



3871./19.

ALTO MAIPO SpA

Avda. Rosario Norte #532
Piso 19, Las Condes Santiago, Chile.
(56-2) 2686 8900
www.altomaipo.com

Mat.: Entrega información requerida.

Ant.: Resolución Exenta N° 044, de 23 de enero de 2019 de la Comisión de Evaluación de la Región Metropolitana.

Ref.: Procedimiento de revisión de la Resolución de Calificación Ambiental N° 256/2009 del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

Adj.: Anexo en formato digital (CD).

SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL
Región Metropolitana de Santiago
OFICINA DE PARTES

1º Destino: Juan On Fecha: 11/02
2º Destino: EIA CASL Fecha: 11/02
3º Destino: SUR Fecha: 11/02
4º Destino: 389 Fecha: 11/02

Santiago, 11 de febrero de 2019

AM 2019/025

Sra.

Andelka Vrsalovic Melo

Directora Regional Servicio de Evaluación Ambiental

Secretaria Comisión de Evaluación

Región Metropolitana de Santiago

PRESENTE

Estimada Directora,

Junto con saludarle y en representación de Alto Maipo SpA (en adelante, "**Alto Maipo**"), ambos domiciliados para estos efectos en **Rosario Norte N° 532, piso 19, comuna de Las Condes, Santiago**, por medio de la presente, en tiempo y forma, vengo en hacer entrega de la información requerida en el Resuelvo 5 de la Resolución Exenta N° 044, de 23 de enero de 2019, que da inicio a procedimiento de revisión de la Resolución de Calificación Ambiental N° 256/2009 del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

Según lo requerido, la información que se entrega se refiere a:


- **Cambios de capacidades de los sistemas de tratamiento de aguas de afloramiento y sus condiciones de descarga** (Informe de actualización de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas afloradas del PHAM, N° 20190130-MA-RPT, enero 2019).

- **Modelo Hidrogeológico** (Modelo Hidrogeológico Alto Maipo SpA, Hidromas, diciembre 2018, el cual corresponde al Anexo B del Informe N° 20190130-MA-RPT).
- **Actualización de medidas de control de los afloramientos que surgen de la construcción de los túneles del PHAM** (Procedimiento de cementación de pre y post-excavación, PMG-PCD-002, febrero 2019).
- **Medidas de monitoreo y seguimiento ambiental** (Plan de seguimiento y monitoreo de aguas afloradas desde los túneles del PHAM, ENV-PLN-004, febrero 2019).
- **Plan de Contingencia** (Plan de Contingencia de Aguas de Afloramiento, ENV-PCD-013, febrero 2019).

POR TANTO, en atención a la información entregada en soporte digital (CD), se solicita a Ud. tener por presentados, en tiempo y forma, los antecedentes requeridos.

Sin perjuicio de lo anterior, quedamos a su disposición para ampliar o aclarar cualquier aspecto de la información entregada en esta presentación, así como para cumplir con futuros requerimientos que estime necesario efectuar.

Sin otro particular, le saludamos atentamente,



Nelson Saieg
Alto Maipo SpA

Rosario Norte 532, Piso 19, Las Condes, Santiago, Chile
Km. 14, Ruta Los Maitenes, San José de Maipo, Región Metropolitana, Chile

Tel: (+56) 2 2686 4700
Fax: (+56) 2 2686 8916

Informe Técnico

Informe No.:	20190130-MA-RPT
Título:	Informe de actualización de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas afloradas del PHAM
Planta:	Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo
Participantes:	Nelson Saieg, Hector Llanos, Eberhard Kirchner

Fecha:	30 de enero de 2019
Sección:	Medio Ambiente Strabag
Responsable:	Alexander Wilkes
Firma del responsable:	

Resumen

Mediante el presente documento, se informa la actualización de las plantas de tratamiento de aguas generadas durante la construcción de los túneles del PHAM. Al efecto, se describen las capacidades de tratamiento de aguas afloradas actualmente operativas y stand-by en cada frente de trabajo y su asociación al túnel o sistema de túneles respectivo. Cabe aclarar que las plantas de tratamiento Residuos Industriales Líquidos (Riles) se mantienen en los términos autorizados por la SEREMI de Salud RM. Además, se indican las capacidades operacionales futuras de las plantas de tratamiento de aguas afloradas que se asociarán a cada túnel del PHAM (Las Lajas, Alfalfal y Volcán), basándose en los resultados del modelo hidrogeológico desarrollado por HIDROMAS, en el cual se estiman y proyectan los caudales medios mensuales de afloramiento en los túneles, y las variables operacionales y temporales asociadas a la excavación y control de afloramientos. Dichas capacidades responden a la necesidad de contar con plantas de tratamiento que permitan:

- tratar los caudales de agua aflorada definidos en el presente documento para cada túnel (Las Lajas, Alfalfal y Volcán);
- ser modulares para facilitar su adaptación en el frente de trabajo de cada túnel por el cual aflore el agua; y,
- ser funcionales a las diversas variables operacionales de cada método constructivo utilizado durante las excavaciones subterráneas del PHAM.

Con lo anterior se actualizan las capacidades de tratamiento, minimizando potenciales eventos de descarga de emergencia. Asimismo, las capacidades de tratamiento operacionales se definen para cada túnel para adaptarse en función de los avances reales de excavación y los sectores específicos de surgimiento de aguas afloradas.

Condiciones de archivo
1.

Distribución:	
Especial	X

Este documento y todas sus secciones son propiedad de Alto Maipo SpA. No se autorizan copias a menos que exista autorización por escrito. Copias impresas son documentos no controlados.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	OBJETIVO	3
3	ANTECEDENTES GENERALES SOBRE AGUAS TRATADAS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO	4
4	DESCRIPCIÓN CAPACIDAD ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE AFLORAMIENTO EN EL PHAM	5
4.1	INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS AFLORADAS	5
4.2	DESCRIPCIÓN CAPACIDAD OPERATIVA POR SISTEMA DE TÚNELES.....	6
4.3	RESUMEN CAPACIDAD OPERACIONAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS AFLORADAS DEL PHAM.....	6
5	ANTECEDENTES TEÓRICOS DE AFLORAMIENTOS ESPERADOS	7
6	ACTUALIZACIÓN DE CAPACIDADES DE TRATAMIENTO DE AGUAS AFLORADAS DEL PHAM.....	8
6.1	ADAPTACIÓN DE CAPACIDAD DE TRATAMIENTO PARA AFLORAMIENTOS.....	8
7	TRATAMIENTO DE RILES	9
8	ANEXOS	10

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Resumen capacidad de tratamiento por sistema de Túneles	6
Tabla 2. Caudales Esperados Promedios de afloramiento esperados por túnel.....	7
Tabla 3. Capacidad operacional para tratamiento de agua de afloramiento	9
Tabla 4. Plantas de Riles en el Proyecto Alto Maipo	10

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Descripción general Manejo Aguas de Afloramiento	5
--	---

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A	Metodología para estimación de capacidad operacional de tratamiento de agua aflorada requerida en los sistemas de túneles del PHAM
ANEXO B	Informe Modelo Hidrogeológico HIDROMAS

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), cuyo titular es la empresa Alto Maipo SpA, se emplaza en la Región Metropolitana, en la comuna de San José de Maipo, próxima a la ciudad de Santiago. El proyecto comprende la construcción y operación de dos centrales hidroeléctricas de pasada: Alfalfal II y Las Lajas, dispuestas en serie en el sector alto del río Maipo, para lo cual considera el aprovechamiento de las aguas provenientes de la zona alta del río Volcán, del río Yeso, de las aguas turbinadas provenientes de la actual Central Alfalfal y de la cuenca intermedia del río Colorado. Ambas centrales permitirán disponer en conjunto una potencia máxima de 531 MW, para ser despachada al Sistema Interconectado Central.

El PHAM obtuvo su calificación ambiental favorable mediante Resolución Exenta N° 256 de 2009 de la Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana (RCA 256).

La construcción del PHAM está basada en un sistema de túneles subterráneos, los cuales se dividen en tres sistemas principales, túnel Las Lajas, Alfalfal y Volcán. La excavación de cada túnel se realiza desde diferentes frentes de trabajo denominados portales. En el caso del túnel Las Lajas se excava desde seis portales (L1, VL2, VL4, VL5, VL7 y VL8), el túnel Alfalfal desde tres (VA1, VA2 y VA4) y finalmente el túnel Volcán se excava desde dos portales (V1 y V5).

Las capacidades de tratamiento se definen por sistema de túnel y se instalarán y adaptarán según sea requerido en función del avance real de la excavación y en consecuencia el portal por el cual se pueda conducir el agua aflorada hacia el sistema de tratamiento. A la fecha, las capacidades de tratamiento están definidas en el marco del Programa de Cumplimiento (PdC) del PHAM aprobado por la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), pero en el presente documento dichas capacidades se actualizan en función de los resultados del Modelo Hidrogeológico realizado por HIDROMAS, las actividades de manejo del surgimiento de aguas afloradas actuales junto a su registro de caudales aflorados, los diferentes métodos constructivos y los tiempos involucrados al manejo de contingencias cuando el afloramiento de aguas es de una magnitud mayor a la capacidad operacional destinada para el túnel respectivo. Por tanto, las capacidades descritas en el presente documento responden principalmente al objetivo de minimizar los eventos de contingencia y permitir un tratamiento de las aguas acorde al real avance de la excavación y el método constructivo utilizado.

2 OBJETIVO

Definir las capacidades operacionales de las plantas de tratamiento aguas afloradas en cada frente de trabajo del túnel respectivo y la máxima capacidad de tratamiento operacional de aguas afloradas proyectada para cada sistema de túnel (Las Lajas, Alfalfal y Volcán) del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo según el resultado del modelo hidrogeológico, aspectos operacionales y la variabilidad de los avances de excavación de las obras subterráneas.

3 ANTECEDENTES GENERALES SOBRE AGUAS TRATADAS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO

En la evaluación ambiental del PHAM se consideró la presencia de aguas afloradas durante la construcción de los túneles, como una condición propia de la etapa de construcción del proyecto, pero acotada en consideración al método constructivo.

La evaluación ambiental del PHAM, contempló piscinas exclusivamente destinadas al tratamiento de las aguas que afloran desde los túneles previo a su descarga en forma regulada y limpia al cauce más cercano. Adicionalmente, y aun cuando estas aguas no son definidas como Riles según la normativa vigente, se comprometió que éstas debían cumplir con el D.S. 90/00 MINSEGPRES.

De acuerdo a lo descrito en el cuerpo principal del escrito que presenta la versión refundida del Programa de Cumplimiento aprobado mediante RES. EX. N° 29 / ROL D-001-2017 de abril 6 de 2018, se concluyó que:

- La RCA 256 define las aguas afloradas como aquellas que afloran del macizo rocoso, de origen natural, que entran en contacto con materiales propios de la construcción de los túneles, que pueden afectar su calidad y cuya presencia y características -especialmente su volumen- no pueden ser previstas con certeza.
- No existe ningún tipo de restricción respecto del periodo en el cual estas aguas pueden ser descargadas. Es decir, se permite su descarga previo tratamiento durante todo el año.
- La descripción diferenciada para tratar las aguas afloradas que surgen de la construcción de túneles considera que los estanques dispuestos para ello tienen como objetivo principal captar las aguas que afloran desde los túneles y hacerlas circular por un sistema para su limpieza o clarificado, para luego ser descargadas en forma regulada y limpia al cauce más cercano.

De esta forma, estas aguas no son usadas ni producidas por el PHAM, sino que, con ocasión de la construcción de los túneles, éstas afloran y entran en contacto con materiales de la construcción, para luego ser conducidas a sistemas de tratamiento, donde finalmente son descargadas al cuerpo receptor cumpliendo el estándar de calidad del efluente regulado en el D.S. N° 90/2000 MINSEGPRES.

4 DESCRIPCIÓN CAPACIDAD ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE AFLORAMIENTO EN EL PHAM

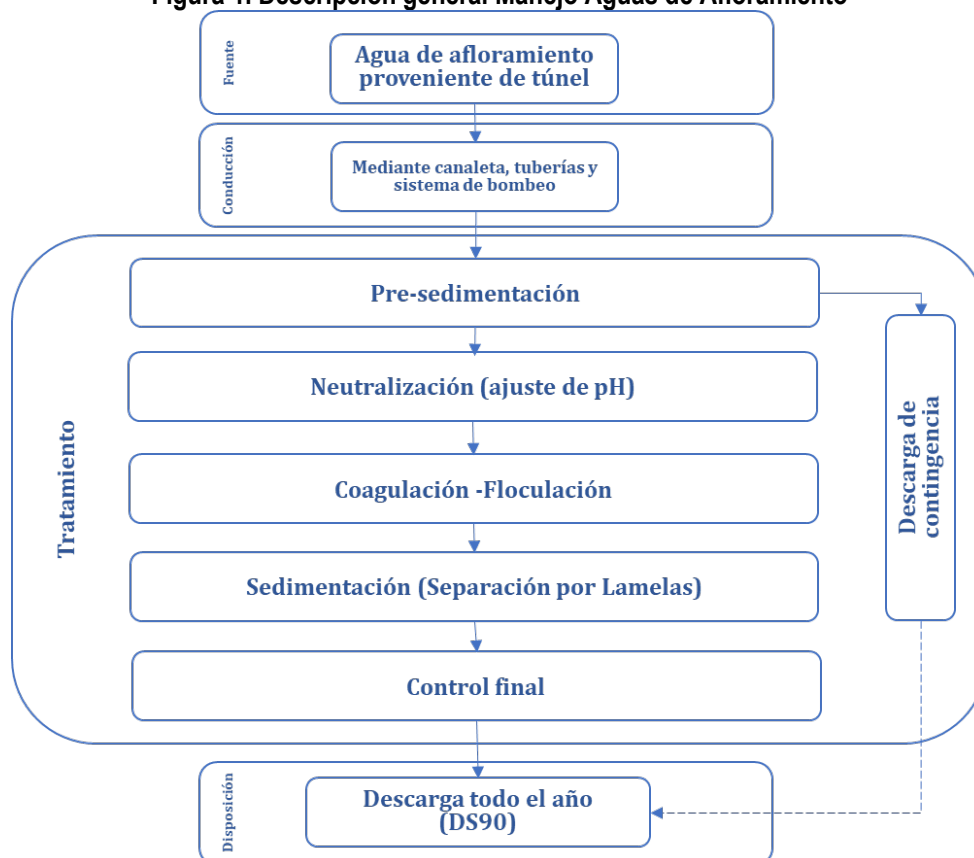
4.1 Instalaciones de tratamiento de aguas afloradas

Las aguas afloradas que surgen durante la excavación de los túneles son captadas y conducidas a sistemas de tratamiento diseñados para abatir y controlar sólidos suspendidos y pH.

Estas plantas corresponden a sistemas de tratamiento compuestos de un sistema de dosificación de ácido o gas CO₂ para la neutralización, y dosificación de coagulante y/o floculante, que se inyectan en la línea y que se mezclan mediante un mezclador estático, para posteriormente ir a un reactor con agitación para floculación y sedimentadores de lamelas para lograr el retiro de sólidos suspendidos totales, y luego descargar. Estos sistemas son construidos con una serie de módulos, lo cual facilita su instalación y entrega la flexibilidad para aumentar o disminuir la capacidad de tratamiento de la planta según sea el requerimiento en cada portal.

La Figura 1. muestra la descripción general del manejo de aguas de afloramiento.

Figura 1. Descripción general Manejo Aguas de Afloramiento



4.2 Descripción capacidad operativa por sistema de túneles

4.2.1 Sistema de túneles central hidroeléctrica Las Lajas (Túnel Las Lajas)

El sistema de Túneles de la central hidroeléctrica las Lajas, corresponde a los túneles de acceso existentes para la construcción de la caverna las Lajas, los accesos a las vías hidráulicas de la central y los túneles hidráulicos que transportaran el agua para generación de esta central, se puede dividir en tres grandes áreas, la aducción las Lajas en donde se ubican los portales VL8, VL7 y VL5, el acceso a la caverna las Lajas (portal VL4) y la descarga las Lajas en donde están los portales L1 y VL2.

4.2.2 Sistema de túneles central hidroeléctrica Alfalfal II (Túnel Alfalfal)

El sistema de Túneles de la central hidroeléctrica Alfalfal II, corresponde a los túneles de acceso existentes para la construcción de la caverna Alfalfal II, los accesos a las vías hidráulicas de la central y los túneles hidráulicos que transportarán el agua para generación de esta central, se puede dividir en dos grandes áreas, los túneles ubicados aguas arriba de la central en donde se ubican los portales VA2 y VA4, cámara de carga Alfalfal II (BCC), el acceso a la caverna Alfalfal II (portal VA1) y la descarga de la central Alfalfal II correspondiente al sistema de aducción de las Lajas.

4.2.3 Túnel Volcán

El túnel Volcán inicia en el portal V1, en donde recibe las aguas de las bocatomas del sector Alto Volcán y termina en el portal V5 en el sector del Yeso, captando las aguas para conducir las al sistema Alfalfal II.

4.3 Resumen capacidad operacional de plantas de tratamiento de aguas afloradas del PHAM

De acuerdo con lo presentado en la sección anterior, las capacidades operacionales y en stand-by para el tratamiento de aguas de afloramiento a febrero de 2019 se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen capacidad de tratamiento por sistema de Túneles

Túnel	Portales asociados	Capacidad instalada (l/s)	Estatus	Capacidad operacional total del sistema (l/s)	Capacidad stand-by total del sistema (l/s)
Las Lajas	L1	125	Operativa	360	225
		125	Stand-by		
	VL2	10	Operativa		
	VL4	125	Operativa		
		100	Stand-by		
	VL5	100	Operativa		
	VL7	0	Sin planta		
	VL8	0	Sin planta		
Alfalfal	VA1	25	Stand-by	50	25
	VA2	25	Operativa		
	VA4	25	Operativa		
Volcán	V5	25	Operativa	50	100
	V1	25	Operativa		
		100	Stand-by		
Total		810		460	350

5 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE AFLORAMIENTOS ESPERADOS

En base a una serie de información histórica y adicional recopilada durante el trabajo desarrollado por la consultora Hidrogeología y Medio Ambiente Sustentable Ltda. (HIDROMAS), se confeccionó un modelo hidrogeológico adoptando los criterios y lineamientos de la guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA¹, cuya modelación involucra dos etapas:

- Elaboración de un modelo conceptual.
- Elaboración de un modelo numérico, que, entre otros, permite estimar los caudales medios mensuales de afloramiento esperados en los túneles del PHAM.

Con el modelo conceptual se buscó comprender y conceptualizar el funcionamiento hidrogeológico del sistema de túneles del PHAM, hacer una representación cualitativa de este y obtener el balance hídrico, para posteriormente generar el modelo numérico usando el software MODFLOW®, cuya simulación permite evaluar escenarios y establecer una estimación de los caudales medios mensuales de afloramiento esperados durante la construcción de los túneles del PHAM.

El modelo numérico generó dos escenarios de estimación de caudales de agua de afloramiento en cada uno de los túneles durante la construcción, el primero estima caudales sin la implementación de medidas de control de afloramientos y el segundo con la implementación de medidas de control de afloramientos, todos los detalles se entregan en el informe emitido por HIDROMAS que se adjunta en el Anexo B.

Adicionalmente, para efectos de definir las capacidades de tratamiento de aguas de afloramiento, se consideraron los resultados del modelo de HIDROMAS y los análisis estadísticos que se detallan en el Anexo A. Por tanto, en la Tabla 2, se muestran los Caudales Esperados Promedio para cada túnel, cuyos valores coinciden con lo reflejado en el modelo para el caso del túnel Las Lajas y Alfalfal, ya que se estimaron con registros de caudales del PHAM hasta julio 2018, y para el portal V1 del túnel Volcán se realiza un ajuste con los datos del periodo abril a diciembre de 2018 puesto que la base de registro del modelo fue sólo de 5 meses.

Tabla 2. Caudales Esperados Promedios de afloramiento esperados por túnel

Túnel	Caudales Esperados Promedios por túnel (l/s)
Las Lajas	508
Alfalfal	71
Volcán ²	190
Total	769

Fuente: Modelo Hidrogeológico HIDROMAS y Anexo A

¹ Servicio de Evaluación Ambiental, http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_aguas_subterraneeas_seia.pdf

² Para este túnel se realizó un ajuste de los caudales del portal V1 definidos en el modelo hidrogeológico, detallado en el Anexo A.

6 ACTUALIZACIÓN DE CAPACIDADES DE TRATAMIENTO DE AGUAS AFLORADAS DEL PHAM.

La definición de las capacidades responde a la necesidad de contar con sistemas de tratamiento que permitan actuar oportunamente bajo las condiciones reales de afloramiento de agua que se enfrenten durante la excavación y necesidades operacionales de la excavación.

En conjunto con lo antes indicado, las necesidades de tratamiento de aguas afloradas en cada portal requieren ser adaptadas en función de dos aspectos esenciales: i) las condiciones hidrogeológicas encontradas durante la excavación, y ii) el progreso y dinámica de la construcción de las obras.

Con base a lo anterior, en la medida que avanza la excavación en los diferentes frentes de trabajo, aumentará el volumen total de aguas afloradas y, por consiguiente, el requerimiento de capacidad en los sistemas de tratamiento de aguas de afloramiento, para lo cual se instalarán nuevas plantas de tratamiento de aguas afloradas o retirarán módulos de otros portales, según corresponda, respetando la capacidad máxima operacional por sistema de túnel descrita en la Tabla 3.

Adicionalmente, el grado de avance en la excavación desde los diferentes frentes de trabajo producirá variaciones en los requerimientos de capacidad de tratamiento en los distintos portales. Así, mientras el procedimiento constructivo de un sistema hidráulico considere el avance desde más de un frente de trabajo en forma independiente, es decir desconectados entre sí, el flujo total de agua aflorada desde dicho sistema hidráulico será naturalmente distribuido entre los distintos portales, generando requerimientos de tratamiento específicos en cada uno de ellos. Sin embargo, en la medida que estos frentes se conecten, la totalidad de las aguas afloradas escurrirá gravitacionalmente hacia un único punto receptor, que corresponderá al ubicado en la menor cota geográfica, incrementando las necesidades de tratamiento en dicho punto y disminuyendo en forma proporcional las capacidades operacionales de tratamiento necesarias en los portales restantes. Por tanto, las capacidades operacionales de tratamiento se definen para cada túnel y se instalan en los diferentes frentes de trabajo en función de los afloramientos esperados según los avances reales de excavación desde cada portal.

6.1 Adaptación de capacidad de tratamiento para Afloramientos

Para determinar la capacidad futura de tratamiento de agua de afloramiento se consideró los resultados del modelo hidrogeológico, un análisis estadístico de las cantidades máximas de tratamiento de agua que se requieren tener operando según el avance de la construcción y el tipo de técnica de excavación utilizada, y el comportamiento de la tasa de afloramiento.

En función de lo anterior, en la Tabla 3 se entregan las capacidades operacionales máximas de tratamiento requeridas para cada sistema de túneles.

El detalle del cálculo y metodología utilizada se presenta en Anexo A.

Tabla 3. Capacidad operacional para tratamiento de agua de afloramiento

Túnel	Portal	Estimación caudales esperados promedios por portal (l/s)	Caudales esperados promedios por túnel (l/s)	Estimación capacidad operacional por portal (l/s)	Capacidad operacional máxima por sistema de túneles (l/s)
Las Lajas	L1	183	508	200	525
	VL2	91		100	
	VL4	207		200	
	VL5	24		25	
	VL7-VL8	3		-	
Alfalfal	VA1	0	71	25	125
	VA2	32		50	
	VA4	39		50	
Volcán	V5	92	190	150	250
	V1	98		100	
Total					900

Si bien en la Tabla 3 se presenta la estimación obtenida de la capacidad operacional tanto por Túnel como Portal, esta última es sólo referencial puesto que ésta se basa en el escenario actual de extracción de agua en cada uno de los portales, pero la capacidad operacional máxima de tratamiento se limita según el túnel y es la que se muestra en la tabla bajo el título “Capacidad operacional máxima por sistemas de túneles (l/s)”, ya que según se indicó anteriormente, de acuerdo con el avance de la construcción la capacidad de tratamiento deberá instalarse en el Portal del Túnel respectivo por donde surja el agua aflorada, por lo tanto, el PHAM instalará durante su construcción una capacidad operacional de tratamiento total de 900 l/s, distribuida en un máximo para el túnel Las Lajas de 525 l/s, Alfalfal de 125 l/s y El Volcán de 250 l/s. La ubicación de las plantas será en el portal requerido según el avance de la excavación.

7 TRATAMIENTO DE RILES

Las actividades propias de la construcción de túneles en los frentes de trabajo generan Residuos Industriales Líquidos (Riles), provenientes de procesos tales como; perforación de roca al interior del túnel y actividades complementarias al proceso como preparación de hormigón, lavado y preparación de áridos, y lavado de equipos. Estas aguas son tratadas en la planta de tratamiento de Riles para lograr la calidad que permita devolverlas al río en el periodo invernal (en las condiciones señaladas en la RCA 256) o bien reutilizarlas en diversos procesos (lavado de equipos, trabajos de construcción del túnel, humectación de superficies y caminos). El sistema de funcionamiento general de las Plantas de Tratamiento de Riles cuenta con ecualizador, floculador, sedimentador tipo lamelas, cámara hidrocarburos, controlador de pH, estanque de aguas tratadas, estanque de acopio de lodos y deshidratador de lodos.

En la Tabla 4 se presenta la capacidad de tratamiento de Riles durante la construcción del Proyecto Alto Maipo. Todas las plantas de Riles se encuentran autorizadas sectorialmente ante la SEREMI de Salud de la Región Metropolitana.

Tabla 4. Plantas de Riles en el Proyecto Alto Maipo

Túnel	Portal	Capacidad (l/s)	Estatus
Las Lajas	L1	25	Operativa
	VL2	Sin planta a la fecha	
	VL4	25	Operativa
	VL5	25	Operativa
	VL7 -VL8	25	Operativa
Alfalfal	VA1	25	Operativa
	VA2	25	Operativa
	VA4	22	Operativa
Volcán	V5	22	Operativa
	V1	22	Operativa
Total		216	

8 ANEXOS

ANEXO A Metodología para estimación de capacidad operacional de tratamiento de agua aflorada requerida en los sistemas de túneles del PHAM

ANEXO B Informe Modelo Hidrogeológico HIDROMAS

ANEXO A

Reporte Técnico No.: 20190130-MA-RPT

ANEXO A

METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE CAPACIDAD OPERACIONAL DE TRATAMIENTO DE AGUA AFLORADA REQUERIDA EN LOS SISTEMAS DE TÚNELES DEL PHAM

ÍNDICE

1.	Objetivo.....	2
2.	Antecedentes.....	2
3.	Consideraciones previas	2
4.	Metodología de cálculo.....	3
4.1	Determinación del comportamiento	3
4.2	Factor de seguridad y nivel operacional	5
4.3	Afloramiento residual-temporal	7
4.4	Determinación de las capacidades operacionales de tratamiento requeridas para aguas de afloramiento	10
5.	Anexo de Tablas.....	12
5.1	Tablas A.1 Registro de flujos medidos por portal.....	12
5.2	Tablas A.2 Factores de seguridad para cada portal de cada túnel.....	14
5.3	Tabla A.3 Tabla resumen caudales del modelo hidrogeológico de Hidromas	15
5.4	Tabla A.4 Registro de flujos medidos diarios en portal V1.....	15
5.5	Tablas A.5 Flujos medidos mensuales en portal V1	16
5.6	Tabla A.6 Capacidades Operacionales de Tratamiento para las Aguas Afloradas.....	16

1. Objetivo

El presente anexo corresponde a la descripción del procedimiento y bases de cálculo utilizadas para determinar las capacidades operacionales requeridas para el tratamiento de aguas afloradas de los túneles del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), las cuales se indican en la Tabla 3 del informe 20190130-MA-RPT “Informe de actualización de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas afloradas y Riles del PHAM”

2. Antecedentes

El procedimiento utilizado para proyectar las capacidades requeridas para las plantas de tratamiento de las aguas afloradas asociadas a los túneles del PHAM se fundan en los siguientes antecedentes:

- a) Informe del modelo hidrogeológico elaborado por HIDROMAS (Anexo B del informe N° 20190130-MA-RPT). En este documento se muestra, en base a los registros históricos y las condiciones hidrogeológicas en el área de estudio, la proyección de caudales medios esperados para cada túnel del PHAM, desagregados de forma esquemática por cada portal de acceso a dichos túneles con la proyección del avance de excavación conocida a julio 2018.
- b) Registro histórico de caudales medidos en los diferentes portales de acceso a los túneles en diferentes períodos entre febrero de 2016 y julio de 2018. Esta información es parte de la base utilizada para determinar los caudales indicados en el documento descrito en el literal a) anterior.
- c) Registro histórico de caudales medidos en el Portal V1-Túnel Volcán entre agosto y diciembre de 2018. Esta información fue utilizada para determinar la proyección de tasas de afloramiento en el referido portal y ajustar el resultado estimado en el modelo hidrogeológico.

3. Consideraciones previas

Para establecer una metodología de cálculo de capacidades operacionales esperadas/requeridas de plantas de tratamiento de agua de afloramiento para los túneles del PHAM, es necesario revisar algunas consideraciones que permitan un adecuado entendimiento y uso de los antecedentes disponibles; por ello, se presentan las siguientes consideraciones:

- a) El modelo Hidrogeológico muestra valores promedios mensuales de flujos esperados, que además de tomar en cuenta aspectos geológicos e hidrogeológicos, considera como parte de la base de su modelación, el uso de los promedios mensuales de los registros de medición de flujos de las plantas de aguas afloradas que se han registrado al ingreso de las plantas de tratamiento durante el periodo modelado.
- b) Los registros históricos de los flujómetros instalados en las plantas de aguas afloradas existentes, asociadas a los túneles del PHAM (Las Lajas, Alfalfal y Volcán), reflejan el comportamiento de las aguas de afloramiento durante la excavación de los túneles y por tanto hay períodos en los cuales el régimen del afloramiento responde a condiciones sin medidas de control (grouting), posterior a la aplicación de medidas e incluso eventos de contingencia (superación de las capacidades de tratamiento) que puntualmente se han presentado.

- c) Respecto de los registros históricos, se considera que, desde un punto de vista estadístico, presentan un comportamiento normal o de distribución gaussiana, lo que permite aplicar diferentes herramientas o parámetros estadísticos para determinar el comportamiento de los flujos de aguas afloradas en cada túnel y, en consecuencia, en cada portal asociado.
- d) Adicionalmente, las capacidades de tratamiento operacional proyectadas de las plantas deberían ser capaces de atender los flujos diarios máximos que son parte de la base de cálculo de los promedios mensuales esperados para los flujos de aguas afloradas.
- e) En determinados periodos de tiempo, los métodos de excavación utilizados tienen resultados o eficiencias de control de afloramientos de aguas similares; sin embargo, durante el proceso constructivo, su comportamiento será diferente dependiendo del grado de flexibilidad de cada método; de este modo, aunque cumpliendo con los promedios mensuales, el nivel de requerimiento de tratamiento de flujos máximos diarios no tendrá la misma magnitud.

4. Metodología de cálculo

4.1 Determinación del comportamiento

Como se indica en las consideraciones previas, los registros históricos de las aguas afloradas medidas en cada portal de los respectivos túneles han mostrado un comportamiento que permite establecer relaciones estadísticas para las lecturas, en este sentido y como primer paso, se calculan en base a las Tablas A.1 “Registro de flujos medidos por portal” (ver punto 5.1 del presente documento), los siguientes promedios, máximos y desviación estándar de los registros por túnel y portal:

ESTADISTICA DE LOS REGISTROS (febrero 2016 - Julio 2018)							
Túnel	Portal	Caudales Promedios Mensuales (l/s)			Caudales Máximos Mensuales (l/s)		
		Promedio	Máximo	Desviación Estándar	Promedio	Máximo	Desviación Estándar
Volcán	V1	8,02	11,47	2,53	10,83	16,35	3,54
	V5	8,19	11,30	3,78	10,67	14,22	3,53
Alfalfal	VA4	5,87	11,60	4,59	12,82	32,87	8,93
	VA2	3,92	6,90	1,72	6,11	13,88	3,67
Las Lajas	L1	42,86	74,67	16,71	51,85	87,56	21,37
	VL4	52,21	84,91	13,05	65,52	87,32	10,29
	VL5	11,41	19,47	5,08	14,80	27,95	6,26
	VL2						
	VL7						

Tabla 4.1 Estadística de los Registros¹

De los datos estadísticos de la Tabla 4.1, tomando como ejemplo el túnel Las Lajas, en particular el Portal L1, el caudal promedio mensual es 42,86 l/s y el caudal máximo de los promedios es 74,67 l/s; sin embargo, de la misma base de datos, ambos valores están por debajo del máximo registrado diario de 87,56 l/s. En este ejemplo, siendo el promedio representativo del comportamiento del túnel, el mismo valor no lo es para los efectos de la necesidad de manejo de los flujos máximos diarios que está representado por los 87,56 l/s.

¹ VL2 y VL7 no se encuentran dentro de los registros. En el caso del VL2, se proyectará su comportamiento en base al portal VL4, el cual es de las mismas características y parte del mismo túnel

La situación descrita, implica la necesidad de establecer una relación entre los valores promedios mensuales y los valores máximos diarios, para lo cual se genera la siguiente tabla que identifica la estadística de las diferencias entre los flujos de estos dos conceptos en base mensual (datos en tablas A.1):

RELACION ENTRE LOS CAUDALES PROMEDIOS Y MÁXIMOS MENSUALES (febrero 2016 - julio 2018)					
Túnel	Portal	Caudales Mensuales (l/s)			
		Promedio caudales medios	Promedio caudales máximo diario	Diferencia promedio mensual	Desviación estándar de las diferencias
Volcán	V1	8,02	10,83	2,81	1,42
	V5	8,19	10,67	2,48	1,53
Alfalfal	VA4	5,87	12,82	6,95	6,52
	VA2	3,92	6,11	2,18	2,31
Las Lajas	L1	42,86	51,85	8,99	7,89
	VL4	52,21	65,52	13,31	7,77
	VL5	11,41	14,80	3,39	3,77
	VL2				
	VL7				

Tabla 4.2 Relación entre caudales promedio y máximos mensuales

Volviendo al ejemplo del túnel Las Lajas, Portal L1, si tomamos el promedio mensual calculado en base a los caudales medios y lo comparamos con el promedio máximo mensual calculado en base a los máximos diarios mensuales, para cada mes dentro del período de registro, se obtiene de la muestra que la diferencia promedio es de 8,99 l/s con una desviación estándar de 7,89 l/s. Utilizando estos valores estadísticos y el máximo diario registrado, se obtiene que para calcular el máximo histórico mensual medido en el Portal L1, deberíamos de sumar 4,5 veces la desviación estándar de la diferencia, a la diferencia promedio mensual y al promedio mensual de los caudales medios para obtener el 100% de las lecturas bajo el valor máximo registrado de 87,56 l/s (Tabla 4.1.).

De lo precedentemente indicado, cabe destacar que, dependiendo de la cantidad de veces que multipliquemos la desviación estándar de la diferencia mensual entre las medidas promedios y máximas de los flujos registrados, en cada portal de cada túnel, llegaremos a diferentes niveles de confianza estadística o, enfocándose en el PHAM, niveles de cobertura operacional en función de los registros históricos. Para los efectos de hacer una proyección o extrapolación del comportamiento de los portales de cada túnel en relación con las aguas afloradas medidas, se hace necesario reflejar los datos estadísticos en términos porcentuales, en vez de medidas en términos de flujos, con el objetivo de establecer las desviaciones en una base proporcional en función de los promedios proyectados.

De esta forma, volviendo al ejemplo del túnel L1, la diferencia promedio entre el máximo promedio y el promedio mensual que corresponde a 8,99 l/s, equivale al 20,98% del promedio mensual del caudal medio de los flujos registrados; y la desviación estándar de las diferencias, que corresponde a 7,89 l/s, equivale al 18,41% del promedio mensual del caudal medio de los flujos registrados. De esta manera, para calcular el porcentaje a agregar al promedio mensual para cubrir el máximo mensual, debemos sumar 44,50 l/s o un 104,26% del flujo promedio mensual medido. El porcentaje de 104,26% también se puede expresar en términos numéricos, es decir, 1,0426 que se puede expresar como un factor multiplicador sobre el promedio mensual, para determinar la cantidad a sumar al promedio para

encontrar el máximo, o también se puede generar un factor total de mayoración; para esto último, se le suma 1 al factor multiplicador y se obtiene un factor total de 2,043; así, 42,86 l/s multiplicado por el factor total de 2,043 equivale a 87,56 l/s, es decir, el máximo registrado, implicando que el 100% de las medidas tomadas desde los flujómetros está bajo este valor o, lo que podríamos decir de otra forma, los 87,56 l/s tienen un 100% de nivel de cobertura operacional diaria o, en términos simples, equivalente a un 100% de nivel operacional diario. Para los efectos operacionales, se le cambiará el nombre al factor total y se continuará haciendo referencia al mismo como “factor de seguridad”.

De esta forma y basados en la metodología presentada, utilizando la distribución normal y asumiendo que todos los portales se comportan de esta forma estadística, se está en condiciones de determinar diferentes niveles de cobertura operacional y asociarlos a factores de seguridad calculados en función de la desviación estándar de los registros medidos de cada portal para cada túnel.

4.2 Factor de seguridad y nivel operacional

La metodología mostrada en el punto 4.1 anterior, estableció la relación de los datos promedios con los máximos en base mensual, contenidos en los registros históricos muestrales del PHAM. También se incorporó el concepto de factor de seguridad en función de la distribución normal de las medidas en cada túnel; en lo específico, se desarrolló un ejemplo considerando el 100% de cobertura sobre la muestra registrada.

a) Factor de Seguridad

Como se desarrolla en esta sección, el factor de seguridad se determina utilizando herramientas estadísticas, en lo particular, las asociadas a la distribución normal, con las cuales se pueden determinar diferentes niveles de confianza o, en nuestro caso, diferentes niveles de cobertura operacional.

Tomando como referencia tablas de distribución normal acumulada, los factores de multiplicación de la desviación para los diferentes niveles de confianza que se indican, son los siguientes:

Nivel de Confianza	Factor de la Tabla Gaussiana
75,00%	0,68
80,00%	0,84
84,00%	1,00
90,00%	1,29
95,00%	1,65
99,00%	2,33

Tabla 4.3 Factores Gaussianos

Para los efectos de determinar el 100% (no mostrado en la Tabla 4.3), siendo que se desea realizar una estimación sobre los valores conocidos y registrados, se ha optado por calcular directamente el factor de multiplicación en función del valor máximo encontrado en cada portal de cada túnel.

Utilizando el ejemplo desarrollado en el punto 4.1 anterior, se puede formular el factor de seguridad de forma genérica, con el objetivo de, a partir del valor promedio mensual medido, con un cierto nivel de cobertura operacional, obtener el valor máximo o flujo máximo esperado para cada túnel; de esta forma, el factor de seguridad se puede expresar de la siguiente manera:

$$F.S. = 1 + (Pd + Sd * Fg) / Pm \quad \text{(Fórmula 4.1)}$$

F.S.: Factor de Seguridad. Cantidad de veces que se multiplica el promedio mensual de los flujos medios mensuales registrados de un portal, para proyectar el máximo mensual esperado dentro de un cierto nivel operacional. De este modo al utilizar un factor de seguridad con un 100% de nivel operacional, todos los registros de la muestra estarán por debajo de este nivel.

Pd: Promedio de las diferencias de flujos mensuales entre el máximo diario mensual y el promedio mensual de un determinado mes, para los flujos registrados en un portal específico de un determinado túnel.

Sd: Desviación estándar de las diferencias de los flujos mensuales, entre el máximo diario mensual y el promedio mensual de un determinado mes, para los flujos registrados en un portal específico de un determinado túnel.

Pm: Promedio mensual de un determinado mes de los flujos registrados en un portal específico de un determinado túnel.

Fg: Factor gaussiano asociado a un determinado nivel de confianza. Como se define en nuestro caso, nivel de cobertura operacional requerido. (Tabla 4.3)

En las Tablas A.2 (punto 5.2 del presente documento) se muestran los factores de seguridad para cada portal de cada túnel con registro histórico de flujos medidos.

b) Nivel Operacional

Retomando el concepto del nivel operacional, se podría definir entonces como: el porcentaje de datos registrados que se encuentran bajo un flujo determinado para cada portal de cada túnel. De este modo, con el apoyo de las Tablas A.2, continuando con el ejemplo desarrollado en el punto 4.1 anterior, para el portal L1, el 100% de los flujos registrados está bajo los 87,56 l/s, el 90% de los registros está por debajo de los 62,03 l/s y el 75% bajo los 57,22 l/s.

Las medidas de control de los flujos de aguas afloradas, para disminuir su ingreso y mantenerlo bajo un cierto nivel definido, tienen el mismo grado de efectividad en el tiempo, sin embargo, durante el proceso constructivo tendrán diferente nivel de efectividad y grado de flexibilidad para su implementación. De esta forma, como ya se ha explicado y demostrado en la práctica, el proceso de excavación manual de perforación y voladura (Drill and Blast) o simplemente D&B, tiene la flexibilidad de perforar y lechar (groutear) en todas direcciones e incluso directamente en la frente, sin embargo, las TBM abiertas sólo permiten perforar y lechar en las direcciones que el equipo instalado en la

máquina permite; sin perjuicio de que luego de avanzar con el frente de excavación se tenga acceso a las mismas áreas que antes no se tuvo, aunque dependiendo de los sectores, aún con algunos grados de dificultad técnica; no obstante, en el tiempo ambos sistemas (D&B y TBM abiertas) tienden a disminuir los flujos de agua aflorada a niveles aceptables.

Entonces, en el tiempo, los diferentes sistemas o métodos de excavación tienden a tener un mismo nivel de efectividad, sin embargo, su capacidad de reacción no es la misma al momento de avanzar con la frente de excavación teniendo cada método ventajas técnicas u operacionales que justifican su elección.

El Proyecto se construye a través de dos métodos de excavación, D&B y TBM (abiertas y cerradas²) que poseen diferentes grados de flexibilidad durante la excavación, por tanto, su factor de seguridad debe ser distinto, lo cual se expresa en la siguiente tabla:

Método Constructivo	Necesidad Operacional de Tratamiento Aguas Afloradas
Perforación y Voladura (D&B)	75%
TBM Abiertas	90%
TBM Cerradas o con escudo(s)	100%

Tabla 4.4 Necesidad operacional de tratamiento aguas afloradas según método constructivo

4.3 Afloramiento residual-temporal

Durante la excavación y aplicación de medidas de control, se ha observado que existen filtraciones por fisuras milimétricas o incluso micrométricas de aguas afloradas de caudal mínimo a lo largo de la zona excavada, las que se presentan en zonas tratadas y también en zonas no tratadas, que se suman a los afloramientos propios del avance de la frente de excavación. Estos afloramientos de tramos ya excavados tienden a desaparecer o desaparecen con el tiempo, dado que se colmatan por el material intersticial propio del macizo rocoso arrastrado por el agua o por reacciones químicas al contacto con el aire o por campañas adicionales focalizadas de post-grouting. Esto se ha observado por ejemplo en los túneles asociados al frente VL5, VL7, y acceso a la Caverna de Máquinas de Las Lajas (Acceso VL4).

Tanto las aguas afloradas de tramos excavados como las propias de la frente de excavación generan una tasa de afloramiento asociada al tiempo o a la longitud excavada en cada túnel por cada portal, dicha tasa la expresaremos en litros por segundo por metro (l/s/m) y la denominaremos como Tasa de Afloramiento Promedio; la que, evaluada a una cierta distancia excavada o proyectada de excavación, la denominaremos Afloramiento Residual-Temporal, medida en litros por segundo (l/s).

Siendo que el túnel de descarga de Las Lajas, particularmente el Portal L1, es el que tiene mayor cantidad de análisis e información de detalle, parece un ejemplo adecuado para explicar lo enunciado en el párrafo precedente. El comportamiento de las aguas afloradas en base a los registros indicados

² Este método representa una ventaja importante, dado que el túnel va quedando prácticamente terminado con el avance del equipo, pudiendo quedar sólo algunas actividades secundarias pendientes para el final de la excavación; sin embargo, la operatividad constructiva de estos equipos es menos flexible que las TBM abiertas.

en las Tablas A.1 (Sección 5.1) (aplicando medidas de control de afloramientos), se puede graficar de la siguiente forma:

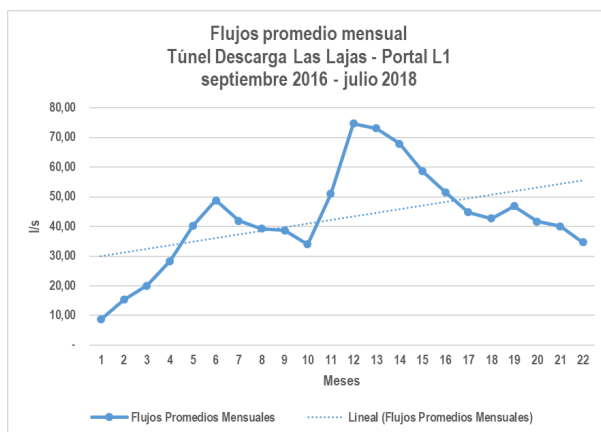


Gráfico 4.1 Comportamiento de los afloramientos promedio de agua en Portal L1.

El comportamiento de las aguas afloradas, mostrada en el Gráfico 4.1, se puede dividir en tres grandes períodos de aproximadamente 6 meses cada uno. Para los primeros seis meses se observa un crecimiento del ingreso de agua aflorada, luego otros seis meses con un decrecimiento inicial y posterior aumento; y un tercero con un descenso de los caudales de forma prácticamente constante que se proyecta por sobre los 18 meses. En términos estadísticos, las rectas de regresión lineal para cada período muestran tasas de afloramiento promedio por metro de:

Período Amulado	Kilometraje Acumulado (m)	Tasa de Afloramiento Promedio (l/s/m)	Caudal Promedio Registrado (l/s)	Máximo Registrado (l/s)
Hasta los 6 meses	1.449	0,067	26,89	61,57
Hasta los 12 meses	1.891	0,036	36,73	87,56
Hasta los 22 meses	2.639	0,018	42,86	87,56

Tabla 4.5 Afloramiento Promedio por metro de túnel Descarga Las Lajas – Portal L1

Sin perjuicio de la eventual ocurrencia de eventos inesperados producto de las propias condiciones de la variabilidad geológica, la proyección es que continúe disminuyendo la tasa de afloramiento promedio en el túnel Las Lajas en el Portal L1 hasta llegar a niveles similares a los ya alcanzados en los túneles que presentaron afloramientos durante su desarrollo y que hoy están con su excavación terminada. Es de destacar que, a la fecha las reducciones de las tasas de afloramiento semestral en el Portal L1 han bajado significativamente.

El criterio que se presenta en la presente Sección 4.3 también debe ser atendido para la determinación de las proyecciones del agua aflorada, al igual que las propias de la modelación hidrogeológica y las operacionales, ya mencionadas en las secciones anteriores. Aunque las longitudes definitivas a excavar por cada portal dentro de cada túnel dependen de numerosas variables, razonablemente se podría considerar que la excavación del Túnel de Descarga de Las Lajas desde el Portal L1 hacia la Caverna, podría probablemente avanzar hasta el kilómetro 7.300, y con este avance, basados en la ecuación de regresión lineal para los registros de las Tablas A.1 (Sección 5.1), se proyecta un caudal de afloramiento residual-temporal del orden de los 144,18 l/s. Este último número se encuentra dentro

del margen de 183 l/s y 127 l/s del modelo hidrogeológico, proyectados respectivamente para los casos de sin y con medidas de control con grouting (Tabla A.3 – Sección 5.3).

De igual forma que para el Túnel de Descarga de Las Lajas desde el Portal L1, se ha realizado la proyección de afloramiento residual-temporal en otros portales y se ha detectado que, en el caso del Túnel Volcán, esta proyección está por sobre lo indicado en el modelo hidrogeológico para el portal V1. Esta circunstancia nos obliga a considerar la proyección del afloramiento residual-temporal como criterio de estimación de los caudales promedios y máximos esperados para las capacidades de tratamiento requeridas en el referido portal.

Tomando en consideración los registros mostrados en la Tabla A.4 (Sección 5.4) y los promedios mostrados en la Tabla A.5 (Sección 5.5), se grafica lo siguiente para los valores medios según los registros del Túnel Volcán – Portal V1:

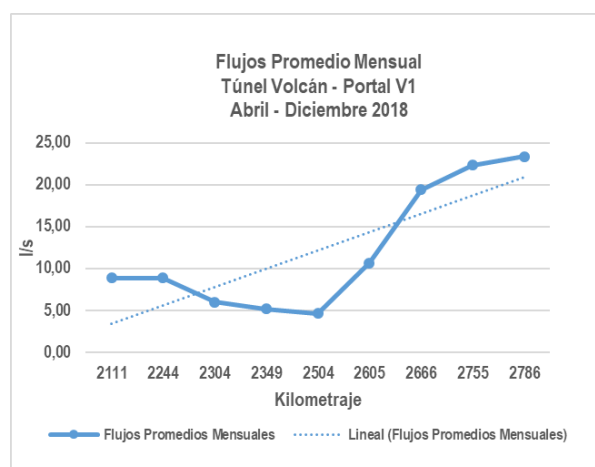


Gráfico 4.2 Comportamiento de los afloramientos promedio de agua en Túnel Volcán – Portal V1

En este caso, tomando en consideración la pendiente de la recta de regresión lineal de los promedios, la tasa de afloramiento promedio en el Túnel Volcán para el Portal V1 es de 0,024 l/s/m. Como ya comentado, el sistema de tratamiento debe ser capaz de tratar los caudales de afloramiento residual-temporal, que en este caso, considerando una excavación aproximada de este frente hasta los 6.000 m (aproximadamente un 40% del largo total del Túnel Volcán) sería de 97,75 l/s con control de afloramientos; muy superior, a lo indicado en el modelo hidrogeológico que indica 17 l/s y 16 l/s, proyectados respectivamente para los casos de sin y con medidas de control con grouting.

Las variaciones detectadas y mencionadas en el párrafo precedente, entre la proyección del afloramiento residual-temporal y la proyección del modelo hidrogeológico para el Túnel Volcán - Portal V1, se deben a que para la modelación se utilizó la base de datos disponible al momento de confeccionar el modelo, la cual era sólo de 5 meses de registros y con períodos prolongados de detención; sin embargo, para la proyección del afloramiento residual-temporal se utilizó una base de datos de 9 meses luego de retomados los trabajos de excavación a contar de Abril 2018 hasta Diciembre 2018. (Tablas A.4 y A.5 en Secciones 5.4 y 5.5 respectivamente). Importante mencionar

que sólo este Portal ha mostrado una variación significativa desde la fecha de corte de la base de datos utilizada para la modelación hidrogeológica.

4.4 Determinación de las capacidades operacionales de tratamiento requeridas para aguas de afloramiento

Como se ha desarrollado en esta Sección 4 “Metodología de Cálculo”, tres son los criterios que se deben tomar en consideración para la determinación de las capacidades operacionales de tratamiento requeridas para las aguas afloradas:

- i) Modelo hidrogeológico.
- ii) Flujos mensuales de afloramientos promedios y máximos registrados.
- iii) Proyección de flujos de afloramiento de los promedios según comportamiento de los túneles durante la excavación. (Afloramiento Residual-Temporal)

Considerando los requerimientos ambientales y la necesidad de tratar las aguas afloradas antes de su descarga en los cauces, es que los criterios antes mencionados se combinan y evalúan mediante los procedimientos ya detallados en el presente documento, y se escogen aquellos que con la información actual nos permite abordar los afloramientos en su condición más desfavorable.

Según lo descrito en el literal b) de la Sección 4.2. anterior, es necesario tener en consideración los métodos de excavación, su estado actual y programado, y el nivel/necesidad operacional para cada túnel, distribuido por portal de entrada, dicha información se resume en la siguiente tabla:

METODOLOGIAS DE EXCAVACION ACTUAL Y PROGRAMADA				
Túnel	Portal	Metodología de Excavación		Necesidad Operacional
		Actual	Programada	
Volcán	V1	D&B	TBM c/Escudo	100%
	V5	D&B	TBM c/Escudo	100%
Alfalfal	VA4	TBM Abierta	TBM Abierta	90%
	VA2	TBM Abierta	TBM Abierta	90%
Las Lajas	L1	TBM Abierta	TBM Abierta	90%
	VL4	D&B	TBM c/Escudo	100%
	VL5	D&B	D&B	75%
	VL2	D&B	D&B	75%
	VL7	-	-	-

Tabla 4.6 Metodologías de excavación y necesidad operacional

La metodología mostrada en la Sección 4.1 anterior estableció la relación de los datos promedios con los máximos en base mensual, contenidos en los registros históricos muestrales del PHAM. También se incorporó el concepto de factor de seguridad en función de la distribución normal de las medidas en cada túnel; en lo específico, se desarrolló un ejemplo considerando el 100% de cobertura sobre la muestra registrada.

Con base a la Tabla A.6 (Sección 5.6) a continuación se muestra una tabla resumen de las capacidades requeridas para las plantas de tratamiento de las aguas afloradas:

Sistema de túneles	Portal	Caudales Esperados Promedio (l/s)	Capacidad operacional por sistema de túneles(l/s)
Volcán ³	V1	190	250
	V5		
Alfalfal	VA4	71	125
	VA1		
	VA2		
Las Lajas	L1	508	525
	VL4		
	VL5		
	VL2		
	VL7-VL8		
Capacidad operacional total requerida para tratamiento de aguas de afloramiento PHAM			900

Tabla 4.7 Capacidades operacionales de tratamiento requeridas para las aguas de afloramiento

La capacidad operacional para cada sistema de túneles (l/s): es la suma de las capacidades por cada portal del túnel correspondiente, que se estima en base a la proyección de avance de la excavación. Sin embargo, dichas capacidades por portal se adaptarán en función a las condiciones reales que se visualicen durante la excavación, siempre respetando que sobre la capacidad operacional máxima de 900 l/s se aplicará el procedimiento de contingencia definido en el Proyecto Alto Maipo en caso de superación de las capacidades de tratamiento para aguas de afloramiento.

Por tanto, las capacidades operacionales máximas comprometidas para cada túnel sobre las cuales aplicará el procedimiento de contingencia, según se muestra en la Tabla anterior, son: El Volcán 250 l/s, Alfalfal 125 l/s y Las Lajas 525 l/s, y la ubicación de dichas plantas será en el portal requerido, según el avance de la excavación y comportamiento de las aguas de afloramiento.

³ Los caudales esperados corresponden a los indicados en el modelo de hidrogeológico con excepción del portal V1 del túnel Volcán por los motivos y cálculos presentados en la Sección 4.3 de este Anexo A.

5. Anexo de Tablas

5.1 Tablas A.1 Registro de flujos medidos por portal

Túnel Descarga Las Lajas (L1 - O-TBM)						Túnel Descarga Las Lajas (VL4 - D&B)						Túnel Descarga Las Lajas (VL5 - D&B)					
Meses	Fecha	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional		Meses	Fecha	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional		Meses	Fecha	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%			l/s	l/s	l/s	%			l/s	l/s	l/s	%
1	01-09-2016	8,66	9,92	1,26	14,58	1	01-02-2016	42,29	58,48	16,19	38,28	1	01-02-2016	18,77	23,17	4,40	23,42
2	01-11-2016	15,29	17,20	1,91	12,47	2	01-03-2016	33,42	46,86	13,44	40,23	2	01-03-2016	18,75	25,70	6,95	37,09
3	01-12-2016	20,04	28,17	8,13	40,57	3	01-04-2016	32,61	48,40	15,79	48,42	3	01-04-2016	18,19	22,01	3,82	21,01
4	01-01-2017	28,37	34,28	5,90	20,81	4	01-05-2016	30,48	43,65	13,17	43,19	4	01-05-2016	19,35	20,42	1,07	5,53
5	01-02-2017	40,23	52,48	12,25	30,44	5	01-06-2016	35,50	62,88	27,38	77,14	5	01-06-2016	19,47	21,66	2,19	11,23
6	01-03-2017	48,77	61,57	12,80	26,25	6	01-07-2016	40,88	57,94	17,06	41,73	6	01-07-2016	19,29	25,20	5,91	30,63
7	01-04-2017	41,92	49,02	7,10	16,94	7	01-08-2016	51,51	60,02	8,51	16,52	7	01-08-2016	16,28	18,69	2,41	14,79
8	01-05-2017	39,23	44,99	5,76	14,68	8	01-09-2016	54,70	66,84	12,14	22,20	8	01-09-2016	12,28	13,61	1,33	10,87
9	01-06-2017	38,64	49,86	11,22	29,03	9	01-10-2016	52,45	61,47	9,02	17,19	9	01-10-2016	8,61	11,16	2,55	29,66
10	01-07-2017	33,93	50,73	16,80	49,50	10	01-11-2016	58,75	65,86	7,10	12,09	10	01-11-2016	8,25	9,56	1,31	15,86
11	01-08-2017	51,04	86,67	35,63	69,81	11	01-12-2016	59,61	71,86	12,25	20,56	11	01-12-2016	8,20	9,19	0,99	12,03
12	01-09-2017	74,67	87,56	12,89	17,26	12	01-01-2017	55,55	70,73	15,18	27,33	12	01-01-2017	8,20	9,12	0,92	11,25
13	01-10-2017	73,15	86,40	13,24	18,11	13	01-02-2017	51,82	65,62	13,80	26,63	13	01-02-2017	7,82	10,19	2,37	30,28
14	01-11-2017	67,89	85,31	17,42	25,66	14	01-03-2017	48,07	70,50	22,42	46,64	14	01-03-2017	7,12	9,61	2,49	35,00
15	01-12-2017	58,76	69,42	10,66	18,14	15	01-04-2017	51,10	71,13	20,03	39,21	15	01-04-2017	6,93	8,49	1,55	22,40
16	01-01-2018	51,55	53,64	2,09	4,06	16	01-05-2017	50,34	69,97	19,63	39,00	16	01-05-2017	6,68	10,17	3,49	52,22
17	01-02-2018	44,82	48,77	3,95	8,81	17	01-06-2017	47,84	69,09	21,25	44,42	17	01-06-2017	5,37	9,26	3,89	72,32
18	01-03-2018	42,68	45,76	3,08	7,22	18	01-07-2017	35,47	68,92	33,45	94,30	18	01-07-2017	5,11	9,80	4,69	91,62
19	01-04-2018	46,84	57,22	10,39	22,17	19	01-08-2017	42,54	52,66	10,12	23,78	19	01-08-2017	4,46	5,30	0,84	18,74
20	01-05-2018	41,71	43,45	1,74	4,17	20	01-09-2017	47,62	57,33	9,71	20,38	20	01-09-2017	4,21	6,63	2,42	57,30
21	01-06-2018	40,05	42,34	2,30	5,73	21	01-10-2017	54,21	68,69	14,48	26,71	21	01-10-2017	5,02	20,91	15,89	316,36
22	01-07-2018	34,63	35,92	1,29	3,71	22	01-11-2017	54,59	80,31	25,72	47,11	22	01-11-2017	12,38	27,95	15,57	125,85
						23	01-12-2017	54,90	60,25	5,35	9,75	23	01-12-2017	13,56	14,40	0,84	6,22
						24	01-01-2018	54,88	59,10	4,22	7,70	24	01-01-2018	13,83	15,52	1,69	12,18
						25	01-02-2018	58,04	61,19	3,15	5,42	25	01-02-2018	12,81	16,81	4,00	31,23
						26	01-03-2018	62,63	73,95	11,32	18,07	26	01-03-2018	14,43	15,43	1,00	6,91
						27	01-04-2018	64,29	73,97	9,68	15,06	27	01-04-2018	12,50	13,49	0,99	7,91
						28	01-05-2018	77,48	77,48	-	-	28	01-06-2018	11,41	12,20	0,79	6,92
						29	01-06-2018	84,91	87,32	2,41	2,83	29	01-07-2018	11,69	13,55	1,86	15,90
						30	01-07-2018	77,77	83,22	5,45	7,01						

Túnel de Alimentación Alfalfal II (VA2 - O-TBM)					
Meses	Fecha	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%
1	01-08-2017	0,55	0,55	-	-
2	01-09-2017	6,90	9,54	2,65	38,39
3	01-10-2017	6,25	13,88	7,62	121,92
4	01-11-2017	4,11	8,11	3,99	97,10
5	01-12-2017	4,02	7,56	3,54	88,12
6	01-01-2018	4,07	7,25	3,18	78,03
7	01-02-2018	4,22	4,76	0,54	12,80
8	01-03-2018	3,53	4,30	0,77	21,68
9	01-04-2018	2,80	2,85	0,05	1,92
10	01-06-2018	2,47	3,40	0,93	37,57
11	01-07-2018	4,25	5,01	0,76	17,84

Túnel de Alimentación Alfalfal II (V5 - D&B)					
Meses	Fecha	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%
1	01-09-2017	11,07	12,17	1,11	9,99
2	01-10-2017	10,65	13,19	2,53	23,79
3	01-11-2017	10,87	12,17	1,30	11,96
4	01-12-2017	10,67	11,67	1,00	9,34
5	01-01-2018	11,30	14,22	2,92	25,84
6	01-02-2018	10,93	13,22	2,29	20,96
7	01-03-2018	10,24	12,21	1,97	19,18
8	01-04-2018	5,54	9,90	4,36	78,70
9	01-05-2018	4,22	8,73	4,51	107,06
10	01-06-2018	3,40	8,26	4,86	142,86
11	01-07-2018	1,24	1,68	0,44	35,23

Túnel de Alimentación Alfalfal II (VA4 - O-TBM)					
Meses	Fecha	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%
1	01-09-2017	3.88203187	13,18	9,30	239,58
2	01-10-2017	0,93960227	10,21	9,27	986,92
3	01-11-2017	2,62401706	10,66	8,04	306,40
4	01-12-2017	5,52	13,76	8,24	149,34
5	01-01-2018	11,60	22,37	10,77	92,84
6	01-02-2018	11,08	12,45	1,37	12,35
7	01-03-2018	10,09	32,87	22,78	225,83
8	01-04-2018	-	1,44	1,44	-
9	01-05-2018	-	0,19	0,19	-
10	01-06-2018	9,58	12,38	2,79	29,16
11	01-07-2018	9,24	11,49	2,24	24,28

Túnel de Alimentación Alfalfal II (V1 - D&B)					
Meses	Fecha	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%
1	01-01-2018	9,80	11,55	1,75	17,84
2	01-02-2018	11,47	16,35	4,88	42,55
3	01-03-2018	7,11	10,76	3,66	51,47
4	01-06-2018	5,43	7,64	2,21	40,69
5	01-07-2018	6,29	7,86	1,56	24,85

5.2 Tablas A.2 Factores de seguridad para cada portal de cada túnel

Nivel de Confianza	Factor de la Tabla Gaussiana	Túnel Descarga Las Lajas (L1 - O-TBM)						Túnel Descarga Las Lajas (VL4 - D&B)						Túnel Descarga Las Lajas (VL5 - D&B)						Túnel de Alimentación Alfalfal II (VA2 - O-TBM)					
		Caudal Promedio	Ajuste por Desviación Estándar	Capacidad Corregida	Capacidad Adicional s/Promedio	Capacidad Adicional s/Promedio	Factor de Seguridad	Caudal Promedio	Ajuste	Capacidad Operacional	Capacidad Adicional s/Promedio	Capacidad Adicional s/Promedio	Factor de Seguridad	Caudal Promedio	Ajuste	Capacidad Operacional	Capacidad Adicional s/Promedio	Capacidad Adicional s/Promedio	Factor de Seguridad	Caudal Promedio	Ajuste	Capacidad Operacional	Capacidad Adicional s/Promedio	Capacidad Adicional s/Promedio	Factor de Seguridad
		l/s	l/s	l/s	%	n	n	l/s	l/s	l/s	%	n	n	l/s	l/s	l/s	%	n	n	l/s	l/s	l/s	%	n	n
75.00%	0.68	42.86	14.36	57.22	33.50%	0.3350	1.3350	52.21	18.60	70.81	35.63%	0.3563	1.3563	11.41	5.95	17.37	52.15%	0.5215	1.5215	3.92	3.76	7.68	95.76%	0.9576	1.9576
80.00%	0.84	42.86	15.62	58.48	36.45%	0.3645	1.3645	52.21	19.84	72.05	38.01%	0.3801	1.3801	11.41	6.56	17.97	57.44%	0.5744	1.5744	3.92	4.13	8.05	105.19%	1.0519	2.0519
84.00%	1.00	42.86	16.88	59.74	39.40%	0.3940	1.3940	52.21	21.09	73.30	40.39%	0.4039	1.4039	11.41	7.16	18.57	62.73%	0.6273	1.6273	3.92	4.50	8.42	114.62%	1.1462	2.1462
90.00%	1.29	42.86	19.17	62.03	44.74%	0.4474	1.4474	52.21	23.34	75.55	44.71%	0.4471	1.4471	11.41	8.25	19.67	72.32%	0.7232	1.7232	3.92	5.17	9.09	131.72%	1.3172	2.3172
95.00%	1.65	42.86	22.02	64.87	51.37%	0.5137	1.5137	52.21	26.14	78.35	50.07%	0.5007	1.5007	11.41	9.61	21.03	84.22%	0.8422	1.8422	3.92	6.00	9.93	152.85%	1.5285	2.5285
99.00%	2.33	42.86	27.38	70.24	63.89%	0.6389	1.6389	52.21	31.43	83.63	60.19%	0.6019	1.6019	11.41	12.18	23.59	105.71%	1.0571	2.0571	3.92	7.58	11.50	193.04%	1.9304	2.9304
100.00%	N/A	42.86	44.70	87.56	104.30%	1.0430	2.0430	52.21	36.11	87.32	67.25%	0.6725	1.6725	11.41	16.54	27.95	144.89%	1.4489	2.4489	3.92	9.95	13.88	253.59%	2.5359	3.5359

Nivel de Confianza	Factor de la Tabla Gaussiana	Túnel de Alimentación Alfalfal II (VA4 - O-TBM)						Túnel de Alimentación Alfalfal II (V5 - D&B)						Túnel de Alimentación Alfalfal II (V1 - D&B)					
		Caudal Promedio	Ajuste	Capacidad Operacional	Capacidad Adicional s/Promedio	Capacidad Adicional s/Promedio	Factor de Seguridad	Caudal Promedio	Ajuste	Capacidad Operacional	Capacidad Adicional s/Promedio	Capacidad Adicional s/Promedio	Factor de Seguridad	Caudal Promedio	Ajuste	Capacidad Operacional	Capacidad Adicional s/Promedio	Capacidad Adicional s/Promedio	Factor de Seguridad
		l/s	l/s	l/s	%	n	n	l/s	l/s	l/s	%	n	n	l/s	l/s	l/s	%	n	n
75.00%	0.68	5.87	11.38	17.25	194.00%	1.9400	2.9400	8.19	3.52	11.71	42.98%	0.4298	1.4298	8.02	3.78	11.80	47.08%	0.4708	1.4708
80.00%	0.84	5.87	12.43	18.30	211.79%	2.1179	3.1179	8.19	3.77	11.96	45.98%	0.4598	1.4598	8.02	4.00	12.02	49.91%	0.4991	1.4991
84.00%	1.00	5.87	13.47	19.34	229.58%	2.2958	3.2958	8.19	4.01	12.21	48.97%	0.4897	1.4897	8.02	4.23	12.25	52.74%	0.5274	1.5274
90.00%	1.29	5.87	15.36	21.23	261.82%	2.6182	3.6182	8.19	4.46	12.65	54.39%	0.5439	1.5439	8.02	4.64	12.66	57.87%	0.5787	1.5787
95.00%	1.65	5.87	17.71	23.58	301.84%	3.0184	4.0184	8.19	5.01	13.20	61.12%	0.6112	1.6112	8.02	5.15	13.17	64.24%	0.6424	1.6424
99.00%	2.33	5.87	22.15	29.02	377.44%	3.7744	4.7744	8.19	6.05	14.24	73.64%	0.7364	1.7364	8.02	6.12	14.14	75.26%	0.7526	1.7526
100.00%	N/A	5.87	27.00	32.87	460.06%	4.6006	5.6006	8.19	6.03	14.22	73.58%	0.7358	1.7358	8.02	8.33	16.35	103.88%	1.0388	2.0388

5.3 Tabla A.3 Tabla resumen caudales del modelo hidrogeológico de Hidromas

CAUDALES ESPERADOS PROMEDIO MENSUAL MODELO HIDROGEOLÓGICO HIDROMAS					
Túnel	Portal	Caudal Medio (l/s)		Suma Caudales (l/s)	
		S/Grouting	C/Grouting	S/Grouting	C/Grouting
Volcán	V1	17	16	109	94
	V5	92	78		
Alfalfal	VA4	32	23	71	49
	VA2	39	26		
Las Lajas	L1	183	127	508	311
	VL4	207	101		
	VL5	24	20		
	VL2	91	60		
	VL7	3	3		
Totales				688	454

5.4 Tabla A.4 Registro de flujos medidos diarios en portal V1

REGISTRO DE FLUJOS DE AGUA AFLORADA EN TUNEL VOLCÁN - PORTAL V1																	
Fecha	Registro	Fecha	Registro	Fecha	Registro	Fecha	Registro	Fecha	Registro	Fecha	Registro	Fecha	Registro	Fecha	Registro	Fecha	Registro
01-04-18	9,08	01-05-18	8,92	01-06-18	8,47	01-07-18	7,26	01-08-18	4,06	01-09-18	7,31	01-10-18	13,10	01-11-18	22,91	01-12-18	21,62
02-04-18	8,96	02-05-18	8,97	02-06-18	8,04	02-07-18	6,38	02-08-18	3,96	02-09-18	3,67	02-10-18	13,22	02-11-18	23,40	02-12-18	22,46
03-04-18	8,49	03-05-18	8,90	03-06-18	7,42	03-07-18	7,59	03-08-18	3,96	03-09-18	2,85	03-10-18	12,80	03-11-18	25,06	03-12-18	23,94
04-04-18	10,12	04-05-18		04-06-18	7,28	04-07-18		04-08-18	2,37	04-09-18	6,23	04-10-18	12,12	04-11-18	23,95	04-12-18	25,71
05-04-18	9,32	05-05-18	9,54	05-06-18	7,44	05-07-18		05-08-18	2,93	05-09-18	7,22	05-10-18	11,67	05-11-18	23,00	05-12-18	25,61
06-04-18	9,52	06-05-18	9,61	06-06-18	6,96	06-07-18		06-08-18	3,66	06-09-18	7,23	06-10-18	15,09	06-11-18	24,66	06-12-18	26,70
07-04-18	9,28	07-05-18	9,69	07-06-18	6,30	07-07-18	8,23	07-08-18	1,21	07-09-18	8,87	07-10-18	15,56	07-11-18	22,52	07-12-18	21,35
08-04-18	9,20	08-05-18	9,55	08-06-18	8,07	08-07-18	8,28	08-08-18	3,44	08-09-18	8,29	08-10-18	18,52	08-11-18	23,03	08-12-18	24,18
09-04-18	9,18	09-05-18	9,77	09-06-18	6,37	09-07-18	8,22	09-08-18	2,27	09-09-18	8,78	09-10-18	18,04	09-11-18	23,59	09-12-18	25,66
10-04-18	2,73	10-05-18	8,24	10-06-18	6,73	10-07-18	7,77	10-08-18	1,99	10-09-18	8,52	10-10-18	19,27	10-11-18	24,14	10-12-18	22,19
11-04-18		11-05-18	9,43	11-06-18	6,52	11-07-18	7,18	11-08-18	1,94	11-09-18	7,27	11-10-18	20,56	11-11-18	23,04	11-12-18	20,47
12-04-18	9,32	12-05-18	8,96	12-06-18	6,78	12-07-18	7,44	12-08-18	2,25	12-09-18	13,12	12-10-18	18,45	12-11-18	21,37	12-12-18	21,83
13-04-18	9,10	13-05-18	9,04	13-06-18	5,00	13-07-18	7,14	13-08-18	4,03	13-09-18	10,44	13-10-18	19,42	13-11-18	25,77	13-12-18	21,91
14-04-18	9,09	14-05-18	9,45	14-06-18	6,48	14-07-18	4,20	14-08-18	3,78	14-09-18	6,80	14-10-18	20,43	14-11-18	24,40		
15-04-18	9,06	15-05-18	9,25	15-06-18	6,61	15-07-18	3,33	15-08-18	5,44	15-09-18	6,37	15-10-18	18,01	15-11-18	20,56		
16-04-18	9,07	16-05-18	9,24	16-06-18	8,03	16-07-18	4,18	16-08-18	4,27	16-09-18	9,46	16-10-18	17,91	16-11-18	22,64		
17-04-18	9,11	17-05-18	7,96	17-06-18	8,20	17-07-18	3,36	17-08-18	4,35	17-09-18		17-10-18	19,55	17-11-18	19,11		
18-04-18	9,12	18-05-18	8,95	18-06-18	7,67	18-07-18	4,36	18-08-18	4,43	18-09-18		18-10-18	21,19	18-11-18	20,12		
19-04-18	9,18	19-05-18	8,85	19-06-18	3,34	19-07-18	3,43	19-08-18	5,07	19-09-18	11,82	19-10-18	23,27	19-11-18	19,44		
20-04-18	9,18	20-05-18	8,85	20-06-18	2,83	20-07-18	3,69	20-08-18	4,57	20-09-18	14,11	20-10-18	23,30	20-11-18			
21-04-18	9,18	21-05-18	8,97	21-06-18	3,18	21-07-18	5,86	21-08-18	4,88	21-09-18	12,27	21-10-18	23,71	21-11-18	19,00		
22-04-18	9,18	22-05-18	8,96	22-06-18	1,20	22-07-18	3,48	22-08-18	5,17	22-09-18	10,79	22-10-18	21,74	22-11-18	18,78		
23-04-18	9,18	23-05-18	9,34	23-06-18	4,04	23-07-18	3,63	23-08-18	5,85	23-09-18	8,07	23-10-18	25,11	23-11-18	18,11		
24-04-18	8,96	24-05-18	8,76	24-06-18	4,21	24-07-18	3,61	24-08-18	5,47	24-09-18	2,12	24-10-18	22,20	24-11-18	15,38		
25-04-18	7,93	25-05-18	8,17	25-06-18	3,51	25-07-18	3,82	25-08-18	2,44	25-09-18	23,25	25-10-18	22,43	25-11-18	21,78		
26-04-18	8,67	26-05-18	7,95	26-06-18	3,76	26-07-18	3,87	26-08-18	5,41	26-09-18	21,21	26-10-18	25,32	26-11-18	25,55		
27-04-18	9,26	27-05-18	8,56	27-06-18	5,28	27-07-18	3,61	27-08-18	13,84	27-09-18	20,60	27-10-18	21,40	27-11-18	26,01		
28-04-18	8,89	28-05-18	8,40	28-06-18	6,51	28-07-18	3,68	28-08-18	7,34	28-09-18	13,64	28-10-18	23,06	28-11-18	24,65		
29-04-18	9,09	29-05-18	8,51	29-06-18	6,84	29-07-18	3,91	29-08-18	7,38	29-09-18	21,26	29-10-18	22,94	29-11-18	25,13		
30-04-18	8,89	30-05-18	7,90	30-06-18	6,69	30-07-18	4,09	30-08-18	7,64	30-09-18	17,42	30-10-18	23,21	30-11-18	20,63		
		31-05-18	7,88			31-07-18	4,03	31-08-18	7,93			31-10-18	19,00				

5.5 Tablas A.5 Flujos medidos mensuales en portal V1

Túnel Volcán Portal V1 (Abril-Diciembre 2018)					
Meses 2018	PK	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%
Abril	2111	8,87	10,12	1,24	14,01
Mayo	2244	8,89	9,77	0,88	9,94
Junio	2304	5,99	8,47	2,48	41,42
Julio	2349	5,20	8,28	3,08	59,22
Agosto	2504	4,62	13,84	9,22	199,33
Septiembre	2605	10,68	23,25	12,57	117,73
Octubre	2666	19,41	25,32	5,91	30,45
Noviembre	2755	22,34	26,01	3,67	16,43
Diciembre	2786	23,36	26,70	3,34	14,30

5.6 Tabla A.6 Capacidades Operacionales de Tratamiento para las Aguas Afloradas

CAPACIDADES DE TRATAMIENTO OPERACIONALES EN BASE A PROMEDIO Y MÁXIMO DIARIO MENSUAL										
Modelo hidrogeológico				Necesidad operacional			Tasa de afloramiento esperada ⁴	Capacidad operacional		
Túnel	portal	caudal medio por portal/túnel (l/s)		nivel operacional	factor seguridad	máximo corregido (l/s)	Afloramiento residual-temporal (l/s)	Capacidad (l/s)	capacidad modular	capacidad por túnel (l/s)
		S/G	C/G	%	N	C/G	C/G	Max S/G & C/G	l/s	C/G
Volcán	V1 ⁵	17	16	100	2,04	33	98	98	100	250
	V5	92	78	100	1,74	135		135	150	
Alfalfal	VA4 ⁶	32	23	90	2,32	53		53	50	125
	VA1 ⁷	-	-	-	-	-		25	25	
	VA2	39	26	90	2,32	60		60	50	
Las Lajas	L1	183	127	90	1,45	184	144	184	200	525
	VL4	207	101	100	1,67	169		207	200	
	VL5	24	20	75	1,52	30		30	25	
	VL2 ⁸	91	60	75	1,67	100		100	100	
	VL7-VL8	3	3	75	-	-		-	-	
CAPACIDAD OPERACIONAL TOTAL REQUERIDA										900

La Tabla A.6 se divide en cuatro secciones:

- Modelo Hidrogeológico: Cita los resultados de los valores indicados en el Modelo Hidrogeológico de HIDROMAS.
- Necesidad Operacional: Determina el nivel de flujo esperado en función del factor de seguridad determinado por el nivel operacional requerido de acuerdo con el método de excavación.
- Tasa de Afloramiento Esperada: Con base al comportamiento estadístico de los registros de agua afloradas, determina el Afloramiento Residual-Temporal para los túneles/portales seleccionados.
- Capacidad Operacional: Capacidad operacional para el tratamiento de agua aflorada en cada túnel con base referencial en cada portal:

⁴ Solo se presenta para los túneles L-1 y V1 por las razones expuestas en la sección 4.3

⁵ Siendo que la modelación no refleja el afloramiento efectivo esperado, el caudal medio esperado para el Portal V1 debe ser la Infiltración Residual-Temporal proyectada para este portal. (ver Sección 4.3 de este Anexo A)

⁶ Los datos en VA4 muestran una dispersión muy amplia por lo que se utilizó comportamiento estadístico registrado en VA2.

⁷ Este portal sólo tiene registros esporádicos y se mantiene la capacidad actualmente operacional como requerimiento futuro

⁸ Por falta de datos, para el VL2 se utilizó comportamiento estadístico del VL4.

- La columna Capacidad (l/s) es el mayor valor entre el caudal máximo corregido con grouting, el caudal medio por portal sin grouting y el afloramiento residual-temporal proyectado.
- En la columna Capacidad Modular (l/s) se ajusta la capacidad al múltiplo de 25 más cercano, que es la capacidad de tratamiento mínima de las plantas modulares disponibles en el PHAM.
- La columna Capacidad por Túnel (l/s) es la suma de las capacidades por cada Portal del túnel correspondiente que se estima en base a la proyección del avance de la excavación a noviembre 2018. Sin embargo, dichas capacidades por Portal se adaptarán en función a las condiciones reales que se visualicen durante la excavación, siempre respetando que el Proyecto Alto Maipo tendrá durante su construcción una capacidad operacional de tratamiento de aguas afloradas máxima de 900 l/s. Por tanto, las capacidades comprometidas para cada túnel, según se muestra en la Tabla anterior, son: El Volcán 250 l/s, Alfalfal 125l/s y Las Lajas 525 l/s), y la ubicación de dichas plantas será en el portal requerido según el avance de la excavación y comportamiento de las aguas afloradas.

ANEXO B

Reporte Técnico No.: 20190130-MA-RPT



MODELO HIDROGEOLÓGICO PHAM

INFORME Rev. 0

Preparado para

Alto Maipo SpA

DICIEMBRE de 2018

Preparado por
HIDROMAS LTDA



Modelo Hidrogeológico del Proyecto PHAM

Código de Proyecto: [2018 - 228 - MNAM]

HIDROGEOLOGIA y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE LTDA

Suecia 211, Oficina 701-A, Providencia - Santiago Chile

e-mail: contacto@hidromas.cl

website: www.hidromas.cl

Tel: +(56-2) 232027540

REV.	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	DESCRIPCIÓN
Rev. A	Rodrigo Zamorano	Julio Cornejo	Julio Cornejo	Coordinación Interna
	[21.11.18]	[26.11.18]	[26.11.18]	
Rev. B	Rodrigo Zamorano	Julio Cornejo	Mesenia Atenas	Revisión y Aprobación Cliente
	[03.12.18]	[03.12.18]	[03.12.18]	
Rev.0	Rodrigo Zamorano	Mesenia Atenas	Mesenia Atenas	Aprobado Cliente
	[28.12.2018]	[28.12.2018]	[28.12.2018]	

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1	Objetivos.....	2
2	ANTECEDENTES GENERALES.....	2
3	MODELO CONCEPTUAL.....	4
3.1	Definición del dominio	4
3.2	Geometría del acuífero.....	8
3.3	Condiciones de Borde Conceptuales	10
3.4	Parámetros hidrogeológicos.....	12
3.5	Unidades Hidrogeológicas	17
3.6	Niveles de Agua Subterránea	21
3.6.1	Nivel registrado en expedientes de derechos de agua subterráneos DGA	21
3.6.2	Niveles medidos en pozos pertenecientes a PHAM.....	22
3.7	Curvas equipotenciales y direcciones de flujo	31
4	ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO.....	34
4.1	Aspectos Generales	34
4.2	Sistema sedimentario.....	34
4.2.1	Descarga por afloramiento en el Sistema Sedimentario	34
4.2.2	Recarga del relleno sedimentario	38
4.2.3	Extracciones de aguas subterráneas	39
4.2.4	Flujo Subterráneo de Salida en Maipo	42
4.3	Unidad de Roca.....	44
4.3.1	Recarga de la Unidad de Roca.....	44
4.3.2	Estimación de las descargas	48
4.4	Balance hídrico global de la zona de estudio.....	57
5	CONSTRUCCIÓN MODELO NUMÉRICO.....	59
5.1	Aspectos Generales	59
5.2	Dominio y Geometría.....	59
5.3	Definición de la Grilla.....	63
5.4	Condiciones de Borde	66
5.5	Parámetros Hidrogeológicos	68
5.6	Mecanismos de Recarga.....	70
6	CALIBRACIÓN.....	72
6.1	Aspectos generales	72
6.2	Proceso de Ajuste	73
6.2.1	Régimen Permanente (Situación sin proyecto)	73
6.2.2	Régimen Permanente (Flujo base subterráneo aforado)	73
6.2.3	Régimen Transiente (Caudales de afloramiento en túneles)	76
6.3	Curvas equipotenciales	83
6.4	Balance hídrico.....	84
7	ESCENARIOS.....	85

7.1 Aspectos Generales	85
7.2 Resultados de series de caudales medios mensuales de los escenarios de simulación	88
7.3 Resultados de radio de influencia de efecto de túneles y afectación a terceros	94
7.4 Resultados de caudales aflorados en sistemas superficiales	97
8 CONCLUSIONES	98
REFERENCIAS	99
ANEXOS	100
ANEXO 1 ESTUDIO BÁSICO HIDROLOGÍA	100
ANEXO 2 ESTUDIO DE PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS	100
ANEXO 3 ESTUDIO GEOLÓGICO	100
ANEXO 4 ESTUDIO BÁSICO HIDROQUÍMICA	100

FIGURAS

Figura 3-1: Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, y Cuencas Definidas	6
Figura 3-2: Dominio Definido en Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo	7
Figura 3-3: Geometría del Acuífero en Sector Maipo Alto, Vista en Planta	9
Figura 3-4: Ubicación de Condiciones de Borde Conceptuales Identificadas Dentro del Dominio	11
Figura 3-5: Ubicación de sondajes con información de permeabilidad	13
Figura 3-6: Permeabilidad para el Relleno Sedimentario y la Unidad de Roca	14
Figura 3-7: Valores de Permeabilidad para los Miembros Geológicos Mayores	15
Figura 3-8: Distribución Espacial de las Unidades Geológicas	16
Figura 3-9: Permeabilidad a Distinta Profundidad de la Unidad de Roca y Relleno Sedimentario	18
Figura 3-10: Unidades Hidrogeológicas Definidas dentro del Dominio, Profundidades Menores a 200 m	19
Figura 3-11: Unidades Hidrogeológicas Definidas dentro del Dominio, Profundidades Mayores a 200 m	20
Figura 3-12: Ubicación de Pozos con Registros de Profundidad del Nivel Freático	24
Figura 3-13: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-4	25
Figura 3-14: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-14	26
Figura 3-15: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-10	27
Figura 3-16: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-12	28
Figura 3-17: Profundidad del nivel en pozo SAM-12 y caudal mensual medio en estación fluviométrica Maipo en El Manzano	29
Figura 3-18: Curvas equipotenciales definidas en el dominio	33
Figura 4-1: Ubicación estaciones fluviométricas DGA y campaña de aforos realizada en abril 2018	35

Figura 4-2: Esquema conceptual del balance hídrico superficial por subsistema	36
Figura 4-3: Sistema de relleno sedimentario.....	37
Figura 4-4: Ubicación de los derechos de agua en el dominio definido	41
Figura 4-5: Zona de salida del dominio y cálculo de flujo pasante	43
Figura 4-6: Zonas de Recarga Definidas dentro del Dominio de Estudio.....	46
Figura 4-7: Ubicación de los Aforos de Caudal Superficial Realizados en Abril 2018	49
Figura 4-8: Ubicación de los portales de entrada/salida de los túneles del proyecto.....	52
Figura 4-9: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal V1.....	53
Figura 4-10: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal V5.....	53
Figura 4-11: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VA4	54
Figura 4-12: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VA-1	54
Figura 4-13: Medio Mensual Caudal de descarga medido en la salida del portal VA-2	55
Figura 4-14: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VL-7	55
Figura 4-15: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VL-4	56
Figura 4-16: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VL-5	56
Figura 4-17: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal L1	57
Figura 5-1: Dominio y geometría Modelo PHAM	61
Figura 5-2: Dominio y topografía Modelo PHAM	62
Figura 5-3: Malla QuadTree Modelo PHAM.....	64
Figura 5-4: Capas en vertical de Modelo PHAM.....	65
Figura 5-5: Condiciones de borde, Modelo PHAM.....	67
Figura 5-6: Parámetros hidrogeológicos Modelo PHAM.....	69
Figura 5-7: Zonas de recarga del Modelo PHAM.....	71
Figura 6-1: Ubicación de los pozos con observación de nivel del Modelo PHAM	72
Figura 6-2: Niveles calculados vs niveles observados.....	74
Figura 6-3: Caudales de flujo base subterráneo medidos vs simulados Modelo PHAM	75
Figura 6-4: Tramos de túneles actualmente construidos (junio 2018).....	77
Figura 6-5: Caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados Modelo PHAM	78

Figura 6-6: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal V1	79
Figura 6-7: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal V5	79
Figura 6-8: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VA-4	80
Figura 6-9: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VA-2	80
Figura 6-10: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VL-7	81
Figura 6-11: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VL-5	81
Figura 6-12: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VL-4	82
Figura 6-13: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal L1	82
Figura 6-14: Curvas equipotenciales situación sin proyecto Modelo PHAM	83
Figura 7-1: Avance anual proyectado de la construcción de túneles (escenario conservador)	87
Figura 7-2: Tramos de túneles asociados a la conducción de caudal aflorado en cada portal	89
Figura 7-3: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Volcán, en portal V1	90
Figura 7-4: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Volcán, en portal V5	90
Figura 7-5: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Alfalfal, en portal VA-4	91
Figura 7-6: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Alfalfal, en portal VA-2	91
Figura 7-7: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal VL-7	92
Figura 7-8: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal VL-5	92
Figura 7-9: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal VL-4	93
Figura 7-10: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal VL-2..	93
Figura 7-11: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal L1	94
Figura 7-12: Radio de influencia estimado a partir de modelación de Esc 1 y Esc 2 al final del período de construcción.....	95
Figura 7-13: Radio de influencia en sector de pozos con derecho de aguas subterráneas para el final de la construcción.....	96

TABLAS

Tabla 3-1: Resumen de Valores de Conductividad Hidráulica.....	17
Tabla 3-2: Resumen de Valores de Conductividad Hidráulica para las Unidades Hidrogeológicas	21
Tabla 3-3: Información de los pozos con derechos concedidos dentro del dominio	22
Tabla 3-4: Información de los pozos de monitoreo PHAM dentro del dominio.....	30
Tabla 3-5: Información de los pozos monitoreados en la campaña de julio de 2018.....	31
Tabla 3-6: Fuente de Registros de Profundidad del Nivel Estático para Generación de Curvas	32
Tabla 4-1: Estimación de las descargas en el relleno sedimentario en cada subsistema.....	38
Tabla 4-2: Estimación de las recargas en el relleno sedimentario en cada subsistema	39
Tabla 4-3: Caudales de derechos de aguas subterráneas otorgados	39
Tabla 4-4: Calculo del flujo subterráneo pasante por cada UH	43
Tabla 4-5: Recarga de las unidades de roca dentro del Dominio	47
Tabla 4-6: Flujo Base Subterráneo Estimado de Campaña de Aforos de Abril 2018.....	50
Tabla 4-7: Caudales medios mensuales del primer semestre del año 2018, medidos en la salida de los portales	51
Tabla 4-8: Resumen Balance Hídrico Conceptual	58
Tabla 5-1: Valores de conductividad hidráulica adoptados en modelo numérico vs los definidos en el modelo conceptual	68
Tabla 5-2: Recarga impuesta a cada zona del Modelo PHAM	70
Tabla 6-1: Indicadores de ajuste del Modelo PHAM.....	73
Tabla 6-2: Balance hídrico Modelo PHAM	84
Tabla 7-1: Conductancias adoptadas para los escenarios constructivos del Modelo PHAM.....	86
Tabla 7-2: Caudales para los escenarios constructivos del Modelo PHAM	88
Tabla 7-3: Caudales superficiales aflorados en quebradas y esteros	97

RESUMEN EJECUTIVO

Alto Maipo solicitó a HIDROMAS la elaboración de un modelo hidrogeológico en el área donde se inserta el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM). El modelo se construyó con la finalidad de evaluar los potenciales efectos de la construcción de las obras subterráneas (túneles) del PHAM sobre los acuíferos, las aguas superficiales y los derechos de aprovechamiento de agua de terceros; así como para estimar los caudales aflorados en toda la extensión de los túneles, y, a partir de esta información, dimensionar las capacidades de las plantas que se requiere instalar para tratar dichos volúmenes.

De esta manera, y sobre la base de la información pública disponible, la información generada por el PHAM y aquella generada en el marco de este estudio, se avanzó, en primer lugar, en la elaboración del modelo conceptual del sistema hidrogeológico en que se emplazan los túneles del PHAM.

Los estudios geológicos e hidrogeológicos desarrollados dentro del área de estudio, permitieron establecer, en términos generales, la presencia de dos grandes unidades con propiedades hidráulicas diferentes: La unidad de roca que presenta una baja permeabilidad y en la cual se encuentran los túneles del PHAM y la unidad del relleno sedimentario, que destaca por una mayor capacidad de conducción de agua y donde se desarrolla el sistema acuífero dentro del área de estudio.

Una vez conceptualizado el sistema, se desarrolló un modelo numérico capaz de representar el sistema hidrogeológico. Este, fue calibrado utilizando mediciones de niveles en pozos tanto del PHAM como de derechos de aguas otorgados por la Dirección General de Aguas. Además, se calibraron los caudales de afloramiento de las quebradas laterales, utilizando información de aforos; y, finalmente, se ajustaron las propiedades de los túneles a partir de la serie de caudales de aguas de afloramiento medidos en los portales de cada uno de ellos. El resultado de la calibración indicó un ajuste adecuado de cada una de las variables en análisis, validándose, de esta forma, que el modelo hidrogeológico elaborado representa e interpreta, adecuadamente, los fenómenos que ocurren en el sistema.

A partir del modelo numérico calibrado, se consideraron dos escenarios de simulación para analizar la respuesta del sistema frente a los efectos de drenaje producido por la construcción de los túneles. El escenario 1 correspondió a la situación (hipotética) donde durante la construcción de los túneles no se aplican medidas de control de caudales aflorados ('Grouting') en caso de ser requeridas. Mientras que el escenario 2 representó la situación donde durante la construcción de los túneles se aplican medidas de control para disminuir el ingreso de aguas de afloramiento a los túneles, si corresponde. Dentro de los resultados del modelo numérico destaca el efecto de la medida de control en la magnitud de los caudales que ingresan al túnel. Al aplicar la medida de control, los caudales que afloran al interior del túnel disminuyen considerablemente con respecto a la situación sin medida de control.

Asimismo se analizó la posible afectación de terceros, mediante la determinación del radio de influencia del efecto del drenaje de los túneles. Los resultados del modelo muestran que los efectos del túnel quedarían contenidos dentro del sistema de roca para los dos escenarios, sin conectarse con el sistema del relleno sedimentario que es en donde se encuentran ubicados los pozos con derechos de aguas.

Finalmente, también se analizó el efecto del drenaje de los túneles en los cauces superficiales, concluyéndose que, en gran parte de las subcuencas analizadas (en total se analizaron 32 esteros y quebradas), no existiría disminución de su caudales, siendo cuantificable este efecto sólo en 5 subcuencas, con disminuciones menores de su caudal, que varían entre 0,1 y 1 L/s, lo que representa entre 0 y 4% dependiendo del cauce, dando cuenta de un efecto despreciable en el tiempo.

1 INTRODUCCIÓN

Alto Maipo SpA, ha solicitado a HIDROMAS la elaboración de un estudio hidrogeológico del área en que se emplaza el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), con el objetivo de desarrollar un modelo hidrogeológico que permita analizar el efecto de la construcción de los túneles sobre el medio hidrogeológico en que se emplaza el proyecto y que ésta sea una herramienta de análisis en el proceso de evaluación ambiental.

Sobre la base de la información pública disponible, la información de PHAM y la nueva información generada en el marco de este estudio, se ha desarrollado un análisis que ha permitido elaborar un modelo conceptual del sistema hidrogeológico en que se emplazan los túneles del proyecto.

El modelo conceptual consiste en la integración de distintos elementos hidrogeológicos, que en conjunto permiten entender cómo funciona el sistema, en este caso el acuífero sedimentario en la parte alta de la cuenca del río Maipo y el sistema de roca en que se emplazan las obras del proyecto. Este modelo conceptual se compone de la definición del dominio del sistema hidrogeológico en la zona del proyecto, la definición de las unidades hidrogeológicas principales con sus parámetros hidrogeológicos característicos, la definición de condiciones de borde, curvas equipotenciales, direcciones de flujo y el balance hídrico que caracteriza el sistema.

Del mismo modo, el modelo numérico busca representar el modelo conceptual que explica el sistema hidrogeológico, de manera de lograr reproducir niveles en el sistema del relleno sedimentario, como también caudales de flujo base subterráneo y aforamiento al interior de los túneles.

1.1 Objetivos

El objetivo de este informe es definir e integrar las distintas componentes que representan el sistema hidrogeológico del área de estudio del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, de manera de establecer un modelo conceptual que será base para la construcción de un modelo numérico a escala regional, el cual será utilizado para cuantificar y evaluar los potenciales efectos de la construcción de túneles del PHAM sobre acuíferos, derechos de aguas subterráneos, cursos superficiales de agua y entregar una estimación de caudales aflorados desde los túneles para dimensionar las capacidades mínimas de tratamiento que se deben instalar.

2 ANTECEDENTES GENERALES

Para el desarrollo del presente modelo hidrogeológico, se recopiló una serie de información tanto de fuentes públicas como también estudios realizados por PHAM. En el presente capítulo se describen en términos generales los principales antecedentes utilizados.

- **“Revisión y actualización del modelo geológico Proyecto Hidrológico Alto Maipo”, GEOV 2017:** Este estudio fue realizado por la Universidad de Chile y posteriormente GEOAV, en donde se actualizaron los mapas geológicos y perfiles longitudinales realizados en la etapa de ingeniería básica y elaboraron un modelo geológico en 3-D a lo largo del túnel. Este modelo incluye campañas de terreno tanto geológicas como geofísicas, mapeos del túnel y sondajes. La información de este estudio se utilizó como base de la componente geológica del presente documento, cuyos detalles se encuentran en el Anexo 3.
- **“Modelo hidrogeológico conceptual y numérico sector Las Lajas”, SRK 2017:** En este estudio se desarrolló un modelo conceptual y numérico del sector cercano a la caverna de Máquinas de la central

Las Lajas, con el objetivo de predecir flujos de infiltración durante la etapa de construcción y operación de los túneles del sistema. Este documento, incluye descripciones geológicas, geotécnicas, ensayos hidráulicos y mediciones de parámetros fisicoquímicos medidos en campañas de terreno. En el presente informe, se utilizó la información de este estudio, a modo de complementar los análisis de las propiedades hidrogeológicas presentes en el sector.

- **“Radio de influencia producido por el drenaje del túnel Las Lajas en Sector L1”, HIDROMAS 2018:** En este estudio se realizó una estimación mediante un cálculo teórico, de la posible área de afectación producida por el drenaje de los túneles. Los resultados de este trabajo sirvieron para corroborar los radios de influencia simulados a partir del modelo numérico.
- **Antecedentes públicos:** Se cuenta con la información de los expedientes de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea ubicados en el sector de interés. Dentro de estos documentos, existe información acerca de la litología y pruebas de bombeo realizados en los pozos. Esta información se utilizó como complemento para el estudio de las propiedades hidrogeológicas, presentado en el Anexo 2. Del mismo modo en algunos pozos se cuenta con una medición histórica de la profundidad del nivel estático del pozo, este dato fue utilizado para la calibración de niveles del modelo numérico.
- **Registro de la red hidrométrica DGA, 2018:** Como parte de la información pública disponible del proyecto, se cuenta con las series de precipitación y caudales de distintas estaciones, cuyos datos permitieron definir las componentes del balance hídrico del sistema, el cual se detalla en el Anexo 1.
- **Antecedentes levantados por PHAM:** PHAM cuenta con una variedad de estudios y trabajos en terreno, donde se recoge información relevante para la conceptualización del medio hidrogeológico en donde se emplaza el proyecto. Dentro de los cuales se destaca:
 - Topografía de detalle levantada a lo largo del trazado de los túneles del proyecto, esta se realizó mediante un vuelo LIDAR y se utilizó como base para la definición de la geometría del modelo hidrogeológico.
 - Planos de ingeniería de los túneles que se utilizaron para definir la posición de éste dentro del modelo hidrogeológico.
 - Ensayos de permeabilidad realizados en sondajes tanto de exploración como de ingeniería básica del proyecto. Esta información fue utilizada como base en el presente estudio para determinar las propiedades hidrogeológicas del medio. En el Anexo 2 se encuentra el detalle de la información.
 - Ensayos geofísicos realizados en distintos sectores a lo largo del dominio de estudio, en particular destaca un perfil de resistividad realizado a lo largo de una sección del río Colorado, los resultados de este estudio permitieron complementar la definición de las unidades hidrogeológicas desarrolladas en el modelo hidrogeológico.
 - Niveles de agua subterránea medidos en pozos instalados por el proyecto en algunos SAM (Sistema de Acopio de Marinas). Estos poseen mediciones desde el año 2016, con una frecuencia mensual. Estos datos se utilizaron en el proceso de calibración del modelo numérico desarrollado en el presente estudio.

- Registro de caudales de afloramientos a la salida de los portales de los túneles del proyecto. Estos valores diarios medidos mediante flujómetro instalados por el proyecto durante el periodo de construcción, permitieron realizar una calibración en régimen transiente del modelo numérico.
- Se realizó un estudio acerca de la efectividad del *grouting*, en donde el efecto de esta medida de control del caudal aflorado hacia los túneles, se traduce en una reducción de la permeabilidad equivalente del medio rocoso en el cual se excava. Los datos obtenidos de este estudio, permitieron el desarrollo de los escenarios de simulación del modelo numérico.
- **Campañas de terreno realizadas durante 2018:** Se contó con dos campañas de terreno realizadas por PHAM durante el año 2018. La primera de estas durante el mes de abril, se realizaron aforos del flujo base subterráneo de los esteros y quebradas que aportan a los sistemas principales ubicados en el relleno sedimentario. Esta información fue utilizada para la determinación del balance hídrico del sistema detallado en el Anexo 1, como también para una calibración cualitativa de los resultados obtenidos del modelo numérico. La segunda campaña, fue realizada en el mes de julio de 2018, y en esta se llevaron a cabo mediciones de nivel de alguno de los pozos pertenecientes a PHAM. La información recolectada, se agregó a la serie histórica y fue utilizada para la calibración de niveles del modelo numérico.

3 MODELO CONCEPTUAL

3.1 Definición del dominio

El PHAM se emplaza en la parte alta de la cuenca del río Maipo, en la comuna de San José de Maipo, provincia Cordillera de la región Metropolitana. La extensión del trazado de los túneles y obras del proyecto se encuentra mayoritariamente dentro de las subcuencas del río Maipo Alto y en una parte de la subcuenca del río Maipo Medio. Dentro del área del proyecto se destacan la presencia de glaciares, lagunas y embalses, entre otros cuerpos de agua. En la Figura 3-1 se ilustra la zona en donde se emplaza el proyecto con las unidades hidrológicas mencionadas, las cuales son:

- Sub cuenca Río Maipo Medio
 - Sub-subcuenca Río Maipo entre Estero Colorado y Río Clarillo
- Sub-cuenca Río Maipo Alto
 - Sub-subcuenca Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo
 - Sub-subcuenca Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado
 - Sub-subcuenca Río Volcán
 - Sub-subcuenca Río Yeso

La delimitación del dominio del sistema hidrogeológico del presente estudio considera una extensión tal, que todo el trazado del túnel del PHAM quede contenido, tomando en cuenta un margen adecuado alrededor de las obras que permita analizar los efectos del proyecto sobre el sistema hidrogeológico. Esta delimitación se

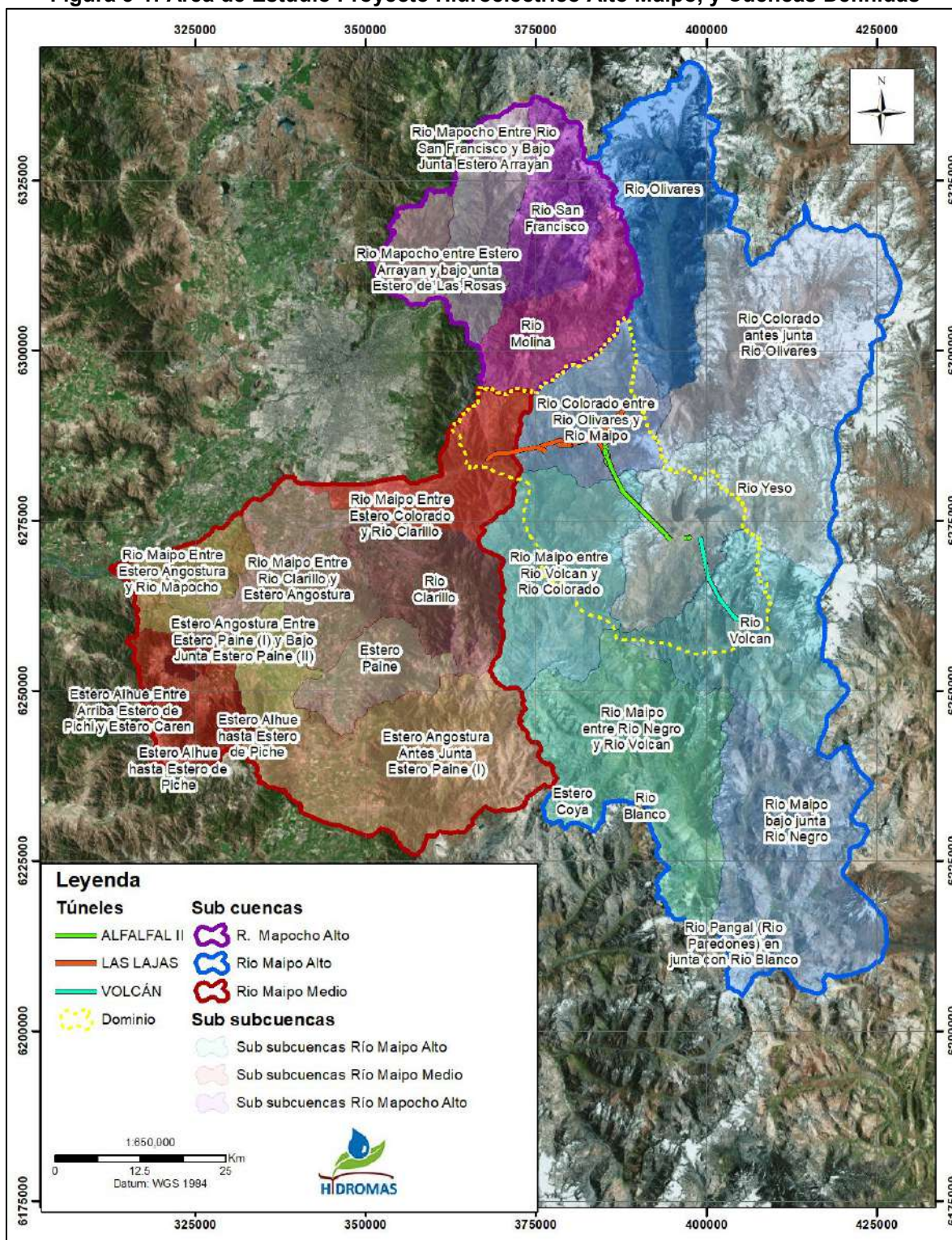
basa en el concepto de que, en los sectores alejados a la intervención del proyecto, las divisorias de aguas superficiales son representativas de las divisorias hidrogeológicas del sistema rocoso, considerando que la recarga se produce en las partes altas de las cuencas y las descargas ocurren en los bajos topográficos. El concepto citado anteriormente, permite acotar los sistemas hidrogeológicos representativos en los cuales se encuentran emplazadas las obras principales del proyecto.

De esta forma, el límite sur-oeste del dominio queda determinado por el relleno sedimentario del Río Maipo entre el sector El Manzano (inicio del túnel L1, central Las Lajas) de la sub cuenca del río Maipo Medio y la confluencia con el Río Yeso (Subcuenca río Maipo Alto), continuando por el río Volcán hasta la confluencia con el Estero La Engorda (sector túnel Volcán, portal V1).

En el extremo nor-este, el dominio queda definido por los límites de las sub-subcuencas de Río Maipo entre Estero Colorado y Río Clarillo y la sub-subcuenca Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo. Del mismo modo, siguiendo el concepto de divisorias de aguas, se delimitó por el este, un sector de la sub-subcuenca del río Yeso y del río Volcán.

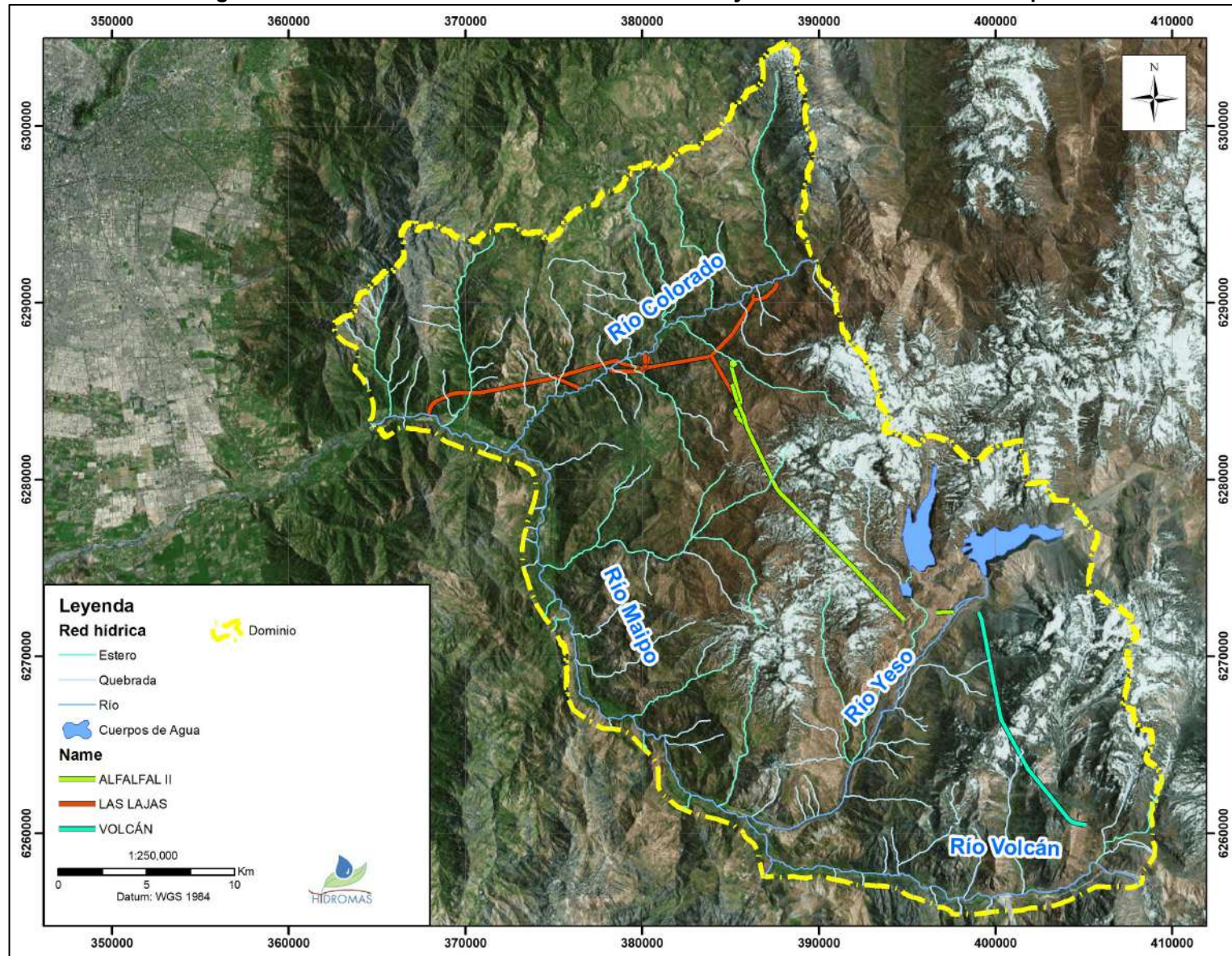
El dominio de la zona de estudio, definido para caracterizar el comportamiento hidrogeológico del sistema en que se emplaza el proyecto, posee un área total de aproximadamente 1.140 km², con una altura topográfica que varía entre los 780 y 5.350 msnm. En la Figura 3-2 se presenta la ubicación espacial del dominio.

Figura 3-1: Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, y Cuencas Definidas



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-2: Dominio Definido en Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo



Fuente: Elaboración Propia

3.2 Geometría del acuífero

A partir de la descripción realizada y entregada en el Anexo 3, la cuenca del Maipo Alto no presenta un desarrollo extensivo de depósitos sedimentarios, y estos se limitan a escasos valles de leve amplitud. En el área de estudio predomina una unidad de roca de permeabilidad muy baja a nula, de tipo mixtas sedimentaria-volcánicas, brechas e ignimbritas, areniscas y conglomerados. Estos sectores de roca fundamental constituyen un límite al escurrimiento subterráneo.

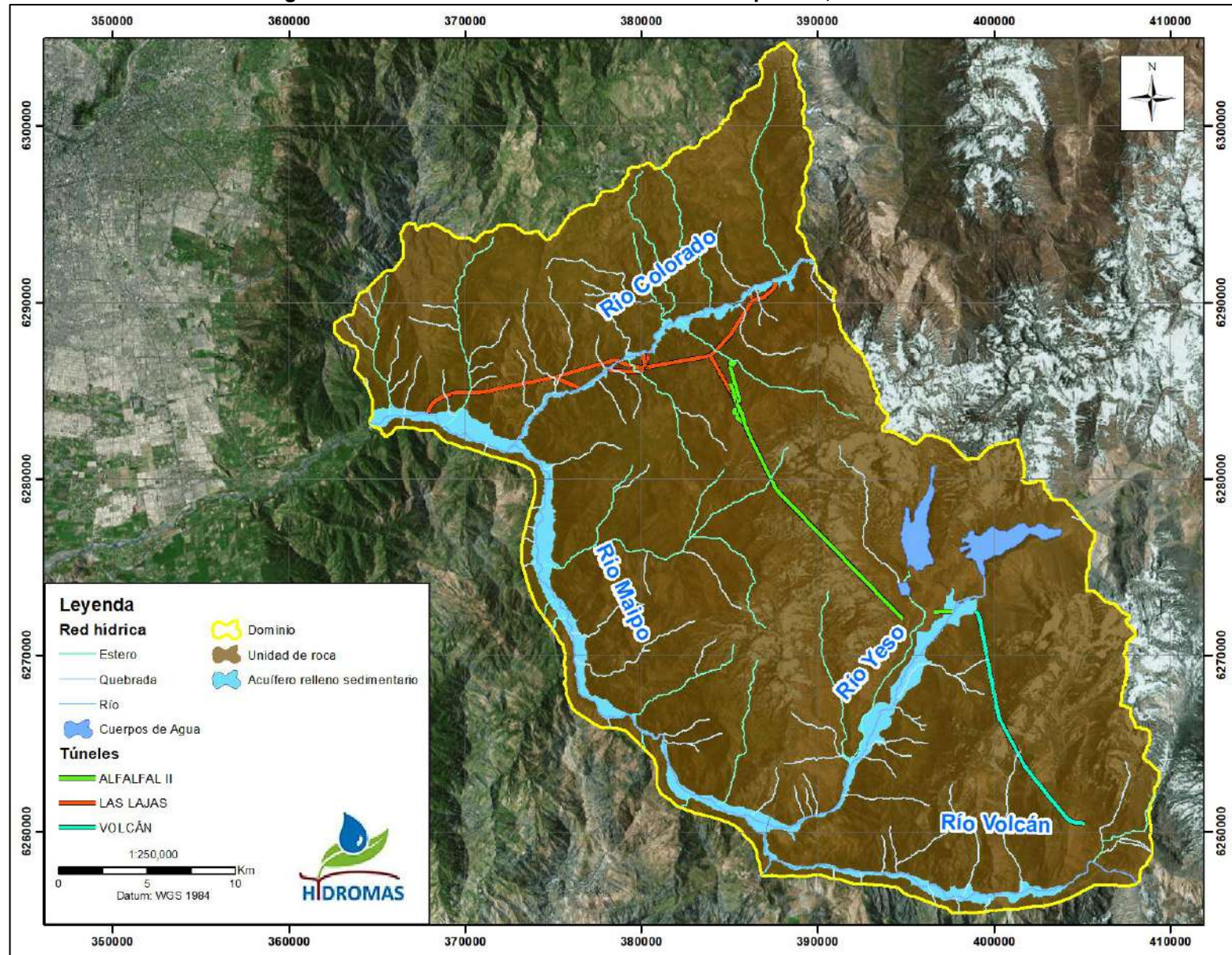
También se destaca que, en las zonas cordilleranas, existen depósitos glaciares. Las morrenas, en general, presentan bajas permeabilidades, y no se consideran como buenos acuíferos. Los depósitos coluviales presentes en el área, poseen, en general, una mayor permeabilidad, sin embargo, debido a la mayor pendiente que caracteriza a los conos de deyección, la capacidad de retener y almacenar agua es muy baja y no se consideran como parte del sistema acuífero.

No obstante, existen sectores con mayor potencial hidrogeológico, formados principalmente por depósitos de relleno no consolidado, sedimentos fluviales, aluviales, glaciares, glacio-fluviales, lacustres y aluvionales, conformando así un sistema acuífero acotado en las zonas con depósitos más recientes y superficiales. Los valles de los ríos Maipo, Colorado, Yeso y Volcán presentan estas características hidrogeológicas que permiten el desarrollo de un sistema acuífero.

En la Figura 3-3 se presenta una vista en planta de la extensión del acuífero ubicado en el relleno sedimentario, además se identifica la unidad de roca, cuyo macizo presenta características de baja a nula permeabilidad, siendo las estructuras geológicas las que presentan la posibilidad de conexión hidráulica entre el sistema de roca somera y el sistema de roca en profundidad.

El acuífero del relleno sedimentario, presenta una potencia variable entre 60 y 100 m, estos rangos se estimaron a partir de la litología, descrita en los pozos con expedientes de derechos de agua en el valle del río Maipo. Aquellos pozos que identifican una unidad de roca, la describen generalmente como un sistema fracturado (ver Anexo 2)

Figura 3-3: Geometría del Acuífero en Sector Maipo Alto, Vista en Planta



Fuente: Elaboración Propia

3.3 Condiciones de Borde Conceptuales

A partir del dominio definido en el acápite 3.1, se identifican una serie de condiciones de borde que permiten caracterizar conceptualmente el funcionamiento del sistema hidrogeológico en que se emplaza el PHAM. Tal como se indicó precedentemente, el límite del dominio, consideró principalmente divisorias superficiales, representativas de las divisorias hidrogeológicas, por lo tanto, se asume que no existen conexiones hidráulicas entre la unidad de roca en el dominio definido con sistemas de roca fuera de éste.

Dentro del dominio de la zona de estudio, se consideran condiciones de borde relacionadas principalmente con el flujo, tales como la presencia de ríos, esteros y quebradas que definen condiciones de drenaje de la recarga que ingresa al medio hidrogeológico. A continuación, se describen las principales características de estas condiciones de borde. Del mismo modo, en la Figura 3-4 se presenta la ubicación espacial de éstas.

Río Maipo: El sistema del río Maipo desde la confluencia con el río Yeso hasta el sector de El Manzano (salida por el borde oeste del dominio), actúa como una condición de borde, que permite representar la interacción río-acuífero en el acuífero del relleno sedimentario del borde sur del dominio.

Río Colorado, Yeso y Volcán: Estos ríos son de menor envergadura que el río Maipo, pero de igual forma son capaces de transportar grandes cantidades de agua y corresponden a sistemas de drenaje que interactúan con los acuíferos de relleno sedimentario.

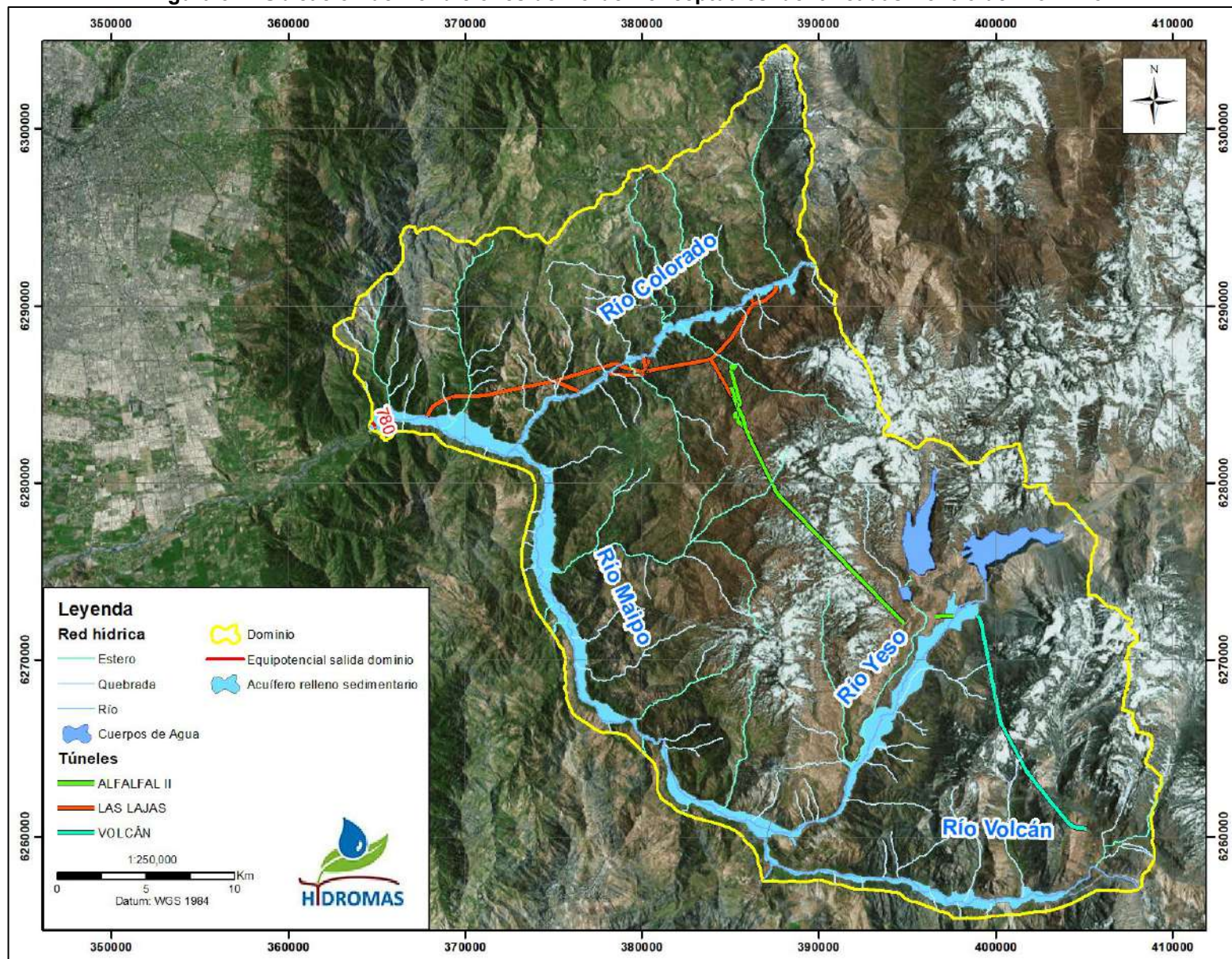
Esteros y Quebradas: Dentro del dominio del sistema, existen numerosos esteros y quebradas que están insertos dentro de la unidad de roca. Estos sistemas presentan una alta pendiente y lechos de baja permeabilidad (ver Anexo 1), lo que favorece la escorrentía superficial provenientes de precipitación y derretimiento nival y/o glaciar, confluyendo a cauces principales que sobreyacen al acuífero del relleno sedimentario. Estos esteros y quebradas permiten además el afloramiento del flujo base subterráneo que se manifestó como la recarga del sistema de roca.

Cuerpos de agua: Dentro del dominio, existen tres cuerpos de agua que destacan debido a que presentan un volumen de agua almacenado durante todo el año, estos son:

- **Embalse El Yeso:** Corresponde a una fuente de abastecimiento de agua potable administrado actualmente por Aguas Andinas, posee una superficie media aproximada de 6,0 km² con una elevación media de 2.570 msnm.
- **Laguna Lo Encañado:** Parte del sistema del río Yeso, limita hacia el nor-este con la Laguna Negra, posee una superficie aproximada de 0,4 km². Se encuentra ubicada en una cota media de 2.490 msnm.
- **Laguna Negra:** Ubicada al poniente de la Laguna Lo Encañado, presenta un régimen marcadamente nival, recibiendo aportes de altas cumbres provenientes del sector norte. Posee una superficie aproximada de 5,4 km² con una elevación media de 2.700 msnm.

Salida del Río Maipo: En el relleno sedimentario del río Maipo, en el borde oeste del dominio definido, en el sector del Estero El Manzano, existe un flujo subterráneo de salida. Este límite está representado por un nivel piezométrico o equipotencial cuyo valor se identifica en 780 msnm aproximadamente. (ver el acápite 3.7 del presente documento).

Figura 3-4: Ubicación de Condiciones de Borde Conceptuales Identificadas Dentro del Dominio



Fuente: Elaboración Propia

3.4 Parámetros hidrogeológicos

A partir del estudio de las propiedades hidrogeológicas (Anexo 2), se cuenta con un total de 68 sondajes con información que permiten caracterizar la conductividad hidráulica en el dominio definido para la zona de estudio. En la Figura 3-5 se presenta la ubicación de estos puntos.

De los resultados obtenidos en el Anexo 2 Estudio Hidrogeológico, se identificaron distintas unidades según su clasificación geológica. En términos generales se destaca una unidad asociada a los depósitos no consolidados que definen el acuífero del relleno sedimentario, con valores de permeabilidad mayores, y una unidad de roca caracterizado por una menor permeabilidad. En la Figura 3-6 se presenta un gráfico con los valores de permeabilidad obtenidos en los distintos ensayos realizados en los sondajes respectivos.

Para el relleno sedimentario, se cuenta con información de 7 pruebas de bombeo obtenidas desde los expedientes de derechos de agua, y de 4 ensayos de Slug Test realizados por PHAM en sus pozos de monitoreo, los que se respaldan en el Anexo 2. El resumen de la información se presenta en la Figura 3-6, en donde se aprecia que, para el relleno sedimentario, los valores de permeabilidad son más altos que para la unidad de roca, caracterizados en un rango de variación entre 0,1 y 56 m/d.

En la unidad del sistema de roca, tal como describe la geología, las formaciones principales, en términos generales, corresponden a secuencias estratificadas de rocas volcánicas y sedimentarias continentales y marinas, intruídas por mantos, diques, batolitos y stocks.

Para el presente estudio, se cuenta con 365 ensayos de Lugeon en 41 sondajes del PHAM. La información disponible, cuyo análisis se presenta en el Anexo 2, muestra que las permeabilidades son inferiores a las que representan el relleno sedimentario, lo que responde a las características geológicas presentes en la zona de estudio. La mediana de permeabilidad para la unidad de roca, es de $2,4E-03$, y el rango representativo varía entre $9,5E-05$ a $3,4E-02$, definidos por los percentiles 25 y 75%, respectivamente.

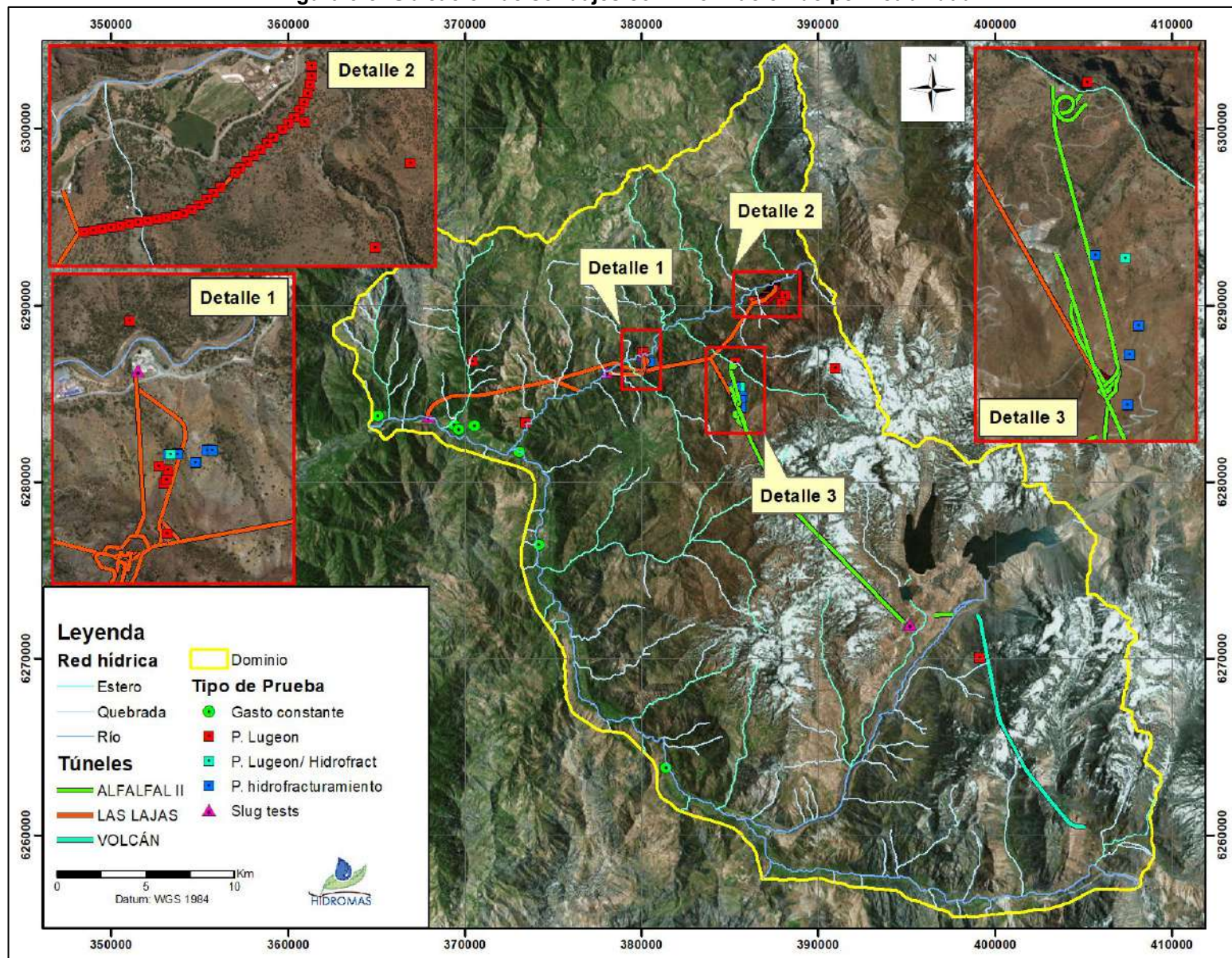
Esta definición entre relleno sedimentario y unidad de roca, permite definir que la unidad de roca posee una permeabilidad media que caracteriza el macizo rocoso, de tres órdenes de magnitud menor que el relleno sedimentario, lo que caracteriza a este último como el medio hidrogeológico principal, que conduce el flujo de agua subterránea.

La información de caracterización litológica disponible en la unidad de roca permite representar tres unidades geológicas mayores, Andesitas, Rocas Volcanoclásticas (Brechas y Tobas) y Rocas Intrusivas (Diorita y Granito), las que presentan rangos de permeabilidad variables según el tipo litológico. En la Figura 3-7 se presentan los estadísticos asociados a estas unidades.

De esta forma, a partir del estudio geológico (Anexo 3), se realiza un análisis de la distribución de estas macro unidades geológicas en el dominio de estudio, relacionándolas con los rangos de permeabilidad obtenidas de los ensayos respectivos. En la Figura 3-8 se presenta la distribución espacial de las unidades geológicas, a partir de mapa realizado por GEOAV (2017).

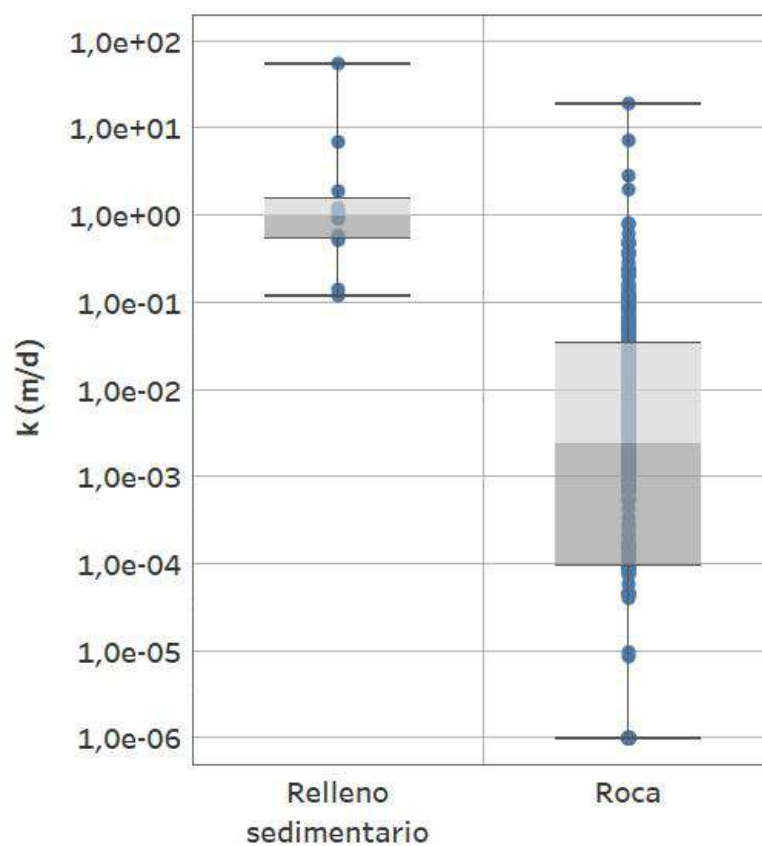
Del mismo modo, en el Anexo 2 de propiedades hidrogeológicas, se presenta un análisis de cómo varía la permeabilidad en profundidad. Dentro de los resultados, se destaca que, para las unidades de roca, existe una disminución en las magnitudes en términos generales, de los rangos de conductividad hidráulica a medida que se profundiza el sondaje. En la Tabla 3-1 se presenta un resumen de las permeabilidades obtenidas para cada unidad geológica en términos de la profundidad con respecto al nivel de terreno.

Figura 3-5: Ubicación de sondajes con información de permeabilidad



Fuente: Elaboración Propia

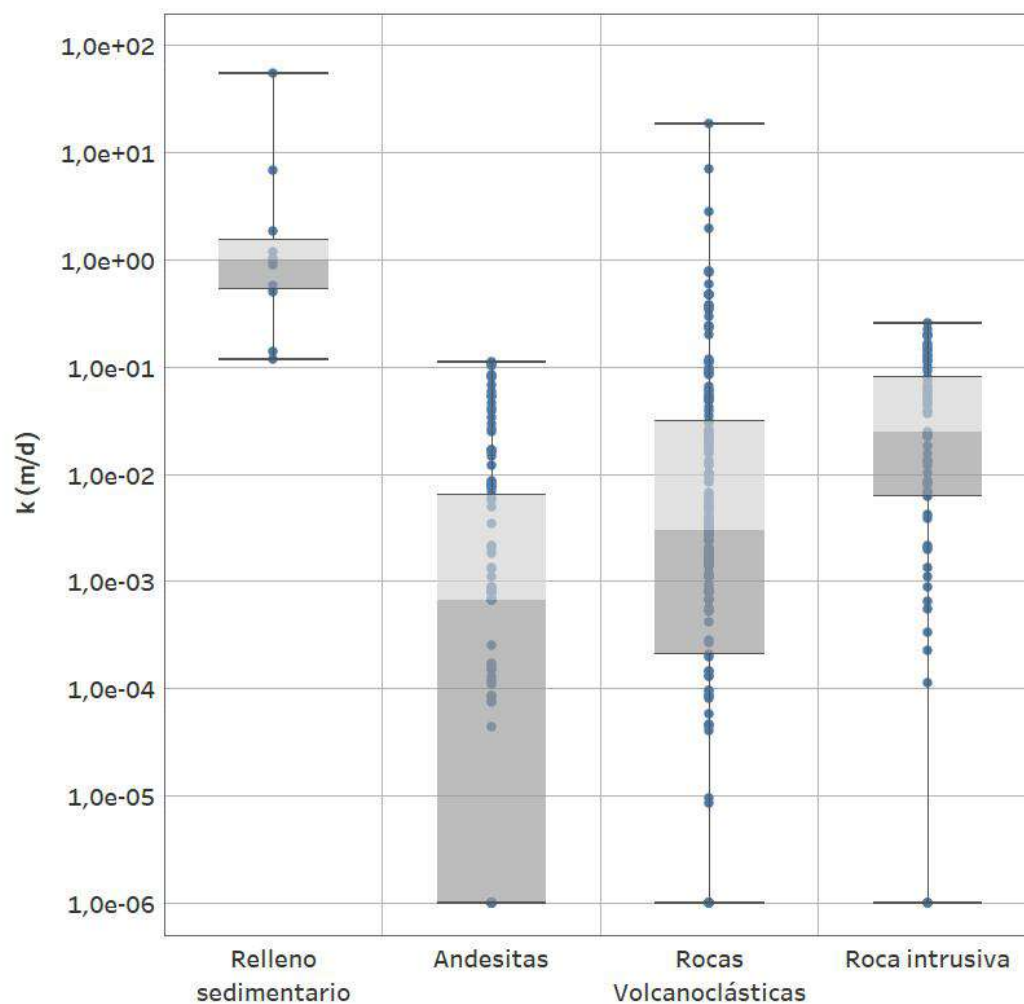
Figura 3-6: Permeabilidad para el Relleno Sedimentario y la Unidad de Roca



	Relleno sedimentario	Roca
Máximo	5,6e+01	1,9e+01
Percentil (75)	1,5e+00	3,4e-02
Mediana	1,0e+00	2,4e-03
Percentil (25)	5,4e-01	9,5e-05
Mínimo	1,2e-01	1,0e-06
Nº Datos	11	365

Fuente: Elaboración propia

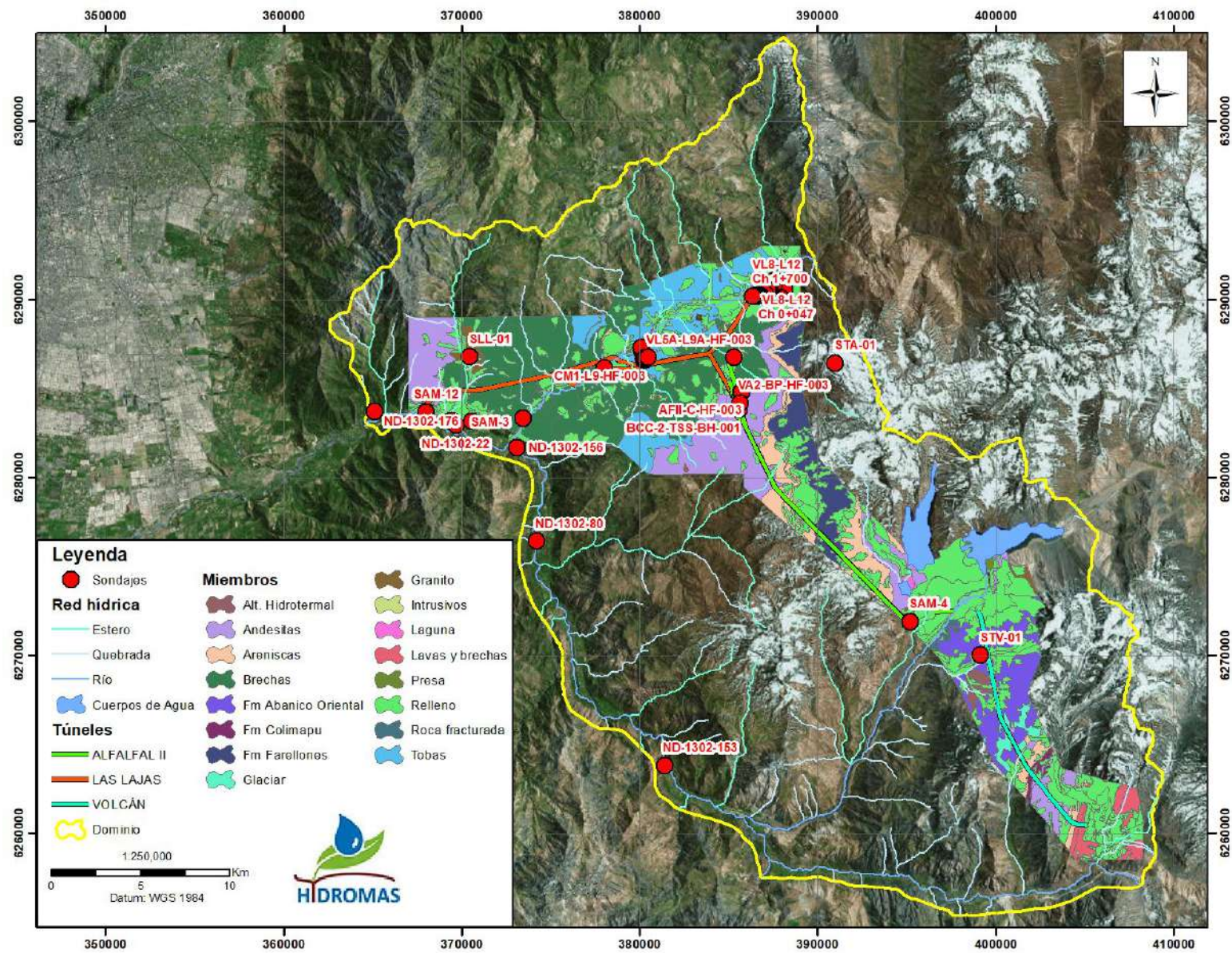
Figura 3-7: Valores de Permeabilidad para los Miembros Geológicos Mayores



	Miembro geológico			
	Relleno sedimentario	Andesitas	Rocas Volcanoclásticas	Roca intrusiva
Máximo	5,6e+01	1,1e-01	1,9e+01	2,6e-01
Percentil (75)	1,5e+00	6,5e-03	3,2e-02	8,0e-02
Mediana	1,0e+00	6,7e-04	3,0e-03	2,5e-02
Percentil (25)	5,4e-01	1,0e-06	2,1e-04	6,2e-03
Mínimo	1,2e-01	1,0e-06	1,0e-06	1,0e-06
Nº Datos	11	119	181	65

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3-8: Distribución Espacial de las Unidades Geológicas



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-1: Resumen de Valores de Conductividad Hidráulica

Miembro geológico	Profundidad (m)	K Inferior (m/d)	K Medio (m/d)	K Superior (m/d)	N° Datos
Relleno sedimentario	[0-200]	1.E-1	1.E00	5.6E01	11
Andesitas	[0-200]	8.E-03	7.E-04	1.E-06	98
	>200	7.E-04	9.E-05	1.E-06	21
Rocas Volcanoclásticas	[0-200]	5.E-02	5.E-03	1.E-03	124
	>200	4.E-03	5.E-04	5.E-05	57
Roca intrusiva	[0-200]	8.E-02	2.E-02	6.E-03	65

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que las pruebas hidráulicas presentadas en el Anexo 2, no poseen registros del coeficiente de almacenamiento, de manera que se adoptaron valores obtenidos de la literatura (Singhal BBS y Gupta RP, 1999). En este caso, para los sistemas de rocas el coeficiente de almacenamiento varía entre 0 y 5%, mientras que el relleno sedimentario, varía entre un 5 a 20% y para los sistemas de estructuras o fallas geológicas, se adopta un rango entre 1 y 10%.

3.5 Unidades Hidrogeológicas

A partir del análisis de las propiedades hidrogeológicas presentadas en el acápite 3.4, es posible definir cuatro unidades hidrogeológicas, según sus propiedades y características.

La primera unidad hidrogeológica (UH1), corresponde a los depósitos no consolidados que conforman el acuífero del relleno sedimentario asociado a los cauces principales del río Maipo, Yeso, Volcán y Colorado. Debido a sus propiedades hidrogeológicas, corresponde a una unidad permeable, con un rango de permeabilidades que varía entre $1,2 \times 10^{-1}$ a $5,6 \times 10^1$ m/d.

La segunda unidad hidrogeológica (UH2), corresponde a la roca ubicada en la sección más somera del macizo, es decir, a menos de 200 m de profundidad con respecto al nivel de terreno. Esta unidad se caracteriza por tener un mayor contacto con procesos erosivos y de meteorización, produciendo así un mayor grado de fracturamiento, lo que se traduce en permeabilidades relativas más altas que en rocas sanas o competentes.

A partir de los resultados de los ensayos hidráulicos realizados para obtener los parámetros hidrogeológicos, se tiene que la mediana de permeabilidad para la UH2 es de $5,0 \times 10^{-3}$ m/d, con un rango que varía entre $5,4 \times 10^{-4}$ y $4,8 \times 10^{-2}$ m/d determinado por los percentiles 25 y 75% respectivamente.

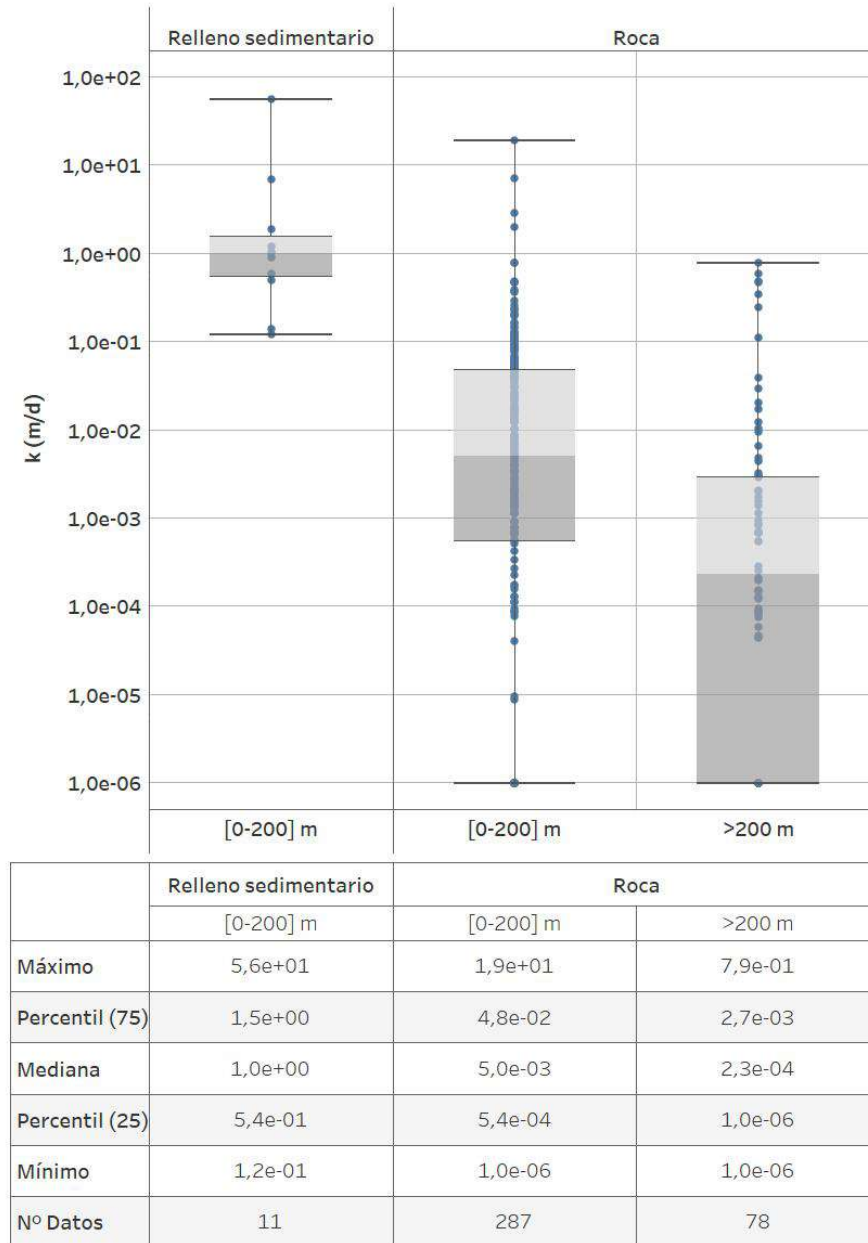
La tercera unidad hidrogeológica (UH3), corresponde a la roca ubicada a mayores profundidades, es decir a más de 200 m por debajo del nivel de terreno. Esta unidad de roca se caracteriza por ser más competente o sana que las secciones más someras, lo que implica permeabilidades relativas menores. La mediana de los datos de permeabilidad de la UH3 es de $2,3 \times 10^{-4}$ m/d, es decir un orden de magnitud menor que la UH2, el rango de permeabilidades varía entre $1,0 \times 10^{-6}$ y $2,7 \times 10^{-3}$ determinado por los percentiles 25 y 75% respectivamente. En la Figura 3-9 se presenta el análisis de permeabilidad en profundidad para el sistema de roca y relleno sedimentario.

Finalmente, se define una cuarta unidad hidrogeológica (UH4) a partir de los lineamientos presentes, ya sean fallas, fallas inferidas, diques, entre otros y los contactos litológicos. Estas estructuras pueden representar conexiones en el sistema de roca, lo que se traduce en una permeabilidad mayor que la del sistema de roca

superficial (UH2). A partir del estudio de SRK (2017) y de los valores mayores de los ensayos de permeabilidad, se estimó que la conductividad para esta unidad hidrogeológica varía entre 1×10^{-3} y 1×10^{-1} m/d.

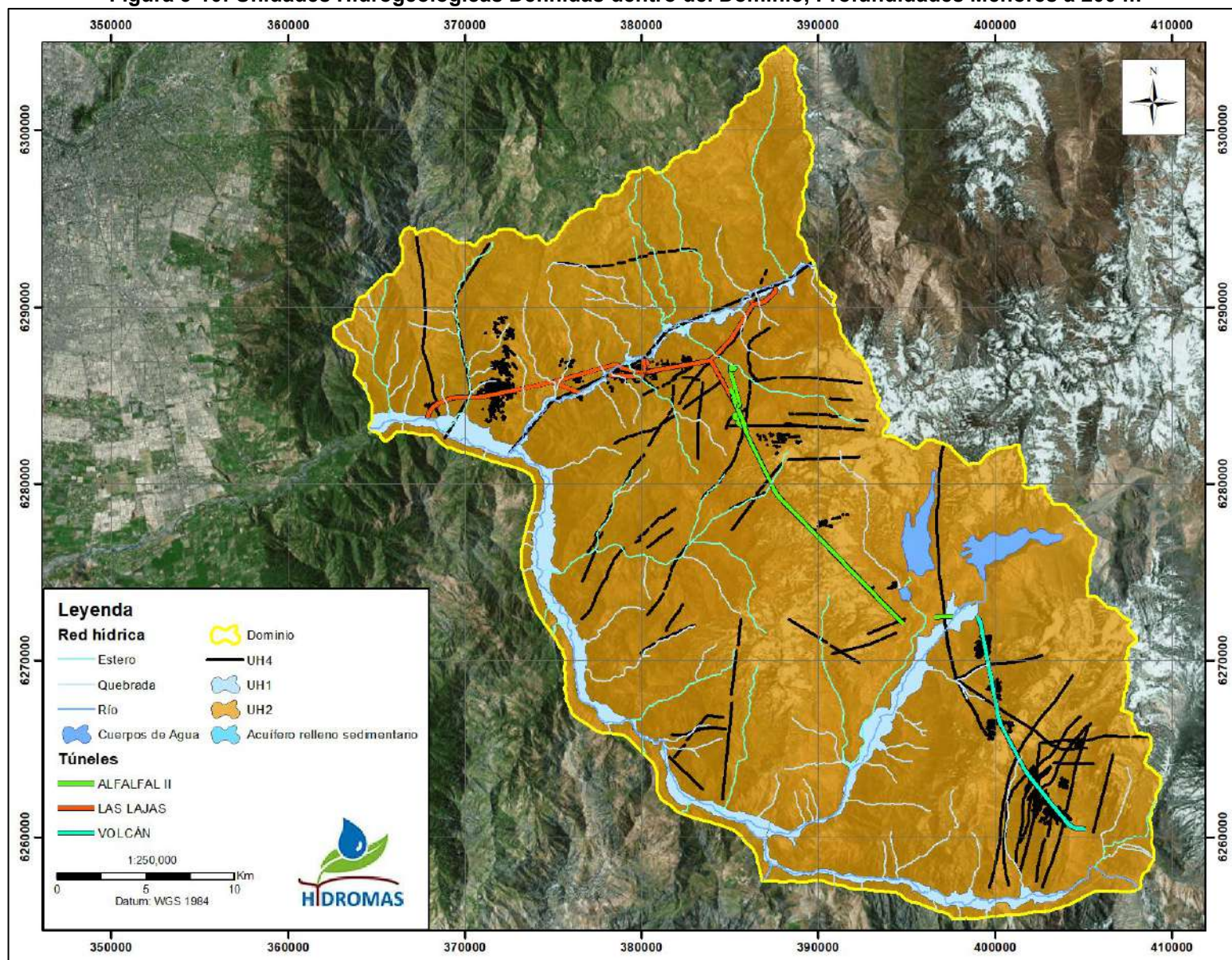
En la Figura 3-10 se presenta una vista en planta con la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas para los primeros 200 m de profundidad. Del mismo modo, en la Figura 3-11 se presenta las unidades hidrogeológicas distribuidas a profundidades mayores que 200 m. Finalmente, en la Tabla 3-2 se presenta un resumen de los rangos de permeabilidad para cada unidad hidrogeológica.

Figura 3-9: Permeabilidad a Distinta Profundidad de la Unidad de Roca y Relleno Sedimentario



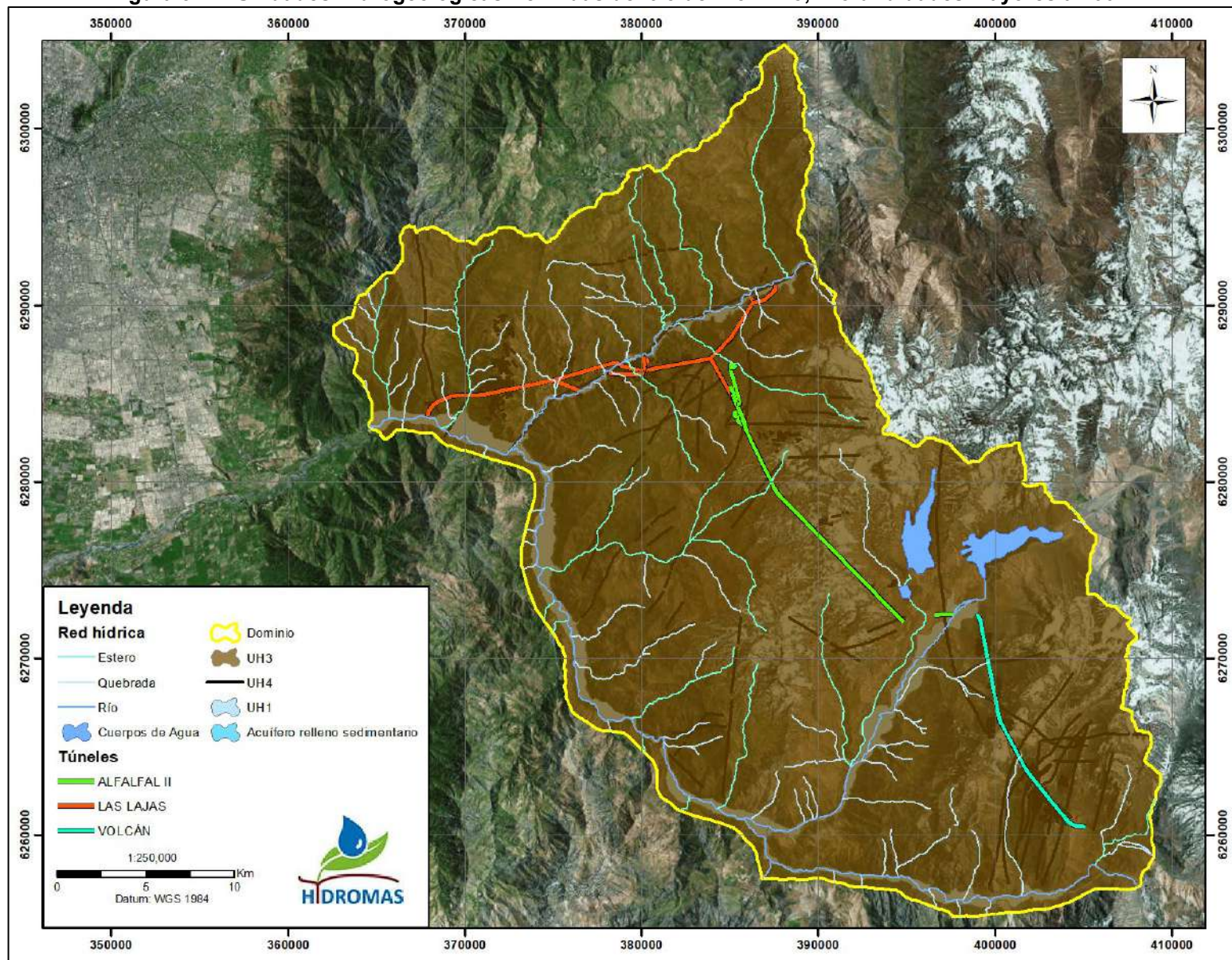
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-10: Unidades Hidrogeológicas Definidas dentro del Dominio, Profundidades Menores a 200 m



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3-11: Unidades Hidrogeológicas Definidas dentro del Dominio, Profundidades Mayores a 200 m



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-2: Resumen de Valores de Conductividad Hidráulica para las Unidades Hidrogeológicas

Unidades hidrogeológicas	K inferior (m/d)	K medio (m/d)	K superior (m/d)
UH1	$1,2 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^0$	$5,6 \times 10^1$
UH2	$5,4 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$4,8 \times 10^{-2}$
UH3	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-3}$
UH4	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$

Fuente: Elaboración propia

3.6 Niveles de Agua Subterránea

Dentro del dominio de la zona de estudio, se cuenta con dos fuentes de registros del nivel piezométrico, que permiten caracterizar los sistemas acuíferos presentes en los rellenos sedimentarios del Maipo, Río Colorado y Río Yeso. Éstas corresponden a las mediciones de la profundidad del nivel estático registrados durante:

- La prueba de bombeo que se presenta en los expedientes de derechos de agua subterráneas concedidos por la DGA,
- La segunda fuente, corresponde a las mediciones de profundidad del nivel estático realizadas en los pozos de monitoreo del PHAM desde marzo de 2016 al presente,
- y una campaña de terreno realizada en julio de 2018 incluyendo pozos de ingeniera que no registraron nivel al momento de la construcción.

En la Figura 3-12 se presenta la distribución espacial de los pozos con información de profundidad de nivel estático disponibles dentro del dominio de la zona de estudio.

3.6.1 Nivel registrado en expedientes de derechos de agua subterráneos DGA

A partir de la información disponible en el Catastro Público de Aguas, se obtiene información sobre los derechos de agua subterráneas constituidos por la Dirección General de Agua (DGA, 2018) en la zona de estudio. Usando dicha información, se verifica que dentro del dominio de interés se cuenta con un total de 33 pozos, de los cuales 13 poseen expedientes con medición de nivel estático durante la respectiva prueba de bombeo.

En la Tabla 3-3 se presentan aquellos pozos con derecho constituidos que contienen información de medición de la profundidad de nivel estático durante la realización de la prueba de bombeo descrita en el expediente, además se señala la ubicación de cada pozo, así como también la cota de terreno y fecha de realización de la prueba de bombeo.

Tabla 3-3: Información de los pozos con derechos concedidos dentro del dominio

Código DGA	Cota terreno (msnm)	Coordenadas UTM (*)		Profundidad del nivel freático (m)	Cota piezométrica (msnm)	Fecha prueba de bombeo
		Este (m)	Norte (m)			
ND-1302-314	911	372.364	6.282.031	67	844	25-01-2007
ND-1302-183	830	365.121	6.283.729	42	788	29-07-2004
ND-1302-182	840	364.975	6.283.898	55	785	18-03-2003
ND-1302-175	874	369.409	6.283.210	42	832	-
ND-1302-153	1.171	381.403	6.263.834	26	1.145	10-03-2001
ND-1302-156	880	373.098	6.281.706	13	867	-
ND-1302-151	921	371.064	6.283.094	77	844	-
ND-1302-80	950	374.228	6.276.426	8	942	28-01-1995
ND-1302-130	931	373.628	6.281.481	45	886	23-02-2000
ND-1302-22	880	369.685	6.282.961	51	830	15-02-1990
ND-1302-221	786	364.322	6.282.800	11	775	24-01-1985
ND-1302-217	954	374.298	6.276.425	8	946	-
ND-1302-217	952	374.284	6.276.426	7	945	-

(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar, que la información de profundidad del nivel estático disponible en los expedientes se ubica en el relleno sedimentario del río Maipo, entre las localidades de El Manzano y San Gabriel. Si bien, esta información fue medida entre 1985 y 2007, se considera representativa de la condición actual, por cuanto la demanda de aguas subterráneas en la parte alta del relleno sedimentario del río Maipo es baja en relación a la cantidad de agua que dispone el sistema y, por lo tanto, la condición de equilibrio reflejada en el nivel estático de cada pozo se puede considerar representativo de la condición de equilibrio de la condición actual.

3.6.2 Niveles medidos en pozos pertenecientes a PHAM

El PHAM cuenta con una red de monitoreo de pozos en los cuales se realiza una medición mensual de la profundidad del nivel estático. Su distribución espacial se muestra en la Figura 3-12. En la Tabla 3-4 se presentan los registros de mediciones mensuales de los pozos mencionados.

En la Figura 3-13 se presenta la serie temporal de registros de profundidad del nivel estático a nivel mensual del pozo SAM-4. Este se encuentra ubicado en el sector del portal VA-4 en las cercanías del río Yeso. Como se observa en el gráfico, se cuenta con registros no continuos entre el año 2016 y abril 2018, con una tendencia a la disminución del nivel estático.

En la Figura 3-14 se presenta la serie temporal a nivel mensual de los registros de profundidad del nivel estático del pozo SAM-14. Este se encuentra ubicado en el sector del portal VL-4 en las cercanías del río Colorado. Como se observa en el gráfico, se cuenta con registros desde marzo de 2016 hasta abril 2018, las mediciones muestran que los niveles son relativamente estables en el tiempo, con profundidades cercanas a los 30 m.

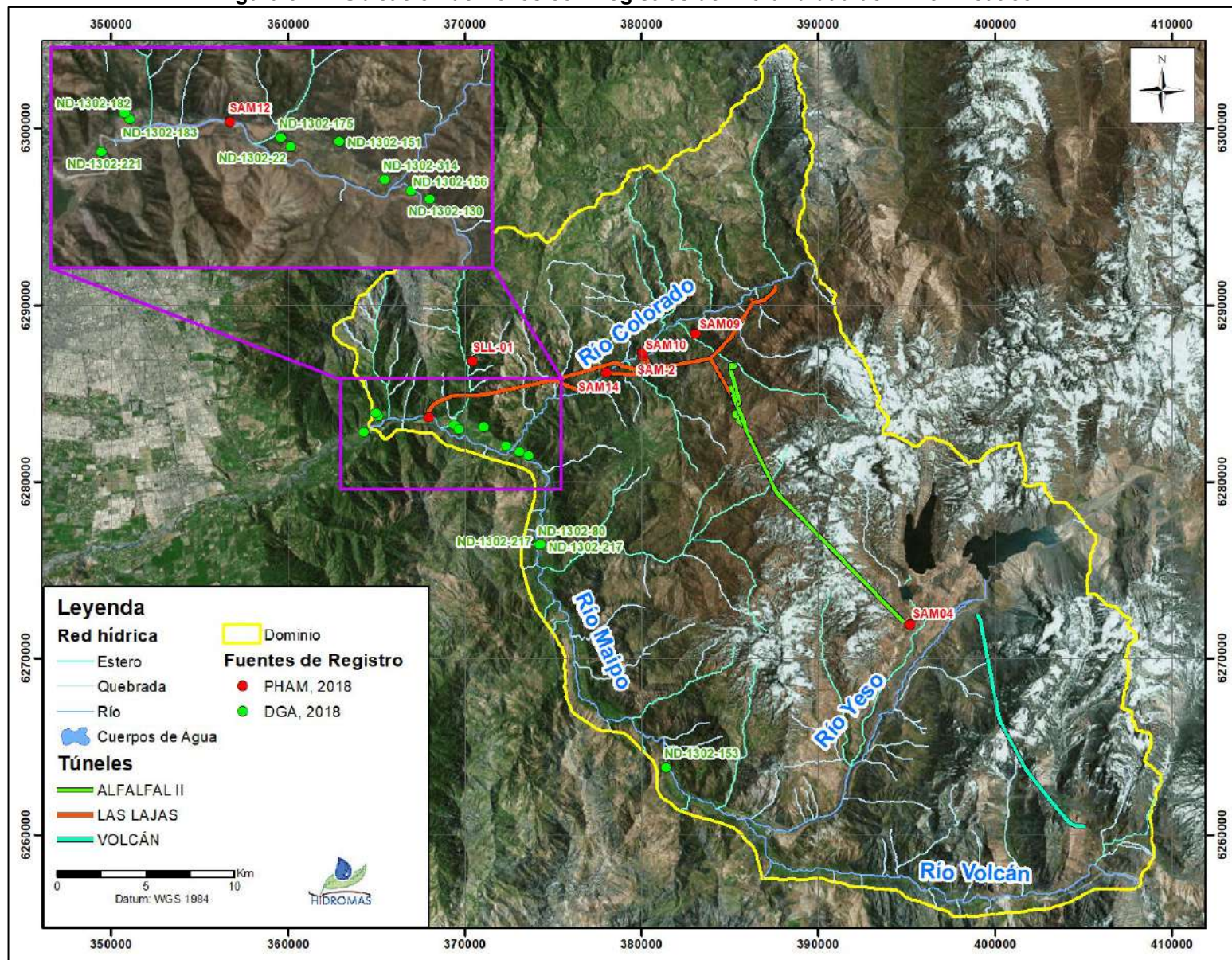
En la Figura 3-15 se presenta la serie temporal de registros de profundidad del nivel estático a nivel mensual del pozo SAM-10. Este se encuentra ubicado en el sector del portal VL-5 en las cercanías del río Colorado. Como se observa en el gráfico, se cuenta con registros desde marzo de 2016 hasta julio de 2018, las mediciones muestran que los niveles son relativamente estables en el tiempo, con profundidades cercanas a los 25 m.

Finalmente, en la Figura 3-16 se presenta la serie temporal de registros de profundidad del nivel estático a nivel mensual del pozo SAM-12. Este se encuentra ubicado en el sector del portal L1, muy cercano al río Maipo. Para este pozo se cuenta con un registro continuo a nivel mensual desde marzo de 2016 a julio de 2018, con profundidades del nivel estático que oscilan entre 6 y 8 m.

Debido a la cercanía con el río Maipo, en la Figura 3-17 se presenta una comparativa entre la profundidad del nivel estático medida en SAM-12 y el caudal medio mensual registrado en la estación fluviométrica río Maipo en El Manzano, de la DGA. En el gráfico, se ilustra la conexión existente entre el pozo SAM-12 y el río Maipo, de manera que se puede establecer que el acuífero del relleno sedimentario del río Maipo está fuertemente influenciado por el régimen observado superficialmente en el cauce.

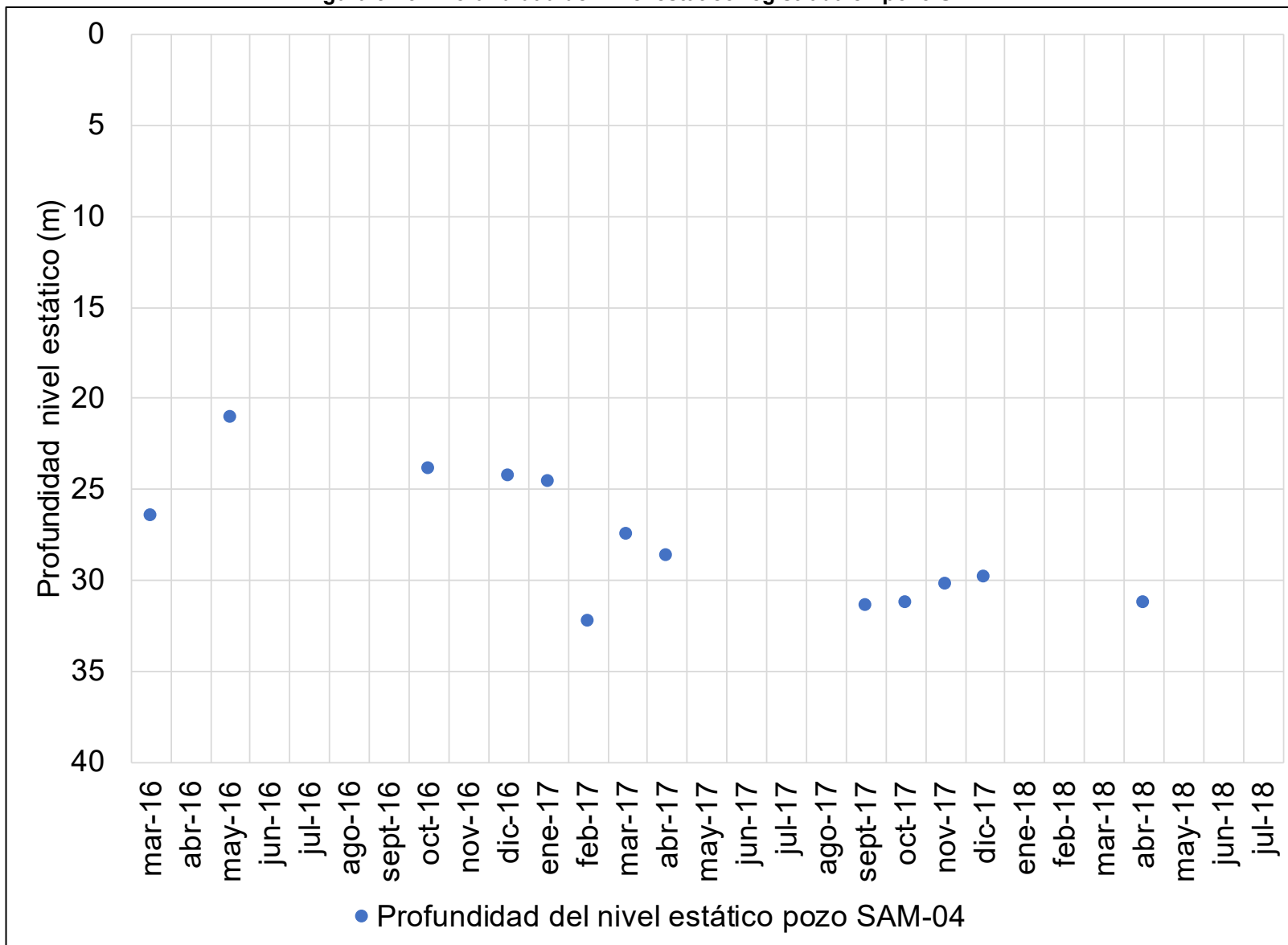
Para complementar la información de niveles, en el mes de julio de 2018, se realizó una campaña de medición de la profundidad del nivel freático en seis pozos que fueron construidos para fines de la ingeniería básica del proyecto. Se visitaron 6 puntos en total, de los que solamente se pudieron medir 2, ya que en los otros el nivel se encontraba por debajo de los 100 m (capacidad máxima del pozómetro). En la Tabla 3-5 se presenta un resumen de los valores de profundidad del nivel freático registrados en la campaña de terreno.

Figura 3-12: Ubicación de Pozos con Registros de Profundidad del Nivel Freático



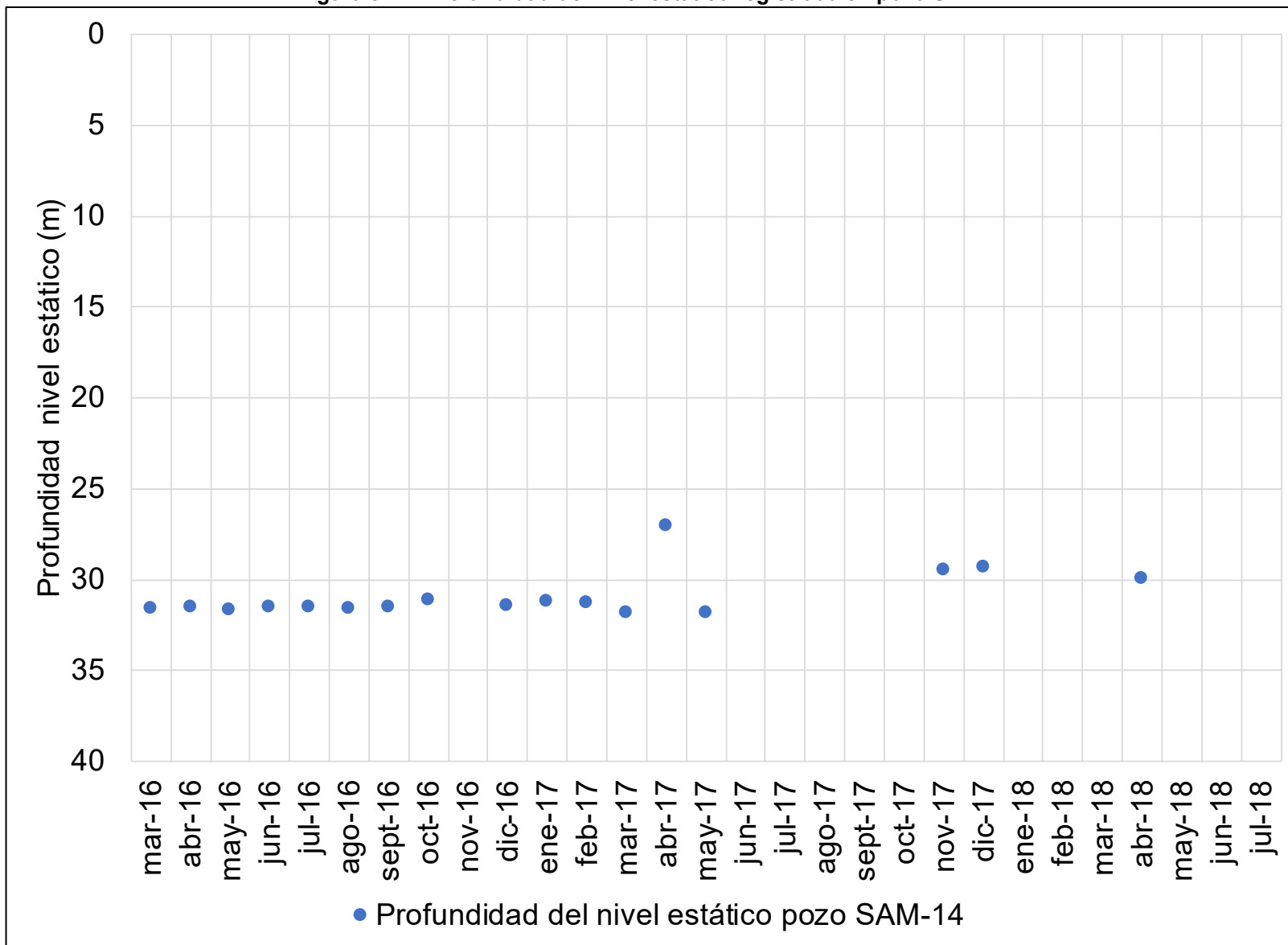
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3-13: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-4



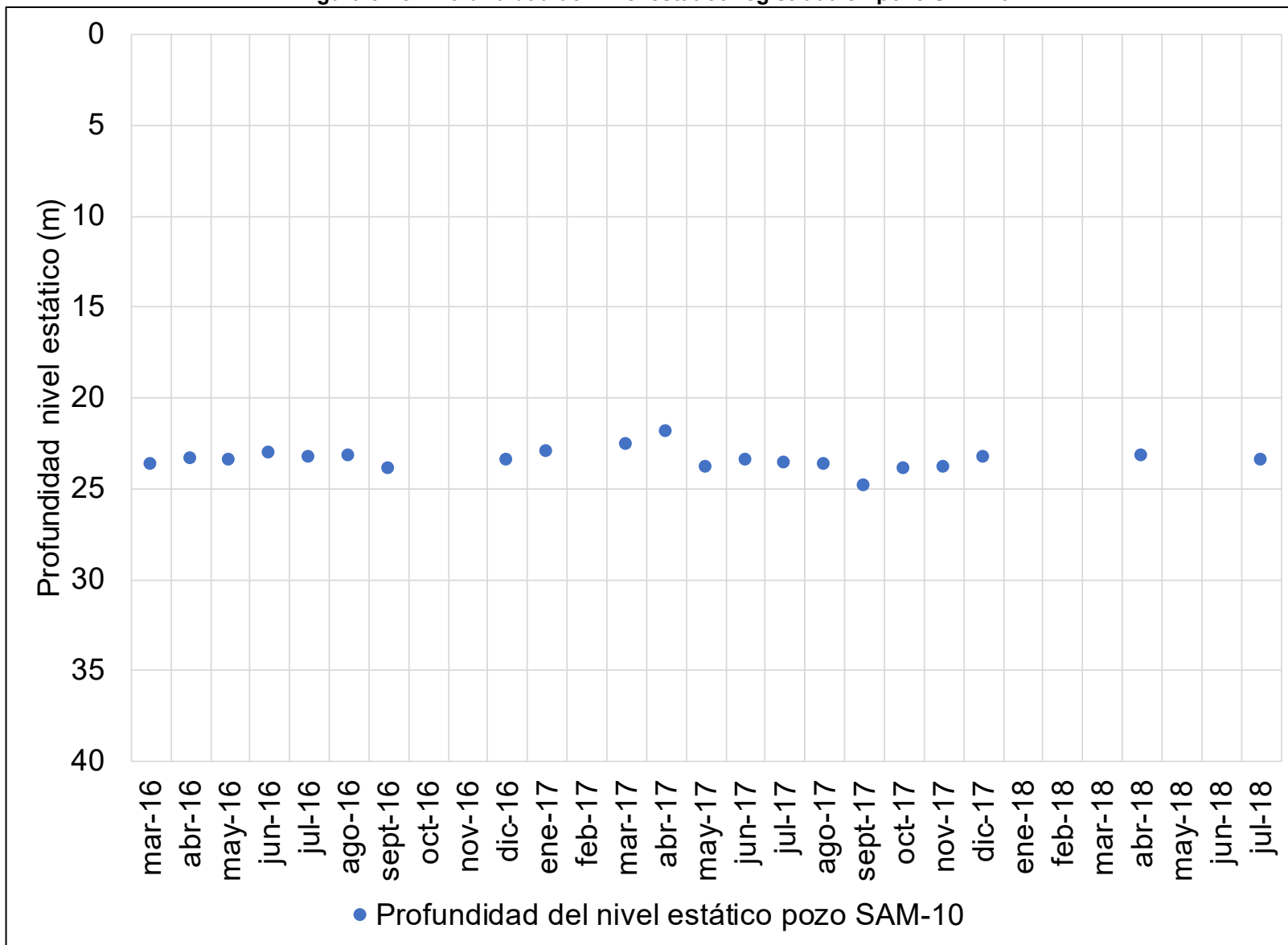
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3-14: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-14



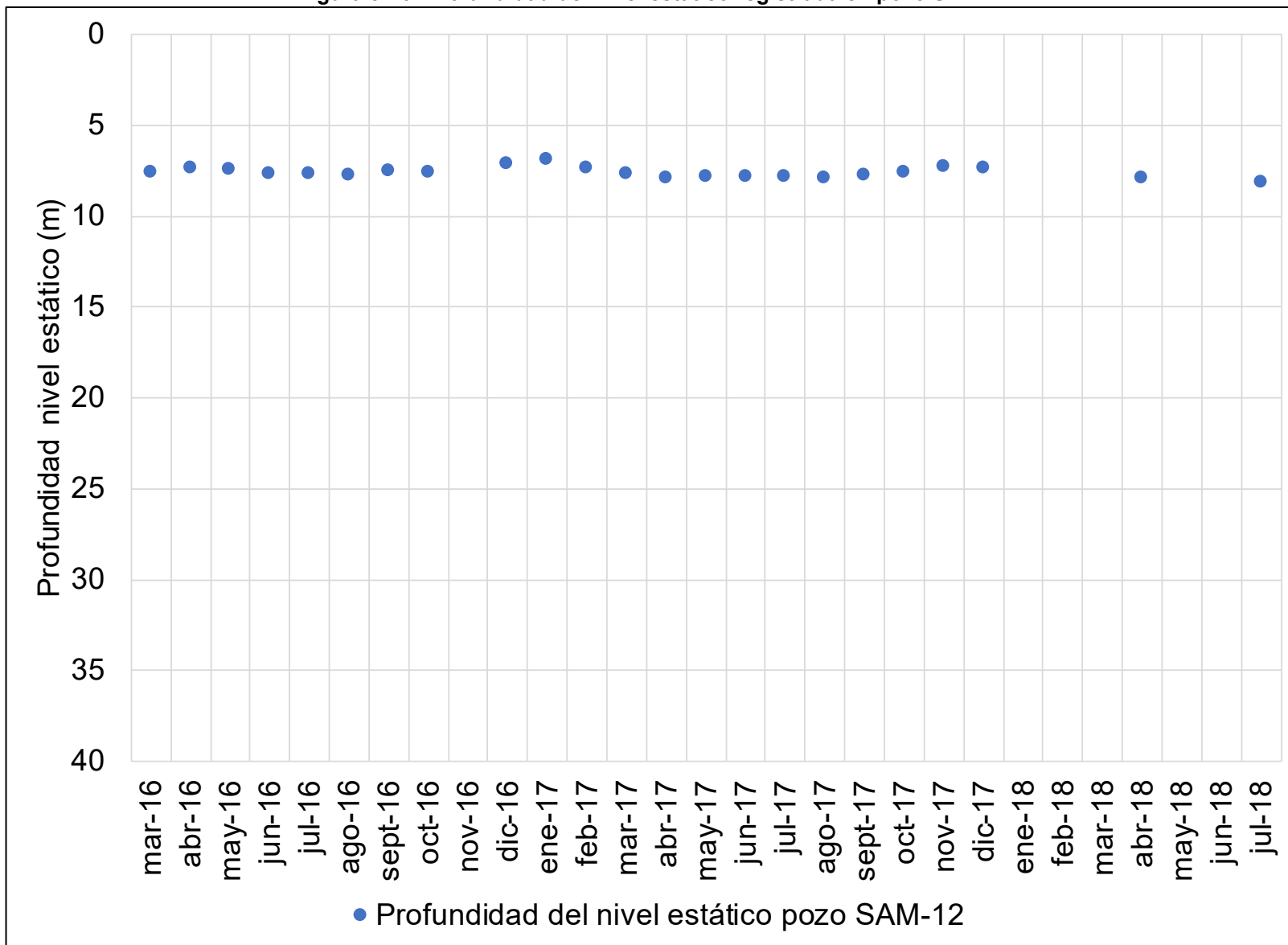
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3-15: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-10



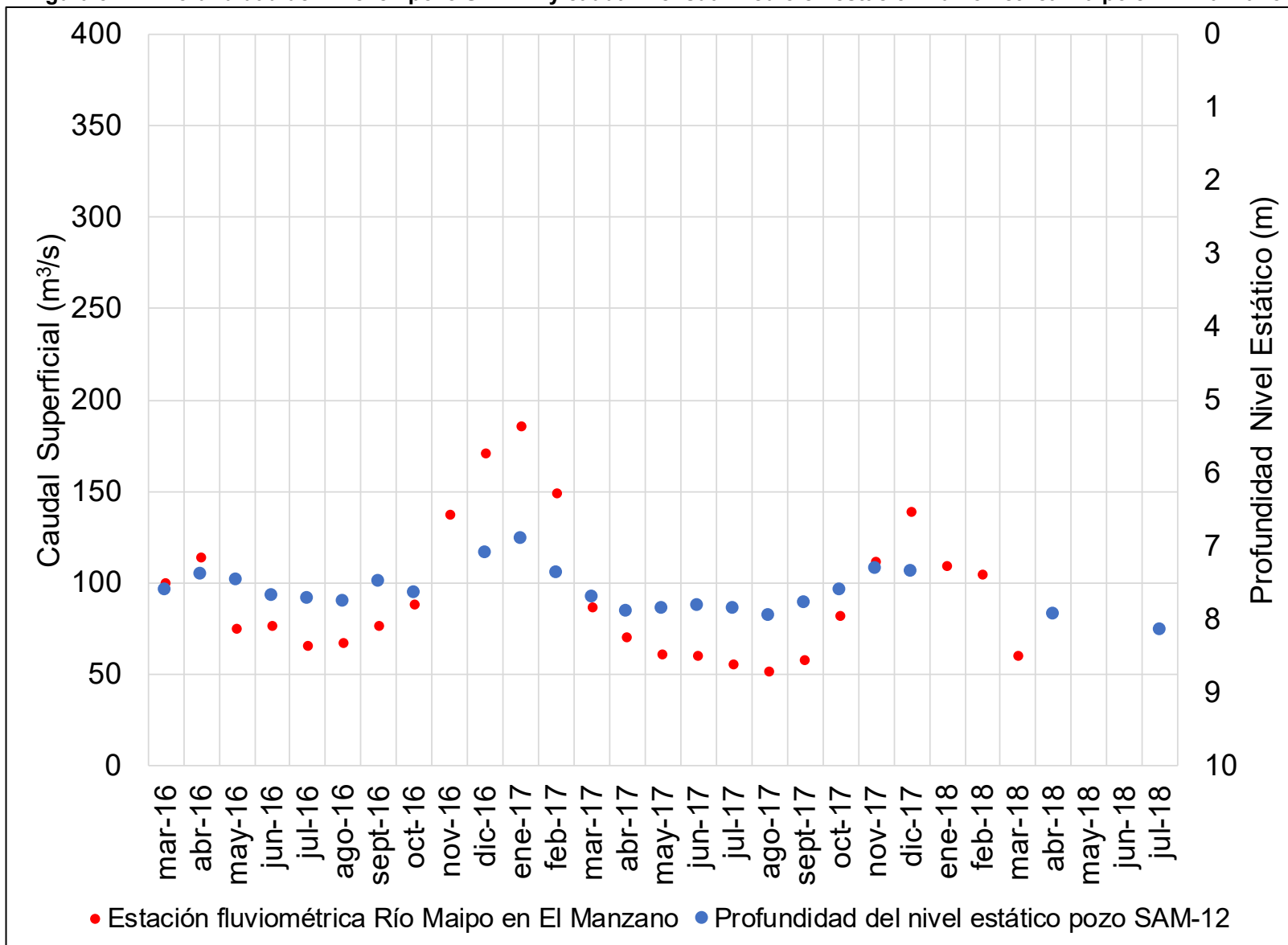
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3-16: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-12



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3-17: Profundidad del nivel en pozo SAM-12 y caudal mensual medio en estación fluviométrica Maipo en El Manzano



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-4: Información de los pozos de monitoreo PHAM dentro del dominio

Fecha	Profundidad Nivel Estático (m)					Nivel Piezométrico (msnm)				
	SAM-04	SAM-09	SAM-10	SAM-12	SAM-14	SAM-04	SAM-09	SAM-10	SAM-12	SAM-14
mar-2016	26,5	39,6	23,7	7,6	31,6	2.391,7	1.310,4	1.053,5	804,8	972,1
abr-2016			23,4	7,4	31,5			1.053,8	805,0	972,2
may-2016	21,1		23,4	7,5	31,7	2.397,1		1.053,7	804,9	972,0
jun-2016			23,1	7,7	31,5			1.054,1	804,7	972,2
jul-2016			23,3	7,7	31,5			1.053,8	804,7	972,2
ago-2016			23,2	7,8	31,6			1.054,0	804,6	972,1
sept-2016			23,9	7,5	31,5			1.053,3	804,9	972,2
oct-2016	23,9			7,6	31,1	2.394,3			804,8	972,6
nov-2016										
dic-2016	24,3		23,5	7,1	31,5	2.393,9		1.053,7	805,3	972,2
ene-2017	24,6		23,0	6,9	31,2	2.393,6		1.054,2	805,5	972,5
feb-2017	32,3			7,4	31,3	2.385,9			805,0	972,4
mar-2017	27,5		22,6	7,7	31,9	2.390,6		1.054,6	804,7	971,9
abr-2017	28,7		21,9	7,9	27,1	2.389,5		1.055,3	804,5	976,7
may-2017			23,8	7,9	31,9			1.053,3	804,6	971,9
jun-2017			23,5	7,8				1.053,7	804,6	
jul-2017			23,6	7,9				1.053,5	804,5	
ago-2017			23,7	8,0				1.053,4	804,5	
sept-2017	31,4		24,9	7,8		2.386,8		1.052,3	804,6	
oct-2017	31,3		24,0	7,6		2.386,9		1.053,2	804,8	
nov-2017	30,2		23,9	7,3	29,5	2.387,9		1.053,3	805,1	974,2
dic-2017	29,8		23,3	7,4	29,3	2.388,3		1.053,9	805,1	974,4
ene-2018										
feb-2018										
mar-2018										
abr-2018	31,2		23,2	7,9	29,9	2.386,9		1.053,9	804,5	973,8
jul-2018			23,5	8,1				1.053,7	804,3	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-5: Información de los pozos monitoreados en la campaña de julio de 2018

Código DGA	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Profundidad del nivel freático (m)	Cota piezométrica (msnm)	Fecha medición
SAM-1	385.300	6.286.760	>100 m		11-Jul-2018
SAM-2	380.100	6.287.340	46	1.065	11-Jul-2018
SCA-01 ^a	388.131	6.290.558	>100 m		11-Jul-2018
SCA-03	387.560	6.290.780	>100 m		11-Jul-2018
SLL-01	370.454	6.286.806	11	1.050	11-Jul-2018
TSLL-A	380.260	6.286.363	>100 m		11-Jul-2018

Fuente: Elaboración propia

3.7 Curvas equipotenciales y direcciones de flujo

A partir de la información de niveles descritos en el acápite 3.6, se generó un mapa de curvas equipotenciales del acuífero del relleno sedimentario. Para la definición de estas curvas, se utilizó como criterio, las siguientes condiciones:

- Cotas piezométricas estimadas en los pozos con información de nivel de aguas en rellenos sedimentarios de Maipo, Colorado y Yeso, descritos en el acápite 3.6.
- Contorno del contacto unidad de roca y del relleno sedimentario, que define un contraste de tres órdenes de magnitud entre ambas unidades hidrogeológicas
- Nivel de agua subterránea cercana a la topografía en el eje de los cauces de los ríos Maipo, río Colorado, río Yeso y río Volcán, considerando que por la interacción río-acuífero, el nivel intercepta la superficie.

Es importante señalar que se consideró que, dentro del sistema hidrogeológico de estudio, no existe una explotación importante del acuífero, de manera que es posible afirmar que se encuentra en relativo equilibrio. De esta forma, aquellas mediciones de la profundidad del nivel registradas años anteriores, se pueden considerar como representativas del sistema actual.

En la Tabla 3-6 se presenta la información utilizada para la generación de las curvas equipotenciales. En total se cuenta con 20 registros de niveles de agua subterránea, distribuidos a lo largo del dominio. Para los pozos de derechos de agua obtenidos desde los expedientes de la DGA, se consideró el nivel registrado durante la prueba de bombeo, mientras que para los pozos de monitoreo mensual se consideró el nivel promedio de la serie histórica. En la Figura 3-18 se presentan las curvas equipotenciales definidas a partir de la información mencionada.

Como se observa de las curvas equipotenciales, existe una relación directa con el sistema de drenaje de los cauces principales presentes en el área de estudio. Las direcciones de flujo coinciden con el escurrimiento superficial de los cauces mayores, en el relleno del río Maipo y Volcán se observa un flujo que va desde el sector este hacia el nor-oeste, mientras que para el relleno sedimentario del río Colorado y Yeso, el flujo subterráneo va desde nor-este hacia sur-oeste.

En el sector del río Maipo entre la confluencia con el Yeso y el Colorado, se observa un gradiente hidráulico por debajo del 1%, en promedio. Del mismo modo en el acuífero del río Yeso, se observa un gradiente

hidráulico fuerte, con valores de aproximadamente un 6 % en promedio. Para el sector acuífero asociado al relleno sedimentario del río Colorado, se observa un gradiente hidráulico de 2% mientras que para el río Volcán es de un 3% aproximadamente.

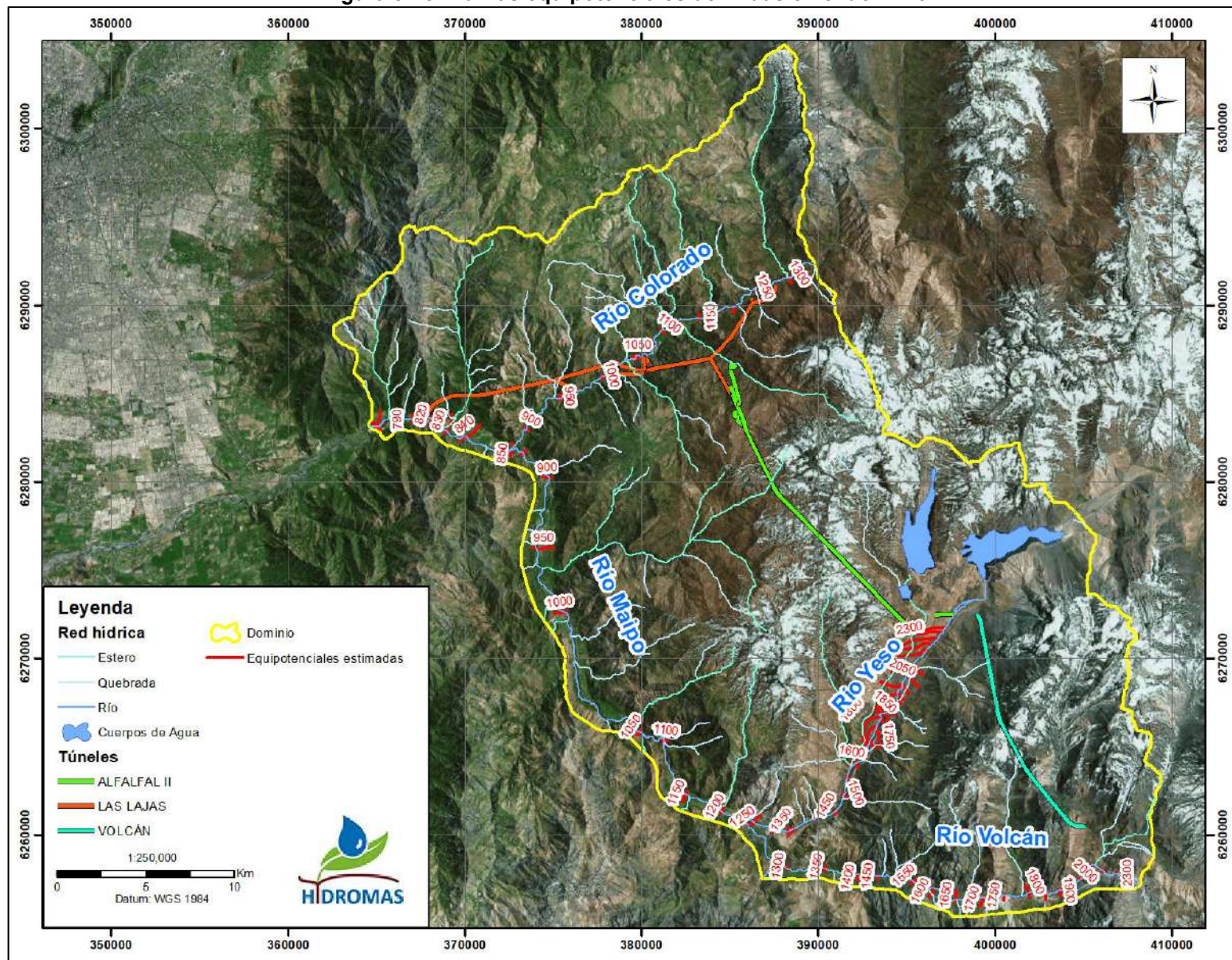
Tabla 3-6: Fuente de Registros de Profundidad del Nivel Estático para Generación de Curvas

Nombre	Fuente	Coordenadas UTM (*)		Cota de Terreno (msnm)	Profundidad del Nivel Freático (m)	Cota Piezométrica (msnm)
		Este	Norte			
		(m)	(m)			
ND-1302-314	DGA, 2018	372.364	6.282.031	911	67	844
ND-1302-183	DGA, 2018	365.121	6.283.729	830	42	788
ND-1302-182	DGA, 2018	364.975	6.283.898	840	55	785
ND-1302-175	DGA, 2018	369.409	6.283.210	874	42	832
ND-1302-153	DGA, 2018	381.403	6.263.834	1.171	26	1.145
ND-1302-156	DGA, 2018	373.098	6.281.706	880	13	867
ND-1302-151	DGA, 2018	371.064	6.283.094	921	77	844
ND-1302-80	DGA, 2018	374.228	6.276.426	950	8	942
ND-1302-130	DGA, 2018	373.628	6.281.481	931	45	886
ND-1302-22	DGA, 2018	369.685	6.282.961	880	51	830
ND-1302-221	DGA, 2018	364.322	6.282.800	786	11	775
ND-1302-217	DGA, 2018	374.298	6.276.425	954	8	946
ND-1302-217	DGA, 2018	374.284	6.276.426	952	7	945
SAM04	PHAM, 2018	395.194	6.271.931	2.418	28	2.391
SAM09	PHAM, 2018	383.073	6.288.379	1.350	40	1.310
SAM10	PHAM, 2018	380.114	6.287.110	1.077	24	1.054
SAM12	PHAM, 2018	367.966	6.283.661	812	8	805
SAM14	PHAM, 2018	378.038	6.286.172	1.004	31	973
SAM02	PHAM, 2018	380.100	6.287.340	1.110	46	1.065
SLL-01	PHAM, 2018	370.454	6.286.806	1.060	11	1.050

(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-18: Curvas equipotenciales definidas en el dominio



Fuente: Elaboración Propia

4 ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

4.1 Aspectos Generales

El sistema hidrogeológico en que se emplaza el PHAM, considera un acuífero sedimentario definido como la unidad hidrogeológica UH-1, sin embargo, la mayor porción del túnel interactúa en la unidad de roca de baja permeabilidad, con valores prácticamente tres órdenes de magnitud inferior al relleno sedimentario que constituye el acuífero. La unidad de roca presenta un mayor nivel de fracturamiento en superficie y bajo los 200 metros de profundidad se encuentra un sistema de roca más competente.

De acuerdo a la información del modelo conceptual, existe una recarga en los depósitos sedimentarios, la que se presenta en mayor magnitud, dada las condiciones hidrogeológicas presentes en la UH-1, sin embargo, dicha recarga que entra al sistema acuífero descarga rápidamente en los cauces del río Maipo, Río Colorado, río Yeso y río Volcán.

El sistema de roca más somero, es capaz de recibir una recarga proveniente del aporte pluvial y nival. Este sistema que presenta un bajo nivel de permeabilidad, hace que el agua de recarga se conduzca por fracturas hasta las quebradas de los mismos sistemas de roca aportando al flujo base de dichas quebradas.

4.2 Sistema sedimentario

4.2.1 Descarga por afloramiento en el Sistema Sedimentario

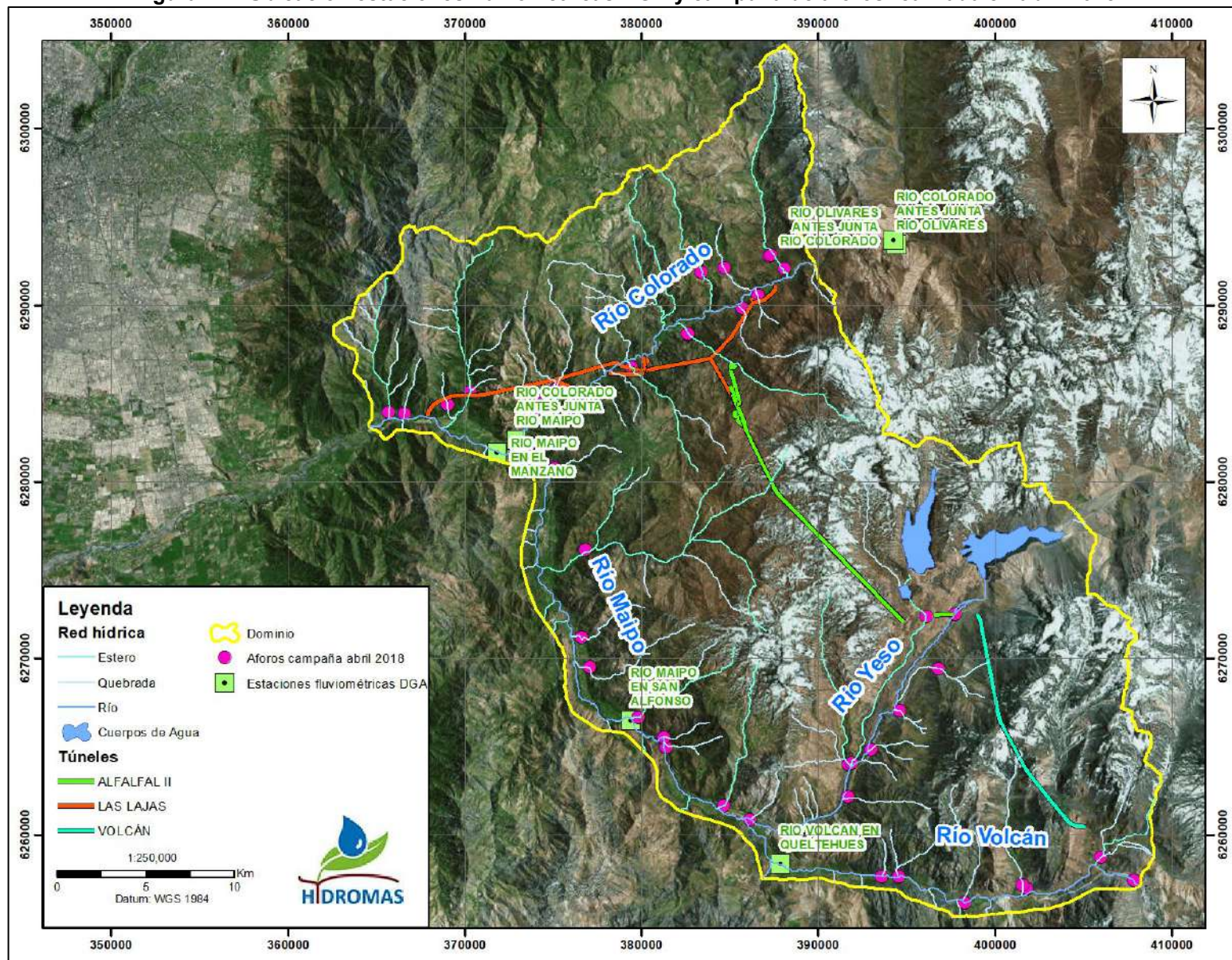
A partir de la información hidrológica disponible que se presenta en detalle en el Anexo 1 de este documento, se analizó la serie de caudales superficiales levantados en los subsistemas de los ríos Colorado, Yeso, Volcán y Maipo. Para el análisis se ha considerado el mes de abril, dado que, en este mes, la precipitación y el derretimiento nival no son componentes relevantes que afectan el flujo de agua superficial de manera importante en la mayoría de las subcuencas en el área de estudio.

En términos generales, para conocer la producción neta de caudal de cada subsistema, se considera el valor a la entrada y salida de cada uno, además de los aportes intermedios. Debido a que la información disponible de aguas superficiales en la zona, corresponde a los registros de las estaciones fluviométricas de la DGA ubicadas en los cauces principales del subsistema Colorado y Maipo, en abril de 2018, se realizó una campaña de aforos de caudales superficiales en las quebradas aportantes a los ríos principales, para, de esta forma, cuantificar el aporte del sistema de roca. Del mismo modo, esta campaña consideró el aforo de caudales superficiales en el río Yeso y río Volcán. La Figura 4-1 muestra la ubicación de las estaciones fluviométricas de la DGA y los puntos de aforo de la campaña de abril de 2018.

Para la determinación del balance hídrico global de los sistemas sedimentarios definidos como UH-1 y para los subsistemas de los ríos Colorado, Yeso, Volcán y Maipo, se utiliza toda la información de los citados caudales con el fin de verificar la presencia de afloramientos netos a través de los cauces principales, dado que el balance en el sistema sedimentario considera que existe una recarga superficial que proviene desde los aportes pluviales y nivales que ocurren durante el año y esta entrada al sistema hidrogeológico se manifiesta como flujo base.

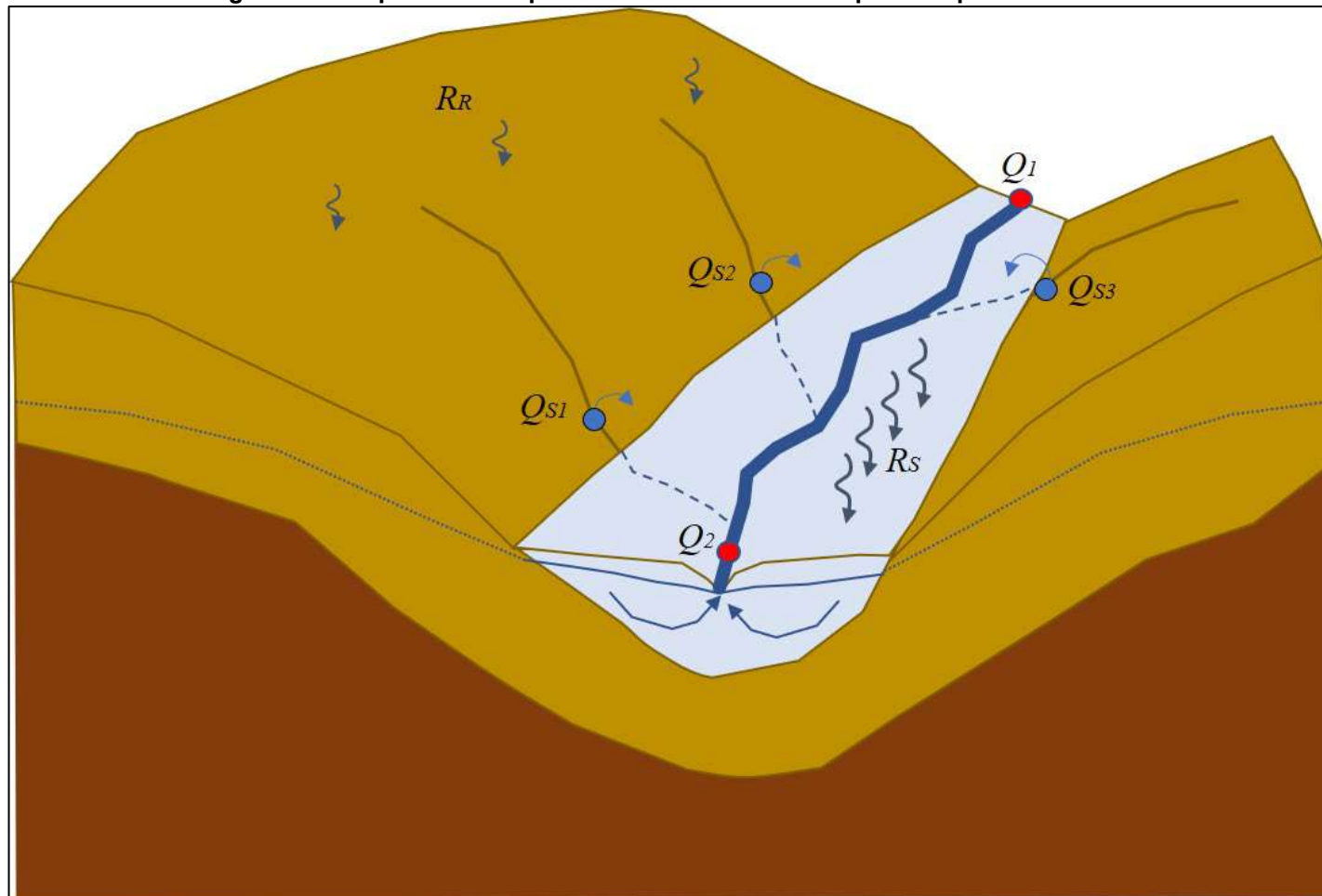
La Figura 4-2 muestra las componentes del balance hídrico de los subsistemas principales y en la Figura 4-3 se aprecian las áreas de los rellenos sedimentarios de los subsistemas principales y las superficies de las subcuencas aportantes.

Figura 4-1: Ubicación estaciones fluviométricas DGA y campaña de aforos realizada en abril 2018



Fuente: Elaboración Propia

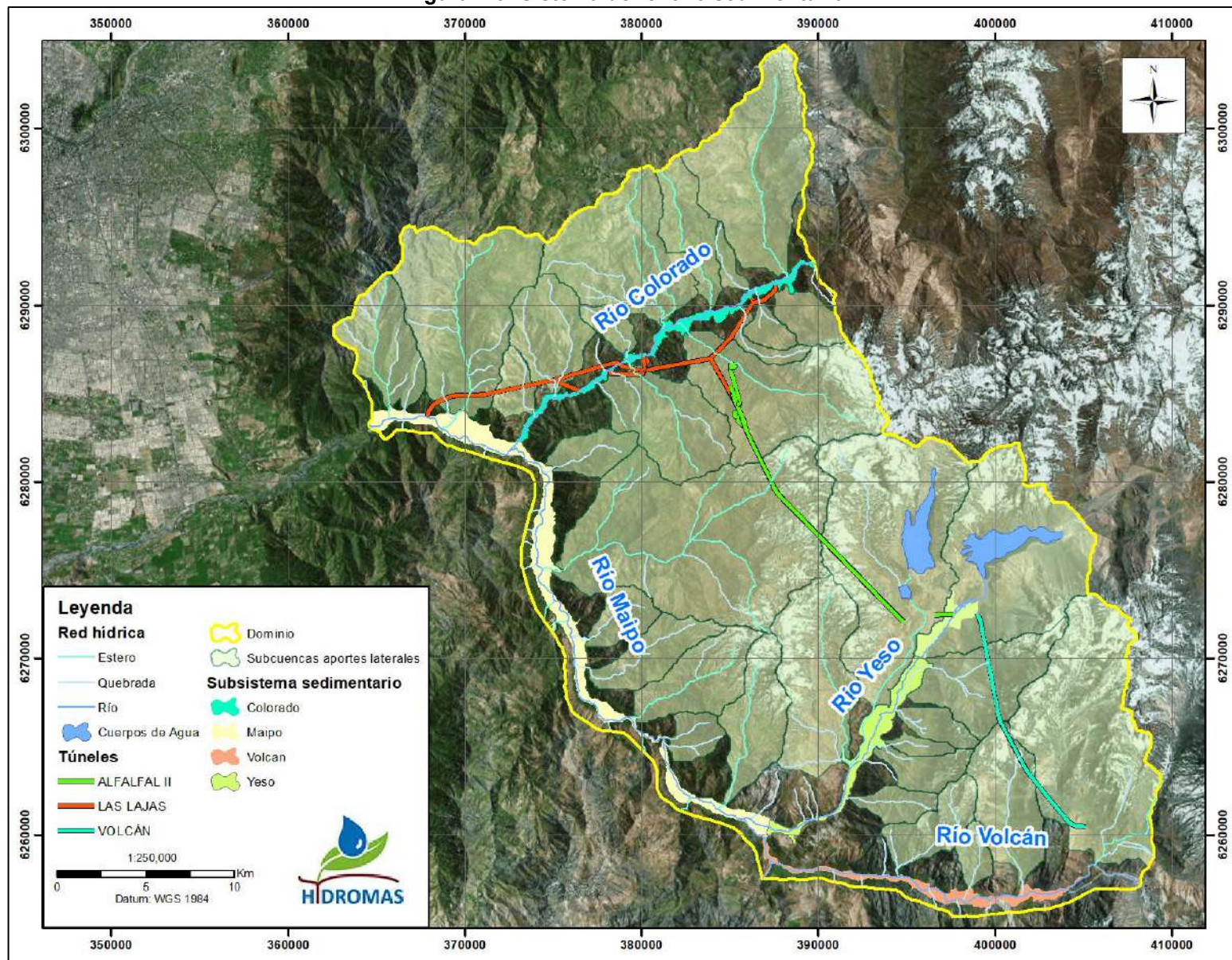
Figura 4-2: Esquema conceptual del balance hídrico superficial por subsistema



* Q_1 : Caudal de entrada al sistema; Q_2 : Caudal de salida del sistema; Q_{si} : Caudales de aporte lateral, afloramientos de quebradas; R_R : Recarga en el sistema de roca; R_S : Recarga en el sistema del relleno sedimentario.

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-3: Sistema de relleno sedimentario



Fuente: Elaboración Propia

Cada uno de los subsistemas principales, cuentan con datos de caudal superficial aguas arriba (Q_1), caudal superficial aguas abajo (Q_2) y aportes superficiales intermedios (Q_{s_i}). Al analizar las componentes del balance hídrico superficial en el mes de abril, si la diferencia entre las salidas, representadas por Q_2 , respecto a las entradas del sistema, es decir $Q_1 + \sum Q_{s_i}$, es positiva, entonces existe un flujo base neto que representa los afloramientos del sistema sedimentario. La expresión que representa dicho análisis se muestra a continuación:

$$\Delta Q = Q_2 - (Q_1 + \sum_{i=1}^n Q_{s_i})$$

Donde, ΔQ representa la ganancia o afloramiento neto en el sistema sedimentario y n es el número de subcuencas aportantes al subsistema de análisis. Este monto corresponde a la descarga por afloramiento del sistema subterráneo en el relleno sedimentario (UH-1), para cada subsistema, es decir Maipo, Colorado, Yeso y Volcán.

Tabla 4-1: Estimación de las descargas en el relleno sedimentario en cada subsistema

Subsistema	Q_1 (l/s)	$\sum Q_{s_i}$ (l/s)	Q_2 (l/s)	ΔQ (l/s)
Colorado	14.650 ⁽¹⁾	327	16.251	1.274
Yeso	13.312	623	15.139	1.204
Volcán	4.642	510	6.369	1217 ⁽²⁾
Maipo	43.593	13.831 ⁽³⁾	59.389	1.965 ⁽⁴⁾

⁽¹⁾: En la entrada del subsistema (Q_1), se considera los caudales descargados de las centrales Alfalfal y Maitenes (11.486 L/s) y el caudal de la confluencia de las estaciones DGA (3.164 L/s)

⁽²⁾: Caudal obtenido a partir de balance hídrico realizado en tramo de río Volcán desde la toma de la central Queltehués hasta la salida (estación DGA).

⁽³⁾: Los aportes laterales se considera la desembocadura del río Colorado de 13.500 L/s más los aportes de quebradas menores estimados en 331 L/s.

⁽⁴⁾: La ganancia neta del río Maipo fue estimada a partir del caudal ganado por kilómetro del Río Colorado (50 L/s/km).

El detalle de la estimación de la descarga por afloramiento de cada subsistema superficial se presenta en el Anexo 1.

4.2.2 Recarga del relleno sedimentario

El sistema acuífero del relleno sedimentario, según sus propiedades hidrogeológicas, posee una mayor permeabilidad, lo que permite una mayor capacidad de infiltración de la precipitación, generando así una mayor recarga.

Para estimar la recarga del sistema sedimentario R_s , se consideró que ésta se relaciona como un coeficiente del volumen de precipitación anual y un coeficiente del volumen de nieve anual caída equivalente en agua, tal como se explica en la siguiente expresión:

$$R_s = \alpha \cdot Q_p + \beta \cdot Q_N$$

Donde, R_s es la recarga al sistema subterráneo, Q_p es el aporte pluvial a nivel anual, Q_N el aporte nival a nivel anual y α , β son coeficientes que representan la cantidad de agua que efectivamente llega al sistema subterráneo. En el caso del acuífero del relleno sedimentario, que corresponde a la unidad hidrogeológica UH-1, se da que para $\alpha = \beta = 15\%$, el valor de la recarga en el relleno sedimentario es consistente con el monto de descarga por afloramiento de los subsistemas. La Tabla 4-2 presenta la recarga del relleno sedimentario por subsistema Maipo, Colorado, Yeso y Volcán.

Tabla 4-2: Estimación de las recargas en el relleno sedimentario en cada subsistema

Subsistema	$\alpha = \beta$ (%)	Q_P (l/s)	Q_N (l/s)	R_s (l/s)
Colorado	15	5.865	1.548	1.112
Yeso	15	4.318	2.875	1.079
Volcán	15	1.782	1.804	538
Maipo (*)	15	9.435	4.153	2.038
Total Sedimentario		21.400	10.380	4.767

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3 Extracciones de aguas subterráneas

Dentro del dominio de estudio, existen 33 derechos de aprovechamiento de agua subterránea constituidos (DGA, 2018), cuyo caudal anual promedio de extracción es de 243 L/s. Los principales usos del agua corresponden al riego y a captaciones para producción de agua potable. En la Tabla 4-3 se presenta la información del catastro de derechos concedidos de la DGA.

Del mismo modo, en la Figura 4-4 se presenta la ubicación de aquellos pozos con información de coordenadas. Como se observa en la figura, todos los pozos se encuentran ubicados dentro del relleno sedimentario del río Maipo.

Tabla 4-3: Caudales de derechos de aguas subterráneas otorgados

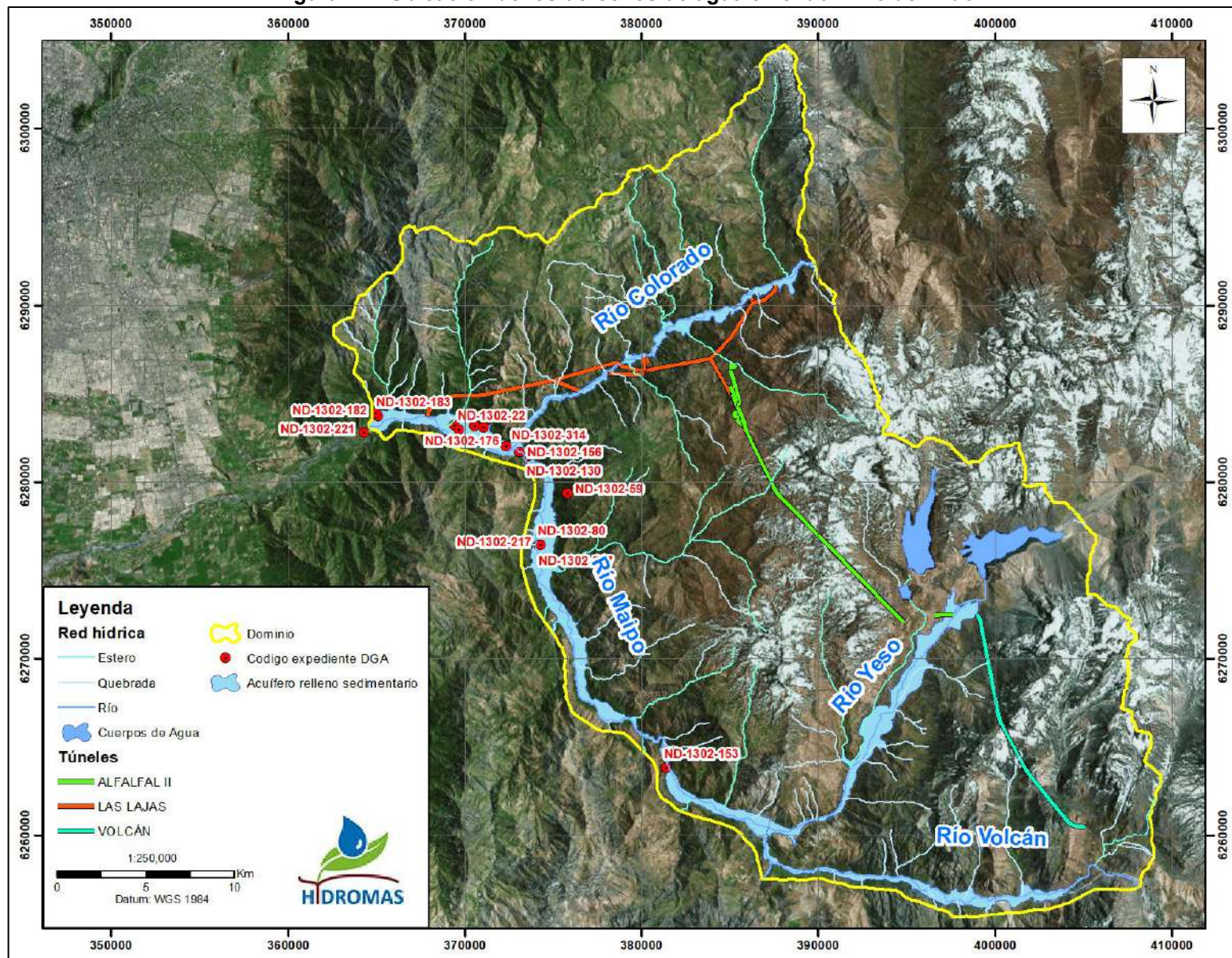
Código de Expediente	UTM Norte Captación(m)	UTM Este Captación(m)	Uso del Agua	Q anual (L/s)
ND-1302-473	6.283.636	364.929	Otros Usos	1
ND-1302-800051				0.4167
ND-1302-266	6.271.530	376.023	Riego	0.1
ND-1302-278	6.283.644	368.600	Riego	2
ND-1302-302	6.282.536	371.157	Riego	2
ND-1302-288	6.260.877	386.217	Riego	0.5
ND-1302-262	6.281.359	361.334	Riego	2
ND-1302-263	6.281.363	361.472	Riego	2
ND-1302-264	6.281.382	361.400	Riego	2
ND-1302-314	6.282.031	372.364	Riego	3.4
ND-1302-183	6.283.729	365.121	Riego	1.4
ND-1302-182	6.283.898	364.975	Riego	3
ND-1302-175	6.283.210	369.409	Riego	7
ND-1302-176	6.283.177	370.567	Riego	5.5
ND-1302-153	6.263.834	381.403	Riego	0.3
ND-1302-156	6.281.706	373.098	Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	10
ND-1302-151	6.283.094	371.064	Riego	3.5
ND-1302-80	6.276.426	374.228	Uso Industrial	24
ND-1302-130	6.281.800	373.830		1.25
ND-1302-59	6.279.370	375.800		0.009
NR-1302-800000*			Agua Potable	300
ND-1302-22				4
UA-1302-802581			Agua Potable	44

Código de Expediente	UTM Norte Captación(m)	UTM Este Captación(m)	Uso del Agua	Q anual (L/s)
UA-1302-802582			Agua Potable	32
ND-1302-221				6
ND-1302-217			Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	44
UA-1302-807285			Riego	2,4
UA-1302-807256			Riego	0,39
UA-1302-807247			Riego	0,39
UA-1302-807258			Riego	0,39

* : Corresponde a un dren superficial, por lo que no es considerado en el total de descarga subterránea

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-4: Ubicación de los derechos de agua en el dominio definido



Fuente: Elaboración Propia

4.2.4 Flujo Subterráneo de Salida en Maipo

Finalmente, en la sección de salida del modelo, aguas debajo del Maipo en el Manzano, se tiene un flujo subterráneo, el cual se estima utilizando la ley de Darcy, cuya expresión es la siguiente:

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

Donde el Q es el caudal pasante por la sección de área A , K es la conductividad hidráulica del relleno sedimentario e i corresponde al gradiente hidráulico. En la Figura 4-5 se presenta una vista en planta de la sección en donde se realiza el cálculo, la flecha azul indica la dirección del flujo subterráneo y en la línea negra segmentada se indican los 2.000 m en donde se realizó la estimación del gradiente hidráulico.

El gradiente hidráulico se calcula como la razón entre una variación de nivel piezométrico que ocurre en una distancia longitudinal determinada. Considerando que entre el nivel piezométrico de 820 msnm y el de 800 msnm existe una distancia longitudinal de 2km el gradiente hidráulico queda determinado por la siguiente expresión:

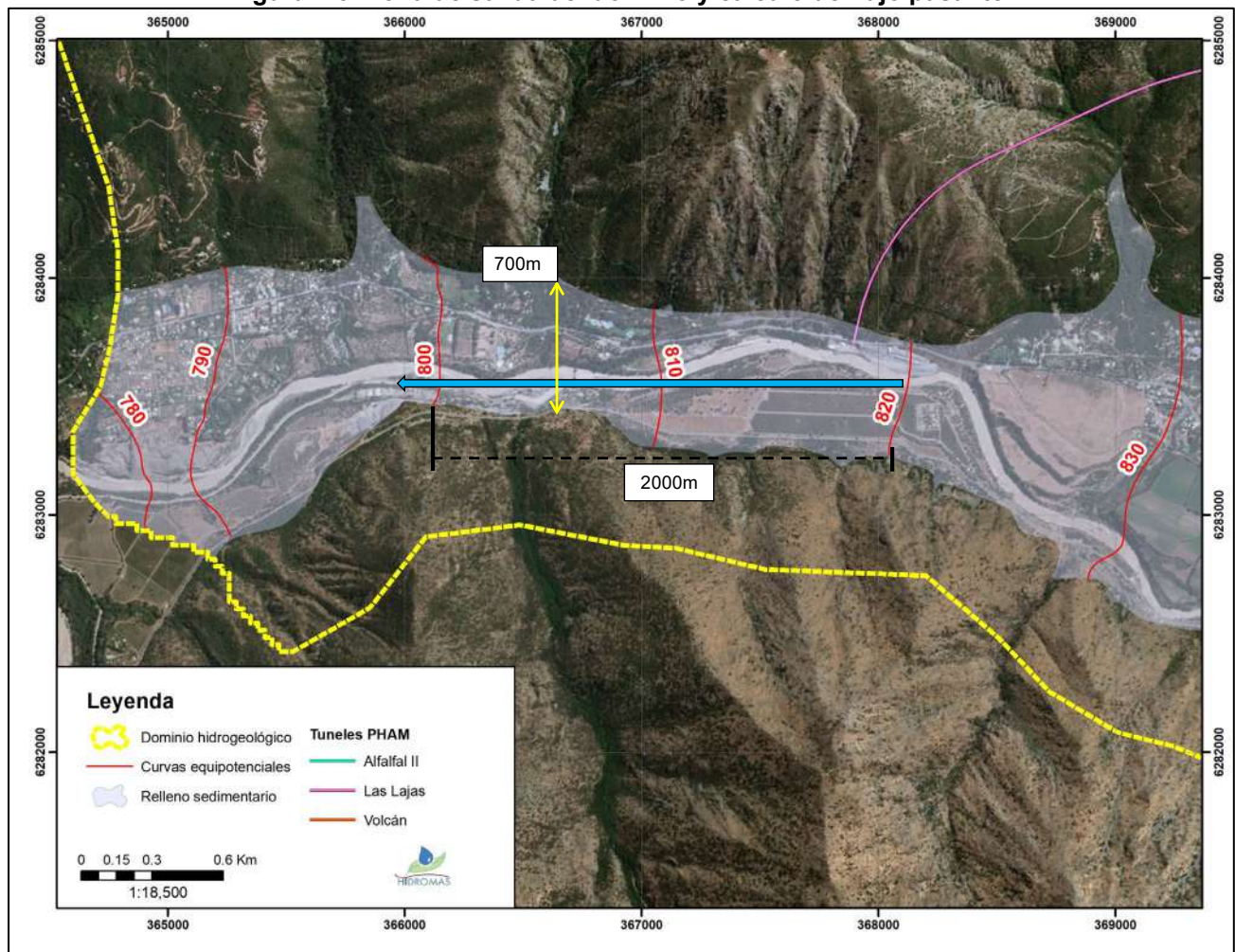
$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{820 - 800}{2000} = 0,01 = 1\%$$

El área transversal por donde pasa el flujo subterráneo depende de la unidad hidrogeológica correspondiente. Considerando secciones rectangulares de un ancho de 700 m, la UH1 posee un espesor de 100 m, UH-2 de 200 m y UH-3 se consideró de 500 m.

Finalmente, los valores de conductividad hidráulica se definieron a partir de los análisis presentados en el acápite 3.4. Para la UH-1 (relleno sedimentario), dado que los rangos definidos por el mínimo y máximo son muy amplios, para efectos de este cálculo se adoptó un rango de permeabilidad que varía entre los percentiles 25 y 75%, de manera de obtener un flujo subterráneo más probable. En la Tabla 4-4 se presenta un resumen de la estimación del flujo subterráneo de salida.

Como se observa en la tabla mencionada, el flujo pasante escurre principalmente por la UH-1, dada su permeabilidad mucho más alta que el sistema de roca, siendo el flujo pasante por el medio rocoso muy bajo en comparación al flujo total. El rango de caudal pasante, dependerá de los valores de conductividad hidráulica, de esta manera el rango definido varía entre 4 y 13 L/s, con un valor medio de 8,2 L/s.

Figura 4-5: Zona de salida del dominio y cálculo de flujo pasante



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4-4. Calculo del flujo subterráneo pasante por cada UH

UH	Litología	Espesor (m)	i (m/m)	K mín. (m/d)	K medio (m/d)	K máx. (m/d)	Q mín. (L/s)	Q medio (L/s)	Q máx. (L/s)
UH-1	Relleno	100	0.01	0.54	1	1.5	4.4	8.1	12.2
UH-2	Roca con mayor fracturamiento	200	0.01	5.4E-04	5.0E-03	4.8E-02	0.0	0.1	0.8
UH-3	Unidad Roca Competente	500	0.01	1.0E-06	2.3E-04	2.7E-03	0.0	0.0	0.1
Total							4.4	8.2	13.0

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Unidad de Roca

4.3.1 Recarga de la Unidad de Roca

La recarga que ingresa en el sistema subterráneo se ha estimado mediante el uso de la metodología del balance hídrico (Anexo 1). De esta forma, la recarga subterránea corresponde a un porcentaje de la precipitación total distribuida en el área de estudio, este porcentaje varía según propiedades morfológicas de las subcuencas hidrológicas, como también de las propiedades hidrogeológicas de las unidades en las cuales se distribuye la precipitación.

En el dominio de estudio se establece que el régimen hidrológico es del tipo nival, en donde los escurrimientos superficiales presentan sus mayores caudales durante el período de deshielo (entre noviembre y enero). Del mismo modo, las precipitaciones ocurren durante los meses de invierno, presentándose en forma líquida y en forma de nieve para cotas mayores. Debido a la variabilidad en altura de las precipitaciones, se determinó un gradiente de precipitación-elevación para determinar la precipitación total en todo el dominio.

La recarga de la unidad de roca, la cual posee una permeabilidad baja a nula, es la que da sustento a los distintos aportes laterales de quebradas o esteros que confluyen a los sistemas acuíferos definidos en el acápite 3.2. En estas unidades, se distinguen dos tipos de subcuencas, aquellas dominadas principalmente por la componente pluvial y las dominadas por el aporte nival (Anexo 1).

Para estimar la recarga del sistema de roca R_R , se consideró que ésta se relaciona como un coeficiente del volumen de precipitación anual y un coeficiente del volumen de nieve anual caída equivalente en agua, tal como se explica en la siguiente expresión:

$$R_R = \alpha \cdot Q_P + \beta \cdot Q_N$$

Donde, R_R es la recarga al sistema de roca, Q_P es el aporte pluvial a nivel anual, Q_N el aporte nival a nivel anual y α , β son coeficientes que representan la cantidad de agua que efectivamente llega al sistema subterráneo. Para el sistema de roca, se ha considerado que la recarga es aproximadamente la descarga por afloramientos o flujo base subterránea obtenido desde la campaña de aforos de abril 2018. Al respecto, la metodología de balance hídrico permitió identificar que existen tres tipos de comportamiento, las que se describen a continuación:

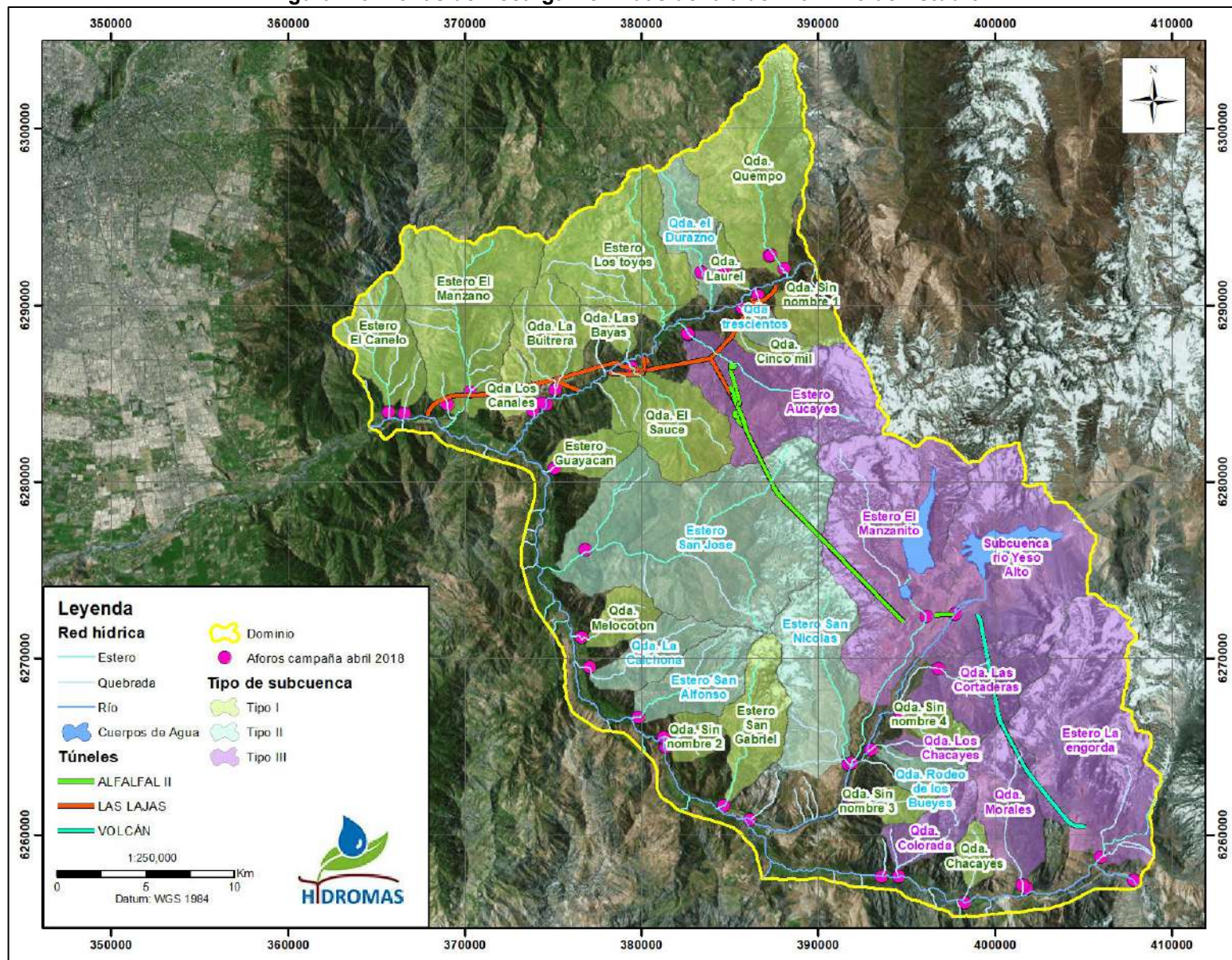
- **Tipo I:** Corresponden a las subcuencas dominadas por la componente pluvial que se caracterizan por estar ubicadas en sectores bajos principalmente, y de menor tamaño con respecto a las otras. Para estos sistemas, considerando $\alpha = \beta = 3\%$, el valor de la recarga en la unidad de roca es consistente con el monto de la descarga obtenida a partir del aforo.
- **Tipo II:** Corresponden a las subcuencas de mayor elevación, lo que implica una mayor cobertura nival y mayores precipitaciones. Para estos sistemas, considerando un $\alpha = 5\%$ y un $\beta = 15\%$, el valor de la recarga en la unidad de roca es consistente con el monto de la descarga obtenida a partir del aforo.
- **Tipo III.** Corresponden a aquellas subcuencas que poseen un área glaciar importante, se constató que los caudales de flujo base aforado en la campaña de abril 2018 son muy elevados para ser considerados como flujo base subterráneo aportados por medio de la recarga, dadas las condiciones geológicas de baja permeabilidad predominantes en el sector. Por lo tanto, debido a las características de las unidades, es posible utilizar los mismos coeficientes determinados para la estimación de

recarga en las cuencas nivales ($\alpha = 5\%$ y un $\beta = 15\%$). La diferencia entre el flujo base aforado y la recarga estimada, se considera como aporte glaciar, ya que, en el periodo de abril, si bien no hay aporte pluvial o nival, la componente glaciar puede aportar entre un 25 a 90% de los flujos superficiales medidos (Castillo, 2015).

En la Figura 4-6 se presenta la ubicación espacial de las zonas de recarga definidas según la unidad hidrogeológica a la cual pertenecen. Del mismo modo en la Tabla 4-5 se presentan las magnitudes de recarga subterránea estimadas para cada unidad dentro del dominio de estudio.

A partir de estos resultados, se establece que los mayores valores de recarga corresponden a los ingresados a los sistemas de acuífero definidos en los rellenos sedimentarios correspondientes. De esta forma, la recarga del sistema de roca se estima en 1.403 L/s.

Figura 4-6: Zonas de Recarga Definidas dentro del Dominio de Estudio



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4-5: Recarga de las unidades de roca dentro del Dominio

Subsistema	Unidad en sistema de roca	Tipo	Qp (L/s)	Qn (L/s)	Recarga (L/s)
Río Colorado	Qda. Quempo	I	767	572	40
	Qda. Sin nombre 1	I	665	37	21
	Qda. Laurel	I	63	0	2
	Qda. El Durazno	II	335	72	28
	Qda. Trescientos	II	92	12	3
	Qda. Cinco mil	I	74	28	3
	Estero Los Toyos	I	892	42	28
	Estero Aucayes	III	743	512	114
	Qda. Las Bayas	I	63	0	2
	Qda. El Sauce	I	482	24	15
	Qda. La Buitrera	I	417	0	13
	Qda. Los Canales	I	129	0	4
	Total Unidad de roca subsistema río Colorado		4.722	1.300	272
Río Yeso	Estero El Manzanito	I	982	1.067	209
	Yeso Alto	III	784	852	167
	Qda. Las Cortaderas	III	275	330	63
	Estero San Nicolas	III	686	444	101
	Qda. Sin nombre 4	I	86	76	5
	Qda. Los Chacayes	I	168	129	28
	Qda. Rodeo de los Bueyes	II	119	66	16
	Qda. Sin Nombre 3	I	125	66	6
	Total Unidad de roca subsistema río Yeso		3.224	3.030	584
Río Volcán	Estero La Engorda	III	332	616	109
	Qda. Morales	III	367	236	54
	Qda. Chacayes	I	105	43	4
	Qda. Coloradas	III	114	114	23
	Total Unidad de roca subcuenca río Yeso		918	1.008	190
Río Maipo	Estero San Gabriel	I	382	211	18
	Qda. Sin nombre 2	I	100	0	2
	Estero San Alfonso	II	410	125	39
	Qda. La Calchona	II	309	49	23
	Qda. Melocotón	I	180	1	5
	Estero San José	II	1.985	765	214
	Estero Guayacán	I	188	0	6
	Estero El Manzano	I	1.172	99	38
	Estero El Canelo	I	390	28	13
	Total unidad de roca Cuenca río Maipo		5.017	1.277	358

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Estimación de las descargas

Las descargas del sistema están asociadas a tres efectos principalmente, éstos son: afloramientos por flujo base, caudales drenados por los túneles y extracciones de aguas subterráneas. A continuación, se describen cada una de estas descargas.

4.3.2.1 Afloramientos por flujo base subterráneo

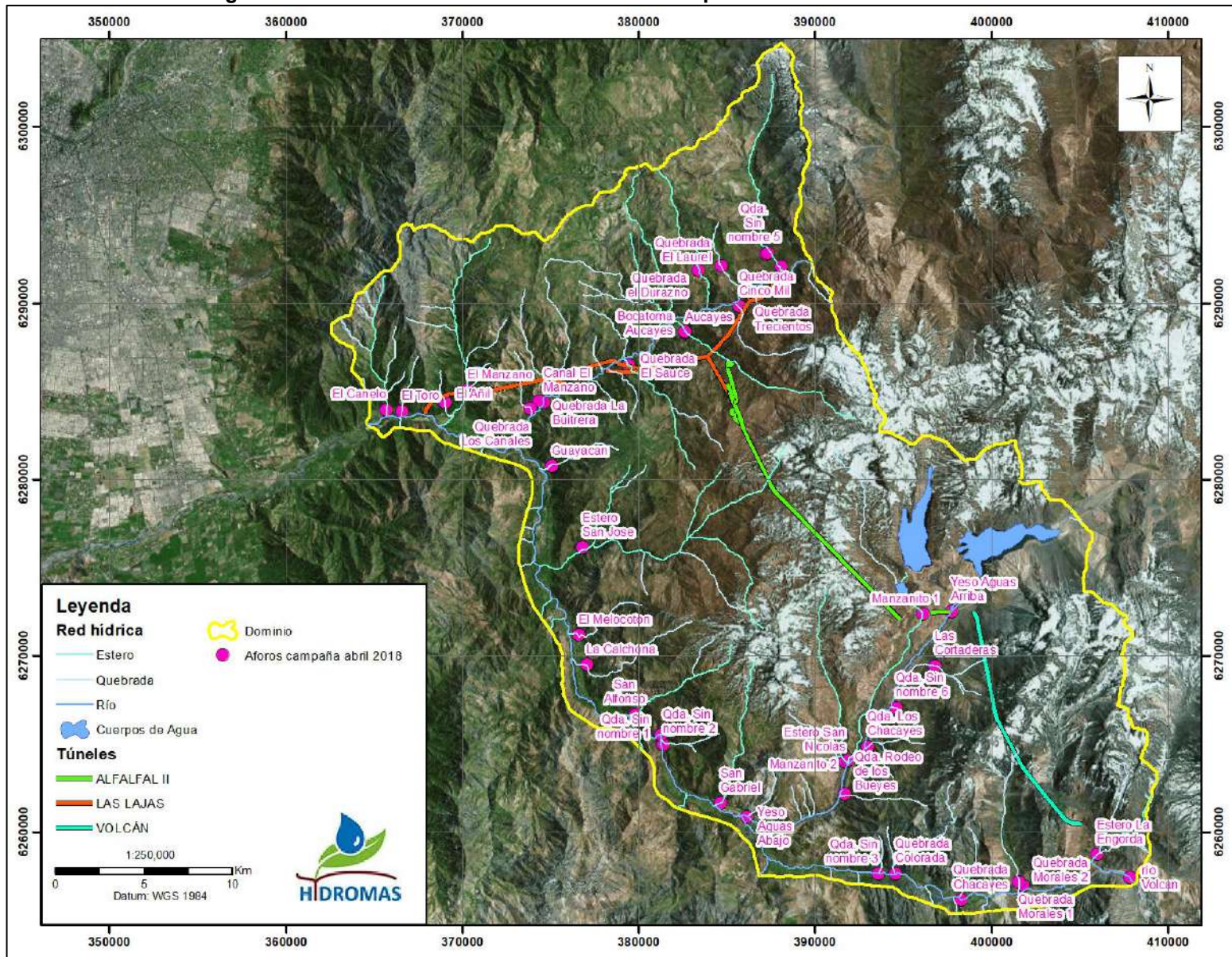
Se ha identificado, como salida del sistema subterráneo los afloramientos existentes en los cauces dentro del dominio ya sean ríos, esteros o quebradas.

Con objeto de cuantificar el aporte subterráneo de las quebradas laterales asociadas al sistema de roca, se realizó una campaña de aforos del caudal superficial pasante por cada una de éstas. Esta campaña fue realizada en abril de 2018, considerando que en este periodo no existen precipitaciones y tampoco nieve, por lo que la mayor componente del flujo superficial proviene desde el flujo base subterráneo.

Cabe mencionar, que en aquellos sistemas que contienen fuente glaciar, un porcentaje importante del flujo base es alimentado por el deshielo glaciar (Castillo, 2015), por lo que esta componente debe ser considerada para estimar el flujo base subterráneo. De esta forma, aquellas cuencas en donde el área glaciar aportante es importante, como por ejemplo El Estero La Engorda, Quebrada Morales o El Estero Aucayes entre otras, la magnitud del caudal superficial, se ve fuertemente influenciado por el aporte glaciar del sistema, de manera que la recarga es un porcentaje menor del aforo realizado.

En total, se aforaron caudales en 42 puntos distribuidos a lo largo del área. En la Figura 4-7 se presenta la distribución espacial de los aforos realizados, mientras que en la Tabla 4-6 se resumen los caudales obtenidos.

Figura 4-7: Ubicación de los Aforos de Caudal Superficial Realizados en Abril 2018



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4-6: Flujo Base Subterráneo Estimado de Campaña de Aforos de Abril 2018

	Subsistema	Recarga (L/s)	Flujo base Aforado (L/s)	Flujo base subterráneo (L/s)	Estimación aporte Glaciar (L/s)
Río Colorado	Qda. Quempo	27	33	33	-
	Qda. Sin nombre 1	14	sin aforo	14 ^(*)	-
	Qda. Laurel	1	0	0	-
	Qda. El Durazno	28	20	20	-
	Qda. Trescientos	6	12	12	-
	Qda. Cinco mil	2	0	0	-
	Estero Los Toyos	19	sin aforo	19 ^(*)	-
	Estero Aucayes	114	255	114	141
	Qda. Las Bayas	1	sin aforo	1 ^(*)	-
	Qda. El Sauce	10	0	0	-
	Qda. La Buitrera	8	7	7	-
	Qda. Los Canales	3	0	0	-
	Total Unidad de roca subcuenca río Colorado	233	327	220	141
Río Yeso	Estero El Manzanito	209	195	195	-
	Yeso Alto	167	sin aforo	167 ^(*)	-
	Qda. Las Cortaderas	63	136	63	73
	Estero San Nicolas	101	175	101	74
	Qda. Sin nombre 4	3	5	5	-
	Qda. Los Chacayes	28	99	28	71
	Qda. Rodeo de los Bueyes	16	13	13	-
	Qda. Sin Nombre 3	4	0	4	-
	Total Unidad de roca subcuenca río Yeso	591	623	576	218
Río Volcán	Estero La Engorda	109	2.269	109	2.160
	Qda. Morales	54	409	54	355
	Qda. Chacayes	3	0	0	-
	Qda. Coloradas	44	101	44	57
	Total Unidad de roca subcuenca río Volcán	210	2.779	207	2.572
Río Maipo	Estero San Gabriel	12	1	1	-
	Qda. Sin nombre 2	2	0	0	-
	Estero San Alfonso	39	26	26	-
	Qda. La Calchona	23	14	14	-
	Qda. Melocotón	4	2	2	-
	Estero San José	214	204	204	-
	Estero Guayacán	4	0	0	-
	Estero El Manzano	25	26	26	-
	Estero El Canelo	8	5	5	-
	Total unidad de roca Cuenca río Maipo	331	278	278	-

^(*): Para los puntos sin aforo manual, se consideró que el flujo base subterráneo es equivalente a la recarga

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2 Caudal aflorado de los túneles

El PHAM considera un total de aproximadamente 55 km de túneles hidráulicos que conducirán el agua para la generación eléctrica. Estos se dividen en tres tramos correspondientes a las dos centrales del proyecto, estos son: Túnel Las Lajas, Alfalfal y Volcán.

A medida que se avanza en la construcción de los túneles, se registran afloramientos de agua al interior de estos, según lo presentado en el Anexo 3, estos afloramientos se deben a la presencia de estructuras geológicas que conectan el túnel con el sistema de roca. Las aguas afloradas son conducidas por tuberías hacia el exterior de cada portal, en donde son tratadas y devueltas a un cauce superficial.

En los portales de los túneles, se cuenta con flujómetros volumétricos que registran el caudal que está saliendo desde el interior de éstos, lo que permite contar con una estimación del caudal total aflorado de cada túnel a medida que se progresa en el avance de excavación. En la Tabla 4-7 se presenta un resumen con los caudales medios mensuales del primer semestre del año 2018 medido en cada portal.

En la Figura 4-8 se presenta la ubicación de los portales en los cuales se registra el caudal aflorado desde el interior de los túneles.

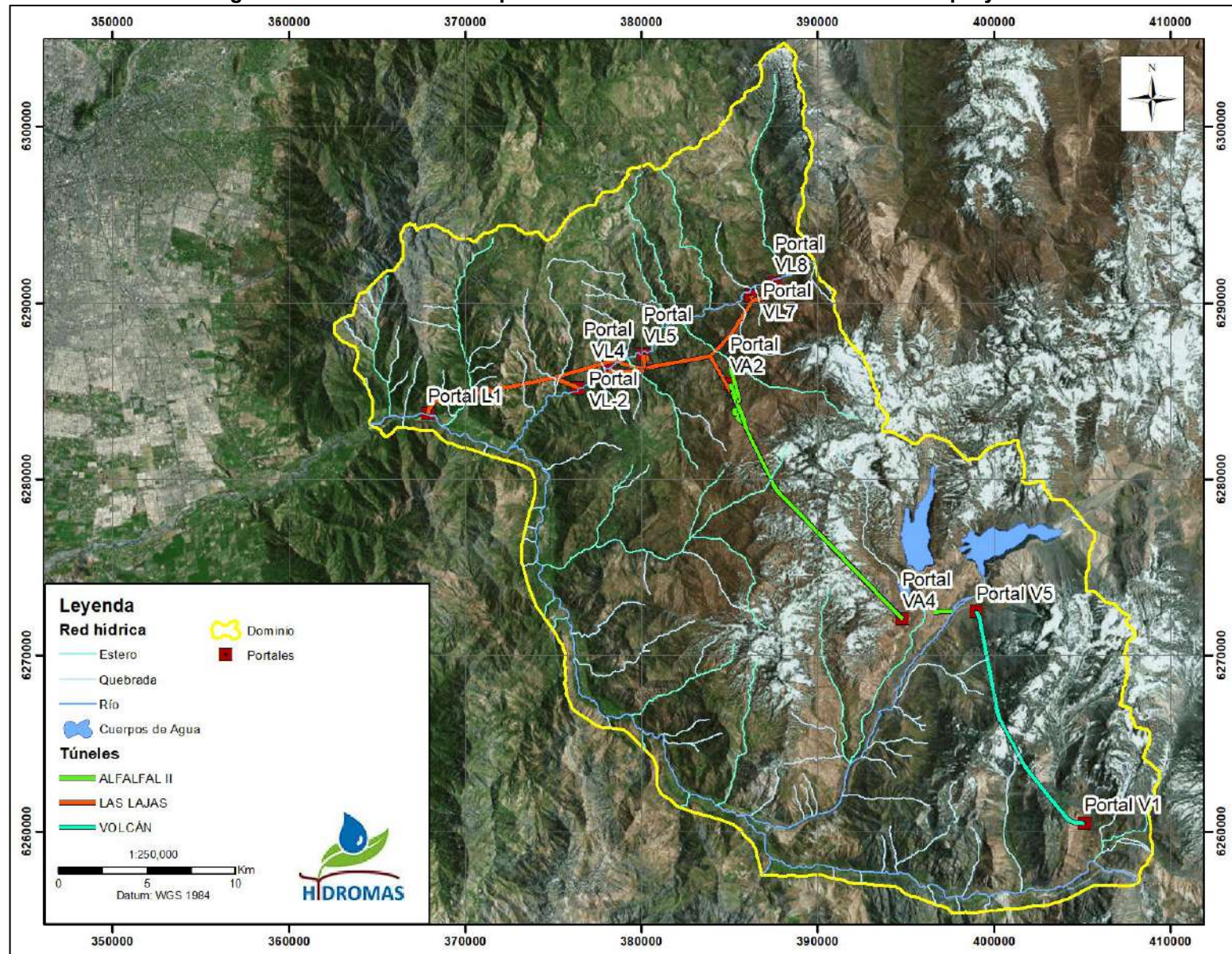
En las Figura 4-9 a 4-16 se presentan las series temporales de caudal aflorados registrados por los flujómetros instalados en la salida de los portales de los túneles del PHAM.

Tabla 4-7: Caudales medios mensuales del primer semestre del año 2018, medidos en la salida de los portales

Sistema	Portal	Caudal Medio Primer Semestre de 2018 (L/s)
Volcán	V1	9
	V5	8
Alfalfal	VA1	1
	VA2	3
	VA4	11
Las Lajas	L1	45
	VL-4	67
	VL-5	13
	VL7	2
Total		159

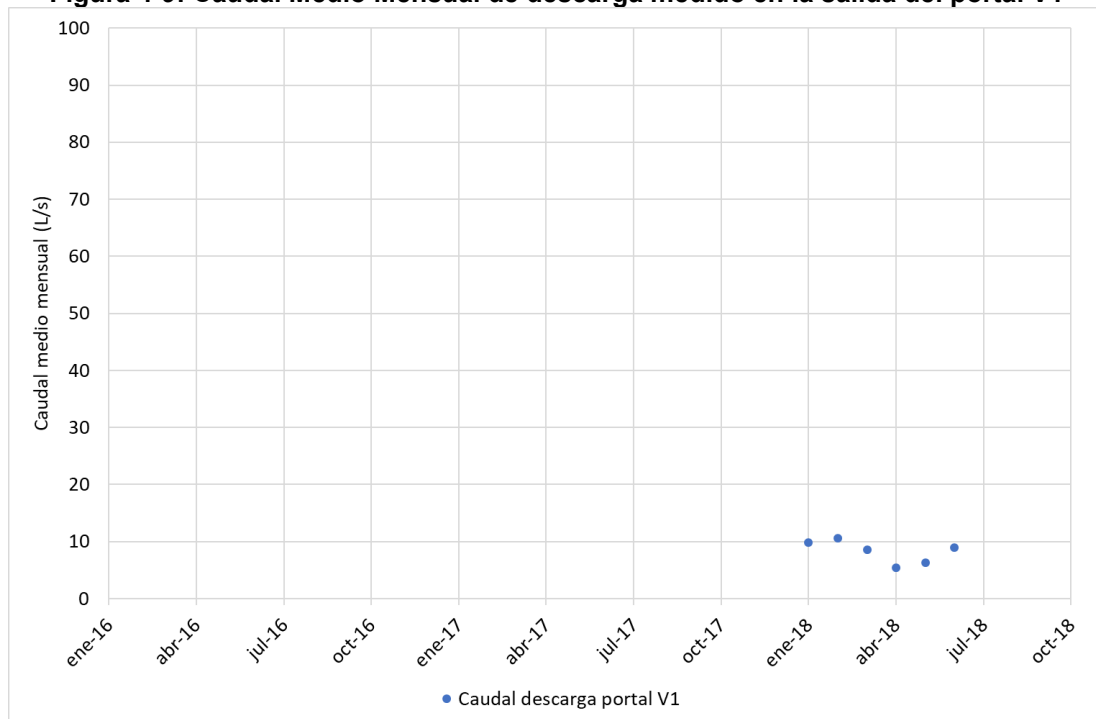
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-8: Ubicación de los portales de entrada/salida de los túneles del proyecto



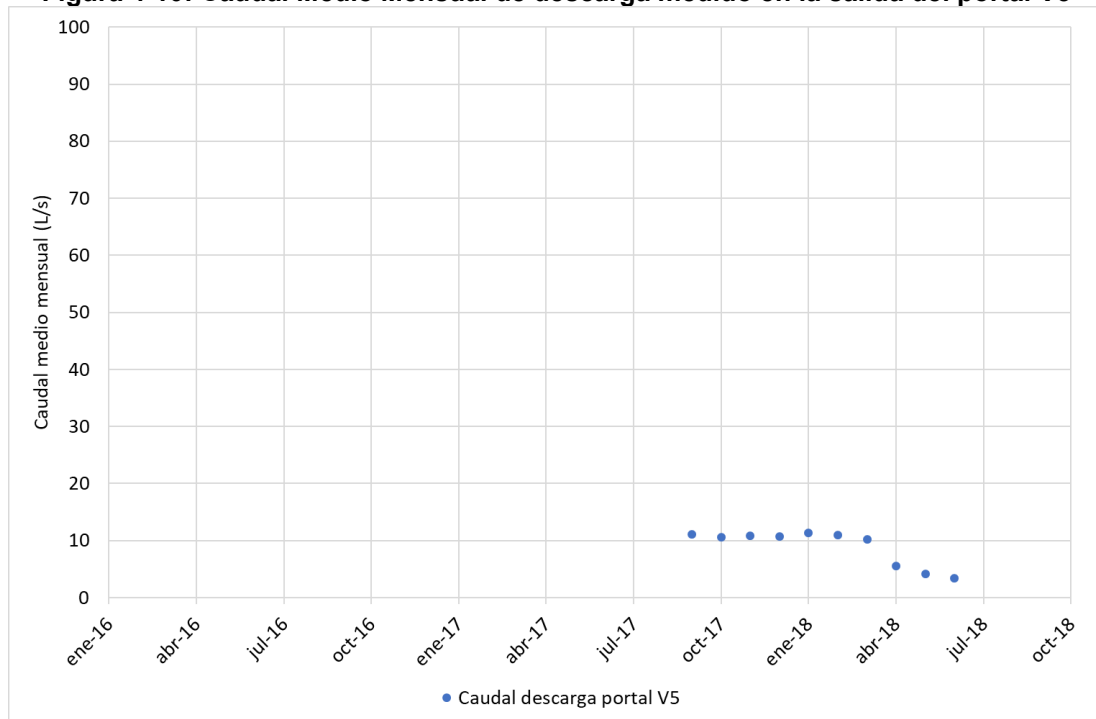
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-9: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal V1



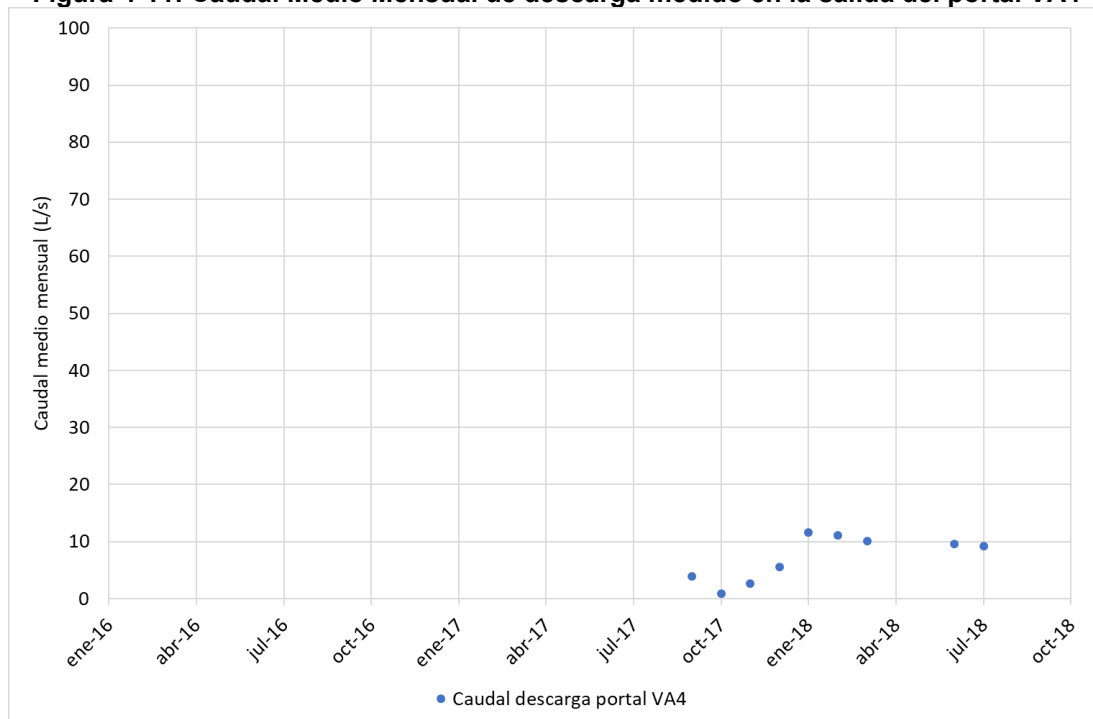
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-10: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal V5



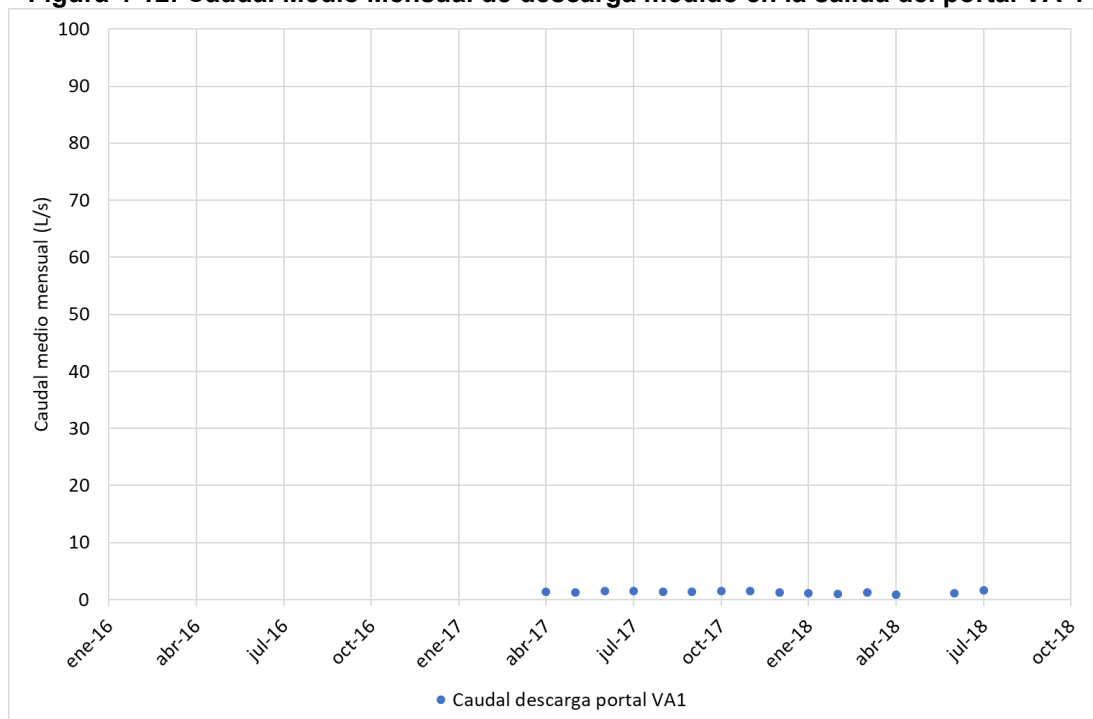
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-11: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VA4



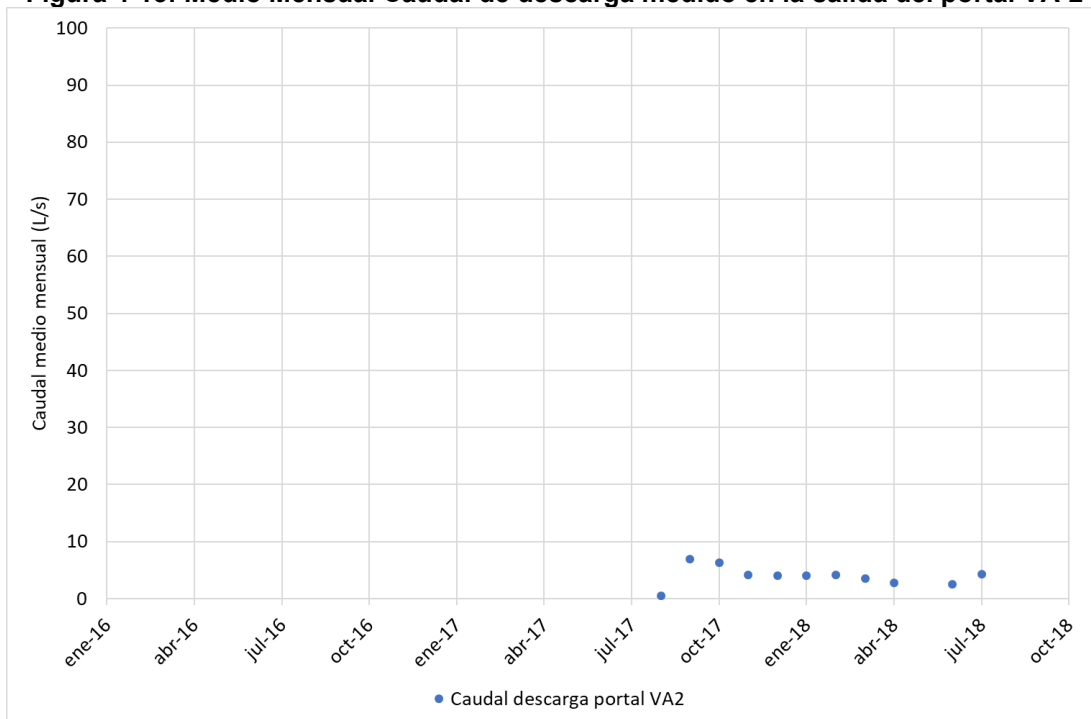
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-12: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VA-1



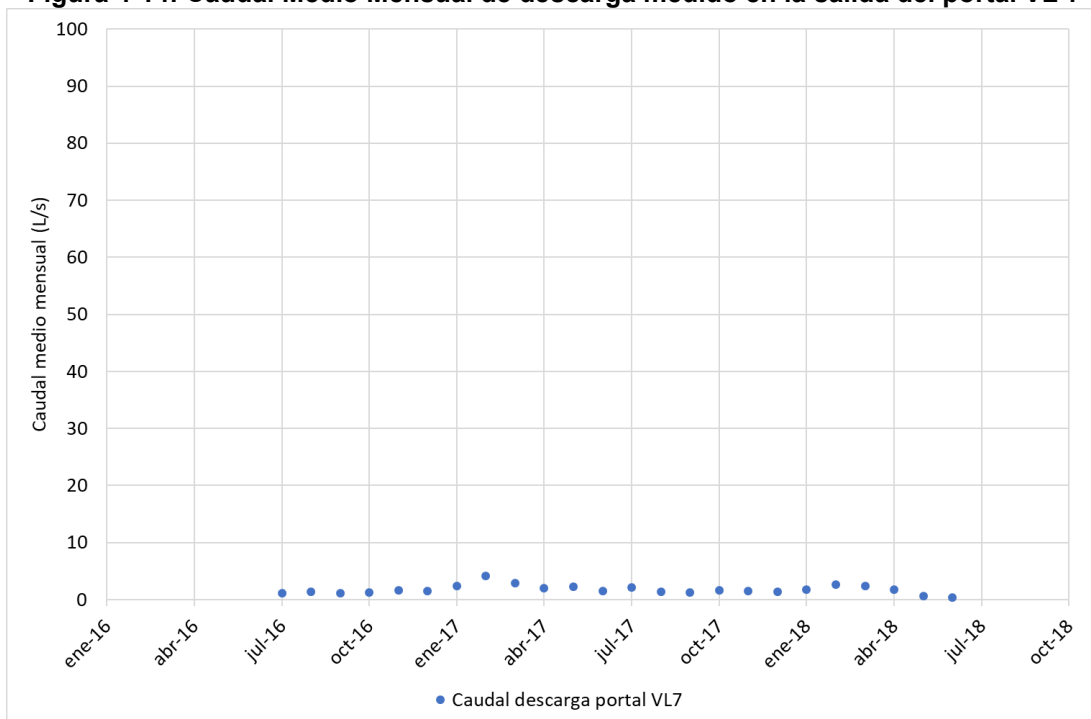
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-13: Medio Mensual Caudal de descarga medido en la salida del portal VA-2



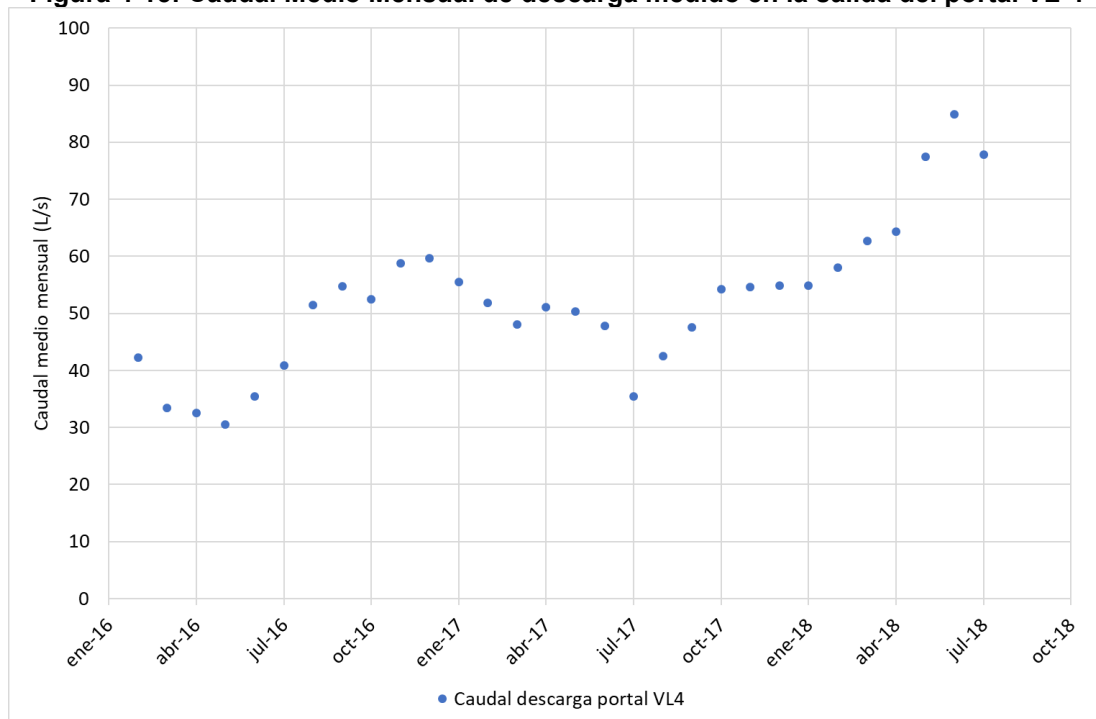
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-14: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VL-7



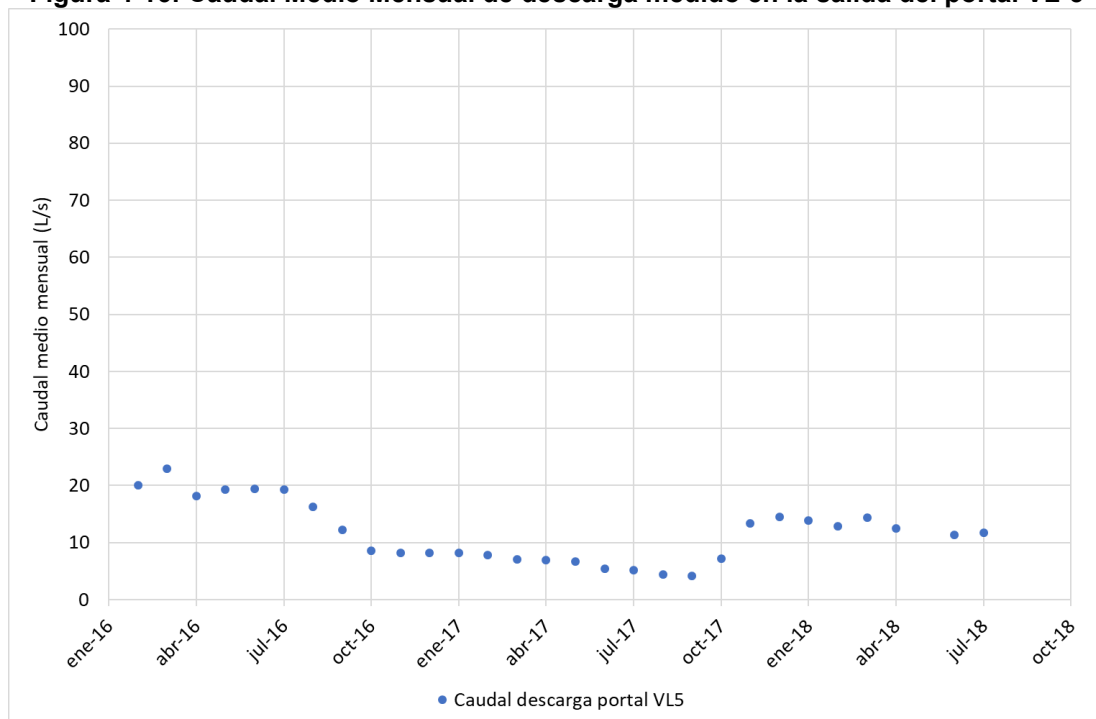
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-15: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VL-4



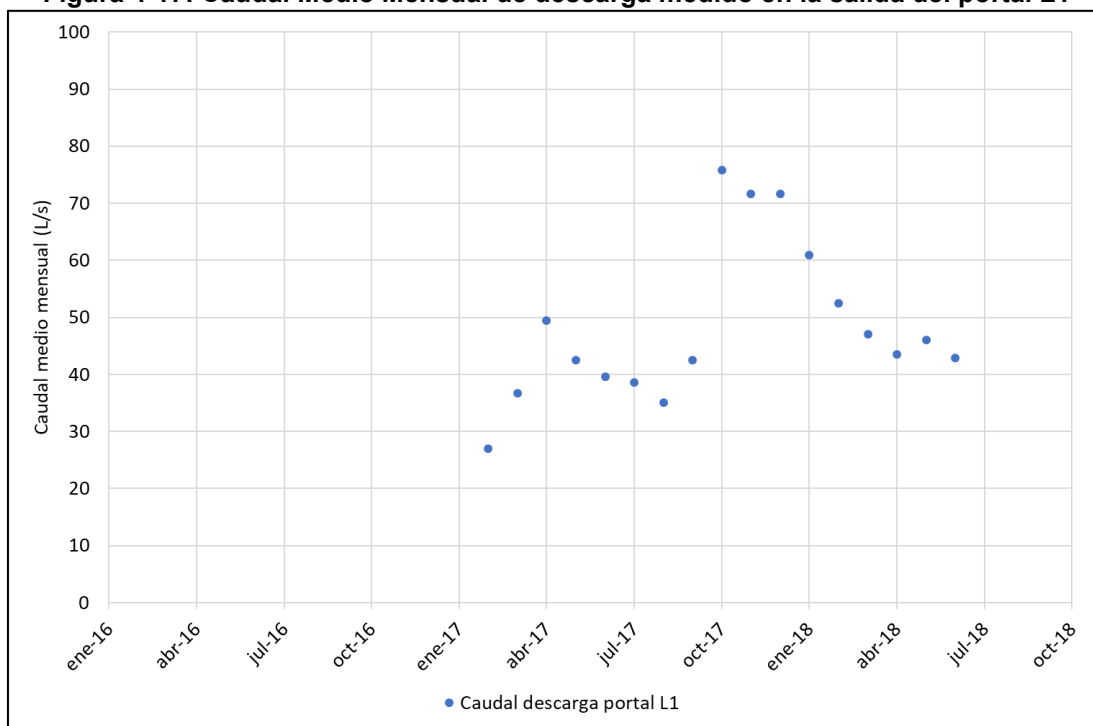
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-16: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal VL-5



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-17: Caudal Medio Mensual de descarga medido en la salida del portal L1



Fuente: Elaboración Propia

4.4 Balance hídrico global de la zona de estudio

A partir de las distintas componentes descritas anteriormente, es posible establecer un balance hídrico dentro del dominio del modelo hidrogeológico conceptual, considerando todas las entradas y salidas del sistema subterráneo. Los resultados de este balance son consistentes con un sistema que se encuentra en equilibrio, dada la similitud en las magnitudes de entrada y salida, y el bajo nivel de explotación de aguas subterráneas desde el acuífero sedimentario.

La entrada al sistema hidrogeológico corresponde a la recarga superficial, la que proviene desde la precipitación líquida y sólida. Según lo presentado en los acápites 4.2.2 y 4.3.1, la recarga total al sistema es de 6.928 L/s.

Con respecto a las salidas, éstas son principalmente a través del flujo base subterráneo o afloramiento neto en cada sistema asociado a los cuatro cauces principales del área de estudio, río Colorado, Yeso, Volcán y Maipo. La descarga total del sistema se estimó en 7.196 L/s. Con este resultado del balance hídrico se puede indicar que las entradas y salidas son similares y se refleja la condición de equilibrio. La diferencia de cierre de balance responde a que éste se implementó usando metodologías independientes en la estimación de recargas y descargas.

Las extracciones por bombeo se encuentran localizadas en el relleno sedimentario del río Maipo (UH-1). De acuerdo con la información del Catastro Público de Aguas (CPA), la demanda otorgada de derechos de aguas subterráneas suma en total 243 L/s en derechos constituidos, lo que es bajo en comparación con la recarga hidrológica del sistema. Considerando que este es un valor nominal de derecho, la extracción real debería estar por debajo de esta magnitud, el presente balance se consideró un factor de uso promedio de un 50%.

Otra salida corresponde al caudal aflorado por los túneles desde el sistema de roca. De acuerdo con la configuración del modelo conceptual, el túnel se encuentra contenido en las unidades hidrogeológicas UH-2 y UH-3 en toda su extensión. En base a la información de conductividad hidráulica, los tramos de túnel que se encuentran a profundidad mayor de 200 m desde la superficie del terreno, tienen baja probabilidad de producir efectos en superficie y el agua aflorada responde a agua almacenada en el sistema de roca. El caudal de afloramiento desde los túneles construidos se estima en, aproximadamente, 159 l/s para el primer semestre de 2018. Esta salida desde la unidad de roca es conducida a la salida del portal en cada tramo de túnel y se descarga al cauce correspondiente para no afectar la disponibilidad de aguas superficiales en el río Maipo.

En la Tabla 4-8 se presenta un resumen del balance hídrico conceptual considerado.

Tabla 4-8: Resumen Balance Hídrico Conceptual

Entradas	L/s	Salidas	L/s
Recarga sistema rocoso	1.403	Descarga sistema rocoso	1.267
Colorado	271	Colorado	236
Yeso	584	Yeso	568
Volcán	190	Volcán	185
Maipo	358	Maipo	278
Recarga sedimentario	5.524	Descarga sedimentario	5.642
Colorado	1.112	Colorado	1.273
Yeso	1.079	Yeso	1.204
Volcán	1.295	Volcán	1.200
Maipo	2.038	Maipo	1.965
		Otras descargas	287
		Extracciones bombeo	122
		Flujo subterráneo salida	8
		Afloramiento túneles (*)	159
Total	6.928	Total	7.198

(*) Se considera en términos medios para el período del primer semestre del 2018

Fuente: Elaboración propia

5 CONSTRUCCIÓN MODELO NUMÉRICO

5.1 Aspectos Generales

Para el desarrollo del modelo numérico del sector en que se emplaza el proyecto, se ha seleccionado el software GMS (Groundwater Modelig System), debido a que presenta ventajas comparativas y flexibilidad para la elaboración de modelos conceptuales, que permiten construir modelos numéricos 3D de forma rápida y simple. Este software es considerado por la “Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA” (SEA, 2012), como uno de los recomendados para realizar modelos hidrogeológicos aplicados a la mayoría de los problemas en Chile, y es equivalente a otros como *Model Muse* de USGS (*United States Geological Services*), *Visual MODFLOW* o *GroundWater Vistas*.

El dominio de modelación se emplaza, mayoritariamente, en un sistema de roca, con condiciones hidrogeológicas de baja permeabilidad. En este sistema de roca se ha identificado que la parte superficial corresponde a una roca fracturada y bajo los 200 metros se encontraría una roca de menor permeabilidad con características de basamento impermeable. Ambos sistemas podrían eventualmente ser conectados mediante fallas, que corresponde al mecanismo de ingreso de aguas de afloramiento en los sistemas de túneles del proyecto. En una menor proporción, es factible encontrar el acuífero sedimentario, asociado a los principales sistemas de drenaje vinculados a los ríos Colorado, Yeso, Volcán y Maipo. Sin embargo, ha sido sólo el relleno sedimentario del río Maipo el que ha presentado mayor interés hidrogeológico por cuanto ahí se emplazan los derechos de aguas subterráneas otorgados por la DGA.

Para resolver el problema de flujo y representar tanto las unidades hidrogeológicas consideradas como el proyecto lineal de los túneles, se ha seleccionado el motor de cálculo *MODFLOW USG*, debido a que permite trabajar con grillas no estructuradas. La flexibilidad en el tamaño de la grilla permite enfocar la resolución del problema en el eje del sistema de túneles hidráulicos del proyecto, y representar adecuadamente el drenaje de quebradas en los sistemas de rocas, los ríos principales como Colorado, Yeso y Maipo; y las fallas geológicas principales que conectan las unidades hidrogeológicas consideradas para el sistema de roca.

MODFLOW USG, es basado en el método numérico de volúmenes finitos y además usa opcionalmente *Newton Raphson*, basado en *MODFLOW NWT*, para mejorar la convergencia de la solución, resolviendo el problema de secado y re-humedecimiento de las celdas. También se incorpora el *solver SMS (Sparse Matrix Solver Package)*, que provee varios métodos para resolver las no-linealidades de la matriz proveniente de las expresiones de flujo y de la formulación de *Newton Raphson*.

5.2 Dominio y Geometría

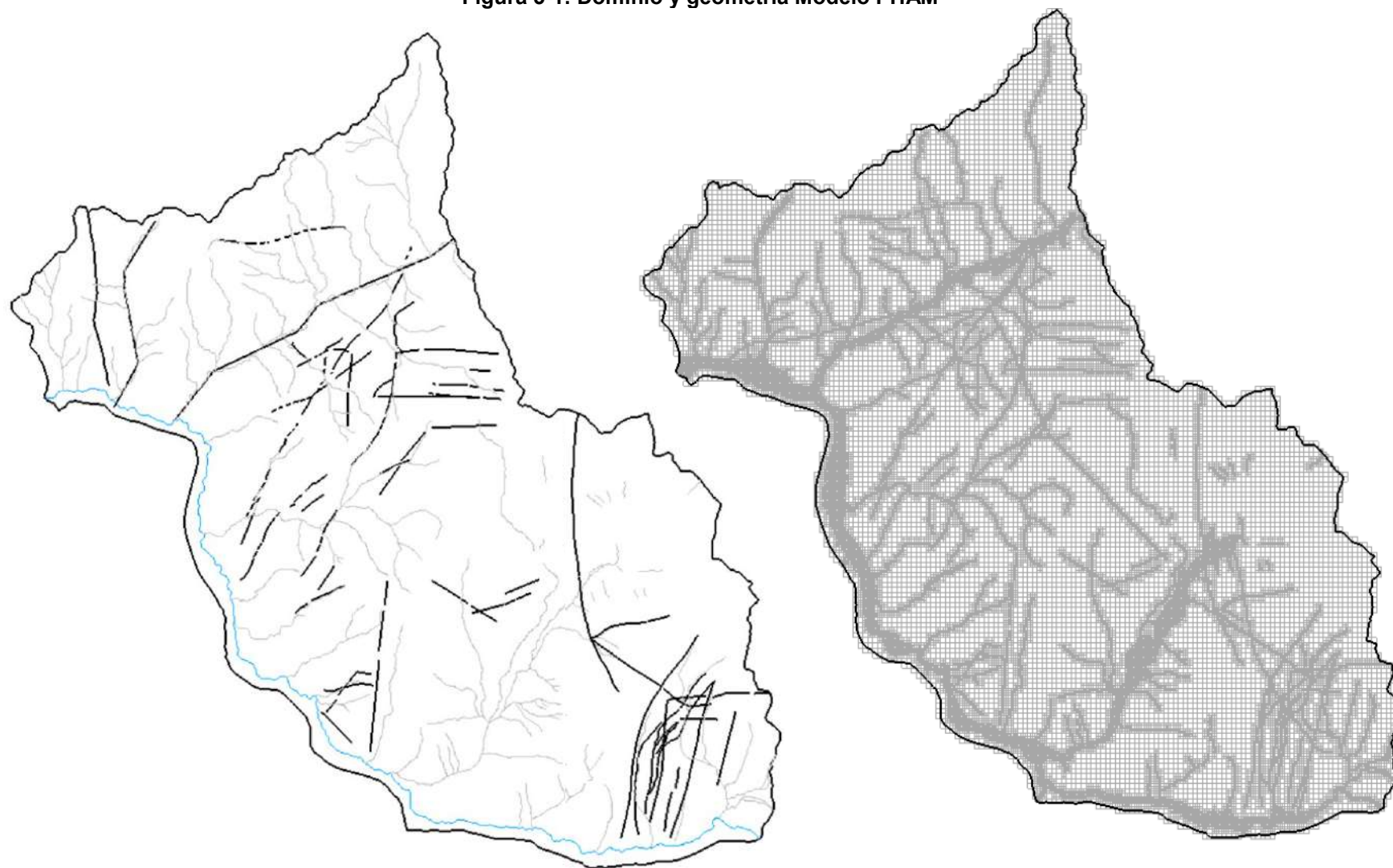
El dominio del modelo fue definido como parte del modelo conceptual, a modo de representar la interacción de los túneles del proyecto y el sistema de roca en que se emplazan. El dominio del modelo PHAM incluye los depósitos no consolidados que definen el sistema acuífero y la unidad de roca en la cual se encuentra el túnel. La Figura 5-1 muestra el dominio del acuífero en el modelo numérico

El techo o superficie del sistema hidrogeológico a modelar corresponde al nivel de terreno, el cual se obtuvo desde dos fuentes principales. La primera consiste en una topografía de detalle obtenida mediante un vuelo LIDAR realizado por PHAM, la cual abarca principalmente la zona de los túneles del proyecto. Para complementar la topografía, se utilizó un modelo de elevación digital SRTM (Acrónimo en inglés de *Shuttle*

Radar Topography Mission). SRTM es un producto de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) de EEUU. En la Figura 5-2 se muestra la topografía del sistema.

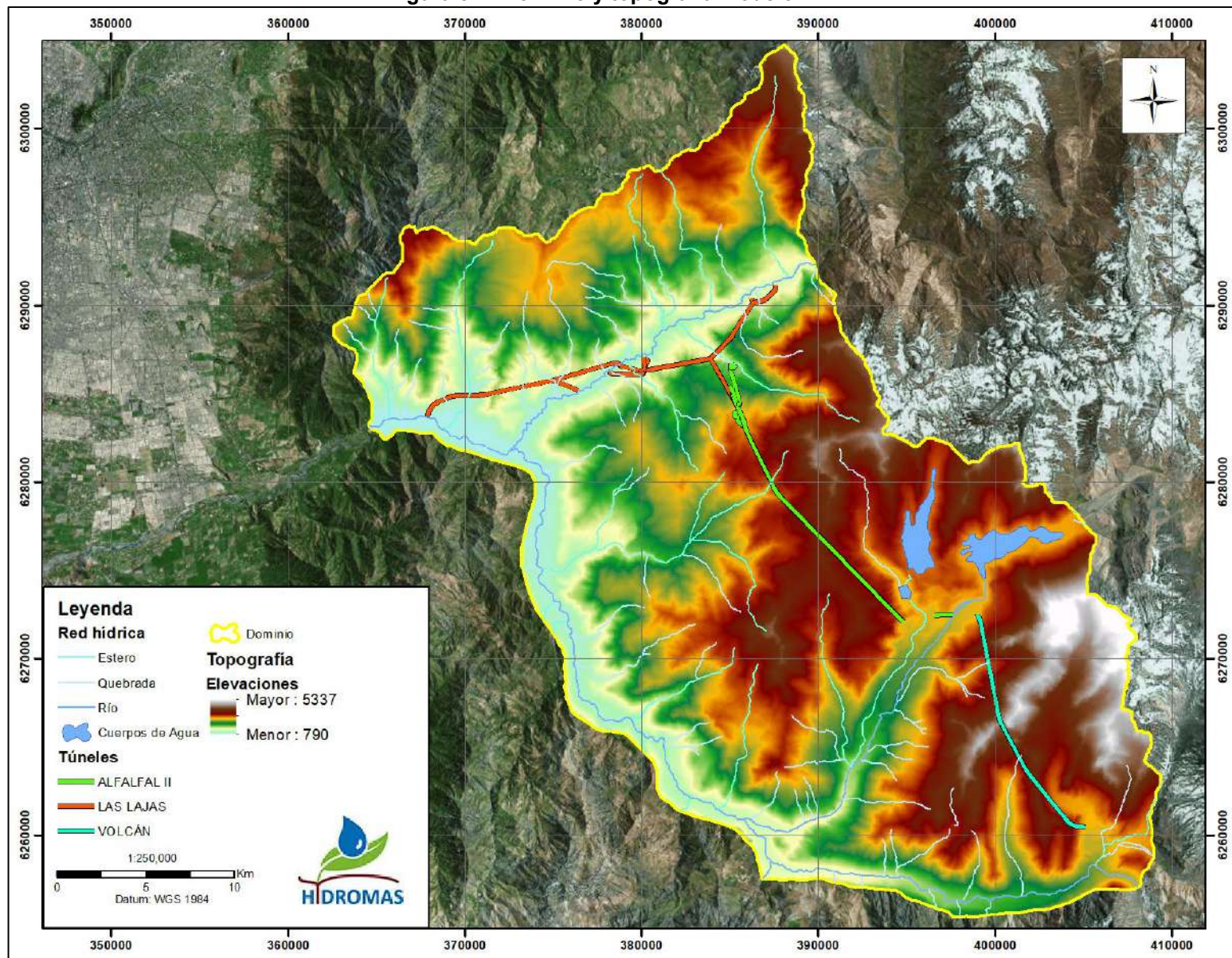
A partir de la información del proyecto, basado en información de geofísica, geología y permeabilidades de las unidades geológicas, es posible identificar una unidad hidrogeológica de baja a nula permeabilidad (UH-3), por debajo de los 200 metros desde el terreno. Sin embargo, este medio que en una caracterización hidrogeológica correspondería a un basamento, ha sido representado en el modelo para representar la interacción del túnel y las estructuras (UH-4), que se ha supuesto conectan el sistema profundo con el sistema subsuperficial (UH-2), como una condición más desfavorable.

Figura 5-1: Dominio y geometría Modelo PHAM



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2: Dominio y topografía Modelo PHAM



Fuente: Elaboración Propia

5.3 Definición de la Grilla

Para la construcción del modelo numérico, se ha definido una grilla de tipo no estructurada, basada en el método *Quadtree*, que permite generar grillas muy refinadas en sectores de interés o que requieran un mayor detalle en la solución del problema numérico como en pozos, ríos y condiciones de borde.

La discretización adoptada en el modelo numérico se describe a continuación:

- Se define 300m x 300m como el tamaño máximo de la grilla definida para el modelo numérico. En sectores alejados de puntos de interés, se pueden encontrar este tipo de elementos y se asocian principalmente al sistema de roca (UH-2 y UH-3).
- 75m x 75m en sectores asociados a los depósitos no consolidados que corresponden a la UH-1.
- 75m x 75m en los cauces de quebradas de los sistemas de roca afluentes a los ríos principales del Yeso, Volcán, Colorado y Maipo.
- 75m x 75m en zonas de fallas principales observadas, que conforman la UH-4.
- Cabe mencionar que la malla *Quadtree*, define una transición en la grilla, en que se pasa de elementos menores de 75m x 75m a elementos de 150m x 150m hasta llegar a los de 300m x 300m.

La Figura 5-3 muestra la grilla utilizada para el modelo confeccionado. La Figura 5-3^a) muestra la definición del refinamiento del Modelo PHAM, en tanto la Figura 5-3b) muestra el refinamiento local en la zona cercana a quebradas, fallas y/o túnel.

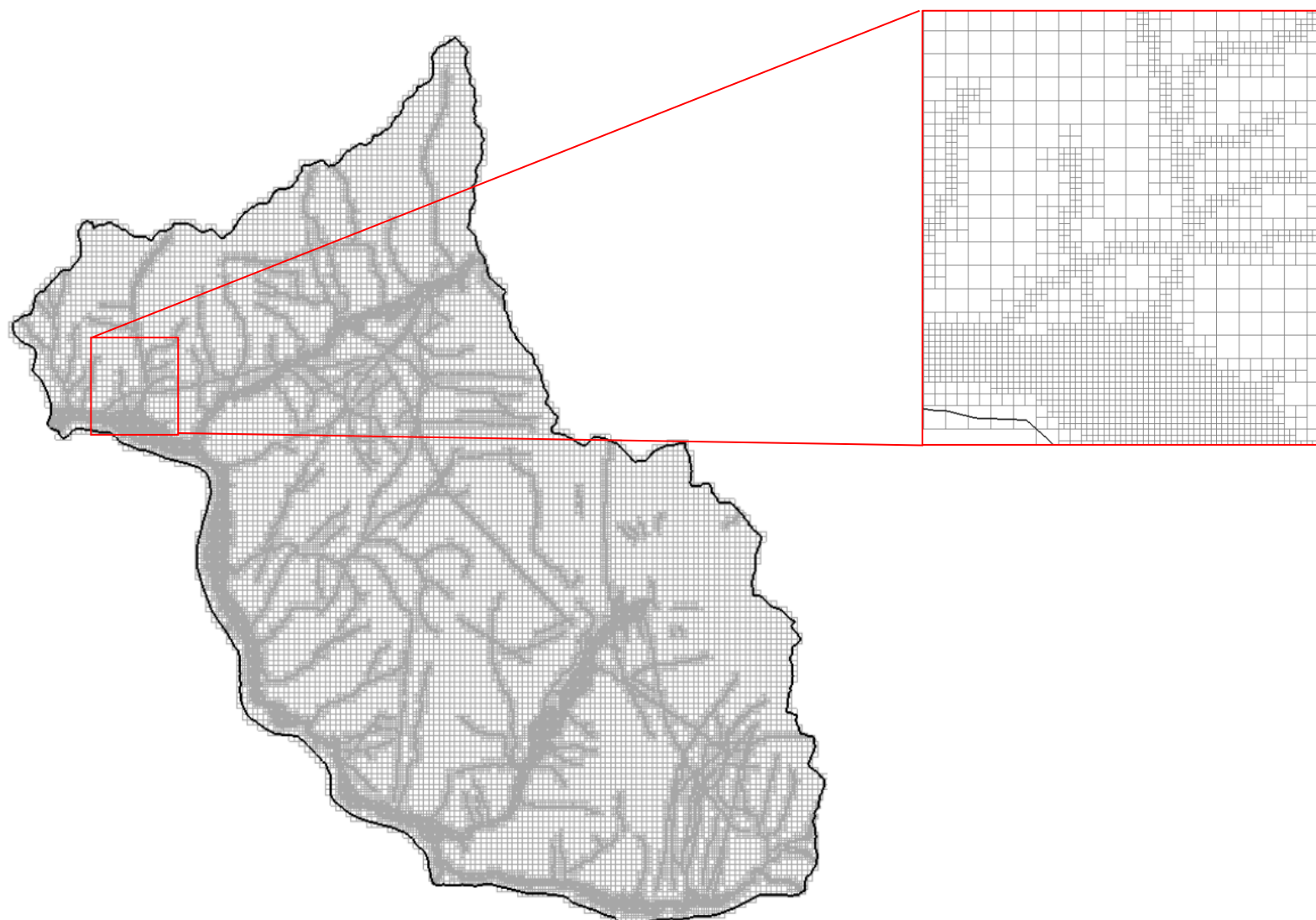
La discretización vertical considera 8 capas, entre la superficie topográfica y la cota cero msnm. La referencia topográfica considera cotas desde 5340 msnm aproximadamente hasta los 780 msnm en la salida del río Maipo o límite de salida hidrológica del dominio definido.

La discretización vertical se construyó a partir del eje del túnel, ubicando este en la capa 5 del modelo, cuyo espesor corresponde a 6 m. En la Figura 5-4 se presenta un corte en vertical con la representación de las capas del modelo, en donde el túnel queda representado en la capa 5, las capas 3,4, 6 y 7 se construyeron de forma de poder representar el sistema cuasi 3D y propagar los efectos del túnel en la dirección vertical.

Figura 5-3: Malla QuadTree Modelo PHAM

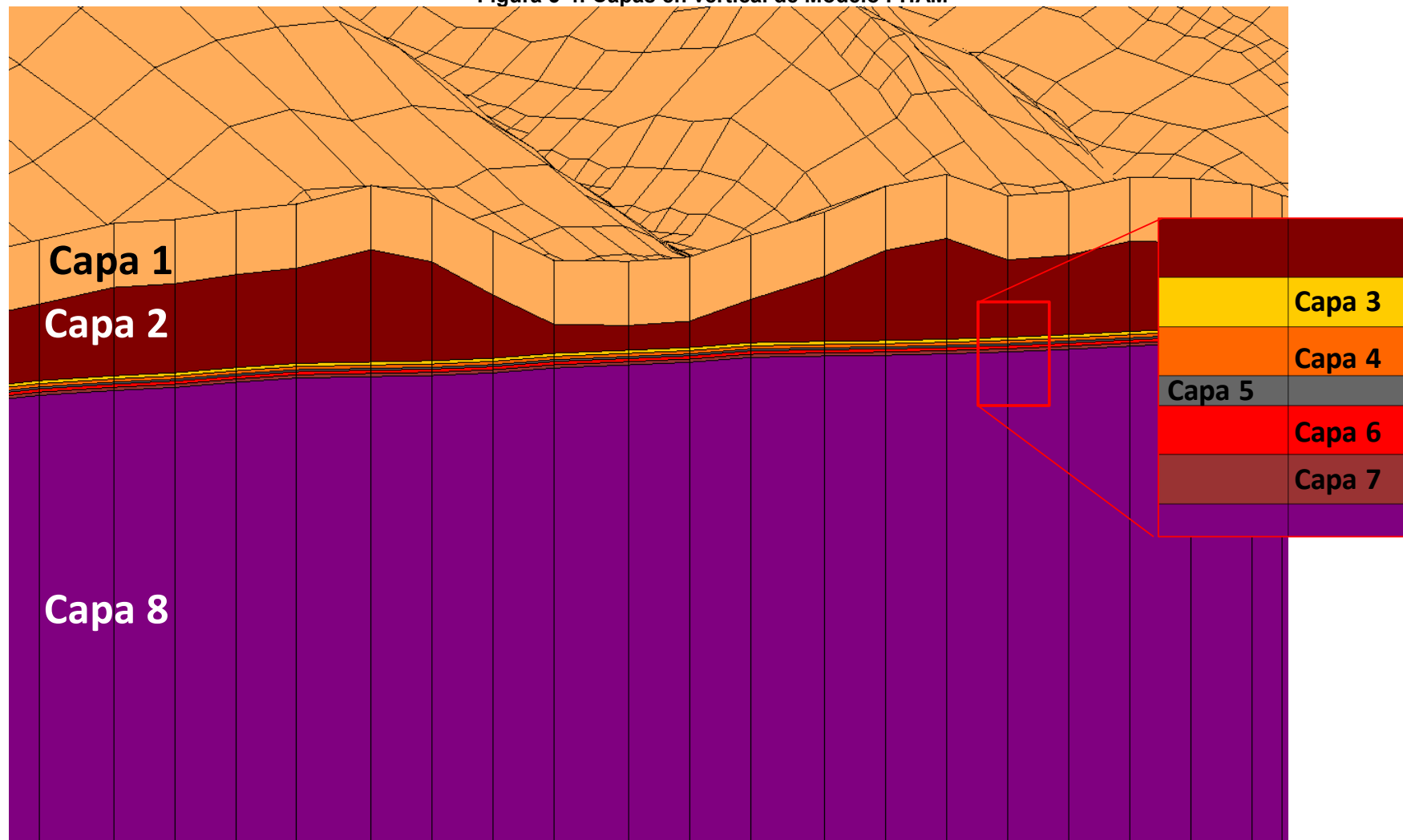
Figura 5-3 a) Malla QuadTree Modelo PHAM

Figura 5-3 b) Detalle refinamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-4: Capas en vertical de Modelo PHAM



Fuente: Elaboración propia

5.4 Condiciones de Borde

Dentro del dominio de la zona de estudio, se consideran condiciones de borde relacionadas principalmente con el flujo, tales como la presencia de ríos, esteros y quebradas que definen condiciones de drenaje de la recarga que ingresa al medio hidrogeológico. A continuación, se describen las principales características de estas condiciones de borde. Del mismo modo, en la Figura 5-5 se presenta la ubicación espacial de éstas.

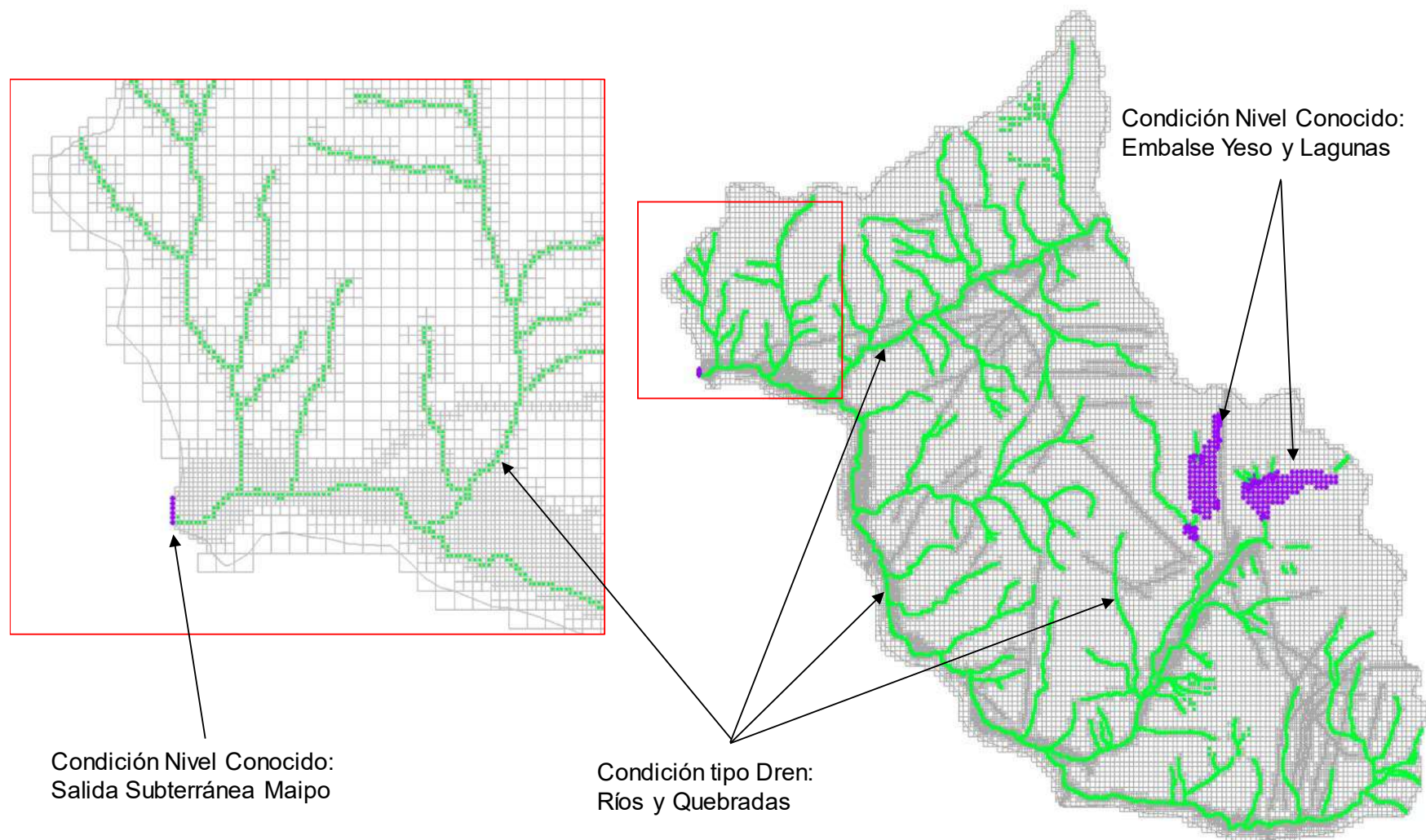
Condición tipo Dren (DRAIN):

- **Río Maipo:** El sistema del río Maipo desde la confluencia con el río Yeso hasta el sector de El Manzano (Borde del dominio), actúa como una condición de borde, que permite representar la interacción río-acuífero en el acuífero del relleno sedimentario del borde sur del dominio.
- **Río Colorado, Yeso y Volcán:** Estos ríos son de menor envergadura que el río Maipo, pero de igual forma son capaces de transportar grandes cantidades de agua y corresponden a sistemas de drenaje que interactúan con los acuíferos de relleno sedimentario.
- **Esteros y Quebradas:** Dentro del dominio del sistema, existen numerosos esteros y quebradas que están insertos dentro de la unidad de roca. Estos sistemas presentan una alta pendiente y lechos de baja permeabilidad (Anexo 1), lo que favorece la escorrentía superficial provenientes de precipitación y derretimiento nival y/o glaciario, confluyendo a cauces principales que sobreyacen al acuífero del relleno sedimentario. Estos esteros y quebradas permiten además el afloramiento del flujo base subterráneo que se manifestó como la recarga del sistema de roca.
- **Túnel:** Para representar los afloramientos de agua desde el sistema hidrogeológico hacia el túnel, se representó el túnel como una condición tipo dren ubicado en la cota correspondiente definida por el proyecto.

Condición tipo Carga Constante (CHD):

- **Cuerpos de agua:** Dentro del dominio, existen tres cuerpos de agua que destacan debido a que presentan un volumen de agua almacenado durante todo el año, éstos son:
 - Embalse El Yeso: Se impuso una carga constante de 2.570 msnm que equivale a la elevación media de la lámina de agua del embalse.
 - Laguna Lo Encañado: Se impuso una carga constante de 2.490 msnm que equivale a la elevación media de la lámina de agua de la laguna.
 - Laguna Negra: Se impuso una carga constante de 2.700 msnm que equivale a la elevación media de la lámina de agua de la laguna.
- **Salida del Río Maipo:** En el relleno sedimentario del río Maipo, en el borde oeste del dominio definido, en el sector del estero El Manzano, existe un flujo subterráneo de salida. Este límite está representado por un nivel piezométrico o equipotencial cuyo valor se identifica en 780 msnm aproximadamente.

Figura 5-5: Condiciones de borde, Modelo PHAM



Fuente: Elaboración propia

5.5 Parámetros Hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos de un acuífero corresponden a la permeabilidad (K) y el coeficiente de almacenamiento (S). Como parte de la metodología de calibración, se consiguió ajustar los parámetros de permeabilidad y almacenamiento, en rangos similares a los definidos en la parte conceptual del capítulo 3 del presente informe.

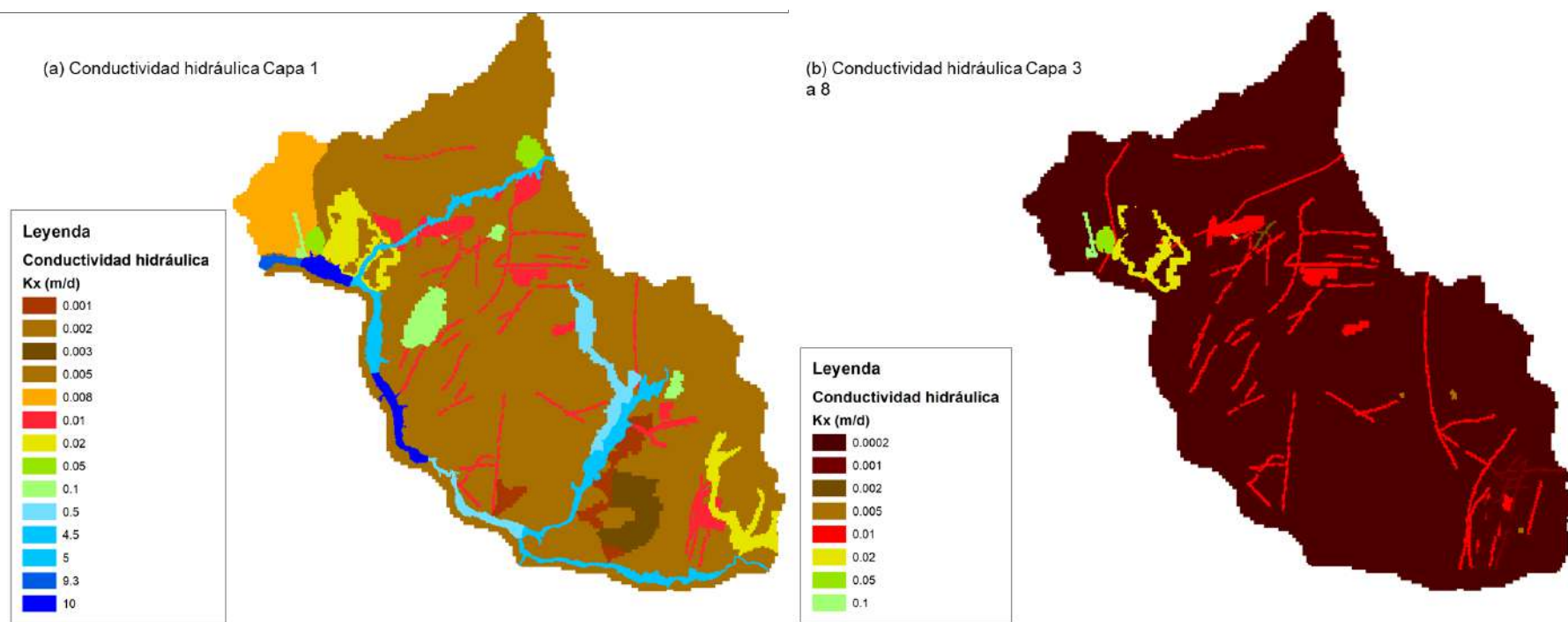
La Figura 5-6 muestra la distribución de los parámetros hidrogeológicos usados para el modelo PHAM y el detalle de las zonas y valores de los parámetros calibrados. En la Figura 5-6ª se muestra la zonificación de conductividad en la capa 1 y en la 5-6b para la capa 3 e inferiores. Del mismo modo, en la Tabla 5-1 se presenta una comparativa entre los valores de parámetros hidrogeológicos adoptados en el modelo numérico y los rangos definidos por el modelo conceptual, en la cual se comprueba que los valores calibrados del modelo numérico, se encuentran dentro de los rangos definidos por el modelo conceptual, como se indica en la guía de modelación de aguas subterráneas del SEA (2012).

Tabla 5-1: Valores de conductividad hidráulica adoptados en modelo numérico vs los definidos en el modelo conceptual

UH	Valores modelo conceptual			Valores modelo numérico		
	K (m/d)		Sy (%)	K (m/d)		Sy (%)
	Mínimo	Máximo	Rango	Mínimo	Máximo	Rango
UH-1	0.12	56	5-20	0.5	10	15
UH-2	5.4E-04	4.8E-02	0-5	5.0E-03	8.0E-03	1-3
UH-3	1.0E-06	2.7E-03	0-5	2.0E-04	2.0E-04	1
UH-4	1.0E-03	1.0E-01	1-10	1.0E-03	1.0E-01	1-10

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-6: Parámetros hidrogeológicos Modelo PHAM



Fuente: Elaboración propia

5.6 Mecanismos de Recarga

A partir de los aspectos conceptuales recopilados para el sistema PHAM, la recarga total del sistema se ha estimado en 6.928 L/s, la cual se distribuye en todo el dominio, tanto en el sistema de roca como en el área asociada al relleno sedimentario. Al modelo se ingresan tasas de recarga, las que se distribuyen desde las cuencas a las celdas asociadas al modelo numérico.

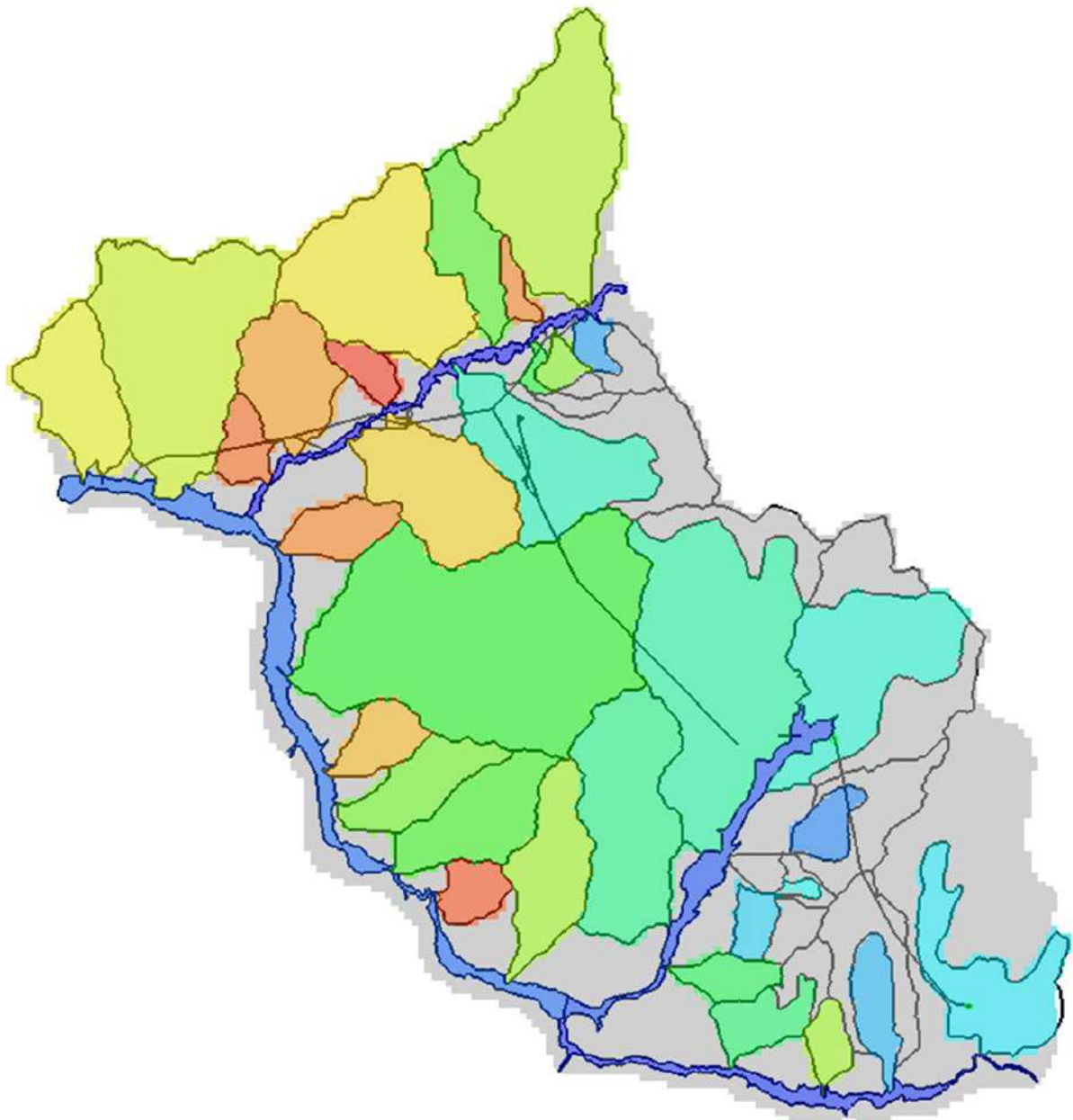
En la Figura 5-7 se presentan las distintas zonas de recarga asociadas a cada uno de los subsistemas identificados dentro del dominio. Del mismo modo, en la Tabla 5-2 se presenta la información de la tasa de recarga específica a cada sector impuesta al Modelo PHAM.

Tabla 5-2: Recarga impuesta a cada zona del Modelo PHAM

Subsistema		Recarga modelo (L/s)
Río Colorado	Qda. Quempo	45
	Qda. Sin nombre 1	22
	Qda. Laurel	2
	Qda. El Durazno	29
	Qda. Trescientos	3
	Qda. Cinco mil	3
	Estero Los Toyos	30
	Estero Aucayes	115
	Qda. Las Bayas	1
	Qda. El Sauce	20
	Qda. La Buitrera	13
	Qda. Los Canales	4
	Relleno sedimentario Río Colorado	1.336
Río Yeso	Estero El Manzanito	186
	Yeso Alto	123
	Qda. Las Cortaderas	68
	Estero San Nicolas	104
	Qda. Sin nombre 4	5
	Qda. Los Chacayes	35
	Qda. Rodeo de los Bueyes	18
	Relleno sedimentario Río Yeso	1.017
Río Volcán	Estero La Engorda	126
	Qda. Morales	54
	Qda. Chacayes	5
	Qda. Coloradas	25
	Relleno sedimentario Río Volcán	1.211
Río Maipo	Estero San Gabriel	18
	Qda. Sin nombre 2	2
	Estero San Alfonso	41
	Qda. La Calchona	24
	Qda. Melocotón	6
	Estero San José	219
	Estero Guayacán	6
	Estero El Manzano	40
	Estero El Canelo	16
	Total unidad de roca Cuenca río Maipo	2.182

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-7: Zonas de recarga del Modelo PHAM



Fuente: Elaboración propia

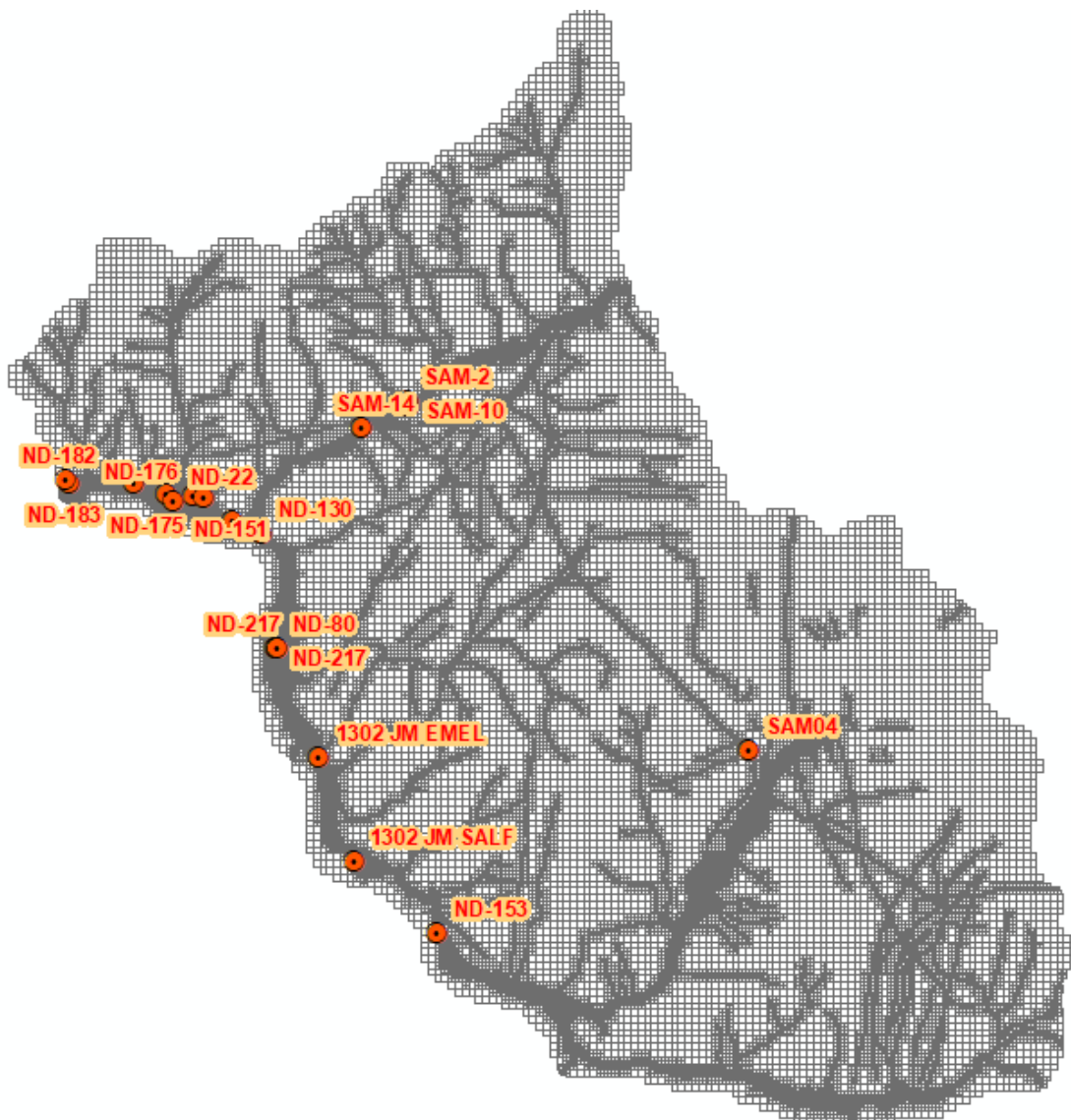
6 CALIBRACIÓN

6.1 Aspectos generales

Una vez construido el modelo numérico, se procede a realizar el proceso de ajuste o calibración de la herramienta. Este proceso tiene por finalidad encontrar los parámetros hidrogeológicos que permiten representar las condiciones de nivel de agua subterránea medidas en el relleno sedimentario que define el sistema acuífero.

Para dicho ajuste, se considera los pozos de monitoreo ambiental de PHAM y los niveles registrados durante las respectivas pruebas de bombeo de los pozos con derechos de aguas subterráneas ubicados en el relleno sedimentario del río Maipo. La Figura 6-1 muestra la distribución de los pozos de observación.

Figura 6-1: Ubicación de los pozos con observación de nivel del Modelo PHAM



Fuente: Elaboración propia

6.2 Proceso de Ajuste

6.2.1 Régimen Permanente (Situación sin proyecto)

La situación sin proyecto se utilizó para ajustar las cotas piezométricas medidas en el relleno sedimentario que define el sistema acuífero en condición natural. Para dicha condición, se asume que el sistema se encuentra en relativo equilibrio. Este proceso permitió calibrar las conductividades hidráulicas del acuífero.

En la Figura 6-2 se presenta el ajuste de los niveles calculados por el Modelo Numérico PHAM con respecto a los niveles observados en el acuífero. Del mismo modo en la Tabla 6-1 se presentan los indicadores de ajuste para la situación sin proyecto. Para la situación en régimen permanente, se observa un error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés *Mean Absolute Error*) de 8,9 m y error cuadrático medio (RMS, por sus siglas en inglés *Root mean square error*) de 12,0 m, lo que representan en términos normalizados errores de 0,6% (MAEN, MAE Normalizado) y 0,7% (RMSN, RMS Normalizado) respectivamente. Estas magnitudes siguen la recomendación de errores medios normalizados menores a un 5%, según la Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA (SEA, 2012).

Tabla 6-1: Indicadores de ajuste del Modelo PHAM

Parámetro	Valor
n° datos	19
H máx. (m)	2.390
H mín. (m)	785
dH	1.606
RMS	12.0
RMSN	0.7%
MAE	8.9
MAE N	0.6%

Fuente: Elaboración propia

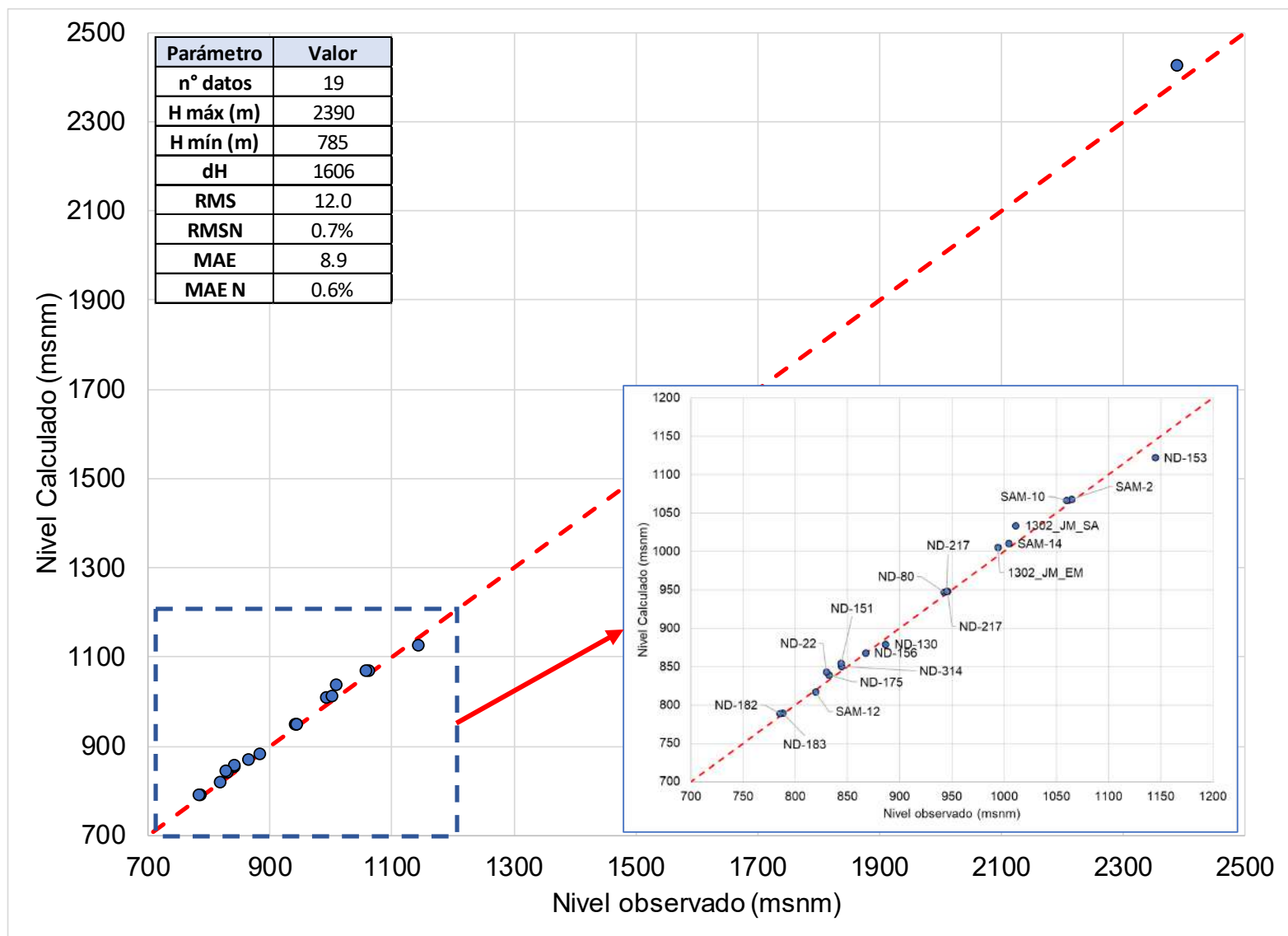
6.2.2 Régimen Permanente (Flujo base subterráneo aforado)

Además de representar los niveles medidos en el relleno sedimentario, se ajustaron los caudales de flujo base subterráneo de las quebradas y esteros ubicados en subcuencas de la unidad de roca del sistema. En la Figura 6-3 se presenta el ajuste entre el flujo base subterráneo simulado y el medido. De la figura, se observa que los caudales simulados en el sistema de roca poseen una buena correlación con los valores medidos en la campaña de aforos realizada.

Es importante señalar, que el ajuste de estos caudales representa una “calibración cualitativa”, ya que el objetivo es poder representar el caudal drenado por las quebradas y esteros de la unidad de roca, sin embargo, se observa que las magnitudes simuladas y observadas poseen un buen grado de correlación.

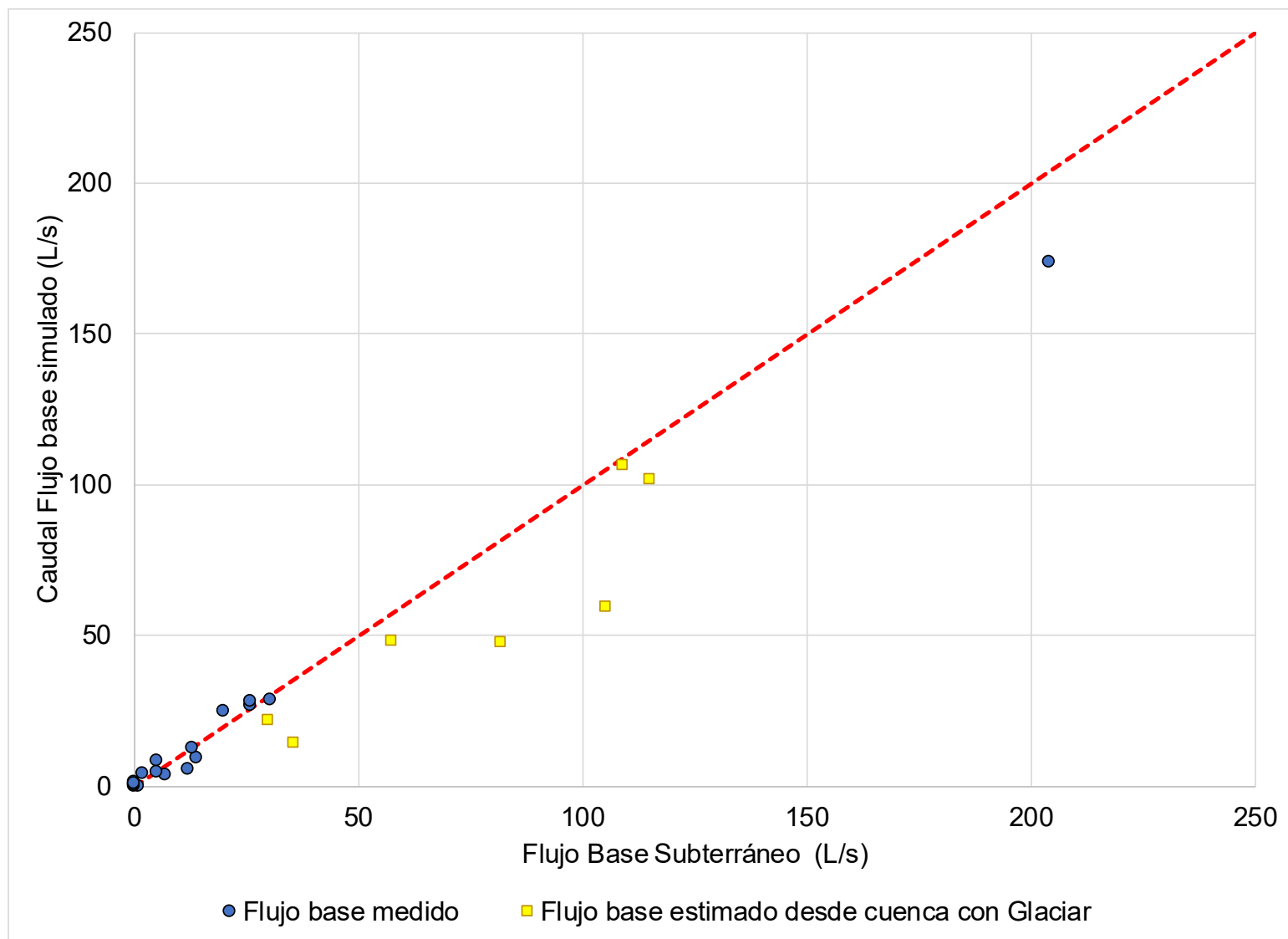
En la Figura mencionada, se tienen dos series que muestran los caudales de afloramientos simulados para aquellas subcuencas, sin y con presencia de glaciar. Estas últimas, poseen un menor nivel de ajuste, ya que el aporte glaciar del sistema genera un grado de incertidumbre en la estimación del flujo base subterráneo.

Figura 6-2: Niveles calculados vs niveles observados



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-3: Caudales de flujo base subterráneo medidos vs simulados Modelo PHAM



Fuente: Elaboración propia

6.2.3 Régimen Transiente (Caudales de afloramiento en túneles)

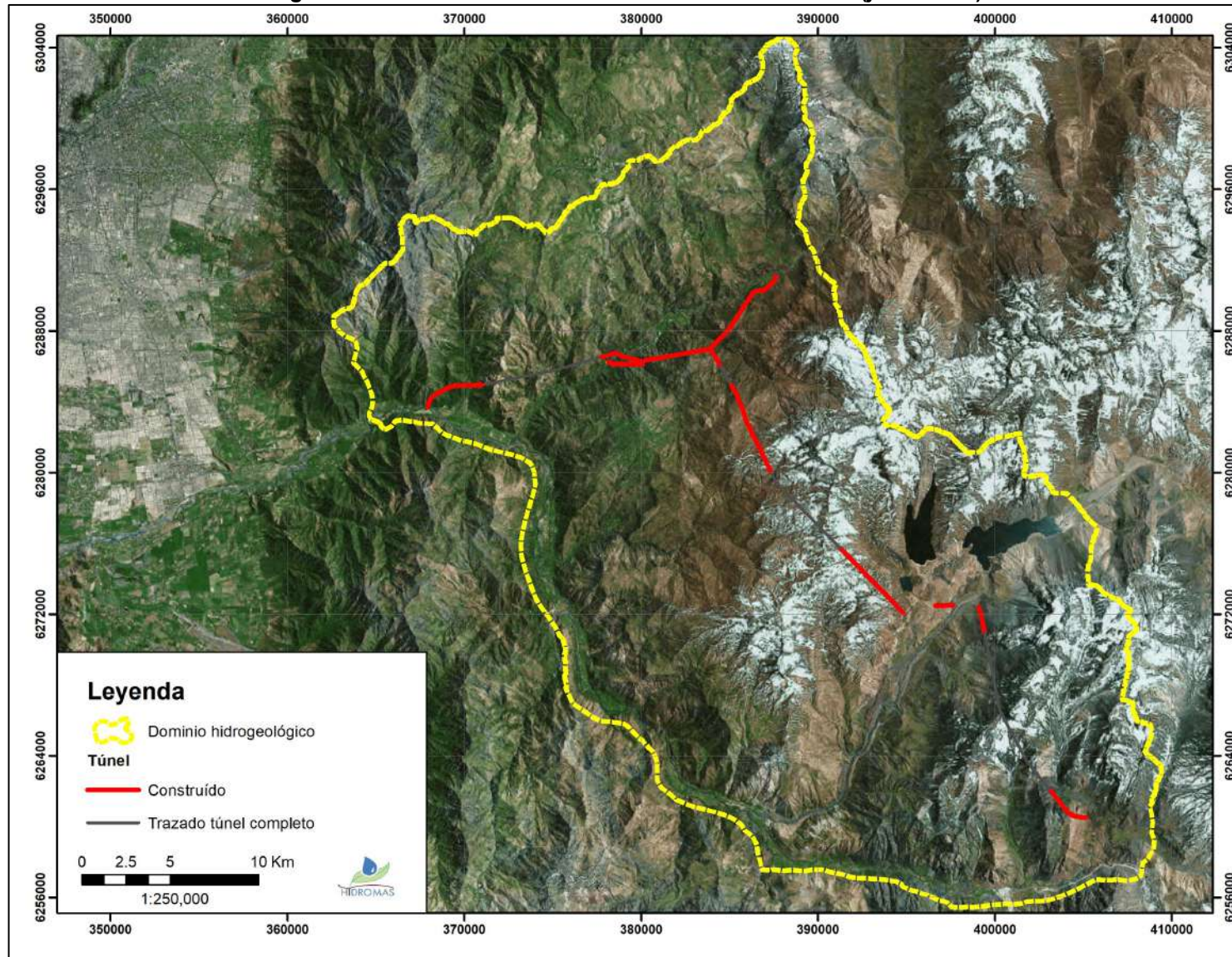
La situación de construcción del proyecto se representó mediante el ajuste de las propiedades hidrogeológicas de permeabilidad y almacenamiento de las estructuras geológicas que atraviesan el túnel en un tramo determinado, y variando el parámetro numérico de conductancia asociado al módulo dren de los túneles. En la Figura 6-4 se presenta el avance de construcción actual de los túneles, considerando hasta junio de 2018.

La Figura 6-5 muestra el nivel de ajuste entre los caudales medios mensuales aflorados por el túnel simulados por el modelo y los medidos en los portales respectivos por PHAM. El error medio absoluto calculado posee una magnitud menor a 3 L/s, con un rango de valores de caudal medido que va entre 1 y 85 L/s.

Del mismo modo, en las Figuras 6-6 a 6-13 se presenta la serie temporal de caudales medios mensuales de aguas afloradas registrados en cada uno de los portales de los túneles del proyecto. En éstas se observa que existe una buena coincidencia entre los caudales registrados a nivel medio mensual en los portales, con respecto a la serie simulada por el modelo.

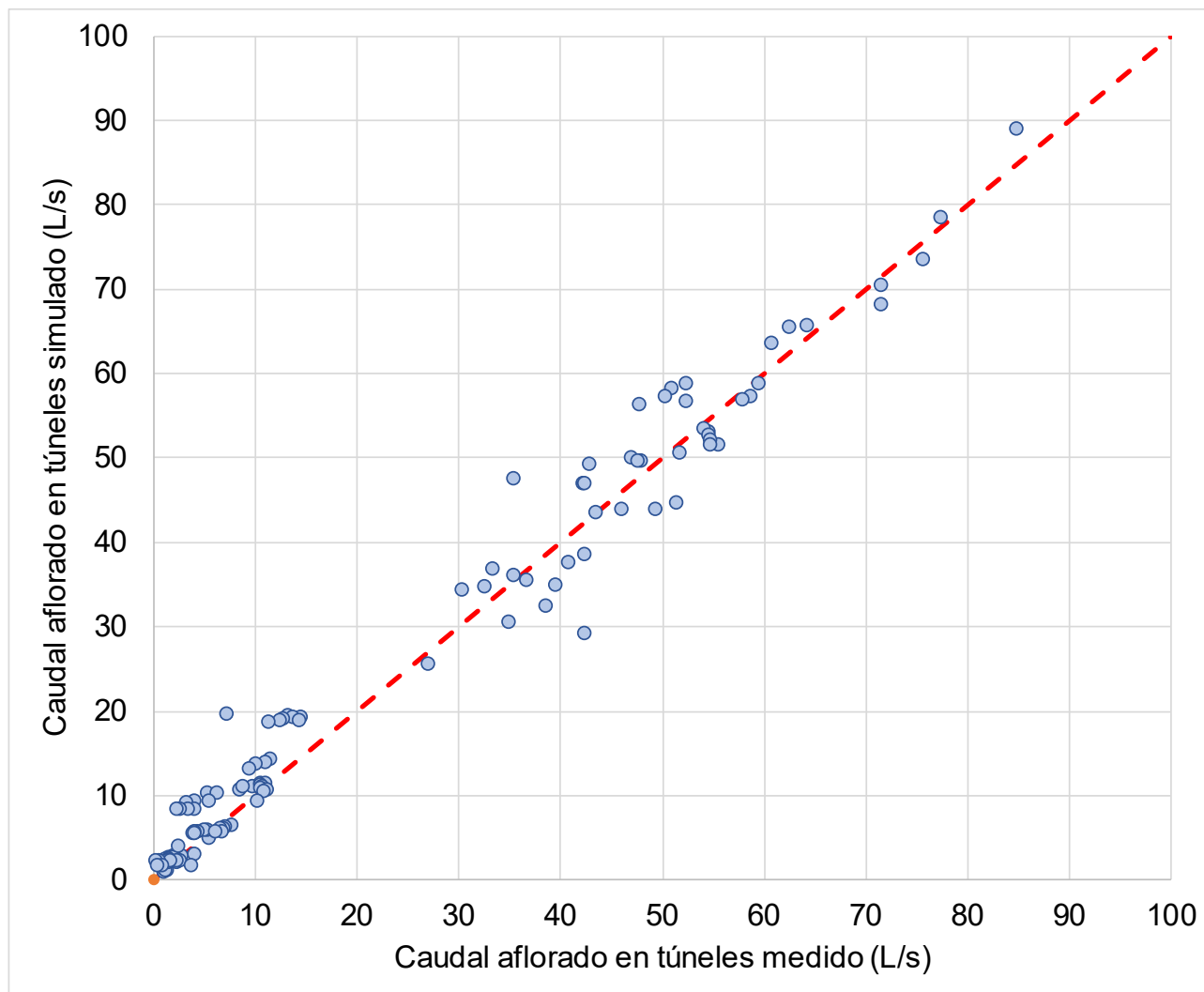
Adicionalmente, se logró representar de manera adecuada los “*peaks*” de caudal medio mensual aflorado en cada túnel debido al cruce por estructuras o contactos litológicos, como también la disminución de estos en el tiempo gracias a las medidas de control de afloramientos aplicadas durante la construcción.

Figura 6-4: Tramos de túneles actualmente construidos (junio 2018)



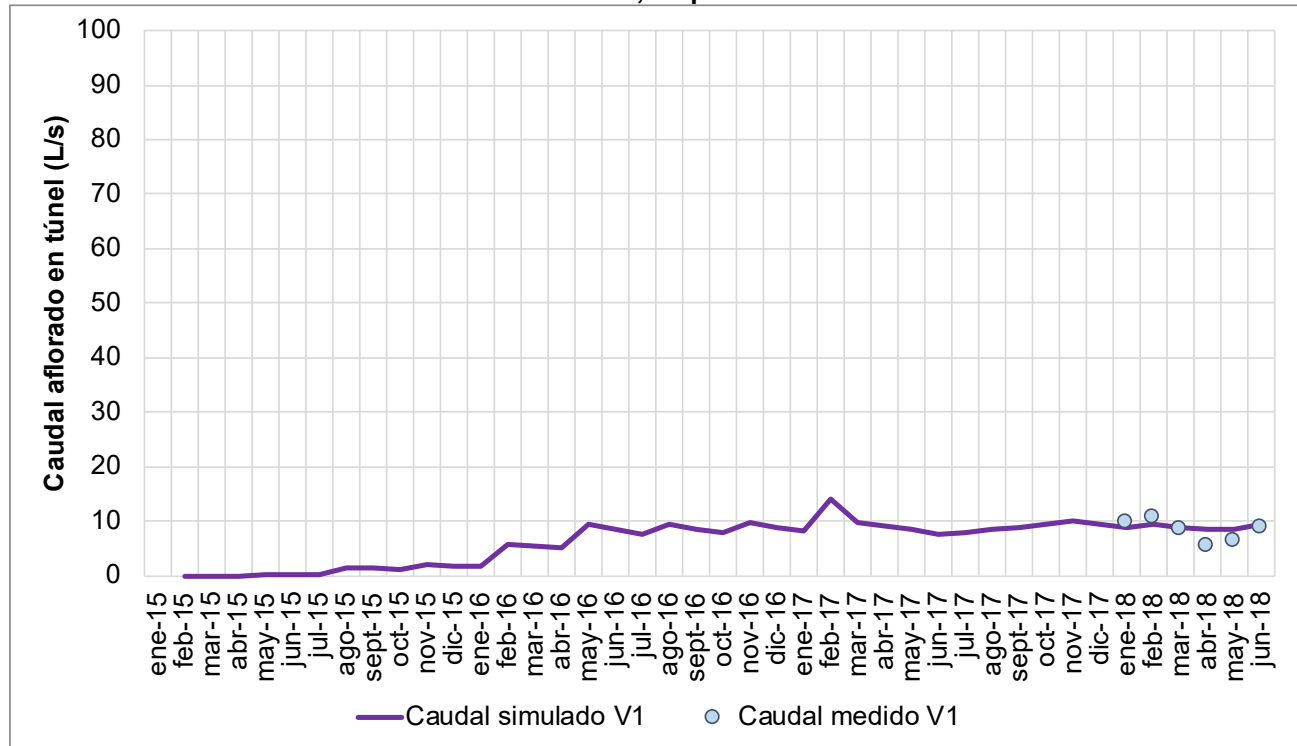
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-5: Caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados Modelo PHAM



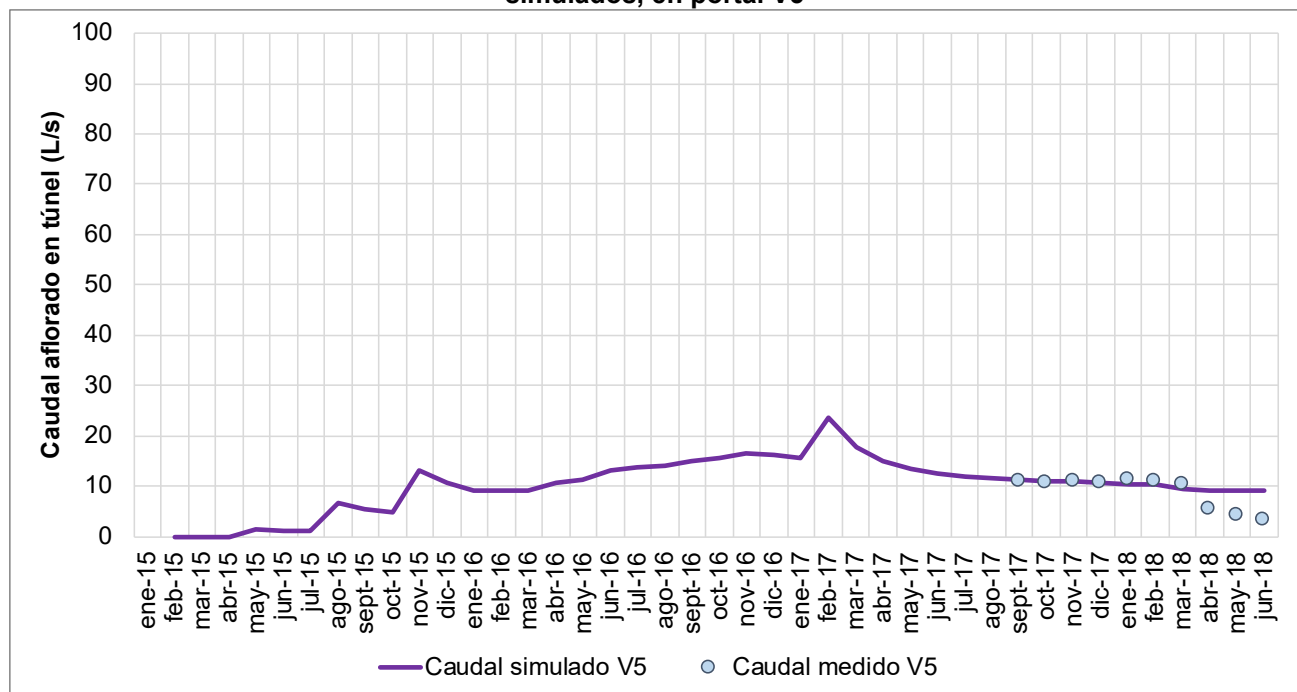
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-6: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal V1



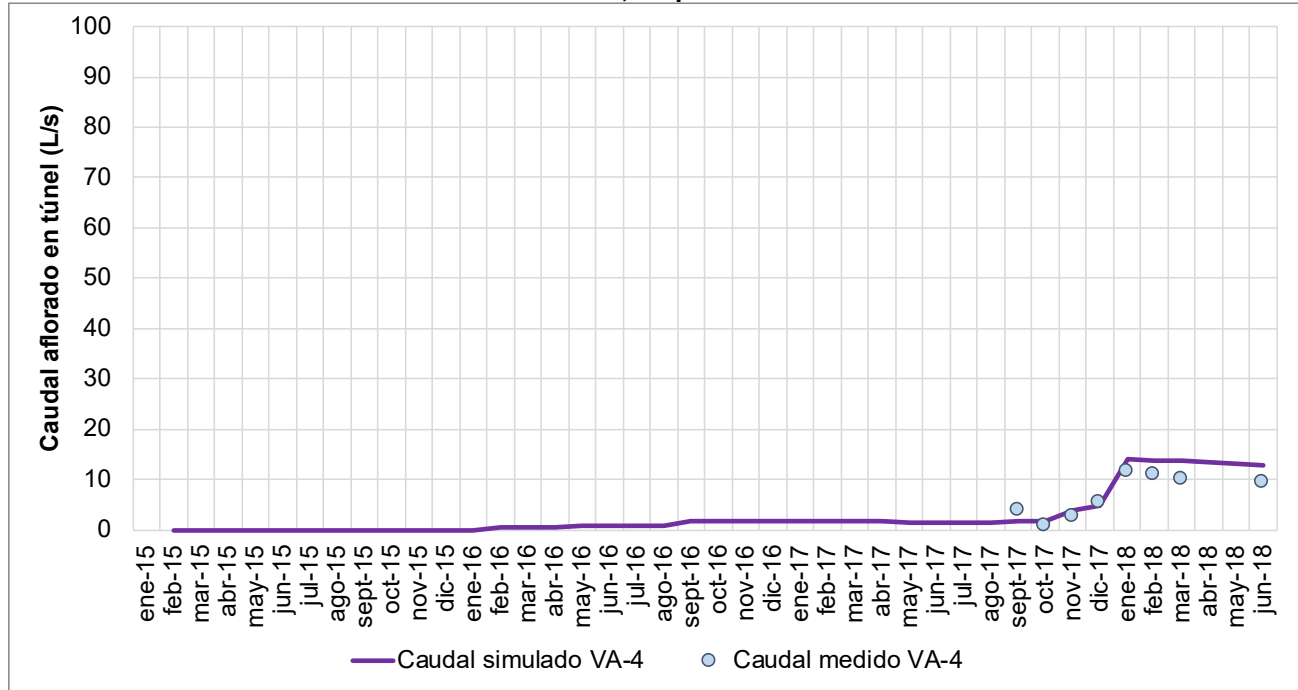
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-7: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal V5



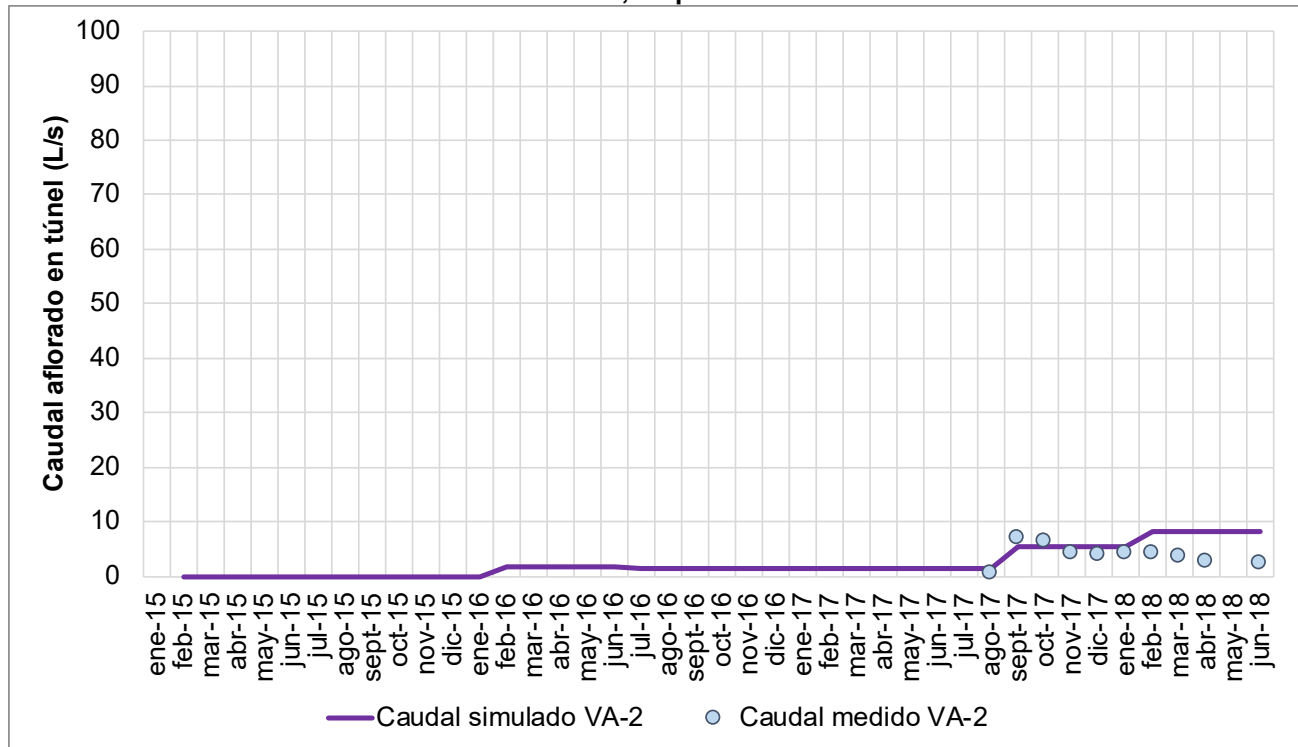
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-8: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VA-4



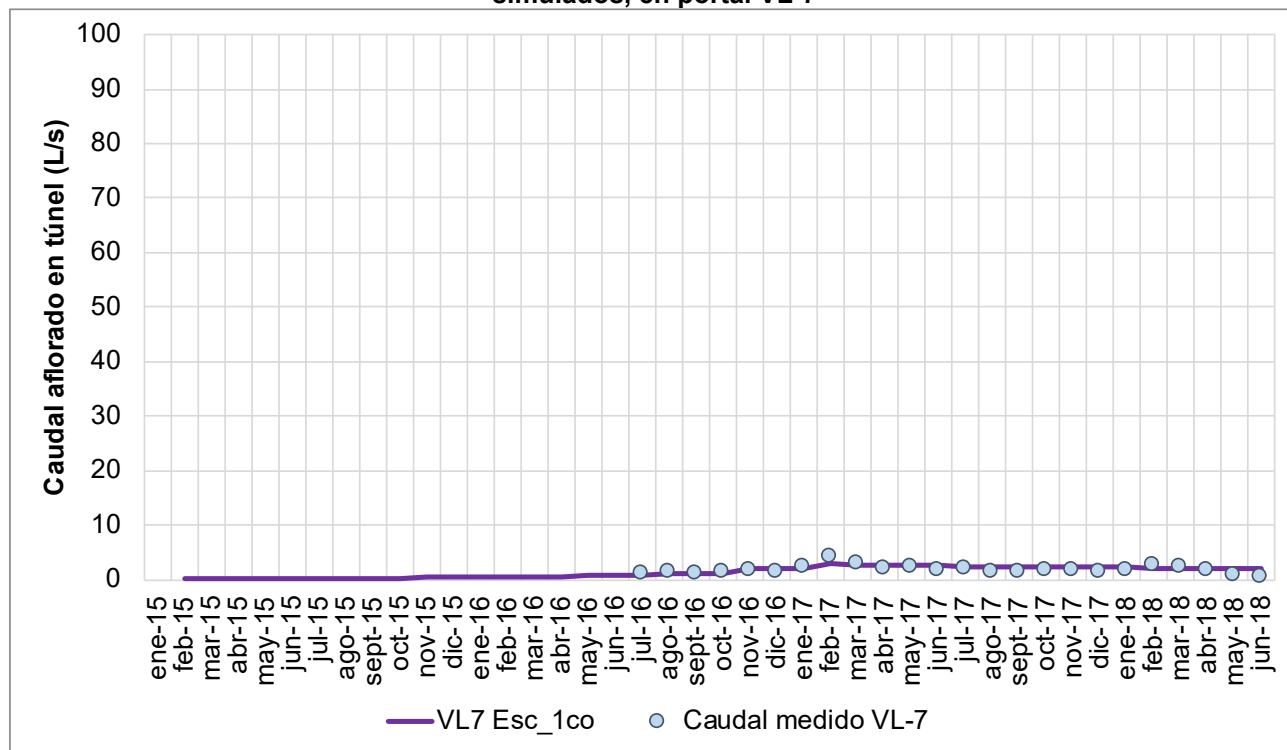
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-9: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VA-2



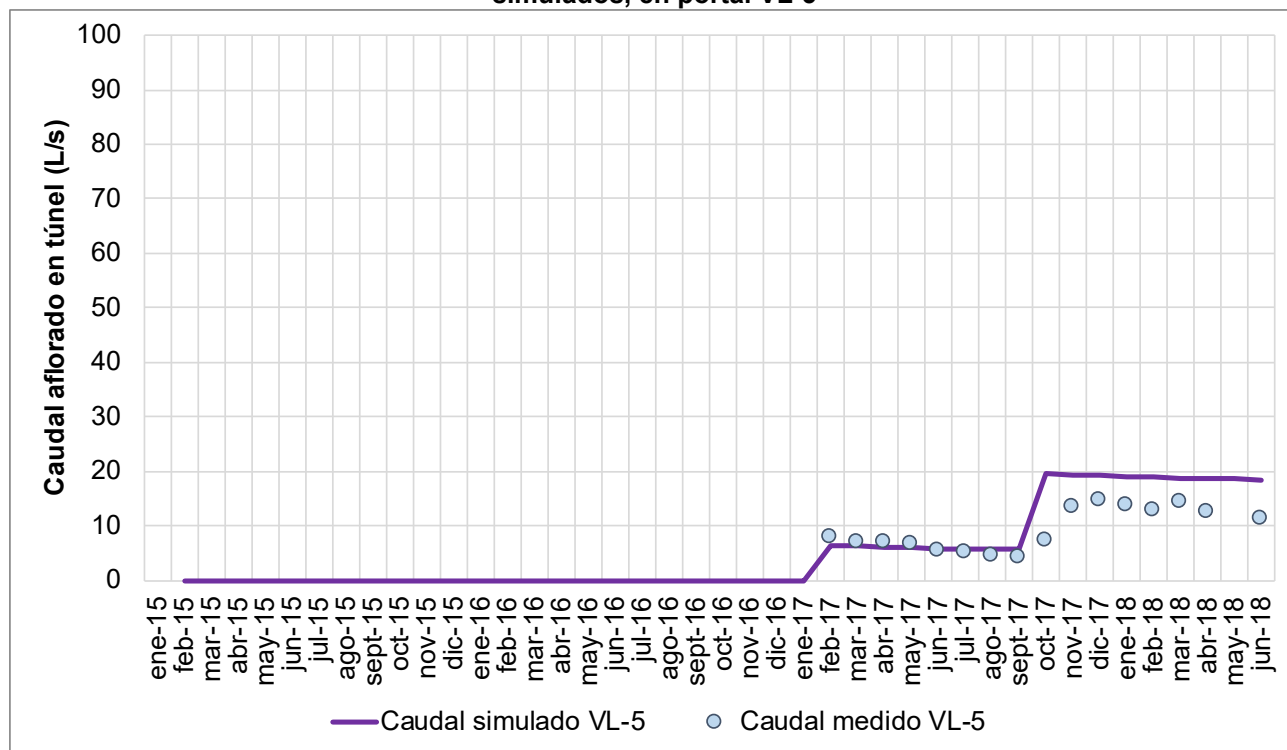
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-10: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VL-7



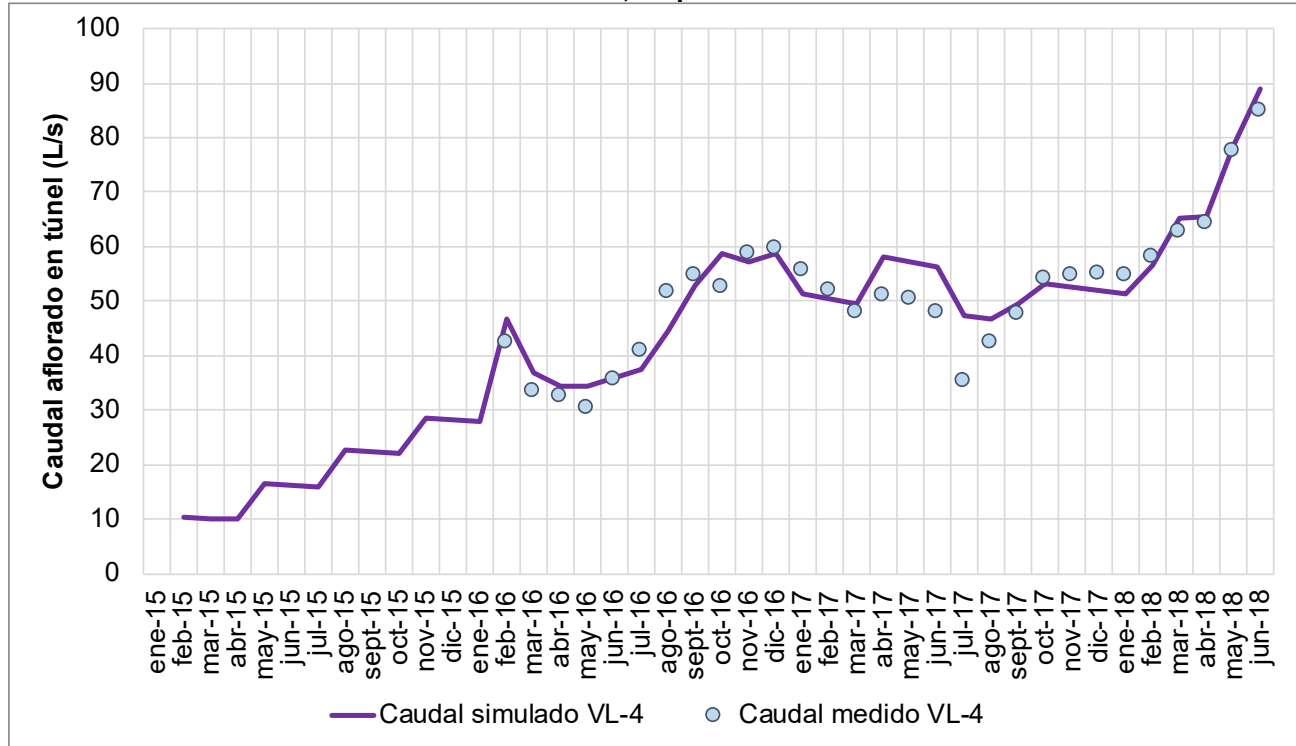
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-11: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VL-5



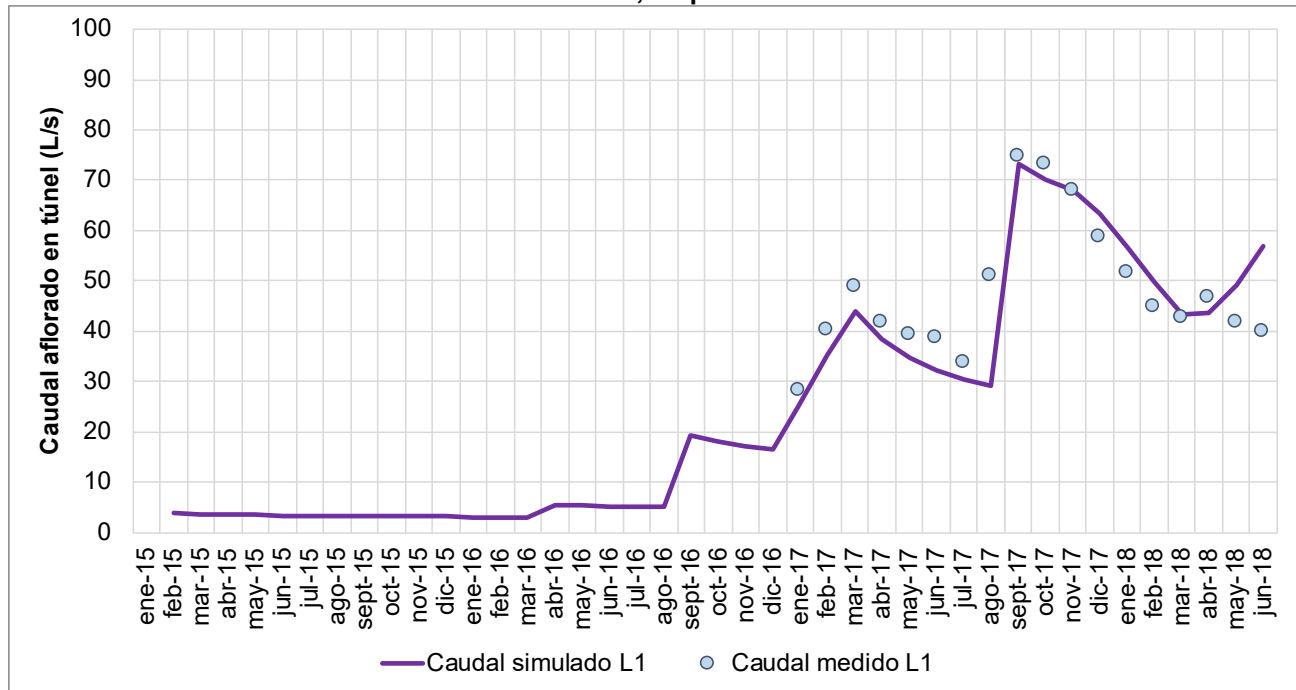
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-12: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal VL-4



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-13: Serie temporal de caudales medios mensuales aflorados en los túneles medidos vs simulados, en portal L1

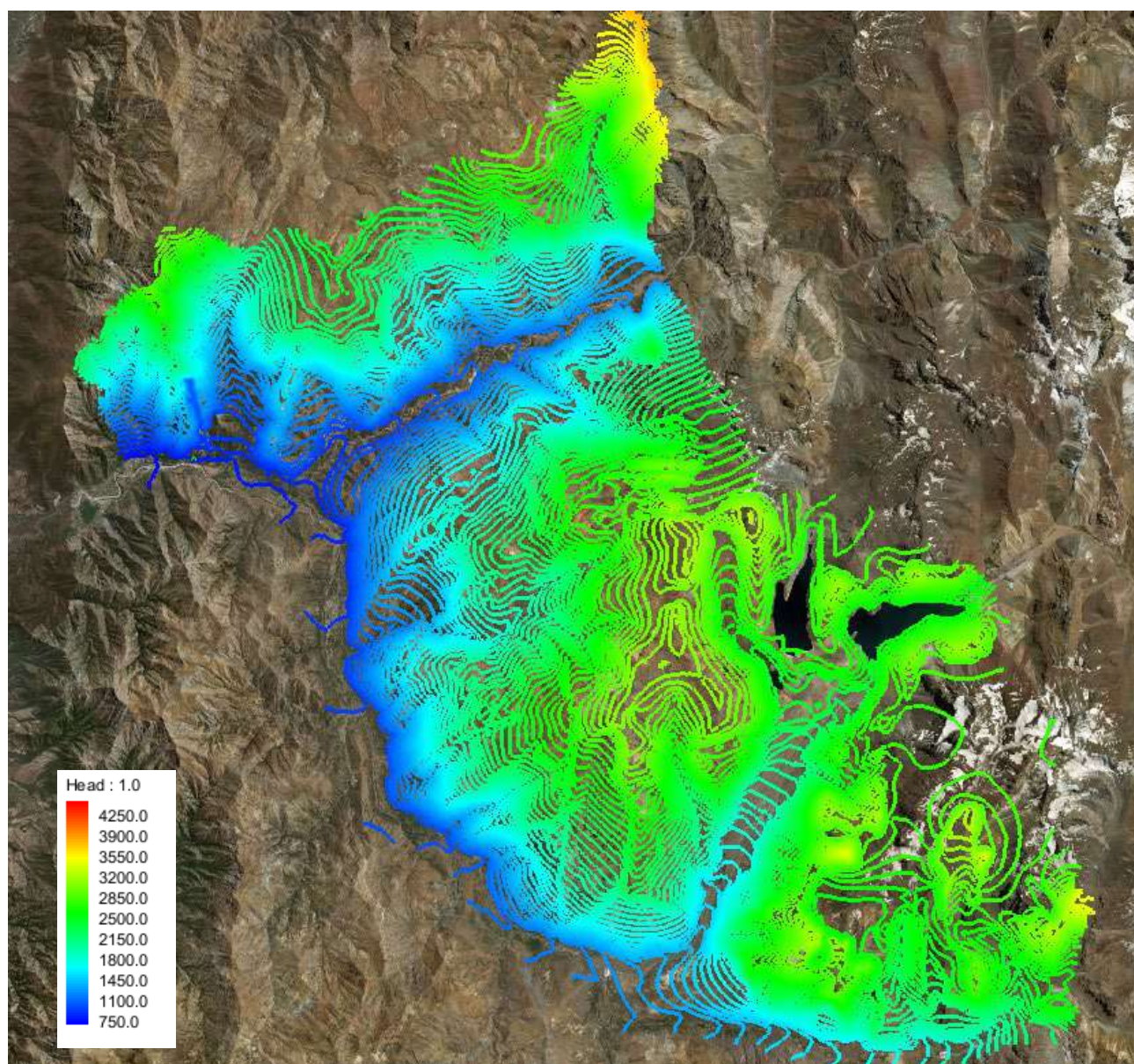


Fuente: Elaboración propia

6.3 Curvas equipotenciales

La Figura 6-14 muestra las curvas equipotenciales para la situación en régimen permanente sin proyecto, las que varían en el rango entre 780 m que corresponde a la condición de borde de salida del modelo y la cota piezométrica superior es de 3.900 m.

Figura 6-14: Curvas equipotenciales situación sin proyecto Modelo PHAM



Fuente: Elaboración propia

6.4 Balance hídrico

Como resultado del proceso de calibración del modelo numérico PHAM, se obtiene el balance hídrico del sistema. La Tabla 6-2 muestra el balance entre las componentes de entradas y salidas, tanto para el modelo en régimen permanente, que representa la condición de equilibrio pre-proyecto, como para la condición actual de calibración (2018) resultante del modelo en régimen transiente producto de la construcción de los túneles del proyecto.

En la situación en régimen permanente o previa al inicio de construcción del proyecto, se observa que prácticamente toda la recarga ingresada al sistema sale del mismo mediante el sistema de drenaje, ya sean quebradas del sistema de roca o los cauces principales del relleno sedimentario. La diferencia en magnitud está dada por las entradas y salidas mediante la condición de carga constante ubicada en la salida del modelo y en embalses y lagunas. Como se observa en la Tabla 6-2, el total de entradas es equivalente a las salidas del modelo, de manera que se posee un error de cierre del balance hídrico de un orden de magnitud menor a 0,1%, este valor cumple con las recomendaciones establecidas por la Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA (SEA, 2012).

En la situación actual, transcurridos 3 años y medio desde el inicio de la construcción, con el modelo calibrado, se observa que existe un aumento en el drenaje del sistema en 188 L/s con respecto a la situación en régimen permanente, debido a los caudales aflorados a los túneles del proyecto. El resto de las componentes se mantienen constantes con respecto la situación en régimen permanente.

Tabla 6-2: Balance hídrico Modelo PHAM

Componente del Balance hídrico	Régimen permanente (sin proyecto)	Año 2018 (con proyecto)
Entradas	L/s	L/s
Recarga		
Sistema Colorado	1.624	1.624
Sistema Yeso	1.557	1.557
Sistema Volcán	1.421	1.421
Sistema Maipo	2.554	2.554
Total	7.156	7.156
Salidas		
Afloramientos cauces superficiales	7.053	7.052
Afloramientos Túneles	0	198
Afloramientos en sistemas de embalses	87	87
Flujo subterráneo de salida	16	16
Total	7.156	7.353
Ganancia (+) /pérdida (-) almacenamiento	--	-197
Error de cierre	-8.E-04	-9.E-04

Fuente: Elaboración propia

7 ESCENARIOS

7.1 Aspectos Generales

Como escenarios de simulación se han considerado los aspectos constructivos y los parámetros obtenidos del proceso de calibración del modelo numérico.

En términos de las condiciones de borde, la recarga del sistema se ha extendido hasta el final del período de construcción estimado por el proyecto ante un escenario conservador de avance, que corresponde hasta el año 2023. En función de lo anterior, se han considerado dos escenarios que contemplan aspectos netamente constructivos del proceso de excavación de los túneles hidráulicos del proyecto.

Los escenarios se definen a partir de la aplicación de la medida de control del caudal ingresado hacia el interior del túnel, de manera que el primer escenario denominado como Esc. 1 corresponde a la situación del proyecto en donde no se aplica la medida de control de caudales aflorados. Por otro lado, el escenario 2, definido como Esc. 2, corresponde a la situación en donde se controlan los caudales que ingresan al túnel mediante medidas de control, las cuales tienen un efecto en las permeabilidades efectivas de los túneles. El efecto de la medida de control se representa en el modelo numérico a partir de la variación del parámetro de conductancia del módulo “*DRAIN*” del tramo de túnel respectivo.

En términos del avance de construcción, la situación actual a junio de 2018 representa, aproximadamente, un 55% del total diseñado del proyecto. Para la proyección de la construcción de los túneles, se consideró un escenario de avance conservador, en donde el proceso quedaría completamente terminado en el año 2023. En la Figura 7-1 se presenta espacialmente el avance anual proyectado de cada túnel del proyecto.

En el Esc. 1 se simuló la situación hipotética que, durante la construcción de los túneles del proyecto, no se hubiese utilizado medida de control para disminuir la permeabilidad equivalente del tramo de túnel en el cual se produjo el ingreso de agua. Para la proyección futura de construcción se utilizaron los valores de eficiencia de la medida de control que maximizan el caudal ingresado por cada túnel, es decir una situación más desfavorable.

En el Esc. 2 la simulación corresponde a la situación en la que el proceso constructivo considera las medidas de control respectivas ante un ingreso de caudal de afloramiento hacia el interior de los túneles. Estas medidas se traducen en una reducción de la permeabilidad equivalente del medio rocoso en el cual se está excavando el túnel, y así se restringe el afloramiento de agua en el interior de éste.

Para la situación actual de construcción, es decir, el período desde 2015 al primer semestre de 2018, se consideró el valor de conductancia obtenido a partir del modelo calibrado, el cual reproduce la serie de caudales medios mensuales aflorados en el interior del túnel. Para la proyección futura de construcción, se extrapoló la información obtenida durante la construcción actual y se proyectó hacia el fin de la etapa de construcción en el año 2023, siempre en consideración de representar el caso más conservador.

De manera de cuantificar la eficiencia de la medida de control, PHAM (2018) elaboró un estudio en donde se analiza en términos del efecto en la reducción de la permeabilidad del medio rocoso, al aplicar una medida de control. En el modelo numérico, esta condición se representa mediante el parámetro de conductancia asociado a la condición de borde tipo dren (*DRAIN*) de los túneles.

En la Tabla 7-1 se presentan los valores de eficiencia en términos de permeabilidades estimadas por PHAM (2018), es decir, representan cuánto porcentaje de la permeabilidad se logró disminuir luego de aplicar la

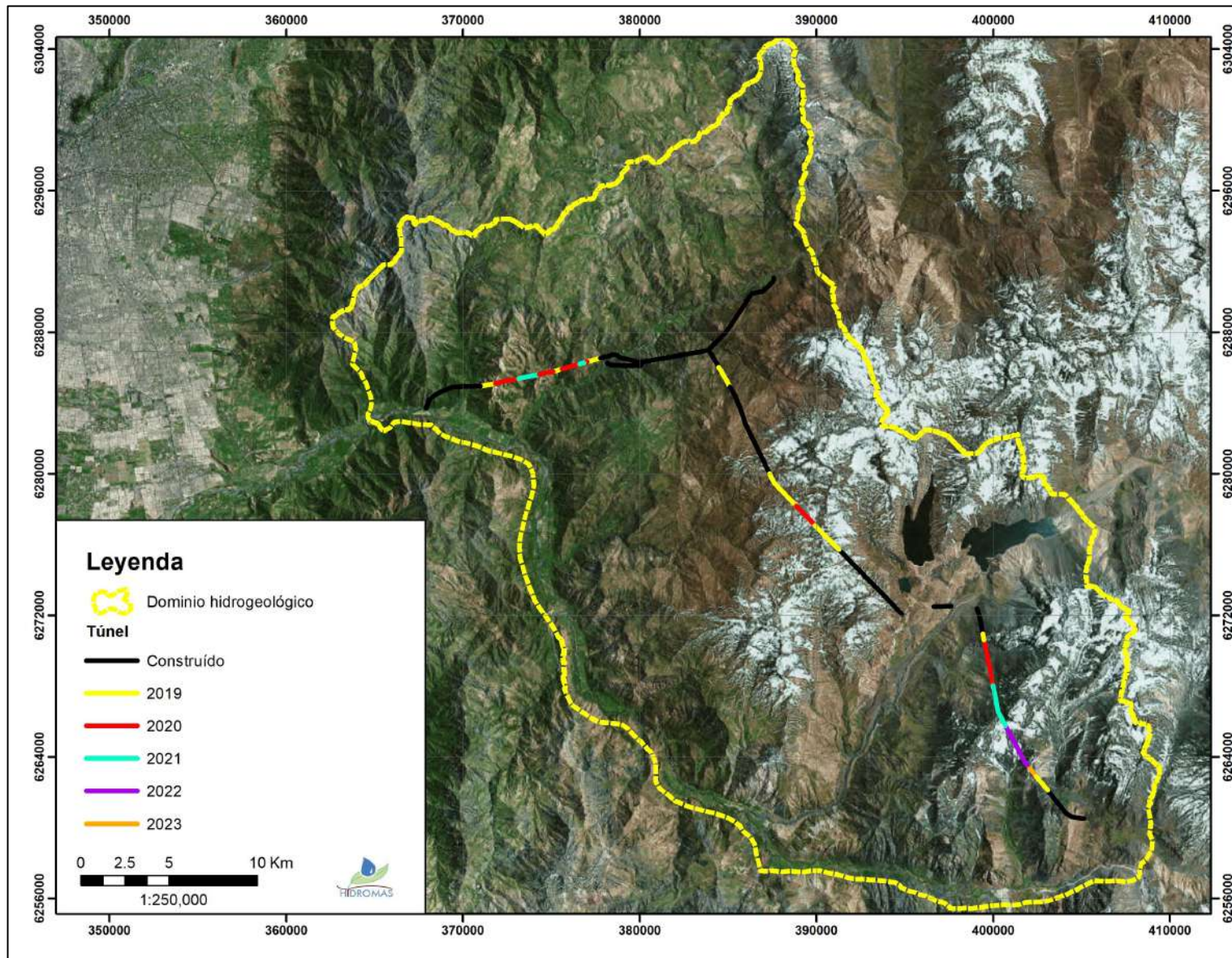
medida de control de caudales. Del mismo modo, se presentan los valores de conductancia ingresados al Modelo Numérico para los escenarios 1 y 2.

Tabla 7-1: Conductancias adoptadas para los escenarios constructivos del Modelo PHAM

Túnel	Desde	Hasta	Eficiencia (%)	Conductancia Esc. 1 (m ² /d/m)	Conductancia Esc. 2 (m ² /d/m)
LPE5-A-L1	0+100.0	0+250.0	37	0.0032	0.0020
LPE5-A-L1	0+450.0	0+525.0	53	0.0213	0.0100
LPE5-A-L1	0+525.0	0+615.0	42	0.0172	0.0100
LPE5-A-L1	0+625.0	0+703.0	83	0.0600	0.0100
LPE5-A-L1	0+950.0	1+125.0	75	0.0400	0.0100
LPE5-A-L1	1+175.0	1+325.0	42	0.0173	0.0100
VL4A1	0+075.0	0+230.0	90	0.1008	0.0100
VL4-VL4A	0+370.0	0+550.0	41	0.0169	0.0100
VL4-VL4A	0+630.0	1+070.0	92	0.1262	0.0100
VL4-VL4A	1+135.0	1+285.0	90	0.0991	0.0100
VL4-VL4A	1+313.0	1+374.0	76	0.0416	0.0100
VL4-VL4A	1+380.0	1+437.0	81	0.0527	0.0100
VL4-VL4A	1+454.0	1+482.0	72	0.0360	0.0100
VL4-VL4A	1+651.0	1+762.0	52	0.0631	0.0300
VL4-VL4A	1+826.0	1+945.0	94	0.5118	0.0300
L1	0+217.0	0+379.0	97	1.6385	0.0500
L1	0+750.0	1+005.0	24	0.0659	0.0500
L1	1+832.0	1+910.0	67	0.1216	0.0400
L1	1+956.8	2+012.0	73	0.1509	0.0400
L1	2+145.0	2+161.0	75	0.1599	0.0400
VA4	0+741.0	0+843.0	93	0.0082	0.0006
V5	3+246.0	3+116.0	40	0.0168	0.0100
V1	1+336.0	1+451.0	92	0.0722	0.0060
V1	1+512.0	1+573.0	56	0.0138	0.0060

Fuente: Elaboración propia

Figura 7-1: Avance anual proyectado de la construcción de túneles (escenario conservador)



Fuente: Elaboración Propia

7.2 Resultados de series de caudales medios mensuales de los escenarios de simulación

Los resultados del modelo permiten proyectar la serie de caudales a medida que avanza la construcción de los túneles del proyecto. En la Figura 7-2 se presenta la distribución espacial de los tramos de túneles que son considerados para contabilizar el agua aflorada en cada portal. Este supuesto se basa en las estimaciones de un escenario conservador en el avance constructivo de los túneles realizada por PHAM.

En las Figuras 7-3 a 7-11 se presentan las series de caudales medios mensuales que afloran al interior de cada túnel y son conducidos a la salida por el portal respectivo, considerando el avance de excavación proyectado y conservador ya indicado anteriormente.

A partir de estos resultados, es posible observar los efectos de la medida de control en la disminución de los caudales que afloran al interior de los distintos túneles del proyecto. En el túnel Volcán, el cual contabiliza dos portales a cada extremo, se observa en el V5 (sector del río Yeso), se produce un incremento importante del caudal aflorado al interior de este túnel producto del atraveso por el sector de la quebrada Las Cortaderas durante los meses de abril y mayo de 2020 (Figura 7-4).

En el túnel Alfalfal, en términos generales se observan bajos caudales de afloramiento dentro del túnel, no superando los 40 L/s en las proyecciones futuras de excavación. Del mismo modo, al no identificar sector de estructuras geológicas que pudiesen realizar una conexión hidráulica con el túnel, las diferencias entre los Esc 1 y 2 son mínimas, y se observan específicamente en el portal VA-4.

En el túnel Las Lajas, que comprende los portales VL-7, VL-5, VL-4, VL-2 y L1, corresponde al sector con mayores caudales aflorados tanto en el período actual, como en las proyecciones futuras del avance de excavación.

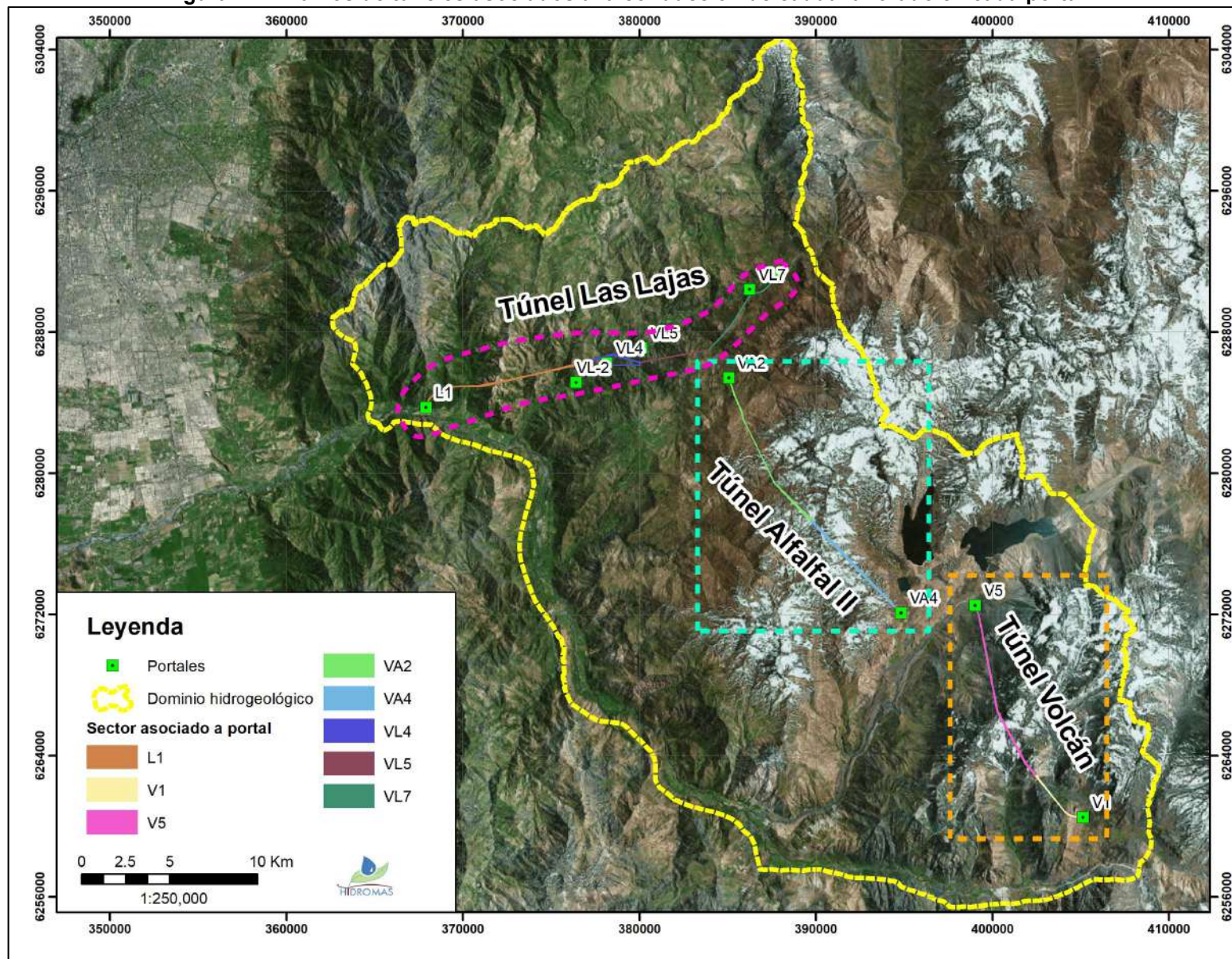
En la Tabla 7-2 se presenta un resumen de los caudales medios mensuales máximos simulados por ambos escenarios de modelación para cada portal considerado. Es importante señalar que, este análisis corresponde a reducciones en los máximos registrados en la serie temporal de los caudales medios mensuales simulados, no corresponden a caudales máximos instantáneos que pudiesen ingresar al túnel.

Tabla 7-2: Caudales para los escenarios constructivos del Modelo PHAM

Túnel	Portal	Caudal medio mensual máximo (L/s)	
		Esc 1	Esc 2
Volcán	V1	17	16
	V5	92	78
Alfalfal	VA4	32	23
	VA2	39	26
Las Lajas	L1	183	127
	VL4	207	101
	VL5	24	20
	VL2	91	60
	VL7	3	3

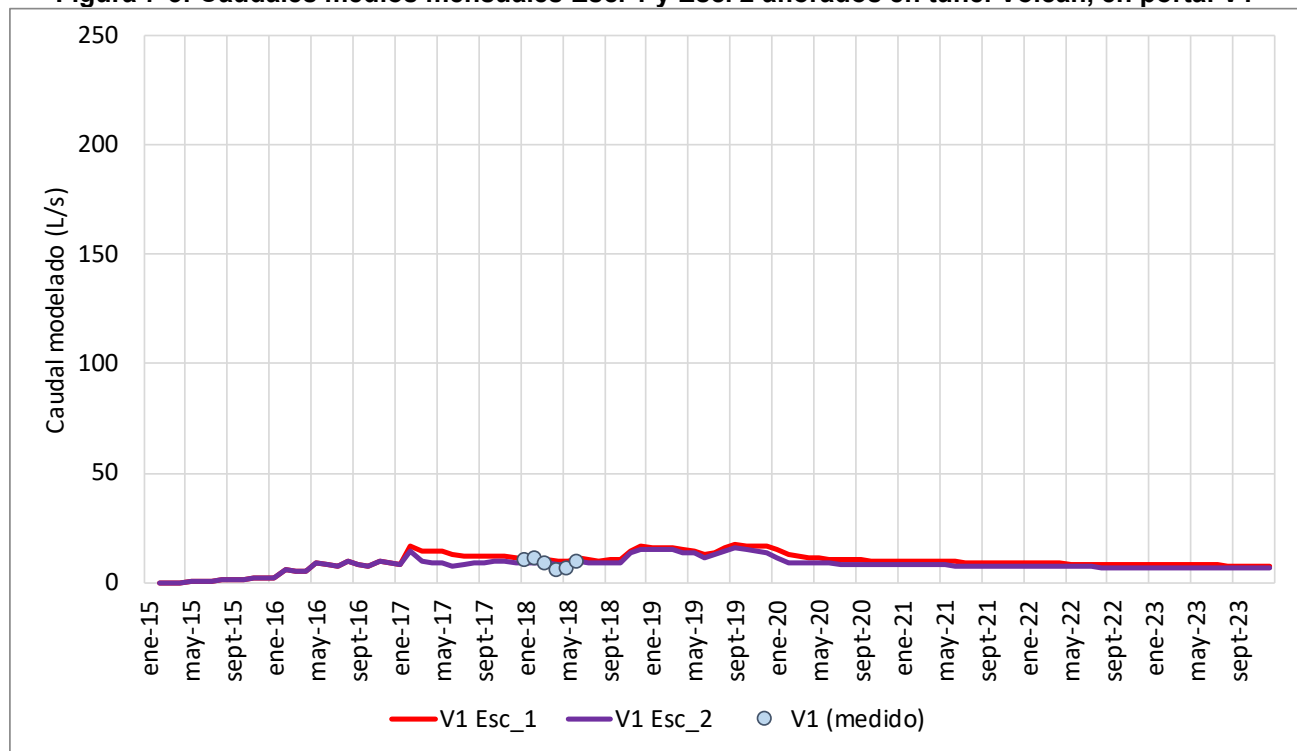
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-2: Tramos de túneles asociados a la conducción de caudal aflorado en cada portal



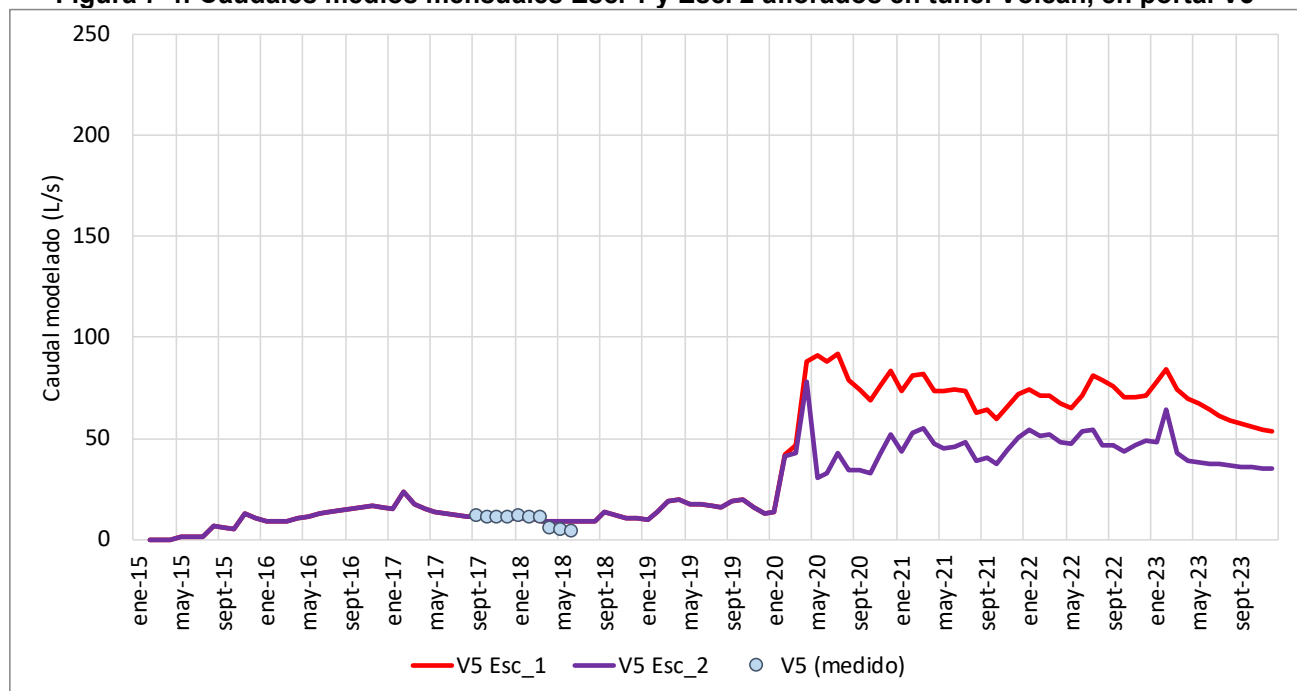
Fuente: Elaboración Propia

Figura 7-3: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Volcán, en portal V1



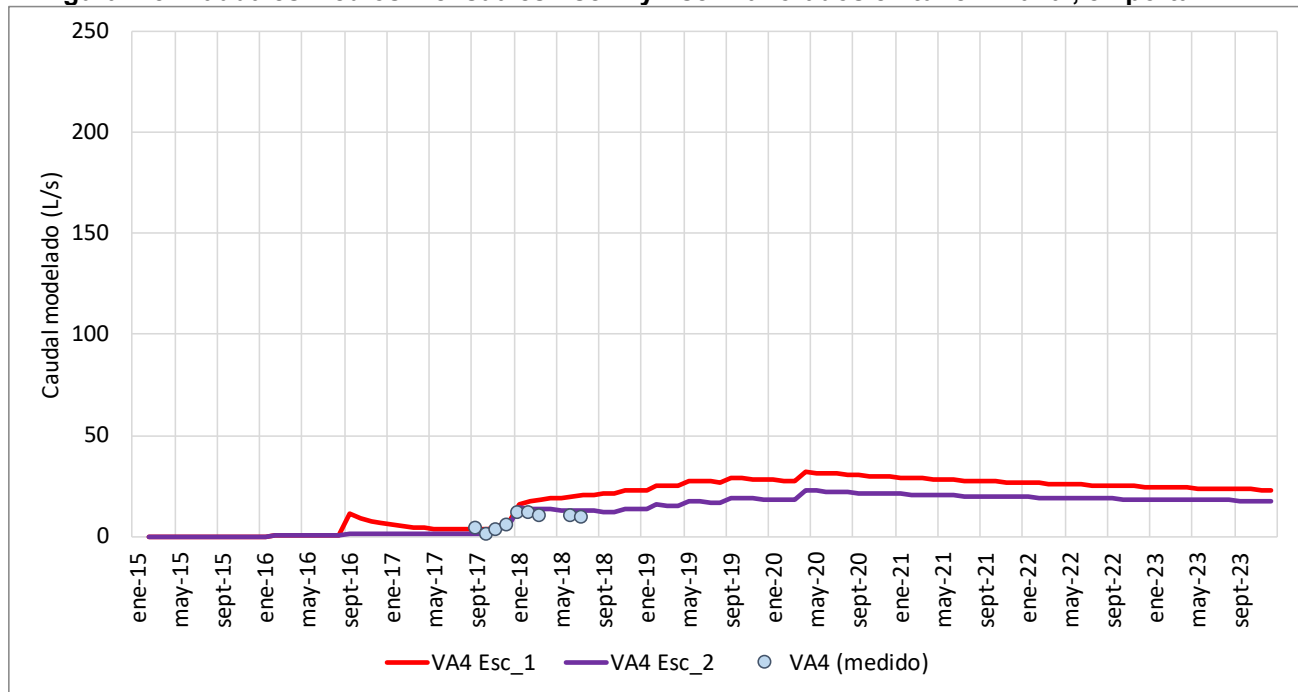
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-4: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Volcán, en portal V5



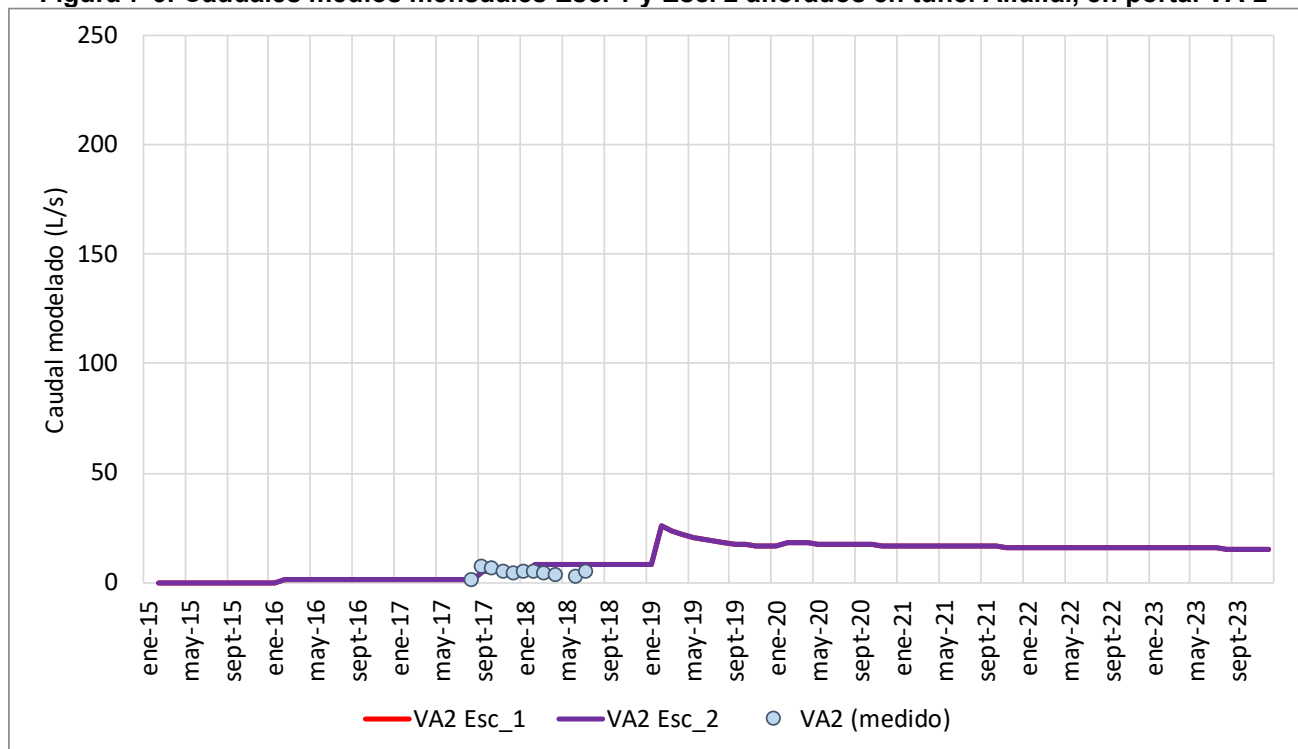
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-5: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Alfalfal, en portal VA-4



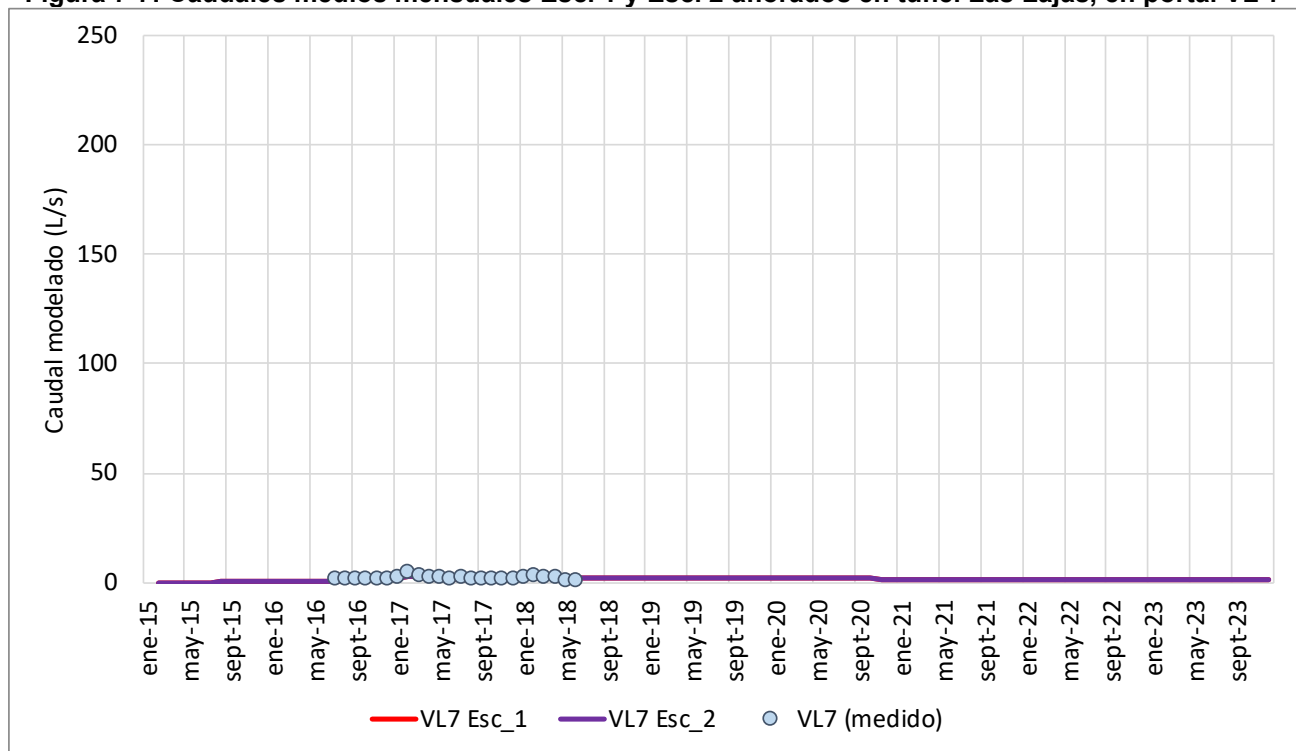
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-6: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Alfalfal, en portal VA-2



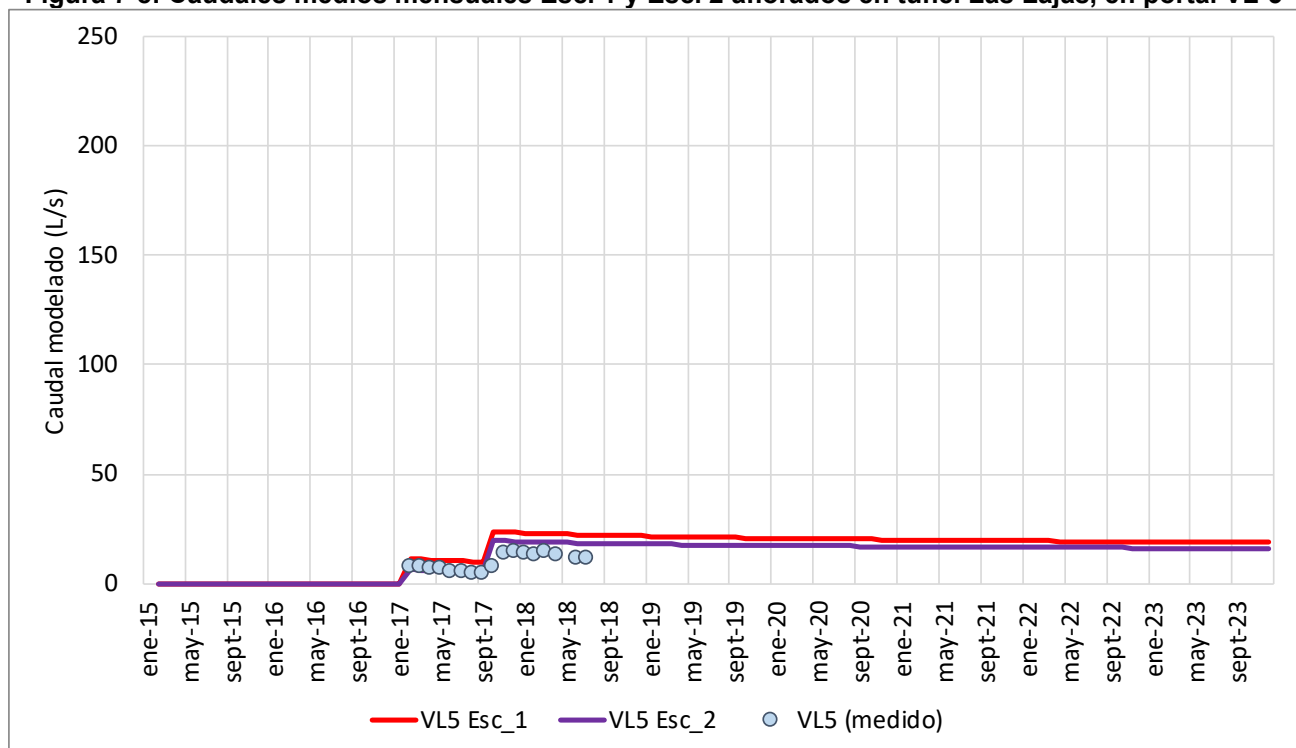
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-7: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal VL-7



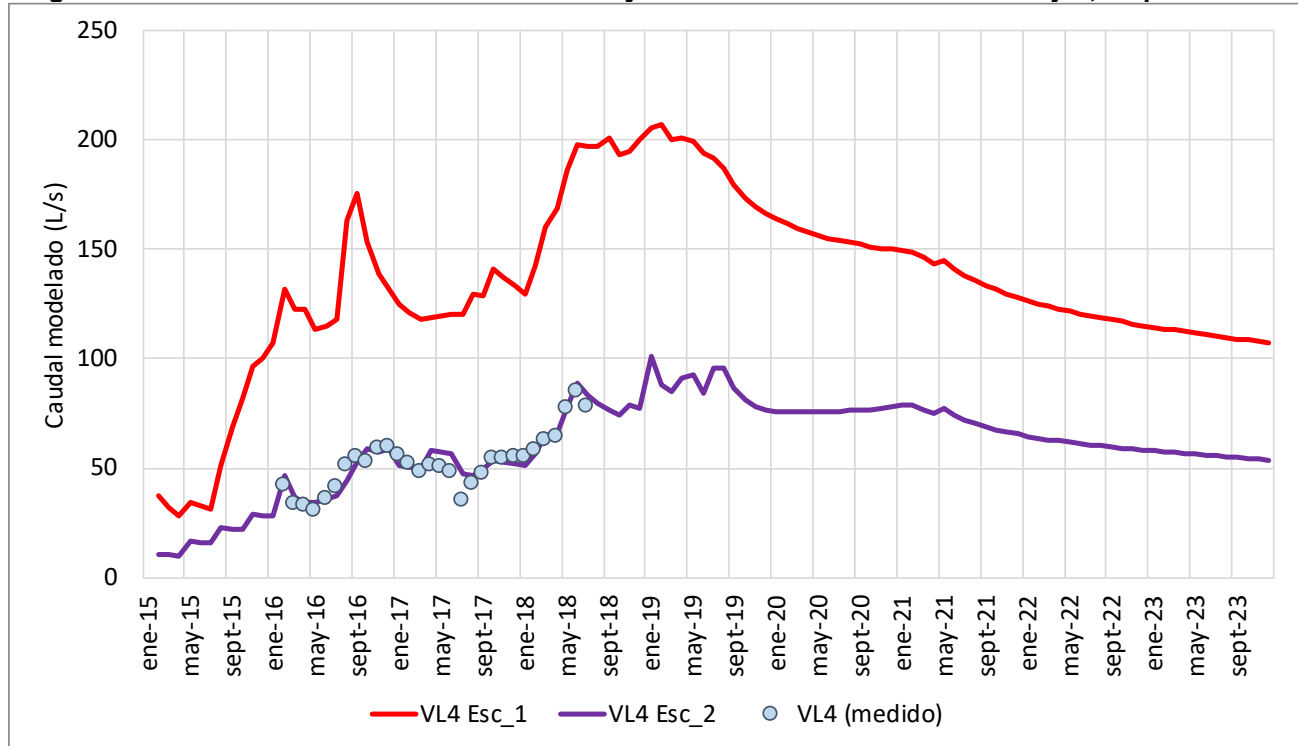
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-8: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal VL-5



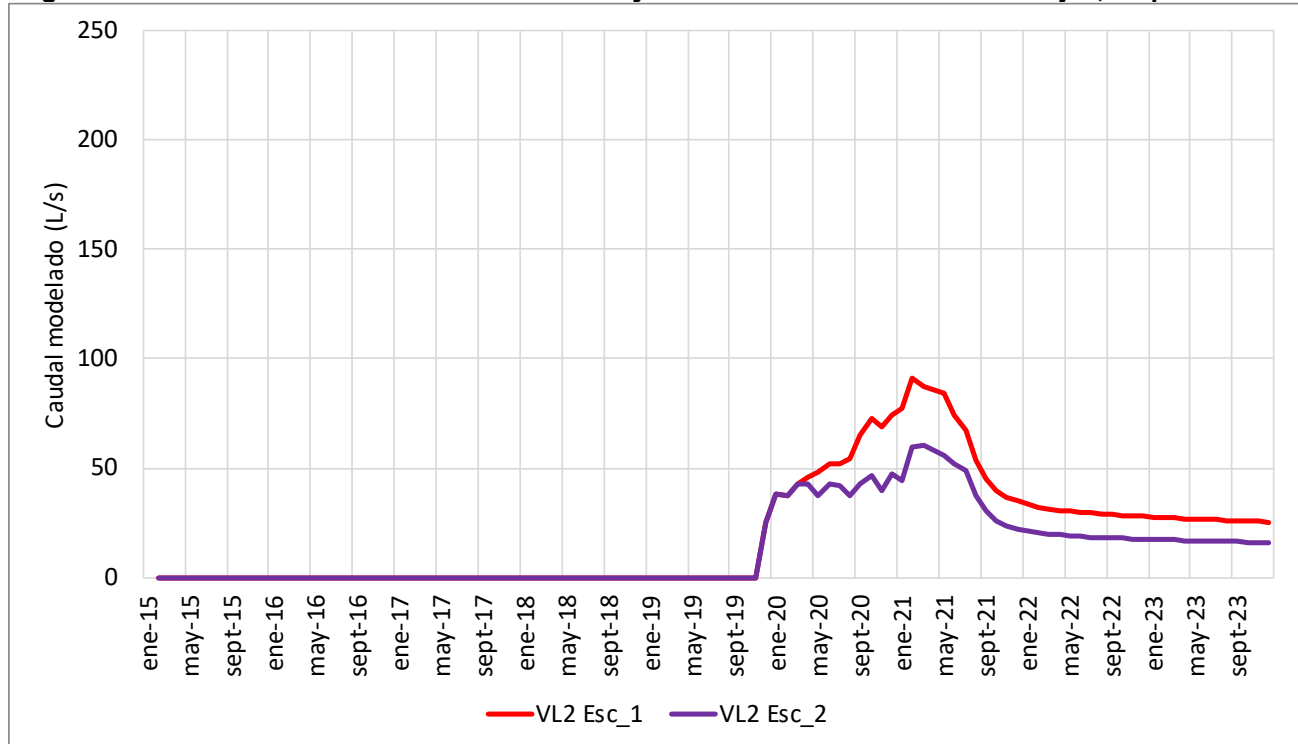
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-9: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal VL-4



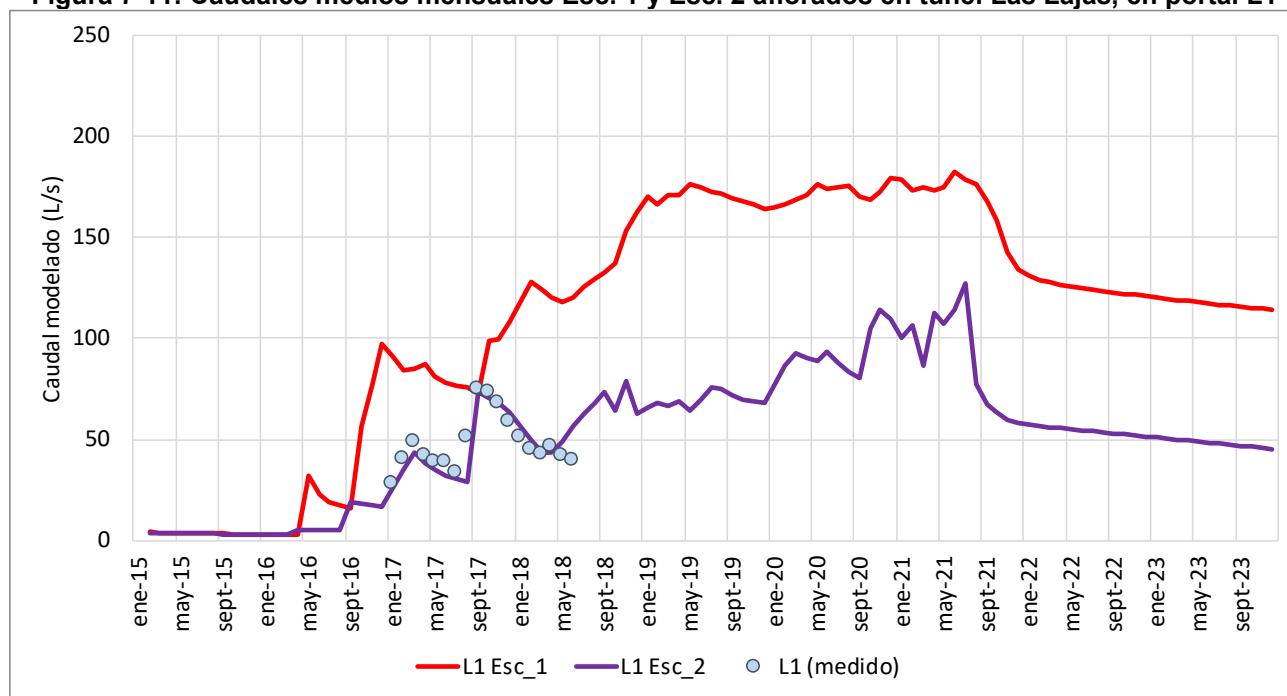
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-10: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal VL-2



Fuente: Elaboración propia

Figura 7-11: Caudales medios mensuales Esc. 1 y Esc. 2 aflorados en túnel Las Lajas, en portal L1



Fuente: Elaboración propia

7.3 Resultados de radio de influencia de efecto de túneles y afectación a terceros

Para determinar o descartar una posible afectación a los pozos con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas constituidos en la zona de interés, se determinó la distancia a la cual es posible observar una posible influencia del drenaje del túnel en el medio hidrogeológico en el cual se emplaza. Este parámetro se denomina “radio de influencia” y fue determinado a partir de los resultados de nivel piezométrico calculados por el modelo numérico.

El radio de influencia se determinó como la distancia radial desde el eje del túnel, hasta donde se tiene una variación de 1 m entre el nivel piezométrico de la condición inicial (régimen permanente sin túneles) y el nivel piezométrico evaluado al final del período de construcción.

En la Figura 7-12 se presenta una vista en planta del radio de influencia obtenido a partir de la modelación realizada en los escenarios 1 y 2 para el final del período de construcción modelado (2023). Mientras que en la Figura 7-13 se presenta un acercamiento de esta información para la zona de El Manzano y se incluye la ubicación de pozos de los pozos con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas constituidos al interior del área de estudio..

Como se aprecia en ambas figuras (figuras 7-12 y 7-13), el radio de influencia obtenido a partir del modelo numérico se encuentra contenido en el sistema de roca y no posee interacción alguna con el acuífero del relleno sedimentario del río Maipo, que es en donde se encuentran ubicados los pozos con derechos de aprovechamiento de aguas de terceros.

Figura 7-12: Radio de influencia estimado a partir de modelación de Esc 1 y Esc 2 al final del período de construcción

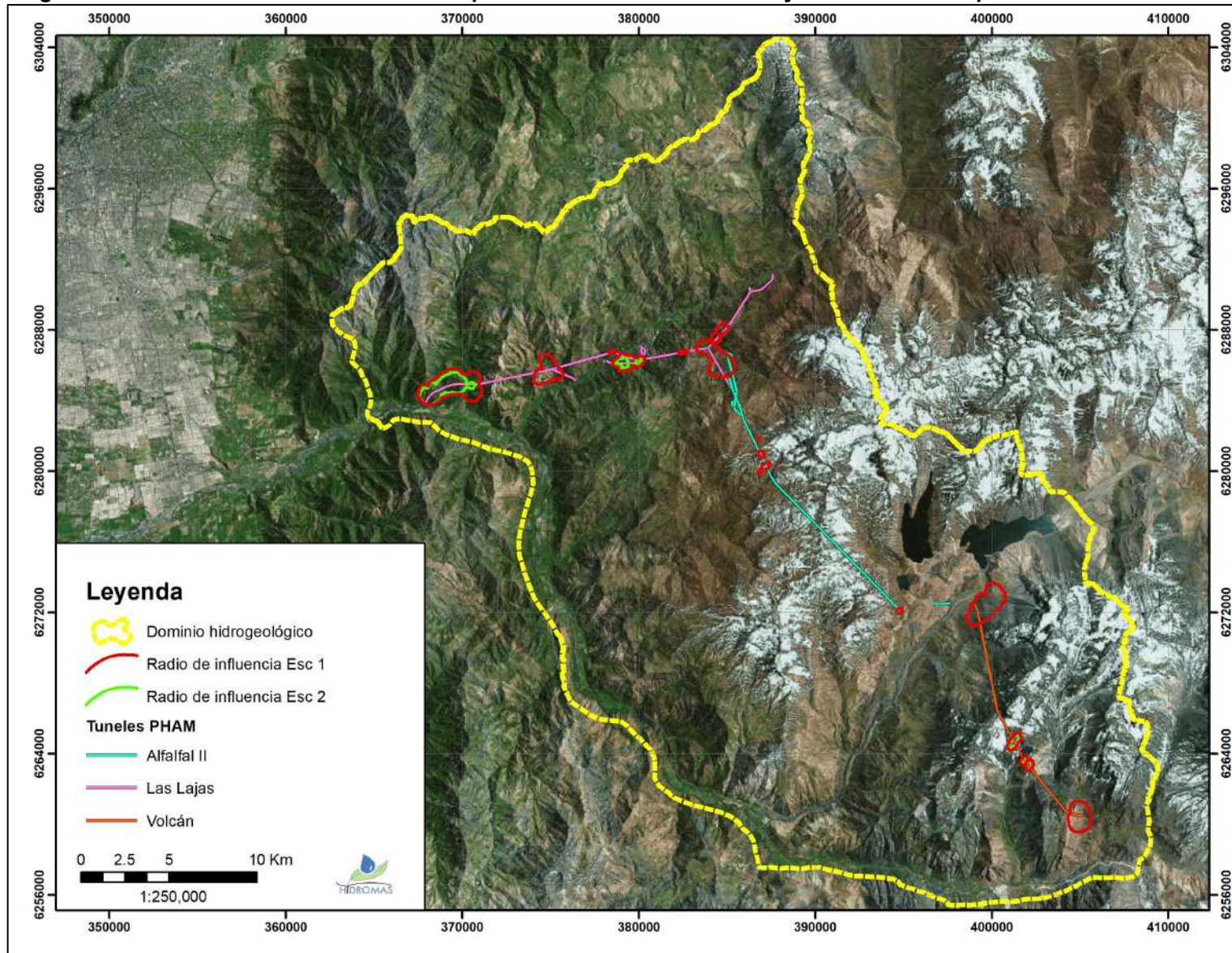
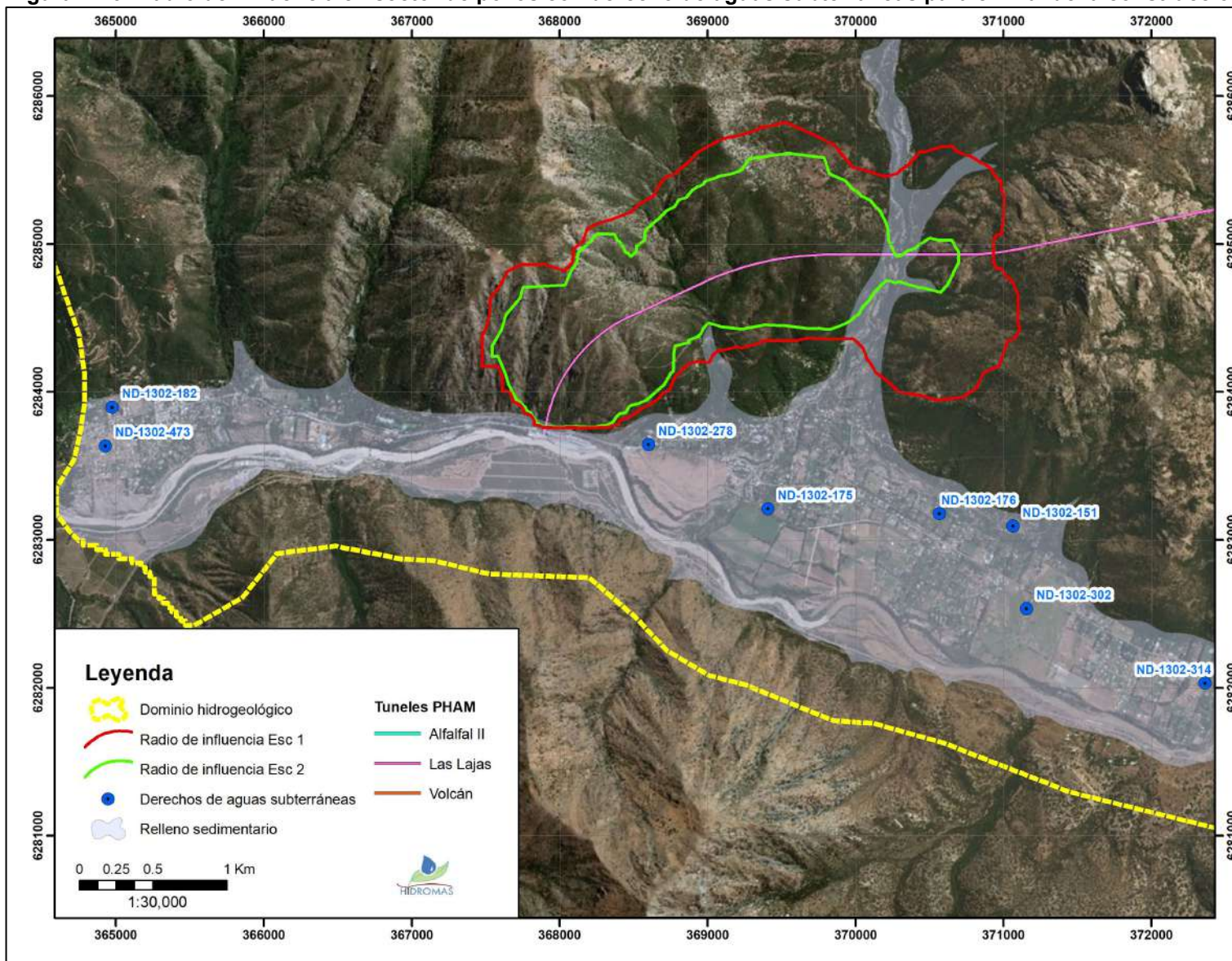


Figura 7-13: Radio de influencia en sector de pozos con derecho de aguas subterráneas para el final de la construcción



Fuente: Elaboración Propia

7.4 Resultados de caudales aflorados en sistemas superficiales

A partir de los resultados del modelo numérico, es posible cuantificar el balance hídrico en cada uno de los sistemas de drenaje superficial asociado a esteros y quebradas, y de esta forma analizar la variación de caudal de flujo base debido a la construcción de los túneles del proyecto.

El modelo numérico a partir de su herramienta de cálculo del balance hídrico por sectores, permite evaluar el caudal de afloramiento de cada quebrada y estero del sistema en estudio. De manera de analizar la posible afectación con los escurrimientos superficiales, se contrastaron los caudales simulados por el modelo en el último periodo de modelación, con respecto a los caudales aflorados en la campaña de abril de 2018.

En total, se analizaron 32 esteros y quebradas, en las cuales en 27 de ellas no existe ningún tipo de disminución en el caudal superficial por efectos de la construcción del túnel.

De las cinco quebradas y esteros en las que es posible identificar un grado de efecto, es posible notar que estas corresponden a cauces ubicados en las cercanías de portales de ingreso de los túneles. Sin embargo, en términos de magnitudes, el máximo caudal de disminución se observa en el Estero El Manzano, siendo de tan solo 1 L/s para el escenario 1 (caso sin medida de control), y al aplicar medida de control, este disminuye a 0,3 L/s. El resto de caudales representan un porcentaje de prácticamente 0%.

En la Tabla 7-3 se presenta un resumen de aquellos cursos de aguas superficiales en los que se observa una variación de caudal entre la situación natural y el final del periodo de construcción, para los escenarios 1 y 2. Es importante señalar que para el resto de esteros y quebradas no existe una diferencia entre los caudales simulados, de manera que no se presentan en la tabla mencionada.

Cabe tener en consideración que la variación del caudal de afloramiento en estas cuencas se encuentra bajo el error de aforo con método del molinete (10% del caudal de aforo).

Tabla 7-3: Caudales superficiales aflorados en quebradas y esteros

Subcuenca	Flujo base superficial aforado abril 2018 (L/s)	Variación del caudal al Final etapa construcción (2023)		Variación del caudal al Final etapa construcción (2023)	
		Esc 1 (L/s)	Esc 2 (L/s)	Esc 1 (%)	Esc 2 (%)
Esteros El Manzano	26	1	0.3	4%	1%
Esteros Aucayes	255	0.6	0.6	0%	0%
Esteros La Engorda	2.269	0.3	0.3	0%	0%
Qda. Las Cortaderas	204	0.2	<0.1	0%	0%
Esteros San José	136	<0.1	<0.1	0%	0%

Fuente: *Elaboración Propia*

8 CONCLUSIONES

A partir de la información recabada por Alto Maipo SpA, y de la información pública disponible, se construyó un modelo conceptual del sistema hidrogeológico donde se emplazarán las obras del PHAM. Los límites del dominio se definieron fundamentalmente en consideración a rasgos geomorfológicos (divisorias de aguas) e hidrográficos (río Maipo) que actúan como condiciones de borde desde el punto de vista hidráulico, y en consideración de contar con un margen de territorio suficiente alrededor de las obras, de manera de analizar adecuadamente todos los efectos del proyecto sobre el sistema hidrogeológico.

Sobre la base de los análisis hidrológicos de las cuencas de interés, se pudo establecer una metodología de estimación de la recarga que satisfizo el balance hídrico establecido al interior del dominio.

En términos de la geología e hidrogeología, se identificaron dos unidades macro al interior del dominio del modelo, las que presentan características hidráulicas bastante distintas. En primer lugar, se encuentra una unidad de roca, la cual posee permeabilidades bajas, y que es la unidad donde se encuentran emplazados los túneles del PHAM. La otra unidad, la conforma el relleno sedimentario que define el sistema acuífero del río Maipo, en términos de extensión superficial es mucho menor que la unidad de roca, pero debido a sus propiedades hidrogeológicas, corresponde a la unidad principal por donde se conduce el agua.

A partir de la conceptualización realizada del sistema, se construyó un modelo numérico siguiendo la guía de modelación del SEA (2012). La calibración del modelo mostró un grado adecuado de correlación entre las variables simuladas y medidas, de manera que el modelo hidrogeológico construido logró representar de manera correcta el sistema en estudio. La herramienta numérica permitió evaluar el comportamiento del sistema hidrogeológico ante los efectos de la construcción de los túneles.

Con el modelo numérico desarrollado, se consideraron dos escenarios de simulación. El primero (escenario 1) considera que el avance del túnel se realiza sin implementar la medida de control de afloramientos (grouting) y el segundo (escenario 2) corresponde a la situación con implementación de medidas de control.

Como resultado de la evaluación de estos escenarios, se concluyó que los caudales de aguas afloramiento, expresados en términos de caudales medios mensuales y estimados en los portales de los sistemas de túneles, disminuyen notablemente al aplicar la medida de control, ya que los caudales simulados para el escenario 2 fueron considerablemente menores que para el escenario 1.

Del mismo modo, se analizó el radio de influencia que generaría la excavación de los túneles bajo los dos escenarios estudiados. En ambos casos se determinó que el radio de influencia queda contenido en el sistema de roca, sin manifestarse efectos sobre el sistema del relleno sedimentario del río Maipo. Así, se concluye que el drenaje de aguas de afloramiento producto de la construcción de los túneles no afectará los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados por la DGA a terceros, ni la disponibilidad futura del acuífero del relleno sedimentario.

Finalmente, se analizó el efecto del drenaje de los túneles sobre los caudales superficiales de los esteros y quebradas del sector. De los resultados de la modelación se concluye que en gran parte de las subcuencas analizadas (en total se analizaron 32 esteros y quebradas) no existiría disminución de sus caudales producto de la construcción de los túneles, siendo cuantificable este efecto sólo en 5 subcuencas, con disminuciones menores de su caudal, que sólo en un caso alcanza 1 L/s y en los cuatro casos restantes se aproxima al 0%.

REFERENCIAS

- Tapia, A, 2018. Análisis de efectividad de grouting.
- DGA, 2018. Base de datos en línea de expedientes de derechos de agua.
- DGA, 2018. Base de datos en línea de registros de la red hidrométrica.
- HIDROMAS, 2018. Radio de influencia producido por el drenaje del túnel Las Lajas en sector L1.
- Singhal BBS, Gupta RP, 1999. Applied hydrogeology of fractured rocks. Kluwer Academic Publishers. 400 pp.
- GEOAV, 2017. Revisión y Actualización del Modelo Geológico Proyecto Hidrológico Alto Maipo
- SRK, 2017. Modelo hidrogeológico conceptual y numérico sector Las Lajas.
- Castillo, 2015. Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado.
- SEA, 2012. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA.

ANEXOS

ANEXO 1 ESTUDIO BÁSICO HIDROLOGÍA

ANEXO 2 ESTUDIO DE PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS

ANEXO 3 ESTUDIO GEOLÓGICO

ANEXO 4 ESTUDIO BÁSICO HIDROQUÍMICA



ANEXO 1 ESTUDIO BÁSICO HIDROLOGÍA

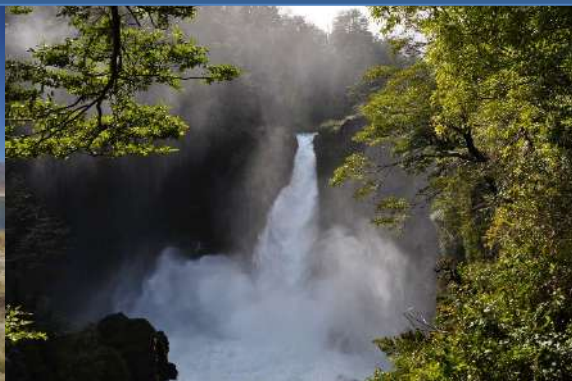
INFORME Rev 0

Preparado para

Alto Maipo SpA.

DICIEMBRE DE 2018

Preparado por
HIDROMAS LTDA



Anexo 1 Estudio Básico Hidrología

Código de Proyecto: [2018 - 228 - MNAM]

HIDROGEOLOGIA y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE LTDA

Suecia 211, Oficina 701-A, Providencia - Santiago Chile

e-mail: contacto@hidromas.cl

website: www.hidromas.cl

Tel: +(56-2) 232027540

REV.	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	DESCRIPCIÓN
Rev.A	Rodrigo Zamorano	Julio Cornejo	Julio Cornejo	Coordinación Interna
	[14.11.18]	[26.11.18]	[26.11.18]	
Rev.B	Rodrigo Zamorano	Julio Cornejo	Mesenia Atenas	Revisión y Aprobación Cliente
	[03.12.18]	[03.12.18]	[03.12.18]	
Rev.0	Rodrigo Zamorano	Mesenia Atenas	Mesenia Atenas	Aprobado Cliente
	[28.12.2018]	[28.12.2018]	[28.12.2018]	

TABLA DE CONTENIDOS

1	ÁREA DE ESTUDIO.....	1
2	ANÁLISIS PRECIPITACIONES.....	3
2.1	Información de precipitación	3
2.2	Correlaciones y relleno de información	5
2.3	Gradiente de precipitación-elevación	7
2.4	Precipitación sólida.....	10
3	ANÁLISIS DE CAUDALES.....	14
3.1	Información de caudales	14
3.2	Variación estacional de caudales superficiales.....	16
3.3	Caudales centrales Alfalfal y Maitenes	18
3.4	Caudales aforados en esteros y quebradas	19
4	ESTIMACIÓN DE LA RECARGA.....	22
4.1	Aspectos generales	22
4.2	Definición zonas de recarga.....	22
4.3	Estimación de la descarga por afloramiento en el Sistema Sedimentario.....	24
4.3.1	Afloramiento Sistema del Río Colorado	24
4.3.2	Afloramiento Sistema del Río Yeso	26
4.3.3	Afloramiento Sistema del Río Volcán	27
4.3.4	Afloramiento Sistema del Río Maipo	29
4.4	Estimación de la recarga en la unidad de relleno sedimentario	30
4.5	Estimación de las descargas en la unidad de roca.....	31
4.6	Estimación de la recarga en la unidad de roca	34
4.7	Balance hídrico	39
APENDICE A		41
APENDICE B		46

FIGURAS

Figura 1-1:	Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, y Cuencas Definidas.....	2
Figura 2-1:	Ubicación de las Estaciones Pluviométricas Consideradas en el Análisis.....	4
Figura 2-2:	Serie de precipitación anual en los años hidrológicos de estudio	6
Figura 2-3:	Precipitación en función de la elevación.....	8
Figura 2-4:	Gradiente precipitación-elevación definido según rango de cota.....	9
Figura 2-5:	Rango de elevaciones en el área de estudio.....	11
Figura 2-6:	Ubicación estación Laguna Negra	12
Figura 2-7:	Serie de equivalente en agua de precipitación nival registrada en estación Laguna Negra....	13

Figura 3-1: Ubicación espacial de las estaciones fluviométricas dentro del área de estudio	15
Figura 3-2: Variación estacional de caudales mensuales medios	17
Figura 3-3: Caudales medios de restitución de las centrales Alfalfal y Maitenes	18
Figura 3-4: Caudales aforados en estero San José.....	20
Figura 3-5: Ubicación espacial de los aforos realizados durante abril de 2018.....	21
Figura 4-1: Zonas de recarga separadas en el subsistema del relleno sedimentario y el de roca.....	23
Figura 4-2: Diagrama unifilar sistema Río Colorado	24
Figura 4-3: Diagrama unifilar sistema Río Yeso.....	27
Figura 4-4: Diagrama unifilar sistema Río Volcán.....	28
Figura 4-5: Diagrama unifilar sistema Río Maipo	29
Figura 4-6: Contribución del hielo glaciar al caudal total en distintas temporadas y dependiendo del área glaciar total	33
Figura 4-7: Esquema del balance hídrico general (imagen superior) y considerado para el mes de abril (imagen inferior)	36
Figura 4-8: Zonas de recarga en el sistema de roca	37

TABLAS

Tabla 2-1: Estaciones pluviométricas DGA en la zona, Datum WGS 84 Huso 19	3
Tabla 2-2: Resumen cantidad de registros totales y precipitación anual media de serie sin rellenar	5
Tabla 2-3: Resumen de precipitación anual media rellenada	5
Tabla 2-4: Precipitación anual media y elevación de cada estación pluviométrica	7
Tabla 3-1: Estaciones fluviométricas DGA en la zona, Datum WGS 84 Huso 19	14
Tabla 3-2: Caudales aforadas en campaña de medición de abril 2018.....	19
Tabla 4-1: Caudales superficiales que definen el sistema del Río Colorado.....	25
Tabla 4-2: Caudales superficiales que definen el sistema del Río Yeso	26
Tabla 4-3: Caudales superficiales que definen el sistema del Río Volcán	29
Tabla 4-4: Caudales superficiales que definen el sistema del Río Maipo	30
Tabla 4-5: Estimación de las recargas en el relleno sedimentario en cada subsistema	31
Tabla 4-6: Caudales aforados y área de aporte glaciar de la subcuenca.....	32

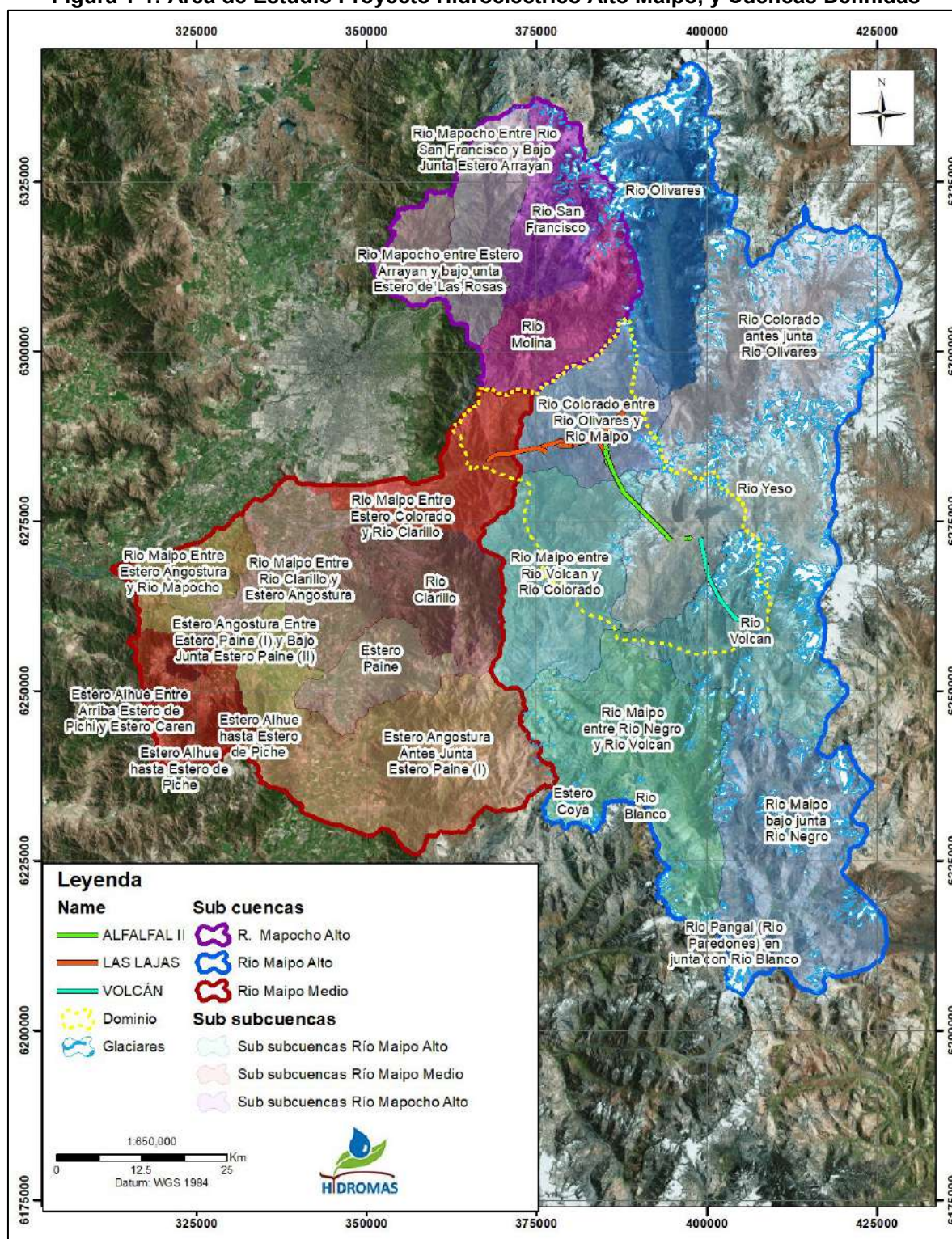
Tabla 4-7: Recarga de las unidades de roca dentro del Dominio	38
Tabla 4-7: Resumen Balance Hídrico Conceptual	39

1 ÁREA DE ESTUDIO

El “Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo” (PHAM), se emplaza en la parte alta de la cuenca del río Maipo, en la comuna de San José de Maipo, provincia Cordillera de la región Metropolitana. La extensión del trazado de los túneles y obras del proyecto se encuentra mayoritariamente dentro de las subcuencas definidas por la Dirección General de Aguas (DGA) del río Maipo Alto y en una parte de la subcuenca del río Maipo Medio. Dentro del área del proyecto se destaca la presencia de glaciares, lagunas, embalses, entre otros cuerpos de agua. En la Figura 1.1 se ilustra la zona en donde se emplaza el proyecto con las unidades hidrológicas mencionadas, las cuales son:

- Sub cuenca Río Maipo Medio
 - Sub-subcuenca Río Maipo entre Estero Colorado y Río Clarillo
- Sub-cuenca Río Maipo Alto
 - Sub-subcuenca Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo
 - Sub-subcuenca Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado
 - Sub-subcuenca Río Volcán
 - Sub-subcuenca Río Yeso

Figura 1-1: Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, y Cuencas Definidas



Fuente: Elaboración propia

2 ANÁLISIS PRECIPITACIONES

2.1 Información de precipitación

Dentro del sector de estudio, existen estaciones pluviométricas de la red hidrométrica de la DGA. Para representar el régimen de precipitaciones en el sector de interés del dominio hidrogeológico, se utilizarán los datos de 5 estaciones pluviométricas, cuyas características generales se presentan en la Tabla 2-1. Del mismo modo en la Figura 2-1 se muestra espacialmente la ubicación de las estaciones.

El criterio de selección de las estaciones consiste en aquellas con un registro lo suficientemente extenso con el fin de representar el comportamiento histórico del régimen de precipitaciones dentro del dominio de estudio. Del mismo modo, se seleccionaron estaciones ubicadas a distintas elevaciones para establecer un gradiente precipitación-elevación con mayor sustento.

Tabla 2-1: Estaciones pluviométricas DGA en la zona, Datum WGS 84 Huso 19

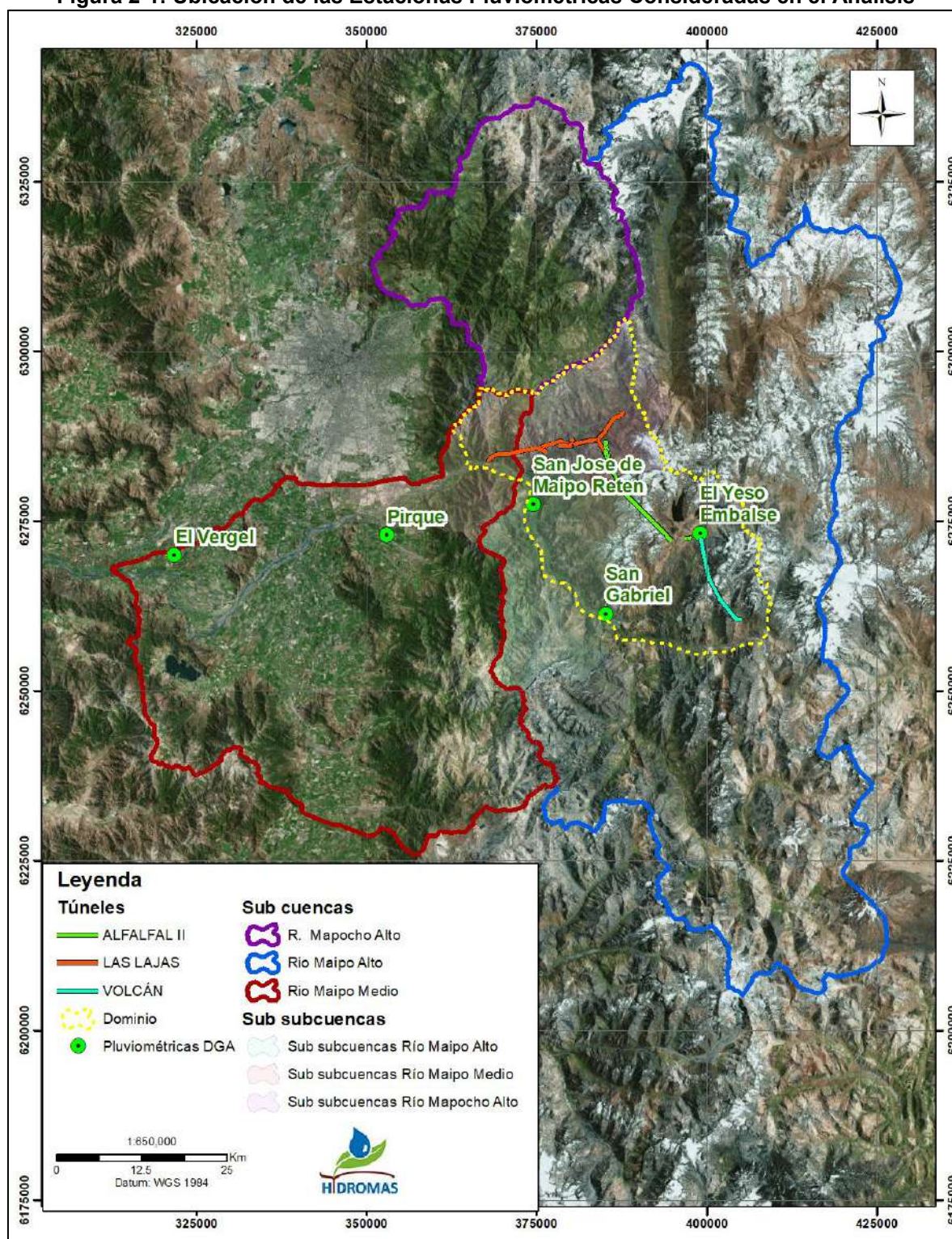
Nombre Estación	Altitud (mnsn)	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Fecha Inicio	Fecha Final	Código BNA
El Vergel	340	6.269.912	321.716	may-1988	may-2017	5717008
Pirque	659	6.272.904	352.888	oct-1967	may-2017	5711003
San José De Maipo	943	6.277.370	374.509	ago-1971	may-2017	5704006
San Gabriel	1266	6.261.269	385.250	dic-1977	may-2017	5704004
El Yeso Embalse	2475	6.273.158	399.089	abr-1962	may-2017	5703008

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 2-1, la fecha de inicio del registro varía para cada estación, de esta forma, para uniformar la extensión de la estadística a utilizar, se consideró en el análisis la información por año hidrológico (desde abril a marzo) desde el período 1976-77 hasta 2016-17, es decir, los últimos 40 años hidrológicos.

A partir de lo anterior, se utilizó la metodología de correlación a partir de una estación base, para rellenar la estadística de precipitaciones anuales de aquellas estaciones con información incompleta.

Figura 2-1: Ubicación de las Estaciones Pluviométricas Consideradas en el Análisis



Fuente: Elaboración propia

2.2 Correlaciones y relleno de información

A partir de la información disponible descrita en el acápite 2.1, se realiza el proceso de relleno de la estadística mediante la metodología de correlaciones de precipitación anual. En el Apéndice A, se presenta la información de precipitaciones anuales para cada estación, del mismo modo en la Tabla 2-2, se presenta un resumen de la cantidad de años completos para cada estación de interés. El valor anual solo es considerado para aquellos años hidrológicos con los 12 meses con información.

Como se observa en la Tabla 2-2, la estación Pirque es la que posee mayor cantidad de registros (40 años), faltando solo el año hidrológico de 1981-82. A partir de esto, es que esta estación es considerada como base para el relleno de los años incompletos del resto de estaciones.

De esta forma, se rellenaron los registros de precipitación anual, utilizando la correlación lineal de cada estación con la estación base de Pirque. Los resultados completos del análisis de correlación se presentan en el Apéndice A. Es importante señalar que todos los ajustes lineales obtenidos poseen coeficientes R^2 mayores al 80%, de manera que se valida la correlación entre las precipitaciones registradas en la estación Pirque con el resto.

Como resultado de lo anterior, se obtiene en total una serie de 41 años de precipitación anual para las 5 estaciones de interés. En la Tabla 2-3 se presenta un resumen de los resultados de precipitaciones anuales medias para cada una de las estaciones consideradas en el análisis.

Como se observa en la Tabla 2-3, la estadística rellenada no varía de manera significativa con respecto a la serie sin rellenar. De esta forma se generó una serie de precipitaciones anuales para cada una de las estaciones, con una extensión total de 41 años completos, el registro de las precipitaciones anuales rellenadas se presenta en el Apéndice A.

En la Figura 2-2 se presenta la serie de precipitaciones anuales rellenadas, obtenida a partir de la metodología descrita anteriormente.

Tabla 2-2: Resumen cantidad de registros totales y precipitación anual media de serie sin rellenar

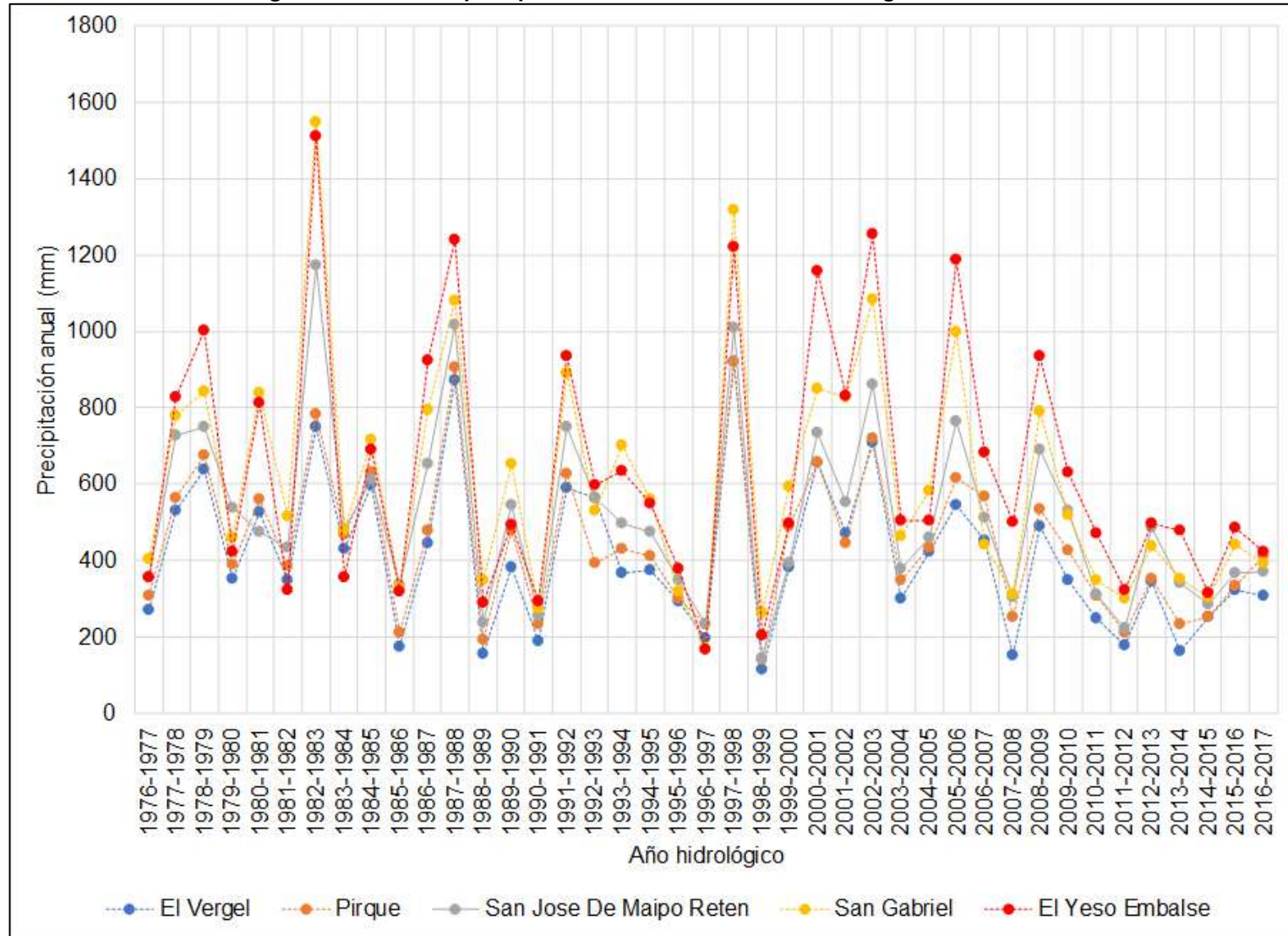
Parámetro	El Vergel	Pirque	San José De Maipo	San Gabriel	El Yeso Embalse
Años completos	25	40	36	35	39
% del total	61%	98%	88%	85%	95%
Pp anual media (mm)	383	449	520	616	626

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-3: Resumen de precipitación anual media rellenada

Parámetro	El Vergel	Pirque	San José De Maipo	San Gabriel	El Yeso Embalse
Años completos	41	41	41	41	41
% del total	100%	100%	100%	100%	100%
Pp anual media rellenada (mm)	411	447	517	607	640
Pp anual media sin rellenar (mm)	383	449	520	616	626
Variación %	7%	-0.3%	-1%	-1%	2%

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-2: Serie de precipitación anual en los años hidrológicos de estudio

Fuente: Elaboración Propia

2.3 Gradiente de precipitación-elevación

A partir de la serie de precipitaciones generada en el acápite 2.2, se construye un gradiente de precipitación anual en función de la elevación. En la Tabla 2-4 se presenta el valor de precipitación anual media de cada estación, en conjunto con la respectiva elevación o cota a la cual se encuentra ubicada. Del mismo modo, en la Figura 2-3 se presenta de manera gráfica el gradiente precipitación-elevación construido a partir de las series de precipitación anual generadas para cada estación.

Como se observa en la Figura 2-3 la precipitación anual media se incrementa a medida que aumenta la elevación, sin embargo, es posible identificar dos tendencias en el gradiente generado, en donde a partir de una elevación de 1.266 msnm la tasa a la cual aumenta la precipitación es menor que lo observado para menores elevaciones.

De esta forma, se establece que para elevaciones mayores la precipitación líquida no se incrementa a la misma tasa que para elevaciones menores, ya que, en este rango más alto de alturas, se manifiestan precipitaciones en forma de nieve.

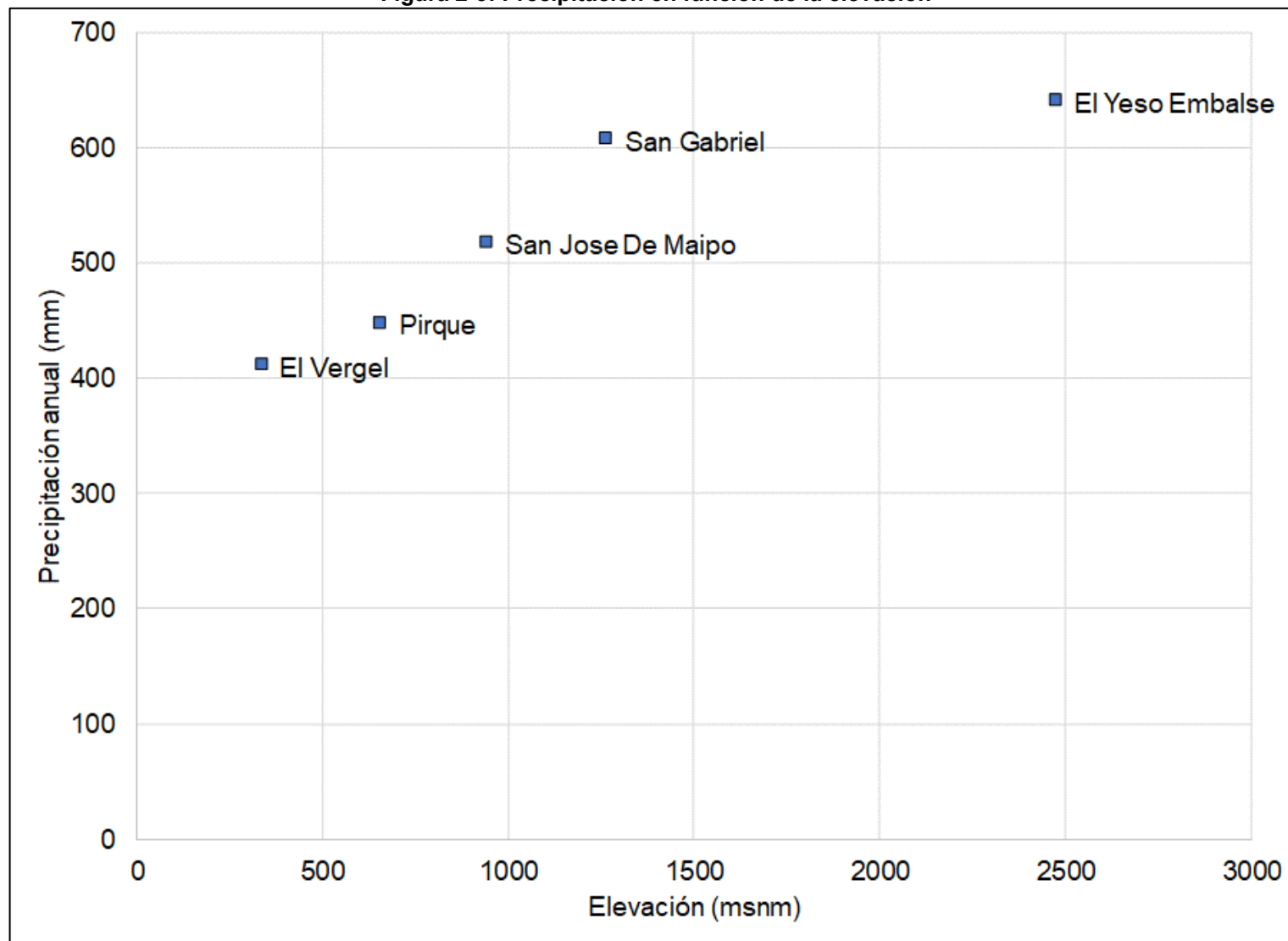
A partir de lo anteriormente expuesto, se generan dos gradientes lineales de precipitación-elevación, ya que, al considerar la linealidad en toda la zona, se estarían sobre estimando las precipitaciones líquidas en los sectores más altos del área de estudio. La cota umbral considerada es de 1.266 msnm, de manera que se tiene un gradiente válido desde los 340 a 1.266 msnm y otro desde los 1.266 msnm hacia arriba. En la Figura 2-4 se presenta el gradiente de precipitación-elevación diferenciado según el umbral de altura.

A partir del gradiente presentado en la Figura 2-4, se observa que, para alturas mayores a 1.266 msnm, la tasa de incremento de la precipitación anual media es dos órdenes de magnitud que la tasa obtenida para menores elevaciones.

Tabla 2-4: Precipitación anual media y elevación de cada estación pluviométrica

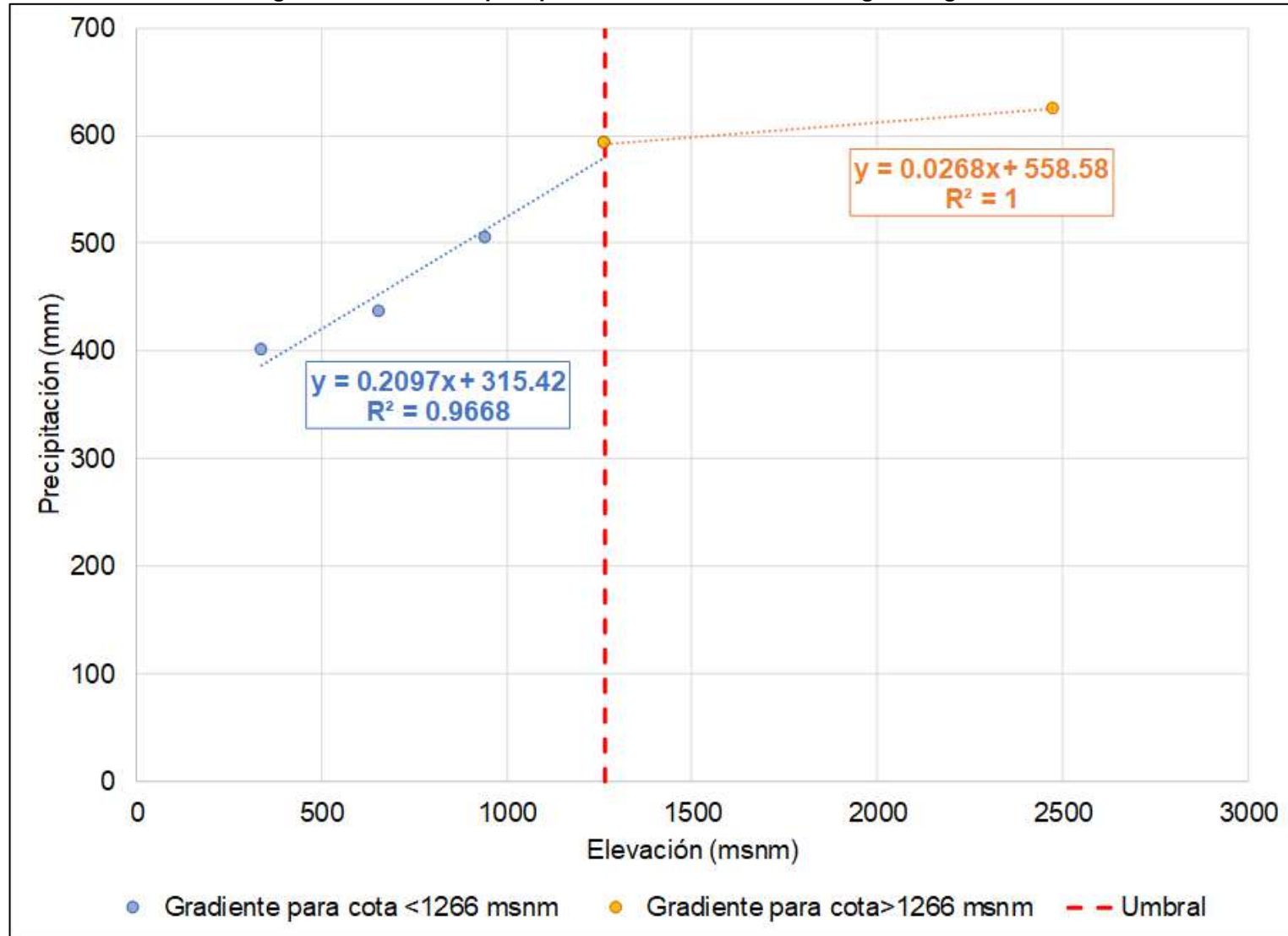
Estación	Elevación (msnm)	Precipitación anual media (mm)
El Vergel	340	411
Pirque	659	447
San Jose De Maipo	943	517
San Gabriel	1266	607
El Yeso Embalse	2475	640

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-3: Precipitación en función de la elevación

Fuente: Elaboración Propia

Figura 2-4: Gradiente precipitación-elevación definido según rango de cota



Fuente: Elaboración Propia

2.4 Precipitación sólida

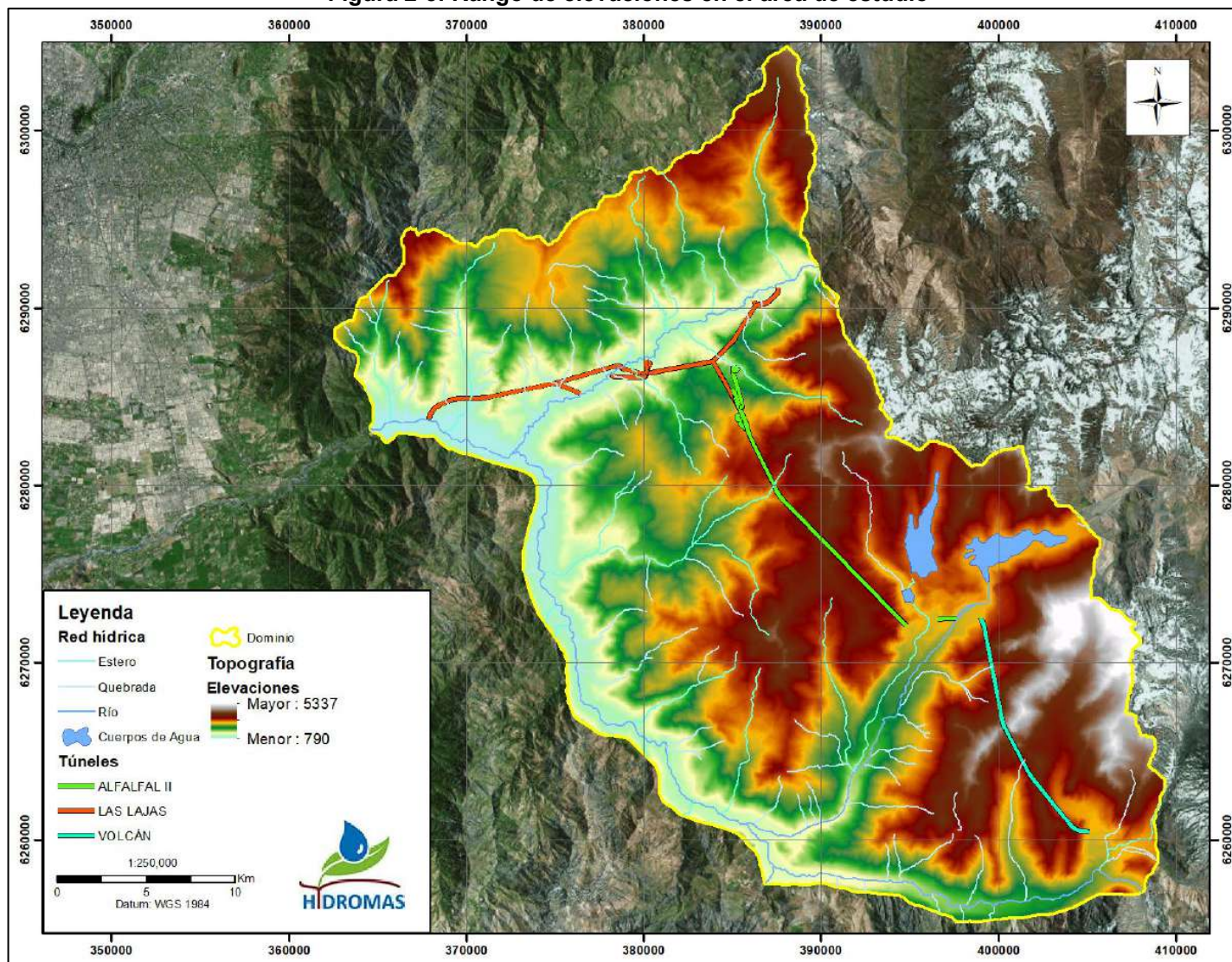
En el área de estudio, el rango de alturas es muy variable, llegando a cotas muy altas en dónde predomina la precipitación en forma de nieve. En la Figura 2-5 se presenta el dominio de estudio, con el rango de elevaciones presentes, éstas fueron determinadas a partir de un modelo de elevación digital generado para el área de estudio.

Dentro del área de estudio existe solamente una estación con registros de medición de nieve caída, esta corresponde a la estación Laguna Negra (DGA, 2018). En la Figura 2-6 se presenta la ubicación de la estación, ésta se encuentra a una elevación de aproximadamente 2.700 msnm.

En el gráfico de la Figura 2-7 se presentan los registros de precipitación en equivalente en agua, como se observa, los valores extremos de precipitación nival coinciden con años extremadamente húmedos, como, por ejemplo, 1982, 1987 o 1997. A partir de estos registros se obtiene un valor anual medio de 560 mm de equivalente en agua nieve.

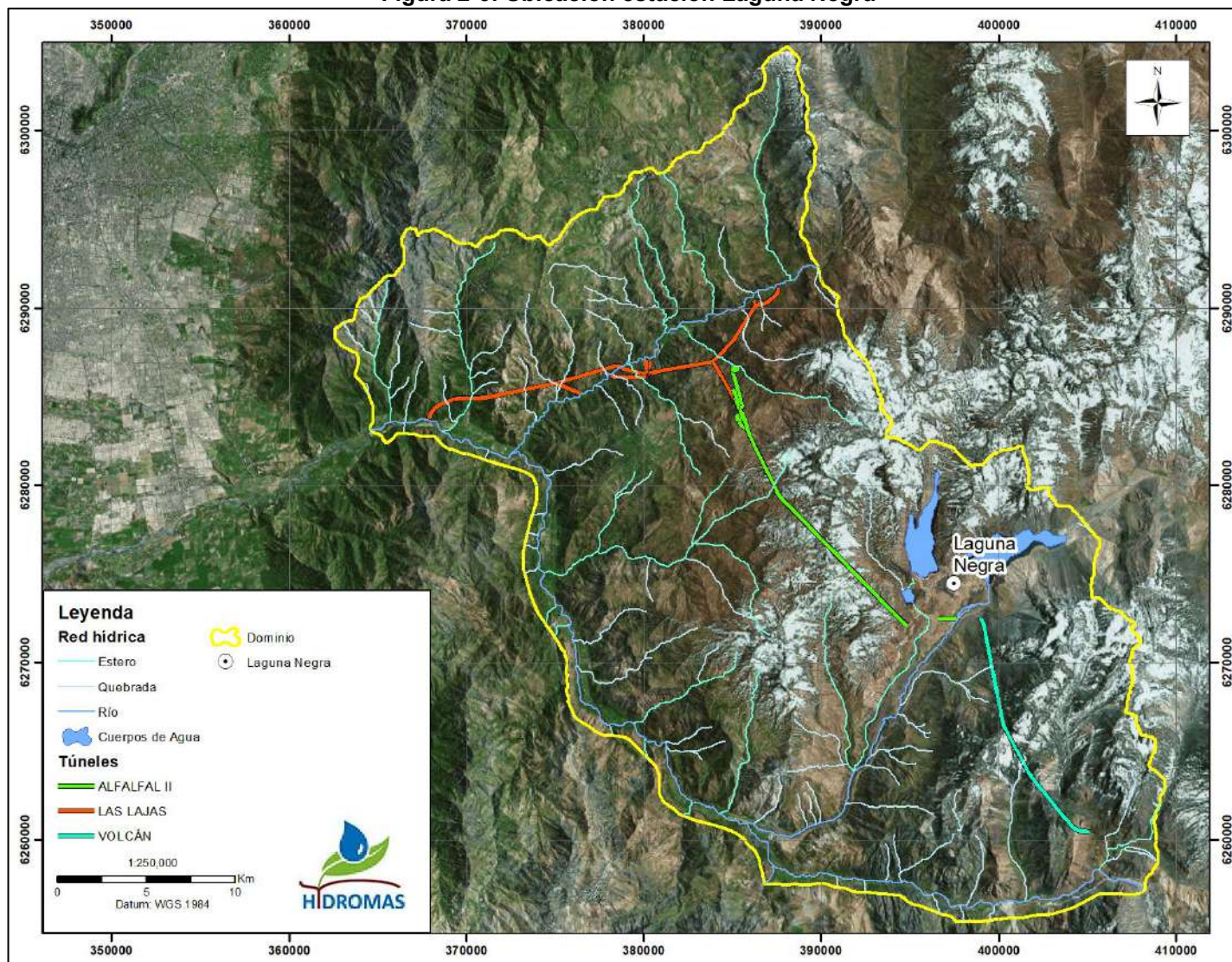
Debido a la falta de información nival de la zona, se consideró que este valor anual nieve del equivalente de agua nieve, es representativo del área de estudio.

Figura 2-5: Rango de elevaciones en el área de estudio

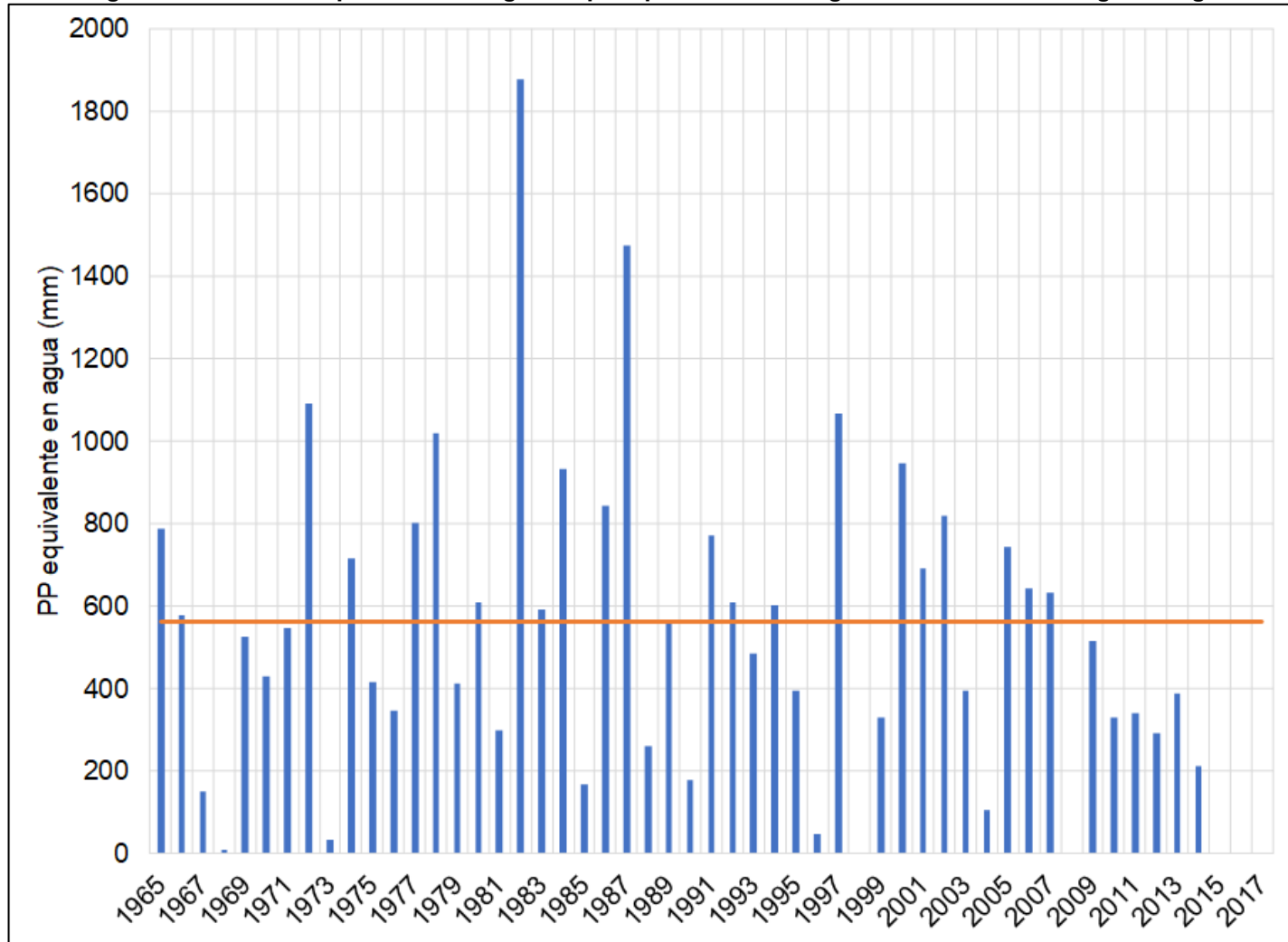


Fuente: Elaboración Propia

Figura 2-6: Ubicación estación Laguna Negra



Fuente: Elaboración Propia

Figura 2-7: Serie de equivalente en agua de precipitación nival registrada en estación Laguna Negra

Fuente: Elaboración Propia

3 ANÁLISIS DE CAUDALES

3.1 Información de caudales

En el presente capítulo se presenta una descripción general del régimen de caudales superficiales presentes dentro del área de interés. Para lo anterior, se cuenta con información de caudales medios mensuales medidos en estaciones fluviométricas pertenecientes a la red hidrométrica de la DGA.

A lo largo del cauce del Río Maipo, se cuenta con dos estaciones fluviométricas, una en el sector de San Alfonso y otra en el sector de El Manzano.

En los afluentes al río Maipo, se cuenta con estaciones fluviométricas en el cauce del Río Volcán en Queltehues y en Río Colorado antes de la confluencia con el Río Maipo. Es importante señalar que estos cauces están influenciados por la operación de las centrales hidroeléctricas Alfalfal y Maitenes en el río Colorado, y la central Queltehues en el sector del río Volcán.

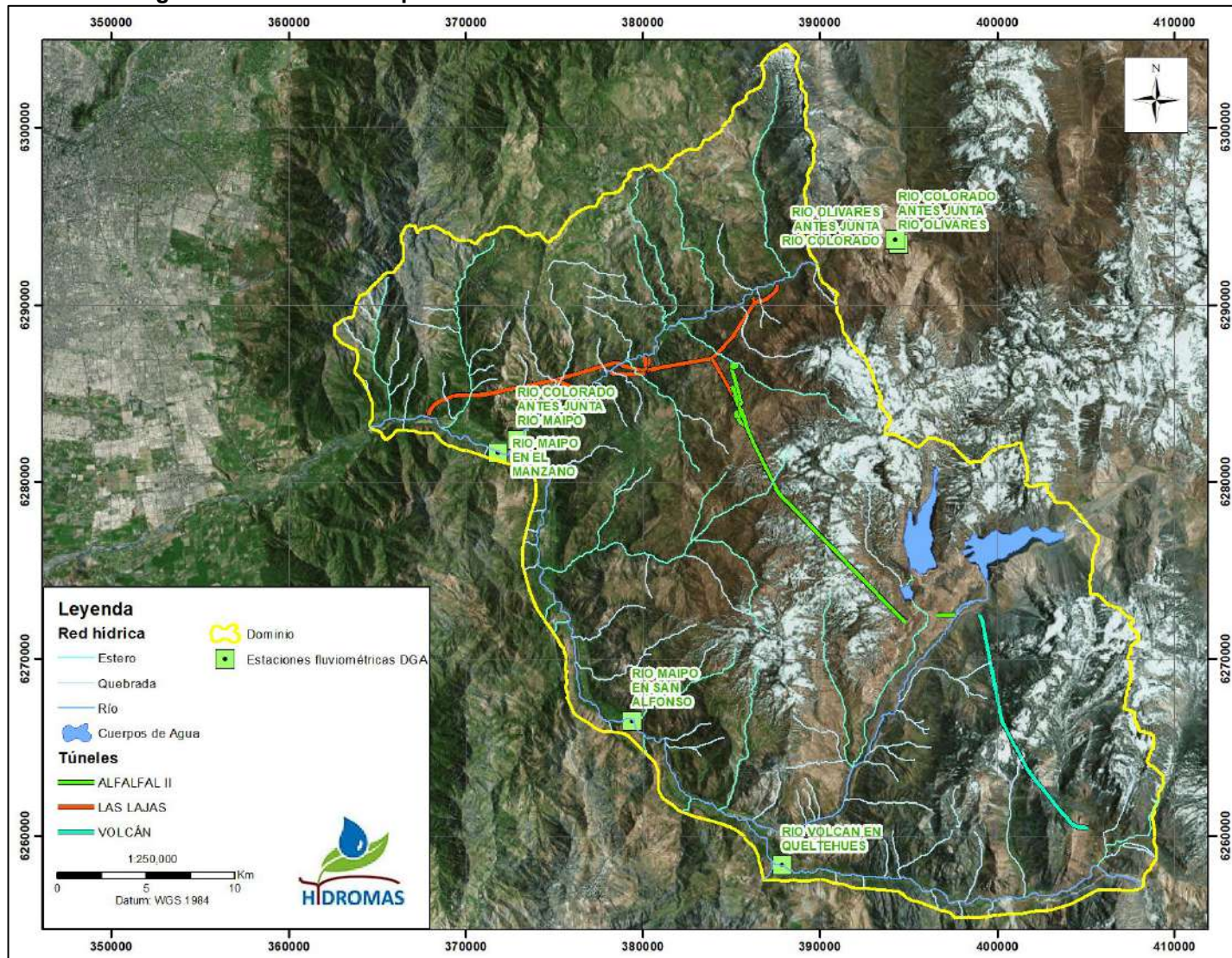
De manera de uniformar la cantidad de datos considerados para el análisis, se utilizará la información de caudales medios mensuales desde el año 1966 en adelante.

En la Figura 3-1 se presenta la ubicación espacial de estas estaciones, mientras que en la Tabla 3-1 se resumen las principales características de cada una de estas.

Tabla 3-1: Estaciones fluviométricas DGA en la zona, Datum WGS 84 Huso 19

Nombre Estación	Altitud (msnm)	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Fecha Inicio	Fecha Final	Código BNA
Río Colorado antes junta Río Maipo	920	6.282.366	372.946	abr-1966	may-2017	05707002-1
Río Maipo en El Manzano	850	6.281.643	371.821	abr-1966	may-2017	05710001-K
Río Maipo en San Alfonso	1092	6.266.492	379.437	abr-1966	may-2017	05704002-5
Río Volcán en Queltehues	1365	6.258.371	387.898	abr-1966	may-2017	05702001-6

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1: Ubicación espacial de las estaciones fluviométricas dentro del área de estudio


Fuente: Elaboración Propia

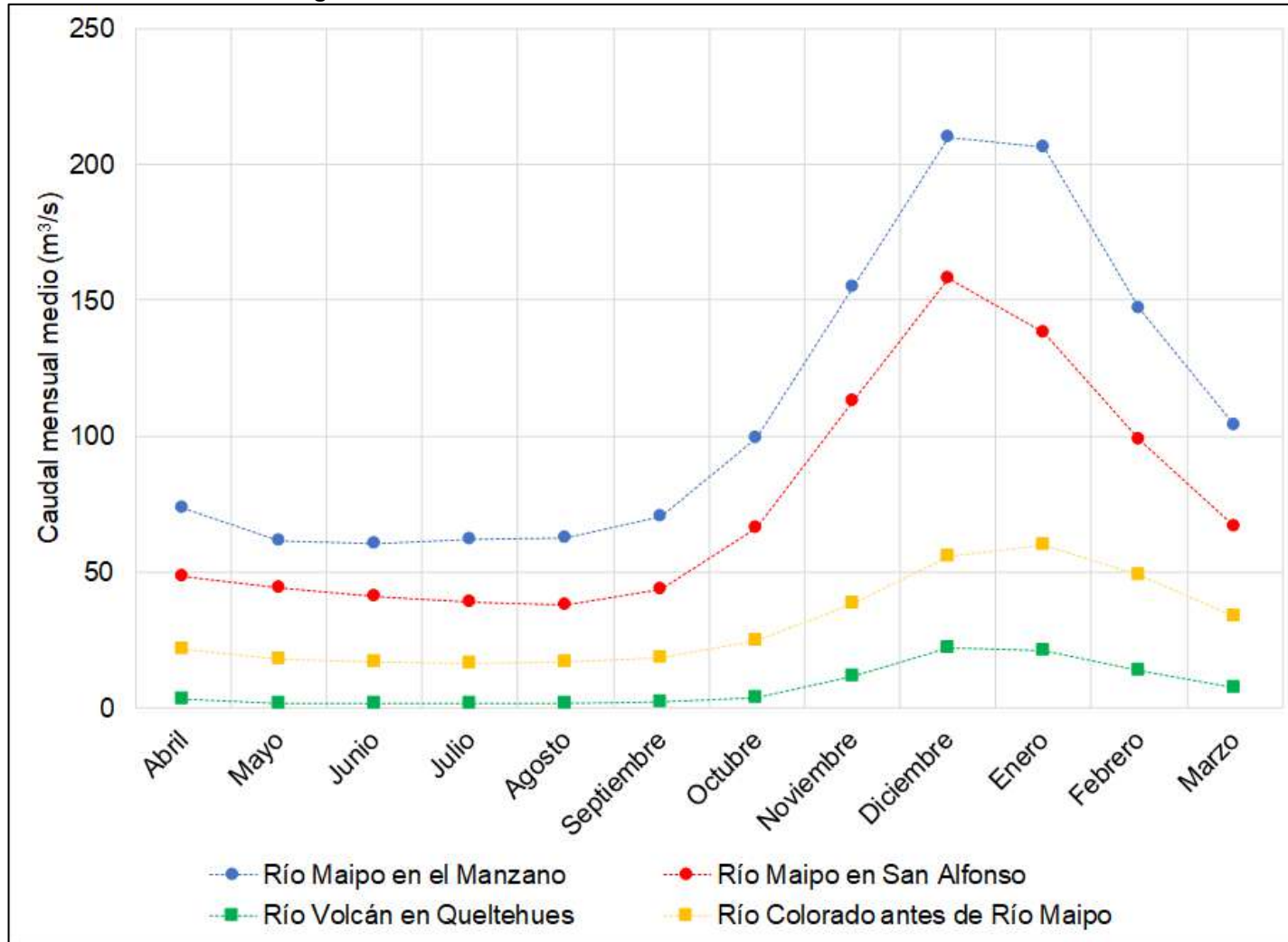
3.2 Variación estacional de caudales superficiales

A partir de la información de caudales medios mensuales de las estaciones de la red hidrométrica de la DGA descritas en el acápite 3.1, se realiza un análisis de la curva de variación estacional para los caudales medios mensuales.

En la Figura 3-2 se presenta el gráfico de los caudales medios mensuales ordenados por año hidrológico desde abril hasta marzo. Como se observa en el gráfico, existe una variación estacional marcada en cada una de las estaciones fluviométricas en estudio, en donde se destaca el régimen nivo-glaciar del sistema hídrico de la cuenca del río Maipo Alto, es decir un incremento de caudales en el período de deshielo, desde septiembre a marzo, alcanzando los valores máximos en los meses de diciembre y enero, mientras que los meses de invierno se registran los menores caudales superficiales.

En el sector del río Maipo en El Manzano, ubicado en la salida del dominio de interés, el caudal varía entre un mínimo registrado en el mes de junio de 60 m³/s en los meses de invierno, hasta los 210 m³/s registrados en el mes de diciembre. En la estación río Maipo en San Alfonso, se observa el mismo comportamiento, con la diferencia que las magnitudes de los caudales son menores, con un rango que va desde los 40 m³/s hasta los 160 m³/s aproximadamente.

En el caso de los ríos Colorado y Volcán, se observa la misma variación estacional que en el río Maipo. Sin embargo, las magnitudes de caudal registradas en el río Volcán, son considerablemente menores que en las otras estaciones, esto se debe a la interferencia de la toma de agua que va hacia la central Queltehues. El rango observado en río Volcán varía entre 1,6 y 22 m³/s. Del mismo modo, en el río Colorado, los caudales varían entre 16 y 60 m³/s.

Figura 3-2: Variación estacional de caudales mensuales medios

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Caudales centrales Alfalfal y Maitenes

PHAM cuenta con registros de caudales captados por las bocatomas que conducen las aguas hacia las centrales respectivas.

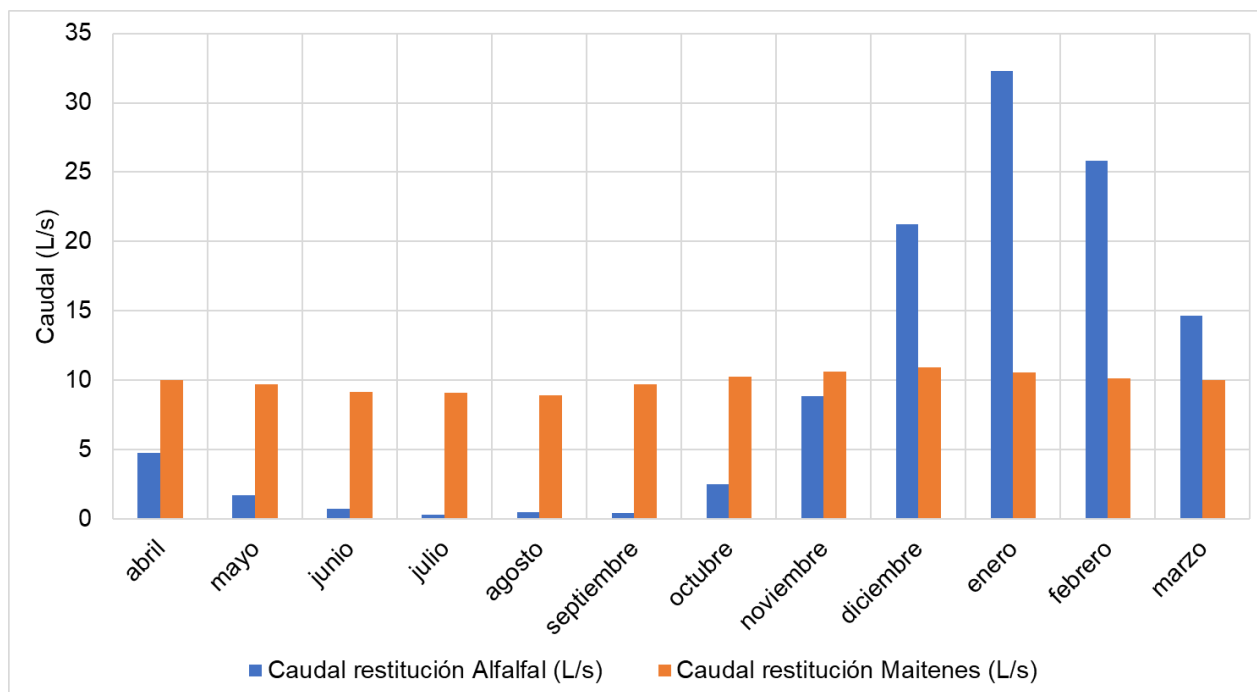
En particular, en el cauce del río Colorado se encuentran dos centrales, aguas arriba se ubica la central Alfalfal, la que capta sus aguas en la cuenca alta del río Colorado y en la del río Olivares. Estas aguas son devueltas aguas abajo de la central en el mismo río Colorado.

La segunda central corresponde a Maitenes, la cual se encuentra aproximadamente a 7,6 km aguas abajo de la central Alfalfal. La captación de agua de esta central se encuentra algunos metros aguas arriba de la central Alfalfal, y utiliza aguas del río Colorado y de la propia restitución de la central Alfalfal.

En términos del balance superficial del río Colorado, se establece que las aguas captadas por las centrales son devueltas en su totalidad a lo largo del mismo cauce, de manera que la estación fluviométrica localizada en la salida del río Colorado (Estación río Colorado antes de río Maipo) registra todo el caudal del cauce.

En la Figura 3-3 se presenta la serie de caudales medios mensuales de las restituciones de las centrales Alfalfal y Maitenes. Como se observa en la figura mencionada, el caudal de restitución de la central Alfalfal está directamente relacionada con la disponibilidad de caudal superficial del río Colorado, con caudales mayores en los meses de noviembre a marzo.

Figura 3-3: Caudales medios de restitución de las centrales Alfalfal y Maitenes



Fuente: Elaboración Propia

3.4 Caudales aforados en esteros y quebradas

Además de los cursos de aguas principales presentes dentro del dominio de estudio, existen numerosos esteros y quebradas ubicadas dentro de la unidad de roca definida en el Anexo 2. De manera de cuantificar el aporte de cada una de éstas, se desarrolló una campaña de aforos de caudal superficial en la mayoría de las quebradas aportantes a los cauces principales.

Esta campaña se realizó durante los días 9 y 14 de abril del 2018, en donde se aforaron un total de 42 puntos distribuidos en los esteros y quebradas presentes en el dominio de estudio. En la Figura 3-5 se presenta la distribución espacial de los aforos realizados.

Como se observa en la figura, estas mediciones abarcan la mayoría de los afluentes a los cauces principales de los ríos Maipo, Colorado, Yeso y Volcán, de manera que es posible cuantificar el caudal asociado a estos aportes laterales. En la Tabla 3-2 se presenta un resumen de los caudales aforados en la campaña mencionada.

Tabla 3-2: Caudales aforadas en campaña de medición de abril 2018

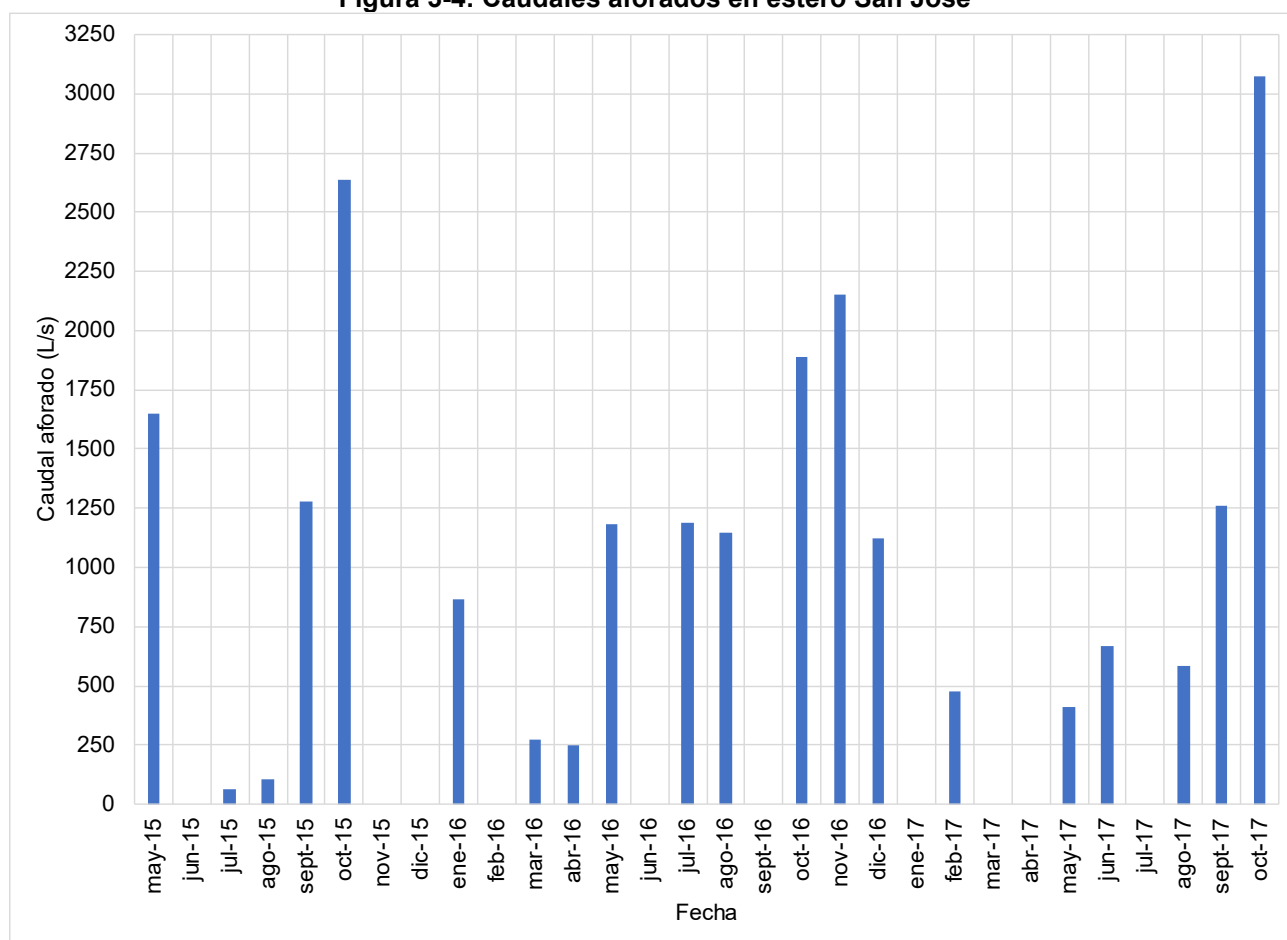
Quebrada/Estero		UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Q (L/s)
Río Colorado	Qda. Trecientos	386.598	6.290.528	12
	Qda. Sin nombre 3	393.611	6.257.640	0
	Qda. Quempe	388.075	6.292.054	33
	Qda. El Sauce	379.474	6.286.489	0.005
	Qda. Sin nombre 4	387.260	6.292.788	12
	Qda. Sin nombre 5	387.316	6.292.848	8
	Qda. El Laurel	384.706	6.292.122	0
	Qda. El Durazno	383.411	6.291.865	20
	Estero Aucayes	382.655	6.288.346	115
	Bocatoma Aucayes	382.642	6.288.379	159
	Qda. Los Canales	373.886	6.284.015	0
	Qda. Cinco Mil	385.710	6.289.815	0
	Canal El Manzano	374.626	6.284.356	10
	Canal Maurino	374.384	6.284.430	62
	Qda. La Buitrera	375.154	6.285.204	7
Río Maipo	El Manzano	370.297	6.285.071	26
	El Canelo	365.715	6.283.955	5
	El Toro	366.599	6.283.868	0
	El Añil	369.033	6.284.360	7
	Guayacán	375.098	6.280.763	0
	Estero San José	376.829	6.276.139	204
	La Calchona	377.081	6.269.483	14
	San Gabriel	384.670	6.261.661	1
	El Melocoton	376.607	6.271.195	2
	Qda. Sin Nombre 1	381.291	6.265.531	3
	Qda. Sin Nombre 2	381.403	6.264.982	0
	San Alfonso	379.821	6.266.685	26
Río Volcán	Qda. Chacayes	398.280	6.256.154	0
	Qda. Colorada	394.557	6.257.663	101
	Qda. Morales 1	401.562	6.257.202	304
	Qda. Morales 2	401.792	6.256.986	105
	Estero La Engorda	405.985	6.258.734	2269
	Río Volcan	407.878	6.257.432	2373
Río Yeso	Estero San Nicolas	391.751	6.264.007	175
	Manzanito 1	396.123	6.272.373	899
	Manzanito 2	391.918	6.264.094	195

Quebrada/Estero	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Q (L/s)
Yeso Aguas Arriba	397.738	6.272.493	13312
Yeso Aguas Abajo	386.128	6.260.863	15139
Qda. Las Cortaderas	396.797	6.269.430	136
Qda. Sin nombre 6	394.631	6.267.045	5
Qda. Los Chacayes	393.011	6.264.864	99
Qda. Rodeo de los Bueyes	391.676	6.262.160	13

Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente a la campaña de aforos realizada por PHAM en abril de 2018, existe registro de caudales superficiales en distintos puntos a lo largo del Estero San José, en el marco de los compromisos de PHAM con la comunidad del canal Comunero. En la Figura 4-4 se presenta la serie de caudales aforados en el estero San José desde el año 2015. Como se observa en la figura, el rango de caudales varía entre 0,06 y 3,2 m³/s, presentándose los menores registros durante los meses de invierno. En particular, se observa que en abril de 2016 se registró un aforo de caudal de 247 L/s, cuya magnitud es consistente con lo registrado en la campaña de aforos de abril de 2018, en donde se midieron 214 L/s en el Estero San José.

Figura 3-4: Caudales aforados en estero San José



Fuente: Elaboración Propia

Este mapa detallado muestra la zona de estudio en la zona de influencia del Estero de San José. Incluye una leyenda que define la red hídrica (Estero, Quebrada, Río), cuerpos de agua, túneles (ALFALFA II, LAS LAJAS, VOLCÁN) y puntos de muestreo (Aforos campaña abril 2013). El mapa también muestra el dominio de la zona y una escala de 1:250,000. Se observan varios puntos de muestreo etiquetados como 'Qda. Sin nombre' y 'Quebrada', así como túneles de diferentes tipos. El mapa está orientado con el norte hacia arriba y tiene una escala de 1:250,000.

Rev. 0 / 28.12.2018

4 ESTIMACIÓN DE LA RECARGA

4.1 Aspectos generales

La estimación de la recarga al sistema subterráneo, se realizará a partir de algunos componentes del balance hídrico del área de estudio. En particular, se considerará que esta componente representa una fracción del total de precipitación, cuya magnitud dependerá de las propiedades hidrogeológicas y morfológicas de las unidades consideradas.

Según el análisis de caudales presentado en el capítulo 3, el régimen de flujo superficial está influenciado de manera importante por la componente nival y glaciar. A partir de esta información, se deben tener en cuenta estas componentes tanto para la estimación de la precipitación total que recarga el sistema subterráneo, como también el aporte de glaciar a la escorrentía superficial.

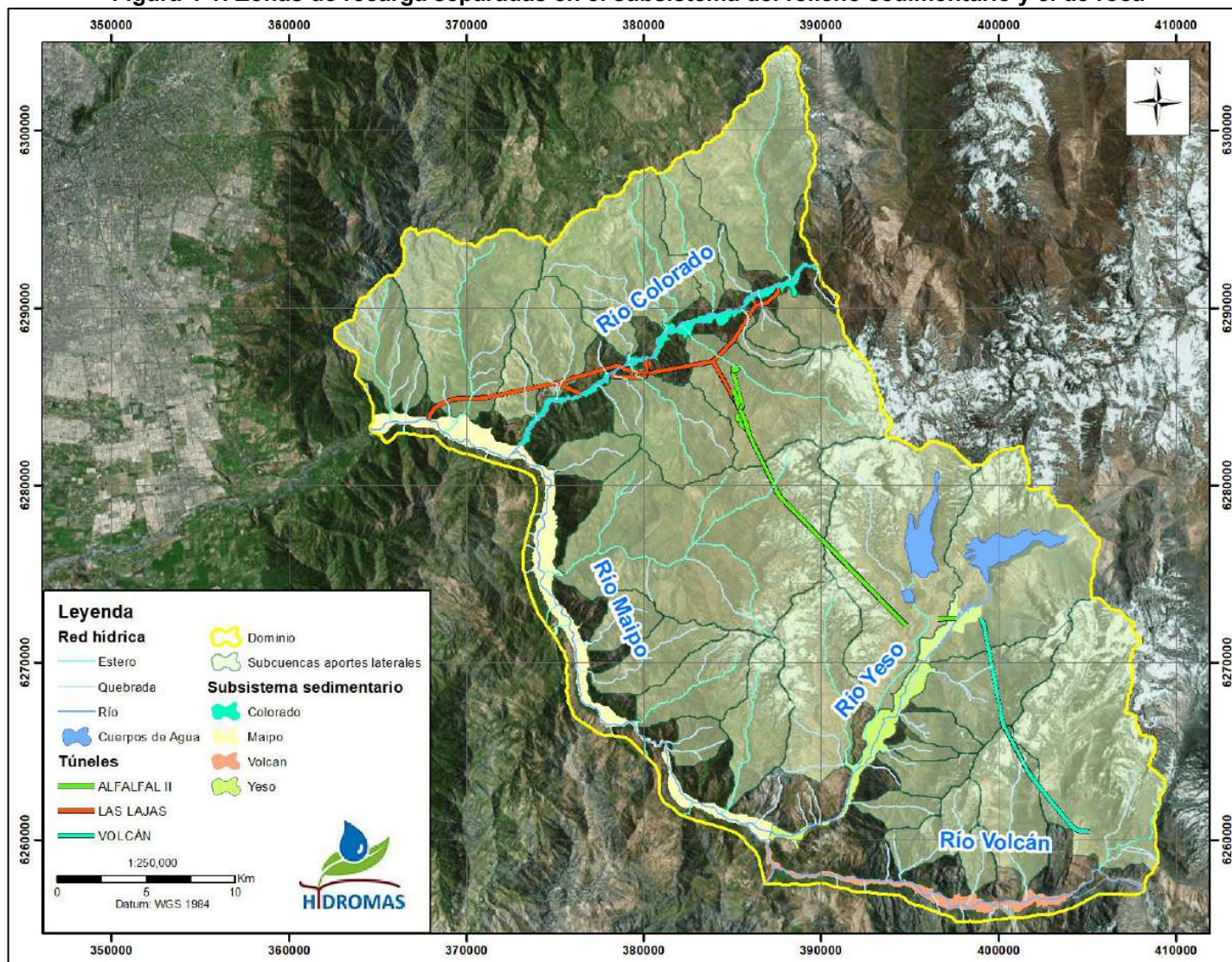
De esta forma, en primer lugar, se deben definir las zonas de recarga, las cuales dependen de las propiedades hidrogeológicas de cada sub sistema.

4.2 Definición zonas de recarga

A partir de lo descrito en el Anexo 2, se identifican dos sistemas principales por donde se mueve el agua, en primer lugar, un sistema de roca, el cual presenta una baja permeabilidad y es donde se encuentran ubicadas numerosas quebradas y esteros aportantes a los cauces principales. En segundo lugar, se identifica un sistema acuífero asociado al relleno sedimentario de los cauces principales que se encuentran presentes en el área de estudio, estos se caracterizan por una mayor permeabilidad.

De esta forma se definen zonas de recarga las cuales están referidas a los sistemas hidrogeológicos presentes en el sistema. Los rellenos sedimentarios de los ríos Maipo, Colorado, Yeso y Volcán, definen cuatro zonas de recarga, del mismo modo, se identifican como zonas a las sub cuencas asociadas a los aportes laterales que se encuentran inmersos en el sistema rocoso del sector. En la Figura 4-1 se presenta la distribución de las zonas de recarga definidas dentro del dominio de estudio.

Figura 4-1: Zonas de recarga separadas en el subsistema del relleno sedimentario y el de roca



Fuente: Elaboración Propia

4.3 Estimación de la descarga por afloramiento en el Sistema Sedimentario

Para los cuatro cauces principales presentes en el dominio de estudio que definen la zona asociada al relleno sedimentario, se realizó un balance hídrico superficial de manera de poder estimar el flujo base y de esta forma relacionarlos con la recarga del sistema hidrogeológico.

4.3.1 Afloramiento Sistema del Río Colorado

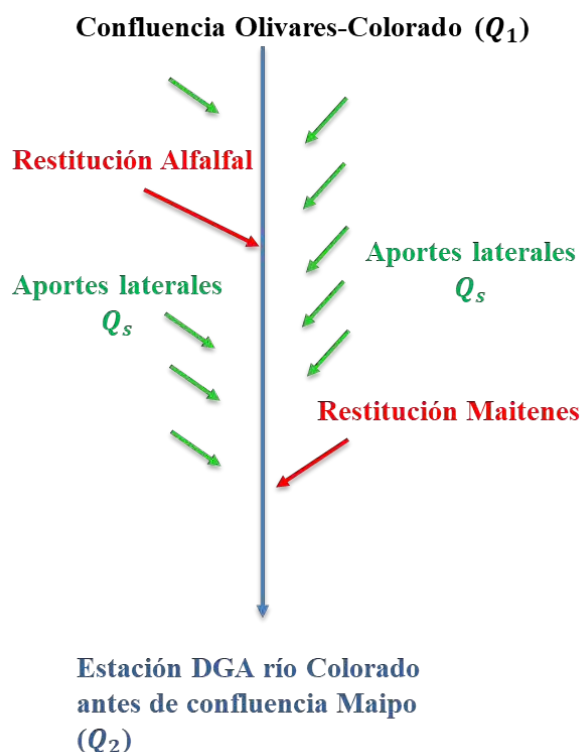
En el dominio del sistema, el río Colorado tiene su origen algunos metros aguas abajo de la confluencia entre el río Olivares y el río Colorado. Ambos afluentes poseen en la salida, una estación fluviométrica perteneciente a la red hidrométrica de la DGA. Ambos cauces afluentes se encuentran intervenidos por la toma de la central Alfalfal, los caudales captados se detallan en el acápite 3.3.

A lo largo del sistema río Colorado, existen numerosos aportes de quebradas laterales que descargan un caudal hacia el cauce principal. Para estimar los aportes laterales en el sistema, se utilizó la información de aforos realizado en la campaña de abril de 2018.

En la salida del sistema del Río Colorado, antes de la desembocadura al Río Maipo, se encuentra la estación fluviométrica DGA “Río Colorado antes de Río Maipo”, de manera que el caudal registrado en la estación representa el total de agua que circula por el cauce.

En la Figura 4-2 se presenta un diagrama unifilar del río Colorado, con las principales componentes de la escorrentía superficial.

Figura 4-2: Diagrama unifilar sistema Río Colorado



Fuente: Elaboración Propia

Como se mencionó en el acápite 3.4, los caudales registrados durante el mes de abril de 2014, son representativos de condiciones más secas del sistema río Colorado, es decir, que los caudales superficiales no se encuentran influenciados por procesos de precipitación tanto pluvial como nival, de esta forma, es posible cuantificar los aportes provenientes de los afloramientos del sistema subterráneo.

La entrada al sistema consideró la confluencia entre el río Olivares y Colorado, cuya magnitud media en el período de abril 2014 es de 3,2 m³/s. Es importante señalar que estos caudales se encuentran influenciados por las bocatomas ubicadas aguas arriba que captan agua para la central Alfalfal.

Los aportes laterales de quebradas y esteros afluentes al sistema del río Colorado, se estimaron a partir de la campaña de aforos realizada en abril de 2018, en la cual se contabilizó un total de 327 L/s en todas las quebradas aportantes ($Q_{\text{aportes laterales}}$).

De manera de considerar todas las componentes del balance hídrico del río Colorado, se deben tener en cuenta los caudales de restitución de las centrales Alfalfal y Maitenes, que según los registros medidos por PHAM, para el período de análisis de abril de 2014, suman un total de 8,2 m³/s. Estos caudales son captados desde aguas arriba de la confluencia entre el río Olivares y Colorado y son restituidos en su totalidad en el río Colorado. A partir de esta información, se estableció que el río Colorado posee un caudal de entrada correspondiente a los 3,2 m³/s medidos en la confluencia, más los 8,2 m³/s captados aguas arriba, sumando un total de 11,4 m³/s (Q_{entrada}).

Finalmente, a la salida del sistema del río Colorado, se cuenta con la estación DGA de Río Colorado antes de río Maipo, la que, según los registros del periodo en estudio de abril de 2014, posee un caudal de 13 m³/s (Q_{salida}).

En la Tabla 4-1 se presenta un resumen con los valores correspondientes al balance superficial del sistema río Colorado. Con estos caudales se estimó el caudal neto aflorado por el sistema, considerando un balance de entradas y salidas, la diferencia entre lo medido en la salida y las entradas totales, corresponde a los aportes en forma de afloramiento del río Colorado, la relación descrita es la siguiente:

$$Q_{\text{afloramiento}} = Q_{\text{salida}} - (Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{aportes laterales}})$$

$$Q_{\text{afloramiento}} = 13,0 - (3,2 + 8,2 + 0,3) = 1,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 4-1: Caudales superficiales que definen el sistema del Río Colorado

Punto	Caudal m ³ /s
Confluencia Olivares y Colorado	3.2
Restitución Alfalfal y Maitenes	8.2
Caudal entrada al sistema	11.4
Aportes Laterales	0.3
Caudal río Colorado antes de río Maipo	13.0
Afloramiento río colorado	1.3

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2 Afloramiento Sistema del Río Yeso

Análogamente al análisis realizado en el sistema del río Colorado, se realizó un balance de caudales superficiales a lo largo del sistema del río Yeso, con tal de estimar el aporte por afloramiento del sistema subterráneo.

En este cauce no existen estaciones de la red hidrométrica de la DGA, de manera que dentro de la campaña de aforos realizada en abril 2018, se incluyó un aforo en la sección de aguas arriba del río (aguas abajo del embalse El Yeso) y otro aforo al final del río Yeso, aguas arriba a la desembocadura al río Maipo.

Al igual que en el río Colorado, existen aportes laterales a este sistema, lo cuales fueron cuantificados a partir de la campaña de aforos mencionada anteriormente. En la Figura 5-3 se presenta el diagrama unifilar del sistema río Yeso, de manera de representar esquemáticamente las componentes del balance hídrico de la sección.

La campaña de aforos en el río Yeso se realizó el día 13 de abril de 2018, según el reporte meteorológico en el sector no se presentaron precipitaciones durante ese día ni en los días anteriores, por lo que el sistema superficial se considera que no está influenciado por eventos de lluvia.

El caudal aforado en el sector del río Yeso aguas arriba corresponde a $13,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{entrada}), mientras que, en el sector de salida del sistema, río Yeso aguas abajo, se aforó un caudal de $15,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{salida}). Del mismo modo, los aportes laterales se contabilizaron en 623 L/s ($Q_{\text{aportes laterales}}$).

A partir de los caudales aforados, se estima que el afloramiento neto del sistema río Yeso corresponde a la diferencia entre lo registrado en la salida, con las entradas y aportes laterales. En la Tabla 4-2 se presenta un resumen de los caudales involucrados en el balance hídrico, cuya expresión es la siguiente:

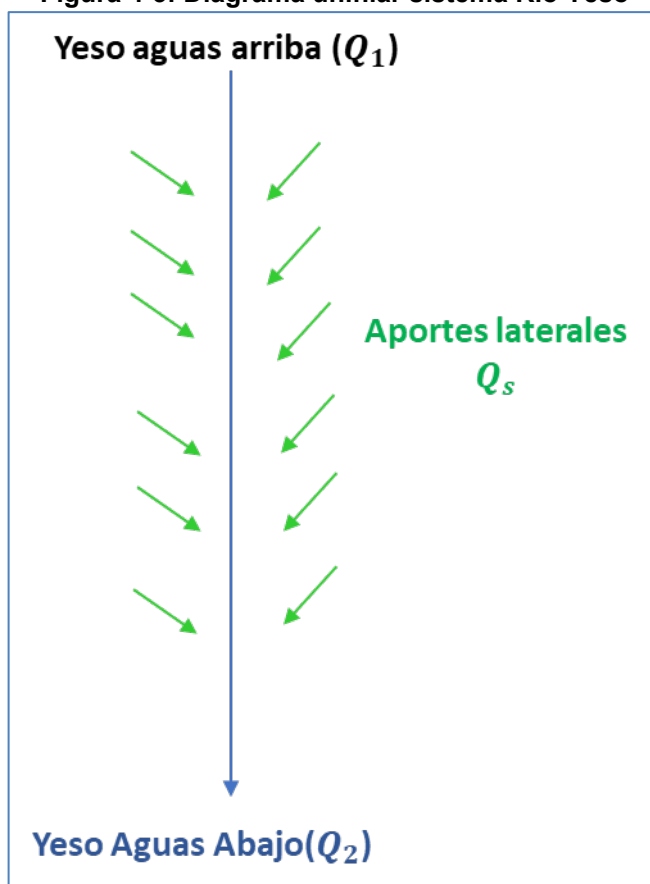
$$Q_{\text{afloramiento}} = Q_{\text{salida}} - (Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{aportes laterales}})$$

$$Q_{\text{afloramiento}} = 15,1 - (13,3 + 0,6) = 1,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 4-2: Caudales superficiales que definen el sistema del Río Yeso

Punto	Caudal m^3/s
Aforo Yeso superior	13.3
Aportes Laterales	0.6
Aforo Yeso salida	15.1
Afloramiento río colorado	1.2

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-3: Diagrama unifilar sistema Río Yeso

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3 Afloramiento Sistema del Río Volcán

Dentro del dominio de estudio, se considera que el sistema del río Volcán se inicia en la confluencia del río Volcán con el Estero La Engorda, éste se extiende hasta su confluencia con el río Maipo.

Este cauce posee una estación controlada por la DGA en el sector de Queltehues, que se ubica aguas arriba de la desembocadura del cauce del río Maipo. Es importante señalar, que aguas arriba de la estación fluviométrica se encuentra la bocatoma que capta prácticamente la totalidad del agua para la central Queltehues.

Considerando lo anteriormente expuesto, se realizó un balance de aguas en el tramo final del río Volcán, desde la toma de agua de la central Queltehues, hasta la estación fluviométrica de la DGA río Volcán en Queltehues. De esta forma se consideró que justo en la ubicación de la toma, el caudal en el río es cero y en la salida, el caudal corresponde a lo registrado por la estación en el mes de abril. Con esta simplificación, se determinó el aporte neto hacia el río para el tramo específico.

A partir de lo anterior, en la Figura 4-4 se presenta el diagrama unifilar de los flujos superficiales de todo el tramo del río Volcán dentro del dominio, del mismo modo se presenta un acercamiento de la sección de río utilizada para el análisis, que corresponde a una extensión de 7 km en el tramo final del río Volcán.

En la entrada de la sección remarcada en el recuadro rojo de la Figura 4-4 se consideró un caudal cero, mientras que en la salida se consideró el valor registrado por la estación, que corresponde a un caudal de 530 L/s. Los aportes laterales del tramo se cuantificaron a partir de la campaña de aforos realizada en abril de 2018, éstos corresponden a 101 L/s.

De esta forma, el balance de caudales superficiales indicados por el recuadro rojo de la Figura 4-4, sigue la siguiente relación:

$$Q_{\text{afloramiento}} = Q_{\text{salida}} - (Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{aportes laterales}})$$

$$429 \text{ L/s} = 530 \text{ L/s} - (0 + 101 \text{ L/s})$$

De esta forma, los resultados muestran que en el tramo analizado en el río Volcán afloran un total de 429 L/s en una extensión de 7 km, lo que se representa como un aporte de 61 L/s/km desde el sistema subterráneo al superficial.

Este resultado se extrapola a toda la extensión del río Volcán, que corresponde a un total de 20 km aproximadamente, obteniendo así que el afloramiento neto del sistema es de 1,2 m³/s ($Q_{\text{afloramiento}}$).

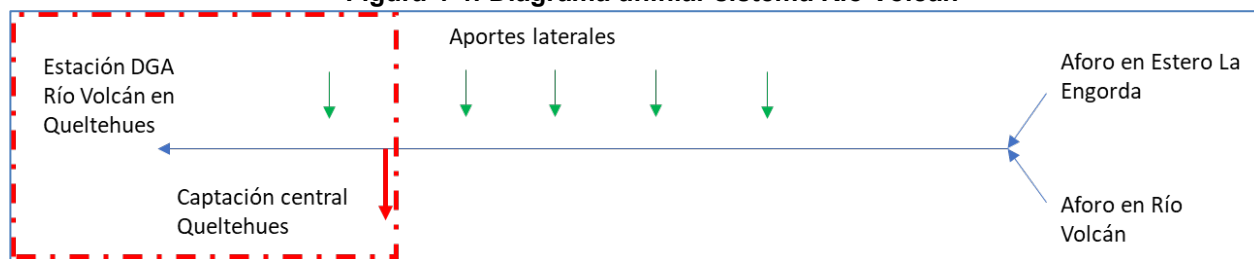
Considerando todo el sistema río Volcán, en la entrada de este, se cuantifican un total de 4,64 m³/s, correspondientes a los aforos del Estero la Engorda y del Río Volcán realizados en la campaña de aforos de abril 2018 (Q_{entrada}).

Del mismo modo, mediante los aforos mencionados, se estimaron los aportes de quebradas laterales, con un total de 510 L/s ($Q_{\text{aportes laterales}}$). Finalmente, a partir del análisis anteriormente descrito, se estima que el caudal de salida del río Volcán, debería ser de 6,4 m³/s, de acuerdo a lo detallado en la Tabla 4-3. Los valores completos obtenidos, se presentan en la relación del balance hídrico del sistema del río Volcán según la siguiente expresión:

$$Q_{\text{afloramiento}} = Q_{\text{salida}} - (Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{aportes laterales}})$$

$$1200 \text{ L/s} = 6400 \text{ L/s} - (4640 \text{ L/s} + 510 \text{ L/s})$$

Figura 4-4: Diagrama unifilar sistema Río Volcán



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4-3: Caudales superficiales que definen el sistema del Río Volcán

Punto	Caudal m ³ /s
Aguas abajo captación central Queltehues	0
Aportes Laterales en sección final	0,1
Caudal Estación DGA RVEQ	0,5
Afloramiento en tramo de análisis	0,4
Caudal entrada al sistema Volcán	4,6
Aportes laterales totales	0,5
Caudal aflorado en todo sistema Volcán (extrapolado)	1,2
Caudal salida sistema (estimado)	6,4

Fuente: Elaboración Propia

4.3.4 Afloramiento Sistema del Río Maipo

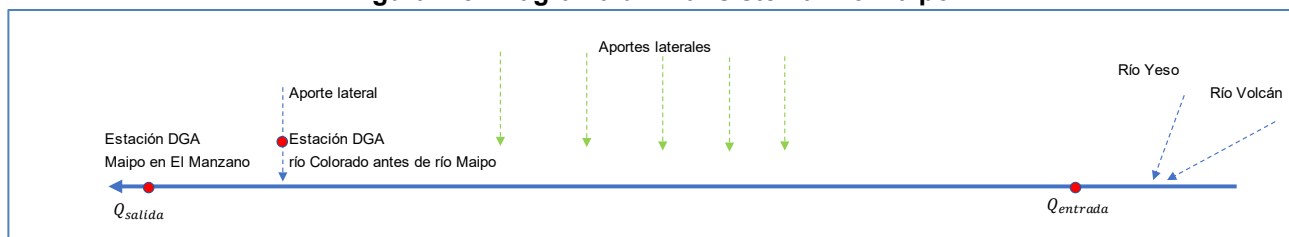
A partir de la metodología descrita para el río Volcán y las estimaciones realizadas en los ríos Colorado y Yeso, se realiza una estimación del caudal total aflorado por el río Maipo, entre la confluencia con el río Volcán y Yeso, hasta el sector de salida del dominio, en El Manzano.

A partir de los análisis realizados en los ríos Colorado y Yeso, se obtiene que existe una ganancia de caudal por kilómetro de río de aproximadamente 50 L/s/km. De esta forma, considerando una extensión total de 39 km, la ganancia o caudal de afloramiento del río Maipo corresponde a 1.965 L/s ($Q_{afloramiento}$).

Para estimar el caudal en la salida del río Maipo (Q_{salida}), se consideran los registros de la estación fluviométrica DGA, río Maipo en El Manzano. Como se mencionó previamente, al considerar una condición hidrológicamente seca (abril de 2014), la estación registra un caudal medio mensual de 59,39 m³/s.

Los aportes laterales de quebradas y esteros menores se obtuvieron mediante la campaña de aforos realizada durante el mes de abril de 2018, los cuales se cuantifican en 331 L/s. Del mismo modo, se considera como aporte lateral, la descarga del río Colorado, el cual queda determinado por los caudales registrados en la estación fluviométrica río Colorado antes de río Maipo, cuya magnitud es de 13,5 m³/s, de manera que el caudal total de aportes laterales es de 13,8 m³/s.

En la Figura 4-5 se presenta el diagrama unifilar del río Maipo considerado para la estimación del afloramiento total del sistema.

Figura 4-5: Diagrama unifilar sistema Río Maipo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4-4: Caudales superficiales que definen el sistema del Río Maipo

Punto	Caudal m³/s
Inicio río Maipo en dominio	43.59
Aportes laterales quebradas y esteros	0.33
Aporte lateral río Colorado	13.50
Caudal Maipo en El Manzano	59.39
Caudal aflorado en el sistema Maipo	1.97

Fuente: Elaboración Propia

4.4 Estimación de la recarga en la unidad de relleno sedimentario

El sistema acuífero del relleno sedimentario según sus propiedades hidrogeológicas posee una mayor permeabilidad, la que permite una mayor capacidad de infiltración de la precipitación, generando así una mayor recarga.

Para estimar la recarga del sistema sedimentario R_s , se consideró que ésta se relaciona como un coeficiente del volumen de precipitación anual y un coeficiente del volumen de nieve anual caída, tal como se explica en la siguiente expresión:

$$R_s = \alpha \cdot Q_p + \beta \cdot Q_N$$

Donde, R_s es la recarga al sistema subterráneo, Q_p es el aporte pluvial a nivel anual, Q_N el aporte nival a nivel anual y α , β son coeficientes que representan la cantidad de agua que efectivamente llega al sistema subterráneo.

El aporte pluvial Q_p en cada subsistema del acuífero sedimentario se determinó a partir del gradiente de precipitación-altura obtenido en el capítulo 2 del presente informe. La elevación característica de cada subsistema se determinó mediante la curva hipsométrica respectiva, considerando la elevación en la cual se contiene el 50% del área total. De esta forma se calculó un valor de precipitación anual media para cada subsistema, el cual fue llevado a el aporte volumétrico total. Es importante considerar que las cuencas fueron acotadas al área dentro del dominio hidrogeológico.

El aporte nival Q_N en cada subcuenca se estimó mediante la información de precipitación nival acumulada a nivel anual en la estación meteorológica Laguna Negra. En el capítulo 3 se presentó la serie histórica de mediciones en la estación mencionada, de manera que se determinó un valor anual medio de 562 mm del equivalente en agua nieve. Este valor fue distribuido en el área nival de cada subcuenca, definida a partir de la elevación media de la línea de nieves.

En el caso del acuífero del relleno sedimentario, que corresponde a la unidad hidrogeológica UH-1, se da que para $\alpha = \beta = 15\%$, el valor de la recarga en el relleno sedimentario es consistente con el monto de descarga por afloramiento de los subsistemas. La Tabla 4-5 presenta la recarga del relleno sedimentario por subsistema Maipo, Colorado, Yeso y Volcán.

Tabla 4-5: Estimación de las recargas en el relleno sedimentario en cada subsistema

Subsistema	$\alpha = \beta$ (%)	Q_P (l/s)	Q_N (l/s)	R_s (l/s)
Colorado	15	5.865	1.548	1.112
Yeso	15	4.318	2.875	1.079
Volcán	15	4.693	3.941	1.295
Maipo	15	9.435	4.153	2.038
Total Sedimentario		21.400	10.380	5.524

Fuente: *Elaboración Propia*

4.5 Estimación de las descargas en la unidad de roca

Las descargas del sistema están asociadas a tres efectos principalmente. Éstos son: afloramientos por flujo base, caudales drenados por los túneles y extracciones de aguas subterráneas. En el presente acápite, se realizó el análisis de los afloramientos por flujo base, mientras que las otras descargas se analizaron en el Anexo 2 Estudio básico hidrogeología.

De manera de cuantificar el aporte subterráneo de las quebradas laterales asociadas al sistema de roca, se realizó una campaña de aforos del caudal superficial pasante por cada una de éstas, como se encuentra descrito en el acápite 3.4 del presente documento.

Esta campaña fue realizada en abril de 2018, considerando que en este periodo no existen precipitaciones y tampoco derretimiento de nieve, los caudales aforados son una buena representación del aporte desde el flujo base subterráneo del sistema.

Es importante mencionar, que dentro del área de estudio se encuentran zonas con glaciares o glaciaretos, los cuales suponen un aporte importante al flujo superficial en las quebradas y esteros correspondientes. A partir de Castillo (2015), en condiciones secas para el sector de la cuenca del río Maipo Alto, el aporte glaciar puede llegar hasta casi un 95% de la escorrentía total, estos porcentajes varían según la temporada analizada y la extensión superficial del glaciar en cuestión. En la Figura 4-6 se presentan los resultados obtenidos por Castillo (2015) en cuanto al aporte del glaciar al caudal total en distintas temporadas y dependiendo del área de este.

En la Tabla 4-6 se presentan los resultados de los aforos realizados, además se señalan aquellas subcuencas que poseen área glaciar y su respectiva área. A partir de lo anterior, se constató que aquellas subcuencas con presencia de glaciares, el caudal aforado durante la campaña de abril 2018, es considerablemente mayor.

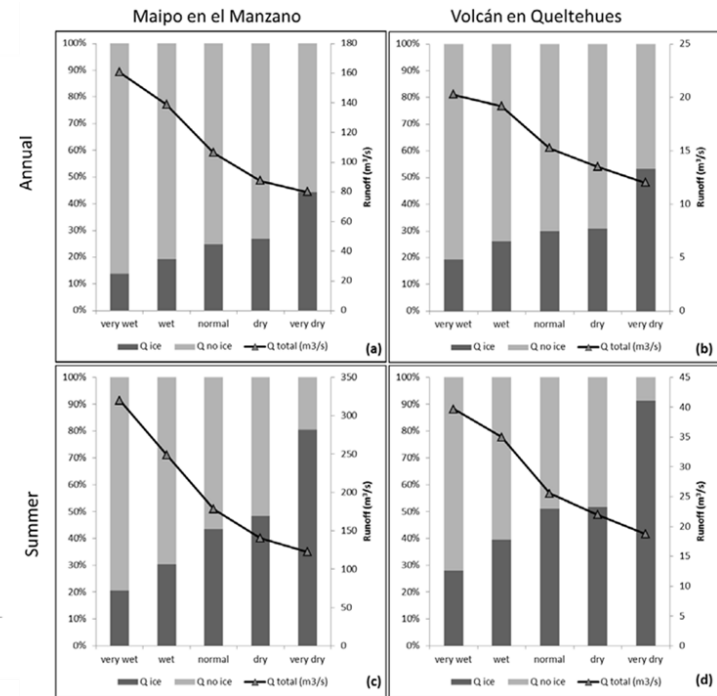
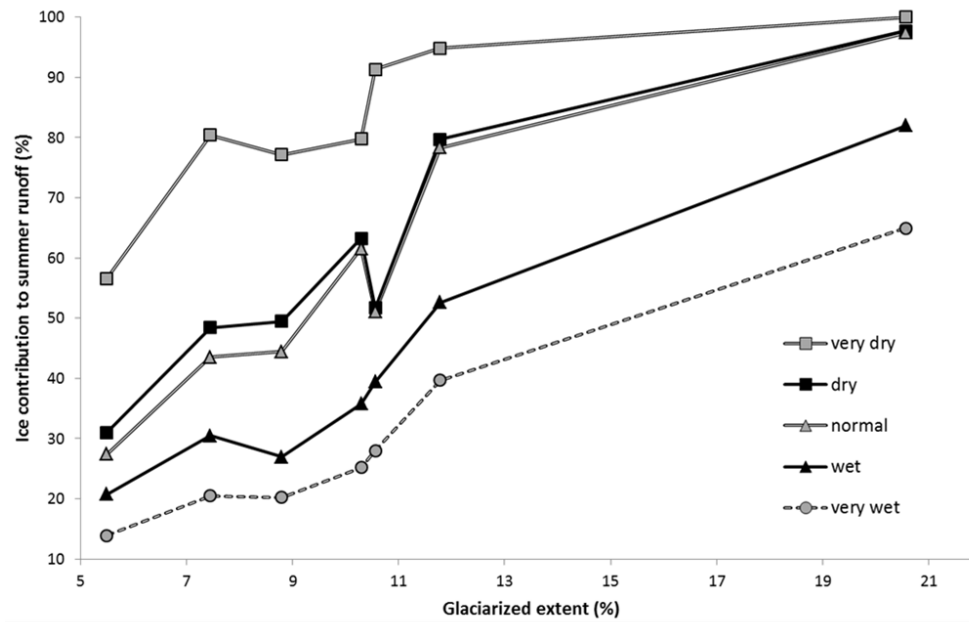
Tabla 4-6: Caudales aforados y área de aporte glaciar de la subcuenca

Subsistema		Flujo base Aforado (L/s)	Área aporte glaciar (%)*
Río Colorado	Qda. Quempo	33	3
	Qda. Laurel	0	0
	Qda. El Durazno	20	0
	Qda. Trescientos	12	0
	Qda. Cinco mil	0	0
	Estero Aucayes	255	6
	Qda. El Sauce	0	0
	Qda. La Buitrera	7	0
	Qda. Los Canales	0	0
	Total Unidad Aforos río Colorado	327	-
Río Yeso	Estero El Manzanito	195	7
	Qda. Las Cortaderas	136	17
	Estero San Nicolas	175	1
	Qda. Sin nombre 4	5	0
	Qda. Los Chacayes	99	0
	Qda. Rodeo de los Bueyes	13	0
	Qda. Sin Nombre 3	0	0
	Total Unidad de roca subcuenca río Yeso	623	-
Río Volcán	Estero La Engorda	2269	23
	Qda. Morales	409	15
	Qda. Chacayes	0	0
	Qda. Coloradas	101	7
	Total Unidad de roca subcuenca río Volcán	2779	-
Río Maipo	Estero San Gabriel	1	1
	Qda. Sin nombre 2	0	0
	Estero San Alfonso	26	0
	Qda. La Calchona	14	0
	Qda. Melocotón	2	0
	Estero San José	204	0
	Estero Guayacán	0	0
	Estero El Manzano	26	0
	Estero El Canelo	5	0
	Total unidad de roca Cuenca río Maipo	278	-

* Corresponde al porcentaje del total del Área de la subcuenca

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-6: Contribución del hielo glaciar al caudal total en distintas temporadas y dependiendo del área glaciar total



Fuente: Castillo (2015)

4.6 Estimación de la recarga en la unidad de roca

En la unidad de roca definida dentro del dominio de estudio, se encuentran quebradas y esteros los cuales afloran agua proveniente de la recarga del sistema de roca hacia el relleno sedimentario correspondiente.

Para estimar la recarga del sistema de roca R_R , se consideró que ésta corresponde a una fracción del agua total disponible, la cual está compuesta de una parte asociada a la precipitación Q_P , y la otra a la cantidad de nieve disponible en la subcuenca Q_N , tal como se explica en la siguiente expresión:

$$R_R = \alpha \cdot Q_P + \beta \cdot Q_N$$

Donde, R_R es la recarga al sistema de roca, Q_P es el aporte pluvial a nivel anual, Q_N el aporte nival a nivel anual y α , β son coeficientes que representan la cantidad de agua que efectivamente llega al sistema subterráneo de cada componente.

El aporte pluvial Q_P en cada subcuenca de la unidad de roca, se determinó a partir del gradiente de precipitación-altura obtenido en el capítulo 2 del presente informe. La elevación característica de cada subcuenca se determinó mediante la curva hipsométrica respectiva, considerando la elevación en la cual se contiene el 50% del área total. De esta forma se calculó un valor de precipitación anual media para cada subcuenca, el cual fue llevado al aporte volumétrico total considerando la superficie respectiva. El detalle de los parámetros de las subcuencas considerados para la estimación de este parámetro, se encuentran en el Apéndice B.

El aporte nival Q_N en cada subcuenca, se estimó mediante la información de precipitación nival acumulada a nivel anual en la estación meteorológica Laguna Negra. En el capítulo 2 se presentó la serie histórica de mediciones en la estación mencionada, de manera que se determinó un valor anual medio de 562 mm del equivalente en agua nieve. Este valor fue distribuido en el área nival de cada subcuenca, definida a partir de la elevación media de la línea de nieves.

Para la obtención de los coeficientes α y β , se consideró que la recarga es aproximadamente equivalente a la descarga por afloramientos o flujo base subterráneo obtenido a partir de la campaña de aforos de abril de 2018. Lo anterior se basa en el análisis del balance hídrico, en donde en las entradas menos las salidas del sistema se igualan a las variaciones en el almacenamiento, como se muestra en la siguiente expresión.

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación de almacenamiento}$$

En la Figura 4-7, la imagen superior muestra un esquema general de las distintas componentes que influyen en el balance hídrico de una cuenca cualquiera.

A partir de los análisis realizados en capítulos anteriores, se estableció que el régimen nival es el predominante en el sistema, con caudales de deshielo manifestándose entre los meses de septiembre a febrero, principalmente. De esta forma, al centrar el análisis en el mes de abril, es posible descartar el efecto del deshielo en el caudal superficial registrado durante la campaña de aforos.

Del mismo modo, las precipitaciones ocurren durante los meses de invierno, desde junio a agosto, principalmente, presentándose en su fase líquida y sólida según la elevación considerada. De esta forma, particularmente para el mes de abril de 2018, no se registraron eventos de precipitación.

Otros elementos del balance hídrico, como evapotranspiración o caudales subterráneos de entrada y salida, se despreciaron debido a que, para estas subcuencas en la unidad de roca, no corresponden a componentes relevantes.

En la Figura 4-7, la imagen inferior muestra un esquema general del balance hídrico considerando el escenario descrito para el mes de abril de 2018. A partir de estas consideraciones, se puede establecer que la recarga es equivalente al flujo base subterráneo, la relación en términos generales se muestra a continuación:

$$\text{Recarga} \approx \text{Flujo base subterráneo}$$

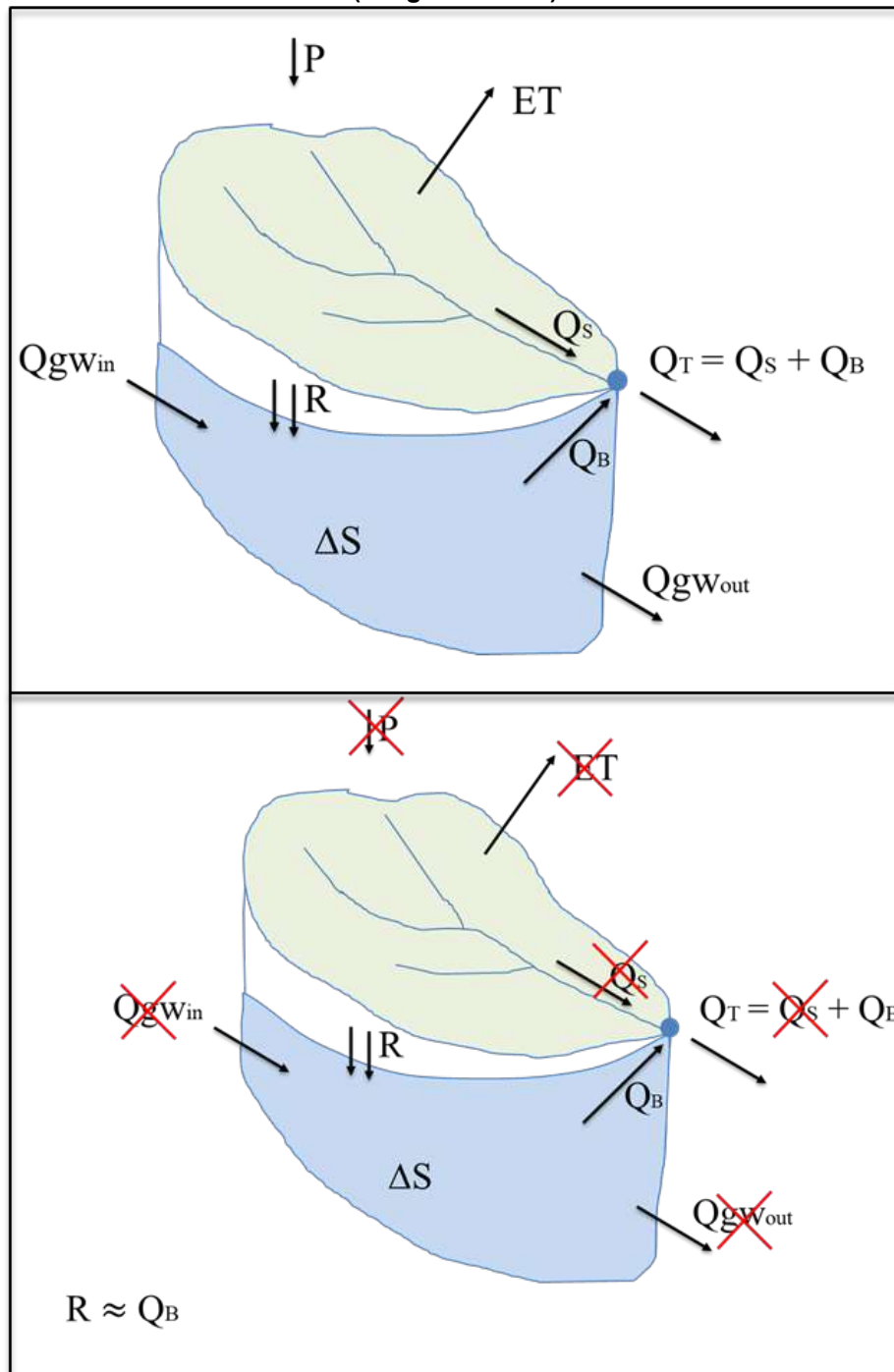
De esta forma, los coeficientes α y β se ajustarán de manera que la recarga estimada en cada subcuenca sea equivalente al flujo base subterráneo obtenido de la campaña de aforos realizada en abril de 2018.

A partir de este proceso, se identificaron que existen tres tipos de comportamientos determinado, según las características propias de cada subcuenca, las que se describen a continuación:

- **Tipo I:** Corresponden a las subcuencas dominadas por la componente pluvial, se caracterizan por estar ubicadas en sectores bajos principalmente, y de menor tamaño con respecto a las otras. Para estos sistemas, considerando $\alpha = \beta = 3\%$, el valor de la recarga en la unidad de roca es consistente con el monto de la descarga obtenida a partir del aforo.
- **Tipo II:** Corresponden a las subcuencas de mayor elevación, lo que implica una mayor cobertura nival y mayores precipitaciones. Para estos sistemas, considerando un $\alpha = 5\%$ y un $\beta = 15\%$, el valor de la recarga en la unidad de roca es consistente con el monto de la descarga obtenida a partir del aforo.
- **Tipo III.** Corresponden a aquellas subcuencas que poseen un área glaciar importante, se constató que los caudales de flujo base aforado en la campaña de abril 2018 son muy elevados para ser considerados como flujo base subterráneo aportados por medio de la recarga, dadas las condiciones geológicas de baja permeabilidad predominantes en el sector. Por lo tanto, debido a las características de las unidades, es posible utilizar los mismos coeficientes determinados para la estimación de recarga en las cuencas nivales ($\alpha = 5\%$ y un $\beta = 15\%$). La diferencia entre el flujo base aforado y la recarga estimada, se considera como aporte glaciar, ya que, en el periodo de abril, si bien no hay aporte pluvial o nival, la componente glaciar puede aportar entre un 25 a 95% de los flujos superficiales medidos (Castillo, 2015).

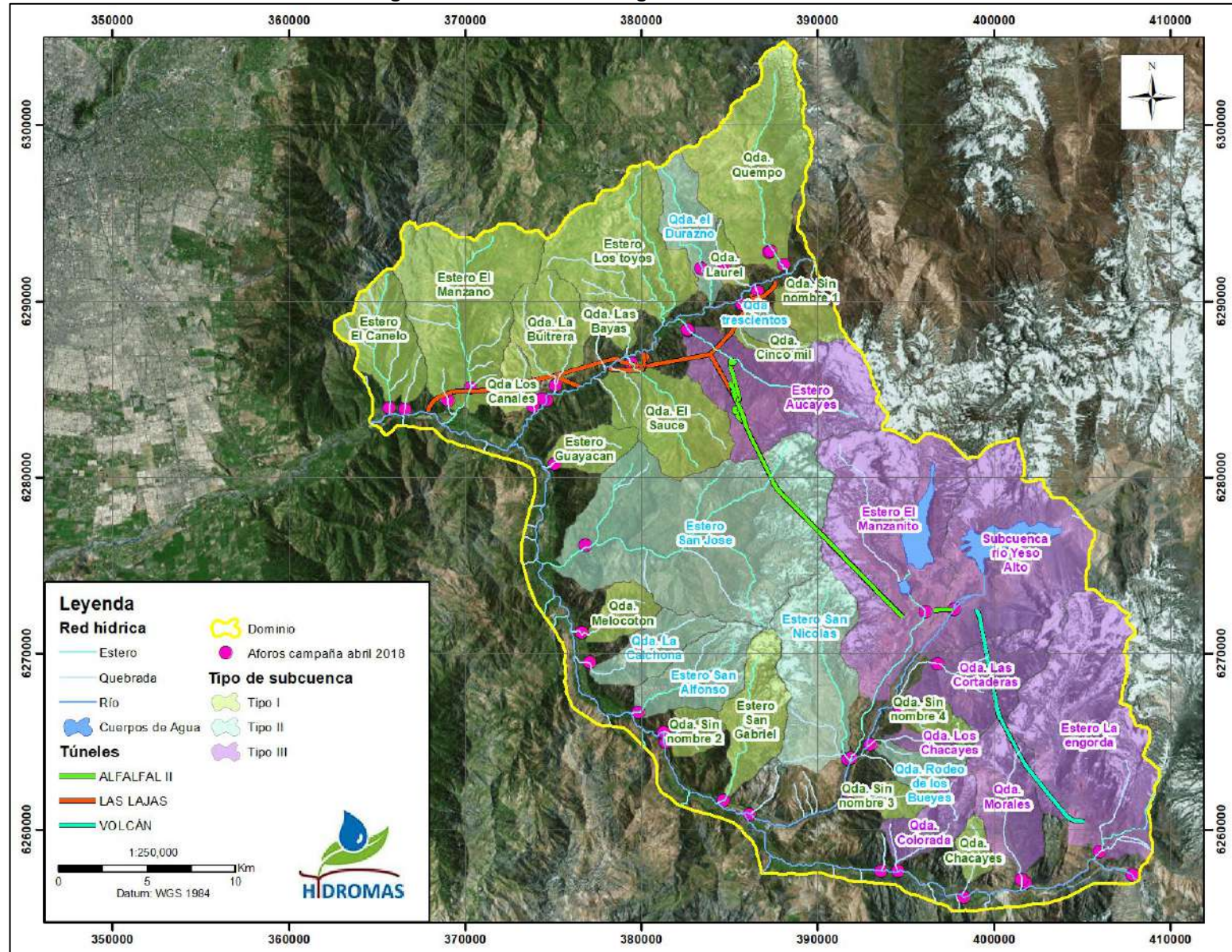
En la Figura 4-8 se presenta la ubicación espacial de las zonas de recarga definidas según la unidad hidrogeológica a la cual pertenecen. Del mismo modo, en la Tabla 4-7 se presentan las magnitudes de recarga subterránea estimadas para cada unidad dentro del dominio de estudio, la recarga del sistema de roca se estima en un total de 1.403 L/s. El detalle del cálculo para cada subcuenca se presenta en el Apéndice B del presente documento.

Figura 4-7: Esquema del balance hídrico general (imagen superior) y considerado para el mes de abril (imagen inferior)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4-8: Zonas de recarga en el sistema de roca



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4-7: Recarga de las unidades de roca dentro del Dominio

Subsistema	Unidad en sistema de roca	Tipo	Qp (L/s)	Qn (L/s)	Recarga (L/s)
Río Colorado	Qda. Quempo	I	767	572	40
	Qda. Sin nombre 1	I	665	37	21
	Qda. Laurel	I	63	0	2
	Qda. El Durazno	II	335	72	28
	Qda. Trescientos	II	92	12	3
	Qda. Cinco mil	I	74	28	3
	Estero Los Toyos	I	892	42	28
	Estero Aucayes	III	743	512	114
	Qda. Las Bayas	I	63	0	2
	Qda. El Sauce	I	482	24	15
	Qda. La Buitrera	I	417	0	13
	Qda. Los Canales	I	129	0	4
	Total Unidad de roca subsistema río Colorado		4722	1300	272
Río Yeso	Estero El Manzanito	I	982	1067	209
	Yeso Alto	III	784	852	167
	Qda. Las Cortaderas	III	275	330	63
	Estero San Nicolas	III	686	444	101
	Qda. Sin nombre 4	I	86	76	5
	Qda. Los Chacayes	I	168	129	28
	Qda. Rodeo de los Bueyes	II	119	66	16
	Qda. Sin Nombre 3	I	125	66	6
	Total Unidad de roca subsistema río Yeso		3224	3030	584
Río Volcán	Estero La Engorda	III	332	616	109
	Qda. Morales	III	367	236	54
	Qda. Chacayes	I	105	43	4
	Qda. Coloradas	III	114	114	23
	Total Unidad de roca subcuenca río Yeso		918	1008	190
Río Maipo	Estero San Gabriel	I	382	211	18
	Qda. Sin nombre 2	I	100	0	2
	Estero San Alfonso	II	410	125	39
	Qda. La Calchona	II	309	49	23
	Qda. Melocotón	I	180	1	5
	Estero San José	II	1985	765	214
	Estero Guayacán	I	188	0	6
	Estero El Manzano	I	1172	99	38
	Estero El Canelo	I	390	28	13
	Total unidad de roca Cuenca río Maipo		5017	1277	358

Fuente: Elaboración propia

4.7 Balance hídrico

A partir de las distintas componentes descritas anteriormente, es posible establecer un balance hídrico dentro del dominio del modelo hidrogeológico conceptual, considerando las entradas y salidas del sistema subterráneo. Lo anterior se resume en la Tabla 4-8.

La entrada al sistema hidrogeológico corresponde a la recarga superficial, la que proviene desde la precipitación líquida y sólida. Según lo presentado en los acápites anteriores, la recarga total al sistema es de 6.928 L/s. Este valor es posible desagregarlo en la recarga asociada al sistema rocoso y al relleno sedimentario, cuyas magnitudes corresponden a 1.403 L/s y 5.524 L/s, respectivamente. Es decir, la recarga al sistema sedimentario es aproximadamente cuatro veces superior al del sistema de roca.

Con respecto a las salidas o afloramientos, estos corresponden al flujo base subterráneo caracterizado en cada sistema asociado a los cuatro cauces principales del área de estudio, río Colorado, Yeso, Volcán y Maipo, estos flujos se estimaron en 6.909 L/s en términos totales. Al igual que la recarga, al considerar las descargas por el sistema rocoso y sedimentario, se obtienen caudales de 1.267 L/s y 5.642 L/s respectivamente, es decir, la descarga en el sistema sedimentario es de 4,5 veces la descarga del sistema rocoso.

Tabla 4-8: Resumen Balance Hídrico Conceptual

Entradas	L/s	Salidas	L/s
Recarga sistema rocoso	1403	Descarga sistema rocoso	1267
Colorado	271	Colorado	236
Yeso	584	Yeso	568
Volcán	190	Volcán	185
Maipo	358	Maipo	278
Recarga sedimentario	5524	Descarga sedimentario	5642
Colorado	1112	Colorado	1273
Yeso	1079	Yeso	1204
Volcán	1295	Volcán	1200
Maipo	2038	Maipo	1965
Total	6928	Total	6909

Fuente: Elaboración propia

REFERENCIAS

- DGA, 2018. Base de datos en línea de registros de la red hidrométrica.
- Castillo, 2015. Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado.

APENDICE A

Tabla A-1: Estadística bruta de precipitaciones anuales

Año hidrológico	El Vergel	Pirque	San José De Maipo	San Gabriel	El Yeso Embalse
1976-1977		309			356
1977-1978		565	726		
1978-1979		674	748	844	
1979-1980		389	539	461	422
1980-1981		562	477	839	814
1981-1982			434		325
1982-1983		782	1174	1548	1512
1983-1984		469	483	479	357
1984-1985		630	613	716	692
1985-1986		213	338	332	321
1986-1987		480	653	795	925
1987-1988		905	1018	1080	1240
1988-1989		193	236	350	290
1989-1990	382	479	547		494
1990-1991	189	235	255	275	294
1991-1992		626		890	934
1992-1993	566	395	565		596
1993-1994	369	430	496	702	634
1994-1995		413		560	550
1995-1996	293	301		320	380
1996-1997		234	233	173	168
1997-1998	922	921	1010	1318	1223
1998-1999	114	140	145	263	203
1999-2000	381	492	394	595	496
2000-2001	659	658	735	851	1158
2001-2002	471	446	554	830	831
2002-2003	709	721	862	1084	1255
2003-2004	300	349	380	463	506
2004-2005	424	435	459	582	504
2005-2006	545	617	764	1000	1187
2006-2007	453	568	511	441	684
2007-2008	152	252	304	314	503
2008-2009	488	536	690	792	935
2009-2010	351	425		519	633
2010-2011	250	310	310	347	470
2011-2012	179	211	222	300	322
2012-2013	344	353	486	440	497
2013-2014	164	234	341	352	480
2014-2015	253	254	287	305	317
2015-2016	324	333	368		488
2016-2017	307	411	373	394	424
Total de datos	25	40	36	35	39

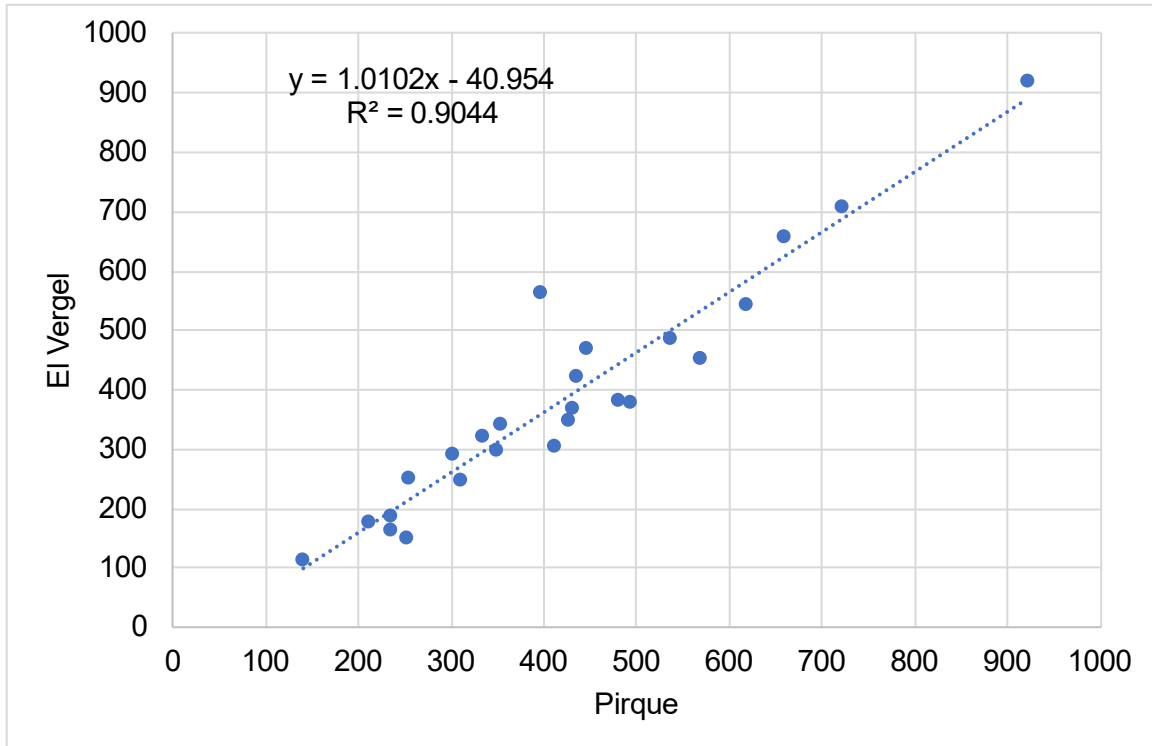
Fuente: Elaboración propia

Tabla A-2: Serie de precipitaciones anuales rellenada

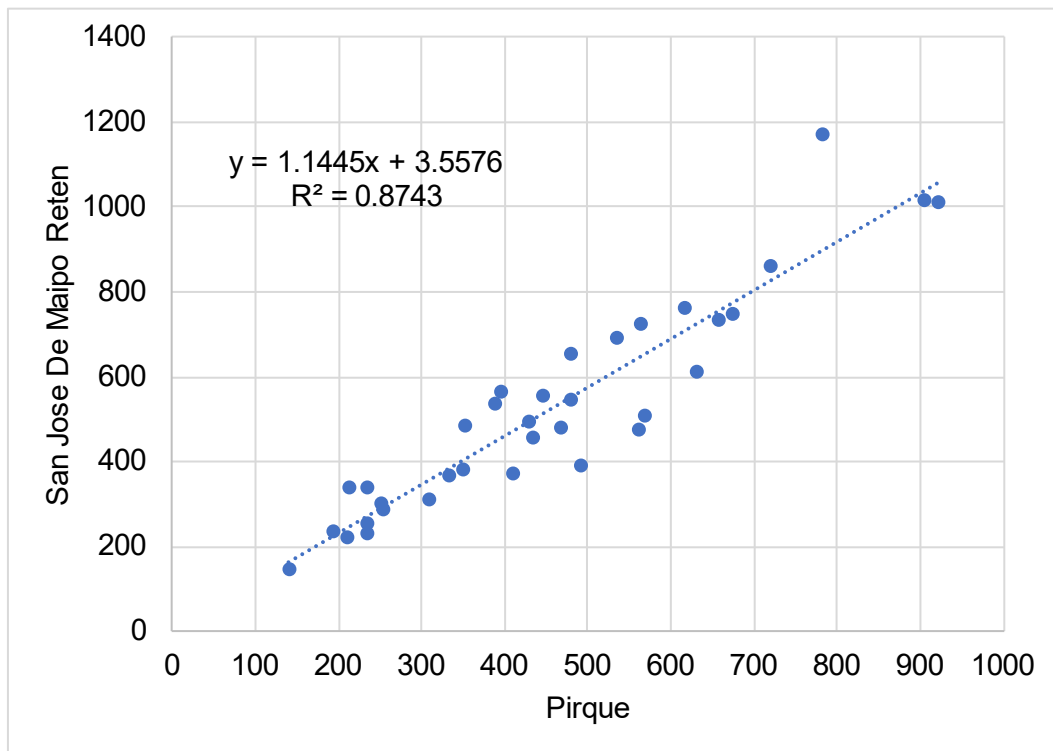
Año hidrológico	El Vergel	Pirque	San José De Maipo	San Gabriel	El Yeso Embalse
1976-1977	271	309	357	405	356
1977-1978	530	565	726	778	830
1978-1979	640	674	748	844	1001
1979-1980	352	389	539	461	422
1980-1981	526	562	477	839	814
1981-1982	349	386	434	517	325
1982-1983	749	782	1174	1548	1512
1983-1984	432	469	483	479	357
1984-1985	596	630	613	716	692
1985-1986	174	213	338	332	321
1986-1987	444	480	653	795	925
1987-1988	873	905	1018	1080	1240
1988-1989	154	193	236	350	290
1989-1990	382	479	547	653	494
1990-1991	189	235	255	275	294
1991-1992	592	626	752	890	934
1992-1993	566	395	565	531	596
1993-1994	369	430	496	702	634
1994-1995	376	413	476	560	550
1995-1996	293	301	347	320	380
1996-1997	195	234	233	173	168
1997-1998	922	921	1010	1318	1223
1998-1999	114	140	145	263	203
1999-2000	381	492	394	595	496
2000-2001	659	658	735	851	1158
2001-2002	471	446	554	830	831
2002-2003	709	721	862	1084	1255
2003-2004	300	349	380	463	506
2004-2005	424	435	459	582	504
2005-2006	545	617	764	1000	1187
2006-2007	453	568	511	441	684
2007-2008	152	252	304	314	503
2008-2009	488	536	690	792	935
2009-2010	351	425	529	519	633
2010-2011	250	310	310	347	470
2011-2012	179	211	222	300	322
2012-2013	344	353	486	440	497
2013-2014	164	234	341	352	480
2014-2015	253	254	287	305	317
2015-2016	324	333	368	440	488
2016-2017	307	411	373	394	424
Total de datos	41	41	41	41	41

Nota: Las celdas destacadas corresponden a valores rellenados mediante el método de correlación de precipitación

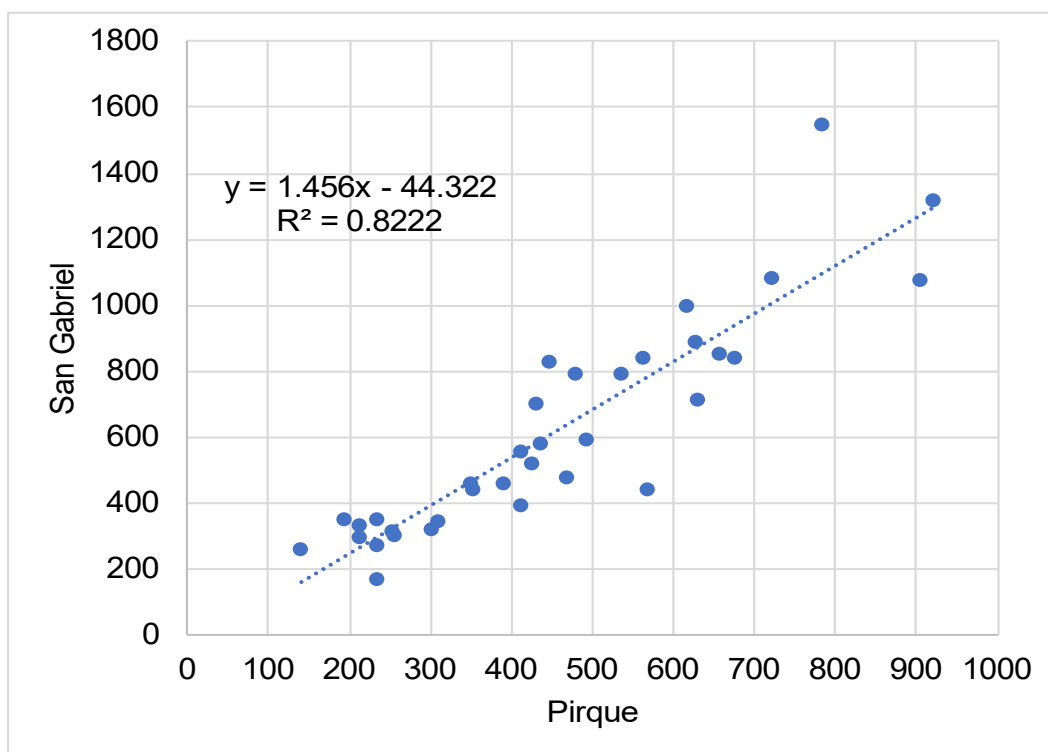
Fuente: Elaboración propia

Figura A-1: Gráfico de correlación serie de precipitación anual estación El Vergel y Pirque

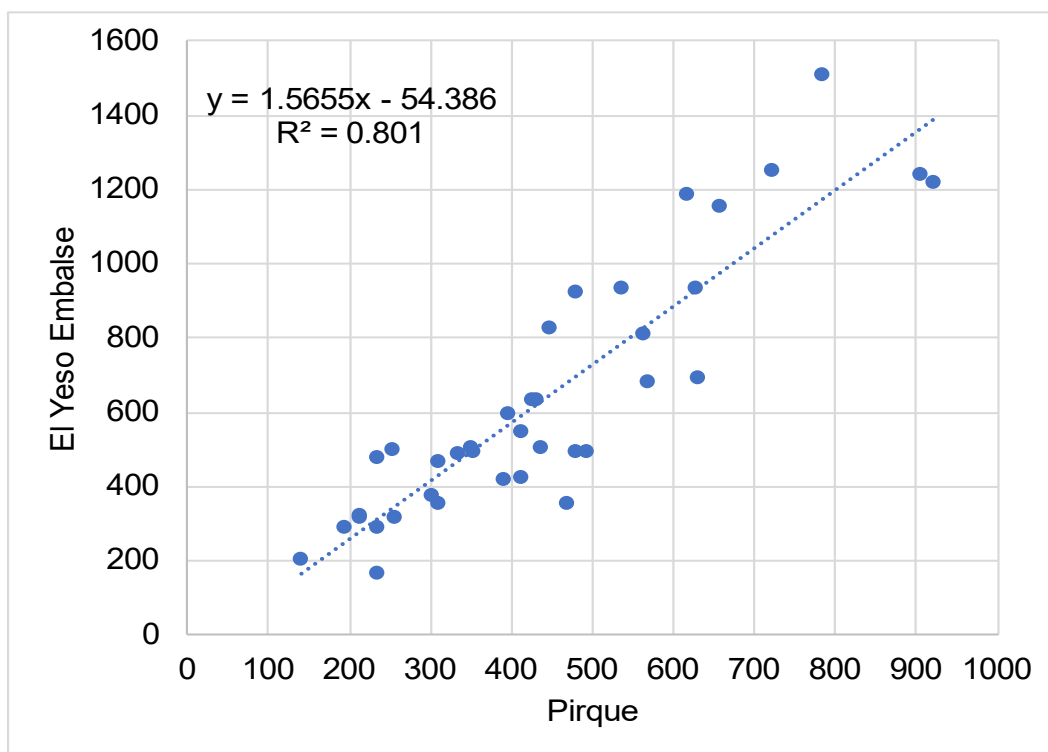
Fuente: Elaboración propia

Figura A-2: Gráfico de correlación serie de precipitación anual estación San José de Maipo y Pirque

Fuente: Elaboración propia

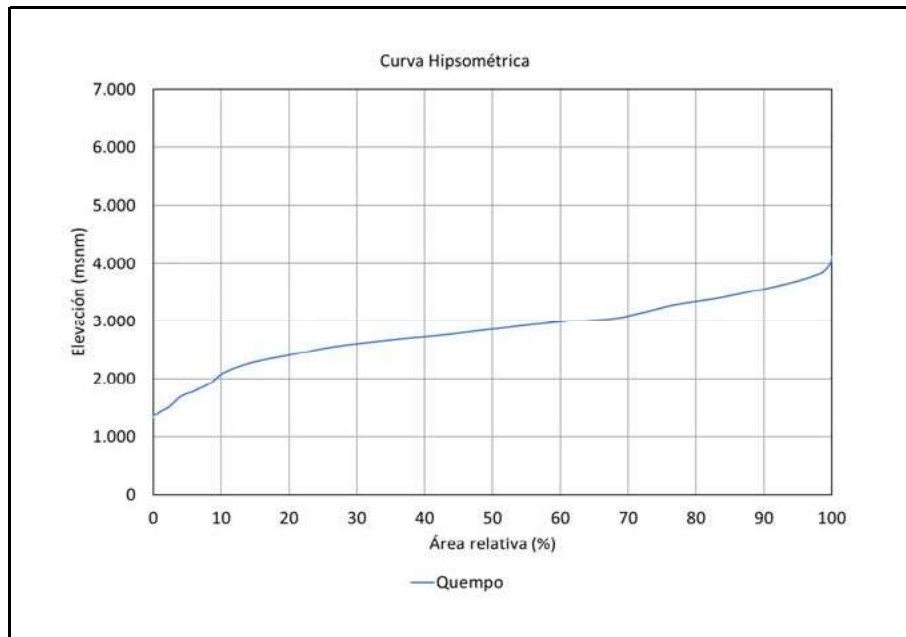
Figura A-3: Gráfico de correlación serie de precipitación anual estación San Gabriel y Pirque

Fuente: Elaboración propia

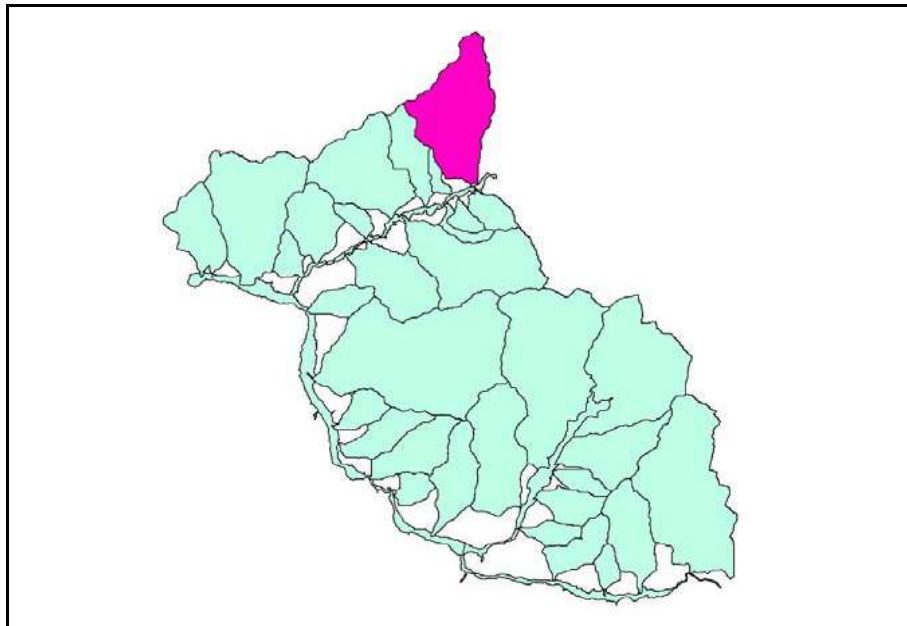
Figura A-4: Gráfico de correlación serie de precipitación anual estación San José de Maipo y Pirque

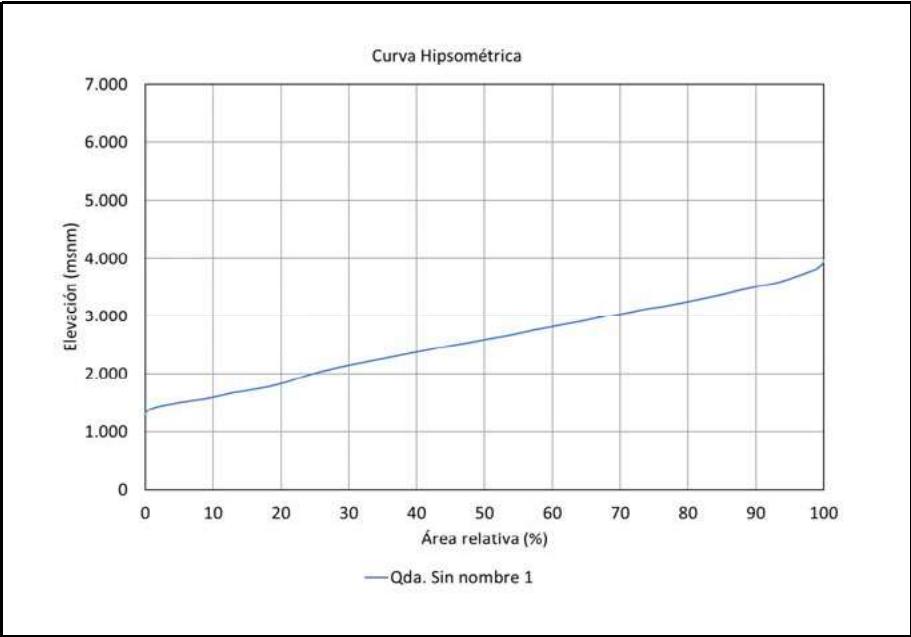
Fuente: Elaboración propia

APENDICE B

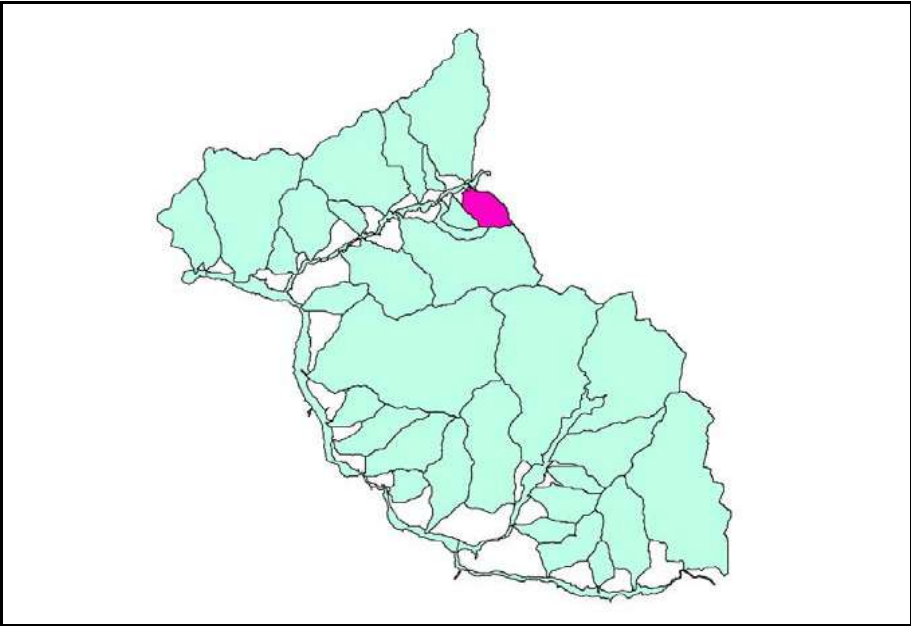


Nombre	-	Quempo
PP _{anual}	mm	631
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	52
Área _{glacial}	%	3
Área _{pluvial}	%	74
Área _{nival}	%	62
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	767
Q _{nival}	L/s	572
R _R	L/s	40
Q _B Medido	L/s	33
Q _B Subt Medido	L/s	33
Q _{Glacial}	L/s	0

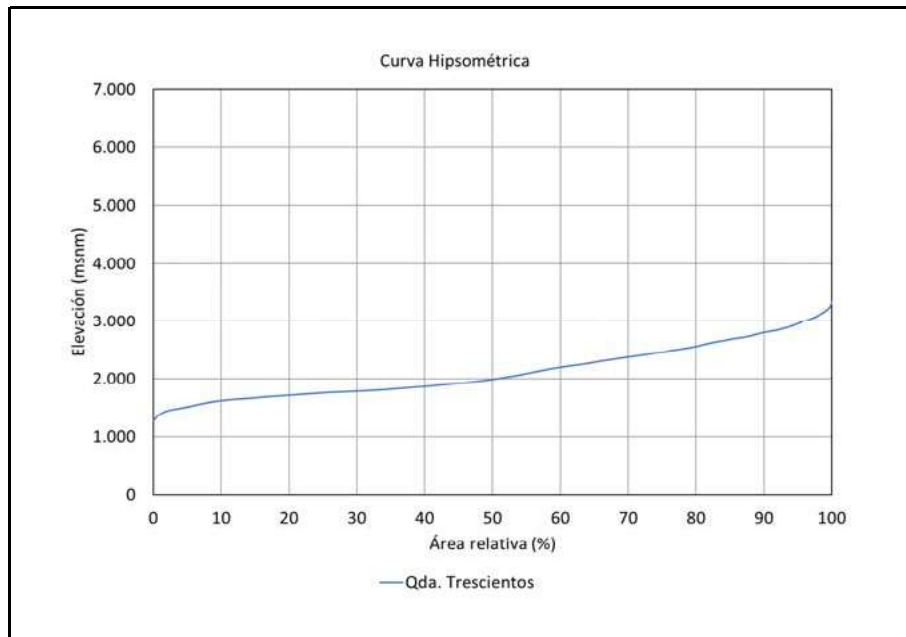




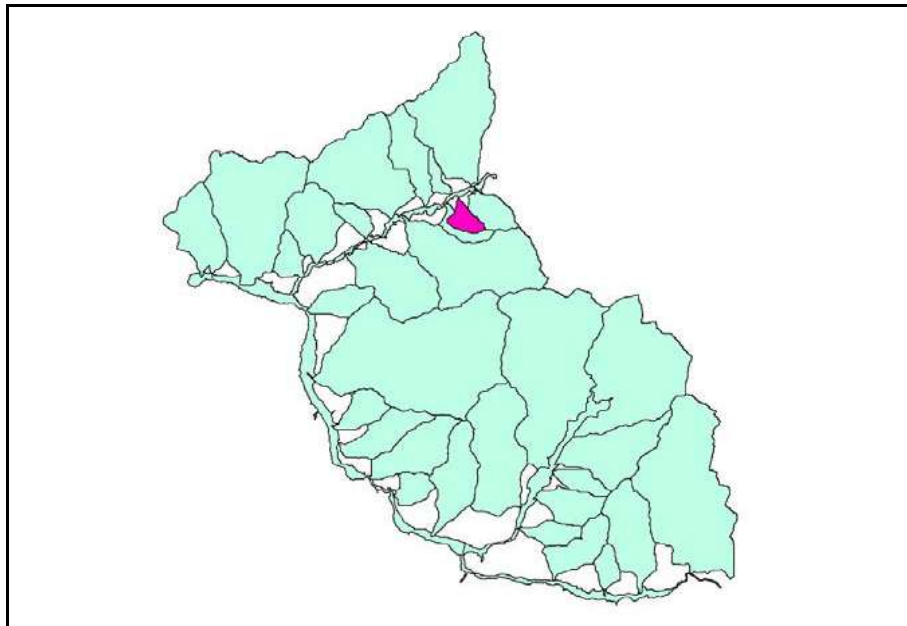
Nombre	-	Qda. Sin nombre 1 (*)
PP _{anual}	mm	
PP _{nival}	mm	
Área	km ²	5
Área _{glacial}	%	
Área _{pluvial}	%	
Área _{nival}	%	
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	665
Q _{nival}	L/s	37
R _R	L/s	21
Q _{B Medido}	L/s	s.i.
Q _{B Subt Medido}	L/s	21
Q _{Glacial}	L/s	0

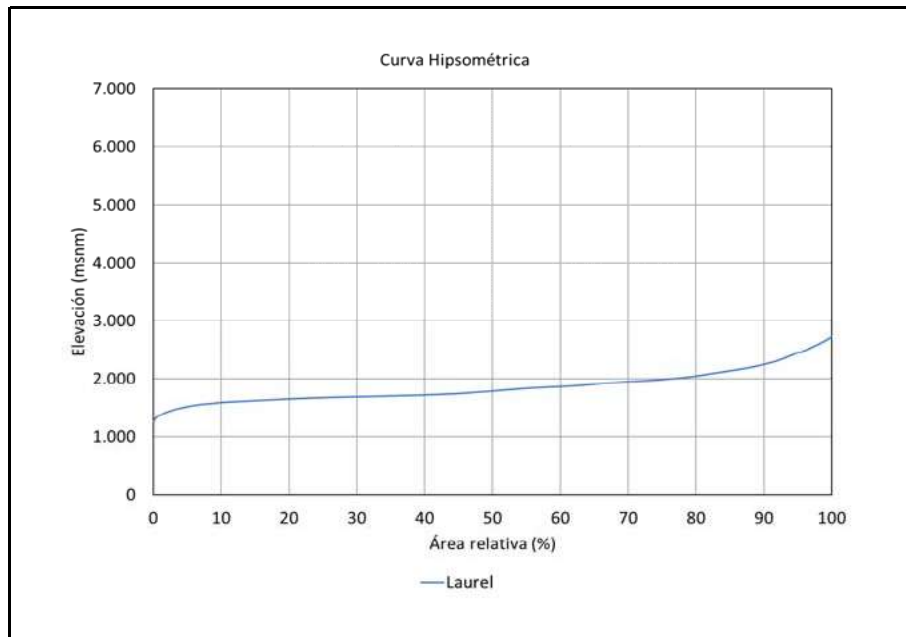


(*): Cálculo por transposición
s.i.: Sin información

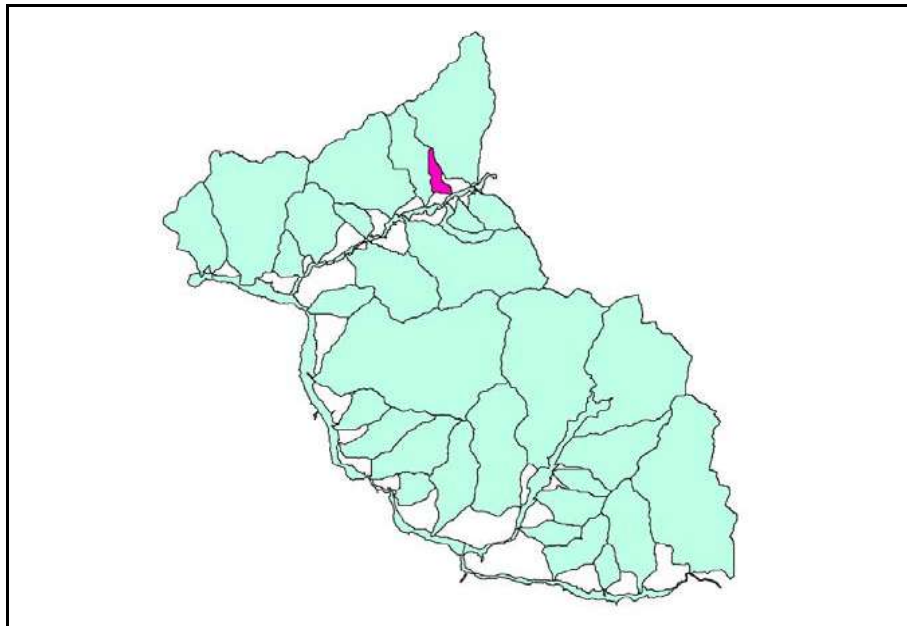


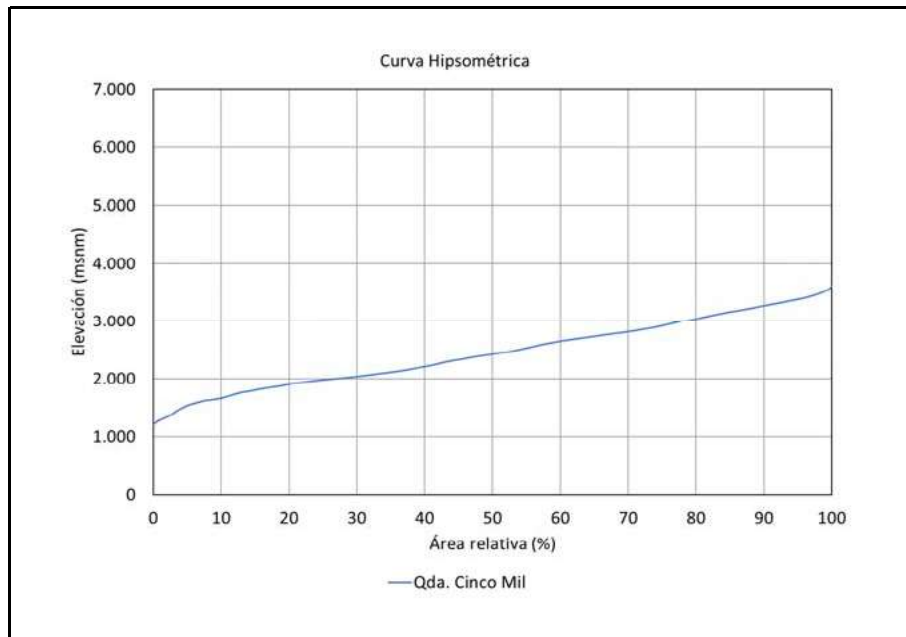
Nombre	-	Qda Trescientos
PP _{anual}	mm	612
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	5
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	99
Área _{nival}	%	14
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	92
Q _{nival}	L/s	12
R _R	L/s	3
Q _{B Medido}	L/s	12
Q _{B Subt Medido}	L/s	12
Q _{Glacial}	L/s	0



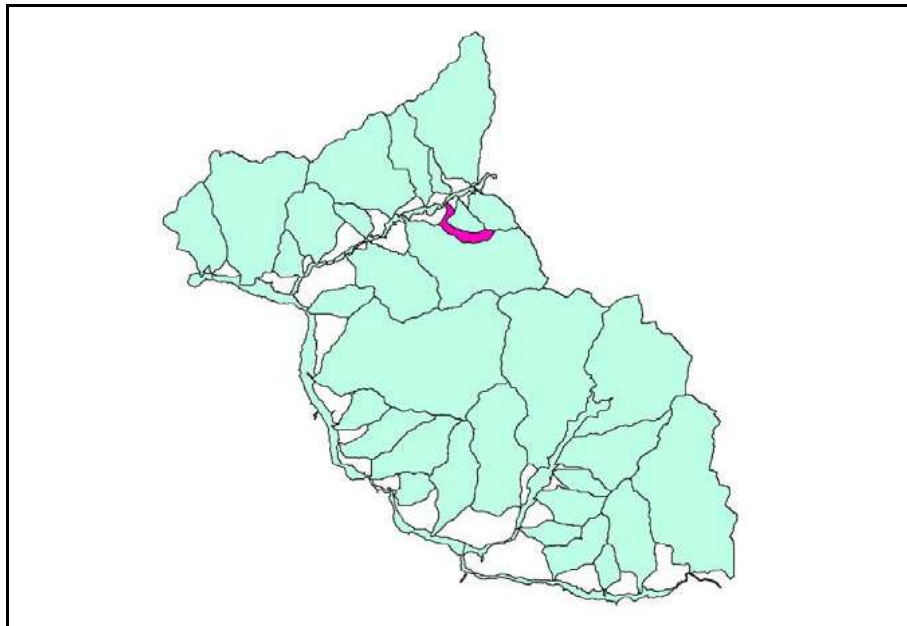


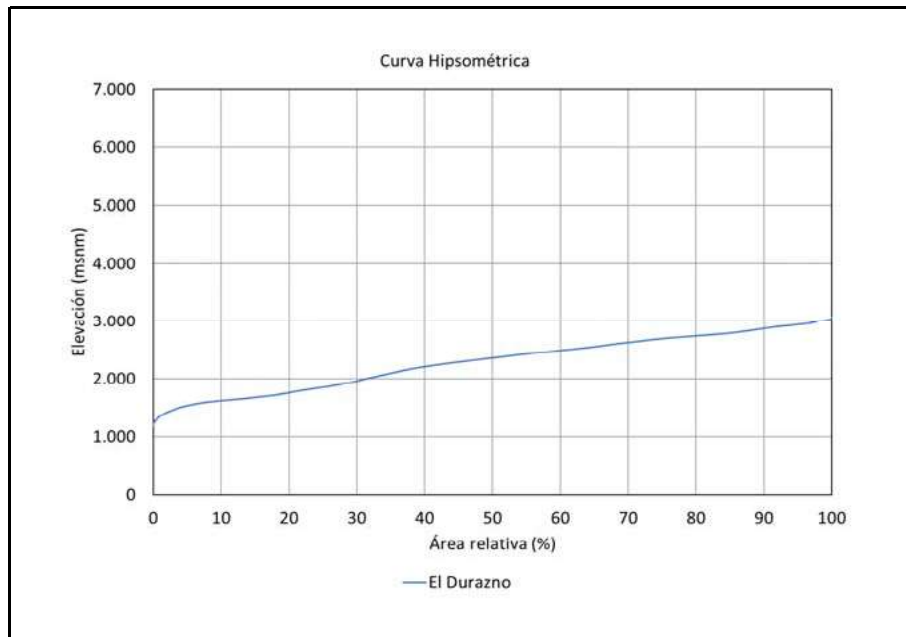
Nombre	-	Laurel
PP _{anual}	mm	606
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	3
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	0
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	63
Q _{nival}	L/s	0
R _R	L/s	2
Q _{B Medido}	L/s	0
Q _{B Subt Medido}	L/s	0
Q _{Glacial}	L/s	0



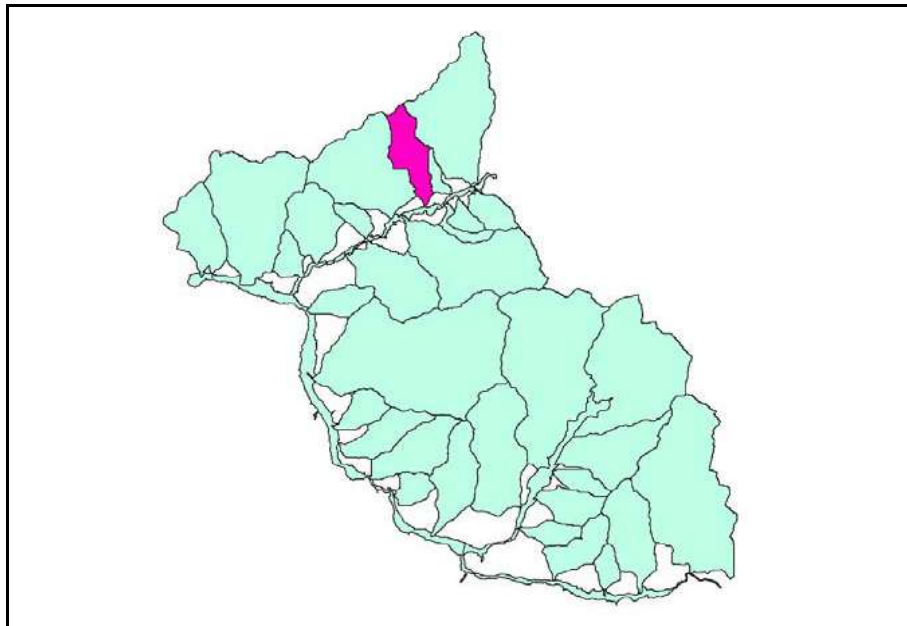


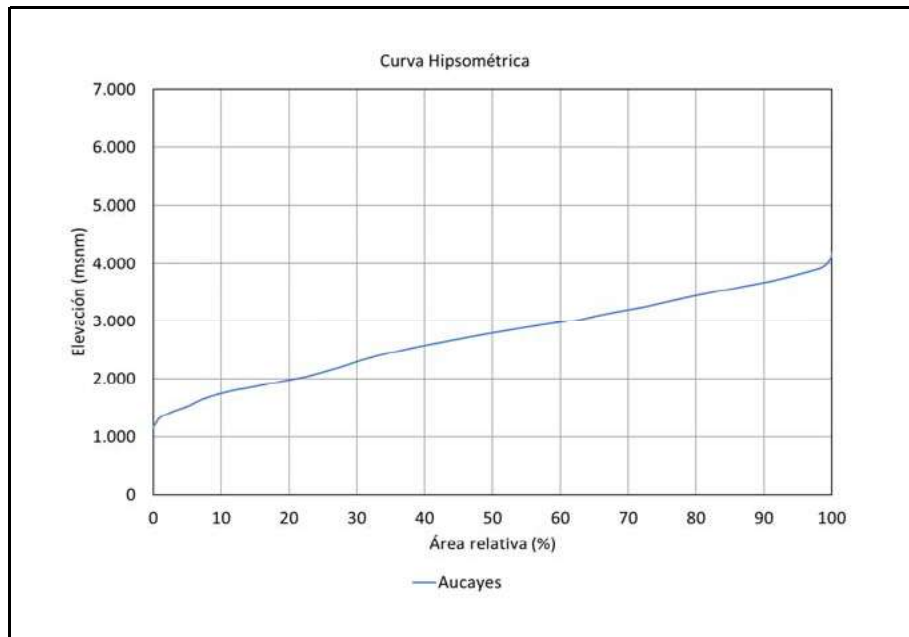
Nombre	-	Qda. Cinco Mil
PP _{anual}	mm	620
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	4
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	88
Área _{nival}	%	37
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	74
Q _{nival}	L/s	28
R _R	L/s	3
Q _{B Medido}	L/s	0
Q _{B Subt Medido}	L/s	0
Q _{Glacial}	L/s	0



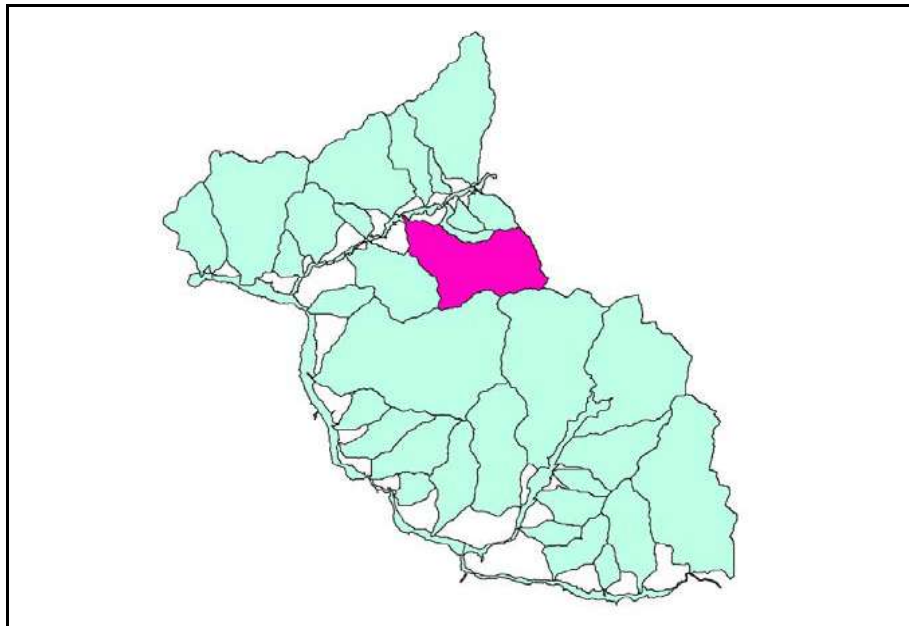


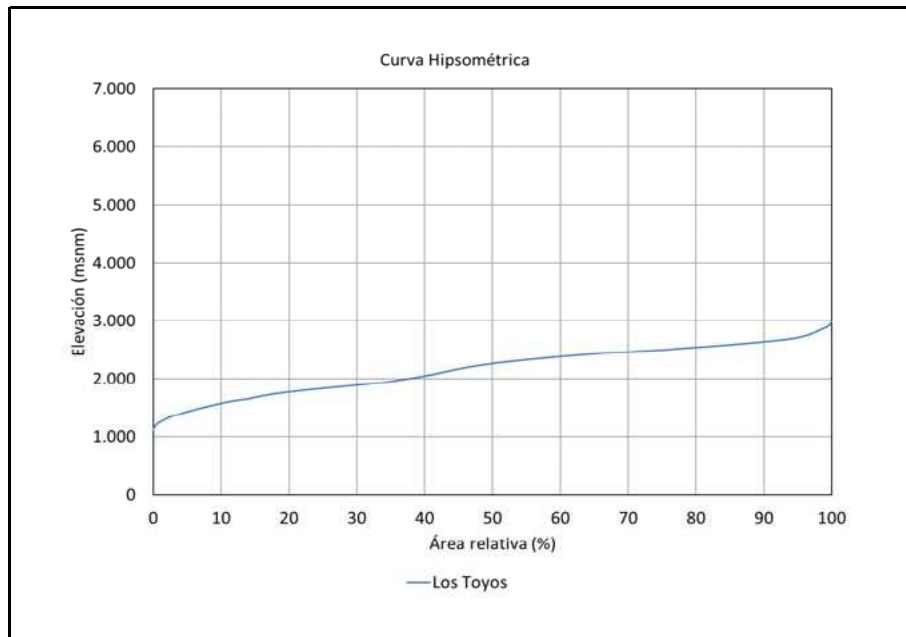
Nombre	-	El Durazno
PP _{anual}	mm	622
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	17
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	24
Tipo	-	II
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	335
Q _{nival}	L/s	72
R _R	L/s	28
Q _{B Medido}	L/s	20
Q _{B Subt Medido}	L/s	20
Q _{Glacial}	L/s	0





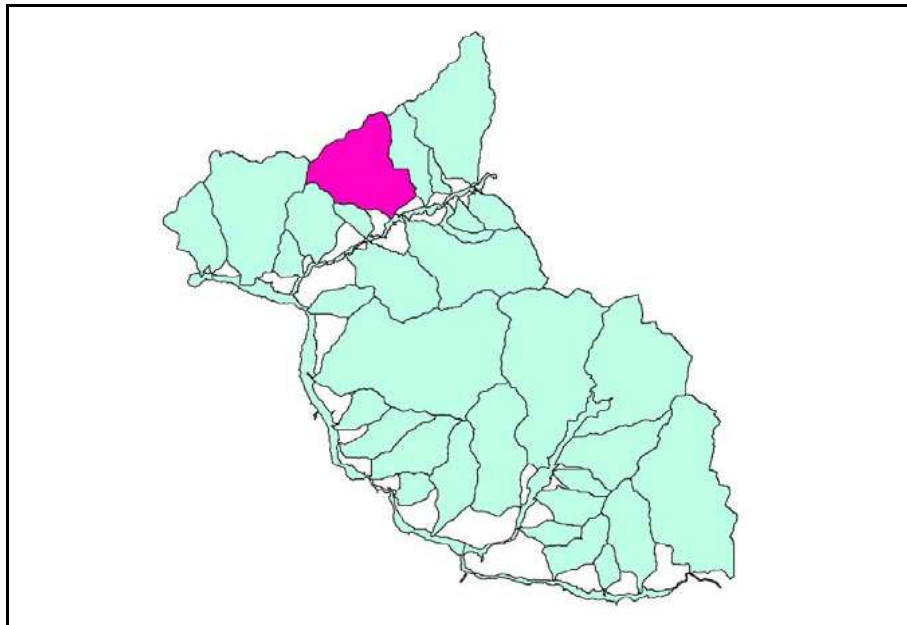
Nombre	-	Aucayes
PP _{anual}	mm	624
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	53
Área _{glacial}	%	6
Área _{pluvial}	%	71
Área _{nival}	%	54
Tipo	-	III
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	743
Q _{nival}	L/s	512
R _R	L/s	114
Q _{B Medido}	L/s	255
Q _{B Subt Medido}	L/s	114
Q _{Glacial}	L/s	141

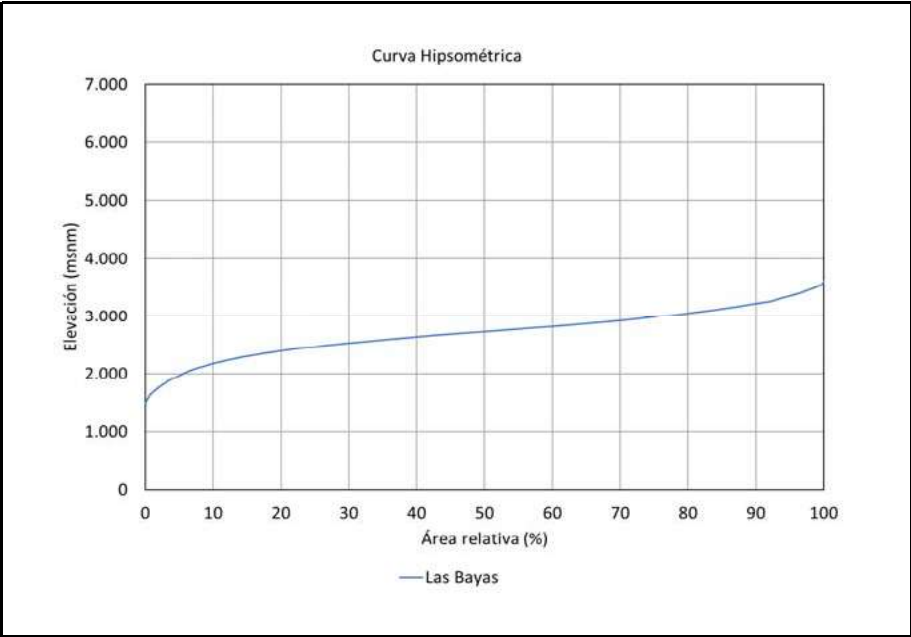




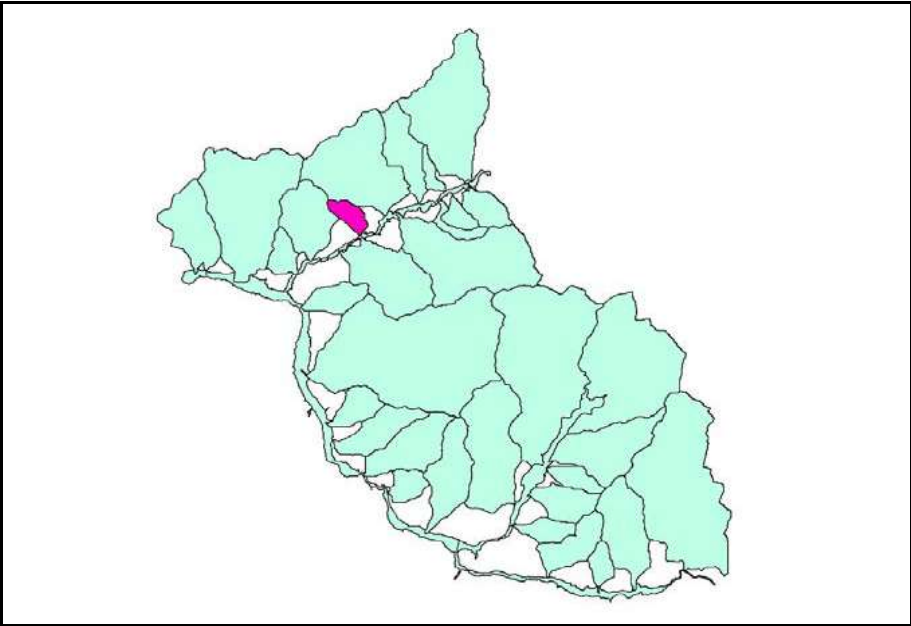
Nombre	-	Los Toyos
PP _{anual}	mm	619
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	45
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	5
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	892
Q _{nival}	L/s	42
R _R	L/s	28
Q _{B Medido}	L/s	s.i.
Q _{B Subt Medido}	L/s	28
Q _{Glacial}	L/s	0

s.i.: Sin información

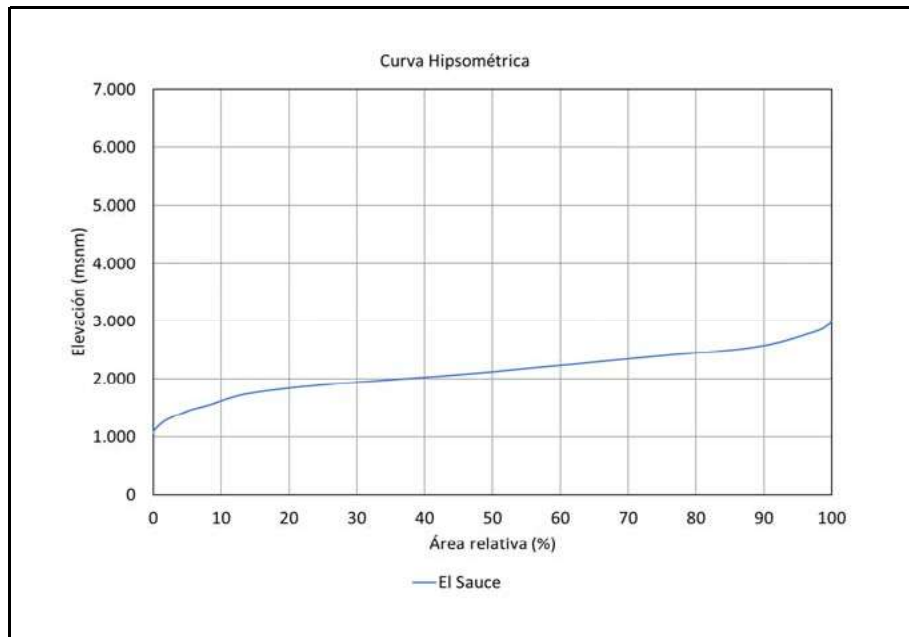




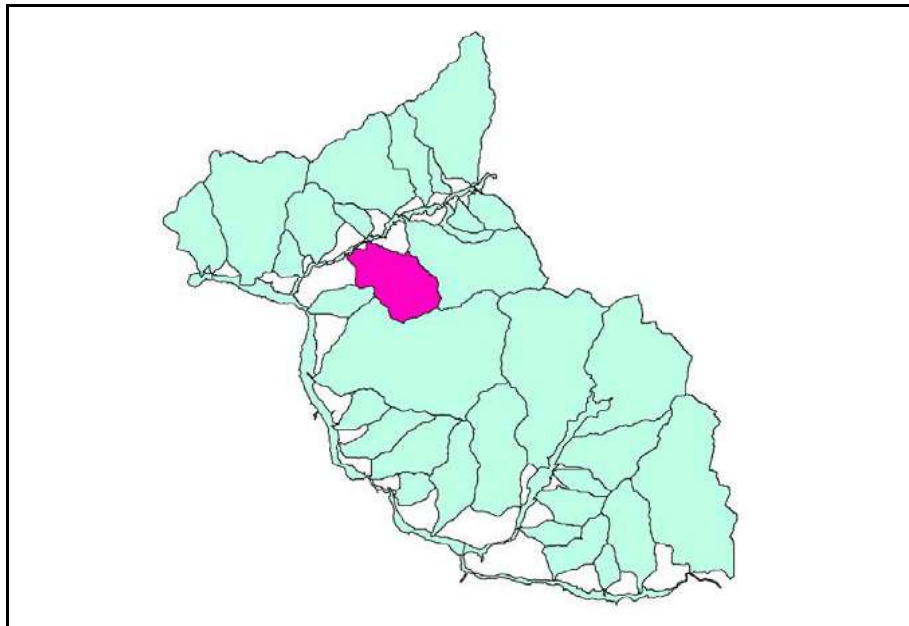
Nombre	-	Las Bayas (*)
PP _{anual}	mm	
PP _{nival}	mm	
Área	km ²	5
Área _{glacial}	%	
Área _{pluvial}	%	
Área _{nival}	%	
Tipo	-	
α	%	
β	%	
Q _{pluvial}	L/s	
Q _{nival}	L/s	
R _R	L/s	1
Q _{B Medido}	L/s	s.i.
Q _{B Subt Medido}	L/s	1
Q _{Glacial}	L/s	0

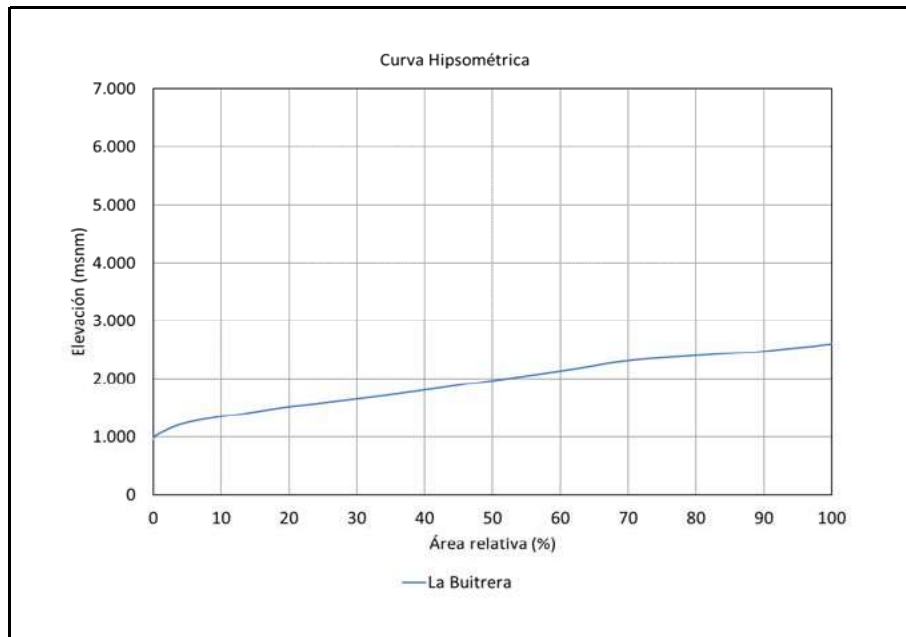


(*): Cálculo por transposición
s.i.: Sin información

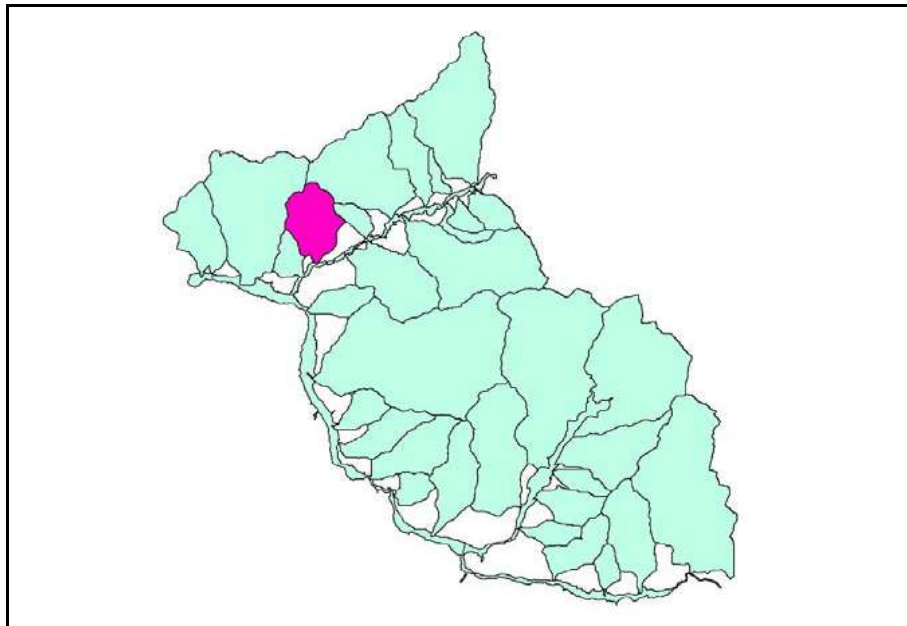


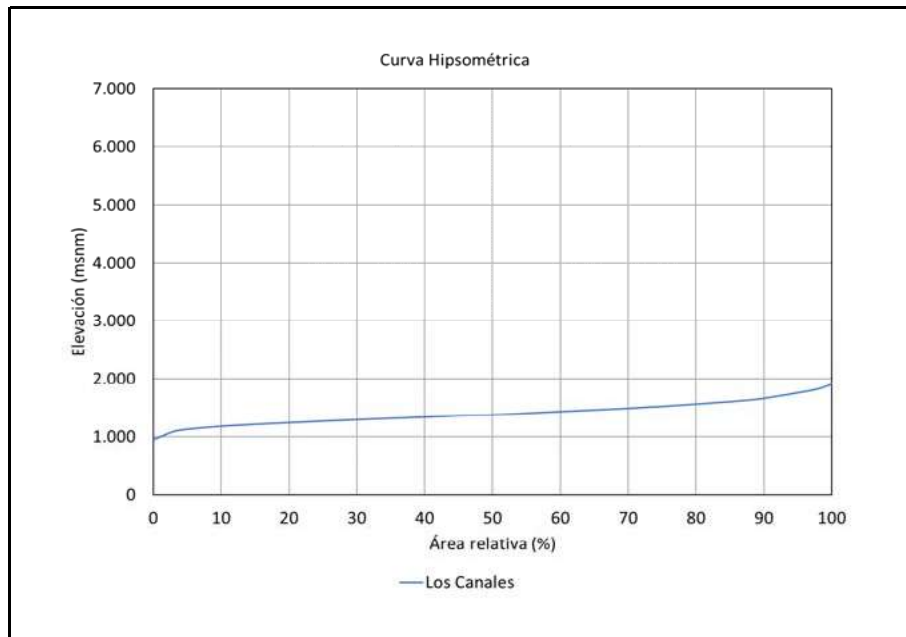
Nombre	-	El Sauce
PP _{anual}	mm	615
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	25
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	6
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	482
Q _{nival}	L/s	24
R _R	L/s	15
Q _{B Medido}	L/s	0
Q _{B Subt Medido}	L/s	0
Q _{Glacial}	L/s	0



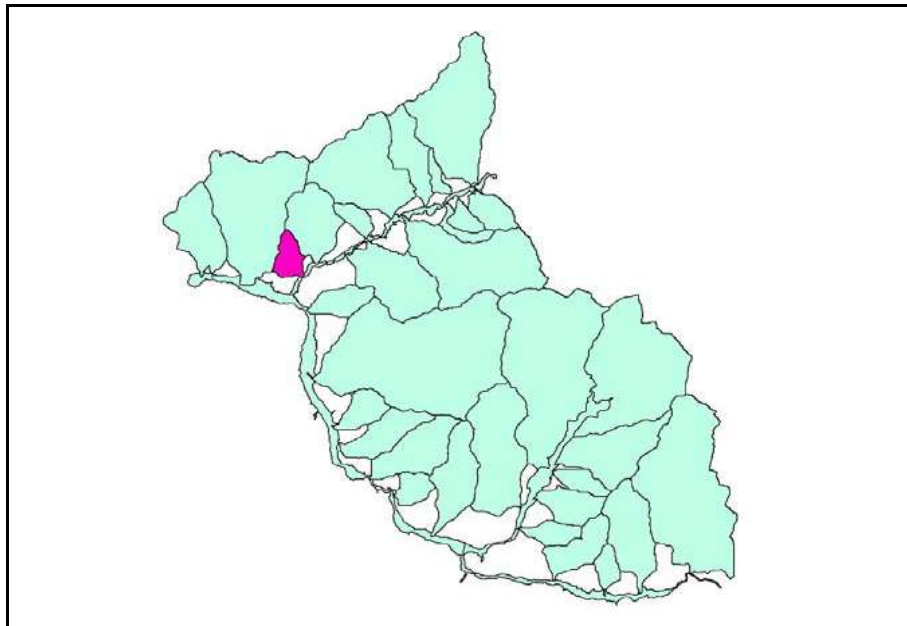


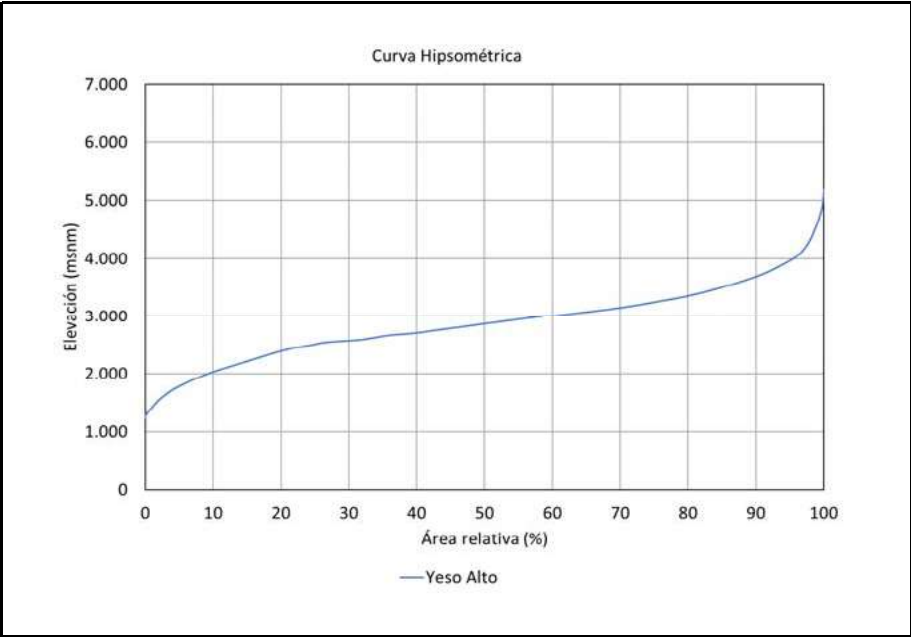
Nombre	-	La Buitrera
PP _{anual}	mm	611
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	22
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	0
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	417
Q _{nival}	L/s	0
R _R	L/s	13
Q _{B Medido}	L/s	7
Q _{B Subt Medido}	L/s	7
Q _{Glacial}	L/s	0



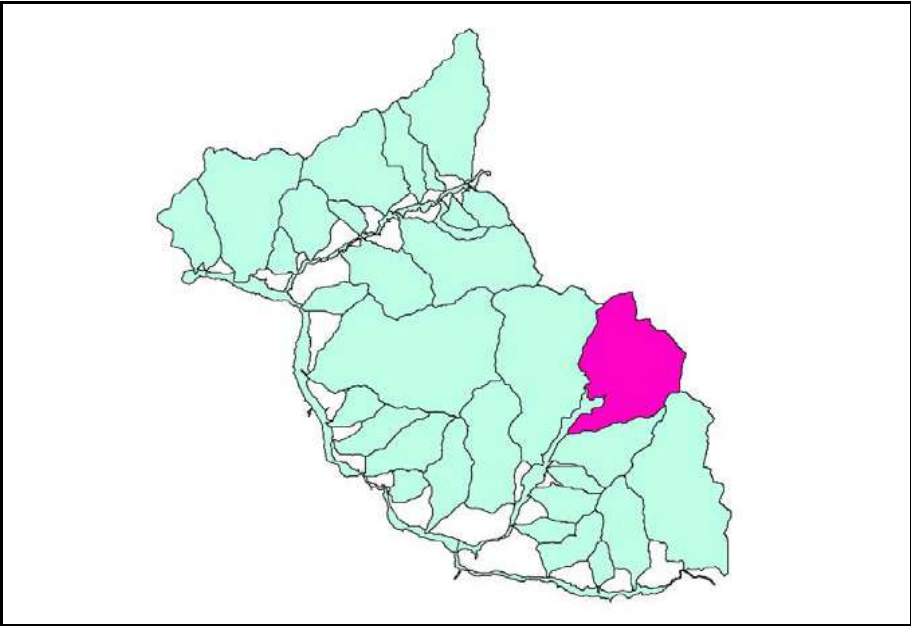


Nombre	-	Los Canales
PP _{anual}	mm	596
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	7
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	0
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	129
Q _{nival}	L/s	0
R _R	L/s	4
Q _{B Medido}	L/s	0
Q _{B Subt Medido}	L/s	0
Q _{Glacial}	L/s	0

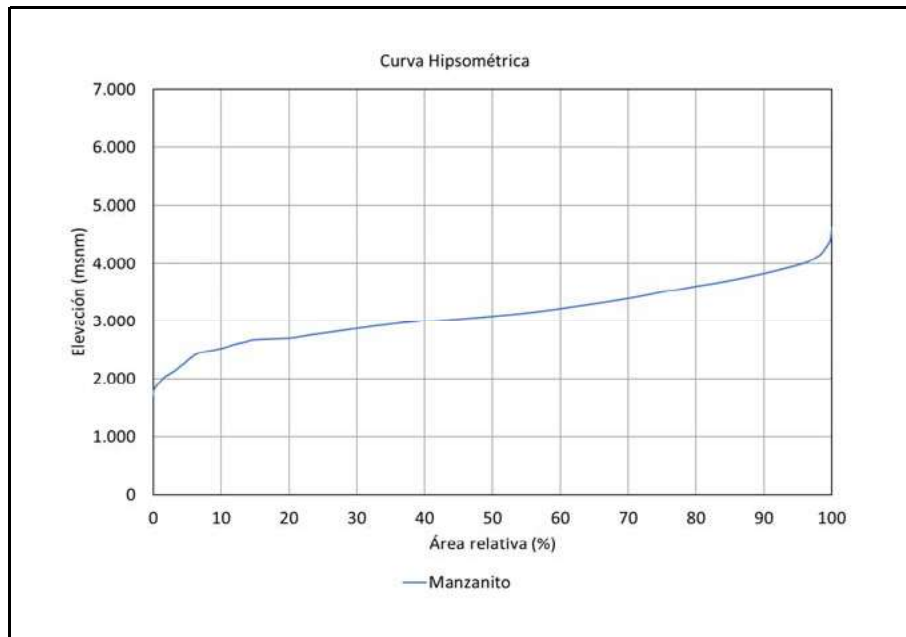




Nombre	-	Yeso Alto (*)
PP _{anual}	mm	
PP _{nival}	mm	
Área	km ²	61
Área _{glacial}	%	
Área _{pluvial}	%	
Área _{nival}	%	
Tipo	-	
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	784
Q _{nival}	L/s	852
R _R	L/s	157
Q _{B Medido}	L/s	s.i.
Q _{B Subt Medido}	L/s	157
Q _{Glacial}	L/s	

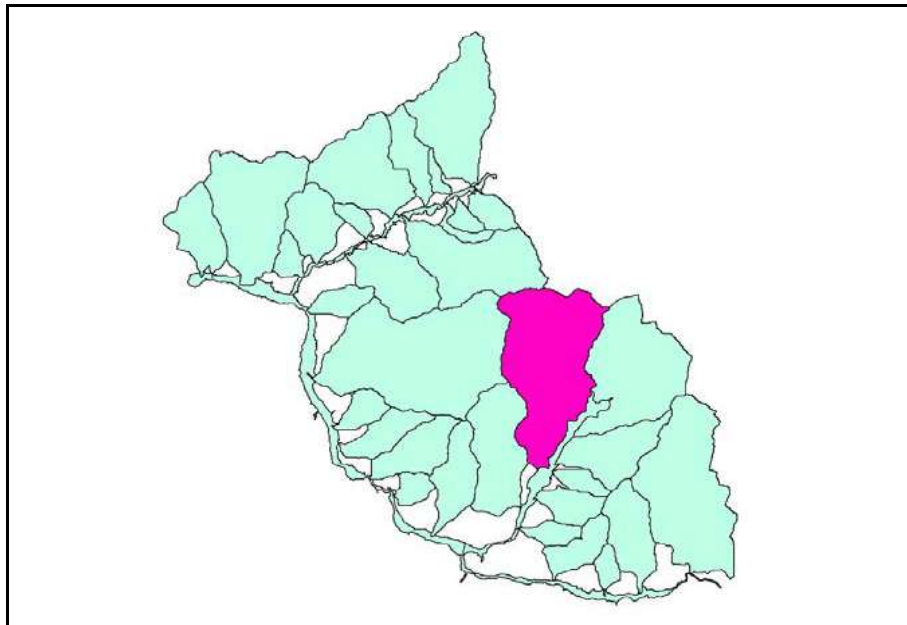


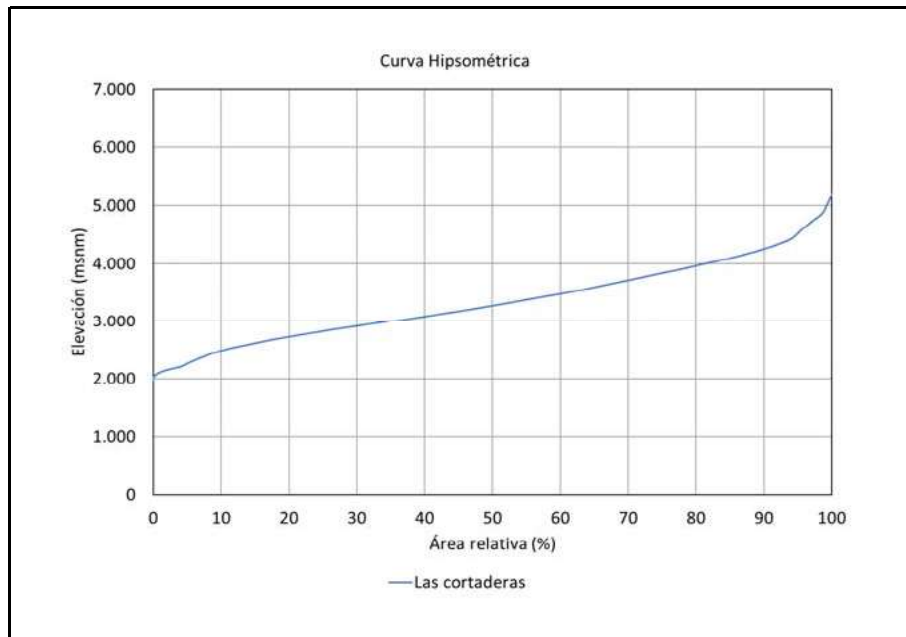
(*): Cálculo por transposición
s.i.: Sin información



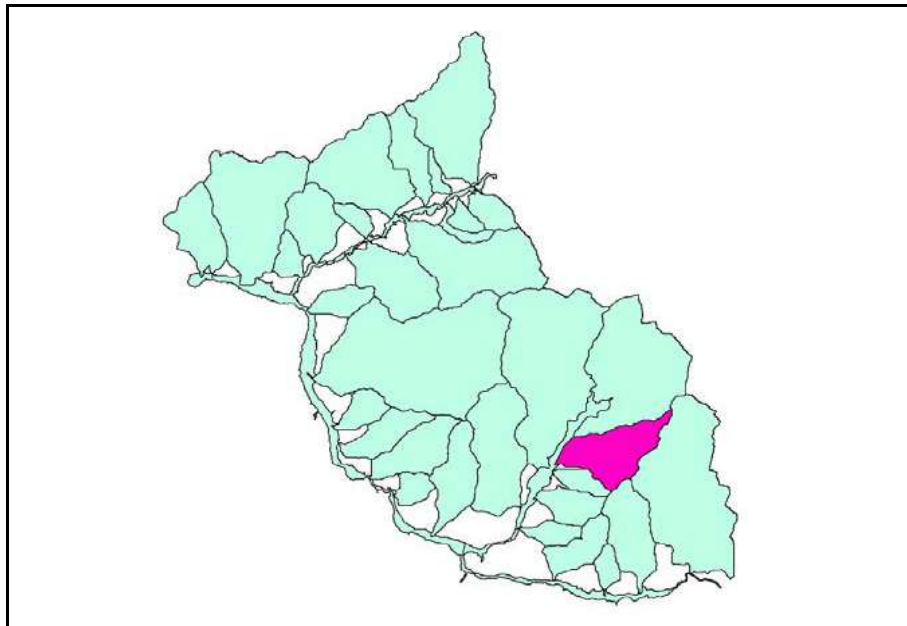
Nombre	-	Manzanito
PP _{anual}	mm	635
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	82
Área _{glacial}	%	7
Área _{pluvial}	%	60
Área _{nival}	%	73
Tipo	-	II
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	982
Q _{nival}	L/s	1067
R _R	L/s	209
Q _{B Medido}	L/s	s.i.
Q _{B Subt Medido}	L/s	195
Q _{Glacial}	L/s	0

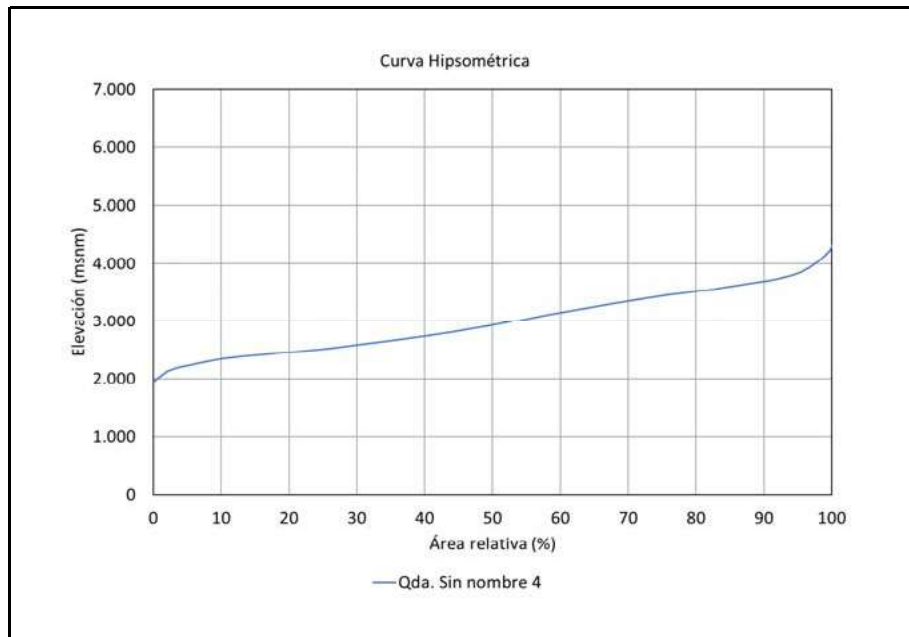
s.i.: Sin información



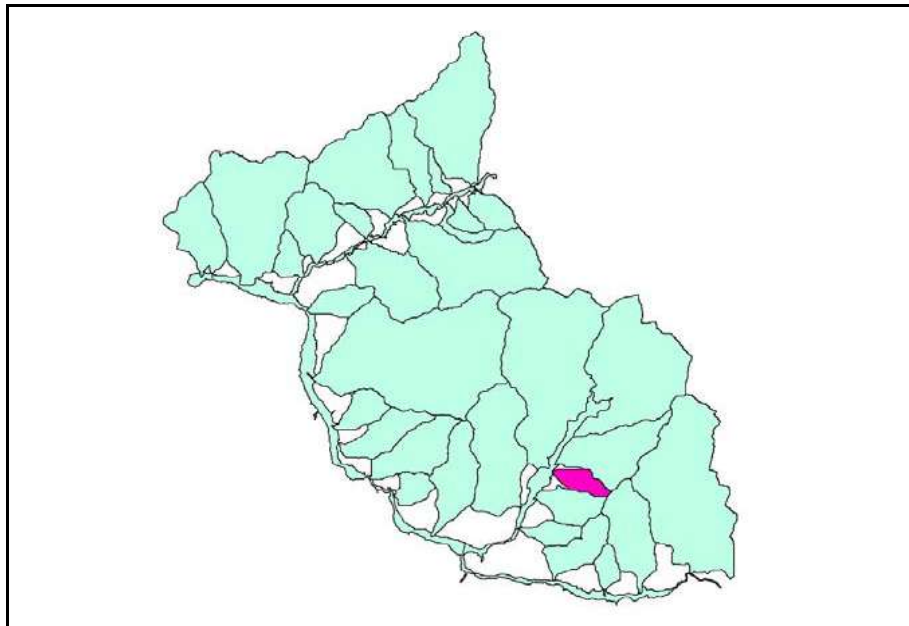


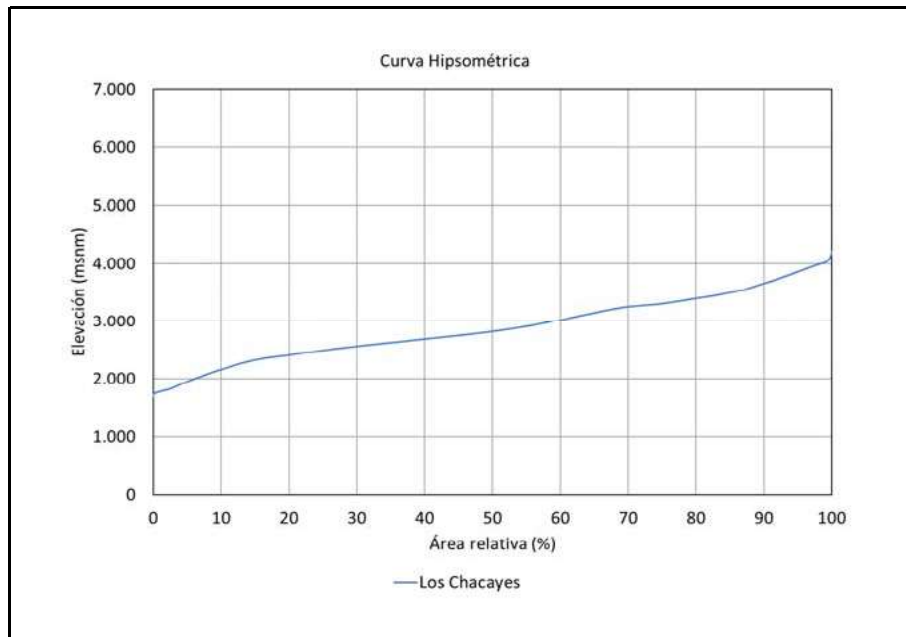
Nombre	-	Las cortaderas
PP _{anual}	mm	633
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	29
Área _{glacial}	%	17
Área _{pluvial}	%	47
Área _{nival}	%	64
Tipo	-	III
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	275
Q _{nival}	L/s	330
R _R	L/s	63
Q _{B Medido}	L/s	136
Q _{B Subt Medido}	L/s	63
Q _{Glacial}	L/s	73



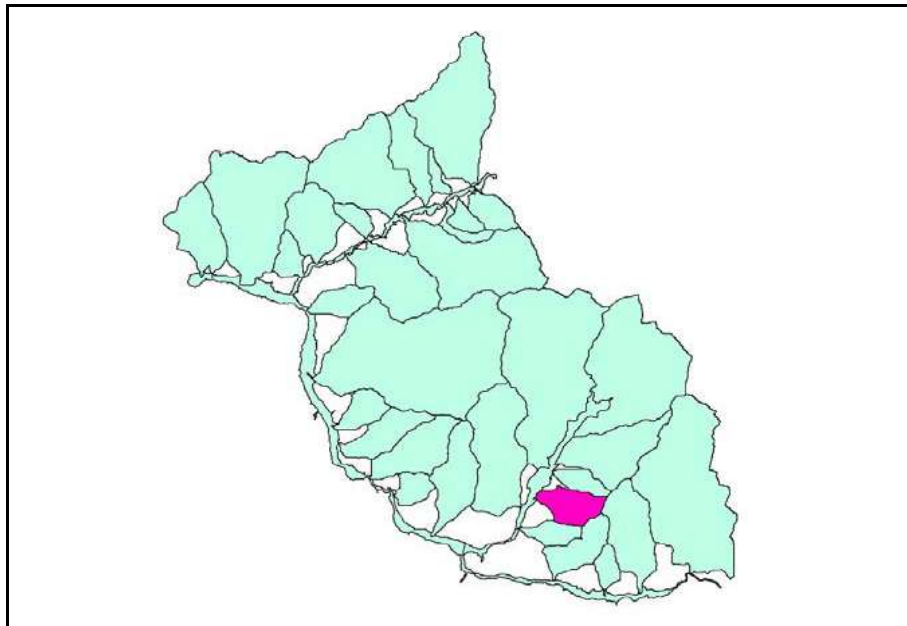


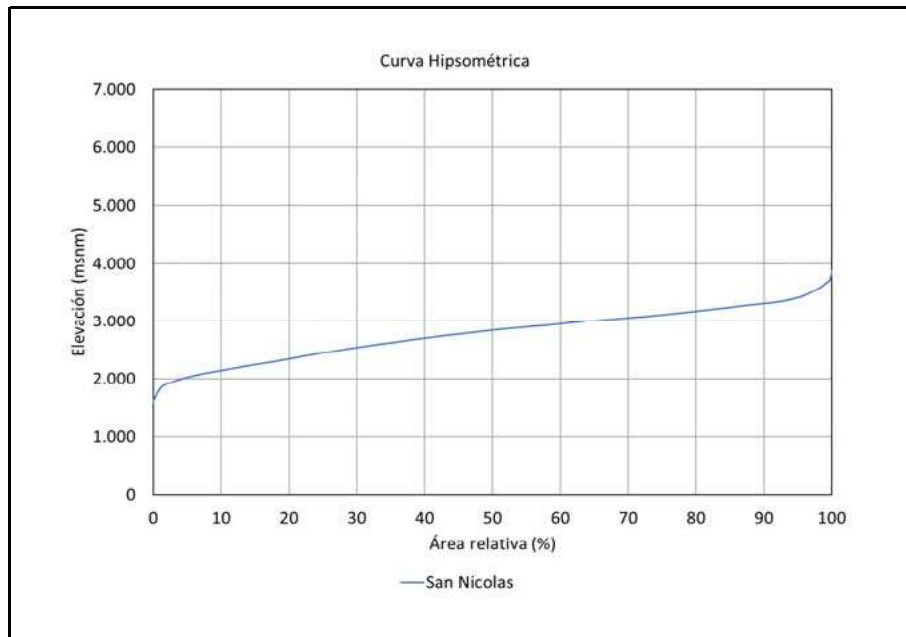
Nombre	-	Qda. Sin nombre 4
PP _{anual}	mm	628
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	7
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	63
Área _{nival}	%	62
Tipo	-	1
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	86
Q _{nival}	L/s	76
R _R	L/s	5
Q _{B Medido}	L/s	5
Q _{B Subt Medido}	L/s	5
Q _{Glacial}	L/s	0



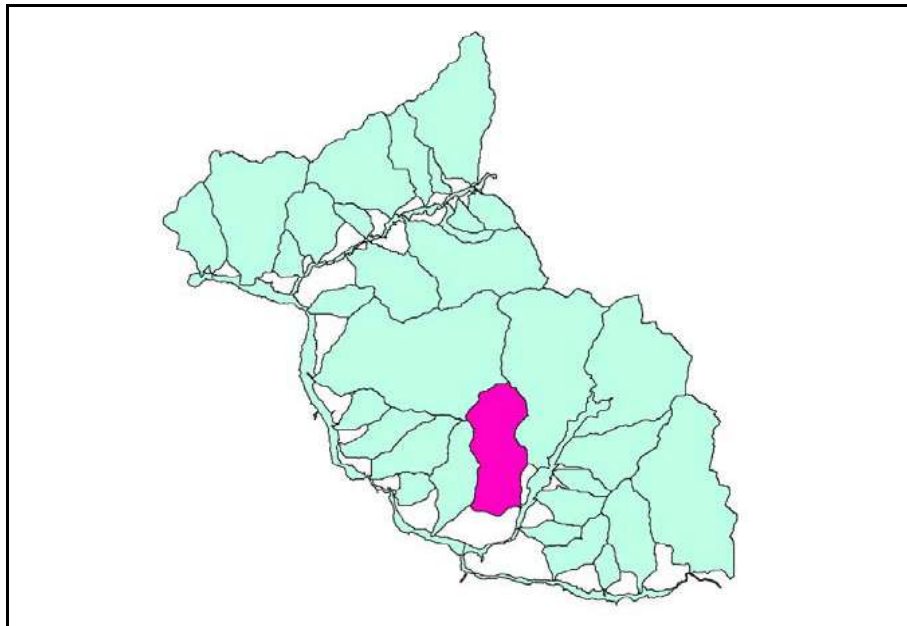


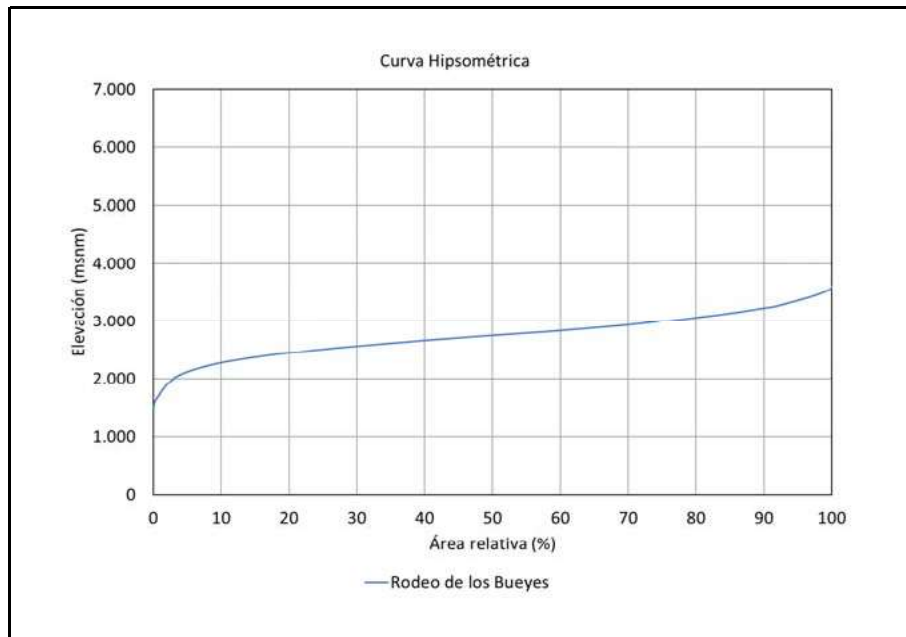
Nombre	-	Los Chacayes
PP _{anual}	mm	629
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	12
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	68
Área _{nival}	%	59
Tipo	-	III
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	168
Q _{nival}	L/s	129
R _R	L/s	28
Q _{B Medido}	L/s	99
Q _{B Subt Medido}	L/s	28
Q _{Glacial}	L/s	71



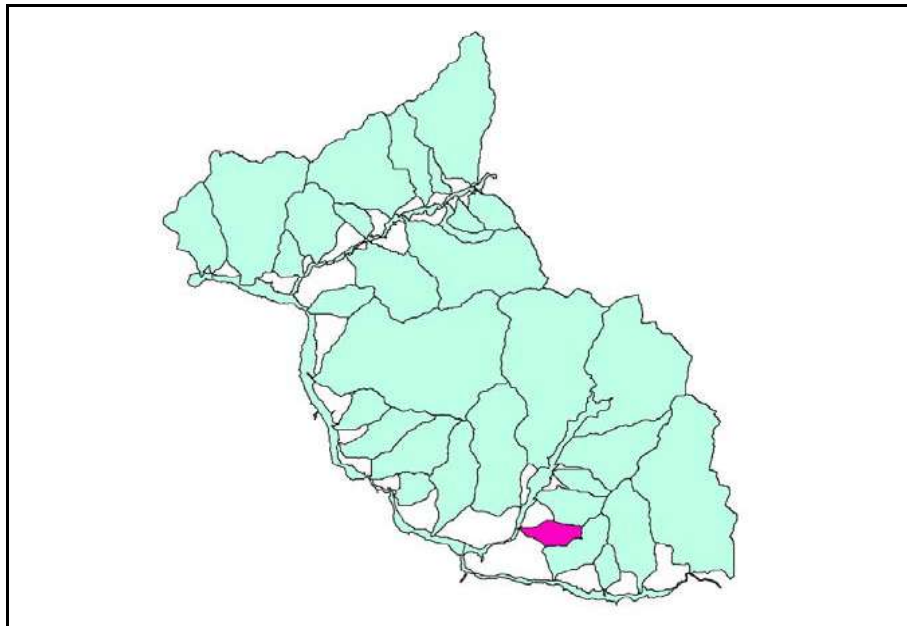


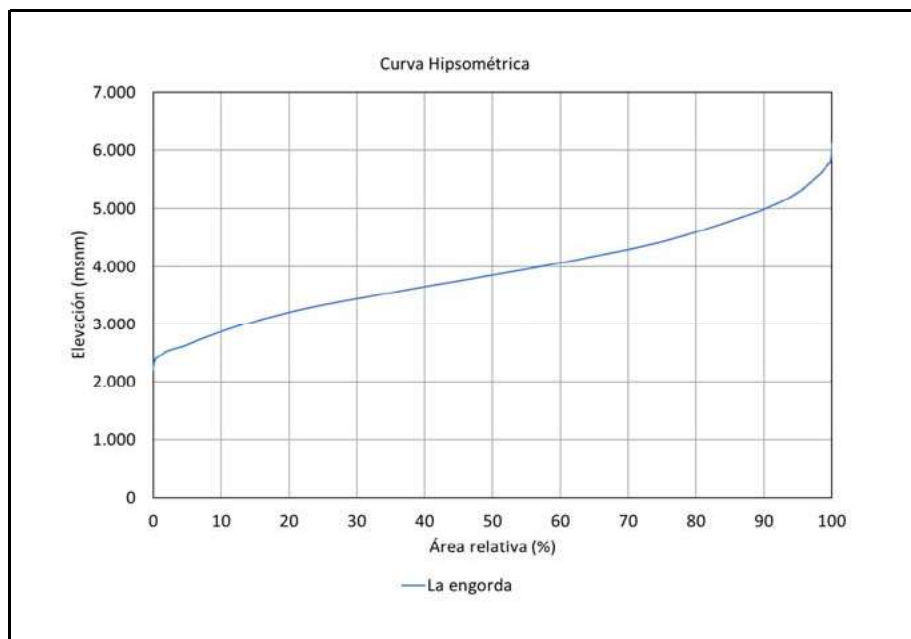
Nombre	-	San Nicolas
PP _{anual}	mm	632
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	41
Área _{glacial}	%	1
Área _{pluvial}	%	83
Área _{nival}	%	60
Tipo	-	III
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	686
Q _{nival}	L/s	444
R _R	L/s	101
Q _{B Medido}	L/s	175
Q _{B Subt Medido}	L/s	101
Q _{Glacial}	L/s	74



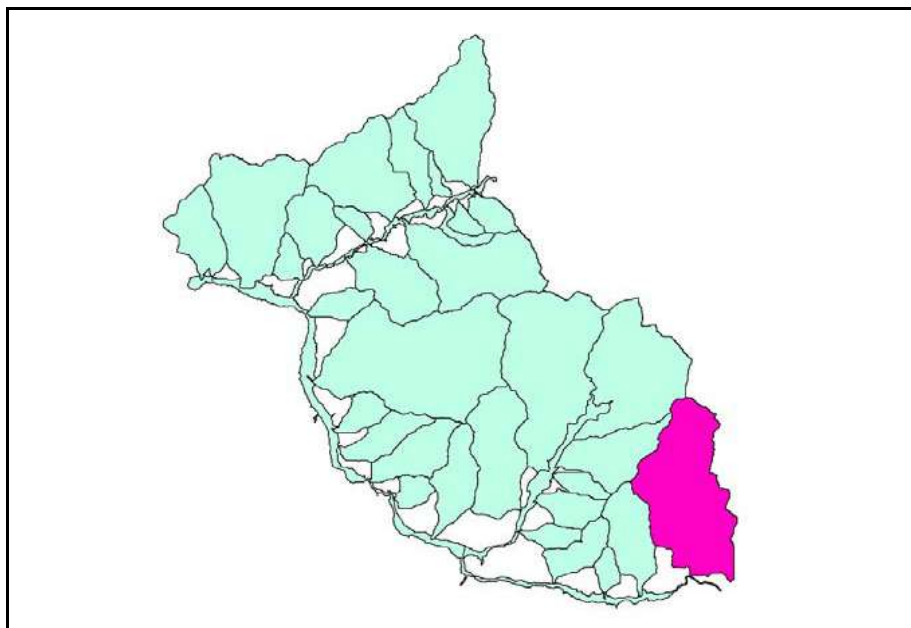


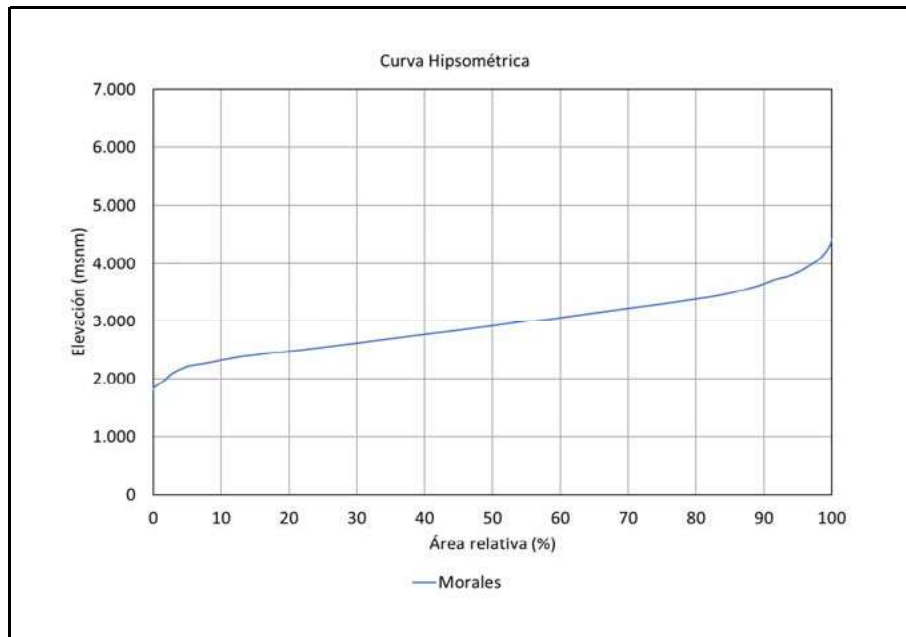
Nombre	-	Rodeo de los Bueyes
PP _{anual}	mm	631
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	7
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	89
Área _{nival}	%	55
Tipo	-	II
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	119
Q _{nival}	L/s	66
R _R	L/s	16
Q _{B Medido}	L/s	13
Q _{B Subt Medido}	L/s	13
Q _{Glacial}	L/s	0



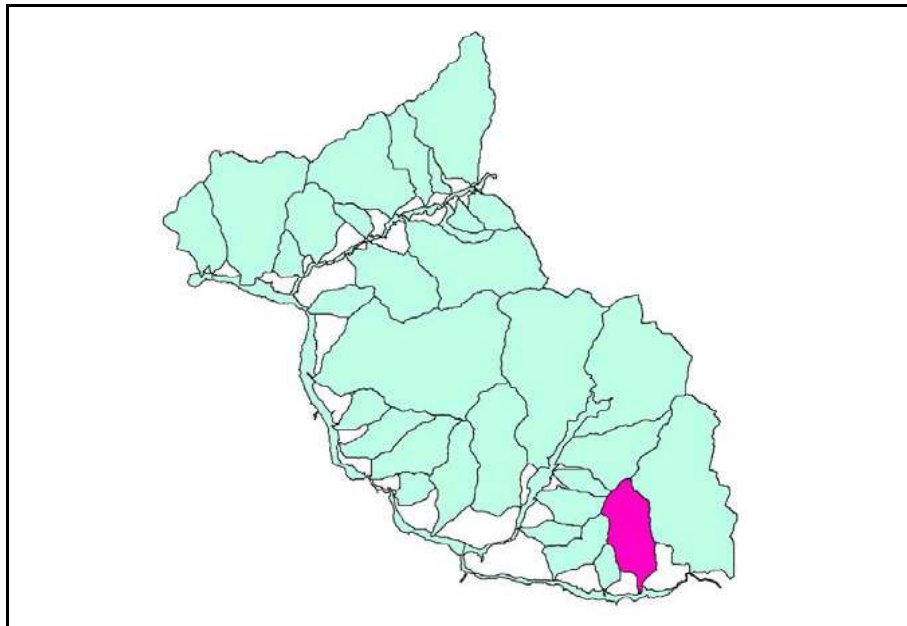


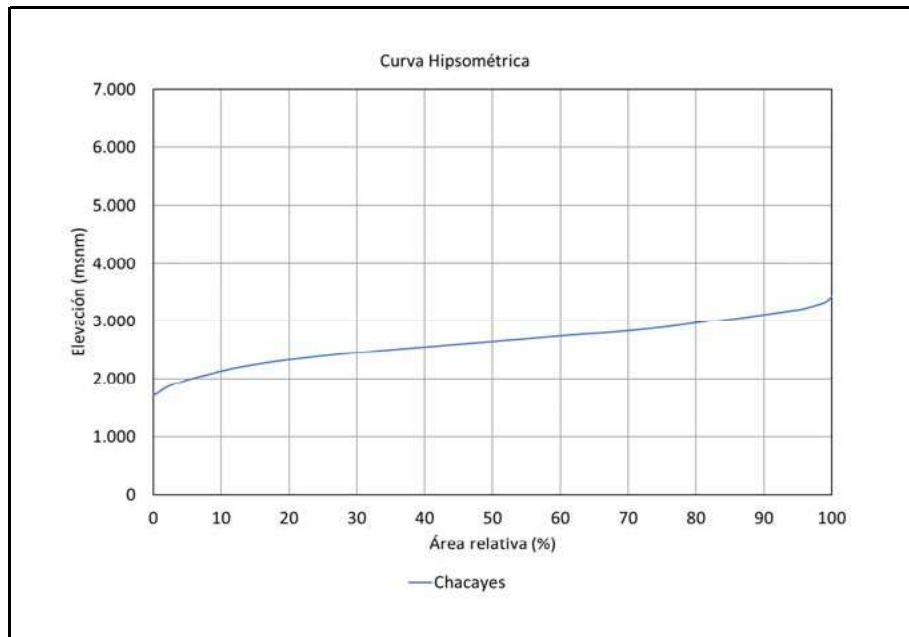
Nombre	-	La engorda
PP _{anual}	mm	635
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	81
Área _{glacial}	%	51
Área _{pluvial}	%	20
Área _{nival}	%	43
Tipo	-	III
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	332
Q _{nival}	L/s	616
R _R	L/s	109
Q _{B Medido}	L/s	2269
Q _{B Subt Medido}	L/s	109
Q _{Glacial}	L/s	2160



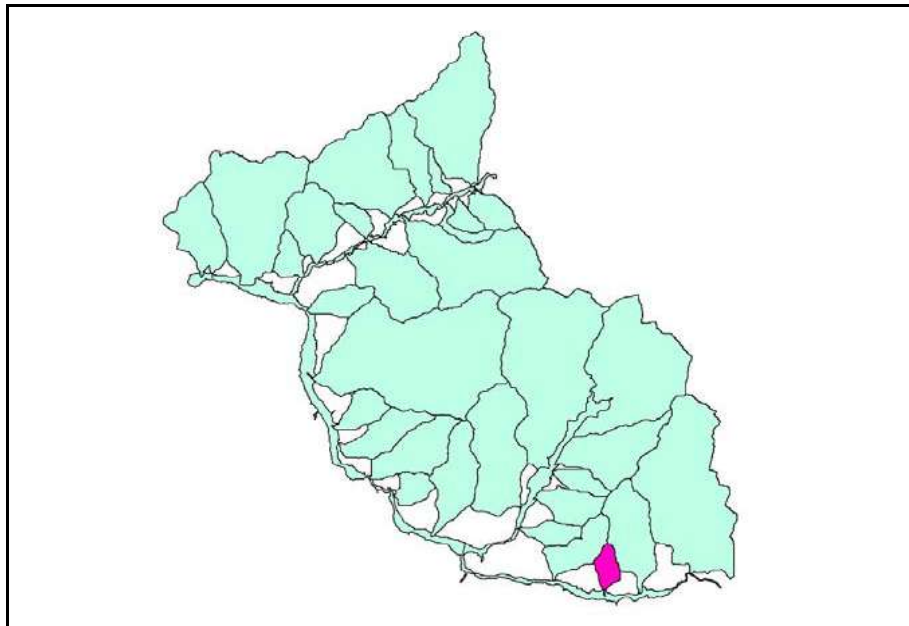


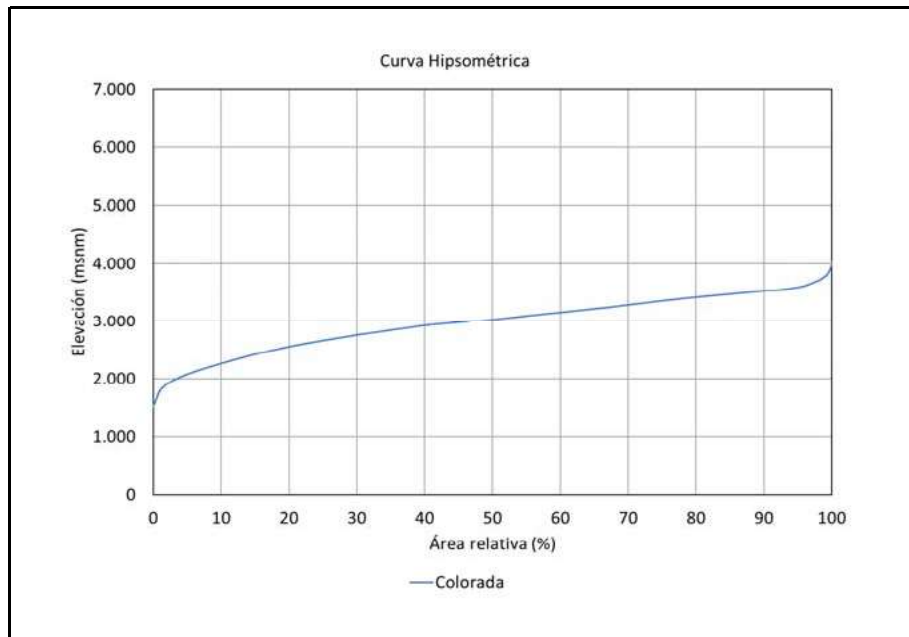
Nombre	-	Morales
PP _{anual}	mm	631
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	27
Área _{glacial}	%	15
Área _{pluvial}	%	69
Área _{nival}	%	50
Tipo	-	III
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	367
Q _{nival}	L/s	236
R _R	L/s	54
Q _{B Medido}	L/s	409
Q _{B Subt Medido}	L/s	54
Q _{Glacial}	L/s	355



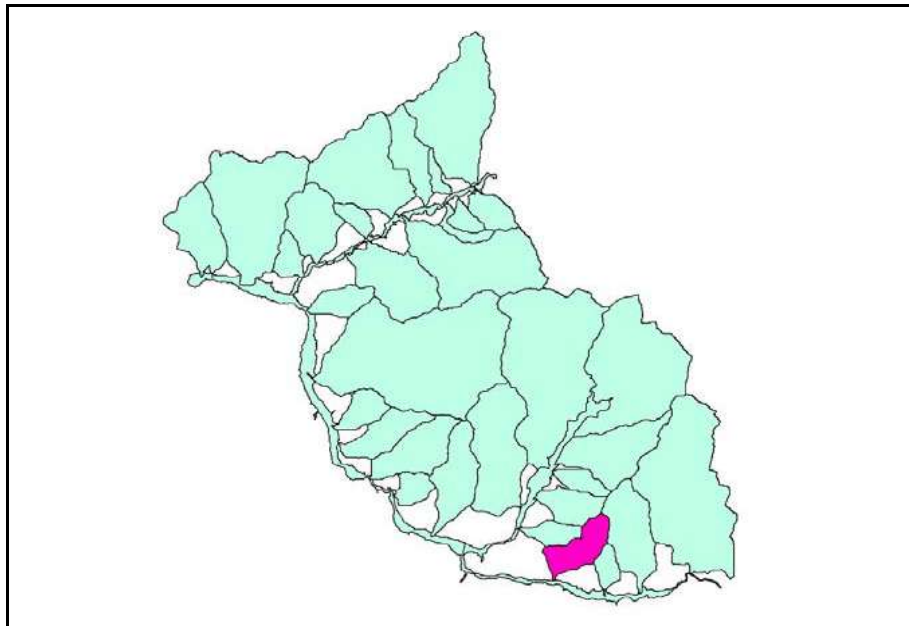


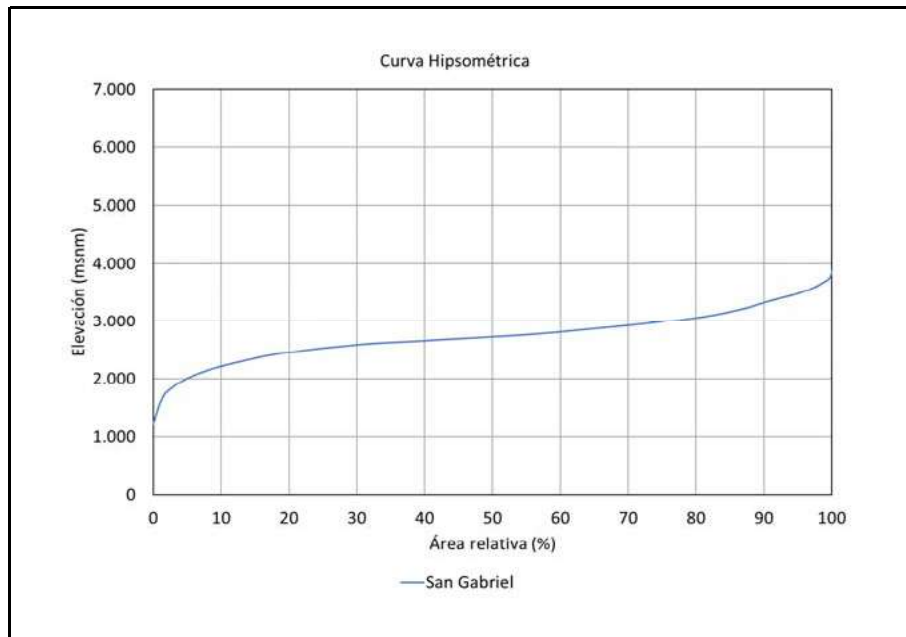
Nombre	-	Chacayes
PP _{anual}	mm	629
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	5
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	96
Área _{nival}	%	44
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	105
Q _{nival}	L/s	43
R _R	L/s	4
Q _{B Medido}	L/s	0
Q _{B Subt Medido}	L/s	0
Q _{Glacial}	L/s	0



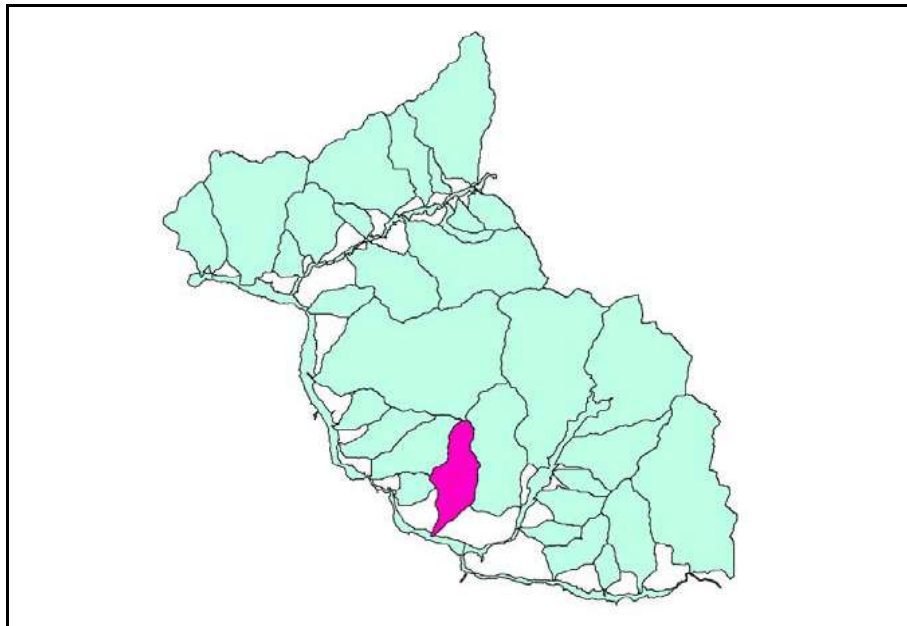


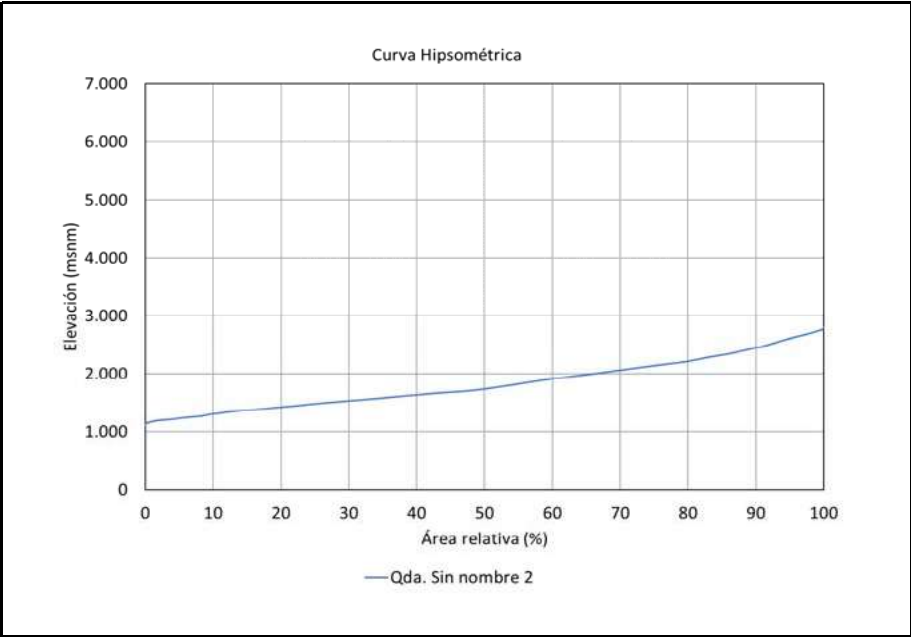
Nombre	-	Colorada
PP _{anual}	mm	633
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	14
Área _{glacial}	%	7
Área _{pluvial}	%	65
Área _{nival}	%	73
Tipo	-	III
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	185
Q _{nival}	L/s	185
R _R	L/s	37
Q _{B Medido}	L/s	101
Q _{B Subt Medido}	L/s	37
Q _{Glacial}	L/s	64



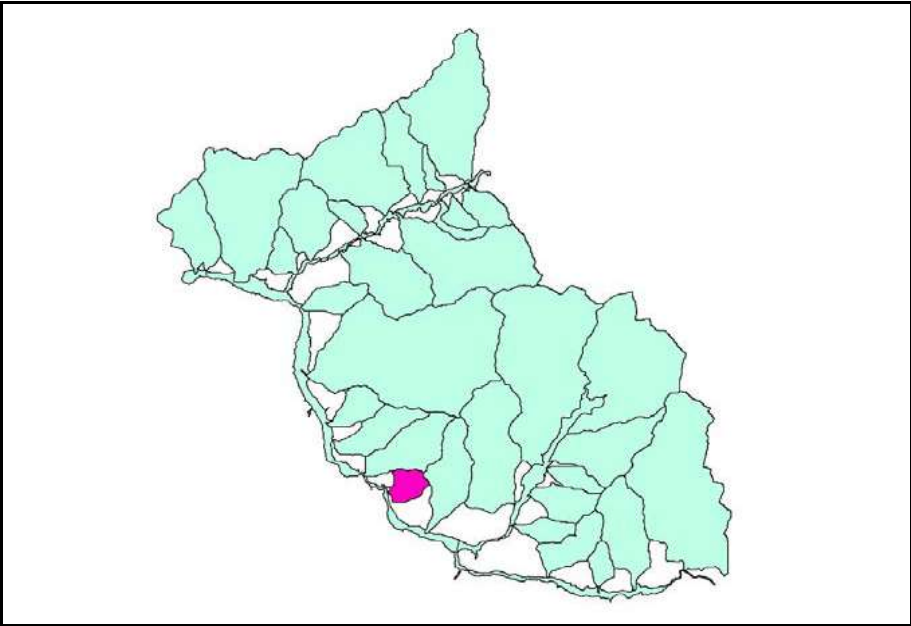


Nombre	-	San Gabriel
PP _{anual}	mm	630
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	22
Área _{glacial}	%	1
Área _{pluvial}	%	87
Área _{nival}	%	54
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	382
Q _{nival}	L/s	211
R _R	L/s	18
Q _{B Medido}	L/s	1
Q _{B Subt Medido}	L/s	1
Q _{Glacial}	L/s	0

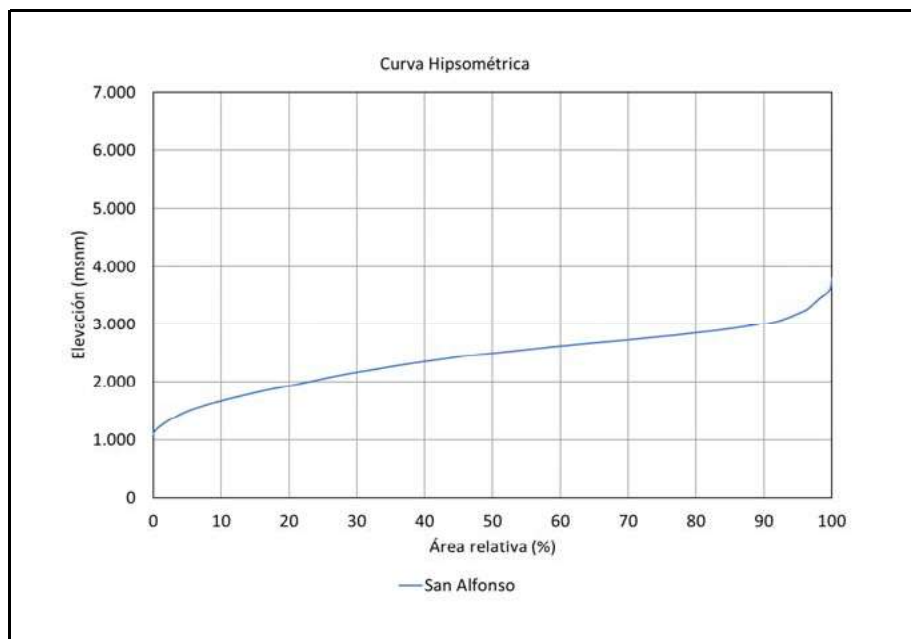




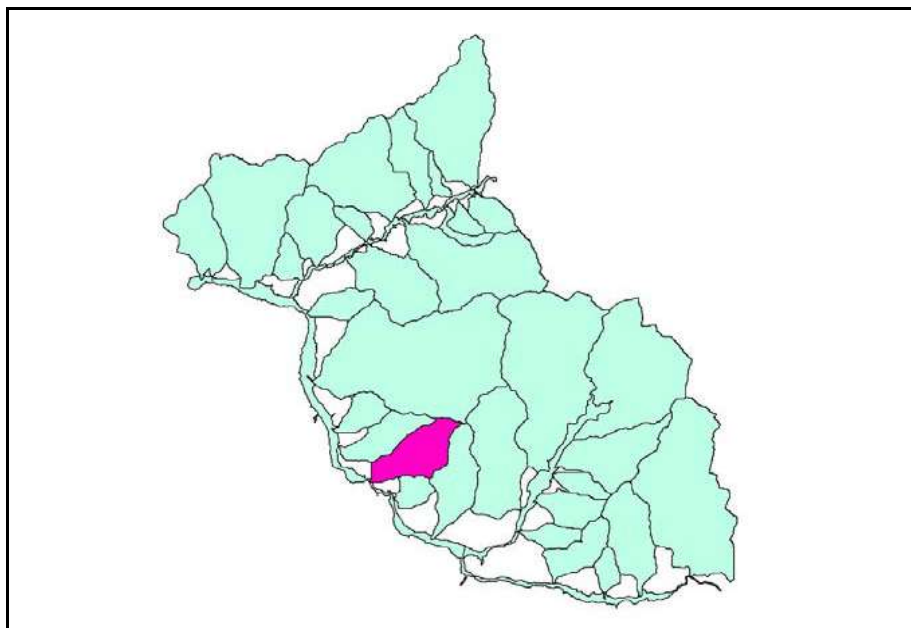
Nombre	-	Qda. Sin nombre 2 (*)
PP _{anual}	mm	
PP _{nival}	mm	
Área	km ²	7
Área _{glacial}	%	
Área _{pluvial}	%	
Área _{nival}	%	
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	100
Q _{nival}	L/s	0
R _R	L/s	2
Q _{B Medido}	L/s	s.i.
Q _{B Subt Medido}	L/s	2
Q _{Glacial}	L/s	

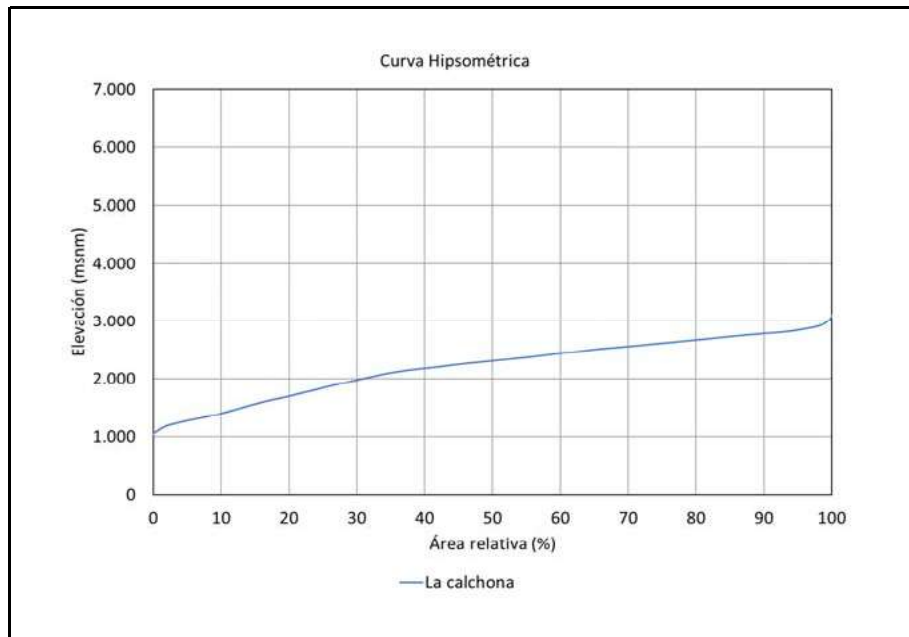


(*): Cálculo por transposición
s.i.: Sin información

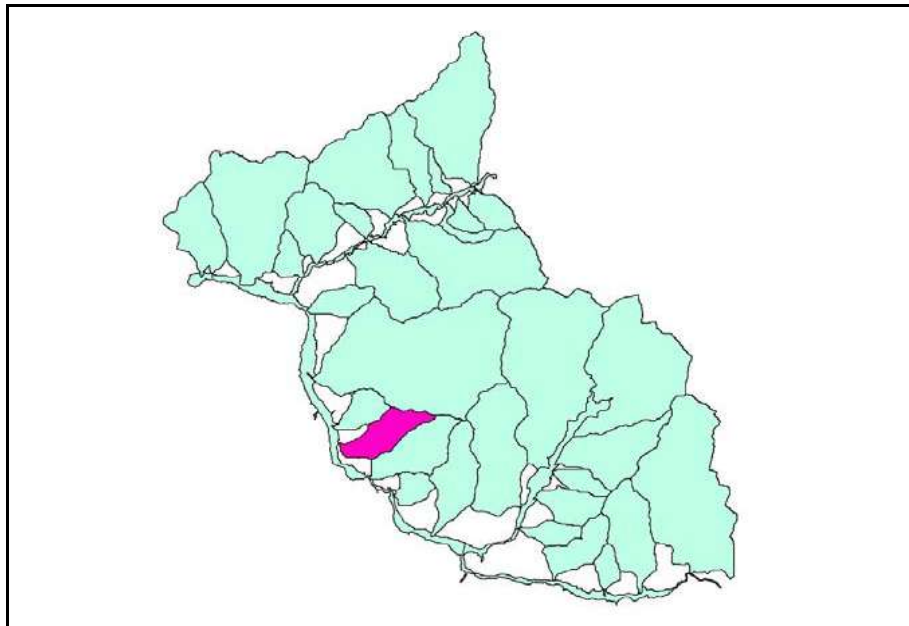


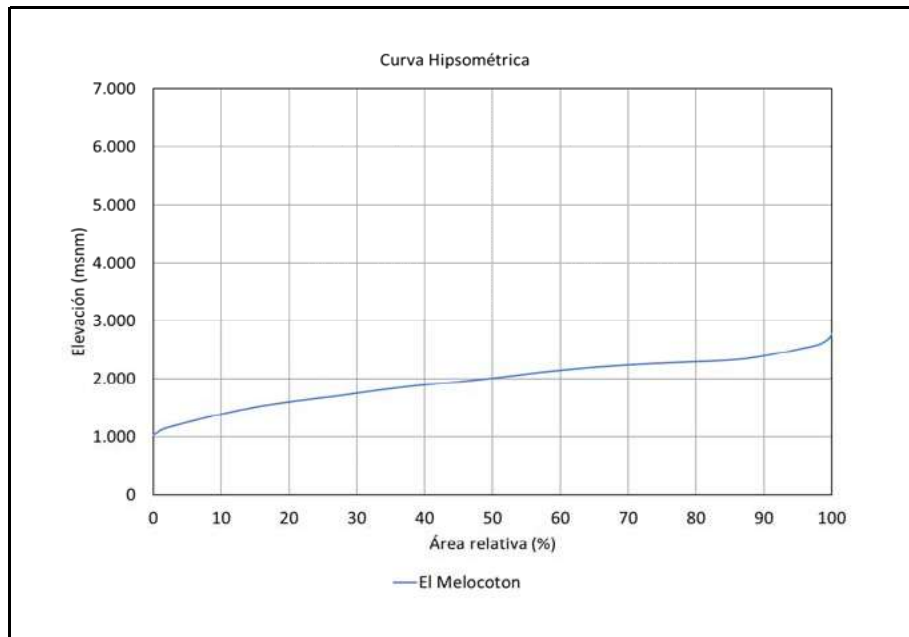
Nombre	-	San Alfonso
PP _{anual}	mm	625
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	22
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	96
Área _{nival}	%	32
Tipo	-	II
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	410
Q _{nival}	L/s	125
R _R	L/s	39
Q _{B Medido}	L/s	26
Q _{B Subt Medido}	L/s	26
Q _{Glacial}	L/s	0



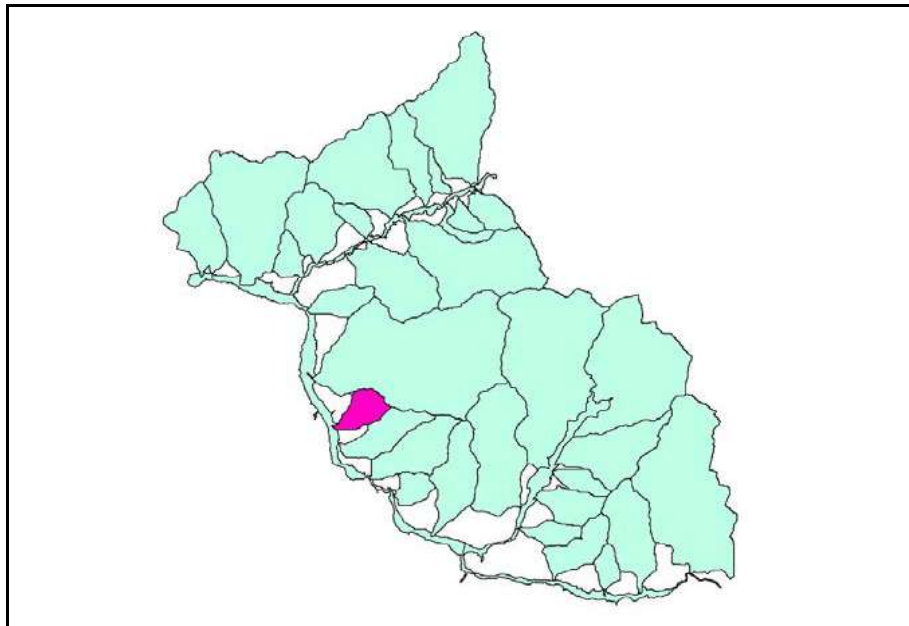


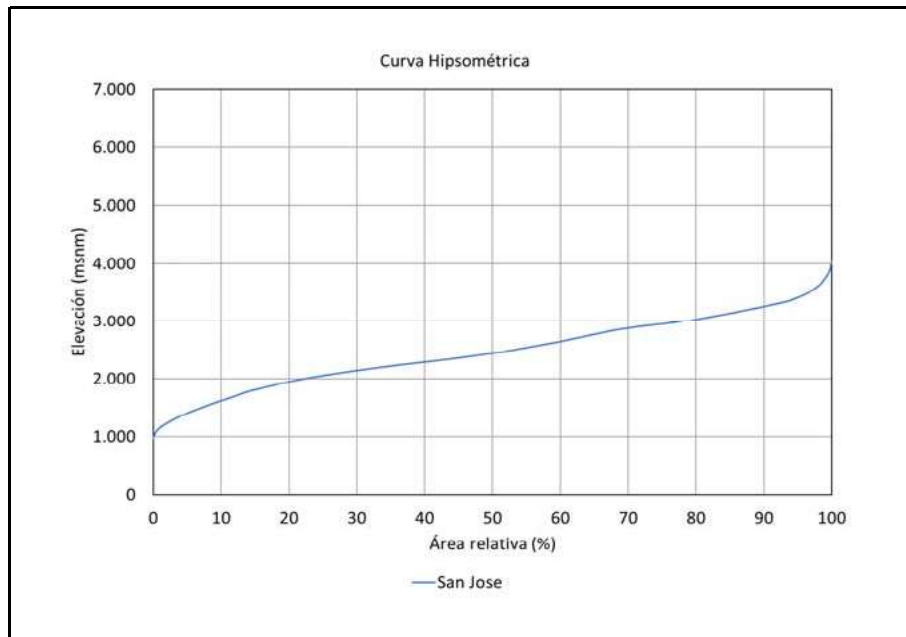
Nombre	-	La calchona
PP _{anual}	mm	620
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	16
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	17
Tipo	-	II
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	309
Q _{nival}	L/s	49
R _R	L/s	23
Q _{B Medido}	L/s	14
Q _{B Subt Medido}	L/s	14
Q _{Glacial}	L/s	0



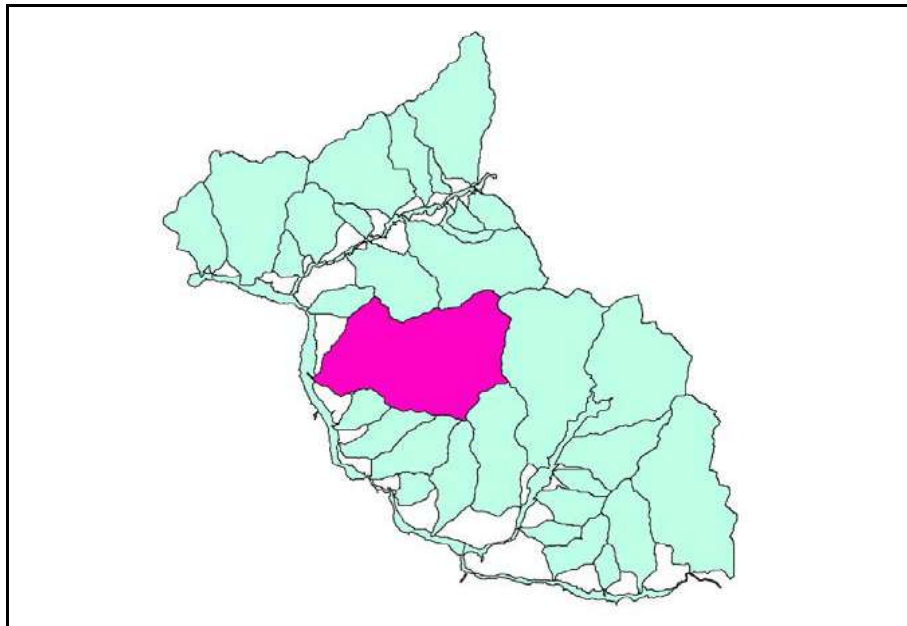


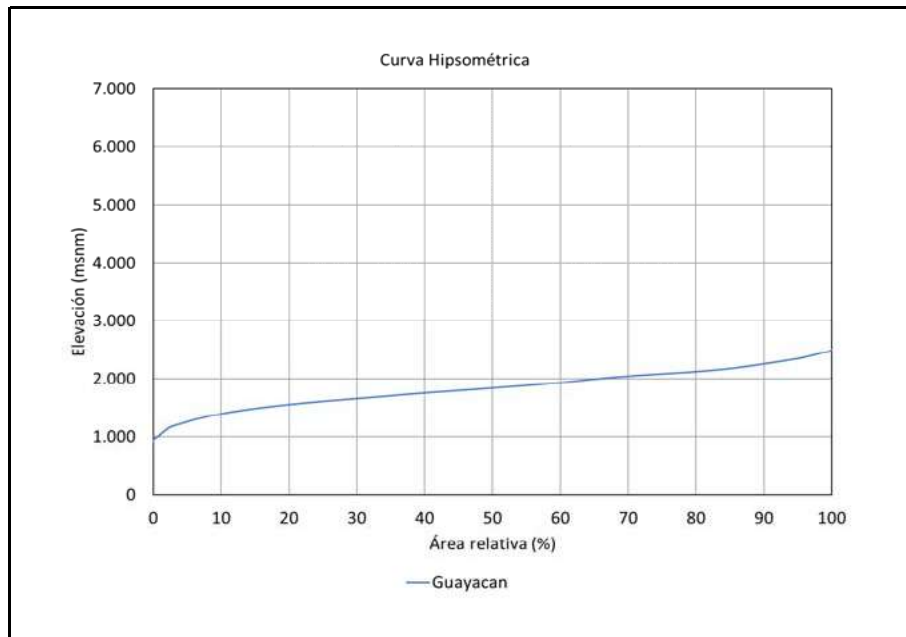
Nombre	-	El Melocoton
PP _{anual}	mm	612
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	9
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	0
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	180
Q _{nival}	L/s	1
R _R	L/s	5
Q _{B Medido}	L/s	2
Q _{B Subt Medido}	L/s	2
Q _{Glacial}	L/s	0



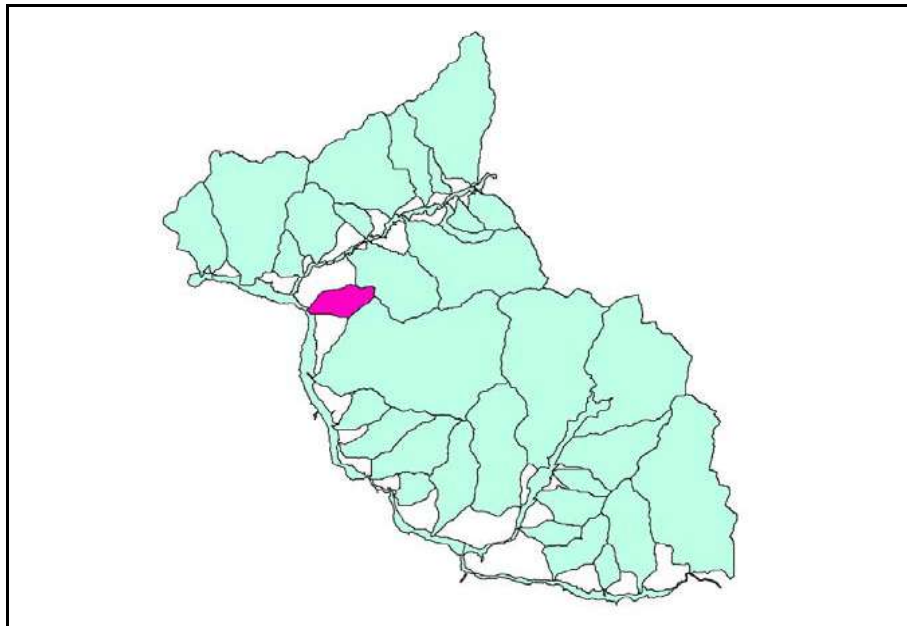


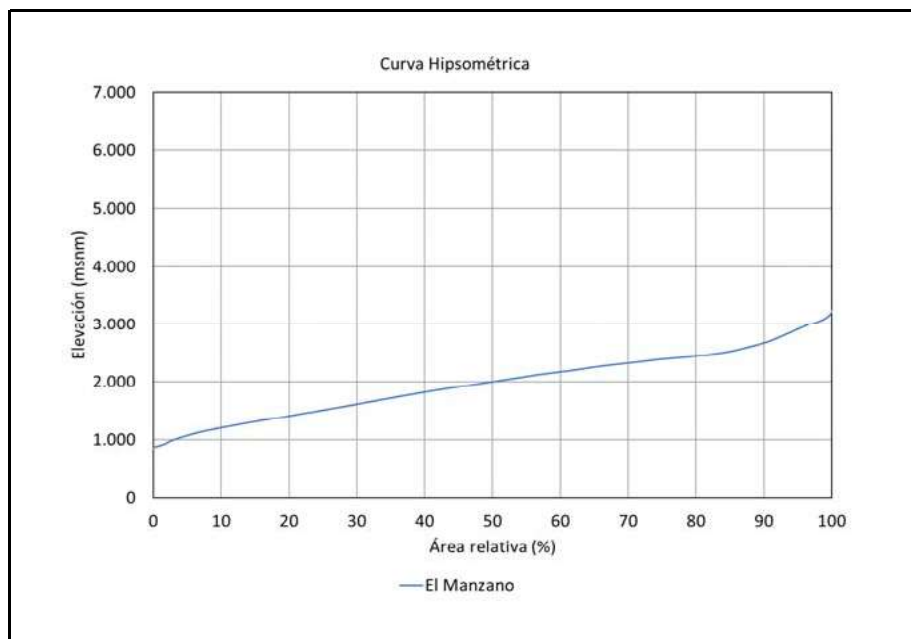
Nombre	-	San Jose
PP _{anual}	mm	621
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	114
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	88
Área _{nival}	%	38
Tipo	-	II
α	%	5
β	%	15
Q _{pluvial}	L/s	1985
Q _{nival}	L/s	765
R _R	L/s	214
Q _{B Medido}	L/s	204
Q _{B Subt Medido}	L/s	204
Q _{Glacial}	L/s	0



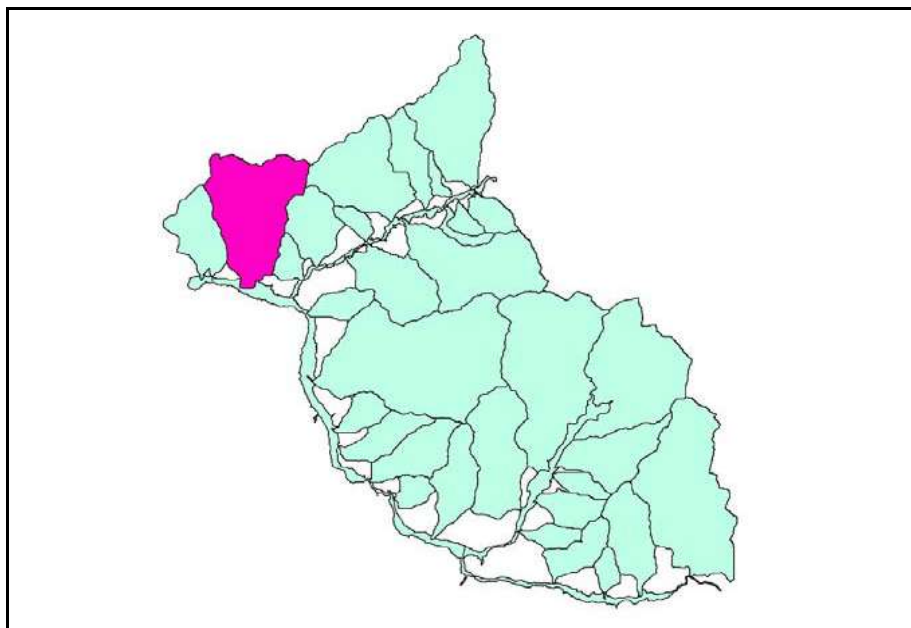


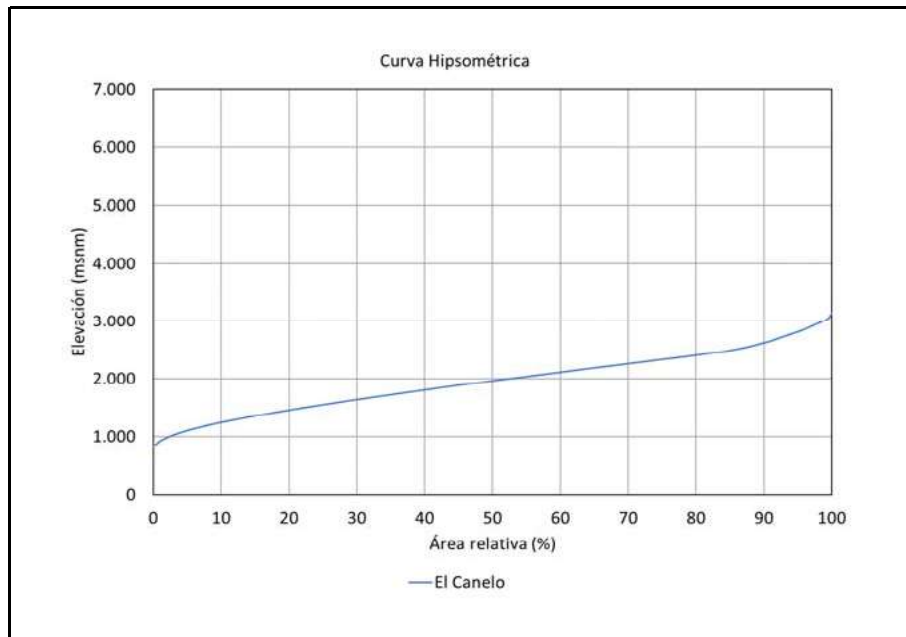
Nombre	-	Guayacan
PP _{anual}	mm	608
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	10
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	0
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	188
Q _{nival}	L/s	0
R _R	L/s	6
Q _{B Medido}	L/s	0
Q _{B Subt Medido}	L/s	0
Q _{Glacial}	L/s	0



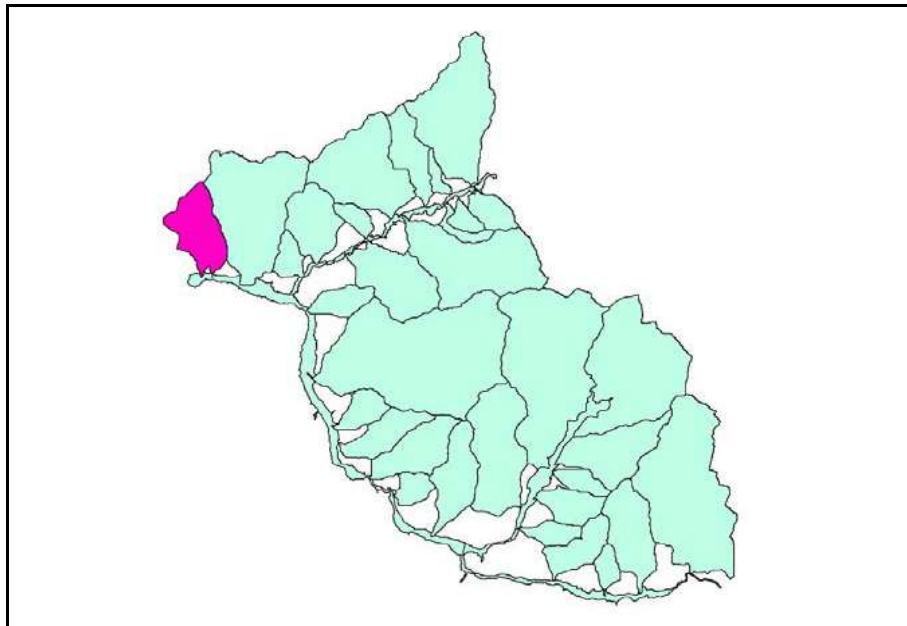


Nombre	-	El Manzano
PP _{anual}	mm	612
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	60
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	9
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	1172
Q _{nival}	L/s	99
R _R	L/s	38
Q _{B Medido}	L/s	26
Q _{B Subt Medido}	L/s	26
Q _{Glacial}	L/s	0





Nombre	-	El Canelo
PP _{anual}	mm	611
PP _{nival}	mm	563
Área	km ²	20
Área _{glacial}	%	0
Área _{pluvial}	%	100
Área _{nival}	%	8
Tipo	-	I
α	%	3
β	%	3
Q _{pluvial}	L/s	390
Q _{nival}	L/s	28
R _R	L/s	13
Q _{B Medido}	L/s	5
Q _{B Subt Medido}	L/s	5
Q _{Glacial}	L/s	0





ANEXO 2 ESTUDIO PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS

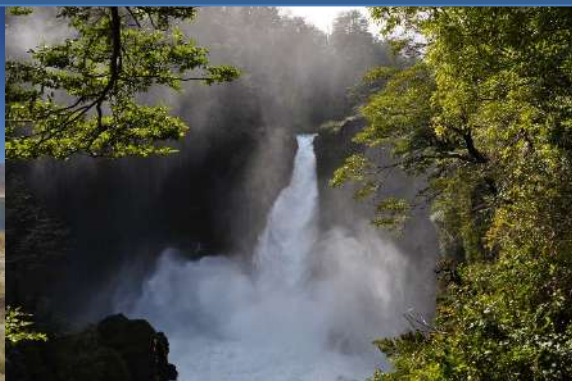
INFORME Rev 0

Preparado para

Alto Maipo SpA

DICIEMBRE de 2018

Preparado por
HIDROMAS LTDA



ANEXO 2 Estudio de Propiedades Hidrogeológicas

Código de Proyecto: [2018 - 228 - MNAM]

HIDROGEOLOGIA y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE LTDA

Suecia 211, Oficina 701-A, Providencia - Santiago Chile

e-mail: contacto@hidromas.cl

website: www.hidromas.cl

Tel: +(56-2) 232027540

REV.	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	DESCRIPCIÓN
Rev.A	Rodrigo Zamorano	Julio Cornejo	Julio Cornejo	Coordinación Interna
	[14.11.18]	[26.11.18]	[26.11.18]	
Rev.B	Rodrigo Zamorano	Julio Cornejo	Mesenia Atenas	Revisión y Aprobación Cliente
	[03.12.18]	[03.12.18]	[03.12.18]	
Rev.0	Rodrigo Zamorano	Mesenia Atenas	Mesenia Atenas	Aprobado Cliente
	[28.12.18]	[28.12.18]	[28.12.18]	

TABLA DE CONTENIDOS

1	GENERALIDADES.....	1
2	ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA.....	5
2.1	Ensayos Hidráulicos realizados en el Área de Estudio.....	5
2.2	Estudios Geofísicos realizados en el Área de Estudio.....	10
2.3	Información de Niveles en el Área de Estudio	10
2.4	Información de caudal aflorado desde túneles	13
2.5	Metodología de Análisis	13
3	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA POR TIPO LITOLÓGICO	14
3.1	Aspectos Generales	14
3.2	Resultados Prueba Lugeon.....	15
3.3	Resultados Prueba de Bombeo	16
3.4	Resultados Slug Test	16
3.5	Conductividad Hidráulica según Unidades geológicas	17
4	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN PROFUNDIDAD	20
5	RESUMEN DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	25
6	GEOFÍSICA	28
7	DEFINICIÓN UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UH)	31
8	NIVELES PIEZOMÉTRICOS	35
8.1	Aspectos Generales	35
8.2	Nivel registrado en expedientes de derechos de agua subterráneos DGA.....	35
8.3	Niveles medidos en pozos pertenecientes a PHAM	36
8.4	Curvas equipotenciales y direcciones de flujo	45
9	CAUDAL AFLORADO DESDE TÚNELES.....	48
10	COMENTARIOS.....	54
	APÉNDICE C	55

FIGURAS

Figura 1-1:	Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, y Cuencas Definidas.....	3
Figura 1-2:	Dominio Definido en Área de Estudio y Portales de Túneles Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo	4
Figura 2-1:	Ubicación de Sondajes con Información Disponible.....	9
Figura 2-2:	Ubicación de puntos con información piezométrica disponible	12
Figura 3-1:	Esquema de Gráfico “Boxplot” o de Caja con Estadísticos Principales	14
Figura 3-2:	Valores de Conductividad Hidráulica según Miembros Geológicos Mayores	18
Figura 3-3:	Mapa Geológico con Unidades Mayores	19

Figura 4-1: Valores de Conductividad Hidráulica del Relleno Sedimentario en profundidad	21
Figura 4-2: Valores de Conductividad Hidráulica de las Andesitas en profundidad	22
Figura 4-3: Valores de Conductividad Hidráulica de las Rocas Volcanoclásticas en profundidad	23
Figura 4-4: Valores de Conductividad Hidráulica de las Rocas Intrusivas en profundidad	24
Figura 5-1: Valores de Conductividad Hidráulica de Rocas Andesíticas y Volcanoclásticas	26
Figura 5-2: Valores de Conductividad Hidráulica de Rocas y Relleno Sedimentario	27
Figura 6-1: Ubicación de áreas de estudios geofísicos realizados por DPI.....	29
Figura 6-2: Perfil de Resistividad EM-4.....	30
Figura 7-1: Conductividad Hidráulica según profundidad para Roca y Relleno Sedimentario	32
Figura 7-2: Unidades Hidrogeológicas definidas dentro del Dominio para profundidades menores a 200 m	33
Figura 7-3: Unidades Hidrogeológicas definidas dentro del Dominio para profundidades mayores a 200 m	34
Figura 8-1: Ubicación de Pozos con Registros de Profundidad del Nivel Freático	38
Figura 8-2: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-4	39
Figura 8-3: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-14	40
Figura 8-4: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-10	41
Figura 8-5 Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-12	42
Figura 8-6: Profundidad del nivel en pozo SAM-12 y caudal mensual medio en estación fluviométrica Maipo en El Manzano.....	43
Figura 8-7: Curvas Equipotenciales definidas en el dominio	47
Figura 9-1: Caudal de descarga medido en la salida del portal L1	49
Figura 9-2: Caudal de descarga medido en la salida del portal V1	49
Figura 9-3: Caudal de descarga medido en la salida del portal V5	50
Figura 9-4: Caudal de descarga medido en la salida del portal VA1	50
Figura 9-5: Caudal de descarga medido en la salida del portal VA2	51
Figura 9-6: Caudal de descarga medido en la salida del portal VA4	51
Figura 9-7: Caudal de descarga medido en la salida del portal VL4	52
Figura 9-8: Caudal de descarga medido en la salida del portal VL5	52

Figura 9-9: Caudal de descarga medido en la salida del portal VL7	53
---	----

TABLAS

Tabla 2-1: Información de Sondajes Disponible	7
Tabla 2-2: Puntos con Información Piezométrica Disponible.....	11
Tabla 3-1: Fuente de los Sondajes	15
Tabla 3-2: Tipo de Prueba de los Sondajes	15
Tabla 3-3: Principales Resultados a partir de Pruebas Lugeon.....	15
Tabla 3-4: Principales Resultados a partir de Pruebas de Bombeo de Gasto Constante	16
Tabla 3-5: Principales Resultados a partir de Pruebas Slug.....	16
Tabla 5-1: Resumen de Valores de Conductividad Hidráulica.....	25
Tabla 7-1: Resumen de Valores de Conductividad Hidráulica para las Unidades Hidrogeológicas	35
Tabla 8-1: Información de los pozos con derechos concedidos dentro del dominio	36
Tabla 8-2: Información de los pozos de monitoreo PHAM dentro del dominio.....	44
Tabla 8-3: Información de los pozos monitoreados en la campaña de Julio de 2018	44
Tabla 8-4: Fuente de Registros de Profundidad del Nivel Estático para Generación de Curvas	46
Tabla 9-1: Caudales medios del año 2018 medidos en la salida de los portales	48

1 GENERALIDADES

El “Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo” (PHAM), se emplaza en la parte alta de la cuenca del río Maipo, en la comuna de San José de Maipo, provincia Cordillera de la región Metropolitana. La extensión del trazado de los túneles y obras del proyecto, se encuentra mayoritariamente dentro de las subcuencas del río Maipo Alto y en una parte de la subcuenca del río Maipo Medio. Dentro del área del proyecto se destaca la presencia de glaciares, lagunas y embalses, entre otros cuerpos de agua. En la Figura 1-1 se ilustra la zona en donde se emplaza el proyecto con las unidades hidrológicas mencionadas, las cuales son:

- Sub cuenca Río Maipo Medio
 - Sub-subcuenca Río Maipo entre Estero Colorado y Río Clarillo
- Sub-cuenca Río Maipo Alto
 - Sub-subcuenca Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo
 - Sub-subcuenca Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado
 - Sub-subcuenca Río Volcán
 - Sub-subcuenca Río Yeso

La delimitación del dominio del sistema hidrogeológico del presente estudio, considera una extensión tal que todo el trazado del túnel del proyecto PHAM quede contenido, tomando en cuenta una distancia adecuada que permita analizar los efectos del proyecto sobre el sistema hidrogeológico. Esta delimitación se basa en el concepto de que, en los sectores alejados a la intervención del proyecto, las divisorias de aguas superficiales son representativas de las divisorias hidrogeológicas del sistema rocoso, considerando que la recarga se produce en las partes altas de las cuencas y las descargas ocurren en los bajos topográficos. El concepto citado anteriormente, permite acotar los sistemas hidrogeológicos representativos en los cuales se encuentran emplazadas las obras principales del proyecto.

De esta forma, el límite inferior del dominio queda determinado por el relleno sedimentario del río Maipo entre el sector El Manzano (inicio del túnel L1, central Las Lajas) de la subcuenca del río Maipo medio y la confluencia con el río Yeso (Subcuenca río Maipo Alto), continuando por el río Volcán hasta la confluencia con el Estero La Engorda (sector túnel Volcán, portal V1).

En el extremo superior, el dominio queda definido por los límites de las sub-subcuencas de Río Maipo entre Estero Colorado y Río Clarillo y la sub-subcuenca Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo. Del mismo modo, siguiendo el concepto de divisorias de aguas, se delimitó por el este, un sector de la sub-subcuenca del río Yeso y del río Volcán.

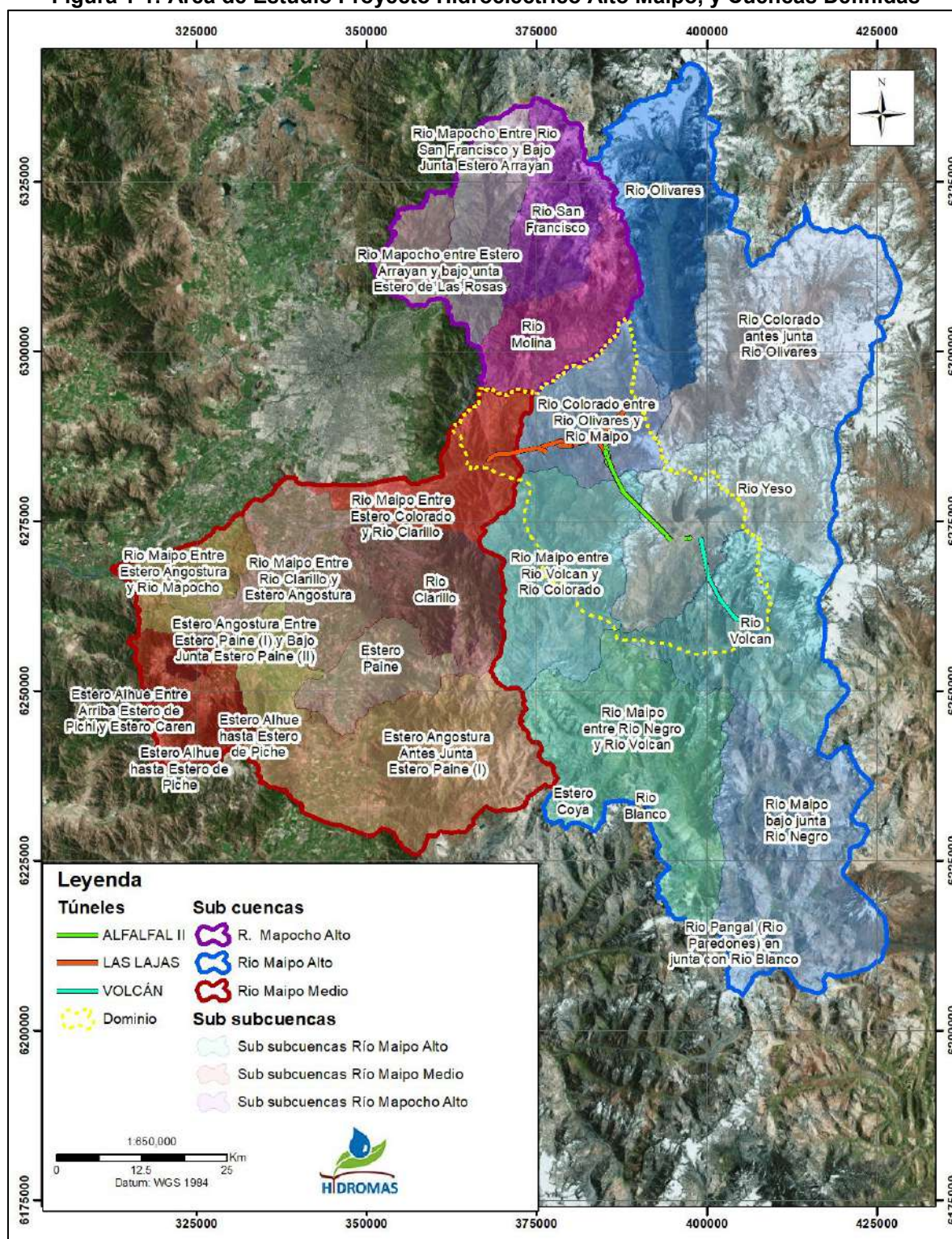
El dominio de la zona de estudio, definido para caracterizar el comportamiento hidrogeológico del sistema en que se emplaza el proyecto, posee un área total de aproximadamente 1.140 km², con una altura topográfica que varía entre los 780 y 5.350 msnm.

El PHAM considera un total de aproximadamente 55 km de túneles hidráulicos que conducirán el agua para la generación eléctrica. Éstos se dividen en tres tramos correspondientes a las dos centrales del proyecto, estos son: Túnel Las Lajas, Alfalfal y Volcán.

A medida que se avanza en la construcción de los túneles, se registran afloramientos de agua al interior de éstos. Las aguas afloradas son conducidas por tuberías hacia el exterior de cada portal, en donde son tratadas y devueltas al río.

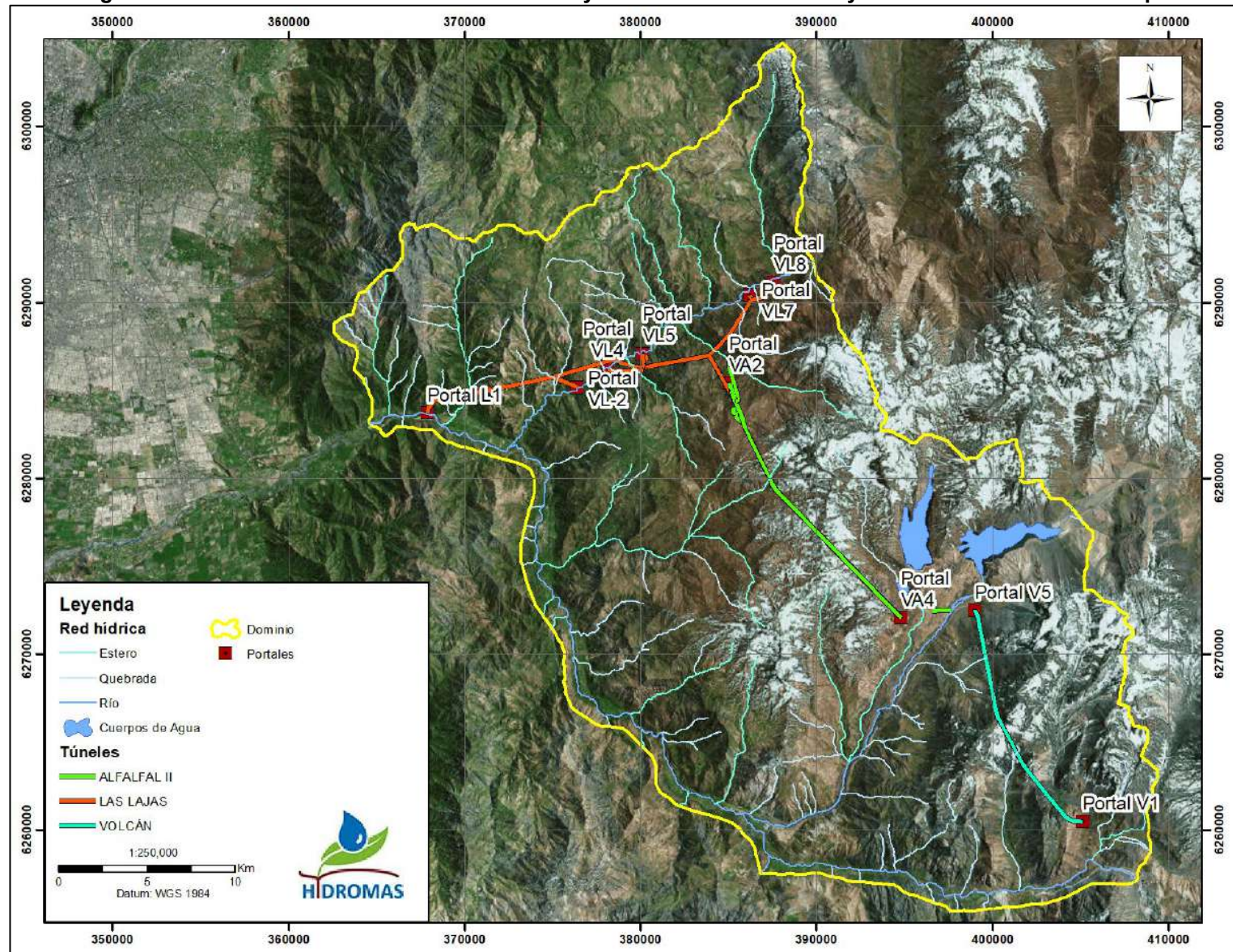
En la Figura 1-2 se presenta la disposición espacial del dominio y la ubicación de los portales en los cuales se registra el caudal de drenaje captados desde el interior de los túneles.

Figura 1-1: Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, y Cuencas Definidas



Fuente: Elaboración propia

Figura 1-2: Dominio Definido en Área de Estudio y Portales de Túneles Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo



Fuente: Elaboración propia

2 ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

Para caracterizar las propiedades hidrogeológicas del sistema en estudio, se cuenta con diversas fuentes de información. Un grupo de información comprende la ejecución de ensayos hidráulicos en el Área de Estudio, considerando aquellos de pozos o sondajes propios de PHAM o ensayos presentados en los expedientes DGA de los derechos de agua concedidos. Del mismo modo, se cuenta con estudios geofísicos realizados en distintos sectores del Dominio de estudio. La recopilación de antecedentes, bajo los cuales se enmarca el posterior análisis se presenta en el presente capítulo.

Por otro lado, también se cuenta con una serie de registros de niveles piezométricos en el área de estudio como, también, registros de flujos de salida desde los túneles a partir de aguas afloradas.

2.1 Ensayos Hidráulicos realizados en el Área de Estudio

Los antecedentes recopilados y relativos a la realización de ensayos hidráulicos en el Área de Estudio corresponden a:

- **Pruebas de bombeo de pozos con derechos de aguas subterráneas concedidos (DGA, 2018)**

Catastro DGA de pozos con derechos constituidos, donde se cuenta con información de 7 expedientes con detalles de las pruebas de bombeo. Los pozos se ubican en el relleno sedimentario del acuífero del río Maipo. Se reanalizaron solo aquellas pruebas de gasto constante, consideradas como más confiables que aquellas de gasto variable.

- **Información PHAM (PHAM, 2018): “Ensayos Hidráulicos en el Área de Estudio”**

El PHAM cuenta con 4 distintas fuentes de sondajes, en los cuales se desarrollaron distintos ensayos que permiten cuantificar los valores de permeabilidad:

- Pozos del proyecto para fines ambientales: Estos pozos cuentan con ensayos tipo *Slug Test* para determinar sus parámetros hidrogeológicos, además cuentan con una descripción litológica realizada durante el proceso de construcción del pozo.
- Sondajes exploratorios: Estos sondajes corresponden a perforaciones realizadas en los frentes de avance de la construcción del túnel. Cuentan con ensayos de Lugeon realizados a distintas profundidades, como también la respectiva descripción litológica.
- Sondajes de ingeniería básica: Durante la etapa de ingeniería básica, se realizaron sondajes exploratorios profundos, realizando ensayos de Lugeon y de hidrofracturamiento a distintas profundidades, además de la descripción litológica.
- Sondajes de Proyecto: Posterior a la etapa de ingeniería básica, se realizaron sondajes exploratorios profundos adicionales, realizando ensayos de Lugeon y de hidrofracturamiento para distintos rangos de profundidad, además cuentan con descripción de la litología.

A partir de la información disponible de ensayos hidráulicos en el Área de Estudio, se construyó una base de datos de los sondajes que integra, tanto mediciones de conductividad hidráulica como información de la litología, según su profundidad correspondiente. En la Tabla 2-1 se presentan todos los sondajes que tienen

información de conductividad hidráulica, según tipo de sondaje, tipo de prueba y litología. Del mismo modo, en la Figura 2-1 se presenta la distribución espacial de estos.

En el tipo de ensayo, están los Sondajes del Proyecto (Proyecto), sondajes exploratorios al túnel (Exploratorio), Pruebas de bombeo de derechos de aguas subterráneas concedidos de la DGA (Pozos DGA), Sondajes realizados con fines ambientales (Ambiental) y los sondajes realizados para la Ingeniería Básica (Ing. Básica). En los tipos de prueba, están las Pruebas de Lugeon (P. Lugeon), Pruebas de hidrofracturamiento (P. hidrofracturamiento o P. hidrofract), Pruebas de Gasto Constante y los Slug Tests. En cuanto a la litología, en la Tabla 2-1 se resume en dos unidades mayores como Roca y Relleno Sedimentario (Relleno sed., además de los sin información de la litología S/I).

Tabla 2-1: Información de Sondajes Disponible

Tipo de Prueba	Nombre	Coordenadas UTM (*)		Tipo de Sondaje	Litología
		Este	Norte		
		(m)	(m)		
Gasto constante	ND-1302-153	381.403	6.263.834	Pozos DGA	Relleno sed.
	ND-1302-156	373.098	6.281.706	Pozos DGA	Relleno sed.
	ND-1302-175	369.409	6.283.210	Pozos DGA	Relleno sed.
	ND-1302-176	370.567	6.283.177	Pozos DGA	Relleno sed.
	ND-1302-183	365.121	6.283.729	Pozos DGA	Relleno sed.
	ND-1302-22	369.685	6.282.961	Pozos DGA	Relleno sed.
	ND-1302-80	374.228	6.276.426	Pozos DGA	Relleno sed.
P. hidrofracturamiento	AFII-C-HF-001	385.708	6.284.831	Exploratorio	Roca
	AFII-C-HF-002	385.710	6.284.831	Exploratorio	Roca
	AFII-C-HF-003	385.709	6.284.832	Exploratorio	Roca
	CM1-L9-HF-001	380.314	6.286.740	Exploratorio	Roca
	CM1-L9-HF-002	380.317	6.286.742	Exploratorio	Roca
	CM1-L9-HF-003	380.318	6.286.739	Exploratorio	Roca
	L9A-TPS(B)-CM1A-HF-001	380.400	6.286.701	Exploratorio	S/I
	L9A-TPS(B)-CM1A-HF-002	380.399	6.286.699	Exploratorio	S/I
	L9A-TPS(B)-CM1A-HF-003	380.399	6.286.703	Exploratorio	S/I
	LLC-CH-BH-002	380.267	6.286.632	Exploratorio	Roca
	VA2-A-HF-001	385.634	6.284.598	Exploratorio	S/I
	VA2-A-HF-002	385.637	6.284.599	Exploratorio	S/I
	VA2-A-HF-003	385.639	6.284.599	Exploratorio	S/I
	VA2-BP-HF-001	385.620	6.284.197	Exploratorio	Roca
	VA2-BP-HF-002	385.624	6.284.196	Exploratorio	Roca
	VA2-BP-HF-003	385.623	6.284.200	Exploratorio	Roca
	VA2-HF-001	385.363	6.285.391	Exploratorio	S/I
	VL5'-L9-HF-001	380.450	6.286.757	Exploratorio	Roca
	VL5'-L9-HF-002	380.454	6.286.760	Exploratorio	Roca
	VL5'-L9-HF-003	380.453	6.286.755	Exploratorio	Roca
	VL5A-L9A-HF-001	380.477	6.286.756	Exploratorio	Roca
	VL5A-L9A-HF-002	380.477	6.286.755	Exploratorio	S/I
	VL5A-L9A-HF-003	380.474	6.286.756	Exploratorio	Roca
	TPS-BH-002	380.277	6.286.739	Proyecto	Roca
P. Lugeon	Borehole 1 Ch 0+002.6*	380.268	6.286.378	Exploratorio	Roca
	Borehole 7 Ch 0+038.6*	380.268	6.286.378	Exploratorio	Roca
	Borehole 9 Ch 0+050.6*	380.268	6.286.378	Exploratorio	Roca
	LLC-CH-BH-001	380.256	6.286.607	Exploratorio	Roca
	LLC-CH-BH-003	380.271	6.286.661	Exploratorio	Roca
	LLC-CH-BH-004	380.266	6.286.625	Exploratorio	Roca
	LLC-CH-BH-005	380.272	6.286.668	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 0+047	387.596	6.291.085	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 0+100	387.596	6.291.032	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+150	387.589	6.290.983	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+197	387.576	6.290.937	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+250	387.556	6.290.888	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 0+300	387.531	6.290.845	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 0+350	387.501	6.290.805	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+394	387.471	6.290.773	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+441	387.437	6.290.741	Exploratorio	S/I

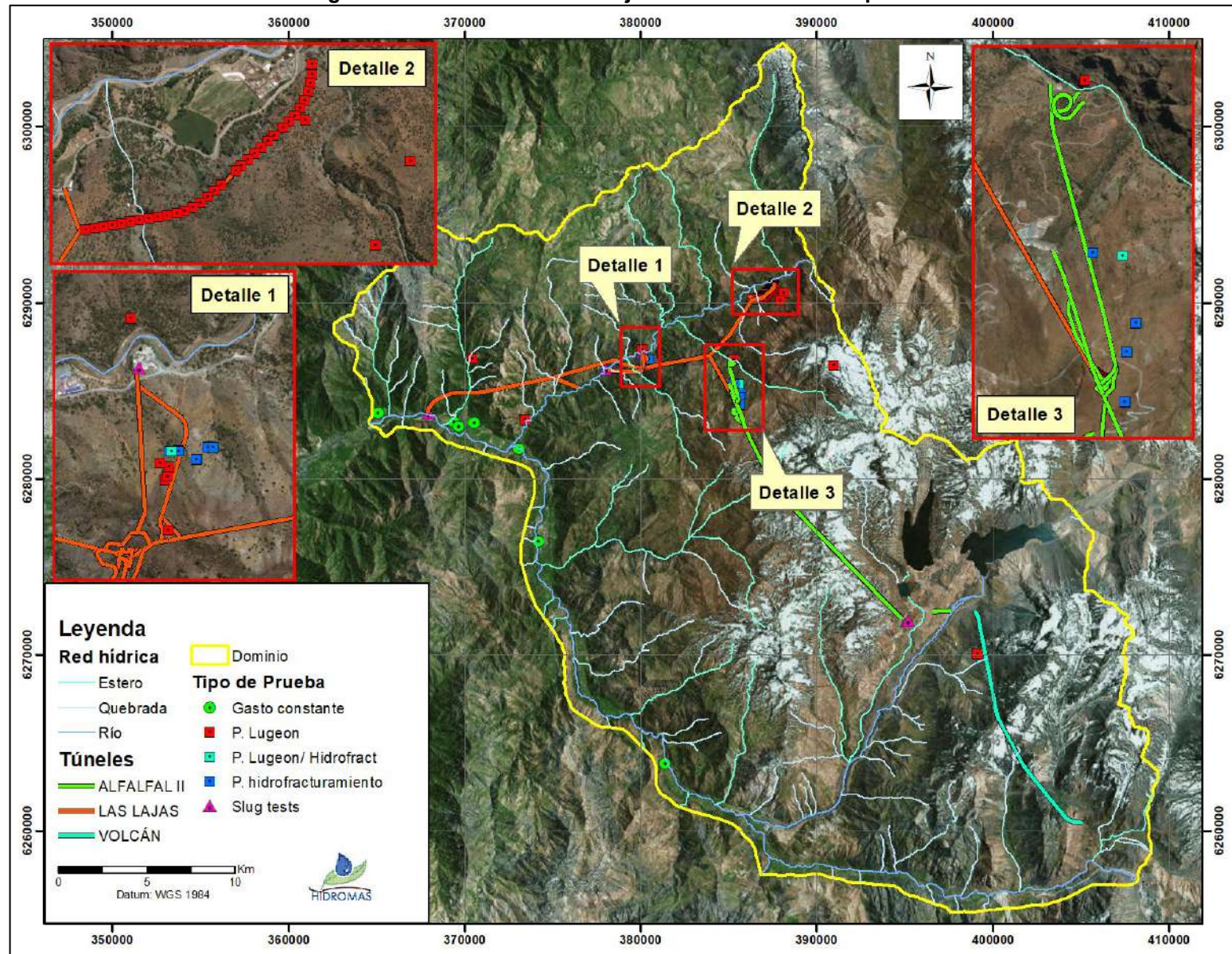
Tabla 2-1: Información de Sondajes Disponible (Continuación)

Tipo de Prueba	Nombre	Coordenadas UTM (*)		Tipo de Sondaje	Litología
		Este	Norte		
		(m)	(m)		
P. Lugeon	VL8-L12 Ch 0+507	387.388	6.290.697	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+550	387.357	6.290.667	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+600	387.320	6.290.633	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 0+650	387.283	6.290.600	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 0+700	387.246	6.290.566	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 0+750	387.210	6.290.532	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 0+790	387.180	6.290.504	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+900	387.100	6.290.430	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 0+950	387.063	6.290.396	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 1+000	387.026	6.290.362	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+050	386.987	6.290.331	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 1+100	386.944	6.290.306	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 1+150	386.898	6.290.286	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 1+190	386.860	6.290.274	Exploratorio	S/I
	VL8-L12 Ch 1+250	386.801	6.290.262	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+300	386.752	6.290.253	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+350	386.703	6.290.245	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+400	386.653	6.290.236	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+450	386.604	6.290.227	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+500	386.555	6.290.218	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+550	386.506	6.290.210	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+600	386.457	6.290.201	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+650	386.407	6.290.192	Exploratorio	Roca
	VL8-L12 Ch 1+700	386.358	6.290.184	Exploratorio	Roca
	SAM-1	385.300	6.286.760	Ing. Básica	Roca
	SAM-2	380.100	6.287.340	Ing. Básica	Roca
	SAM-3	373.460	6.283.340	Ing. Básica	Roca
	SCA-01	388.131	6.290.558	Ing. Básica	Roca
	SCA-01A	388.131	6.290.558	Ing. Básica	Roca
	SCA-02	387.940	6.290.100	Ing. Básica	Roca
	SCA-03	387.560	6.290.780	Ing. Básica	Roca
	SLL-01	370.454	6.286.806	Ing. Básica	Roca
	STA-01	390.989	6.286.434	Ing. Básica	Roca
	STV-01	399.144	6.270.035	Ing. Básica	Roca
	AFII-C-BH-001-A	385.705	6.284.822	Proyecto	Roca
	AFII-C-BH-002	385.703	6.284.823	Proyecto	Roca
	BCC-2-TSS-BH-001	385.618	6.283.842	Proyecto	Roca
	TCS-A-L001	380.232	6.286.686	Proyecto	Roca
P. Lugeon/ Hidrofract	DDH-VA1	385.604	6.285.365	Proyecto	S/I
	TPS-BH-001	380.276	6.286.740	Proyecto	Roca
	TPS-BH-005	380.287	6.286.739	Proyecto	Roca
Slug tests	SAM-10	380.138	6.287.114	Ambiental	Relleno sed.
	SAM-12	367.984	6.283.690	Ambiental	Relleno sed.
	SAM-14	378.038	6.286.172	Ambiental	Relleno sed.
	SAM-4	395.194	6.271.931	Ambiental	Relleno sed.

(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-1: Ubicación de Sondajes con Información Disponible



Fuente: Elaboración propia

2.2 Estudios Geofísicos realizados en el Área de Estudio

Se han realizado una serie de estudios geofísicos en el Dominio del modelo, diferenciándose tanto en metodologías empleadas, objetivos, extensión de estudio, etcétera. A continuación, se enumeran los estudios mencionados adjuntos a una breve descripción de los mismos:

- **Estudio Geofísico de Refracción Sísmica y Geoeléctrico (DPI, 2007a)**

Estudio de Refracción Sísmica y Geoeléctrico enfocado en el lugar donde se emplazaría la Casa de Máquinas. El estudio comprende 12 perfiles en total, de los cuales 7 son perfiles sísmicos ubicados en el sector Los Chacayes, 4 en el sector Las Ramadas y un último en el sector El Manzano. Por otro lado, se realizaron mediciones geoeléctricas en el sector bajo de Los Chacayes. Entre las principales conclusiones del estudio se encuentra que el subsuelo presenta tres tipos de material, llámense suelos de baja compactación, rocas fracturadas y basamento rocoso de buena calidad geomecánica.

- **Estudio Geofísico de Método Electromagnético (DPI, 2007b)**

Estudio Geofísico con empleo de metodologías Electromagnéticas y de complemento al Estudio Geofísico de Refracción Sísmica y Geoeléctrico (DPI, 2007a), enfocado al mismo sector del estudio precedente. El estudio tuvo como principal objetivo determinar la potencia del relleno sedimentario y caracterizar la geometría estructural del valle. Entre los perfiles geofísicos desarrollados se da especial énfasis a uno en particular debido a que cruza un cauce principal, el Río Colorado.

- **Geophysical Complementary Study of the Estero El Manzano Valley (NGA, 2017)**

Estudio con empleo de distintas metodologías y enfocado al sector del estero El Manzano, donde se proyecta la ubicación del túnel del proyecto L1. Se realizaron 2 perfiles sísmicos, 5 puntos TEM y 4 perfiles gravimétricos. Entre las principales conclusiones del estudio, se constata la existencia de una clara estratificación, desde sedimentos no consolidados, sedimentos consolidados y basamento fracturado. Por otro lado, y concerniente al trazado del túnel, se menciona que, si bien se evitaría el contacto con la unidad de relleno sedimentario, se debe tener en consideración la presencia de agua y roca fracturada.

- **Airborne geoscanning survey (NGI, 2017)**

Estudio Electromagnético Aerotransportado y enfocado en el lineamiento de los túneles del proyecto. El objetivo principal del estudio fue proveer información de resistividad eléctrica del área mencionada para su consecuente interpretación. Dicha interpretación se basó, parcialmente, en la comparación de las resistividades eléctricas de los tramos construidos. El análisis de la información levantada en este estudio permitió definir mapas de resistividad, bajo lo cual se proyectaron características geológicas para los túneles del proyecto.

2.3 Información de Niveles en el Área de Estudio

Dentro del dominio de la zona de estudio, se cuenta con distintas fuentes de registros del nivel piezométrico, que permiten caracterizar los sistemas acuíferos presentes en los rellenos sedimentarios del Río Maipo, Río Colorado y Río Yeso. Estas corresponden a las mediciones de la profundidad del nivel estático registrados en las siguientes fuentes de información:

- **Pruebas de Bombeo de Pozos con Derechos Concedidos (DGA, 2018)**

Catastro DGA de pozos con derechos de aguas subterráneas concedidos. Los pozos se ubican en el relleno sedimentario del acuífero del río Maipo, estos cuentan con mediciones del nivel estático en la fecha de realización de la prueba de bombeo asociada al expediente respectivo.

- **Información PHAM (PHAM, 2018): “Pozos de Monitoreo del Proyecto”**

Mediciones de profundidad del nivel estático realizadas en los pozos de monitoreo del PHAM con fines ambientales. Se cuenta con un registro desde marzo de 2016 a julio 2018 y en una escala temporal a nivel mensual o trimestral, dependiendo del pozo. Los registros de los pozos de monitoreo del proyecto son complementados con una campaña de terreno realizada en julio de 2018, donde adicionalmente se midió el nivel estático de aquellos pozos de ingeniería que no registraban nivel al momento de la construcción y se encontraron en condiciones adecuadas para la medición.

En la Tabla 2-2 se detallan cada uno de los pozos con información de profundidad de nivel estático disponible dentro del dominio de la zona de estudio, mientras que en la Figura 2-2 se presenta la distribución espacial de dichos pozos.

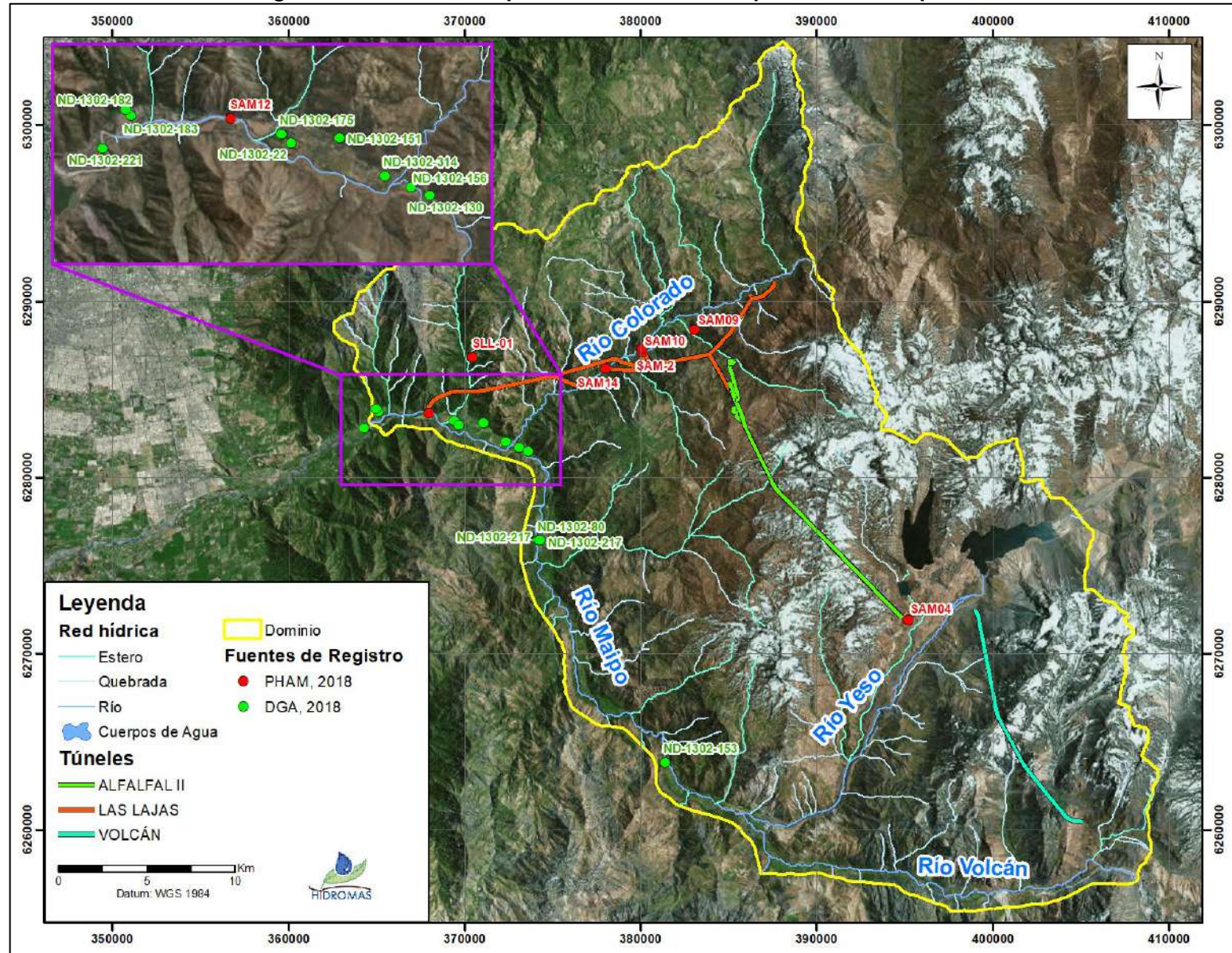
Tabla 2-2: Puntos con Información Piezométrica Disponible

Nombre	Coordenadas UTM (*) (m)		Fuente Información
	Este	Norte	
ND-1302-314	372.364	6.282.031	DGA, 2018
ND-1302-183	365.121	6.283.729	DGA, 2018
ND-1302-182	364.975	6.283.898	DGA, 2018
ND-1302-175	369.409	6.283.210	DGA, 2018
ND-1302-153	381.403	6.263.834	DGA, 2018
ND-1302-156	373.098	6.281.706	DGA, 2018
ND-1302-151	371.064	6.283.094	DGA, 2018
ND-1302-80	374.228	6.276.426	DGA, 2018
ND-1302-130	373.628	6.281.481	DGA, 2018
ND-1302-22	369.685	6.282.961	DGA, 2018
ND-1302-221	364.322	6.282.800	DGA, 2018
ND-1302-217	374.298	6.276.425	DGA, 2018
ND-1302-217	374.284	6.276.426	DGA, 2018
SAM04	395.194	6.271.931	PHAM, 2018
SAM09	383.073	6.288.379	PHAM, 2018
SAM10	380.114	6.287.110	PHAM, 2018
SAM12	367.966	6.283.661	PHAM, 2018
SAM14	378.038	6.286.172	PHAM, 2018
SAM-2	380.100	6.287.340	PHAM, 2018
SLL-01	370.454	6.286.806	PHAM, 2018

(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-2: Ubicación de puntos con información piezométrica disponible



Fuente: Elaboración propia

2.4 Información de caudal aflorado desde túneles

Con el avance de la construcción de los túneles del proyecto se constató el afloramiento de aguas subterráneas dentro de los mismos, por lo que, dentro de otras medidas, se ha optado por establecer un registro de los caudales de salida de los túneles. La recopilación de los registros necesarios para la estimación de los caudales aflorados desde los túneles proviene de:

- **Información PHAM (PHAM, 2018): “Registros de Flujómetros Volumétricos”**

Se dispusieron flujómetros volumétricos en los portales de los túneles, los cuales registran el caudal que está saliendo desde el interior de éstos, de manera que es posible obtener una estimación del caudal total aflorado de cada túnel a medida que se progresa en el avance de excavación.

Los portales que cuentan con registros de flujos de agua aflorada desde los túneles son los portales **L1, VL4, VL5, VL7, VA1, VA2, VA4, V1 y V5**.

2.5 Metodología de Análisis

El análisis de los ensayos hidráulicos comprende un estudio estadístico de los resultados obtenidos de cada una de las distintas pruebas disponibles. Para efectos del análisis de las propiedades hidrogeológicas, solo serán considerados aquellos sondeos que presentan información litológica. En cuanto al análisis de la litología asociada a los ensayos hidráulicos mencionados, éstos se agrupan a partir de grupos geológicos mayores, los cuales catalogan una serie de descripciones litológicas similares y observadas durante los ensayos.

Una vez definidas las propiedades de conductividad hidráulica en el Área de estudio se procedió al análisis de los estudios geofísicos. Dicho análisis tuvo como principal objetivo la identificación del relleno sedimentario del valle y el basamento rocoso a partir de las interpretaciones realizadas de los resultados obtenidos en base a las distintas metodologías empleadas.

En base al registro de información de las profundidades de nivel de agua, niveles piezométricos y topografía del sector se procede a definir la piezometría del Área de Estudio, de esta forma se identifican conceptualmente los gradientes hidráulicos y direcciones de flujo del sistema.

Por último, se presentan los registros y evoluciones históricas de los caudales aflorados de los túneles.

3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA POR TIPO LITOLÓGICO

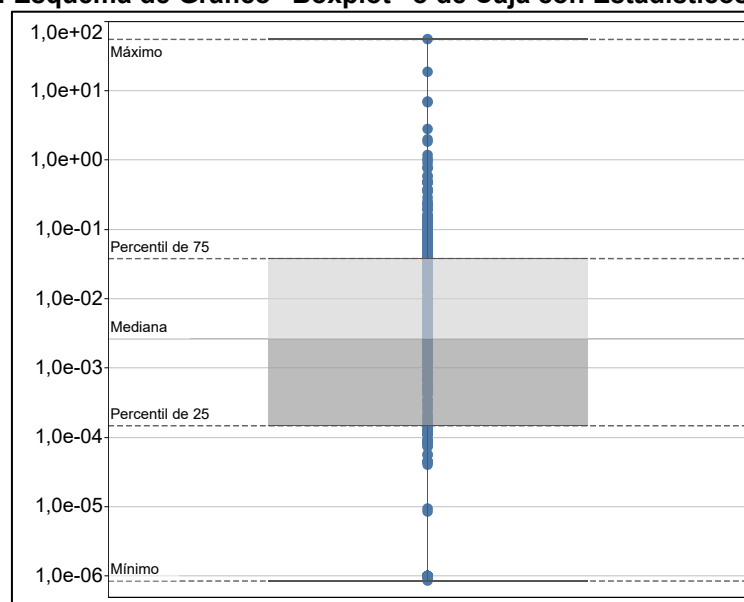
3.1 Aspectos Generales

A partir de la información expuesta en el capítulo 2 del presente anexo, se realizó un análisis de los resultados de los diversos ensayos realizados para la determinación de la conductividad hidráulica.

A partir de las litologías presentadas durante los ensayos hidráulicos, se agruparon los resultados de las mismas en unidades geológicas mayores, definiendo cuatro grupos principales: Andesitas, Rocas Intrusivas, Rocas Volcanoclásticas y Relleno Sedimentario. El presente capítulo resume los principales resultados de los ensayos hidráulicos en conjunción de la definición de las unidades geológicas mencionadas.

En los acápites posteriores se realizará un análisis estadístico de los valores de permeabilidad obtenidos de los distintos ensayos realizados en los sondajes de la Tabla 2-1. A modo de representar gráficamente los rangos de variación de este parámetro, se utilizará el gráfico de tipo “Boxplot” o de caja. En la Figura 3-1, se presenta un esquema del tipo de gráfico, en donde se destacan los estadísticos: Máximo, Percentil de 75, Mediana, Percentil de 25 y Mínimo.

Figura 3-1: Esquema de Gráfico “Boxplot” o de Caja con Estadísticos Principales



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-1 se resume la cantidad total de sondajes según el tipo de ensayo con información disponible, donde se observa que el 59% de los 68 sondajes son de tipo exploratorio en túnel y le siguen con un 15% los sondajes realizados para Ingeniería Básica. Los sondajes de tipo ambiental y de pruebas de bombeo de derechos de aguas realizados por la DGA corresponden al 10% de la cantidad total de sondajes.

Tabla 3-1: Fuente de los Sondajes

Fuente	N° Total	Porcentaje (%)
Ambiental	4	6
Exploratorio	40	59
Ingeniería Básica	10	15
Pozos DDA (DGA)	7	10
Sondaje	7	10
Total	68	100

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la Tabla 3-2 se presenta el tipo de prueba para determinar las propiedades hidrogeológicas de los sondajes y pozos y sus porcentajes correspondientes, donde destaca que el 59% de los sondajes son ensayos de tipo Lugeon, el 26% son pruebas de hidrofracturamiento y, en menor porcentaje, se tienen pruebas de bombeo de gasto constante y Slug Tests. Para el análisis de los valores de conductividad no serán considerados los sondajes con tipo de prueba de hidrofracturamiento, ya que éstos fueron realizados posterior al fracturamiento hidráulico y no son representativos de las propiedades de la roca.

Tabla 3-2: Tipo de Prueba de los Sondajes

Tipo de Prueba	N° Total	Porcentaje
Gasto constante	7	10
P. hidrofracturamiento	18	26
P. Lugeon	41	59
Slug tests	4	6
Total	70	100

Fuente: Elaboración propia

3.2 Resultados Prueba Lugeon

En general, se cuenta con una gran cantidad de Ensayos Hidráulicos del tipo Lugeon. Estos se concentran principalmente en un tramo de túnel del proyecto correspondiente al que se ubica entre los portales VL7 y VL8 (ver Figura 2-1, Detalle 2). La recopilación de resultados para esta prueba en particular define un rango de variación para la conductividad hidráulica de $1,0 \times 10^{-6}$ a $1,9 \times 10^1$ m/d, con un valor medio de $2,2 \times 10^{-3}$ m/d. La Tabla 3-3 detalla los principales resultados de permeabilidad expresada en unidades de Lugeon (LU) y Conductividad Hidráulica (k).

Tabla 3-3: Principales Resultados a partir de Pruebas Lugeon

Estadístico	Lugeon (LU)	k (m/d)
Mediana	$4,8 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-3}$
Mínimo	0,0	$8,6 \times 10^{-7}$
Máximo	$6,9 \times 10^1$	$1,9 \times 10^1$

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que en los ensayos de Lugeon, existen tramos en donde no es posible lograr el ingreso de agua para realizar las pruebas, es decir se tiene una situación de “no admisión”, cuantitativamente se traduce en un valor de unidad de Lugeon de cero y, matemáticamente, se refiere a una permeabilidad nula. Para estos casos de “no admisión”, se estableció un valor mínimo de permeabilidad de $1,0 \times 10^{-6}$ m/d.

3.3 Resultados Prueba de Bombeo

Se analizaron las pruebas de bombeo realizadas en el marco de la obtención de derechos de agua subterráneas y catastrados por la DGA descritos en el capítulo 2. Los expedientes de los pozos mencionados contienen información en cuanto al desarrollo de dicha prueba de bombeo, tanto de gasto constante y variable. Para efectos del presente análisis, se toman en cuenta aquellos registros correspondientes a la fase de la prueba de bombeo de gasto constante. En resumen, se reanalizó el registro de la prueba de bombeo de gasto constante para 7 pozos, el cual se detalla en el Apéndice C “Análisis Pruebas de Bombeo”.

Los pozos mencionados están emplazados a lo largo del relleno sedimentario del Río Maipo (Ver Figura 2-1), donde cuatro de estos se encuentran aguas abajo de la confluencia con el Río Colorado, mientras que el resto se ubican entre las confluencias del Río Colorado y el Río El Yeso.

El análisis fue desarrollado en base a una serie de metodologías, las cuales se pueden enfocar, tanto en la etapa de bombeo y tiempo efectivo de extracción desde el sondaje, como en la etapa de recuperación, desde el instante en que se paraliza la extracción desde el sondaje. Las metodologías empleadas, tanto para la etapa de bombeo como la de recuperación, corresponden a Theis, Theis con corrección de Jacob y Neuman. El análisis se realizó empleando el software *Aquifer Test* en su versión 2016.1.

En la Tabla 3-4 se presentan los principales resultados del análisis en cuanto a la Transmisibilidad (T) y Conductividad Hidráulica (k). Es importante recordar que la ubicación de los pozos permite inferir que caracterizan el relleno sedimentario del acuífero.

Tabla 3-4: Principales Resultados a partir de Pruebas de Bombeo de Gasto Constante

Estadístico	T (m ² /d)	k (m/d)
Mediana	4,1x10 ¹	9,0 x10 ⁻¹
Mínimo	5,0x10 ⁰	1,4 x10 ⁻¹
Máximo	1,4x10 ³	5,6 x10 ¹

Fuente: Elaboración propia

3.4 Resultados Slug Test

Las pruebas de tipo “*Slug*” realizadas en el Área de Estudio están ubicadas en los Sectores de Acopio de Marina (SAM) del proyecto, abarcando los sectores del portal L1 del río Maipo, portales VL4 y VL5 del río Colorado y portal VA4 del estero tributario al río El Yeso, El Manzanito (Ver Figura 2-1). Debido al sector donde se ubican los puntos, y la profundidad en que se realizaron los ensayos, éstos permiten caracterizar el relleno sedimentario del acuífero.

En la Tabla 3-5 se detallan los principales resultados de Conductividad Hidráulica (k) obtenidos a partir del presente ensayo hidráulico.

Tabla 3-5: Principales Resultados a partir de Pruebas Slug

Estadístico	k (m/d)
Mediana	1,1x10 ⁰
Mínimo	1,2x10 ⁻¹
Máximo	6,9 x10 ⁰

Fuente: Elaboración propia

3.5 Conductividad Hidráulica según Unidades geológicas

Los sondeos, aparte de entregar información con respecto a la conductividad hidráulica del punto en estudio, también presentan información de la unidad geológica representada, es decir, se permite hacer un símil de la geología de un sector con respecto a sus propiedades hidrogeológicas. En base a esto, se realizó un análisis de las propiedades de permeabilidad con respecto a la recopilación de los resultados de los ensayos hidráulicos y las unidades geológicas representativas en el Área de Estudio, definidas como “unidades geológicas mayores”:

- Relleno Sedimentario
- Andesitas
- Rocas Volcanoclásticas
- Rocas Intrusivas

En la Figura 3-2 se presenta un diagrama de tipo “*Boxplot*” de la conductividad hidráulica para cada uno de los miembros geológicos mayores anteriormente definidos. Al comparar las medianas se observa que la conductividad hidráulica es mayor para el Relleno Sedimentario, le siguen las Rocas Intrusivas, posteriormente las Rocas Volcanoclásticas y, por último, las Andesitas con un menor valor medio.

Analizando la información en términos de percentiles, las Andesitas presentan una mayor variación, con percentiles de 25% y 75% que van desde $1,0 \times 10^{-6}$ a $6,5 \times 10^{-3}$ m/d respectivamente, es decir, una variación de tres órdenes de magnitud.

Las permeabilidades de las Rocas volcanoclásticas varían desde $2,1 \times 10^{-4}$ a $3,2 \times 10^{-2}$ m/d, para los percentiles 25 y 75%.

Mientras que las Rocas intrusivas concentran sus datos en el rango $6,2 \times 10^{-3}$ a $8,0 \times 10^{-2}$ m/d, para los percentiles 25% y 75% respectivamente.

El rango más acotado entre percentiles 25% y 75% de conductividad hidráulica es el correspondiente al Relleno Sedimentario, con valores que van desde $5,4 \times 10^{-1}$ a $1,5 \times 10^0$ m/d, es decir, varios órdenes de magnitud mayores que las rocas analizadas anteriormente.

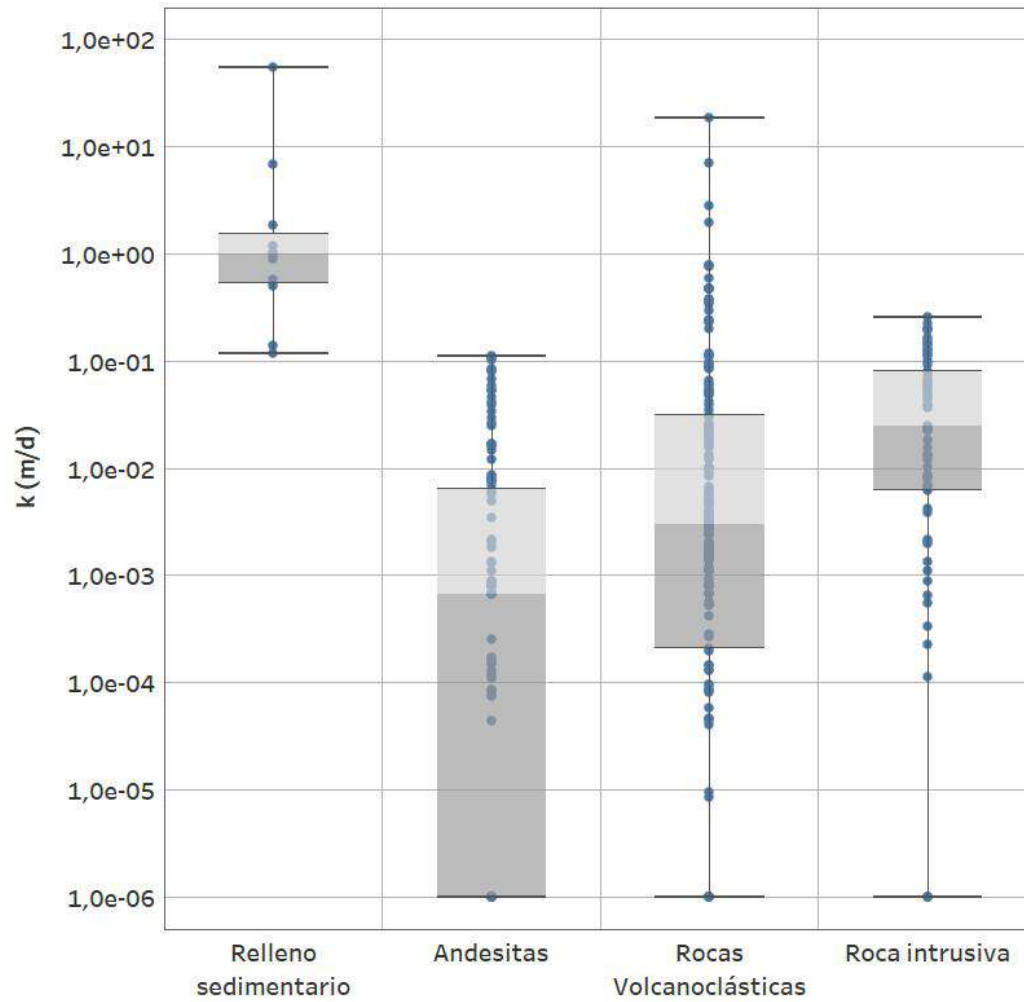
En la Figura 3-3 se presenta un mapa geológico a lo largo del trazado del túnel con la distribución espacial de los miembros geológicos mayores definidos en este acápite.

Se observa que en el sector de Las Lajas predominan principalmente Rocas Volcanoclásticas y Andesitas y Relleno Sedimentario siguiendo la red hídrica.

En el sector del Alfalfal, predominan las Andesitas, La Formación Abanico Oriental y La Formación Farellones.

En el sector del Volcán, se observan tres miembros principalmente, el Relleno sedimentario, Las Lavas y Brechas.

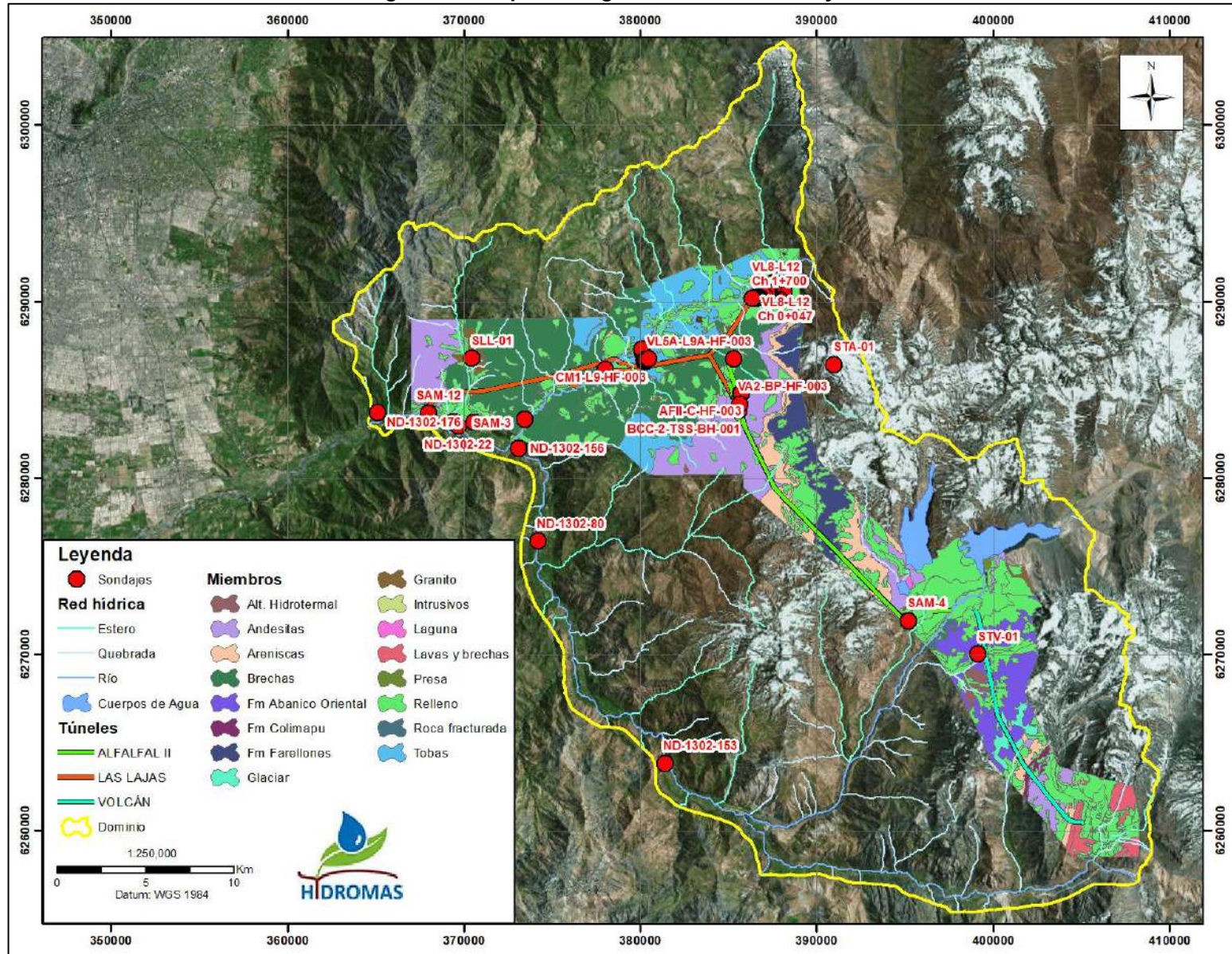
Figura 3-2: Valores de Conductividad Hidráulica según Miembros Geológicos Mayores



	Miembro geológico			
	Relleno sedimentario	Andesitas	Rocas Volcanoclásticas	Roca intrusiva
Máximo	5,6e+01	1,1e-01	1,9e+01	2,6e-01
Percentil (75)	1,5e+00	6,5e-03	3,2e-02	8,0e-02
Mediana	1,0e+00	6,7e-04	3,0e-03	2,5e-02
Percentil (25)	5,4e-01	1,0e-06	2,1e-04	6,2e-03
Mínimo	1,2e-01	1,0e-06	1,0e-06	1,0e-06
Nº Datos	11	119	181	65

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-3: Mapa Geológico con Unidades Mayores



Fuente: Elaboración propia

4 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN PROFUNDIDAD

En los sondeos o pozos, los ensayos para determinar las propiedades hidrogeológicas se realizan a distintas profundidades. De esta forma, en este capítulo se realiza un análisis de cómo varía la conductividad hidráulica a distintas profundidades con respecto al nivel de terreno.

En primer lugar, se clasifica la profundidad en tres rangos, la primera corresponde a la unidad más superficial y se define en los primeros 100 m. Luego, se considera una sección más profunda con un rango de profundidad entre los 100 y 200 m, y finalmente se considera la fracción más profunda que se encuentra a más de 200 m debajo del nivel de terreno.

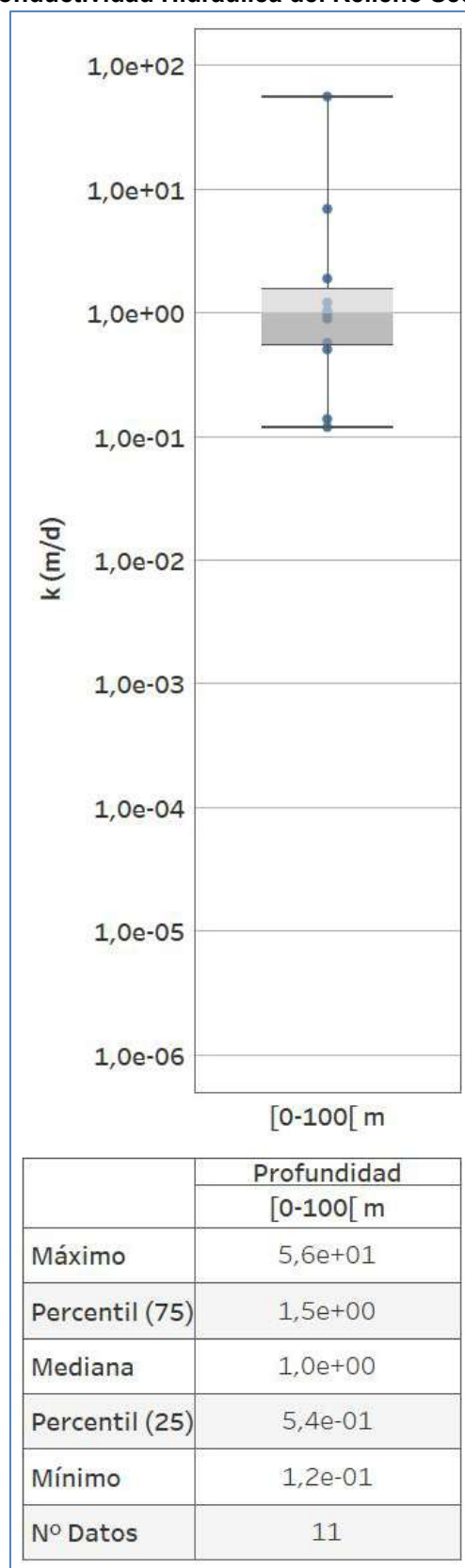
En las Figuras 4-1 a la 4-4 se presentan los valores de conductividad hidráulica para cada una de las unidades geológicas definidas en el capítulo anterior, discretizando en función de la profundidad con respecto al nivel de terreno. Los gráficos presentados en las figuras mencionadas corresponden a diagramas de tipo “Boxplot”.

En la Figura 4-1 se presentan los resultados de la unidad definida como Relleno Sedimentario, en ésta se observa que todos los datos se encuentran en la sección más superficial, con profundidades menores a los 100 m. Lo anterior se traduce que las expresiones del relleno sedimentario sean a profundidades no mayores a 100 m, con un rango de conductividad hidráulica de $1,2 \times 10^{-1}$ a $5,6 \times 10^1$ m/d, lo cual define al relleno sedimentario del acuífero.

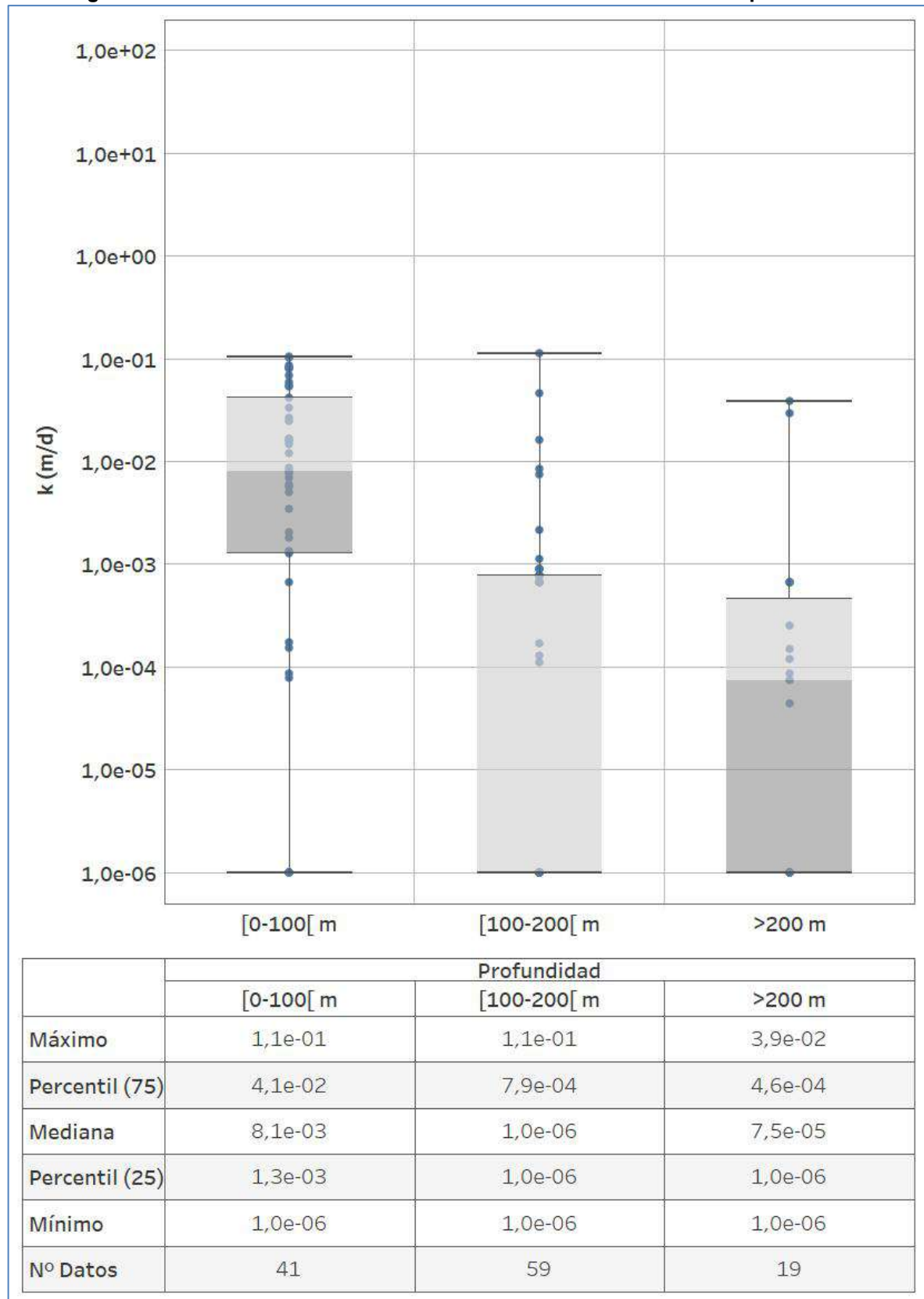
En la Figura 4-2 se observa que las Andesitas presentan dos comportamientos diferentes en los valores de conductividades hidráulicas, el primero para profundidades menores a 100 m con una mediana de $8,1 \times 10^{-3}$ m/d y el segundo para mayores a 100 metros, llegando a valores de permeabilidad menores en 2 y 3 órdenes de magnitud.

En la Figura 4-3 se presenta la variación de conductividad hidráulica con la profundidad de las unidades definidas como Rocas Volcanoclásticas. Como se observa, en términos de la mediana, existe una disminución de la permeabilidad a medida que se incrementa la profundidad del ensayo. Los rangos varían desde $4,5 \times 10^{-2}$, $3,0 \times 10^{-3}$ y $4,1 \times 10^{-4}$ para profundidades ente 0 - 100 m, 100 - 200 m y mayores a 200 m respectivamente.

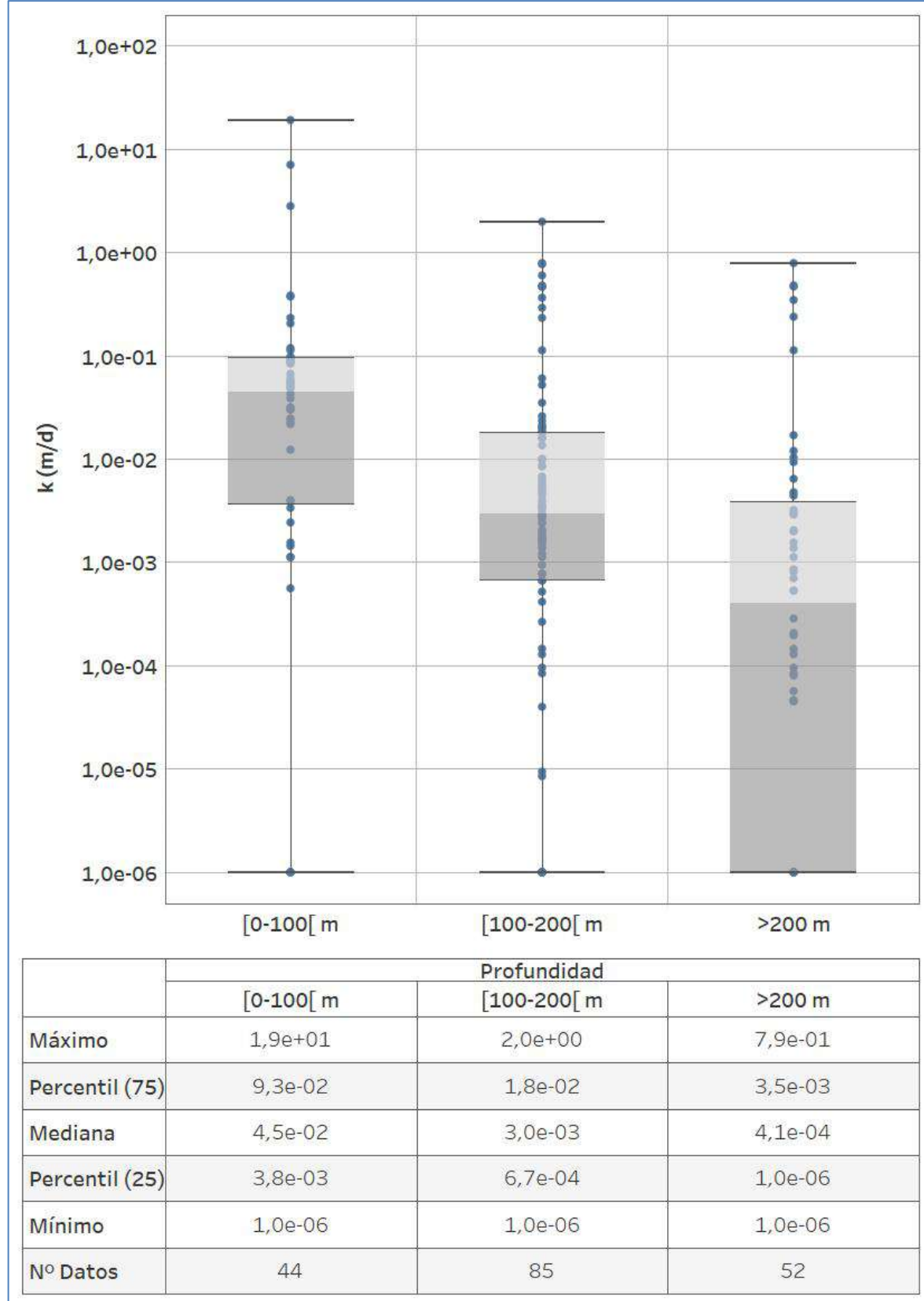
En la Figura 4-4 se presenta el diagrama para las rocas intrusivas. Como se observa, solo existen mediciones para profundidades menores a 100 m, lo que corresponde a intrusivos que afloran en superficie. El rango de conductividad hidráulica es mayor que para las otras rocas analizadas, variando entre $6,2 \times 10^{-3}$ a $8,0 \times 10^{-2}$ m/d, considerando los percentiles 25 y 75, respectivamente.

Figura 4-1: Valores de Conductividad Hidráulica del Relleno Sedimentario en profundidad

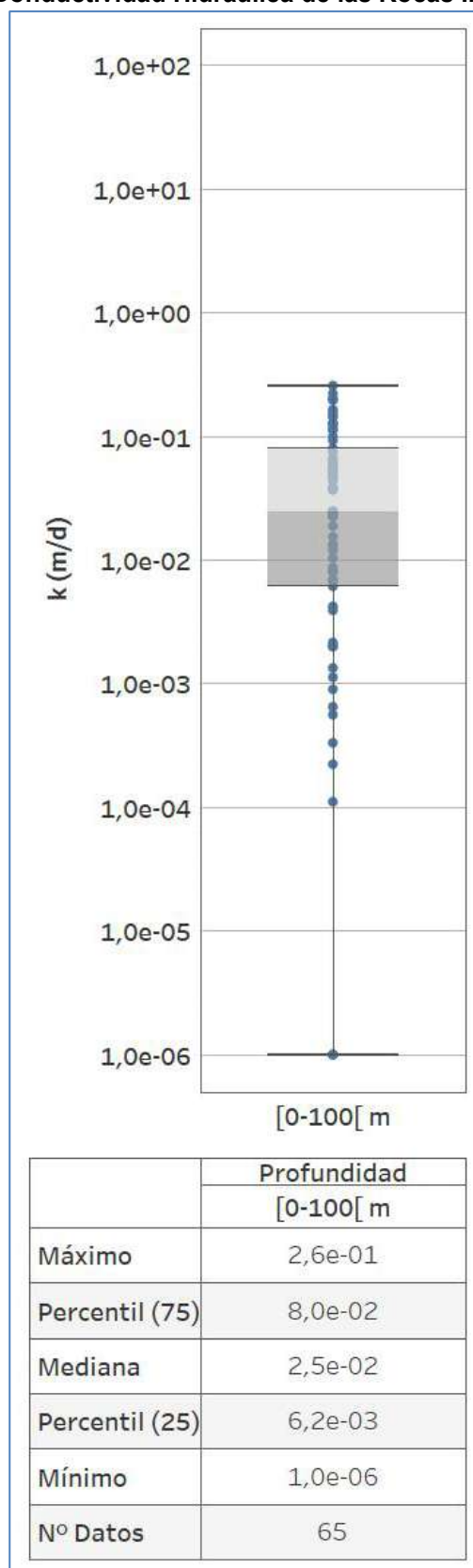
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-2: Valores de Conductividad Hidráulica de las Andesitas en profundidad

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-3: Valores de Conductividad Hidráulica de las Rocas Volcanoclásticas en profundidad

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-4: Valores de Conductividad Hidráulica de las Rocas Intrusivas en profundidad

Fuente: Elaboración propia

5 RESUMEN DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

En este capítulo se presenta un resumen de las conductividades hidráulicas obtenidas a partir de los análisis realizados en los capítulos 3 y 4 del presente documento.

En la Tabla 5-1 se presenta un resumen con los miembros geológicos mayores para los distintos rangos de profundidad. Para cada una de éstas, se muestran los estadísticos más representativos (Percentil 75, Mediana, Percentil 25 y el N° total de datos). Por otro lado, la Figura 5-1 detalla los valores de conductividad hidráulica para las unidades geológicas de roca y discretizados en profundidad, mientras que la Figura 5-2 muestra los valores de conductividad hidráulica agrupados, según sea Relleno sedimentario o Roca. Éste último engloba las unidades de Rocas Andesíticas, Intrusivas y Volcanoclásticas. Las Figuras mencionadas se presentan en formato “Boxplot”.

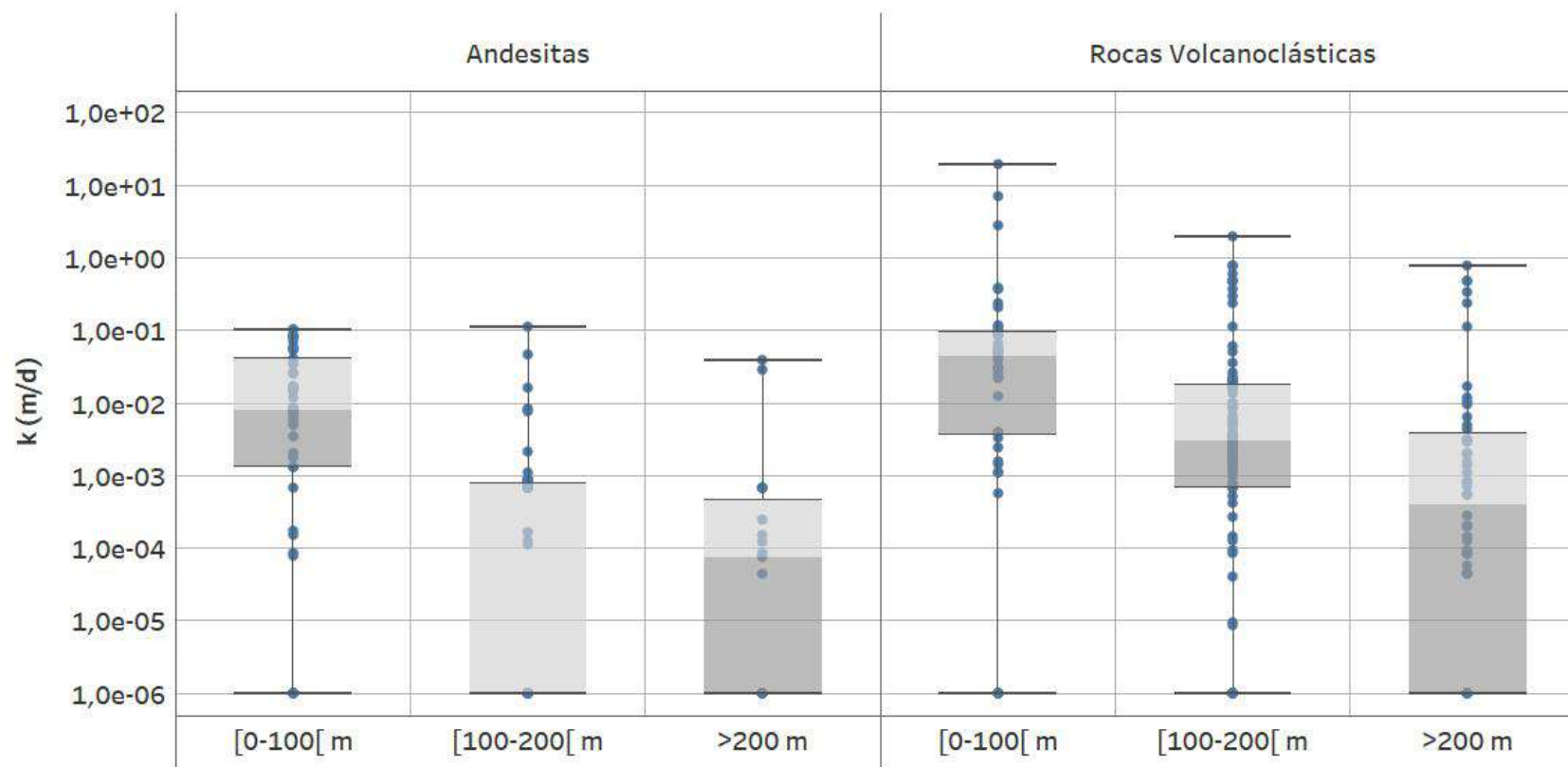
Como se observa en la Tabla 5-1 y en la Figura 5-1, existe una tendencia general que, para las unidades definidas como Andesitas y Rocas Volcanoclásticas, las conductividades hidráulicas disminuyen con la profundidad. Se observa que las permeabilidades para las rocas volcanoclásticas disminuyen en 1 orden de magnitud aproximadamente para los distintos rangos de profundidad, desde $4,5 \times 10^{-2}$ a $4,1 \times 10^{-4}$ m/día. Para las Andesitas el comportamiento es el mismo para las profundidades menores a 100 m ($8,1 \times 10^{-3}$ m/d) y mayores a 200 m ($7,5 \times 10^{-5}$ m/d), sin embargo, entre 100 y 200 m se observa un valor medio de $1,0 \times 10^{-6}$ m/d, debido a la gran cantidad de ensayos realizados que tuvieron como resultado “no admisión” de agua.

Por último, en la Figura 5-2 se presentan los rangos de conductividad hidráulica para el Relleno sedimentario y para las Rocas (Andesitas, Rocas volcanoclásticas y Rocas intrusivas). El Relleno sedimentario al ser un depósito no consolidado presenta valores de conductividad altos ($1,0 \times 10^0$ m/d), mientras que la conductividad media de las Rocas es de $2,4 \times 10^{-3}$ m/d y presenta un amplio rango en los datos, desde $9,5 \times 10^{-5}$ a $3,4 \times 10^{-2}$ m/d, considerando los percentiles 25% y 75% de los datos, respectivamente.

Tabla 5-1: Resumen de Valores de Conductividad Hidráulica

Miembro geológico	Profundidad (m)	Percentil (75)	Mediana	Percentil (25)	N° Datos
Relleno sedimentario	[0-100[	$1,5 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$5,4 \times 10^{-1}$	11
Andesitas	[0-100[	$4,1 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	41
	[100-200[	$7,9 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$	59
	>200	$4,6 \times 10^{-4}$	$7,5 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-6}$	19
Rocas Volcanoclásticas	[0-100[	$9,3 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-2}$	$3,8 \times 10^{-3}$	44
	[100-200[	$1,8 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-3}$	$6,7 \times 10^{-4}$	85
	>200	$3,5 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-6}$	52
Roca intrusiva	[0-100[	$8,0 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$6,2 \times 10^{-3}$	65

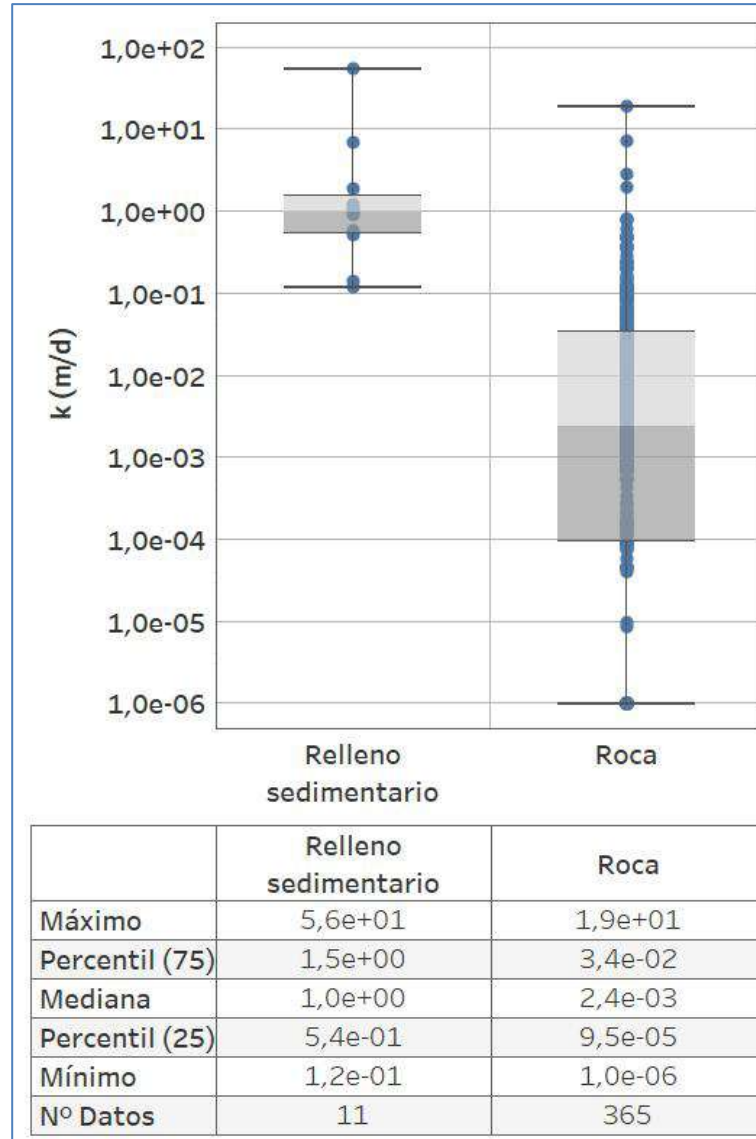
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-1: Valores de Conductividad Hidráulica de Rocas Andesíticas y Volcanoclásticas

	Andesitas			Rocas Volcanoclásticas		
	[0-100[m	[100-200[m	>200 m	[0-100[m	[100-200[m	>200 m
Máximo	1,1e-01	1,1e-01	3,9e-02	1,9e+01	2,0e+00	7,9e-01
Percentil (75)	4,1e-02	7,9e-04	4,6e-04	9,3e-02	1,8e-02	3,5e-03
Mediana	8,1e-03	1,0e-06	7,5e-05	4,5e-02	3,0e-03	4,1e-04
Percentil (25)	1,3e-03	1,0e-06	1,0e-06	3,8e-03	6,7e-04	1,0e-06
Mínimo	1,0e-06	1,0e-06	1,0e-06	1,0e-06	1,0e-06	1,0e-06
Nº Datos	41	59	19	44	85	52

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2: Valores de Conductividad Hidráulica de Rocas y Relleno Sedimentario



Fuente: Elaboración propia

6 GEOFÍSICA

Si bien los estudios geofísicos realizados en el Área de Estudio presentan distintas metodologías y objetivos, tienden a coincidir en la observación de la estratificación de las unidades geológicas. Lo anterior se ratifica en la observación de la predominancia de tres tipos de material, como lo son los suelos con bajo nivel de compactación, rocas fracturadas y basamento rocoso de buena calidad geomecánica, como asevera DPI (2007a y 2007b).

Acorde a lo mencionado, se implicarían ciertas características proyectadas en la construcción de los túneles del proyecto, ya que dichas obras pueden ubicarse en unidades de alta permeabilidad, debido al contacto con material de relleno sedimentario o roca meteorizada (NGA, 2017), lo cual se debe tomar en cuenta en la construcción de los túneles del proyecto, donde se espera presencia de agua y roca fracturada. Lo anterior se reafirma con la presencia de lineamientos como fallas, diques o contactos litológicos, como se detalla en el Anexo 3. Esto último conlleva la existencia de conexiones entre las unidades geológicas a lo largo de dichas estructuras y lineamientos.

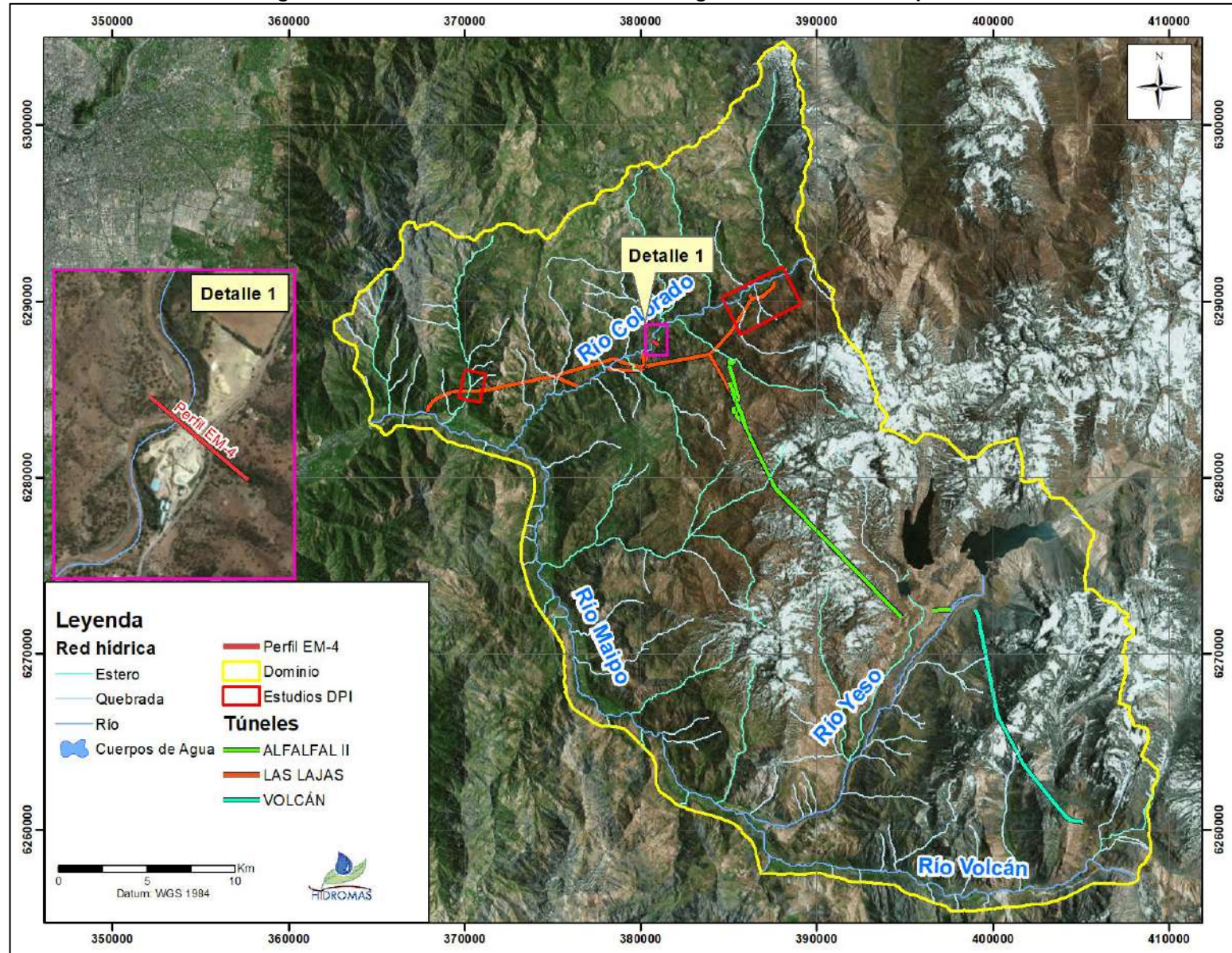
La Figura 6-1 detalla las áreas de estudio comprendidas para los Estudios Geofísicos de Refracción Sísmica, Geoeléctrico y Electromagnético de DPI (2007a y 2007b). Entre Abril y Mayo de 2007 se realizaron 4 perfiles electromagnéticos en el sector del río Colorado, dentro de los cuales y, en particular, el perfil EM-4 cruza el río Colorado. Dicho perfil cobra relevancia en concordancia a la definición del acuífero en el sector de un cauce principal.

El perfil EM-4 tuvo una longitud de 460 m, ubicándose en las cercanías de una planta de molienda de caliza, cruzando el río El Colorado (Figura 6-1). La Figura 6-2 muestra el perfil de resistividad EM-4, a partir del cual, su interpretación tuvo como resultado las siguientes conclusiones (DPI, 2007b):

- Cubierta sedimentaria de baja resistividad ($<40 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) con espesores que alcanzan hasta los 100 m.
- Basamento rocoso de resistividades medias ($200 - 1.000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) de tipo sana con fracturas menores.
- A partir de los 200 m se presenta roca de alta resistividad ($1.000 - 5.000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) del tipo sana, donde no se observan estructuras asociadas a fallas en la roca.

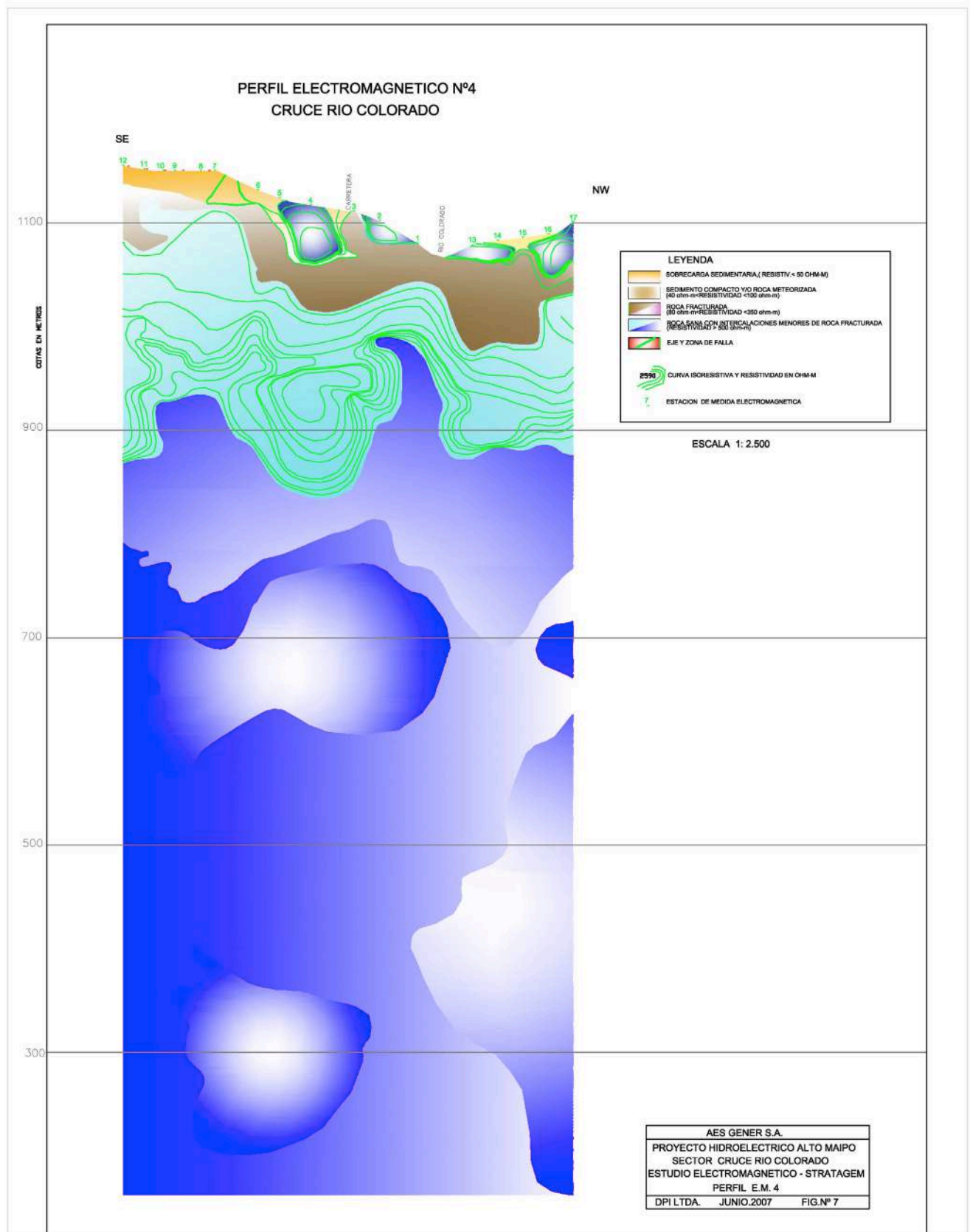
Las interpretaciones de los ensayos hidráulicos en el área de Estudio y en contraste con las interpretaciones de los estudios geofísicos, en particular el perfil EM-4, se constata una cobertura de relleno sedimentario de un máximo de 100 m en los cauces principales, mientras que fuera de dichas secciones, se constatan unidades de roca fracturada con espesores máximos de 200 m. Una vez superados los 200 m de profundidad con respecto al nivel de terreno, se espera la presencia de unidades de roca sana.

Figura 6-1: Ubicación de áreas de estudios geofísicos realizados por DPI



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-2: Perfil de Resistividad EM-4



Fuente: Modificado de DPI, 2007b

7 DEFINICIÓN UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UH)

A partir del análisis de las propiedades hidrogeológicas y las interpretaciones de los estudios geofísicos presentados en los capítulos anteriores, es posible definir cuatro unidades hidrogeológicas, según sus propiedades y características.

La primera unidad hidrogeológica (UH1), corresponde a los depósitos no consolidados que conforman el acuífero y del relleno sedimentario asociado a los cauces principales del río Maipo, Yeso, Volcán y Colorado. Debido a sus propiedades hidrogeológicas, corresponde a una unidad permeable, con un rango de permeabilidades que varía entre $1,2 \times 10^{-1}$ a $5,6 \times 10^1$ m/d.

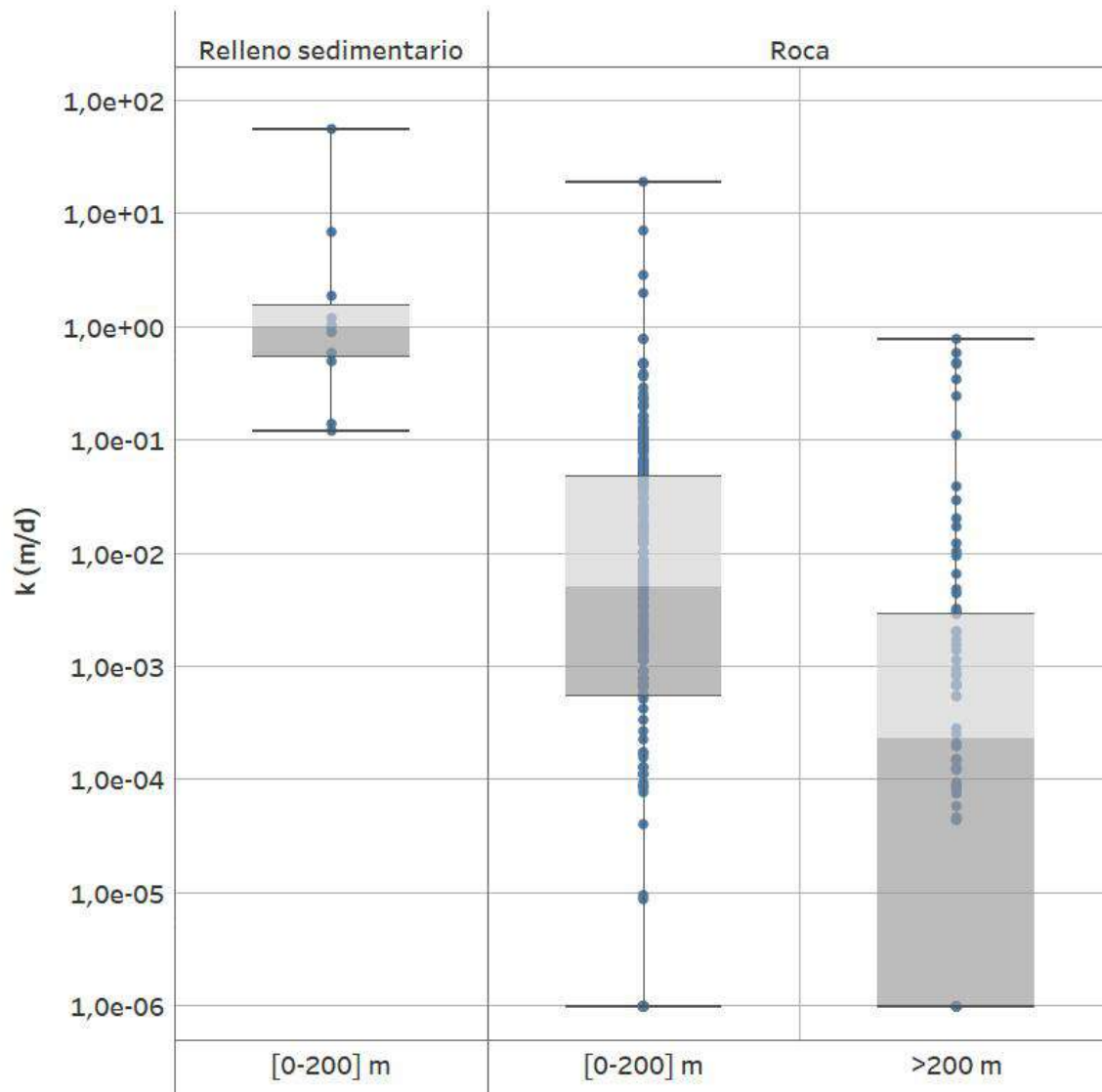
La segunda unidad hidrogeológica (UH2), corresponde a la roca ubicada en la sección más somera del macizo, es decir, a menos de 200 m de profundidad con respecto al nivel de terreno. Esta unidad se caracteriza por tener un mayor contacto con procesos erosivos y de meteorización, produciendo así un mayor grado de fracturamiento, lo que se traduce en permeabilidades relativas más altas que en rocas sanas o competentes. A partir de los resultados de los ensayos hidráulicos realizados para obtener los parámetros hidrogeológicos, se tiene que la mediana de conductividad hidráulica para la UH2 es de $5,0 \times 10^{-3}$ m/d, con un rango que varía entre $5,4 \times 10^{-4}$ y $4,8 \times 10^{-2}$ determinado por los percentiles 25 y 75%, respectivamente.

La tercera unidad hidrogeológica (UH3), corresponde a la roca ubicada a mayores profundidades, es decir, a más de 200 m por debajo del nivel de terreno. Esta unidad de roca se caracteriza por ser más competente o sana que las secciones más someras, lo que implica permeabilidades relativas menores. La mediana de conductividad hidráulica de la UH3 es de $2,3 \times 10^{-4}$ m/d, es decir, un orden de magnitud menor que la UH2, el rango de permeabilidades varía entre $1,0 \times 10^{-6}$ y $2,7 \times 10^{-3}$ determinado por los percentiles 25 y 75% respectivamente. En la Figura 7-1 se presenta el análisis de conductividad hidráulica en profundidad para el sistema de roca y relleno sedimentario.

Finalmente, se define una cuarta unidad hidrogeológica (UH4) representada a partir de los lineamientos presentes, ya sean fallas, fallas inferidas, diques, entre otros y los contactos litológicos. Estas estructuras pueden representar conexiones en el sistema de roca, lo que se traduce en una permeabilidad mayor que la del sistema de roca superficial (UH2). Según se detalla en el Anexo 3 y de los mayores valores de los ensayos de permeabilidad, se estimó la conductividad para esta unidad hidrogeológica varía entre 1×10^{-3} y 1×10^{-1} m/d.

En la Figura 7-2 se presenta una vista en planta con la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas para los primeros 200 m de profundidad. Del mismo modo, en la Figura 7-3 se presentan las unidades hidrogeológicas distribuidas a profundidades mayores que 200 m. Finalmente, en la Tabla 7-1 se presenta un resumen de los rangos de permeabilidad para cada unidad hidrogeológica.

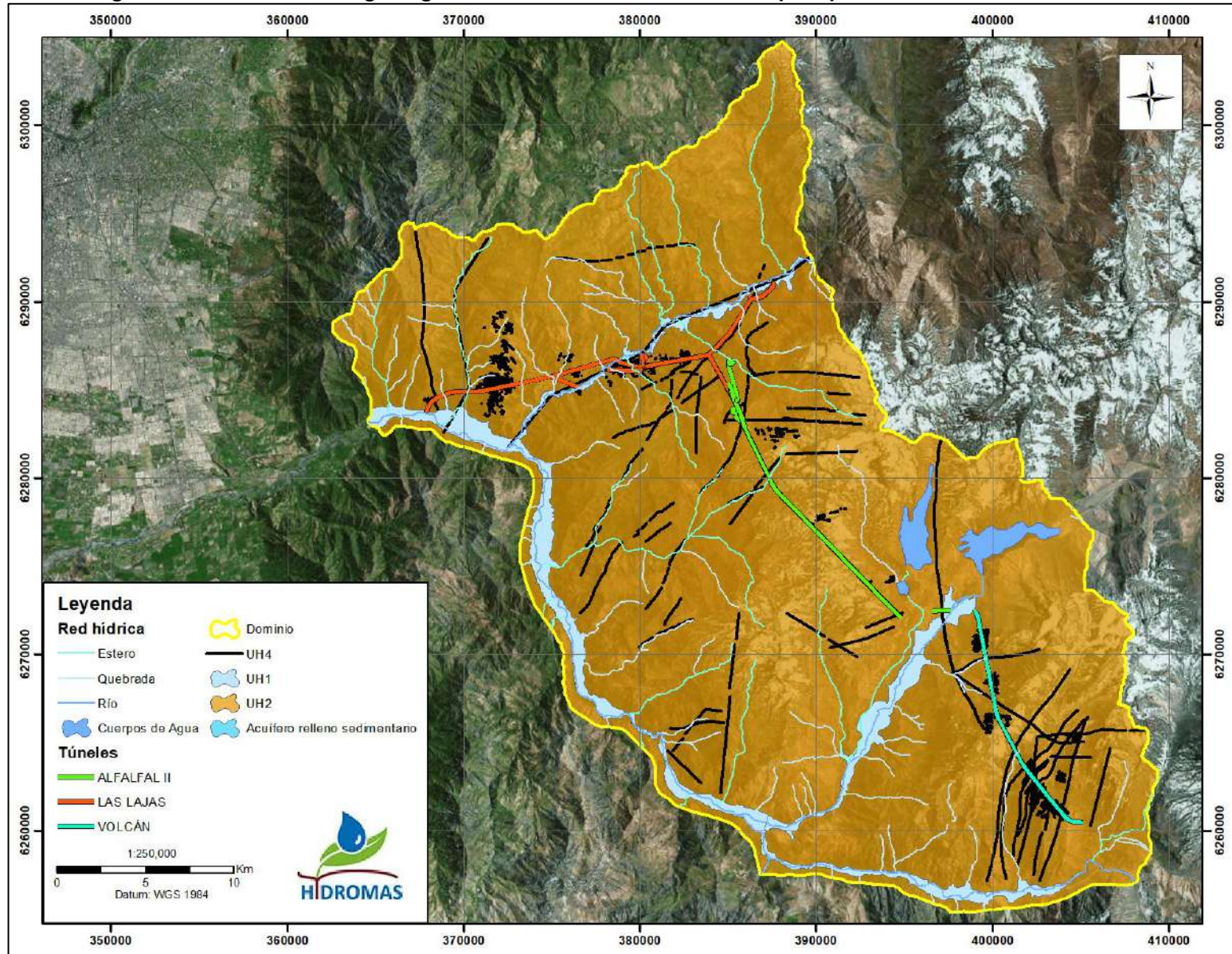
Figura 7-1: Conductividad Hidráulica según profundidad para Roca y Relleno Sedimentario



	Relleno sedimentario	Roca	
	[0-200] m	[0-200] m	>200 m
Máximo	5,6e+01	1,9e+01	7,9e-01
Percentil (75)	1,5e+00	4,8e-02	2,7e-03
Mediana	1,0e+00	5,0e-03	2,3e-04
Percentil (25)	5,4e-01	5,4e-04	1,0e-06
Mínimo	1,2e-01	1,0e-06	1,0e-06
Nº Datos	11	287	78

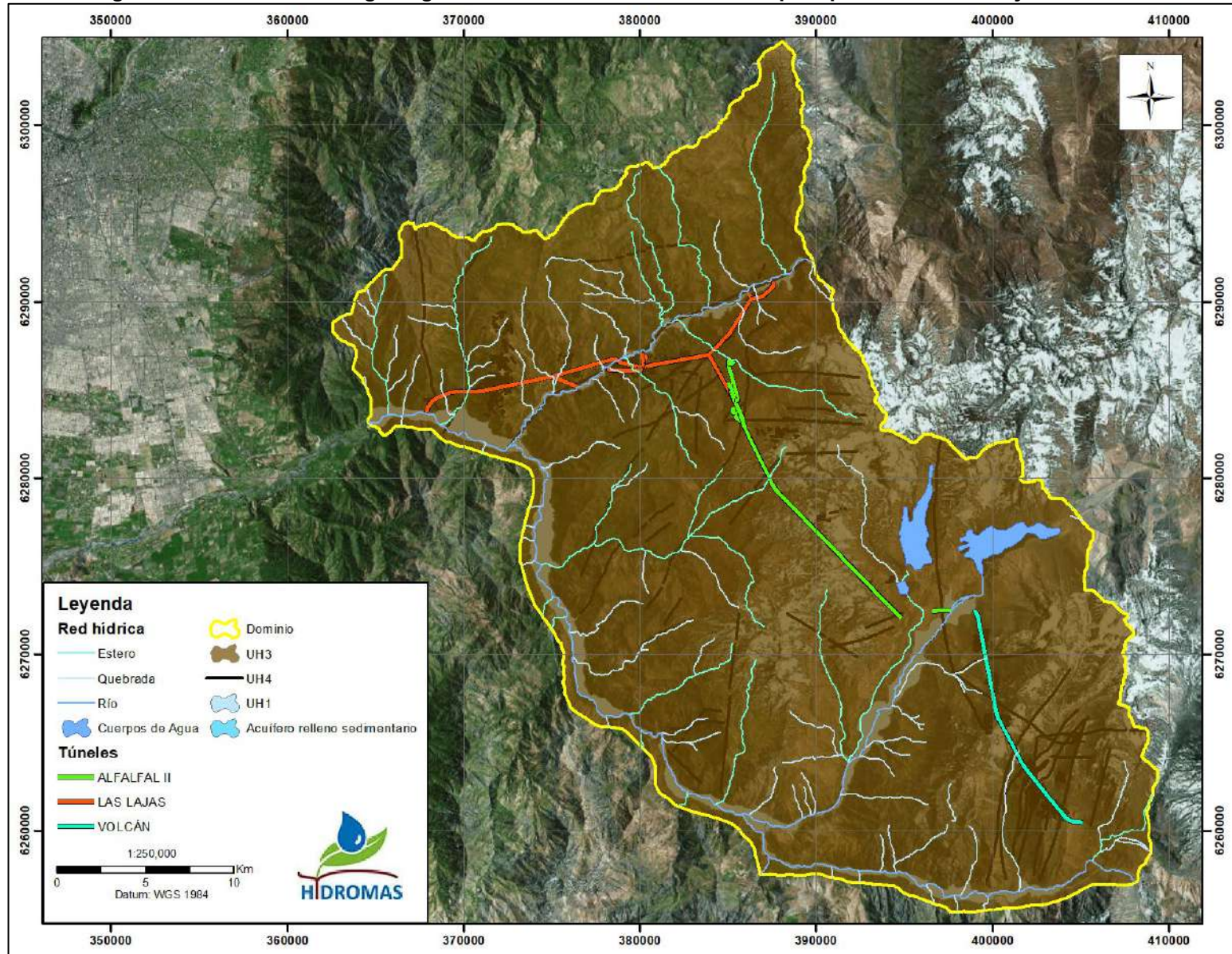
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-2: Unidades Hidrogeológicas definidas dentro del Dominio para profundidades menores a 200 m



Fuente: Elaboración propia

Figura 7-3: Unidades Hidrogeológicas definidas dentro del Dominio para profundidades mayores a 200 m



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-1: Resumen de Valores de Conductividad Hidráulica para las Unidades Hidrogeológicas

Unidades Hidrogeológicas	k inferior (m/d)	k medio (m/d)	k superior (m/d)
UH1	$5,4 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^0$	$1,5 \times 10^0$
UH2	$5,4 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$4,8 \times 10^{-2}$
UH3	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-3}$
UH4	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$

Fuente: Elaboración propia

8 NIVELES PIEZOMÉTRICOS

8.1 Aspectos Generales

Como se detalló en el capítulo 2, la información de niveles de agua subterránea consiste en el registro de mediciones de campo de la profundidad del nivel estático. Dicha medición se diferencia contextualmente según la fuente, ya sea durante:

- La prueba de bombeo que se presenta en los expedientes de derechos de agua subterráneas concedidos por la DGA.
- La medición de nivel estático en los pozos del proyecto y pertenecientes a la red de monitoreo de PHAM, desde marzo de 2016.
- La campaña de terreno realizada en julio de 2018, donde se incluyeron los pozos de ingeniería que no habían registrado nivel al momento de la construcción.

La información disponible se analizó a modo de obtener un mapa de curvas equipotenciales características del sistema en estudio.

8.2 Nivel registrado en expedientes de derechos de agua subterráneos DGA

A partir de la información disponible en el Catastro Público de Aguas, se obtiene información sobre los derechos de agua subterráneas constituidos por la Dirección General de Agua (DGA, 2018) en la zona de estudio. Usando dicha información, se verifica que dentro del dominio de interés se cuenta con un total de 33 pozos, de los cuales 13 poseen expedientes con medición de nivel estático durante la respectiva prueba de bombeo.

En la Tabla 8-1 se presentan aquellos pozos con derecho constituidos que contienen información de medición de la profundidad de nivel estático durante la realización de la prueba de bombeo descrita en el expediente, además se señala la ubicación de cada pozo, así como también la cota de terreno y fecha de realización de la prueba de bombeo.

Tabla 8-1: Información de los pozos con derechos concedidos dentro del dominio

Código DGA	Cota terreno (mnsn)	Coordenadas UTM (*)		Profundidad del nivel freático (m)	Cota piezométrica (msnm)	Fecha prueba de bombeo
		Este (m)	Norte (m)			
ND-1302-314	911	372.364	6.282.031	67	844	25-01-2007
ND-1302-183	830	365.121	6.283.729	42	788	29-07-2004
ND-1302-182	840	364.975	6.283.898	55	785	18-03-2003
ND-1302-175	874	369.409	6.283.210	42	832	-
ND-1302-153	1.171	381.403	6.263.834	26	1.145	10-03-2001
ND-1302-156	880	373.098	6.281.706	13	867	-
ND-1302-151	921	371.064	6.283.094	77	844	-
ND-1302-80	950	374.228	6.276.426	8	942	28-01-1995
ND-1302-130	931	373.628	6.281.481	45	886	23-02-2000
ND-1302-22	880	369.685	6.282.961	51	830	15-02-1990
ND-1302-221	786	364.322	6.282.800	11	775	24-01-1985
ND-1302-217	954	374.298	6.276.425	8	946	-
ND-1302-217	952	374.284	6.276.426	7	945	-

(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar, que la información de profundidad del nivel estático disponible en los expedientes se ubica en el relleno sedimentario del río Maipo, entre las localidades de El Manzano y San Gabriel. Si bien, esta información fue medida entre 1985 y 2007, se considera representativa de la condición actual, por cuanto la demanda de aguas subterráneas en la parte alta del relleno sedimentario del río Maipo es baja en relación a la cantidad de agua que dispone el sistema y, por lo tanto, la condición de equilibrio reflejada en el nivel estático de cada pozo se puede considerar representativo de la condición de equilibrio de la condición actual.

8.3 Niveles medidos en pozos pertenecientes a PHAM

El PHAM cuenta con una red de monitoreo de pozos en los cuales se realiza una medición mensual de la profundidad del nivel estático. Su distribución espacial se muestra en la Figura 8-1. En la Tabla 8-2 se presentan los registros de mediciones mensuales de los pozos mencionados.

En la Figura 8-2 se presenta la serie temporal de registros de profundidad del nivel estático a nivel mensual del pozo SAM-4. Este se encuentra ubicado en el sector del portal VA-4 en las cercanías del río Yeso. Como se observa en el gráfico, se cuenta con 12 meses de registros no continuos entre los años 2016 y 2018, con una tendencia a la disminución del nivel estático.

En la Figura 8-3 se presenta la serie temporal de registros de profundidad del nivel estático a nivel mensual del pozo SAM-14. Este se encuentra ubicado en el sector del portal VL-4 en las cercanías del río Colorado. Como se observa en el gráfico, se cuenta con registros entre los años 2016 a 2018, las mediciones muestran que los niveles son relativamente estables en el tiempo, con profundidades cercanas a los 30 m.

En la Figura 8-4 se presenta la serie temporal de registros de profundidad del nivel estático a nivel mensual del pozo SAM-10. Este se encuentra ubicado en el sector del portal VL-5 en las cercanías del río Colorado. Como se observa en el gráfico, se cuenta con registros desde 2016 a 2018, las mediciones muestran que los niveles son relativamente estables en el tiempo, con profundidades cercanas a los 25 m.

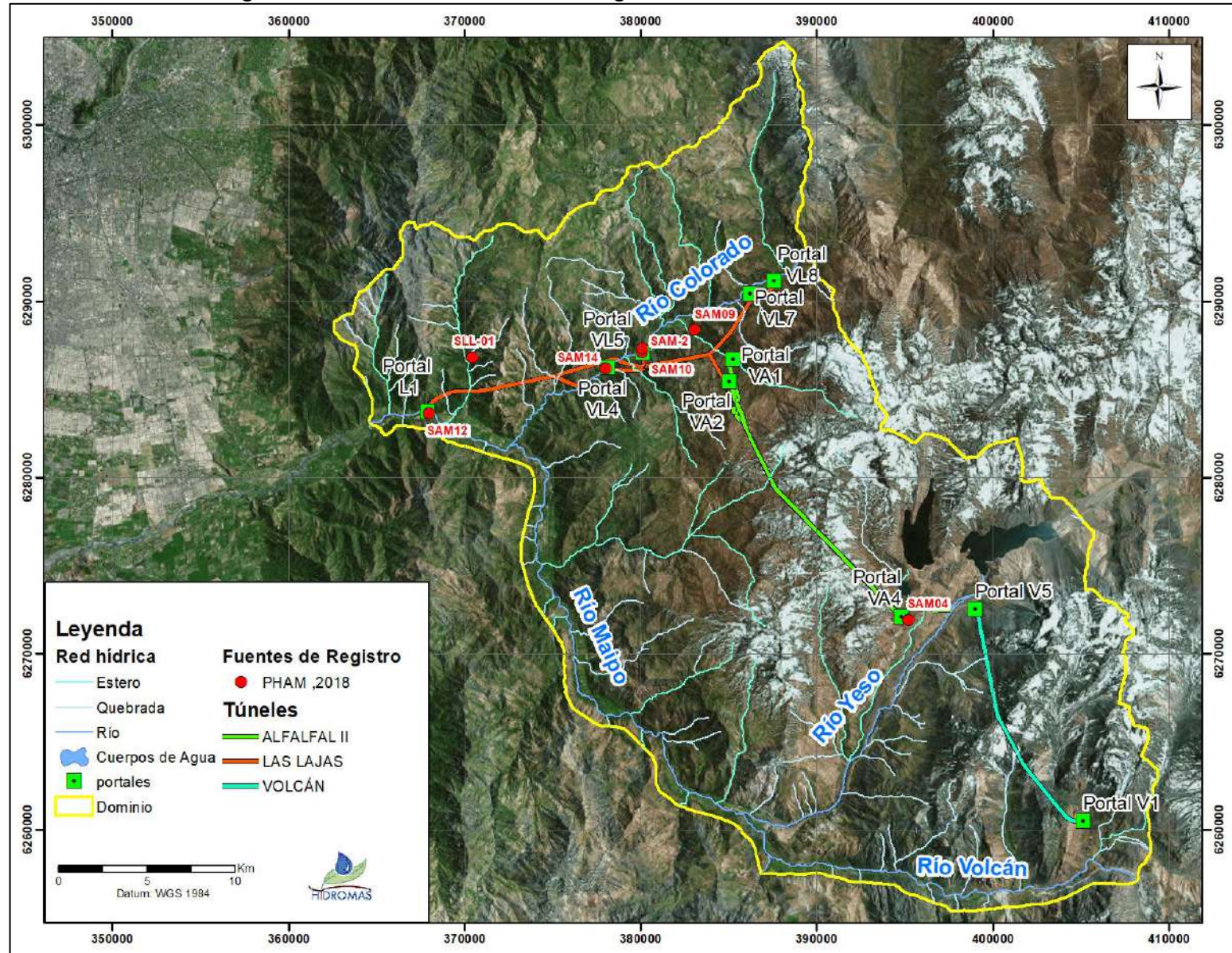
Por otro lado, en la Figura 8-5 se presenta la serie temporal de registros de profundidad del nivel estático a nivel mensual del pozo SAM-12. Este se encuentra ubicado en el sector del portal L1, muy cercano al río Maipo. Para este pozo se cuenta con un registro continuo a nivel mensual desde los años 2016 a 2018, con profundidades del nivel estático que oscilan entre 6 y 8 m.

Debido a la cercanía con el río Maipo, en la Figura 8-6 se presenta una comparativa entre la profundidad del nivel estático medida en SAM-12 y el caudal medio mensual registrado en la estación fluviométrica río Maipo en El Manzano de la DGA. En el gráfico, se ilustra la conexión existente entre el pozo SAM-12 y el río Maipo, de manera que se puede establecer que el acuífero del relleno sedimentario del Río Maipo está fuertemente influenciado por el régimen observado superficialmente en el cauce.

En el caso del pozo SAM-9 no es posible presentar una evolución histórica de las mediciones de profundidad del nivel estático debido a que se cuenta con un único registro que data de marzo de 2016. El valor obtenido en dicha ocasión fue de 39,6 m.

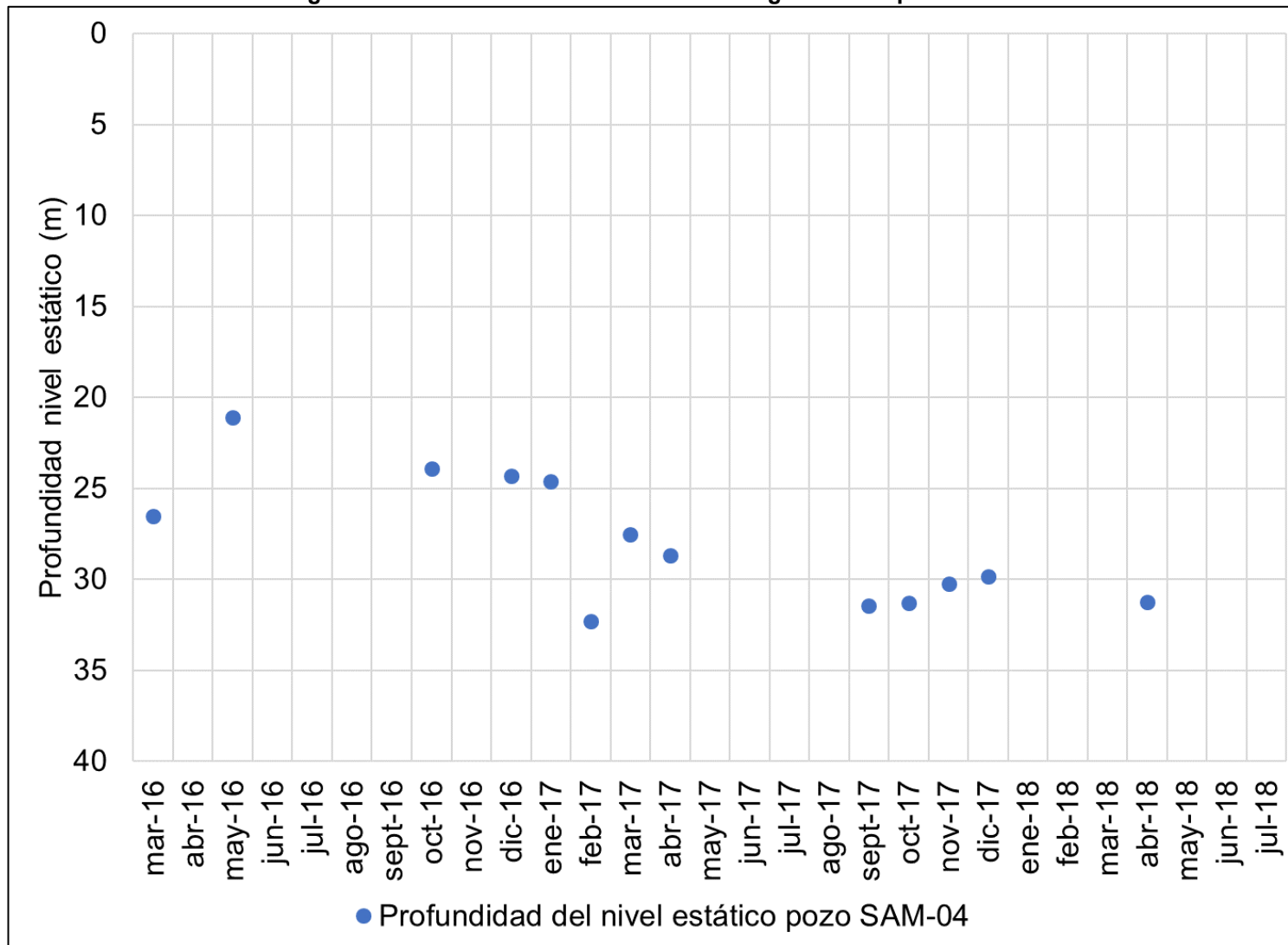
De manera de complementar la información de niveles, en el mes de julio de 2018 se realizó una campaña de medición de la profundidad del nivel freático en seis pozos que fueron construidos para fines de la ingeniería básica del proyecto. Se visitaron 6 puntos en total, de los que solamente se pudieron medir 2, ya que en el resto el nivel se encontraba por debajo de los 100 m (capacidad máxima del pozómetro). En la Tabla 8-3 se presenta un resumen de los valores de profundidad del nivel freático registrados en la campaña de terreno.

Figura 8-1: Ubicación de Pozos con Registros de Profundidad del Nivel Freático



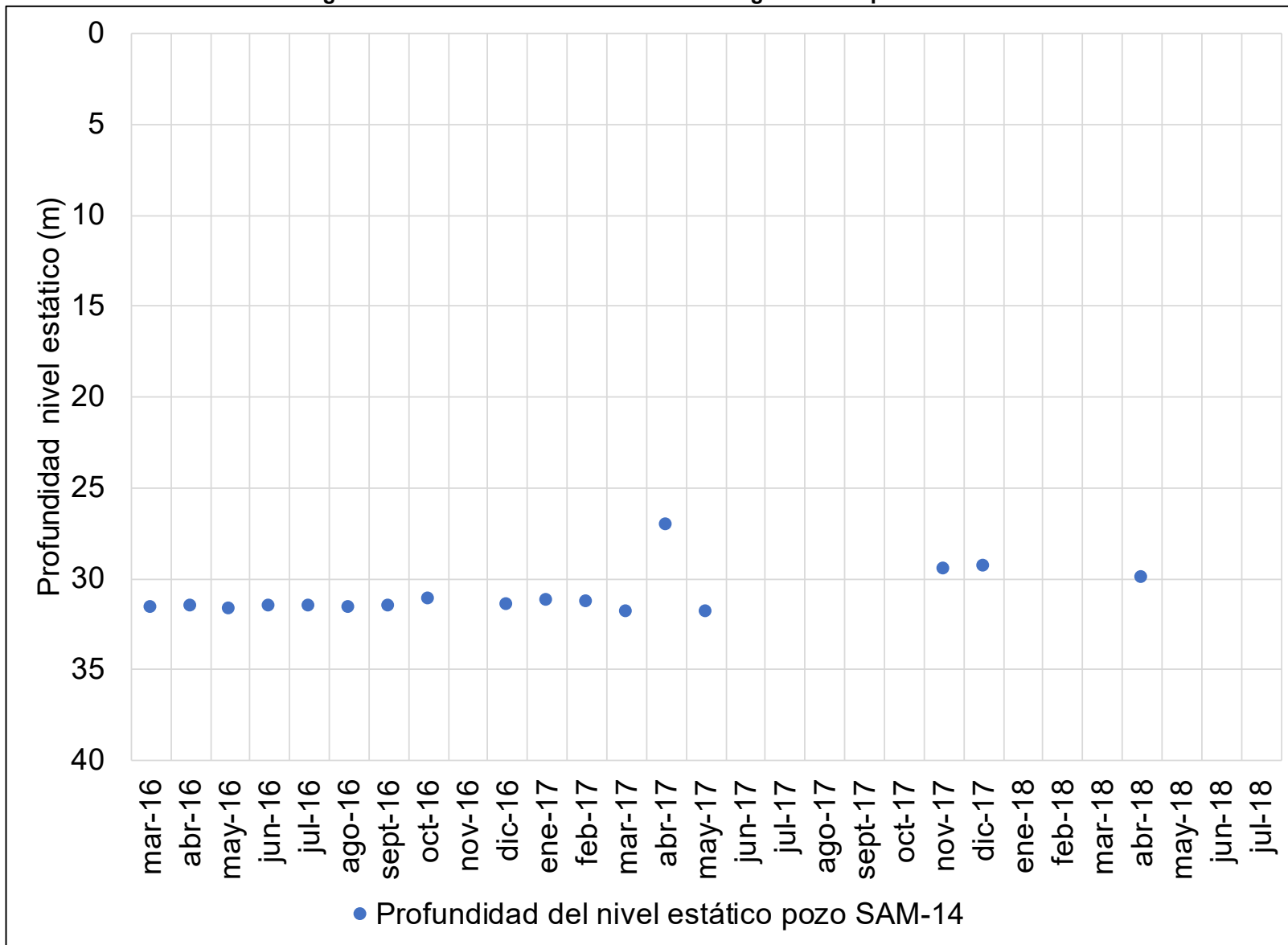
Fuente: Elaboración propia

Figura 8-2: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-4



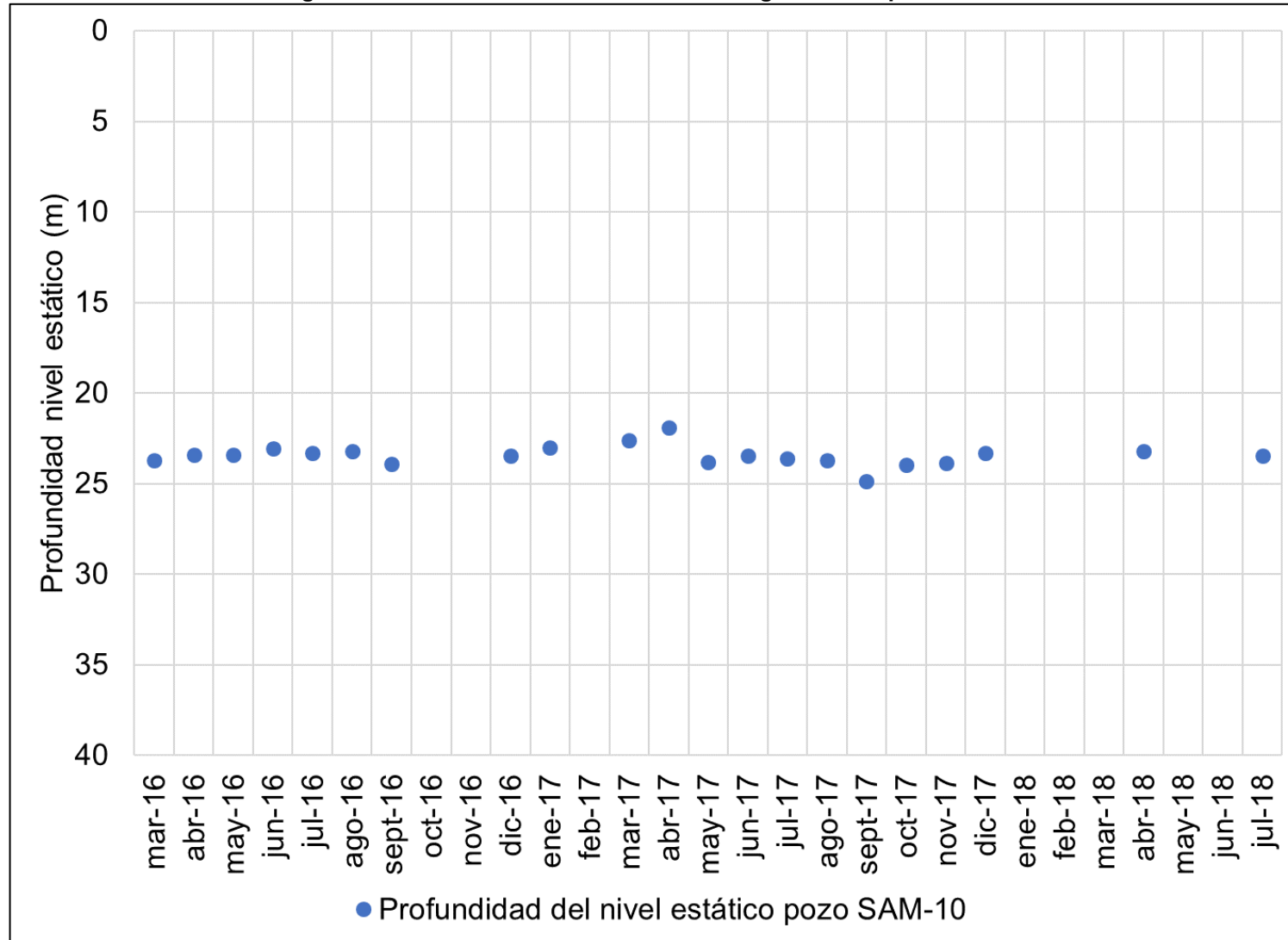
Fuente: Elaboración propia

Figura 8-3: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-14



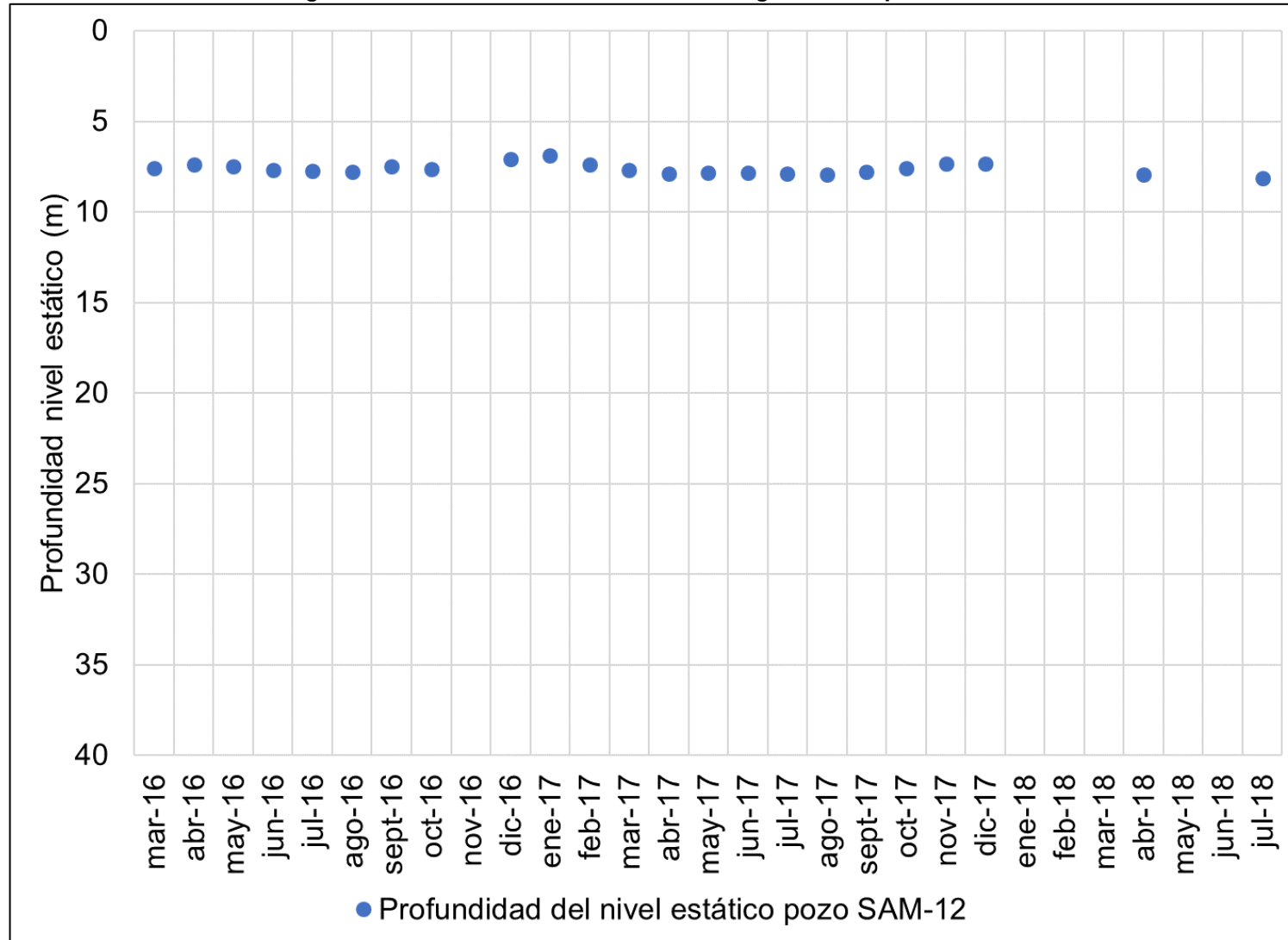
Fuente: Elaboración propia

Figura 8-4: Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-10



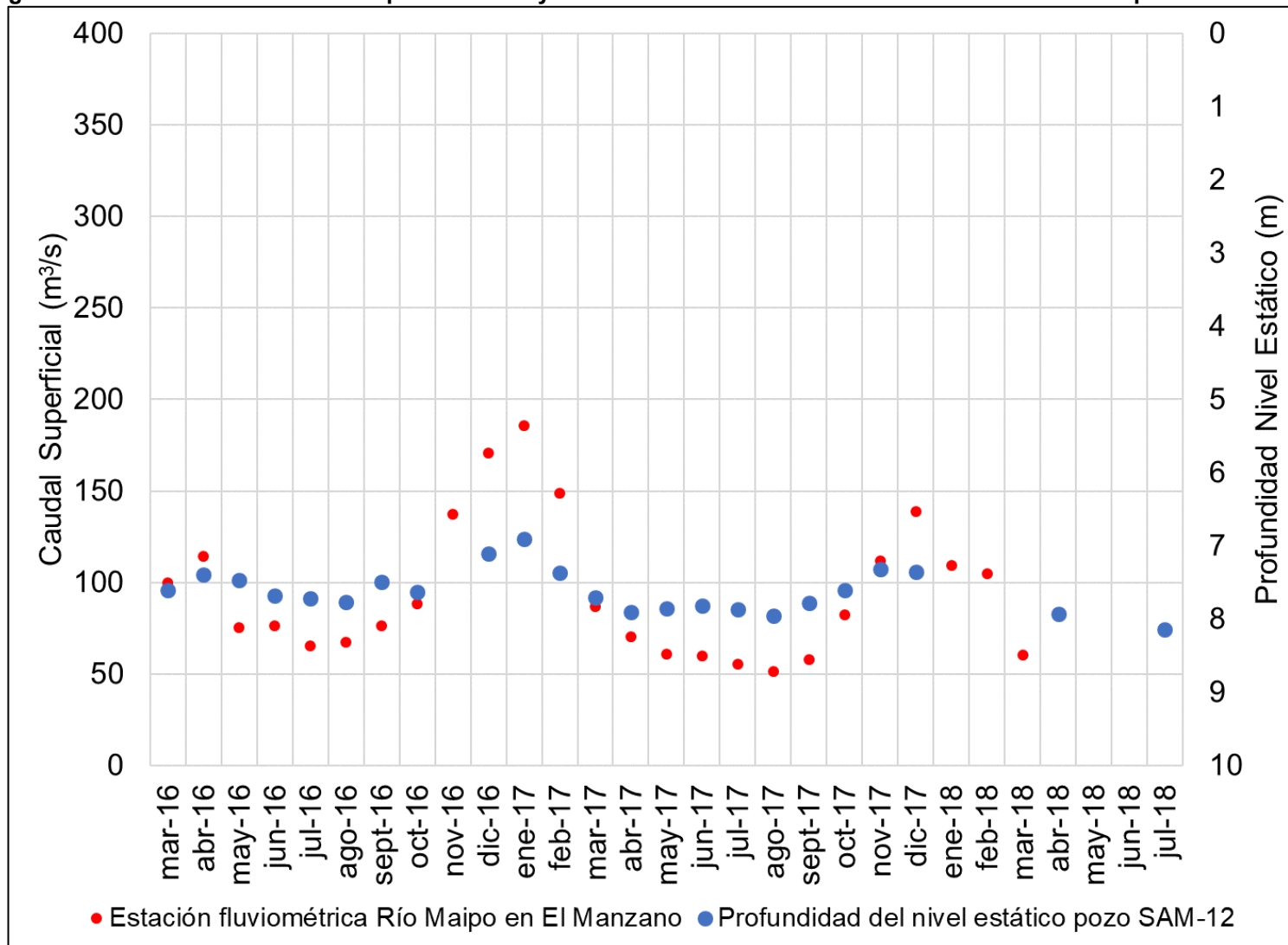
Fuente: Elaboración propia

Figura 8-5 Profundidad del nivel estático registrada en pozo SAM-12



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-6: Profundidad del nivel en pozo SAM-12 y caudal mensual medio en estación fluviométrica Maipo en El Manzano



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8-2: Información de los pozos de monitoreo PHAM dentro del dominio

Fecha	Profundidad Nivel Estático (m)					Nivel Piezométrico (msnm)				
	SAM-04	SAM-09	SAM-10	SAM-12	SAM-14	SAM-04	SAM-09	SAM-10	SAM-12	SAM-14
mar-2016	26,5	39,6	23,7	7,6	31,6	2.391,7	1.310,4	1.053,5	804,8	972,1
abr-2016			23,4	7,4	31,5			1.053,8	805,0	972,2
may-2016	21,1		23,4	7,5	31,7	2.397,1		1.053,7	804,9	972,0
jun-2016			23,1	7,7	31,5			1.054,1	804,7	972,2
jul-2016			23,3	7,7	31,5			1.053,8	804,7	972,2
ago-2016			23,2	7,8	31,6			1.054,0	804,6	972,1
sept-2016			23,9	7,5	31,5			1.053,3	804,9	972,2
oct-2016	23,9			7,6	31,1	2.394,3			804,8	972,6
nov-2016										
dic-2016	24,3		23,5	7,1	31,5	2.393,9		1.053,7	805,3	972,2
ene-2017	24,6		23,0	6,9	31,2	2.393,6		1.054,2	805,5	972,5
feb-2017	32,3			7,4	31,3	2.385,9			805,0	972,4
mar-2017	27,5		22,6	7,7	31,9	2.390,6		1.054,6	804,7	971,9
abr-2017	28,7		21,9	7,9	27,1	2.389,5		1.055,3	804,5	976,7
may-2017			23,8	7,9	31,9			1.053,3	804,6	971,9
jun-2017			23,5	7,8				1.053,7	804,6	
jul-2017			23,6	7,9				1.053,5	804,5	
ago-2017			23,7	8,0				1.053,4	804,5	
sept-2017	31,4		24,9	7,8		2.386,8		1.052,3	804,6	
oct-2017	31,3		24,0	7,6		2.386,9		1.053,2	804,8	
nov-2017	30,2		23,9	7,3	29,5	2.387,9		1.053,3	805,1	974,2
dic-2017	29,8		23,3	7,4	29,3	2.388,3		1.053,9	805,1	974,4
ene-2018										
feb-2018										
mar-2018										
abr-2018	31,2		23,2	7,9	29,9	2.386,9		1.053,9	804,5	973,8
jul-2018			23,5	8,1				1.053,7	804,3	966,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8-3: Información de los pozos monitoreados en la campaña de Julio de 2018

Nombre	Coordenadas UTM (*)		Profundidad del nivel (m)	Cota piezométrica (msnm)	Fecha medición
	Este (m)	Norte (m)			
SAM-1	385.300	6.286.760	>100 m		11-jul-18
SAM-2	380.100	6.287.340	46	1.065	11-jul-18
SCA-01A	388.131	6.290.558	>100 m		11-jul-18
SCA-03	387.560	6.290.780	>100 m		11-jul-18
SLL-01	370.454	6.286.806	11	1.050	11-jul-18
TSLL-A	380.260	6.286.363	>100 m		11-jul-18

(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

Fuente: Elaboración propia

8.4 Curvas equipotenciales y direcciones de flujo

A partir de la información de niveles descritos anteriormente, se generó un mapa de curvas equipotenciales del acuífero del relleno sedimentario. Para la definición de estas curvas, se utilizó como criterio, las siguientes condiciones:

- Cotas piezométricas estimadas en los pozos con información de nivel de aguas en rellenos sedimentarios de Maipo, Colorado y Yeso, descritos en los acápite anteriores del presente capítulo.
- Contorno del contacto unidad de roca y del relleno sedimentario, que define un contraste de tres órdenes de magnitud de los valores de permeabilidad entre ambas unidades hidrogeológicas.
- Nivel de agua subterránea cercana a la topografía en el eje de los cauces de los ríos Maipo, río Colorado, río Yeso y río Volcán, considerando que por la interacción río-acuífero, el nivel intercepta la superficie.

Es importante señalar que se consideró que, dentro del sistema hidrogeológico de estudio, no existe una explotación importante del acuífero, de manera que es posible considerar que se encuentra en relativo equilibrio. De esta forma, aquellas mediciones de la profundidad del nivel registradas años anteriores, se pueden considerar como representativas del sistema actual.

En la Tabla 8-4 se presenta la información utilizada para la generación de las curvas equipotenciales. En total se cuenta con 20 registros de niveles de agua subterránea, distribuidos a lo largo del dominio. Para los pozos de derechos de agua obtenidos desde los expedientes de la DGA, se consideró el nivel registrado durante la prueba de bombeo, mientras que para los pozos de monitoreo mensual se consideró el nivel promedio de la serie histórica. En la Figura 8-7 se presentan las curvas equipotenciales definidas a partir de la información mencionada.

Como se observa de las curvas equipotenciales, existe una relación directa con el sistema de drenaje de los cauces principales presentes en el área de estudio. Las direcciones de flujo coinciden con el escurrimiento superficial de los cauces mayores, en el relleno del río Maipo y Volcán se observa un flujo que va desde el sector este hacia el noroeste, mientras que para el relleno sedimentario del río Colorado y Yeso, el flujo subterráneo va desde noreste hacia suroeste.

En el sector del río Maipo entre la confluencia con el Yeso y el Colorado, se observa un gradiente hidráulico bajo de 1% en promedio. Del mismo modo, en el acuífero del río Yeso, se observa un gradiente hidráulico fuerte, con valores de, aproximadamente, un 6 % en promedio. Para el sector acuífero asociado al relleno sedimentario del río Colorado, se observa un gradiente hidráulico de 2% mientras que para el río Volcán es de un 3% aproximadamente.

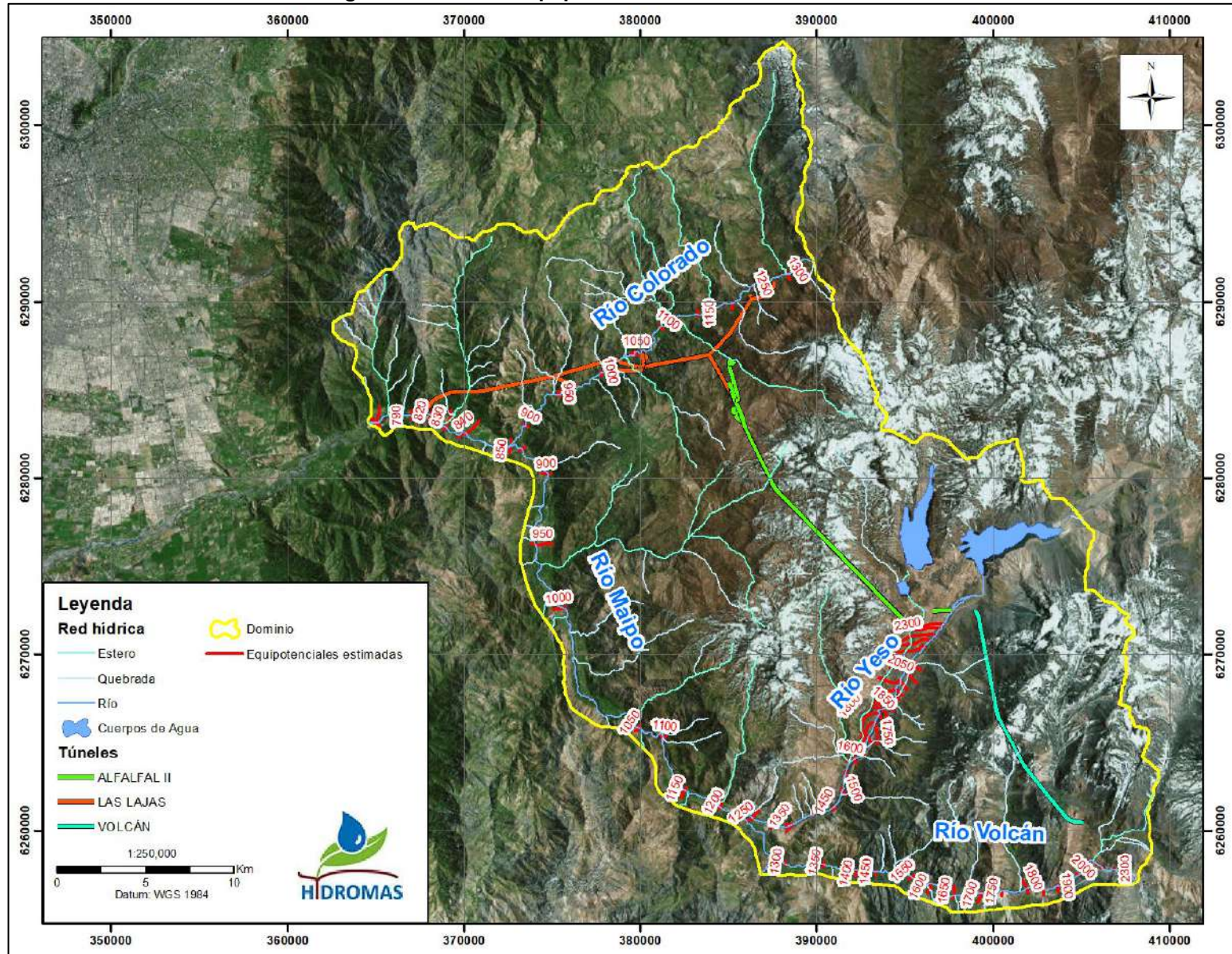
Tabla 8-4: Fuente de Registros de Profundidad del Nivel Estático para Generación de Curvas

Nombre	Fuente	Coordenadas UTM (*)		Cota de Terreno (msnm)	Profundidad del Nivel Freático (m)	Cota Piezométrica (msnm)
		Este (m)	Norte (m)			
ND-1302-314	DGA, 2018	372.364	6.282.031	911	67	844
ND-1302-183	DGA, 2018	365.121	6.283.729	830	42	788
ND-1302-182	DGA, 2018	364.975	6.283.898	840	55	785
ND-1302-175	DGA, 2018	369.409	6.283.210	874	42	832
ND-1302-153	DGA, 2018	381.403	6.263.834	1.171	26	1.145
ND-1302-156	DGA, 2018	373.098	6.281.706	880	13	867
ND-1302-151	DGA, 2018	371.064	6.283.094	921	77	844
ND-1302-80	DGA, 2018	374.228	6.276.426	950	8	942
ND-1302-130	DGA, 2018	373.628	6.281.481	931	45	886
ND-1302-22	DGA, 2018	369.685	6.282.961	880	51	830
ND-1302-221	DGA, 2018	364.322	6.282.800	786	11	775
ND-1302-217	DGA, 2018	374.298	6.276.425	954	8	946
ND-1302-217	DGA, 2018	374.284	6.276.426	952	7	945
SAM04	PHAM, 2018	395.194	6.271.931	2.418	28	2.391
SAM09	PHAM, 2018	383.073	6.288.379	1.350	40	1.310
SAM10	PHAM, 2018	380.114	6.287.110	1.077	24	1.054
SAM12	PHAM, 2018	367.966	6.283.661	812	8	805
SAM14	PHAM, 2018	378.038	6.286.172	1.004	31	973
SAM02	PHAM, 2018	380.100	6.287.340	1.110	46	1.065
SLL-01	PHAM, 2018	370.454	6.286.806	1.060	11	1.050

(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

Fuente: Elaboración propia

Figura 8-7: Curvas Equipotenciales definidas en el dominio



Fuente: Elaboración propia

9 CAUDAL AFLORADO DESDE TÚNELES

El proyecto PHAM considera un total de aproximadamente 55 km de túneles hidráulicos que conducirán el agua para la generación eléctrica. Estos se dividen en tres tramos correspondientes a las dos centrales del proyecto, estos son: Túnel Las Lajas, Alfalfal y Volcán.

A medida que se avanza en la construcción de los túneles, se registran afloramientos de agua al interior de estos, según lo presentado en el Anexo 3 y a reportes propios de PHAM, estos afloramientos se deben a la presencia de lineamientos geológicos que conectan el túnel con otros sectores. Las aguas afloradas son conducidas por tuberías hacia el exterior de cada portal, en donde son tratadas y devueltas al río.

En los portales de los túneles se cuenta con flujómetros volumétricos que registran el caudal aflorado desde el interior de éstos, de manera que es posible obtener una estimación del caudal total de agua aflorada de cada túnel a medida que se progresa en el avance de excavación. En la Tabla 9-1 se presenta un resumen con los caudales medios del primer semestre del año 2018 medido en cada portal.

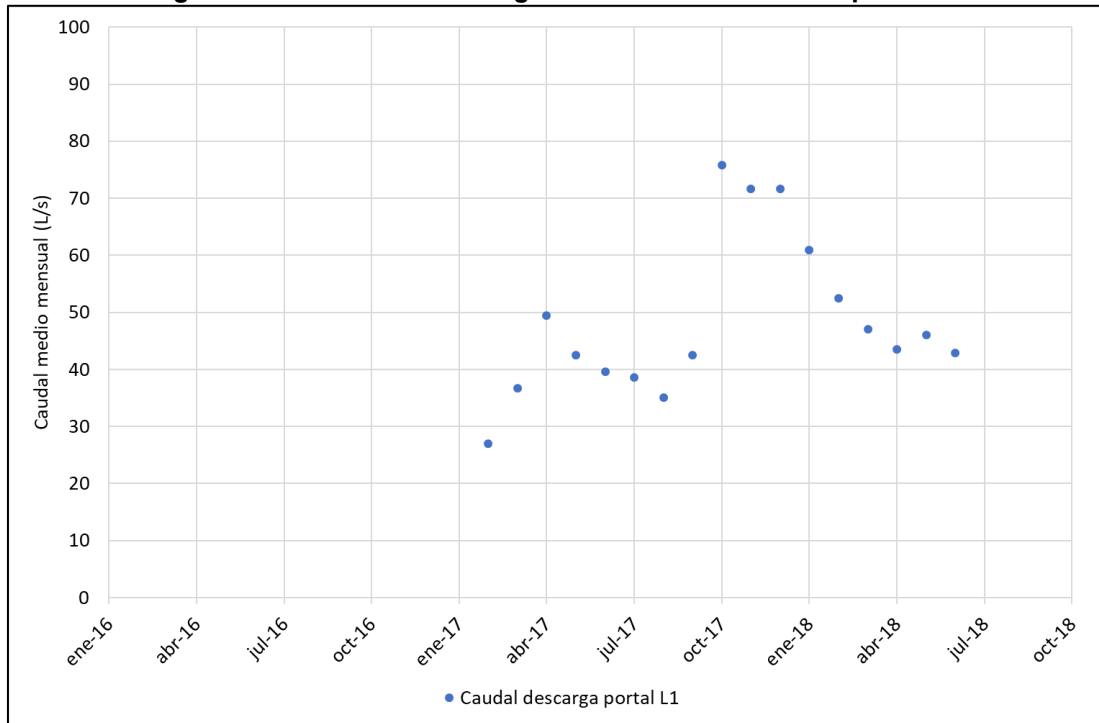
En las Figura 9-1 a 9-9 se presentan las series temporales de caudal medio mensual de afloramiento registrado en los portales de los túneles del PHAM.

Tabla 9-1: Caudales medios del año 2018 medidos en la salida de los portales

Portal	Caudal 2018 (L/s)
V1	9
V5	7
VA1	1
VA2	4
VA4	5
L1	45
VL-4	66
VL-5	13
VL7	2
Total	152

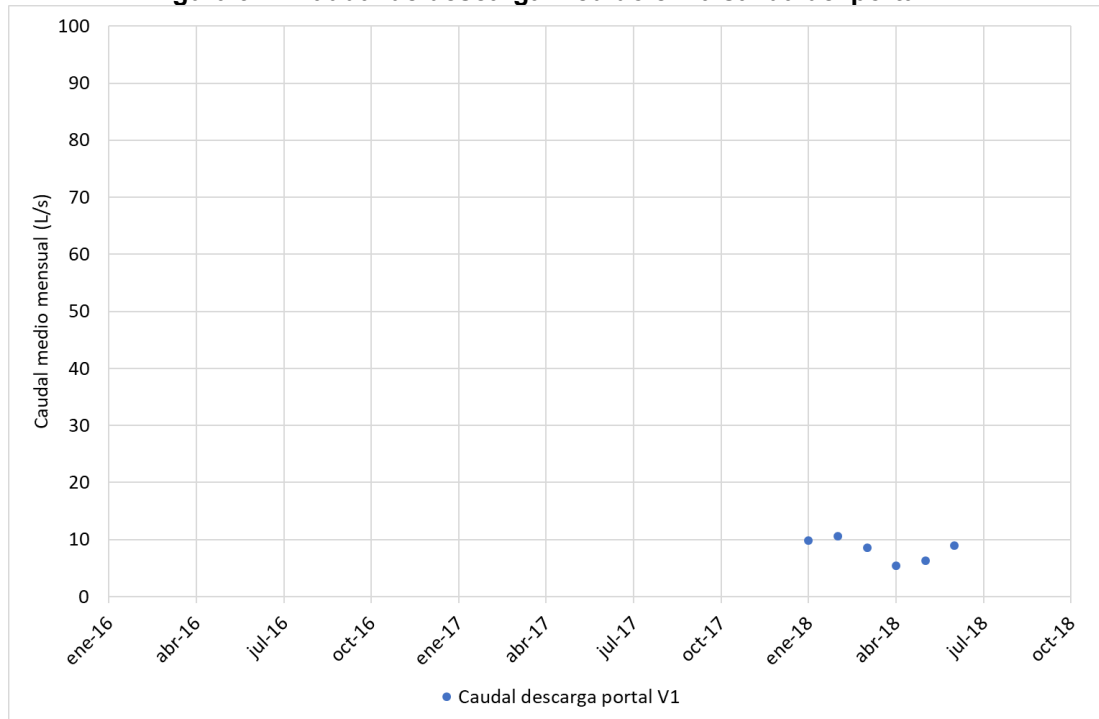
Fuente: Elaboración propia

Figura 9-1: Caudal de descarga medido en la salida del portal L1



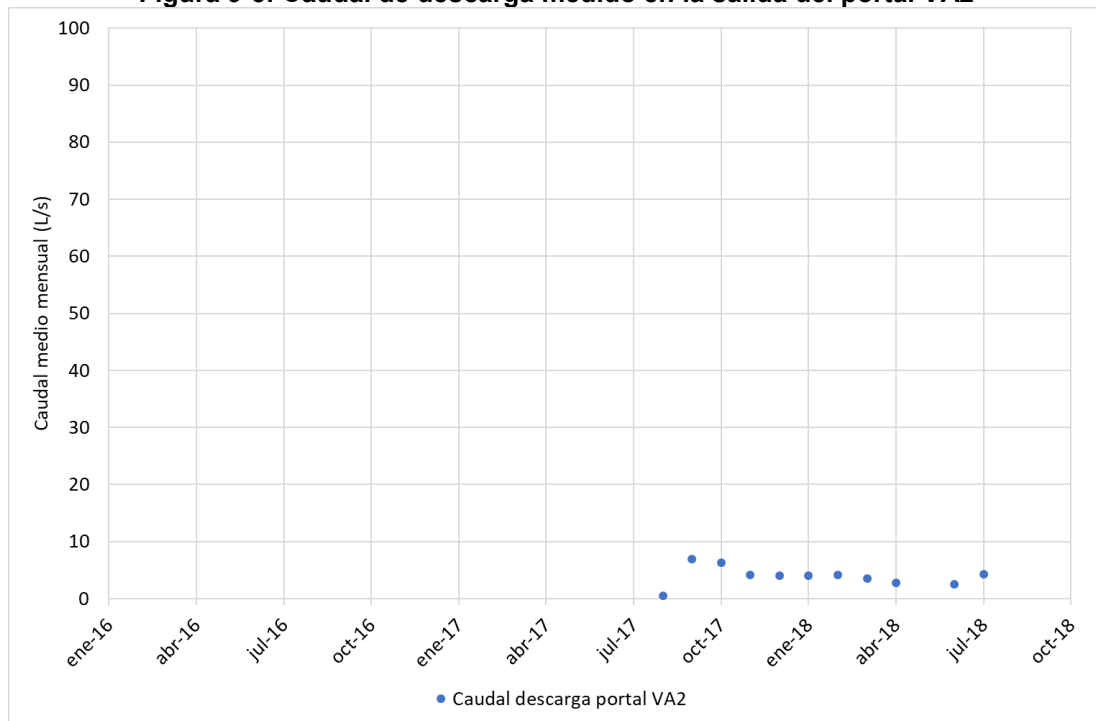
Fuente: Elaboración propia

Figura 9-2: Caudal de descarga medido en la salida del portal V1



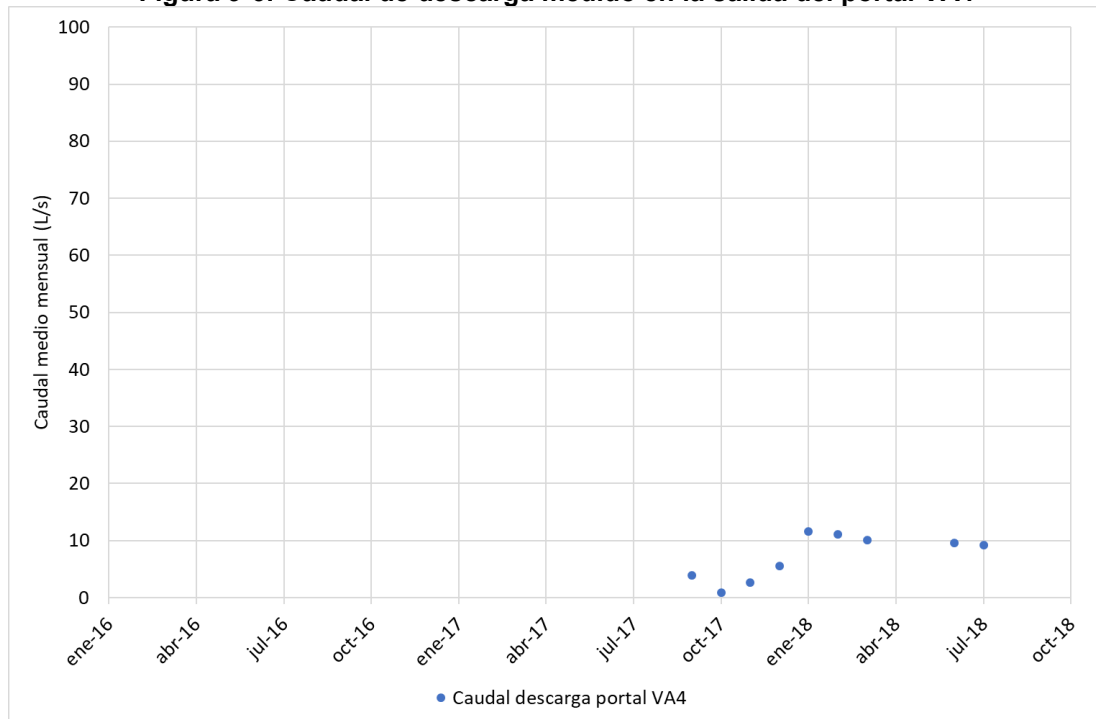
Fuente: Elaboración propia

Figura 9-5: Caudal de descarga medido en la salida del portal VA2



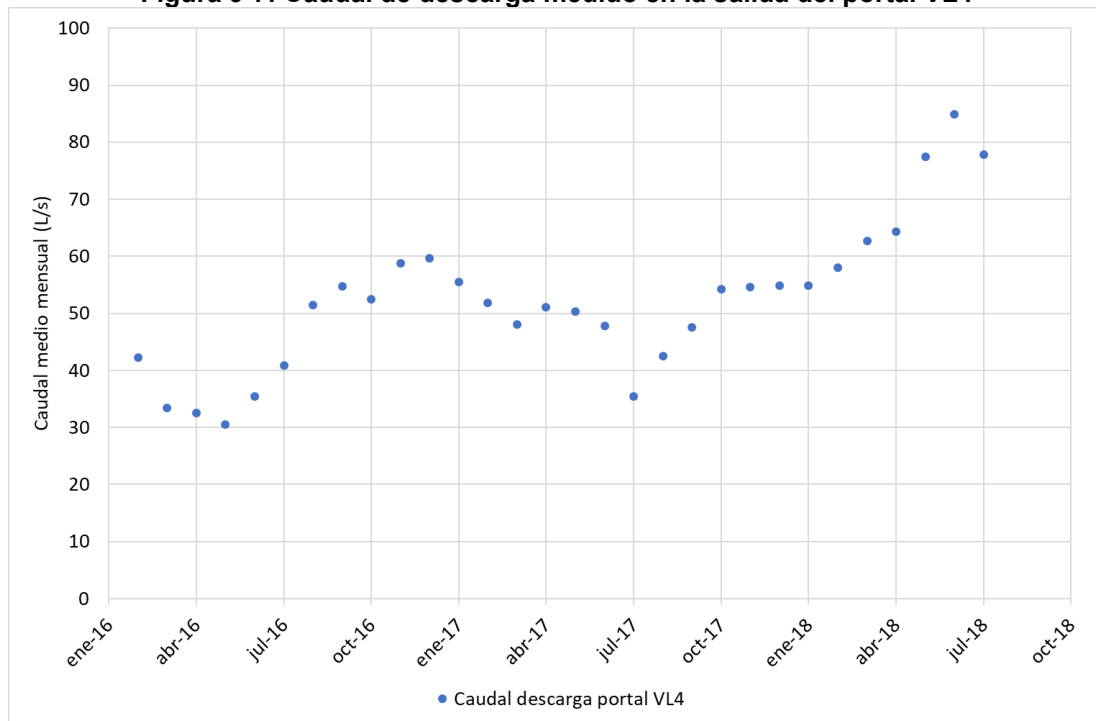
Fuente: Elaboración propia

Figura 9-6: Caudal de descarga medido en la salida del portal VA4



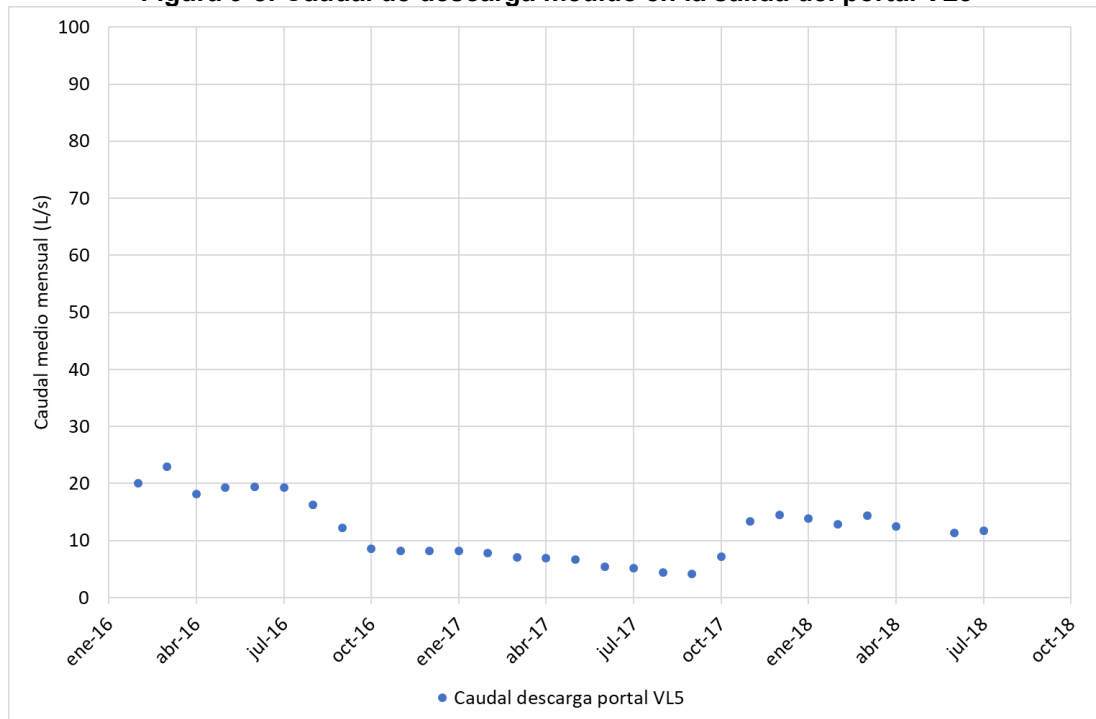
Fuente: Elaboración propia

Figura 9-7: Caudal de descarga medido en la salida del portal VL4



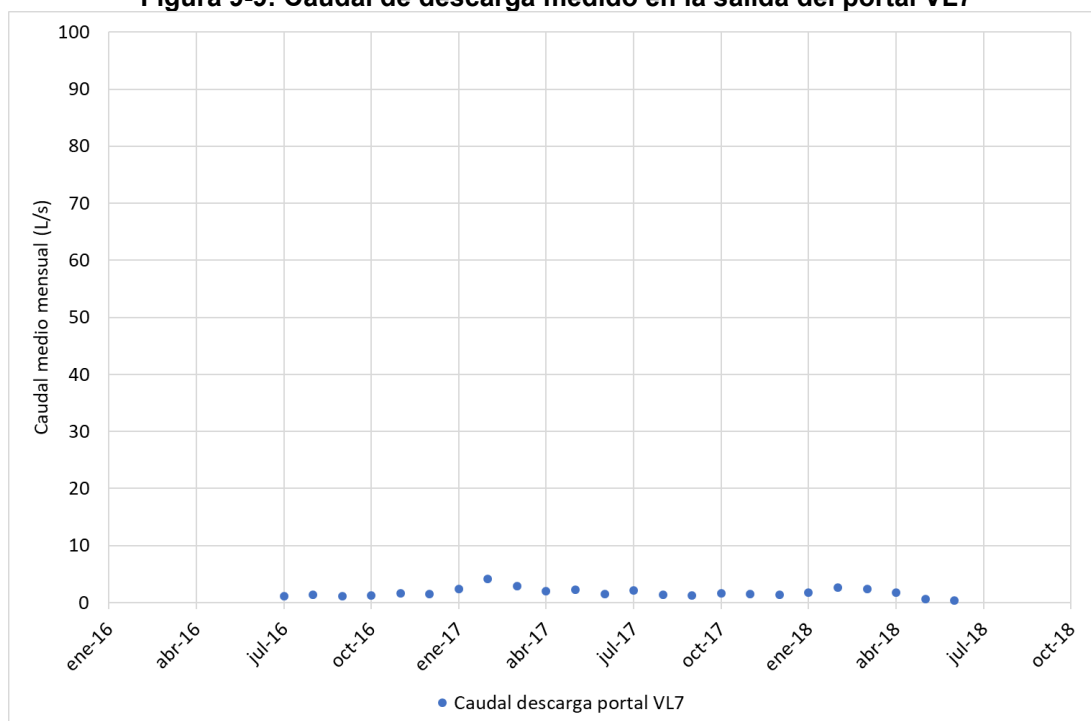
Fuente: Elaboración propia

Figura 9-8: Caudal de descarga medido en la salida del portal VL5



Fuente: Elaboración propia

Figura 9-9: Caudal de descarga medido en la salida del portal VL7



Fuente: Elaboración propia

10 COMENTARIOS

Del análisis realizado en el presente documento se desprende una caracterización hidrogeológica del Área de Estudio, basada, principalmente, en el análisis de ensayos hidráulicos en sondajes, la litología observada de los mismos y el análisis interpretativo de estudios geofísicos.

En particular, se evidencia la presencia de información y se constata el respectivo análisis en detalle para los sectores de los tramos VL5, VL4, L1, VA2 y VL8. Dichos sectores presentan un mayor nivel de detalle y por ende el modelo que se propone tendrá mayor precisión en sus resultados.

El análisis realizado de los ensayos hidráulicos enfatizó, primordialmente, la distribución de registros de permeabilidad en el área de estudio, por lo cual se optó por una metodología estadística para su análisis, representado a través de la definición de cuartiles para las distintas unidades geológicas identificadas. Se observó la presencia predominante de Rocas (Andesíticas, Volcanoclásticas e Intrusivas), seguida por la presencia de Relleno Sedimentario.

El Relleno Sedimentario es el miembro geológico que presentó mayores permeabilidades, al ser un depósito no consolidado. A su vez, el Relleno Sedimentario, junto con las Rocas Intrusivas, se encontraron a profundidades menores a 100 m, mientras que las Rocas Andesíticas y Volcanoclásticas se encontraron a distintas profundidades, aumentando su frecuencia a medida que aumentaba la profundidad.

Al analizar la permeabilidad de las rocas en profundidad, se concluye que para las Rocas de tipo Volcanoclásticas y Andesitas, la permeabilidad disminuye a medida que aumenta la profundidad. Esta definición se respalda con los resultados obtenidos de los estudios geofísicos.

Mediante el análisis de las permeabilidades, tanto en dos dimensiones como en profundidad, se definieron unidades hidrogeológicas en el sistema, respaldados por los ensayos hidráulicos, estudios geológicos y geofísicos.

APÉNDICE C

1 ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

La recopilación de antecedentes concernientes a la realización de pruebas de bombeo dentro del Área de Estudio (esta última delimitada por el dominio del modelo) corresponden a una única fuente:

- **Pruebas de Bombeo de Pozos con Derechos Concedidos (DGA, 2018)**

Catastro DGA de pozos con derechos constituidos, donde se cuenta con información de 7 expedientes con detalles de las pruebas de bombeo. Los pozos se ubican en el relleno sedimentario del acuífero del río Maipo. Se reanalizaron solo aquellas pruebas de gasto constante, consideradas como más confiables que aquellas de gasto variable.

La ubicación de los pozos con derechos concedidos, y donde se realizaron las respectivas pruebas de bombeo en el marco de su solicitud de derecho de aprovechamiento se detalla en la Figura C-1, mientras que la Tabla C-1 identifica cada uno de los pozos con su respectivo nombre de expediente de ingreso en la DGA y ubicación.

Tabla C-1: Pozos con información de Pruebas de Bombeo

Nombre	Coordenadas UTM (*)	
	Este	Norte
	(m)	(m)
ND-1302-153	381.403	6.263.834
ND-1302-156	373.098	6.281.706
ND-1302-175	369.409	6.283.210
ND-1302-176	370.567	6.283.177
ND-1302-183	365.121	6.283.729
ND-1302-22	369.685	6.282.961
ND-1302-80	374.228	6.276.426

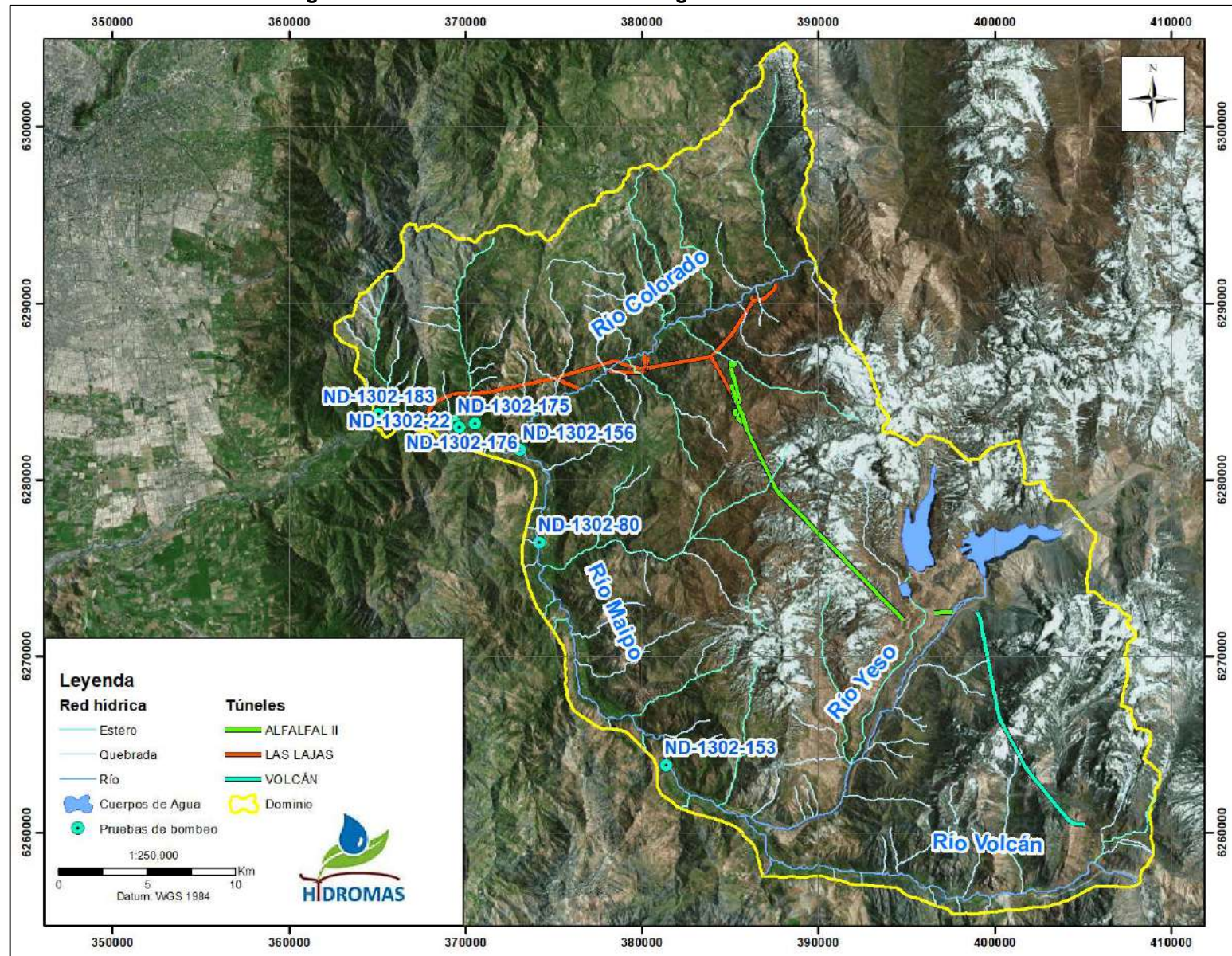
(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

En cuanto a la metodología empleada para el análisis de cada una de las pruebas de bombeo, se detalla en los acápite anteriores, la aplicación de soluciones de uso común y en base a procedimientos de superposición con la ayuda del software *Aquifer Test* 2016.1. Las soluciones empleadas, y según la disponibilidad de información de cada punto de estudio, fueron:

- Theis
- Theis con corrección de Jacob
- Neuman

La descripción de cada una de las metodologías se detalla en la formulación dispuesta en el software mencionado. Dicha formulación se expone en el “*User’s Manual, Aquifer Test Pro 2016.1*” (Waterloo Hydrogeologic, 2016).

Figura C-1: Ubicación de Pozos con registro de Prueba de Bombeo



Fuente: Elaboración propia

2 DESARROLLO Y ANÁLISIS DE PRUEBAS

2.1 Aspectos Generales

Como se ha mencionado, las pruebas de bombeo en los pozos de interés fueron desarrolladas en el marco de su solicitud de derecho de aprovechamiento. Los registros durante dichas pruebas fueron recopilados a partir de los expedientes existentes y facilitados por la Dirección General de Aguas (DGA). Los 7 pozos con los que se cuenta información de su respectiva prueba de bombeo se ubican en el valle central correspondiente al río Maipo, en el relleno sedimentario de dicho sector. De éstos, 4 se ubican aguas abajo de la confluencia con el río Colorado, mientras que los 3 restantes se hallan entre las confluencias del río Colorado y el río Yeso. En la Tabla C-2 se exponen especificaciones en cuanto a la realización de las pruebas.

Tabla C-2: Información en cuanto a la realización de pruebas de bombeo

Código DGA	Coordenadas UTM (*)		Fecha de realización	Duración bombeo	Duración Recuperación	Caudal ensayado	Espesor
	Este	Norte					
	(m)	(m)					
ND-1302-153	381.403	6.263.834	10-03-2001	24,0	0,4	0,3	10
ND-1302-156	373.098	6.281.706	s.i.	24,0	s.i.	10,0	100
ND-1302-175	369.409	6.283.210	s.i.	s.i.	2,0	7,0	100
ND-1302-176	370.567	6.283.177	s.i.	s.i.	2,0	5,5	100
ND-1302-183	365.121	6.283.729	31-07-2004	24,0	2,0	1,4	39
ND-1302-22	369.685	6.282.961	15-02-1990	24,0	0,6	3,7	61
ND-1302-80	374.228	6.276.426	26-01-1995	12,0	0,8	24,0	25
ND-1302-80	374.228	6.276.426	20-11-2001	24,0	2,5	24,9	25

s.i. : Sin Información

(*) Coordenadas UTM Datum WGS84, Huso 19S

Fuente: Elaboración propia

La realización de las pruebas difiere bastante temporalmente y se definen a partir del proceso de constitución de derechos para cada caso en particular. La recopilación de los registros estuvo condicionada primordialmente a la disponibilidad de información, y en cuyo proceso, se enfatizó en la información que respecta a las pruebas de bombeo de gasto constante debido a su mayor confiabilidad para la estimación de los parámetros hidrogeológicos. Aun así, las pruebas de gasto constante difieren en la duración de la etapa de bombeo, variando entre 12 y 24 horas, mientras que el registro de la etapa de recuperación una vez detenido el bombeo varía en un rango de 0,4 a 2,5 horas.

En cuanto a la definición del espesor saturado asumido para el análisis de la permeabilidad del acuífero difiere en cada caso y según la disponibilidad de información que contenga el respectivo expediente consultado. En el caso del pozo ND-1302-153 se asumió un espesor saturado definido a partir de la diferencia entre la profundidad del pozo con el nivel estático. Por otro lado, en los pozos ND-1302-183, ND-1302-22 y ND-1302-80, se asumió el espesor del relleno sedimentario, descontando el espesor de las unidades de roca, en base a información estratigráfica. Por último, en el caso de los pozos ND-1302-156, ND-1302-175 y ND-1302-176, no se cuenta con información estratigráfica de los sondajes, por lo que se asumió un valor medio del espesor del relleno sedimentario. Dicho espesor es definido en el punto de “Estudios Hidrogeológicos” del presente Anexo, en específico en el análisis de los estudios geofísicos realizados en el Área de Estudio.

En los acápite posteriores se detalla, para cada uno de los pozos, el desarrollo de las pruebas de bombeo de gasto constante realizadas y en función de los registros extraídos de los expedientes, para luego detallar el análisis de las mismas y la definición de los parámetros hidrogeológicos de permeabilidad.

2.2 Pozo ND-1302-153

En cuanto a la prueba de bombeo de gasto constante en el pozo ND-1302-153 se evidenció una duración del bombeo de 24 horas, mientras que se cuenta con 0,4 horas de registros tras detenido el bombeo. El desarrollo de la prueba es graficado en la Figura C-2, la cual detalla la evolución temporal de la prueba diferenciando en las etapas de bombeo y recuperación.

En cuanto al análisis, se emplearon la solución de Theis, Theis con corrección de Jacob (abreviada como Theis c/Jacob), y Neuman. Las metodologías fueron empleadas para cada etapa de la prueba, ya sea de bombeo y de recuperación. Los resultados obtenidos para la Transmisibilidad (T) y Conductividad Hidráulica (k) se detallan en la Tabla C-3, mientras que en las Figuras C-3 a C-5, se detalla la superposición de la curva teórica de descenso con los registros observados para cada una de las metodologías empleadas. La Figura C-3 detalla el empleo de las metodologías de análisis para la primera mitad de la etapa de bombeo, mientras que la Figura C-4 las detalla para la segunda mitad de la etapa de bombeo y, por último, la Figura C-5 expone dichas metodologías para la etapa de recuperación de la prueba.

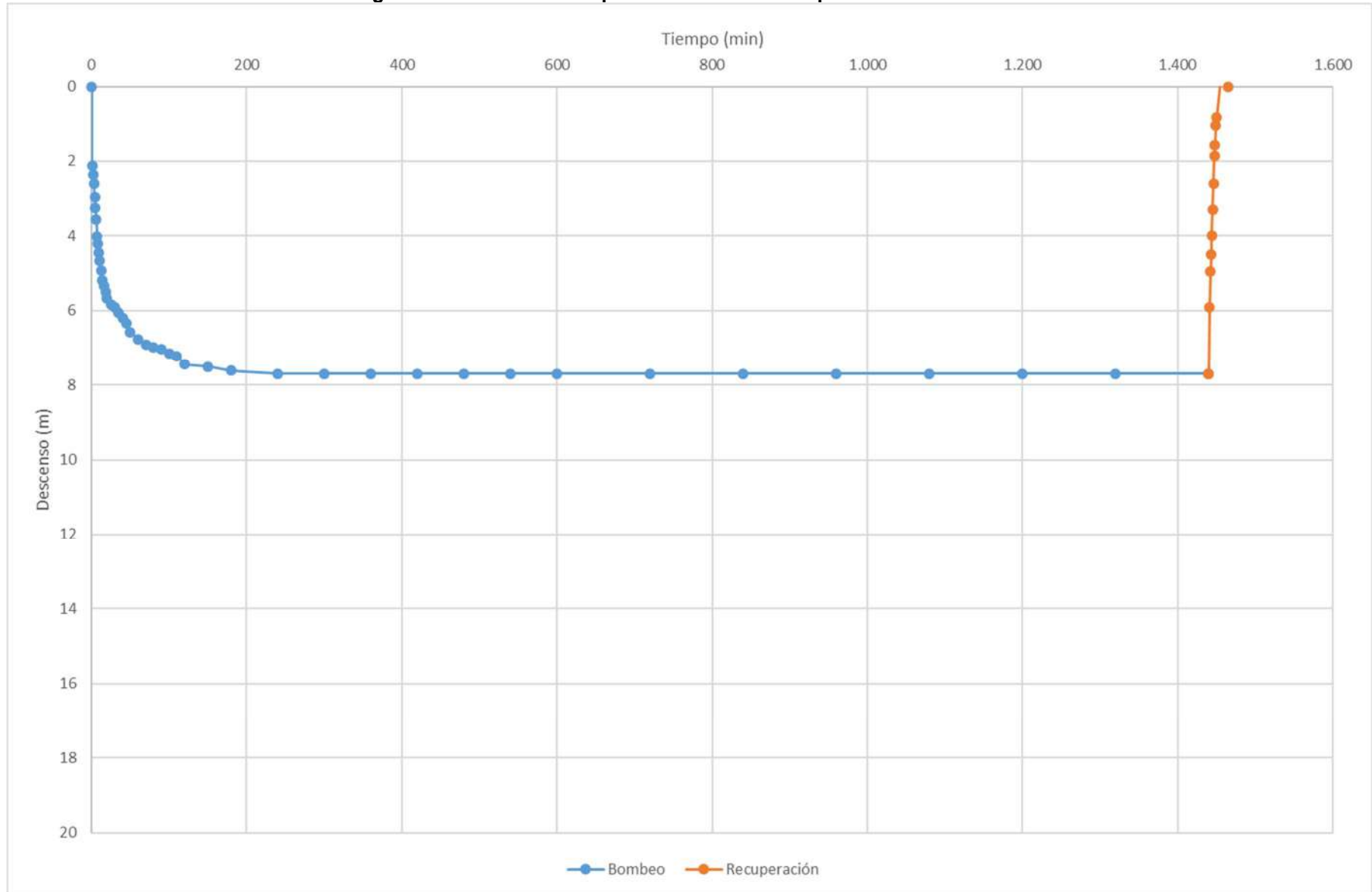
El análisis realizado para el pozo ND-1302-153, y en base a las distintas metodologías, tuvo como resultado un valor promedio de 5,03 m²/d para la transmisibilidad, y de 0,50 m/d para la conductividad hidráulica.

Tabla C-3: Resultados de permeabilidad en pozo ND-1302-153

Metodología	Etapas	T	k
		(m ² /d)	(m/d)
Theis	Bombeo (Inicio)	1,69	0,17
Theis c/Jacob	Bombeo (Inicio)	4,15	0,42
Neuman	Bombeo (Inicio)	1,08	0,11
Theis	Bombeo (Final)	9,65	0,97
Theis c/Jacob	Bombeo (Final)	16,00	1,60
Neuman	Bombeo (Final)	9,66	0,97
Theis	Recuperación	0,84	0,08
Theis c/Jacob	Recuperación	1,32	0,13
Neuman	Recuperación	0,84	0,08
Promedio		5,03	0,50

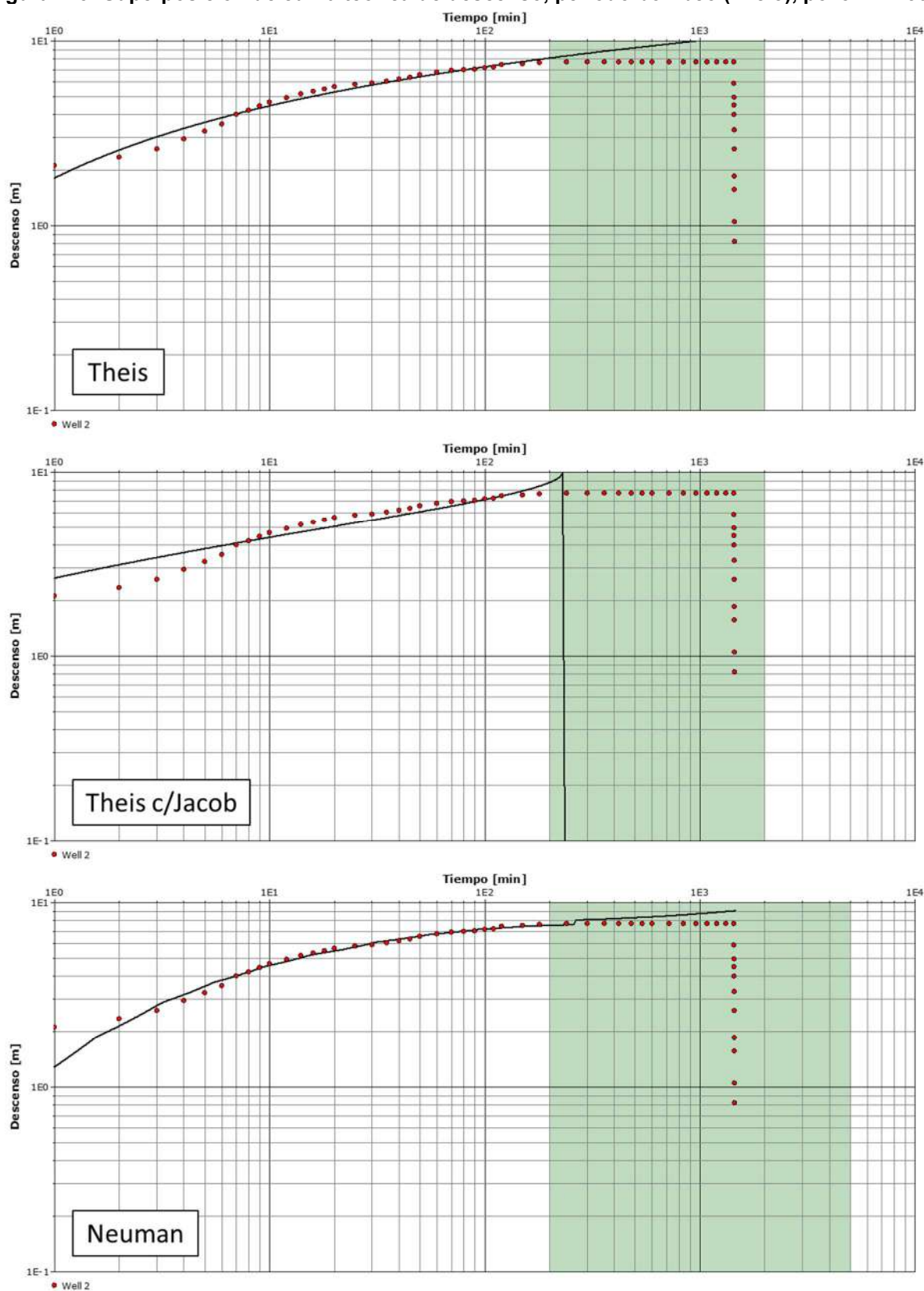
Fuente: Elaboración propia

Figura C-2: Desarrollo de prueba de bombeo en pozo ND-1302-153



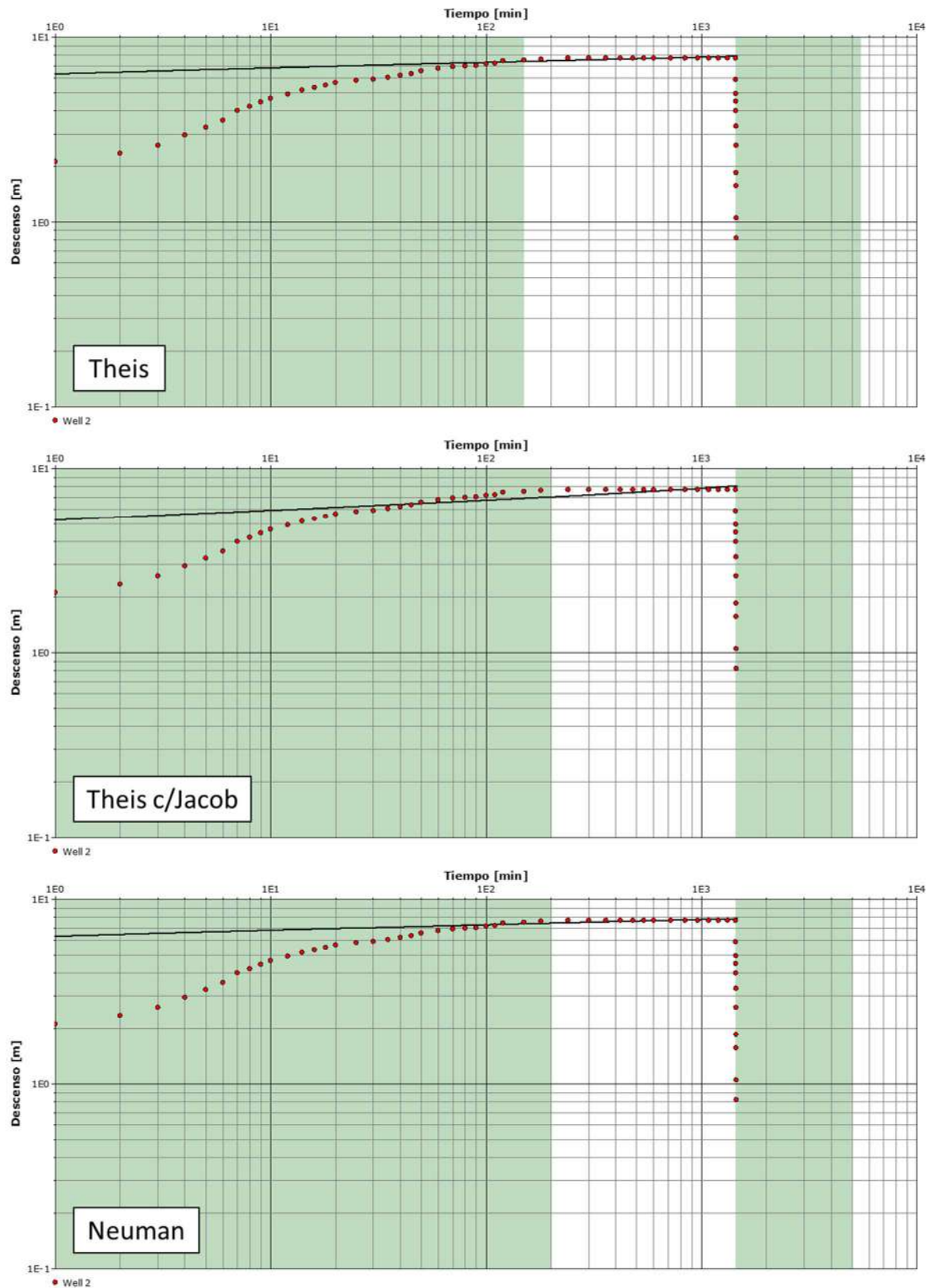
Fuente: Elaboración propia

Figura C-3: Superposición de curva teórica de descenso, período bombeo (inicio), pozo ND-1302-153



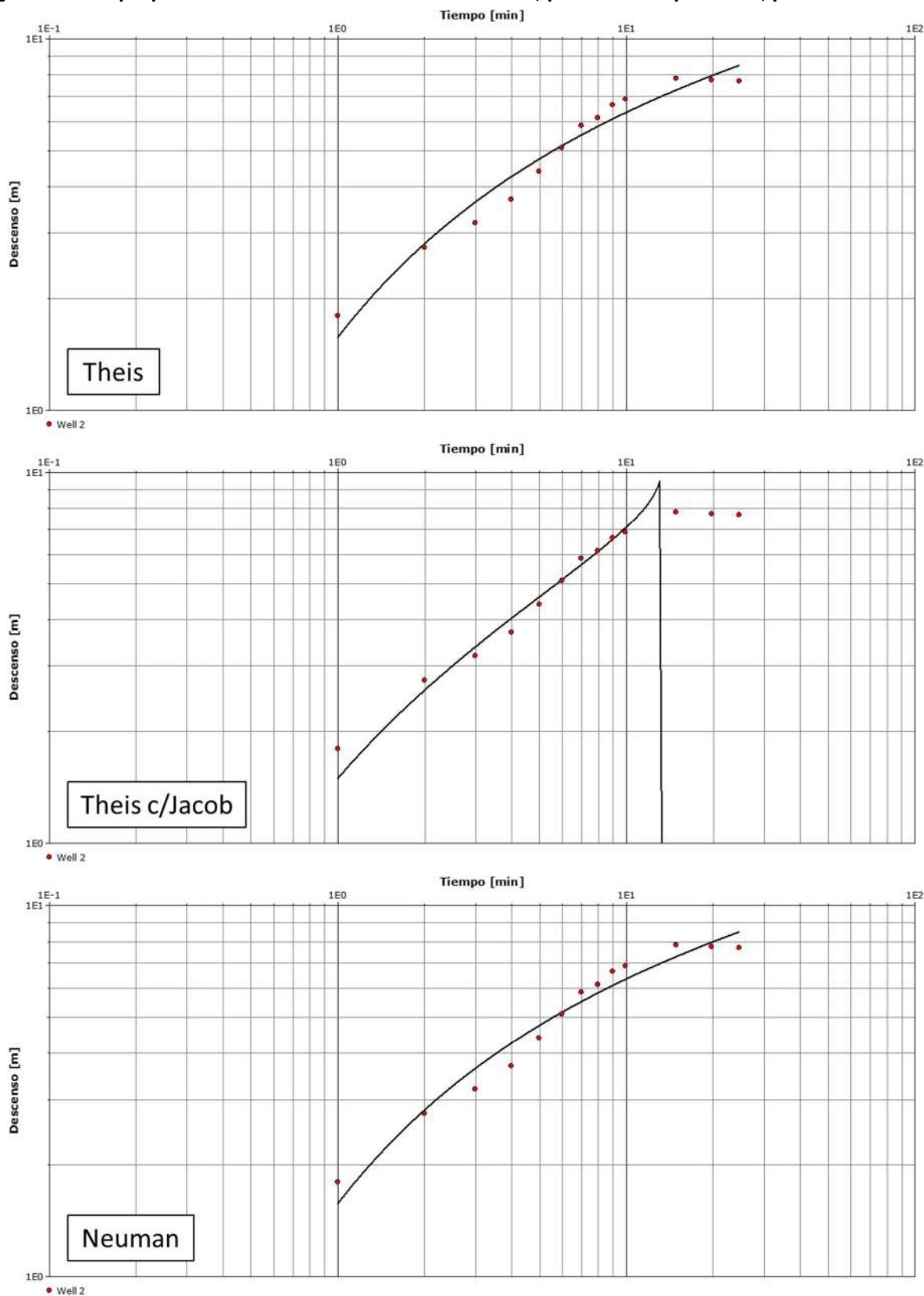
Fuente: Elaboración propia

Figura C-4: Superposición de curva teórica de descenso, período bombeo (final), pozo ND-1302-153



Fuente: Elaboración propia

Figura C-5: Superposición de curva teórica de descenso, período recuperación, pozo ND-1302-153



Fuente: Elaboración propia

2.3 Pozo ND-1302-156

En cuanto a la prueba de bombeo de gasto constante en el pozo ND-1302-156 se evidenció una duración del bombeo de 24 horas, mientras que, con respecto a la etapa de recuperación, no se cuenta con registros tras detenido el bombeo. El desarrollo de la prueba es graficado en la Figura C-6, la cual detalla la evolución temporal de la prueba para la etapa de bombeo.

En cuanto al análisis, se empleó la solución de Theis. La metodología fue empleada para la etapa de bombeo, que es la etapa con la cual se cuenta con registros. Los resultados obtenidos para la Transmisibilidad (T) y Conductividad Hidráulica (k) se detallan en la Tabla C-4, mientras que en la Figura C-7 se detalla la superposición de la curva teórica de descenso con los registros observados para la metodología empleada.

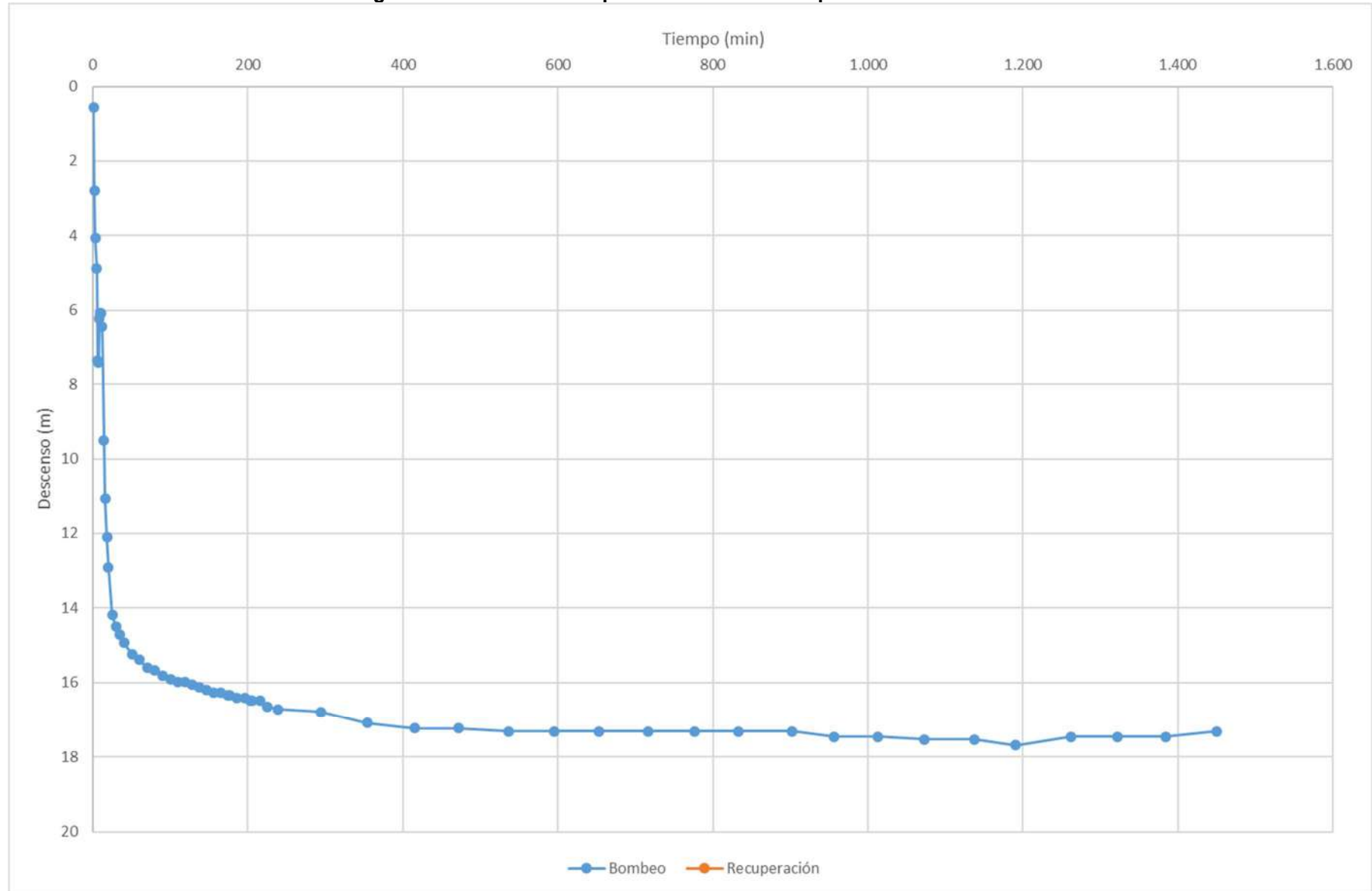
El análisis realizado para el pozo ND-1302-153, y en base a la metodología empleada, tuvo como resultado un valor de 14,00 m²/d para la transmisibilidad, y de 0,14 m/d para la conductividad hidráulica.

Tabla C-4: Resultados de permeabilidad en pozo ND-1302-156

Metodología	Etapa	T	k
		(m ² /d)	(m/d)
Theis	Bombeo	14,00	0,14

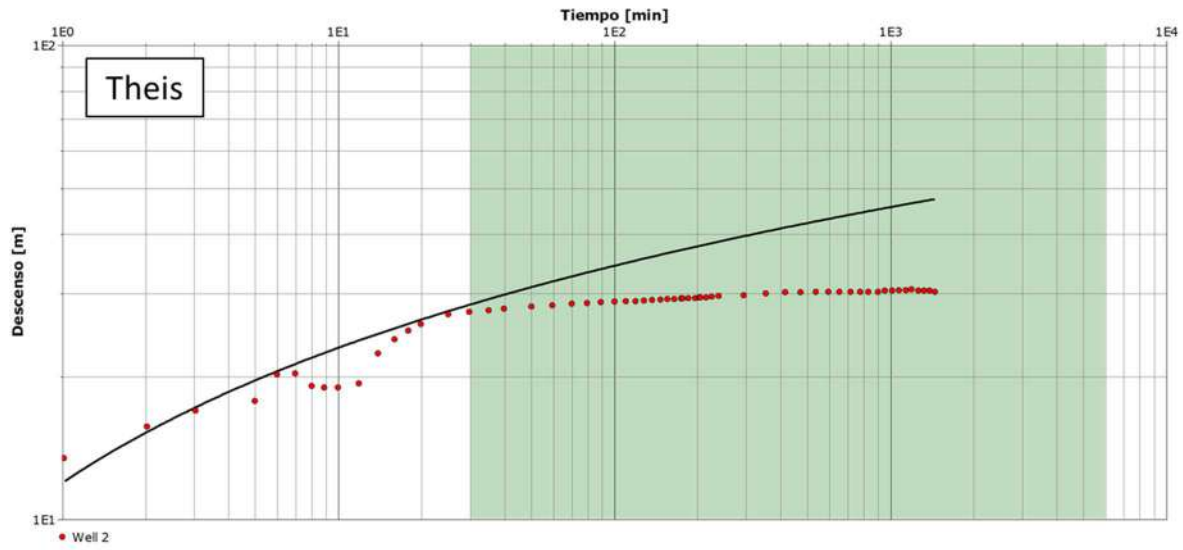
Fuente: Elaboración propia

Figura C-6: Desarrollo de prueba de bombeo en pozo ND-1302-156



Fuente: Elaboración propia

Figura C-7: Superposición de curva teórica de descenso, período bombeo, pozo ND-1302-156



Fuente: Elaboración propia

2.4 Pozo ND-1302-175

En cuanto a la prueba de bombeo de gasto constante en el pozo ND-1302-175 no se cuentan con registros de la etapa de bombeo, mientras que, con respecto a la etapa de recuperación, se constató un período de registro de 2 horas tras detenido el bombeo. El desarrollo de la prueba es graficado en la Figura C-8, la cual detalla la evolución temporal de la prueba para la etapa de recuperación.

En cuanto al análisis, se empleó la solución de Theis. La metodología fue empleada para la etapa de recuperación, que es la etapa con la cual se cuenta con registros. Los resultados obtenidos para la Transmisibilidad (T) y Conductividad Hidráulica (k) se detallan en la Tabla C-5, mientras que en la Figura C-9 se detalla la superposición de la curva teórica de descenso con los registros observados para la metodología empleada.

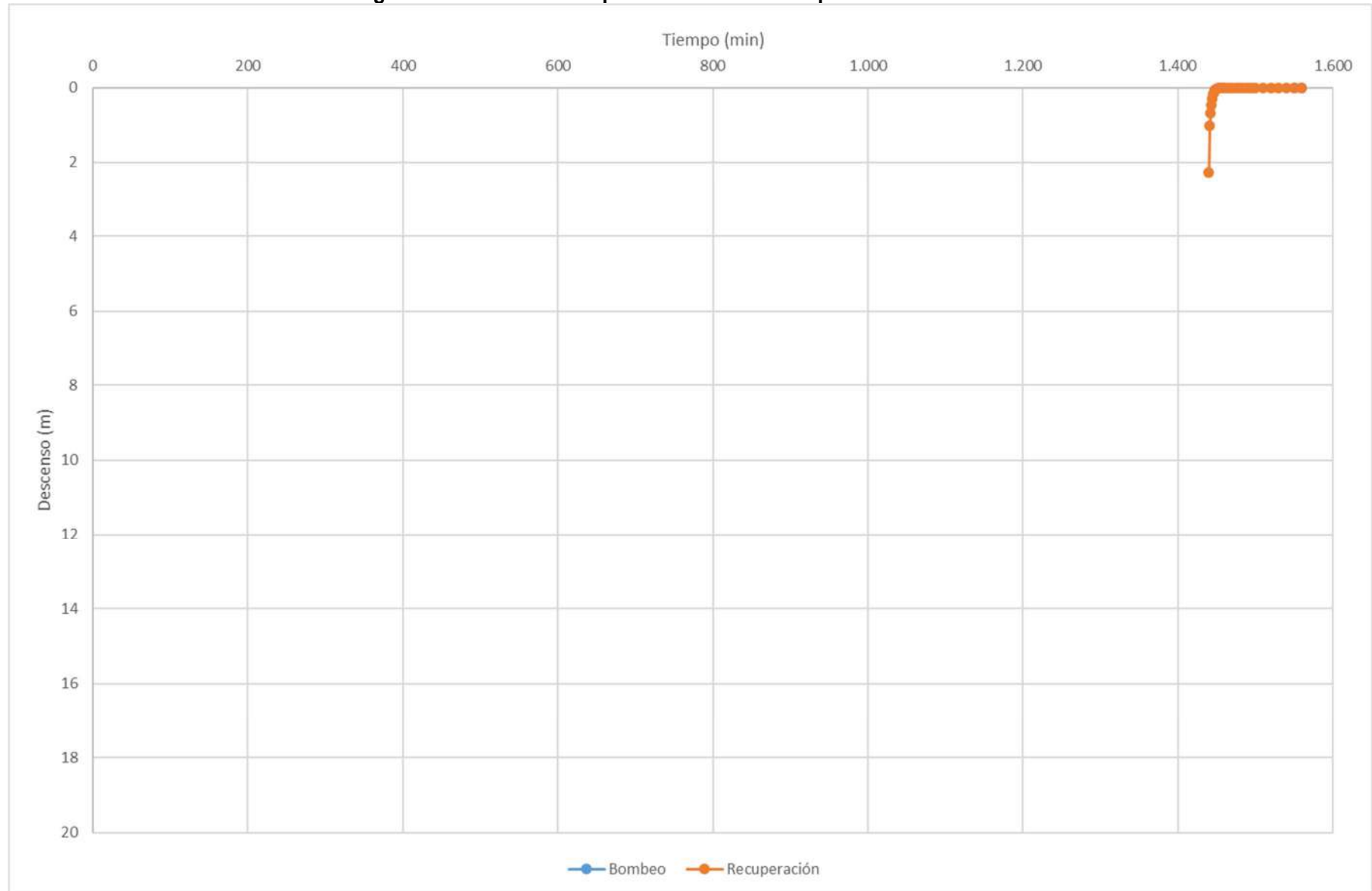
El análisis realizado para el pozo ND-1302-175, y en base a la metodología empleada, tuvo como resultado un valor de 90,00 m²/d para la transmisibilidad, y de 0,90 m/d para la conductividad hidráulica.

Tabla C-5: Resultados de permeabilidad en pozo ND-1302-175

Metodología	Etapa	T	k
		(m ² /d)	(m/d)
Theis	Recuperación	90,00	0,90

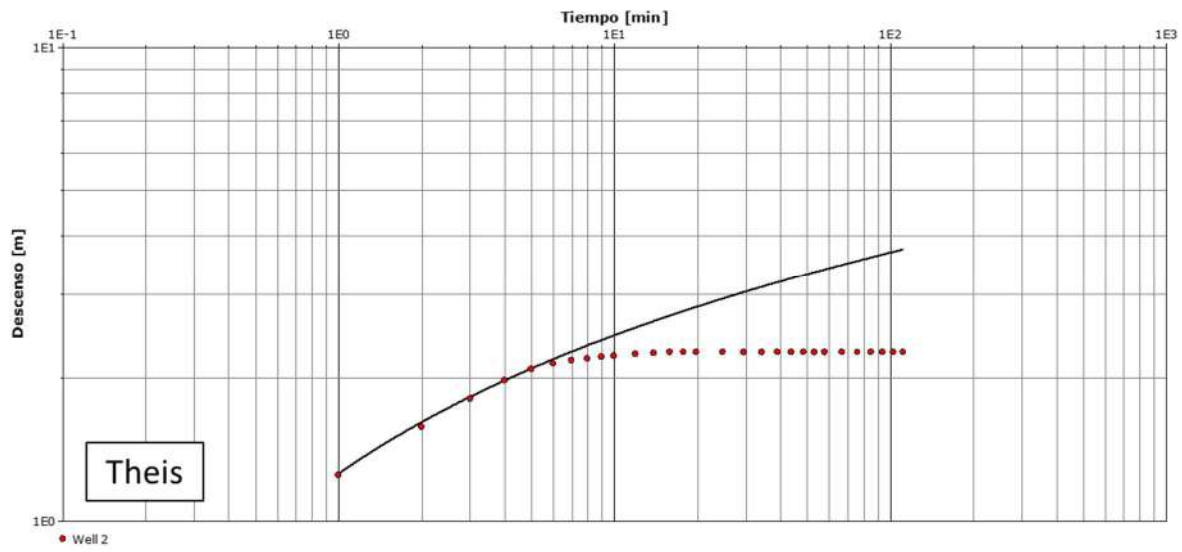
Fuente: Elaboración propia

Figura C-8: Desarrollo de prueba de bombeo en pozo ND-1302-175



Fuente: Elaboración propia

Figura C-9: Superposición de curva teórica de descenso, período recuperación, pozo ND-1302-175



Fuente: Elaboración propia

2.5 Pozo ND-1302-176

En cuanto a la prueba de bombeo de gasto constante en el pozo ND-1302-176 no se cuentan con registros de la etapa de bombeo, mientras que, se recopilieron 2 horas de registros tras detenido el bombeo. El desarrollo de la prueba es graficado en la Figura C-10, la cual detalla la evolución temporal de la prueba durante la etapa de recuperación.

En cuanto al análisis, se emplearon la solución de Theis, Theis con corrección de Jacob (abreviada como Theis c/Jacob), y Neuman. Las metodologías fueron empleadas para la etapa de recuperación de la prueba. Los resultados obtenidos para la Transmisibilidad (T) y Conductividad Hidráulica (k) se detallan en la Tabla C-6, mientras que en la Figura C-11, se detalla la superposición de la curva teórica de descenso con los registros observados para cada una de las metodologías empleadas.

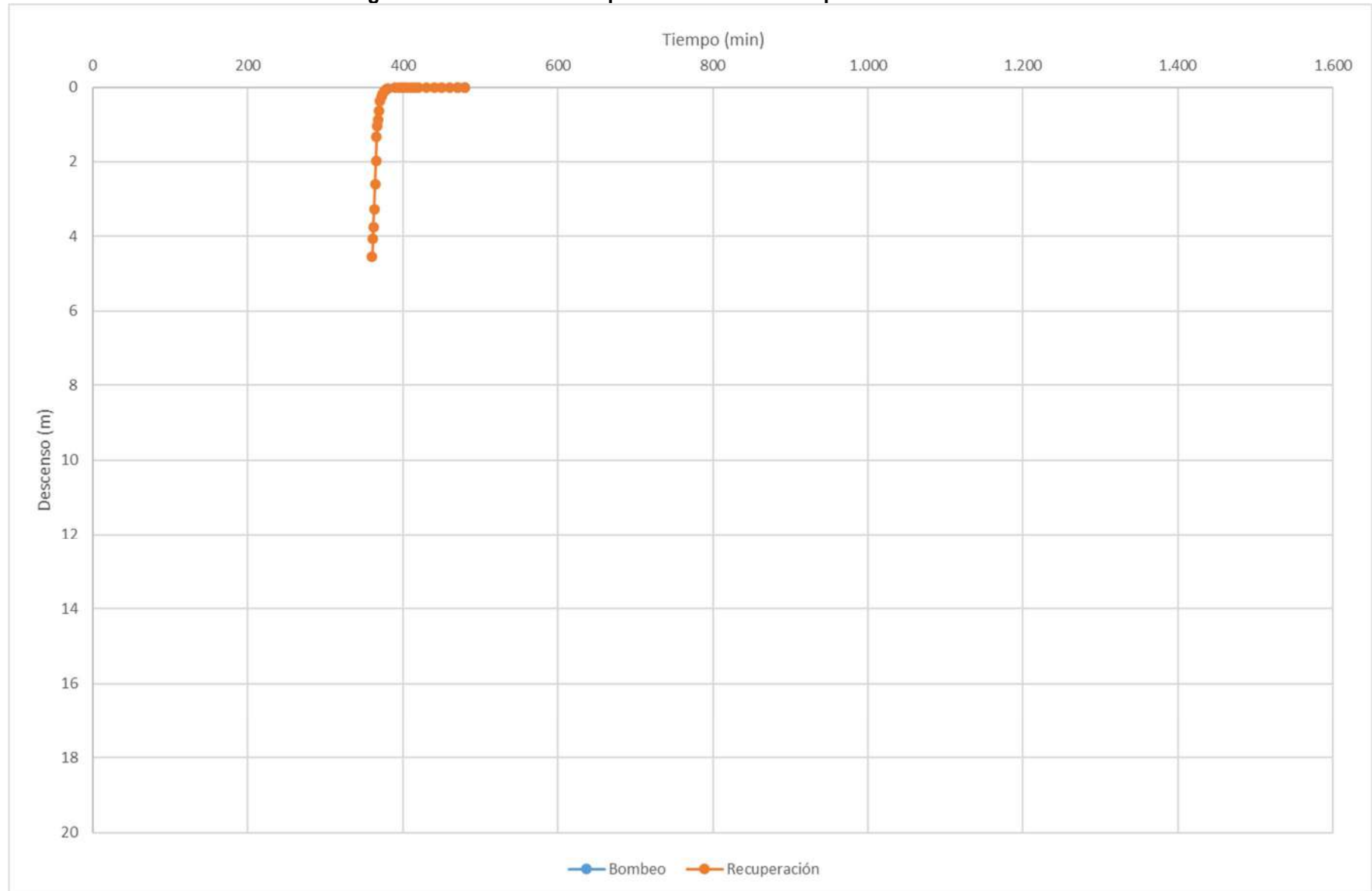
El análisis realizado para el pozo ND-1302-176, y en base a las distintas metodologías, tuvo como resultado un valor promedio de 188,33 m²/d para la transmisibilidad, y de 1,88 m/d para la conductividad hidráulica.

Tabla C-6: Resultados de permeabilidad en pozo ND-1302-176

Metodología	Etapa	T	k
		(m ² /d)	(m/d)
Theis	Recuperación	146,00	1,46
Theis c/Jacob	Recuperación	151,00	1,51
Neuman	Recuperación	268,00	2,68
Promedio		188,33	1,88

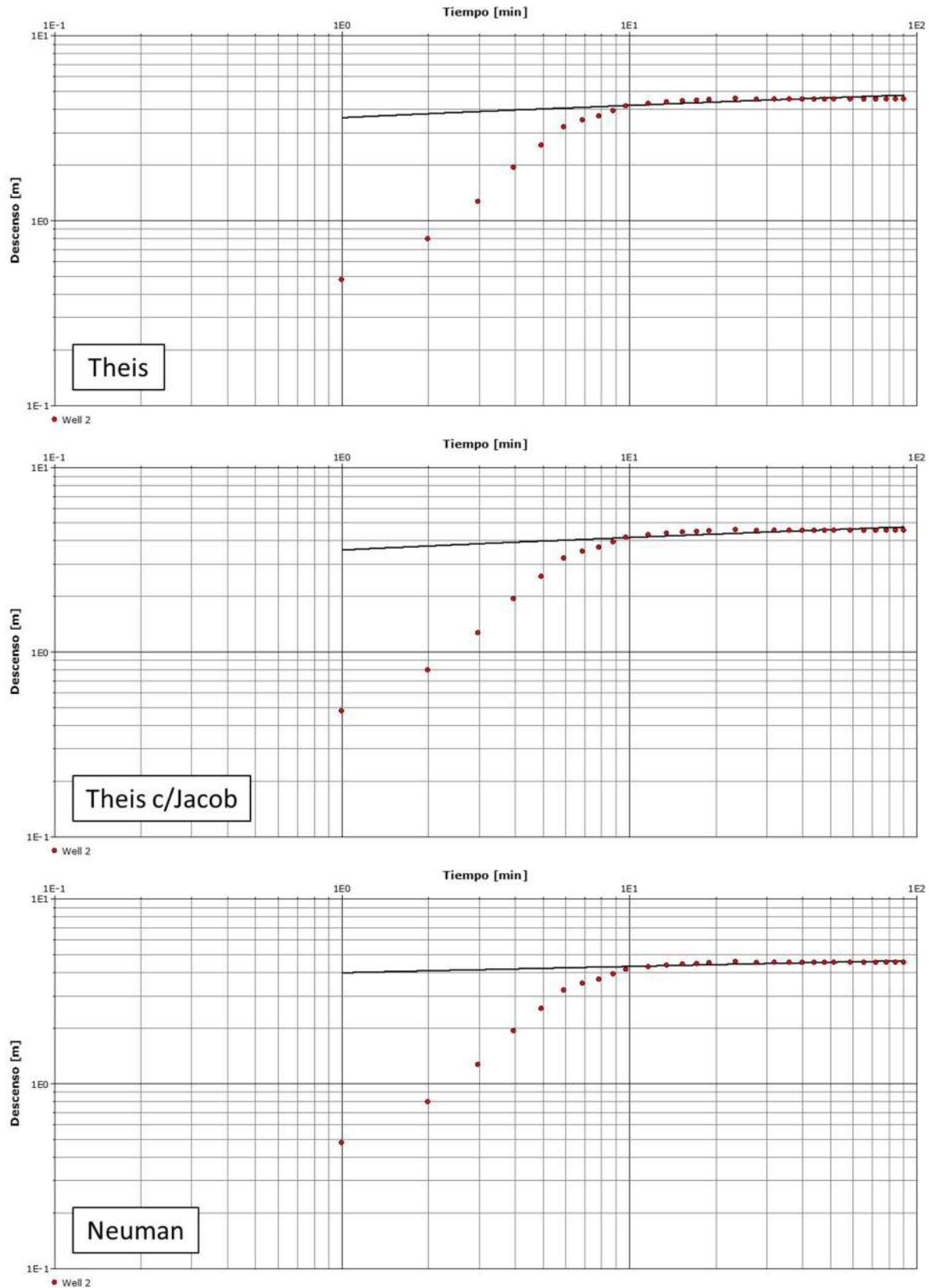
Fuente: Elaboración propia

Figura C-10: Desarrollo de prueba de bombeo en pozo ND-1302-176



Fuente: Elaboración propia

Figura C-11: Superposición de curva teórica de descenso, período recuperación, pozo ND-1302-176



Fuente: Elaboración propia

2.6 Pozo ND-1302-183

En cuanto a la prueba de bombeo de gasto constante en el pozo ND-1302-183 se cuenta con un registro de 24 horas de bombeo y 2 horas de la etapa de recuperación, es decir, una vez detenido el bombeo. El desarrollo de la prueba es graficado en la Figura C-12, la cual detalla la evolución temporal de la prueba diferenciando entre las etapas de bombeo y recuperación.

En cuanto al análisis, se emplearon la solución de Theis, Theis con corrección de Jacob (abreviada como Theis c/Jacob), y Neuman. Las metodologías fueron empleadas solo para la etapa de recuperación de la prueba. Los resultados obtenidos para la Transmisibilidad (T) y Conductividad Hidráulica (k) se detallan en la Tabla C-7, mientras que en la Figura C-13, se detalla la superposición de la curva teórica de descenso con los registros observados para cada una de las metodologías empleadas.

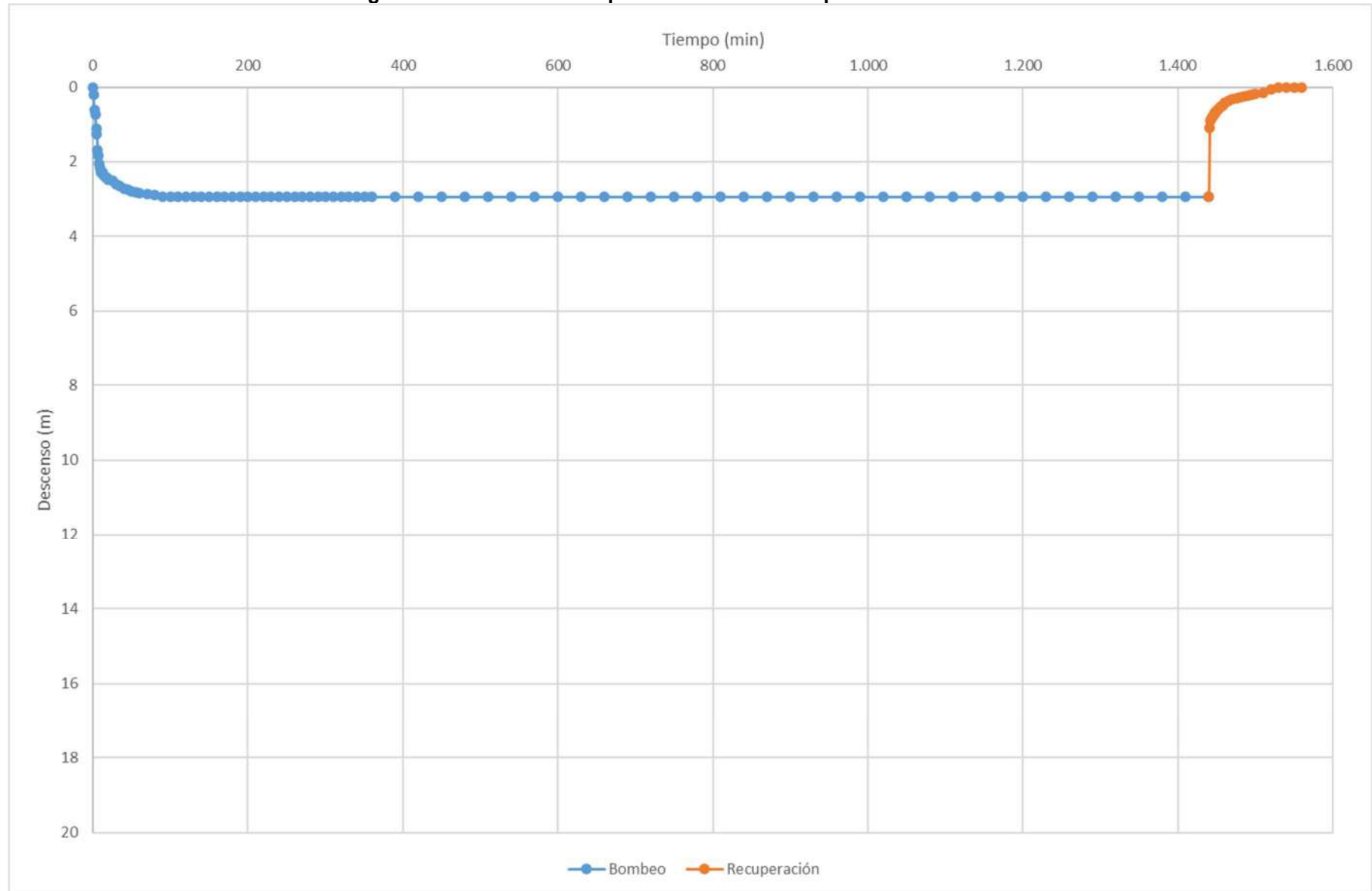
El análisis realizado para el pozo ND-1302-183, y en base a las distintas metodologías, tuvo como resultado un valor promedio de 40,80 m²/d para la transmisibilidad, y de 1,05 m/d para la conductividad hidráulica.

Tabla C-7: Resultados de permeabilidad en pozo ND-1302-183

Metodología	Etapa	T	k
		(m ² /d)	(m/d)
Theis	Recuperación	39,90	1,02
Theis c/Jacob	Recuperación	42,60	1,09
Neuman	Recuperación	39,90	1,02
Promedio		40,80	1,05

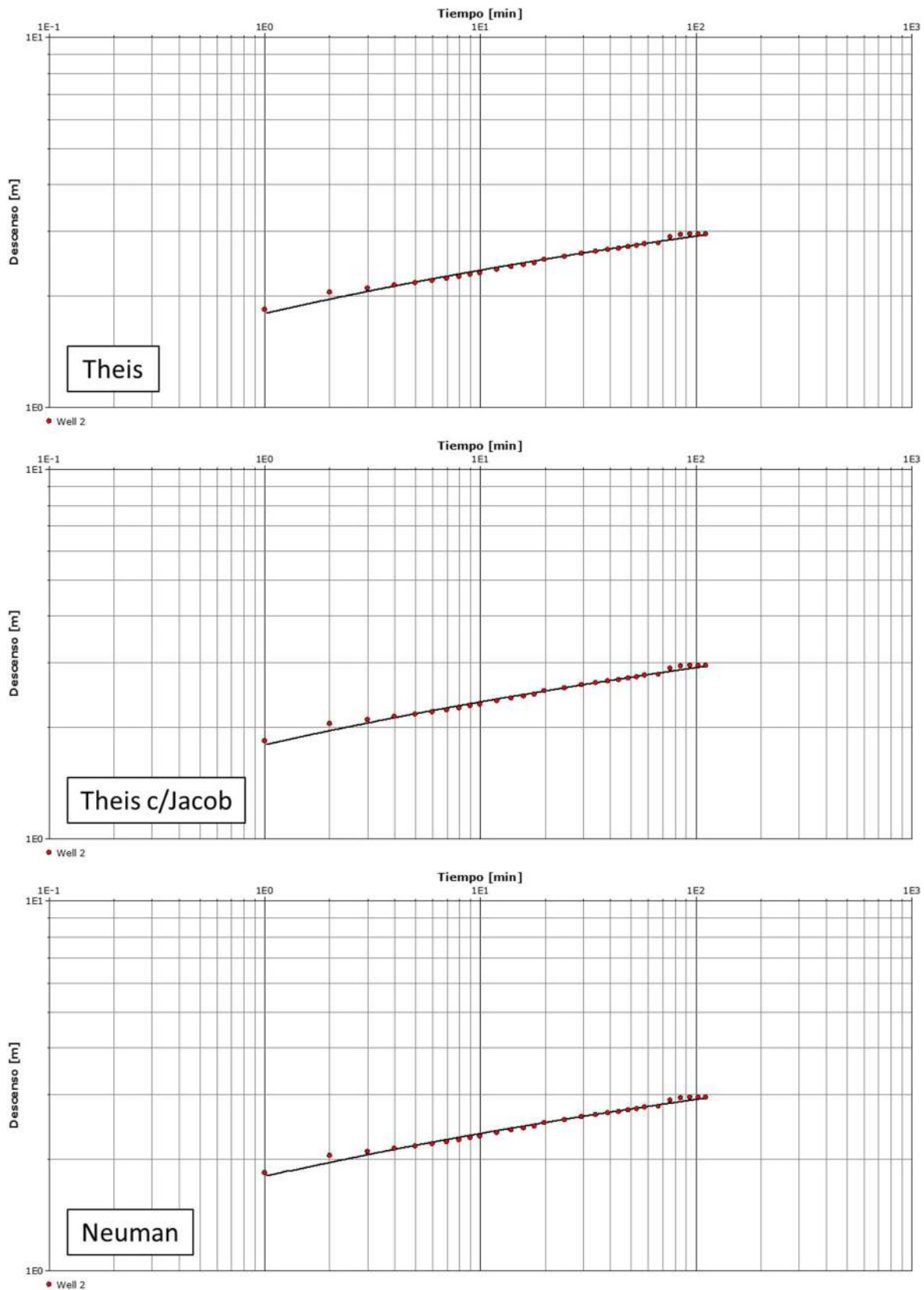
Fuente: Elaboración propia

Figura C-12: Desarrollo de prueba de bombeo en pozo ND-1302-183



Fuente: Elaboración propia

Figura C-13: Superposición de curva teórica de descenso, período recuperación, pozo ND-1302-183



Fuente: Elaboración propia

2.7 Pozo ND-1302-22

En cuanto a la prueba de bombeo de gasto constante en el pozo ND-1302-22 se evidenció una duración del bombeo de 24 horas, mientras que se cuenta con 0,6 horas de registros tras detenido el bombeo. El desarrollo de la prueba es graficado en la Figura C-14, la cual detalla la evolución temporal de la prueba diferenciando en las etapas de bombeo y recuperación.

En cuanto al análisis, se emplearon la solución de Theis, Theis con corrección de Jacob (abreviada como Theis c/Jacob), y Neuman. Las metodologías fueron empleadas para cada etapa de la prueba, ya sea de bombeo y de recuperación. Los resultados obtenidos para la Transmisibilidad (T) y Conductividad Hidráulica (k) se detallan en la Tabla C-8, mientras que en las Figuras C-15 y C-16, se detalla la superposición de la curva teórica de descenso con los registros observados para cada una de las metodologías empleadas. La Figura C-15 detalla el empleo de las metodologías de análisis para la etapa de bombeo, mientras que la Figura C-16 las detalla para la etapa de recuperación.

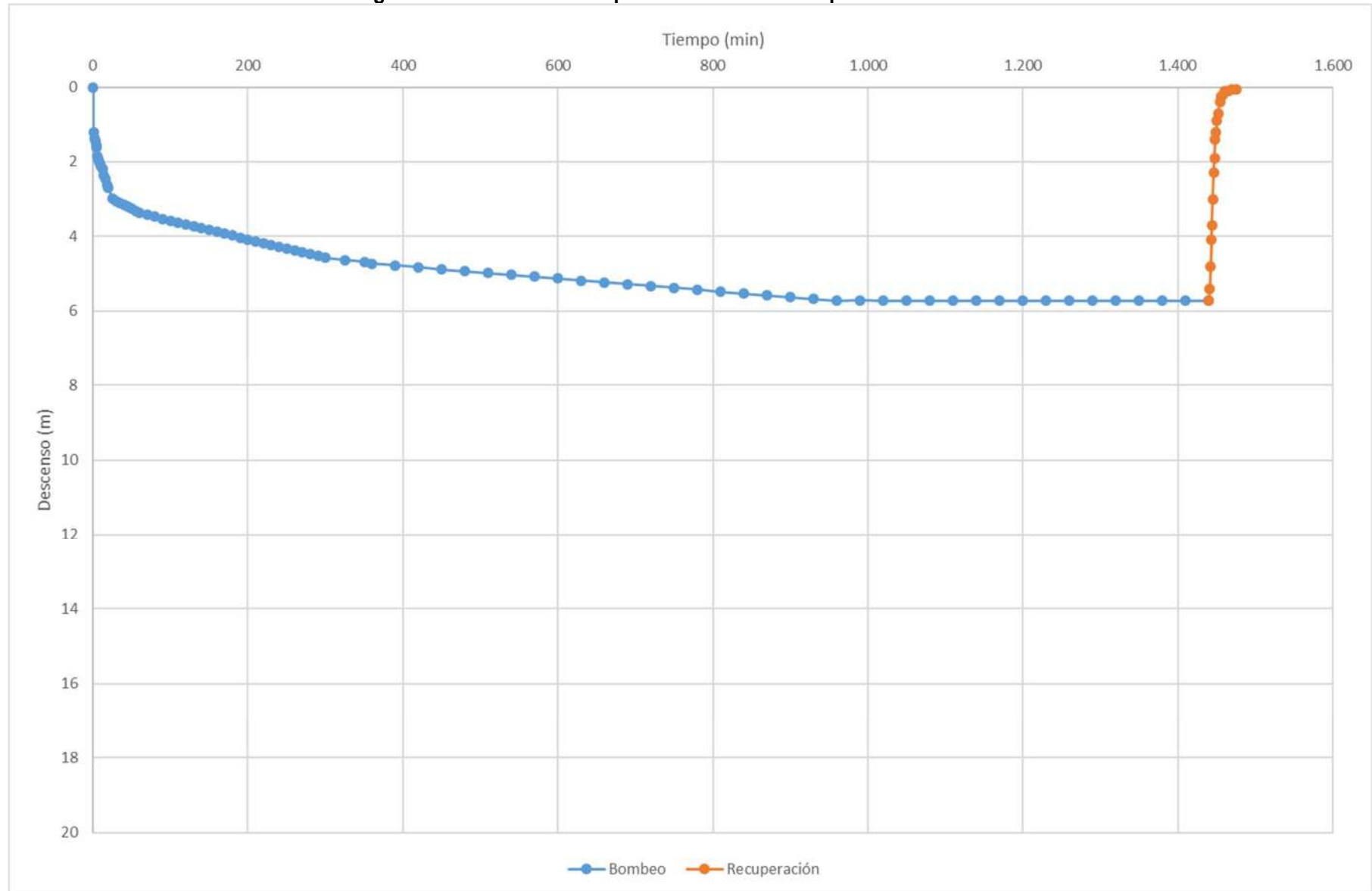
El análisis realizado para el pozo ND-1302-22, y en base a las distintas metodologías, tuvo como resultado un valor promedio de 35,35 m²/d para la transmisibilidad, y de 0,58 m/d para la conductividad hidráulica.

Tabla C-8: Resultados de permeabilidad en pozo ND-1302-22

Metodología	Etapas	T	k
		(m ² /d)	(m/d)
Theis	Bombeo	33,10	0,54
Theis c/Jacob	Bombeo	35,40	0,58
Neuman	Bombeo	33,10	0,54
Theis	Recuperación	30,20	0,50
Theis c/Jacob	Recuperación	31,90	0,52
Neuman	Recuperación	48,40	0,79
Promedio		35,35	0,58

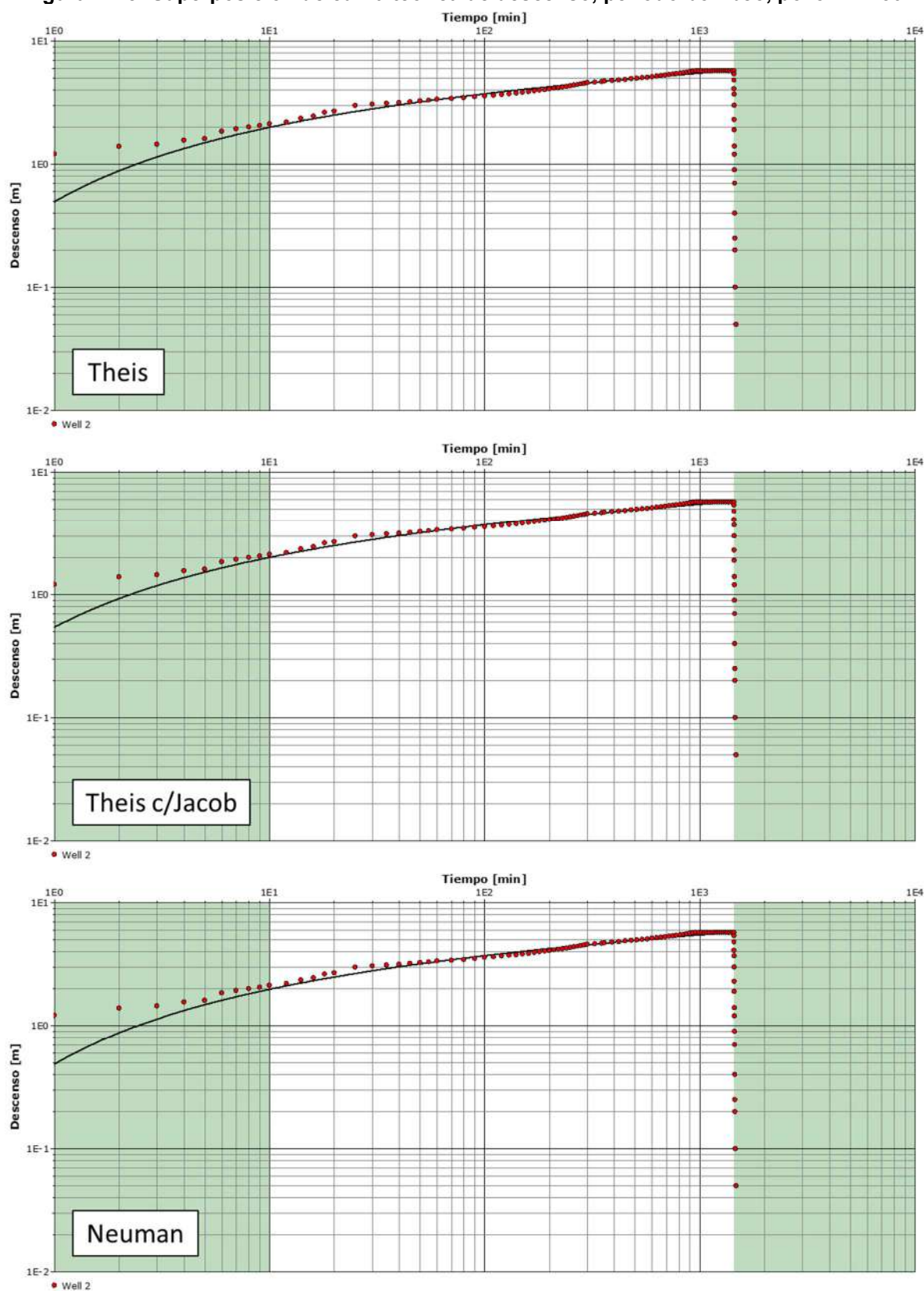
Fuente: Elaboración propia

Figura C-14: Desarrollo de prueba de bombeo en pozo ND-1302-22



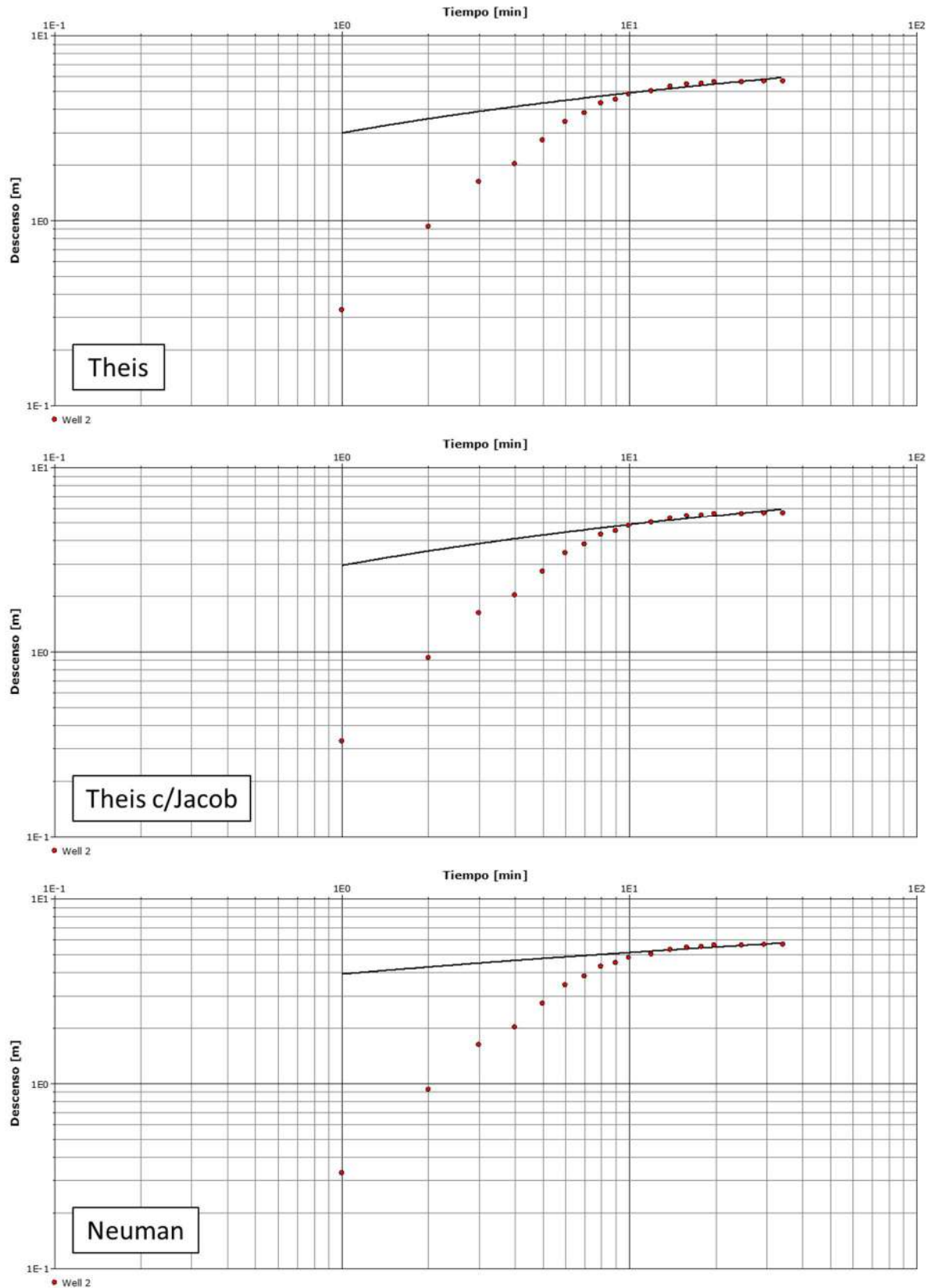
Fuente: Elaboración propia

Figura C-15: Superposición de curva teórica de descenso, período bombeo, pozo ND-1302-22



Fuente: Elaboración propia

Figura C-16: Superposición de curva teórica de descenso, período recuperación, pozo ND-1302-22



Fuente: Elaboración propia

2.8 Pozo ND-1302-80

En el caso del pozo ND-1302-80 se constató la realización de dos pruebas de bombeo en los años 1995 y 2001. Los registros recopilados de la prueba de gasto constante ejecutada en el año 1995 dan cuenta de una duración de 12 horas de la etapa de bombeo, mientras que se cuentan con 0,8 horas de registros una vez detenido el bombeo. Por otro lado, para el caso de la prueba de gasto constante ejecutada en el año 2001, se obtuvo una duración de 24 horas de la etapa de bombeo y de 2,5 horas para la etapa de recuperación. Las Figuras C-17 y C-18 detallan la evolución temporal de las pruebas de gasto constante en el pozo ND-1302-80 para los años 1995 y 2001, respectivamente.

En cuanto al análisis, se emplearon la solución de Theis, Theis con corrección de Jacob (abreviada como Theis c/Jacob), y Neuman. Las metodologías fueron empleadas para cada etapa de las pruebas, ya sea de bombeo y de recuperación, como también, para cada año donde se realizaron dichas pruebas, es decir, 1995 y 2001. Los resultados obtenidos para la Transmisibilidad (T) y Conductividad Hidráulica (k) se detallan en la Tabla C-9, mientras que en las Figuras C-19 a C-22, se detalla la superposición de la curva teórica de descenso con los registros observados para cada una de las metodologías empleadas.

La Figura C-19 detalla el empleo de las metodologías de análisis para la etapa de bombeo en la prueba realizada en el año 1995, en cambio, la Figura C-20 lo detalla para la etapa de recuperación de la prueba ejecutada durante el mismo año. Por otro lado, las Figuras C-21 y C-22 exponen el empleo de las metodologías de análisis para la prueba desarrollada durante el año 2001, diferenciándose respectivamente en las etapas de bombeo y recuperación.

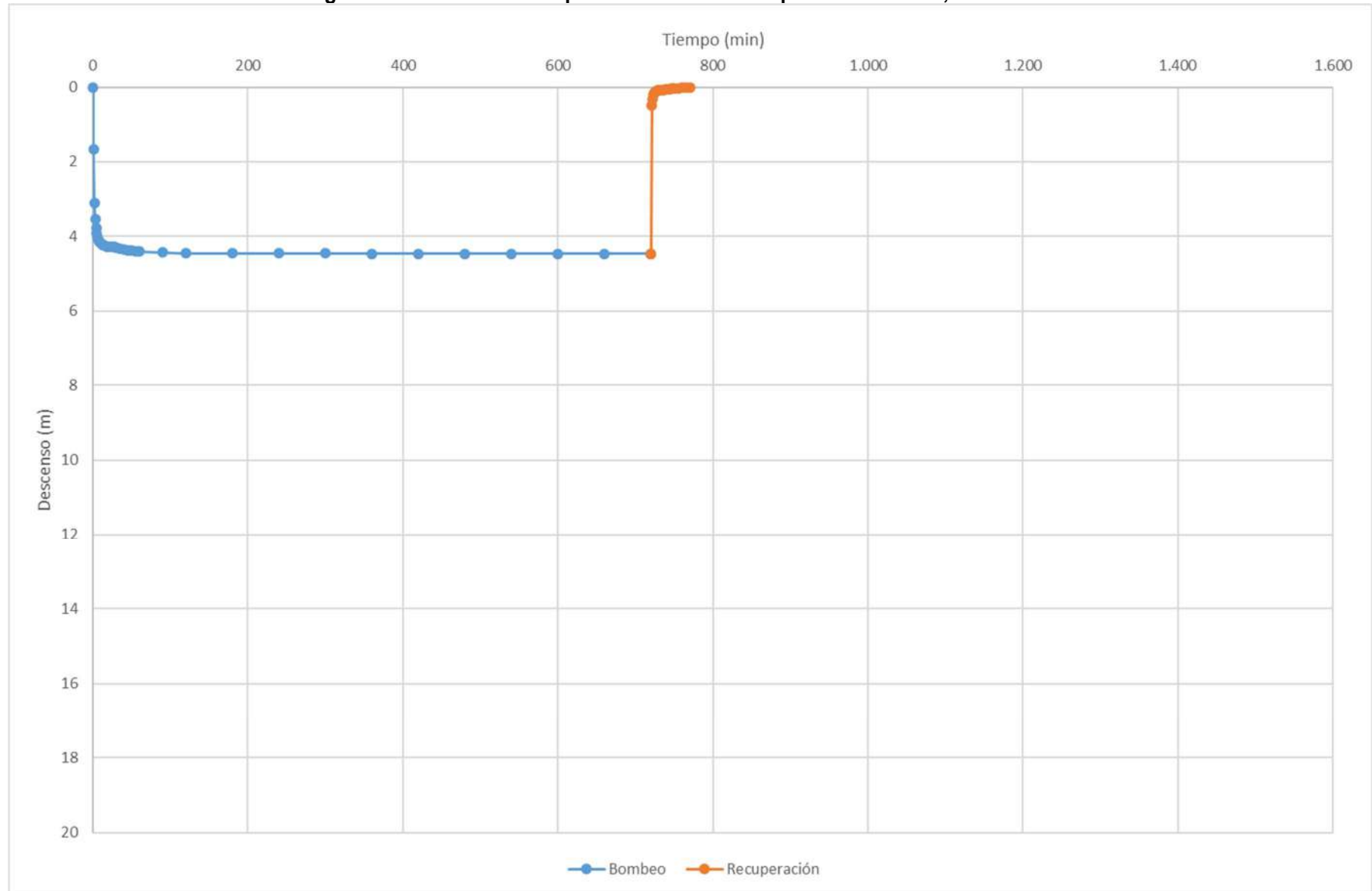
El análisis realizado para el pozo ND-1302-80, y en base a las distintas metodologías, tuvo como resultado un valor promedio de 1.390,83 m²/d para la transmisibilidad, y de 55,63 m/d para la conductividad hidráulica.

Tabla C-9: Resultados de permeabilidad en pozo ND-1302-80

Metodología	Etapa	Año Prueba	T	k
			(m ² /d)	(m/d)
Theis	Bombeo	1995	1.471,00	58,84
Theis c/Jacob	Bombeo	1995	1.620,00	64,80
Neuman	Bombeo	1995	1.440,00	57,60
Theis	Recuperación	1995	1.400,00	56,00
Theis c/Jacob	Recuperación	1995	1.540,00	61,60
Neuman	Recuperación	1995	1.400,00	56,00
Theis	Bombeo	2001	1.280,00	51,20
Theis c/Jacob	Bombeo	2001	1.430,00	57,20
Neuman	Bombeo	2001	1.276,00	51,04
Theis	Recuperación	2001	1.230,00	49,20
Theis c/Jacob	Recuperación	2001	1.376,00	55,04
Neuman	Recuperación	2001	1.227,00	49,08
Promedio			1.390,83	55,63

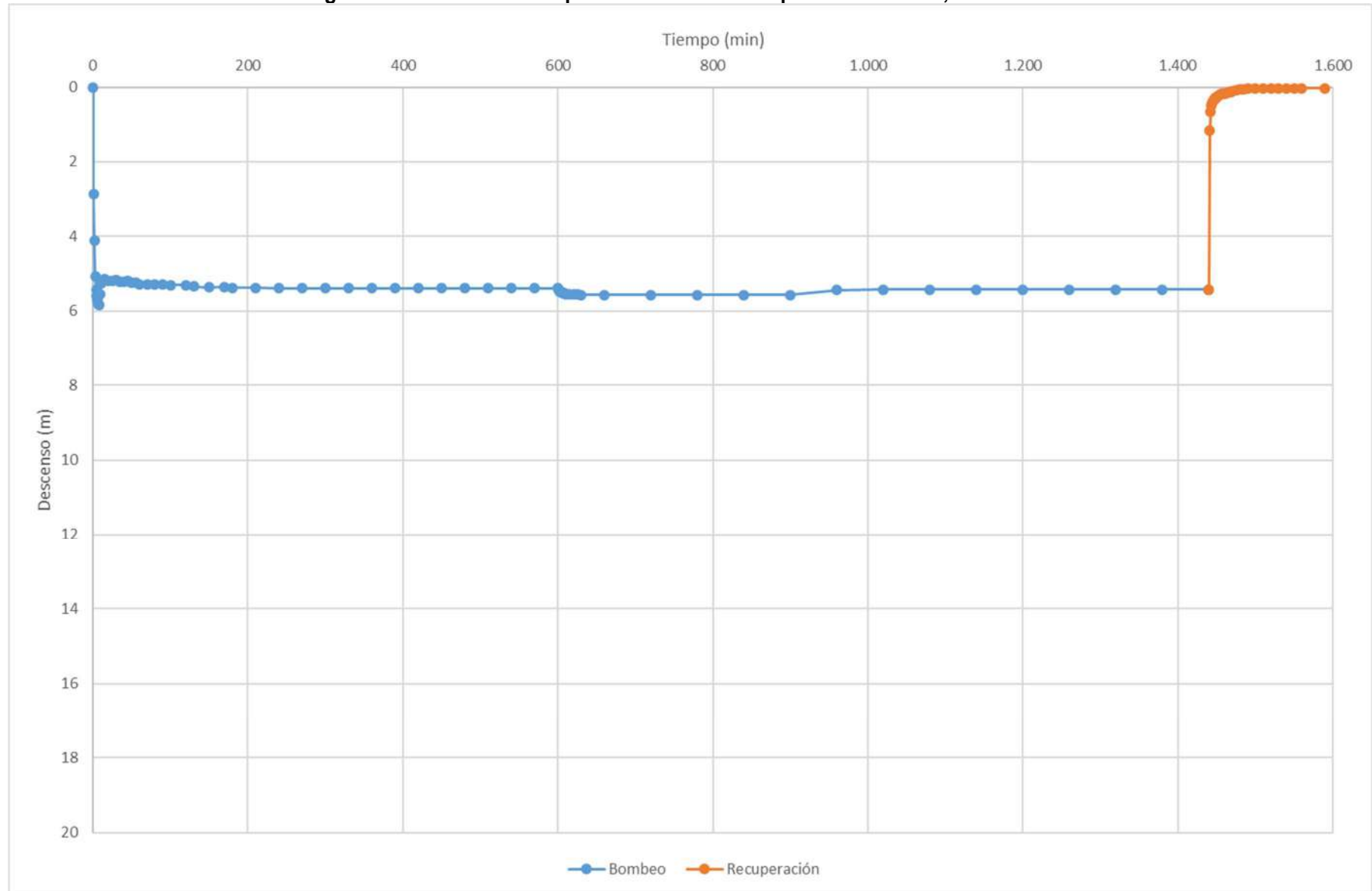
Fuente: Elaboración propia

Figura C-17: Desarrollo de prueba de bombeo en pozo ND-1302-80, año 1995



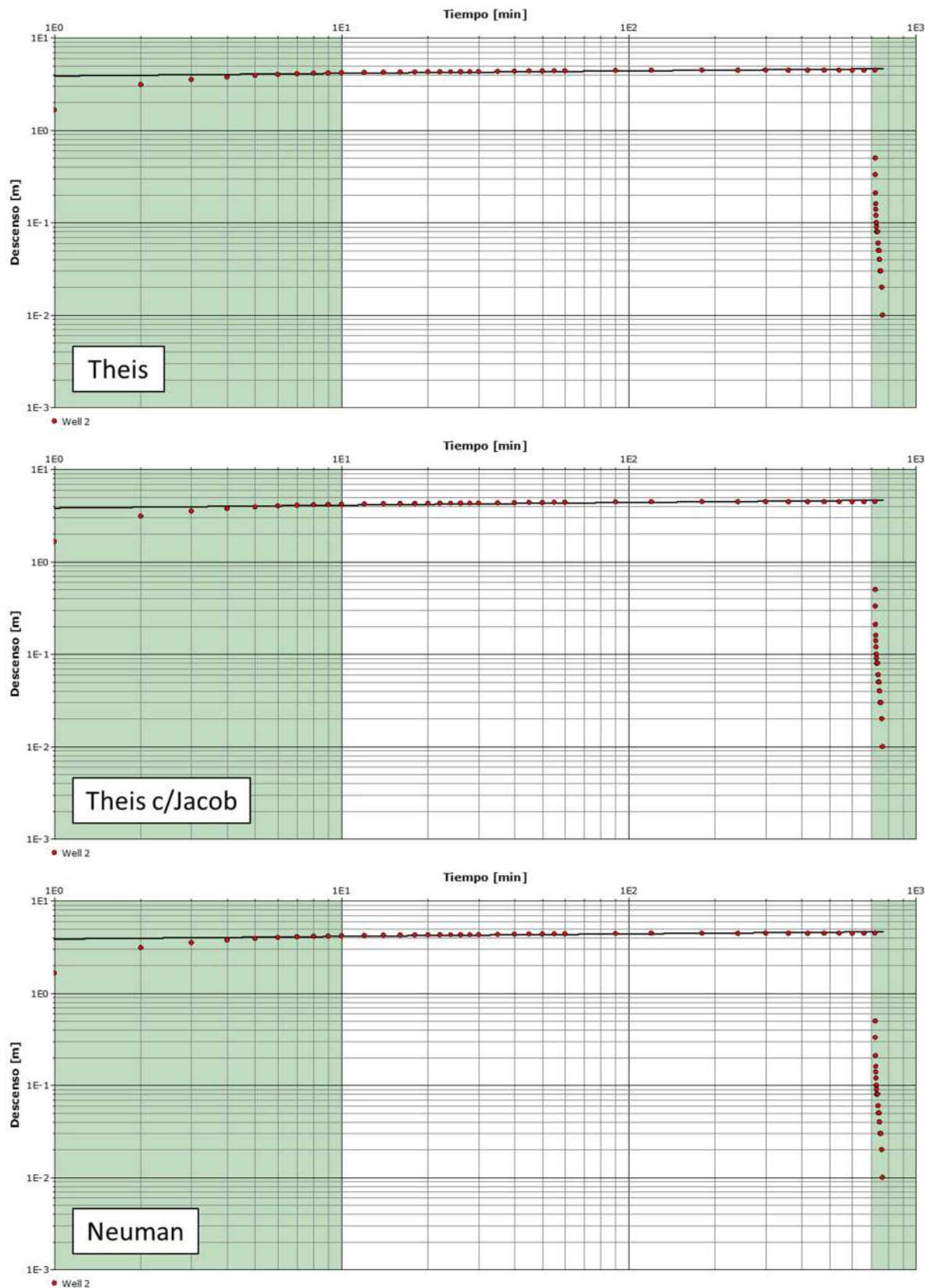
Fuente: Elaboración propia

Figura C-18: Desarrollo de prueba de bombeo en pozo ND-1302-80, año 2001



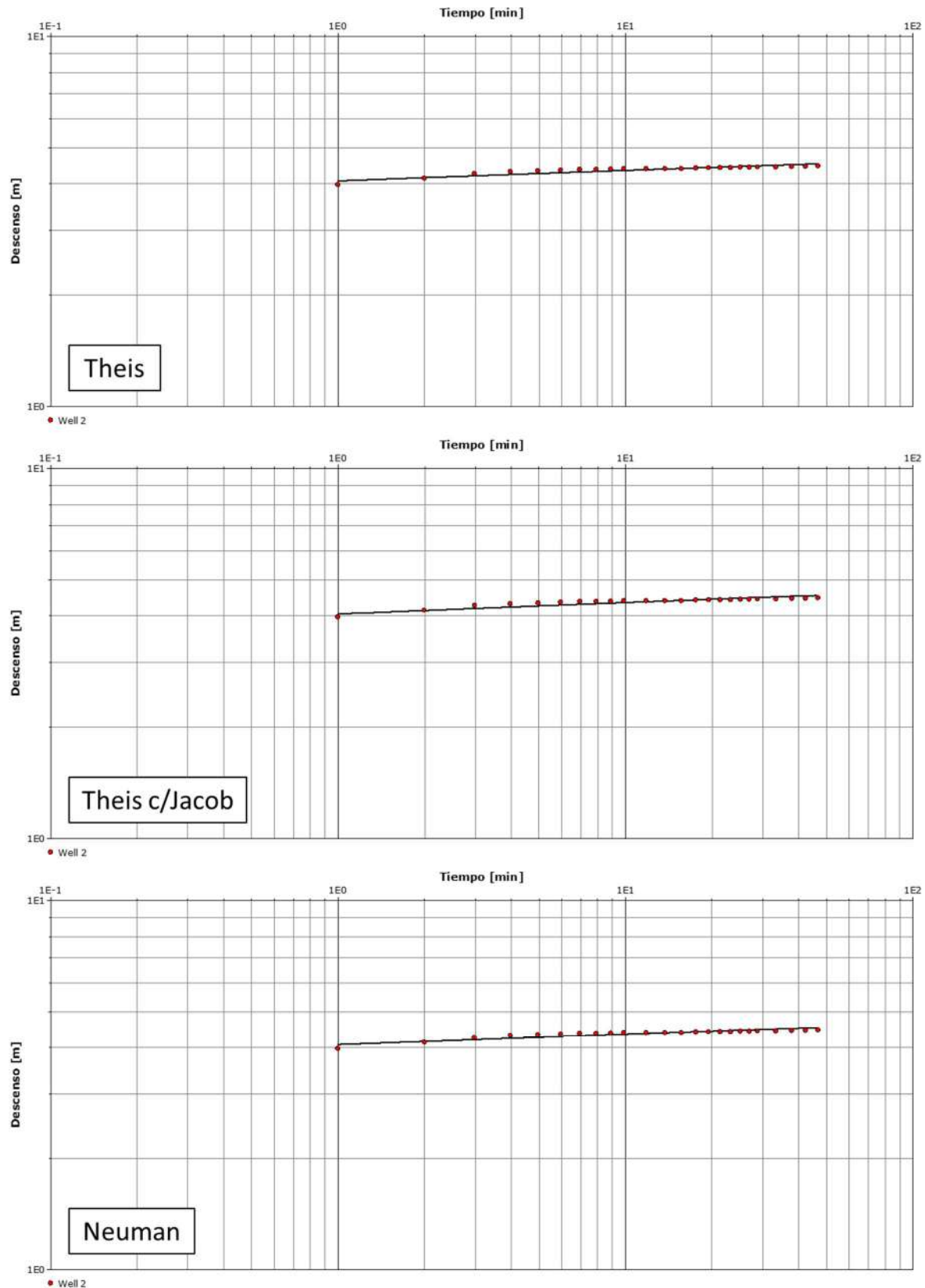
Fuente: Elaboración propia

Figura C-19: Superposición de curva teórica de descenso, período bombeo, pozo ND-1302-80, año 1995



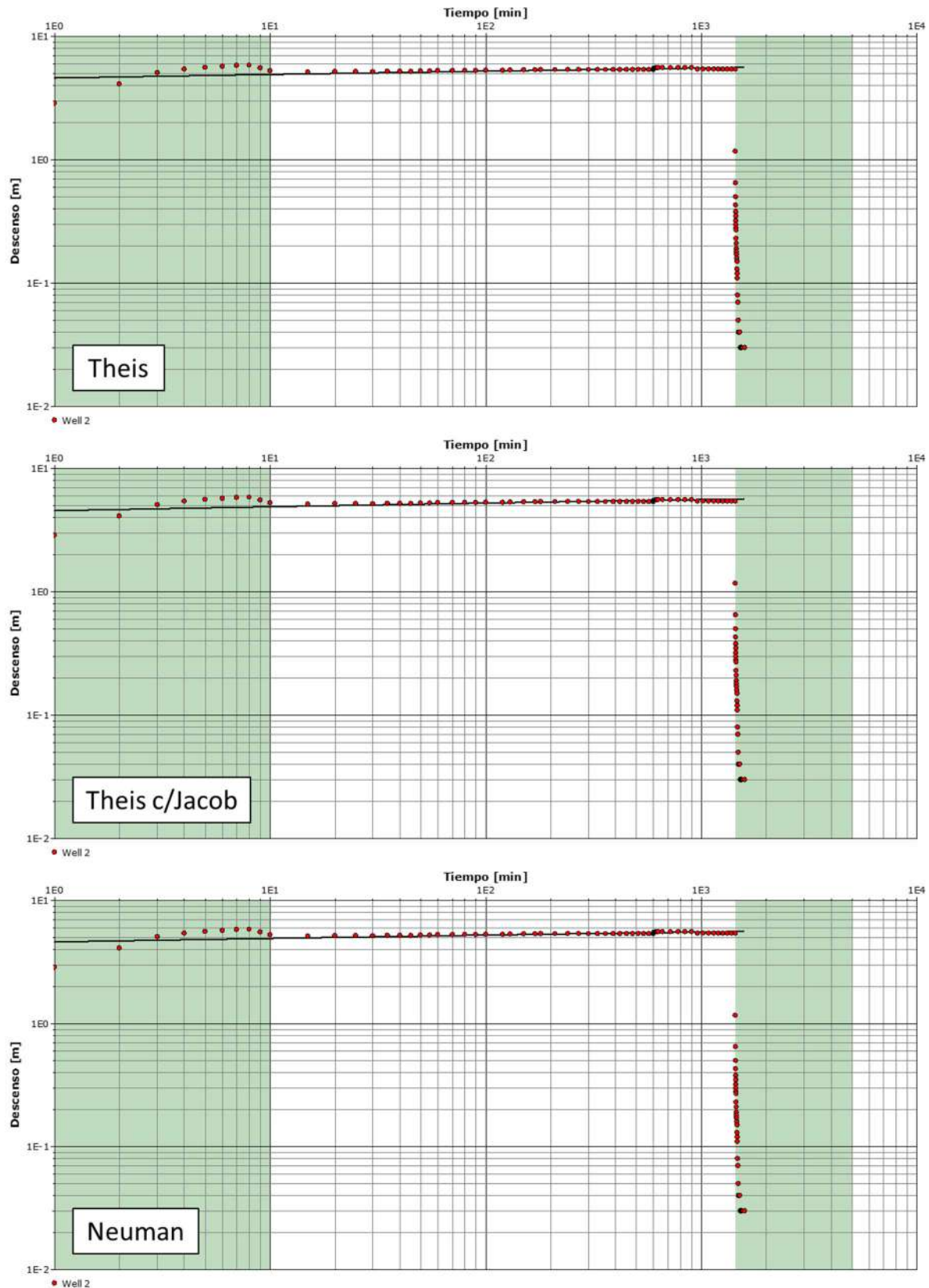
Fuente: Elaboración propia

Figura C-20: Superposición de curva teórica de descenso, período recuperación, pozo ND-1302-80, año 1995



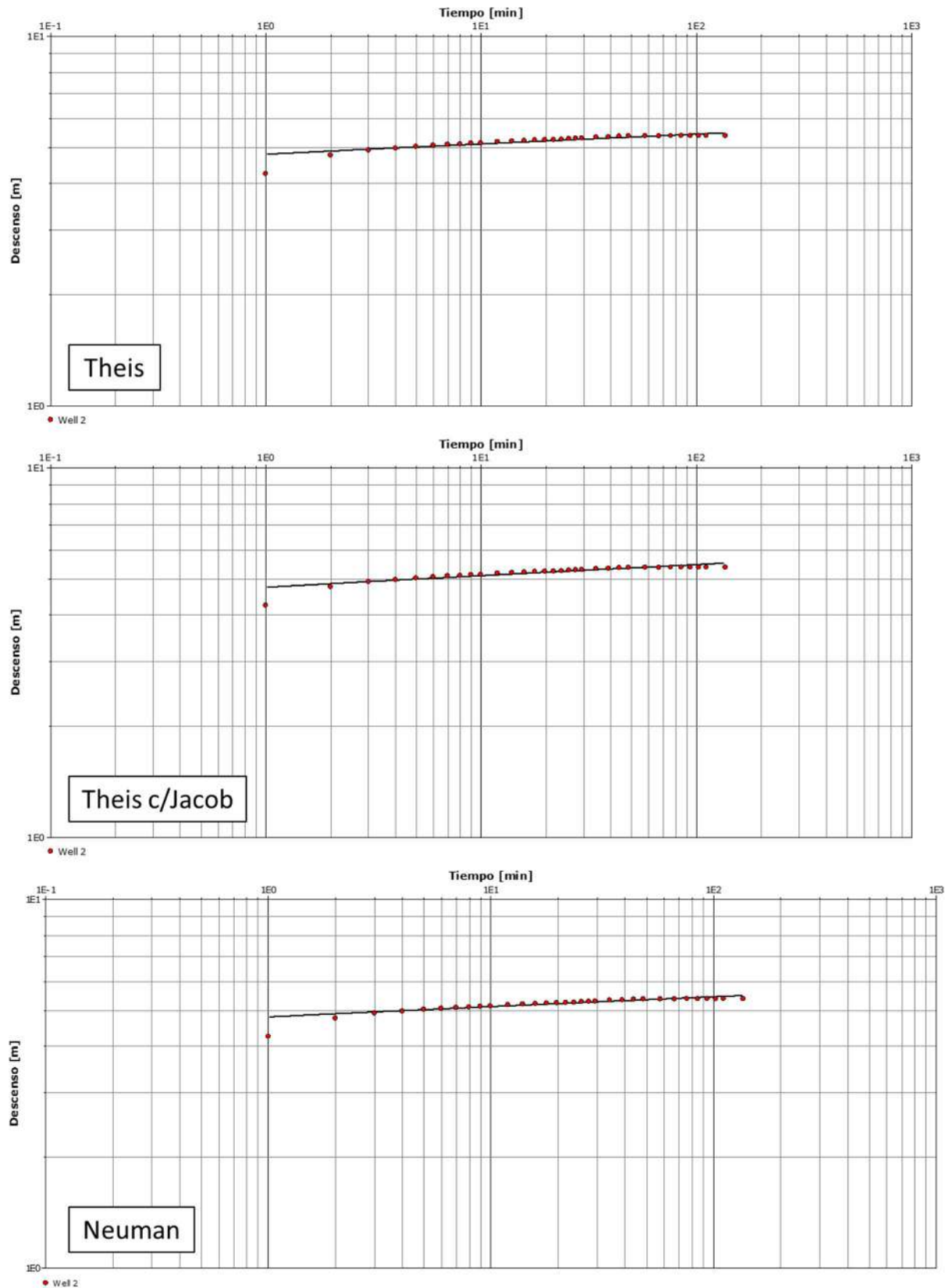
Fuente: Elaboración propia

Figura C-21: Superposición de curva teórica de descenso, período bombeo, pozo ND-1302-80, año 2001



Fuente: Elaboración propia

Figura C-22: Superposición de curva teórica de descenso, período recuperación, pozo ND-1302-80, año 2001



Fuente: Elaboración propia

3 RESUMEN DE RESULTADOS

El empleo de las distintas metodologías de análisis en las pruebas de bombeo de gasto constante, con las que se cuenta información, permitieron definir un valor característico de conductividad hidráulica para cada uno de los pozos presentados en los capítulos anteriores, en términos de valor medio. Por lo cual y a modo de resumen, en la Tabla C-10 se presentan los valores de conductividad hidráulica para los pozos con expedientes de derechos de aprovechamiento concedidos por la Dirección General de Aguas (DGA, 2018).

Tabla C-10: Valores característicos de permeabilidad para los pozos con expedientes DGA

Código DGA	T	k
	(m ² /d)	(m/d)
ND-1302-153	5,03	0,50
ND-1302-156	14,00	0,14
ND-1302-175	90,00	0,90
ND-1302-176	188,33	1,88
ND-1302-183	40,80	1,05
ND-1302-22	35,35	0,58
ND-1302-80	1.390,83	55,63

Fuente: Elaboración propia

Para los valores de transmisibilidad (T) obtenidos se puede apreciar un rango de valores que varía entre 5,03 a 1.390,83 m²/d, mientras que para la conductividad hidráulica (k) el rango de valores obtenido fluctúa entre 0,14 y 55,63 m/d.

4 CONCLUSIONES

En base a lo expuesto en los capítulos anteriores, que comprende el detalle de los registros recopilados a partir de los pozos con expedientes de derechos de aprovechamiento de agua concedidos por la Dirección General de Aguas (DGA, 2018) y su posterior análisis en base a metodologías de superposición de curvas teóricas de descenso para las pruebas de bombeo de gasto constante, se ha permitido definir las características hidrogeológicas de permeabilidad para distintos puntos, en específico, los lugares de emplazamiento de los pozos señalados.

El análisis efectuado, y en base a los antecedentes presentados, permite homologar los rangos de valores obtenidos de permeabilidad como esperables del relleno sedimentario en los sectores del río Maipo.

Lo anterior, y concerniente a los objetivos propuestos en el presente Apéndice, permite describir hidrogeológicamente los sectores del Río Maipo, dentro del Área de Estudio, lo cual está en concordancia al desarrollo del modelo a cargo de HIDROMAS.



HIDROMAS

Anexo 3: Actualización Estudio Geológico Regional Proyecto Alto Maipo

ALTO MAIPO SpA. Región Metropolitana

María Fernanda Rojas G. / Natalia Carrasco M.
28 de octubre de 2018
Rev.0

ACTUALIZACIÓN ESTUDIO GEOLÓGICO REGIONAL ALTO MAIPO

TABLA DE CONTENIDO

1.0	INTRODUCCIÓN	1
2.0	METODOLOGÍA.....	1
2.1	Área de Estudio.....	1
2.2	Revisión de Antecedentes	3
3.0	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	4
3.1	Análisis, Integración y Procesamiento de la información Geológica-Estructural.....	6
3.2	Definición de Dominios Geológicos-estructurales	11
4.0	GEOLOGÍA Y ESTRUCTURAS.....	12
4.1	Geología Regional.....	12
4.1.1	Secuencias Estratificadas.....	12
4.1.1.1	Formación Río Damas (Jsrd):	12
4.1.1.2	Formación Lo Valdés (Kilv):	12
4.1.1.3	Formación Baños del Flaco (Kbf):	12
4.1.1.4	Formación Colimapu (Kic):.....	13
4.1.1.5	Formación Abanico:.....	13
4.1.1.6	Formación Coya Machalí (Kcm):	13
4.1.1.7	Formación Farellones (Tsf):	14
4.1.1.8	Intracaldera El Manzano:.....	14
4.1.2	Rocas Intrusivas	14
4.1.2.1	Rocas Plutónicas Graníticas (Mg):	14
4.1.2.2	Rocas Hipabisales porfídicas (Pp):	14
4.1.3	Unidades Cuaternarias	15
4.1.3.1	Rocas Volcánicas antiguas	15
4.1.3.2	Depósitos de ignimbritas pumicíticas (Qip).....	15

4.1.3.3	Depósitos de Relleno Sedimentario	16
4.2	Estructuras.....	18
5.0	DOMINIOS GEOLÓGICOS-ESTRUCTURALES.....	21
5.1	Introducción	21
5.2	Dominios Geológicos-Estructurales Interpretados	24
5.2.1	Tramo Las Lajas.....	24
5.2.1.1	Dominio 1	24
5.2.1.2	Dominio 2	24
5.2.1.3	Dominio 3	24
5.2.2	Tramo Alfalfal	27
5.2.2.1	Dominio 4	27
5.2.2.2	Dominio 5	27
5.2.2.3	Dominio 6	28
5.2.3	Tramo El Volcán.....	30
5.2.3.1	Dominio 7	30
5.2.3.2	Dominio 8	30
5.2.3.3	Dominio 9	30
5.2.3.4	Dominio 10	31
6.0	CONCLUSIONES.....	33
	REFERENCIAS	34

Contenido de Figuras

Figura 2-1: Mapa de Ubicación Proyecto Alto Maipo. Fuente: EIA Proyecto Alto Maipo, 2008	2
Figura 3-1: Fuentes de información geológica y estructural.	5
Figura 3-2: Geología cuenca Alto Maipo en base a las distintas fuentes de información existentes.....	7
Figura 3-3: Geología Regional dentro del área del dominio del modelo según Moreno et al., 1991.	9
Figura 3-4: Geología Regional dentro del área del dominio del modelo, según Moreno et al., 1991 y geología local en torno al túnel según GEOAV 2017.	10
Figura 4-1: Estructuras regionales según Moreno et al., 1991 y locales según Base Lineaments UCH (2015) de la Universidad de Chile	20
Figura 5-1: Esquema general de dominios geológicos-estructurales en el área del modelo.	22
Figura 5-2: Perfil General cuenca del Alto Maipo	23
Figura 5-3: Perfil geológico tramo Las Lajas.....	26
Figura 5-4: Perfil geológico Tramo Alfalfal	29
Figura 5-5: Perfil geológico tramo El Volcán	32

1.0 INTRODUCCIÓN

HIDROMAS, ha solicitado a quienes suscriben, el desarrollo de un reporte técnico cuyo principal objetivo corresponde a una actualización de la geología regional y distrital en el área de estudio en que se emplaza el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo para ser integrada al modelo hidrogeológico que desarrolla HIDROMAS.

Se presenta el resultado de la revisión de los modelos geológicos existentes para el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM). El detalle de la información relevante, recopilada y analizada, se entrega en la sección 2.0 y corresponde, principalmente, a los estudios realizados por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile desde enero de 2015, continuados por la empresa GEOAV S.A. desde mayo a diciembre de 2017, la información levantada en estudios y prospecciones realizados durante la etapa de Ingeniería Básica del proyecto y la geología regional publicada en la cartografía del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Al igual que en los reportes antes citados, la información geológica actualizada se presentará en dos mapas regionales y uno local y en cuatro secciones finales, tres correspondientes a las etapas de avance del PHAM: Las Lajas, Alfalfal y El Volcán, y otra más regional, que muestra parte de la cuenca del Alto Maipo.

El presente reporte consolida la actualización de la geología regional en el área de la cuenca hidrográfica del Alto Maipo con la actualización de la geología distrital en el área de influencia del PHAM.

2.0 METODOLOGÍA

2.1 Área de Estudio

El trazado del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM) se inserta en la porción superior de la cuenca hidrográfica del río Maipo, conocida como Alto Maipo.

Las aguas del PHAM serán captadas desde afluentes al río Volcán y río Yeso y la actual descarga de la Central Alfalfal, siendo conducidas por túneles hacia dos centrales de pasada, descargando finalmente en la zona alta de la porción media de la cuenca del río Maipo, aguas abajo de la quebrada El Manzano.

La Figura 2-1, muestra la ubicación general del proyecto, disposición de los túneles de avance y descarga del proyecto en el río Maipo

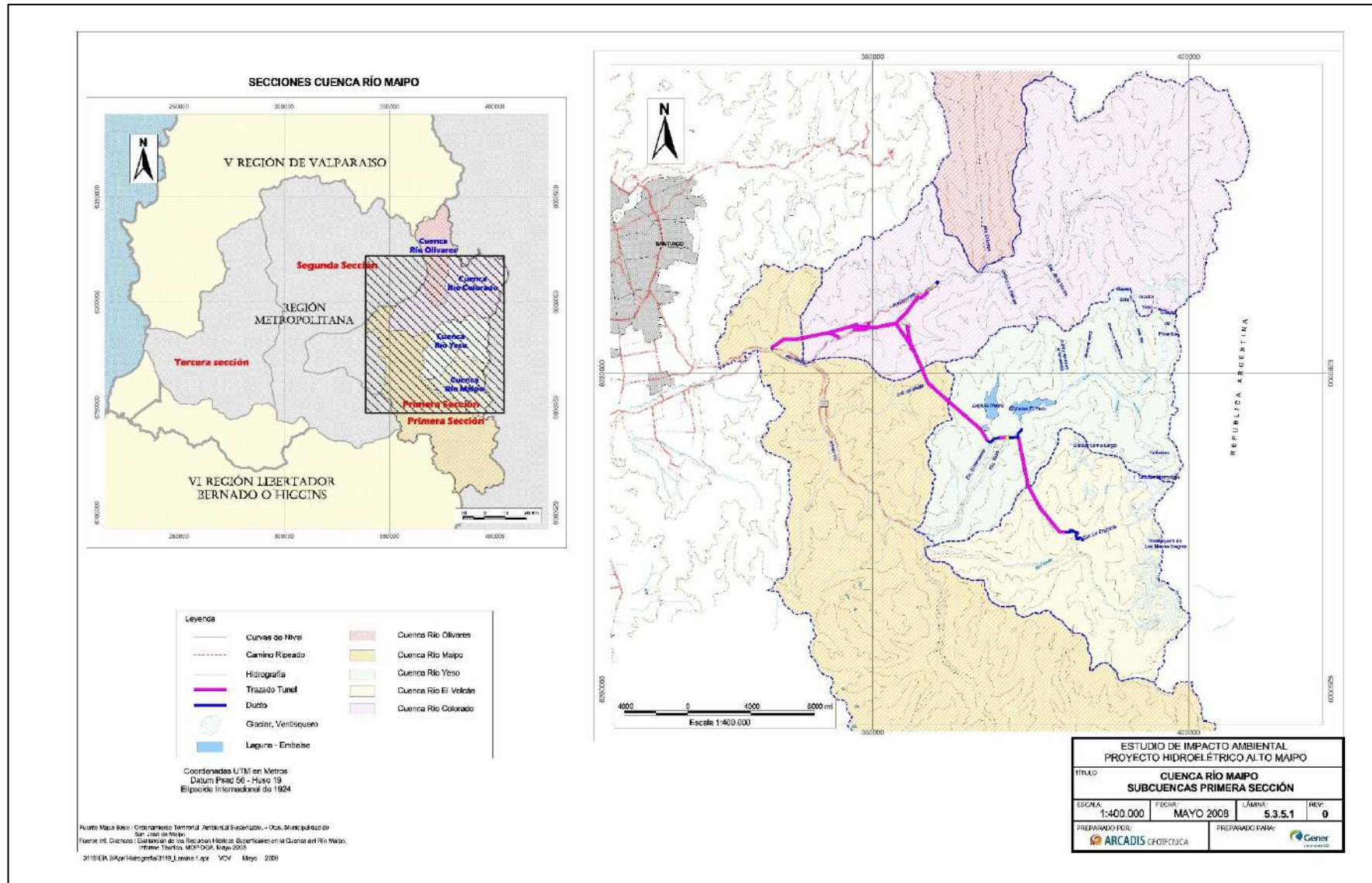


Figura 2-1: Mapa de Ubicación Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo. Fuente: EIA Proyecto Alto Maipo, 2008

Desde el punto de la red de drenaje, el PHAM atraviesa tres sistemas hídricos mayores, que corresponden a los subsistemas de los ríos Volcán, Yeso y Colorado.

- La cuenca del río Volcán se divide en dos subcuencas superiores principales (estero La Engorda y río del Volcán), que dan origen al río Volcán. La zona de interés para el PHAM está constituida por la subcuenca del sistema del estero La Engorda, las cuales corresponden al Cajón del Morado, Quebrada Las Placas, estero Colina y estero La Engorda propiamente tal.
- El sistema río Yeso posee espejos de agua de importancia: Laguna Negra, Laguna Lo Encañado y Embalse El Yeso.
- El sistema cuenca río Colorado nace en las altas cumbres del volcán Tupungato, y recibe como afluente principal al río Olivares.

Para efectos de la caracterización geológica regional, se cubrirá el área que ocupan estos tres sistemas hídricos.

A nivel de la caracterización distrital y local, se han definido las áreas asociadas al trazado de los túneles, hasta el punto de descarga, poniendo énfasis en el área de dominio del modelo numérico, el cual limita hasta el río Maipo por el sur.

2.2 Revisión de Antecedentes

En esta etapa se realizó la recopilación de toda la información geológica y estructural actualizada en el área de la cuenca hidrográfica del alto Maipo y dentro del dominio del modelo hidrogeológico definido para este estudio.

La información más actual se obtuvo principalmente de las siguientes fuentes:

1. El estudio realizado por la empresa GEOAV para ALTO MAIPO en diciembre de 2017, "Revisión y Actualización del Modelo Geológico, Proyecto Hidrológico Alto Maipo. Informe Final Las Lajas, Alfalfal II y Volcán."
2. Información estructural obtenida de los planos del proyecto *Base Lineaments* UCH (2015) de la Universidad de Chile: 6100_UCh_GE-PLA_El_Volcan_Baselineaments_rev_0; 6200_UCh_GE-PLA_Alfalfal_Baselineaments_rev_0; 6300_UCh_GE-PLA_Las_Lajas_Baselineaments_rev_0.
3. Estudio en etapa de Ingeniería Básica para el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, en el sector del túnel Las Lajas, 630-GE-INF-001 (Norconsult, 2008), "Geología-Geotecnia de las obras subterráneas del contrato AM-CO630".
4. *Technical Report* N°2017-04-10-GE-RPT. *Geology and Geotechnics of the VL2 Adit Area. Alto Maipo Hydroelectrical Project.*
5. *Volcanic facies analysis, El Manzano area*, AES Gener. J. Clavero, R. Quiroga, B. Droguett, 2016. Amawta Consultores.
6. Información de sondeos exploratorios realizados en diferentes sectores dentro del túnel Las Lajas y Alfalfal II.

Además, se utilizó como información geológica y estructural base a nivel regional:

1. Moreno H., Thiele R., Varela, J., 1991. Estudio Geológico y de Riesgos Volcánico y de Remoción en Masa del Proyecto Hidroeléctrico Alfalfal II-Las Lajas. Reporte Técnico. Chilgener S.A., Santiago, 78 pp.
2. Thiele, R., 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 39, 51 p.
3. Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N°8.
4. Fock, A., 2005. Cronología y Tectónica de la Exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S. Tesis de Magister en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile.

3.0 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Tal como fue citado en la sección 2.2, se utilizaron cuatro fuentes de información geológica y estructural para la actualización de este modelo geológico, presentando cada una diferentes escalas.

El resultado de este conjunto de información se presenta en Figura 3-1.

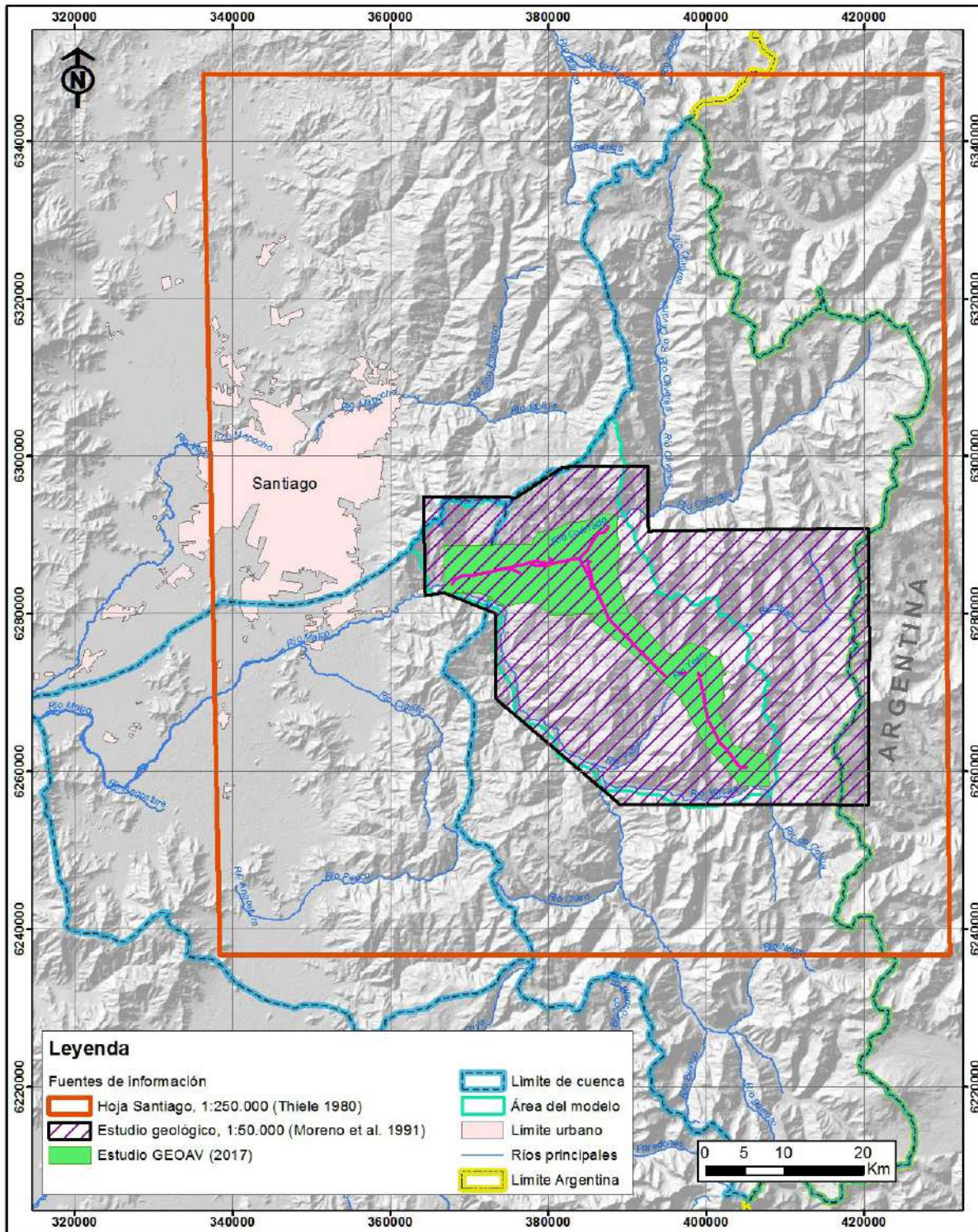


Figura 3-1: Fuentes de información geológica y estructural.

El análisis de la información de los antecedentes consideró las siguientes etapas:

- Análisis, Integración y Procesamiento de la información Geológica-estructural
- Definición de Dominios Geológicos-estructurales

3.1 Análisis, Integración y Procesamiento de la información Geológica-Estructural

La información en torno al trazado del túnel fue tomada íntegramente del estudio realizado por GEOAV y la Universidad de Chile levantada entre los años 2015 y 2017, que está a una escala, aproximada, 1:15.000.

Fuera del trazado del túnel y cubriendo el resto del total del área considerada para el modelo hidrogeológico, se utilizó el mapa escala 1:50.000 del reporte levantado por Moreno *et al.*, 1991 que fue usado en parte como base del estudio de GEOAV 2017. En el presente estudio en particular, se afinaron formas y contactos de las unidades definidas en este mapa, utilizando la imagen satelital de *Google Earth Pro*, 2017.

Finalmente, cubriendo todo el resto de la cuenca del río Maipo (porción sur) se utilizó la información de Thiele, 1980, y Klohn, 1960, ambos a una escala 1:250.000.

La Figura 3-2 representa la compilación de todas las fuentes de información que cubren el área regional de estudio, porción superior de la cuenca del río Maipo.



La información estructural de detalle fue levantada desde el estudio realizado por GEOAV y la Universidad de Chile entre el 2015 y 2017, la que se complementó con las otras fuentes ya mencionadas. Una pequeña cantidad de lineamientos fueron foto interpretados en este trabajo, sin verificación en terreno.

Información de mayor detalle fue tomada de prospecciones ejecutadas por PHAM, durante la ingeniería básica y de sondajes de exploración actuales, que permitió confirmar las unidades litológicas a lo largo de los avances del túnel, y en algunos casos sus características geotécnicas y rasgos estructurales en superficie que se manifiestan en profundidad.

En la Figura 3-3 se presenta la geología regional en el área del dominio del modelo, según Moreno *et al.*, 1991. En la Figura 3-4, se representa esta información complementada con la geología de mayor detalle levantada por GEOAV 2017, en el área de influencia del trazado del túnel.

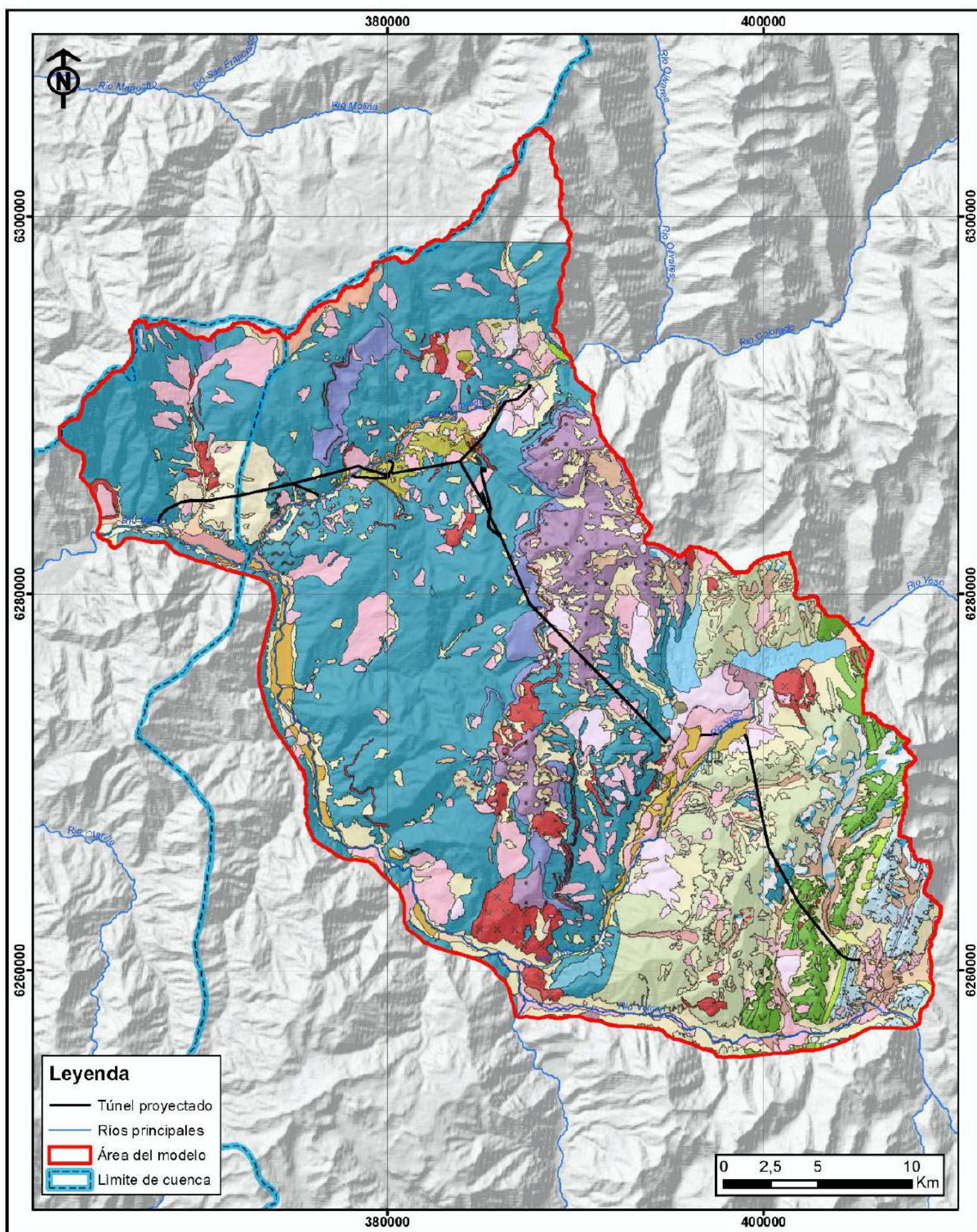


Figura 3-3: Geología Regional dentro del área del dominio del modelo según Moreno et al., 1991.

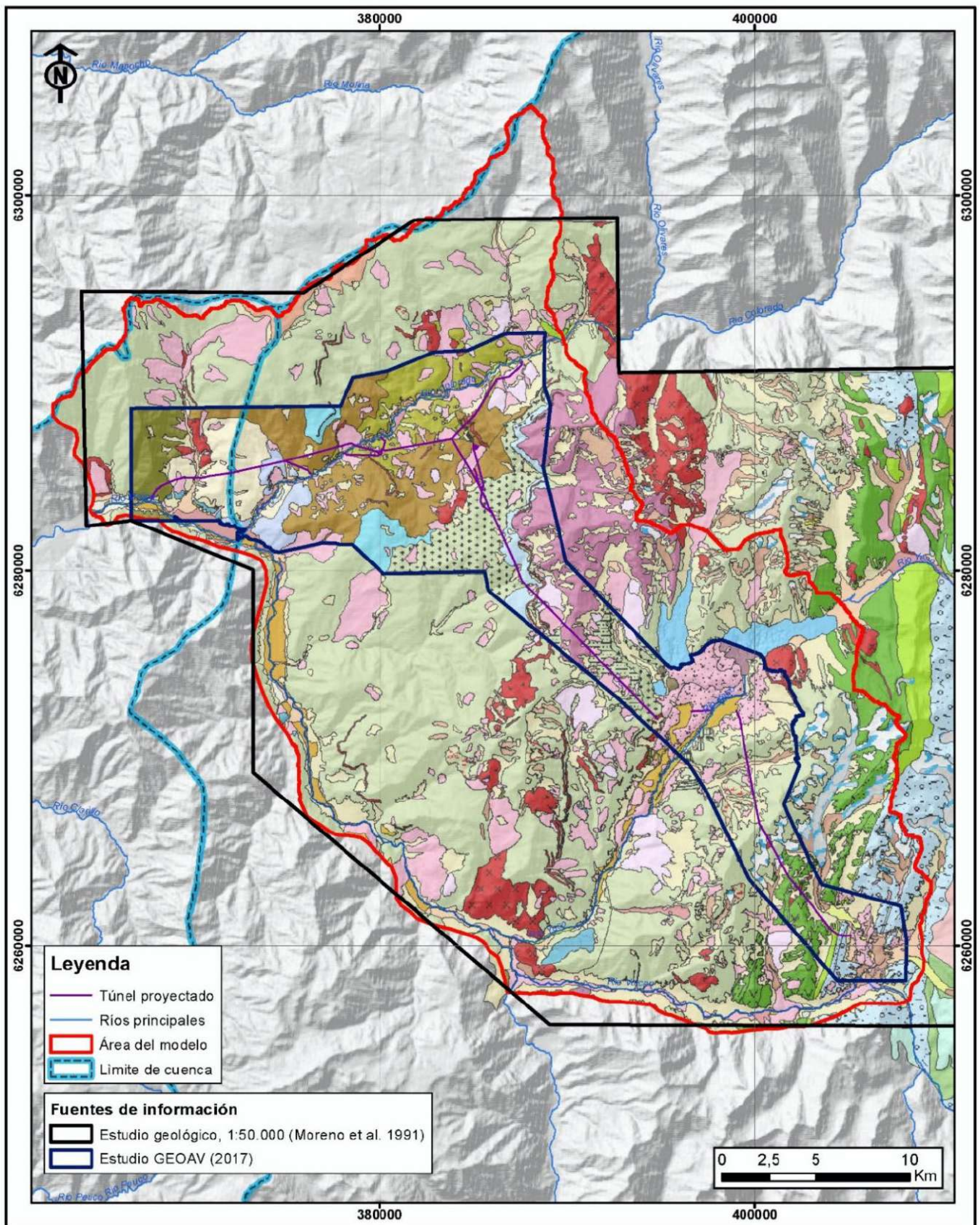


Figura 3-4: Geología Regional dentro del área del dominio del modelo, según Moreno et al., 1991 y geología local en torno al túnel según GEOAV 2017.

Respecto a las secciones geológicas que se han procesado, 3 de ellas están enfocadas a los túneles y son consistentes con las realizadas por GEOAV y la Universidad de Chile entre el 2015 y 2017. Una cuarta sección, tomada de Moreno *et al.*, 1991, muestra el sector occidental y sur del área del dominio del modelo.

3.2 Definición de Dominios Geológicos-estructurales

Una vez completada la etapa de análisis e integración de la información, se procedió a definir dominios geológicos-estructurales. Estos se conformaron de acuerdo con los rasgos estructurales predominantes en cada tramo, considerando la información estructural ya procesada por GEOAV y la Universidad de Chile entre el 2015 y 2017, y la información estructural regional tomada de Moreno *et al.*, 1991, Thiele, 1980, Klohn, 1960, y Fock, 2005.

Posterior a esto, se consideró las unidades litológicas que se disponen en superficie y a nivel del trazado del túnel.

4.0 GEOLOGÍA Y ESTRUCTURAS

4.1 Geología Regional

La geología general de la cuenca del río Maipo, que incluye los sectores donde se emplazarán los túneles Las Lajas, Alfalfal y El Volcán está constituida, en términos generales, por secuencias estratificadas de rocas volcánicas y sedimentarias continentales y marinas, intruidas por filones mantos, diques, batolitos y stocks.

Las edades de estas secuencias estratificadas varían desde el Jurásico Superior al Terciario Superior, y corresponden a Formación Río Damas, Formación Lo Valdés, Formación Baños del Flaco, Formación Colimapu, Formación Abanico, Formación Coya Machalí y Formación Farellones.

Las unidades cuaternarias corresponden a depósitos de relleno sedimentario del tipo fluvial, aluvial, de remoción en masa, glaciales y fluvioglaciares y en menor proporción lacustres, y unidades volcánicas del Volcán Marmolejo y San José (Moreno *et al.*, 1991).

A continuación, se describen brevemente las unidades antes mencionadas basadas, principalmente, en el reporte de Moreno *et al.*, 1991 y, puntualmente, para las unidades del extremo sur del área, en el trabajo de Klohn, 1960.

4.1.1 Secuencias Estratificadas

4.1.1.1 *Formación Río Damas (Jsrd):*

De edad Jurásico Superior, comprende conglomerados y brechas conglomerádicas rojizas con intercalaciones de areniscas y fangolitas púrpuras a marrón. Se intercalan niveles menores de rocas volcánicas andesíticas y yeso.

4.1.1.2 *Formación Lo Valdés (Kilv):*

De edad Titoniano Medio a Hauteriviano (Cretácico Superior), está constituida por una secuencia de calizas, calcilutitas, lutitas, areniscas calcáreas, conglomerados y brechas. Se intercalan en niveles, gruesos a medianos, rocas volcánicas andesíticas con delgadas capas lenticulares de yeso.

4.1.1.3 *Formación Baños del Flaco (Kbf):*

De edad Titoniano Superior-Hauteriviano, corresponde a una secuencia de estratos marinos fosilíferos compuesta principalmente por calizas, calizas arenosas, margas y areniscas calcáreas de color gris. También se observan conglomerados, areniscas glauconíticas, lutitas y lutitas carbonosas. Su mayor desarrollo lo tienen en el área de Baños del Flaco, en el valle del río Tinguiririca en las Provincias de Curicó y Colchagua. En Santiago, aparecen en la hoya del río Maipo superior, desde sus afluentes Negro y Barroso, hasta las inmediaciones del paso Maipo.

4.1.1.4 *Formación Colimapu (Kic):*

De edad Albiano-Aptiano (Cretácico Inferior), constituida por una secuencia de areniscas y lutitas rojas, conglomerados, con niveles de rocas piroclásticas y de lavas andesíticas, también existen calizas en capas lateralmente discontinuas.

4.1.1.5 *Formación Abanico:*

Corresponde al grupo de secuencias estratificadas que afloran en la mayor parte del área en torno a la traza del túnel. Al presentar bastantes singularidades lito estratigráficas se subdivide en dos subunidades.

- a. *Formación Abanico Oriental (KsTia):* De edad Cretácico Superior a Terciario Inferior, se extiende al oriente de la línea definida por el eje longitudinal del cajón Laguna Negra y río Yeso, se estima que representa los niveles basales de la Formación Abanico, apoyados en concordancia sobre la Formación Colimapu. Está formada por una alternancia de tobas, brechas volcánicas con intercalaciones de lavas andesíticas y riolíticas y rocas volcanoclásticas con numerosos filones mantos intruyéndolas. Están intensamente deformados por pliegues muy marcados y por zonas de fallas y fracturas, lo que, junto con una mayor alteración de la roca, la diferencia de la subunidad occidental.
- b. *Formación Abanico Occidental (Tia):* De edad estimada Terciaria Inferior, constituida predominantemente por rocas volcanoclásticas, tobas líticas, tufitas y areniscas tobáceas, y en menor proporción, ignimbritas y brechas, con niveles de lavas escasos. Se intercalan con numerosos filones manto. No se presenta tan deformada como la subunidad oriental y las capas mantean desde subhorizontal a 35° que definen pliegues suaves. Excepcionalmente se manifiestan manteos entre 50° a 85° en el borde occidental, al norte del sector Las Lajas.

En la descripción geológica de Moreno, el sector occidental de la Formación Abanico presenta cuatro facies o secuencias estratificadas distintas, de acuerdo con sus características litológicas y al ambiente en que se desarrollaron. Por otro lado, en el reporte de GEOAV de 2017, distinguen ocho facies, basados en el estudio realizado por Amawta en el 2016, las que representan distintas facies volcánicas, sedimentarias y subvolcánicas, asociadas a volcanismo explosivo lejano; volcanismo efusivo proximal; volcanismo explosivo proximal freatomagmático; sedimentación fluvio-aluvial de tipo intramontana (epiclástica) y magmatismo subvolcánico asociado a cuerpos alimentadores del volcanismo proximal en el área. Esta información se detallará en el siguiente capítulo.

4.1.1.6 *Formación Coya Machalí (Kcm):*

De edad Maastrichtiano, se extiende como precordillera, con rumbo norte, entre los pueblos de Coya y Machalí, al este de Rancagua. Constituida por depósitos terrígenos, principalmente sedimentos límnicos y rocas efusivas y piroclásticas, de composición andesítica y menor basaltos y traquitas. Se presenta intruida por macizos y apófisis de diorita y filones de pórfidos dioríticos y basálticos. Producto de la profunda erosión previa a su depositación, se superpone discordantemente sobre diversas formaciones más antiguas. Corresponde a la prolongación meridional de la Formación Abanico.

4.1.1.7 *Formación Farellones (Tsf):*

De edad calculada isotópicamente Miocena (Terciario Superior). Tiene poca representación en el área del trazado del túnel, en la meseta superior del cordón que se extiende al norte del flanco derecho del valle del Colorado. Presenta en general andesitas y dacitas, en parte brechosas, con afloramientos tipo filón manto.

4.1.1.8 *Intracaldera El Manzano:*

Unidad ubicada entre el estero El Manzano, río Colorado y río Maipo, ha sido interpretada como una intracaldera asociada al volcanismo que originó la Formación Farellones. Los trabajos más actuales realizados por Amawta (2016), interpretan esta zona como una serie de depósitos de diatrema y calderas de distinto orden, que se encuentran dispuestos de manera subhorizontal a ligeramente inclinados hacia el oeste unos 20° y que muestra una geometría circular entre el estero El Manzano y el río Colorado, al norte del río Maipo. Las unidades litológicas predominantes corresponden a tobas de lapilli y tobas de ceniza, y en menor proporción, tobas con texturas de flujo y brechas volcanoclásticas.

4.1.2 **Rocas Intrusivas**

Se agrupan en rocas plutónicas graníticas y rocas hipabisales, estas últimas son las predominantes en el área del proyecto.

4.1.2.1 *Rocas Plutónicas Graníticas (Mg):*

Granodioritas a monzogranitos con facies dioríticas y gábricas. Los principales son el stock La Gloria desde el norte del río Colorado en el sector de alfalfal hasta la Laguna Negra por el sur, y el Plutón San Gabriel, en las confluencias de los ríos Volcán, Yeso y Maipo. Otros intrusivos de menores extensiones son los de El Canelo, El Manzano, Cuesta El Durazno, El Embalse del Yeso y La Leñas. Al intruir la Formación Abanico, se ha estimado una edad máxima Miocena.

4.1.2.2 *Rocas Hipabisales porfídicas (Pp):*

Incluye cuerpos intrusivos de menor extensión, domos, lacolitos, filones manto, diques y cuerpos irregulares que cortan hasta la Formación Farellones. Litológicamente son microgranodioritas, pórfidos dioríticos, dacíticos, andesíticos y basálticos. La edad de estos cuerpos se estima que es más joven que los cuerpos intrusivos mayores, y sería Plioceno.

En el tramo final del túnel sector Las Lajas y sector occidental del túnel sector Alfalfal, el conjunto de intrusivos hipabisales fueron agrupados en el Complejo Hipabisal Aucayes (GEOAV 2017).

4.1.3 Unidades Cuaternarias

Corresponden a unidades volcánicas y depósitos de relleno sedimentario.

4.1.3.1 *Rocas Volcánicas antiguas*

Pertenecen a dos estratovolcanes principales: volcán Marmolejo y el volcán San José.

El volcán Marmolejo (Qvm) corresponde a un estratovolcán que alcanza los 6108 m s.n.m. Se encuentra muy desgastado por la erosión glacial y/o por procesos de remociones en masa. Comprende abundante material volcanoclástico en la base (brechas, aglomerados, tobas e ignimbritas, de espesor aproximado de 500 m), con una predominancia de lavas, filones mantos y brechas volcánicas en la parte alta, y con aproximadamente 1.500-1.700 m de espesor.

El volcán San José (Qvsj) alcanza una altura de 5856 m s.n.m y se conforma por un conjunto de centros de emisión de distintas edades. La cima principal está coronada por cuatro cráteres apareados en sentido norte-sur, de 500 a 600 m de diámetro cada uno. El cráter activo, en la actualidad, tiene más de 150 m de profundidad. El cono principal tiene una edad esencialmente Holocena y ha tenido erupciones con una frecuencia aproximada de 20 años, la última se registró en 1960. Este complejo volcánico se subdivide en cuatro subunidades, además de la unidad Qp que corresponden a depósitos piroclásticos balísticos:

- La subunidad Qvsj1, de edad Pleistoceno inferior-Pleistoceno superior, tiene 1.500 m de espesor y consiste en lavas y brechas volcánicas de composición andesítica, lacolitos y filones mantos;*
- la Subunidad Qvsj2 corresponde a un estrato volcán con un ancho cráter erosionado, esencialmente, efusivo reconociendo en sus flancos morfologías de coladas de andesitas porfídicas;*
- la Subunidad Qvsj3 corresponde a un cono más moderno instalado sobre el estratovolcán anterior, conformado por depósitos de coladas de lava andesítica y su edad sería Pleistoceno Superior;*
- la Subunidad Qvsj4, es el grupo principal de conos, los cuatro cráteres han emitido lavas andesíticas de no más de 3 km de longitud y abundantes piroclastos asociados a la unidad Qp, y su flanco occidental está cubierto por varios glaciares.*

4.1.3.2 *Depósitos de ignimbritas pumicíticas (Qip)*

Unidad constituida por cenizas riolíticas, frecuentes en niveles con fragmentos de piedra pómez y escasos fragmentos líticos volcánicos. Presentan espesores potentes de varias decenas de metros y su origen correspondería a un flujo piroclástico formado durante la explosión de la caldera de Laguna del Diamante y el Volcán Maipo. Los depósitos más importantes de esta unidad se ubican en ambos flancos de la desembocadura del estero El Manzano en el valle del río Maipo, y frente a la confluencia de éste con el río Colorado, también en el Estero Coyanco, en el valle del Yeso y 2 km aguas arriba en la ladera izquierda de este último.

4.1.3.3 *Depósitos de Relleno Sedimentario*

a. *Depósitos coluviales y conos de deyección (Qc)*

Corresponden a depósitos diamícticos de granulometría heterogénea, formas angulosas y composición correspondiente a mezclas simples relacionadas con las rocas que afloran en el relieve local. Se disponen en las laderas desarrollando pendientes fuertes, de unos 20-25°, o se ubican al pie de éstas constituyendo apilamientos de formas cónicas. Se forman por meteorización mecánica y química, y pueden formar un manto *in situ* como coberturas de suelos o escombros de falda o, eventualmente, caer por efecto de la gravedad ayudados por aguas provenientes de lluvias o fusión de nieves.

b. *Depósitos fluviales*

Depósitos fluviales recientes y actuales (Qf): Son gravas arenosas y arenas que se disponen en el cauce actual de los ríos, de edades holocénicas a actuales;

Depósitos fluviales antiguos aterrazados (Qfa): Depósitos de gravas arenosas y arenas interestratificadas en los que se intercalan, eventualmente, algunos finos limo-arcillosos o depósitos de corrientes de barro. Forman partes de terrazas que se ubican a ambos lados del curso de los ríos o laderas de valles y comprenden edades desde el Holoceno hasta el Pleistoceno Superior;

Depósitos aluvionales-torrenciales (Qa): Son gruesas acumulaciones en forma de abanicos o semiconos, constituidos por grandes depósitos de clastos, redondeados a subredondeados, con una escasa matriz gruesa, que corresponden a abanicos que se conectan, en su zona apical, con sectores con evacuación torrencial y esporádica de aguas provenientes, en la mayoría de los casos, de precipitaciones o derretimiento de hielos y nieve. Comprenden edades holocénicas a actual.

Depósitos Avenidales (Qav): Son depósitos de granulometría gruesa, con clastos subredondeados a angulosos de composición heterogénea. Se presenta en forma masiva y alcanzan espesores de hasta decenas de metros, pero la mayor parte son delgados, parches o superficies de erosión. Se forman durante el escape violento de aguas que han sido embalsadas de manera temporal por remociones en masa. Estos depósitos se forman aguas abajo de estos represamientos y su composición se correlaciona con la litología del material que generó el embalsamiento. Su edad va desde el comienzo del Holoceno al actual.

c. *Depósitos de remoción en masa*

Depósitos de remoción en masa por reptación (Qrmr): Son los denominados “glaciares de roca”, diamícticos, de clastos angulosos y composición monomíctica ligados a la litología de la roca que constituye las laderas circundantes a estos depósitos. Tienen formas de lenguas alargadas, con superficies irregulares y desarrollo de levées laterales. Estos depósitos son de edad Holocena.

Depósitos de remoción en masa por deslizamiento o derrumbes de rocas y detritos (Qrmd): Están ampliamente repartidos en la zona, corresponden a sedimentos diamícticos, constituidos por clastos angulosos de diámetros variados en una matriz areno-limo-arcillosa. La superficie de estos depósitos generalmente es monticulada (hummocks) con un espesor que alcanza varias decenas de metros o incluso centenas. Las edades de estos depósitos comprenden desde el Pleistoceno Superior al Holoceno, incluyendo también fenómenos recientes, como el deslizamiento Las Cortaderas o Arenal en el río Yeso, ocurrida durante el terremoto de las Melosas en 1958.

Depósitos de remoción en masa de flujos (Qrmf): Constituida por depósitos diamícticos, con clastos angulosos y algunos redondeados, de tamaños variables, desde centímetros hasta un metro o varios metros, polimícticos, matriz soportante areno-limo-arcillosa. Se caracterizan por su extensión lateral, superficie plana, en parte disectadas, originando terrazas laterales en valles. Su origen corresponde principalmente a fenómenos de remoción en masa complejos tipo derrumbe “catastrófico” de rocas y flujos de detritos conexos posteriores. Su edad varía desde el Pleistoceno Superior hasta la actualidad. Se localizan ambos márgenes del río Colorado, continuando por el valle del río Maipo hasta El Manzano.

Depósitos de remoción en masa por deslizamiento y derrumbe de bloques (Qrmb): Bloques de roca fundamental que sufren desplazamientos verticales y rotaciones sin experimentar cambios notables en su integridad, manteniendo sus estructuras internas, excepto alguna fragmentación o trituramiento interno. Comprenden bloques de algunas decenas de metros hasta algunas centenas de metros o mega bloques. Su edad es principalmente Holoceno. Esta se da en ambas laderas del río Colorado en el sector del Alfalfal.

Depósitos de remoción en masa de avalancha volcánica (Qrmv): Constituidos por depósitos diamícticos, conformados por clastos volcánicos andesíticos inmersos en una matriz de lapilli y ceniza. Se presenta con grandes espesores e incluyen hasta mega bloques. Se formaron durante el colapso del cono del volcán Marmolejo, ocurrido durante las etapas de actividad de éste. Su edad es Pleistoceno Superior y habría ocurrido con anterioridad a las dos últimas glaciaciones.

d. Depósitos de *terrazas* poligénicas (Qtp)

Constituidos por depósitos fluviales, principalmente gravas arenosas y arenas en los cuales se intercalan depósitos diamícticos correspondientes a depósitos de flujo y/o corrientes de barro. Esta unidad da origen a terrazas situadas en ambos flancos de los valles principales de la zona. Su edad es principalmente Holocénica.

e. *Depósitos* lacustres (Ql)

Constituida por depósitos finos del tipo limo-arcillas y arcillas puras con intercalaciones de turbas, depósitos calcáreos, travertinos y depósitos salinos. Alcanzan espesores entre 1 a 10 o 15 m, e internamente presentan estratificación fina. Se forman en cuencas de drenajes obstruidas, la mayor parte de ellas asociadas a fenómenos de remoción en masa. Algunos de ellos, desarrollados aguas arriba de los embalses originados por la caída lateral de alguno de estos depósitos de remoción en masa en los valles.

f. Depósitos Glaciales

Depósitos morrénicos recientes y actuales (Qm): constituido por depósitos diamícticos de clastos angulosos y redondeados en una matriz de arena, limos y arcillas. No evidencian estratificación interna y la disposición de los clastos es caóticas. Presentan potentes espesores y desarrollan morfologías de cordones laterales en los márgenes de muchos valles en forma de artesa o circos glaciales, o cordones transversales en forma de semiarco, correspondientes a morrenas frontales activas, abandonadas o de fondo. Su edad varía desde el Holoceno a la actualidad.

Depósitos fluvioglaciales (Qfg): Corresponden a gravas gruesas arenosas con contenidos variables de matrices más finas limo arcillosas, con clastos subredondeados a subangulosos. Son depósitos masivos y gruesos que en superficie presentan formas de abanicos o semiconos situados aguas abajo de lenguas glaciales y arcos morrénicos. Su génesis corresponde al retrabajamiento (transporte y depositación) de depósitos morrénicos terminales por parte de aguas provenientes de la fusión de hielo. Su edad es Holoceno a actual.

Depósitos morrénicos antiguos (Qma): Constituida por depósitos diamícticos de clastos angulosos y redondeados en una matriz de arena, limos y arcillas. A diferencia de los actuales, presentan un cierto grado de cohesión y, además, una cierta alteración por meteorización. Fueron originados por lenguas glaciales de gran espesor que descendieron por los valles principales hasta alcanzar alturas de unos 1300 m s.n.m. Su edad estimada es Pleistoceno Superior.

4.2 Estructuras

En general, se observan diferentes características en los sectores occidental y oriental dentro del área de dominio del modelo hidrogeológico. La deformación de las unidades es mayor en el sector oriental, es decir en el tramo que comprende el túnel Volcán de la Figura 4-1.

En el *sector occidental*, donde mayoritariamente afloran unidades de la Formación Abanico Occidental y Farellones, éstas se presentan plegadas en un grado medio a menor, formando anticlinales y sinclinales concéntricos, y las fallas mayores en este sector son, principalmente, subverticales de tipo normal.

En el *sector oriental* afloran las demás secuencias descritas que se presentan muy deformadas por pliegues y fallas, de estas últimas, las mayores son, en general, de rumbo norte-sur. Los estratos se pliegan hasta tomar posiciones subverticales e incluso invertidas, y hacia el sur-este, también son características fallas inclinadas inversas con sobre escurrimientos. Este sector corresponde al comienzo de la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua, que consiste, principalmente, en corrimientos de vergencia este que afectan, incluso, a estructuras desarrolladas previamente (Fock, 2005).

De este sector, la estructura lineal más importante, es la zona de falla que se extiende de norte a sur desde el portezuelo La Paloma hasta el Cajón de las Cortaderas, pasando por el borde este de la Laguna Negra y flanco oriente del río Yeso. Esta estructura controla el cambio de actitud estructural de los estratos, al sur del Cajón de Las Cortaderas, donde la roca aparece tectónicamente muy alterada. Más hacia el este, el sistema de fallas El

Fierro-Los Chacayes-El Yesillo (N20°E/80°E) de carácter inverso, también es relevante, pues genera un sinclinal asimétrico de las lavas de la Formación Abanico. Además, en esta zona actúa la falla inversa El Diablo (N20°E/80°W) alzando los estratos de la Formación Colimapu, quedando éstos entre ambas fallas mencionadas. Así la acción conjunta de estas fallas, genera un pliegue anticlinal apretado en la Formación Colimapu de vergencia oeste (Fock, 2005).

Otra falla que tiene incidencia dentro de la *zona occidental* del área estudio es la falla normal Aucayes, con dirección norte-este y subvertical. Se extiende desde Lagunillas por el sur, hasta Alfalfal por el norte, controlando varias de las remociones en masa en el sector. Particularmente, donde atraviesa la quebrada Aucayes y al sur de ésta, se observa un desplazamiento del orden de 10 m con descenso de bloque oriental y, además, al ser subparalela a la traza del túnel, en el flanco izquierdo del valle del Colorado, configura una zona geotécnicamente moderada a mala.

Los sistemas estructurales principales en el sector del túnel Alfalfal (vértice VA2 Adit HRT), corresponde a la Falla Quinagua, de orientación aproximada norte-este en el sector norte, y de alto ángulo (GeaoAV, 2017).

La condición estructural de detalle se explica en el capítulo siguiente, refiriéndose a las estructuras presentes dentro de cada tramo del túnel que constituye el proyecto. En la Figura 4-1, se muestran las estructuras regionales (Moreno *et al.*, 1991) y las obtenidas del proyecto *Base Lineaments* UCH (2015) de la Universidad de Chile.

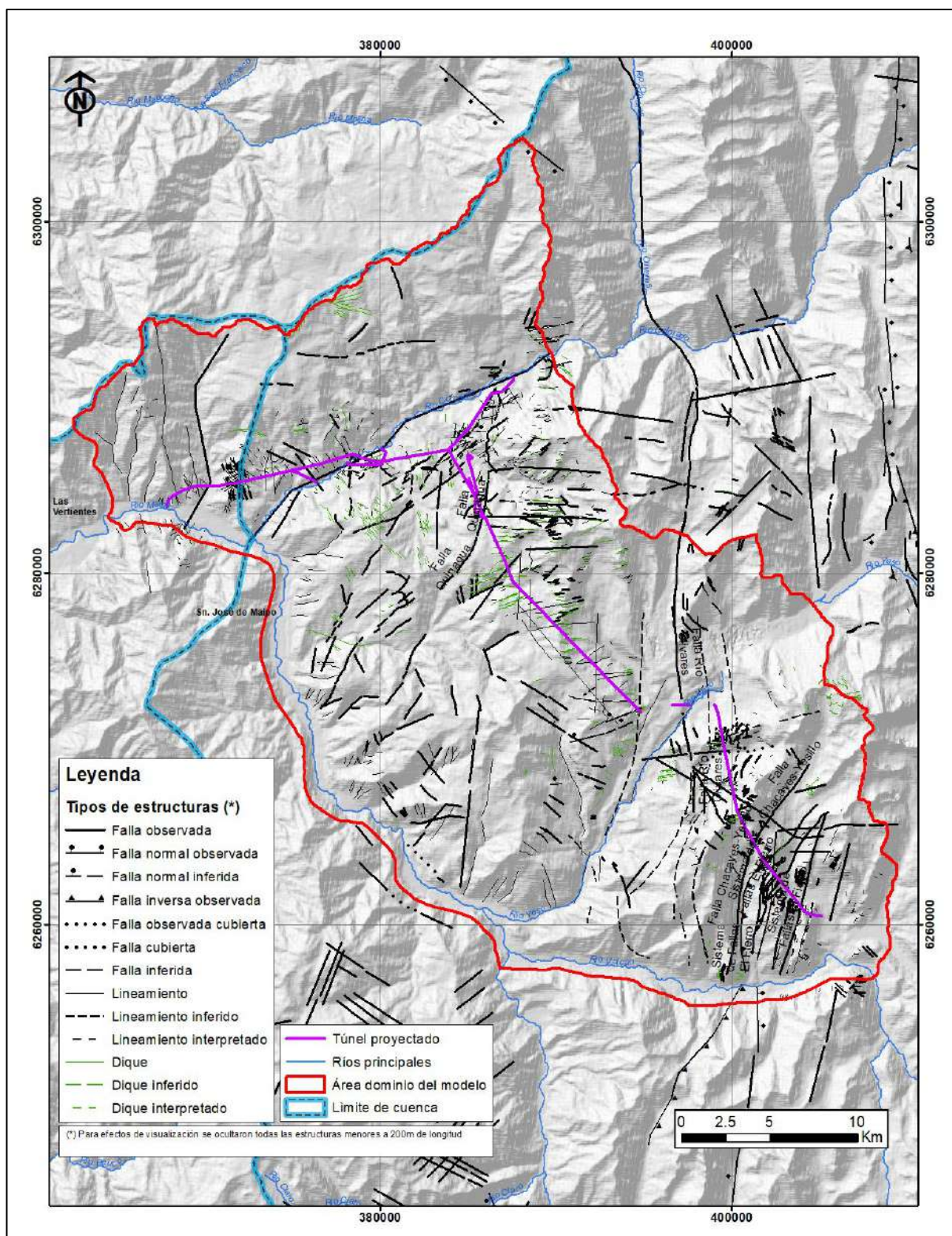


Figura 4-1: Estructuras regionales según Moreno et al., 1991 y locales según Base Lineaments UCH (2015) de la Universidad de Chile

5.0 DOMINIOS GEOLÓGICOS-ESTRUCTURALES

5.1 Introducción

Los estudios geológicos previamente revisados el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, presentaron para cada tramo de proyecto definido, diferentes dominios geológicos-estructurales, donde se consideraron, fundamentalmente, los siguientes rasgos estructurales:

- Fallas regionales,
- zonas de fallas asociadas a las anteriores,
- contactos geológicos,
- pliegues,
- lineamientos generales, algunos de ellos foto interpretados, y
- unidades geológicas involucradas en cada tramo.

En consecuencia, considerando los mismos criterios, se extienden estos dominios hacia el área del modelo hidrogeológico (Figura 5-1).

La distribución de unidades geológicas y rasgos estructurales se presenta en una sección trazada de oeste a este, representada en la Figura 5-2, correspondiente al perfil A-A' identificado de la Figura 5-1.

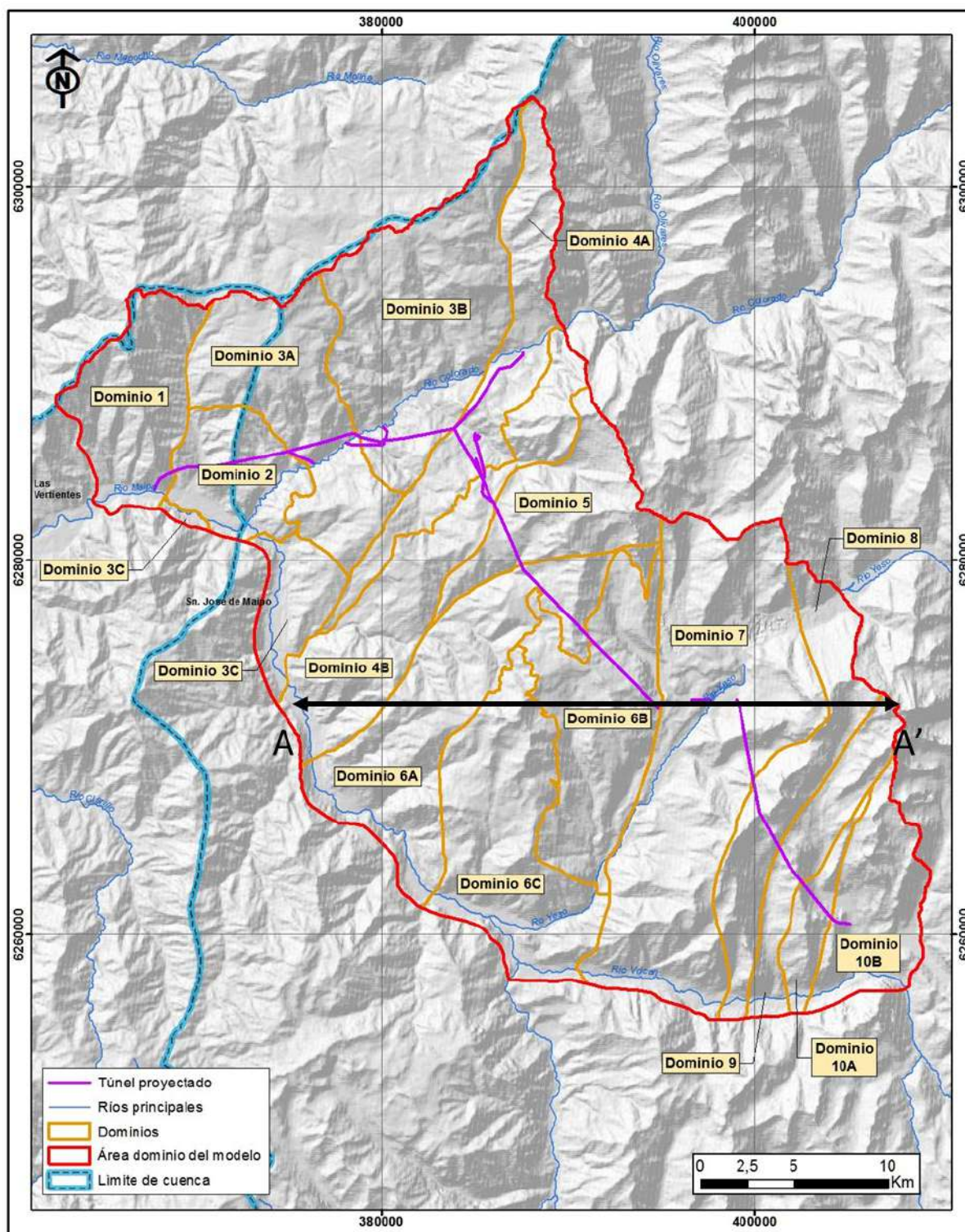


Figura 5-1: Esquema general de dominios geológicos-estructurales en el área del modelo.

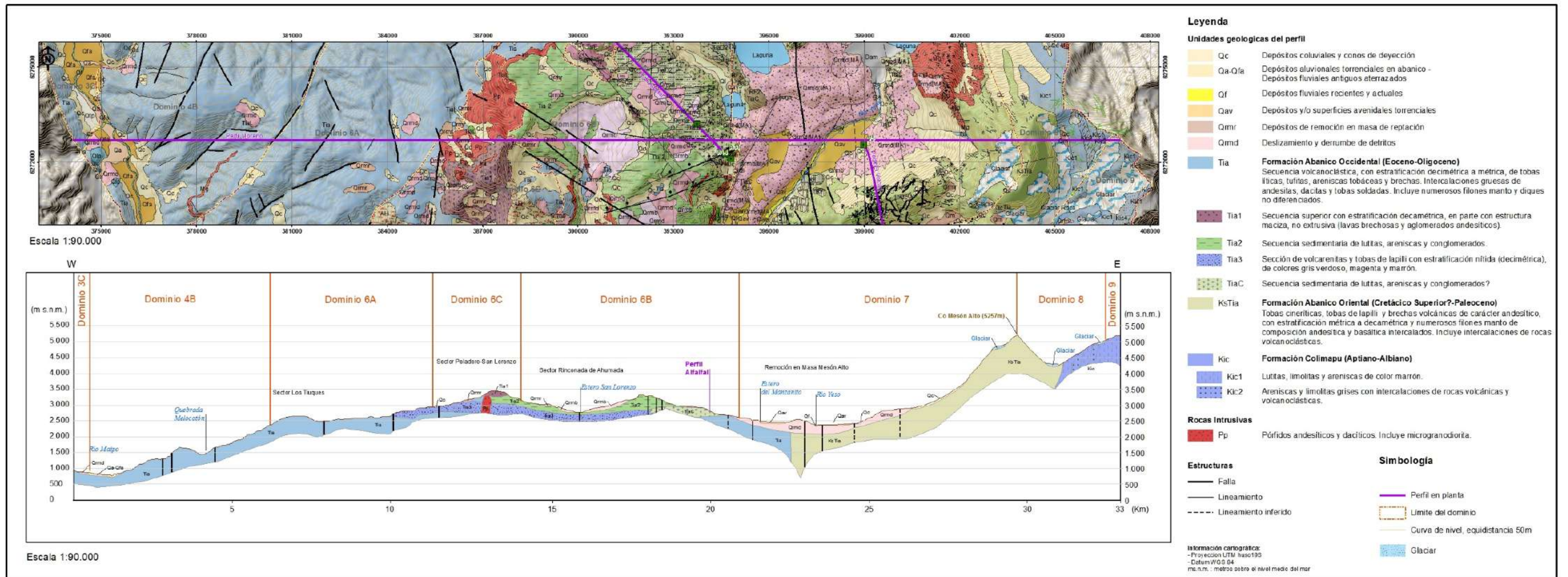


Figura 5-2: Perfil General cuenca del Alto Maipo, Perfil transversal A-A'

5.2 Dominios Geológicos-Estructurales Interpretados

5.2.1 Tramo Las Lajas

Se definieron 3 dominios, de acuerdo, con los rasgos estructurales y las unidades litológicas expuestas a lo largo del tramo del túnel Las Lajas, que se presenta en la Figura 5-3. De oeste a este corresponden a:

5.2.1.1 Dominio 1

Corresponde al segmento L1 a L2 del túnel, como se observa en la Figura 5-3 y geológicamente lo constituyen andesitas y brechas volcánicas de la unidad Las Lajas, de la Formación Abanico, que se encuentran plegadas y cuya estructura principal es interpretada como un anticlinal apretado, con vergencia hacia el este, que se encuentra mejor expuesto en la ladera oeste del valle del estero El Manzano y, hacia el norte, a lo largo del túnel, aparece, únicamente, el flanco occidental de dicha estructura (GEOAV., 2017). En este tramo se observan lineamientos generales con rumbos principalmente norte-sur, siendo la estructura más fuerte del área el pliegue de tipo *chevron* que describen los estratos de la unidad Las Lajas en la ladera oeste del estero El Manzano, cuyos estratos se caracterizan por fuertes manteos (80° - 85° al oeste y al este), cuyo eje se dispone según un rumbo aproximado norte-sur (en Informe Ingeniería Básica 630-GE-INF-001_00_01_2017).

5.2.1.2 Dominio 2

Hacia el este del Dominio 1, se observa un cambio litológico y estructural, aproximadamente en el km 1.500, a lo largo del túnel Las Lajas. A partir de este contacto predominan tobas de lapilli y tobas de ceniza y, en menor proporción, tobas con texturas de flujo y brechas volcanoclásticas, asociadas a la Unidad El Manzano e interpretada como una serie de depósitos de diatrema y calderas de distinto orden, que se encuentran dispuestos de manera subhorizontal a ligeramente inclinados hacia el oeste unos 20° (Amawta, 2016) y que muestra una geometría circular entre el estero El Manzano y el río Colorado, al norte del río Maipo. Hacia el estero El Manzano, afloran rocas intrusivas cubiertas por depósitos fluviales y coluviales. Los contactos entre la unidad intrusiva y los elementos de caldera son indeterminados.

La información estructural 3D obtenida en el interior del túnel, fue correlacionada con los datos observados en superficie cerca de la parte central de la Unidad El Manzano. Entre los km 3.200-5.300 (Sección Las Lajas, El Manzano) la correlación entre las orientaciones estructurales noreste es directa (GEOAV, 2017). En particular, en este segmento y hacia el vértice L4, se observa una importante cantidad de lineamientos subverticales, los cuales se encuentran en intervalos menores a 100 metros, incluyen, además de los norte-este mencionados, otros de orientación noroeste, tal como se observa en la Figura 5-3.

5.2.1.3 Dominio 3

Corresponde al tramo comprendido entre los vértices L4 a L10, de la Figura 5-3, donde se presentan las unidades TiaA y TiaB de la Formación Abanico, en donde la primera está compuesta de tobas con areniscas y andesitas, con intercalaciones de brechas andesíticas, mientras que TiaB se compone de brechas volcanoclásticas con intercalaciones menores de tobas y areniscas (GeoAV, 2017). Particularmente los dominios 3A y 3B se muestran en la Figura 5-3, mientras que el dominio 3C, sector más occidental del área de estudio, se observa en la Figura 5-2.

- **Dominio 3A:**

Entre L4 y L6, presenta lineamientos y estructuras de orientación principalmente noroeste subverticales, espaciadas aproximadamente 100 m o menos.

- **Dominio 3B:**

Hacia el este, se observan dos paneles con diferentes inclinaciones dando forma a un anticlinal suave, de larga longitud de onda (~10 km), denominado Anticlinal del Colorado, entre la zona entre L6 y L9', donde, además, se muestra una alta presencia de estructuras subverticales, espaciadas aproximadamente 100 m o menos y con la presencia de sedimentos y depósitos volcánicos en cuñas de variada extensión lateral. Hacia L10, la disposición de las capas es mayoritariamente subhorizontal según la traza del túnel, con mayor presencia de lineamientos y estructuras, particularmente, entre los km 500-1.600 y 2.100-2.800. Entre los vértices L10 y L14, se observa un anticlinal de gran amplitud. El conjunto de intrusivos hipabisales que se reconocen principalmente en esta última zona y que también se han observado a lo largo de los túneles del sector Alfalfal II fueron agrupados en el Complejo Hipabisal Aucayes (GEOAV, 2017).

- **Dominio 3C:**

Sector ubicado en el borde más occidental del área de estudio, en el sector de la localidad de San José de Maipo. Se caracteriza por presentar escasa evidencia de estructuras, de rumbo norte-sur principalmente y menor NE subverticales y lineamientos EW. Corresponde a un anticlinal con eje subparalelo al río Maipo, y que ha sido erosionado por éste. Hacia el este del río Maipo, luego de la quebrada El Melocotón las capas de los estratos se tornan subhorizontales. Las unidades litológicas corresponden a brechas piroclásticas y volcanoclásticas con intercalaciones de tobas, brechas volcanoclásticas y areniscas.

PERFIL LAS LAJAS

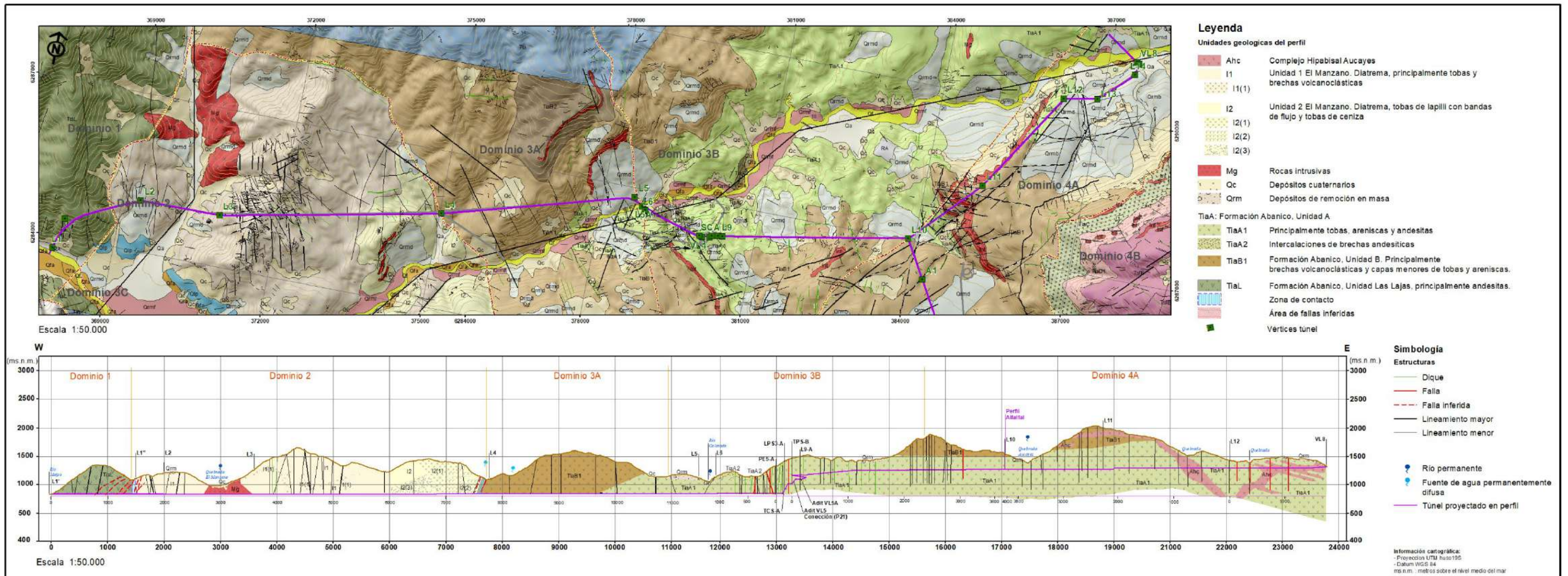


Figura 5-3: Perfil geológico tramo Las Lajas

5.2.2 Tramo Alfalfal

El mapa y sección Alfalfal II reflejan un dominio estructural relativamente estable dentro del área de emplazamiento del proyecto y, en términos generales, presenta variaciones entre sus tramos occidental y oriental (GEOAV, 2017). Para este estudio en particular, se presentan tres dominios a lo largo de este tramo definidos en términos estructurales. Dentro de estos dominios, a su vez, existen algunas variaciones litológicas. En el Perfil Tramo Alfalfal, Figura 5-4, se muestran las características de los dominios en el tramo del túnel, y en la Figura 5-2, Perfil General cuenca del Maipo, las características hacia el sector suroccidental del área de estudio.

5.2.2.1 Dominio 4

Corresponde al tramo donde se ubican los túneles VA1, VA2 y túnel de descarga (TRT, *Tail Race Tunnel*), cuyo límite sur, hacia el siguiente dominio, corresponde a la zona de Falla Quinagua. Este dominio presenta dos subunidades litológicas dentro de la Formación Abanico.

- La primera subunidad en el sector norte-oeste de este tramo, denominada Dominio 4A, contiene brechas volcanoclásticas y piroclásticas con intercalaciones de tobas y capas de areniscas volcanoclásticas (Subunidad TiaB) y
- la subunidad en el sector SE, denominada Dominio 4B, contiene lavas andesíticas, autobrechas andesíticas, aglomerados con intercalaciones menores de tobas de subunidad TiaC (en GEOAV 2017, de Moreno *et al.*, 1991).

En particular, la zona correspondiente a la Caverna Alfalfal II y el pique de presión cruzan unidades de roca intrusiva, de composición andesítica-basáltica variable, que aflora en superficie cerca de 700 m al oeste de A9', aproximadamente, en el límite de estas dos subunidades.

Los sistemas estructurales principales en este dominio corresponden a la Falla Quinagua, cerca del km 2.350 en VA2, y a otras fallas y lineamientos de orientación aproximada norte-este, desde esta falla hacia el norte, todas ellas de alto ángulo.

5.2.2.2 Dominio 5

Corresponde a la parte sur del tramo occidental del túnel Alfalfal, que comienza desde la zona donde se ubica la Falla Quinagua, hacia el sur-este hasta el km 6.500 del túnel VA2-VA4 (A10), y está caracterizado por ser un gran bloque parcialmente subhorizontal, que presenta principalmente unidades litológicas correspondientes a lavas andesíticas, autobrechas andesíticas, aglomerados con intercalaciones menores de tobas de subunidad Tia C, y sobreyaciendo a ésta, areniscas volcanoclásticas y tobas de lapilli de la subunidad Tia D1. Hacia el este y sur de la traza del túnel y sobreyaciendo a la subunidad Tia D1, estratos constituidos por lavas andesíticas brechosas, brechas y aglomerados volcánicos, denominados Cordón Echaurren de la Formación Farellones, caracterizan también este dominio (en GEOAV 2017, de Moreno *et al.*, 1991). El túnel en este dominio atravesaría sólo la primera unidad (TiaC).

Estructuralmente, el túnel VA2-VA4 intercepta sistemas subverticales, compuestos por diques y/o lineamientos mayores, cada 200-400 m en los primeros 4,8 km y cada 100-200 m en zonas más cercanas al portal VA4. En

algunos casos, estos diques están cortados y desplazados por estructuras. En este dominio particularmente, fallas, diques y lineamientos presentan orientación este-oeste y menor este-noreste.

5.2.2.3 Dominio 6

Se extiende desde el km 6.500 del túnel VA2-VA4 (A10) hasta VA4 (HRT, *Head Race Tunnel*), y constituye la zona oriental del túnel Alfalfal (GEOAV, 2017). Hacia el sector occidental de la cuenca se mantienen los rasgos principales cercanos al túnel, con mayor presencia de intrusivos tipo pórfidos y stocks.

- **Dominio 6A**

Se extiende aproximadamente hasta el km 10.600 (A10'), sector centro-oriental del túnel. Litológicamente en superficie se observan, principalmente, las subunidades de la Formación Abanico constituidas por areniscas volcanoclásticas y tobas de lapilli (TiaD1) y sobreyaciendo a ésta, un paquete sedimentario formado por lutitas, areniscas y conglomerados (TiaD2) y hacia el SE, finalizando este dominio, los estratos del Cordón Echaurren de la Formación Farellones. El túnel en este dominio sigue atravesando la subunidad de lavas andesíticas, autobrechas andesíticas y aglomerados con intercalaciones menores de tobas (TiaC). Depósitos de deslizamientos de bloque y detritos, cubren gran parte de estas unidades en la parte central de este dominio. Se observan diques y lineamientos de orientación principalmente este-noreste y menor norte-este con manteos variables entre 75 a 90°.

- **Dominio 6B**

Se extiende desde A10' hasta HRT VA4. En superficie predominan lutitas, areniscas y conglomerados de la subunidad TiaD2 y hacia el final de este dominio al sur-este, en el km 1.100, lavas andesíticas, autobrechas andesíticas, aglomerados con intercalaciones menores de tobas de la subunidad TiaC. Depósitos de deslizamientos de detritos, cubren gran parte de estas unidades al inicio y parte central de este dominio.

Estructuralmente, continúan los diques y lineamientos de orientación principalmente este-noreste y menor norte-este con manteos variables entre 75 a 90°, y además una serie de lineamientos mayores (hasta 6 km de largo) de orientación norte-oeste, corren paralelos a la sección y en particular en la zona central del túnel entre los km 4.000 de VA2 Adit HRT y km 1.000 de HRT VA4, se encuentra bastante cercanos (entre 500-1000 m) (GEOAV, 2017). En las cercanías del portal VA4 se evidencia una leve deformación anticlinal-sinclinal de longitud de onda media de 2 km (GEOAV, 2017; Moreno *et al.*, 1991).

- **Dominio 6C**

Sector ubicado en el centro-sur del área de estudio. Se caracteriza por presentar estructuras y lineamientos subverticales, de rumbo norte-sur principalmente y menor norte-este. Las unidades litológicas en superficie corresponden, principalmente, a las subunidades de la formación abanico constituidas por areniscas volcanoclásticas y tobas de lapilli y sobreyaciendo a ésta, un paquete sedimentario formado por lutitas, areniscas y conglomerados, intruidas por intrusivos tipo pórfidos y hacia el borde sur del área de estudio, por un gran stock. Esta secuencia estratificada, se dispone de forma subhorizontal.

PERFIL ALFALFAL

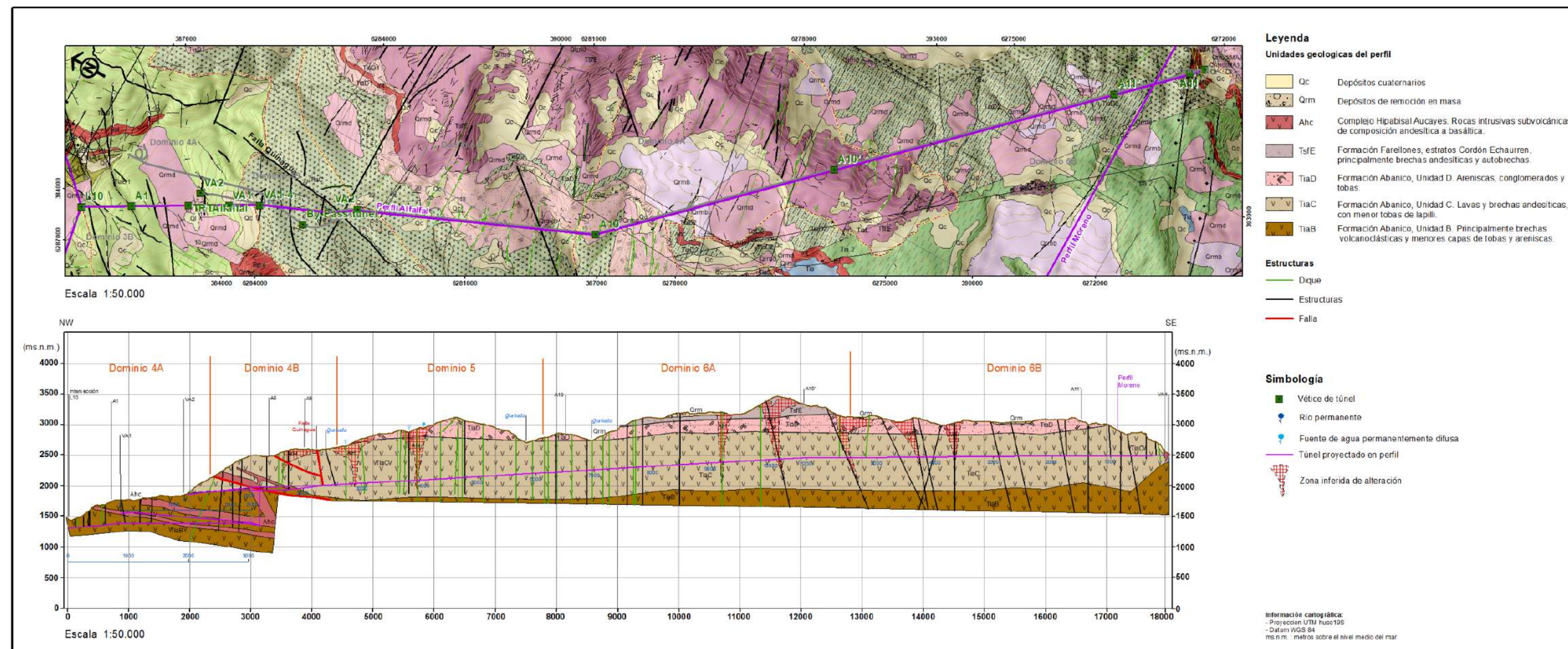


Figura 5-4: Perfil geológico Tramo Alfalfal

5.2.3 Tramo El Volcán

En el análisis de este trabajo, este tramo fue dividido en cuatro dominios, caracterizados de noroeste a sur-este, como se explica a continuación, y como se muestra en la Figura 5-5.

5.2.3.1 Dominio 7

Corresponde a una subcuenca invertida de la Formación Abanico, cuya deformación principal corresponde a un par anticlinal-sinclinal de corta longitud de onda, relativamente simétricos, cuyos rumbos son paralelos al trazado del túnel. En este dominio se han identificado frecuentes estructuras compresivas secundarias, de muy bajo ángulo y escala métrica, con geometrías de tipo dúplex. Además, se observó la presencia de un complejo subvolcánico (hipabisal) en torno al km 10.880, de extensión lateral desconocida, con mineralización de sulfuros de cobre y hierro, además de una fuerte alteración propilítica (asociación epidota-clorita-carbonatos) y menor alteración potásica (Feldespato-K y Biotita) hacia la base (GEOAV, 2017). Adicionalmente, se han observado en superficie, óxidos de hierro que fueron proyectados hacia subsuperficie utilizando las estructuras principales.

Las orientaciones de las estructuras y lineamientos principales son norte-sur y norte-este y menor norte-noroeste. Las unidades litológicas en este tramo corresponden al miembro oriental de la Formación Abanico, constituida por tobas cineríticas, tobas de lapilli y brechas volcánicas de composición andesítica, con estratificación métrica a decamétrica, e intercalaciones de rocas volcanoclásticas (Moreno *et al.*, 1991).

5.2.3.2 Dominio 8

Este dominio se encuentra separado del primero por una falla local inversa de orientación norte-este. Éste corresponde a un sector estable dentro de la sección, con manteos constantes de muy alto ángulo a invertidos, sin evidencias de mayor deformación (GEOAV, 2017, Moreno *et al.*, 1991).

Las unidades litológicas de la primera parte de este dominio siguen perteneciendo al miembro oriental de la Formación Abanico, con presencia de un intrusivo filoniano félsico y, posteriormente, se encuentran desde el km. 5.920 en contacto discordante con las lutitas, areniscas y conglomerados rojos de la Formación Colimapu, la que se encuentra cortada por abundantes diques de escala decimétrica y algunos diques de escala métrica (GEOAV, 2017).

5.2.3.3 Dominio 9

El siguiente dominio, entre los Km 5.750 y 3.570, incluye lutitas, areniscas y conglomerados rojos con intercalaciones de rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Colimapu, y calizas y lutitas calcáreas de la Formación Lo Valdés, las cuales se observan intruidas, alteradas y altamente fracturadas por un cuerpo intrusivo filoniano que se divide en dos hacia la superficie. El conjunto de estructuras involucradas corresponde al sistema de fallas El Fierro-Chacayes-Yesillo (S.F.Ch.Y.), en el cual, además, se observan diapiros de yeso. Por esta razón, en esta zona se espera una disminución en la calidad del macizo rocoso, además corresponde al área de mayor complejidad estructural en el túnel, dada por la presencia de un sistema de fallas regionales con muy alto desplazamiento relativo, que generan una repetición de la columna estratigráfica (GEOAV, 2017).

5.2.3.4 *Dominio 10*

Corresponde al último dominio del túnel El Volcán, y se divide en dos unidades de acuerdo con sus características litológicas.

- **Dominio 10A**

Se define entre el km 3.570 a 1.250 aproximadamente. Está dispuesto en ángulo subvertical igual que el dominio anterior, y está constituido por lavas, tobas y brechas de composición andesítica y hacia el sur-este en paraconcordancia, una unidad de baja potencia de areniscas rojas, correspondiente al miembro sedimentario continental Kic1, de la Formación Colimapu.

Los rasgos estructurales predominantes corresponden a la falla inversa El Diablo (N20°E/80°W), y otras fallas y lineamientos norte-sur y norte-este y menor este-oeste.

- **Dominio 10B**

Finalmente, se observan en concordancia con las unidades anteriores, calizas y lutitas correspondientes a Formación Lo Valdés (Kilv) y, una unidad volcano-sedimentaria correspondiente al miembro superior de Formación Río Damas (Jsrd2) constituida por areniscas y lutitas continentales de rojo, con lineamientos de orientación norte-sur principalmente y menores norte-este y norte-oeste.

PERFIL EL VOLCÁN

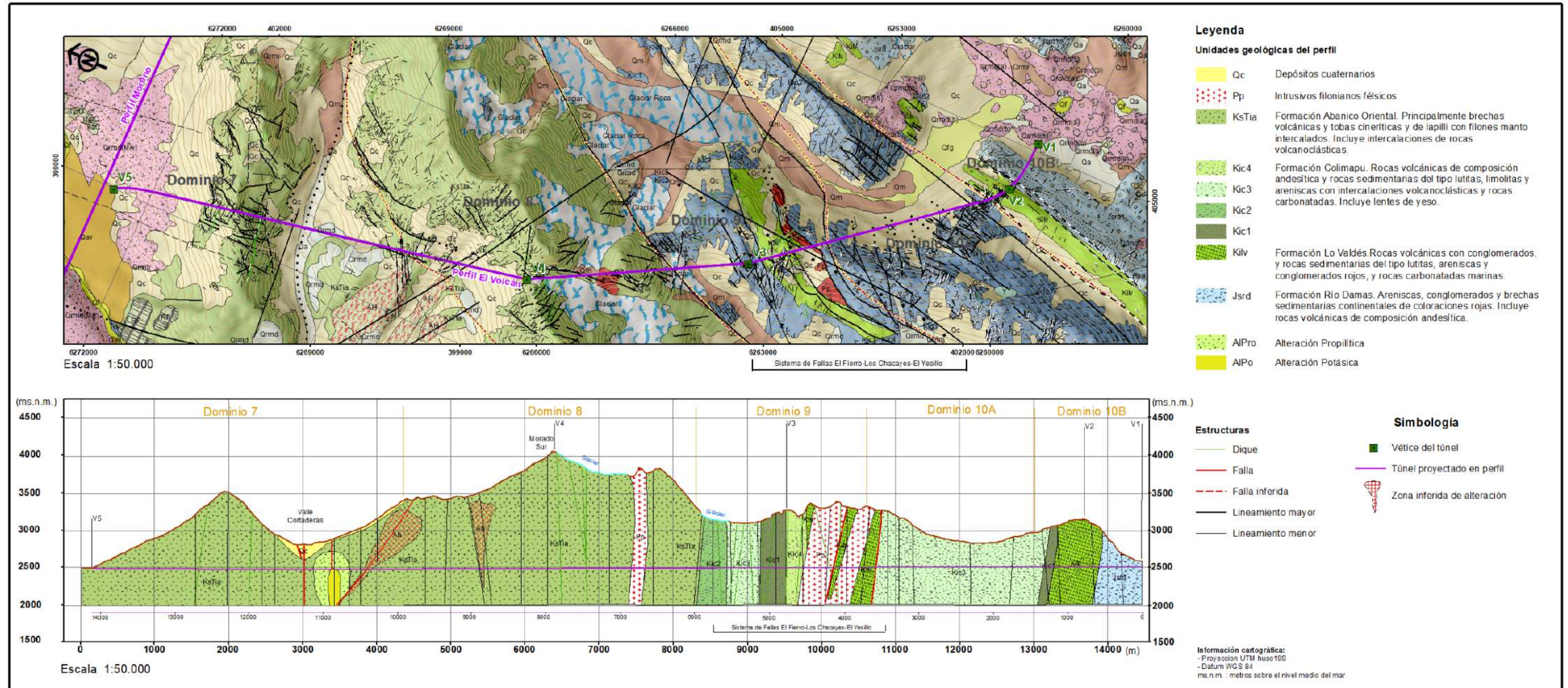


Figura 5-5: Perfil geológico tramo El Volcán

6.0 CONCLUSIONES

En este reporte se presenta la actualización de la geología regional en el área de la cuenca hidrográfica del Alto Maipo y la actualización de la geología distrital en el área de influencia del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo. Esta información se ha integrado a un modelo hidrogeológico en el marco de un estudio de evaluación ambiental

La geología general de la cuenca del río Maipo, está constituida, en términos generales, por secuencias estratificadas de rocas volcánicas y sedimentarias continentales y marinas, intruidas por filones mantos, diques, batolitos y stocks. Las edades de estas secuencias estratificadas varían desde el Jurásico Superior al Terciario Superior, y corresponden a Formación Río Damas, Formación Lo Valdés, Formación Baños del Flaco, Formación Colimapu, Formación Abanico, Formación Coya Machalí y Formación Farellones.

Las unidades cuaternarias corresponden a depósitos de relleno sedimentario del tipo fluvial, aluvial, de remoción en masa, glaciales y fluvioglaciares, y menor lacustres, y unidades volcánicas del Volcán Marmolejo y San José.

Estructuralmente, en general se observan diferentes características en los sectores occidental y oriental dentro del área de dominio del modelo hidrogeológico. La deformación de las unidades es mayor en el lado oriental.

En el *sector occidental* de las unidades de roca se presentan plegadas en un grado medio a menor, formando anticlinales y sinclinales concéntricos, y las fallas mayores en este sector son principalmente subverticales y de tipo normal. En el *sector oriental* se presentan muy deformadas por pliegues y fallas, de estas últimas, las mayores son, en general, de rumbo norte-sur. Los estratos están plegados hasta tomar posiciones subverticales e incluso invertidas, y hacia el sur-este, fallas inclinadas inversas con sobre escurrimientos también son características.

La información estructural regional y de detalle permiten conformar dominios geológicos-estructurales preliminares, éstos corresponden a 10 dominios distribuidos de oeste a este y de norte a sur, usando como referencia principal la traza del proyecto del túnel en construcción. Estos dominios se basan en los siguientes parámetros: fallas regionales, zonas de fallas asociadas a las anteriores, contactos geológicos, pliegues, lineamientos generales, algunos de ellos foto interpretados, y unidades geológicas involucradas en cada tramo.

Como resultado, se han identificado las fallas principales, se han inferido otras y se han delimitado contactos geológicos relevantes.

La información geológica actualizada se ha presentado en dos mapas a escala regional y uno a escala local y en cuatro secciones finales, tres correspondientes a las etapas de avance del proyecto: Las Lajas, Alfalfal y El Volcán, y otra más regional, que muestra parte de la cuenca del Alto Maipo.

REFERENCIAS

- GeoAV, 2017. "Revisión y Actualización del Modelo Geológico, Proyecto Hidrológico Alto Maipo. Informe Final Las Lajas, Alfalfal II y Volcán."
- Universidad de Chile, 2015. *Base Lineaments* de la Universidad de Chile: 6100_UCh_GE-PLA_El_Volcan_Baselineaments_rev_0; 6200_UCh_GE-PLA_Alfalfal_Baselineaments_rev_0; 6300_UCh_GE-PLA_Las_Lajas_Baselineaments_rev_0.
- Norconsult, 2008. "Geología-Geotecnia de las obras subterráneas del contrato AM-CO630".
- *Technical Report* N°2017-04-10-GE-RPT. *Geology and Geotechnics of the VL2 Adit Area. Alto Maipo Hydroelectrical Project.*
- *Amawta*, 2016. *Volcanic facies analysis, El Manzano area*, AES Gener.
- PHAM, 2018. Información de sondajes exploratorios realizados en diferentes sectores dentro del túnel Las Lajas y Alfalfal II.
- Moreno H., Thiele R., Varela, J., 1991. Estudio Geológico y de Riesgos Volcánico y de Remoción en Masa del Proyecto Hidroeléctrico Alfalfal II-Las Lajas. Reporte Técnico. Chilgener S.A., Santiago, 78 pp.
- Thiele, R., 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 39, 51 p.
- Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N°8.
- Fock, A., 2005. Cronología y Tectónica de la Exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S. Tesis de Magister en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile.



ANEXO 4 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

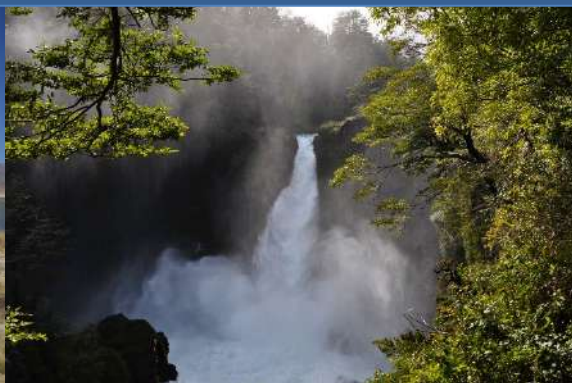
INFORME Rev 0

Preparado para

Alto Maipo SpA.

DICIEMBRE de 2018

Preparado por
HIDROMAS LTDA



Anexo 4 Caracterización Hidroquímica

Código de Proyecto: [2018 - 228 - MNAM]

HIDROGEOLOGIA y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE LTDA

Suecia 211, Oficina 701-A, Providencia - Santiago Chile

e-mail: contacto@hidromas.cl

website: www.hidromas.cl

Tel: +(56-2) 232027540

REV.	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	DESCRIPCIÓN
Rev.A	Benjamín Parraguez	Rodrigo Zamorano	Julio Cornejo	Coordinación Interna
	[21.11.18]	[21.11.18]	[26.11.18]	
Rev.B	Rodrigo Zamorano	Julio Cornejo	Mesenia Atenas	Revisión y Aprobación Cliente
	[03.12.18]	[03.12.18]	[03.12.18]	
Rev.0	Rodrigo Zamorano	Mesenia Atenas	Mesenia Atenas	Aprobado Cliente
	[28.12.2018]	[28.12.2018]	[28.12.2018]	

TABLA DE CONTENIDOS

1	GENERALIDADES.....	1
1.1	Definición del dominio	1
2	ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA.....	5
2.1	Presentación de Antecedentes	5
2.2	Descripción de Información y Metodología de Análisis.....	6
3	ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN	8
3.1	Análisis Sectorial	8
3.1.1	Sector El Maipo.....	8
3.1.2	Sector El Colorado	12
3.1.3	Sector El Yeso	16
3.1.4	Sector El Volcán	20
3.2	Análisis General	24
3.2.1	Comparación de Aguas Superficiales/Subterráneas	24
3.2.2	Análisis Diagramas de Stiff	29
4	CONCLUSIONES.....	31

FIGURAS

Figura 1-1:	Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, y Cuencas Definidas.....	3
Figura 1-2:	Dominio Definido en Área de Estudio y Portales de Túneles Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo	4
Figura 2-1:	Sectorización del Área de Estudio para Análisis Hidroquímico.....	7
Figura 3-1:	Evolución Histórica de Conductividad Eléctrica – Sector El Maipo	9
Figura 3-2:	Evolución Histórica de pH – Sector El Maipo	10
Figura 3-3:	Evolución Histórica de Concentración de Sulfato – Sector El Maipo	11
Figura 3-4:	Evolución Histórica de Conductividad Eléctrica – Sector El Colorado	13
Figura 3-5:	Evolución Histórica de pH – Sector El Colorado	14
Figura 3-6:	Evolución Histórica de Concentración de Sulfato – Sector El Colorado	15
Figura 3-7:	Evolución Histórica de Conductividad Eléctrica – Sector El Yeso.....	17
Figura 3-8:	Evolución Histórica de pH – Sector El Yeso.....	18
Figura 3-9:	Evolución Histórica de Concentración de Sulfato – Sector El Yeso.....	19
Figura 3-10:	Evolución Histórica de Conductividad Eléctrica – Sector El Volcán.....	21
Figura 3-11:	Evolución Histórica de pH – Sector El Volcán.....	22

Figura 3-12: Evolución Histórica de Concentración de Sulfato – Sector El Volcán	23
Figura 3-13: Registros de Conductividad Eléctrica en el Área de Estudio por Sector.....	25
Figura 3-14: Registros de pH en el Área de Estudio por Sector	26
Figura 3-15: Registros de Concentración de Sulfato en el Área de Estudio por Sector	27
Figura 3-16: Registros de Conductividad Eléctrica, pH y Concentración de Sulfato en el Área de Estudio	28
Figura 3-17: Diagramas de Stiff para el Área de Estudio.....	30

TABLAS

Tabla 2-1: Extensión de registros de calidad de aguas en Área de Estudio	6
--	---

1 GENERALIDADES

1.1 Definición del dominio

El “Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo” (PHAM), se emplaza en la parte alta de la cuenca del río Maipo, en la comuna de San José de Maipo, provincia Cordillera de la región Metropolitana. La extensión del trazado de los túneles y obras del PHAM, se encuentra mayoritariamente dentro de las subcuencas del río Maipo Alto y en una parte de la subcuenca del río Maipo Medio. Dentro del área del proyecto se destaca la presencia de glaciares, lagunas, embalses, entre otros cuerpos de agua. En la Figura 1-1 se ilustra la zona en donde se emplaza el proyecto con las unidades hidrológicas mencionadas, las cuales son:

- Sub cuenca Río Maipo Medio
 - Sub-subcuenca Río Maipo entre Estero Colorado y Río Clarillo
- Sub-cuenca Río Maipo Alto
 - Sub-subcuenca Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo
 - Sub-subcuenca Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado
 - Sub-subcuenca Río Volcán
 - Sub-subcuenca Río Yeso

La delimitación del dominio del sistema hidrogeológico del presente estudio, considera una extensión tal que todo el trazado del túnel del PHAM quede contenido, tomando en cuenta una distancia adecuada que permita analizar los efectos del proyecto sobre el sistema hidrogeológico. Esta delimitación se basa en el concepto de que, en los sectores alejados a la intervención del PHAM, las divisorias de aguas superficiales son representativas de las divisorias hidrogeológicas del sistema rocoso, considerando que la recarga se produce en las partes altas de las cuencas y las descargas ocurren en los bajos topográficos. El concepto citado anteriormente, permite acotar los sistemas hidrogeológicos representativos en los cuales se encuentran emplazadas las obras principales del PHAM.

De esta forma, el límite inferior del dominio queda determinado por el relleno sedimentario del Río Maipo entre el sector El Manzano (inicio del túnel L1, central Las Lajas) de la sub cuenca del río Maipo medio y la confluencia con el Río Yeso (Subcuenca río Maipo Alto), continuando por el río Volcán hasta la confluencia con el Estero La Engorda (sector túnel Volcán, portal V1).

En el extremo superior, el dominio queda definido por los límites de las sub-subcuencas de Río Maipo entre Estero Colorado y Río Clarillo y la sub-subcuenca Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo. Del mismo modo, siguiendo el concepto de divisorias de aguas, se delimitó por el este, un sector de la sub-subcuenca del río Yeso y del río Volcán.

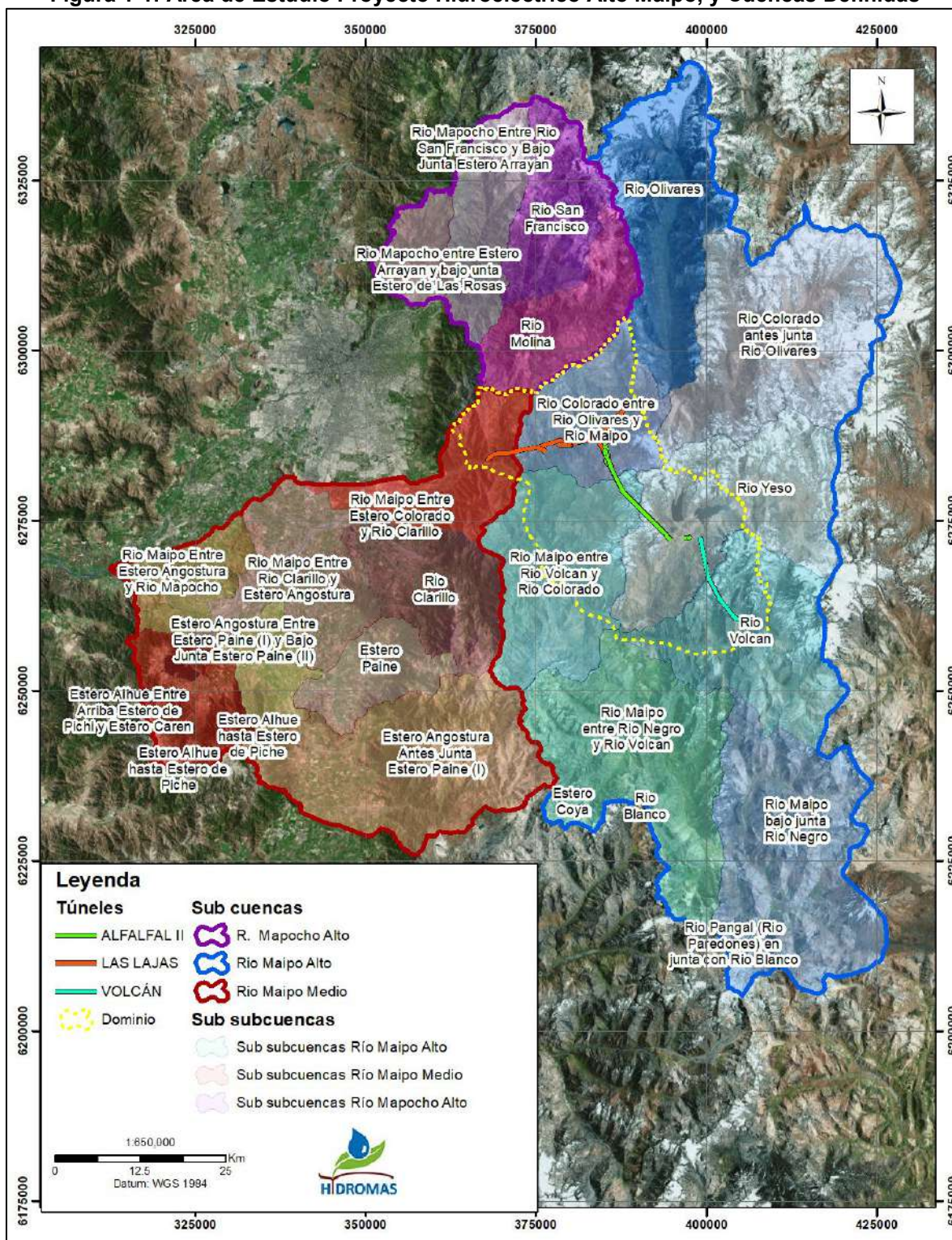
El dominio de la zona de estudio, definido para caracterizar el comportamiento hidrogeológico del sistema en que se emplaza el PHAM, posee un área total de aproximadamente 1.140 km², con una altura topográfica que varía entre los 780 y 5.350 msnm. En la Figura 1-2 se presenta la ubicación espacial del dominio.

El PHAM considera un total de aproximadamente 55 km de túneles hidráulicos que conducirán el agua para la generación eléctrica. Estos se dividen en tres tramos correspondientes a las dos centrales del proyecto, estos son: Túnel Las Lajas, Alfalfal y Volcán.

A medida que se avanza en la construcción de los túneles, se registran afloramientos de agua al interior de estos, según lo presentado en el Anexo 2, estos afloramientos se deben a la presencia de lineamientos geológicos que conectan el túnel con otros sectores. Las aguas afloradas son conducidas por tuberías hacia el exterior de cada portal, en donde son tratadas y devueltas al río.

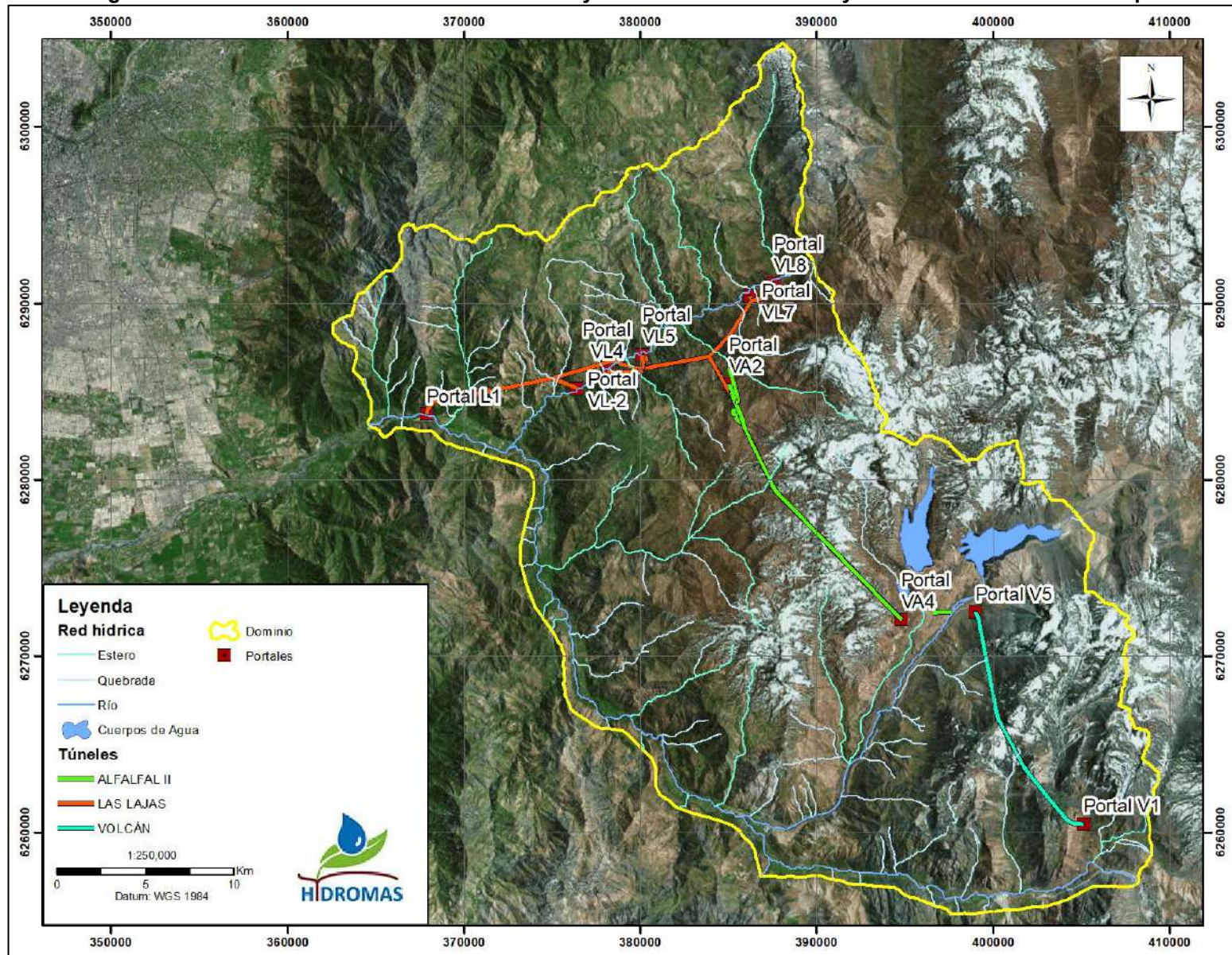
En la Figura 1-2 se presenta la ubicación de los portales en los cuales se registra el caudal aflorado desde el interior de los túneles.

Figura 1-1: Área de Estudio Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, y Cuencas Definidas



Fuente: Elaboración propia

Figura 1-2: Dominio Definido en Área de Estudio y Portales de Túneles Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo



Fuente: Elaboración Propia

2 ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

El presente capítulo contempla la exposición de los principales estudios e información recopilada, adjuntando una descripción de sus características, objetivos y conclusiones más importantes y en la línea de la caracterización hidroquímica de las aguas pertenecientes al Área del Modelo. Luego, se presenta la metodología utilizada para dicha caracterización.

2.1 Presentación de Antecedentes

Los principales estudios e información recopilada para la elaboración del presente Anexo y a partir de los cuales se permitió dar una caracterización hidroquímica de las aguas del Área de Estudio son los siguientes:

- **Línea de Base (LB) presentada en el marco del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), Arcadis (2008).**

Extracto de estudio EIA donde se presenta la Línea de Base para el proyecto, en específico, la línea de base de calidad de aguas. Dicha sección fue desarrollada a partir de una serie de campañas de terreno y la información presentada en el informe publicado por la Dirección General de Aguas (DGA) “Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad” (Cade-Idepe, 2004).

- **Estudio de Origen de Aguas Túneles Proyecto Alto Maipo, SRK (2017).**

Informe que tiene por objetivo determinar el posible origen de las aguas que afloran en los túneles del proyecto y conocer su relación con las aguas superficiales existentes en el entorno. Desarrolla un análisis químico e isotópico de distintos puntos en el Área de Estudio, los que incluyen aguas superficiales (ríos y vertientes) como subterráneas (desde túneles y pozos). El estudio corrobora que las aguas de los ríos Colorado, Maipo, Yeso y Volcán provienen en su mayoría de una altitud sobre los 4.000 msnm, a diferencia de las aguas fuente de los túneles del proyecto, correspondiente a esteros y vertientes cercanos, con origen de precipitaciones locales. Estas últimas se caracterizan por ser aguas de baja conductividad eléctrica y bicarbonatadas cálcicas.

- **Información de Calidad de Aguas Superficiales y Subterráneas, PHAM (2018).**

Registro histórico de información de calidad de aguas obtenida a partir de campañas de muestreo. En el caso de la información de aguas superficiales, corresponde a muestreos en puntos definidos y de monitoreo, con distintas frecuencias de medición. Por otro lado, la información de calidad de aguas subterráneas pertenece a dos fuentes, una primera a partir de la definición de tramos de monitoreo continuo dentro de los túneles del proyecto donde se muestrean aguas de afloramiento, y una segunda fuente correspondiente a la medición de parámetros físico-químicos in situ y durante la excavación de los túneles.

2.2 Descripción de Información y Metodología de Análisis

El análisis hidroquímico de las aguas del Área de Estudio se basa en dos enfoques. Uno primero cualitativo, correspondiente a las características generales del sector estudiado, en cuanto a las generalidades del uso de suelo, presencia de vegetación, antecedentes geológicos, entre otros. El segundo enfoque, con características cuantitativas, busca dilucidar la naturaleza de las aguas en función de los registros históricos de calidad de aguas en el área de interés para aguas subterráneas, para luego contrastar con la calidad de aguas superficiales.

En cuanto al desarrollo del análisis, se estructura en dos niveles y diferenciados a una escala espacial. Un nivel se enfoca en una sectorización de los cauces principales y dirigido al área donde se ubican los portales de entrada a los túneles del proyecto, mientras que el otro nivel de análisis conjuga la información de todos los sectores del dominio. La sectorización para el análisis planteado se detalla en la Figura 2-1.

El análisis de la información de calidad de aguas subterráneas se estructura a partir del análisis de la evolución histórica de los parámetros de Conductividad Eléctrica (CE), pH y Concentración de Sulfato (SO_4). Asimismo, se analiza estadísticamente los rangos de medición de dichos parámetros, realizando un contraste entre la naturaleza de las aguas superficiales y subterráneas. Por otro lado, se presenta la composición hidroquímica de las aguas subterráneas en cuanto a sus cationes y aniones principales mediante diagramas de Stiff, los cuales detallan la composición de aguas en base a Bicarbonato (HCO_3), Sulfato (SO_4), Cloruro (Cl), Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y Sodio (Na).

En lo que respecta a la recopilación de los registros de calidad de aguas en el Área de Estudio, la longitud y número de registros se detallan en la Tabla 2-1. Es importante mencionar que la información de calidad de aguas recolectada a partir de muestreos dentro de los túneles del PHAM, se realizó a partir del muestreo de aguas afloradas, traduciéndose en ser representativos como muestras de agua subterránea para el punto en cuestión.

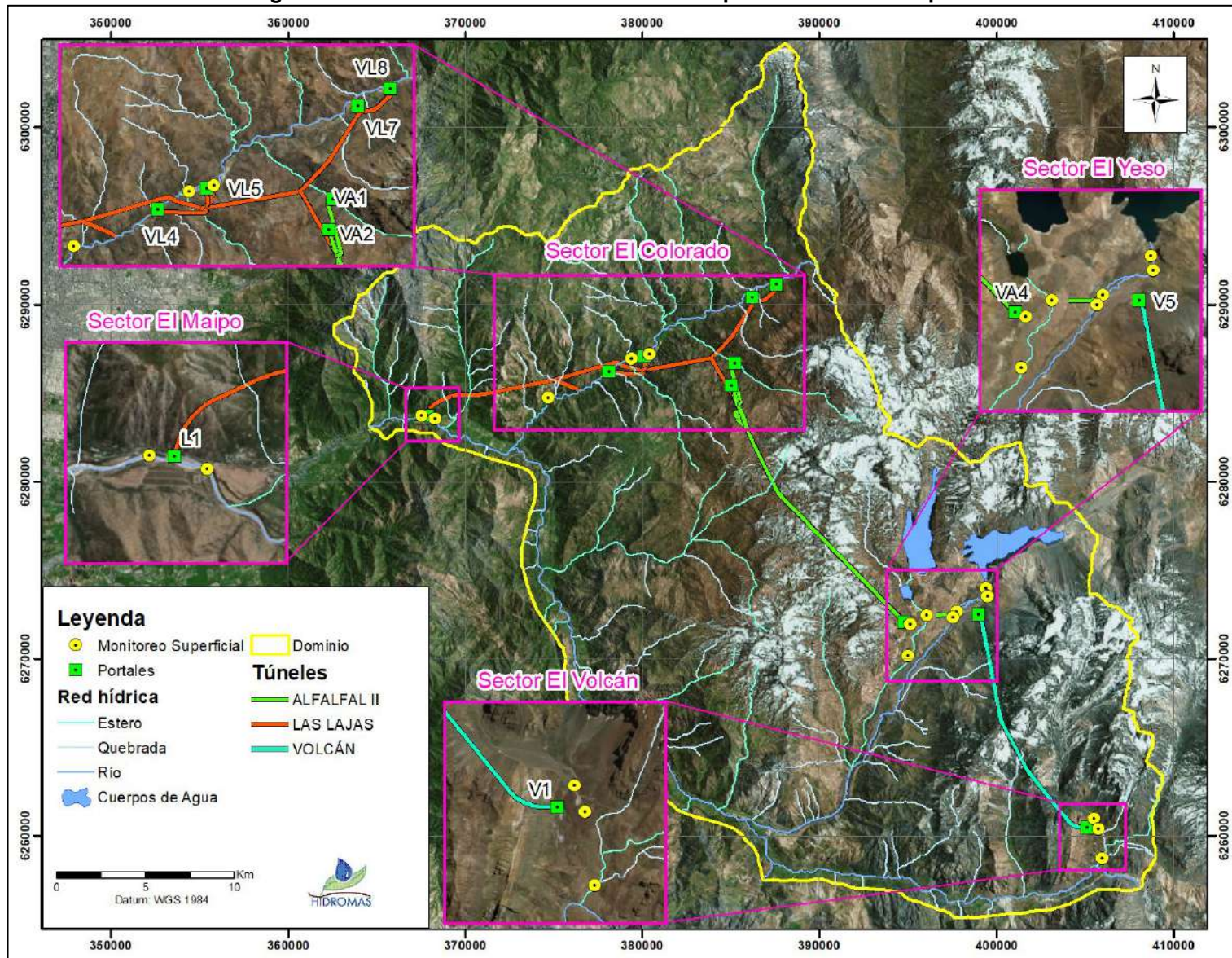
Tabla 2-1: Extensión de registros de calidad de aguas en Área de Estudio

Sector	Túnel	Fecha Mínima	Fecha Máxima	N° de Registros			Tipo
				CE (field)	pH (field)	Sulfato (lab)	
Maipo	L1	01-06-2016	16-01-2018	40	44	7	Subterráneo
Colorado	VL4	01-06-2016	28-12-2017	63	63	28	Subterráneo
	VL5	01-06-2016	01-12-2017	22	20	17	Subterráneo
	VL7	24-01-2017	24-01-2017	3	3	3	Subterráneo
Yeso	V5	01-06-2016	18-04-2017	10	6	6	Subterráneo
	VA4	01-06-2016	01-12-2017	17	17	15	Subterráneo
Volcán	V1	01-06-2016	25-01-2017	9	7	4	Subterráneo
Maipo	n.a.*	01-03-2014	01-03-2018	96	96	96	Superficial
Colorado	n.a.*	01-11-2015	01-12-2017	58	58	64	Superficial
Yeso	n.a.*	01-03-2014	01-03-2018	151	152	158	Superficial
Volcán	n.a.*	01-03-2014	01-03-2018	81	81	84	Superficial

(*) n.a.: No aplica. Muestreo superficial en cauce.

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-1: Sectorización del Área de Estudio para Análisis Hidroquímico



Fuente: Elaboración propia

3 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN

Acorde a lo expuesto en el capítulo anterior, a continuación, se presenta el análisis de cada uno de los sectores, para luego realizar un análisis global del Dominio del Modelo en cuanto a sus características hidroquímicas.

3.1 Análisis Sectorial

3.1.1 Sector El Maipo

El sector El Maipo, se encuentra ubicado en la parte más baja del Área de Estudio y el más cercano a la salida del Dominio del Modelo. Se ubica el portal L1, correspondiente al tramo del túnel de descarga de la central Las Lajas.

A partir del estudio realizado por SRK (2017), se estableció que, en los primeros 220 m excavados del túnel, el origen de las aguas afloradas no guarda relación con el de las aguas del río Maipo. Posteriormente a los 220 m señalados, las aguas son de origen de cuerpos de aguas superficiales locales (esteros y vertientes) formados a partir de precipitaciones y deshielos. Se infiere que, durante los primeros 220 m, las aguas afloradas en el túnel poseen un origen a partir de la mezcla de las aguas del río Maipo y las fuentes locales anteriormente mencionadas.

En cuanto a las aguas pertenecientes al río Maipo, éstas poseen su origen a partir de sus principales afluentes: los ríos Colorado, Yeso y Volcán. Éstos tres últimos coinciden en presentar *sistemas lóticos cordilleranos con baja intervención antrópica* (Arcadis, 2008), lo que se refleja en altas capacidades de tamponamiento y regulación de la acidez a partir de condiciones básicas. Por otro lado, las aguas superficiales del sector El Maipo presentan altos índices de Conductividad Eléctrica, lo cual es atribuible a la alta disponibilidad iónica de yacimientos de actividad minera.

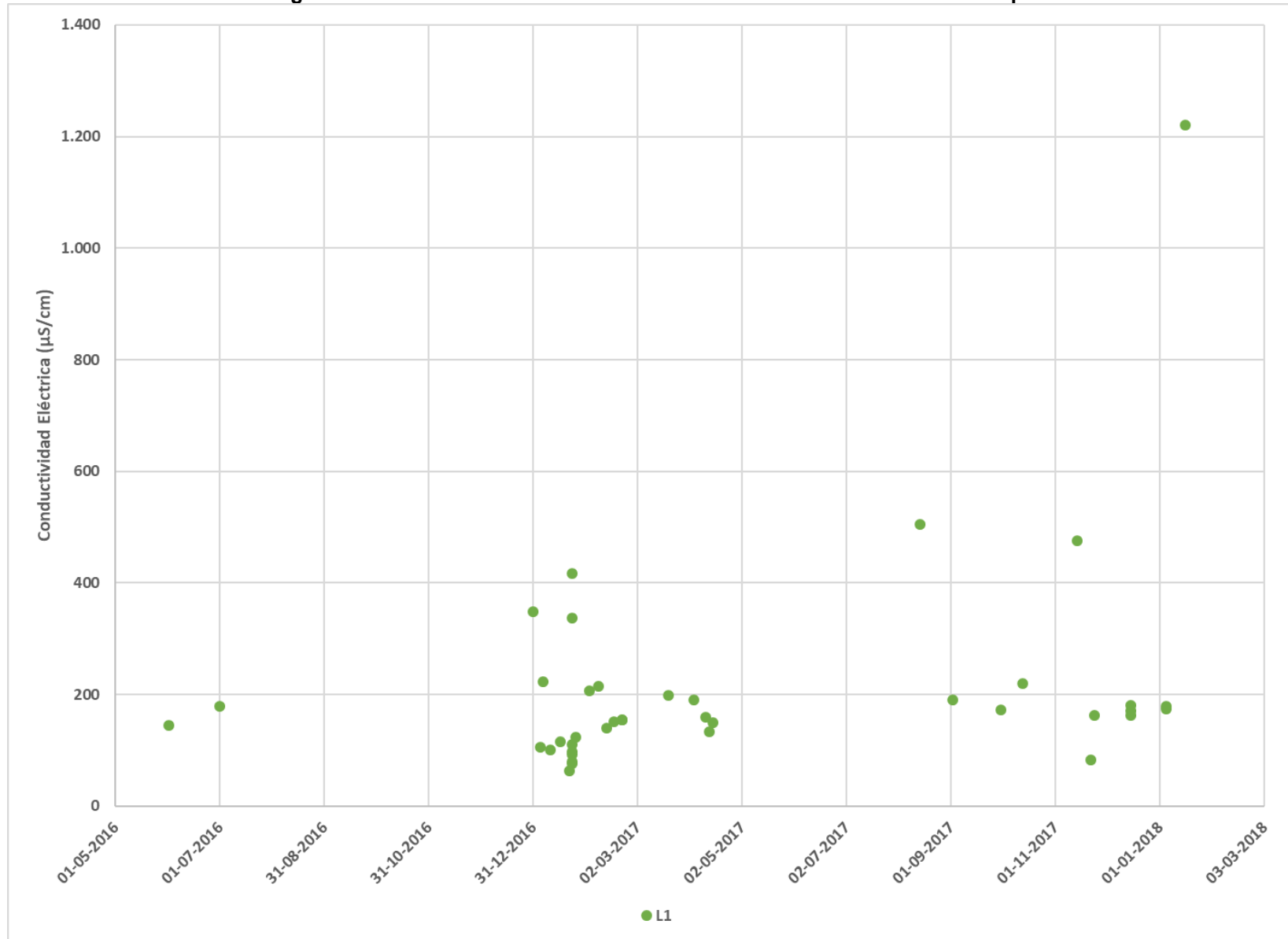
Las Figuras 3-1, 3-2 y 3-3 muestran la evolución histórica de los parámetros de Conductividad Eléctrica, pH y Concentración de Sulfato para las aguas que afloran en el túnel del sector El Maipo, respectivamente.

La Conductividad Eléctrica tiende a estabilizarse en torno a los 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, llegando a mínimos bajo los 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y sobrepasando los 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en casos aislados, aludiendo bajos niveles de conductividad en las aguas del sector y que afloran en el túnel L1.

Por otro lado, el pH presenta un promedio en torno a 8,8 lo que indica una naturaleza básica de las aguas. Dicho parámetro tiende a variar con mínimos de 8 a máximos de 10.

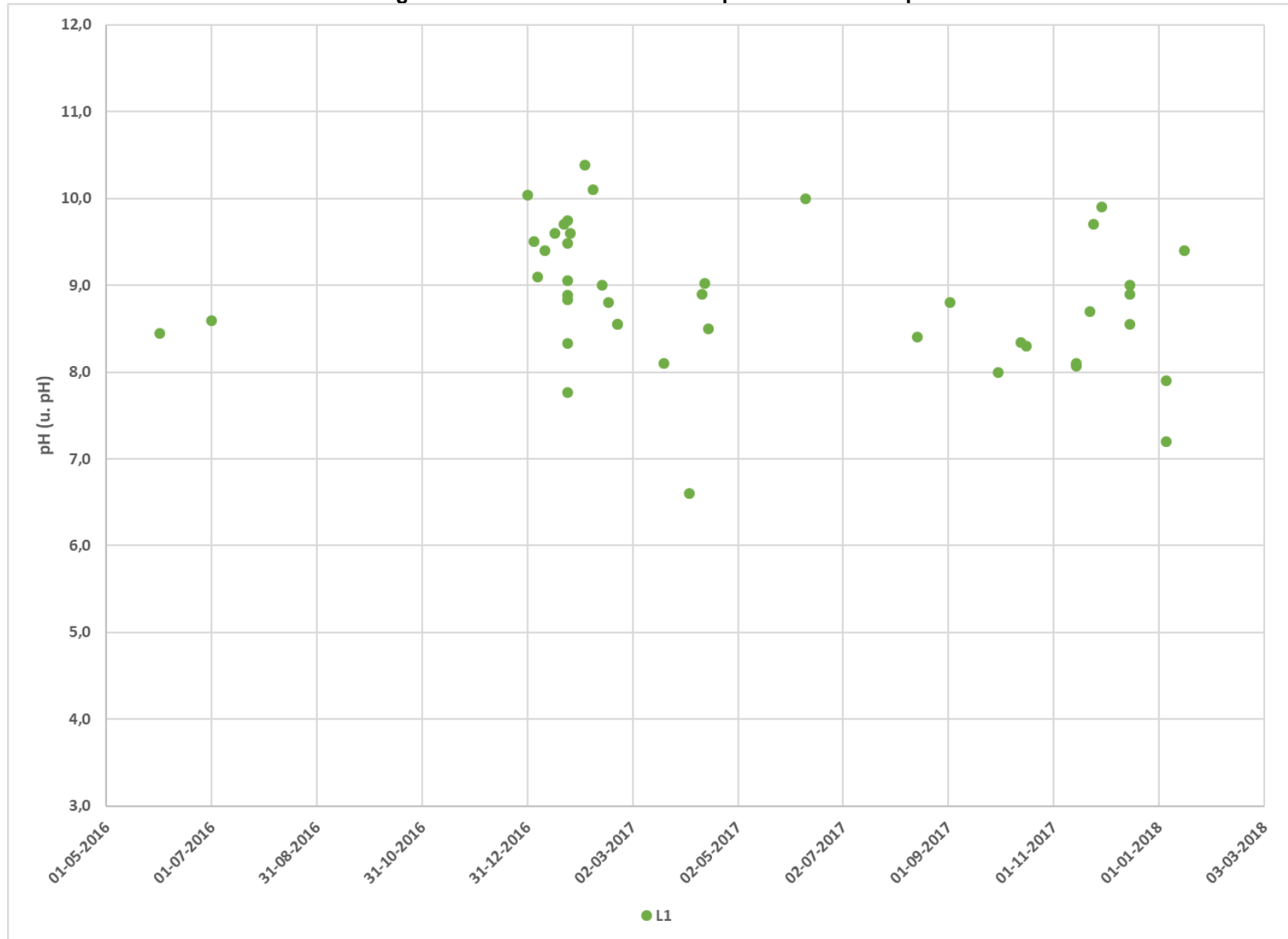
Por último, los escasos registros de Concentración de Sulfato permiten apreciar su baja presencia, con un máximo de 100 mg/l y promedio en torno a los 20 mg/l.

Figura 3-1: Evolución Histórica de Conductividad Eléctrica – Sector El Maipo



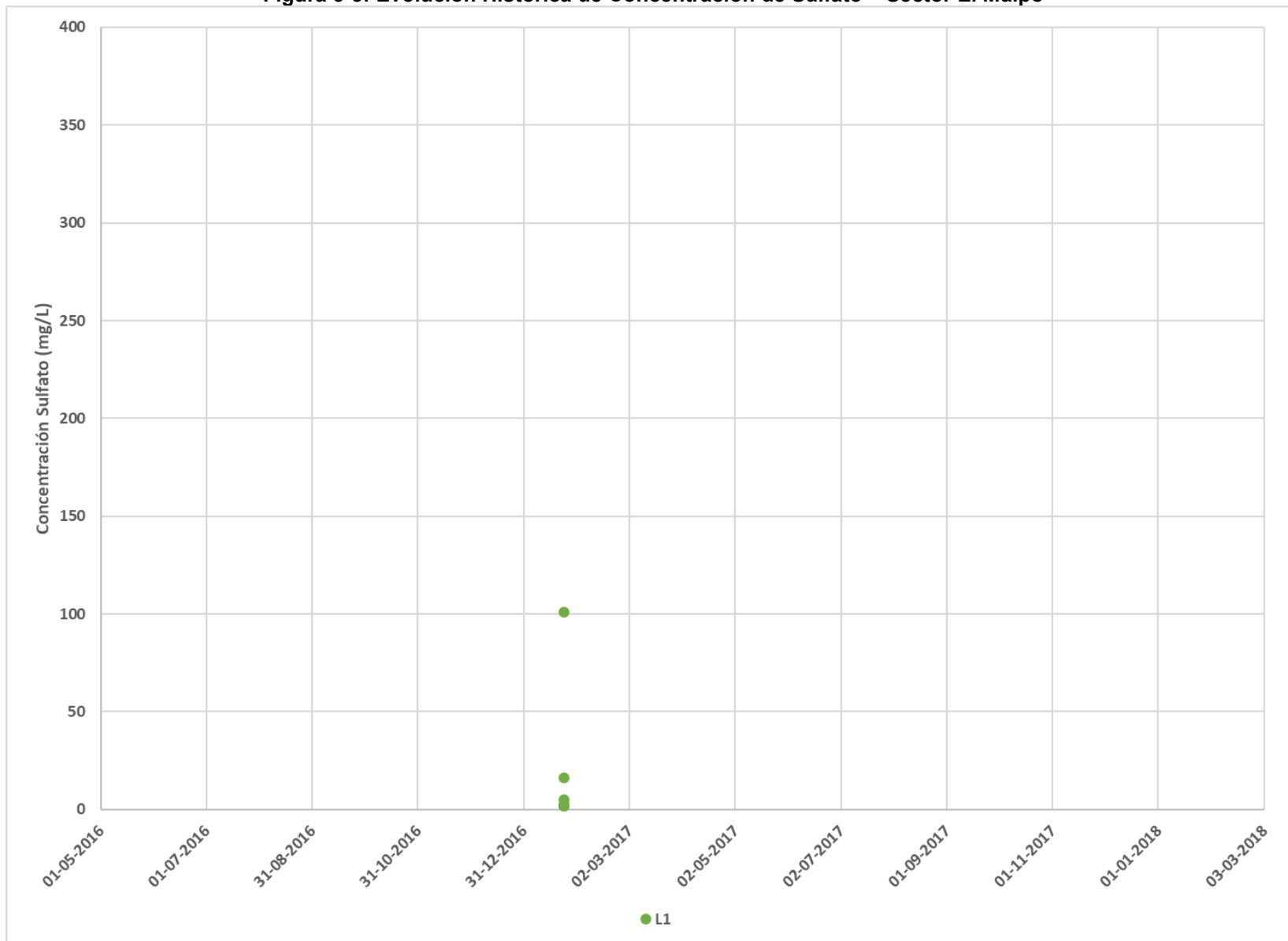
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-2: Evolución Histórica de pH – Sector El Maipo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-3: Evolución Histórica de Concentración de Sulfato – Sector El Maipo



Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Sector El Colorado

El Sector El Colorado se ubica desde la confluencia con el Río Maipo, hacia aguas arriba hasta el borde del dominio de estudio. En esta zona se encuentran tres portales de túneles asociados a la central Las Lajas, VL4, VL5 y VL7.

A partir del estudio realizado por SRK (2017) las aguas afloradas en los túneles que comprenden el Sector El Colorado no guardan relación con las aguas del río El Colorado, sino que la recarga a los túneles es por medio de precipitaciones locales que infiltran al terreno por medio de estructuras, niveles de mayor fracturación o contacto entre eventos volcánicos.

En cuanto a las aguas superficiales, en específico el río Colorado, se presentan escorrentías arcillosas (aluminos y silicatos) con pH básico, lo que genera complejos de aluminio en solución (Arcadis, 2008).

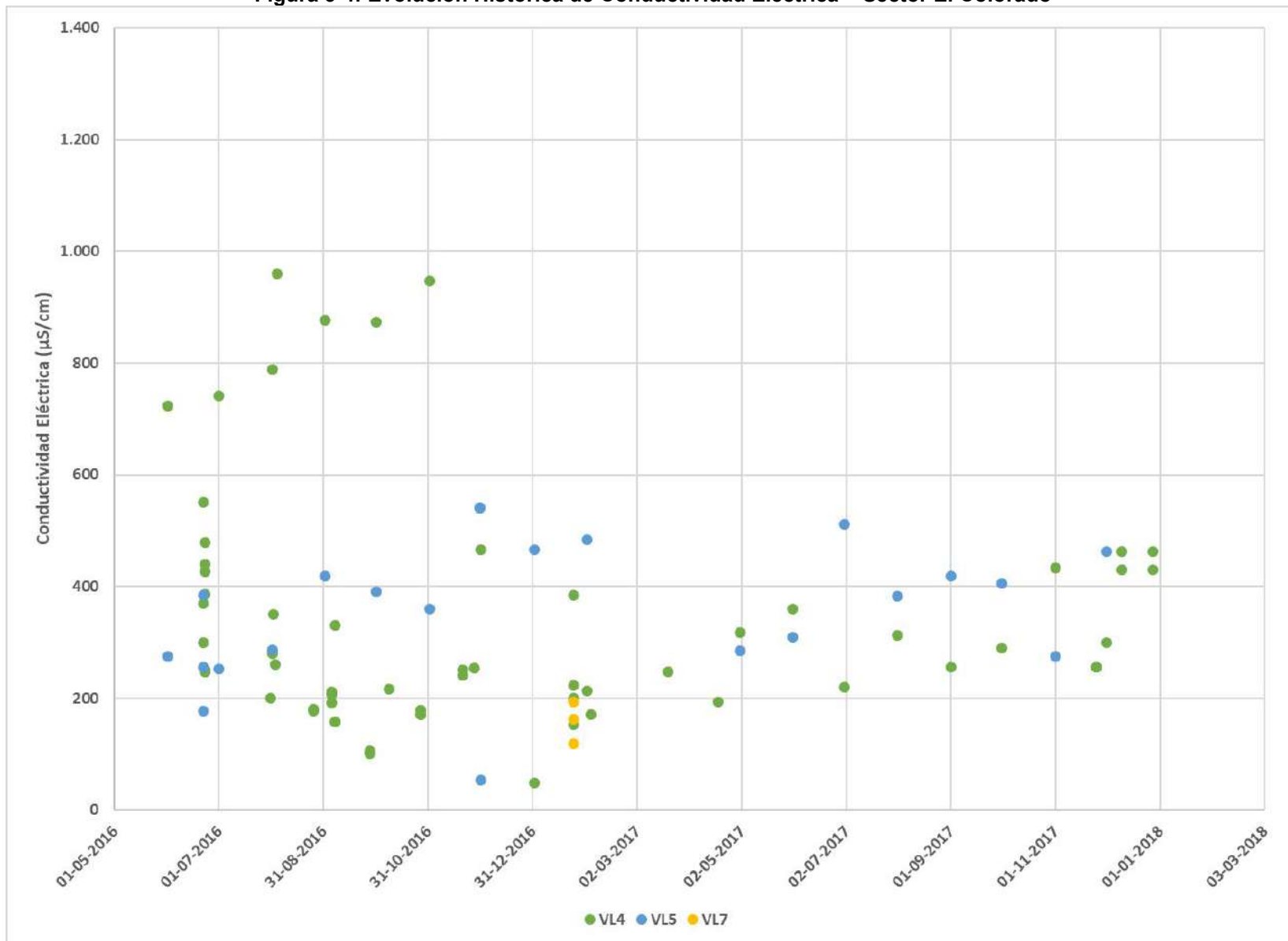
Las Figuras 3-4, 3-5 y 3-6 muestran la evolución histórica de los parámetros de Conductividad Eléctrica, pH y Concentración de Sulfato para las aguas subterráneas que afloran en los túneles del sector El Colorado, respectivamente.

La Conductividad Eléctrica presenta valores que rondan entre los 200 y 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, salvo en el caso del túnel VL4, el cual supera los 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en reiteradas ocasiones, lo cual es atribuible a la cercanía de fallas geológicas en los puntos de afloramiento de aguas dentro del túnel. A pesar de esto, en general, las aguas subterráneas del sector no presentan altos niveles de Conductividad Eléctrica.

Por otro lado, el pH presenta un promedio en torno a 9,1 lo que indica una naturaleza básica de las aguas. Dicho parámetro tiende a variar con mínimos de 8 a máximos de 10.

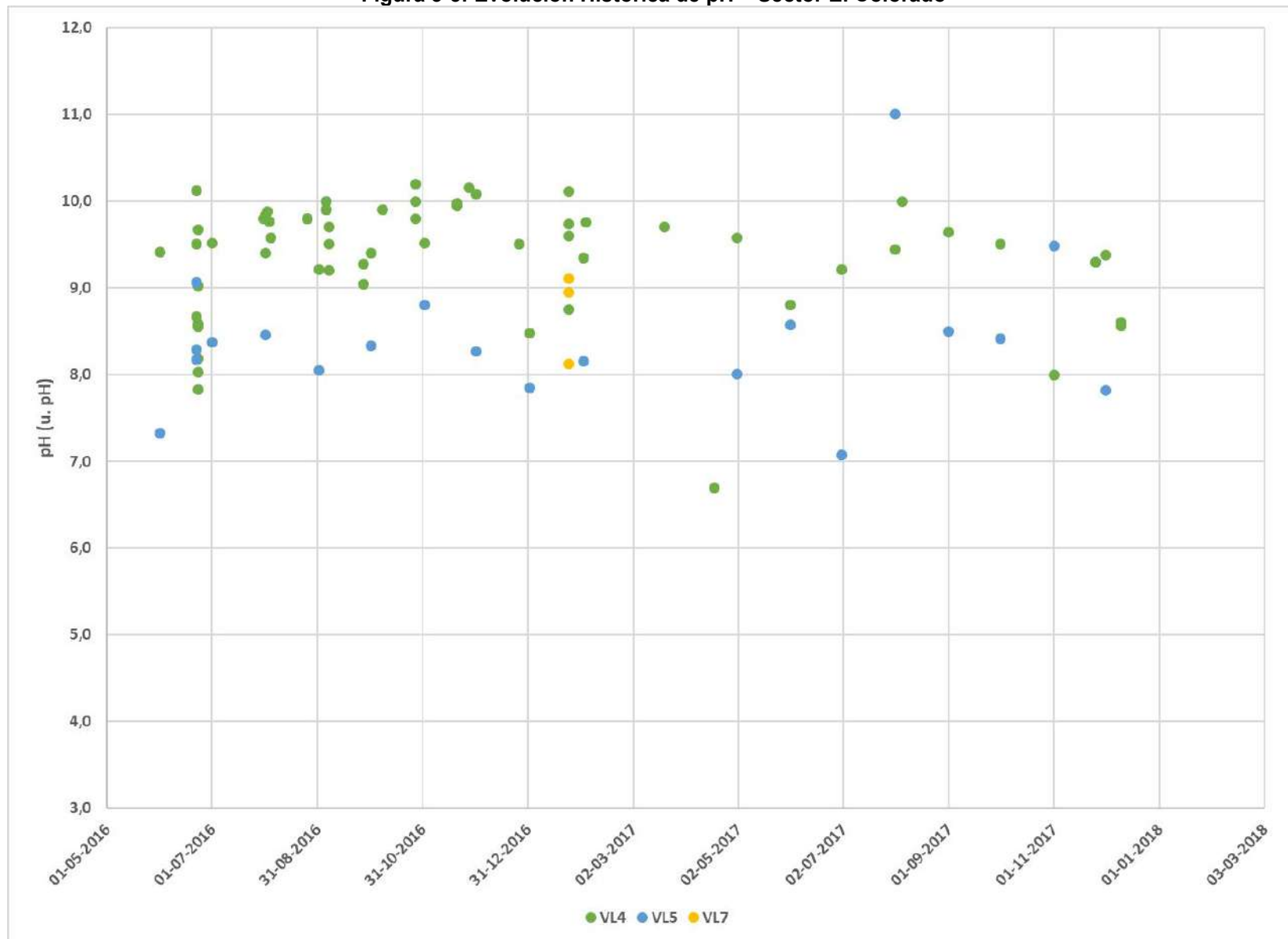
Por último, los registros de Concentración de Sulfato permiten apreciar su baja presencia, con un máximo de 100 mg/l y promedio en torno a los 30 mg/l.

Figura 3-4: Evolución Histórica de Conductividad Eléctrica – Sector El Colorado



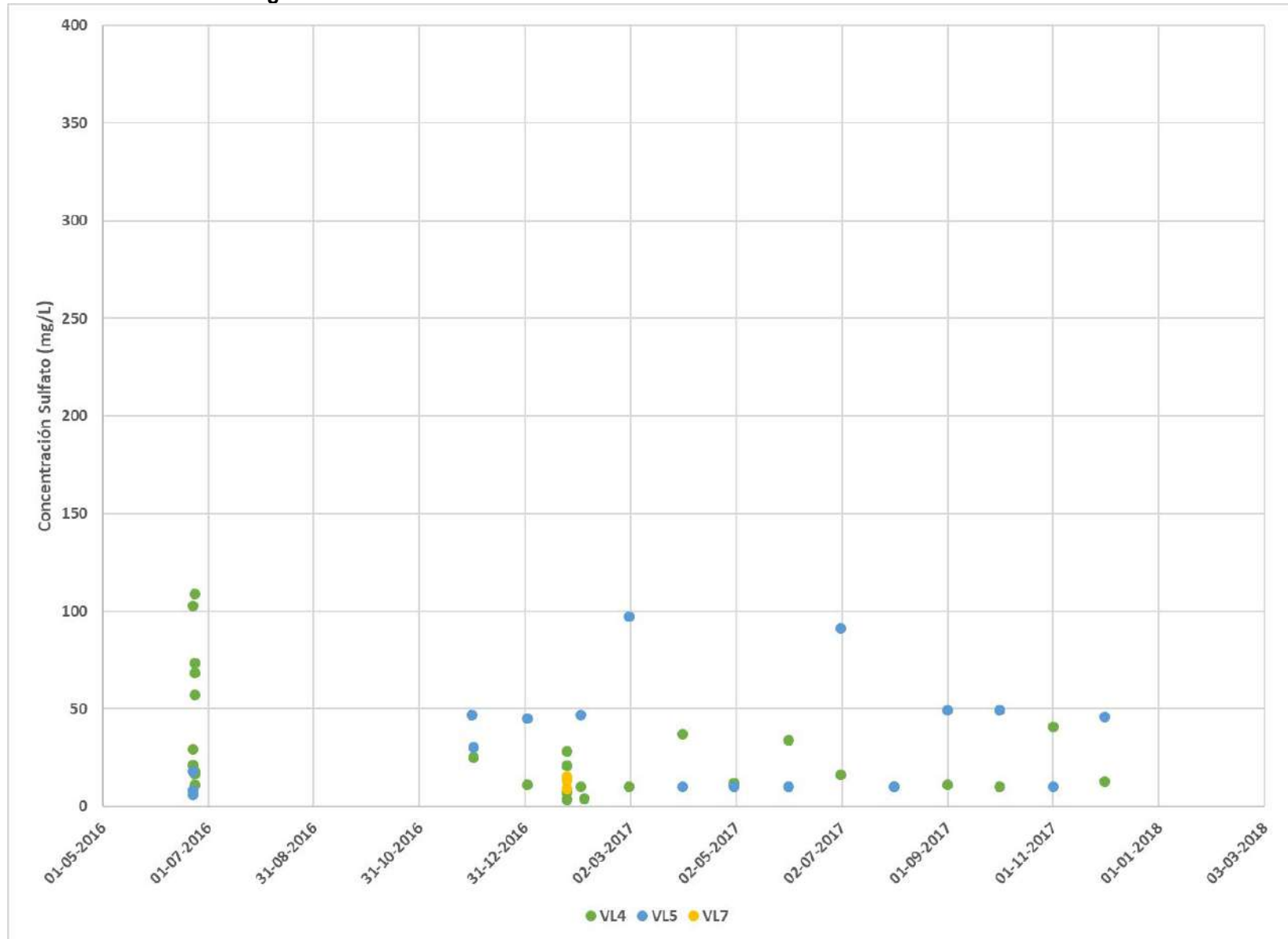
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-5: Evolución Histórica de pH – Sector El Colorado



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-6: Evolución Histórica de Concentración de Sulfato – Sector El Colorado



Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Sector El Yeso

El Sector El Yeso se ubica aguas abajo del embalse El Yeso, abarcando la confluencia del río con el mismo nombre y el estero El Manzanito. En dicha zona se encuentran los portales VA4 cercano al estero El Manzanito, el cual corresponde a la entrada del túnel que conduce el agua hacia la central Alfalfal II, y el portal V5, ubicado cercano al río Yeso, este portal corresponde a la salida del túnel Volcán.

A partir del estudio realizado por SRK (2017), las aguas afloradas en los túneles que comprenden el Sector El Yeso no guardan relación con las aguas del río El Yeso, sino que la recarga a los túneles es por medio de precipitaciones locales que infiltran al terreno por medio de estructuras, niveles de mayor fracturación o contacto entre eventos volcánicos.

En cuanto a las aguas de la cuenca aportante del río El Yeso, existe un gran porcentaje de área bajo la isoterma cero, lo que provocaría meteorización de rocas con sulfuros de hierro presentes en el área, lo que provoca una posterior lixiviación de iones y generación de sales en solución (Arcadis 2008).

Como antecedente, Arcadis (2008) observó en las aguas del sector, altos índices en la concentración de sulfatos, lo cual fue atribuido a las actividades mineras de extracción de yeso y la generación de aguas residuales de faenas mineras.

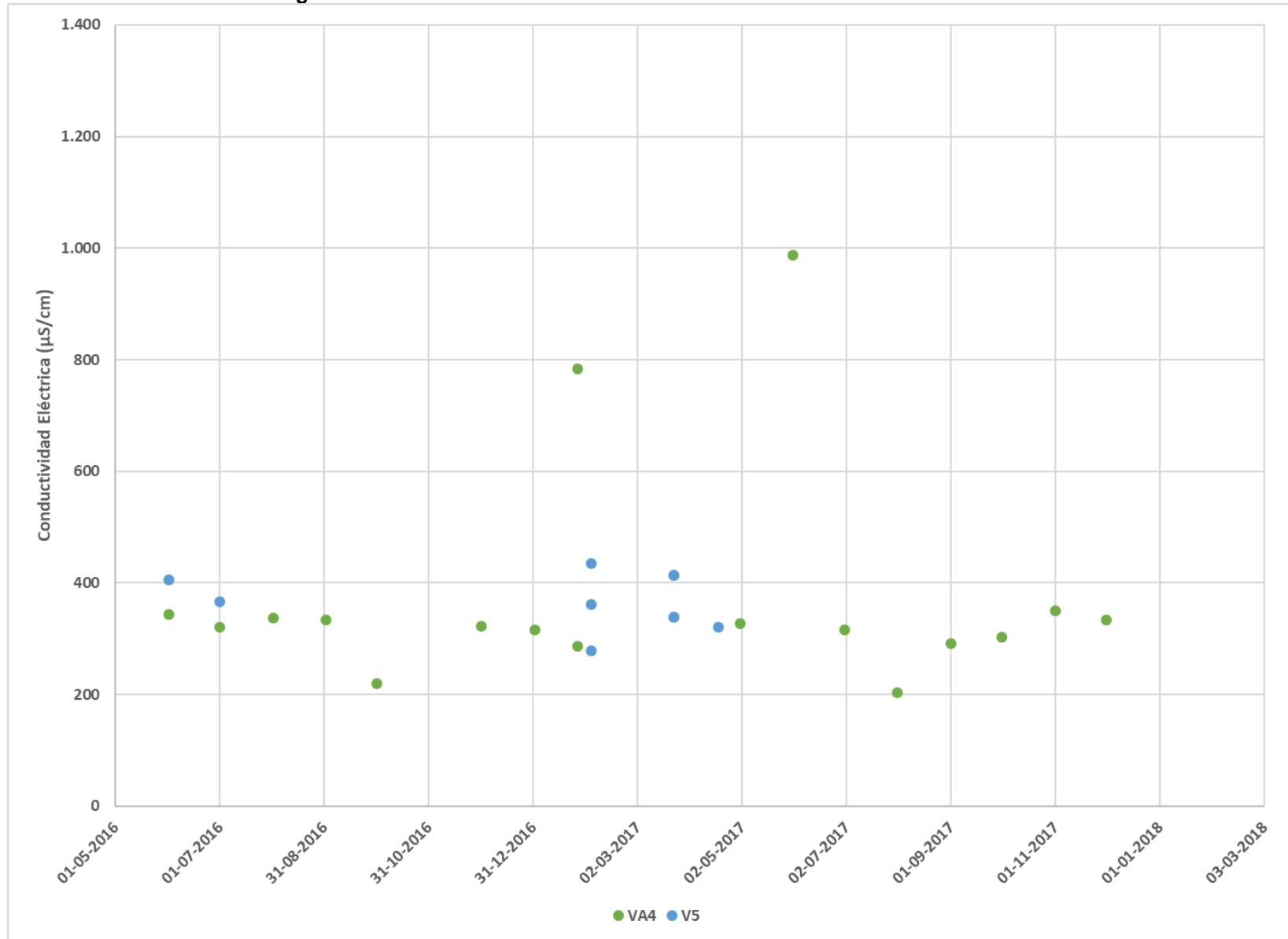
Las Figuras 3-7, 3-8 y 3-9 muestran la evolución histórica de los parámetros de Conductividad Eléctrica, pH y Concentración de Sulfato para las aguas subterráneas que afloran en los túneles del sector El Yeso, respectivamente.

La Conductividad Eléctrica presenta valores que varían entre los 200 y 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, salvo en el caso del túnel VA4, el cual alcanza valores de 800 y 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de manera aislada, lo cual es atribuible a la cercanía de los puntos de afloramiento de aguas dentro del túnel a una falla geológica observada. A pesar de esto, en general, las aguas subterráneas del sector presentan bajos niveles de Conductividad Eléctrica.

Por otro lado, el pH presenta un promedio aproximadamente de 8,0 lo que indica una naturaleza básica de las aguas. Dicho parámetro no suele variar en torno al promedio, excepto por casos puntuales.

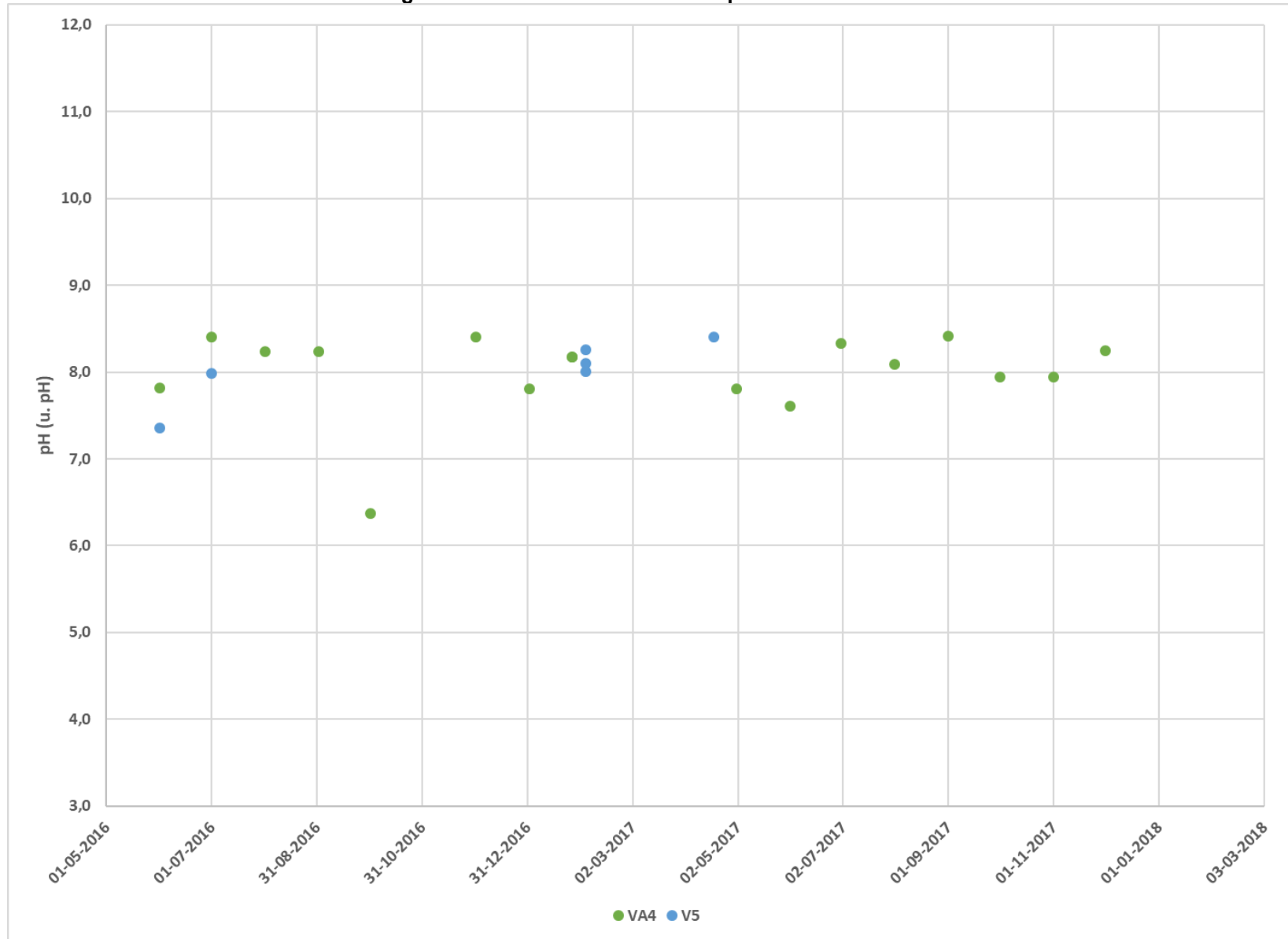
Por último, los registros de concentración de Sulfato permiten apreciar su baja presencia en las aguas afloradas en el interior de los túneles. En el caso del túnel VA4 existe una tendencia a estabilizarse en torno a los 60 mg/l, excepto por un caso puntual en que se alcanzó una concentración de 350 mg/l. Por otro lado, en el túnel V5, los registros de concentración de Sulfato no superan los 50 mg/l.

Figura 3-7: Evolución Histórica de Conductividad Eléctrica – Sector El Yeso



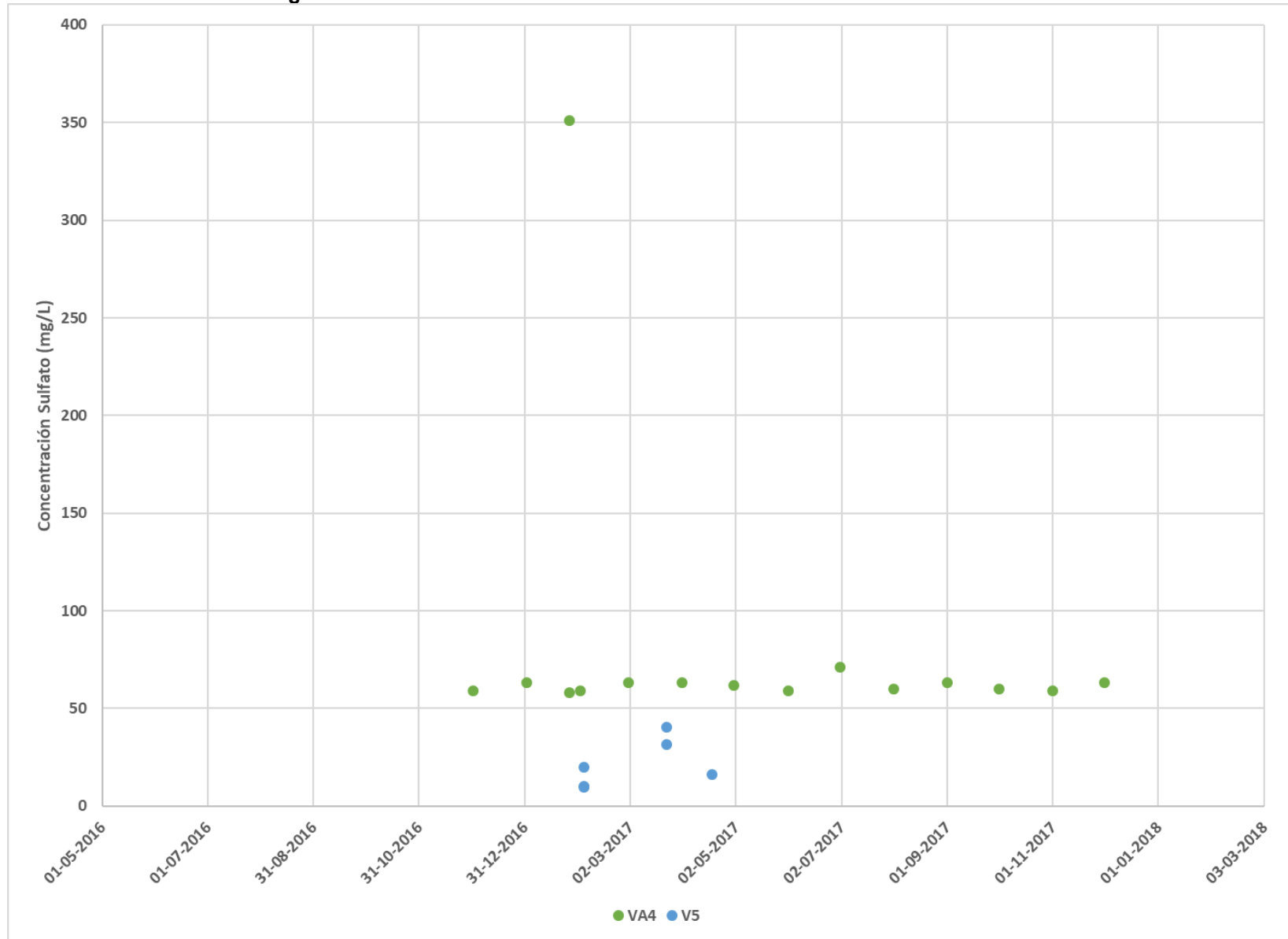
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-8: Evolución Histórica de pH – Sector El Yeso



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-9: Evolución Histórica de Concentración de Sulfato – Sector El Yeso



Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Sector El Volcán

El Sector El Volcán se encuentra ubicado en el sur-oriental del Área de Estudio, comprende la parte alta del estero La Engorda. En esta zona se encuentra el portal V1, el cual corresponde a la entrada del túnel que conduce el agua hacia la central Alfalfal II. Dicho portal se halla colindante con el estero La Engorda, el cual es afluente al río El Volcán.

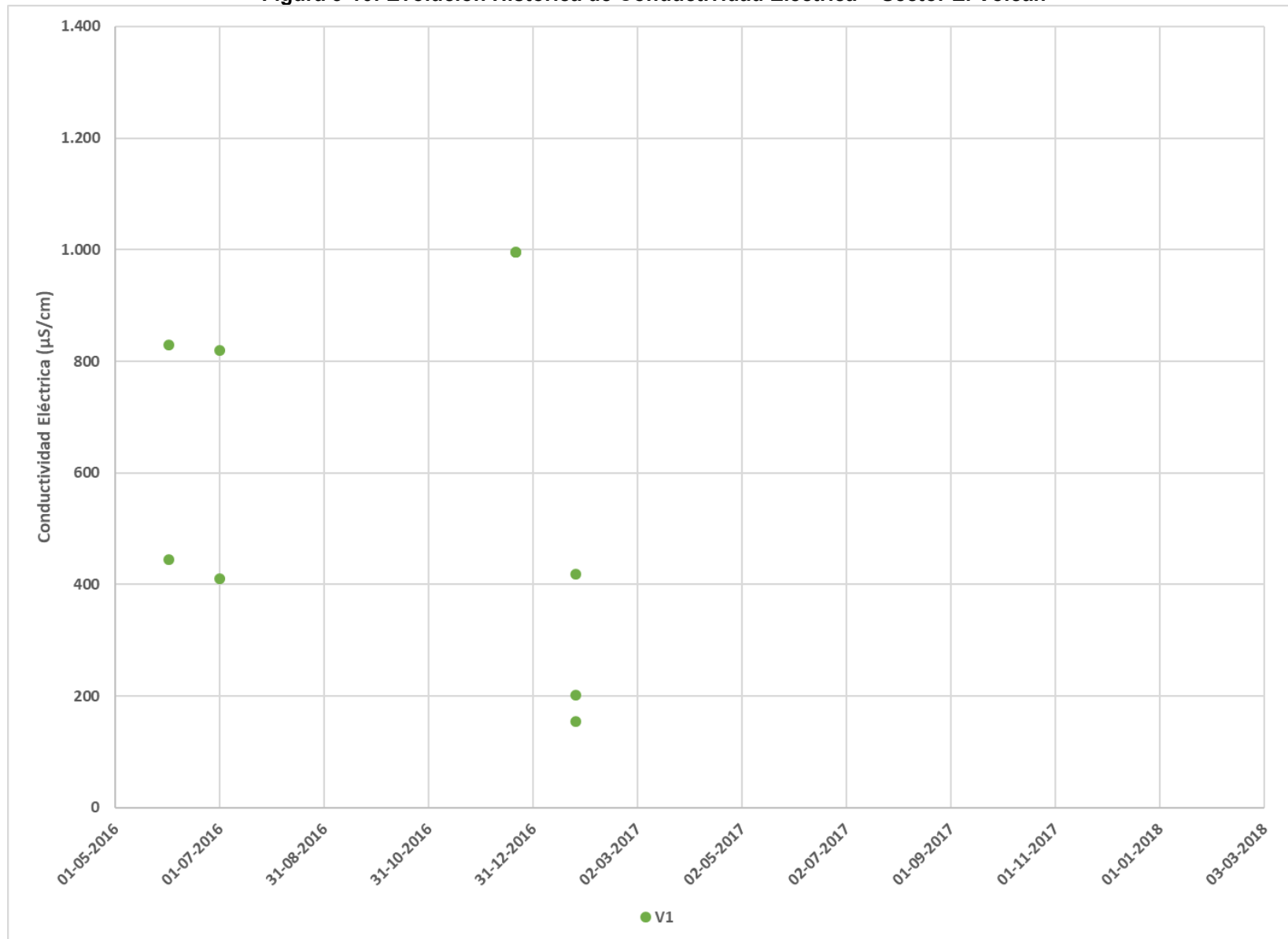
A partir del estudio realizado por SRK (2017), las aguas afloradas en el túnel que comprende el Sector El Volcán no guardan relación con las aguas del río El Volcán, sino que la recarga a los túneles es por medio de precipitaciones locales que infiltran al terreno por medio de estructuras, niveles de mayor fracturación o contacto entre eventos volcánicos.

Durante una campaña realizada por Arcadis en el año 2005 se constató que las aguas superficiales del sector presentaban índices de pH básico y alta Conductividad Eléctrica, lo que fue atribuido a la actividad minera local de extracción de caliza y al sistema lótico cordillerano imperante en el sector (Arcadis, 2008).

Las Figuras 3-10, 3-11 y 3-12 muestran la evolución histórica de los parámetros de Conductividad Eléctrica, pH y Concentración de Sulfato para las aguas subterráneas que afloran en el túnel del sector El Volcán, respectivamente. En particular para el sector El Volcán se cuenta con poca información de la evolución histórica de los parámetros anteriormente señalados.

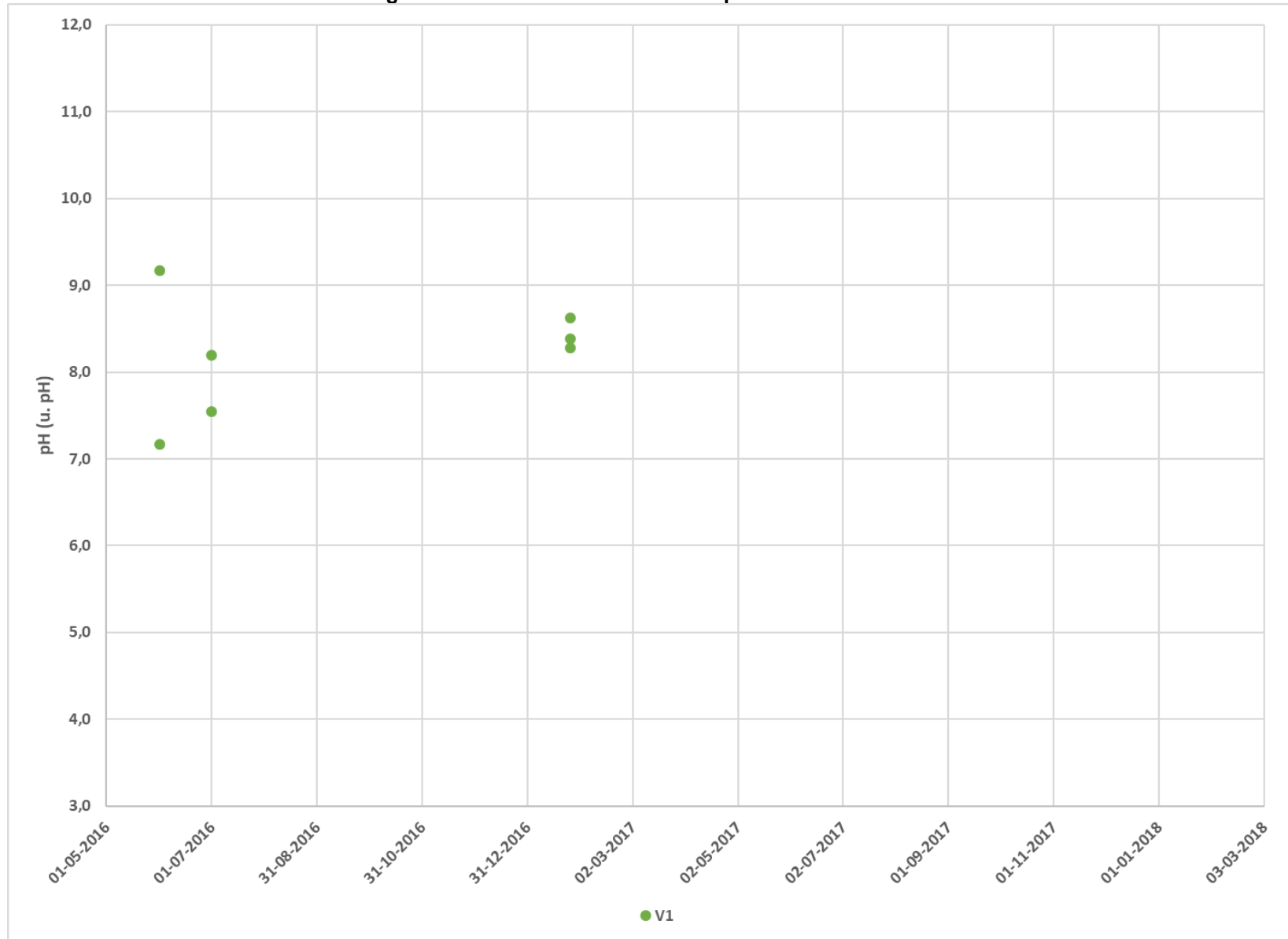
La Conductividad Eléctrica presenta valores que rondan entre los 150 y 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y su distribución no permiten establecer una tendencia. Por otro lado, el pH presenta un promedio en torno a 8,2 lo que indica una naturaleza básica de las aguas. Dicho parámetro suele variar en torno a 7 y 9. Por último, los registros de concentración de Sulfato varían en un rango entre 5 y 250 mg/l.

Figura 3-10: Evolución Histórica de Conductividad Eléctrica – Sector El Volcán



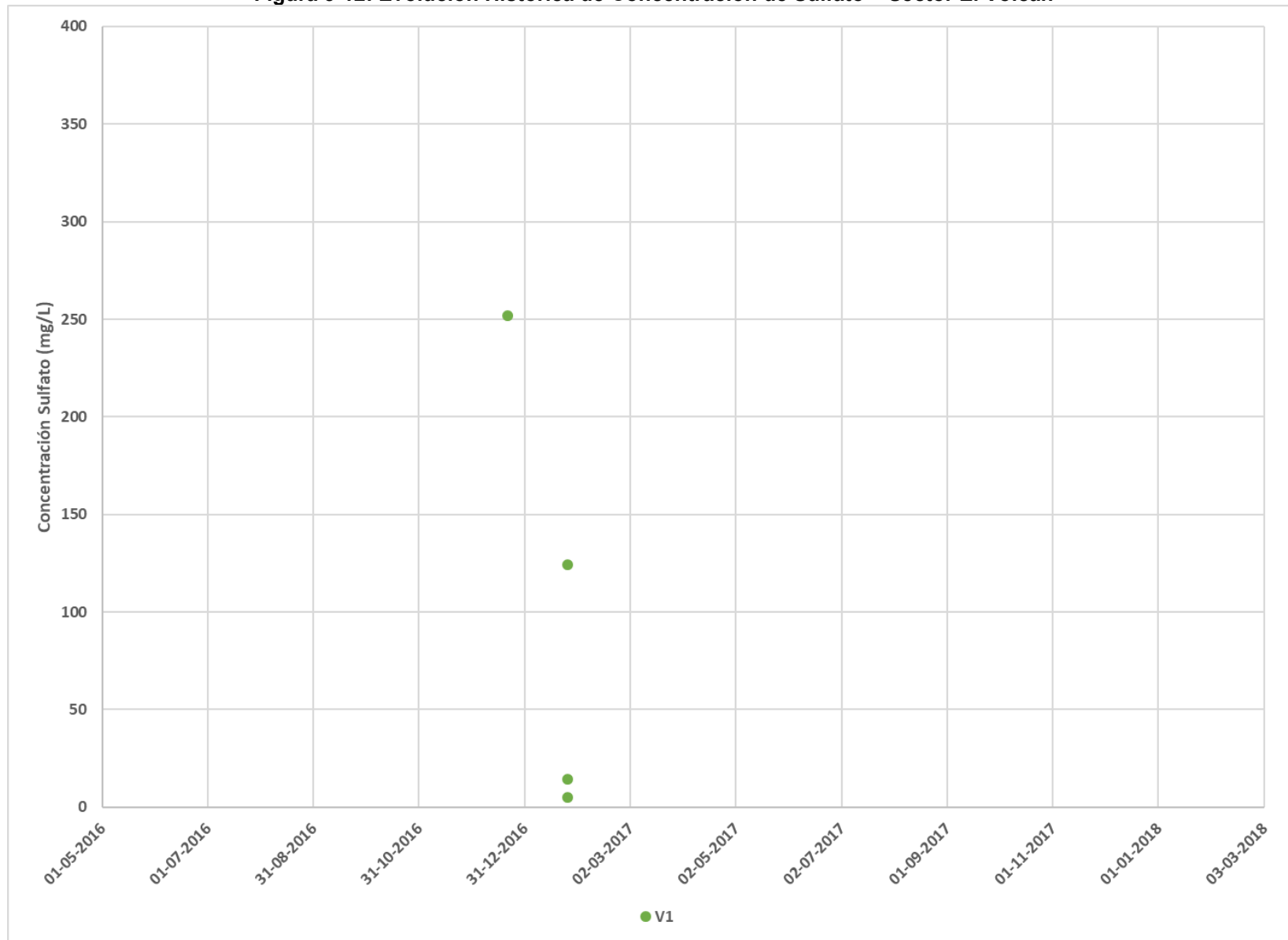
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-11: Evolución Histórica de pH – Sector El Volcán



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-12: Evolución Histórica de Concentración de Sulfato – Sector El Volcán



Fuente: Elaboración propia

3.2 Análisis General

3.2.1 Comparación de Aguas Superficiales/Subterráneas

Es importante señalar que el análisis sectorial presentó ciertas similitudes entre las aguas subterráneas de cada uno de los sectores, lo que se refleja en tendencias de baja Conductividad Eléctrica, pH básico y bajos valores de Concentración de Sulfatos. Ahora bien, dichas características, si bien habituales en las aguas subterráneas del Dominio del Modelo, no se condicen con las características físico-químicas de las aguas superficiales de los cauces principales. A continuación, se analizan una serie de figuras que representan diagramas de cajas en base a los registros de los parámetros de Conductividad Eléctrica, pH y Concentración de Sulfato, denotando los cuartiles para cada caso.

La Figura 3-13 detalla los registros de Conductividad Eléctrica (CE) para cada uno de los sectores y diferenciando entre aguas superficiales y subterráneas. De lo anterior se desprende que, en general, se mantiene una marcada diferencia entre los valores medidos de CE, denotando valores más altos para las aguas superficiales. Caso excepcional es el del sector El Volcán, donde se puede atribuir cierta conexión con las aguas superficiales cercanas al portal V1, correspondientes al estero La Engorda, y no necesariamente al cauce principal El Volcán. En el caso del sector El Yeso, los registros más bajos de CE en aguas superficiales, y comparables con los registros de CE de las aguas subterráneas del mismo sector, fueron obtenidos a partir de muestreos en el estero El Manzanito, tributario del cauce principal El Yeso.

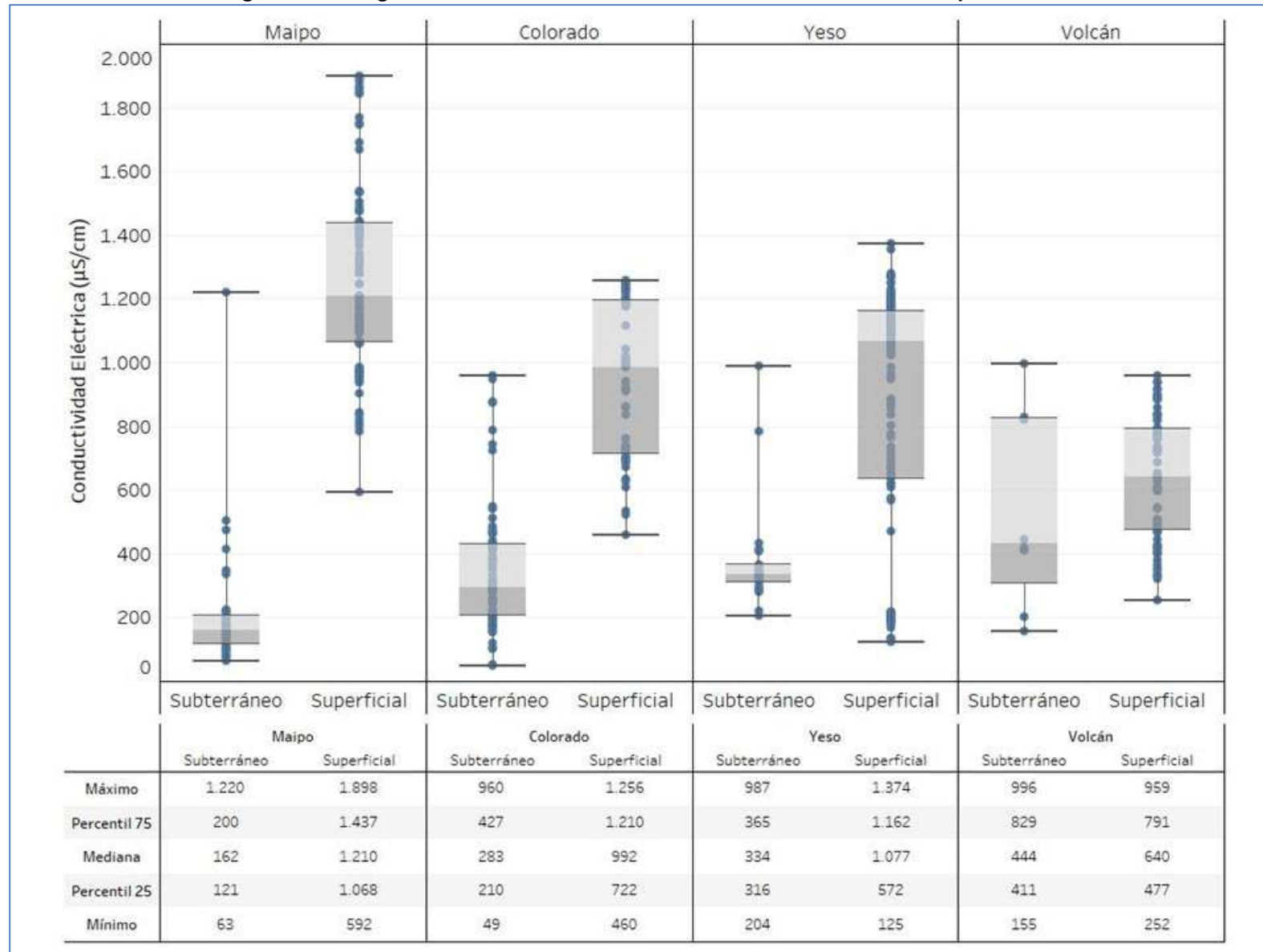
La Figura 3-14, por otro lado, detalla los registros de pH para cada uno de los sectores y diferenciando entre aguas superficiales y subterráneas. Se infiere que, para el caso del parámetro pH, no existe gran diferencia entre las aguas subterráneas y superficiales. En el caso de los sectores El Maipo y El Colorado, las aguas subterráneas tienden a ser más básicas que las superficiales. En el sector El Yeso tiende a ser lo contrario, con aguas subterráneas más neutras que las superficiales del sector. En el caso del sector El Volcán es donde se aprecia la menor diferencia entre las aguas superficiales y subterráneas.

La Figura 3-15 expone los registros de Concentración de Sulfato (SO_4) para cada uno de los sectores y diferenciando entre aguas superficiales y subterráneas. En dicha figura se reafirma la diferencia entre las aguas subterráneas y superficiales para todos los sectores. En general, las aguas superficiales de todos los sectores muestran una tendencia a presentar Concentración de Sulfato mayores que con respecto a las aguas subterráneas.

Lo anteriormente expuesto ayuda a plantear la desconexión entre las aguas subterráneas afloradas en los distintos sectores y las aguas superficiales pertenecientes a los cauces principales. Lo anterior se valida gráficamente a través de la Figura 3-16, donde se puede apreciar la diferencia entre las aguas subterráneas y superficiales del Área de Estudio.

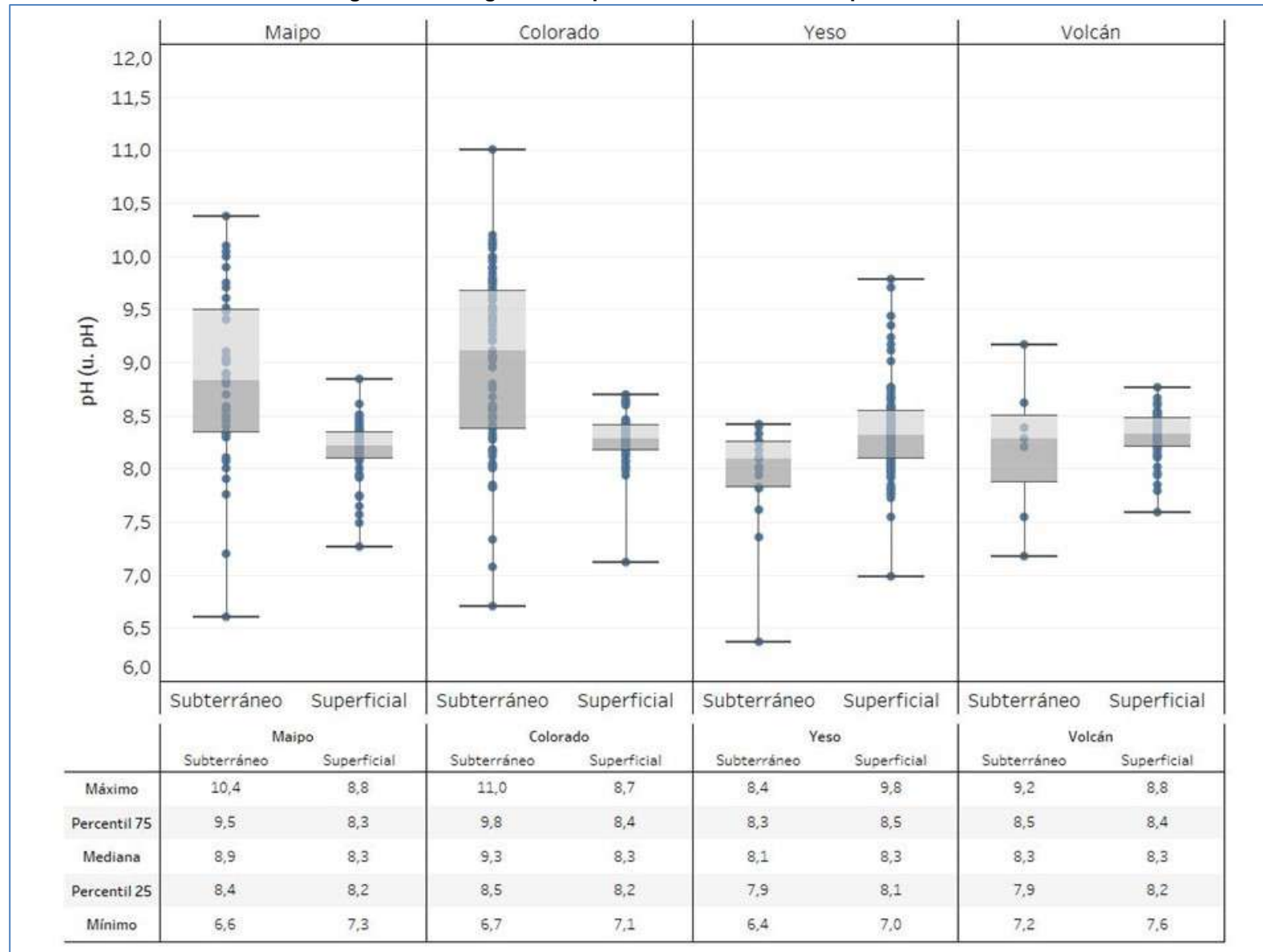
En cuanto a la Conductividad Eléctrica, se evidencia que para aguas subterráneas un 75% de los registros más bajos tienden a estar por debajo de los 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que un 75% de los registros más altos de aguas superficiales están por sobre los 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Si bien el pH presenta menores diferencias, se puede apreciar que los cuartiles centrales de las aguas subterráneas varían desde 8,2 a 9,5, mientras que los mismos cuartiles para aguas superficiales varían desde 8,0 a 8,5. Por último, los registros de Concentración de Sulfato constatan una alta diferencia según el tipo de agua, donde las aguas subterráneas varían de 2 a 60 mg/l en un 75% de sus registros más bajos, mientras que las aguas superficiales varían en un rango de 220 a 630 mg/l en un 75% de sus registros más altos.

Figura 3-13: Registros de Conductividad Eléctrica en el Área de Estudio por Sector



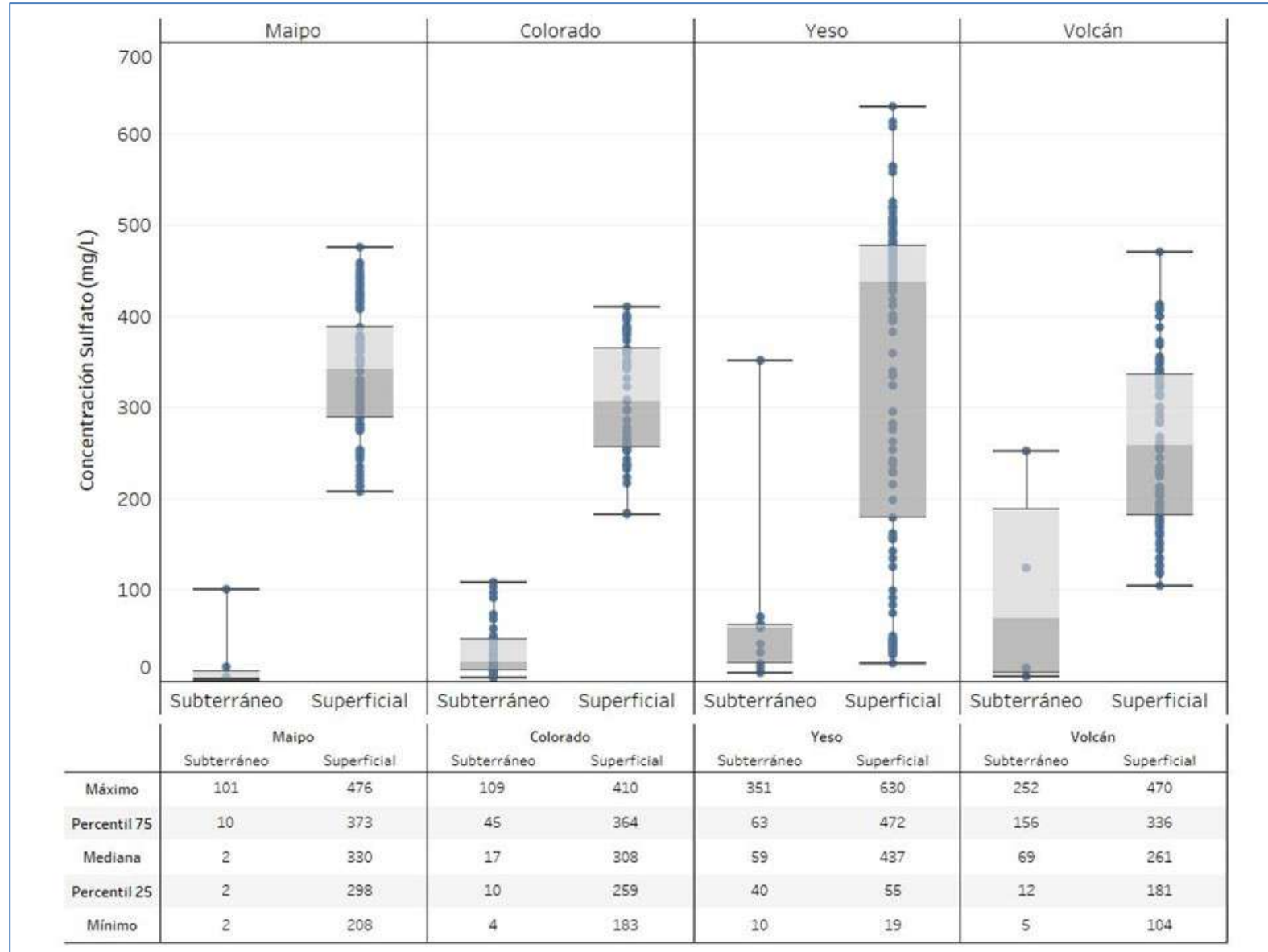
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-14: Registros de pH en el Área de Estudio por Sector



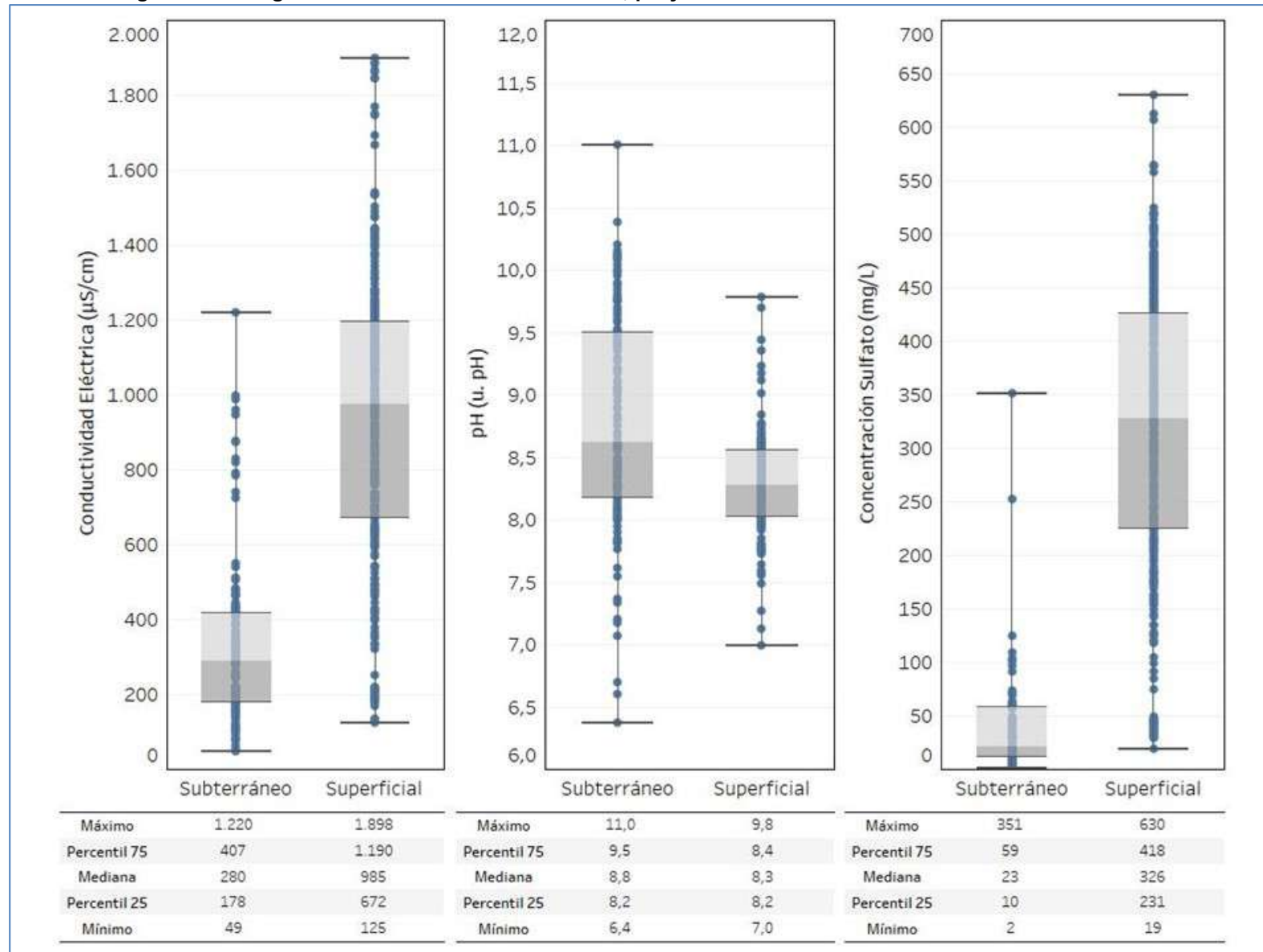
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-15: Registros de Concentración de Sulfato en el Área de Estudio por Sector



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-16: Registros de Conductividad Eléctrica, pH y Concentración de Sulfato en el Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Análisis Diagramas de Stiff

Con el fin de caracterizar la distribución espacial de la hidroquímica de las aguas subterráneas del Área de Estudio, se desarrollaron diagramas de Stiff, los cuales fueron elaborados a partir de registros de concentración de cationes y aniones principales de las muestras de aguas de afloramiento muestreadas al interior de cada túnel. Los compuestos considerados se presentan a continuación:

- Cationes:
 - Bicarbonato (HCO_3)
 - Sulfato (SO_4)
 - Cloruro (Cl)
- Aniones:
 - Magnesio (Mg)
 - Calcio (Ca)
 - Sodio (Na)

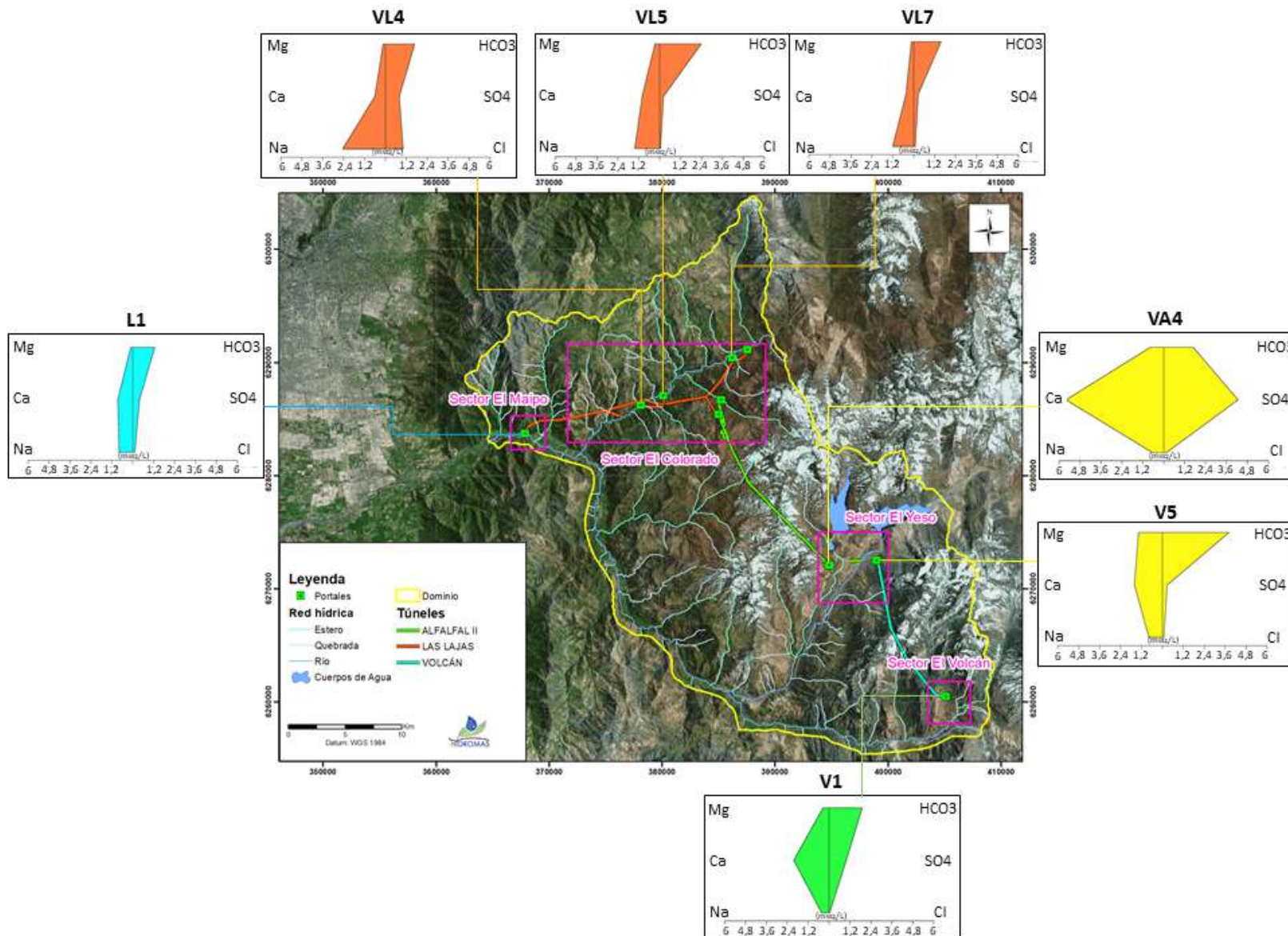
Dichos diagramas permiten caracterizar las aguas en cuanto a sus características químicas. La Figura 3-17 muestra los diagramas de Stiff referenciados espacialmente y diferenciados por color para cada uno de los sectores.

En general, las aguas subterráneas del área de estudio no presentan altas cargas iónicas y se caracterizan por ser bicarbonatadas cálcicas a sódicas, a excepción del sector donde se ubica el túnel VA4.

De manera específica, en el sector El Maipo, las aguas subterráneas son de naturaleza bicarbonatada cálcica a sódica. En el caso del sector El Colorado, el muestreo permitió diferenciar entre los túneles VL4, VL5, y VL7, mostrando como resultado una gran similitud entre los mismos, presentando aguas del tipo bicarbonatada sódica y bicarbonatada sódica a cálcica. En el sector El Volcán, el muestreo en el túnel V1 evidenció la presencia de aguas bicarbonatadas cálcicas.

En el caso del sector El Yeso se constató la presencia de dos naturalezas hidroquímicas para los túneles VA4 y V5. Para las aguas afloradas en el túnel V5 se hace notar la tendencia general de mantener características bicarbonatadas cálcicas principalmente, mientras que las aguas de su par sectorial, el túnel VA4, presentó las aguas de mayor presencia iónica y de tipo sulfatada cálcica. Esto se puede atribuir a la influencia del estero El Manzanito sobre las características físico-químicas de las aguas afloradas en el túnel VA4.

Figura 3-17: Diagramas de Stiff para el Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia

4 CONCLUSIONES

Los antecedentes presentados y su respectivo análisis permitieron definir una caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas del Área de Estudio que comprende el Dominio del Modelo, definido en el marco del desarrollo del Modelo Conceptual del sistema hidrogeológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM).

Entre los principales comentarios y conclusiones, en pertinencia a los análisis presentados en el cuerpo del presente anexo, se pueden mencionar:

- En general, las aguas subterráneas del sector de los túneles del proyecto presentan características bicarbonatadas cálcicas a sódicas de baja carga iónica.
- Las aguas subterráneas en el Área del Modelo presentan baja Conductividad Eléctrica, baja concentración de Sulfatos y pH básico. Se pueden dar excepciones locales en ciertos sectores, debido a la presencia de estructuras geológicas (fracturas o contactos litológicos), como en el sector El Colorado. Otro caso particular es el sector El Volcán y El Yeso, el cual presentan cierta dependencia de las infiltraciones de las aguas de esteros cercanos, como La Engorda y El Manzanito, respectivamente.
- A pesar de esto, se corrobora una baja a nula conexión entre las aguas subterráneas del sector de los túneles del proyecto con respecto a las aguas superficiales de los cauces principales, fundamentada en la diferencia con respecto a los parámetros de Conductividad Eléctrica, pH y Concentración de Sulfatos.
- En general, las aguas superficiales de los cauces principales, en el sector de los portales de los túneles del proyecto presentan alta Conductividad Eléctrica, pH neutral-básico y alta Concentración de Sulfatos, esto con respecto a las aguas subterráneas de dichos sectores.

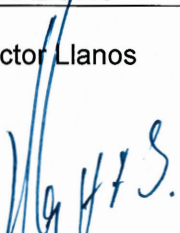


REFERENCIAS

- Arcadis, 2008. Línea de Base (LB) presentada en el marco del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM).
- SRK, 2017. Modelo hidrogeológico conceptual y numérico sector Las Lajas.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

CONTENIDO

1. OBJETIVO
2. ALCANCE
3. DEFINICIONES
4. RESPONSABILIDADES
5. DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD
6. CONTROL DE REGISTROS
7. DOCUMENTOS DE REFERENCIA
8. CONTROL DE MODIFICACIONES

FORMALIZACION DE PROCEDIMIENTO			
ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ	FECHA
Hector Llanos  Gerente Construcción PHAM	Nelson Saieg  Gerente Medio Ambiente y Cumplimiento PHAM	Alexander Wilkes  Gerente HSEQ Strabag	06.02.2019

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

CONTENIDO

1. OBJETIVO.....	3
2. ALCANCE.....	3
3. DEFINICIONES	3
4. RESPONSABILIDADES	4
5. DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD.....	8
5.1 Activación de Procedimiento.....	8
5.2 Medidas de Control.....	9
5.2.1 Nivel 1	9
5.2.2 Nivel 2	10
5.2.3 Nivel 3	10
Materiales para toma de muestras	16
Capacitación operadores plantas de afloramiento	16
Reporte Diario	19
Reporte Semanal	19
Reporte de Cierre	19
6. CONTROL DE REGISTROS.....	20
7. DOCUMENTOS DE REFERENCIA	20
8. CONTROL DE MODIFICACIONES	21
ANEXO A. Tabla Resumen de Caudales Esperados Promedios y Capacidad de Tratamiento Operacional por túnel	23

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

1. OBJETIVO

Definir las acciones y comunicaciones que se implementan en el manejo, tratamiento y disposición de aguas de afloramiento que se generan desde las obras subterráneas del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), ante eventos que presentan flujos superiores a la capacidad operacional por túnel de los sistemas de tratamiento para aguas de afloramiento.

2. ALCANCE

Este procedimiento es aplicable a todos los túneles del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo y los correspondientes Sistemas de Tratamiento de Aguas de Afloramiento.

3. DEFINICIONES

- **Capacidad de Tratamiento Operacional por Túnel (l/s):** Comprende la capacidad necesaria para cubrir los requerimientos operacionales de tratamiento para un túnel determinado, ya sea de forma individual parcial por cada portal o individual total por cada portal, y que corresponde a la capacidad por sobre la cual aplica el nivel de contingencia para el túnel respectivo.
- **Caudales Esperados Promedio por Túnel (l/s):** Corresponde a los caudales estimados por el modelo hidrogeológico, o a los corregidos estadísticamente, por cada túnel (Ver tabla en Anexo A), calculados como promedio mensual en media móvil de 12 meses, que se considera como límite de control para la activación del nivel de alerta para el túnel respectivo.
- **Capacidad de Tratamiento Disponible (l/s):** Capacidad instalada por portal, que incluye plantas de tratamiento en operación, más las plantas de tratamiento en stand-by, por debajo de la Capacidad de Tratamiento Operacional por túnel.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

- **Descarga por contingencia:** Descarga de agua aflorada sin tratamiento hacia un cuerpo receptor, en una situación de evento extraordinario de afloramiento en el macizo rocoso.
- **Monitoreo de calidad de agua:** Actividad de medición, muestreo y análisis de agua con el fin de determinar, en los términos establecidos en la normativa vigente, la cantidad y calidad del efluente vertido en un cuerpo de agua superficial, como también la calidad del cuerpo receptor.

4. RESPONSABILIDADES

4.1 Personal PHAM

Gerente/Director de Proyecto

- Coordinar con el Contratista y el equipo PHAM la verificación de la implementación por parte del Contratista de las acciones que se requieran para el control del ingreso de agua de afloramiento al interior de los túneles, en función de los antecedentes técnicos disponibles.

Gerente de Medio Ambiente y Cumplimiento

- Participar en el seguimiento de las contingencias con el Gerente/Director de Proyecto para evaluar las medidas de control ambiental implementadas por el Contratista.
- Asegurar la difusión de este procedimiento a todo el personal involucrado en el alcance del mismo.
- Asegurar el cumplimiento de este procedimiento y el reporte a la Autoridad Ambiental.
- Reportar la contingencia en la plataforma de incidentes del Sistema de Seguimiento Ambiental de la SMA y hacer seguimiento de la misma.

Supervisión de Construcción

- Verificar el cumplimiento en terreno de las medidas de contingencia implementadas por el Contratista en base a los criterios establecidos en el presente procedimiento.

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

- Verificar que el Contratista cuente con los recursos necesarios para atender la contingencia.

Supervisión Ambiental

- Verificar en terreno, junto al equipo de construcción, que las medidas especificadas hayan sido implementadas y que cumplan lo dispuesto en el presente procedimiento.
- Generar el reporte de la contingencia y consolidar un informe con las medidas implementadas y sus resultados.
- Verificar y apoyar la realización de los monitoreos requeridos por este procedimiento.
- Verificar que el Contratista mantiene registro y realiza oportuna entrega de la información relacionada con el control de la contingencia.

4.2 Personal del Contratista

Gerente de Construcción o Gerente de Terreno

- Evaluar las condiciones de la contingencia e implementar las medidas pertinentes para el control del agua de afloramiento al interior de los túneles.
- En caso que corresponda, suspender actividades productivas al interior del túnel durante la contingencia.
- Gestionar los recursos para implementar las medidas de control.
- Garantizar la operatividad de los Sistemas de Tratamiento de Afloramientos.

Geólogo

- Evaluar las características del macizo rocoso para establecer medidas de control, conforme al procedimiento de cementación de pre y post-excavación".
- Participar en la elaboración de alternativas para el control de afloramientos de agua al interior del túnel.

Superintendente de Excavación

- Controlar las actividades al interior del túnel durante el tiempo que dure la contingencia.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

- Controlar y ejecutar actividades que garanticen la operatividad de los Sistemas de Tratamiento de Afloramientos.

Gerente de Medio Ambiente

- Garantizar los recursos para el monitoreo de aguas y la contratación de la Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental (laboratorio ETFA) para el análisis.
- Proveer el registro de las acciones implementadas para el control de la contingencia, en función de los procedimientos de Proyecto y requerimientos de la Autoridad.
- Entregar los lineamientos de capacitación para los operadores de planta en materia de muestreo y actuación durante la contingencia.
- Reportar el manejo de la contingencia a la Supervisión Ambiental PHAM.

Supervisor Ambiental de Terreno

- Garantizar que los puntos de monitoreo de las descargas se encuentren en condiciones adecuadas para la toma de muestra.
- Supervisar el adecuado funcionamiento de las plantas de tratamiento, registrar y mantener el control de los registros requeridos durante la contingencia.
- Gestionar los equipos de monitoreo requeridos según este procedimiento.
- Reportar internamente los incidentes ambientales asociados a la contingencia.

Operador Planta de Tratamiento de Aguas de Afloramiento.

- Operar y mantener la planta de tratamiento.
- Informar al Supervisor Ambiental del Contratista problemas operacionales de la planta de tratamiento y desviaciones en las condiciones normales de funcionamiento.
- Controlar los parámetros de caudal, pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica de la planta de tratamiento para garantizar su correcto funcionamiento.
- Acompañar la ejecución de monitoreos periódicos que realiza el laboratorio ETFA en la planta de tratamiento.

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

- Ejecutar el monitoreo de caudal, pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica de la calidad de la descarga de contingencia al cauce superficial.
- Ejecutar el monitoreo de pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica en el cauce superficial, aguas arriba y abajo del punto de descarga de contingencia.
- Garantizar el cumplimiento de la cadena de custodia de las muestras tomadas.
- Coordinar con interior túnel la operación del sistema de bombeo en conformidad con la operación de las plantas.

Laboratorio de Calidad de Agua ETFA

- Analizar las muestras tomadas durante la contingencia.
- Reportar el resultado de los análisis de laboratorio.
- Dar cumplimiento a los lineamientos establecidos por la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) respecto al actuar de las ETFAs.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

5. DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

5.1 Activación de Procedimiento

La implementación del procedimiento de contingencia considera la definición de tres estados de operación de las plantas:

- **Nivel 1 (Operación Normal):** Caudal de aguas afloradas medido a la salida de los portales asociados a cada túnel igual o inferior al Caudal Esperado Promedio en un determinado Túnel.
- **Nivel 2 (Operación en Alerta):** Caudal de aguas afloradas medido a la salida de los portales asociados a cada túnel superior al Caudal Esperado Promedio en un determinado Túnel, pero inferior o igual a la Capacidad de Tratamiento Operacional de un determinado Túnel.
- **Nivel 3 (Operación de Contingencia):** Caudal de aguas afloradas medido a la salida de los portales asociado a cada túnel superior a la Capacidad de Tratamiento Operacional del respectivo túnel o en caso de producirse una descarga de contingencia a cauce superficial.

A continuación, en la Tabla 1 se presenta en forma esquemática un resumen de las características de activación de los 3 niveles de operación definidos en función de los Caudales Esperados Promedio y Capacidad de Tratamiento Operacional por túnel.

Tabla 1. Implementación Procedimiento de Contingencia

Nivel	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Operación	Normal	Alerta	Contingencia
Q afluente Planta Afloramiento	<= Caudales Esperados Promedio por túnel	> Caudales Esperados Promedio por Túnel <= Capacidad de Tratamiento Operacional por túnel	Superación de la Capacidad de Tratamiento Operacional por túnel o descarga de contingencia

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

Nivel	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Operación	Normal	Alerta	Contingencia
Condición de activación medidas de control	No Aplica	1 mes sobre Caudales Esperados Promedio por túnel	Inmediato
Avance de Excavación	Normal	Normal	Condicionado
Monitoreo	Normal	Normal	Con reporte a la SMA
Acciones de Control	Según definido en sección 5.2	Según definido en sección 5.2	Según definido en sección 5.2
Duración Máxima desde activación	No Aplica	2 meses D&B 4 meses TBM Abierta 6 meses TBM Cerrada	30 días D&B 60 días TBM Abierta 90 días TBM Cerrada

En Anexo A se indican los Caudales Esperados Promedio por túnel y las Capacidades de Tratamiento Operacional por túnel, que forman parte del contenido del documento “Informe de actualización de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas afloradas del PHAM”.

5.2 Medidas de Control

El equipo de construcción del Contratista, liderado por el Gerente de Construcción o el Gerente de Terreno, liderará la implementación del presente procedimiento y mantendrá debida y oportunamente informado al Gerente de Construcción y al Gerente de Medio Ambiente y Cumplimiento del PHAM. El Contratista informará respecto de la evaluación de la contingencia, asegurando la implementación de las medidas de control y los recursos necesarios para su correcta aplicación.

Para los efectos de los niveles indicados en la Tabla 1, las medidas de control son las siguientes:

5.2.1 Nivel 1

El Nivel de Operación Normal no considera la adopción de medidas distintas a las acciones de monitoreo y control habitualmente implementadas por el Contratista.

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

5.2.2 Nivel 2

El Nivel de Operación en Alerta contempla la adopción de las siguientes medidas:

- **Uso de la capacidad de tratamiento disponible:** El contratista utilizará la Capacidad de Tratamiento Disponible en cada portal para evitar la descarga de contingencia.
- **Control de afloramientos y disminución de caudal aflorado:** Si en un período de 1 mes¹ no se logra disminuir la cantidad de agua de afloramiento, volviendo al nivel del Caudal Esperado Promedio por túnel, el equipo de construcción aplicará las medidas establecidas en el procedimiento de cementación de pre y post excavación. En caso que se supere la duración máxima descrita en la Tabla 1 para el nivel de alerta, y aunque no se haya activado la condición de contingencia descrita en la misma tabla, comenzarán a aplicar las medidas de avance de excavación, monitoreo, control y duración definidas para el nivel 3.
- **Transporte de agua a otras plantas de tratamiento del PHAM:** Eventual transporte a otros portales cercanos al de ocurrencia de la alerta en el cual exista Capacidad de Tratamiento Disponible sin superar la Capacidad de Tratamiento Operacional del respectivo túnel.

5.2.3 Nivel 3

El Nivel de Operación en Contingencia contempla la adopción de las siguientes medidas:

- **Detención del avance normal de construcción del túnel:** Las actividades que se desarrollen dentro del túnel se enfocarán en controlar la contingencia, por lo que los movimientos de las máquinas tuneladoras (TBM), jumbos y otros equipos de perforación se emplearán sólo para las actividades de control de los afloramientos y la seguridad operacional del túnel, deteniendo las actividades de avance normal de excavación al interior del túnel.

¹ Calculado a través de media móvil mensual de 12 meses.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

- **Avances controlados de la TBM:** En el caso de túneles excavados con TBM, abierta o cerrada, se podrían requerir avances controlados para superar restricciones geométricas que impiden el acceso a lugares que se encuentran bloqueados o inaccesibles por instalaciones propias del equipo. Estos avances controlados son necesarios para acceder a nuevos puntos e implementar las acciones de control para superar la contingencia. Eventualmente, y dependiendo de las condiciones geológicas, podría ser necesario mantener el avance de excavación controlado en el caso de la TBM cerradas, esto con el objetivo de evitar atrapamiento del equipo que pudiere dificultar el control del ingreso de las aguas afloradas en un determinado túnel.
- **Uso de la capacidad de tratamiento disponible:** El contratista utilizará la Capacidad de Tratamiento Disponible en cada portal para evitar la descarga de contingencia.
- **Duración de la contingencia:** El tiempo máximo que se podrá estar en contingencia será el definido en la Tabla 1, para lo cual se compararán diariamente los caudales medidos en los afluentes de las plantas con los límites de activación descritos en el presente procedimiento. Para efectos de verificar la superación de la contingencia, es decir, bajar de nivel 3 al 2, o del 3 al 1, se deberá permanecer 5 días corridos en este nuevo nivel, para poder comenzar a aplicar los plazos y medidas asociadas al nivel de operación alerta o normal, según corresponda.

Adicionalmente se ejecutarán las siguientes acciones (Tabla 2):

Tabla 2. Acciones de control de Contingencia

Responsable	Acción
Operador de Planta	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer capacidad de almacenamiento en estanques en el sitio de faenas. • Si procede, solicitar al Superintendente de Minería del Contratista recursos para transporte o bombeo de agua hacia otras plantas de tratamiento de aguas afloradas. • Una vez superadas las capacidades de tratamiento del Sistemas de Tratamiento de Aguas Afloradas, la capacidad de almacenamiento y de transporte hacia otros Sistemas de Tratamiento cercanos, proceder a descargar los flujos en exceso de agua de afloramiento al cauce superficial cercano.

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

Responsable	Acción
	<ul style="list-style-type: none"> • Registrar los volúmenes y destino de las aguas retiradas en camión aljibe, volúmenes de ingreso a las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas, volúmenes descargados de aguas tratadas desde las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas, volúmenes descargados desde la Planta de Riles y volúmenes de aguas afloradas de descarga de contingencia a cauce superficial.
Superintendente de Minería Contratista	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorear las piscinas de bombeo al interior túnel y verificar que el sistema se encuentre completamente operativo y a máxima capacidad. • Evaluar la eventual necesidad de transporte hacia otras plantas de tratamiento de aguas afloradas. • Aplicar las medidas establecidas en el procedimiento de cementación de pre y post excavación.
Gerente de Construcción o Terreno del Contratista	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar la disponibilidad de capacidad de tratamiento en otras plantas de tratamiento de aguas afloradas cercanas del proyecto. • Decidir y disponer los recursos para bombeo o transporte de aguas afloradas para su tratamiento en otras instalaciones del proyecto. • Instruir el uso de la Capacidad de Tratamiento Disponible según lo descrito en el presente procedimiento. • Instruir la detención del avance de la excavación del túnel respectivo.

Respecto a las mediciones y registro, se llevarán a cabo las siguientes actividades

a) Medición de Caudal²

Todas las tuberías de salida de los túneles cuentan con flujómetros que registran el volumen total bombeado y el caudal instantáneo; estos datos son registrados cada doce horas por los operadores de las plantas de tratamiento y con estos valores se calcula el promedio de flujo en períodos de 12 horas así:

² En el caso de flujómetros que estén conectados a un sistema de registro continuo, se podrá utilizar dicho sistema para la medición y control de caudal.

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

$$Caudal\ Promedio(L/S) = \frac{Volumen_t(m^3) - Volumen_{t-1}(m^3)}{t(h) - t_{-1}(h)} \times \frac{1000L}{3600S}$$

Donde el $Volumen_t$ corresponde al volumen total registrado de agua extraída del túnel medido en m^3 reportada con la hora de medición t , y el $Volumen_{t-1}$ corresponde a la cantidad de agua extraída del túnel en m^3 reportada con la hora de medición t_{-1} , tomada 12 horas antes.

b) Túneles con tubería de descarga de contingencia independiente:

Previo al inicio de descarga el operador tomará lectura del volumen registrado por el flujómetro³, y posteriormente tomará lectura tres (3) veces al día durante el periodo de contingencia (esto se registrará fotográficamente, incluyendo fecha, hora y georreferenciación en la foto).

c) Medida de control en caso de falla de flujómetros

En caso de fallas del flujómetro, en tanto este se reemplaza, el operador de la planta deberá hacer un aforo volumétrico cada 60 minutos durante el periodo de descarga de contingencia.

d) Medición de parámetros físico-químicos⁴

El contratista deberá monitorear durante el periodo de contingencia pH, Temperatura (°C) y Conductividad eléctrica ($\mu S/cm$) de las aguas afloradas, aguas afloradas tratadas, RILES tratados y en el cuerpo receptor aguas abajo de la descarga de contingencia, tres (3) veces al día, dejando registro fotográfico de la medición y enviará esta información al Supervisor Ambiental PHAM.

³ Ídem nota 1

⁴ En los casos que exista medición con registro continuo de algún parámetro físico – químico en el afluente y/o efluente de la respectiva planta de tratamiento, se podrá utilizar esta información para el monitoreo.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

e) Monitoreo del D. S. N° 90/00 de la descarga de Contingencia

El monitoreo de la descarga de contingencia se realizará de acuerdo a los procedimientos de medición y control del D.S. N° 90/00 y los requerimientos y resoluciones de la Superintendencia del Medio Ambiente.

Descarga de contingencia inferior a 12 horas:

Toma de muestras del agua de afloramiento a descargar: una vez iniciada la descarga se tomarán muestras puntuales horarias de 15 litros usando 3 bidones de 5 Litros, así:

- **Descarga inferior a 4 horas:** Tres (3) muestras puntuales
- **Descarga superior a 4 horas e inferior a 12 horas:** Muestras puntuales obtenidas a lo más cada dos (2) horas.

La primera muestra se tomará en el momento que inicie la descarga y esta se considerará la muestra 1. Este procedimiento se realizará durante el tiempo que dure la descarga. Con las muestras puntuales se formará una muestra compuesta según los requerimientos del DS 90/2000 MINSEGPRES, en función de lo siguiente:

Las muestras deben ser representativas del periodo de tiempo descargado. Además, luego de formar la muestra compuesta, esta se distribuirá en los envases con preservantes pertinentes, se refrigerará y se transportará a un laboratorio ETFA, realizándose los análisis de los parámetros establecidos en el ítem siguiente.

Descarga de contingencia superior a 12 horas:

Si la descarga de contingencia es superior a 12 horas, se deberá monitorear mediante una ETFA autorizada la calidad de las aguas afloradas, las aguas afloradas tratadas y los RILES tratados, dentro de los dos días siguientes al inicio de la descarga de contingencia.

Los parámetros a analizar en el monitoreo de la descarga de contingencia corresponden a los establecidos en la Tabla 3:

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

Tabla 3. Parámetros de monitoreo de la descarga

Parámetro	Unidad
Aluminio	mg/L
Arsénico	mg/L
Boro	mg/L
Cadmio	mg/L
Cianuro	mg/L
Cloruros	mg/L
Cobre Total	mg/L
Cromo Hexavalente	mg/L
Hierro Disuelto	mg/L
Manganeso	mg/L
Mercurio	mg/L
Molibdeno	mg/L
Níquel	mg/L
pH	Unidades y Temperatura de Medición (°C)
Plomo	mg/L
Selenio	mg/L
Sólidos suspendidos Totales	mg/L
Sulfatos	mg/L
Temperatura	°C
Zinc	mg/L
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml
Hidrocarburos Fijos	mg/L
Poder Espumógeno	mm PE
Conductividad	µS/cm

Este monitoreo se mantendrá con una periodicidad quincenal mientras permanezca activa la contingencia.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

Materiales para toma de muestras

El contratista deberá contar con los siguientes elementos para toma de muestras:

- 18 Bidones plásticos de 5 Litros
- 1 Nevera (Cooler) de 50 Litros
- 1 Set de Botellas acondicionadas por un Laboratorio ETFA para análisis del agua descargada según Tabla 1 DS 90/00 y NCh 411/Of. 96.
- 3 Bolsas de Refrigerante (ICE PACK, Thermos o Similar)
- 1 Bidón de 20 Litros para realizar muestra compuesta.

El contratista debe contar con un número de kits de toma de muestras igual al número de plantas de afloramiento existentes. Adicionalmente la supervisión ambiental PHAM deberá contar con 2 kits de toma de muestra de respaldo.

Capacitación operadores plantas de afloramiento

El contratista capacitará formalmente a todos los operadores de las plantas de Afloramiento en la Norma NCh 411/10, específicamente respecto al muestreo, para garantizar una correcta ejecución de la actividad. Lo anterior deberá ser desarrollado por una empresa especialista y acreditada para esta actividad.

f) Monitoreo del cuerpo receptor

Una vez se produzca una descarga de contingencia se deberá realizar dentro de los dos días siguientes un monitoreo del cuerpo receptor de la descarga en puntos representativos de la columna de agua del cuerpo receptor, ubicados preferentemente a una distancia de 100 metros aguas arriba y 100 metros aguas abajo del punto de descarga. En caso que el acceso no sea posible, se establecerán los puntos más cercanos posibles a las distancias antes indicadas. Esta actividad debe ser realizada por una ETFA autorizada.

Mientras continúe la descarga de contingencia se deberá seguir monitoreando el cuerpo receptor quincenalmente.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

Al momento de la toma de las muestras de agua se deberá medir en cada punto de monitoreo los siguientes parámetros (parámetros *in situ*): pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica.

Los parámetros a analizar en el monitoreo del cuerpo receptor corresponden a los establecidos en la Tabla 4:

Tabla 4. Parámetros de monitoreo cuerpo receptor

Parámetro	Unidad
Aluminio	mg/L
Arsénico	mg/L
Boro	mg/L
Cadmio	mg/L
Cianuro	mg/L
Cloruros	mg/L
Cobre Total	mg/L
Cromo Hexavalente	mg/L
Hierro Disuelto	mg/L
Manganeso	mg/L
Mercurio	mg/L
Molibdeno	mg/L
Níquel	mg/L
pH	Unidades y Temperatura de Medición (°C)
Plomo	mg/L
Selenio	mg/L
Sólidos suspendidos Totales	mg/L
Sulfatos	mg/L
Temperatura	°C
Zinc	mg/L
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml
Hidrocarburos Fijos	mg/L
Poder Espumógeno	mm PE
Conductividad	µS/cm

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

g) Control de calidad de resultados

Las muestras tomadas serán enviadas al laboratorio manteniendo la cadena de custodia respectiva para su análisis de acuerdo a los métodos establecidos para cada uno de los parámetros requeridos por la normativa. Posteriormente, el laboratorio ETFa deberá asegurar la correcta conservación de las muestras y su ulterior análisis.

h) Análisis de los resultados de calidad de agua

La Supervisión Ambiental PHAM recopilará los resultados de los parámetros de calidad de agua medidos *in situ* por el Contratista y los obtenidos por el Laboratorio ETFa, adjuntando los respectivos registros e informes de ensayo. Con esta información se realizará un análisis ex-post de la calidad de agua descargada una vez se reciban los informes de ensayo del laboratorio, para lo cual comparará la calidad del agua descargada y los registros históricos existentes. Adicionalmente, se analizará si hubo cambios en la calidad de las aguas del cuerpo receptor, aguas abajo de la descarga de contingencia, contrastando estos resultados con los correspondientes a aguas arriba de la descarga.

i) Reporte de la contingencia

Cuando se declare la contingencia, la Supervisión Ambiental del Contratista iniciará la investigación en terreno de la situación y elaborará el reporte preliminar del incidente, enviando esta información al Gerente de Medio Ambiente y Cumplimiento Ambiental PHAM dentro de las 12 hrs después de activada la contingencia, para el reporte inicial a la autoridad según lo establecido en la RCA 256/09 considerando 8.3.2 y Resolución Ex. 885/2016 de la Superintendencia del Medio Ambiente.

Todas las medidas de control serán consolidadas por la Supervisión Ambiental PHAM para que el Gerente de Medioambiente y Cumplimiento confeccione los reportes a emitir según lo siguiente:

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

Reporte Diario

Diariamente se enviará vía correo electrónico a la SMA con un reporte en formato Excel del caudal de ingreso a la planta de afloramiento, caudal de descarga de la planta de afloramiento, el caudal de descarga de la planta de RILES si lo hubiere, caudal de contingencia y caudal del cuerpo receptor según lo reportado por la DGA.

Reporte Semanal

El primer día hábil de cada semana, una vez iniciada la contingencia, se reportará la siguiente información a la SMA.

- Reporte semanal de la caracterización de la calidad del efluente con los parámetros de pH, temperatura y Conductividad eléctrica para la descarga de contingencia, caudal descargado por plantas de afloramiento y en cuerpo receptor en punto aguas abajo de la descarga de contingencia. Se reportará la medición realizada tres veces al día.
- Reporte de las medidas de control de afloramiento implementadas en los túneles según lo establecido en el procedimiento de cementación de pre y post excavación, donde se identificará y describirán las medidas implementadas con los correspondientes medios de verificación, vale decir, el registro fotográfico identificando el pK donde se aplicó la medida de control de afloramientos y/o videos que muestren la situación pre y post aplicación de las medidas.
- Reporte de otras medidas implementadas durante la semana.
- Resultados de análisis o monitoreos que sean entregados por la ETFA.

Reporte de Cierre

Una vez finalizada la contingencia el Gerente de Medioambiente y Cumplimiento PHAM cerrará el incidente en la plataforma de la SMA, adjuntando todos los reportes realizados y las evidencias respectivas.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

6. CONTROL DE REGISTROS

Nombre del Registro	Código	Retención			Disposición
		Medio	Tiempo	Responsable de Custodia	
Planilla de terreno toma de Muestras	ENV-PCD-013/F1	Físico		Medio Ambiente PHAM	

7. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

Nombre del Documento	Código	Tipo de Documento (Interno/Externo)	Disponible en:
Resolución Exenta No. 256/09	RCA256/09	Externo	SEIA
Procedimiento de cementación de pre y post-excavación	PMG-PCD-002	Interno	Strabag
Calidad del Agua. Muestreo. Parte 10: Muestreo de aguas residuales. Recolección y manejo de las muestras	NCh 411/10	Externo	INN

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

8. CONTROL DE MODIFICACIONES

Las modificaciones que se hagan a este Procedimiento ENV-PCD-0013 control de contingencias por superación de capacidad de sistemas de tratamiento de aguas de afloramiento, deberán quedar registradas en la siguiente tabla:

Revisión	Fecha	Descripción de Modificaciones
0	31.08.2016	<ul style="list-style-type: none"> Versión inicial
1	17.05.2017	<ul style="list-style-type: none"> Se modifican las responsabilidades dada la creación de la Gerencia de Control Ambiental Se actualizan los nombres y firmas de quien elabora, revisa y aprueba en la portada del procedimiento
2	04.07.2017	<ul style="list-style-type: none"> Se precisan las acciones iniciales y responsabilidades de ejecución inmediata ante activación de procedimiento. Se corrigen errores ortográficos y ajustes de formato
3	06.02.2018	<ul style="list-style-type: none"> Se hacen modificaciones al procedimiento según lo solicitado en la Resolución Exenta No. 22/ROL D-001-2017 del 05-ENE-2018 La cual realiza observaciones al Programa de Cumplimiento presentado por Alto Maipo SpA, y se ajusta a los requerimientos de la medida provisional establecida en Resolución Exenta 1460 del 07-DIC-2017 de la SMA.
4	26.03.2018	<ul style="list-style-type: none"> Se hacen modificaciones al procedimiento según lo solicitado en la Resolución Exenta No. 26/ROL D-001-2017 del 16-MAR-2018 La cual realiza observaciones al Programa de Cumplimiento presentado por Alto Maipo SpA y da traslado de información que indica.
5	01.02.2019	<ul style="list-style-type: none"> Actualización según resultados del modelo hidrogeológico y nueva versión del Informe de

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

ENV-PCD-013	PLAN DE CONTINGENCIA DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

Revisión	Fecha	Descripción de Modificaciones
		<p>actualización de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas afloradas.</p> <ul style="list-style-type: none"> Se modifica el nombre del procedimiento

ENV-PCD-013	MANEJO DE CONTINGENCIA POR SUPERACIÓN DE CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE AFLORAMIENTO
ALTO MAIPO	ENV-PCD-013
	Rev. 5

ANEXO A. Tabla Resumen de Caudales Esperados Promedios y Capacidad de Tratamiento Operacional por túnel

Túnel	Portales	Caudales esperados promedios por túnel (l/s)	Capacidad de tratamiento operacional por túnel (l/s)
Las Lajas	L1	508	525
	VL2		
	VL4		
	VL5		
	VL7-VL8		
Alfalfal	VA1	71	125
	VA2		
	VA4		
Volcán	V5	190	250
	V1		
TOTAL		769	900

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propiedad de Alto Maipo SpA.

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. ALCANCE
3. SEGUIMIENTO Y MONITOREO A AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
4. CONTROL DE MODIFICACIONES

FORMALIZACION DE PROCEDIMIENTO			
ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ	FECHA
Luis Tovar	Nelson Saieg	Alexander Wilkes	07.02.2019
			
Jefe Medio Ambiente PHAM	Gerente de Medio Ambiente y Cumplimiento PHAM	Gerente HSEQ Strabag	

Copias impresas son documentos no controlados.
Documento confidencial y propietaria de Alto Maipo SpA.

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

1. OBJETIVOS

Los objetivos del seguimiento y monitoreo ambiental de las aguas que pudieran aflorar durante la excavación de las obras subterráneas del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), son los siguientes:

- Acreditar el cumplimiento de calidad del efluente de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas.
- Controlar el correcto funcionamiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas, a través del monitoreo continuo de su efluente.
- Verificar que los caudales aflorados desde los túneles no superen la Capacidad de Tratamiento Disponible en cada portal¹.
- Verificar se ejecuten las medidas de control de afloramientos conforme a los criterios y escenarios definidos por el PHAM.

2. ALCANCE

El presente Plan de Seguimiento y Monitoreo aplica a las aguas afloradas que podrían surgir durante la excavación de las obras subterráneas del PHAM.

¹ La Capacidad de Tratamiento Disponible corresponde a la capacidad instalada por portal, que incluye plantas de tratamiento en operación, más las plantas de tratamiento en stand-by, por debajo de la Capacidad de Tratamiento Operacional por Túnel. En tanto, la Capacidad de Tratamiento Operacional por Túnel corresponde a la capacidad necesaria para cubrir los requerimientos operacionales de tratamiento para un túnel determinado, y que se encuentra definida en el documento "Informe de Actualización de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas afloradas del PHAM".

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

3. SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS

3.1. Seguimiento de la calidad del efluente de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas

Para efectos de asegurar una adecuada calidad del efluente de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas se efectuará el seguimiento del cumplimiento del Decreto Supremo N°90 del año 2000, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que establece la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (D.S. N° 90/00), de la siguiente forma:

- a) **Ubicación de puntos de control:** Los puntos de monitoreo se ubicarán en los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas del PHAM, considerando los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del equipo muestreador.
- b) **Parámetros de control:** Los parámetros que se monitorearán son los siguientes²:
 - pH
 - Temperatura
 - Aluminio
 - Coliformes Fecales o Termotolerantes
 - Hidrocarburos Fijos
 - Hierro Disuelto
 - Manganeseo
 - Poder Espumógeno
 - Sólidos Suspendidos Totales
 - Sulfatos
 - Zinc
 - Conductividad Eléctrica
- c) **Límites considerados:** El monitoreo antes mencionado debe cumplir para cada parámetro y en cada uno de los puntos establecidos anteriormente, con la Tabla N°1

² Selección de parámetros se basó en la Res. Ex. N° 734/2016 de la SMA, que fija el Programa de Monitoreo Provisional de la calidad del efluente generado por las Plantas de Tratamiento de Riles del PHAM, incluyendo el parámetro Conductividad Eléctrica.

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

del D.S. N° 90/00. Los límites máximos permitidos para los parámetros y el tipo de muestra que debe ser tomada para su determinación son los siguientes:

Parámetro	Unidad	Límite Máximo	Tipo de Muestra
pH	Unidad	6,0 – 8,5	Puntual
Temperatura	°C	35	Puntual
Aluminio	mg/L	5	Compuesta
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100mL	1.000	Puntual
Hidrocarburos Fijos	mg/L	10	Compuesta
Hierro Disuelto	mg/L	5	Compuesta
Manganeso	mg/L	0,3	Compuesta
Poder Espumógeno	mm	7	Compuesta
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80	Compuesta
Sulfatos	mg/L	1.000	Compuesta
Zinc	mg/L	3	Compuesta
Conductividad Eléctrica	-	-	Puntual

En caso de existir excedencia de los límites establecidos, se realizará el remuestreo correspondiente. Así también se realizará un monitoreo de los mismos parámetros en el origen del surgimiento de las aguas afloradas para determinar si la excedencia registrada es de origen natural.

El parámetro Conductividad Eléctrica se empleará de manera referencial como un índice aproximado de la concentración de solutos en el agua.

- d) Duración y frecuencia del plan de seguimiento:** Todo mes en que se realice descarga a cauce superficial desde las plantas de tratamiento de aguas afloradas del PHAM, se realizará un monitoreo de la calidad del efluente, durante todo el periodo de construcción y mientras esté operativa la respectiva planta.

En caso de la ocurrencia de hechos que alteren la medición y/o dejen fuera de funcionamiento el equipo de monitoreo, o eventos naturales o antrópicos que afecten

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

o impidan el monitoreo, se avisará a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) en un plazo máximo de 5 días hábiles acompañando todos los antecedentes que acrediten el hecho e informando las nuevas fechas programadas para los monitoreos que no pudieron realizarse.

- e) Método o procedimiento de medición de cada parámetro:** Las muestras deberán cumplir con lo establecido en la Norma Chilena 411/10, Of. 2005, Calidad del agua - muestreo - parte 10: muestreo de aguas residuales - recolección y manejo de las muestras, declarada Norma Oficial de la República por medio del Decreto Supremo N° 571, de 20 de julio de 2005, del Ministerio de Obras Públicas, o su versión vigente. La metodología a utilizar en el análisis de los parámetros señalados será la establecida en la Serie Norma Chilena 2.313, Of. 2006, Aguas Residuales -Métodos de Análisis", declaradas como Norma Oficial de la República por medio del Decreto Supremo N° 355, de 2006, del Ministerio de Obras Públicas, o en su efecto deberán cumplir con lo establecido en el artículo 6.5 del D.S. N° 90/00. Los muestreos se realizarán por una Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental (ETFA), en cumplimiento de la Resolución Exenta N° 1024 del 8 de septiembre de 2017 de la SMA.
- f) Plazo y frecuencia de entrega de informes:** El informe de seguimiento ambiental de la medida descrita en este apartado será remitido en forma semestral a la SMA a través del Sistema Electrónico de Seguimiento Ambiental y se estructurará según lo definido en la Res. Ex. 223/2015 de la SMA.

Los informes incluirán la siguiente información:

- Certificados de autocontrol mensuales emitidos por el laboratorio que realizó el monitoreo y remuestreos, si corresponde.
- Resumen de los monitoreos realizados, fechas de monitoreo, parámetros excedidos, fechas de remuestreo, si corresponde, y laboratorio que realizó el monitoreo.

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

3.2. Seguimiento del correcto funcionamiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas, a través de sistema de monitoreo continuo

Para efectos de asegurar el correcto funcionamiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas, se efectuará el seguimiento de los parámetros pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica mediante equipos de monitoreo continuo, de la siguiente forma:

- a) **Ubicación de puntos de control:** Los puntos de control se ubicarán en los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas del PHAM, considerando los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento de los equipos de monitoreo continuo.
- b) **Parámetros de control:** Los parámetros que se monitorearán son los siguientes:
 - pH
 - Temperatura
 - Conductividad Eléctrica (CE)
- c) **Límites considerados:** Para controlar el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas afloradas se utilizarán como **referencia** los límites establecidos en la Tabla N°1 del D.S. 90/00.
 El parámetro Conductividad Eléctrica se empleará de manera referencial como un índice aproximado de la concentración de solutos en el agua.
 Cabe destacar que, para esta medida de control, los límites descritos para cada parámetro se utilizan de forma referencial, de manera de ajustar los procesos de la planta de tratamiento y detectar anomalías de forma temprana, es decir, parámetros fuera de los límites no implican necesariamente incumplimientos normativos de la calidad del efluente.
- d) **Duración y frecuencia del plan de seguimiento:** Todo mes en que se realice descarga a cauce superficial desde las plantas de tratamiento de aguas afloradas del PHAM, se realizará monitoreo continuo del efluente, durante todo el periodo de construcción y mientras esté operativa la respectiva planta.
 En caso de ocurrencia de hechos que alteren la medición y/o dejen fuera de funcionamiento los equipos de monitoreo, o eventos naturales o antrópicos que afecten o impidan el monitoreo por más de 48 horas, se avisará a la SMA en un plazo

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

máximo de 7 días hábiles acompañando todos los antecedentes que acrediten el hecho. Además, mientras no se reponga el monitoreo continuo, se realizará un registro diario de pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica, a través de un equipo multiparámetro portátil.

- e) Método o procedimiento de medición de cada parámetro:** El registro de datos de pH, T°, CE en los sistemas de monitoreo continuo se realizará al menos cada 15 minutos.

La instalación y operación de los sistemas de monitoreo continuo se realizará para cada una de las plantas asociadas a los túneles del PHAM en las siguientes fechas:

- Túnel Las Lajas, asociado a los portales L1, VL2, VL4, VL5, VL7 y VL8: instalado.
- Túnel Alfalfal, asociado a los portales VA1, VA2, VA4: 30 de abril 2019.
- Túnel Volcán, asociado a los portales V1 y V5: 30 de agosto 2019.

Estos sistemas serán mantenidos de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

En caso de que el presente Plan entre en vigencia antes que todas las plantas de aguas afloradas tengan instalado su sistema de monitoreo continuo, en las plantas cuya instalación aún se encuentre pendiente, se realizará un registro diario de pH, Temperatura y CE, a través de un equipo multiparámetro portátil.

- f) Plazo y frecuencia de entrega de informes:** El informe de seguimiento ambiental de la medida descrita en este apartado será remitido en forma semestral a la SMA a través del Sistema Electrónico de Seguimiento Ambiental y se estructurará según lo definido en la Res. Ex. 223/2015 de la SMA.

Los informes incluirán la siguiente información:

- Estado de implementación de los sistemas de monitoreo continuo.
- Fichas técnicas de los equipos instalados.
- Mantención y calibración de los equipos.
- Resumen de los monitoreos continuos e interpretaciones gráficas entregadas durante el periodo reportado.

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

3.3. Seguimiento de los caudales afluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas

Para asegurar que no se supere la Capacidad de Tratamiento Disponible en cada portal y así evitar descargas sin tratamiento a los cursos de agua receptores, se efectuará el seguimiento de los caudales efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas de la siguiente forma:

- a) **Ubicación de puntos de control:** Los puntos de control se ubicarán en los afluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Afloradas del PHAM, considerando los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento de flujómetros.
- b) **Parámetros de control:** El parámetro que se controlará es el siguiente:
 - Caudal (l/s)
- c) **Límites considerados:** Se medirán los caudales afluentes para asegurar que no se supere la Capacidad de Tratamiento Disponible en cada portal y así evitar descargas sin tratamiento a los cursos de agua receptores.
- d) **Duración y frecuencia del plan de seguimiento:** Se realizará un monitoreo continuo de los caudales afluentes, durante todo el periodo de construcción y mientras esté operativa la respectiva planta.
 En caso de la ocurrencia de hechos que alteren la medición y/o dejen fuera de funcionamiento los equipos de monitoreo, o eventos naturales o antrópicos que afecten o impidan el monitoreo por más de 48 horas, se avisará a la SMA en un plazo máximo de 7 días hábiles acompañando todos los antecedentes que acrediten el hecho. Además, se implementará un registro fotográfico diario de los flujómetros instalados antes del ingreso a cada planta y con dicho registro se controlará el volumen en [metros cúbicos] que es evacuado desde el túnel hacia las plantas de tratamiento de aguas afloradas, con el cual se calcularán los caudales en (l/s).
- g) **Método o procedimiento de medición de cada parámetro:** Los caudales afluentes a las plantas de tratamiento de aguas afloradas se controlarán a través de flujómetros, los cuales serán registrados por un sistema de monitoreo continuo al menos cada 15 minutos.
 La instalación y operación de los sistemas de monitoreo continuo se realizará para cada una de las plantas asociadas a los túneles del PHAM en las siguientes fechas:

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

- Túnel Las Lajas, asociado a los portales L1, VL2, VL4, VL5, VL7 y VL8: instalado.
- Túnel Alfalfal, asociado a los portales VA1, VA2, VA4: 30 de abril 2019.
- Túnel Volcán, asociado a los portales V1 y V5: 30 de agosto 2019.

En caso de que el presente Plan entre en vigencia antes de que todas las plantas de tratamiento de aguas afloradas tengan instalado su sistema de monitoreo continuo de caudal, en las plantas cuya instalación se encuentre pendiente, se realizará un registro fotográfico diario de los flujómetros instalados antes del ingreso a cada planta y con dicho registro se controlará el volumen en [metros cúbicos] que es evacuado desde el túnel hacia las plantas de tratamiento de aguas afloradas, con el cual se calcularán los caudales en (l/s).

- e) Plazo y frecuencia de entrega de informes:** El informe de seguimiento ambiental de la medida descrita en este apartado será remitido en forma semestral a la SMA a través del Sistema Electrónico de Seguimiento Ambiental y se estructurará según lo definido en la Res. Ex. 223/2015 de la SMA.

Los informes incluirán la siguiente información:

- Estado de implementación de los sistemas de monitoreo continuo de caudal.
- Fichas técnicas de los flujómetros instalados.
- Resumen de los caudales de aguas afloradas emanadas de los túneles v/s la capacidad de tratamiento disponible en cada portal en el periodo reportado.
- Registro de acciones de contingencia implementadas de acuerdo al procedimiento ENV-PCD-013 "Plan de contingencia de aguas de afloramiento".

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004
	Rev. 0

3.4. Seguimiento de las acciones de control de afloramientos conforme a los criterios y escenarios definidos por el PHAM

Para efectos de verificar la ejecución de las medidas de control de afloramientos de túneles del PHAM establecidas en el Procedimiento PMG-PCD-002 de cementación de pre y post-excavación, se efectuará el seguimiento de las mismas, de la siguiente forma:

- a) **Ubicación de puntos de control:** Tramos de túneles en que se aplicaron medidas de control de afloramientos.
- b) **Parámetros de control:** Criterios y escenarios definidos en el PMG-PCD-002 de cementación de pre y post-excavación.
- c) **Límites considerados:** Se verificará la aplicación de medidas de control de afloramiento de túneles del PHAM, conforme a los criterios y escenarios definidos en el Procedimiento PMG-PCD-002.
- d) **Duración y frecuencia del plan de seguimiento:** Las medidas de control de afloramientos se realizarán durante todo el periodo que dure la construcción, según sea requerido. Se verificará la aplicación del procedimiento PMG-PCD-002 cada vez que se ejecuten las medidas de control de afloramientos.
- e) **Método o procedimiento de medición de cada parámetro:** Procedimiento PMG-PCD-002 de cementación de pre y post-excavación.

En caso de imposibilidad de acceso al túnel por eventos naturales o antrópicos, ajenos a la voluntad del titular, se avisará a la SMA en un plazo máximo de 5 días hábiles acompañando todos los antecedentes que acrediten el hecho.

- f) **Plazo y frecuencia de entrega de informes:** El informe de seguimiento ambiental de la medida descrita en este apartado será remitido en forma semestral a la SMA a través del Sistema Electrónico de Seguimiento Ambiental y se estructurará según lo definido en la Res. Ex. 223/2015 de la SMA.

GRL-PCD-0007/10	PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE AGUAS AFLORADAS DESDE LOS TÚNELES DEL PHAM	
ALTO MAIPO	ENV-PLN-004	
	Rev. 0	

Los informes incluirán la siguiente información:

- Registros de ejecución de medidas de control de afloramientos, que contiene información sobre fecha de inicio y término de la aplicación de la medida de control e instrucciones asociadas, tipo de medida de control aplicada, volumen de material empleado, tramo del túnel en el cual se aplicó la medida, incluyendo registros audiovisuales de los túneles (con su PK respectivo) de dichos tramos que permitan verificar el resultado de la medida aplicada.

4. CONTROL DE MODIFICACIONES.

Las modificaciones que se hagan a este Plan de Seguimiento y Monitoreo a aguas afloradas desde los túneles del PHAM, deberán quedar registradas en la siguiente tabla:

Revisión	Fecha	Descripción de Modificaciones
0	07/02/2019	Primera Versión

PROCEDIMIENTO DE CEMENTACIÓN DE PRE Y POST EXCAVACIÓN

0	Firma		
	Nombre	Eberhard Kirchner	Alexander Wilkes
	Fecha	08/02/2019	08/02/2019
Rev.		Construction Manager	HSEQ Manager

Tabla de Contenidos

1.	Descripción.....	4
2.	Objetivo de las inyecciones	4
3.	Metodologías de inyección	5
4.	Antecedentes para la definición de las inyecciones	6
5.	Criterios técnicos para la definición de las inyecciones.....	8
6.	Metodología de inyección y aplicación de otras medidas, umbrales de activación.....	8
6.1.	Criterios técnicos para excavaciones mediante TBM.....	8
6.1.1	Pre-grouting.....	10
6.1.2	Systematic grouting	11
6.1.3	Post-grouting	15
6.2.	Criterios técnicos para excavaciones mediante Drill & Blast.....	16
6.1.4	Pre-grouting.....	17
6.1.5	Post-grouting	18
6.1.6	Spot-grouting (figura 8):.....	18
	Corresponde a la ejecución de perforaciones específicas directas en puntos de afloramiento de agua. Esta medida es complementaria a la realización de campañas de pre-excavación y cortinas radiales sistemáticas de post-excavación. Para las inyecciones se utilizarán productos químicos y/o cementicios.	18
7.	Registros de aplicación de medidas de control de afloramiento.....	18

CONTROL DE CAMBIOS

[illegible]

1. Descripción

Este documento muestra el procedimiento general y las directrices técnicas de las herramientas utilizadas en el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (“PHAM”), para el control de ingreso de agua en los túneles, así como para los trabajos de consolidación del macizo rocoso.

Los trabajos para el control de ingreso de agua y consolidación del macizo rocoso, ejecutados por el contratista, contemplan principalmente la inyección de lechadas de cemento y/o productos químicos durante la excavación de las obras. Adicionalmente, en función de los diferentes rangos de afloramiento se determinará el uso de medidas alternativas para el control de afloramiento, tal como el uso de revestimientos en base a concreto o acero.

Las especificaciones técnicas del diseño y los productos utilizados para el control de ingreso de agua y consolidaciones, varían en base al tipo de tecnología utilizada en la excavación, la que puede ser mediante Máquina Tuneladora Abierta (TBM Abierta), Máquina Tuneladora Cerrada (TBM Cerrada) o excavación tradicional con perforación y tronadura, esta última también conocida como Drill & Blast (D&B). Además, la definición del diseño y productos están sujetas a diferentes criterios tanto para campañas de inyección de pre-excavación (pre-grouting) y de post-excavación (spot y post-grouting) y para las Máquinas Tuneladoras Cerradas sistematic grouting.

Los trabajos de inyección, su definición e instructivos seguirán las indicaciones o lineamientos establecidos en los siguientes documentos:

- i. Informe 20190130-MA-RPT Informe de actualización de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas afloradas del PHAM.
- ii. ENV-PCD-013, Plan de Contingencia de aguas de afloramiento.
- iii. El presente documento.

2. Objetivo de las inyecciones

Las secciones de túneles intervenidas mediante inyecciones tienen por objeto adecuar y/o mejorar el comportamiento local del macizo rocoso tanto mecánico

como de conductividad hidrogeológica en el contorno de los túneles, las cuales se indican a continuación:

a) Reducción de Ingreso de Agua en los Túneles

Los métodos de inyección utilizados para reducir el ingreso de agua en los túneles se basan en la reducción de la permeabilidad que posee el macizo rocoso, mediante las técnicas grouting de pre-excavación y de post-excavación. Ambas técnicas pueden ejecutarse usando productos químicos o lechadas cementicias.

b) Consolidación

Los métodos utilizados para realizar consolidaciones se basan en la adecuación y/o mejora de las propiedades mecánicas, mediante las técnicas de grouting de pre-excavación, grouting de contacto, relleno de oquedades e inyecciones. Cada una de éstas técnicas puede ser ejecutada usando productos químicos o lechadas cementicias.

Para los efectos de este reporte se entenderá que “grouting” corresponde al método de inyecciones a presión en el macizo rocoso, con el objetivo de disminuir la conductividad hidráulica y/o mejorar sus propiedades mecánicas.

3. Metodologías de inyección

Las metodologías de inyección dependerán de las condiciones geológicas y técnicas particulares para su aplicación, las mismas pueden ser agrupadas en cuatro tipos: pre-grouting, post-grouting, Systematic grouting y spot-grouting, cuyas características se pueden describir como sigue:

a) Pre-grouting

El método de inyección de pre-grouting es utilizado para reducir la alta permeabilidad y afloramientos de agua a fin de mejorar las condiciones del macizo rocoso previo a la excavación. Además de reducir la afluencia de agua al túnel, el pre-grouting también se aplica para mejorar la estabilidad general de macizo rocoso.

b) *Post-grouting*

El método de inyección de post-grouting se realiza en secciones ya excavadas y se aplica en caso de ser necesario el control de agua detrás de la frente para efectos de reducir los niveles de afloramiento y continuar con los trabajos de excavación.

El post-grouting se puede considerar como una medida de apoyo al pre-grouting o como una medida independiente en función de las condiciones geológicas y niveles de afloramiento o condiciones de estabilidad del macizo rocoso.

c) *Systematic grouting*

En el caso de las TBM con escudo cerrado, se realiza un grouting sistemático con el fin de garantizar la estabilidad y el correcto sellado de los anillos instalados en el túnel. Para ello, se inyectará primero la gravilla (pea gravel) para garantizar la estabilidad del anillo y, posteriormente, se realizará el grouting de la misma.

d) *Spot-grouting*

Ya sea como herramienta complementaria del pre-grouting o del post-grouting o como medida independiente de control, tiene por objetivo controlar afloramientos puntuales del macizo rocoso.

4. Antecedentes para la definición de las inyecciones

En base a lo descrito en el presente documento, en lo específico, se realizarán las inyecciones en base a los siguientes antecedentes:

- i. Condiciones geológicas locales en la sección del túnel.
- ii. Flujo de agua esperado en la zona no excavada.
- iii. Presión de agua aflorada que se encuentra en la zona no excavada.
- iv. Flujo de agua existente en la zona excavada y su evolución en el tiempo.
- v. Capacidad de tratamiento operacional por Túnel de las plantas de tratamiento de aguas afloradas.
- vi. Niveles de operación normal, alerta y contingencia, conforme a lo indicado en el procedimiento ENV-PCD-013, Plan de Contingencia de Aguas de Afloramiento.

Los antecedentes mencionados se recopilarán o determinarán según los siguientes puntos:

- a) **Sondajes exploratorios:** La realización de sondajes exploratorios de manera sistemática, permitirá estimar cuál es el caudal de agua y presión localmente detectado en la zona no excavada por delante de las frentes de avance. Los criterios para su especificación y cantidad se apoyarán en la geología detectada, las proyecciones geológicas, condiciones operacionales y los mapeos geológicos específicos de los frentes de excavación. Podrán corresponder a perforaciones de longitud, número y ubicación variables en base a las condiciones de las frentes. Típicamente entre uno y tres sondajes. En el caso de los túneles excavados con TBM (abierta o cerrada) estos sondajes serán realizados siempre y cuando las condiciones geológicas lo permitan y no comprometa el avance de la misma.

En el caso de las TBM (abierta o cerrada), dadas las restricciones físicas que impone este tipo de excavación y la heterogeneidad de la geología (incluso en la misma frente de excavación), es necesario resaltar que, aunque se utilizan las técnicas y especificaciones del estado del arte, aumentando al máximo la efectividad de esta técnica, existe la posibilidad que algunos sondajes no detecten de forma efectiva la cantidad de agua afloramiento que pudiere surgir durante avance de la excavación.

De este modo los sondajes exploratorios constituyen la fuente de información para determinar los antecedentes para la definición de inyecciones i), ii), y iii) del listado anterior.

- b) **Mapeo de aguas al interior de los túneles:** De forma regular, el Contratista realizará caminatas al interior de los túneles, con el fin de establecer el estado de las zonas que presentan afloramientos. Estos mapeos permitirán establecer la necesidad de inyecciones de post-excavación y las técnicas a aplicar.

De este modo los mapeos de aguas al interior de los túneles serán la fuente de información para determinar el antecedente para la definición de inyecciones iv) del listado anterior.

- c) **Plan de contingencia:** En este documento se establece la información y definiciones relacionadas con los antecedentes para la definición de inyecciones v) y vi) del listado anterior para cada frente de trabajo del Proyecto.

5. Criterios técnicos para la definición de las inyecciones

Los criterios para la definición de las acciones son los siguientes:

a) *Criterio Operacional*

Este considera los umbrales de afloramiento compatibles con el avance de la excavación de forma segura para los trabajadores, equipos y estabilidad del túnel respectivo.

b) *Criterio de Capacidad de Tratamiento Operacional*

Considera la capacidad de tratamiento operacional por túnel y los caudales esperados promedio por túnel al momento de definir las inyecciones y metodologías a aplicar. Esto considerando la definición de los niveles de operación normal, alerta y contingencia establecidos en el Plan de Contingencia de Aguas de Afloramiento, ENV-PCD-013.

Estos criterios aplicados sobre los antecedentes descritos en la sección anterior, serán utilizados para las realizaciones de inyecciones

6. Metodología de inyección y aplicación de otras medidas, umbrales de activación

La metodología de inyección a utilizar para el control de ingreso de agua y/o consolidación estructural difiere para los túneles excavados mediante TBM Abiertas, TBM Cerradas y para Drill & Blast, detallando a continuación las características técnicas para cada tipo de excavación.

6.1. Criterios técnicos para excavaciones mediante TBM

Los diferentes niveles de actuación para medidas operacionales y de aplicación de grouting se han definido tomando en consideración los límites de caudales esperados

promedio por túnel definidos en revisión 5 del documento ENV-PCD-013 Plan de Contingencia de Aguas de Afloramiento; según lo siguiente:

Nivel 1: Solo para la excavación normal con TBM de tipo cerrada, se realizará el grouting sistemático del túnel conforme se va realizando el avance. Durante el avance del escudo, el anillo previamente montado irá saliendo del mismo siendo inyectada la gravilla en el extradós para garantizar la estabilidad del mismo. Este proceso se realiza desde la parte inferior hasta la superior del anillo hasta que se completa el relleno del espacio entre el extradós del anillo y el terreno. Inmediatamente después, se comienza con el grouting de la gravilla, sellando y consolidando este material. Como en el caso anterior, el grouting se realiza desde la parte inferior del anillo hasta la parte superior a través de los diferentes puntos de inyección que disponen los segmentos que componen el anillo.

Nivel 2 (Alerta): Si se declara Alerta según ENV-PCD-013 Plan de Contingencia de Aguas de Afloramiento y durante el período que en dicho documento se indica, se activará pre-grouting, cuando lo permitan las condiciones geológicas y el posicionamiento de la TBM, de tal forma de realizar un trabajo en condiciones operacionales seguras y de mayor eficiencia en su implementación.

Nivel 3 (Contingencia): Si se declara Contingencia según ENV-PCD-013 Plan de Contingencia de aguas de afloramiento y durante el período que en dicho documento se indica, las actividades que se desarrollen dentro del túnel se enfocarán en controlar la contingencia, por lo que los movimientos de las máquinas tuneladoras (TBM), jumbos y otros equipos de perforación se emplearán para las actividades de control de afloramientos y la seguridad operacional del túnel, deteniendo las actividades de avance normal de excavación al interior del túnel. La aplicación de grouting en situación de Contingencia corresponderá a todas aquellas técnicas que permitan reducir el agua aflorada en el menor tiempo posible.

En el caso de túneles excavados con TBM abierta o cerrada, se podrían requerir avances controlados para superar restricciones geométricas que impiden el acceso a lugares que se encuentran bloqueados o inaccesibles por instalaciones propias del equipo. Estos avances controlados son necesarios para acceder a nuevos puntos e implementar las acciones de control para superar la contingencia. Eventualmente, y dependiendo de las condiciones

geológicas, podría ser necesario mantener el avance de excavación controlado en el caso de la TBM cerradas, esto con el objetivo de evitar atrapamiento del equipo que pudiere dificultar el control del ingreso de las aguas afloradas en un determinado túnel.

Las técnicas de grouting en máquinas tuneladoras se adaptarán a su geometría y tomarán en cuenta las restricciones propias que poseen las máquinas en términos de espacio y equipamiento. Se considera utilizar la totalidad de los elementos de perforación disponibles en la máquina.

6.1.1 Pre-grouting

Corresponde al método que tiene por objetivo realizar inyecciones mediante perforaciones proyectadas hacia la zona no excavada por delante de la TBM, creando una cortina periférica alrededor del contorno de la proyección de la excavación.

Las directrices técnicas consideran realizar dos etapas de inyección. Una primera etapa de grouting químico, seguido de una segunda etapa de grouting con cemento o microcemento (figura 1).

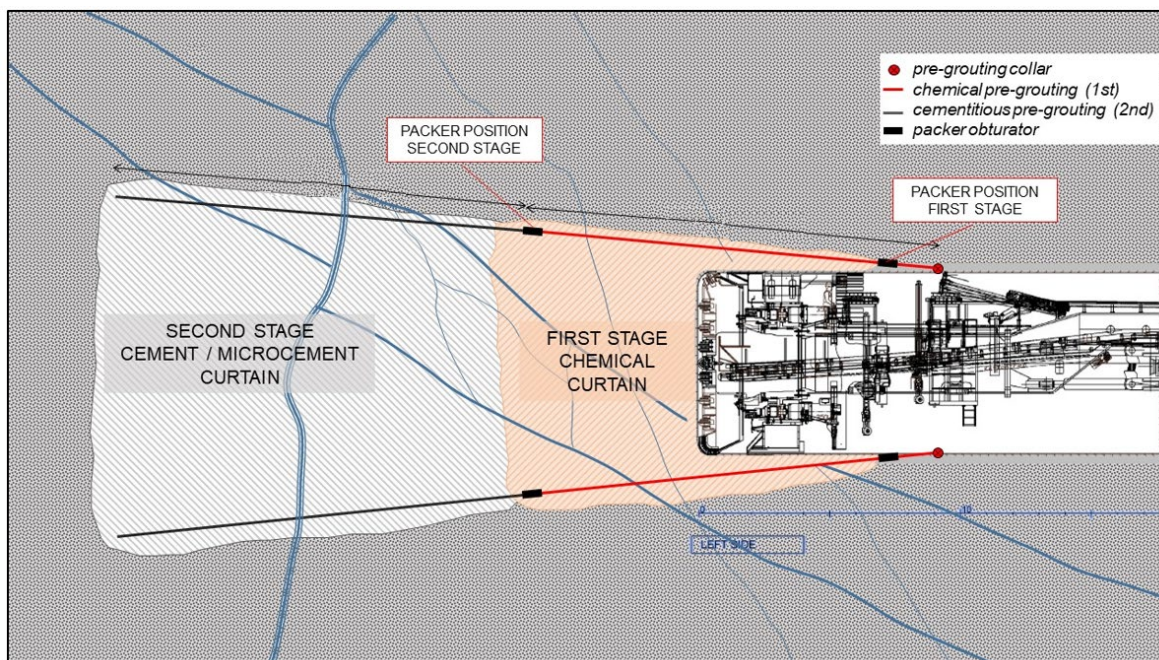


Figura 1: Esquema general de grouting de pre-excavación en dos etapas para TBM. Los productos químicos, a utilizar en la etapa 1, corresponden a espumas expansivas y/o resinas, según se defina en sitio dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

Los productos basados en cemento, a utilizar en la etapa 2, corresponden a Cemento Portland Normal o Micro-cemento, según se defina en sitio dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

Un ejemplo de patrón de perforaciones para la generación de la cortina de pre-excavación se muestra en figura 2 y se puede adaptar dependiendo del tamaño de la excavación y de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

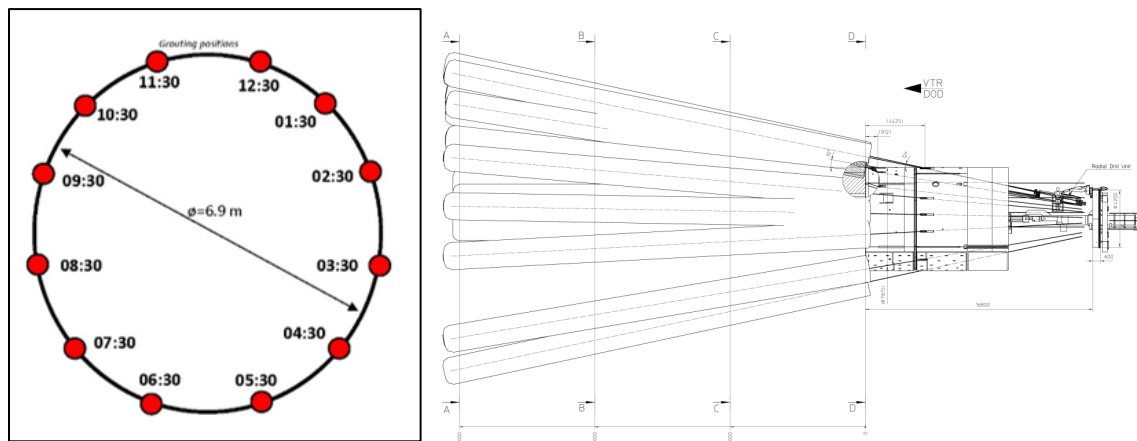
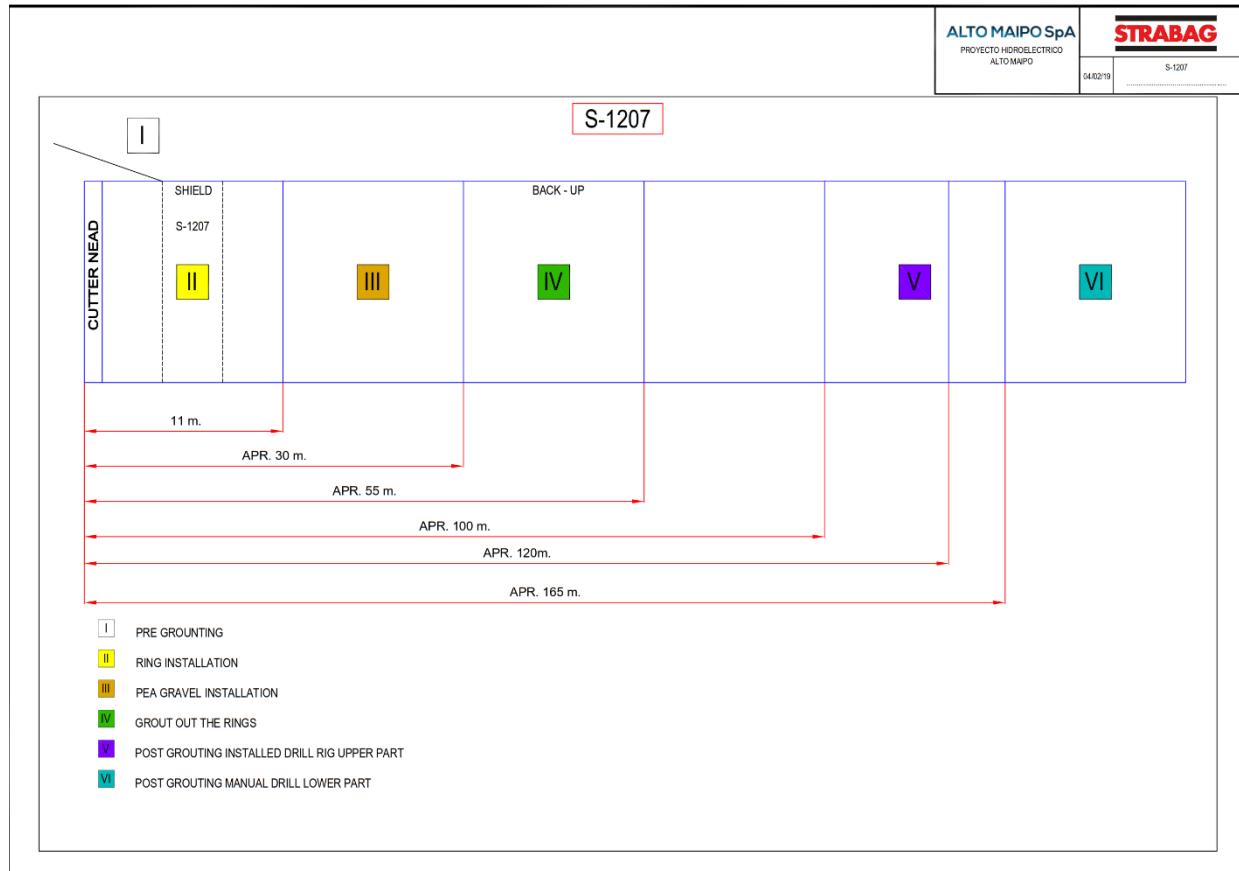
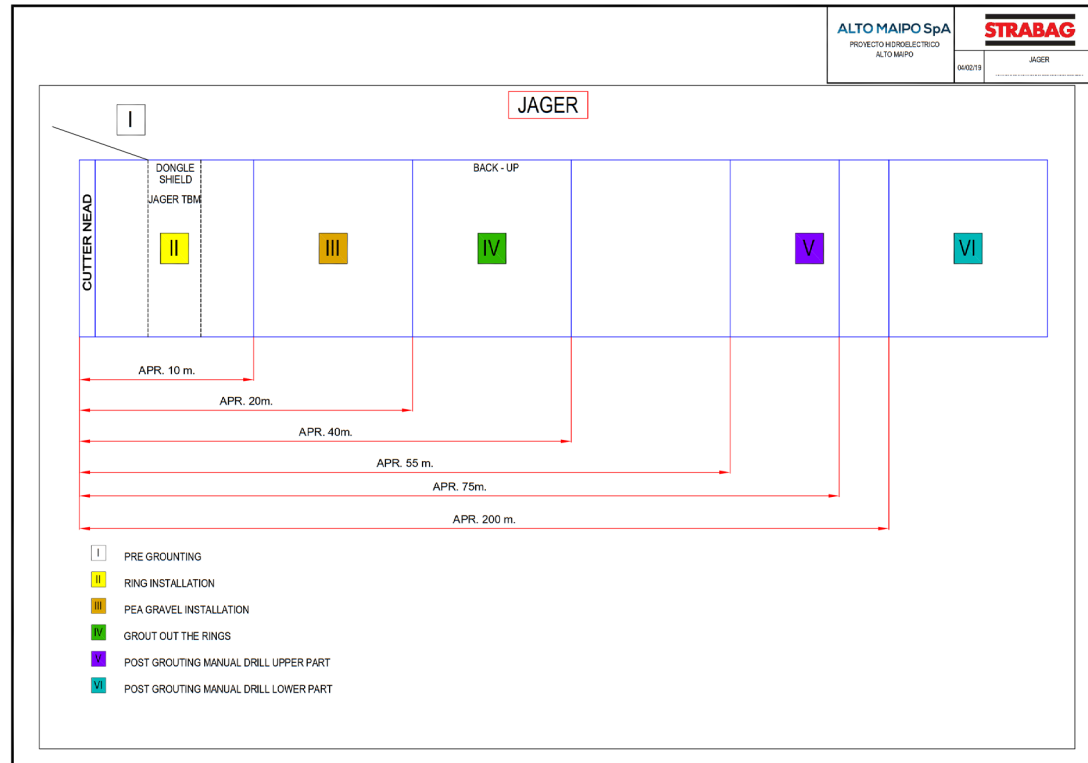
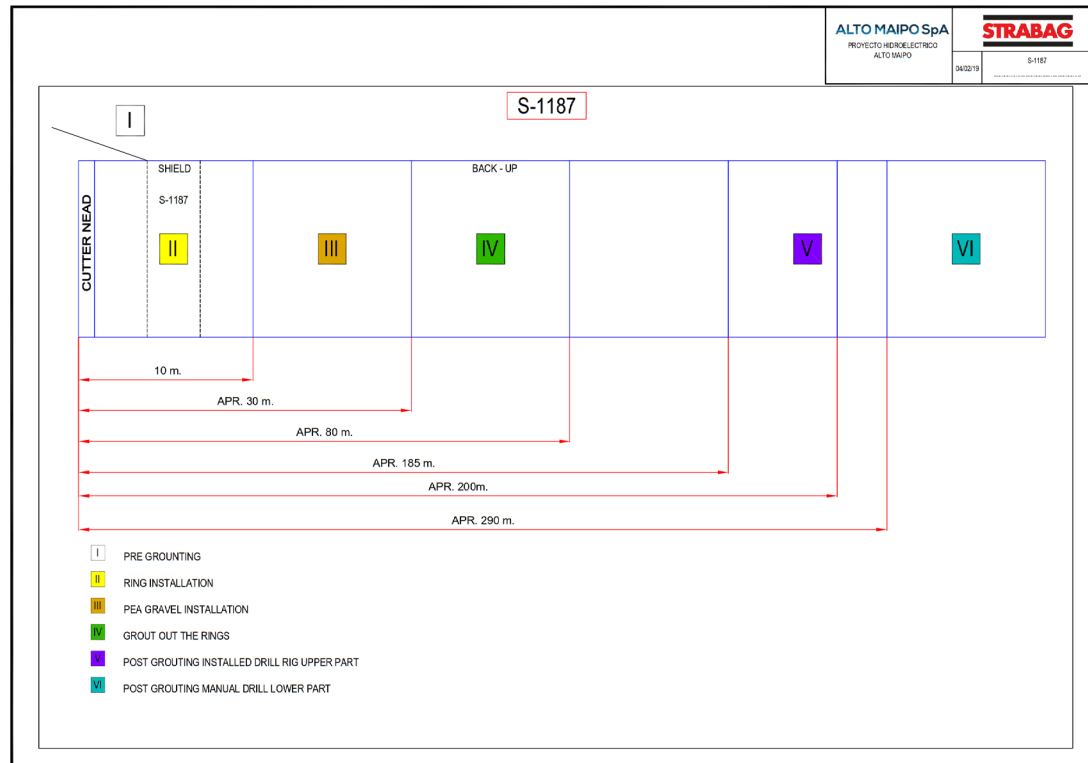


Figura 2: Ejemplo de patrón de diseño de grouting de pre-excavación para TBM.

6.1.2 Systematic grouting.

Cómo se puede observar en los siguientes planos que muestran los tres modelos de TBM cerradas a utilizar en las excavaciones, se delimitan una serie de zonas de trabajo en las que se realizarán las diferentes actividades de grouting.





6.1.3 Post-grouting

Las medidas de control en la zona excavada se definen como post-grouting e incluyen técnicas para el tratamiento específico de zonas con concentración de afloramientos de agua. A modo de ejemplo:

1. *Post-grouting en cortinas radiales (figura 4)*: Corresponde a la ejecución de perforaciones perpendiculares a la periferia de los túneles, con el objetivo de realizar cortinas radiales de inyección. Esta medida de control se puede tomar como complemento de las campañas de pre-excavación o se puede ejecutar de manera independiente. En el caso que las zonas a tratar se encuentren fuera del alcance del equipamiento de perforación podría ser necesario realizar avances de ajuste con la TBM.

En el caso de las TBM cerradas, este post-grouting puede ser realizado en la zona V y VI de las tuneladoras.

2. *Spot-grouting (figura 4)*: Corresponde a la ejecución de perforaciones específicas directas en puntos de afloramiento de agua. Esta medida es complementaria a la realización de campañas de pre-excavación y de post-excavación. Se utilizarán productos químicos y/o cemento dependiendo de los caudales y presiones encontrados.

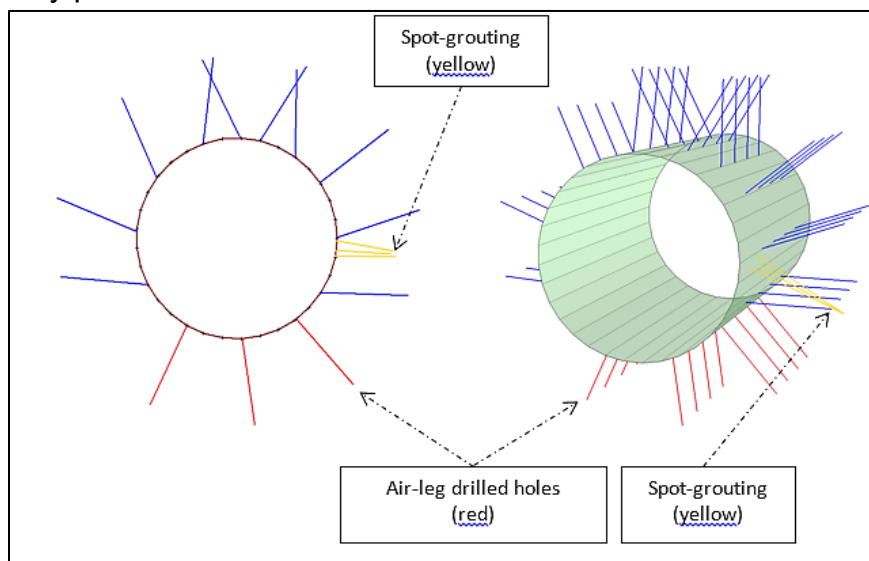


Figura 4: Ejemplo de patrón de diseño de grouting de post-excavación y spot-grouting complementario para TBM

6.2. Criterios técnicos para excavaciones mediante Drill & Blast

Los diferentes niveles de actuación para medidas operacionales y de aplicación de grouting se han definido tomando en consideración el documento ENV-PCD-013 Plan de Contingencia de Aguas de Afloramiento. En los túneles excavados mediante Drill & Blast, las medidas de control se activarán según los resultados obtenidos de sondeos exploratorios, los caudales esperados promedio por túnel, las capacidades de tratamiento operacional por túnel, mapeos de agua al interior de los túneles y condiciones operacionales, según lo siguiente:

Nivel 1: No obligatorio.

Nivel 2 (Alerta): Si se declara Alerta según ENV-PCD-013 Plan de Contingencia de Aguas de Afloramiento y durante el período que en dicho documento se indica, se activará pre-grouting.

Nivel 3 (Contingencia): Si se declara Contingencia según ENV-PCD-013 y durante el período que en dicho documento se indica, las actividades que se desarrollen dentro del túnel se enfocarán en controlar la contingencia, por lo que los movimientos de los jumbos y otros equipos de perforación se emplearán para las actividades de control de afloramientos y la seguridad operacional del túnel, deteniendo las actividades de avance normal de excavación al interior del túnel, y aplicando las técnicas de grouting necesarias para reducir el agua aflorada en el menor tiempo posible.

Las técnicas de grouting que se detallan a continuación, poseen características de diseño específicas para túneles excavados mediante con Drill & Blast. Los detalles operativos para cada una de las técnicas, variará dependiendo del tipo de productos usados.

6.1.4 Pre-grouting

Corresponde al método que tiene por objetivo realizar inyecciones mediante perforaciones proyectadas hacia la zona no excavada, creando una cortina periférica alrededor del contorno de la excavación proyectada.

Las directrices técnicas a utilizar contemplan la realización de perforaciones en el contorno del túnel, incluyendo el piso, con el objetivo de conseguir un cierre perimetral.

Un ejemplo de patrón de perforaciones para la generación de la cortina de pre-excavación se muestra en figura 6 y se puede adaptar dependiendo del tamaño de la excavación y de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

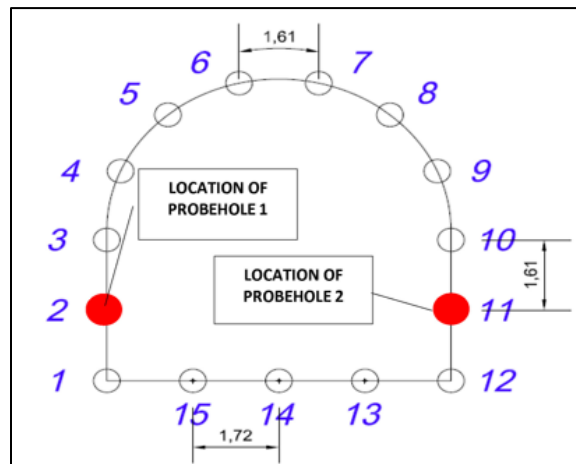


Figura 6: Ejemplo de patrón de pre-grouting para Drill and Blast.

Las inyecciones generalmente se realizarán utilizando Cemento Portland Normal o Micro-cemento pudiendo utilizar excepcionalmente productos químicos, dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

6.1.5 Post-grouting

Las medidas de control en la zona excavada se definen como post-grouting e incluyen técnicas para el tratamiento específico de las zonas con concentración de afloramientos de agua, como por ejemplo:

6.1.6 Spot-grouting (figura 8):

Corresponde a la ejecución de perforaciones específicas directas en puntos de afloramiento de agua. Esta medida es complementaria a la realización de campañas de pre-excavación y cortinas radiales sistemáticas de post-excavación. Para las inyecciones se utilizarán productos químicos y/o cementicios.

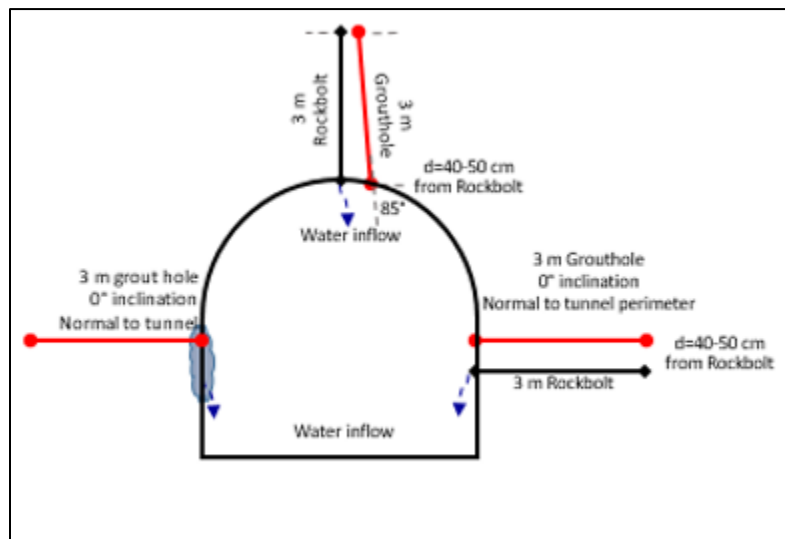


Figura 8: Ejemplo de patrón de diseño de spot-grouting complementario para Drill & Blast.

7. Registros de aplicación de medidas de control de afloramiento

Los registros de aplicación de medidas de control especificarán:

- Descripción del tipo de medida implementada.
- Estatus respecto a los niveles definidos en el procedimiento de emergencia, es decir, si corresponden a acciones preventivas o correctivas.

- Volúmenes de materiales empleados correspondientes a las medidas implementadas.
- Tiempo empleado en las aplicaciones.
- Extensión del tramo implementado, con el pk respectivo.
- Registros fotográficos del antes y después.