



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

MODELAMIENTO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO DEL RAJO
ANDACOLLO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

DANIELA CID ESCOBAR

PROFESOR GUÍA:

DOLORINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MARCELO KONG CASTRO

CARLOS PARRAGUEZ DECKER

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2014

RESUMEN

La Compañía Minera Teck Carmen de Andacollo (Teck CDA) está desarrollando actualmente la operación del depósito de Andacollo, Región de Coquimbo. Con el objetivo de entregar información básica para definir los aspectos de diseño geotécnico del futuro rajo se realizó la caracterización hidrogeológica del sector.

El modelo conceptual elaborado prevé la existencia de un acuífero en profundidad, confinado y compartimentalizado, alimentado fundamentalmente por las principales estructuras, las cuales infiltran agua proveniente del depósito de relaves ubicado aguas arriba.

El presente trabajo tiene como objetivo la construcción de un modelo hidrogeológico numérico de la zona del rajo, el cual permita realizar simulaciones de escenarios a futuro que consideren la instalación de nuevos pozos.

La metodología básica contempla las etapas de construcción, calibración y simulaciones predictivas para el modelo. Durante el desarrollo de la presente memoria se construyó una herramienta numérica capaz de representar las características del medio estudiado, con un error para la zona de interés de 12.5%.

El modelo numérico elaborado funciona de acorde al modelo conceptual y a los parámetros medidos en terreno y, confirma la estructura y circulación del flujo conceptualizado para el acuífero del área. Éste es efectivamente compartimentalizado presentando zonas de alta conductividad hidráulica asociada a las estructuras que juegan un papel relevante en la circulación hídrica subterránea del área de estudio.

Mediante la simulación de escenarios predictivos se configuraron dos hipótesis de trabajo, el primero sin bombeo y el segundo con bombeo mediante un pozo ubicado en el fondo del rajo.

Se recomienda la realización de un mayor número de simulaciones con pozos ubicados en distintos lugares para conocer mejor la respuesta del medio a las variaciones en el tiempo. Para que los bombeos sean efectivos se recomienda que se construyan en las zonas de daño asociadas a las estructuras de alta permeabilidad que permitan el drenaje de la zona.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	2
Tabla de Contenido	3
Índice de Tablas	7
Índice de Figuras	8
Capítulo 1 Antecedentes Generales	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos y Alcances	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
1.3. Ubicación y accesos.....	4
1.4. Metodología de trabajo.....	5
1.5. Estudios Anteriores	6
1.6. Limitaciones	10
Capítulo 2 Descripción del área de estudio	12
2.1. Clima	12
2.2. Geomorfología	13
2.3. Marco Geológico	14
Formación Arqueros (FA).....	15
Formación Quebrada Marquesa (FQM)	16
Formación Viñita	17
Intrusivo de Tablalalume	17
Pórfido Andacollo	18
Diques 18	
Depósitos aluviales	19
Estructuras	19
2.4. Hidrología	21
Entrada Natural	22
Entrada artificial	24
Almacenamiento de aguas subterráneas	25
Salida Natural.....	25
Salida Artificial.....	26
Balance Final	26

2.5. Red de monitoreo Hidrogeológico	28
Capítulo 3 Modelo Hidrogeológico Conceptual	32
3.1. Litología, alteración y zonación mineral	33
3.2. Definición de Unidades Geotécnicas Básicas (UGB)	34
3.3. Definición de Unidades Hidrogeológicas (UH)	36
Unidad Hidrogeológica UH0:	37
Unidad Hidrogeológica UH1:	37
Unidad Hidrogeológica UH2:	38
Unidad Hidrogeológica UH3:	38
Unidad Hidrogeológica UH4:	38
Unidad Hidrogeológica UH5:	39
Unidad Hidrogeológica UH6:	39
3.4. Análisis de permeabilidad	42
Capítulo 4 Modelo Hidrogeológico Numérico del sector mina.....	47
2.1. Selección del código de modelación	48
Acerca de Feflow 6.1	49
2.2. Construcción del modelo numérico	50
Definición del dominio del modelo	50
Definición de la malla.....	52
Tipo de modelo en relación a la dinámica temporal.....	53
Asignación de propiedades hidráulicas	53
Asignación de condiciones de borde	59
Entradas	59
Salidas.....	61
Definición de condición inicial.....	63
Configuración del problema.....	63
Capítulo 5 Calibración del modelo numérico.....	64
5.1. Metodología	64
5.2. Calibración del modelo en régimen permanente.....	65
Descripción del modelo permanente	65
Resultados de calibración de los niveles de agua en régimen permanente .	65
.....	65
Validación de la calibración en régimen permanente	67
5.3. Calibración del modelo en régimen transitorio	69
Descripción del modelo transitorio.....	69
5.4. Resultados de la calibración	72

Capa 1	73
Capa 2 74	
Capa 3 75	
Capa 4 77	
Capa 5 78	
Capa 6 79	
Capa 7 80	
Capas 8 y 9	81
5.5. Criterios de aceptación.....	82
Análisis Cuantitativo	82
Análisis Cualitativo	86
5.6. Análisis y discusiones para la calibración	87
Zona norte	87
Zona oeste	89
Zona sur 91	
Balance Hídrico.....	95
Capítulo 6 Simulaciones predictivas del modelo numérico	100
6.1. Objetivos	100
6.2. Configuración del modelo numérico predictivo.....	100
Entradas	101
Salidas 101	
Desarrollo del rajo Teck CDA	102
6.3. Análisis e interpretación de las simulaciones predictivas	102
Zona Norte	102
Zona oeste	103
Zona Sur 104	
Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones	107
7.1. Conclusiones.....	107
Etapa de construcción:.....	107
Etapa de Calibración.....	108
Etapa de simulación.....	110
7.2. Recomendaciones.....	111
BIBLIOGRAFIA	112
ANEXOS	115
Anexo A: Distribución unidades hidráulicas en planta.	

Anexo B: Hidrogramas calibración periodo 2005-2013.

Anexo C: Hidrogramas calibración periodo 2013-2019.

Anexo D: Piezometrias predictivas y caudales de salida en rajo.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Superficie estimada para las subcuencas del distrito.	22
Tabla 2.2: Entrada natural por infiltración de precipitaciones	23
Tabla 2.3: Balance de aguas para la zona de estudio.	27
Tabla 2.4: Pozos de medio ambiente ubicados dentro del modelo.....	28
Tabla 2.7: Pozos pertenecientes a la red de drenaje/despresurización mina.	29
Tabla 2.5: Piezómetros con sensor cuerda vibrante (PHCDA).	29
Tabla 2.6: Profundidad de sensores de cuerda vibrante en pozos PHCDA.	30
Tabla 3.1: Resumen definición de Unidades Geotécnicas Básicas. UGB	35
Tabla 3.2: Resumen de parámetros geotécnicos promedio para cada UGB.....	35
Tabla 3.3: Definición de Unidades Hidrogeológicas UH	41
Tabla 3.4: Relación entre las permeabilidades y las Unidades Hidrogeológicas. .	43
Tabla 4.1: Propiedades hidráulicas iniciales para las distintas unidades hidrogeológicas.	54
Tabla 4.2: Detalle para la configuración de pozos de bombeo	62
Tabla 5.1: Cálculo de RMS para modelo permanente.	68
Tabla 5.2: Ubicación de fondo de pozos para cada capa del modelo.....	71
Tabla 5.3: Conductividades Hidráulicas para la segunda capa del modelo.....	73
Tabla 5.4: Conductividades hidráulica para la tercera capa del modelo.....	75
Tabla 5.5: Conductividades Hidráulicas para la cuarta capa del modelo.....	76
Tabla 5.6: Conductividades hidráulicas para la quinta capa del modelo.	77
Tabla 5.7: Conductividades hidráulicas para la sexta capa del modelo.....	78
Tabla 5.8: Conductividades hidráulicas para la séptima capa del modelo.....	79
Tabla 5.9: Conductividades hidráulicas para capas ocho y nueve.	80
Tabla 5.10: Análisis cuantitativo de error para el modelo numérico.....	82
Tabla 5.11: Error cuadrático medio normalizado para la zona de interés.	83
Tabla 5.12: Error cuadrático medio para los pozos de monitoreo presentes en la zona de interés.....	83
Tabla 5.13: Resultados de análisis cualitativo para cada pozo.....	84

Tabla 6.1: Configuración de caudales extraídos para los pozos de bombeo.....	98
Tabla 6.2: Configuración del pozo de bombeo PHB-19.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Imagen Satelital de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. ...	2
Figura 1.2: Mapa de la ubicación general de la zona de estudio.....	4
Figura 2.1: Medidas de precipitación históricas y diarias. .	13
Figura 2.2: Mapa Geológico de la zona de estudio. (López, 2012)	16
Figura 2.3: Estructuras principales en la zona de estudio.	20
Figura 2.4: Foto satelital con la división de las subcuencas.....	21
Figura 2.5: Gráfico de caudales extraídos de manera mensual.	26
Figura 2.6: Ubicación de pozos en la zona de estudio.	31
Figura 3.1: Rango de permeabilidades por Unidad Hidrogeológica.	44
Figura 3.2: Permeabilidad versus Profundidad.....	46
Figura 4.1: Esquema explicativo entre los métodos de diferencias finitas y elementos finitos.	49
Figura 4.2: Subcuencas y dominio del modelo.....	51
Figura 4.3: Grilla en 3D y 2D del modelo hidrogeológico numérico.....	52
Figura 4.4: Distribución de las fallas principales.....	56
Figura 4.5: Distribución de las fallas secundarias.	57
Figura 4.6: Falla Churque.....	58
Figura 4.7: Condiciones de borde de entrada.	60
Figura 4.8: Distribución espacial de los pozos de bombeo.	61
Figura 4.9: Condiciones de borde asociadas al rajo.....	62
Figura 5.1: Piezometría en régimen permanente	66
Figura 5.2: Modelo estacionario 3d para 2005.	67
Figura 5.3: Balance de agua para modelo en régimen estacionario.	69
Figura 5.4: Distribución de los pozos de monitoreo en el modelo 3D.....	71

Figura 5.5: Distribución espacial de conductividad hidráulica para la primera capa del modelo.....	73
Figura 5.6: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la segunda capa del modelo.....	74
Figura 5.7: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la tercera capa del modelo.....	75
Figura 5.8: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la cuarta capa del modelo.....	76
Figura 5.9: Distribución espacial de las conductividades hidráulicas para la quinta capa del modelo.....	77
Figura 5.10: Distribución espacial de las conductividades hidráulicas en la sexta capa del modelo.....	78
Figura 5.11: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la séptima capa del modelo.....	79
Figura 5.12: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la capa 8 (izquierda) y capa 9 (derecha).....	80
Figura 5.13: Pozos ubicados en la zona norte	86
Figura 5.14: Pozos Ubicados en la zona oeste.....	87
Figura 5.15: Pozos ubicados en la zona sur.....	92
Figura 5.16: Balance de aguas para mayo 2013.....	94
Figura 5.17: Piezometría vista en planta para mayo 2013.....	95
Figura 5.18: Piezometría en 3d para mayo 2013.....	96

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

Compañía Minera Teck Carmen de Andacollo (Teck CDA) opera una mina de pórfido cuprífero ubicada en la región de Coquimbo, Chile. Esta posee mineralización de cobre diseminada, controlada por fracturas, dentro de una secuencia de rocas volcánicas traquíticas a andesíticas e intrusiones subvolcánicas. La mineralización está relacionada espacialmente a intrusiones de pórfido de feldespato y una serie de estructuras de falla de origen profundo. (Llaumett et al, 1975). En la Figura 1.1 se presenta una imagen satelital de la zona de estudio del presente proyecto. En la zona oeste se puede observar el tranque de relave, al norte de este se encuentra el rajo y al noroeste se encuentra el pueblo de Andacollo.

La hidrogeología del lugar se encuentra dominada por estructuras, las cuales actúan como zonas preferenciales de flujo de agua en un macizo rocoso caracterizado por bajas permeabilidades. De esta forma el acuífero presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo en profundidad, con conos de abatimiento irregulares y elongados que siguen la dirección de la estructura.

Cuando la explotación de un yacimiento ocurre bajo el nivel freático, se genera un gradiente de presiones que induce el flujo subterráneo hacia el fondo y las paredes de la excavación (Beale, 2007). Un control inapropiado de este fenómeno podría causar problemas operacionales (Vutukuri & Singh, 1995), por ejemplo, la presencia de agua

reduce el factor de seguridad de los taludes de la mina, lo cual se traduce en variaciones en los ángulos de talud de hasta un 30%. El agua, al humedecer el material aumenta los costos en transporte y en explosivos para tronadura, además de impedir la extracción en caso de presentarse afloramientos en el fondo del rajo. (Robles, 1975)

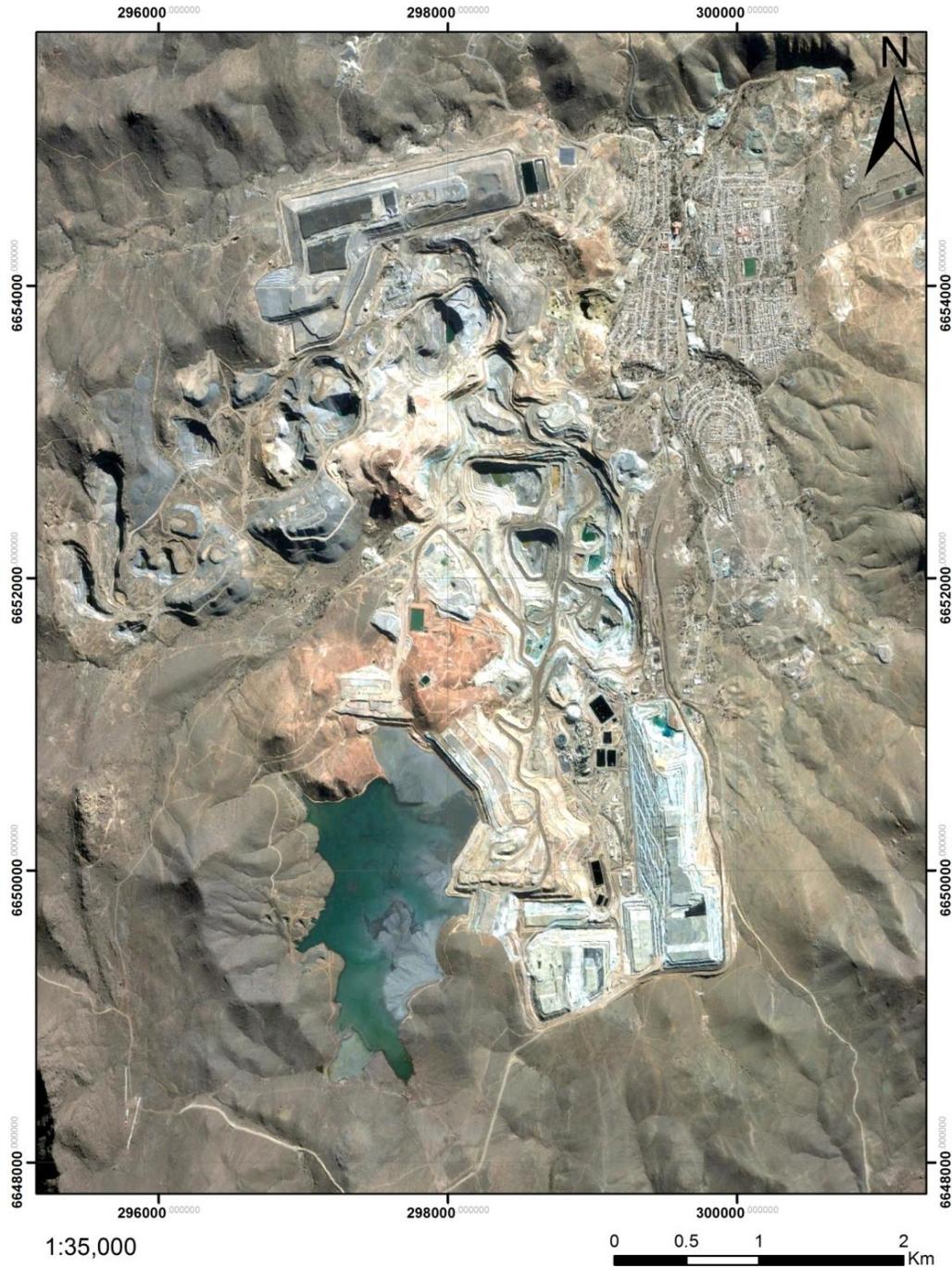


Figura 1.1: Imagen Satelital de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

La distribución de la Compañía Minera Teck CDA es tal que el depósito de relaves y las instalaciones se encuentran aguas arriba del rajo. Esto sumado a la presencia de numerosas fallas, genera flujos preferenciales hacia la zona del rajo que podrían generar consecuencias como las anteriormente descritas.

En los últimos años, Teck CDA ha desarrollado un programa de caracterización hidrogeológica, siendo el trabajo más reciente la actualización del modelo hidrogeológico conceptual del rajo.

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este estudio es la construcción y análisis de un modelo hidrogeológico numérico 3D del rajo y su superficie piezométrica, que represente el drenaje en la mina a través de la simulación de escenarios con y sin bombeo, evaluado de manera trimestral durante el año 2014 y de manera anual hasta el 2019.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización de la geología e hidrogeología del sector, considerando antecedentes históricos y recientes.
- Construcción y calibración del modelo hidrogeológico numérico a través de un software especializado.
- Desarrollo de escenarios con y sin bombeo, con evaluaciones trimestrales para el primer año y anuales hasta 2019.

1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS

La zona de estudio está ubicada en la IV Región de Coquimbo, Provincia de Coquimbo, a 37 km al SE en línea recta de la ciudad de La Serena y a 30 km del Océano Pacífico. Compañía Minera Teck Carmen de Andacollo está ubicada aproximadamente a 350m al SO del pueblo de Andacollo. Sus coordenadas UTM son; 6.652.166 Norte y 298.634 Este, a una cota aproximada de 1.050 msnm y rodeada de cumbres que alcanzan los 1600m. Un mapa de ubicación general se presenta en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Mapa de la ubicación general de la zona de estudio.

El acceso vehicular desde La Serena hacia la zona de estudio se realiza a través de la Ruta 43 hasta el Peñón y posteriormente por la Ruta D-51 hacia el poblado de Andacollo. La ruta tiene un largo de 55km, se presenta pavimentada, en buen estado, pero con curvas bastante sinuosas.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

De manera general, la metodología consistió en un principio en el reconocimiento y la recopilación de toda la información bibliográfica referente a la geología e hidrogeología del sector de estudio. Debido a las características anisótropas generadas por las estructuras en la zona de estudio se decidió que el software más apto para el desarrollo de este modelo sería Feflow 6.1.

Se recolectó información disponible en la literatura acerca de la geología, hidrología, hidrogeología, geomorfología, estratigrafía y topografía de la zona. Se realizaron visitas a las dependencias de Compañía Minera Teck Carmen de Andacollo para el reconocimiento de la zona de estudio, recopilación de información y discusión de objetivos, alcances y metodología de trabajo.

Se solicitó a Teck el modelo de bloque en formato AutoCAD, para ingresar la información referida a la geología e hidrogeología (parámetros hidráulicos), las topografías semestrales en formato DXF desde 2005 hasta 2013, las topografías estimadas de 2014 a 2019 y la información referente tanto a los pozos de bombeo como de monitoreo, es decir, los informes constructivos, registros de niveles medidos y caudales bombeados desde el 2005 hasta la fecha para todos los pozos ubicados en la zona de interés.

Los principales softwares usados en el análisis de los datos e integración al programa fueron: AutoCAD, ArcGis, Google Earth, Excel y Feflow 6.1. Gran parte de la

metodología de este trabajo fue diseñada a partir del documento “Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEA” del Servicio de Evaluación Ambiental y de los manuales disponibles en la página del software FEFLOW. La planificación del estudio fue discutido con la consultora Schlumberger Water Services. Además, se contó con la ayuda de los profesores Linda Daniele y Carlos Parraguez del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Una vez reunida y analizada toda la información necesaria, se generó el contorno del dominio en ArcGis y se importó a Feflow junto con las estructuras y la ubicación de los pozos. Posteriormente se definió el tamaño y orientación de la malla, el nivel de refinamiento y el número de capas, se asignaron las propiedades hidráulicas y las condiciones de borde. Se prepararon los datos transcientes y se generaron las series de tiempo referentes a los pozos de bombeo, las topografías, las precipitaciones y los niveles de los pozos de observación. Después de la implementación del modelo se procedió a la etapa de calibración a través de métodos iterativos, primero bajo régimen permanente y luego transitorio, con los niveles obtenidos del primer modelo como condiciones iniciales, hasta lograr una calibración cuantitativa y cualitativamente aceptable.

Finalmente se configuraron los escenarios predictivos. El primero bajo el supuesto de no agregar pozos de bombeo en la zona y el segundo bajo el supuesto de la construcción de un pozo de coordenadas 6651888N, 298586E (PSAD-56).

1.5. ESTUDIOS ANTERIORES

El distrito de Andacollo, del quechua Cerro de Cobre, ha presentado una explotación activa desde tiempos históricos debido a sus riquezas minerales. Esto ha permitido el desarrollo de numerosos estudios sobre aspectos geológicos e hidrogeológicos de

interés. A continuación se detallan brevemente los estudios hidrogeológicos previos y sus principales conclusiones.

Bruggen, 1949. "Informe Geológico sobre el agua subterránea de Andacollo". Este es de los primeros estudios realizados en la zona acerca de los recursos de agua subterránea en la Cuenca de Andacollo. Tuvo como objetivo principal realizar una prospección de recursos hídricos para aumentar la captación. Concluye que el caudal subterráneo extraído podía aumentar hasta 1.2 l/s.

Thomas, 1951. "Informe sobre el agua subterránea en el distrito Andacollo". En este estudio se llevó a cabo la descripción geológica de la zona de estudio con énfasis en las estructuras. Se evaluó la posibilidad de encontrar agua explotable concluyendo una baja disponibilidad de recursos hídricos para el abastecimiento completo de la población de Andacollo. Se hace hincapié en la dependencia de la recarga del acuífero local a las precipitaciones de la zona.

Dignman y Galli, 1955. "Acerca de la captación de agua en Andacollo, provincia de Coquimbo". Este estudio se realizó para verificar los recursos de agua subterránea para abastecimiento de la población de Andacollo estimados en Thomas, 1951. Se concluye que el sistema bombea tasas mayores a la recarga por precipitación y se propone acumular aguas en embalses ubicados en la parte alta de la cuenca.

Robles, 1975. "Hidrogeología de Andacollo y su aplicación en el drenaje del agua subterránea del yacimiento de cobre porfídico". El objetivo de este estudio es el caracterizar la hidrogeología de Andacollo y evaluar alternativas de drenaje para el agua subterránea que afloraba en la mina. Este ha sido uno de los estudios más completos de la zona, sirviendo de base para estudios posteriores, pues incluye medición de niveles, caudales y calidad de agua.

Como conclusión Robles indica que el agua subterránea de la zona proviene principalmente de la infiltración de las precipitaciones, las que se incorporan a través de fracturas y grietas en el sistema superficial. Presenta la primera piezometría de la zona, la cual se caracteriza por altos equipotenciales en los bordes de la cuenca, estos van disminuyendo hacia la zona de explotación minera de esa época. Se calcularon transmisividades de entre 4 y 32 m²/día, conductividades hidráulicas del orden de 0.04m/día y coeficientes de almacenamiento de entre 0.12% y 0.32%, todos estos datos se obtuvieron a partir del desarrollo de pruebas de bombeo.

SIGA Consultores S.A., 2005. "Proyecto Hipógeno Compañía Minera Carmen de Andacollo Estudio Hidrogeológico, Informe Final". Este estudio presenta una recopilación de los antecedentes del sector y un estudio de impacto ambiental producto del desarrollo del proyecto hipógeno.

A partir del 2008 la consultora Schlumberger Water Services ha realizado una serie de estudios hidrogeológicos en la zona. Entre los que presentan mayor interés para este estudio se encuentran:

"Evaluación diagnóstica de información hidrogeológica rajo abierto y análisis de datos", 2008. Se propone un plan de terreno para aumentar la información hidrogeológica en la zona, este consistía en pozos con sensores de cuerda vibrante, además de la realización de pruebas de Lugeon durante su construcción. La implementación de esta propuesta se realizó el año 2009.

"Supervisión perforación pozos de monitoreo de aguas, CMCA". En este trabajo se construyen 12 pozos de monitoreo tipo Casagrande en la zona mina y sus alrededores para el área de medio ambiente.

“Informe modelo hidrogeológico conceptual y numérico del rajo”, 2010. Se define el modelo hidrogeológico conceptual de la mina, considera 11 unidades hidrogeológicas y una caracterización hidroquímica de la cuenca. Se realizó un modelo numérico bidimensional para determinar las distribuciones de las presiones de poro en las paredes de la mina. El modelo reveló que aun cuando el drenaje natural reduce la presión de poros del talud, existen sectores de la mina donde era necesaria la implementación de un sistema de drenaje/despresurización para reducir las presiones en la base de la pared del rajo.

“Informe programa de exploración y explotación de aguas subterráneas entorno al rajo, proyecto drenaje mina, Etapa I”, 2010. En este trabajo se detallan los resultados obtenidos durante la construcción del sistema de drenaje de la mina (pozos PHM), además de los primeros ensayos de bombeo en las estructuras principales del rajo, confirmando su comportamiento como canales preferenciales para el flujo de agua subterránea.

“Informe constructivo de piezómetros cuerda vibrante y pruebas hidráulicas para el rajo”, 2012. Se habilitaron 6 piezómetros de cuerda vibrante (pozos PHCDA). Se realizaron pruebas de Packer en las unidades más profundas, las cuales no habían sido caracterizadas. Estos ensayos revelaron una permeabilidad muy baja en profundidad, modificada sólo por sectores acotados asociados a estructuras.

“Informe programa de exploración y explotación de aguas subterráneas entorno al rajo, proyecto drenaje mina, Etapa II”, 2012. Este informe detalla la campaña de perforación en la que se construyeron seis pozos de bombeo y dos piezómetros de control abierto (pozos PHM). Las pruebas hidráulicas permitieron evaluar de mejor manera el funcionamiento del sistema de bombeo de la mina en su totalidad, además de entregar nuevos datos sobre la distribución en profundidad de los principales aportes de agua.

El último estudio realizado, “Actualización de modelo hidrogeológico conceptual del rajo” servirá como base para este estudio, en él se entrega información relevante como el análisis de niveles piezométricos y de flujos, la actualización de las unidades hidrogeológicas, análisis de permeabilidades para cada UH obtenida a partir de las pruebas realizadas durante la construcción de los pozos PHM, PHCDA y de medio ambiente.

1.6. LIMITACIONES

Las principales limitaciones que se han presentado en el desarrollo de este estudio fueron la falta de información en los sectores más alejados al rajo, baja resolución en la distribución espacial de las propiedades hidráulicas, errores en la información topográfica y tiempo necesario para construir y calibrar el modelo.

- Falta de información en los sectores más alejados del rajo: Las zonas externas a las dependencias de Teck CDA no cuentan con información de uso público. Para la zona noroeste del modelo, donde se ubica la mina Dayton, no se cuenta con datos acerca de posibles pozos, caudales de extracción o de la variación de la topografía en el tiempo.
- Baja resolución en la distribución espacial de las propiedades hidráulicas: La distribución espacial de las UGB y UH fue obtenida en plantas cada 5m, sin embargo, numéricamente no es viable generar un modelo con un gran número de capas. Finalmente se generaron ocho capas de 50m y una de 30m, generalizando la distribución espacial y reduciendo la resolución para el modelo numérico.
- Errores en la información topográfica de 2005 a 2019: La información referente a la topografía obtenida a través de la Compañía Minera Teck CDA

presentaba errores e incongruencias para algunos sectores y años específicos. Estas diferencias generaron una serie de problemas relacionados a la convergencia del modelo. Finalmente se realizo una comparación entre cada una de las topografías y se redujeron las condiciones de borde al sector del rajo.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. CLIMA

El distrito de Andacollo pertenece al dominio de “clima de estepa templada marginal” que marca la transición entre el clima desértico del norte y el mediterráneo del sur. (Antonioletti et al, 1972)

Características como la baja humedad atmosférica, limpidez del aire, alta amplitud térmica y ligero aumento en cantidad de precipitaciones con respecto a la costa a igual latitud permite considerar al distrito como parte de la zona de clima semiárido interior con leves influencias del clima semiárido litoral. (SIGA, 2005).

El Norte Chico Chileno corresponde a una zona de altas presiones atmosféricas en las que predominan los vientos en dirección SO. Las precipitaciones son relativamente bajas, con altas tasas de evaporación. La Figura 2.1 presenta las mediciones obtenidas en la estación pluviométrica Tenencia Andacollo. El primer gráfico muestra las precipitaciones anuales entre 1963 y 2012, el promedio anual alcanza los 143 mm/año. El segundo gráfico muestra las medidas diarias para las precipitaciones entre los años 2010 y 2012, en el es posible observar como las precipitaciones se concentran en eventos cortos de alta precipitación.

La mayoría de las precipitaciones ocurren durante los meses de invierno, específicamente entre mayo y agosto (con más del 85%). En cambio, el período entre noviembre a marzo sólo registra menos del 5% de la precipitación. (SIGA, 2005)

Las precipitaciones presentan una doble irregularidad en el tiempo anual e interanual. Los meses que van de mayo a agosto reciben alrededor del 85% de las precipitaciones, mientras que los meses de noviembre a marzo solo reciben el 3% del total. (SIGA, 2005)

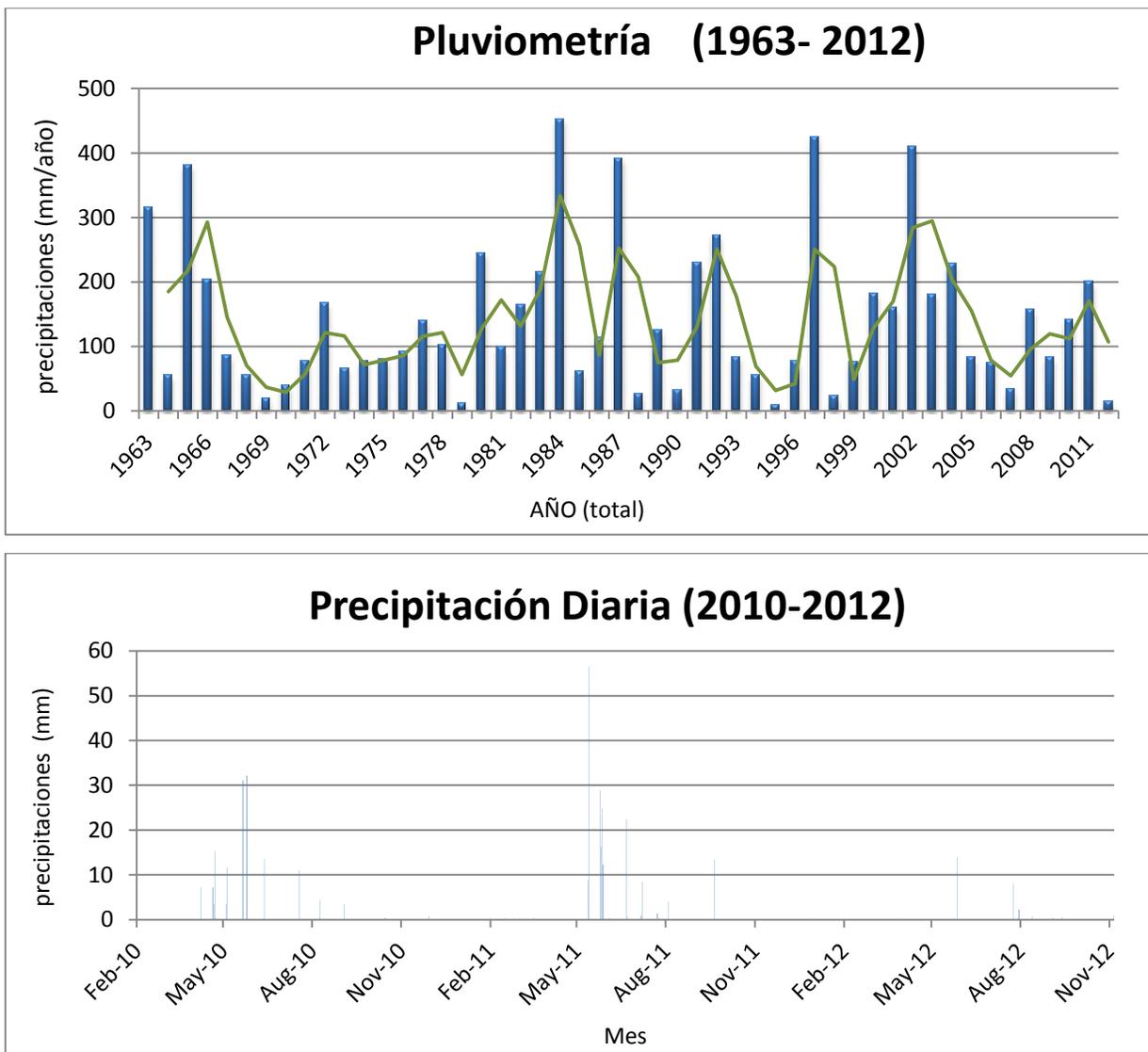


Figura 2.1: Medidas de precipitación históricas y diarias. .

2.2. GEOMORFOLOGÍA

El distrito de Andacollo, ubicado en el Norte Chico de Chile, al oriente de la cordillera de la costa en la IV Región de Coquimbo, forma parte de una pequeña cuenca tributaria de la hoya hidrográfica del río Elqui, que se sitúa en el interfluvio de los ríos Elqui - Hurtado y está limitada por una serie de cimas de altura superior a 1000m. (SIGA, 2005).

El principal agente modelador de relieve son las escasas precipitaciones existentes en la zona. El fracturamiento de la rocas, acidez del terreno y escasa vegetación permiten la ocurrencia de corrientes de barro (Robles, 1975).

En la zona de estudio es posible distinguir el Pediplano Andacollo, ligeramente circular con cotas que van desde los 965 hasta los 1050 msnm, rellenado por depósitos de gravas de hasta 30 m de potencia, conformando el Llano de Andacollo. Este llano se encuentra interrumpido por cerros que alcanzan los 1.200 msnm. (SIGA, 2005)

La zona de estudio ha sido explotada desde épocas prehispánicas debido a su riqueza mineral. Gracias a esto la cuenca presenta muchas zonas con remoción de material y una diversidad de piques mineros en profundidad.

Las quebradas son suaves, de baja pendiente, con depósitos aluviales de baja magnitud. El drenaje de la hoya hidrográfica es de tipo detrítico, convergente hacia la quebrada Andacollo y formada por numerosas quebradas afluentes, las que se encuentran secas la mayor parte del año. El escurrimiento encausado es de régimen temporal o esporádico y se manifiesta sólo en períodos de lluvias. (SIGA, 2005)

2.3. MARCO GEOLÓGICO

La geología del distrito de Andacollo ha sido estudiada en múltiples oportunidades. La zona es conocida desde tiempos prehispánicos debido a su riqueza mineral, principalmente a la explotación de placeres de oro. Durante los años 70 se

desarrollaron numerosos estudios encabezados por la Empresa Nacional de Minería bajo el nombre de Proyecto Andacollo. Ya para esa fecha se contaban con más de 15.000 m de perforación prospectiva y 20.000 m de mapeo geológico subterráneo. La información acerca de estos estudios se presenta en trabajos como “Estado actual del estudio Geológico y Evaluación del yacimiento cuprífero Andacollo” (Llaumett et al, 1973), “Geología de la Hoja Ovalle” (Thomas, 1967), entre otros. En el presente capítulo se exponen las principales características geológicas de la zona de estudio.

La cuenca de Andacollo, ubicada en la cordillera de la costa de la Provincia de Coquimbo, presenta una potente secuencia mesozoica de rocas sedimentarias y volcánicas dispuestas en orientación N-S y formando un sinclorium perteneciente al “geosinclinal andino”. Este último presenta un flanco oriental alzado y un flanco occidental hundido. Por otro lado el sinclorium es atravesado por una serie de fallas mayores de rumbo NS. (Thomas, 1967)

La secuencia volcano-sedimentaria se presenta intruída por cuerpos batolíticos y stocks graníticos del Cretácico Superior. La Figura 2.2 presenta la geología a nivel regional de la zona de estudio, en un mapa a escala 1:65.000. A continuación se detallan las principales formaciones presentes.

FORMACIÓN ARQUEROS (FA)

Esta formación se caracteriza por una secuencia de rocas sedimentarias marinas con intercalaciones volcánicas constituidas por andesitas porfídicas, calizas marinas, areniscas continentales y calcáreas con una gradación que va desde sedimentos marinos en el norte a sedimentos continentales en el sur. (Aguirre y Egert, 1962)

Pertenece a la edad Hauteviriano-Barremiano, definido según las relaciones estratigráficas. La base de esta formación corresponde al banco de caliza de Huachalalume (Hauteriviano y Barremiano), mientras que en el techo se encuentra la Formación Quebrada Marquesa. (SIGA, 2005).

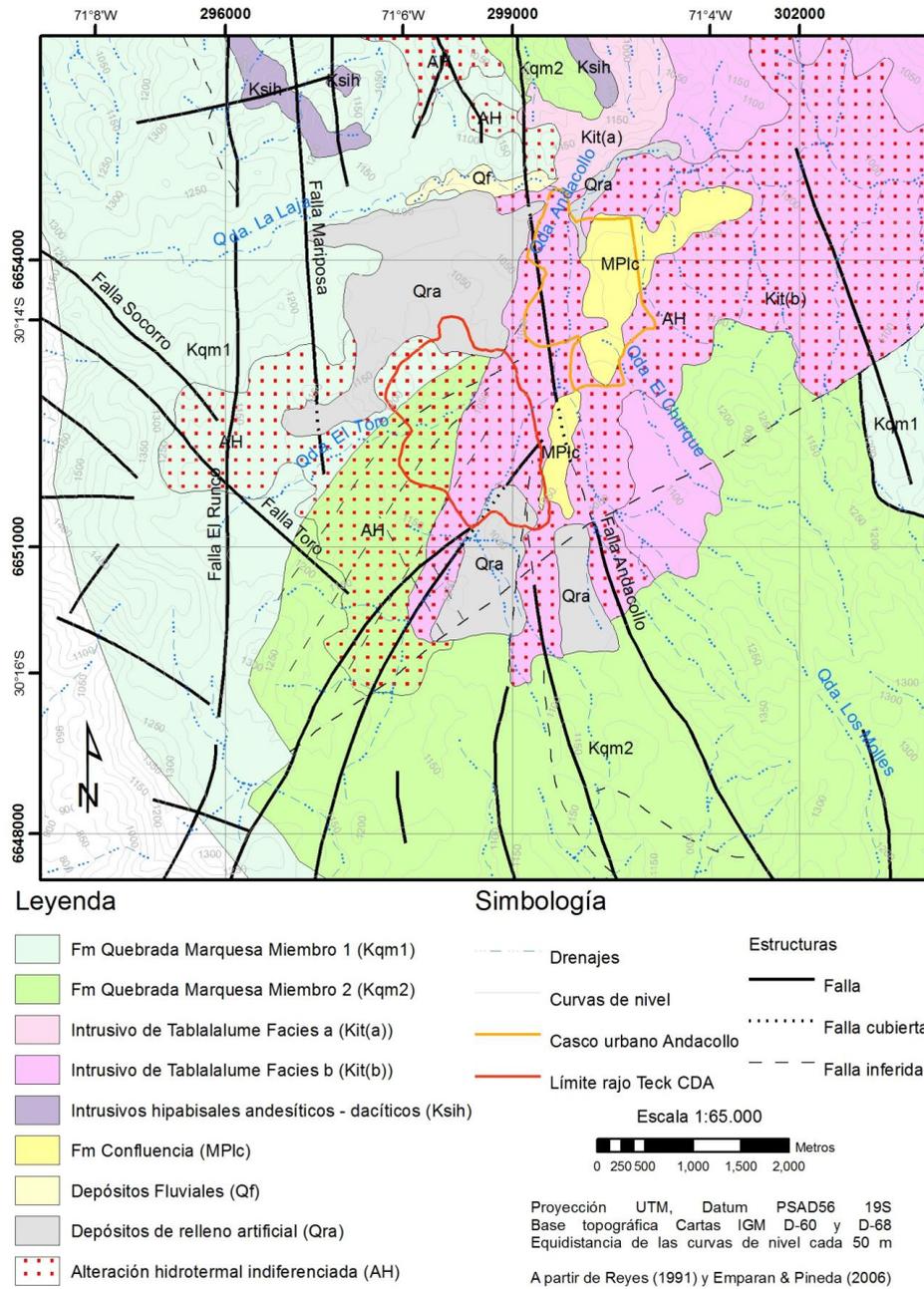


Figura 2.2: Mapa Geológico de la zona de estudio. (López, 2012)

FORMACIÓN QUEBRADA MARQUESA (FQM)

Esta formación, de edad Aptiano-Albiano y dominante en la zona de estudio, sobryace de manera concordante a la Formación Arqueros (FA) y está limitada hacia el oriente, de manera discordante por la Formación Viñita (FV).

La Formación Quebrada Marquesa está representada en la zona de estudio por andesitas, lavas brechosas y brechas con intercalaciones menores de traquitas, ignimbritas y brechas sedimentarias. La serie conforma un monoclinal de rumbo N-S y manteo que varía entre 15° y 45°E (Thomas, 1967). Es definida también como una secuencia continental compuesta por conglomerados, brechas, lavas y una base formada por areniscas marinas (Aguirre y Egert, 1962).

La estratigrafía, litología y edad de la Formación Marquesa permite correlacionarla con la Formación Colimapu, presentes en Chile central. (SIGA, 2005)

FORMACIÓN VIÑETA

Formación de origen volcánico continental constituida por conglomerados, areniscas volcánicas, lavas y tobas ignimbriticas traquíticas y riolíticas, lavas y brechas andesíticas y basaltos. Sobreyace a la Formación Quebrada Marquesa y subyace a la Formación Los Elquinos. Se encuentra intruída por granodioritas, monzogranitos y tonalitas cenozoicas. Su espesor varía entre 1.500 y 1.800 m.

La Formación Viñeta no alcanza a estar presente en la zona de estudio, aflorando aproximadamente 15 km al Este de Andacollo.

INTRUSIVO DE TABLALALUME

El Intrusivo de Tablalalume intruyó la secuencia volcano sedimentaria produciendo metamorfismo de contacto. El intrusivo está constituido por tonalitas y dioritas. La edad mínima está definida como Cretácico Superior o aún Terciario Inferior. (Thomas, 1967).

Las tonalitas corresponden a rocas de textura hipidiomorfa granular con 70% de plagioclasas, albita turbia levemente alterada a sericita, menos de 5% de ortoclasa, 10% de cuarzo anhedral, anfíbola tipo hornblenda y biotita alterada a clorita y epidota. Por su parte, la diorita presenta textura alotriomorfa granular formada principalmente por plagioclasas alteradas a sericita y epidota, cuarzo y anfíbol escasa.

El contacto entre el intrusivo y la secuencia volcánica sedimentaria se caracteriza por la presencia de rocas córneas de color oscuro, indicando procesos metamórficos de fuerte silicificación y texturas de recristalización. (Robles, 1975)

PÓRFIDO ANDACOLLO

Este pórfido tonalítico de cuarzo y biotita está formado por pequeñas cúpulas, apófisis, filones y cuerpos irregulares. Corresponden a roca de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y cuarzo anhedrales y biotita alterada a clorita. La masa fundamental tiene textura alotriomorfa granular a hipidiomorfa granular y está constituida por cuarzo, biotita, feldespato potásico, plagioclasa tipo andesina, clorita y minerales opacos. Todo el pórfido presenta mineralización de sulfuros como pirita, calcopirita y molibdenita. (Robles, 1975)

El Pórfido Andacollo produjo un área de alteración hidrotermal, en donde se concentraría la mineralización cuprífera, formada por:

- Alteración biotítica interna.
- Alteración cuarzo-sericita bordeando a la anterior.
- Alteración propilítica con distribución periférica.

DIQUES

Existen dos tipos de diques que intruyen las rocas estratificadas en la zona de estudio. Corresponden a diques andesíticos porfíricos a ocoíticos y diques pórfido diorítico a pórfido tonalítico similar al Pórfido Andacollo.

Corresponden a filones de potencias entre 3 a 50 m con un estricto alineamiento estructural de rumbo dominante NNW, sus longitudes varían desde algunas decenas de metros a más de 4 km. (Robles, 1975)

DEPÓSITOS ALUVIALES

Los depósitos aluviales provienen de la erosión de las rocas presentes en la cuenca, principalmente de las andesitas e intrusivos descritos anteriormente, que se depositaron en el pediplano posiblemente durante el pleistoceno.

Las gravas son de tamaño heterogéneo, angulosas a sub-angulosas, se disgregan fácilmente y poseen un espesor variable que llega a los 30 m. Están compuestas principalmente por cuarzo sericita, andesita y pórfidos. La matriz corresponde a una transición entre arcosa gruesa y conglomerado fino, menor a 5 mm. El cemento es arcilloso, color marrón oscuro a rojo y no supera el 10% de la muestra. (Robles, 1973).

ESTRUCTURAS

A nivel regional existen dos grandes dominios estructurales en el área de Andacollo (Figura 2.2). El primero corresponde a un sistema de orientación norte-sur formado por el Sistema de Falla Romeral. El segundo sistema está formado por fallas de orientación noreste-suroeste. (Emparan & Pineda, 2006)

A nivel local, la zona de estudio está disectada por numerosas fallas, en esta sección se detallan las estructuras principales que están presentes en el área del rajo y las instalaciones de Teck CDA, la Figura 2.3 presenta las estructuras principales sobre la imagen satelital de la zona.

Se observan sets de fallas con rumbo norte sur correspondiente a la Falla Andacollo, Falla La Hermosa y Falla Central. Estas dos primeras sirven como barreras hidráulicas para los flujos perpendiculares a ellas y como conducto preferencial en su dirección de rumbo.

En profundidades cercanas a los 90m la Falla Andacollo y La Hermosa presentan confinamiento evidenciado por un sondeo geotécnico artesiano y afloramientos en el fondo de rajo, respectivamente. Análisis isotópicos a muestras obtenidas en estos dos puntos señalan aguas de carácter regional provenientes de alta cordillera (SWS, Memorando Estructuras, 2013).

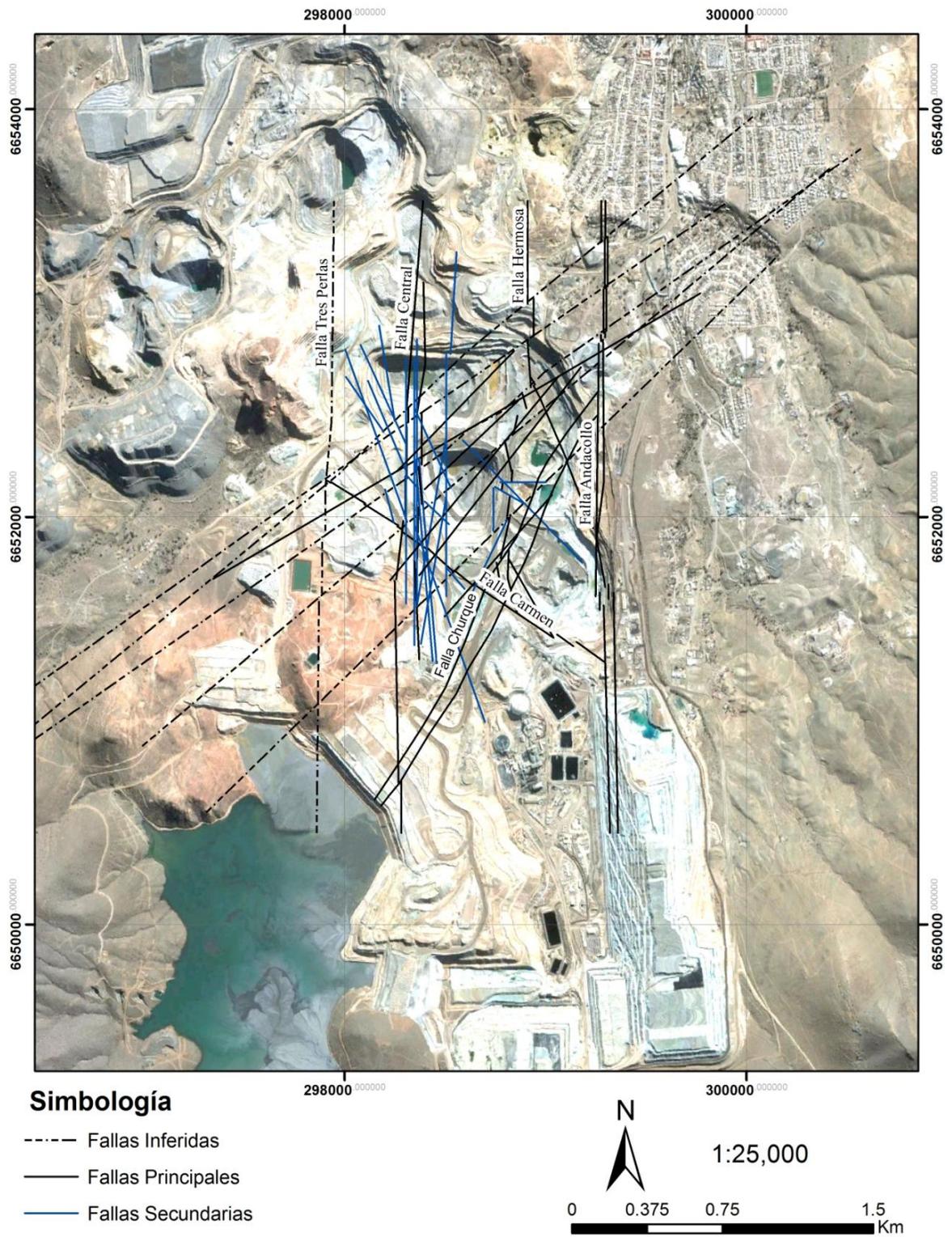


Figura 2.3: Estructuras principales en la zona de estudio.

2.4. HIDROLOGÍA

La Cuenca de Andacollo tiene una superficie estimada de 46,82 km², debido a las alteraciones antropogénicas esta ha sido subdividida en diez subcuencas, tomando en consideración grandes estructuras como los rajos y la laguna de depósito de relaves.

Cada subcuenca presenta un aporte particular de la quebrada mayor que la constituye, en general las direcciones de flujo se generan hacia el rajo de Teck CDA y hacia el pueblo de Andacollo. Esta información se muestra en la Figura 2.4.

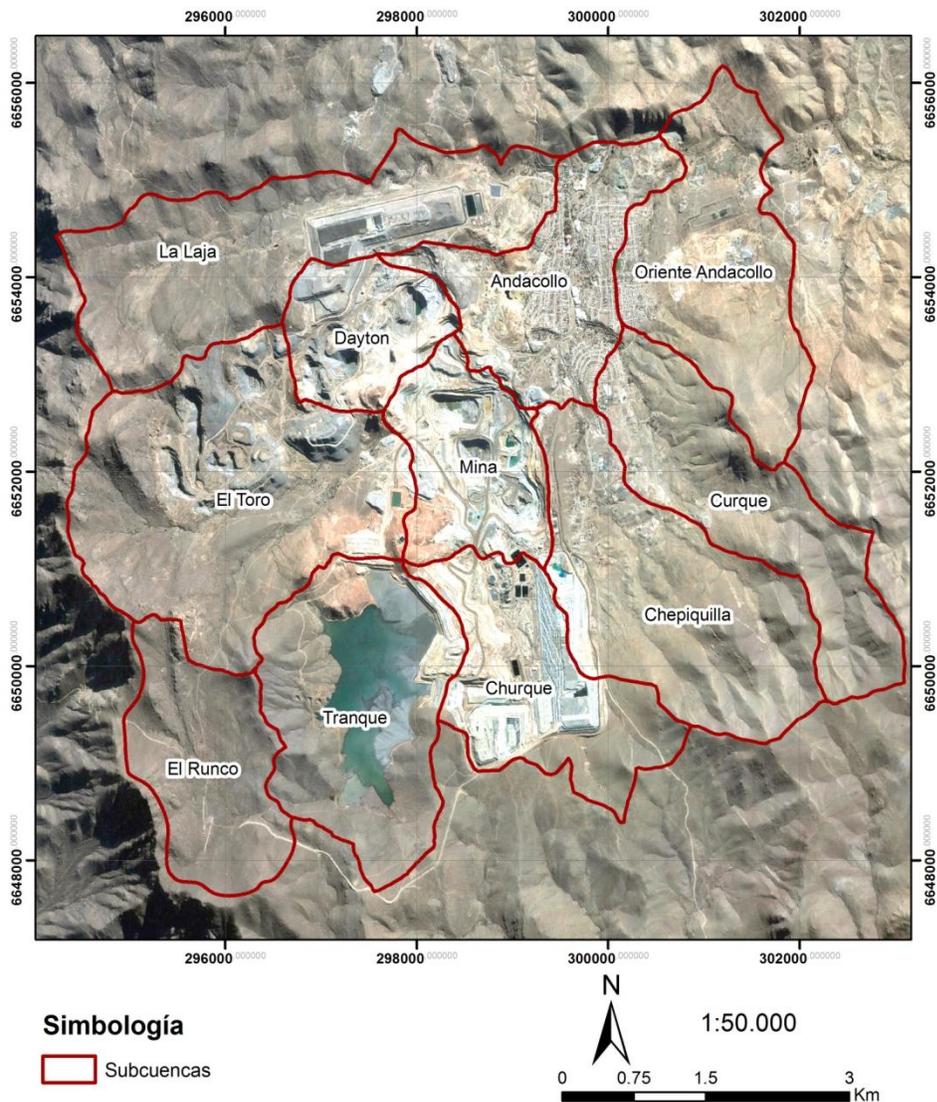


Figura 2.4: Foto satelital con la división de las subcuencas.

La Tabla 2.1 muestra el detalle de las áreas para cada subcuenca. Estas mediciones consideran la superficie estimada sobre la proyección de un plano horizontal.

N°	Subcuenca	Superficie (km²)
1	La Laja	6.3
2	Andacollo	3.74
3	Oriente Andacollo	4.69
4	El Toro	7.96
5	Dayton	2.17
6	Mina	2.82
7	Chepiquilla	5.74
8	Curque	4.36
9	Churque Depósito de Relaves	5.23
10	Churque Planta de Procesamiento	3.82
Total distrito		46.82

Tabla 2.1: Superficie estimada para las subcuencas del distrito.

La división realizada por Teck ha considerado la divisoria topográfica, la cual a su vez ha sido correlacionada a la divisoria de aguas subterráneas a partir de registros distritales de nivel freático, con el apoyo de imágenes satelitales y topografía de detalle.

ENTRADA NATURAL

Según los datos entregados por Compañía Minera Teck CDA la evaporación anual es significativamente mayor que el promedio anual de precipitaciones, 1233.2 mm/año y 141.6 mm/año respectivamente.

Se estima que durante los períodos de precipitación la mayor parte del volumen de agua se evapora, alcanzando un 75% del total, con un 15% distribuido como escorrentía superficial y sólo el 10% restante constituyendo infiltración eficaz hacia el acuífero.

En ciertas áreas, como el rajo, debido al alto fracturamiento en zonas de tronadura, la infiltración podría alcanzar un 15%. Por otro lado, en las zonas donde se establecen instalaciones mineras, como pilas de lixiviación y relaves antiguos, la tasa de infiltración disminuye a cerca de un 5%, como consecuencia de la mayor evaporación en materiales de granulometría fina.

La Tabla 2.2 describe la estimación de la entrada natural por infiltración del acuífero del distrito. En ella se han dividido los aportes potenciales de las diferentes subcuencas en dirección hacia el rajo y hacia la salida de la cuenca, en el sector de Los Negritos al noreste de la cuenca.

La Tabla 2.2 muestra como la mayor parte de las infiltraciones en la cuenca se dirigen hacia la zona del rajo, alcanzando los 13.54 l/s. Cabe destacar que esta estimación no considera las conexiones hidráulicas existentes a nivel subterráneo de la cuenca de Andacollo con cuencas vecinas a través de estructuras geológicas regionales. Además, se ha excluido de la subcuenca el área de la laguna de depósitos de relaves, cuya infiltración será calculada en la sección de entradas artificiales.

N°	Subcuenca	Aporta a (%)		Caudal entrada por infiltración (l/s)		
		Rajo	Los Negritos	Rajo	Los Negritos	Total
1	La Laja	0	100	0.00	2.73	2.73
2	Andacollo	30	70	0.49	1.14	1.63
3	Oriente Andacollo	0	100	0.00	2.10	2.10
4	El Toro	100	0	3.90	0.00	3.90
5	Dayton	100	0	1.23	0.00	1.23
6	Mina	100	0	1.81	0.00	1.81
7	Chepiquilla	30	70	0.74	1.73	2.47
8	Curque	0	100	0.00	1.95	1.95
9	Churque DR	100	0	2.77	0.00	2.77
10	Churque PP	100	0	2.59	0.00	2.59
Total (l/s)				13.54	9.65	23.19

Tabla 2.2: Entrada natural por infiltración de precipitaciones

ENTRADA ARTIFICIAL

La entrada artificial de la zona está compuesta principalmente por aquella proveniente desde el pueblo de Andacollo, de las operaciones mineras realizadas por mineras de pequeña y mediana escala como Minera Dayton y La Coipa y las actividades realizadas por Teck CDA.

Las tasas de entrada artificial aportadas por el poblado y otras actividades mineras son muy difíciles de estimar debido a falta de información, esta no es de uso público o no está disponible. A partir de registros hidroquímicos de pozos de control distrital se estima que las entradas serían de carácter temporal y estarían relacionadas con operaciones mineras pequeñas (Higueras et al, 2004)

De las actividades mineras realizadas por Teck CDA, las principales entradas están asociadas a las potenciales infiltraciones que se producen desde el depósito de relaves, el cual se encuentra aguas arriba de las instalaciones y el rajo. Es importante señalar que el análisis de la entrada producto de la infiltración desde la laguna se encuentra en etapa preliminar.

La laguna del depósito de relaves se encuentra sobre un área cubierta por lamas, las cuales presentan una permeabilidad cercana a $1E-07$ m/s. Para el cálculo de infiltración se asumió que el agua se mueve verticalmente hacia el nivel freático. Así, el flujo de agua queda definido por la ecuación de Darcy, tal como se indica en la siguiente expresión:

$$Q=A*G*K$$

Donde,

Q= Flujo de agua entre laguna y acuífero natural.

A= Área de infiltración efectiva en el depósito.

G= Gradiente Hidráulico.

K= Conductividad hidráulica de las lamas.

Considerando el gradiente igual a 1 y un área de 728,602 m² se obtiene un caudal de 72.9 l/s. De acuerdo a los antecedentes de Teck CDA como paleo-topografía, geología estructural y piezometría del sector, el flujo se dirige hacia el rajo, donde es capturado por las obras de drenaje constituidas por pozos de bombeo y piscinas colectoras.

ALMACENAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

A nivel distrital se conocen dos unidades hidrogeológicas principales. La primera está relacionada a depósitos sedimentarios aluviales y coluviales que se presentan rellenando los principales cauces fluviales actuales, y que también incorpora la zona de meteorización que se establece en los primeros metros del basamento rocoso. Constituyen las zonas de mayor permeabilidad y porosidad del distrito, definiendo el acuífero libre del sector. Se estima que presentan una porosidad efectiva cercana al 10%.

La segunda unidad se define como un acuitardo y corresponde a las unidades compuestas por el basamento volcánico e intrusivo del distrito. En estas unidades el almacenamiento de agua subterránea se asocia a zonas fracturadas con fuertes alteraciones que le imponen una mayor porosidad al macizo rocoso. El detalle de la clasificación de unidades hidrogeológicas se presenta en el Capítulo 3 referente al modelo conceptual del rajo.

SALIDA NATURAL

La salida natural de la cuenca tiene lugar en el sector noreste, en la subcuenca Oriente Andacollo. A partir de la condición de flujo estimada por Robles en 1975, el gasto subterráneo sería aproximadamente de 0.2 l/min por metro lineal de sección de salida. A través de un análisis topográfico del sector se define una sección de salida de 2 km ubicada bajo la cota 1100 msnm., calculándose una salida natural de 6 l/s. (SIGA, 2005)

SALIDA ARTIFICIAL

Las salidas artificiales del acuífero se componen por las producidas a partir de las norias para riego cultivable y actividad de pequeña minería. Según datos obtenidos por Teck CDA a partir de la Subdere, Municipalidad de Andacollo y la comunicación oral con los agricultores, la zona cuenta con un total de setenta norias, estableciéndose una salida por bombeo mínima de 4.38 l/s por consumo en agricultura. No se cuenta con registros que permitan establecer caudales de salida para actividades mineras.

La mayor salida artificial está relacionada al bombeo de agua al interior de las instalaciones de Teck CDA, donde se consideran tanto los afloramientos en las distintas fases de explotación del rajo como los caudales extraídos a partir del sistema de drenaje y despresurización de la mina (Figura 2.4).

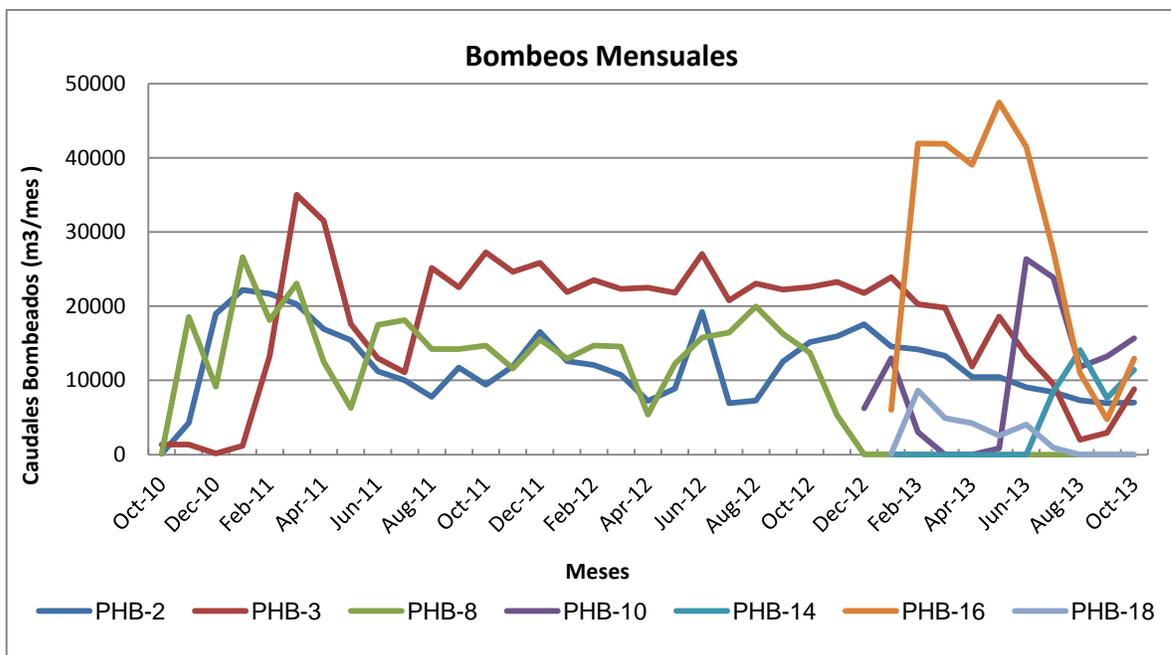


Figura 2.5: Gráfico de caudales extraídos de manera mensual.

BALANCE FINAL

Considerando las salidas y entradas tanto artificiales como naturales, se calcula un balance de agua de 18 litros. Este caudal disponible debería estar siendo consumido por otras operaciones menores que no han sido consideradas, donde se incluirían los

caudales de infiltración a los otros rajos del distrito (Dayton), las operaciones mineras menores y otro consumos agrícolas no declarados. Así mismo se debe tener en cuenta que gran parte de las aguas provenientes desde el sector sur Churque corresponden a volúmenes almacenados, los cuales aumentan las presiones de poros cercanas al rajo y son descargados por bombeos artificiales o, en el futuro, por la profundización del rajo.

A modo global, es necesario señalar que este valor corresponde a una aproximación preliminar debido a las incertidumbres en varios de los componentes estimados en el cálculo, como por ejemplo la permeabilidad del depósito de relaves, la variabilidad en los caudales extraídos desde los pozos de bombeo de la mina, entre otros. El balance de agua se presenta en la Tabla 2.3.

Tipo de Entrada / Salida		Caudal (l/s)
Entrada Natural Precipitación (Rn)	La Laja	2.73
	Andacollo	1.62
	Oriente Andacollo	2.1
	El Toro	3.9
	Dayton	1.23
	Mina	1.81
	Chepiquilla	2.47
	Curque	1.95
	Churque DR (depósito de relaves)	2.77
	Churque PP (planta de procesamiento)	2.59
Entrada Artificial (Ra)	Infiltración Depósito de Relaves	72
Salida Natural (Dn)	Flujo natural de la cuenca	6
Salida Artificial (Da)	Artificial (norias agricultura)	4.4
	Sistema drenaje/despresurización	46
	Afloramientos Mina	20
Balance de agua (Rn+Ra) - (Dn+Da)		18

Tabla 2.3: Balance de aguas para la zona de estudio.

2.5. RED DE MONITOREO HIDROGEOLÓGICO

Compañía Minera Teck Carmen de Andacollo posee una red de monitoreo de niveles freáticos dentro del rajo y sus alrededores. A la fecha esta red está constituida por once pozos equipados con sensores de cuerda vibrante (PHCDA), cinco norias (STN), tres pozos inclinómetros (P-INCLI) y 29 piezómetros Casagrande (PHM, PSTCN) de los cuales seis están habilitados como pozos de bombeo (PHM-3, PHM-8, PHM-10, PHM-14, PHM-16 y PHM-18). Para este estudio sólo serán considerados aquellos pozos que forman parte del dominio, definido en el Capítulo 5.

La Tabla 2.4 presenta los pozos de medio ambiente, con sus respectivas coordenadas, cota de pozo, profundidad y fecha de habilitación.

Nombre de Pozo	Coordenadas PSAD 56		Cota Pozo (msnm)	Profundidad fondo de pozo (msnm)	Fecha de habilitación
	Norte	Este			
PZ-4	298495	6651090	1048.9	1002.5	26-07-09
PZ-5	297518	6651430	1105.0	1054.9	06-08-09
PSTCN-3	297461	6652070	1062.7	1032.1	05-08-09
PSTCN-8B	298511	6651051	1045.1	1014.6	03-08-09
PSTCN-5B	298533	6651050	1046.2	1040.0	Desconocida
STN-7	296712	6651946	1081.6	1075.3	Desconocida
STN-9	298787	6653777	1028.6	1018.9	Desconocida
P-Incli	299257.3	6651265	1061.8	941.3.0	15-06-12

Tabla 2.4: Pozos de medio ambiente ubicados dentro del modelo.

La Tabla 2.7 presenta los pozos del plan de drenaje/despresurización del rajo, sus respectivas coordenadas, la cota del pozo, profundidad de fondo de pozo y fecha de habilitación. Los pozos PHB son pozos de bombeo mientras que los PHM corresponden a pozos de monitoreo.

Nombre de Pozo	Coordenadas PSAD 56		Cota de Pozos (msnm)	Profundidad fondo de pozo (msnm)	Fecha de Habilitación
	Norte	Este			
PHM-01	6651520	298847	1020.8	860.8	16-06-10
PHM-04	6651140	298565	1048.3	938.3	28-07-10
PHM-05	6651970	297743	1069.3	959.3	16-07-10
PHM-06	6652050	297791	1072.1	892.1	20-07-10
PHM-07	6652310	298025	1040.3	860.3	23-07-10
PHM-09	6651260	299240	1061.0	911.0	18-05-12
PHM-11	6652160	298253	1041.9	801.9	06-11-11
PHM-12P	6650930	298565	1056.9	937.9	06-11-11
PHM-15	6651490	298646	1017.9	717.9	06-11-11
PHB-02	6651490	298869	1021.1	861.1	12-06-10
PHB-03	6651120	298581	1048.7	908.7	12-07-10
PHB-08	6651390	298610	1025.5	845.5	30-07-10
PHB-10	6650970	298513	1048.9	808.9	06-11-11
PHB-14	6650990	298576	1052.2	752.2	06-11-11
PHB-16	6651090	298517	1048.3	828.3	15-06-12
PHB-18	6651300	298946	1043.9	823.9	15-06-12

Tabla 2.5: Pozos pertenecientes a la red de drenaje/despresurización mina.

La Tabla 2.5 presenta los pozos de cuerda vibrante, sus coordenadas, la cota de pozo, profundidad de pozo y fecha de instalación de los sensores. La Tabla 2.6 muestra la profundidad a la que fue instalado cada sensor en cada pozo.

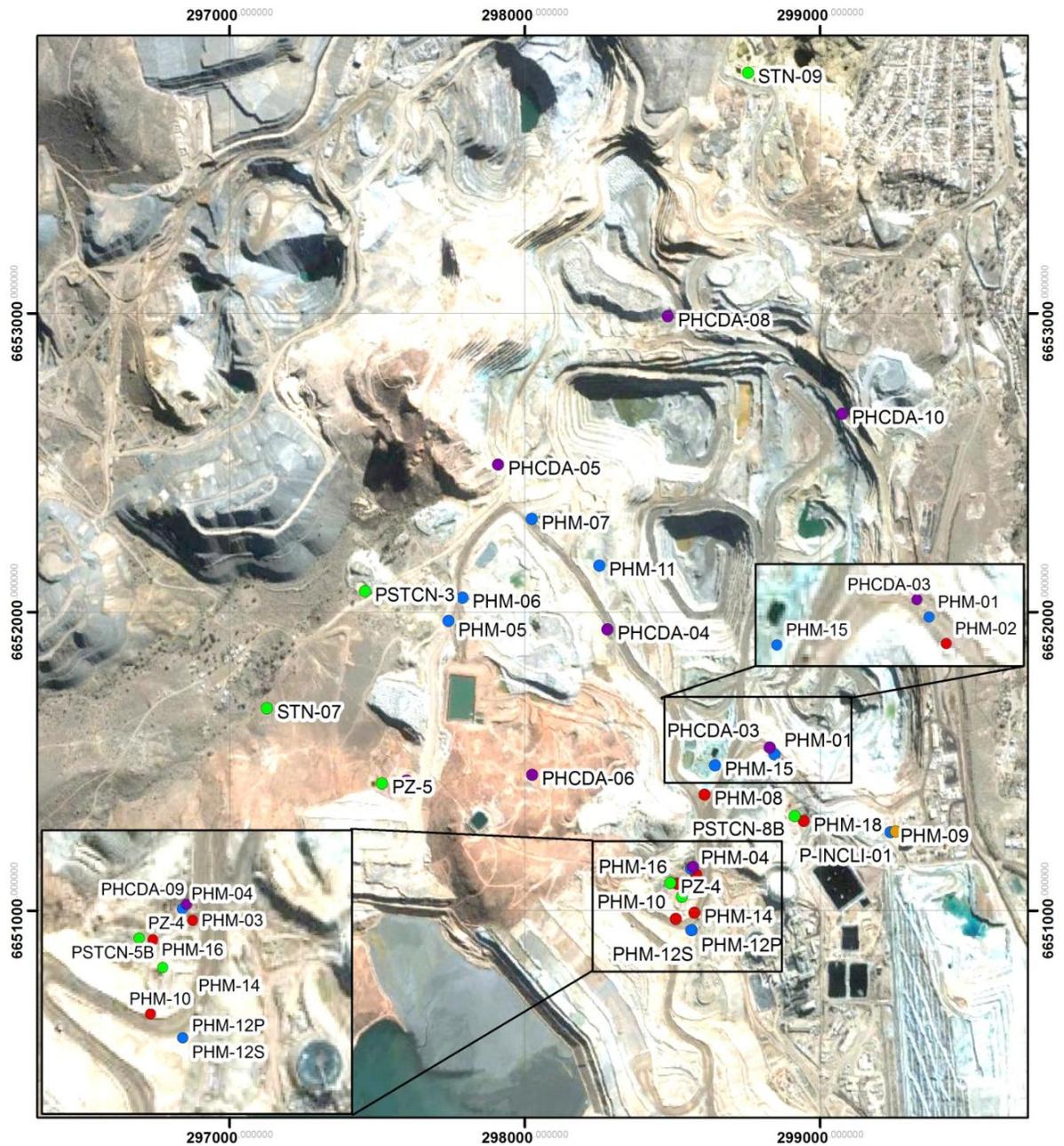
Pozo	Coordenadas PSAD 56		Cota Pozo	Profundidad de pozo (mbns)	Fecha de Instalación
	Norte	Este			
PHCDA-3	665155	29883	1020.3	180	25-07-08
PHCDA-4	665194	29828	1047.8	180	25-07-08
PHCDA-5	665249	29791	1060.4	180	25-07-08
PHCDA-6A	665145	29802	1106.9	400	29-01-12
PHCDA-7	665144	665299	1096.5	400	29-03-12
PHCDA-8A	665299	29848	1050.3	320	25-03-12
PHCDA-9	665115	29857	1047.1	400	06-05-12
PHCDA-10	665266	29907	1051.0	340	29-04-12

Tabla 2.6: Piezómetros con sensor cuerda vibrante (PHCDA).

Pozo	Profundidad Sensor A (msnm)	Profundidad Sensor B (msnm)	Profundidad Sensor C (msnm)
PHCDA-3	930.3	855.3	-
PHCDA-4	957.7	882.8	-
PHCDA-5	938.2	881.6	-
PHCDA-6A	969.5	842.7	709.2
PHCDA-7	945.0	874.4	822.4
PHCDA-8A	891.5	833.6	753.6
PHCDA-9	958.4	867.9	767.9
PHCDA-10	961.5	868.5	800.5

Tabla 2.7: Profundidad de sensores de cuerda vibrante en pozos PHCDA.

La red de monitoreo permite el seguimiento de los niveles del acuífero somero (libre) y del acuífero profundo confinado/semiconfinado. Este seguimiento se realiza por medio de la instalación de dispositivos “diver”, que realiza mediciones de nivel cada cierto tiempo dependiendo de la configuración, o a través de mediciones manuales y sensores de cuerda vibrante. La Figura 2.6 presenta la imagen satelital de la zona con la ubicación de los pozos utilizados en el estudio.



Simbología

Pozos

- Pozo de bombeo (drenaje mina)
- Pozo con cuerda vibrante
- Pozo con inclinometro
- Pozo de Medio-ambiente (no profundo)
- Pozo de monitoreo

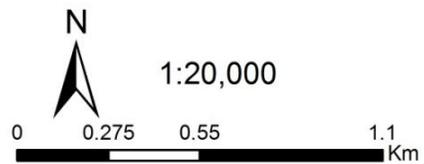


Figura 2.6: Ubicación de pozos en la zona de estudio.

CAPÍTULO 3

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual que se usó de base para la modelación numérica se generó a partir del trabajo desarrollado durante los últimos años para Teck CDA por parte de la compañía Schlumberger Water Services (SWS). En este capítulo se presentan las principales características del modelo hidrogeológico conceptual.

El modelo conceptual describe el análisis e interpretación de la información hidrogeológica actualizada con respecto a los antecedentes geológicos, geotécnicos y estructurales del rajo de Andacollo y su entorno. Elaborado a partir de la información obtenida de los estudios hidrogeológicos realizados entre los años 2008 y 2010 y la redefinición del modelo geotécnico de la mina (“Actualización Propiedades Macizo Rocosó Rajo Carmen de Andacollo, 2012, SKR Consulting”) donde se unificaron las unidades hidrogeológicas con propiedades geomecánicas, litológicas y de alteración similares. Se incorpora también la información obtenida a partir de las campañas de perforación de 6 pozos de bombeo, 2 de monitoreo y 6 piezómetros de cuerda vibrante con sus correspondientes ensayos hidráulicos. Además, se incluye la información actualizada del monitoreo de niveles en los piezómetros, medidos mensual y trimestralmente por la superintendencia del medio ambiente (SSMA), en los alrededores del rajo.

Si bien hidrogeológicamente la zona de estudio presenta litologías de muy baja permeabilidad, la gran cantidad de estructuras presentes sirven como planos de flujo preferencial, constituyendo así acuíferos confinados y compartimentalizados. Por otro lado, la alta mineralización de la zona produce cambios notorios en el comportamiento hidráulico del macizo rocoso dependiendo de la zona mineral y alteración que sufra.

Debido a esto la definición de unidades hidrogeológicas está estrechamente ligada a las características geomecánicas de la zona. A continuación se presenta un pequeño análisis de la definición de las unidades geotécnicas básicas, considerando la litología, alteración y zona mineral.

3.1. LITOLOGÍA, ALTERACIÓN Y ZONACIÓN MINERAL

Tal como se presentó en el Capítulo 2 la zona de Carmen de Andacollo presenta una litología caracterizada por la presencia de rocas volcánicas e intrusivas. Las rocas volcánicas inferiores corresponden principalmente a andesitas y brechas con alteración hidrotermal. Las rocas volcánicas superiores corresponden a tobas y se disponen en una franja norte-sur manteniendo al Este. Las rocas intrusivas corresponden principalmente a pórfidos que intruyen la secuencia de volcánica. Las alteraciones presentes corresponden a alteración Propilítica, Albítica, Potásica, Cuarzo Sericita y Argílica.

Las zonas minerales corresponden desde superficie a profundidad a:

- Una capa lixiviada sobre el supérgeno (sombrero de hierro), que a su vez sobreyace a la zona mineral hipógena.
- Zona de enriquecimiento secundario, la cual se puede dividir en:
 - Enriquecimiento Secundario Fuerte (ESEC1): Caracterizado por la presencia de calcosina, pirita y óxidos de cobre.
 - Enriquecimiento Secundario Débil (ESEC2): Caracterizado por la presencia de calcosina, pirita y calcopirita.
- Zona de enriquecimiento primario, la cual se puede dividir en:
 - Zona primaria con cavidades (PRIMC)

- Zona primaria sin cavidades (PRIMS).

El límite entre ambas zonas con y sin cavidades se conoce como “Techo de Sulfato” (TSO4). En la zona sin cavidades las fracturas y cavidades se encuentran rellenas con yeso o anhidrita.

3.2. DEFINICIÓN DE UNIDADES GEOTÉCNICAS BÁSICAS (UGB)

De acuerdo al informe “Actualización Propiedades Macizo Rocoso Rajo Carmen de Andacollo 2012”, realizado por SRK Consulting, las unidades geotécnicas definidas con anterioridad según los ensayos de laboratorio para roca intacta y similitud en resistencia fueron reagrupadas. Esta nueva agrupación se realizó en función de la litología, alteración y zonación mineral, resultando un total de 10 UGB.

Se agruparon las litologías bajo el techo de sulfatos (PRIMS) como la UGB1, las tobas sobre el techo de sulfato y con enriquecimiento secundario débil (PRIMC-ESEC2) como UGB2, las andesitas PRIMC-ESEC2 como UGB3, pórfidos PRIM-ESEC2 como UGB4. Todas presentando alteraciones propilíticas, potásicas o albiticas.

Para las alteraciones argílica y cuarzo-sericita se agruparon las tobas y andesitas sobre el techo de sulfato y enriquecimiento secundario débil (PRIMC-ESEC2) como UGB5, los pórfidos sobre el techo de sulfato y enriquecimiento secundario débil (PRIM-ESEC2) como UGB6. Las tobas, andesitas y pórfidos con enriquecimiento secundario fuerte como UGB7. La unidad de tobas, andesitas y pórfidos lixiviados constituye la UGB8, la Brecha Hermosa la UGB9 y otras litologías como UGB10.

En la Tabla 3.1 se presenta el resumen de la definición de Unidades Geotécnicas Básicas. Además la Tabla 3.2 presenta para cada unidad geotécnica los valores promedios de los parámetros geomecánicos que presentan una relación con las propiedades hidráulicas del macizo rocoso, estos son: Porosidad, UCS, Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (σ_c), Índice Geológico de Resistencia (GSI) y el

ranking para la clasificación geotécnica RMR (Rock Mass Rating) de Beniawski (1989). Esta información fue obtenida a partir de los informes entregados por SRK Consulting y Teck CDA.

Unidad Geotécnica	Litología	Alteración	Zona Mineral
UGB1	Andesita + Toba + Pórfido	Propilítica/Potásica/ Albítica	PRIMS (Bajo TDSO4)
UGB2	Tobas		PRIMC-ESEC2
UGB3	Andesita		PRIMC-ESEC2
UGB4	Pórfidos		PRIMC-ESEC2
UGB5	Tobas + Andesitas	Argílica/Cuarzo/ Sericítica	PRIMC-ESEC2
UGB6	Pórfidos		ESEC1
UGB7	Tobas + Andesitas + Pórfidos		LIX
UGB8	Tobas + Andesitas + Pórfidos	Todas	TODAS
UGB9	Brecha Hermosa		OTRAS
UGB10	Otras	-	OTRAS

Tabla 3.1: Resumen definición de Unidades Geotécnicas Básicas. UGB

UGB	Porosidad (%)	UCS (Mpa)	σ_{ci} (Mpa)	GSI	RMR '89
UGB1	3.4	102	95.8	61	66.33
UGB2	4.6	97.8	84.5	52	56.59
UGB3	2.45	82.8	75.5	48	52.7
UGB4	3.37	103.7	85.8	52	57.22
UGB5	5.04	86.9	65.7	47	52.08
UGB6	4.34	50.3	59.9	50	54.91
UGB7	10.08	54.2	48.6	41	46.2
UGB8	9.67	73.3	63.7	49	54.14
UGB9	-	-	-	-	54.95
UGB10	-	-	-	-	53.05

Tabla 3.2: Resumen de parámetros geotécnicos promedio para cada UGB.

A partir de esta información es posible resumir lo siguiente:

- Las unidades que presentan mejores calidades geotécnicas, y por lo tanto menores potenciales hidráulicos son: UGB1, UGB2 y UGB4. Estas unidades están asociadas a la mineralización hipógena y enriquecimiento secundario débil, además de alteraciones albiticas, propiliticas y potásicas.
- Las unidades de menor calidad geotécnica son las UGB6, UGB7 y UGB8. Estas unidades se caracterizan por la presencia de alteraciones pervasivas como la argílica y cuarzo sericita, las cuales disminuyen la competencia del macizo rocoso. Todas estas unidades se encuentran por encima del techo de sulfatos.

En general, existe una buena correlación entre los parámetros geotécnicos, las unidades de alteración dominantes y las zonas mineralizadas, lo que permite agrupar las unidades hidrogeológicas de acuerdo a su concordancia en cuanto a calidad de roca.

3.3. DEFINICIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UH)

Dada a la escala y los objetivos de este estudio, se utilizará la definición de unidad hidrogeológica que la señala como cualquier suelo o unidad de roca que, en virtud de sus propiedades hidráulicas, tiene una influencia característica en el almacenamiento y la circulación de las aguas subterráneas. (ANS, 1980).

Luego de la actualización del modelo geotécnico de la mina fue necesario redefinir las Unidades Hidrogeológicas (UH) para la zona del rajo Teck Carmen de Andacollo. Esta clasificación se realizó según la integración entre las UGB's, las unidades de alteración hidrotermal y /o supérgena sobreimpuesta y las zonas mineralizadas descritas. Cabe destacar que las unidades litológicas pierden importancia relativa en

comparación con los otros parámetros geológicos como la alteración, mineralización y características geotécnicas. Estas últimas influyen directamente en el comportamiento hidráulico de cada unidad.

Se determinaron un total de siete unidades hidrogeológicas, relacionadas entre sí, las cuales se detallan a continuación y se resumen en la Tabla 3.3:

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA UH0:

Corresponde al relleno sedimentario aluvial y/o coluvial que sobreyace las quebradas y la zona meteorizada de transición entre suelo y roca fresca. Se trata de gravas gruesas a muy gruesas, polimícticas, con abundante matriz tamaño arena y no consolidadas. Esta unidad alcanza una potencia de hasta 30 m. En esta zona se realizaron ensayos hidráulicos previo a la construcción del muro de tranque de relave en pozos de monitoreo de niveles (STR-1 a STR-6) y ensayos en piezómetros Casagrande pertenecientes a pozos de control medio ambiental (PSTCN y PSTN). En esta unidad se concentra principalmente el acuífero freático existente en la cuenca Andacollo. Esta unidad tiene muy baja distribución al interior del rajo actual y se encuentra normalmente con saturación parcial.

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA UH1:

Esta unidad está conformada por Tobas, Andesitas y Pórfidos con abundantes hidróxidos y óxidos de hierro, con boxwork de pirita en una zona mineral denominada como lixiviada, además incluye la unidad denominada Brecha Hermosa debido a la similitud en cuanto a comportamiento geomecánico con la zona lixiviada. Para esta unidad no se define el predominio de alguna alteración. La calidad del macizo rocoso es Roca Regular "Clase III", es una roca de resistencia moderada (73.3 MPa UCS), una porosidad 9.67% y un GSI de 49. La abundancia volumétrica referida al rajo hipógeno es menor.

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA UH2:

Esta unidad contiene Tobas, Andesitas y Pórfidos con alteración argílica y cuarzo-sericita, en una zona de enriquecimiento secundario fuerte, con presencia de calcosina y pirita. En esta unidad hidrogeológica se incluye la unidad geotécnica básica UGB10, concebida como una unidad que agrupa rocas con una distribución espacial muy restringida en el rajo y cuyas propiedades geomecánicas o de litología, alteración y zona mineral no permiten agruparlas dentro de ninguna de las otras unidades geotécnicas.

La calidad del macizo rocoso es Roca Regular “Clase III”, presenta una resistencia baja a moderada de 54.2 MPa, una porosidad de 10.08% y un GSI de 41. Su abundancia volumétrica es menor.

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA UH3:

Esta unidad está conformada por Tobas, Andesitas y Pórfidos con alteraciones predominantes propilíticas, potásicas y albítica, las que se caracterizan a través de una mezcla entre enriquecimiento secundario débil y zona primaria con cavidades sobre el techo de sulfatos.

La calidad del macizo rocoso es Regular “Clase III”, presenta una resistencia moderada a alta de 92.5 MPa (UCS), una porosidad de 3.64% y un GSI de 51. Determinando así un fuerte cambio de propiedades entre la UH2 y UH3, con una resistencia de casi el doble y una porosidad mucho más reducida. Esta unidad representa la mayor distribución espacial en la mina.

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA UH4:

Esta unidad está conformada por Tobas, Andesitas y Pórfidos con alteración predominante argílica y cuarzo-sericita, en una zona mineral que incluye enriquecimiento secundario débil y zona primaria con cavidades sobre el techo de sulfatos. Representa una transición tanto hidrogeológica como geomecánica, entre las rocas altamente argilizadas, dado por el paso de la zona de enriquecimiento supérgeno

fuerte hacia un enriquecimiento moderado incluyendo la parte superior de la mineralización hipógena.

Corresponde a una roca de calidad Regular “Clase III”, con una resistencia moderada 74.7 MPa (UCS) debido a la alteración argílica que introduce una menor resistencia, una porosidad de 4.84% y un GSI de 49. Esta unidad tiene una abundancia volumétrica considerable en la mina.

UNIDAD HIDROGEOLOGICA UH5:

Esta unidad es considerada el basamento del modelo hidrogeológico. Forma parte del macizo rocoso fracturado relleno con yeso y anhidrita y está conformada por Andesitas, Tobas y Pórfidos con alteraciones propilítica, potásica y albítica en una zona mineral primaria sin cavidades bajo el techo de sulfatos.

Se presenta como una roca de calidad Buena “Clase II”, con una resistencia moderada a alta 102 MPa (UCS), una porosidad baja de 3.4% y un GSI de 61. Esta unidad se presenta principalmente en la porción más profunda del yacimiento.

UNIDAD HIDROGEOLOGICA UH6:

Conceptualmente, es de esperar que en un macizo rocoso de baja permeabilidad y carácter ígneo, tanto intrusivo como extrusivo, las mayores conductividades hidráulicas estén directamente asociadas a zonas con presencia de discontinuidades geológicas, ya sean fallas o juegos de diaclasas persistentes, con aberturas y rellenos que permitan el flujo de agua. Es por esto que se definió una unidad asociada a brechas de fallas e hidrotermales, junto a rocas volcánicas y pórfidos fisurados, asociados a sistemas estructurales principales y en algunos casos de carácter distrital, presentes en la mina.

La calidad del macizo rocoso no fue determinada en el informe de SRK Consulting (2012), sin embargo dada su naturaleza de rocas de falla, sumado a la presencia de flujos de aguas subterráneas y altas permeabilidades, medidas en ensayos hidráulicos que se describirán en las siguientes secciones, se asume una baja calidad. Su

abundancia volumétrica es menor, pero de punto de vista hidrogeológico tiene una gran importancia.

La presencia de estructuras en la cuenca definen un acuífero confinado o semi-confinado, que a la vez compartimentaliza el acuífero en el macizo rocoso, haciendo que se comporte de manera heterogénea y anisótropa, con conos de abatimiento que normalmente son irregulares y elongados, siguiendo la dirección de la estructura. Este comportamiento del acuífero ha sido detectado por pozos surgentes en las Fase 18 y Fase 1, además del comportamiento observado durante la construcción y pruebas hidráulicas de los pozos de bombeo y observación de la mina (campaña 2010 y 2011-2012).

En función de los antecedentes recopilados durante las pruebas de airlift, recuperación y bombeo, para los caudales y conductividades hidráulicas, es que se ha subdividido esta unidad de la siguiente forma, en función del área de influencia de estructuras:

- UH6a, Brecha y/o Zona de Falla:

Corresponde al núcleo de la falla, donde tiene lugar la mayor deformación junto a la formación de planos de desplazamiento, la que queda representada principalmente por los pozos de bombeo, los que durante construcción demostraron tener los mayores caudales en profundidad, confirmando así la naturaleza confinada (semiconfinada) del acuífero estructural. Este tipo de estructuras normalmente conducen agua a lo largo de ella y algunas son barreras hidráulicas a flujos perpendiculares. Esta unidad considera a las estructuras mayores que cruzan el depósito como las zonas de Falla Andacollo, Falla Carmen, Falla Central y Falla Hermosa. (Figura 2.3)

- UH6b, Zona de daño asociado a la Falla:

Corresponde a la zona de transición entre el núcleo de la falla y la roca no perturbada por las estructuras, caracterizada por un alto grado de fracturamiento y permeabilidades moderadas. Ejemplos de esta unidad corresponden a pozos de

observación que presentan respuestas moderadas al bombeo realizado a su alrededor (PHM-4, PHM-5, PHM-6 y PHM-12P).

- UH6c, Fallas Secundarias:

Definida de acuerdo a las diferencias en permeabilidad observadas entre las estructuras principales (determinadas a partir de ensayos de bombeo) y las estructuras menores ensayadas durante la construcción de los piezómetros de cuerda vibrante a través de pruebas de Lugeon. En general, existe una amplia variación en el rango de conductividades hidráulicas medidas en las fallas secundarias, relacionado al tipo de relleno presente en el núcleo de la falla, la existencia de una zona de daño y su espesor, e incluso la profundidad a la que se realizaron las pruebas, dadas las limitaciones de los equipos utilizados y la manera en que están concebidos dichos ensayos.

A continuación, en la Tabla 3.3 se presenta un resumen de la información anterior:

UH	UGB	Litología	Alteración	Zona Mineral
UH0	-	Relleno Sedimentario	-	-
UH1	UGB8	Tobas Andesitas Pórfidos	Todas	LIX
	UGB9	Brecha Hermosa		TODAS
UH2	UGB7	Tobas Andesitas Pórfidos	Argílica Cuarzo-Sericítica	ESEC1
	UGB10	Otras	-	OTRAS
UH3	UGB2	Tobas	Propilítica Potásica Albítica	PRIMC-ESEC2
	UGB3	Andesita		
	UGB4	Pórfidos		
UH4	UGB5	Tobas Andesitas	Argílica Cuarzo-Sericítica	PRIMC-ESEC2
	UGB6	Pórfidos		
UH5	UGB1	Andesita Toba Pórfido	Propilítica Potásica Albítica	PRIMS (Bajo TDSO4)
UH6a	Zona de Falla	-	-	TODAS
UH6b	Zona de Daño	-		
UH6c	Fallas secundarias	-		

Tabla 3.3: Definición de Unidades Hidrogeológicas UH

3.4. ANÁLISIS DE PERMEABILIDAD

Para el análisis de permeabilidad se recopiló información a partir de diferentes estudios hidrogeológicos efectuados en el distrito desde el 2005 a la fecha. Las principales pruebas hidráulicas realizadas son de tipo Packer test, Slug test, recuperación durante ensayos de Airlift y pruebas de bombeo de carga constante.

Las conductividades hidráulicas obtenidas de las distintas pruebas hidráulicas fueron correlacionadas con las unidades hidrogeológicas y geotécnicas previamente definidas.

La UH0 corresponde al acuífero freático distrital caracterizado por la presencia de depósitos cuaternarios y la zona meteorizada de transición entre suelo y roca fresca. El resto de las UH definidas para la zona de estudio forman parte de la unidad hidrogeológica definida como acuitardo a nivel distrital, corresponde a las rocas sin meteorización que constituyen el basamento rocoso de la cuenca y donde se ha depositado el yacimiento Andacollo (SWS, 2012). Se excluye de esta definición a la UH6 que representa un acuífero confinado o semi-confinado en el distrito, asociado a la conectividad entre estructuras de carácter distrital y/o regional.

Dentro de este grupo de siete UH asignadas para el rajo (definidas entre UH0 a UH6), sólo seis han podido ser caracterizadas a través de las 135 pruebas hidráulicas efectuadas sobre los pozos hidrogeológicos construidos desde el 2005 al 2010. La unidad UH1, asociada a la zona lixiviada, no fue caracterizada durante la construcción de los pozos piezométricos debido a la escasa representación en espesor que se pudo verificar en los testigos o porque estas se ubicaban en las porciones más someras del pozo, en las zonas no saturadas.

En este caso, la determinación de la conductividad hidráulica de la UH1 se basó en los parámetros geomecánicas como porosidad, UCS, resistencia a la compresión, índice geológico de resistencia (GSI) y calidad del macizo rocoso. Se logró

correlacionar y estimar rangos de permeabilidad para la UH1, debido a una similitud en sus parámetros geomecánicos con respecto a las UH3 y UH4, mientras que su porosidad es más cercana a la UH2. Además, se han considerado criterios hidrogeológicos como un aumento en la conductividad hidráulica del macizo rocoso debido a la reducción en la carga litostática (al tratarse de una unidad somera) con la consiguiente apertura de las fracturas, además del aumento en el almacenamiento debido a la disolución de minerales a través de los procesos de lixiviación que tuvieron lugar sobre el macizo rocoso.

Los resultados de permeabilidad obtenidos para las diferentes unidades hidrogeológicas se presentan en la Tabla 3.4.

Tipo Unidad	Unidad Hidrogeológica	N° de ensayos	K mín. (m/s)	K prom (m/s) (*)	K máx. (m/s)	Pozos ensayados	
Relleno Sedimentario	UH-0	29	1.97E-09	3.19E-07	5.00E-06	S-3, STR-1, STR-2, STR-3, STR-4, STR-5, STR-6, PZ-3, PSTCN-8B, PSTCN-4, PSTN-5, PSTN-3, PSTCN-3, PZ-1, PSTCN-6, PSTN-6, PSTCN-7	
Macizo Rocosos Sobre TDSO4	UH-1	0	3.97E-09	-	3.97E-08	-	
	UH-2	1	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	PHCDA-03	
	UH-3	25	1.00E-12	9.91E-09	5.19E-07	PHCDA-01, PHCDA-02, PHCDA-03, PHCDA-04, PHCDA-05, PHCDA-06, PHCDA-07, PHCDA-09, PHCDA-10, PHCDA-11	
	UH-4	4	1.00E-11	1.34E-09	1.77E-08	PHCDA-03, PHCDA-04	
Macizo Rocosos Bajo TDSO4	UH-5	11	1.00E-12	5.04E-12	1.55E-08	PHCDA-06, PHCDA-07, PHCDA-08, PHCDA-09, PHCDA-10, PHCDA-11	
Estructuras	UH-6	a	42	1.17E-07	8.73E-06	1.49E-04	PHCDA-02, PHM-02, PHM-01, PHCDA-03, PHM-03, PHM-04, PHM-08, PHM-10, PHM-10, PHM-16, PHCDA-09A, PHCDA-09B, PHM-18
		b	14	2.28E-08	3.75E-07	1.11E-05	PHM-04, PHM-14, PHM-15, PHM-05, PHM-06, PHM-07, PHM-09, PHM-11
		c	9	2.25E-09	2.33E-08	1.11E-07	PHCDA-01, PHCDA-05, PHCDA-07, PHCDA-08, PHCDA-10
Promedio geométrico				2.01E-08			

Tabla 3.4: Relación entre las permeabilidades y las Unidades Hidrogeológicas.

La Figura 3.1 presenta los resultados de manera gráfica, los rombos representan el promedio geométrico de las permeabilidades.

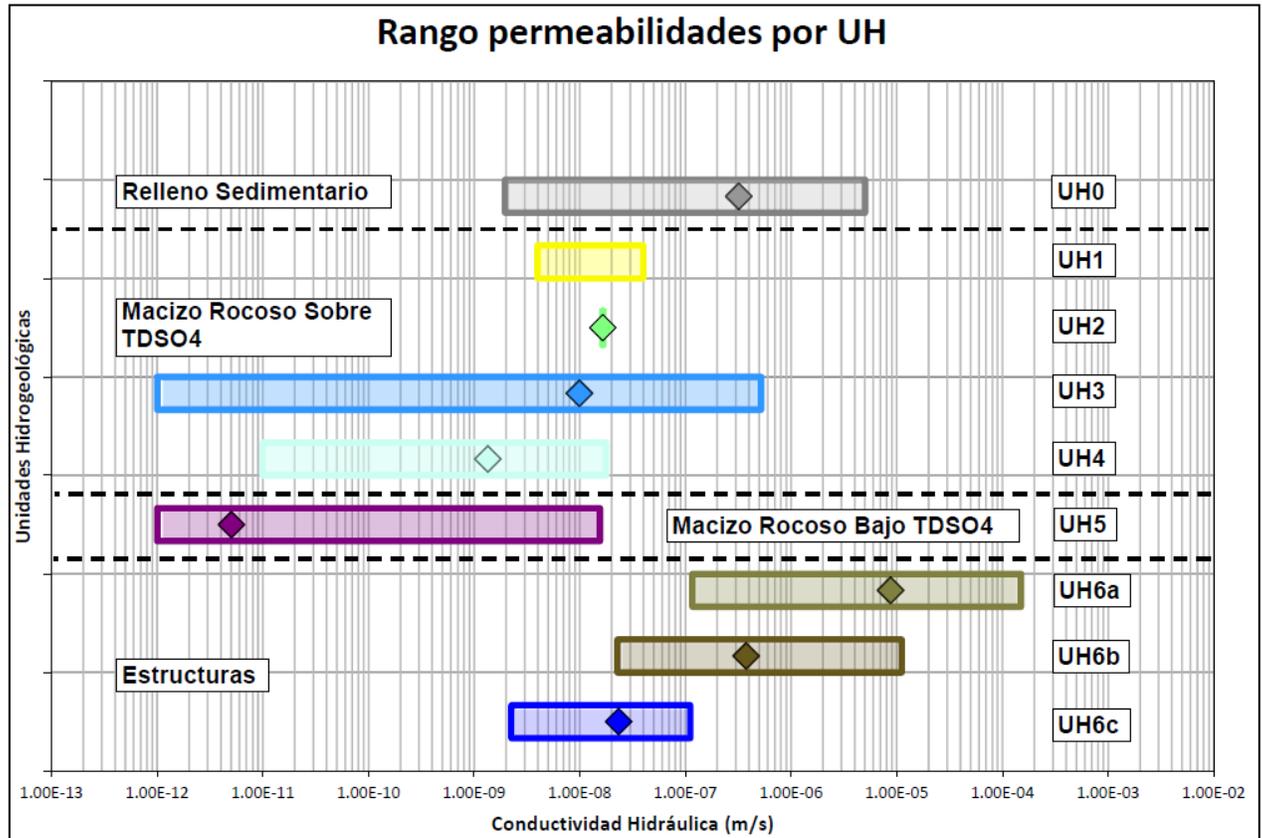


Figura 3.1: Rango de permeabilidades por Unidad Hidrogeológica.

Las pruebas de Packer con admisión cero fueron interpretadas como sectores prácticamente impermeables, asignándose una permeabilidad de $1.00 \text{ E-}12 \text{ m/s}$ (K mínimo para UH3 y UH5). El promedio geométrico de los valores de permeabilidad para el distrito corresponde a $2.01\text{E-}8 \text{ m/s}$ en base a 135 pruebas hidráulicas, disminuyendo levemente con respecto al valor determinado en la actualización anterior del modelo conceptual.

Los valores más altos en permeabilidad se presentan en la UH6 (de mayor representación para el macizo rocoso fracturado con 65 ensayos), que corresponden a las brechas y zonas de fallas y/o zonas de daño estructural moderado a fuerte, tanto en estructuras mayores como secundarias, identificadas en las zonas minerales tanto supérgenas como hipógenas.

Por otro lado, los valores más bajos de permeabilidad promedio medidos se asocian a la UH5, relacionada a la mineralización primaria, con alteraciones no pervasivas (propilítica, potásica y albitica), y bajo el techo de sulfato. Este conjunto de características le confieren a esta unidad un carácter impermeable ($5.04E-12$ m/s), actuando efectivamente como el límite inferior del acuífero somero.

Entre las UH1 y UH4 la variación en la permeabilidad está relacionada al cambio entre las zonas de mineralización entre lixiviado, enriquecimiento secundario débil y fuerte hasta el primario con cavidades, todos por sobre el techo de sulfatos. Además también existe el cambio de alteración que va desde la sódica-potásica hasta la argílica cuarzo-sericita.

La Figura 3.2 muestra la relación entre la dispersión de los resultados de conductividad hidráulica y la profundidad, para este gráfico solo fueron usados los resultados de los ensayos de Packer realizados entre 2008 y 2011-2012. La dispersión en los resultados bajo el techo de sulfatos es mínima, con valores prácticamente impermeables en la mayoría de los casos. Existen dos valores que excepcionalmente presentan valores de cercanas a $3.5E-08$ y $9.5E-07$. Sobre el techo de sulfato la permeabilidad se encuentra condicionada por parámetros geológicos como zona mineral y alteración.

Por otra parte, las estructuras presentan un comportamiento diferente, donde se observa una leve tendencia a disminuir su permeabilidad a medida que se incrementa la profundidad. Esto se encuentra relacionado tanto al relleno de fracturas bajo el techo de sulfatos, sellándolas, como a la manera en que es conducida el agua a través de estas, donde el núcleo de la falla (zona de cizalle) se encuentra relleno con material arcilloso (salbanda) mientras que la zona adyacente al núcleo, caracterizada por un alto grado de fracturamiento es la que presenta las mayores permeabilidades y que actúan como conducto. A medida que se incrementa la profundidad, aumenta la carga litostática sobre estas fracturas, cerrándolas e impidiendo el flujo de agua.

K vs Profundidad (UHs agrupadas)

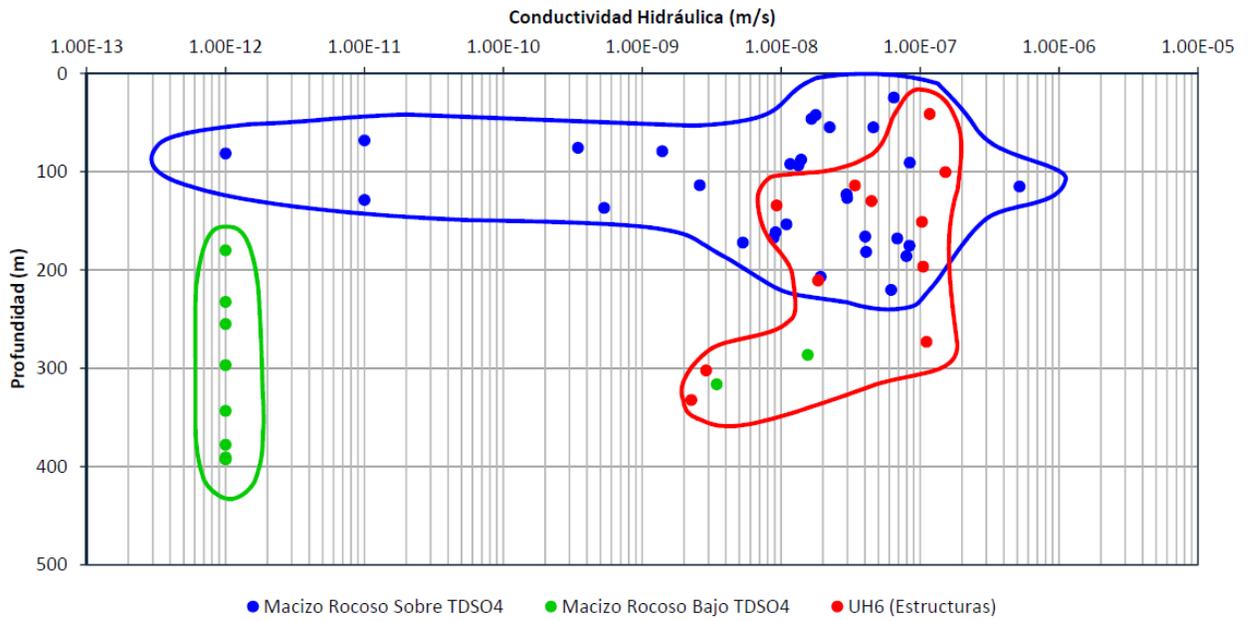


Figura 3.2: Permeabilidad versus Profundidad.

CAPÍTULO 4

MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO DEL SECTOR MINA

En el presente capítulo se detallan las características de la construcción del modelo numérico del rajo Teck Carmen de Andacollo. Para la construcción se consideró como base el modelo conceptual presentado en el Capítulo 3.

Un modelo hidrogeológico es una representación simplificada de un sistema real de flujo subterráneo. Los modelos matemáticos pueden resolver las ecuaciones de flujo y transporte a través de soluciones analíticas o modelos numéricos. Las características básicas que tienen que estar definidas en la construcción de un modelo hidrogeológico numérico son (SEA, 2012):

- El código que se usará para la modelación.
- El dominio de modelación.
- El nivel de detalle de la discretización.
- El tipo de modelo y los atributos en relación al tiempo.
- Las condiciones de borde y condiciones iniciales.
- Tasas de entrada y salida.
- Parámetros hidráulicos del modelo (Conductividad, almacenamiento específico, porosidad, etc.).
- Selección de pozos de observación y su respectiva serie de datos.

2.1. SELECCIÓN DEL CÓDIGO DE MODELACIÓN

La solución de las ecuaciones de derivadas parciales, y en este caso de la ecuación de Darcy, puede realizarse a través del método de elementos finitos o diferencias finitas. Los elementos finitos realizan cálculos en los nodos de cada celda, estas últimas pueden ser prácticamente de cualquier forma, por lo general se usan mallados triangulares por simplicidad. A cada nodo se le asocia una función base y la solución estará dada por una combinación lineal de estas funciones base, las cuales deben ser continuas dentro del dominio y contorno de cada elemento con el objetivo de asegurar convergencia a la solución exacta. (SEA, 2012)

Los elementos finitos son especialmente útiles en los modelos donde se presenta una alta anisotropía y casos en que es necesaria una alta versatilidad en la discretización ya que permite un refinamiento eficiente en áreas críticas de los modelos. Además permite mezclar “tipos de elementos” como por ejemplo la definición de líneas a partir de mallas 3D. Las principales desventajas de los elementos finitos están relacionadas con la mayor complejidad teórica, velocidad discontinua en los elementos que se encuentran en los bordes.

Por otro lado las diferencias finitas sólo realizan los cálculos en el punto central de celdas prismáticas rectangulares, son conceptualmente mucho más simples y más fáciles de usar. Existe una amplia gama de softwares disponibles que utilizan este método, garantizan la conservación de masa tanto a nivel local como global y el cálculo de balances de agua se realiza de forma más sencilla. Sin embargo las mallas rectangulares se hacen ineficientes a la hora de realizar refinamientos específicos en la malla ya que las condiciones de borde ocupan toda una celda, a diferencia de los elementos finitos que ocupan un nodo.

La Figura 4.1 muestra un esquema explicativo sobre la diferencia entre los elementos finitos y las diferencias finitas. A la derecha se observa una malla diseñada a partir de elementos finitos, se puede observar un uso más eficiente de la geometría en comparación a las diferencias finitas (imagen de la izquierda).

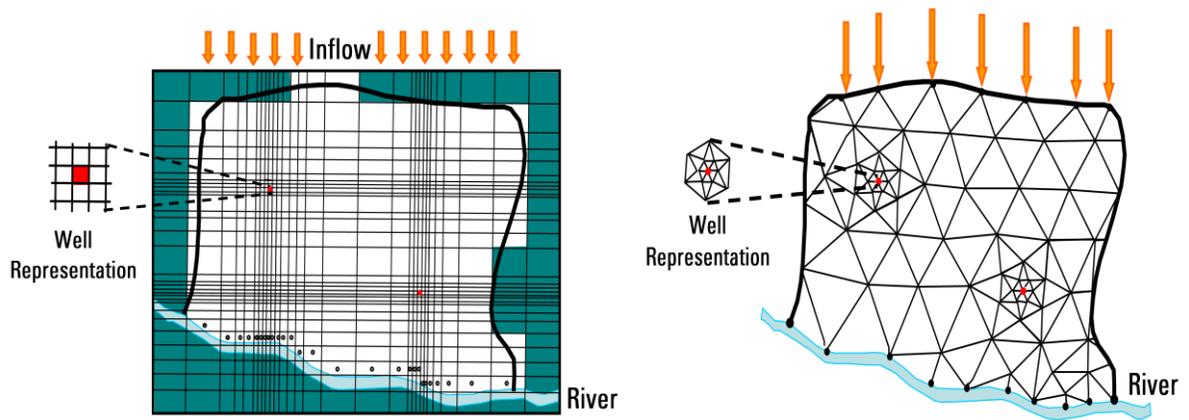


Figura 4.1: Esquema explicativo entre los métodos de diferencias finitas y elementos finitos.

Fuente: Principles of Finite Differences and Finite Elements, SWS

Finalmente se decide que el código utilizado para modelar la zona del rajo Teck CDA es Feflow, software de modelación de flujo subterráneo en 3D, el cual resuelve la ecuación de Darcy a través del uso del método numérico de elementos finitos. Este software permite el manejo de modelos de flujo y transporte en medios saturados y no saturados. En este caso sólo se realizará el modelo de flujo.

Feflow fue seleccionado debido a su flexibilidad pues permite realizar refinamientos locales de malla obteniendo así resultados de mayor precisión en zonas específicas, en este caso las zonas cercanas a las fallas y al rajo, sin aumentar de forma innecesaria los recursos computacionales requeridos para cada simulación. Además, la alta anisotropía causada por la presencia de múltiples fallas, se modela de mejor forma en un software que usa elementos finitos.

ACERCA DE FEFLOW 6.1

El software Feflow (Finite Element Flow), desarrollado por DHI-WASY, es un software de simulación hidrogeológica en 3D usada para la modelación de flujo, transporte de solutos y calor.

Presenta una interfaz interactiva, permitiendo discretizaciones en 2D y 3D, la construcción de modelos en estado transitorio o estacionario, permite importar archivos directamente desde GIS, etc.

2.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

DEFINICIÓN DEL DOMINIO DEL MODELO

El dominio del modelo se ubica dentro de la Cuenca de Andacollo, Región de Coquimbo, Chile. Superficialmente está conformado por la totalidad de la subcuenca mina y partes de las subcuencas El Toro, Dayton, Andacollo y Churque.

La definición de los límites del modelo se realizó en base al entendimiento conceptual de la zona, la piezometría generada por SIGA en 2005 y el mapa de geología estructural. Para el límite norte se ocuparon líneas de no-flujo, perpendiculares a las curvas equipotenciales de la piezometría. Para el límite este se usó la Falla Andacollo, que sirve como barrera hidráulica en la zona. El dominio presenta un área total de 8.33 km². El límite sur se trazó siguiendo la curva equipotencial correspondiente a los 1.060 msnm y el límite oeste a los 1.080 msnm. El paso de una curva a otra se trazó considerando rectas perpendiculares a las equipotenciales, las cuales corresponden a zonas de no-flujo. La Figura 4.2 muestra la imagen satelital de la zona de estudio junto a la división de las subcuencas y el dominio del modelo.

Las condiciones de borde establecidas para el modelo son detalladas más adelante en este mismo capítulo.

El límite superior del modelo está definido por la cota 1085 msnm, mientras que la parte inferior del modelo está definido por la cota 705 msnm, que corresponde a la profundidad máxima del rajo para el año 2019.

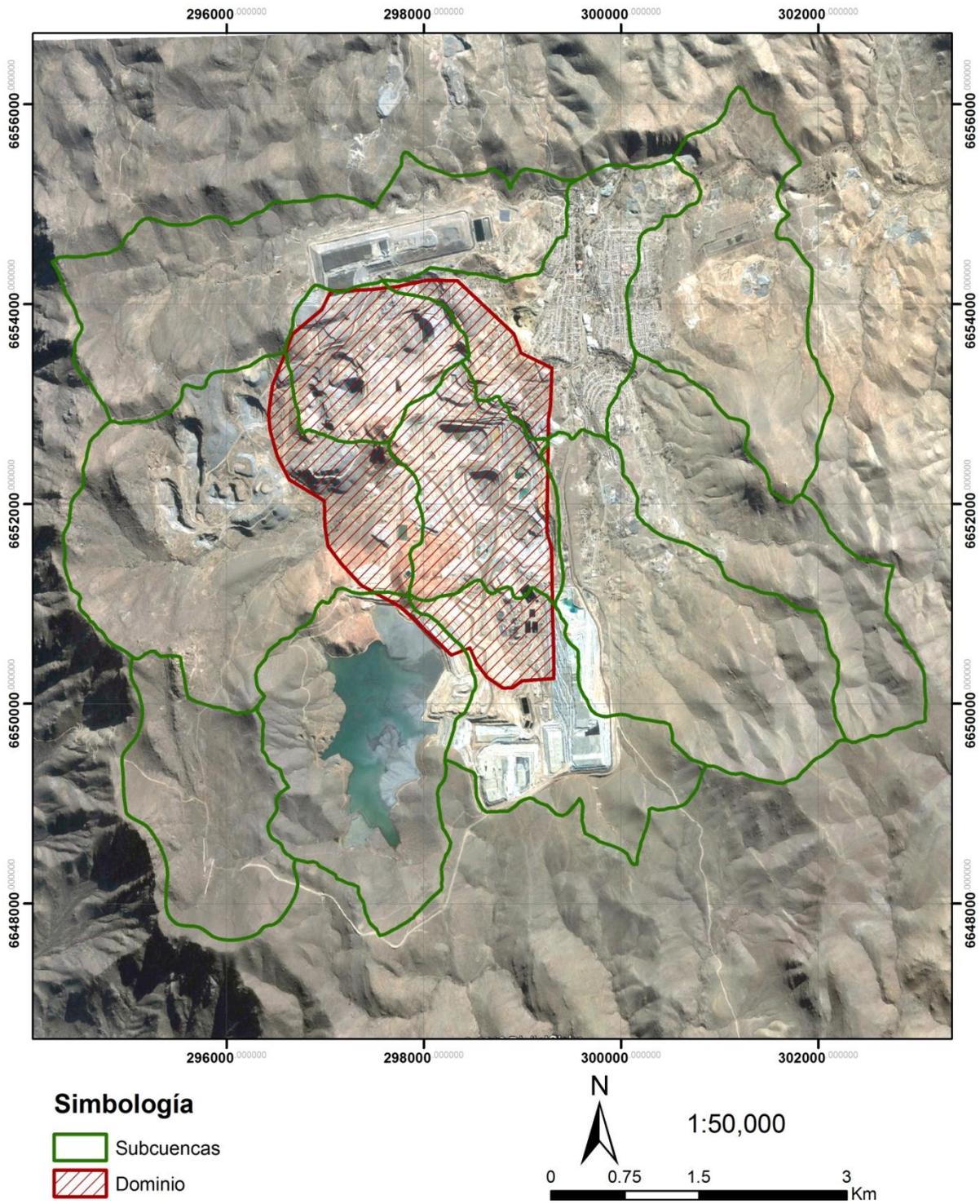


Figura 4.2: Subcuencas y dominio del modelo

DEFINICIÓN DE LA MALLA

Tanto la precisión de los resultados como la convergencia y estabilidad numérica del modelo dependen de una correcta definición de la malla. Si bien elementos más pequeños entregan mayor precisión en los resultados, el tiempo de convergencia y la estabilidad numérica se ven afectados. Es por esto que en las zonas noroeste (Dayton), y sur del modelo (área planta), el tamaño de los elementos es mayor, con aristas que alcanzan los 150 m. En la zona donde se ubican las fallas, las barreras hidráulicas y el rajo, los elementos son mucho más pequeños llegando a un mínimo de 1 m en la zona de las barreras hidráulicas. La Figura 4.3 muestra una imagen de la grilla, tanto en 2D como en 3D.

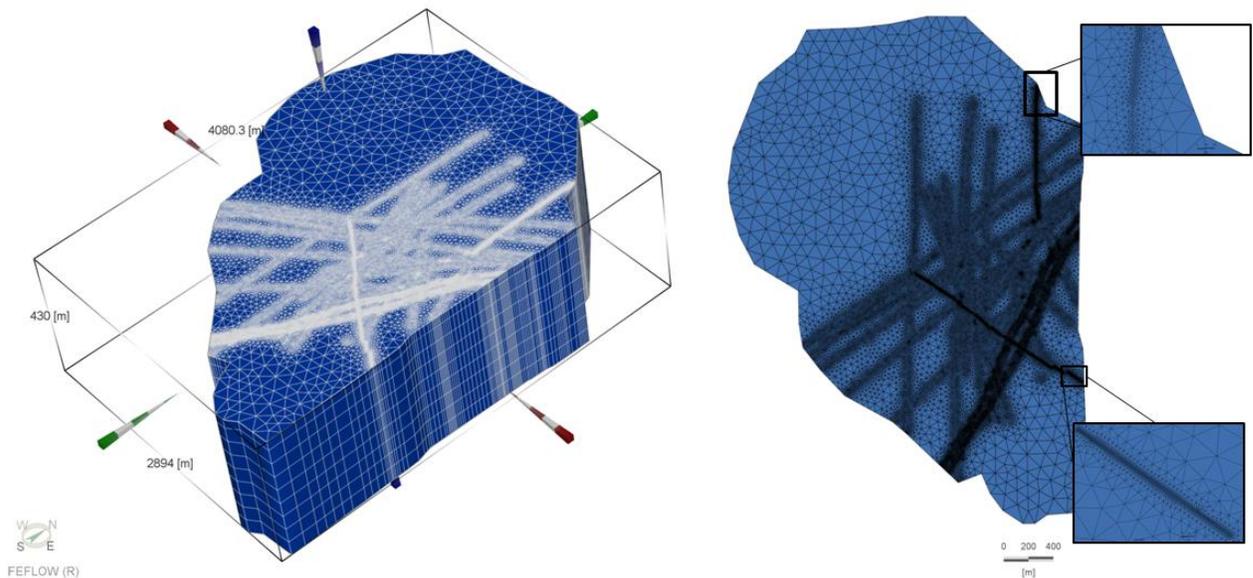


Figura 4.3: Grilla en 3D y 2D del modelo hidrogeológico numérico.

La discretización vertical del modelo consiste en la construcción de nueve layers o capas. La primera capa, caracterizada como UH0, posee una potencia de 30 m, las otras ocho presentan 50 m de potencia cada una.

TIPO DE MODELO EN RELACIÓN A LA DINÁMICA TEMPORAL

Para definir el tipo de régimen más adecuado para simular el comportamiento del sistema hidrogeológico se tomaron en cuenta tanto los objetivos de la modelación como las características del sistema. En este caso la información más antigua obtenida corresponde al año 2005 por lo que se optó por generar las condiciones iniciales a través de un modelo transitorio con condiciones fijas. Una vez obtenida la condición inicial se generó un modelo transitorio hasta 2019 con las respectivas variaciones en las condiciones de borde a lo largo del tiempo.

ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Los primeros valores asignados a las propiedades hidráulicas de las distintas unidades hidrogeológicas y capas del modelo provienen de la caracterización realizada en el modelo conceptual y de los perfiles SEEP/W en 2D generados en ciertas zonas del rajo en 2012.

Cada unidad hidrogeológica define un “material” con el cual posteriormente se va definiendo cada elemento de la malla según la distribución obtenida a partir del modelo de bloque. La agrupación de elementos facilita la asignación de propiedades y la posterior variación de los valores durante el proceso de calibración.

Para asignar propiedades como la conductividad hidráulica, porosidad y almacenamiento específico se utilizan los softwares ArcGIS y AutoCAD que permiten importar exportar hacia Feflow los archivos shapefile y dxf con las características de cada unidad hidrogeológica.

La Tabla 4.1 presenta los datos iniciales de conductividad, porosidad y almacenamiento específico para cada unidad hidrogeológica, las cuales fueron asignadas a cada elemento de la malla. Los datos de almacenamiento específico y porosidad efectiva se obtuvieron a partir de los perfiles SEEP/W 2D realizados en 2012.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica (m/s)	Almacenamiento Específico Ss (m ⁻¹)	Porosidad efectiva Sy (%)
UH0	3.19E-07	9.80E-07	8.00E-03
UH1	2.36E-08	9.80E-07	8.00E-03
UH2	1.30E-09	9.80E-07	8.00E-03
UH3	2.10E-08	9.80E-07	5.00E-03
UH4	1.92E-09	9.80E-07	8.00E-03
UH5	5.04E-12	9.80E-07	5.00E-03
UH6ab	5.00E-05	9.80E-07	1.24E-02
UH6ab bajo	5.00E-07	9.80E-07	1.24E-02
UH6c	9.00E-07	9.80E-07	1.24E-02

Tabla 4.1: Propiedades hidráulicas iniciales para las distintas unidades hidrogeológicas.

Las propiedades hidráulicas fueron asignadas según la distribución de las UH modelo de bloque. Las conductividades asignadas en los ejes X, Y y Z en cada capa fueron las mismas. El Anexo A muestra la distribución en planta, para las nueve capas, de la conductividad hidráulica y la porosidad efectiva. El almacenamiento específico es constante en todo el modelo por lo que no será detallado.

Para modelar las barreras hidráulicas se refinó la malla en la zona de la Falla Hermosa y Falla Carmen hasta alcanzar 2 m de potencia y se le asignó a esa zona una permeabilidad de 5.04E-12. Para modelar escenarios con transporte, Feflow reconoce cambios de propiedades hidráulicas cuando existen dos o más elementos contiguos, debido a esto se construyeron barreras de al menos dos elementos de espesor, en caso de que a futuro se decidiera implementar un modelo de transporte en base al modelo actual.

Para modelar las fallas se utilizaron “*discrete features*”, las cuales están especialmente diseñadas para la modelación de fracturas ya que representa líneas o planos de alta conductividad. Estos planos permanecen activos solo en las zonas saturadas y se apagan cuando la presión es negativa.

Cabe señalar que las *discrete features* sólo pueden configurarse de manera vertical. Las fallas presentes en la zona de estudio son, en general, subverticales. Con el objetivo de no sobrecargar numéricamente el modelo, se decidió modelar las fallas de manera vertical.

Se generaron cinco grupos de *discrete features*, las fallas principales simples someras, fallas principales simples profundas, fallas principales complejas someras, fallas principales complejas profundas y fallas secundarias. A continuación se detallan las características de cada uno de estos grupos:

- Fallas principales simples someras: Estas fallas están presentes entre las capas 2 y 7. Conceptualmente las fallas simples consideran un núcleo de 5 m (UH6a) y un halo de zona de daño de 5m (UH6b), es decir, la zona de falla mas el núcleo suman 15 m. Para facilitar los cálculos numéricos las *discrete features* se configuraron con un espesor de 15 m y una conductividad igual al promedio geométrico entre la permeabilidad de la unidad UH6a y UH6b, la cual corresponde a la UH6ab detallada en la Tabla 4.1
- Fallas principales complejas someras: Corresponden a las fallas que actúan como barreras hidráulicas, es decir, a la Falla Hermosa y Falla Carmen. Alrededor de la zona de baja permeabilidad se configuraron *discrete features* de 7m de grosor. Sumando la barrera hidráulica de 2 m de grosor se obtiene un total de 16 m, correspondiente a la potencia señalada en el modelo conceptual para estas fallas. Los parámetros hidráulicos usados son los señalados en la Tabla 4.1.
- Fallas principales simples profundas y fallas principales complejas profundas: Estas fallas están presentes en las capas 8 y 9, presentan permeabilidades de 5.00E-07 (UH6ad bajo). Estas *discrete features* fueron configuradas para representar la disminución de la permeabilidad tanto de las fallas principales

complejas como fallas principales simples en profundidad. Por lo tanto presentan la misma distribución en planta que las anteriormente descritas.

La Figura 4.4 muestra la distribución fallas principales en el dominio. Las *discrete features* aparecen en amarillo, mientras que los colores verde, morado y azul corresponden a diferentes valores de permeabilidad. En el cuadro de acercamiento se observa el detalle de las fallas complejas, las cuales rodean las barreras hidráulicas.

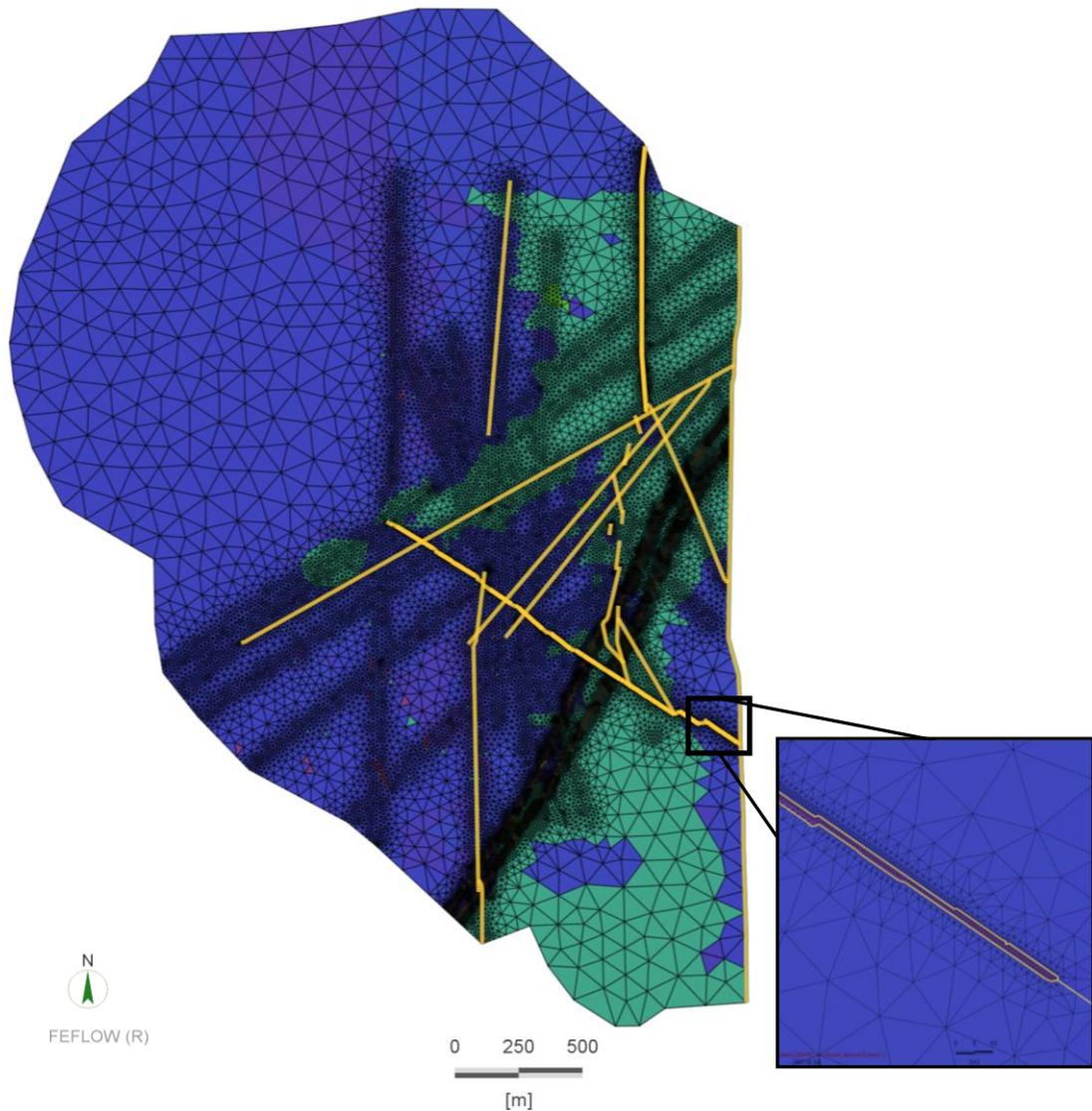


Figura 4.4: Distribución de las fallas principales

- Fallas secundarias: Estas fallas presentan un espesor de 5m, no presentan una variación de la permeabilidad en profundidad y presentan las propiedades hidráulicas señaladas en la Tabla 4.1. La Figura 4.5 muestra la distribución, en amarillo, de las fallas secundarias.

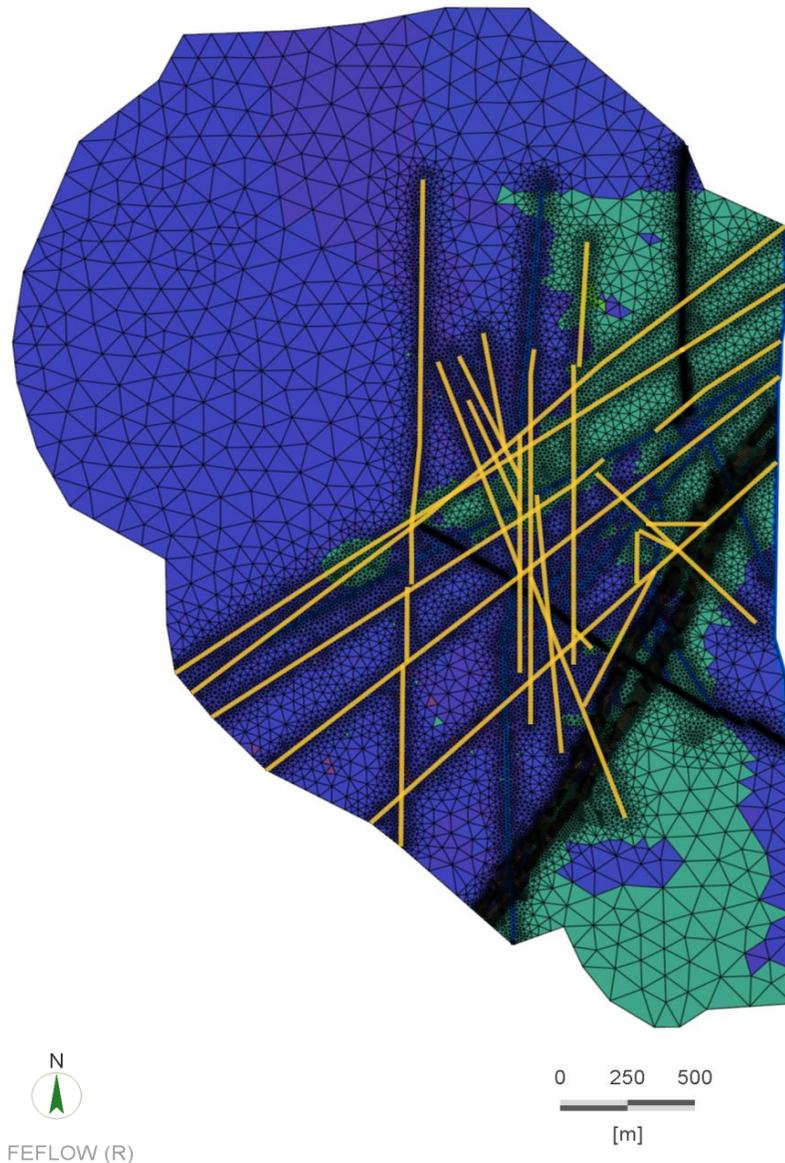


Figura 4.5: Distribución de las fallas secundarias.

Es importante señalar que una vez construido el modelo y ya iniciada la calibración se presentaron ciertas inconsistencias. En la zona Churque, donde se encuentran la mayoría de los pozos de bombeo, no existían fallas o zonas de baja permeabilidad que

justificaran los caudales extraídos en la zona. Tras varias conversaciones, Teck CDA facilitó la actualización del modelo estructural, el cual consideraba una falla principal con rumbo suroeste noreste.

Para ese entonces el modelo ya se encontraba avanzado y no era pertinente construir nuevamente el modelo desde cero. Se decidió refinar manualmente la malla en la zona de falla y configurarla a través de *discrete features*. Una vez realizada esa modificación el modelo presentó problemas de estabilidad numérica. Finalmente se decidió modelar la zona de daño como una zona de baja permeabilidad asignando directamente las propiedades hidráulicas a cada elemento. La Figura 4.6 muestra la configuración final de la Falla Churque.

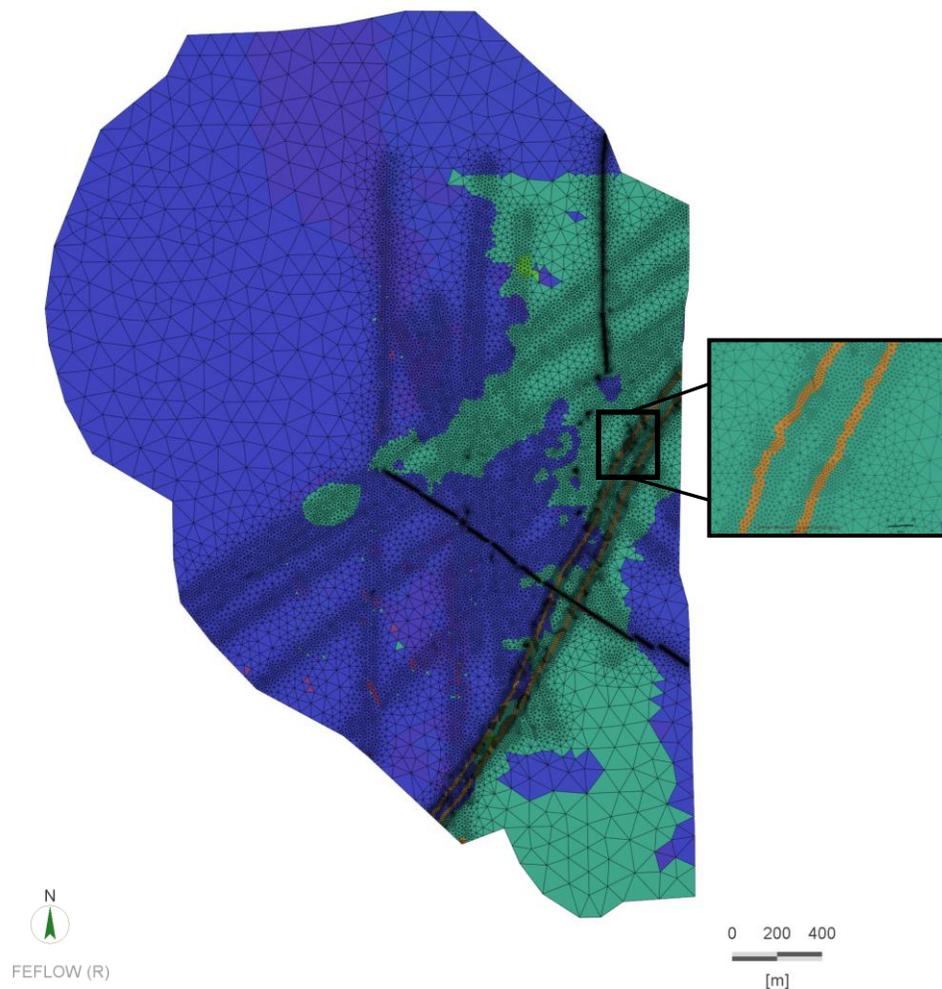


Figura 4.6: Falla Churque.

ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE BORDE

Los límites norte y este del modelo presentan condiciones de no flujo. La primera debido a que fue definida a partir de líneas perpendiculares a la piezometría, la segunda pues corresponde a la Falla Andacollo, la cual funciona como barrera hidráulica.

Los límites oeste y sur corresponden a las equipotenciales 1080 m y 1060 m, respectivamente. Las condiciones de borde usadas para este caso son "*Hydraulic Head Condition*", estos se detallan más detenidamente en la sección de entradas.

Para la zona de los rajos se generaron condiciones de borde asociadas al *seepage* por la variación de la topografía en el tiempo, es decir, se asignó una condición de borde de carga constante igual a la elevación topográfica restringiendo el flujo máximo a 0 m/s. Con esta condición se logra extraer todo el agua por sobre el nodo, eliminando el exceso e impidiendo el ingreso del agua al sistema.

ENTRADAS

Las entradas del sistema corresponden al flujo pasante ubicado en el límite este del modelo, representando la equipotencial 1.080 y 1.060 msnm. Esta condición de borde es representada a través de "*Hydraulic Head Condition*", la cual permite aplicar una carga hidráulica predefinida a un nodo, recargando el modelo cuando los nodos vecinos presentan un potencial menor o descargándolo en caso contrario. Para este modelo la condición de borde siempre actúa como una entrada al sistema.

Otra entrada corresponde a las cuatro fallas ubicadas en el sector suroeste del modelo, representadas a través de la condición de borde "*Multilayer Well*", la cual es usada para simular la inyección de agua a través de pantallas verticales que se pueden extender en profundidad hacia las distintas capas del modelo. En este caso la inyección de agua se realiza en todas las capas por igual.

Para cada falla se configura una serie de tiempo tal que el caudal inyectado sea 0 y a partir de 2010, año en el que entra en funcionamiento el depósito de relave, empieza a aumentar paulatinamente hasta alcanzar los caudales estimados en actualidad. Para la falla secundaria se estima un caudal actual total de 10.2 l/s, mientras que para cada falla principal se estima un caudal total de 20.5 l/s.

La Figura 4.7 muestra las condiciones de borde que permiten la entrada al sistema, los “Hydraulic Head” como círculos azules y los “*Multilayer Well*” de color rojo.

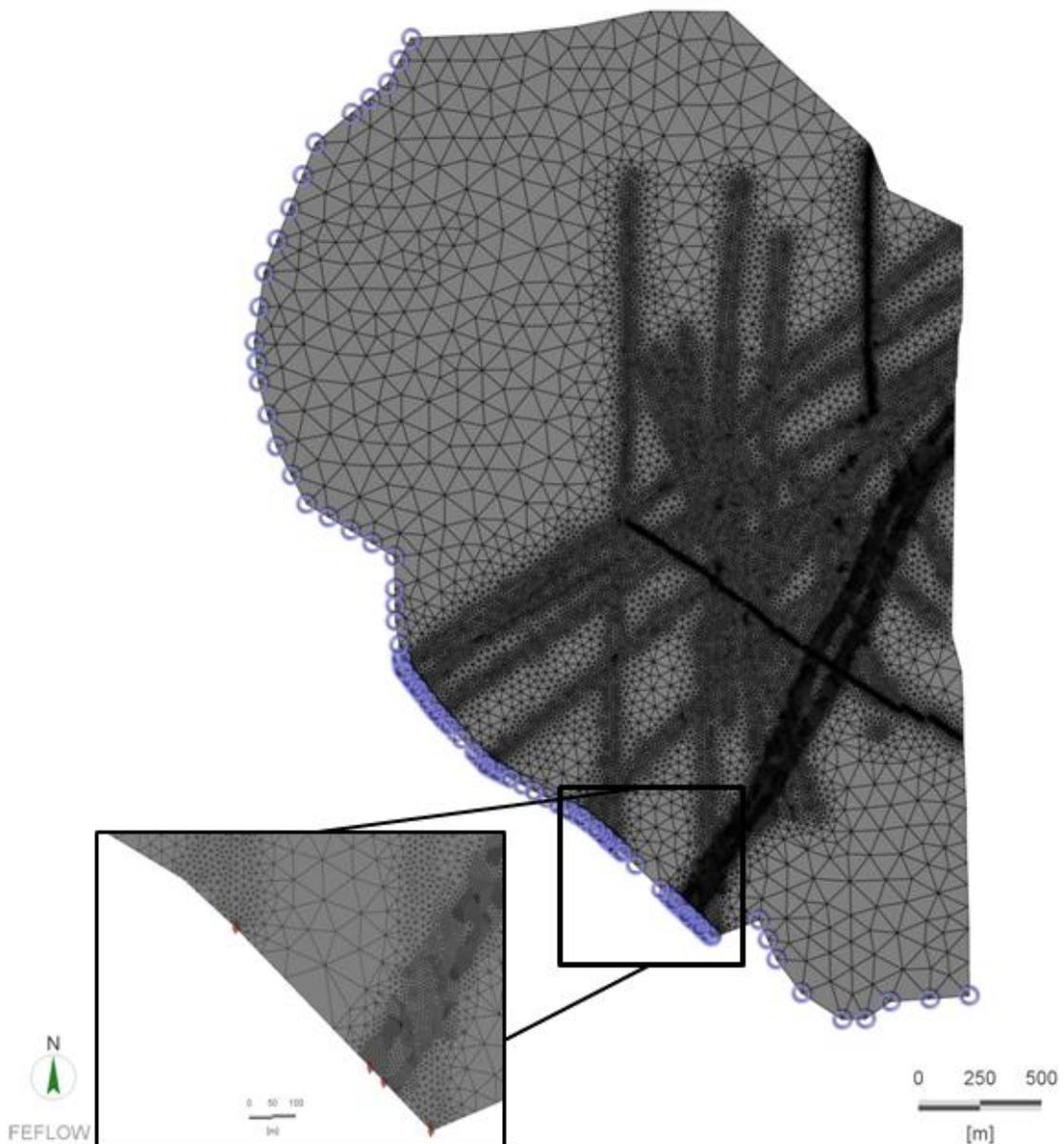


Figura 4.7: Condiciones de borde de entrada.

La entrada por precipitación fue incorporada al modelo a través de la opción “Inflow on Top” en la primera capa, relacionándose a una serie temporal de precipitaciones diarias reales del área de estudio.

SALIDAS

Las principales salidas están asociadas a los pozos de bombeo. Se generaron series de tiempo con el caudal extraído en cada pozo, las tasas de bombeo usadas son las presentadas en la Figura 2.4. Las fallas fueron consideradas verticales en el modelo para mantener una estabilidad numérica. Debido a esto, las coordenadas de los pozos de bombeo podían quedar fuera de la falla. Para solucionar este inconveniente los pozos de bombeo fueron movidos al punto de falla para lograr extraer el volumen de agua. La Tabla 4.2 entrega la información necesaria para la configuración de los pozos de bombeo, este es la cota a la que se encuentra, su profundidad y el diámetro del pozo. La Figura 4.8 presenta la distribución en 3D de los pozos de bombeo.

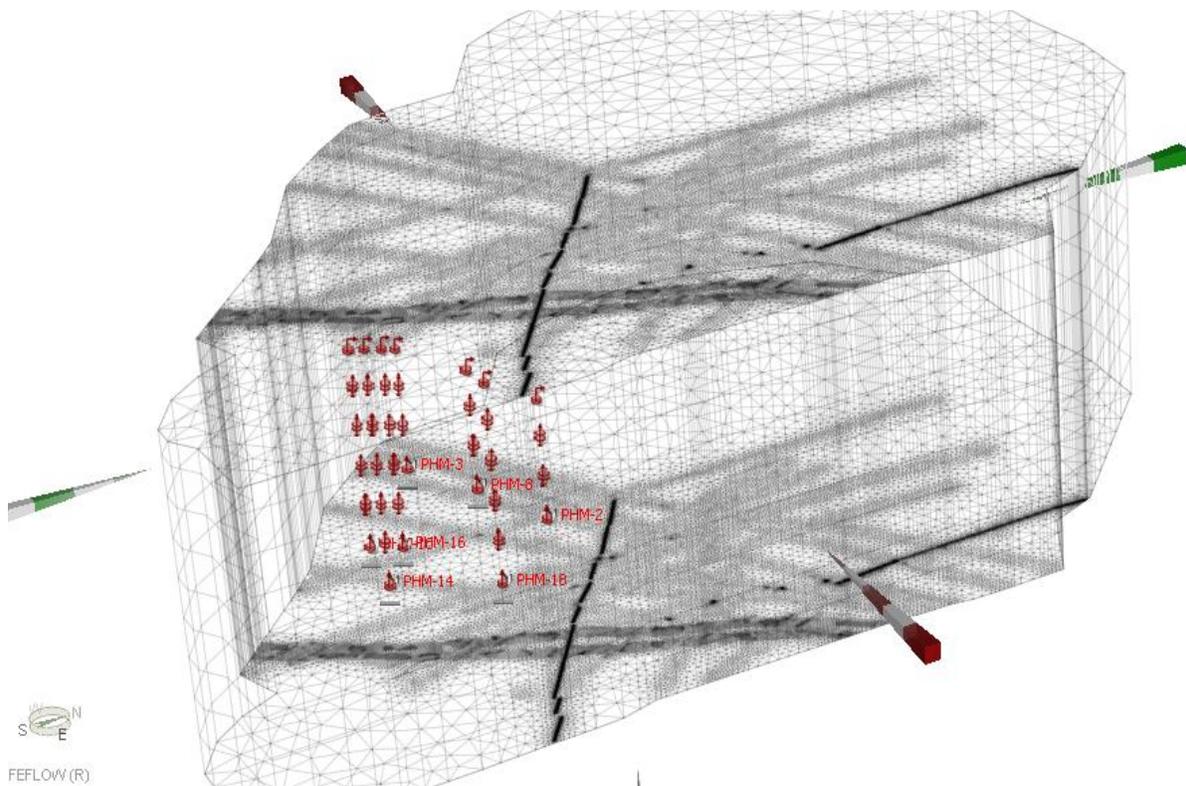


Figura 4.8: Distribución espacial de los pozos de bombeo.

. Pozo	Cota pozo (msnm)	Profundidad Pozo (m)	Diámetro de pozo (")
PHB-02	1021.1	180	8
PHB-03	1048.7	140	8
PHB-08	1025.5	130.25	8
PHB-10	1048.9	2140	14
PHB-14	1052.2	300	14 3/4
PHB-16	1048.3	220	14 3/4
PHB-18	1043.9	220	14 3/4

Tabla 4.2: Detalle para la configuración de pozos de bombeo

Otra salida es la relacionada a los afloramientos en la mina la cual, según el balance de aguas realizado en el modelo conceptual, es la segunda salida más importante con aproximadamente 20 l/s. La Figura 4.9 muestra las condiciones de borde.

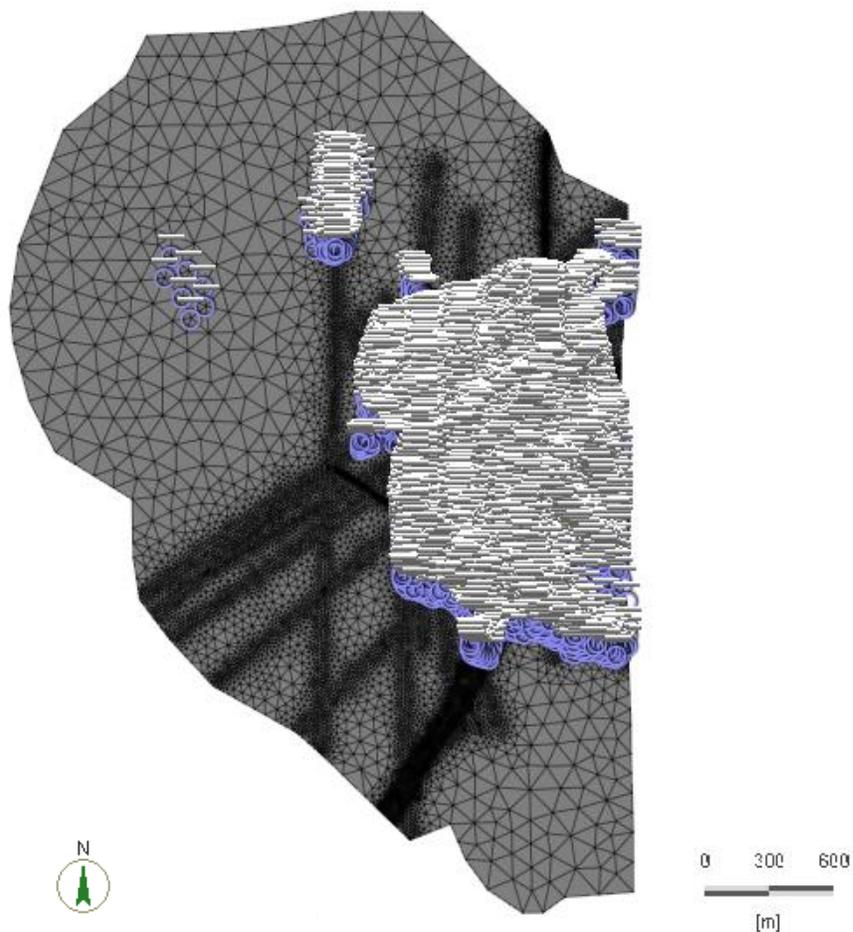


Figura 4.9: Condiciones de borde asociadas al rajo

En la figura se observan las áreas del rajo Dayton y Teck CDA con condiciones de seepage, las cuales fueron explicadas anteriormente.

Otra salida es la asociada al flujo natural de la cuenca y a las norias de agricultura. En ese caso no existe información suficiente para poder integrarlas al modelo. Además, según las estimaciones realizadas en el modelo conceptual, la salida no superaría los 10 l/s, lo cual es mucho menor que el caudal relacionado a los pozos de bombeo y afloramientos en rajos (66 l/s).

DEFINICIÓN DE CONDICIÓN INICIAL

El mecanismo de resolución del modelo es iterativo, y como tal necesita partir de una condición inicial. En este caso, la carga hidráulica inicial para cada nodo se obtuvo a partir de un modelo transitorio con la condición fija para el año 2005. Este modelo se hizo correr hasta la obtención de un balance de aguas inferior al 5%. El detalle de estos resultados se presenta en el Capítulo 5 de calibración.

CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA

En este caso se usó la configuración “*Free and movable*”, en la que la primera *slice* (borde de la capa) es libre y se mueve siguiendo la superficie freática.

En el caso de que la superficie freática decaiga por debajo de la primera capa, no solo la primera *slice* se moverá, sino que también las siguientes. Para cada tiempo simulado, las propiedades materiales de cada elemento son determinadas por la ubicación actual de cada capa computacional, es decir, si la superficie freática cae por debajo de la primera capa y llega a la segunda, la conductividad para esos elementos será la definida para la segunda capa.

CAPÍTULO 5

CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

5.1. METODOLOGÍA

Una vez construido el modelo numérico en base al modelo hidrogeológico conceptual, la etapa siguiente de desarrollo corresponde a la etapa de calibración. Esta consiste en la variación sistemática de ciertos parámetros del modelo con el objetivo de reproducir los niveles freáticos y las presiones de poro existentes en la realidad (SEA, 2012).

En general, para calibrar modelos numéricos de flujo se considera la conductividad hidráulica, la porosidad y el coeficiente de almacenamiento específico. En este caso sólo varió la conductividad hidráulica, los valores usados se mantuvieron entre los rangos especificados en el modelo conceptual manteniendo siempre una consistencia con la interpretación geológica. La distribución se realizó acorde a las unidades hidrogeológicas establecidas en el modelo conceptual.

La porosidad y el coeficiente de almacenamiento específico son análogos a la conductividad hidráulica, pero en este caso las pruebas de bombeo son poco representativas, por lo que es recomendable usar valores según la literatura. (SEA, 2012)

La etapa de calibración del modelo consideró lo siguiente:

- Calibración en régimen permanente: El objetivo fue desarrollar un modelo permanente que representara las condiciones naturales del sistema

hidrogeológico sin considerar variaciones temporales. La implementación de la calibración en régimen permanente verifica el modelo conceptual sin la complicación del comportamiento transitorio y permite condiciones de partida numéricamente estables para las simulaciones transitorias.

- Calibración en régimen transitorio: El objetivo fue ejecutar el modelo en condiciones transitorias con el fin de evaluar los parámetros transcientes tales como la presión de poros y los niveles freáticos.

A continuación se detalla el proceso de calibración tanto del modelo en régimen permanente como transitorio. Para el primero sólo se detallará el resultado final de la calibración debido a que esta se realizó en base a los resultados del modelo transitorio.

5.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO EN RÉGIMEN PERMANENTE

DESCRIPCIÓN DEL MODELO PERMANENTE

La zona de estudio ha mantenido actividades mineras, de distinta intensidad, desde tiempos históricos. La calibración en régimen permanente tiene como finalidad caracterizar las condiciones hidrogeológicas naturales previas a la actividad intensa del rajo Teck CDA.

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE LOS NIVELES DE AGUA EN RÉGIMEN PERMANENTE

La Figura 5.1 muestra la piezometría para el modelo en régimen permanente. En ella es posible observar como las curvas equipotenciales muestran una distribución compleja, disminuyendo en las cercanías del rajo. Se observa que la principal dirección de flujo en la zona de estudio es hacia el rajo, concentrando en este lugar las infiltraciones provenientes de la zona suroeste. Se observa además como los niveles varían a medida que se acercan a sectores de alta permeabilidad (Fallas).

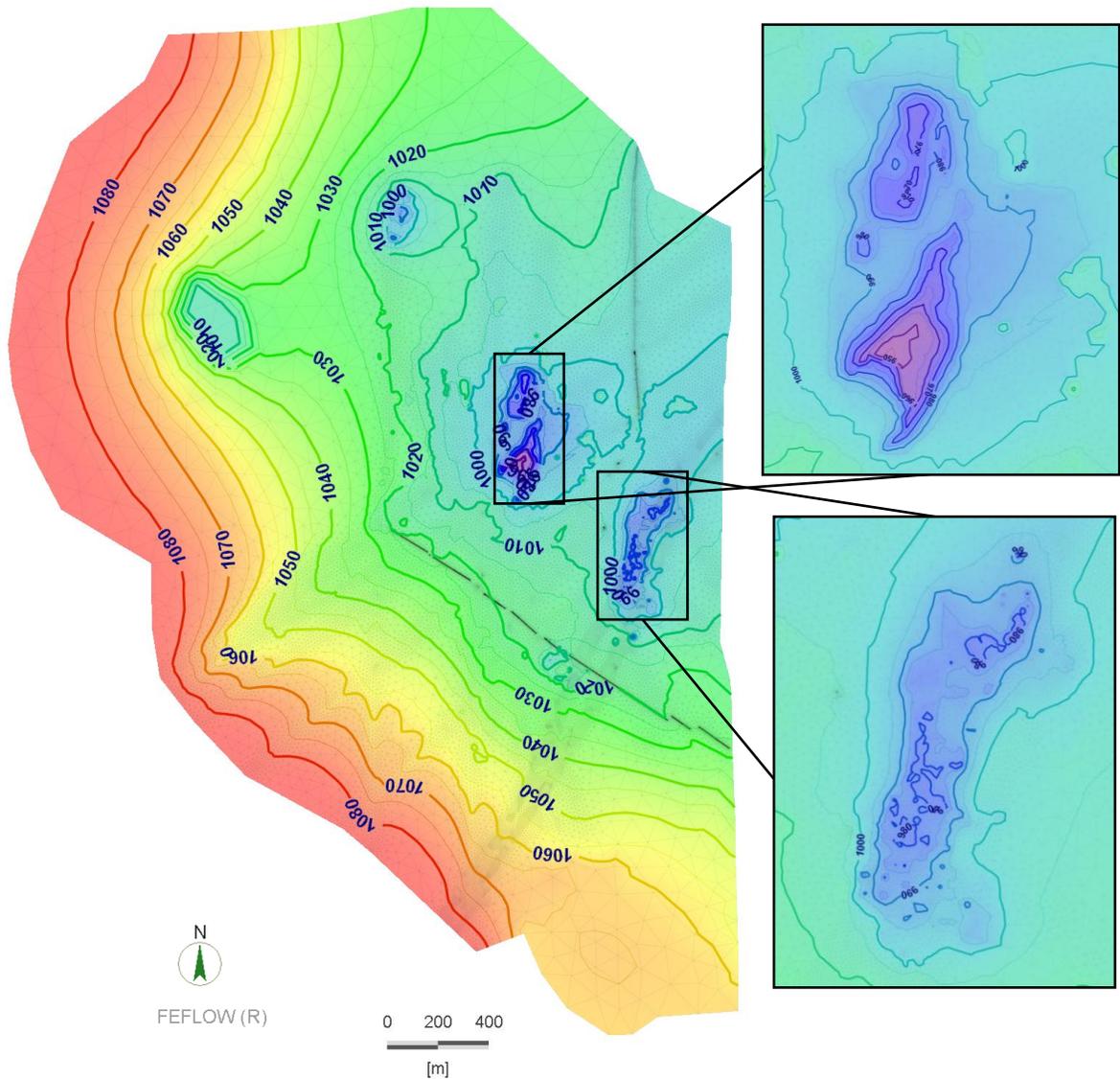


Figura 5.1: Piezometría en régimen permanente

La Figura 5.2 muestra una imagen en tres dimensiones de la superficie piezométrica del modelo numérico en régimen permanente, esta imagen presenta una exageración vertical de 1:3. En ella se observan las caídas abruptas de nivel piezométrico generadas por la presencia de barreras hidráulicas, estos cambios de nivel no superan los 3m. También se observa una ligera caída paulatina del nivel en las zonas de falla, debido a la alta permeabilidad que estas presentan. Los niveles varían entre los 1083m, en el borde oeste del modelo, hasta los 943m en el fondo del rajo.

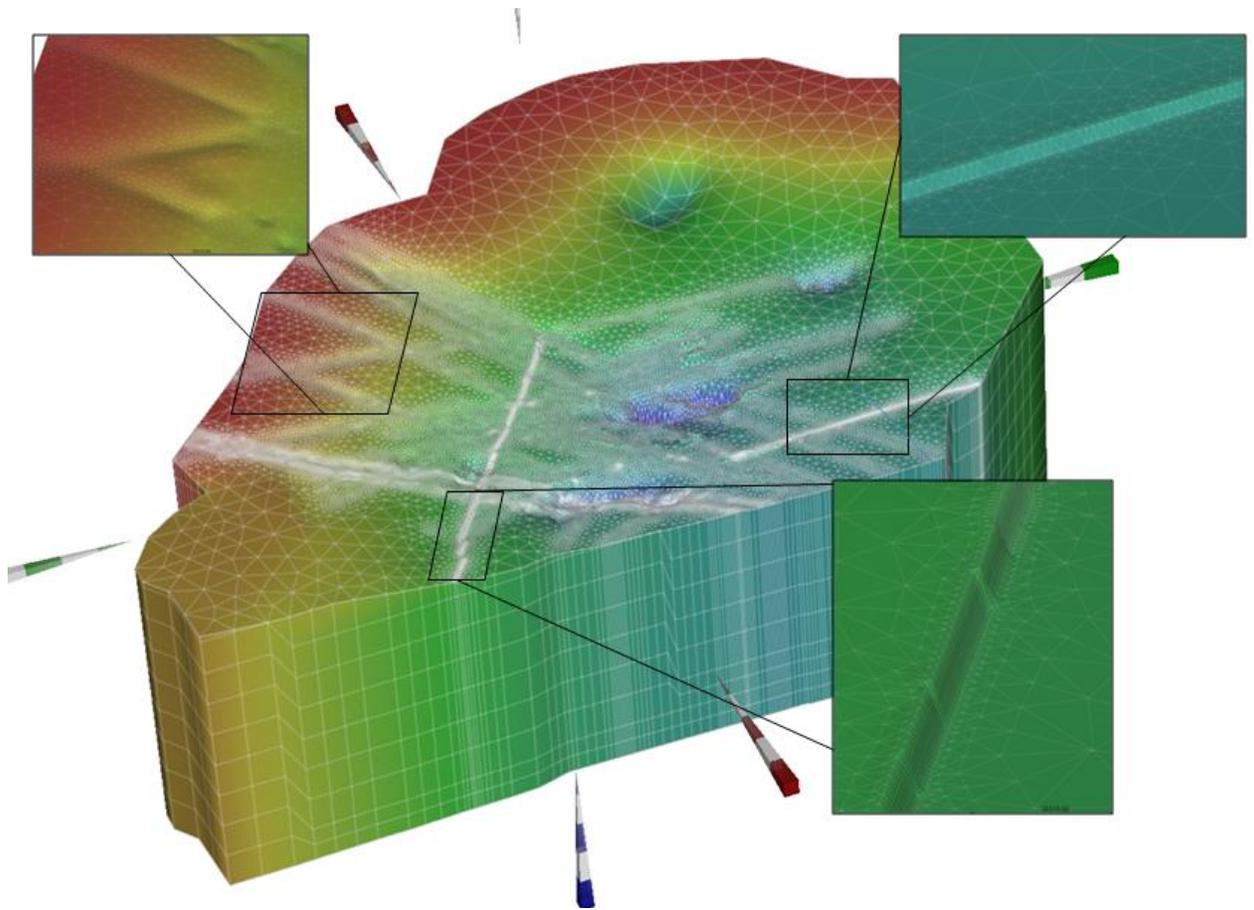


Figura 5.2: Modelo estacionario 3d para 2005.

VALIDACIÓN DE LA CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE

Para validar la simulación en régimen permanente se comparan los niveles de agua simulados con los monitoreados en terreno. Los primeros han sido obtenidos a partir de pozos de observación configurados en la profundidad de cada pozo. Para el 2005, sólo se tiene registro de dos pozos existentes en la zona de estudio, STN-07 y STN-09. Ambos pozos se ubican en la primera capa del modelo numérico, correspondiente a la UH0 de relleno sedimentario y acuífero freático. El grado de error, o residual, se calcula como el nivel de agua observado menos el nivel de agua modelado:

$$\text{Residual} = \text{Observado} - \text{Modelado}$$

Como criterio de aceptación para este modelo se usará el error cuadrático medio (RMS), el cual se calcula como el promedio de las diferencias al cuadrado entre los niveles de agua observados y modelados. En general, los modelos hidrogeológicos consideran válido un modelo con errores menores al 10%. Sin embargo, en la minería se suele considerar un error de dos bancos (20 m) como aceptable. La Tabla 5.1 presenta la comparación entre los niveles medidos y observados, con el respectivo cálculo del RMS.

Pozo	Nivel Medido (msnm)	Nivel Simulado (msnm)	Error Absoluto (m)
STN-07	1078.5	1076.72	1.78
STN-09	1022.05	1018.75	3.3
RMS: 2.65%			

Tabla 5.1: Cálculo de RMS para modelo permanente.

El modelo en régimen permanente presenta un error del 2.65%, considerándose válido. Es importante señalar que si bien el error es bajo, la información existente para el año 2005 es reducida. No existe información cercana al rajo, pudiendo existir en esa zona errores mayores.

Con respecto a la convergencia, el modelo en régimen permanente genera un error de balance de masa de 2.16% demostrando robustez y buena estabilidad.

Para la zona del rajo Dayton el modelo estima una salida de 0.46 l/s a modo de afloramientos superficiales. Para la zona del rajo Teck se estima una salida de 28.8 l/s. Por último, se considera una entrada natural de la cuenca de 29.9 l/s.

Al no tener registro de actividades agrícolas y de pequeña minería, los caudales extraídos en estas actividades quedan agrupados bajo las salidas producidas en los rajes. Por lo tanto, la salida correspondiente al rajo Teck CDA puede estar sobreestimada. La Figura 5.3 muestra el balance de agua para el modelo permanente.

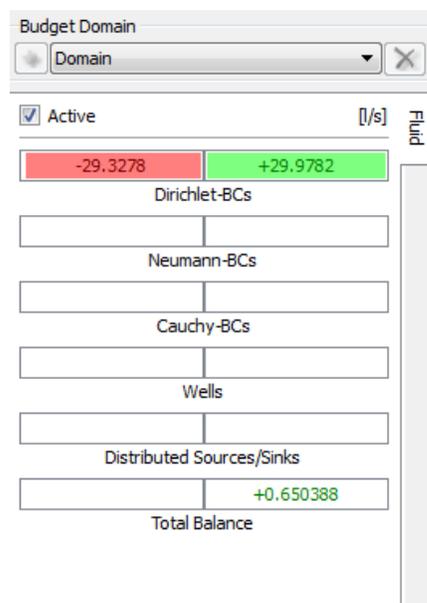


Figura 5.3: Balance de agua para modelo en régimen estacionario.

5.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO

DESCRIPCIÓN DEL MODELO TRANSITORIO

La finalidad de la calibración en régimen transitorio consiste principalmente en caracterizar las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, así como la variación histórica en el balance de aguas y la respuesta del sistema hidrogeológico en la zona de estudio. Se aplicaron entradas y salidas transitorias, las primeras están definidas principalmente por la estimación de las infiltraciones desde el depósito de relaves a través de fallas en profundidad, calculada en el modelo hidrogeológico conceptual. Las salidas ocurren en el sector del rajo, en forma de afloramientos en el rajo, y en los pozos de bombeo.

La calibración del modelo numérico en régimen transitorio presenta las siguientes características:

- La discretización temporal de la topografía corresponde, en general, a cada semestre del año calendario dentro del periodo 2005 – 2013, estas topografías fueron entregadas por Teck CDA en formato DXF.

- La tasa de entrada proveniente de las fallas se obtuvo a partir del modelo conceptual. Para inicios del 2010 se consideró un caudal de 0 l/s que fue aumentando paulatinamente hasta los 72 l/s que se estiman en para mediados de 2014.
- Las tasas de entrada por precipitación fueron obtenidas a partir del modelo conceptual. Se usó una discretización mensual entre 2005-2010 y una discretización diaria entre los años 2010 y 2013 obtenida a partir de la estación pluviométrica Tenencia Andacollo.
- Para la calibración se usaron los pozos presentados en la sección “Red de monitoreo hidrogeológico”. Los niveles en los pozos de observación se obtuvieron a través de mediciones manuales y *dívers*, dispositivos ubicados al interior del pozo que miden la columna de agua por sobre ellos, haciendo la transformación a nivel de agua.

La calibración consistió en un proceso iterativo en el que se obtuvieron los resultados de carga hidráulica para cada pozo de observación. Posteriormente, estos resultados se graficaron junto a los niveles medidos en terreno, se buscaron patrones de comportamiento entre los pozos que pertenecían a las mismas capas o unidades hidrogeológicas (Tabla 3.4 y Tabla 5.1) y a partir de esto se determinaron las variaciones en las conductividades hidráulicas a aplicar en el siguiente modelo.

Para casos en que la carga hidráulica simulada era mayor a la medida en terreno se procedía a aumentar la permeabilidad de la capa o de la unidad cuidando siempre de respetar la distribución de las unidades hidrogeológicas. En caso contrario se disminuía la permeabilidad, manteniendo la consistencia con el modelo hidrogeológico conceptual.

La Tabla 5.2 presenta las distintas capas del modelo y la ubicación del fondo de pozo o sensor. Esta tabla fue usada para facilitar la búsqueda de patrones de comportamiento hidráulico entre los pozos que se ubican en la misma capa.

Capa	Altura máx. capa (msnm)	Altura min capa (msnm)	Pozo
1	1085	1055	STN-9, PSTCN-5B, PSTCN-8B, STN-7
2	1055	1005	PHCDA-10A, PHCDA-9A, PZ-4, PZ-5, PHCDA-4A, PHM-5, PSTCN-3
3	1005	955	PHM-3, PHM-4, PHM-9, Pincli, PHM-1, PHCDA-3A, PHCDA-6A, PHCDA-5A
4	955	905	PHCDA-10B, PHCDA-8A, PHM-12P, PHCDA-9B, PHM-2, PHCDA-3B, PHM-8, PHCDA-7A, PHCDA4B, PHM-7, PHCDA-5B, PHM-6
5	905	855	PHCDA-8B, PHM-16, PHM-18, PHCDA-7B
6	855	805	PHCDA-10C, PHM-10, PHCDA-9C, PHCDA-6B, PHCDA-7C, PHM-11
7	805	755	PHCDA-10D, PHCDA-8C, PHM-15
8	755	705	PHM-14, PHCDA-6C
9	705	655	-

Tabla 5.2: Ubicación de fondo de pozos para cada capa del modelo.

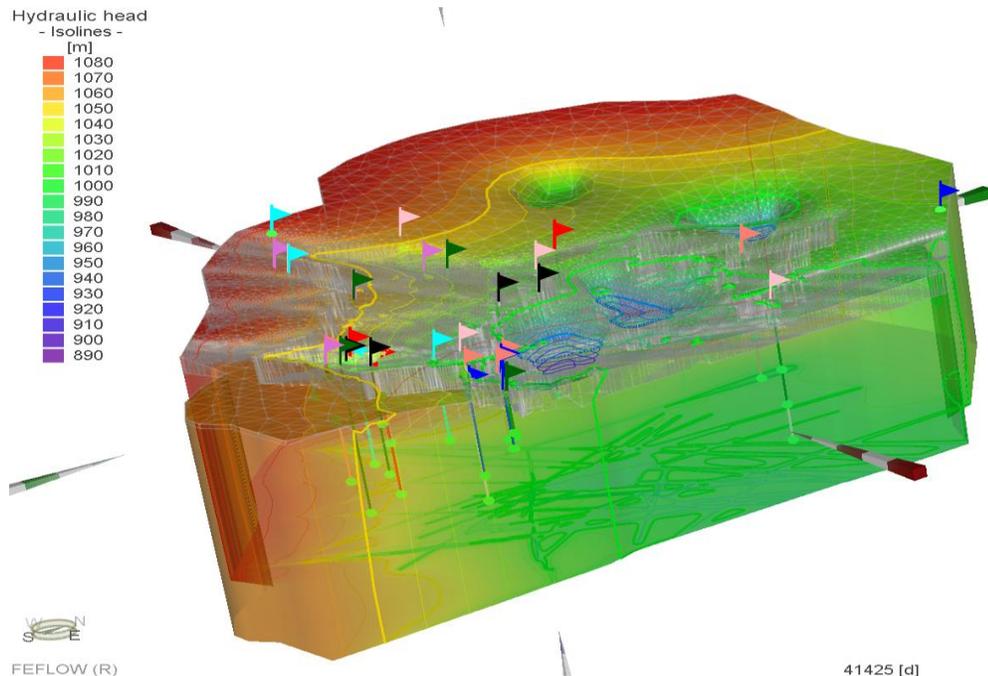


Figura 5.4: Distribución de los pozos de monitoreo en el modelo 3D.

La Figura 5.4 muestra la ubicación de los pozos de observación en el modelo 3D para mayo del 2013. El círculo verde representa la profundidad en la que se encuentran las cribas, en el fondo de pozo, o la profundidad a la que están colocados los sensores de cuerdas vibrantes.. No fueron agregados los nombres de cada punto de observación para no saturar la imagen. Además, la imagen muestra las isocargas para la carga hidráulica. El modelo presenta una exageración vertical de 1:3.

5.4. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

En esta sección se describen las conductividades hidráulicas finales resultantes del proceso de calibración. El análisis y la explicación de los cambios realizados al modelo hidrogeológico se detallan más adelante en este capítulo.

El almacenamiento específico y la porosidad efectiva se mantuvieron con los valores iniciales para cada unidad hidrogeológica (Tabla 4.1). A continuación se presenta el detalle de los resultados de la calibración por capa:

CAPA 1

En un principio la conductividad hidráulica para la UH0 en la primera capa es $3.19E-07$ m/s, finalmente tras la calibración se le asigna el valor de $1E-08$ m/s. La Figura 5.5 muestra la conductividad para la primera capa.

Es importante señalar que al momento de correr el modelo numérico la mayor parte de la superficie freática no considera la primera capa. Debido al uso de la opción “Free and movable” la *slice*, que sigue la superficie freática, desciende y considera las propiedades hidráulicas de la segunda capa. Sólo en la zona oeste, más alejada del rajo, se mantiene la primera capa activa.

Este sector no está afectado por las tronaduras y, por lo tanto, presenta una conductividad menor a la asignada inicialmente.

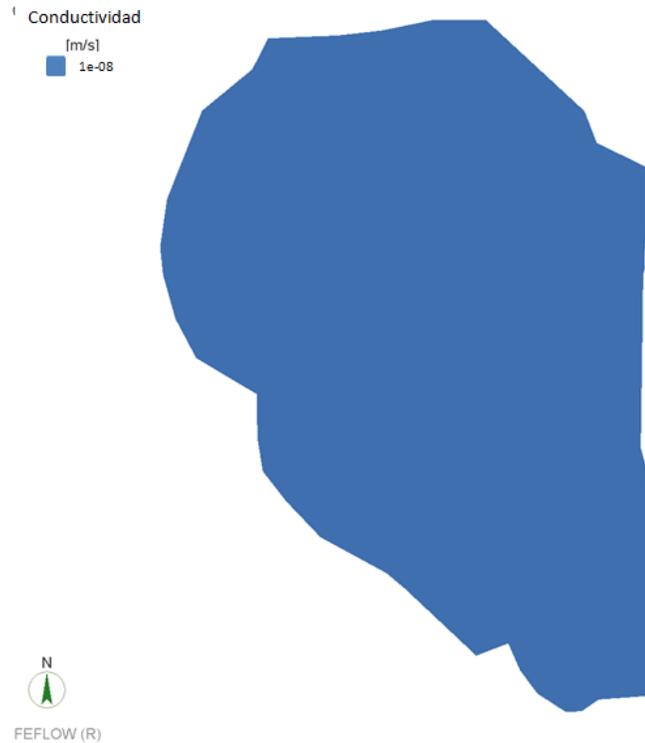


Figura 5.5: Distribución espacial de conductividad hidráulica para la primera capa del modelo.

CAPA 2

La segunda capa está definida entre los 1005 y los 1055 msnm. La Tabla 5.3 presenta las conductividades hidráulicas estimadas a través de la calibración.

UH	Conductividad Hidráulica (m/s)
UH0	3.19E-08
UH1	2.36E-09
UH2	1.30E-09
UH3	2.10E-09
UH4	1.92E-10
UH6ab	5.00E-06

Tabla 5.3: Conductividades Hidráulicas para la segunda capa del modelo.

La Figura 5.6 muestra la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas. En este caso UH0, en amarillo, está cerca del área de tronadura por lo que se ha asignado una permeabilidad mayor a la asignada en la primera capa (3.19E-08 m/s).

Para las unidades UH0, UH1, UH3 y UH4 las conductividades hidráulicas se redujeron en factor diez con respecto a las asignadas inicialmente. Esta fue la primera variación que se realizó en el modelo con el objetivo de producir un aumento general en las cargas hidráulicas.

La UH6ab, en rojo, corresponde a la Falla el Churque. A esta se le asignó una conductividad hidráulica de $5E-06$ m/s, aumentando su permeabilidad en factor diez con respecto a las fallas modeladas a través de *discrete features*.

Para las barreras hidráulicas, en negro, se consideró una conductividad de $5.04E-10$ m/s.

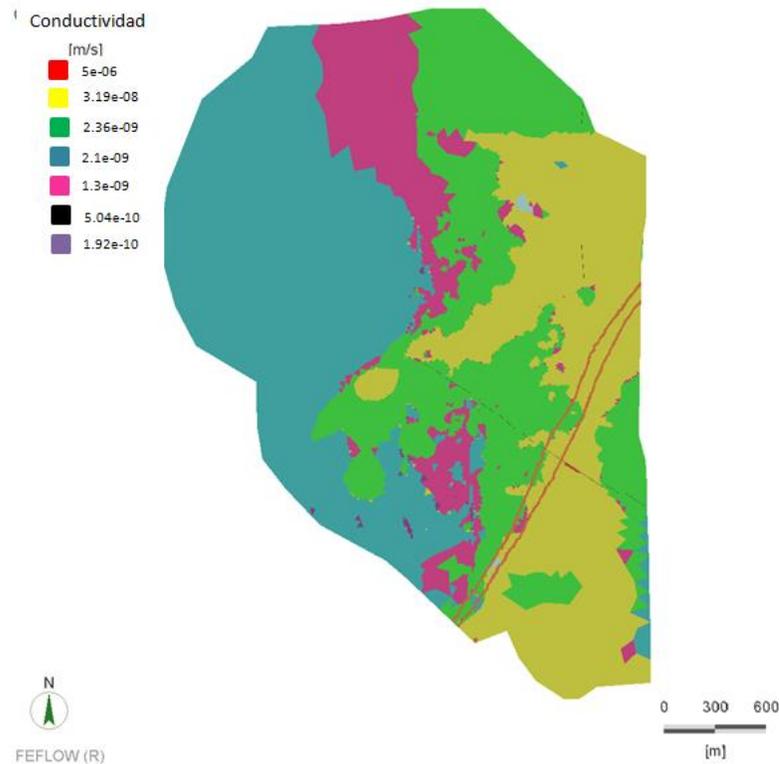


Figura 5.6: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la segunda capa del modelo.

CAPA 3

La tercera está definida entre los 955 y los 1005 msnm. En un principio las conductividades hidráulicas de este sector fueron reducidas en factor diez al igual que en la segunda capa. Sin embargo, por medio del análisis en las respuestas hidráulicas

en los puntos de observación PHCDA-6A, PHCDA10B y PHCDA-8A se decidió retomar los valores de permeabilidad inicial. Sólo la UH4 mantuvo una reducción de su conductividad hidráulica debido a las respuestas de los sensores PHCDA-3B y PHCDA.4B.

Se asignó una conductividad hidráulica de $5.00E-06$ m/s a la Falla Churque y $5.04E-10$ a las barreras hidráulicas en la Falla Hermosa y Falla Carmen.

La Tabla 5.4 presenta la configuración final de la calibración para esta capa. La Figura 5.7 muestra la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas.

UH	Conductividad Hidráulica (m/s)
UH1	2.36E-08
UH2	1.30E-09
UH3	2.10E-08
UH4	1.92E-10
UH6ab	5.00E-06

Tabla 5.4: Conductividades hidráulica para la tercera capa del modelo.

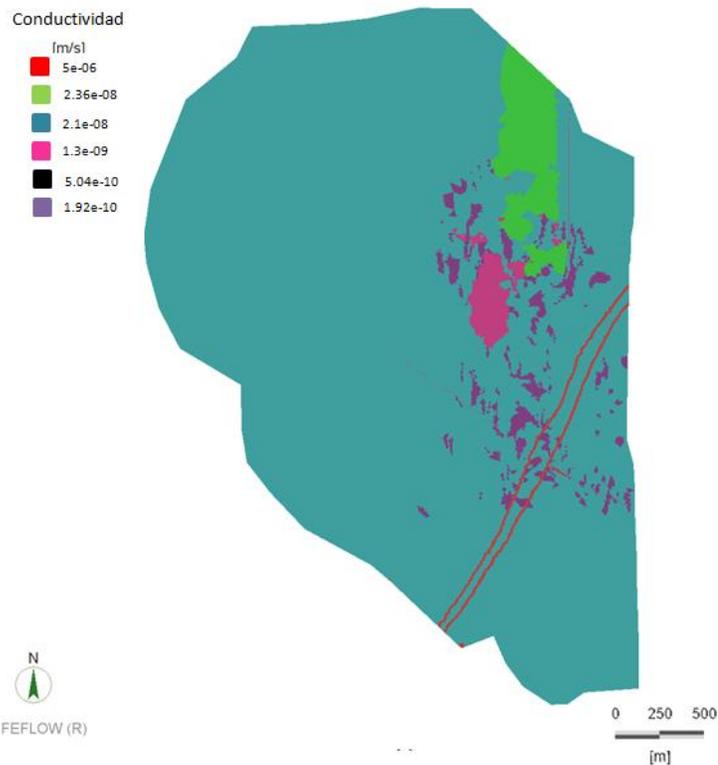


Figura 5.7: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la tercera capa del modelo.

CAPA 4

La cuarta capa está definida ente los 905 y 955 msnm. A partir del análisis de los puntos de observación PHM-2 y PHM-8, se decidió disminuir la carga hidráulica de toda la capa aumentando las permeabilidades en factor 2. Posteriormente, se disminuyeron las permeabilidades de las capas UH1 y UH3 en factor 10, buscando obtener reacciones en los sensores PHCDA-7A, PHCDA-5B y PHCDA-8B.

Se asignó una conductividad hidráulica de $5.00E-06$ m/s a la Falla Churque y $5.04E-10$ a las barreras hidráulicas en la Falla Hermosa y Falla Carmen. La Tabla 5.5 presenta la configuración final de la calibración para esta capa. La Figura 5.8 muestra la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas.

UH	Conductividad Hidráulica (m/s)
UH1	4.70E-09
UH2	2.60E-09
UH3	4.20E-09
UH4	3.80E-09
UH6ab	5.00E-05

Tabla 5.5: Conductividades Hidráulicas para la cuarta capa del modelo.

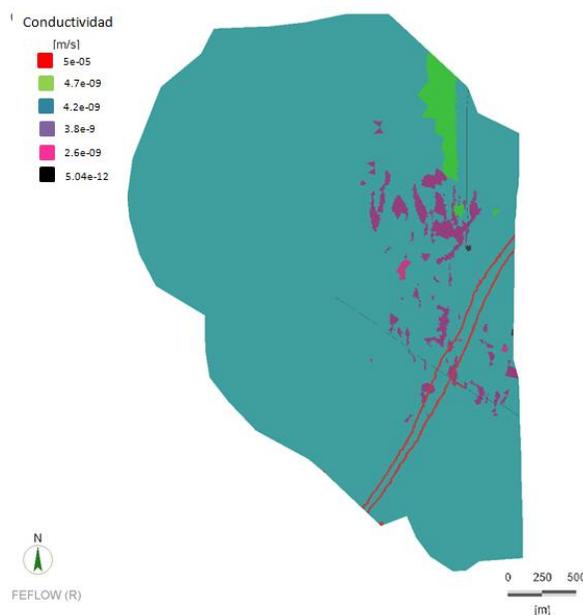


Figura 5.8: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la cuarta capa del modelo.

CAPA 5

La quinta capa está definida entre los 855 y los 905 msnm. La conductividad hidráulica de las unidades UH1 y UH4, con poca presencia en la capa cinco, fueron aumentadas. La permeabilidad de la UH3 fue reducida en consideración al aumento de la profundidad, las respuestas a estas variaciones se midieron a través del sensor PHCDA-8B.

Se generó una zona de daño alrededor de las fallas, de 10m de potencia, con conductividades hidráulicas de $8E-07$ m/s para simular una mayor incidencia de las estructuras en la zona. Para la Falla Churque se mantuvo la conductividad de $5.00E-05$ m/s. La Tabla 5.6 presenta la configuración final de la calibración para esta capa. La Figura 5.9 muestra la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas.

UH	Conductividad Hidráulica (m/s)
UH1	1.18E-07
UH3	1.00E-09
UH4	9.60E-09
UH5	5.04E-12
UH6ab	8.00E-07

Tabla 5.6: Conductividades hidráulicas para la quinta capa del modelo.

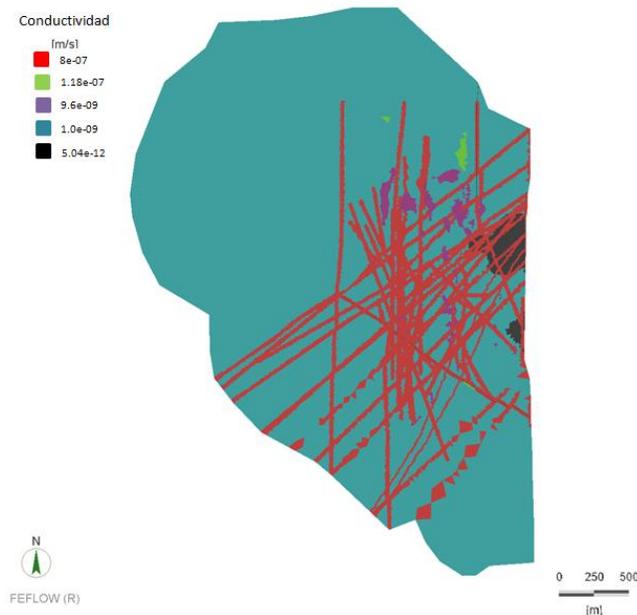


Figura 5.9: Distribución espacial de las conductividades hidráulicas para la quinta capa del modelo.

CAPA 6

La sexta capa está definida entre los 805 msnm y los 855 msnm. En esta capa la unidad UH5, correspondiente al basamento, empieza a tomar mayor relevancia. Su calibración se basó en las respuestas obtenidas a través del sensor PHCDA-10C.

Los valores de conductividad hidráulica asignados son los mismos que los usados en la quinta capa. Se generó una zona de daño alrededor de las fallas, asignándoles la conductividad correspondiente a la UH6ab. Esta se definió a través de las respuestas observadas en los pozos PHM-10 y PHM-11.

Para la Falla Churque se mantuvo la conductividad de $5.00E-05$ m/s. La Tabla 5.7 presenta la configuración final de la calibración para esta capa. La Figura 5.10 muestra la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas.

UH	Conductividad Hidráulica (m/s)
UH3	1.00E-09
UH4	9.60E-09
UH5	5.04E-12
U6ab	8.00E-07

Tabla 5.7: Conductividades hidráulicas para la sexta capa del modelo.



Figura 5.10: Distribución espacial de las conductividades hidráulicas en la sexta capa del modelo.

CAPA 7

Definida entre los 755 msnm y los 805msnm, es la última de las capas que se encuentran por sobre el techo de sulfato. A esta profundidad la unidad de basamento UH5 es dominante. En esta capa se realizaron pocas modificaciones durante la calibración. Las unidades UH3, UH4 y UH5 mantuvieron los valores configurados inicialmente. Solo se agregó la permeabilidad correspondiente a la Falla Churque $5.00E-05$ m/s. La Tabla 5.8 presenta la configuración final de la calibración para esta capa. La Figura 5.11 muestra la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas.

UH	Conductividad Hidráulica (m/s)
UH3	2.10E-08
UH4	1.92E-09
UH5	5.04E-12
U6ab	5.00E-05

Tabla 5.8: Conductividades hidráulicas para la séptima capa del modelo.

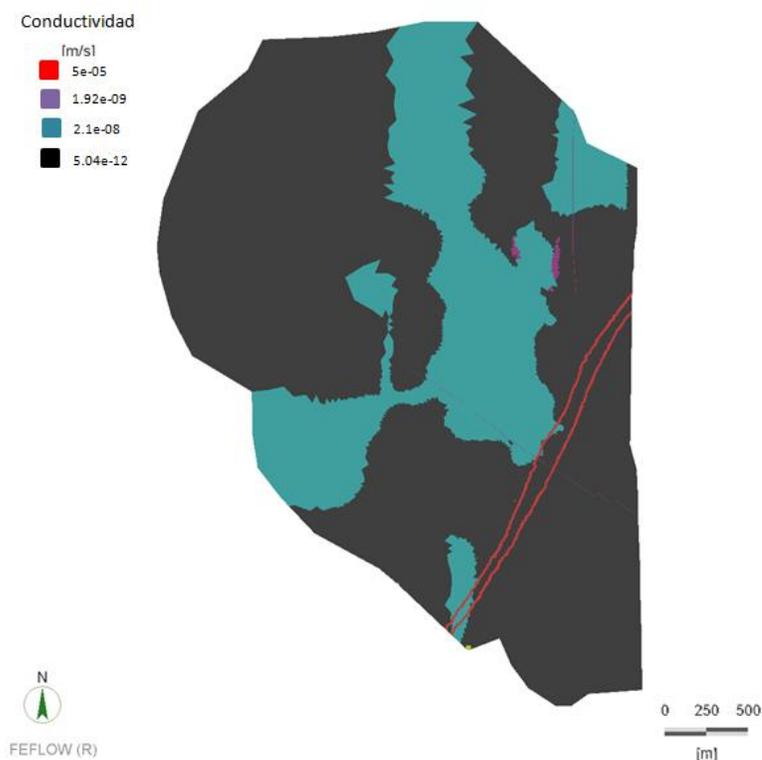


Figura 5.11: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la séptima capa del modelo.

CAPAS 8 Y 9

Estas dos últimas capas se encuentran por debajo del techo de sulfato. Se mantienen las conductividades hidráulicas asignadas inicialmente para las unidades UH3, UH4 y UH5.

Para la Falla Churque, correspondiente a la unidad UH6ab, la conductividad hidráulica se disminuyó en factor diez debido a la profundidad y a la acción del techo de sulfato sobre la roca. La Tabla 5.9 presenta la configuración final de la calibración para esta capa. La Figura 5.12 muestra la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas.

UH	Conductividad Hidráulica (m/s)
UH3	2.10E-08
UH4	1.92E-09
UH5	5.04E-12
U6ab	5.00E-05

Tabla 5.9: Conductividades hidráulicas para capas ocho y nueve.

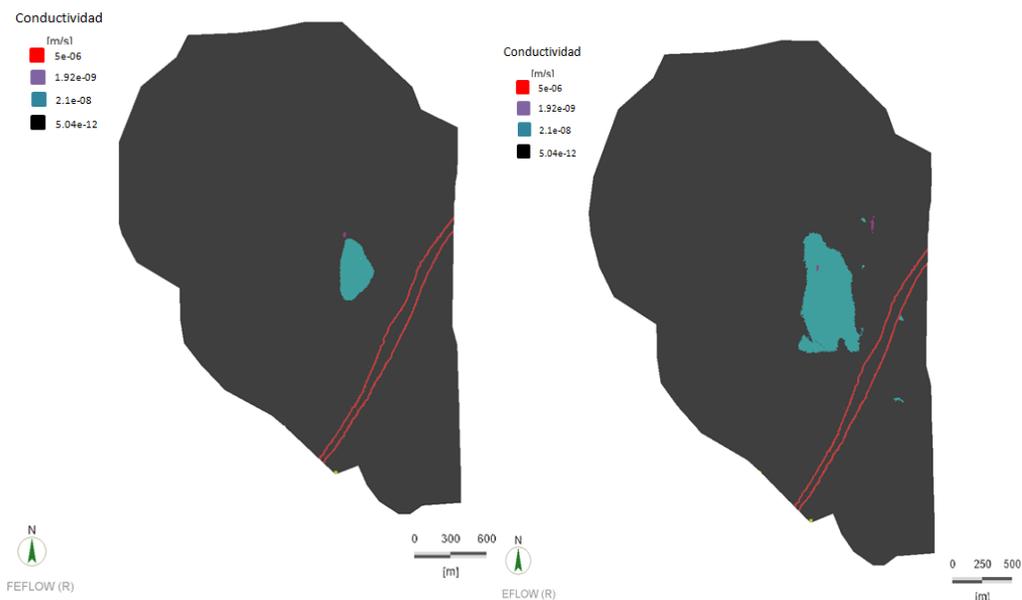


Figura 5.12: Distribución espacial de conductividades hidráulicas para la capa 8 (izquierda) y capa 9 (derecha).

5.5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Para considerar una calibración como válida es necesario hacer análisis cuantitativos y cualitativos de los resultados del modelo. Ambas evaluaciones son necesarias puesto que independiente de la magnitud del error es importante que el modelo refleje las tendencias observadas. (SEA, 2012)

El análisis cuantitativo consideró los pozos de monitoreo y cuerdas vibrantes. Los pozos de bombeo fueron excluidos del análisis debido a la alta variabilidad en sus mediciones. Sin embargo, fueron considerados en el análisis cualitativo. El Anexo B presenta hidrogramas para todos los pozos con los niveles medidos en terreno y los niveles simulados.

ANÁLISIS CUANTITATIVO

Para el análisis cuantitativo de la calibración se analizaron los resultados de los hidrogramas para todos los pozos de la zona y se calculó el error cuadrático medio normalizado (NRMS) para todo el modelo, con fecha mayo del 2013. Se eligió esta fecha debido a que era el mes en el existían más datos.

Los sensores PHCDA3-B y PHCDA4B no fueron considerados al momento del análisis cuantitativo pues no existían datos para la fecha a evaluar. Los pozos Pincli y los sensores PHCDA-6B y PHCDA-8B se excluyeron debido su inestabilidad, hecho que queda evidenciado en los hidrogramas donde se puede observar la presencia de cambios abruptos en la tendencia sin una explicación hidrogeológica.

La mayor parte de los modelos numéricos hidrogeológicos se consideran validos al presentar errores menores al 10%. Sin embargo, en minería se considera como criterio de aceptación de entre uno a dos bancos, es decir, un alrededor de 30m. La Tabla 5.10 presenta los datos usados para calcular el error cuadrático medio. Se presenta el nombre del pozo, el nivel medido en mayo 2013, el nivel simulado para esa fecha y el error absoluto. Al final de la tabla se presenta el NRMS para el modelo, el cual es de 15.5%.

Calibración para mayo 2013							
Pozo	Nivel Medido (msnm)	Nivel Simulado (msnm)	Error Absoluto (m)	Pozo	Nivel Medido (msnm)	Nivel Simulado (msnm)	Error Absoluto (m)
PZ-4	1034.97	1027.37	-7.60	PHCDA-4A	998.80	1008.43	9.63
PZ-5	1056.92	1071.72	14.80	PHCDA-5A	1006.98	1012.62	5.64
PSTCN-3	1056.79	1050.88	-5.91	PHCDA-5B	993.61	1010.74	17.12
PSTCN-8B	1038.62	1014.88	-23.74	PHCDA-6A	991.87	1042.64	50.76
PSTCN-5B	1043.00	1040.07	-2.93	PHCDA-6C	1010.74	1046.90	36.15
STN-07	1076.29	1075.30	-0.99	PHCDA-7A	996.34	1063.64	67.30
STN-09	1022.55	1017.93	-4.62	PHCDA-7B	987.99	1063.11	75.12
PHM-1	947.42	982.70	35.28	PHCDA-7C	986.33	1061.92	75.59
PHM-4	1006.74	1007.77	1.03	PHCDA-8A	952.19	998.34	46.16
PHM-5	1049.89	1022.45	-27.44	PHCDA-8B	933.45	998.30	64.85
PHM-6	1047.53	1020.13	-27.40	PHCDA-9A	975.03	1007.69	32.66
PHM-7	1022.34	1005.75	-16.59	PHCDA-9B	972.52	1008.03	35.51
PHM-9	1010.16	1012.30	2.14	PHCDA-9C	1039.69	1009.64	-30.05
PHM-11	986.10	1003.73	17.63	PHCDA-10A	1017.80	992.31	-25.49
PHM-12P	1042.57	1036.22	-6.35	PHCDA-10B	1004.99	989.97	-15.02
PHM-15	976.80	1011.49	34.69	PHCDA-10C	991.99	990.36	-1.63
PHCDA-3A	934.65	991.04	56.38				
NRMS: 15.2%							

Tabla 5.10: Análisis cuantitativo de error para el modelo numérico

Considerando sólo los pozos de mayor interés, es decir, aquellos ubicados en la zona sur del modelo y en las cercanías del rajo, se tiene un NRMS de 12.47%. La Tabla 5.11 presenta los pozos y las mediciones usadas para el cálculo de este error.

Pozo	Nivel Medido (msnm)	Nivel Observado (msnm)	Error Absoluto (m)
PZ-4	1034.97	1027.37	7.60
PSTCN-8B	1038.62	1014.88	23.74
PSTCN-5B	1043.00	1040.07	2.93
PHM-1	947.42	982.70	35.28
PHM-4	1006.74	1007.77	1.03
PHM-9	1010.16	1012.30	2.14
PHM-12P	1042.57	1036.22	6.35
PHM-15	976.80	1011.49	34.69
PHCDA-3A	934.65	991.04	56.38
PHCDA-9A	975.03	1007.69	32.66
PHCDA-9B	972.52	1008.03	35.51
PHCDA-9C	1039.69	1009.64	30.05
NRMS: 12.48%			

Tabla 5.11: Error cuadrático medio normalizado para la zona de interés.

Si se consideran solo los pozos de monitoreo el NRMS baja a 8.46%. La Tabla 5.12 presenta el cálculo para del NRMS.

Pozo	Nivel Medido (msnm)	Nivel Observado (msnm)	Error Absoluto (m)
PZ-4	1034.97	1027.37	7.60
PSTCN-8B	1038.62	1014.88	23.74
PSTCN-5B	1043.00	1040.07	2.93
PHM-1	947.42	982.70	-35.28
PHM-4	1006.74	1007.77	-1.03
PHM-9	1010.16	1012.30	-2.14
PHM-12P	1042.57	1036.22	6.35
PHM-15	976.80	1011.49	-34.69
NRMS: 8.75%			

Tabla 5.12: Error cuadrático medio para los pozos de monitoreo presentes en la zona de interés.

ANÁLISIS CUALITATIVO

El análisis cualitativo de la calibración consiste en analizar los resultados de los hidrogramas y determinar si las tendencias existentes en los niveles medidos son consistentes con las tendencias simuladas en el modelo numérico.

El periodo de análisis comprendió desde junio del 2005 hasta septiembre del 2013, fecha de la última actualización de los datos por parte de Teck CDA. En el Anexo B se presentan los hidrogramas con los niveles medidos y simulados para todos los pozos. La Tabla 5.13 presenta el resultado del análisis para cada pozo.

Pozo	Cumple la tendencia	No cumple tendencia	Pozo	Cumple la tendencia	No cumple tendencia
PZ-4	X		PHCDA-3A	X	
PZ-5	X		PHCDA-3B		X
PSTCN-3	X		PHCDA-4A	X	
PSTCN-8B		X	PHCDA-4B		X
PSTCN-5B	X		PHCDA-5A	X	
STN-07	X		PHCDA-5B	X	
PHM-1	X		PHCDA-6A	X	
PHB-2	X		PHCDA-6B		X
PHB-3		X	PHCDA-6C		X
PHM-4	X		PHCDA-7A		X
PHM-5	X		PHCDA-7B		X
PHM-6	X		PHCDA-7C		X
PHM-7	X		PHCDA-8A	X	
PHB-8	X		PHCDA-8B		X
PHM-9		X	PHCDA-8C		X
PHB-10		X	PHCDA-9A		X
PHM-11	X		PHCDA-9B		X
PHM-12P	X		PHCDA-9D		X
PHB-14		X	PHCDA-10A		X
PHM-15	X		PHCDA-10B		X
PHB-16		X	PHCDA-10C		X
PHB-18		X	PHCDA-10D		X

Tabla 5.13: Resultados de análisis cualitativo para cada pozo.

En general, se observa que tanto los pozos de monitoreo como de bombeo cumplen con las tendencias observadas en terreno. Sin embargo, los piezómetros de cuerda vibrante no presentan buenos resultados cualitativos ni cuantitativos. En la siguiente sección se realiza un análisis en detalle de los resultados de la calibración.

5.6. ANÁLISIS Y DISCUSIONES PARA LA CALIBRACIÓN

Para el análisis de la calibración los pozos fueron divididos en tres zonas. Zona norte, zona oeste y zona sur. A continuación se presenta el análisis de la calibración para cada zona:

ZONA NORTE

La zona norte está compuesta por los pozos STN-09, PHCDA-8 y PHCDA-10. La Figura 5.13 muestra, dentro de un rectángulo en rojo, los pozos pertenecientes a la zona norte.

El pozo STN-09 presenta un error cuantitativo menor a 5 m y cumple con la tendencia de niveles medidos en terreno. Por otro lado, los pozos de cuerda vibrante PHCDA-8 y PHCDA-10 no presentan buenos resultados para el análisis cualitativo y cuantitativo.

Los dos primeros sensores del pozo PHCDA-8 y los tres primeros del PHCDA-10 están relacionados al drenaje somero del rajo, estos ocurren principalmente en las zonas de alta permeabilidad (UH6). En el modelo, los sensores no están exactamente ubicados en el lugar de la falla pues estas últimas fueron modeladas de manera vertical, de esta forma los sensores se ubican en zonas de baja permeabilidad en donde, si bien existe drenaje, la conductividad es tan baja que la despresurización ocurre en el largo plazo.

Los sensores profundos para los pozos PHCDA-8 y PHCDA-10 se encuentran en la unidad hidrogeológica UH5, la cual presenta conductividades de $5.04E-12$ m/s, esta

baja permeabilidad hace que el medio tarde mucho tiempo en estabilizarse, por lo que estos sensores no fueron considerados en el análisis cuantitativo.

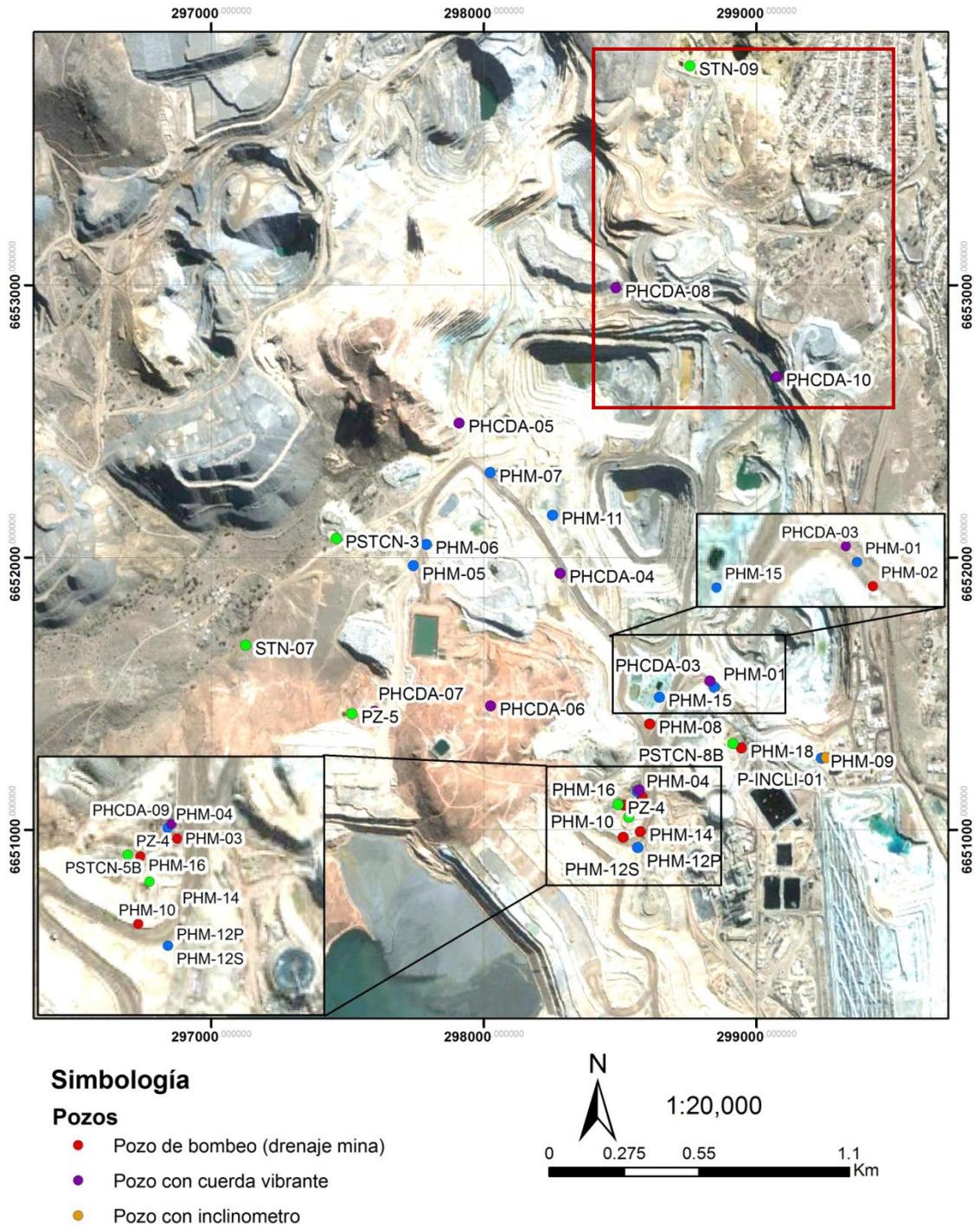


Figura 5.13: Pozos ubicados en la zona norte

ZONA OESTE

La zona oeste está conformada por los pozos de cuerda vibrante PHCDA-04, PHCDA-05, PHCDA-06 y PHCDA-07, Los pozos de monitoreo PHM-05, PHM-06, PHM-07 y PHM-11 y los pozos de medio ambiente PSTCN-03, STN-07 y PZ-5. La Figura 5.14 muestra la ubicación de los pozos pertenecientes a la zona oeste.

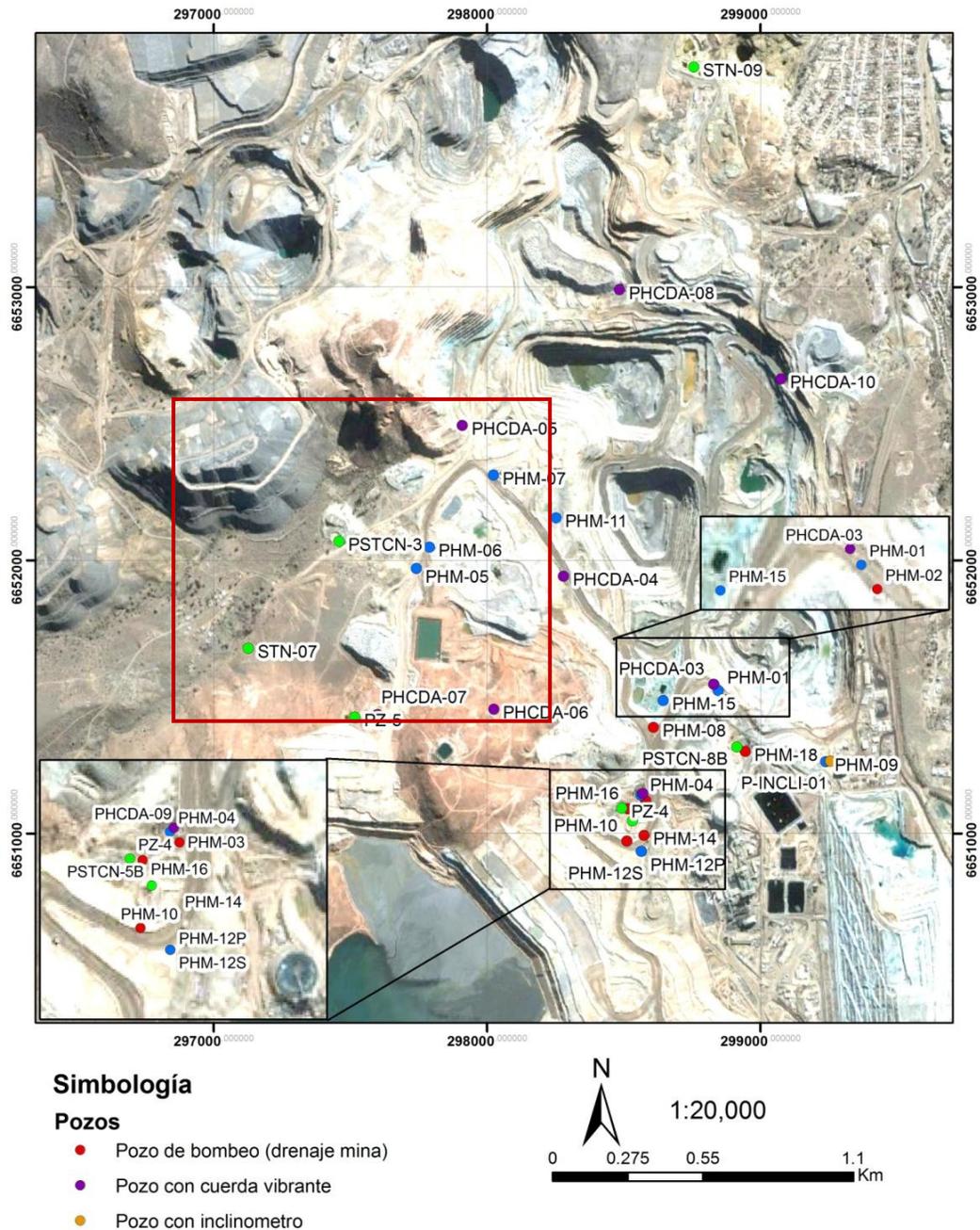


Figura 5.14: Pozos Ubicados en la zona oeste.

Los pozos de monitoreo pertenecientes al área de medio ambiente y ubicados en la Quebrada El Toro, STN-07 y PSTCN-3, presentan buenas calibraciones tanto cuantitativas como cualitativas, con errores de 0.99 m y 5.91 m respectivamente.

Si bien el pozo PZ-5 presenta un error absoluto de hasta 15 m, el hidrograma muestra que la tendencia en los niveles piezométricos se mantiene constante tanto para los niveles medidos como simulados.

Los pozos de monitoreo de drenaje y despresurización mina PHM-05, PHM-06 y PHM-07 presentan diferencias entre los niveles simulados y reales de hasta 27 m, y siguen la tendencia de descensos constantes relacionados al drenaje del rajo.

En el caso del pozo PHM-11 se observan similitudes entre las tendencias de descenso para los niveles simulados y medidos en terreno. Estas se encuentran desfasadas en tiempo y podrían deberse a un error en las fechas de inicio del bombeo. Además, el aumento de la tasa de descenso para mediados de 2013 podría deberse al aumento del drenaje en la mina gracias a la acción de los pozos PHB-10 y PHB-16.

En general, los piezómetros de cuerda vibrante existentes en este sector presentan bajas reacciones al drenaje y despresurización de la zona de estudio. Para el pozo PHCDA-4, la tendencia mostrada por el sensor A es similar a las cargas hidráulicas simuladas en el modelo numérico, separándose de los valores reales en aproximadamente en 10 m. Por otro lado, en el caso del sensor B la carga hidráulica simulada no presenta la misma tasa de descenso que la real, esto podría deberse a que, en el modelo, el sensor se encuentra en zonas de permeabilidad menores a las reales debido a que el sensor para la simulación no se encuentra exactamente en la zona de falla.

A diferencia de la realidad, la carga hidráulica simulada para los sensores A y B del piezómetro de cuerda vibrante PHCDA-5 no presentan una marcada diferencia de nivel cercana a los 10 m. Sin embargo, las cargas hidráulicas simuladas siguen la tendencia y presentan un descenso al final de la calibración producido por el drenaje del rajo.

Según el análisis cuantitativo, el piezómetro de cuerda vibrante PHCDA-6 presenta errores altos que alcanzan los 50 m. Sin embargo, cualitativamente es posible observar una tendencia ligeramente similar a los datos medidos en terreno. El sensor C muestra cargas hidráulicas mayores que los sensores más someros, evidenciando confinamiento en profundidad. Los sensores A y B muestran descensos relacionados con el drenaje del rajo.

El piezómetro de cuerda vibrante PHCDA-7 tiene un comportamiento similar a los pozos PHCDA-8 y PHCDA-10, en los que si bien existe drenaje en sectores localizados muy permeables, la roca caja de muy baja permeabilidad no permite una despresurización simultánea al drenaje.

ZONA SUR

Los niveles simulados para el pozo PSTCN-8B no siguen la tendencia real, la cual permanece relativamente constante en el tiempo, con valores cercanos a los 1040 msnm. Este pozo se encuentra a aproximadamente 40 m del PHB-18. Sin embargo, en la realidad pareciera no verse afectado por el bombeo de este. En cambio, en la simulación, los niveles si se ven afectados por el pozo de bombeo, mostrando un descenso de hasta 40 m.

Los niveles simulados en el pozo PHB-18 presentan una reacción mucho más sensible a los bombeos realizados en el pozo. Sin embargo es posible observar tendencias referentes a los cambios en la tasa de bombeos.

El pozo PINCLI no fue incluido en los análisis debido a que presenta datos inestables, esto puede deberse a que este pozo fue construido hace relativamente poco tiempo y no se ha estabilizado. El pozo PHM-09 presenta bajos errores cuantitativos y cualitativos. Presentando ligeras variaciones en la tendencia.

El pozo PHM-1 monitorea el pozo de bombeo PHM-02. Si bien cuantitativamente ambos pozos se encuentran fuera de rango, presentan tendencias muy similares entre

los niveles medidos y observados, registrando de buena manera las diferencias en las tasas de bombeo para PHM-02.

Si bien el pozo de monitoreo PHM-1 se encuentra más cerca del pozo de bombeo PHB-2, el piezómetro de cuerda vibrante PHCDA-3 presenta una mayor reacción en profundidad. Esto se explica debido a la anisotropía en profundidad generada por las estructuras.

Numéricamente es muy difícil lograr una modelación a este nivel de detalle, es por esto que, en el modelo, el sensor profundo del piezómetro de cuerda vibrante PHCDA-3 registra la tendencia somera y no presenta reacción ante el drenaje en profundidad.

Los niveles simulados en el pozo PHB-08 siguen de buena forma las tendencias observadas en la realidad, mostrando la reacción debido a la variación de las tasas de bombeo.

Los niveles simulados para el pozo de monitoreo PSTCN- 5B siguen la tendencia observada en los niveles medidos en terreno.

Las cargas hidráulicas simuladas para el pozo PHM-12 presentan bajos errores cuantitativos. En la realidad, este pozo presenta una desconexión respecto a los pozos cercano, esto se concluye a partir de los hidrogramas, en los que se observa una tendencia a mantener niveles constantes a pesar de los bombeos que se generan en los pozos del sector. Por el contrario, en el modelo si se presentan variaciones, estas lograron atenuarse a través de ajustes en la conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas. Finalmente las variaciones en el nivel simulado no sobrepasan los 10 m.

El nivel simulado para el pozo PHM-15 presenta una diferencia cuantitativa de aproximadamente 35m. Sin embargo los niveles si cumplen con la tendencia de los niveles medidos.

Para el pozo PHM-10 existen pocos datos medidos en terreno, en general es posible observar una relación o tendencia entre los niveles medidos y simulados, pero con diferencias de nivel de hasta 20 m.

El pozo de monitoreo PHM-4 se encuentra a 25 m del pozo de bombeo PHB-03. Sin embargo, ambos hidrogramas presentan grandes diferencias. Si bien los niveles para ambos pozos presentan tendencias similares, los niveles en el pozo PHB-03 alcanzan variaciones de hasta 100 m mientras que para el PHM-04 las variaciones no superan los 35 m. Esta diferencia en la reacción se debe a la heterogeneidad del macizo rocoso y lo elongado de los conos de abatimiento producidos por el bombeo. Esta condición es muy difícil de simular numéricamente.

En el modelo numérico se observa que los niveles simulados para PHM-4 siguen detalladamente la tendencia de los niveles medidos, con errores cuantitativos que no superan los 5 m. Por el contrario, los niveles simulados para el pozo PHB-03, si bien siguen las tendencias, presentan una reacción muy débil en comparación a los niveles reales.

Los niveles simulados para el pozo PHB-14 siguen la tendencia de los niveles medidos en terreno. Sin embargo, los niveles simulados presentan una reacción mucho menor que la observada en la realidad.

Para el pozo PHB-16 no se realizaron análisis cualitativos debido a que las mediciones de niveles observados presentaban errores ocurridos al momento de la instalación del diver y la toma de datos por parte de Teck CDA.

La simulación de los sensores del piezómetro de cuerda vibrante PHCDA-9 no presenta variaciones según la profundidad. Los sensores A, B y C siguen la misma tendencia, la cual es similar a la observada en superficie, evidenciando un drenaje a nivel somero. Por el contrario, los sensores profundos del piezómetro PHCDA-9 evidencian confinamiento en el acuífero estructural, esta última tendencia no fue posible de simular en el modelo numérico.

Es importante señalar que para la mayoría de los pozos de bombeo el análisis cualitativo es muy bueno. Presentándose tendencia muy similares entre los niveles medidos y observados. La Figura 5.15 muestra los pozos ubicados en la zona sur del modelo.

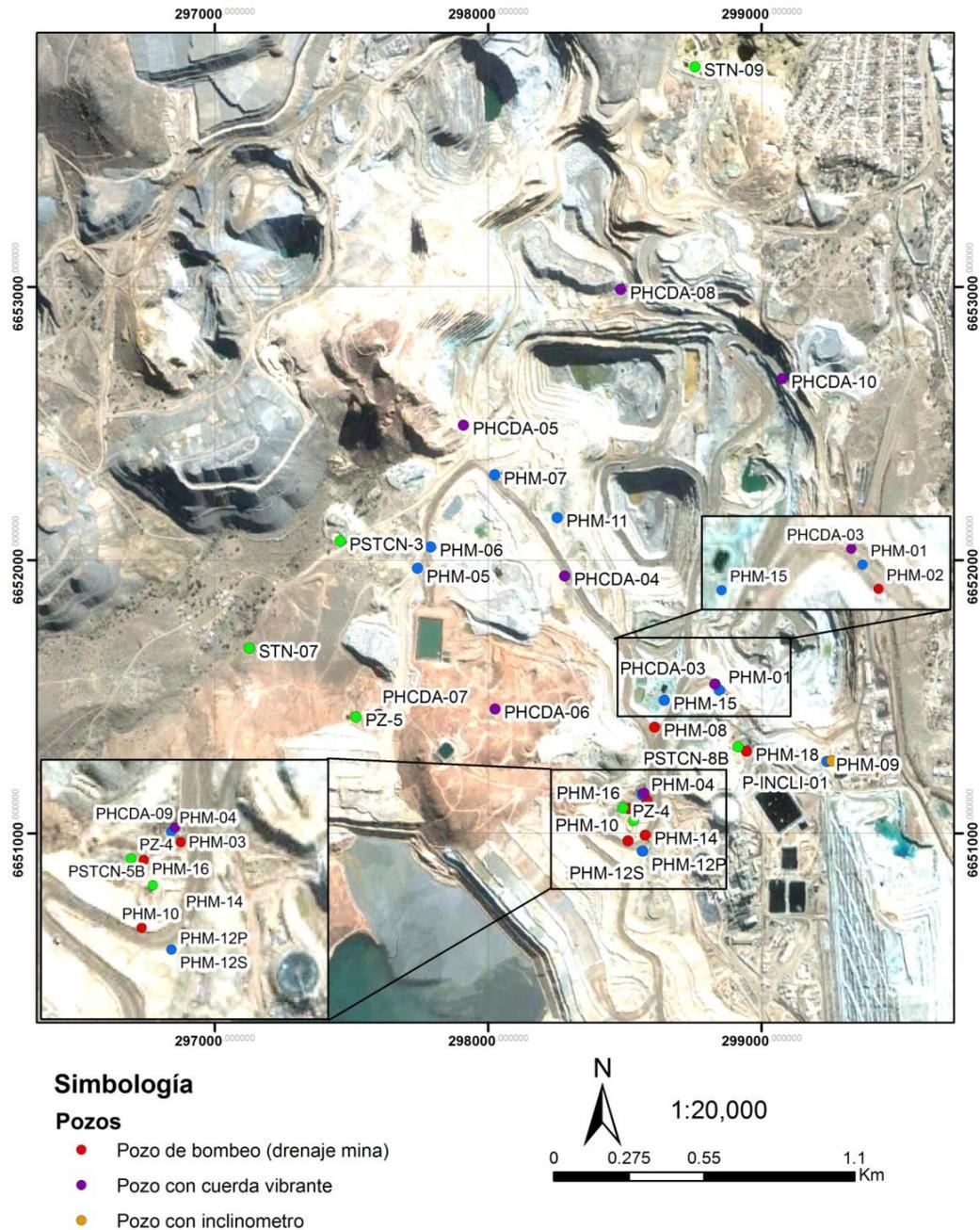


Figura 5.15: Pozos ubicados en la zona sur.

BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico se calculó para el día 30 de mayo de 2013. Según el balance de aguas simulado, la entrada por infiltración desde el depósito de relaves al sistema es de 39.27 l/s. La falla secundaria aporta 7.53 l/s, las fallas churque aportan 21.16 l/s y la falla principal ubicada en el extremo sur oeste del modelo aporta 10.58 l/s.

Los pozos de bombeo extraen en total 35.9 l/s. La Tabla 5.14 presenta el detalle de los caudales de extracción para cada pozo.

Pozo	Caudal Bombeado (l/s)
PHB-02	3.52
PHB-03	5.29
PHB-08	0.00
PHB-10	9.53
PHB-14	0.00
PHB-16	16.12
PHB-18	1.51
Total	35.9

Tabla 5.14: Caudales bombeados a partir de los pozos de bombeo según el balance de aguas.

Estos datos son consistentes con los registros de bombeo entregados por Teck CDA para la fecha de cálculo de balance de aguas.

Por otro lado, la zona oeste del modelo, en donde se encuentran las condiciones de borde de carga constante se produce una entrada de 29.83 l/s y una salida de 13.68 l/s, esta última ocurre en las zonas cercanas a las fallas que inyectan agua al modelo.

En cuanto a las salidas en las zonas de rajo, Dayton presenta afloramientos con caudales de 0.76 l/s, mientras que en la zona del rajo de Teck las salidas alcanzan los 31.17 l/s. Este último valor podría estar sobreestimado si se considera que el agua ocupada por pirquineros en la pequeña minería y por la agricultura no ha sido considerada en este estudio. La Figura 5.13 muestra el balance de aguas entregado por Feflow.

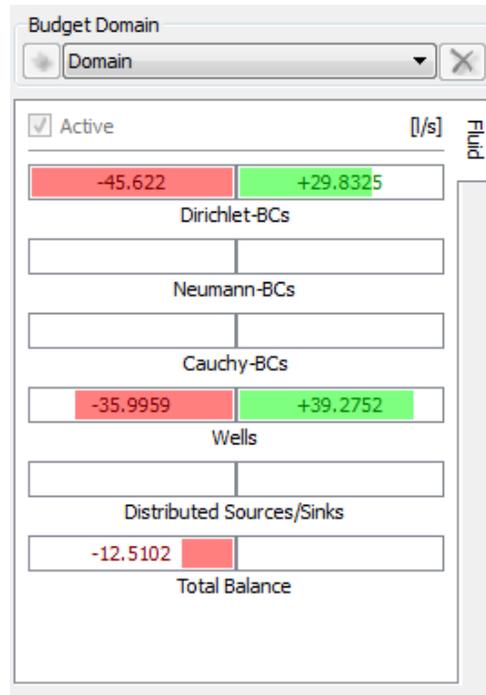


Figura 5.16: Balance de aguas para mayo 2013.

Finalmente se generó la superficie piezométrica. La Figura 5.14 la muestra en planta y la Figura 5.15 presenta una vista 3D.

En ella se observa un nivel de agua mínimo de 890 m. Al lado oeste del modelo se pueden ver claramente los efectos de las fallas, las cuales generan un descenso en los niveles piezométricos de esa zona. En el cuadro de acercamiento también es posible observar los efectos que tiene la barrera hidráulica en la piezometría, generando descensos abruptos pero pequeños en el nivel de agua.

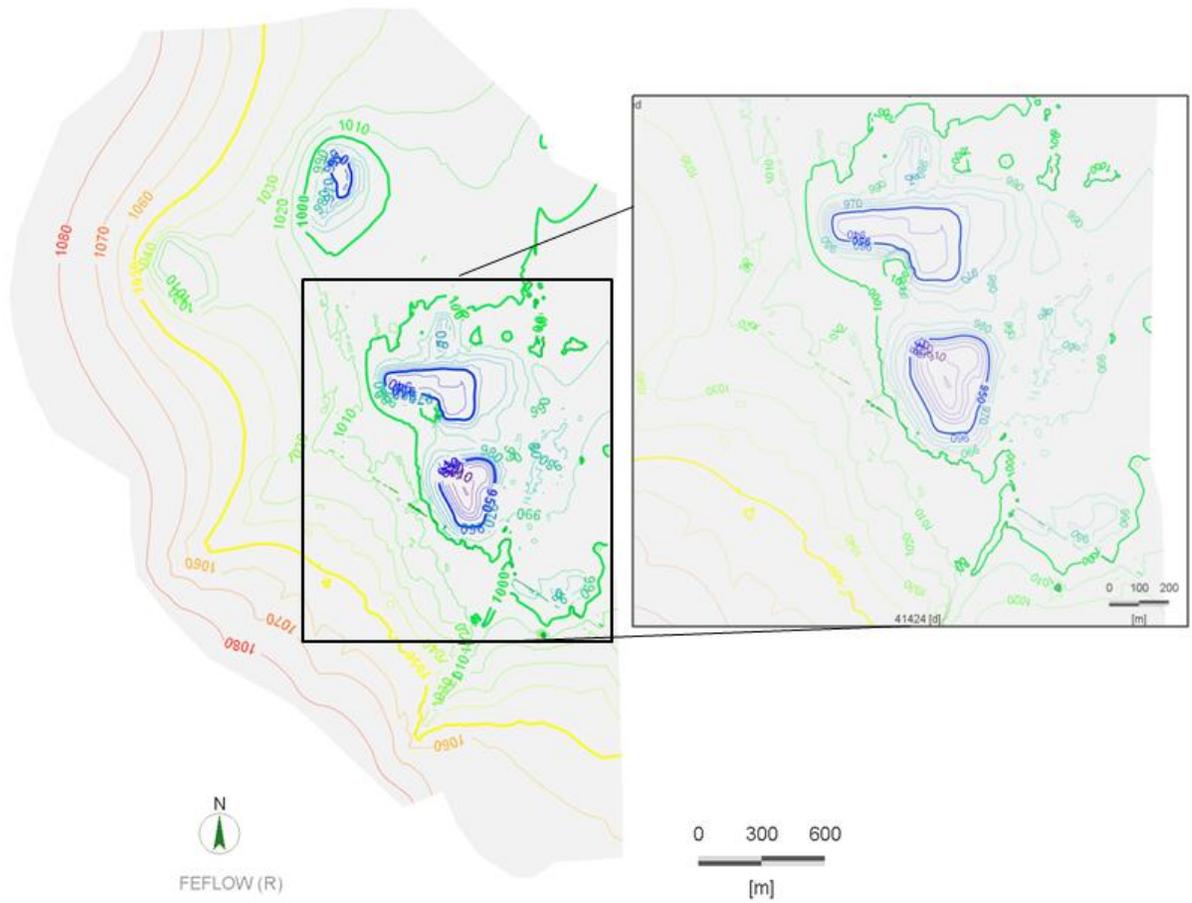


Figura 5.17: Piezometría vista en planta para mayo 2013.

Hydraulic head
- Continuous -
[m]

- 1086.14
- 1065.68
- 1045.22
- 1024.75
- 1004.29
- 983.83
- 963.368
- 942.905
- 922.443
- 901.98
- 881.518

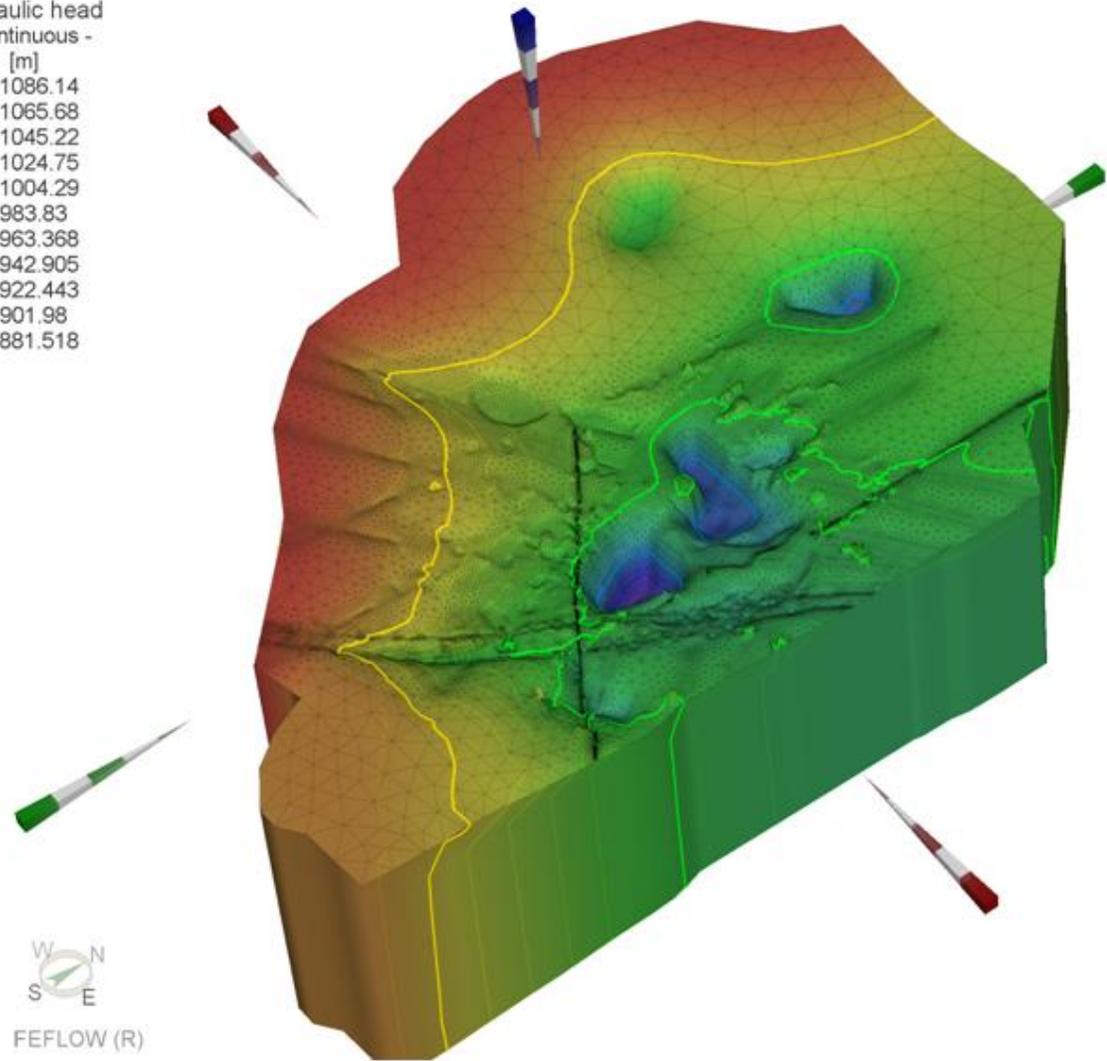


Figura 5.18: Piezometría en 3d para mayo 2013.

CAPÍTULO 6

SIMULACIONES PREDICTIVAS DEL MODELO NUMÉRICO

6.1. OBJETIVOS

Una vez calibrado el modelo numérico, se procedió con la ejecución de simulaciones predictivas con los siguientes objetivos:

- Simular el desarrollo del rajo en un escenario que no contemple la construcción de más pozos de bombeo.
- Simular el desarrollo del rajo en un escenario que contemple la construcción de un pozo más en el fondo de rajo (Fase 1).
- Evaluar ambos escenarios de manera trimestral para el año 2014 y anual hasta el año 2019.

6.2. CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PREDICTIVO

La discretización temporal para los escenarios considera:

- Intervalos de tiempo trimestrales para el año 2014.
- Intervalos de tiempo anual para el periodo 2015 a 2019.

El uso de intervalos de tiempo cortos permite optimizar la convergencia numérica, particularmente con respecto a las condiciones iniciales. Sin embargo, inducen un mayor tiempo de cálculo para completar la simulación.

ENTRADAS

Para los escenarios predictivos la simulación predictiva considera una entrada artificial asociada al depósito de relaves ubicado aguas arriba. Se mantiene una estimación de la entrada por infiltración de 72 l/s, este valor podría aumentar en caso de que se realicen proyectos de expansión del depósito de relaves.

Se considera una entrada natural igual al promedio mensual de los datos obtenidos entre 2010 y 2013.

SALIDAS

Para cada pozo de bombeo se consideró una tasa de extracción constante igual a los caudales bombeados a finales de 2013. La Tabla 6.1 presenta los detalles de caudales extraídos para cada pozo.

Pozo	Caudal extraído (l/s)
PHB-02	2.61
PHB-03	3.28
PHB-08	0
PHB-10	5.78
PHB-14	4.28
PHB-16	4.82
PHB-18	0

Tabla 6.1: Configuración de caudales extraídos para los pozos de bombeo.

Para el escenario con bombeo se considera un nuevo pozo, ubicado en el fondo del rajo fase 1. La Tabla 6.2 presenta las características principales para este pozo.

Pozo	Coordenadas		Profundidad de pozo (m)	Diámetro de pozo	Tasa de bombeo (l/s)
	Norte	Este			
PHB-19	6651888	298586	150	10"	10

Tabla 6.2: Configuración del pozo de bombeo PHB-19.

DESARROLLO DEL RAJO TECK CDA

Los planes de expansión del rajo entregado por Teck CDA han sido procesados e integrados en el modelo numérico predictivo con el fin de simular la excavación y los caudales del desagua del rajo. El rajo final alcanza una profundidad de 822 msnm.

6.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS SIMULACIONES PREDICTIVAS

A continuación se presenta la comparación entre los escenarios con y sin bombeo para las distintas zonas de estudio, los hidrogramas para las simulaciones entre el periodo de septiembre 2013 hasta 2019 se presentan en el Anexo C.

ZONA NORTE

La zona norte, al estar más lejana a la zona de interés, es la que presenta menores reacciones ante la profundización del rajo y su drenaje.

Para el escenario simulado sin bombeo, el pozo STN-9 presenta un nivel constante de 1019m. A partir de diciembre 2015 el nivel desciende por debajo de la profundidad del pozo. Para el escenario con bombeo, el pozo presenta un nivel de 1020 m hasta diciembre del 2015, posterior a esa fecha el nivel desciende y el pozo se seca.

El piezómetro de cuerda vibrante PHCDA-8 presenta una reacción fuerte ante drenaje del rajo en los sensores someros A y B, descendiendo 70m entre los años 2014 a 2019. Por el contrario, el sensor profundo (C) presenta una respuesta menor, variando las cargas hidráulicas en sólo 20 m. Este comportamiento se explica debido a

una despresurización lenta en profundidad producida por la baja conductividad hidráulica de la zona.

El sensor somero del piezómetro PHCDA-10 presenta altas variaciones en los niveles estimados, sin embargo mantiene la tendencia al descenso. Esta variabilidad puede deberse a la acción que los cambios de geometría del rajo tienen sobre el nivel freático de la zona. Para enero del 2017 se estima que la superficie freática descenderá por debajo del sensor A del pozo, impidiéndole tomar más lecturas.

Los sensores B y C no se verían mayormente afectados por los cambios de geometría del rajo, es decir, a profundidad media la zona cercana al pozo PHCDA-10 se despresurizaría de manera constante. El sensor más profundo presenta mayores cargas hidráulicas, evidenciando el confinamiento en profundidad.

ZONA OESTE

El pozo STN-7 presenta un comportamiento similar al pozo STN-9. Para el escenario sin bombeo el pozo presenta un nivel cercano a los 1075.34m hasta octubre del 2015. Posterior a esta fecha el nivel del agua desciende por debajo de la profundidad del pozo. Para el escenario con bombeo, el nivel del pozo varía de manera intermitente, secándose en algunos periodos. Finalmente el último registro de nivel se estima para noviembre de 2017.

El pozo PSTCN-3 y PZ-5 presentan comportamientos similares, con muy bajos o nulos descensos.

Los pozos PHM-5, PHM-6, PHM-7 y PHM-11 muestran tendencias muy similares, con fuertes descensos en los niveles simulados. El pozo PHM-11, cercano al rajo, es el que presenta un descenso de aproximadamente 60m entre 2014 y 2019. Por otro lado, el pozo PHM-05, lejano al rajo, presenta descensos de 40m para el mismo periodo.

Según los escenarios simulados, se espera que el nivel freático descienda por debajo del sensor somero del pozo PHCDA-4 en abril del 2016 para el caso sin bombeo y mayo del 2015 para el caso con bombeo. Además, en el escenario con bombeo los niveles descenderían en aproximadamente 10 m con respecto al escenario sin pozos extras.

El pozo PHCDA-5 no se ve afectado por el bombeo del pozo PHB-19, en ambos escenarios se observa una tendencia al descenso de las cargas hidráulicas debido a la profundización del rajo.

El piezómetro PHCDA-6 presenta una reacción similar al PHCDA-8. Los sensores someros A y B registran una disminución de la carga hidráulica más pronunciada que el sensor profundo C. Debido a las bajas conductividades hidráulicas existentes, la despresurización ocurre de manera mucho más lenta en profundidad (5 m para el periodo simulado). En cambio, en las zonas más permeables asociada a la zona de daño de las fallas, el drenaje es más acentuado (30 m para el periodo simulado). Para el escenario con bombeo, las cargas hidráulicas simuladas se reducen en aproximadamente 5 m con respecto al escenario sin bombeo.

El piezómetro PHCDA-7 no presenta reacciones ante la construcción del pozo de bombeo PHB-19.

ZONA SUR

Esta zona presenta el mayor interés para este estudio, pues es aquí donde ocurre la infiltración en profundidad proveniente del depósito de relave. Además, esta zona concentra los pozos de bombeo para el drenaje del rajo.

El pozo de bombeo PHB-18 presenta niveles muy similares para ambos escenarios, por lo tanto no se ve afectado por el bombeo realizado en la fase 1 del rajo. Presenta un descenso de 40 m en su nivel para todo el periodo de simulación relacionado a la profundización del rajo. Es importante señalar que bajo esta simulación el pozo de bombeo no se encontraba activo. El pozo de monitoreo medioambiental PSTCN-8B se encuentra seco para ambas simulaciones.

El pozo de monitoreo PHM-9, presenta una tendencia similar a la del pozo PHB-18, registrando descensos de 40 m para el periodo de estudio. El pozo Pincli, ubicado a 15 m, presenta un comportamiento similar.

El pozo PHB-02, ubicado sobre la Falla Carmen, presenta un descenso de 60 m para el periodo de simulación. Los niveles simulados presentan variaciones asociados al bombeo del pozo. No se observan diferencias provocadas por el bombeo del pozo PHB-19, siendo la profundización del rajo el principal factor en las disminuciones de nivel.

Los niveles del pozo de monitoreo PHM-1, ubicado a 30 m del pozo PHB-02, presentan un comportamiento similar a este último, registrando las variaciones asociadas al bombeo.

Para el piezómetro de cuerda vibrante PHCDA-3 ambos sensores (A y B), presentan comportamientos similares, descendiendo 50 m en todo el periodo de simulación. El sensor B presenta una mayor respuesta ante el bombeo del pozo PHB-19, alcanzando una diferencia de 5 m entre los escenarios con y sin bombeo.

El pozo de bombeo PHB-8 no se activo para esta simulación. El hidrograma muestra un descenso constante, disminuyendo su nivel en 45 m durante toda la simulación. Este descenso está relacionado principalmente a la profundización del rajo. El pozo PHM-15, ubicado a 100 m del pozo PHB-08, presenta el mismo comportamiento que este último.

Al igual que el pozo PSTCN-8B, el pozo de monitoreo medio ambiental PSTCN-5B se presenta seco y sin registros de nivel durante todo el periodo simulado.

Los pozos ubicados en el sector de la Falla Churque PHB-14, PHB-10, PHM-4, PHB-3, PHB-16 y PHCDA-9 presentan la misma tendencia de descensos. Si bien cada pozo tiene distintos niveles piezométricos, todos presentan un descenso de 25 m para el periodo de simulación.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

La actualización del modelo hidrogeológico para el rajo Teck CDA, trajo con ello la necesidad de crear una herramienta numérica que permitiese modelar las cargas hidráulicas presentes en el sistema y , de esta manera, aumentar el entendimiento de la zona de estudio, pudiendo desarrollar escenarios predictivos para la optimización del drenaje y despresurización dentro de la mina.

Las conclusiones para este trabajo son las siguientes:

ETAPA DE CONSTRUCCIÓN:

Se construyó un modelo numéricamente estable para la simulación de distintos escenarios, sus características principales son las siguientes:

- El modelo se construyó en el software Feflow 6.1, software que resuelve las ecuaciones de flujo a través de elementos finitos. La gran cantidad de fallas presentes en la zona de estudio y la variabilidad en las permeabilidades presentes genera una anisotropía que resulta más simple de modelar en este tipo de softwares.
- El dominio se delimitó en base a la información obtenida en el modelo conceptual y en la literatura. Se consideraron como condiciones de borde la

barrera hidráulica presente en la Falla Andacollo y las líneas equipotenciales definidas en el informe de impacto ambiental SIGA 2005.

- La discretización del modelo consistió en la construcción de 9 capas. La primera de 30 m y las ocho restantes de 50 m de potencia. Las fallas fueron modeladas como planos verticales de alta permeabilidad.
- Las entradas del modelo están definidas por la infiltración en profundidad proveniente del depósito de relaves y la entrada natural de la cuenca. Las salidas corresponden a los caudales extraídos desde los pozos de bombeo y los afloramientos superficiales en la zona de los rajos.
- Las condiciones iniciales para las propiedades hidráulicas de la zona fueron obtenidas a partir del modelo conceptual 2012 para la zona del rajo Teck.
- Para la configuración del problema se usó la opción “free and movable” la cual permite que la superficie del modelo sea libre y se mueva según la superficie freática modelada.

ETAPA DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó para mayo del 2013. A continuación se presentan las principales conclusiones:

- Para la etapa de calibración se configuró un modelo en estado permanente que representara las condiciones del sistema hidrogeológico antes que Teck realizara una extracción intensiva en el rajo. Los resultados de carga hidráulica se integraron como condición inicial para el modelo transitorio.

- A través de métodos iterativos se determinaron las conductividades hidráulicas para la zona de estudio. Éstas varían en un rango que va desde los $5.00E-05$ m/s para las estructuras principales hasta $5.04E-12$ m/s para el basamento.
- Se calculó un error cuadrático medio normalizado (NRMS) para todo el modelo de 15.2%. Para la zona de interés, al sur del modelo, se calculó un error de 12.48%. Finalmente sacando los pozos de cuerda vibrante se obtiene un NRMS del 8.75%.
- Para el análisis cualitativo se observa que, en general, tanto los pozos de bombeo como de monitoreo cumplen con las tendencias observadas en terreno. Sin embargo, los piezómetros de cuerda vibrante no presentan buenos resultados cuantitativos ni cualitativos. Esto puede deberse a que en el modelo al importar la ubicación de los pozos, los sensores no quedan ubicados exactamente en el lugar de la falla pues estas últimas fueron modeladas de manera vertical. Cuando los sensores quedan ubicados en las zonas de baja permeabilidad, si bien existe drenaje, la conductividad es tan baja que la despresurización ocurre en el largo plazo.
- En general, los niveles simulados para los pozos de bombeo imitan las tendencias medidas en terreno. Verificando así el buen funcionamiento del modelo hidrogeológico numérico.
- En casos como el PHCDA-3, en donde el pozo presenta una mayor reacción en la profundidad que en superficie, las diferencias pueden deberse a la anisotropía generada en profundidad por la acción de las fallas.

- El balance hídrico para mayo del 2013 considera una entrada por infiltración desde el depósito de relaves de 39.27 lt/s y una entrada natural de la cuenca de 29.83 l/s. Para las salidas, los pozos de bombeo extraen del sistema alrededor de 35.9 l/s, mientras que la salida asociada a afloramientos en el rajo corresponde a 31.7 l/s.

ETAPA DE SIMULACIÓN

La simulación consistió en el desarrollo de dos escenarios. El primero con la cantidad de pozos de bombeos existentes a la fecha y con tasas de bombeo iguales a las usadas en diciembre 2013. El segundo escenario consideró la construcción del pozo de bombeo PHB-19 en la Fase 1 al fondo del rajo. De la simulación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En general, se observa que los pozos superficiales no se ven afectados por el bombeo realizado por el pozo PHB-19 en el fondo de rajo. Por el contrario, las mayores diferencias en los comportamientos se observan en los piezómetros de cuerda vibrante, los cuales evidencian mayores diferencias entre las cargas hidráulicas para ambos escenarios.
- La desconexión del drenaje realizado por el pozo PHB-19 permite evidenciar la separación entre el acuífero somero y el profundo.
- Es importante señalar que el pozo PHB-19 fue ubicado en las cercanías a las zonas de daño generadas en la quinta y sexta capa. Sin embargo, entre más cercano a la falla se encuentre este pozo de bombeo, más efectivo será el drenaje en el acuífero en profundidad. Por lo mismo, los niveles simulados son considerados como “conservadores” debido a que las variaciones entre ambos escenarios podrían ser mucho mayores en la realidad.

7.2. RECOMENDACIONES

Como recomendaciones se propone lo siguiente:

- Se recomienda realizar un estudio de las infiltraciones más detallado. Si bien la metodología de Curva Número podría ser útil, esta está pensada para el cálculo de las infiltraciones en zonas urbanas. Para realizar este trabajo es necesario contar con el detalle de las precipitaciones diarias para el sector para los años 2005 a 2009.
- Se recomienda realizar un estudio más detallado de la zona noroeste del dominio para obtener resultados de carga hidráulica más precisos. Es importante contar con información acerca de las estructuras existentes en la zona, niveles freáticos y actividades antropogénicas que puedan incidir en el desarrollo de un correcto balance de aguas.
- Se recomienda la realización de un mayor número de simulaciones con pozos ubicados en distintos lugares. Velando por que estos se construyan en las zonas de daño asociadas a las estructuras. De lo contrario, las bajas conductividades presentes en la zona no permitirán un buen funcionamiento de las bombas de extracción.
- Debido a los altos caudales presentes en el fondo de rajo se recomienda reforzar el plan de drenaje y despresurización mina. Esto podría realizarse a través de la instalación de pozos de bombeo en la zona sur del modelo, con le objetivo de recuperar las infiltraciones generadas por el depósito de relaves.

BIBLIOGRAFÍA

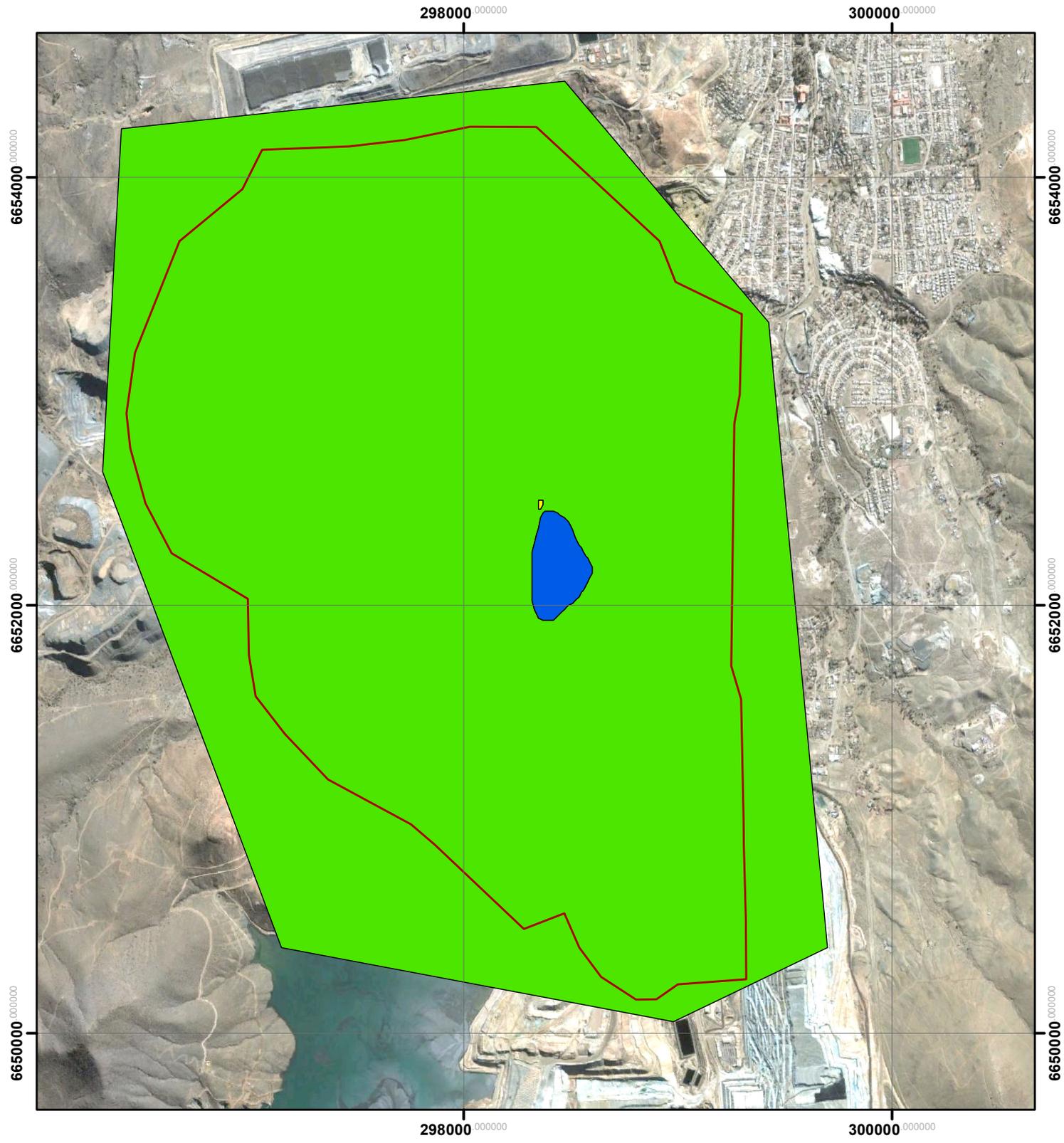
- Aguirre, L. y Eggert, E. 1962. Las formaciones manganesíferas de la región de Quebrada Marquesa, provincia de Coquimbo. *Minerales*, Vol 17, Nº76, p 25-37. Santiago.
- Antonioletti, R. Schneider S., H., Borcosque D., J. & Zárata C., E. 1972. Características climáticas del Norte Chico (26° a 33° latitud sur). Instituto de Investigación de Recursos Naturales, Santiago, 102 p.
- American Nuclear Society ANS, 1980. American national standard for evaluation of radionuclide transport in groundwater for nuclear power sites: La Grange Park, Illinois, ANSI/ANS-2.17-1980, American Nuclear Society.
- ARCADIS Geotécnica. 2005. Proyecto Hipógeno. Estudios Geotécnicos. Informe de Avance.
- Beale, G. (2007). Hydrogeological Model. En J. Read, & P. Stacey, *Guidelines for Open Pit Slope Design* (págs. 141 - 199). CSIRO.
- Bruggen, 1949. "Informe Geológico sobre el agua subterránea de Andacollo".
- Dingman, R. & Galli, C. 1955. Acerca de la captación de agua en Andacollo, Provincia de Coquimbo. CORFO, Santiago, 4p.
- Dirección General de Aguas. 1986. Mapa hidrogeológico de Chile. Santiago, Escala 1:2.500.000, pp. 22.
- Emparan, C. & Pineda, G. 1999. Área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos M36, Escala 1:100.000.

- Lopez, A. 2012. "Hidroquímica de la cuenca de Andacollo. Énfasis sobre las aguas asociadas a la actividad minera".
- Llaumett C., y Ulloa U. 1973. "Estado actual del estudio Geológico y Evaluación del yacimiento cuprífero Andacollo".
- Llaumett, C., Oclay, L., Marín, C., Marquardt, J. & Reyes, E. 1975. El yacimiento de cobre porfídico "Andacollo", Provincia de Coquimbo, Chile. Revista Geológica de Chile, 2: 56-66.
- Reyes, M. 1991. The Andacollo strata-bound gold deposit, Chile, and its position in a porphyry copper-gold system. Economic Geology 86: 1301-1316.
- Robles, P. 1975. Hidrogeología de Andacollo y su aplicación en el drenaje de agua subterránea del yacimiento de cobre porfídico. Memoria de Geología. Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 135p.
- SEA, 2012. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEA. Servicio de Evaluación Ambiental. ISBN: 978-956-9076-12-1
- SIGA Consultores S.A. 2005. Proyecto Hipógeno Compañía Minera Carmen de Andacollo - Estudio Hidrogeológico.
- SWS, 2012. Actualización del modelo hidrogeológico conceptual del rajo Teck CDA.
- SWS, 2013. Informe de modelación hidrogeológica numérica, perfiles SEEP/W 2D. 51880.
- SWS, 2013. Memorandum técnico referente a estructuras.

- Thomas, H. 1951. Informe sobre el Agua Subterránea en el Distrito de Andacollo. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Thomas, H. 1967. Boletín N° 23. Geología de la Hoja de Ovalle. IIG. 54 p
- Vutukuri, V., & Singh, R. (1995). Mine Inundation - Case Histories. Mine Water and the Environment 107 - 130.

ANEXOS

ANEXO A: DISTRIBUCIÓN UNIDADES HIDRÁULICAS EN PLANTA.



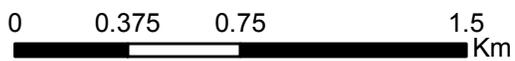
Simbología

- | | | | |
|---|---------|---|------|
|  | Dominio |  | UH03 |
|  | UH02 |  | UH04 |
| | |  | UH05 |

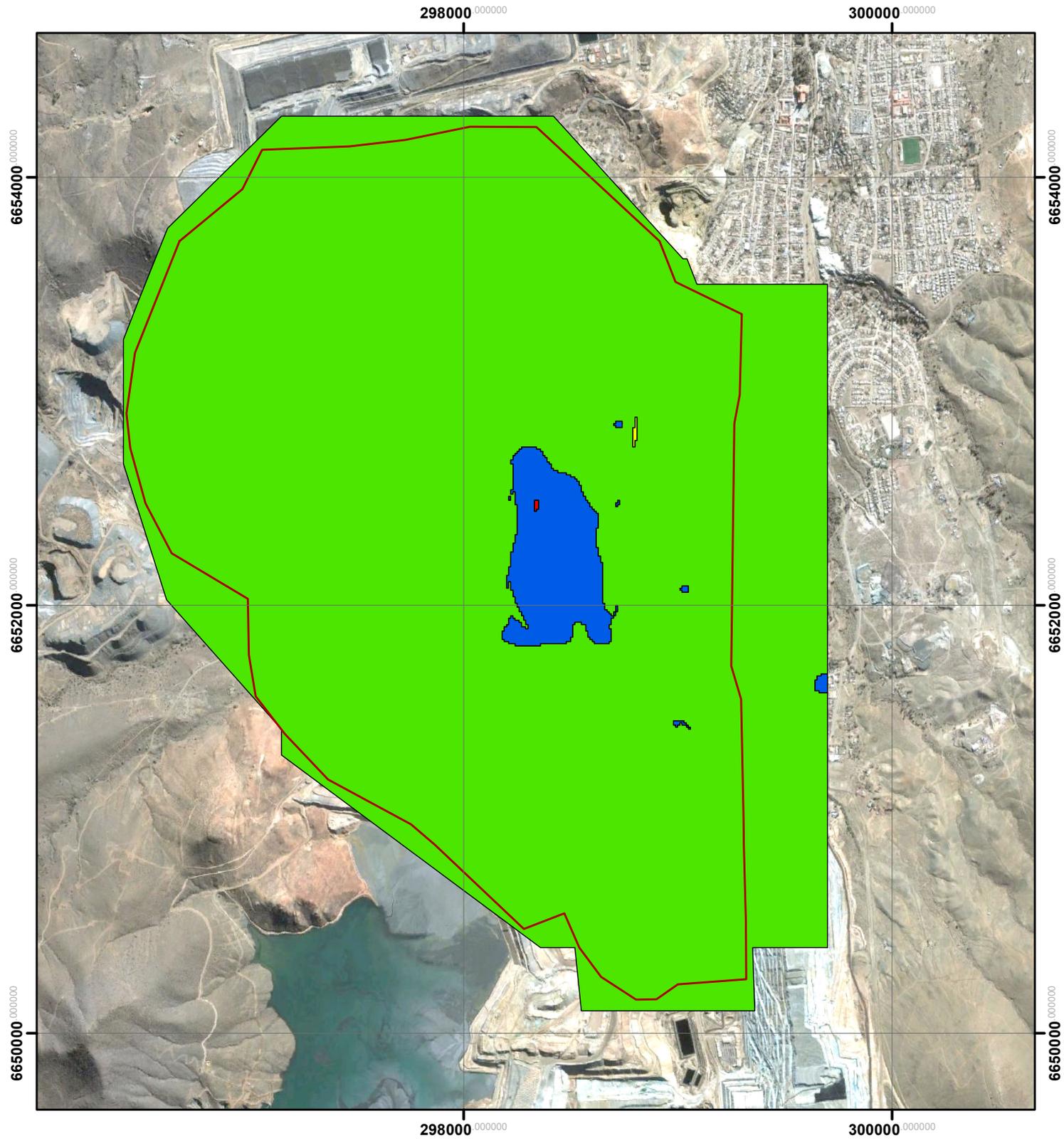


Distribución Espacial de las
Unidades Hidrogeológicas

Profundidad: 705m



1:25,000



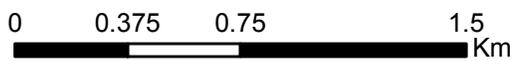
Simbología

- | | | | |
|---|---------|---|------|
|  | Dominio |  | UH03 |
|  | UH02 |  | UH04 |
| | |  | UH05 |

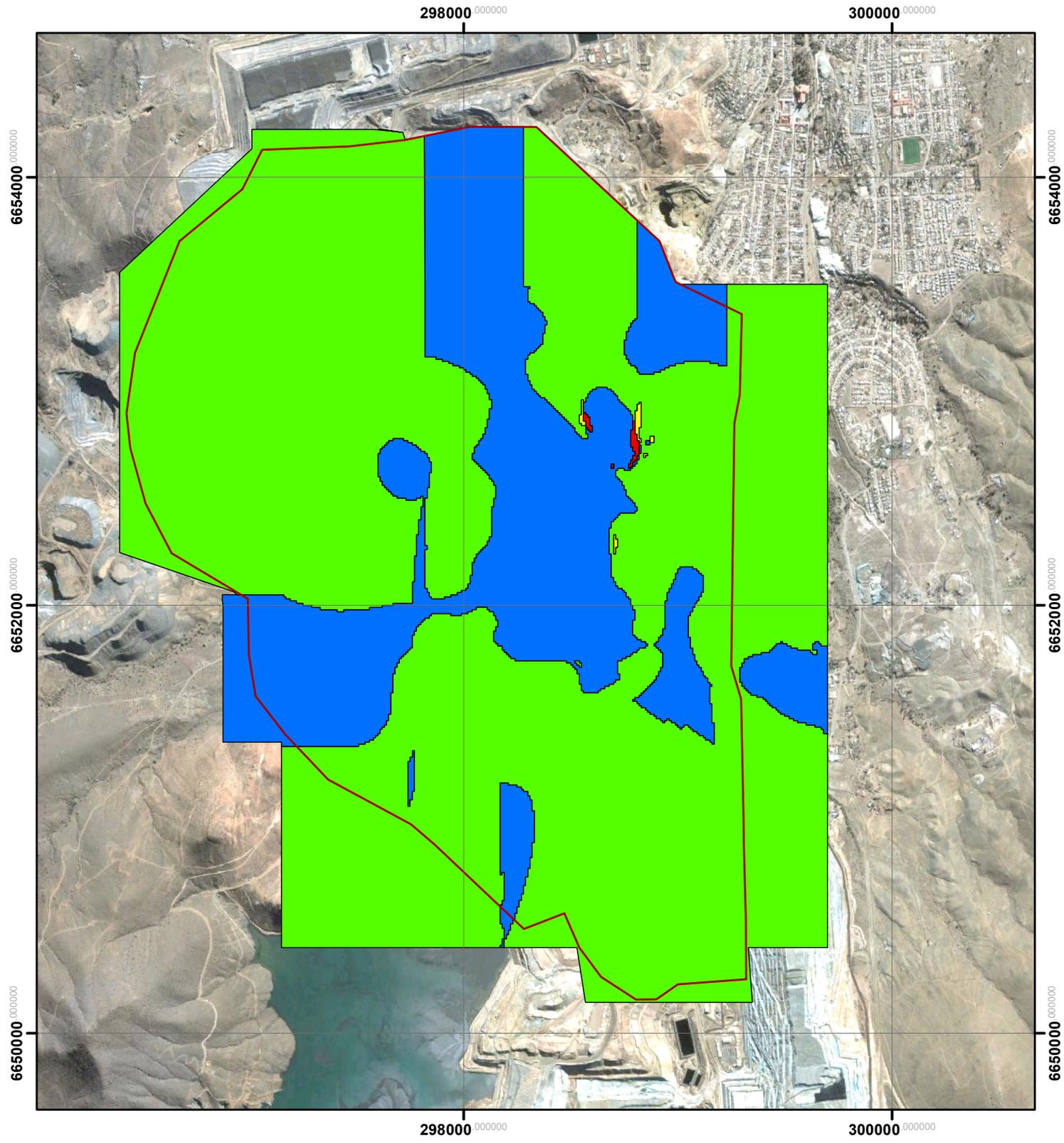


Distribución Espacial de las
Unidades Hidrogeológicas

Profundidad: 755m



1:25,000



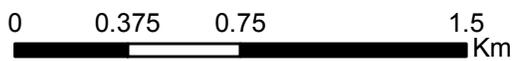
Simbología

- | | | | |
|---|---------|---|-------|
|  | Dominio |  | UHG03 |
|  | UHG02 |  | UHG04 |
| | |  | UHG05 |



Distribución Espacial de las
Unidades Hidrogeológicas

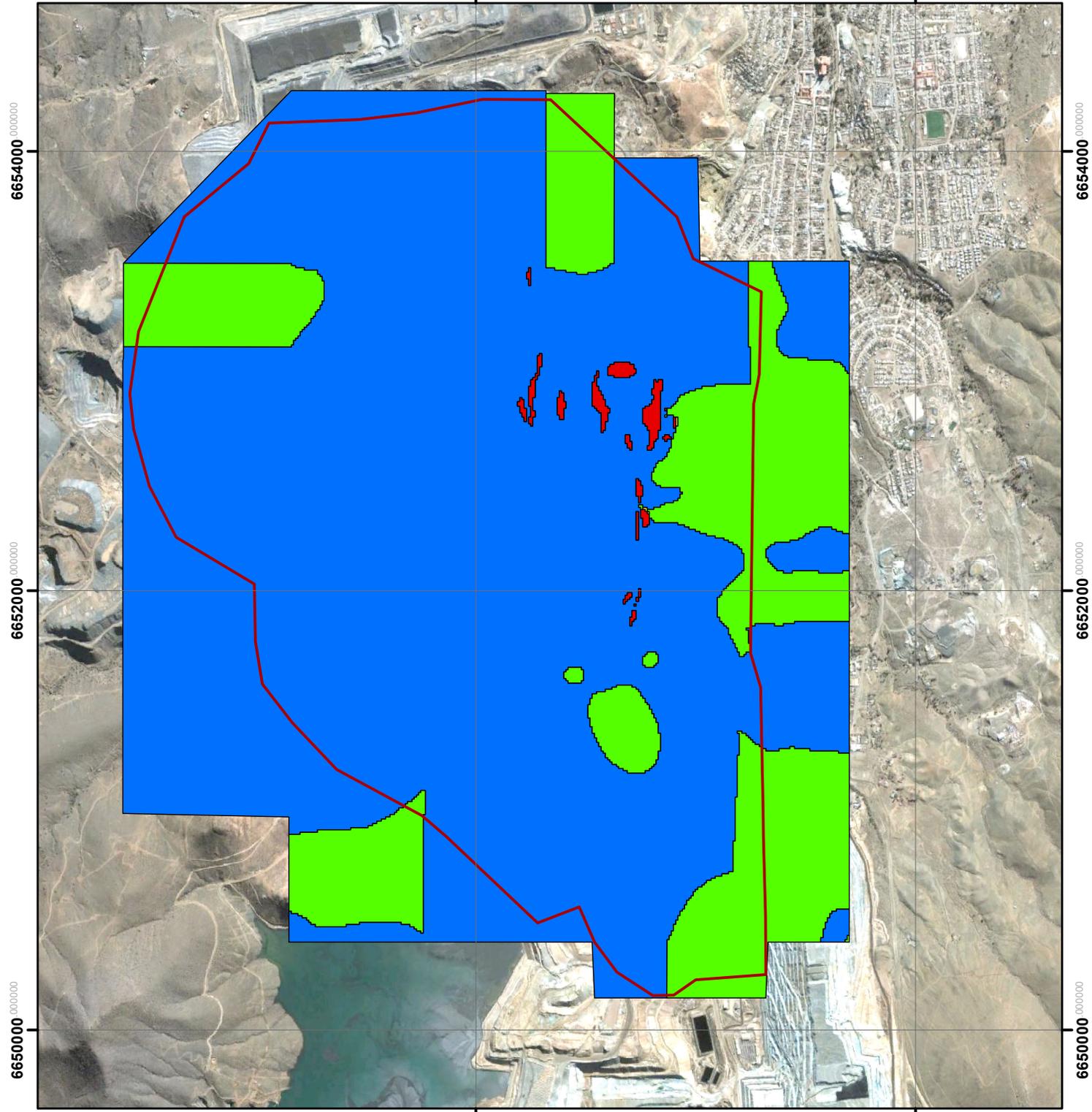
Profundidad: 805m



1:25,000

298000 000000

300000 000000



6654000 000000

6654000 000000

6652000 000000

6652000 000000

6650000 000000

6650000 000000

298000 000000

300000 000000

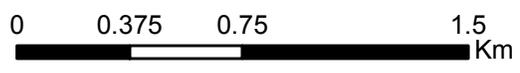
Simbología

- Dominio
- UHG0
- UHG01
- UHG02
- UHG03
- UHG04
- UHG05

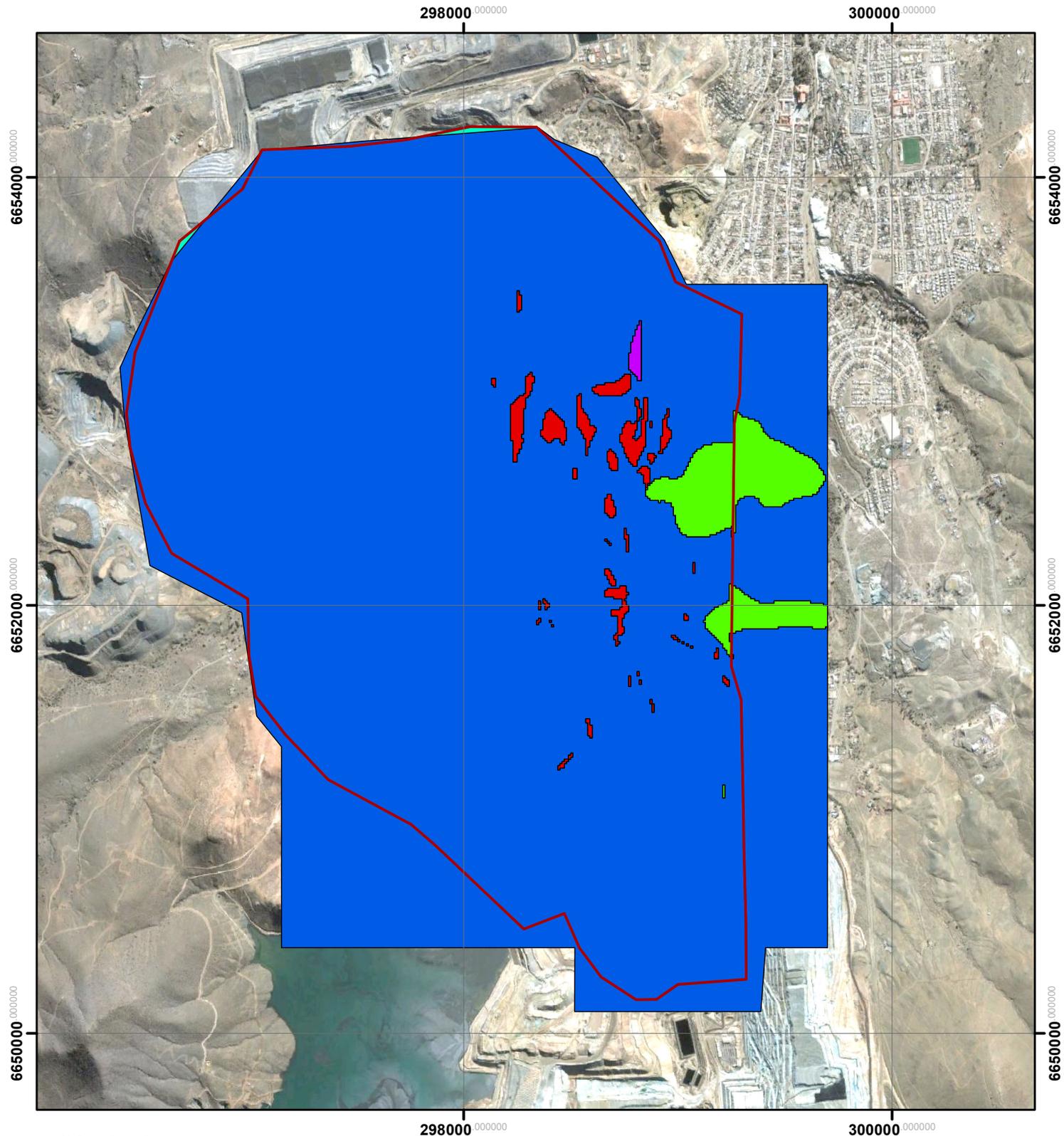


Distribución Espacial de las Unidades Hidrogeológicas

Profundidad: 855m



1:25,000



Simbología

- Dominio
- UHG0
- UHG1
- UHG2
- UHG3
- UHG4
- UHG5

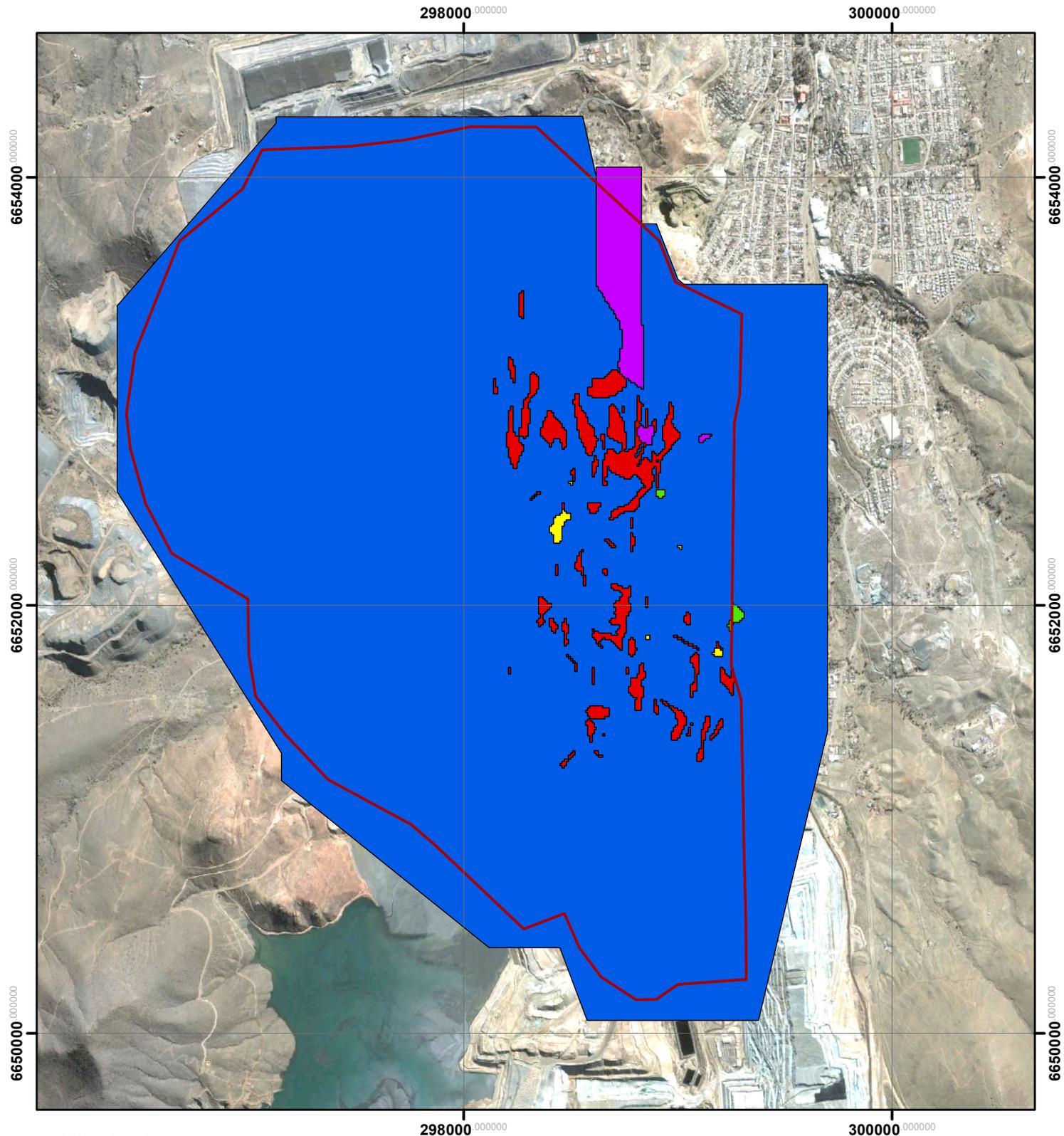


Distribución Espacial de las
Unidades Hidrogeológicas

Profundidad: 905m



1:25,000



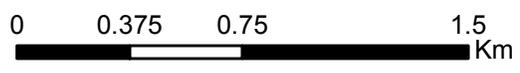
Simbología

- Dominio
- UHG0
- UHG01
- UHG02
- UHG03
- UHG04
- UHG05

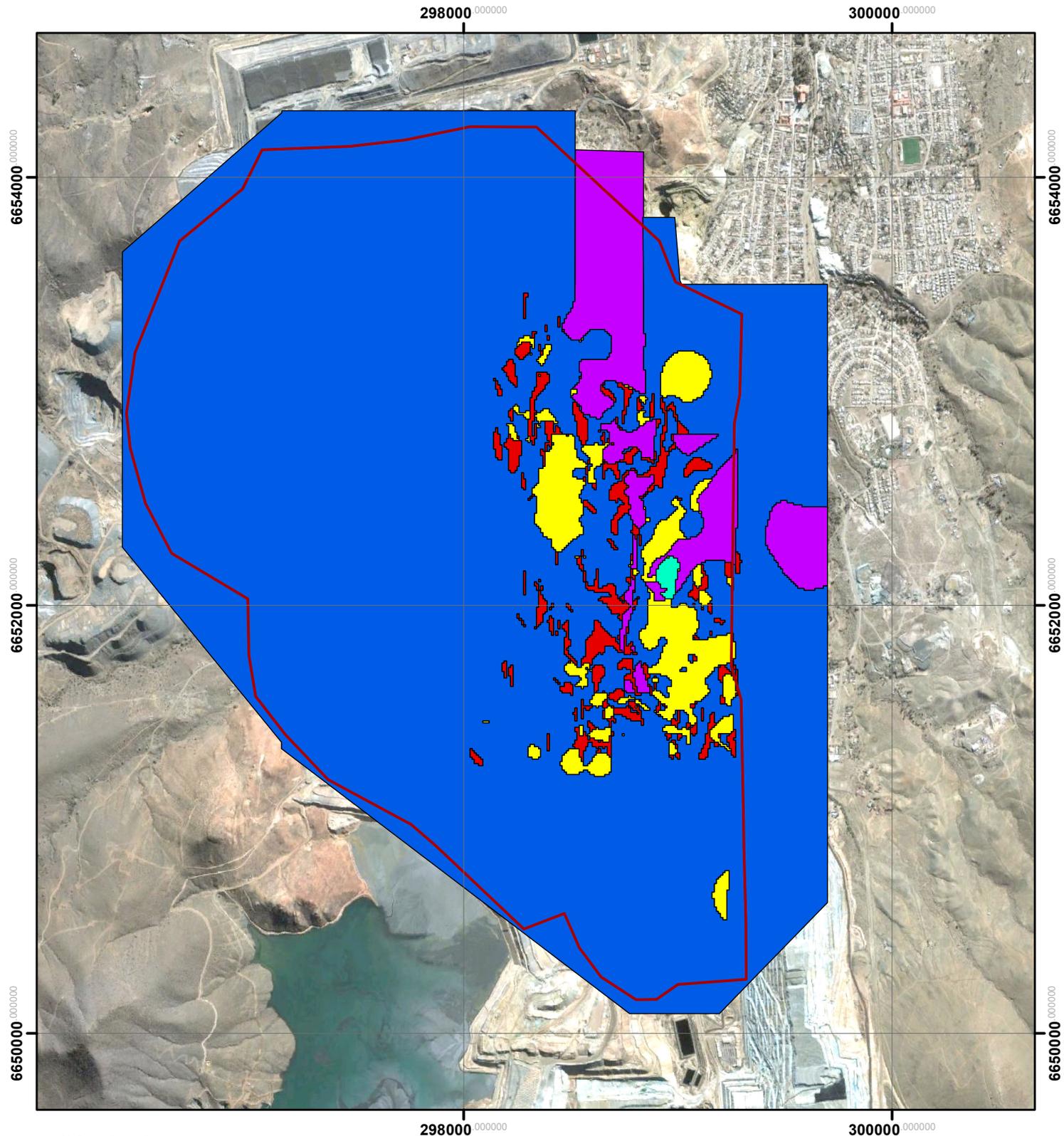


Distribución Espacial de las Unidades Hidrogeológicas

Profundidad: 955m



1:25,000



Simbología

- Dominio
- UHG0
- UHG01
- UHG02
- UHG03
- UHG04
- UHG05



Distribución Espacial de las Unidades Hidrogeológicas

Profundidad: 1005m



1:25,000

298000 000000

300000 000000

6654000 000000

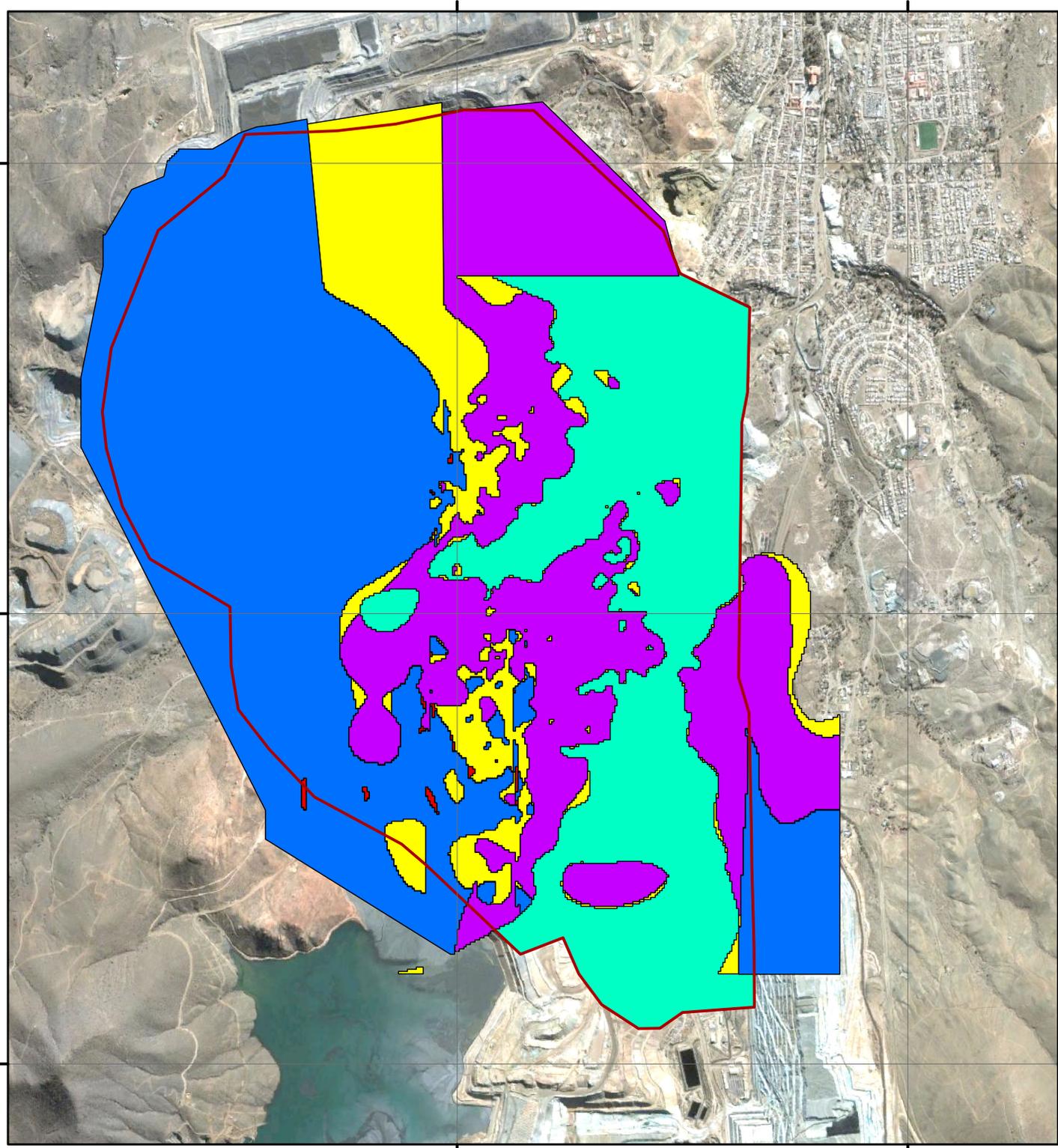
6654000 000000

6652000 000000

6652000 000000

6650000 000000

6650000 000000



298000 000000

300000 000000

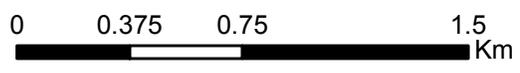
Simbología

- Dominio
- UHG0
- UHG01
- UHG02
- UHG03
- UHG04
- UHG05



Distribución Espacial de las Unidades Hidrogeológicas

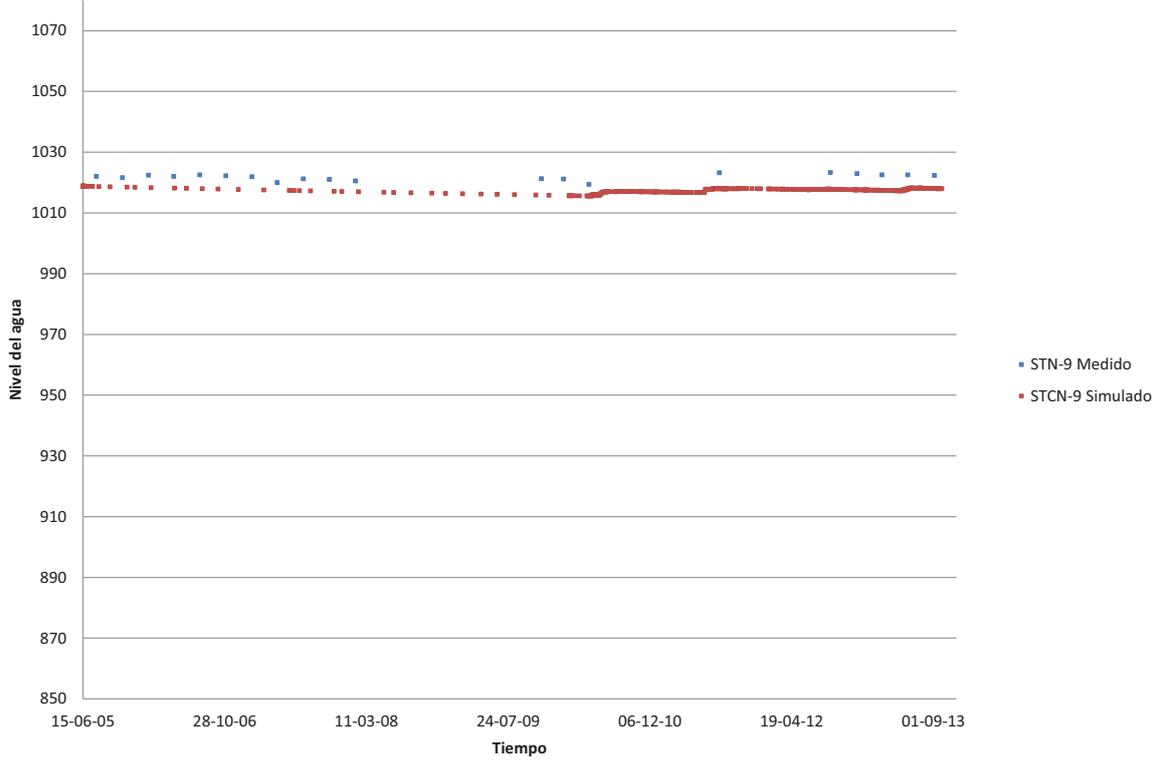
Profundidad: 1055m



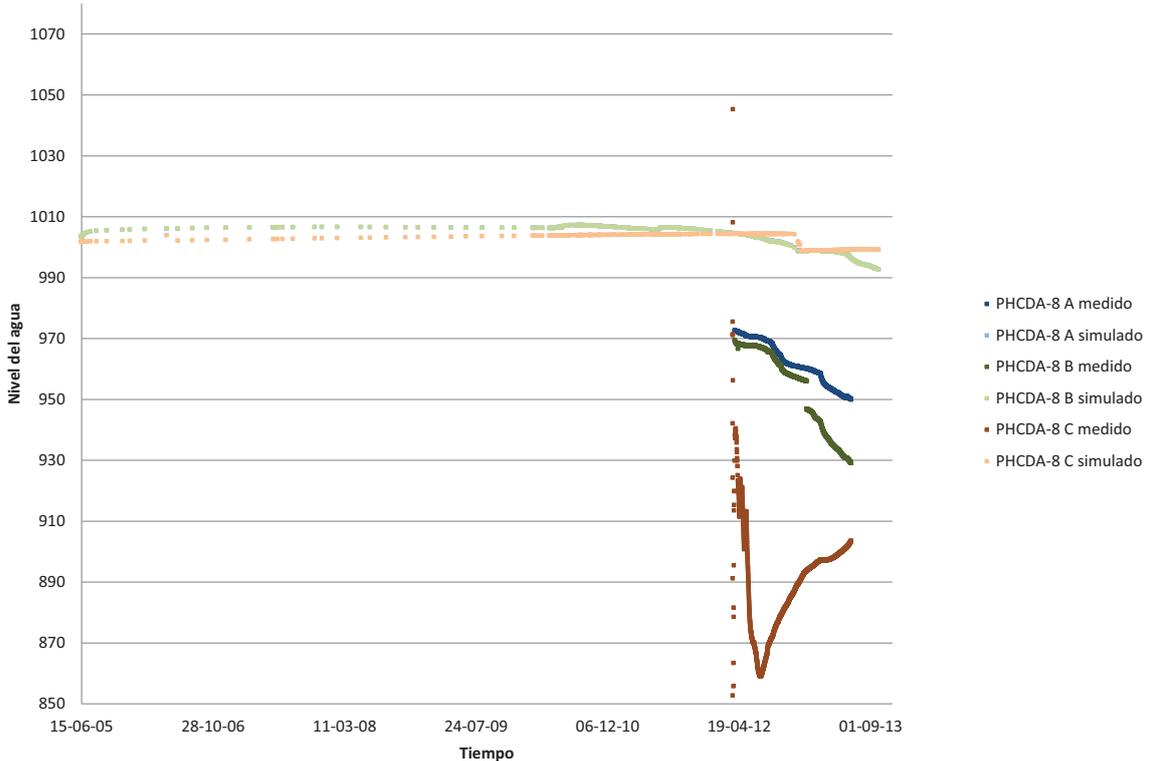
1:25,000

ANEXO B: HIDROGRAMAS CALIBRACIÓN PERIODO 2005-2013.

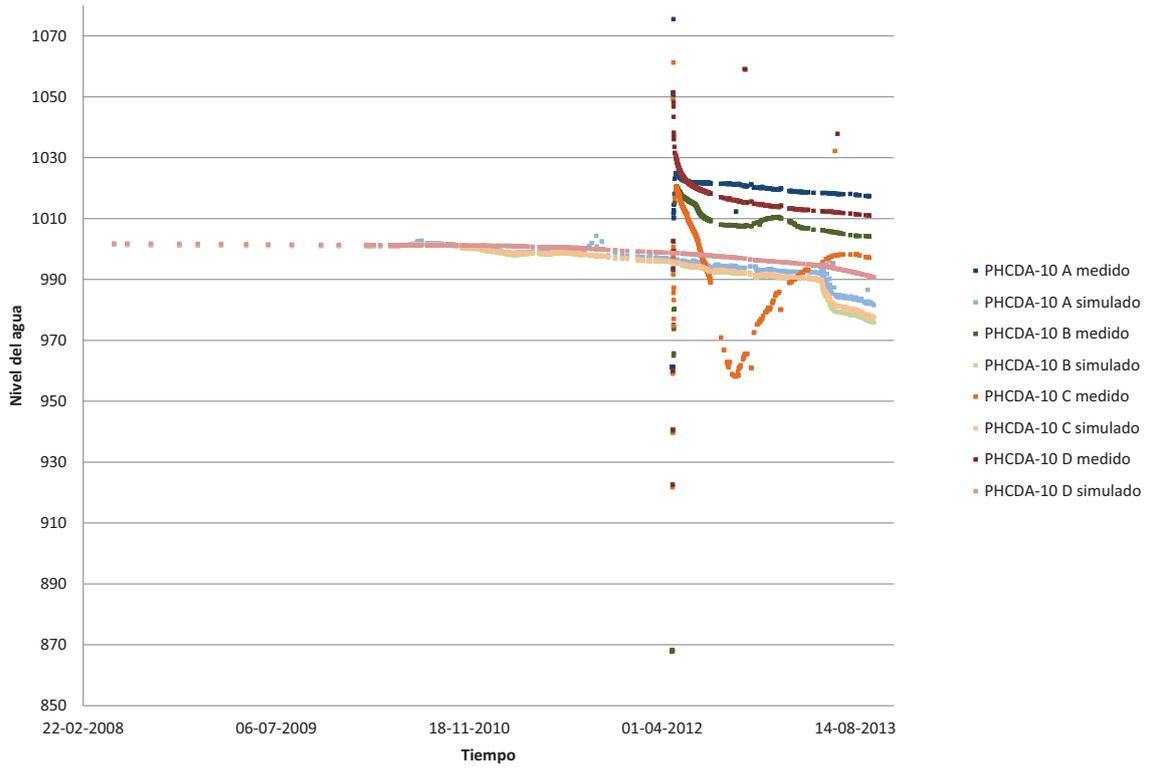
Calibración STN-9



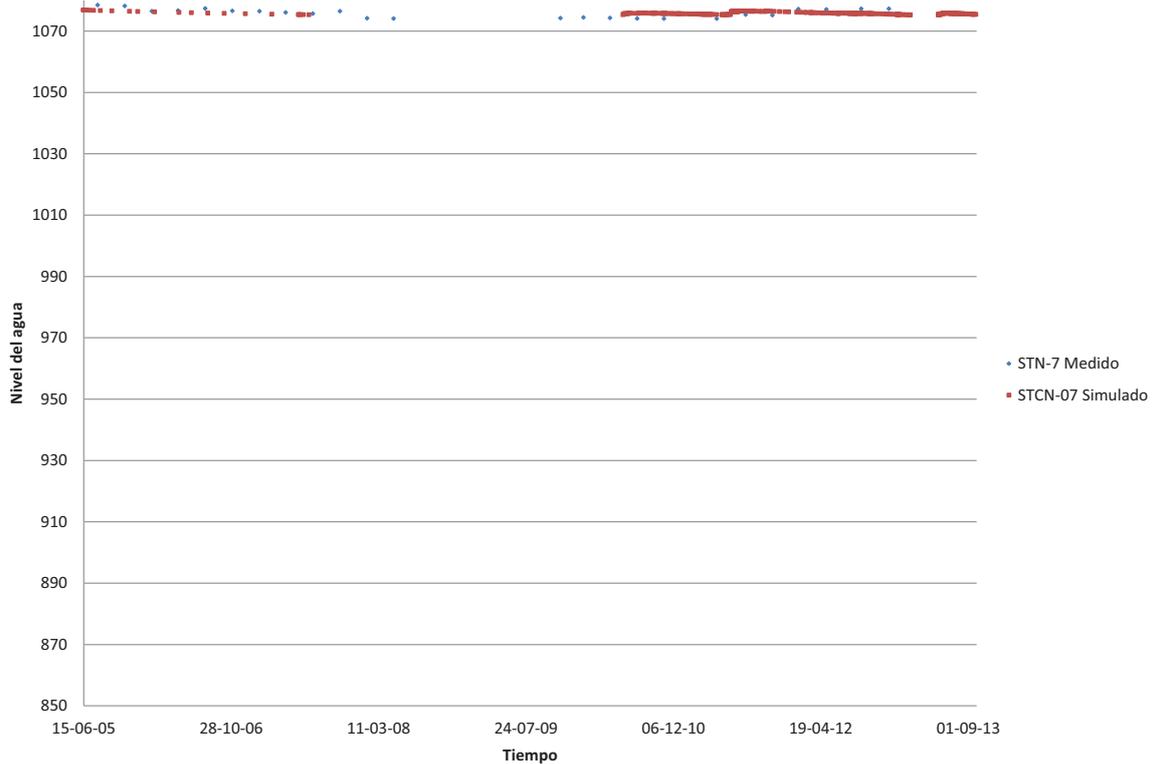
Calibración PHCDA-8



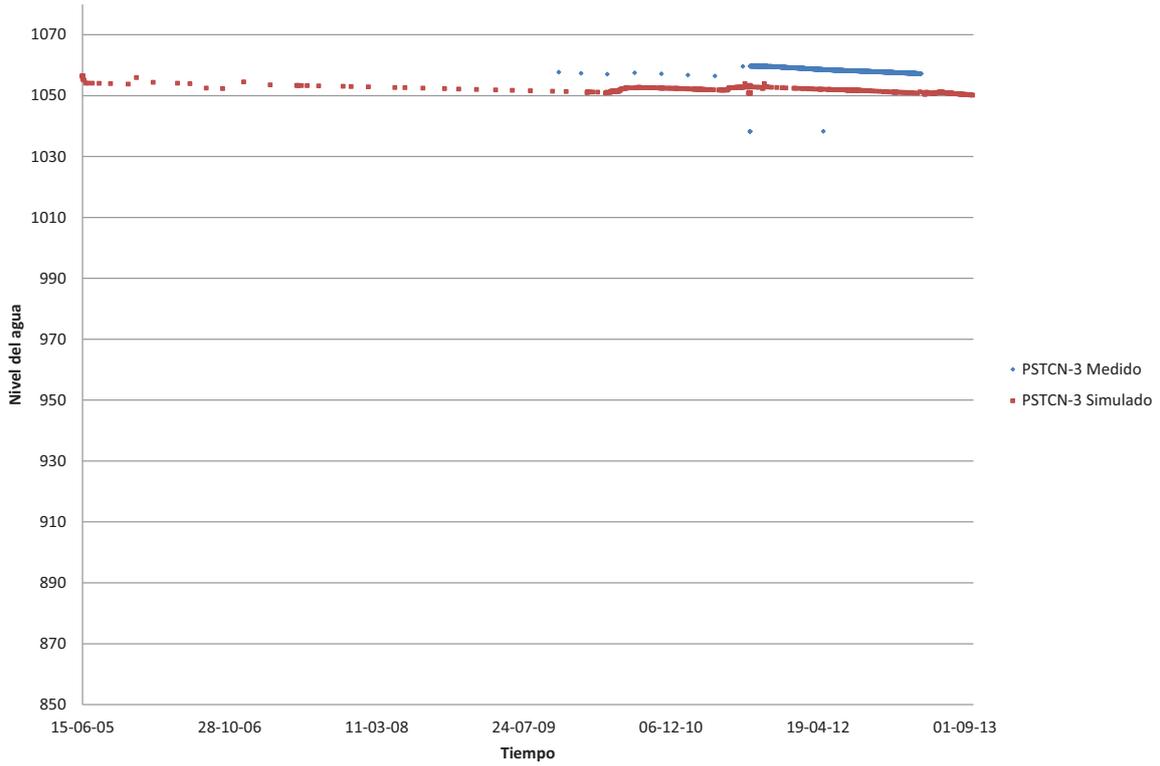
Calibración PHCDA-10



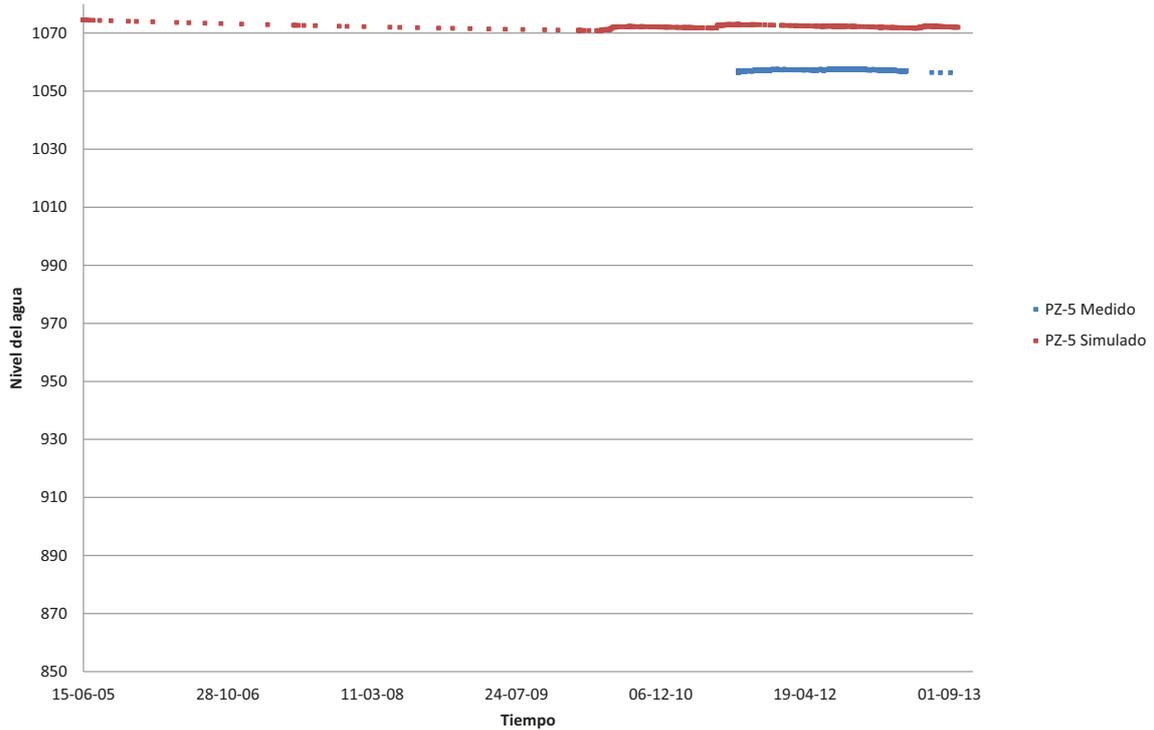
Calibración STN-7



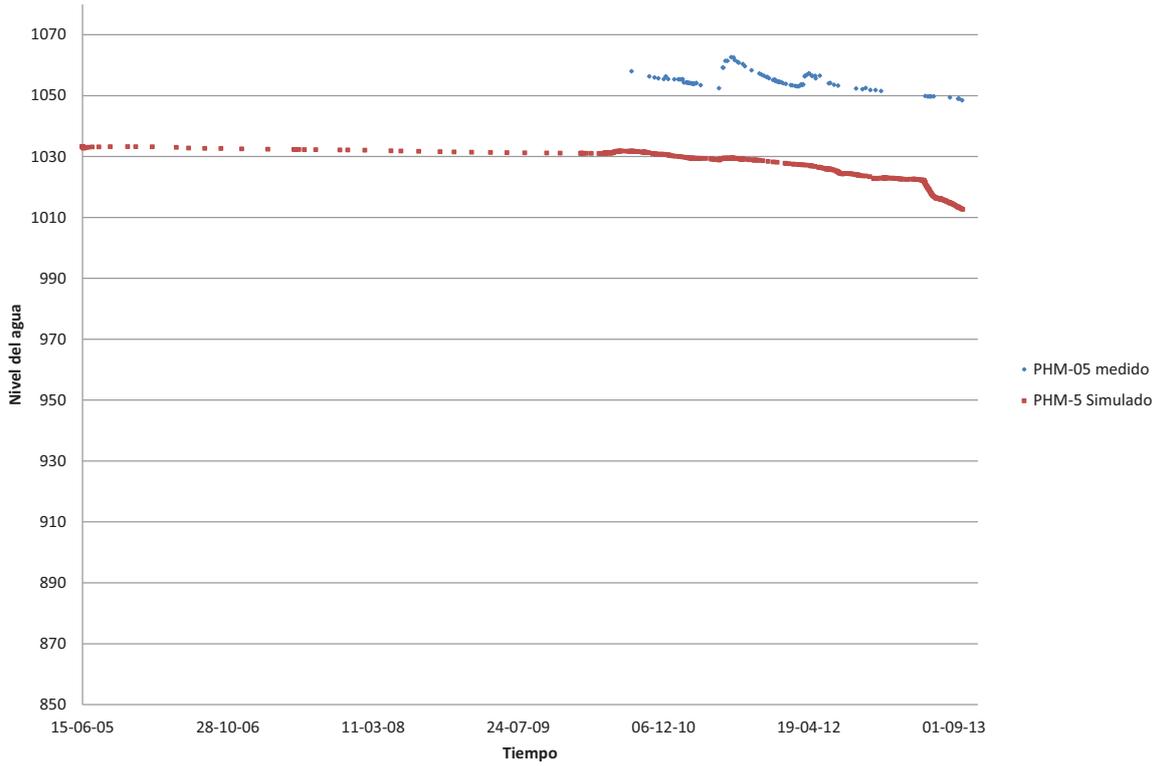
Calibración PSTCN-3



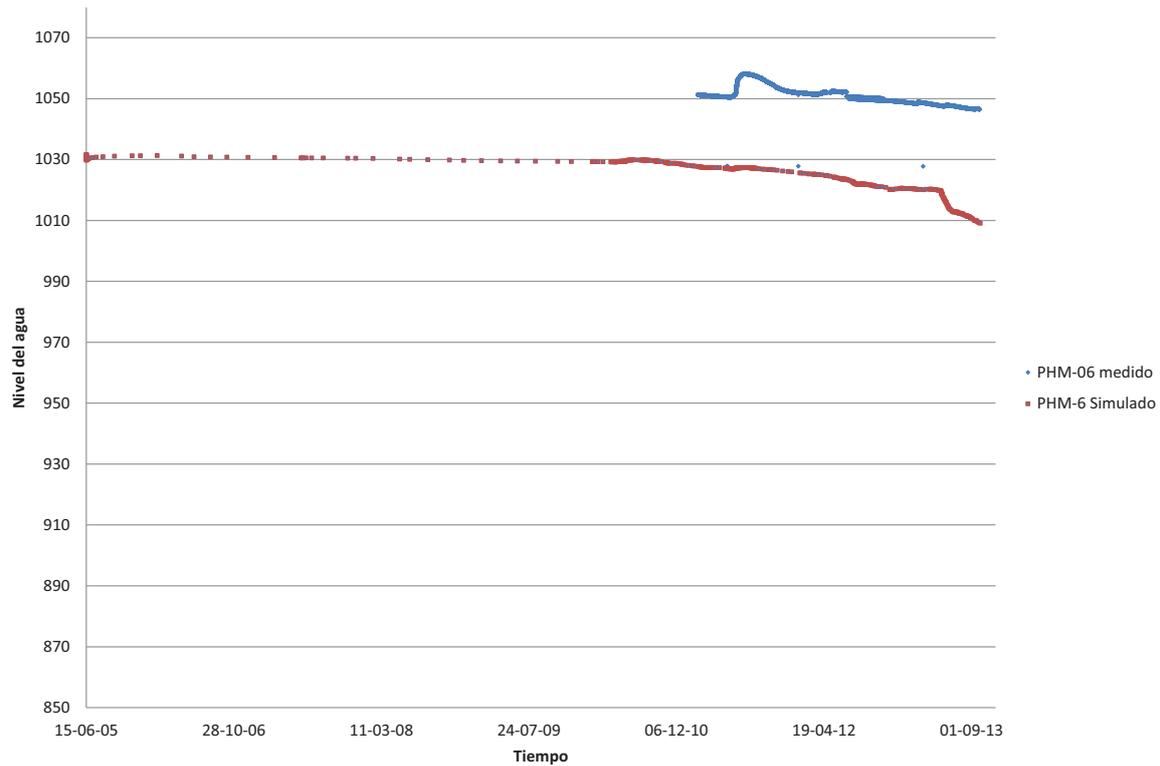
Calibración PZ-5



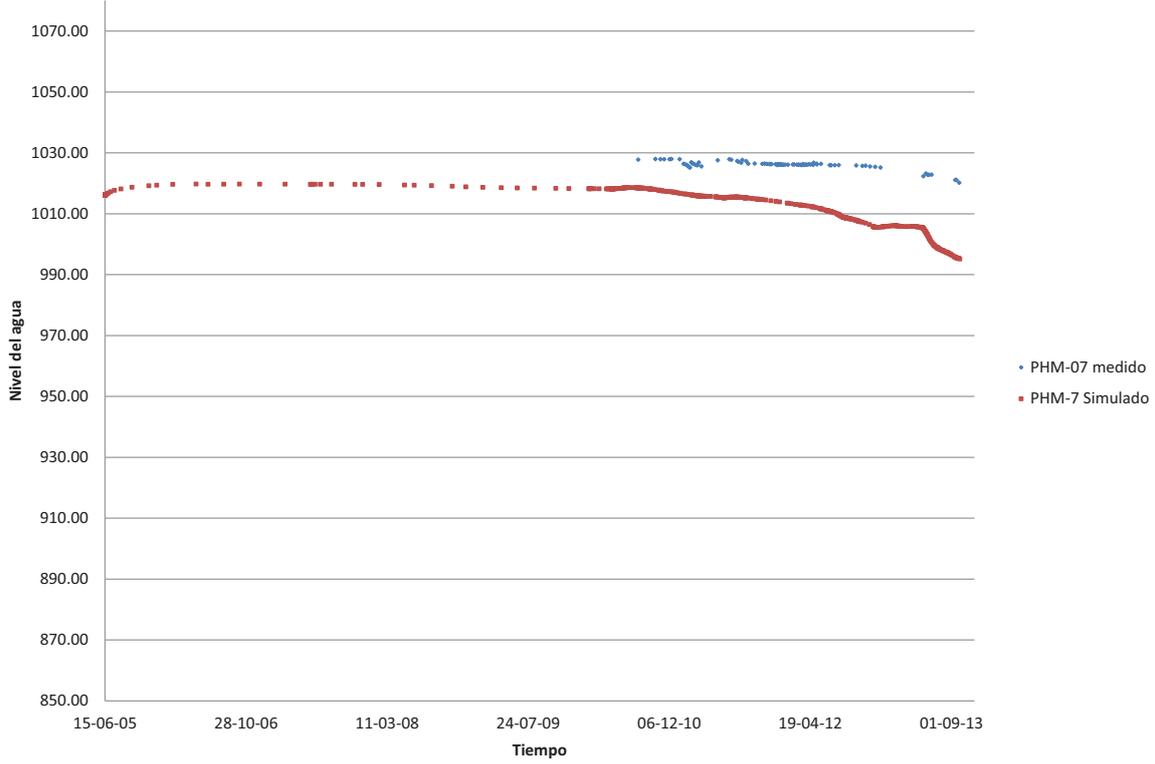
Calibración PHM-05



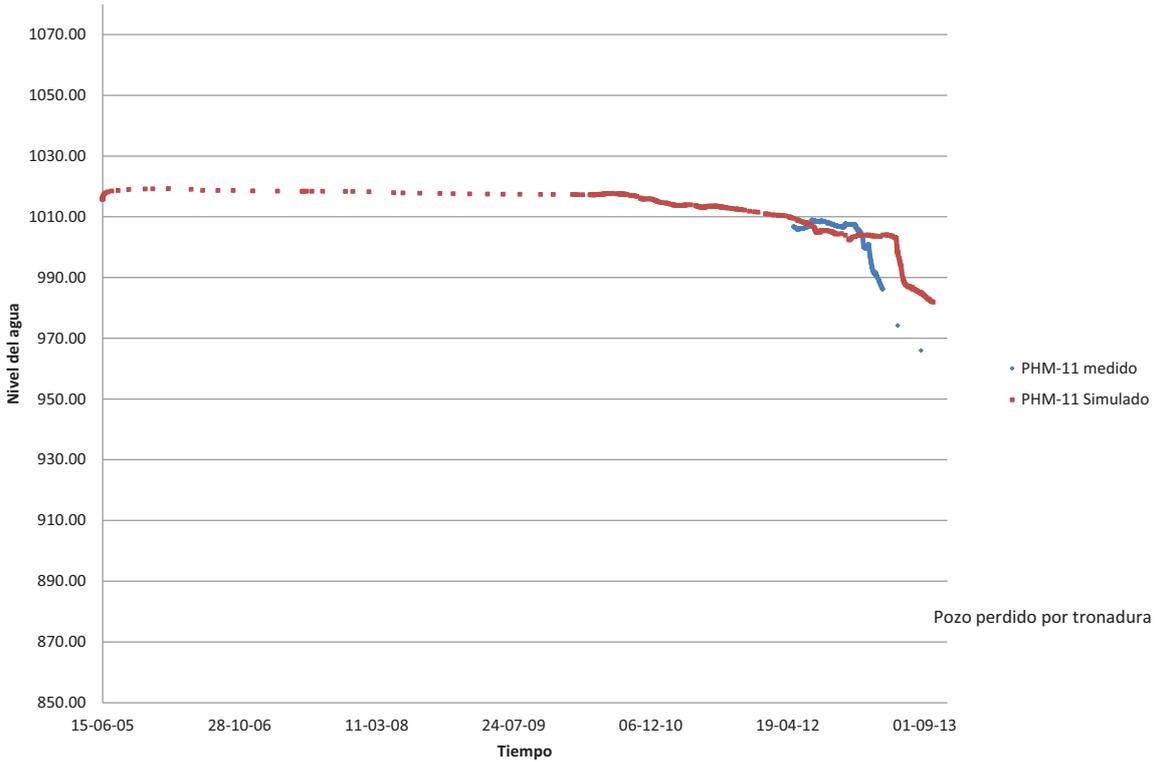
Calibración PHM-06



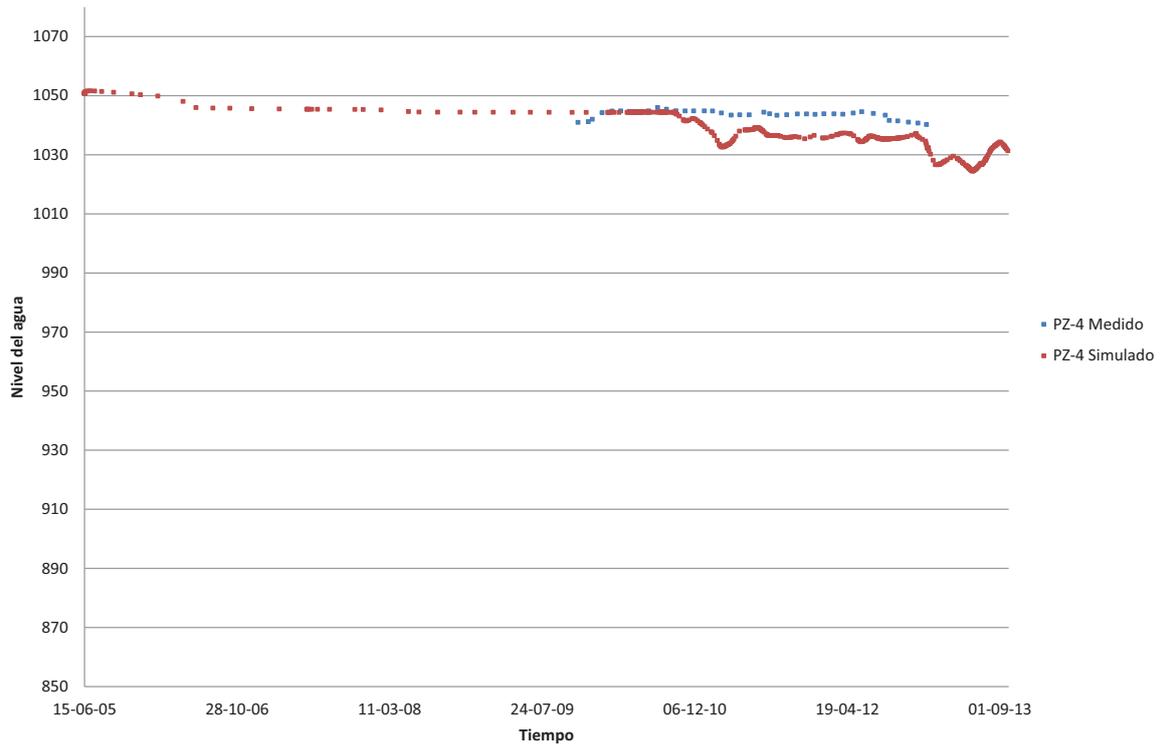
Calibración PHM-07



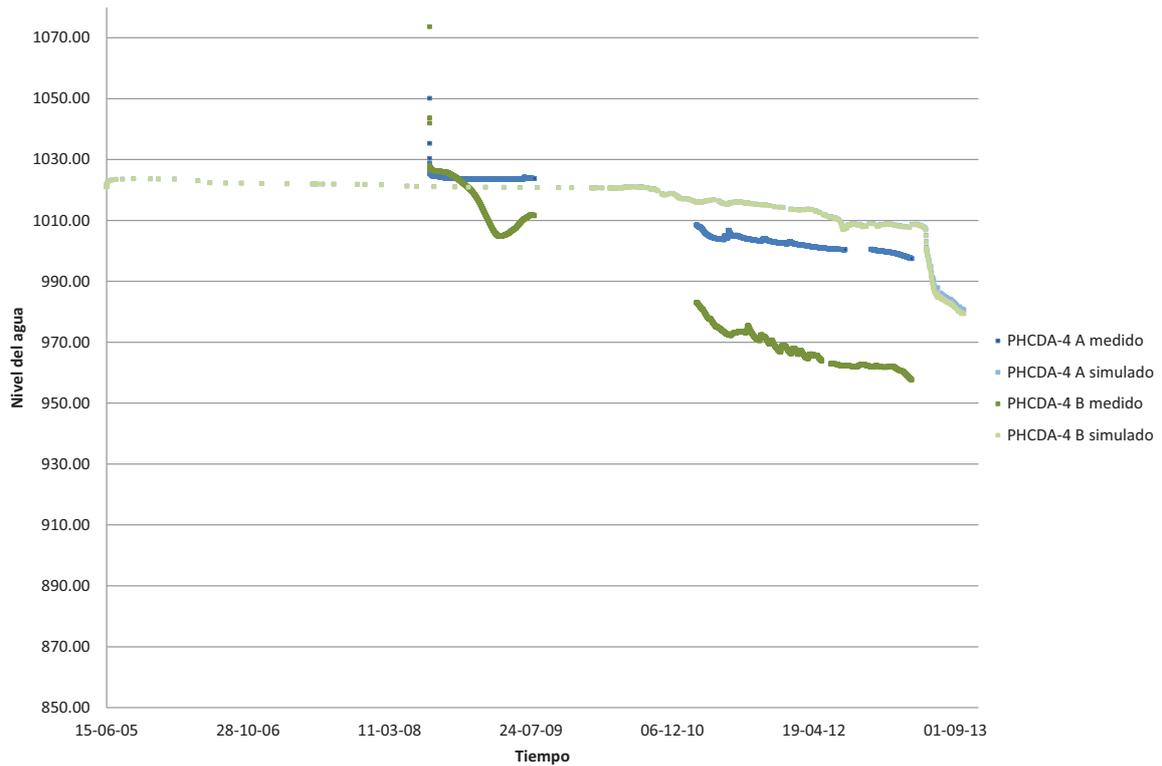
Calibración PHM-11

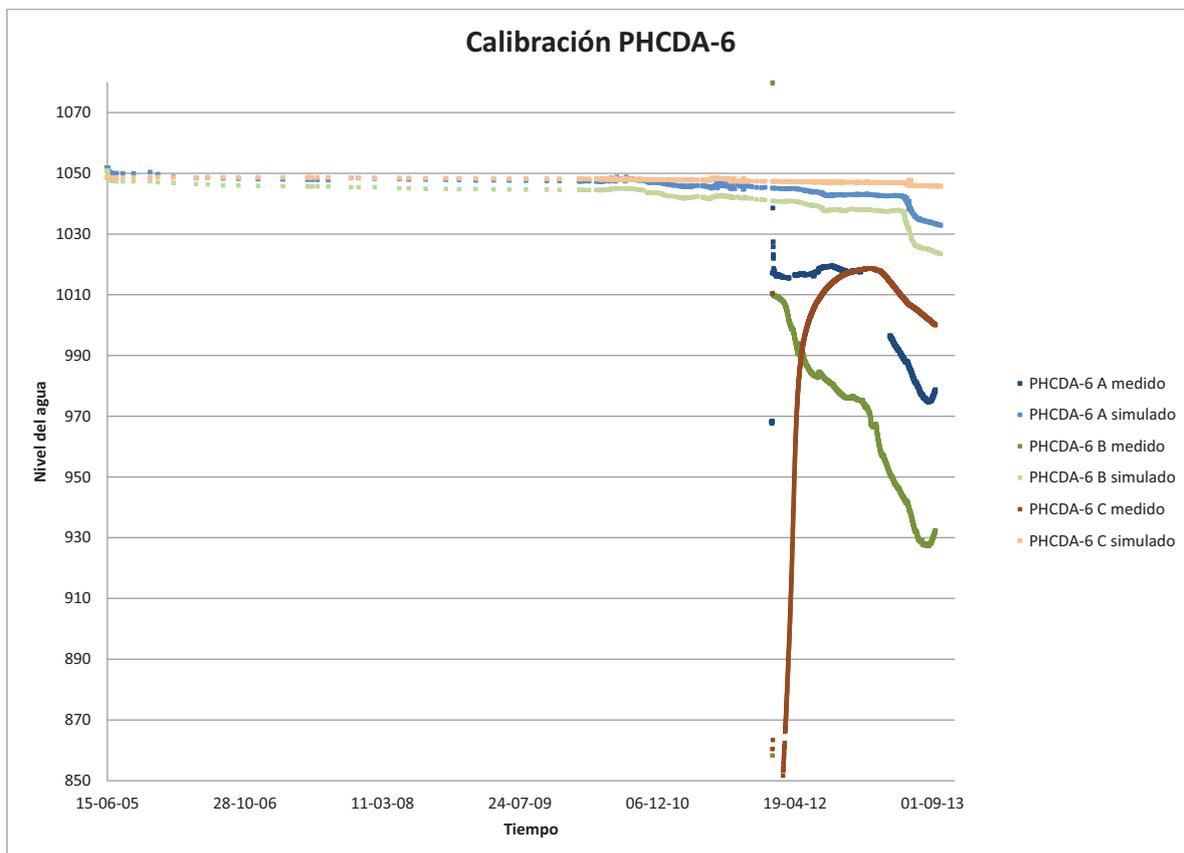
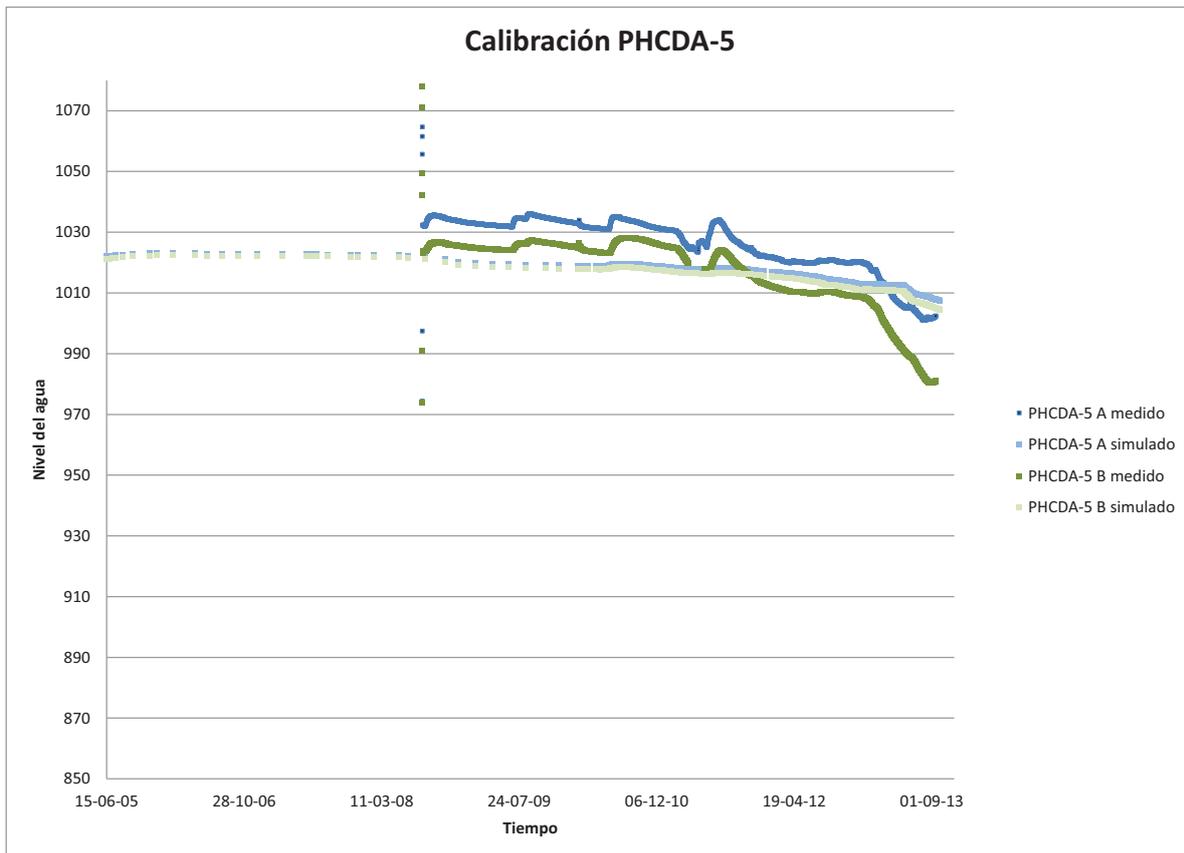


Calibración PZ-4

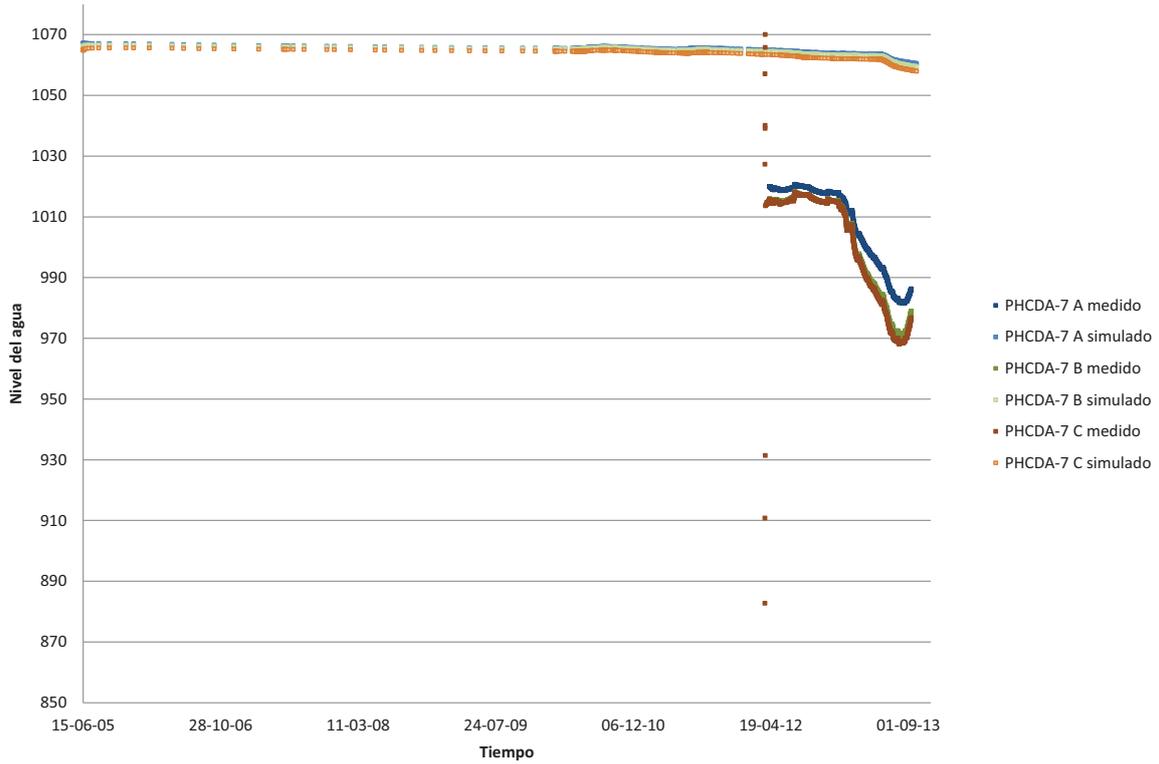


Calibración PHCDA-4

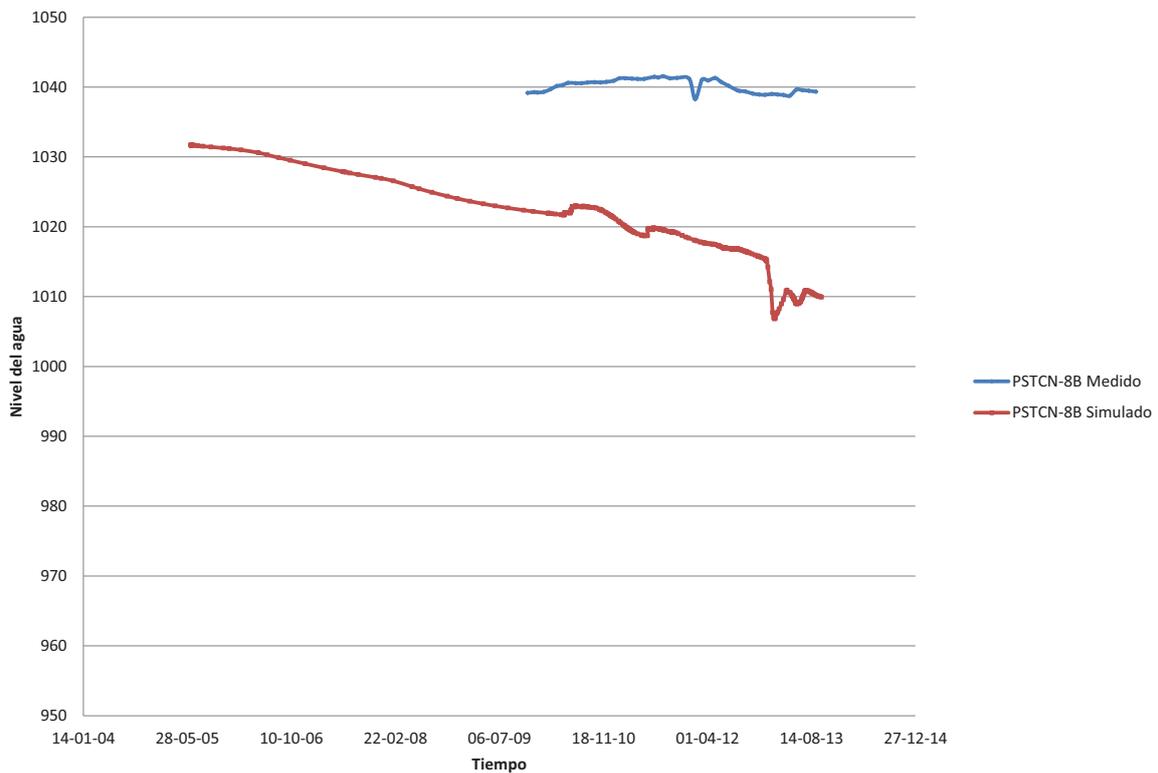




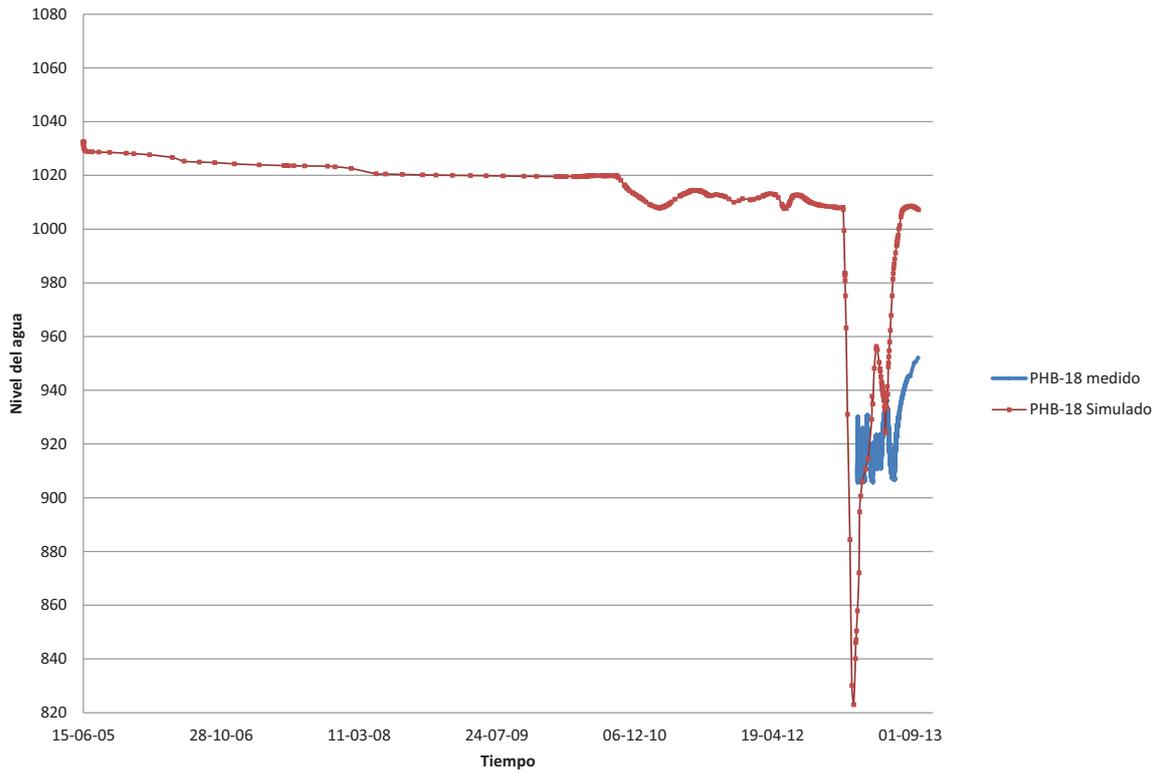
Calibración PHCDA-7



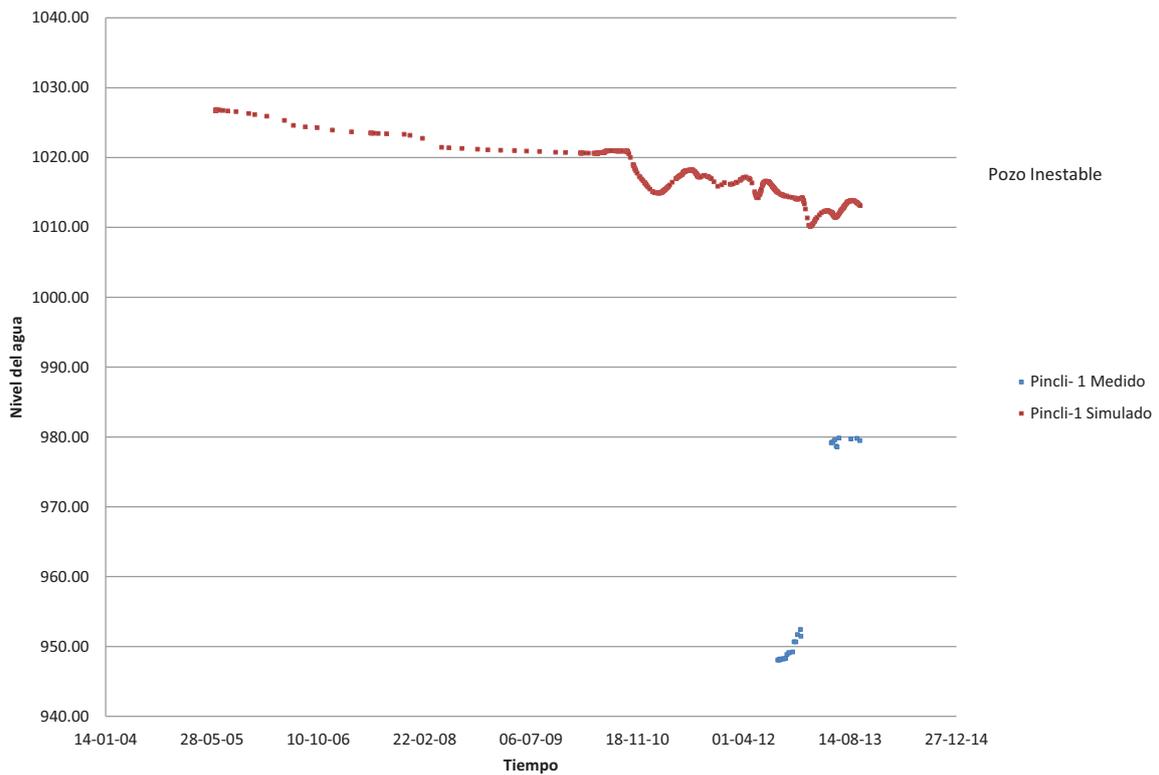
Calibración PSTCN-8B



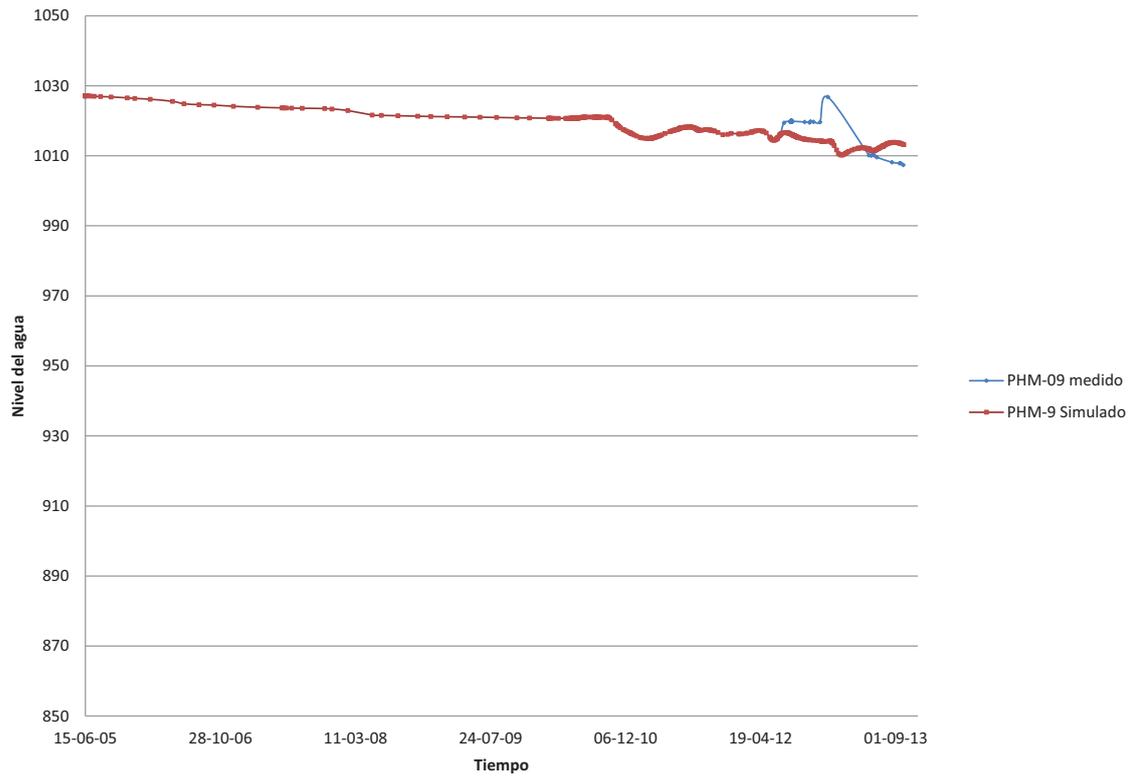
Calibración PHB-18



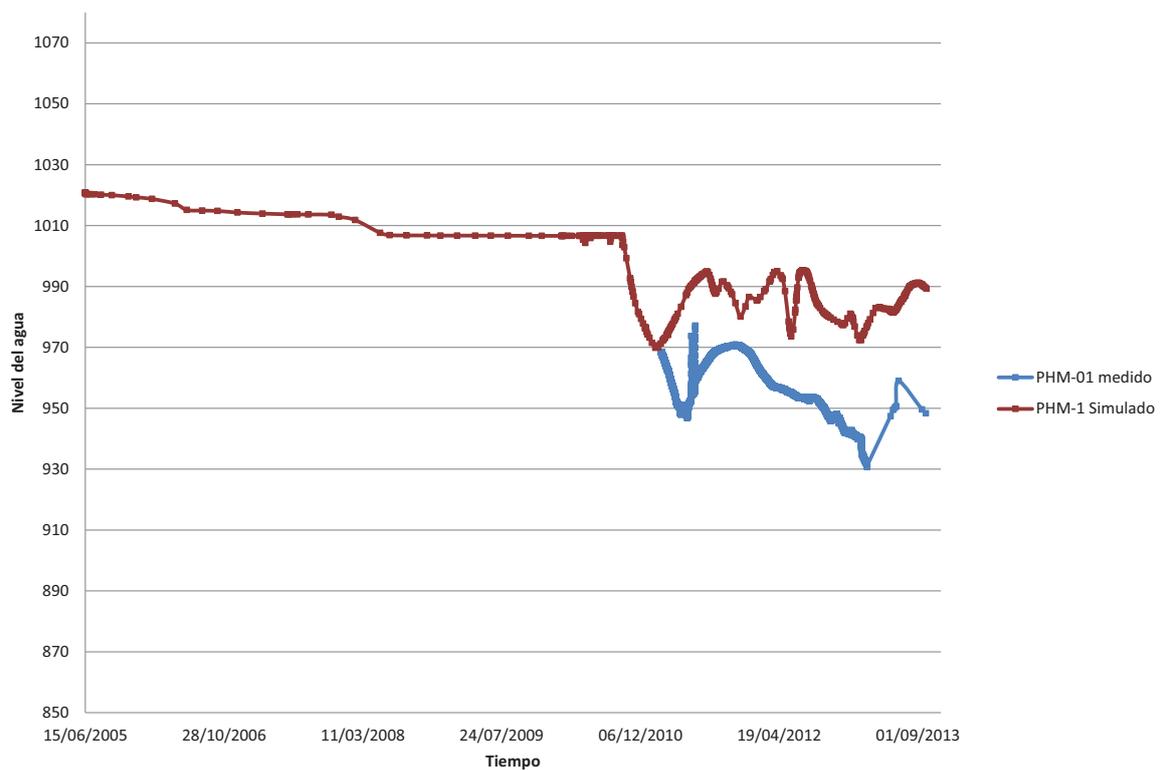
Calibración Pincli-1



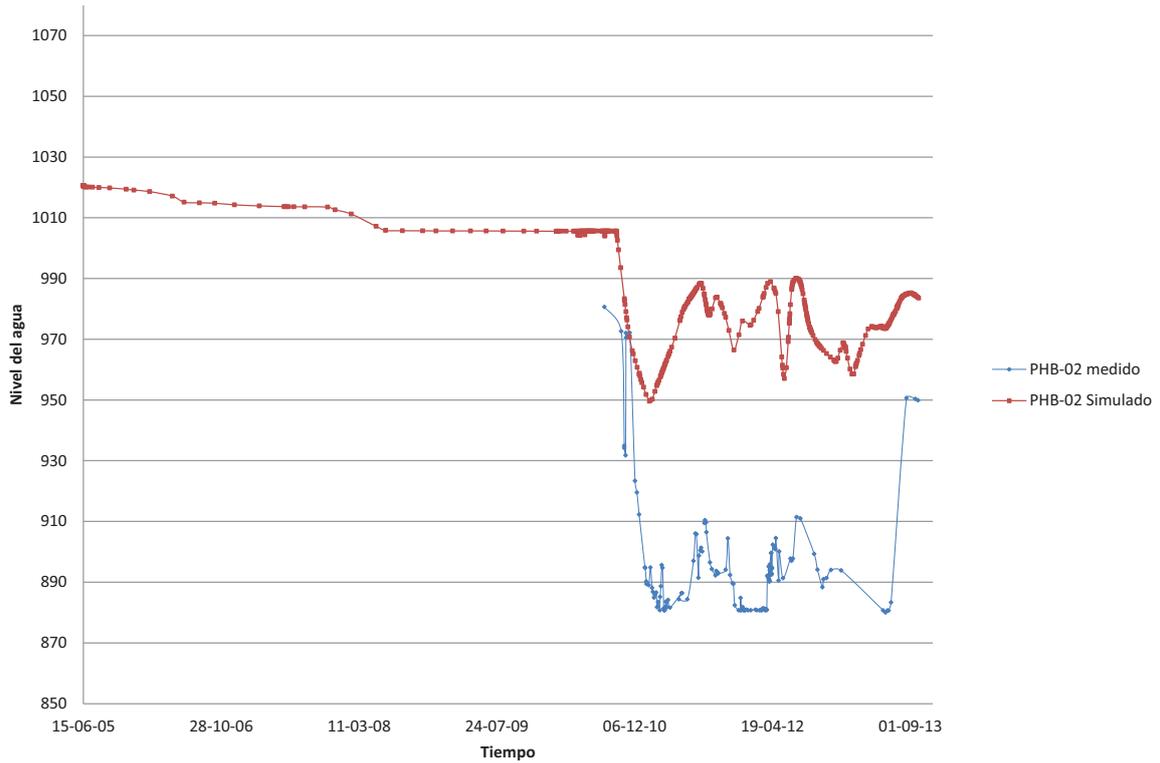
Calibración PHM-09



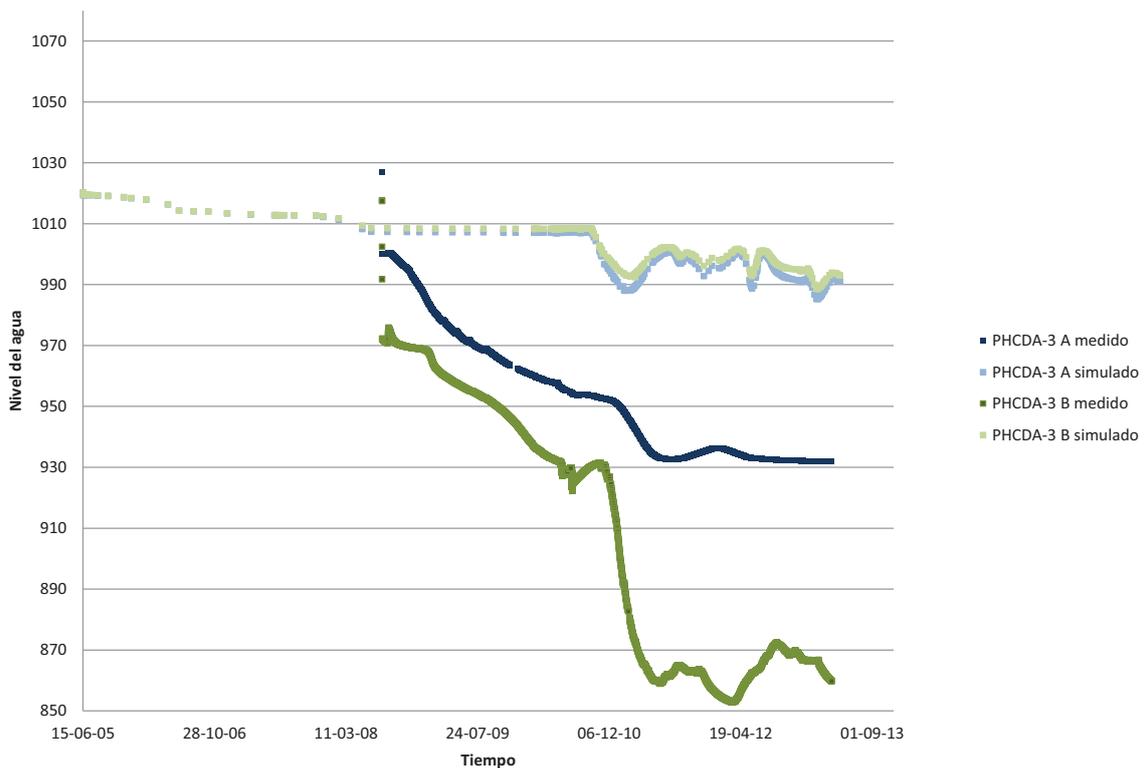
Calibración PHM-01



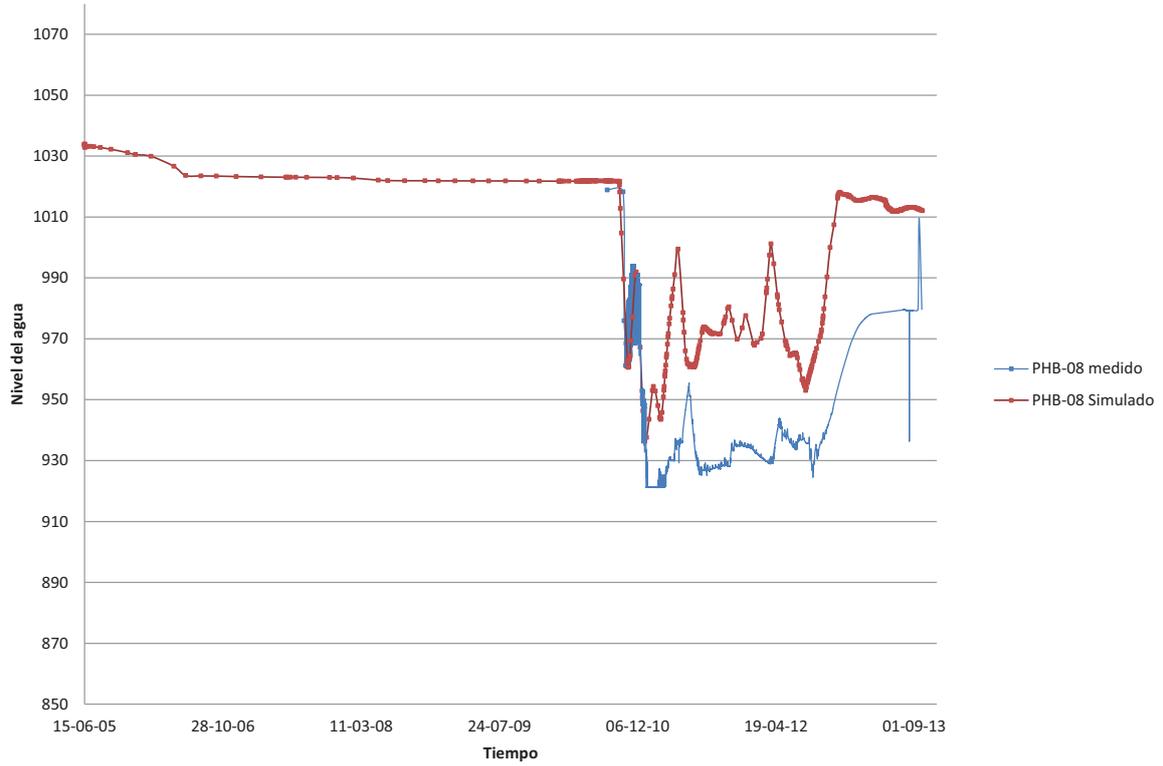
Calibración PHB-02



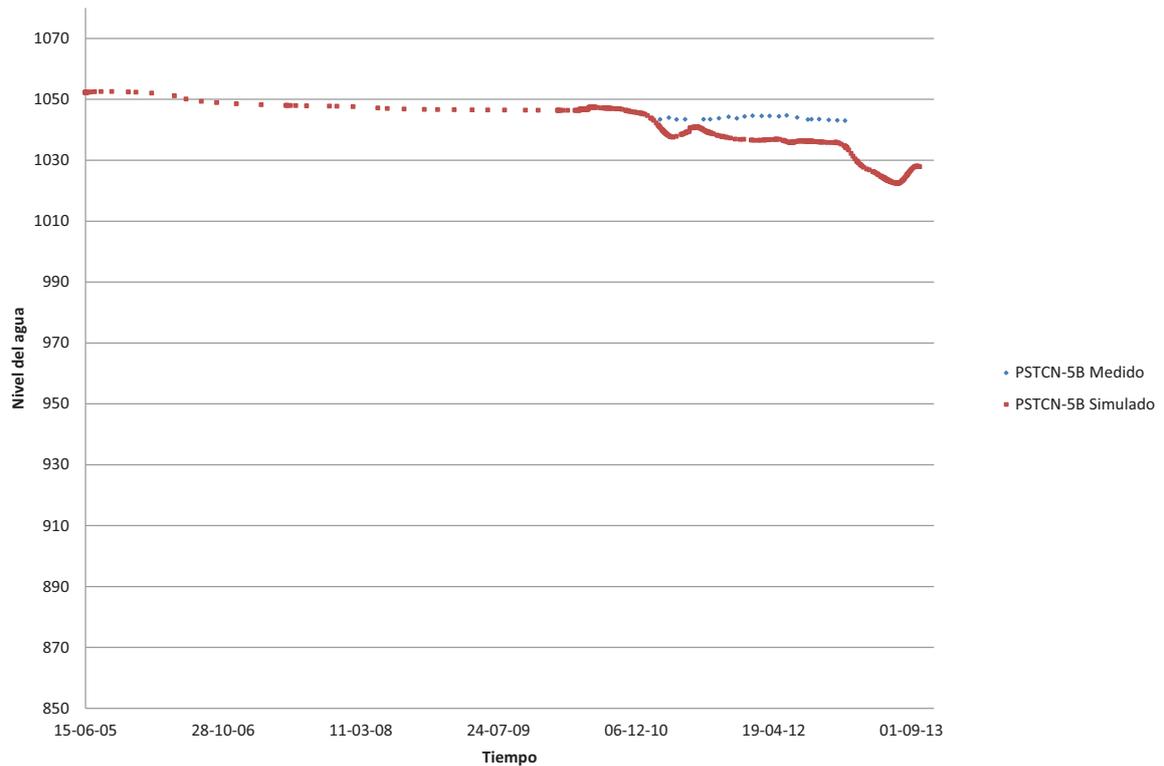
Calibración PHCDA-3



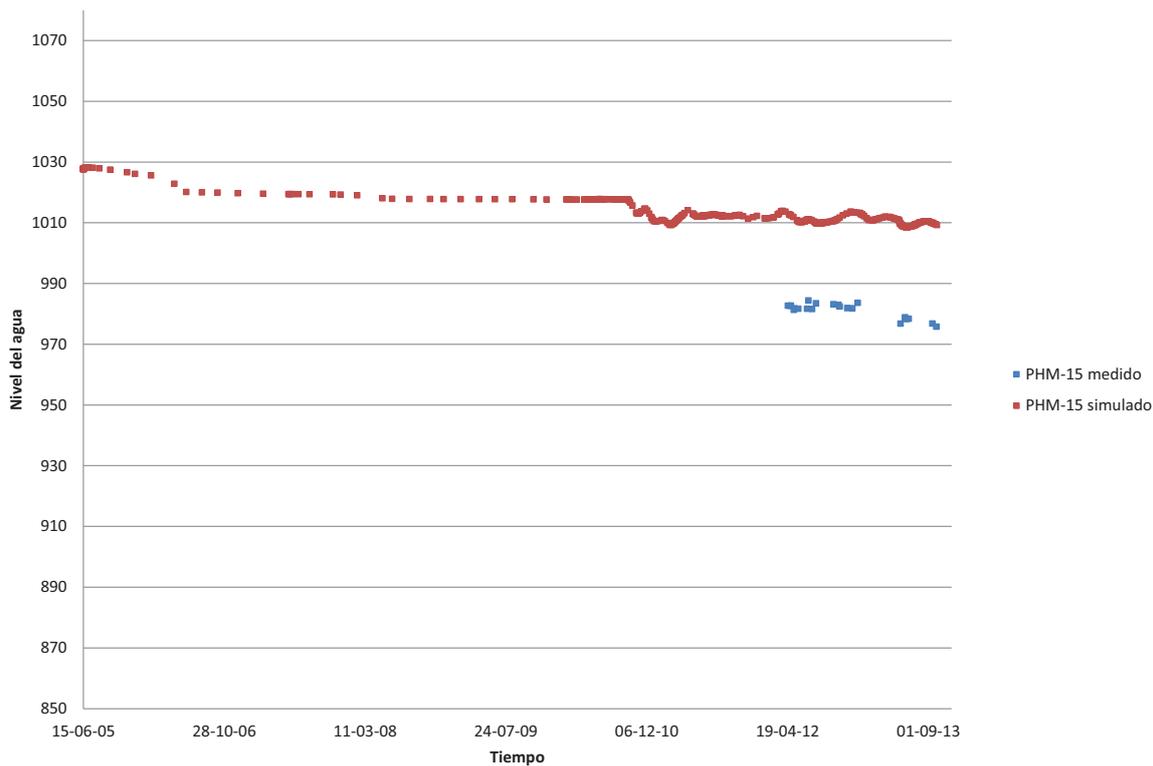
Calibración PHB-08



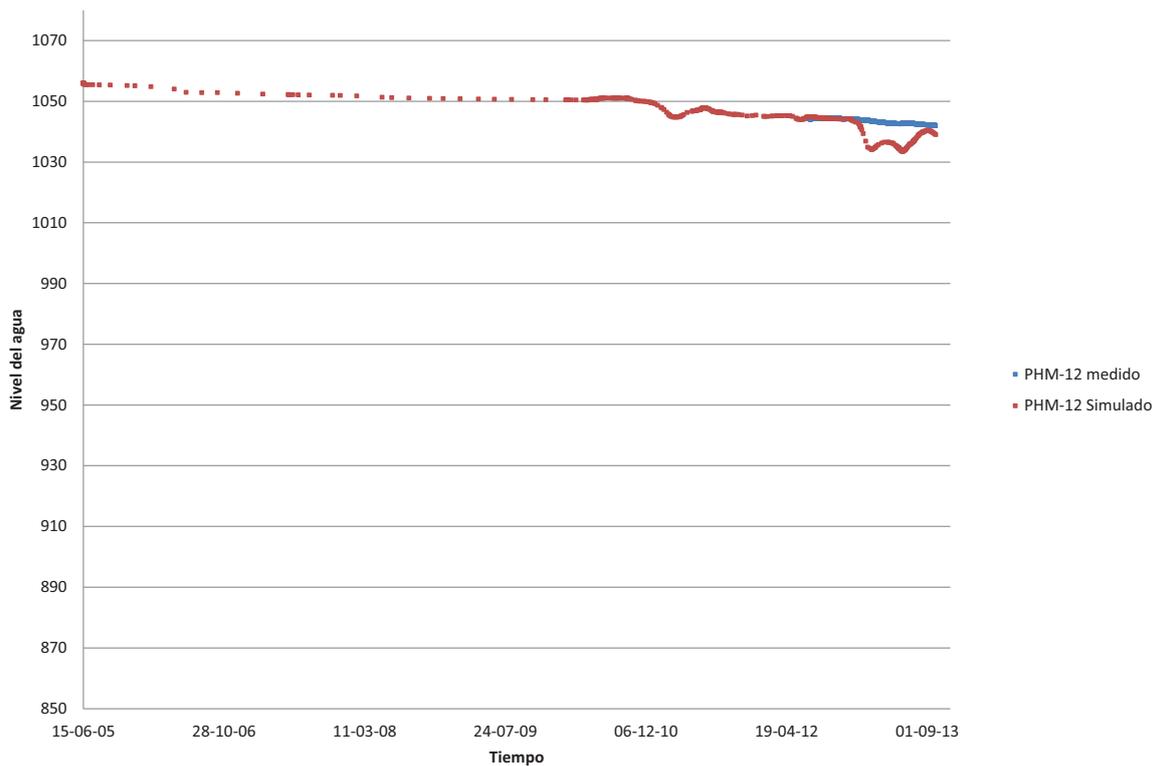
Calibración PSTCN-5B



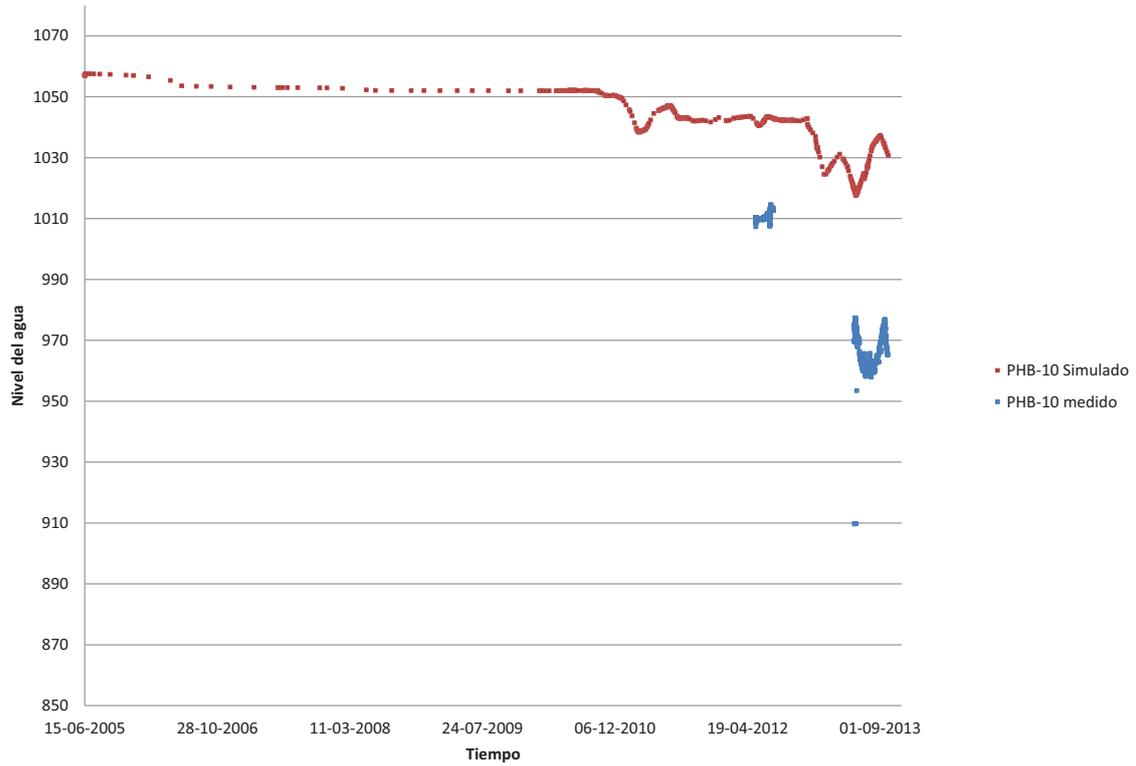
Calibración PHM-15



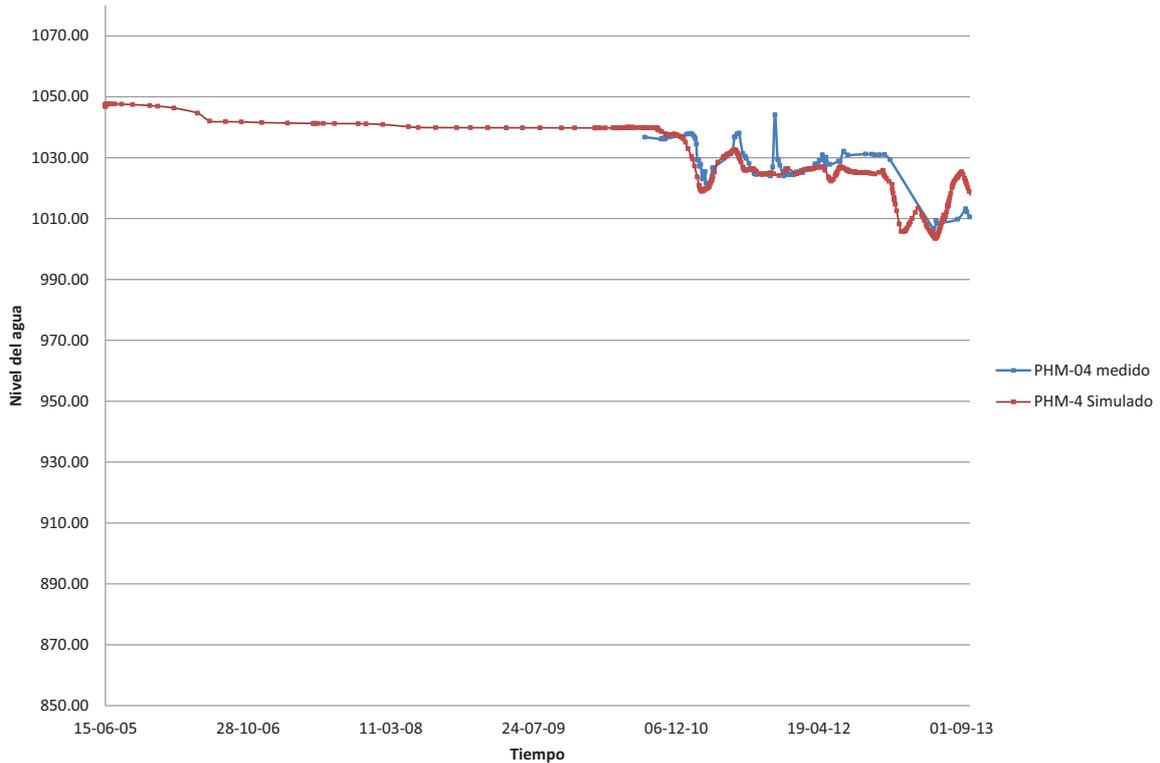
Calibración PHM-12



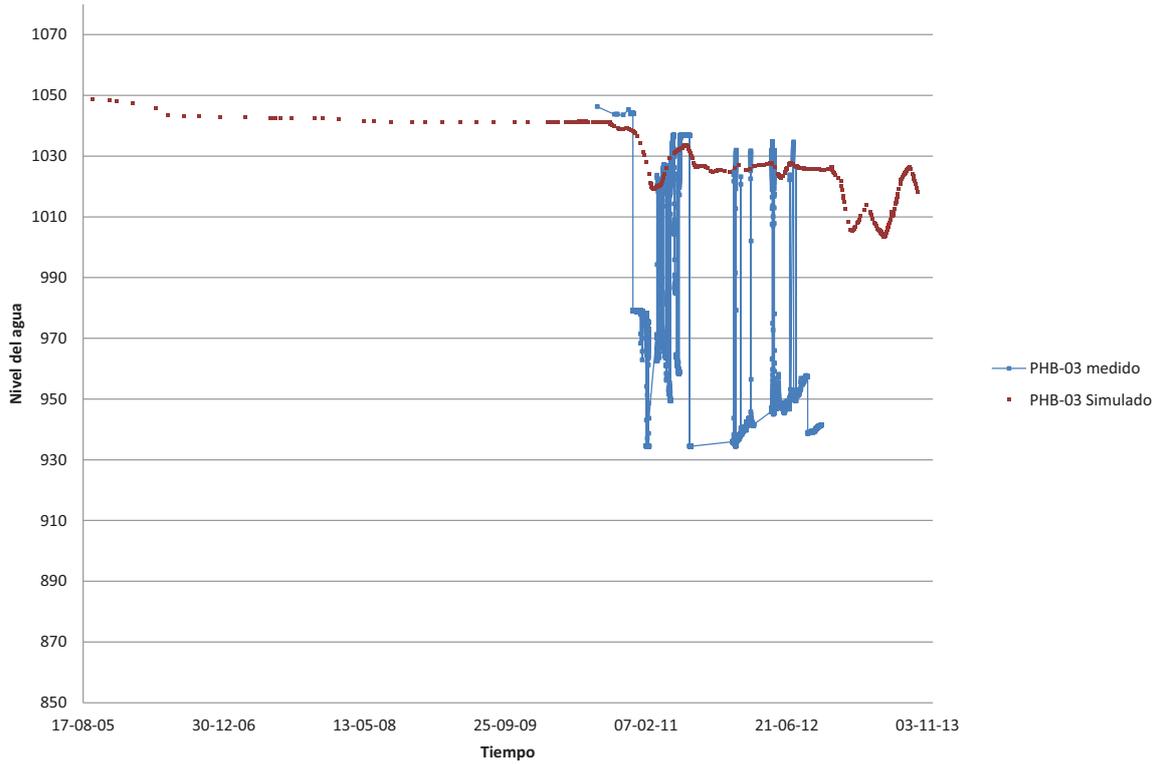
Calibración PHB-10



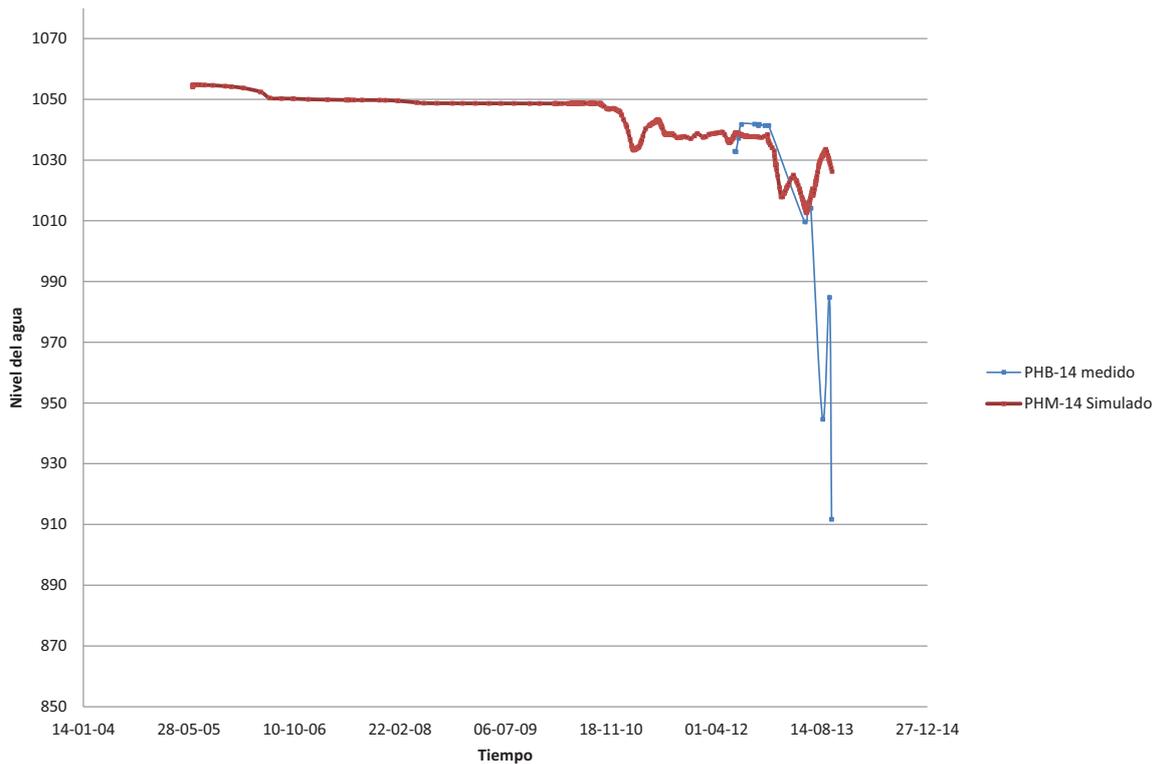
Calibración PHM-04



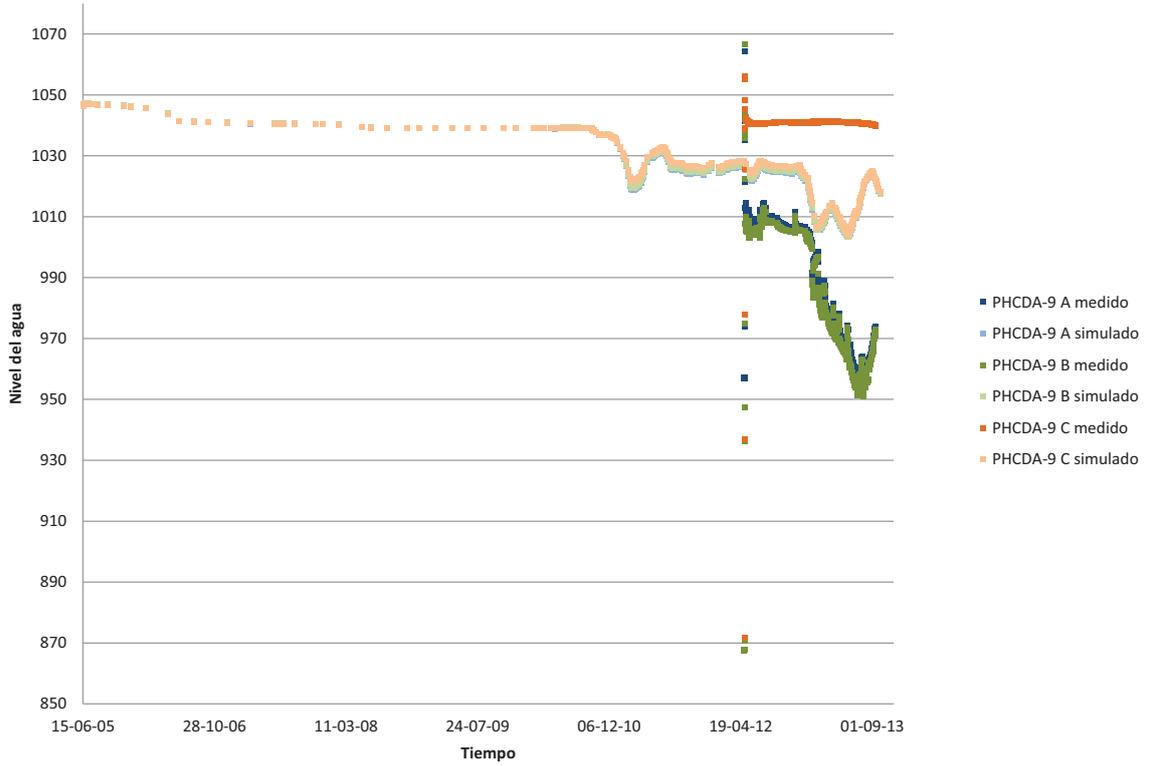
Calibración PHB-03



Calibración PHB-14

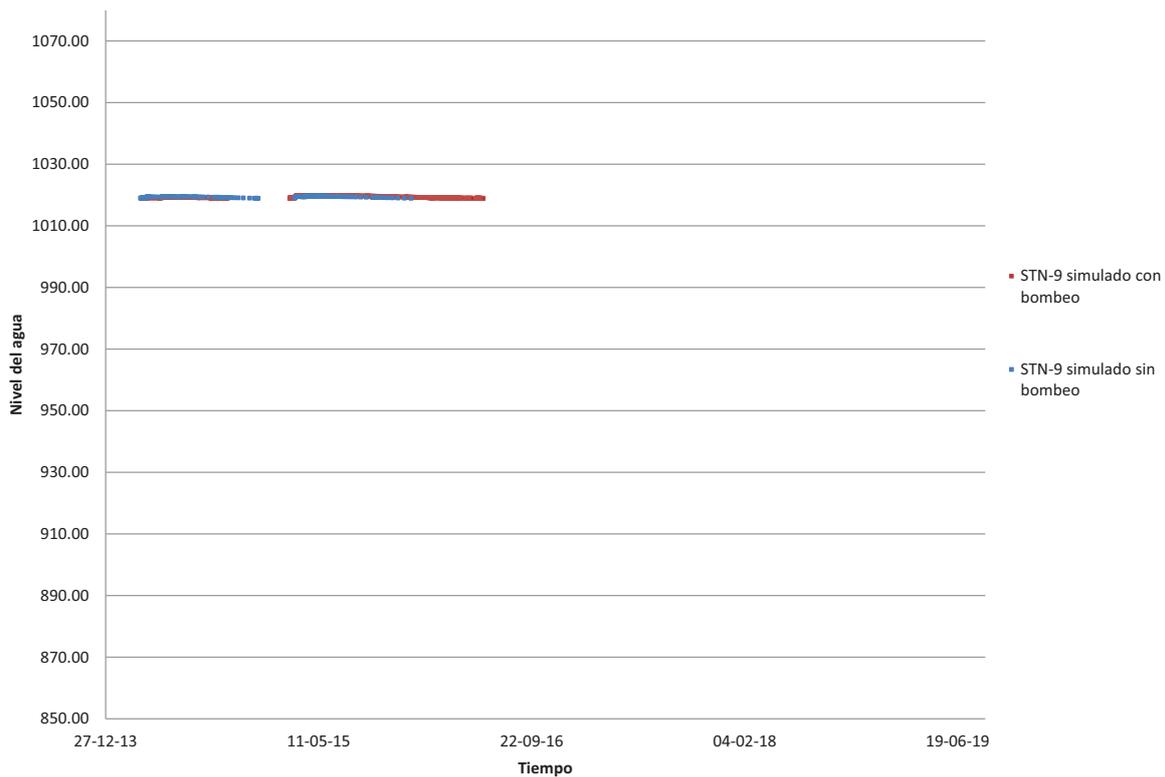


Calibración PHCDA-9

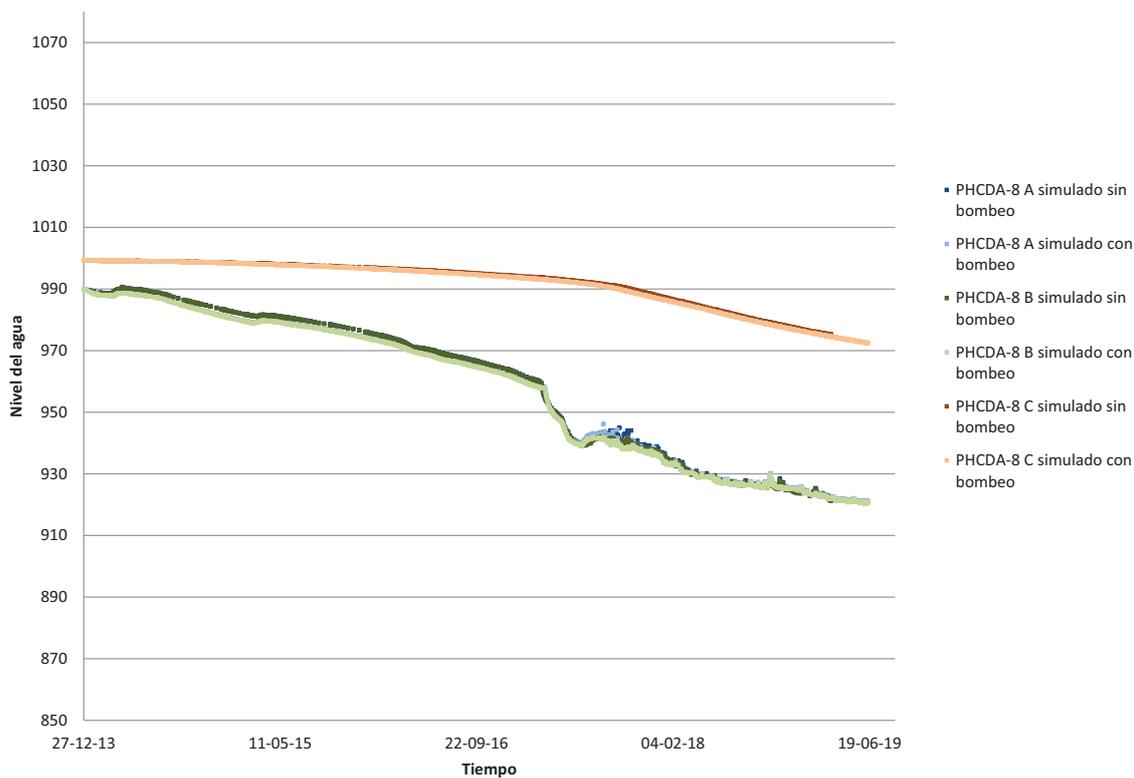


ANEXO C: HIDROGRAMAS CALIBRACIÓN PERIODO 2013-2019.

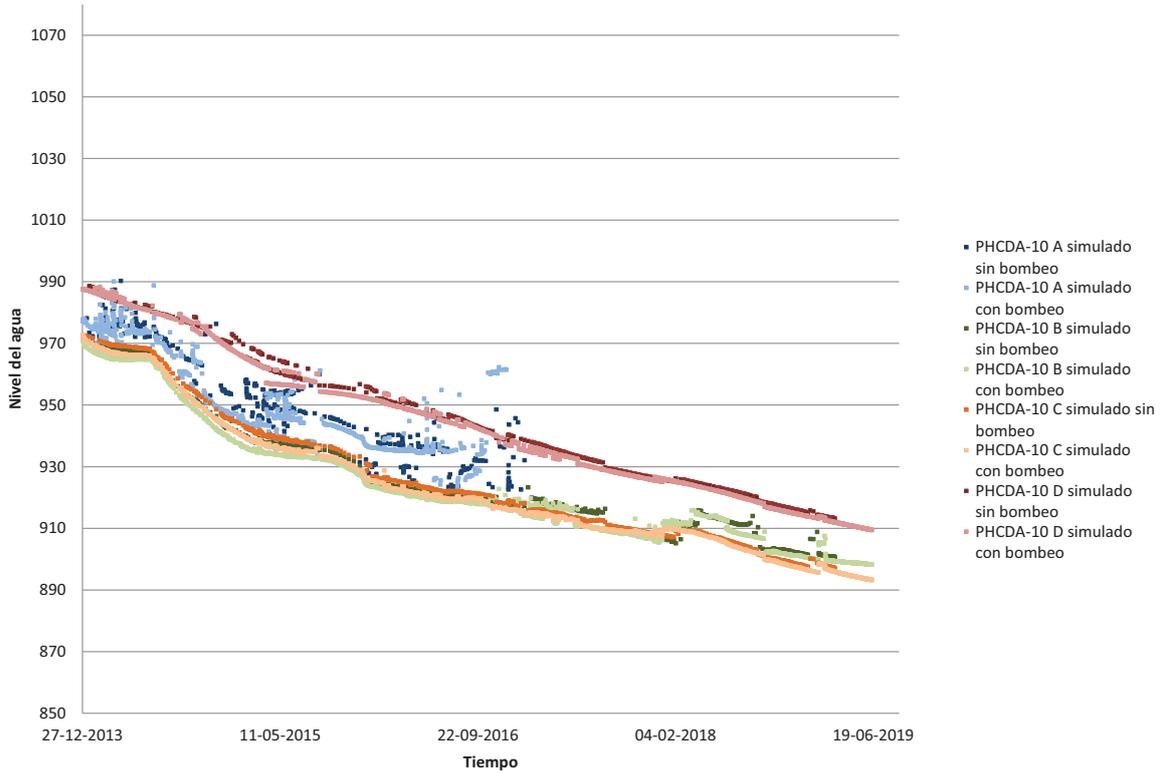
Calibración STN-9



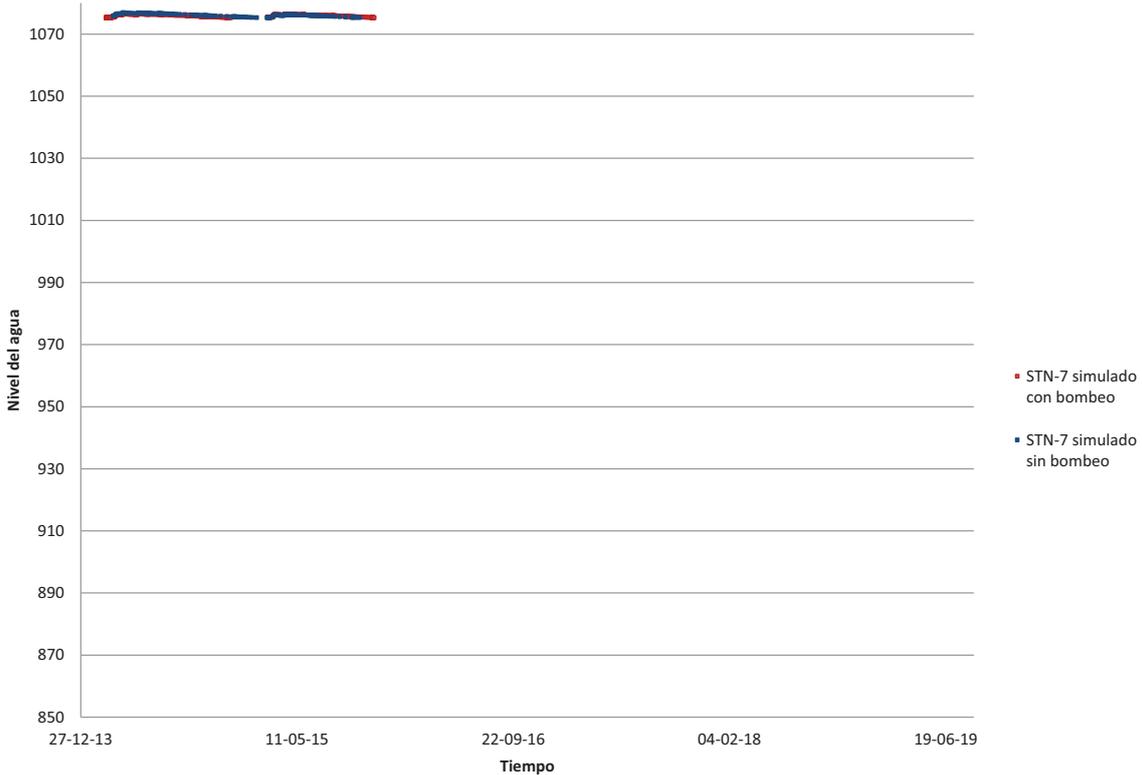
Calibración PHCDA-8



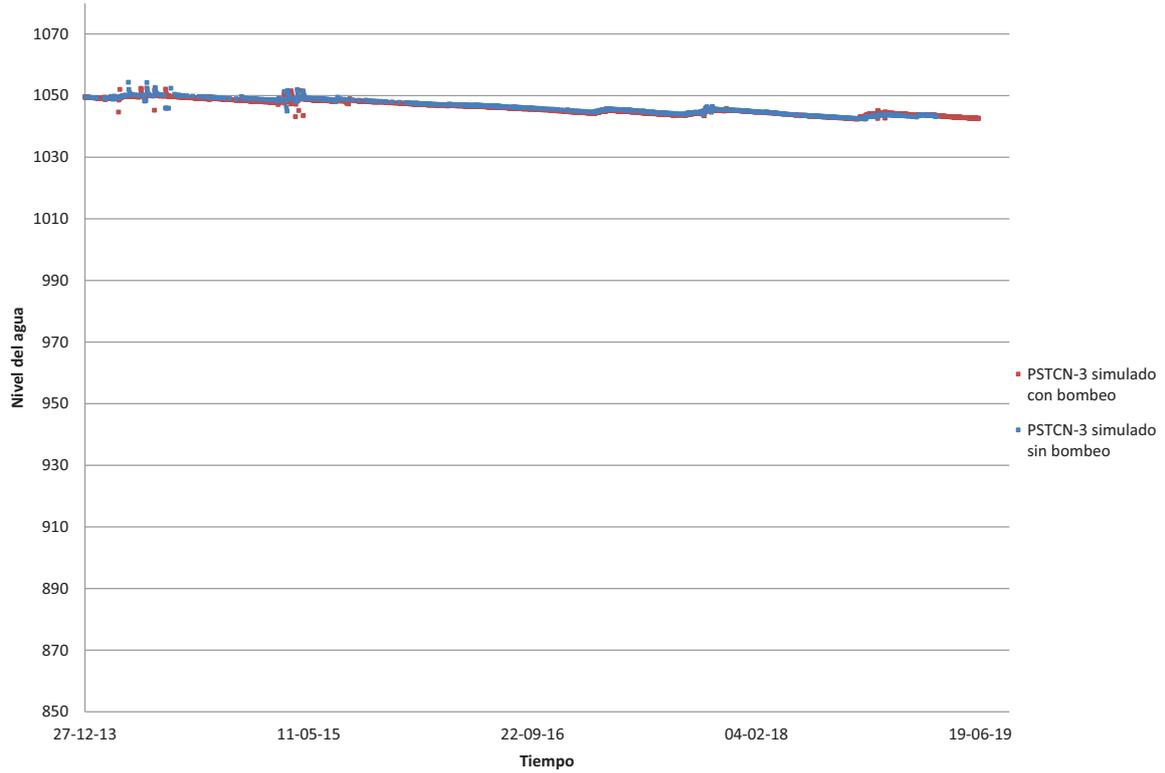
Calibración PHCDA-10



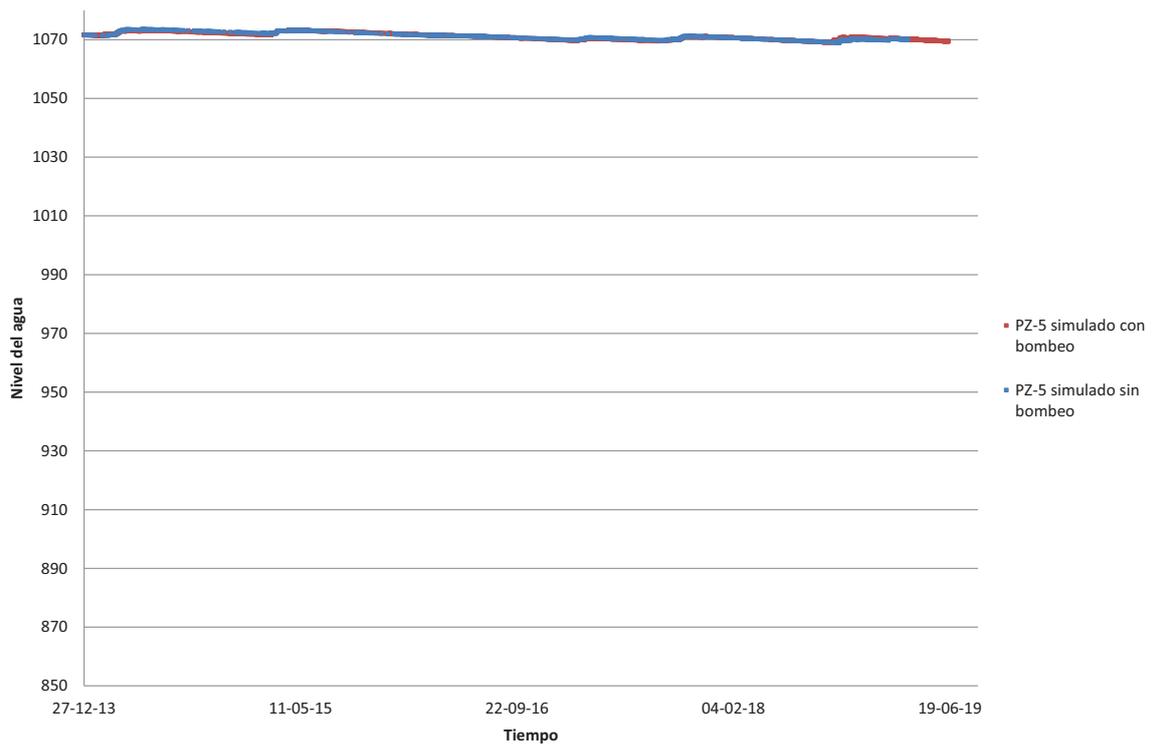
Calibración STN-7



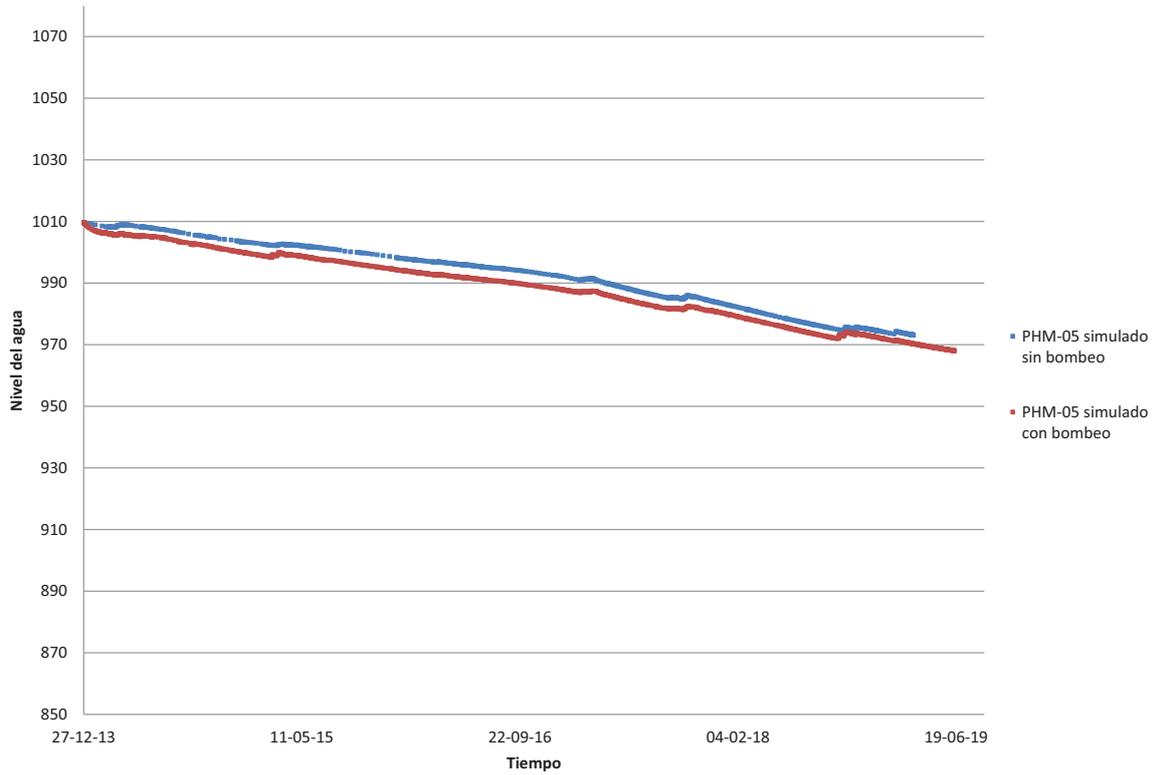
Calibración PSTCN-3



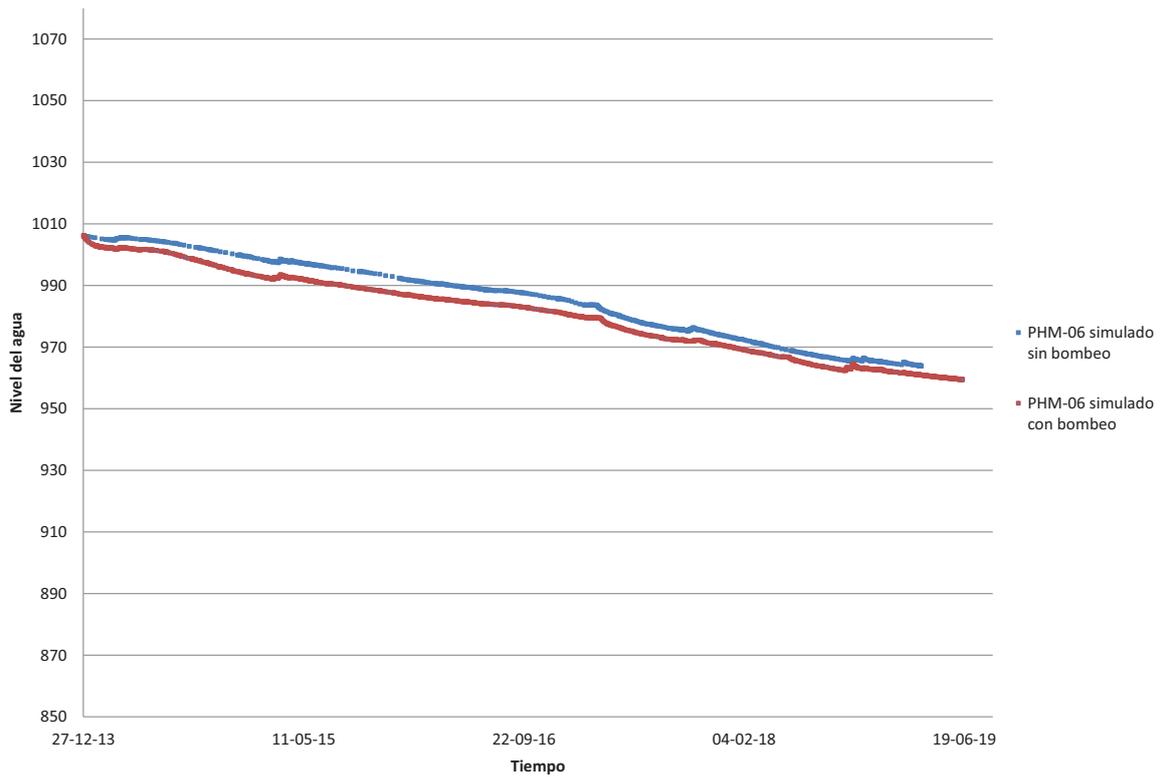
Calibración PZ-5



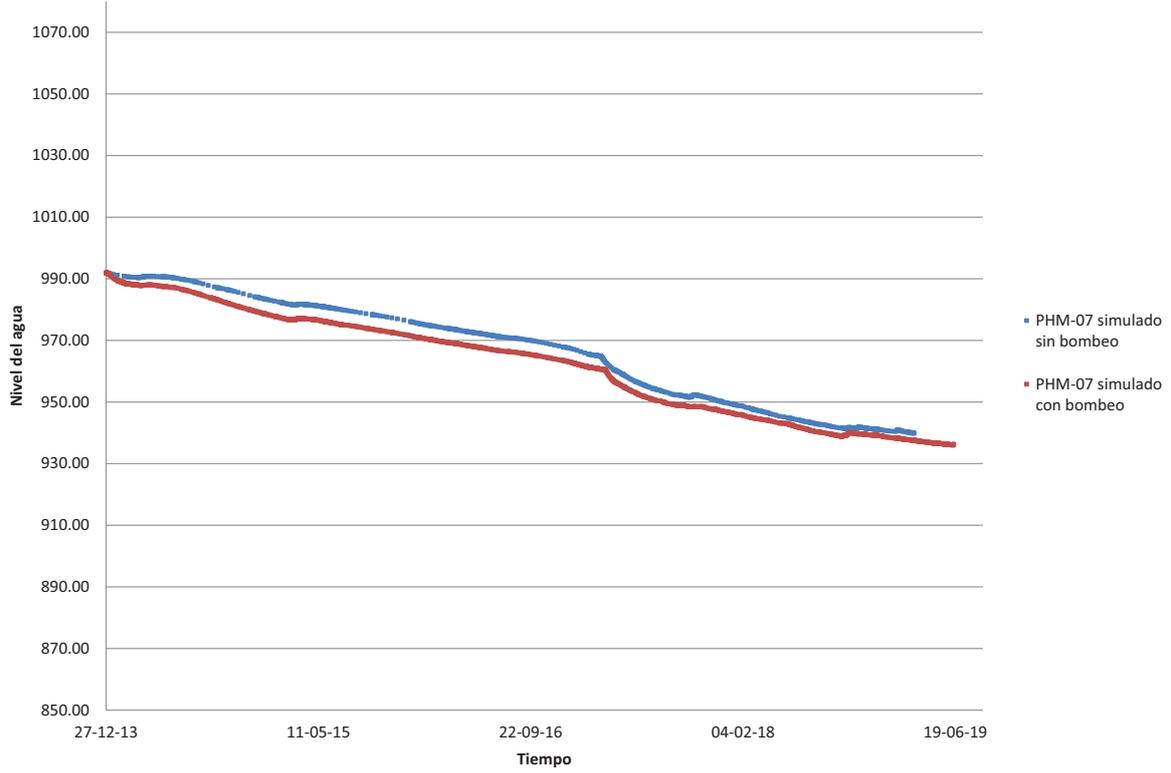
Calibración PHM-05



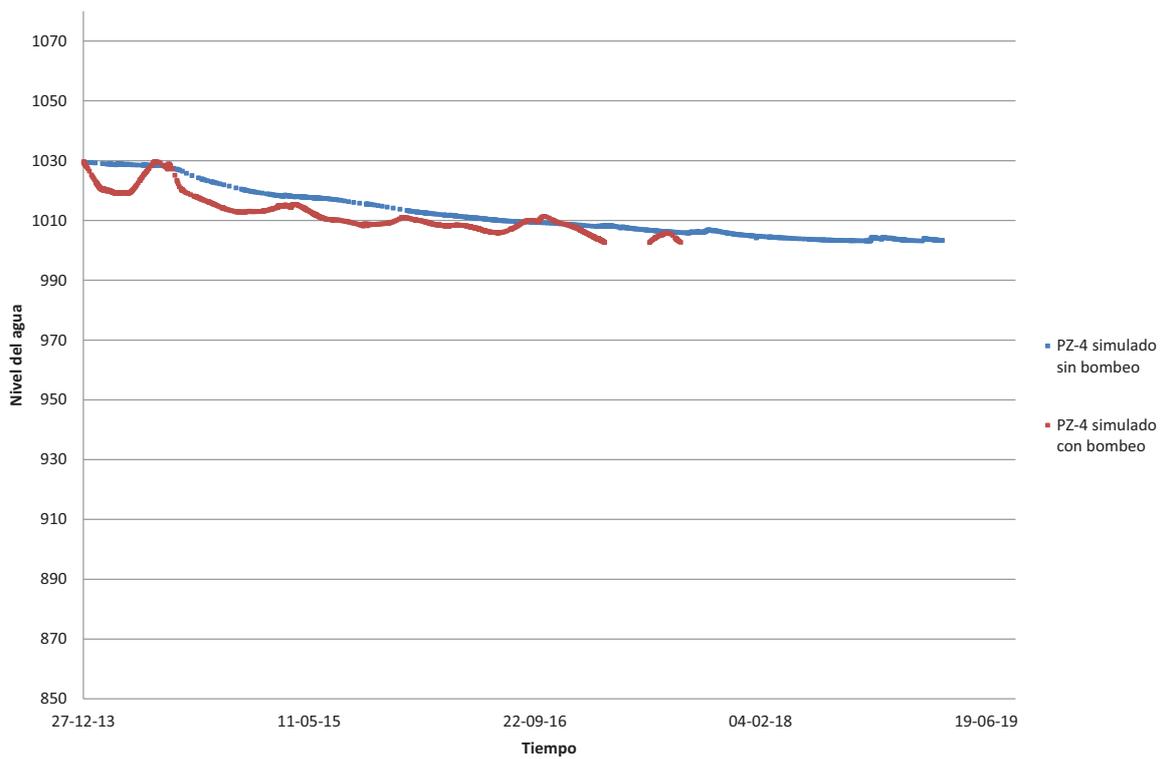
Calibración PHM-06



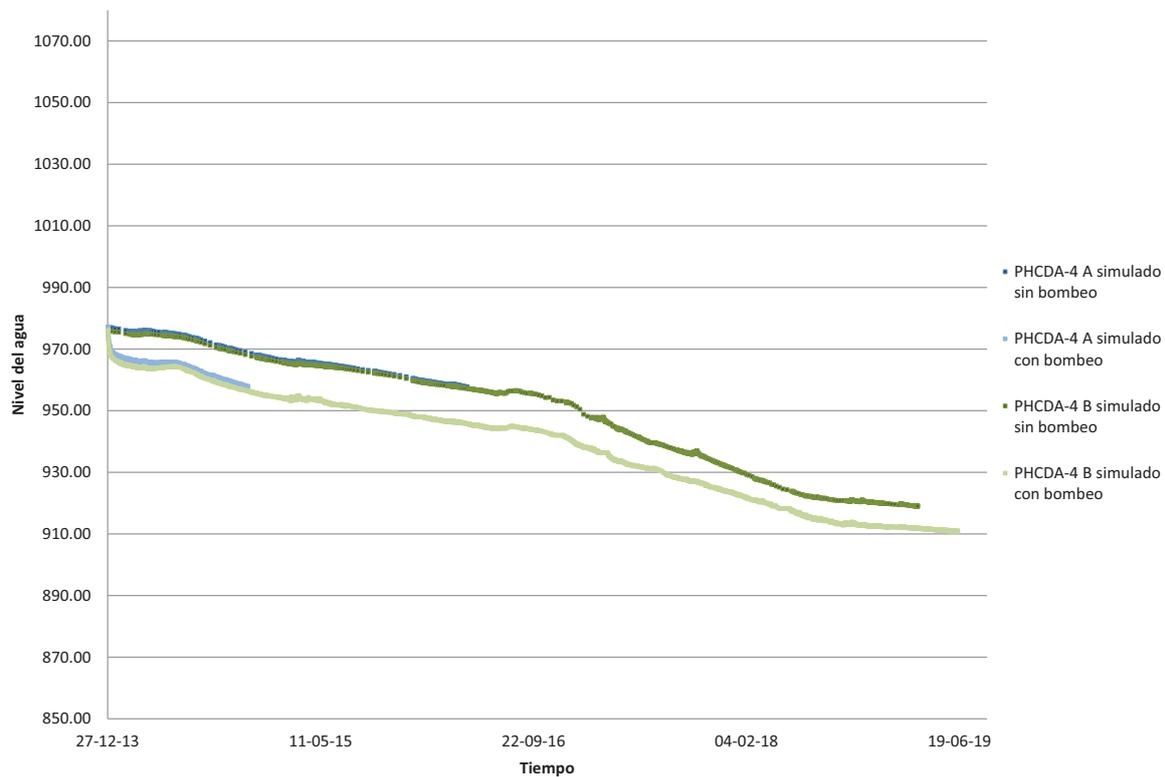
Calibración PHM-07



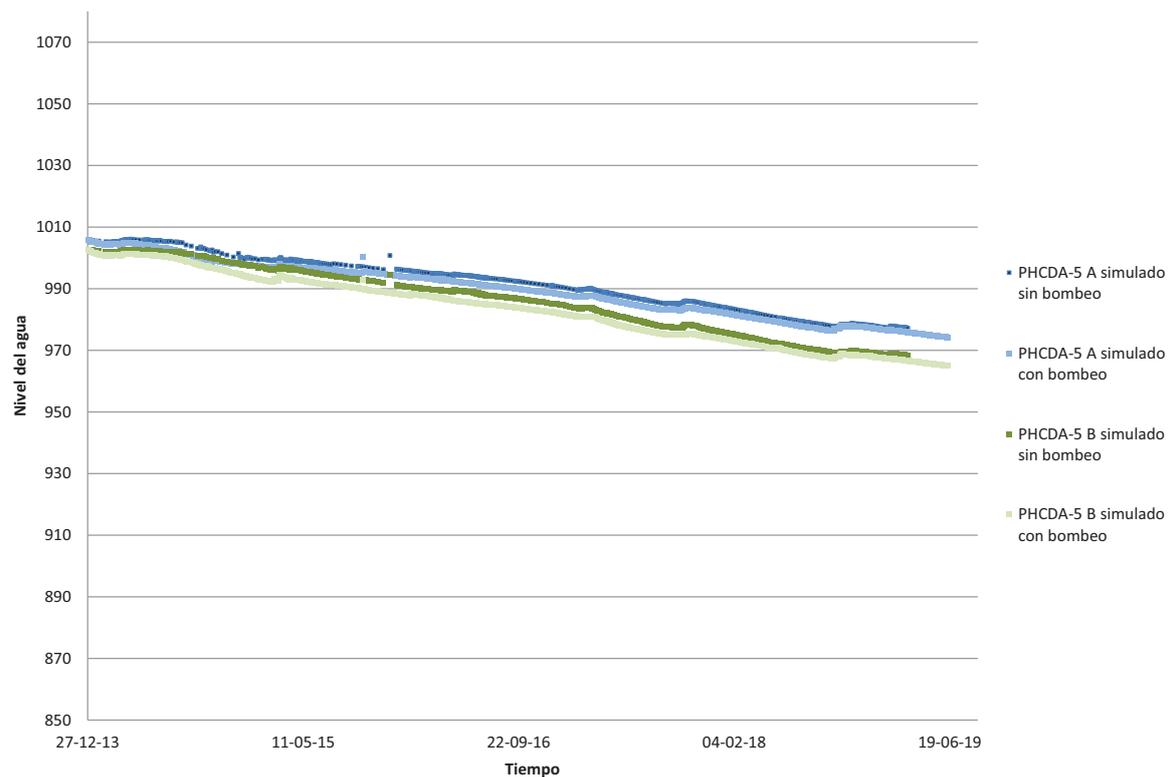
Calibración PZ-4



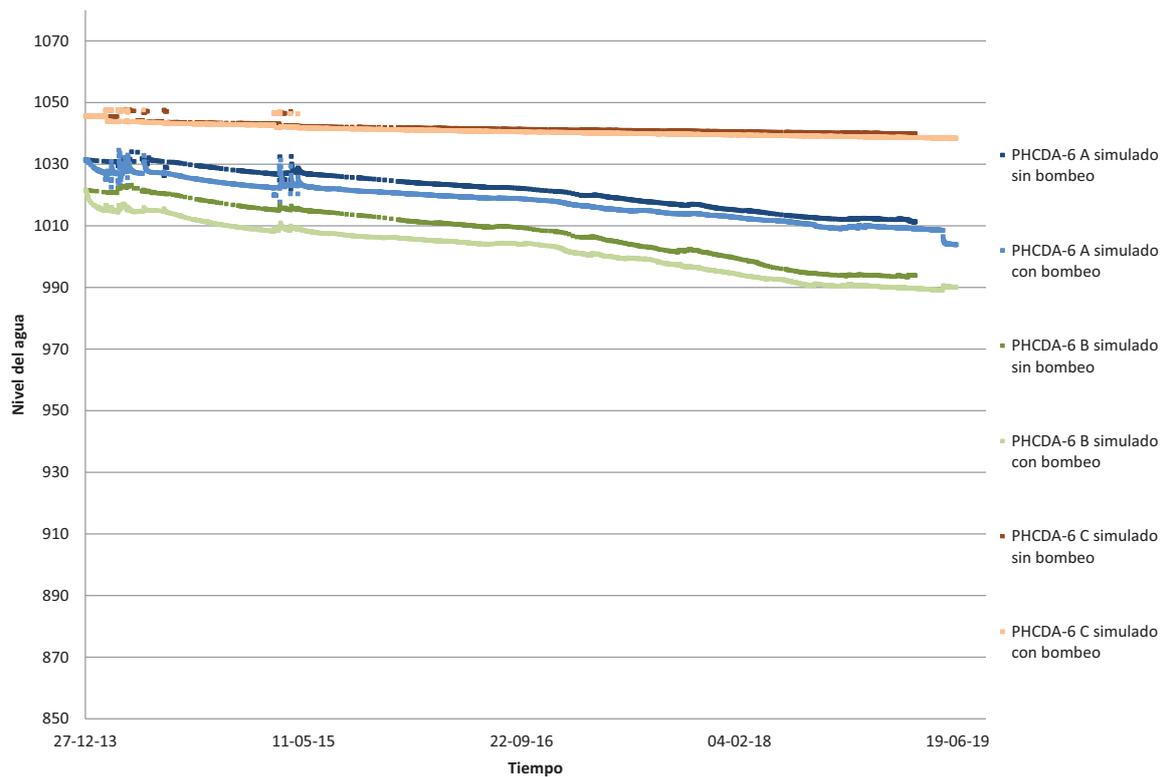
Calibración PHCDA-4



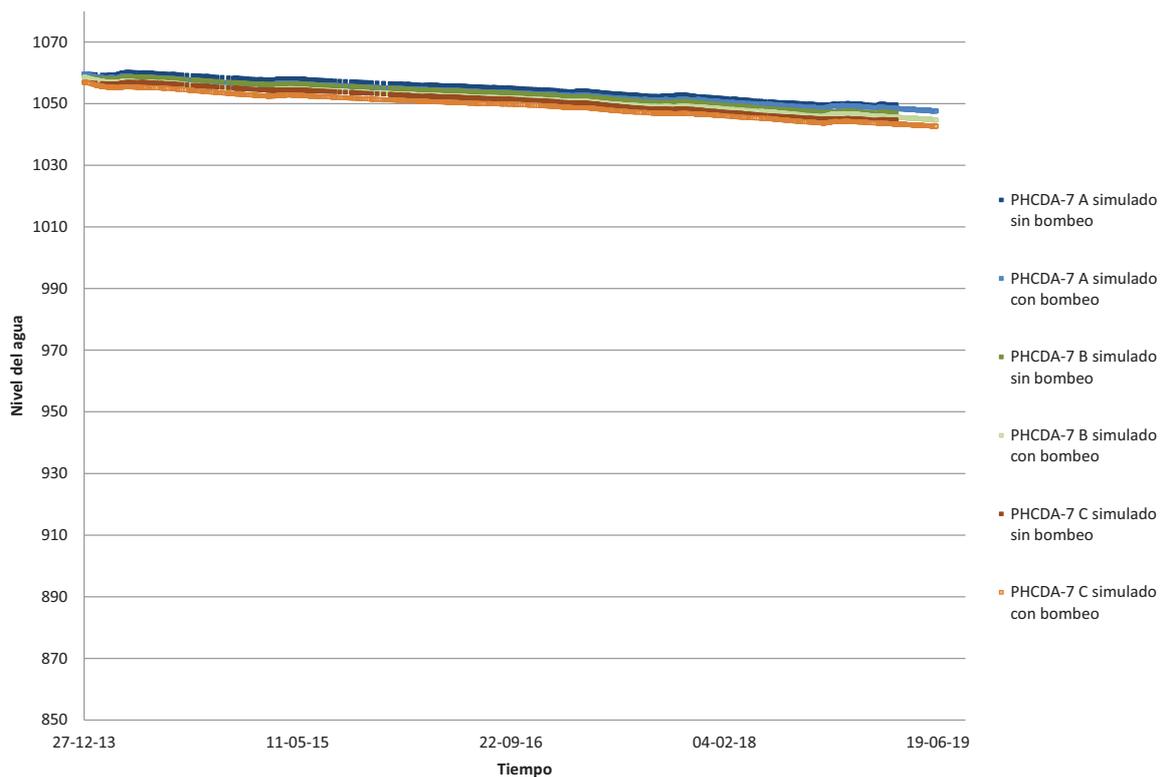
Calibración PHCDA-5



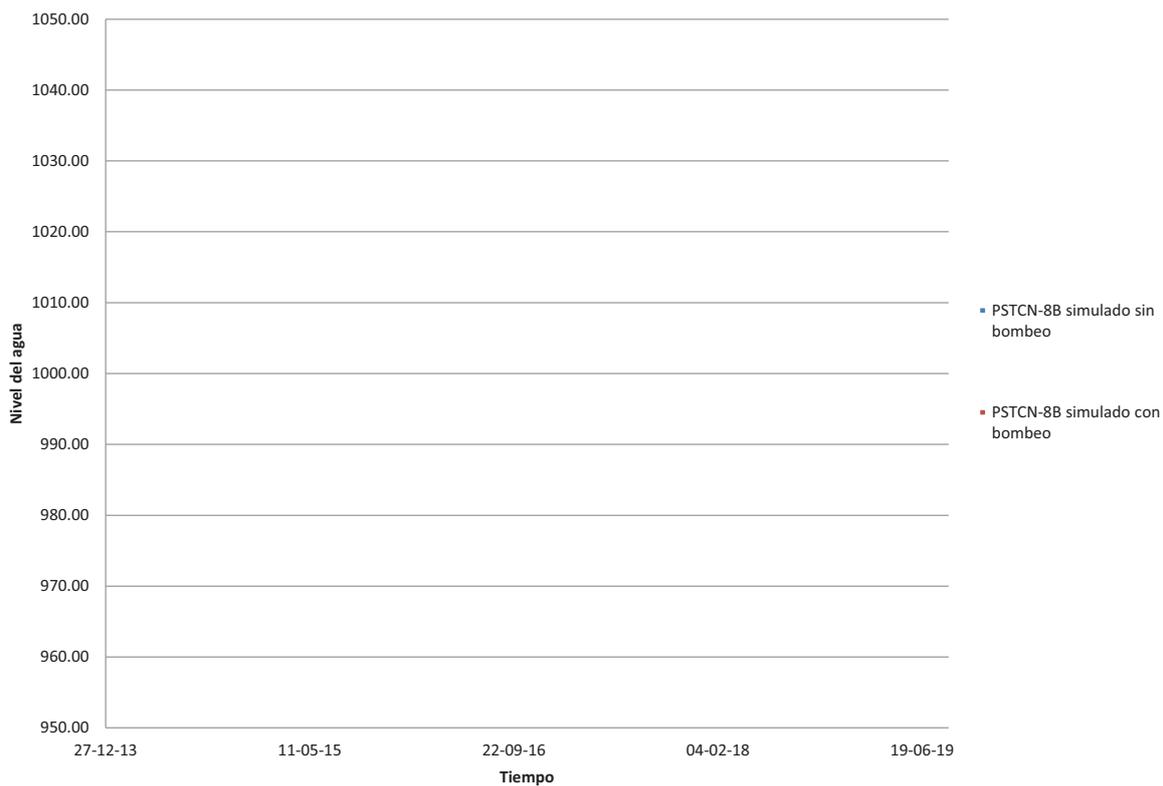
Calibración PHCDA-6



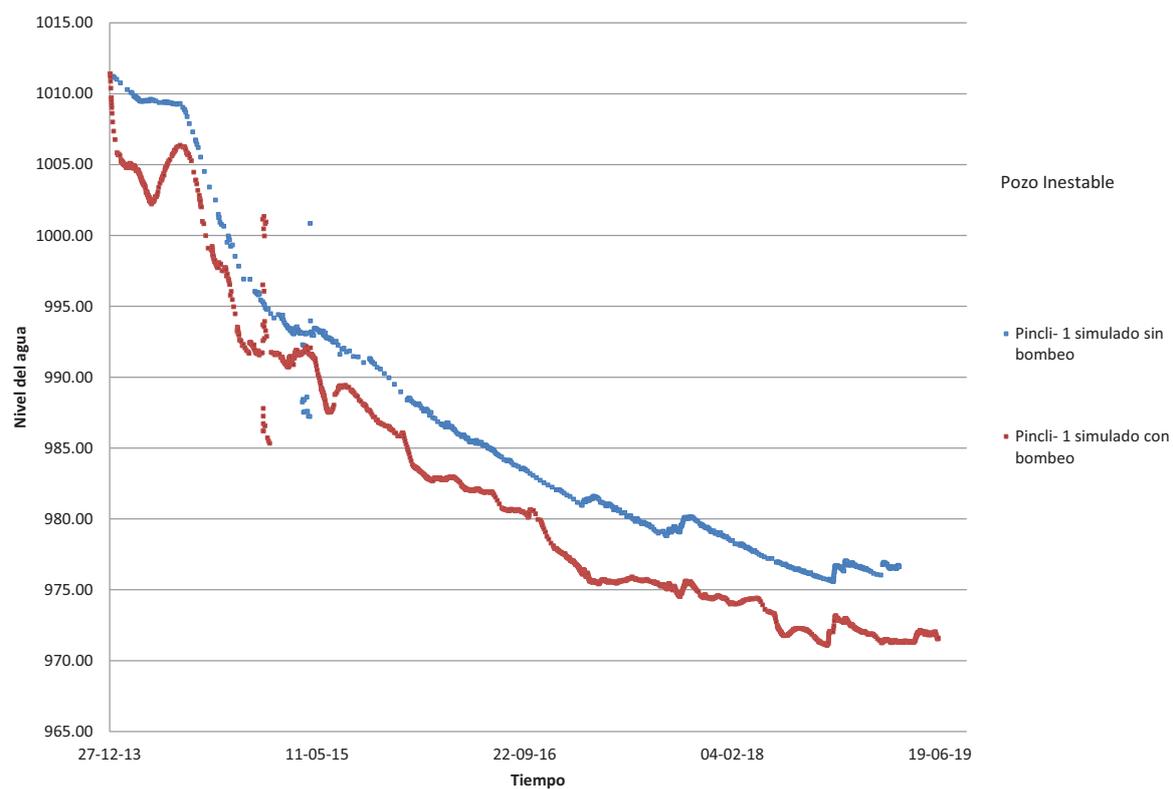
Calibración PHCDA-7



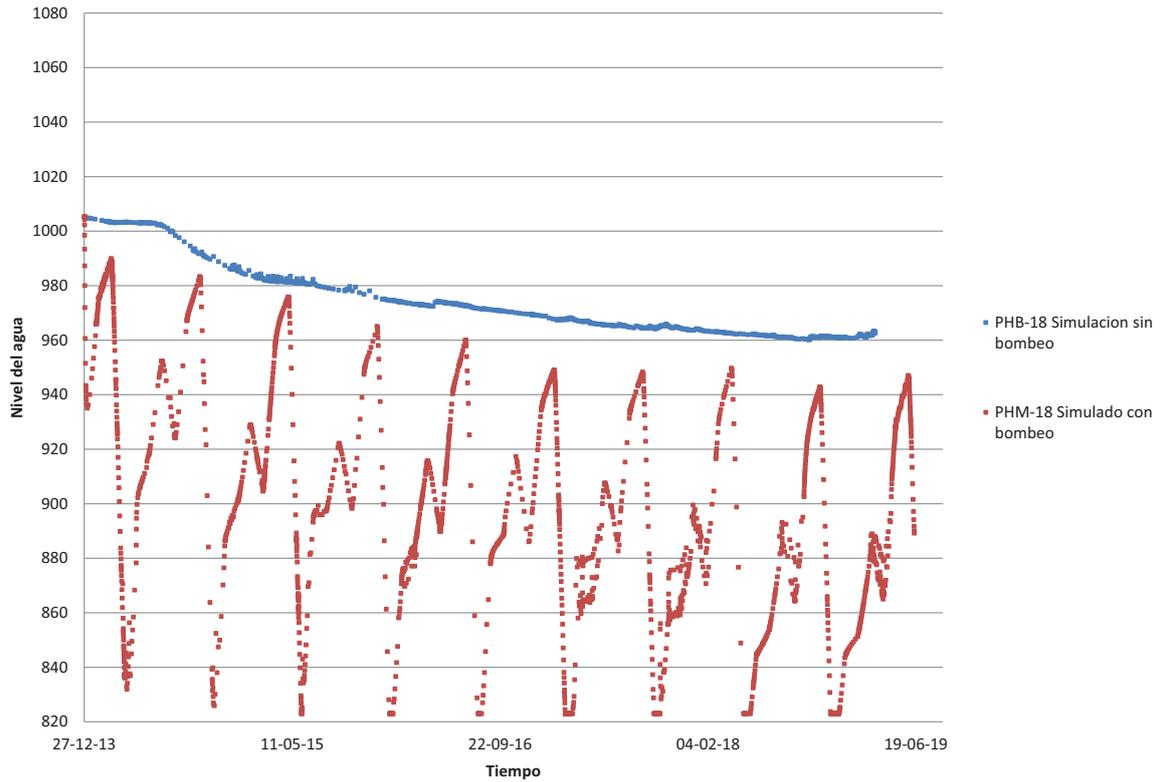
Calibración PSTCN-8B



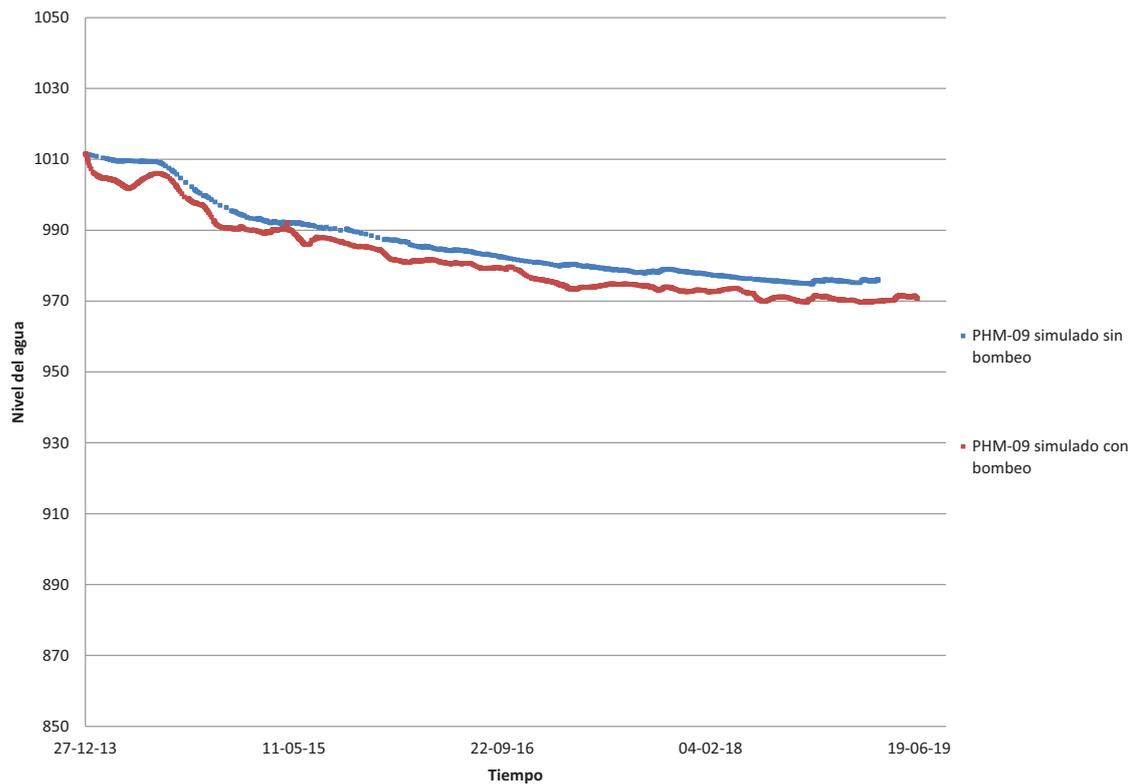
Calibración Pincli-1 (120)



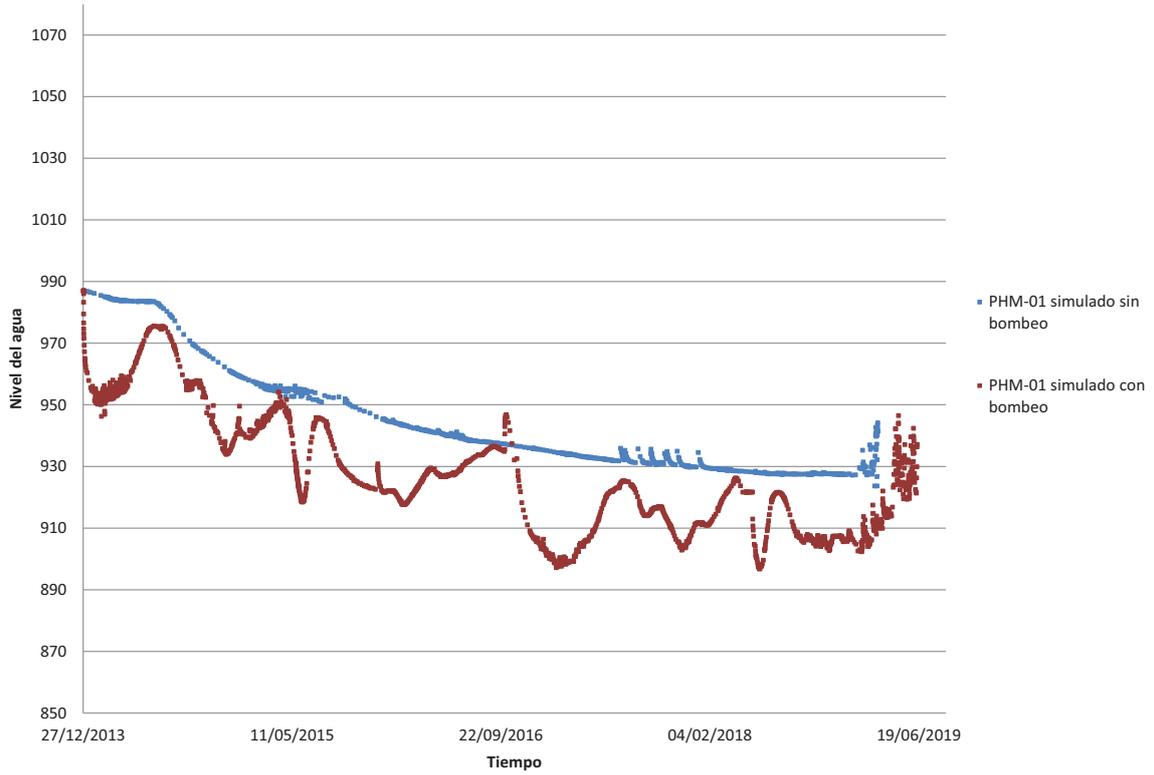
Calibración PHB-18



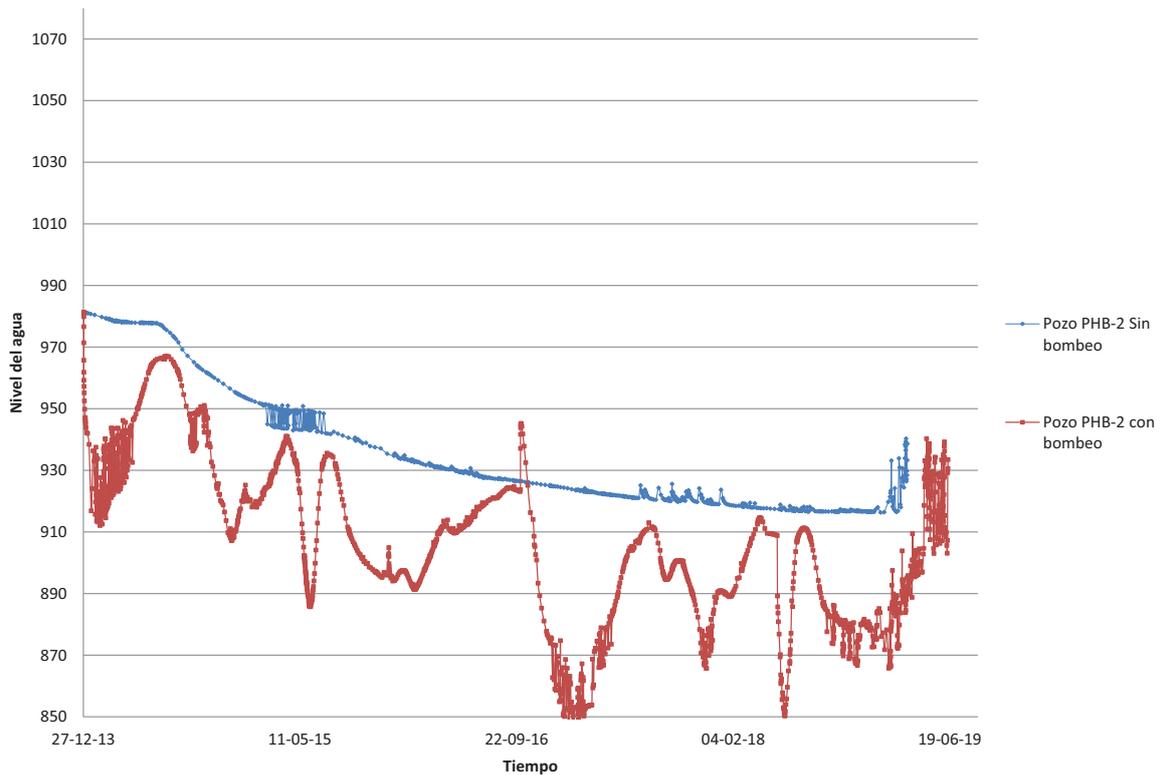
Calibración PHM-09 (911)



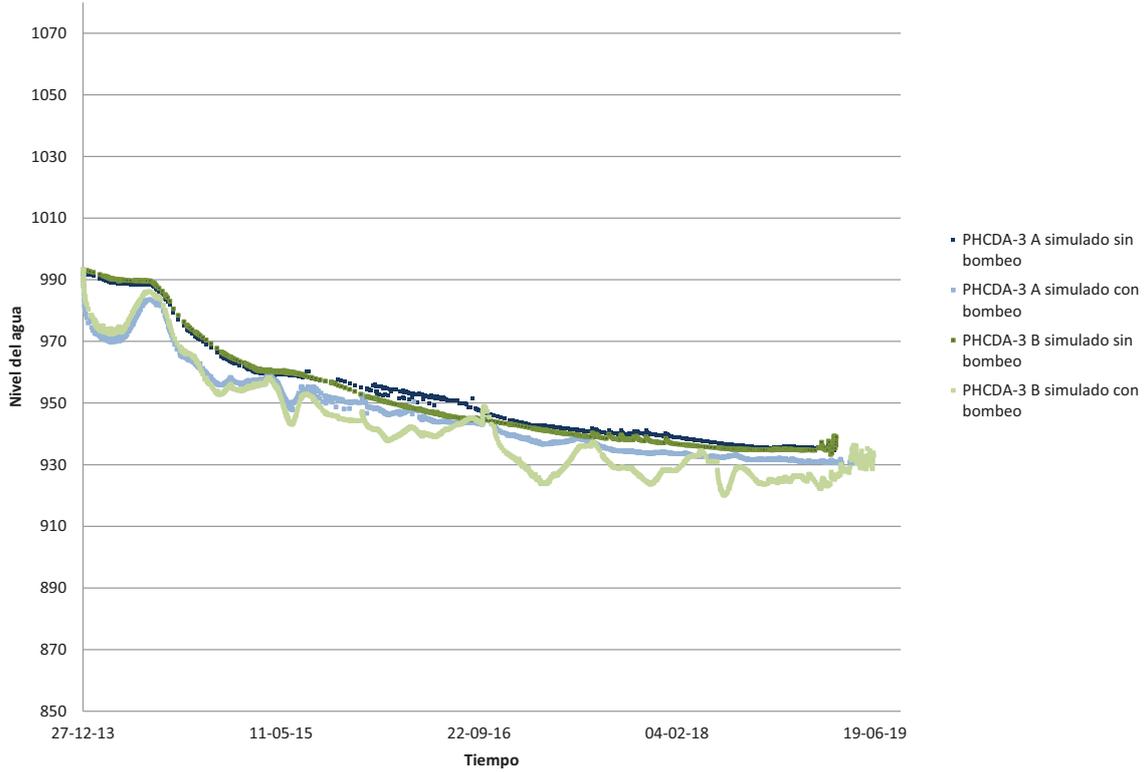
Calibración PHM-01 (860.79)



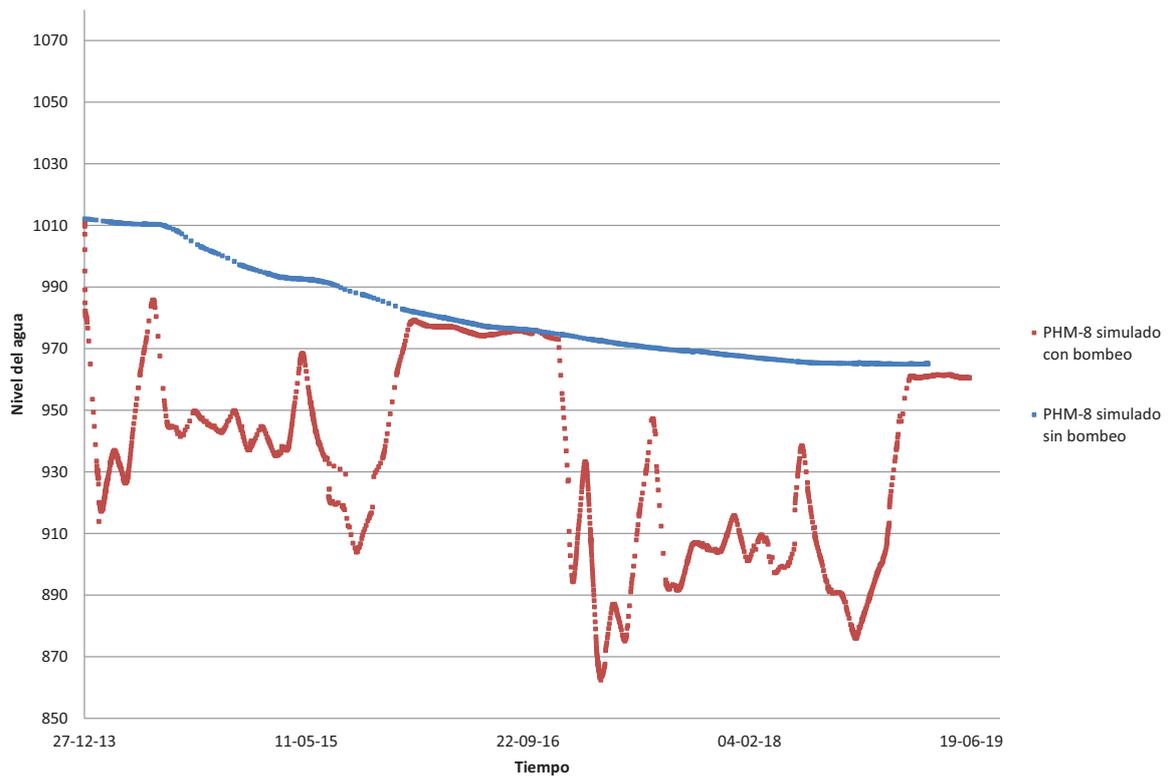
Calibración PHB-02



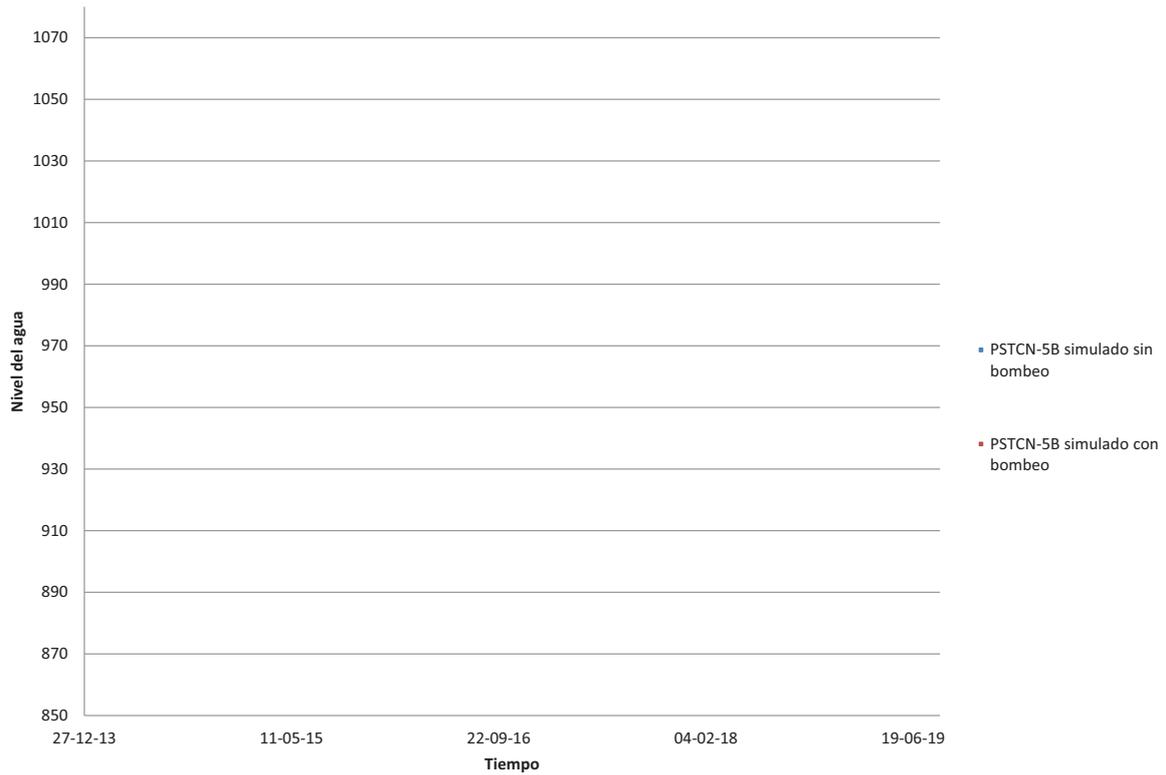
Calibración PHCDA-3



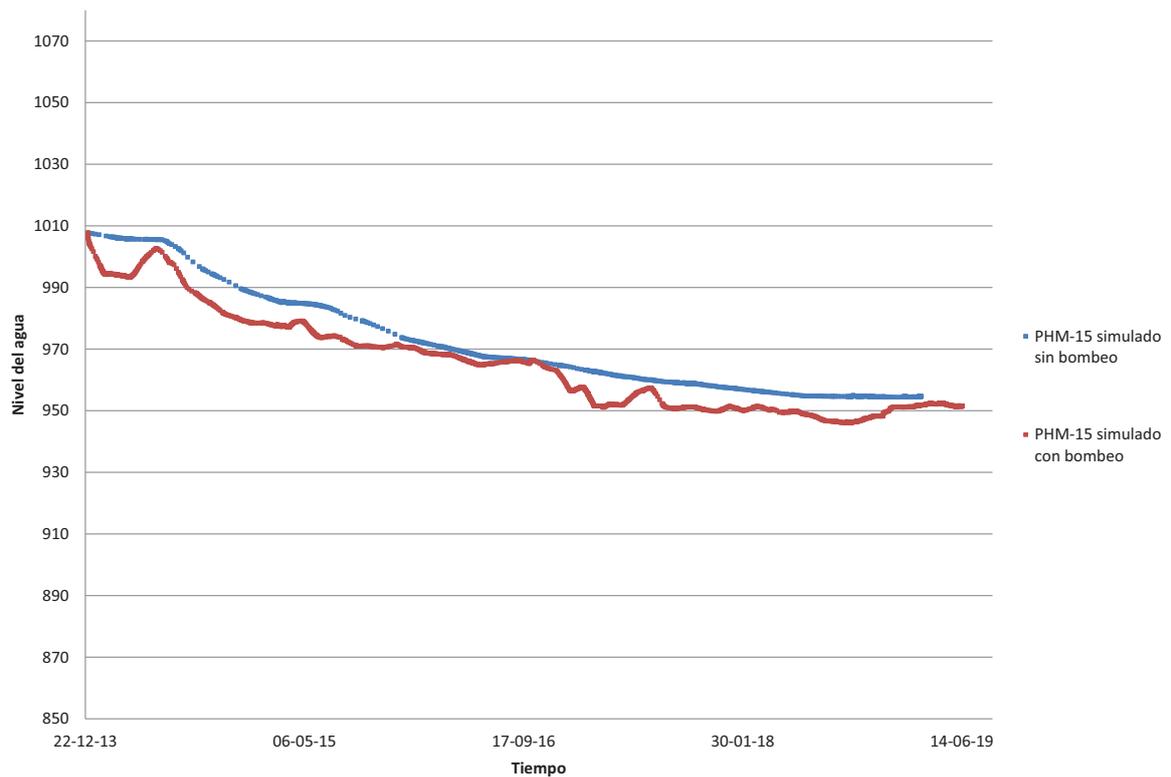
Calibración PHB-08



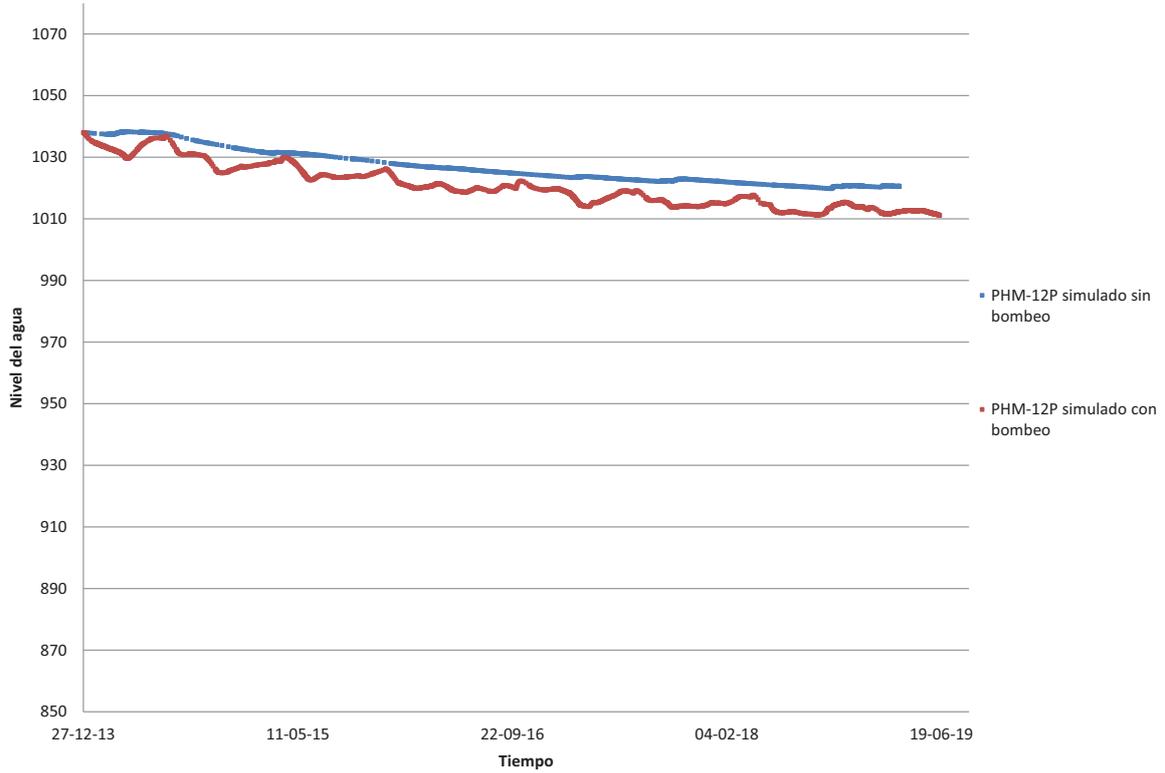
Calibración PSTCN-5B



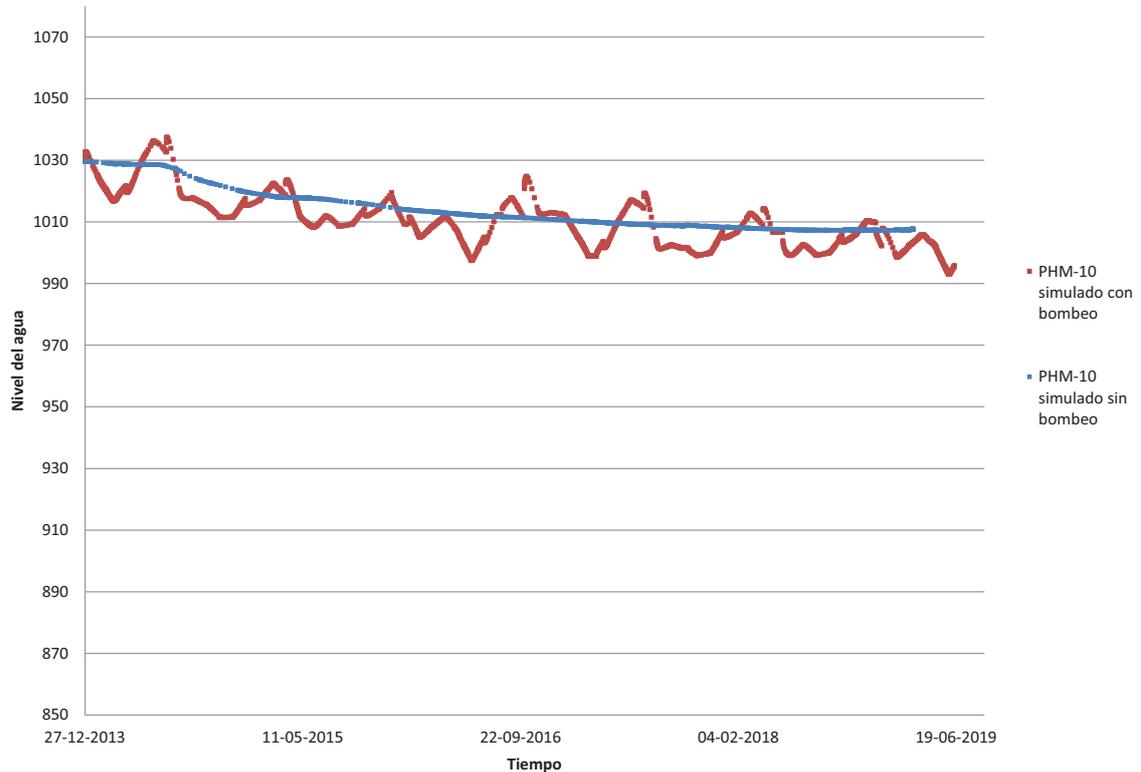
Calibración PHM-15



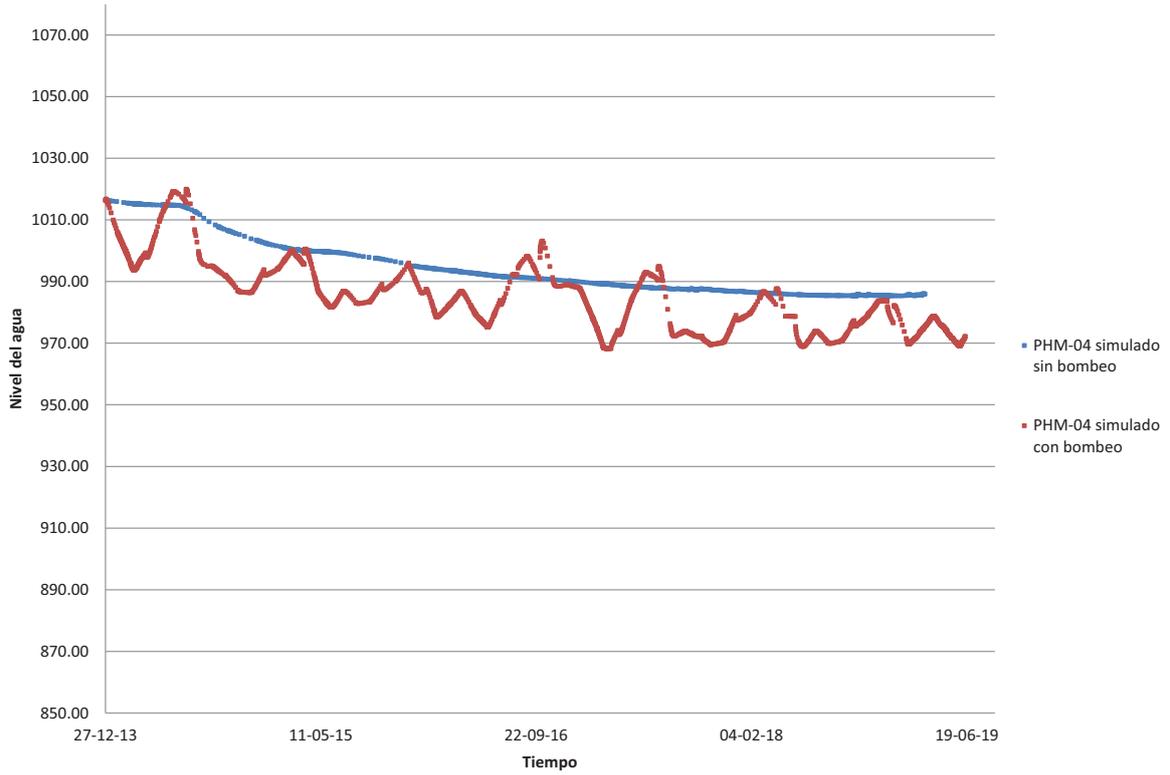
Calibración PHM-12



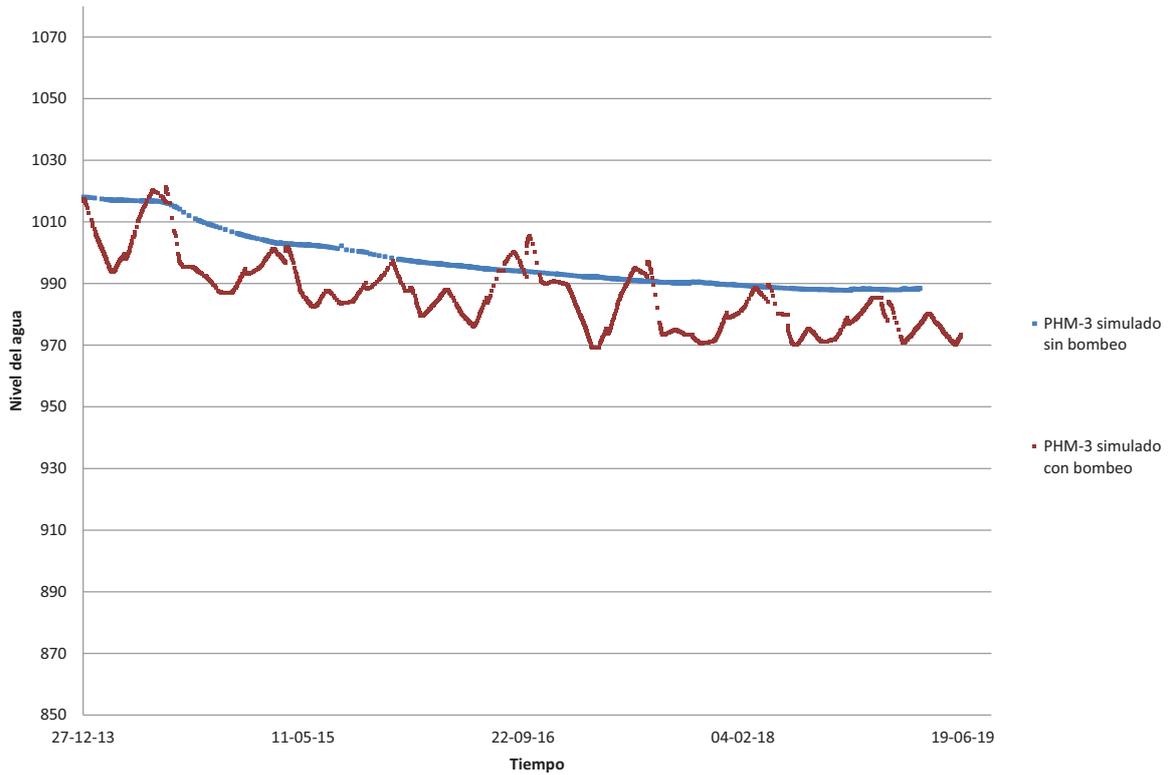
Calibración PHB-10



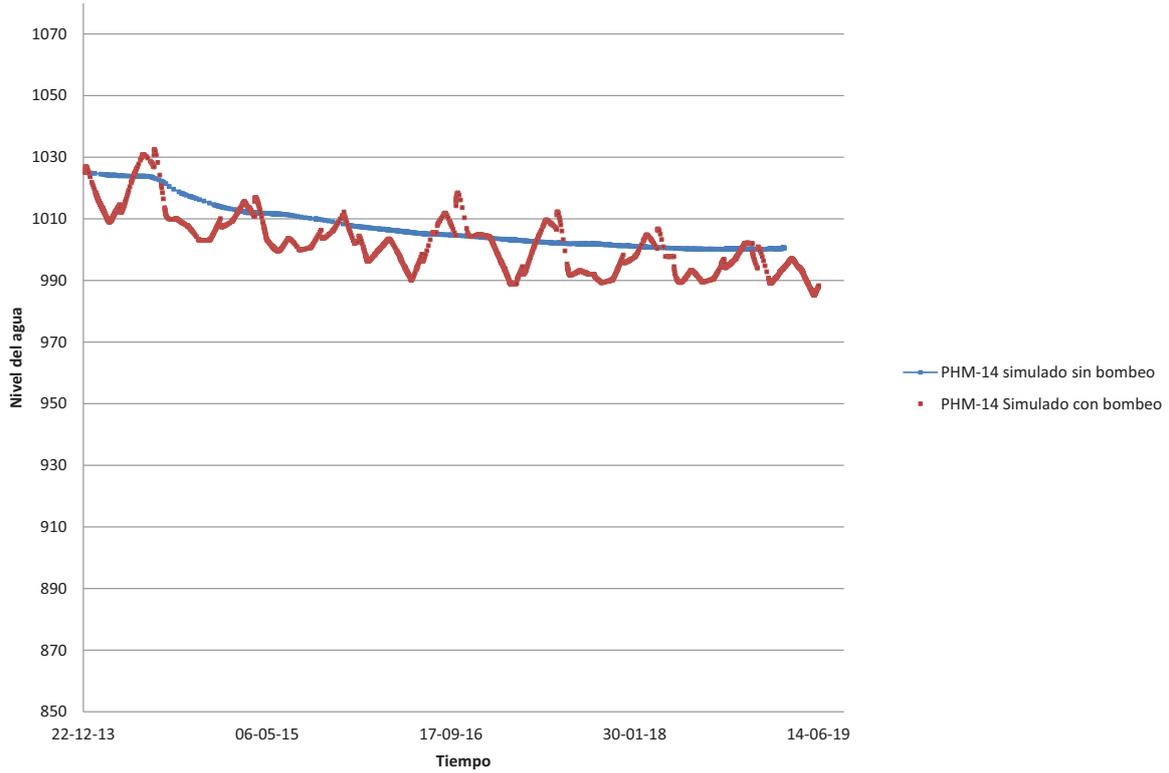
Calibración PHM-04



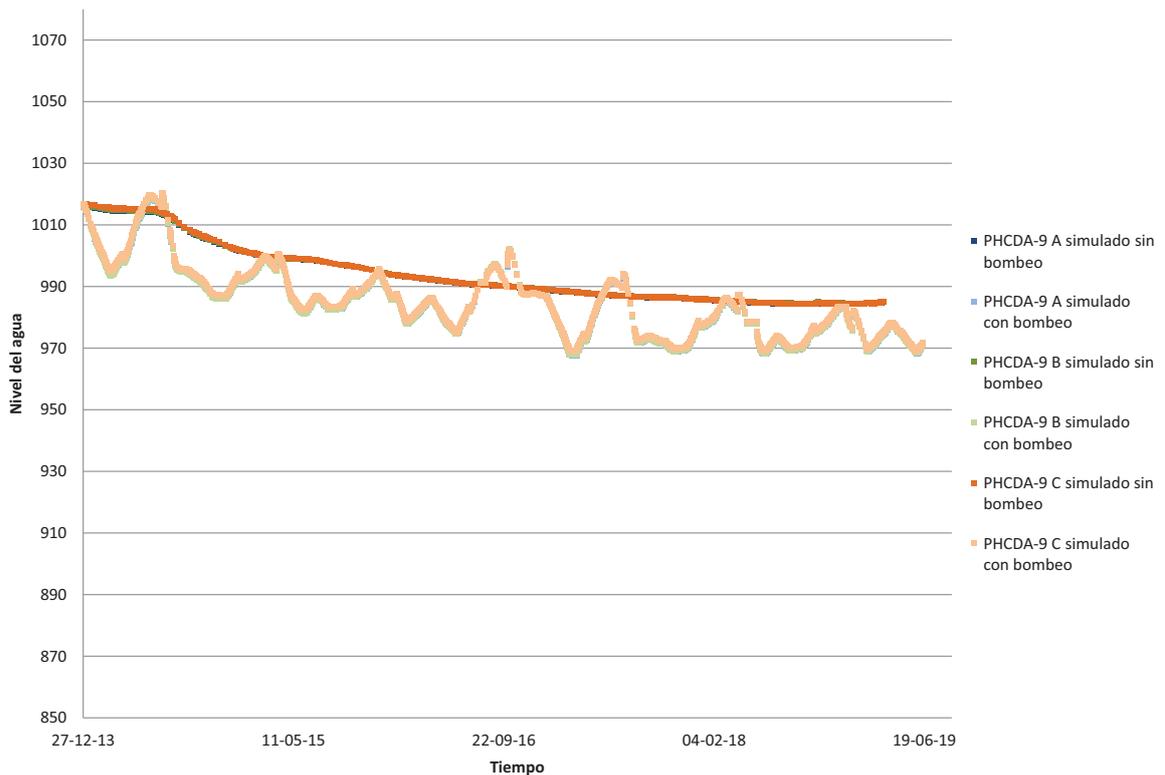
Calibración PHB-03



Calibración PHB-14



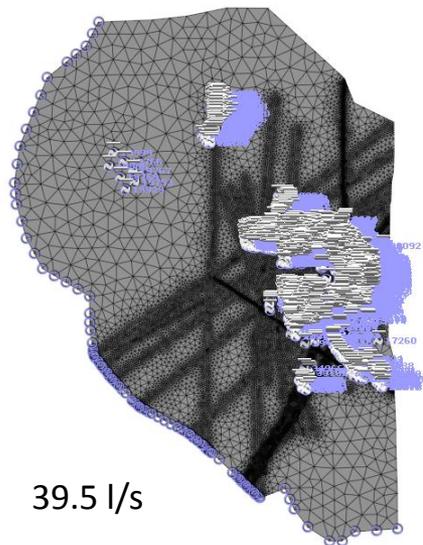
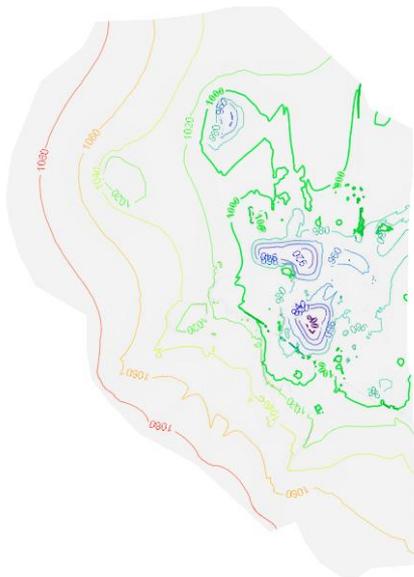
Calibración PHCDA-9



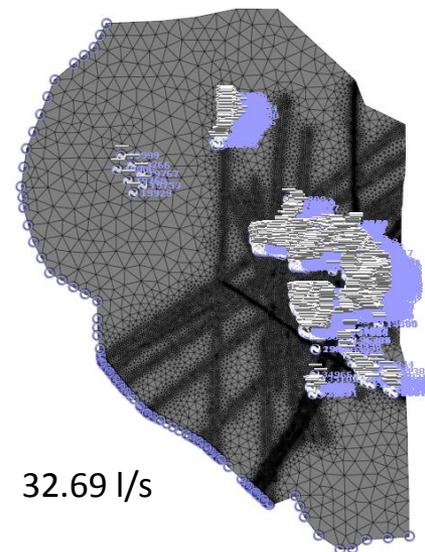
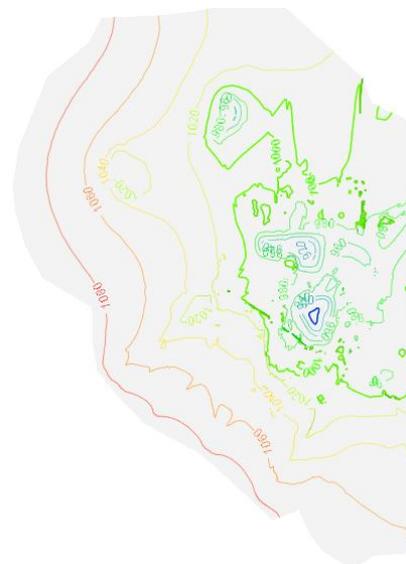
**ANEXO D: PIEZOMETRIAS PREDICTIVAS Y CAUDALES DE SALIDA EN
RAJO.**

Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

Enero 2014 (41654)



39.5 l/s



32.69 l/s



FEFLOW (R)
Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

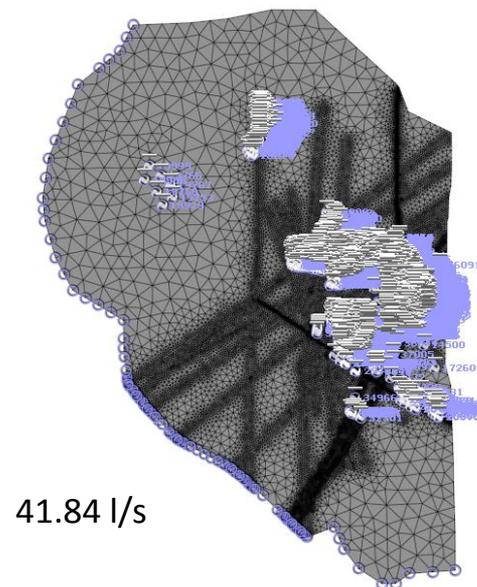
41652 [d]

0 250 500
[m]

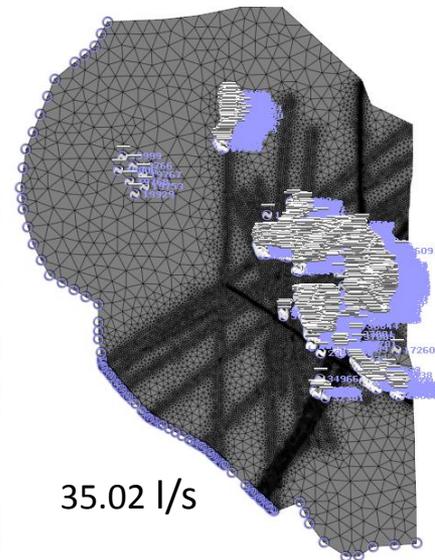
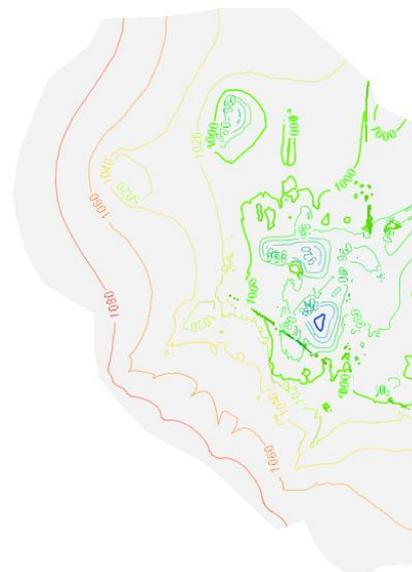
41652 [d]

0 250 500
[m]

Marzo 2014 (41713)



41.84 l/s



35.02 l/s



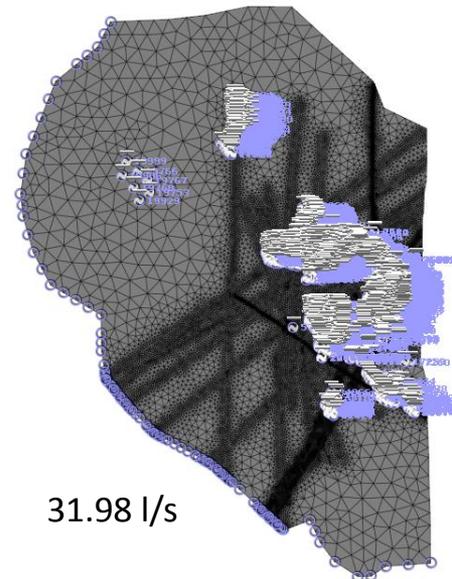
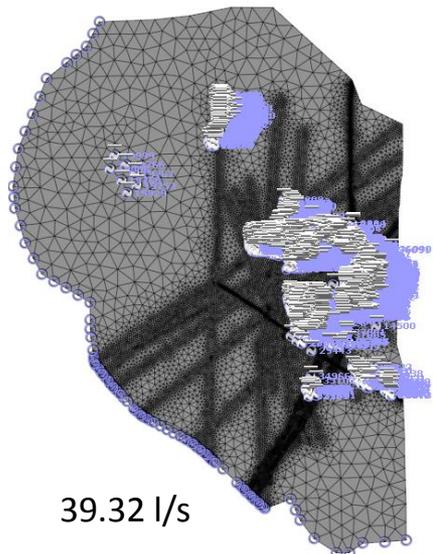
FEFLOW (R)

41713 [d]

0 250 500
[m]

Junio 2014 (41805)

Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

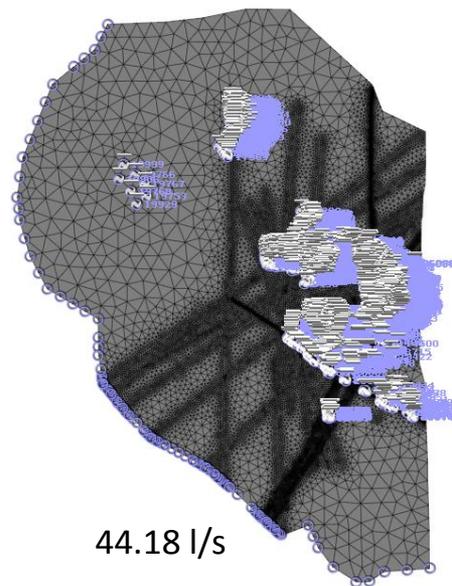
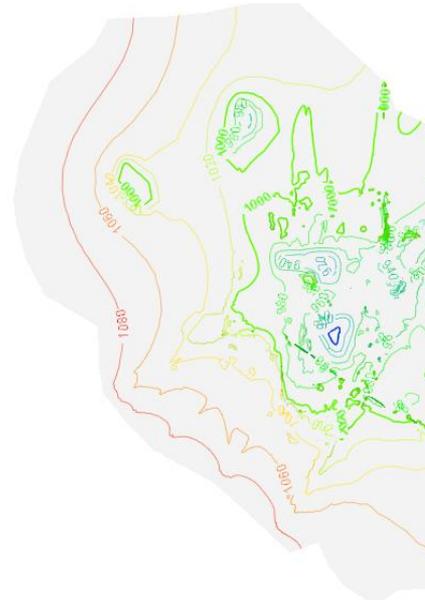
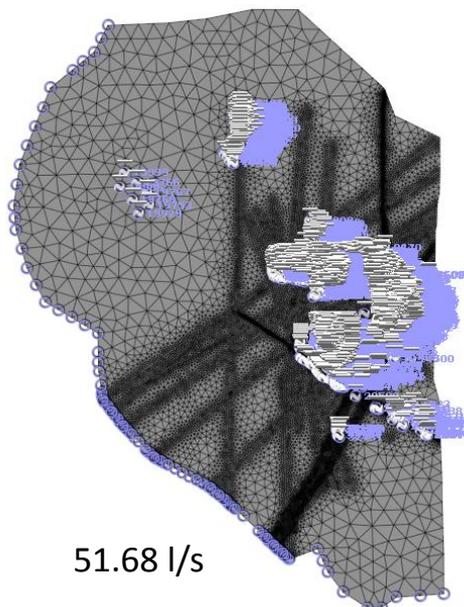
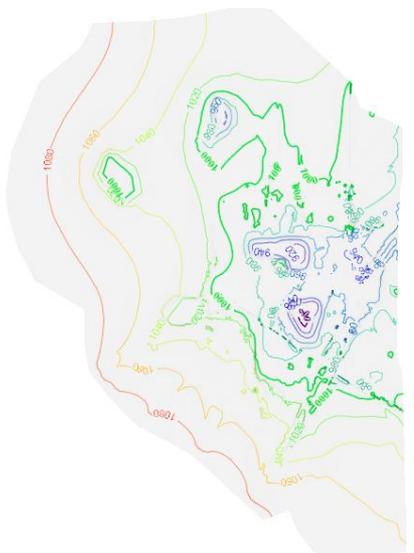


39.32 l/s

31.98 l/s

Septiembre 2014 (41897)

N
Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels



51.68 l/s

44.18 l/s

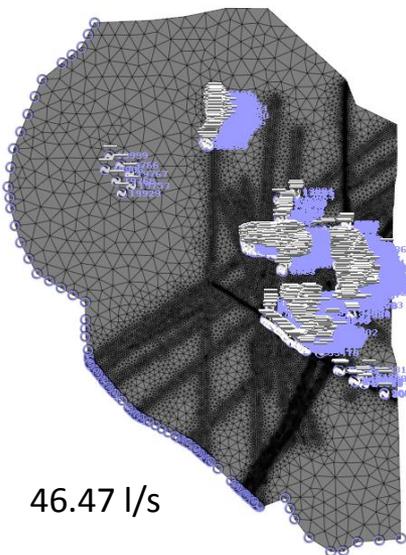
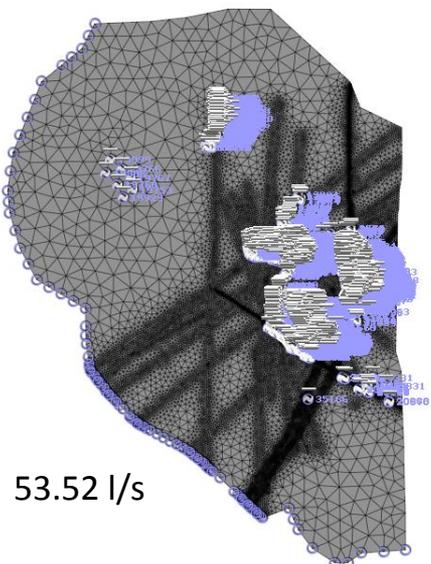
N
FEFLOW (R)

Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

Diciembre 2014 (41988)



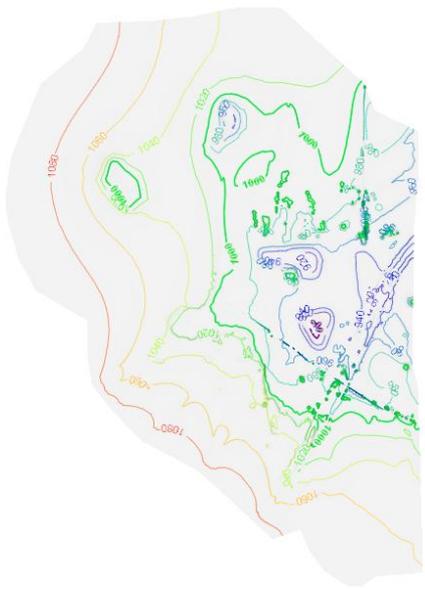
53.52 l/s



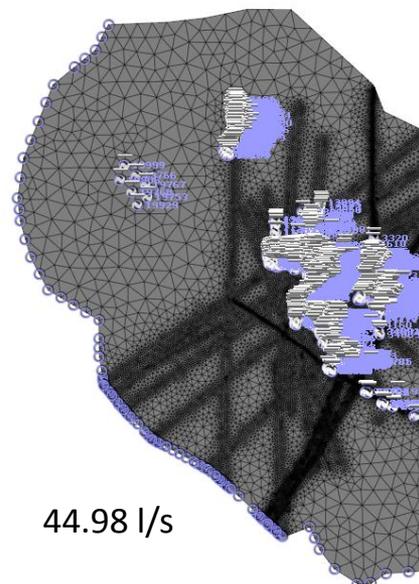
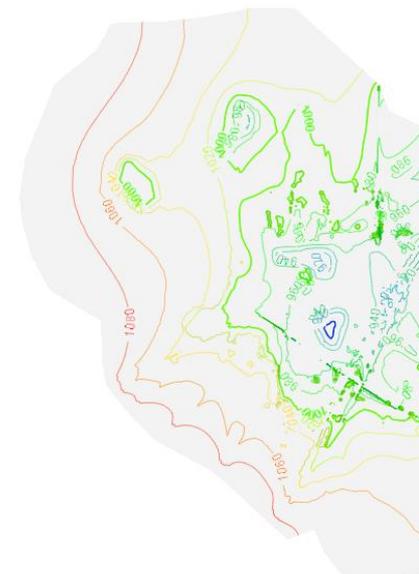
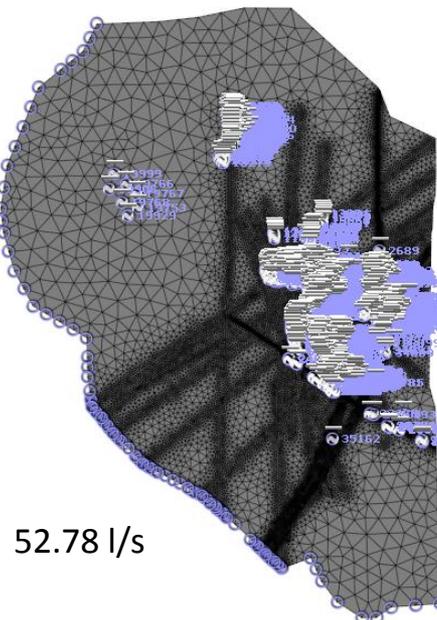
46.47 l/s

N
Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

Junio 2015 (42170)



52.78 l/s



44.98 l/s

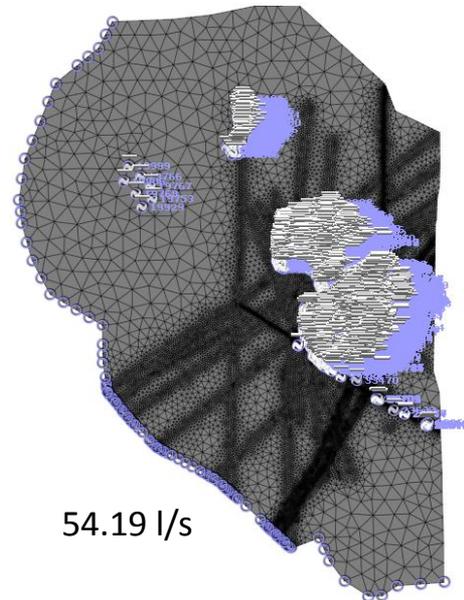
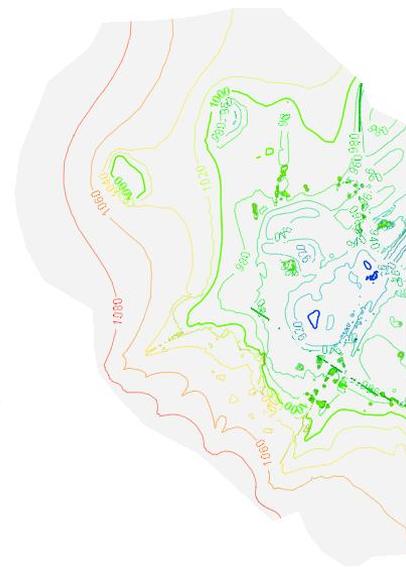
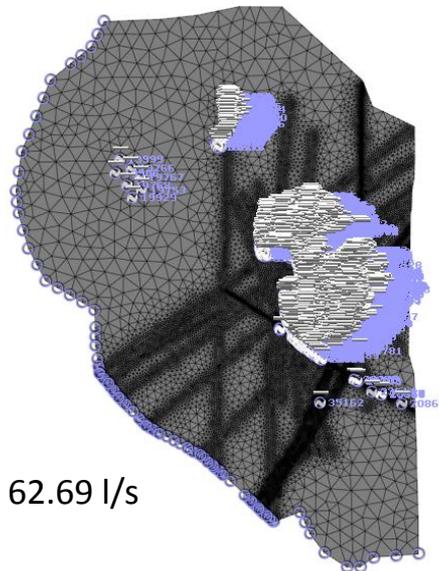
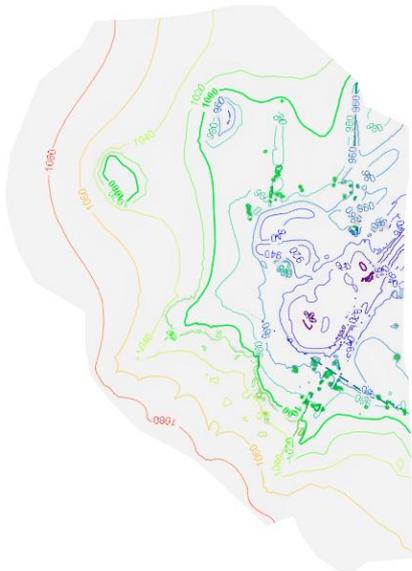
N
FEFLOW (R)

42170 [d]

0 250 500
[m]

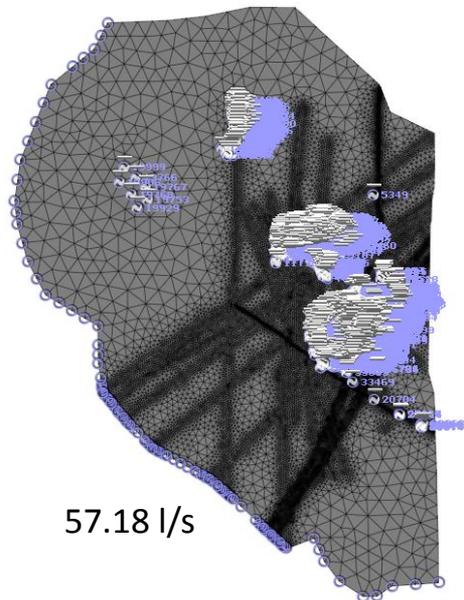
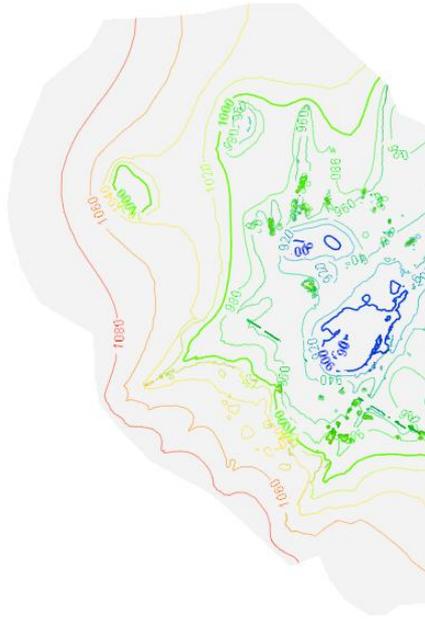
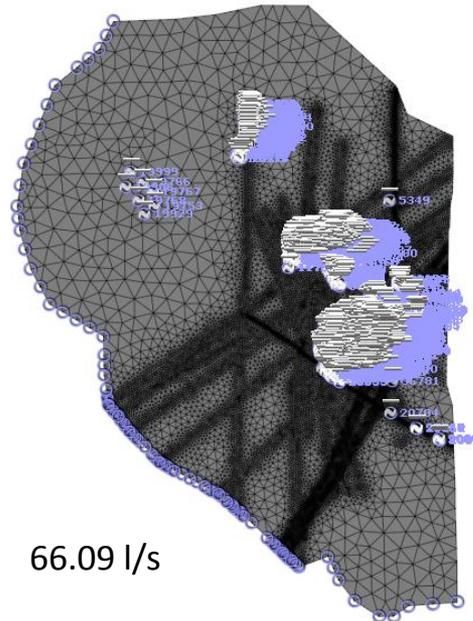
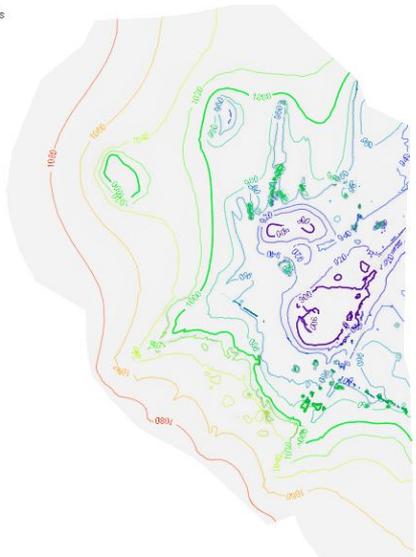
Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

Junio 2016 (42536)



N
Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

Junio2017 (42901)



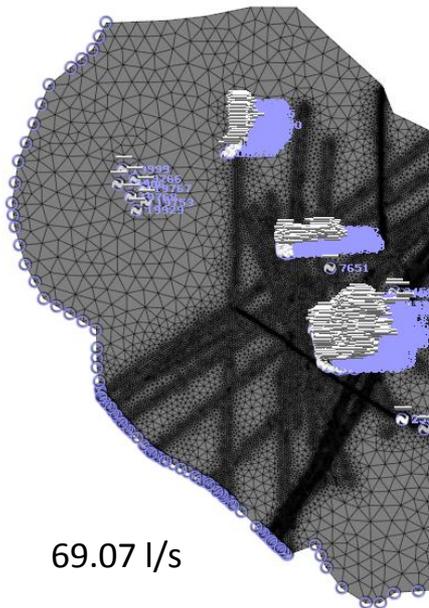
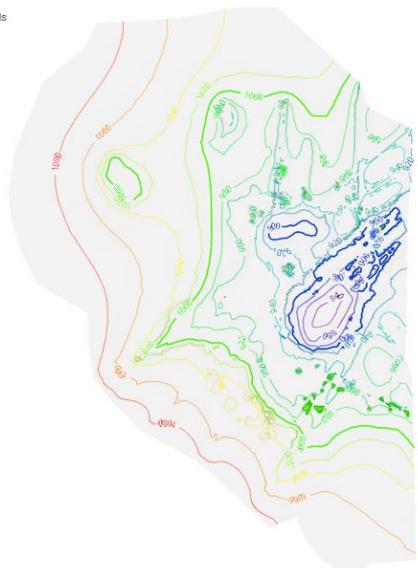
N
FEFLOW (R)

42901 [d]

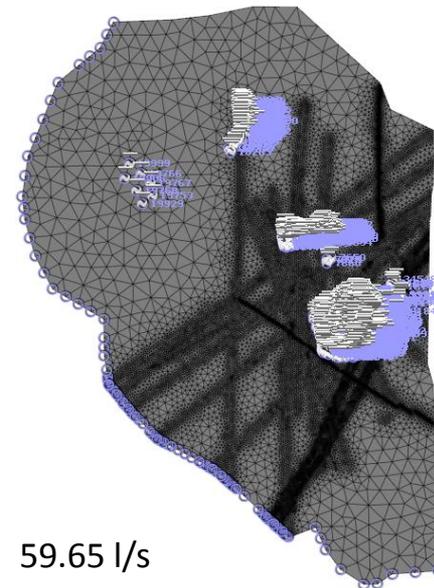
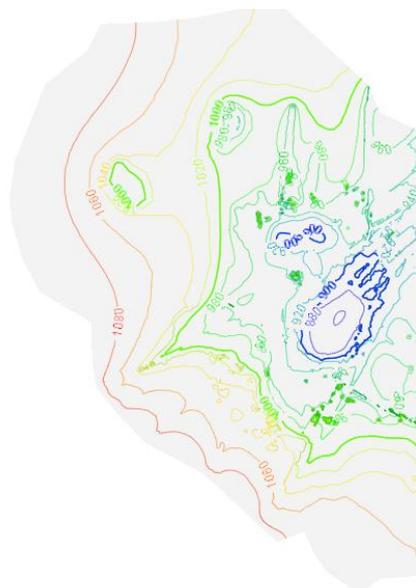
0 250 500
[m]

Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

Junio 2018 (43266)



69.07 l/s

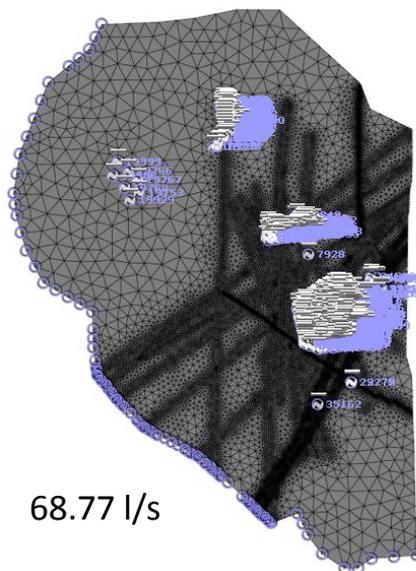
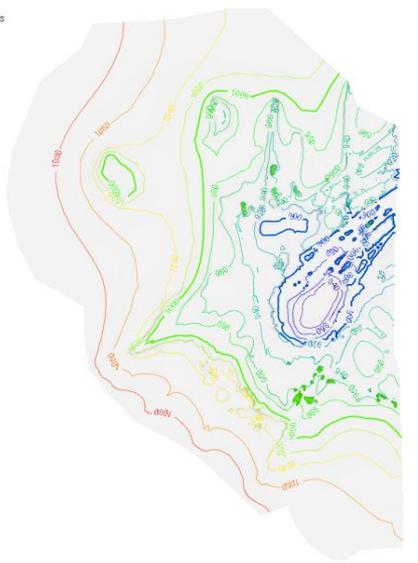


59.65 l/s

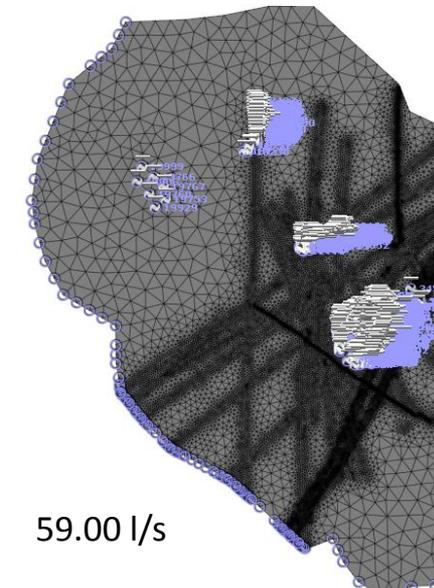
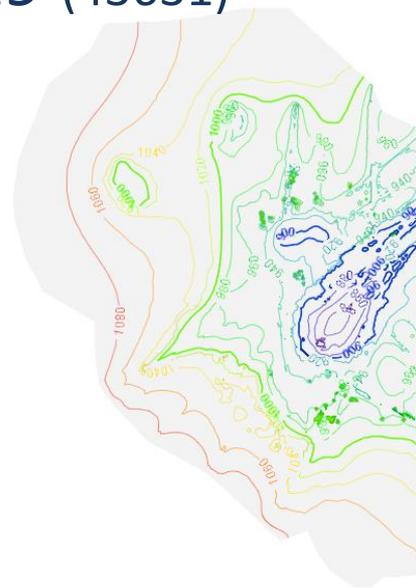


Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

Junio 2019 (43631)



68.77 l/s



59.00 l/s



FEFLOW (R)

43537.3 [d]

0 250 500
[m]