



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INFILTRACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FREDDY JAVIER CORTEZ SALVO

**PROFESOR GUÍA:
PAULO HERRERA RICCI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAMES MCPHEE TORRES
XIMENA VARGAS MESA**

**SANTIAGO DE CHILE
NOVIEMBRE 2012**

RESUMEN

El sostenido aumento de la población y de las áreas residenciales e industriales está creando una reducción en la recarga y un aumento en las extracciones de aguas subterráneas en la Región Metropolitana. Esto ha motivado un creciente interés en la recarga artificial de acuíferos como una forma de paliar los descensos de niveles observados en los acuíferos de la zona.

El propósito de este trabajo de título es estudiar el potencial de efectuar recarga artificial de acuíferos con aguas provenientes del río Maipo, que son transportadas por la red de canales de la Sociedad del Canal del Maipo dentro de la Región Metropolitana.

Como primera parte de este estudio se recopilan antecedentes bibliográficos para conocer los distintos criterios de diseño de los métodos de infiltración existentes y los resultados que se esperarían con su aplicación. Luego, se selecciona un sitio que cumpla con dichos criterios y se recolecta toda la información necesaria para la construcción de un modelo hidrogeológico.

Finalmente, se desarrolla un modelo numérico mediante una modelación "telescópica" desde el modelo hidrogeológico Maipo-Mapocho del año 2000. Con ese modelo se calculan las tasas de recarga tentativas para el sector mediante un sistema de pozos de infiltración gravitacional.

Los resultados del modelo son tasas de infiltración gravitacional de aproximadamente 20 l/s cuando los pozos se llenan de aproximadamente de 10 metros de agua. Estas tasas son muy sensibles a la conductividad hidráulica aledaña a los pozos por lo cual es importante poder determinar el valor real de dicho parámetro efectuando pruebas de bombeo adecuadas para la zona.

Por último, se hace hincapié en la importancia de la calidad del agua usada para la recarga, debido a que puede ser una limitante para el éxito de cualquier tipo de proyecto que recargue directamente a la zona saturada, por lo que se recomienda en el futuro ahondar más en este tema y en la legislación vigente para este tipo de proyectos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 METODOLOGÍA	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS.....	4
2.2 ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	4
2.3 MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL EXISTENTES	5
2.4 CRITERIOS DE DISEÑO PARA POZOS DE INFILTRACIÓN	6
2.5 CALIDAD DEL AGUA NECESARIA PARA LA RECARGA	7
2.6 MARCO LEGAL CHILENO	7
2.7 MODELOS Y EXPERIENCIAS INTERNACIONALES	8
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DEL PROYECTO ASOCIADO	10
3.1 ANTECEDENTES GENERALES DEL PROYECTO DE RECARGA DE LA SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO.....	10
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE COLINA Y LAMPA	11
3.3 CLIMA Y METEOROLOGÍA	12
3.4 HIDROLOGÍA.....	12
3.5 HIDROGEOLOGÍA	15
3.6 INFORMACIÓN DE POZOS DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA)	21
3.7 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA	21
4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL.....	24
4.1 MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICO OPERACIONAL DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS MAIPO Y MAPOCHO.	24
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE PROPUESTO PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA.....	24
4.3 MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO POR MODFLOW	25
4.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	26
4.5 MODELO COLINA – LAMPA.	26
5. MODELACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFERO MEDIANTE POZOS.....	43
5.1 GENERALIDADES DE LA APLICACIÓN.....	43
5.2 TASAS DE INFILTRACIÓN PRELIMINARES OBTENIDAS CON EL MODELO	44
5.3 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO.....	50
5.4 BALANCE DE MASA DESPUÉS DE LA RECARGA.....	52
6. CONCLUSIONES.....	53
6.1 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO COLINA-LAMPA.....	53
6.2 RECOMENDACIONES.....	53
6.3 CONCLUSIONES GENERALES	54
7. REFERENCIAS.....	55

Anexos:

- A.1. TERRENO 25 DE NOVIEMBRE DE 2011
- A.2. TERRENO 1 DE MARZO DE 2012
- A.3. CALIDAD DE AGUA DE LOS POZOS DE AGUA POTABLE RURAL

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

Las aguas del río Maipo son la fuente principal de agua dulce para la Región Metropolitana, gran parte de la cual es transportada por una importante red de canales, para ser usada en procesos de regadío o para el consumo humano.

En el sector norte de Santiago, especialmente en Colina, existe un uso excesivo de los recursos subterráneos, y un cambio en el uso del suelo de rural a urbano, disminuyendo la recarga al acuífero. Por lo anterior, es importante plantear soluciones que permitan mitigar esta situación y una de ellas es realizar un proyecto de recarga artificial. El uso de aguas subterráneas en esta región ha experimentado un aumento significativo. Por ejemplo, el incremento de las solicitudes para su explotación en la zona de Santiago Norte al año 2001, se quintuplicaron comparadas a las del año 1985 (Orrego, 2002).

La recarga artificial de acuíferos se ha utilizado por décadas como una forma de embalse subterráneo y de depuración de agua. Hoy en día, este método está tomando fuerza con el objetivo de desarrollar sistemas que permitan almacenar agua en los periodos de abundancia, como años lluviosos, para luego usarla en periodos de escasez.

Es de suma importancia para estos proyectos contar con toda la información necesaria para su realización y con una legislación que regule respecto de este tipo de tecnología. En nuestro país la información sobre hidrogeología muchas veces no es de acceso público, dificultando la construcción de modelos hidrogeológicos. Además, la legislación no fomenta el desarrollo de la recarga artificial de acuíferos debido a que no define claramente aspectos tales como: la calidad del agua a infiltrar o los derechos de aprovechamiento sobre las aguas infiltradas. Los problemas mencionados anteriormente, se han ido corrigiendo gradualmente, puesto que la Dirección General de Aguas (DGA), encargada de administrar la información hidrogeológica, está mejorando sus bases de datos y la disponibilidad de ellas. En adición, la DGA está creando nuevas normas que permitan tener un mejor manejo legal de la recarga de agua a un acuífero.

Actualmente la Sociedad Canal de Maipo, interesada en ser pionera en el tema de recarga artificial, solicitó a la Universidad de Chile un estudio hidrogeológico en el cual se enmarca este trabajo, para determinar si se puede realizar una recarga de acuífero en la comuna de Colina, con aguas provenientes del río Maipo.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es realizar un estudio de factibilidad técnica de un proyecto de recarga artificial de acuíferos en la Región Metropolitana, utilizando aguas provenientes del río Maipo.

Los objetivos específicos que se pretenden conseguir son:

1. Estudiar la infiltración de acuíferos mediante sistemas de recarga artificial.
2. Determinar los criterios de diseño para un sistema de infiltración artificial.
3. Encontrar la zona más adecuada para la realización de la recarga artificial dentro de la zona aledaña a la red de canales disponible en la Región Metropolitana.

4. Seleccionar un método de recarga artificial que permita la infiltración adecuada de las aguas.
5. Desarrollar un modelo de flujo en la zona de infiltración, que permita determinar el comportamiento de las aguas infiltradas y del acuífero circundante.

1.3 Metodología

Para poder cumplir con los objetivos este trabajo incluye los siguientes puntos:

1. Realizar una recopilación bibliográfica sobre los métodos de infiltración artificial de acuíferos:

Se busca bibliografía donde se explique la utilización de la recarga artificial de acuíferos, tanto sus beneficios como limitaciones, así como los tipos de sistemas existentes y algunos casos destacados a nivel mundial de su aplicación.

2. Criterios de Diseño de sistemas de infiltración:

Se detallan los métodos de infiltración existentes, las tasas de infiltración obtenidas mediante estos sistemas, la calidad del agua y pre-tratamientos necesarios para su aplicación, así como los efectos ocurridos en la infiltración, la colmatación y el aumento de elementos, etc.

3. Modelo numérico de flujo en la zona de recarga:

Se describen las ecuaciones de flujo para la zona saturada junto con las principales características del software utilizado. También se detallan las ecuaciones que utiliza, los parámetros necesarios para su ejecución y los resultados que entrega.

4. Caso de estudio:

Se construye un modelo para un sistema de infiltración en la zona norte de Santiago abordando los siguientes puntos.

Zona de estudio: Mediante la recopilación bibliográfica se obtiene información sobre las unidades naturales y características climáticas, hidrogeología e hidrología, coeficiente de transmisividad y almacenamiento, porosidad, etc.

Diseño del modelo de infiltración: Con la información recopilada se construye un modelo de flujo para la zona saturada bajo los pozos de infiltración. Se describen los procesos principales del modelo, como la discretización del tiempo, los tiempos de impresión gráfica, los criterios de iteración, asignación de las condiciones iniciales y de borde, selección de los parámetros y modelos de suelos, la geometría de la malla, etc. Por último, se obtiene mediante el software, resultados de flujo, resultados de flujo acumulado, curvas, etc.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El interés en la recarga artificial de acuíferos ha tomado fuerza en los últimos años, como respuesta a la disminución sostenida de los niveles de agua subterránea, el incremento en la vulnerabilidad de las fuentes de agua superficiales debido a la contaminación y la oposición medioambiental a la creación de embalses, entre otros factores.

2.1 Recarga artificial de acuíferos

La recarga artificial de acuíferos corresponde a un conjunto de técnicas hidrogeológicas cuya finalidad es infiltrar aguas superficiales hacia un acuífero, de modo tal que se interviene en el ciclo hídrico natural. De esta manera, el objetivo de esta técnica es alcanzar una gestión más racional del recurso hídrico de una cuenca, permitiendo ya sea: (i) restaurar acuíferos sobreexplotados, (ii) conservar o aminorar los impactos de crecidas, (iii) almacenar y distribuir el agua, (iv) tratar las aguas residuales como un proceso de tratamiento terciario y/o finalmente, (v) mejorar la calidad de agua superficial, aprovechando la capacidad de la zona no saturada para remover contaminantes (Wilmans, 2001).

Además, dos definiciones importantes que se deben destacar son:

La **Gestión de la Recarga de Acuíferos** (*Management Aquifer Recharge, MAR*) se entiende como “el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua” (Freeze y Cherry, 1979).

El **Almacenamiento y Recuperación en Acuíferos** (*Aquifer Storage and Recovery, ASR*) se define como “el almacenamiento de agua en acuíferos adecuados, a través de pozos durante tiempos donde el agua está disponible, y luego es recuperada desde el mismo punto cuando se necesita” (David y Pyne, 1995).

Los sistemas de gestión de agua en acuíferos buscan principalmente que estos cumplan la función de un embalse, puesto que la velocidad del agua dentro de ellos es del orden de metros por día o incluso menor, la que para efectos prácticos puede considerarse en reposo. Una de sus ventajas es que no se necesita un espacio de inundación como en una represa y además existen procesos físicos y químicos que permiten la depuración del agua. En Chile, el interés en la recarga artificial de acuíferos está recién comenzando y se ve como una forma de utilizar los recursos hídricos de una mejor manera, por ejemplo para retener volúmenes de agua que se pierden debido a las crecidas estacionales de los ríos.

2.2 Aspectos hidrogeológicos

Wilmans (2001) señala que los factores relevantes en el análisis hidrogeológico para la recarga artificial, son: (i) materiales que conforman el acuífero (forma y tamaño) y fallas, (ii) niveles piezométricos y profundidad de la roca, (iii) transmisividad, (iv) permeabilidad, (v) coeficiente de almacenamiento, (vi) porosidad efectiva, (vii) características químicas de los materiales presentes en la formación geológica, y (viii) existencia de bolsones de mayor permeabilidad.

Dentro de las formaciones geológicas más utilizadas destacan aquellas que poseen una mayor permeabilidad, debido a que presentan una menor oposición al paso del agua de recarga. Entre ellas se encuentran:

- **Depósitos de origen aluvial:** se generan principalmente en los ríos y están formados por gravas, arenas, limos y arcillas.

- **Depósitos de origen eólico:** están formados por arenas de un tamaño uniforme permitiendo alcanzar grandes tasas de recarga, por ejemplo dunas.

- **Depósitos de origen tectónico:** son de origen lacustre, eólico, glacial o piroclástico, se ubican en las depresiones del terreno donde se deposita material fino muy permeable. Además, contienen grandes reservas de agua dulce.

- **Calizas o dolomitas muy fracturadas o kársticas:** tienen bajo almacenamiento, otorgan altos caudales de infiltración y pocos problemas asociados a la colmatación. Poseen un bajo poder de depuración físico, químico y biológico.

2.3 Métodos de recarga artificial existentes

Los métodos de recarga se dividen principalmente en dos grupos: sistemas en superficie y sistemas en profundidad.

2.3.1 Sistemas en superficie

Estos sistemas no están en contacto con la zona saturada del suelo y corresponden principalmente a zanjas o surcos, lagunas de infiltración o acondicionamientos de cauces. Este tipo de sistemas se caracteriza por aprovechar la zona vadosa como zona de tratamiento, para así mejorar la calidad del agua que llega a la zona saturada. De esta forma, estos métodos de recarga permiten infiltrar agua de peor calidad en comparación a los sistemas que lo hacen directamente a la zona saturada. Sin embargo, necesitan que la capa de suelo desde la superficie hasta el nivel freático sea permeable y además de un área de terreno, a un costo razonable, adecuada para todas las instalaciones necesarias para realizar las obras requeridas.

Un aspecto importante a considerar, es que en este tipo de sistemas es necesario controlar la colmatación del suelo debida a la presencia de sedimentos en el agua infiltrada y al crecimiento de biomasa (*bioclogging*), la cual puede provocar un descenso considerable en las tasas de infiltración. Por lo anterior, los sistemas requieren ser secados y limpiados constantemente, para mantener las tasas de recarga a largo plazo. El tiempo necesario para realizar las labores de mantenimiento puede ir de días a meses, y depende de la calidad del agua que se está utilizando y del tipo de suelo donde se está realizando la obra.

2.3.2 Sistemas en profundidad

Los sistemas en profundidad corresponden a técnicas por la cual las aguas son inyectadas o infiltradas directamente al acuífero. Dentro de estos sistemas se encuentran los pozos verticales, drenes y galerías. Las principales ventajas que presentan estos métodos son la posibilidad de utilizarlos en áreas muy pequeñas donde se alcanzan grandes tasas de infiltración, en zonas en donde la superficie es de carácter impermeable y en áreas donde, en profundidad, existe alternancia de estratos permeables. La desventaja es que el agua a infiltrar debe ser de óptima calidad, lo que lleva a invertir en su pretratamiento (Wilmans, 2001). Por otra parte, estos sistemas tienden a colmatarse, por lo cual periódicamente deben realizarse labores de limpieza y mantención lo que se traduce en mayores costos de construcción y operación. Adicionalmente, si el sistema no está equipado con una bomba, se debe conseguir una temporal para el redesarrollo del pozo. Finalmente, cuando el proceso de colmatación es de gran envergadura, se necesitan procesos especiales de limpieza tales como: la acidificación, el bombeo continuo, etc.

2.4 Criterios de diseño para pozos de infiltración

2.4.1 Tipos de camisas

Los pozos diseñados para el almacenaje y recuperación de agua en acuíferos (*Aquifer Storage Recovery, ASR*) generan una cantidad de óxido mayor debido al aumento de la superficie que se humedece por los ciclos de recarga y recuperación. Esto ocurre principalmente en zonas que almacenan agua salobre, como acuíferos costeros.

Una solución a los problemas relacionados con el óxido es usar camisas hechas con materiales que no contribuyan a la oxidación, en particular camisas de PVC (cuando las dimensiones lo permitan) o acero con recubrimiento de epoxi (polímero que reduce la corrosión). Los dos métodos anteriores han sido usados con éxito en la reducción del óxido en pozos de infiltración. Asimismo, existen otras soluciones como recubrimientos de fibra de vidrio o camisas de acero inoxidable. Sin embargo, la solución más frecuente es utilizar una camisa de acero común y aceptar la producción de sólidos por oxidación durante la operación a largo plazo y tratarla después (David y Pyne, 1995).

2.4.2 Diámetro del pozo

El diámetro de los pozos (ASR) debería ser similar a un pozo de bombeo común, excepto cuando uno o más tubos de inyección son usados para la recarga. En estos casos, es aconsejable tener un pequeño espacio extra al interior de la camisa para permitir la fácil entrada o salida de las bombas, tubos de inyección, líneas de aire y cables de electricidad para las bombas sumergibles. Este espacio extra es útil también para bajar instrumentos geofísicos de medición bajo la bomba, permitiendo evaluar cambios en la distribución del flujo debido a diferentes estados de colmatación dentro del pozo durante la recarga.

2.4.3 Diseño de cribas

En los últimos años se ha generado controversia respecto de si las cribas y la capa de grava diseñada para los pozos (ASR) en un acuífero no consolidado debieran ser diferentes en comparación a un pozo de bombeo normal. Una solución a esto podría ser la elaboración de cribas de un largo mayor de tal forma que, durante el bombeo o redesarrollo, la capa de grava se limpie de partículas de sólidos más fácilmente. Aunque lo anterior es una buena idea, la evidencia sustenta que la mejor solución es diseñar las cribas idénticas a los pozos de bombeo comunes para no incrementar los movimientos en el paquete de grava alrededor de ellas (Kortleve, 1998).

2.4.4 Proceso de colmatación

La colmatación en los sistemas de recarga artificial es un problema siempre presente. Este consiste en que la porosidad o área de infiltración se reduce debido a procesos físicos, químicos y biológicos, resultando una reducción en la efectividad de la recarga. (Pérez y Carrera, 1998). Existen cinco procesos principales de colmatación: físico, biológico, químico, por generación aire/gas y por compactación.

En los pozos de inyección la colmatación se presenta como un aumento de la resistencia al flujo. Los primeros sitios donde ocurre esto es en el filtro de grava, y en la zona del suelo que está en contacto directo con el pozo. La colmatación aumenta durante la recarga y disminuye durante el bombeo pero siempre queda una cantidad residual que reduce la eficiencia.

La colmatación causada por sólidos disueltos es la causa más grave de falla en sistemas ASR. Una cantidad de 2 mg/l de sólidos suspendidos totales presentes en el agua produce una reducción considerable en la tasas de recarga en la mayoría de los pozos. Cuando las tasas de infiltración se reducen, típicamente se aumenta la presión para seguir infiltrando el mismo caudal, forzando a los sedimentos dentro de los poros del acuífero, provocando que sea muy difícil removerlos con procesos de limpieza posteriores (David y Pyne, 1995).

A lo anterior se suma que el crecimiento biológico, directamente relacionado con la cantidad de carbono y nutrientes presente, produce la formación de limos impermeables, el desarrollo de una capa de células muertas y una dispersión de partículas coloidales en la matriz de sólido del acuífero. Un método común para controlar el crecimiento biológico durante la recarga es mantener una cantidad de cloro residual del orden de 1 a 5 mg/l en el agua inyectada, que a pesar de generar organoclorados tóxicos, son habitualmente usados pues tienden a disminuir durante el almacenamiento dentro del acuífero (David y Pyne, 1995).

2.5 Calidad del agua necesaria para la recarga

La calidad del agua a recargar es muy importante en cualquier sistema de recarga artificial de acuífero. Por un lado hay que respetar la legislación existente y por otro se deben cumplir los aspectos técnicos que permitan el correcto funcionamiento del proyecto.

En cada proyecto se debe encontrar los tipos de tratamiento necesarios para cumplir con la legislación vigente, tener un desarrollo del sistema adecuado y evitar problemas medioambientales.

En rasgos generales, los parámetros críticos que afectan las tasas de inyección, en pozos, son los siguientes (Wilmans, 2001):

Compuestos capaces de precipitar: Algunos compuestos que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar obras de recarga artificial son los que puedan crear precipitación de carbonatos de calcio (CaCO_3), sales de calcio y manganeso, hidróxidos de hierro y manganeso.

Sólidos suspendidos totales: a menor concentración de sólidos suspendidos en el agua de infiltración, independientemente del método de recarga, la potencialidad de colmatación en el tiempo disminuye. Se recomienda un valor bajo los 3 mg/l.

Temperatura: cuando la temperatura en el agua es muy elevada se pueden ocasionar problemas de generación de gases al momento de la mezcla entre las aguas de recarga y las aguas naturales del acuífero, debido a la disminución de la solubilidad de los gases. Otro fenómeno que se produce por efecto de la temperatura es el crecimiento bacteriano en las paredes del sistema de infiltración o inyección, por lo que se recomienda no sobrepasar los 10°C.

pH: se debe mantener entre los valores 7 y 8, ya que a pH más alto o bajo, tienden a precipitar los diferentes metales o compuestos en solución.

Turbiedad: este parámetro debe tratar de disminuirse al máximo, preferentemente bajo las 0.5 NTU.

2.6 Marco legal chileno

En el país existe un conjunto de leyes y normas que permiten guiar el manejo legal de los proyectos relacionados con la recarga artificial de acuíferos. Se espera que con el avance de

estos proyectos se creen nuevas normativas que permitan con mayor facilidad su manejo legal. En Chile existe dos escritos relacionados con el marco legal de la recarga artificial, estos son:

2.6.1 Código de aguas

La Resolución Número 425 de la Dirección General de Aguas en sus artículos 34, 66 y 67 se refiere a la recarga artificial de acuíferos. El artículo 34 se refiere a los puntos que debe tener una memoria técnica para ejecutar un proyecto de recarga. Los artículos 66 y 67 tratan sobre los derechos de aprovechamiento provisional que serán entregados cuando existan estos proyectos y cuando estos podrán ser definitivos, cumpliendo una lista de condiciones necesarias (Cuellar, 2009).

2.6.2 Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas

La norma D.S. No. 46 de 2002 habla sobre la recarga artificial en los artículos 2, 7, 8 y 9 refiriéndose principalmente a la calidad del agua que se deberá descargar dentro de la zona saturada del acuífero dependiendo de la calidad del agua existente en este.

2.7 Modelos y experiencias internacionales

A modo de ejemplo, en esta sección se resumen dos casos internacionales de recarga artificial de acuíferos. El primero da cuenta de cómo la recarga artificial de acuíferos es utilizada para la creación de una reserva de agua potable de emergencia en Kuwait. El segundo, trata de un sistema de pozos profundos que reemplazó a un sistema de recarga superficial en Holanda.

2.7.1 Creación de una reserva de agua potable en Kuwait a través de recarga artificial (Mukhopadhyay et al., 1998)

Kuwait es una nación árida que depende casi exclusivamente de las plantas desalinizadoras para sus requerimientos de agua dulce. En este país, es necesario contar con una gran capacidad de almacenamiento de agua para cuando estas plantas deban estar fuera de servicio o bien para periodos de emergencia prolongados, derivados de desastres naturales, accidentes industriales, guerras, atentados terroristas, etc. La posibilidad de realizar el almacenamiento en el acuífero resultó ser la opción más barata, puesto que el almacenamiento superficial es muy costoso y requiere gran cantidad de espacio.

Bajo condiciones de emergencia el consumo de agua dulce por persona, para beber y cocinar, puede ser reducido a 30 l/d. Considerando una población de 1,5 millones de personas, el requerimiento de agua mínimo por día sería de 45 mil m³/d. De esta forma, si la emergencia se prolonga durante un año, el volumen necesario de almacenamiento es de 16,4 millones de m³.

Con una capacidad de inyección de 1300 m³/d y la necesidad del mismo caudal para recuperación, se deben construir un mínimo de 35 pozos para poder inyectar y producir un total de 45 millones de litros al día. Luego de varios intentos, se concluyó que la configuración óptima era un campo de forma hexagonal con 37 pozos y una distancia promedio entre ellos de 1500 metros, para lo que se necesitaría un total de 5 años para inyectar un volumen total de 82000 millones de litros.

2.7.2 Sistema de pozos de recarga artificial de Berkheide (Kortleve, 1998)

Este sistema está ubicado en Holanda, contiguo al Mar del Norte, y ha sido usado para la extracción de agua desde 1887. El acuífero posee cuatro estratos, el primero está entre los 0 y 10 metros sobre el nivel del mar; el segundo, se ubica a nivel del mar consistente en una capa

de arcilla confinante de un espesor de 5 m; bajo esta existe un estrato intermedio que va desde los 5 a los 20 m de profundidad, el cual posee una conductividad hidráulica de 10 m/d. La última capa parte a una profundidad de 20 m con una conductividad de 30 m/d y en ella existe el contacto entre el agua dulce proveniente de la recarga y el agua salada que viene desde el mar del norte.

La recarga y la recuperación de agua se realizó en el estrato más profundo, para evitar impactos ecológicos y fluctuaciones de los niveles estáticos en el estrato superior. Antes de la implementación de los pozos profundos, se realizó la recarga del acuífero mediante un sistema superficial, como laguna, lo cual provocó una degradación del ecosistema existente.

La operación del sistema profundo comenzó el año 1997, y su capacidad de recuperación de agua fue de 4.3 millones de metros cúbicos por año, con un máximo de excesos en recarga de un 10%. Este exceso de recarga es necesario para prevenir el ingreso de la cuña salina y no debe ser mayor a este valor porque crearía un impacto sobre el medio ambiente y la agricultura.

Para el monitoreo del sistema, se creó una extensa red consistente en pozos de observación con cribas cada 1 m. Además, cada pozo cuenta con un geo-cable capaz de medir la resistencia eléctrica del suelo y el agua a distintas profundidades, permitiendo con esas mediciones calcular la ubicación de la interfaz entre agua dulce y salada.

En la etapa inicial de operación el sistema funcionó a un 60% de su capacidad debido a que el pretratamiento de las aguas no fue el adecuado, además de que los bombeos de cada uno de los pozos se debieron realizar de forma manual. Algunos de los pozos bombearon la mayor parte del tiempo y otros estuvieron prácticamente en desuso. La configuración de un sistema de bombeo automático es un tema a desarrollar a futuro para lograr optimizar el proyecto.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DEL PROYECTO ASOCIADO

3.1 Antecedentes generales del proyecto de recarga de la Sociedad del Canal de Maipo

La Sociedad del Canal de Maipo (SCM) le asignó a la Universidad de Chile el estudio de factibilidad técnica para realizar un proyecto piloto de recarga artificial en la cuenca Maipo-Mapocho, Región Metropolitana, donde la sociedad posee una red de canales bastante amplia.

Después de varios meses de búsqueda de un terreno apto para la ejecución del proyecto, se eligió uno en el sector de Lo Pinto, en Colina, por existir tres pozos de cien metros de profundidad que se encontraban en desuso y que contaban con las características apropiadas para realizar la infiltración mediante ellos. Por otra parte, el predio se encuentra a sólo un kilómetro del canal Batuco, cuyas aguas son de propiedad de la SCM, y a unos 200 metros de la quebrada de Colina.

3.1.1 Ubicación del proyecto

El predio donde se realizará el estudio de infiltración está en el camino Lo Pinto, comuna de Colina, a 3 kilómetros al oriente de la ruta 5 Norte y a 2.8 kilómetros al poniente de la autopista Los Libertadores. El tiempo de viaje desde el centro de Santiago es de aproximadamente 40 minutos utilizando la Autopista Central. Las coordenadas de los pozos de estudio se muestran en la Tabla 3.1 y su ubicación en la Figura 3.1.

Tabla 3.1: Coordenadas de los pozos de estudio para realizar la infiltración.

Nombre Pozo	Cota m.s.n.m	NORTE m	ESTE M
Pozo 4	526	339281	6319228
Pozo 5	526	339600	6319233
Pozo 6	528	339850	6319235



Figura 3.1: Ubicación de los pozos de estudio para realizar la infiltración.

3.1.2 Descripción de la red de canales de la SCM

La última información entregada por la SCM sobre la red de canales que posee fue el año 2011, en la cual se describe un total de 308 kilómetros de canales dentro de la Región Metropolitana. Estos canales son los encargados de transportar el agua proveniente del río Maipo hacia el centro y norte del valle de Santiago. Los canales San Carlos y Eyzaguirre son los más importantes de toda la red, puesto que poseen las bocatomas en el río Maipo. En su conjunto, ambos canales transportan un total de 2.564 de un total de 8.133 acciones del río Maipo.

El agua usada para el proyecto piloto de recarga viajará por el canal San Carlos desde su bocatoma (30 km), luego pasa al Canal el Carmen (27 km) y finalmente llegará al canal Batuco (14 km), donde será transportada mediante un sistema de tuberías o un canal al lugar donde se ubican los pozos.

3.2 Descripción de la zona de Colina y Lampa

Las comunas de Colina y Lampa se ubican al norte de la Región Metropolitana de Chile, y pertenecen a la provincia de Chacabuco. Ambas comunas están unidas por la Ruta 5 Norte y se encuentran a unos 14 km al norte del centro de Santiago.

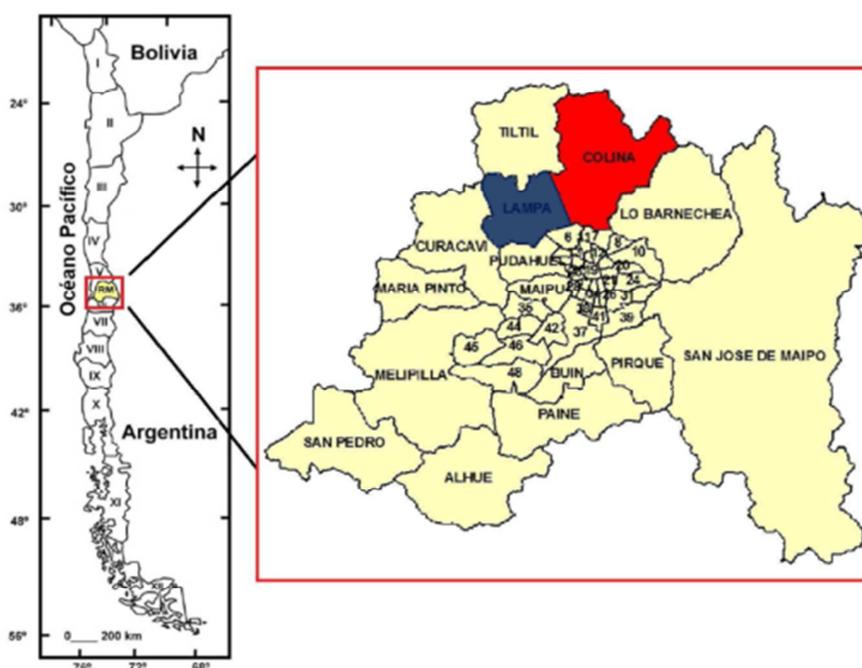


Figura 3.2: Mapa de Chile y detalle de la Región Metropolitana (Fuente: A. Morlans, 2011).

Los límites administrativos de ambas comunas se muestran a continuación:

- Norte : V región y Comuna de Til-Til
- Sur: : Huechuraba, Quilicura y Pudahuel
- Este : Comuna de Lo Barnechea
- Oeste: : Comuna de Curacaví

Colina se encuentra delimitada por las latitudes Sur 32° 21 minutos y 32° 57 minutos, y por las longitudes Oeste 70° 24 minutos y 70° 10 minutos Oeste, mientras Lampa se encuentra ubicada en la latitud Sur 33° 17 minutos Sur y longitud Oeste 70° 54 minutos Oeste.

3.3 Clima y meteorología

Esta zona se caracteriza por un clima templado cálido con estación seca prolongada de 7 a 8 meses y precipitaciones entre los meses de mayo y agosto. El valor normal anual de agua caída es de 312 mm, destacándose el mes de julio con un valor acumulado de 87 milímetros. La temperatura máxima promedio en verano alcanza un valor de 29,7 °C y la mínima llega a 13 °C.

La zona de estudio presenta un clima particularmente árido, debido a que la Cordillera de la Costa genera un efecto “pantalla” en el sector, dificultando el avance de las condiciones climáticas marinas húmedas, lo que conduce a altas fluctuaciones térmicas durante el día. Esta situación se hace aún más evidente en Colina, que presenta las mayores temperaturas diarias de la Región Metropolitana (Mellado, 2008).

3.4 Hidrología

3.4.1 Precipitaciones

La cuenca de Santiago se caracteriza por presentar lluvias que se concentran en un 80% aproximadamente, entre los meses de mayo a agosto. En el estudio “Modelo de Simulación Hidrológico Operacional de las Cuencas de los ríos Maipo y Mapocho” (Ayala y Cabrera, 2000) se construyó un mapa de isoyetas para la cuenca del río Maipo, para lo cual se utilizó la estadística corregida de 36 estaciones pluviométricas en Santiago durante el período de abril de 1950 hasta marzo de 1998, la que se presentan en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3. De esta manera se determinaron las probabilidades de excedencia anuales del 20%, 50% y 95%, y luego se construyeron los mapas de isoyetas correspondientes (Morlans, 2010).

El mapa de isoyetas para una probabilidad de excedencia del 50% se muestra en la Figura 3.3, luego utilizando este mapa se estimó la precipitación media anual para la zona del modelo Colina-Lampa, la cual resultó ser de 300 mm (Ayala y Cabrera, 2000).

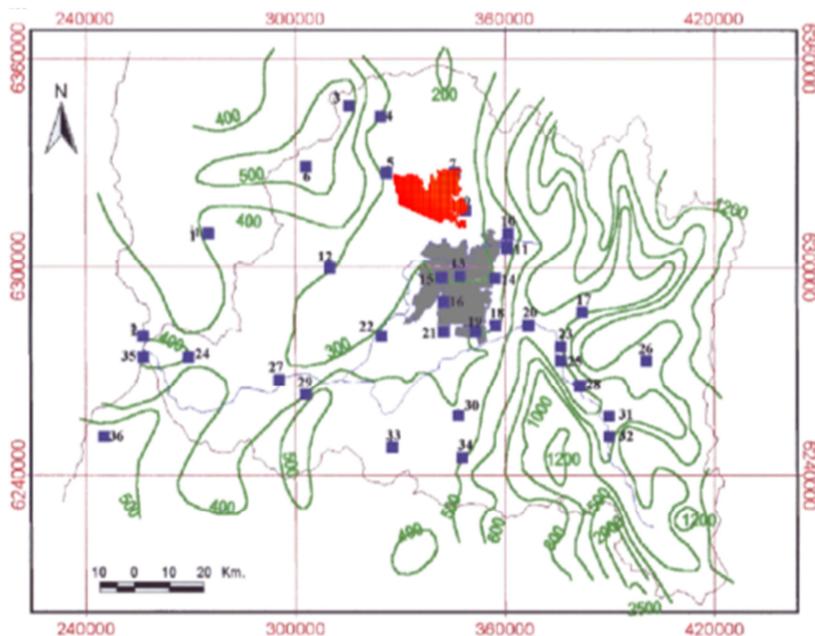


Figura 3.3: Mapa de isoyetas para 50 % de probabilidad, junto con la ubicación del modelo Colina-Lampa en color rojo y las estaciones pluviométricas de Santiago en color azul (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

Tabla 3.2: Precipitaciones anuales para distintas probabilidades de excedencia para las estaciones ubicadas en la cuenca de los ríos Maipo y Mapocho (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

Nº	Estación	Probabilidad		
		20%	50%	95%
20	La Obra de Maipo	837,2	576	277,3
31	Los Queltehues	975,4	620,4	256,2
18	La Florida	564	389,5	188,9
17	Maitenes	605	412,9	195,7
26	Embalse El Yeso	751	482,3	202,9
32	Las Melosas	1036,7	671,5	287,4
25	San José Maipo	749,6	510,3	241,1
23	Retén San José	777,4	529,2	250
26	San Alfonso	756,6	515	243,3
15	Quinta Normal	424,7	288,7	135,8
21	San Bernardo	483,6	326,6	151,7
24	Cerrillos de Leyda	574,8	397,4	193,0
34	Hacienda Chada	701,4	475,8	222,8
2	Punta Panul San Antonio	512,7	345,7	160,1
6	Colliguay	841	551,8	242,1
14	Tobalaba	422	292,3	142,6
29	Carmen de las Rosas	582,5	394,7	184,5
30	El Tránsito	614,6	421,3	201,4

Nº	Estación	Probabilidad		
		20%	50%	95%
33	Aculeo	840,9	543,7	231,9
12	Curacaví	468,7	314,3	143,9
7	Esmeralda de Colina	383,2	256,9	117,6
4	Rungue	479,5	310,8	133,2
10	Fundo Huinganal	559,9	375	171,3
1	Casablanca	501,9	335,3	152,5
27	Melipilla	457,5	307,1	141
16	Los Cerrillos	415,3	273,9	121,5
9	Fundo Valle Hermoso	368,3	247	113,1
5	Polpaico	421,6	286,7	134,9
13	Santiago, edificio MOP	414,3	285,0	137,1
3	Caleu	825,4	546,1	243,6
19	El Bosque	451,4	307,3	144,9
35	Santo Domingo	686,2	468	221,4
36	San Enrique	788,8	549,6	271,2
8	Retén Batuco	369,1	254,5	123,1
11	Cerro Calán	504,8	348,1	168,3
22	Peñaflor	450,5	310,7	150,2

Tabla 3.3: Ubicación y altitud para las estaciones ubicadas en la cuenca de los ríos Maipo y Mapocho (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

Estación	Latitud	Longitud	Altitud m	Estación	Latitud	Longitud	Altitud m
La Obra de Maipo	33°35'	70°30'	799	Aculeo	33°53'	70°53'	370
Los Queltehues	33°49'	70°12'	1365	Curacaví	33°25'	71°03'	167
La Florida	33°33'	70°33'	665	Esmeralda de Colina	33°11'	70°40'	550
Maitenes	33°33'	70°16'	1140	Rungue	33°02'	70°54'	710
Embalse El Yeso	33°41'	70°71'	2475	Fundo Huinganal	33°20'	70°30'	830
Las Melosas	33°51'	70°12'	1600	Casablanca	33°19'	71°25'	230
San José Maipo	33°39'	70°22'	1060	Melipilla	33°42'	71°13'	169
Retén San José	33°38'	70°21'	915	Los Cerrillos	33°30'	70°42'	500
San Alfonso	33°44'	70°18'	1100	Fundo Valle Hermoso	33°17'	70°38'	544
Quinta Normal	33°27'	70°42'	530	Polpaico	33°10'	70°53'	522
San Bernardo	33°35'	70°43'	573	Edificio MOP	33°34'	70°37'	580
Cerrillos de Leyda	33°38'	71°30'	150	Caleu	33°00'	71°00'	1120
Hacienda Chada	33°54'	70°40'	400	El Bosque	33°34'	70°37'	580
Punta Panul San Antonio	33°34'	71°38'	63	Santo Domingo	33°37'	71°38'	66
Colliguay	33°10'	71°08'	488	San Enrique	33°50'	71°45'	160
Tobalaba	33°27'	70°34'	640	Retén Batuco	33°15'	70°49'	483
Carmen de las Rosas	33°45'	71°09'	165	Cerro Calán	33°23'	70°23'	860
El Tránsito	33°48'	70°40'	370	Peñaflor	33°36'	70°54'	370

3.4.2 Cauces Naturales y Canales

El sistema de flujos desarrollado en la zona de estudio es bastante errático. Dentro de los sistemas permanentes y significativos se encuentran la Laguna de Batuco, el Estero Colina y el Canal Batuco; además, existen flujos sin curso definido, que se hallan principalmente aguas arriba de la Laguna Batuco. A lo descrito anteriormente se agregan factores como los orígenes de la cuenca, un nivel freático somero y problemas de evacuación de aguas lluvias en la comuna de Lampa, lo que ha conducido a inundaciones importantes en el sector que se mantienen hasta el presente (Mellado, 2008).

- Laguna Batuco

La fosa de Batuco es de tipo endorreico. Esta retiene los flujos de las laderas circundantes, dando origen a la Laguna de Batuco, así como a otras lagunas más pequeñas, en periodos de alta precipitación. Este sistema de lagunas es de baja profundidad y sus principales pérdidas de agua ocurrirían por evaporación. Dada esta característica, ha sido común que en el pasado la Laguna de Batuco se seque durante el verano, aunque en algunas ocasiones ha presentado un almacenamiento de agua bastante significativo, abarcando un área cercana a 500 hectáreas (Ferrando, 1999).

- Estero Colina

El Estero Colina se origina en los cordones montañosos preandinos situados al oriente de Peldehue (comuna de Colina), se origina a los 2000 m.s.n.m en la confluencia de la quebrada Los Tambillos con el Estero Escalones. Se desplaza por la comuna en dirección NE-SW, desde estación Colina hasta la localidad de La Primavera, desde donde se orienta ya fuera de la comuna hacia el Sur, para conectar con el sistema del río Mapocho en el sector de la Ruta 68 a Valparaíso.

El Estero Colina ha dado origen a suelos evolucionados de aptitud agrícola, con drenaje relativamente bueno hacia el oriente mientras que hacia SW, el nivel freático superficial da origen a suelos salinos de mal drenaje (Ferrando, 1999). Además, presenta un escaso caudal en verano, el cual aumenta en invierno y primavera.

- Canal Batuco

Es la principal rama del Canal El Carmen en la zona de Santiago norte y se origina en el sector de Las Canteras, en el cerro Pan de Azúcar. Su primer tramo se desarrolla paralelo al Canal El Carmen. Posteriormente, debido al cambio de dirección de este al norponiente, continua por el borde de los cerros de Chicureo, para luego dirigirse hacia el norponiente, cruzando la carretera General San Martín y finalmente el Estero Colina (Mellado, 2008).

La capacidad nominal de este canal, es de aproximadamente 2,6 l/s (DOH, 2002). Según información proporcionada por la CONAMA de la Región Metropolitana, el caudal conducido por este canal en temporada de riego (septiembre a mayo) es del orden de 106 l/s.

- Otros flujos

Aguas arriba de la Laguna Batuco existen otros flujos, de carácter errático, producidos por excesos de riego que se descargan directamente a las planicies.

3.5 Hidrogeología

La zona de estudio corresponde al valle del Estero Colina que es uno de los principales tributarios al sistema Maipo-Mapocho. La cuenca de este estero tiene sus cabeceras emplazadas en la cordillera, exhibiendo una cobertura detrítica importante sólo en el sector donde entra en la Depresión Central. En este último sector la divisoria de aguas, que separa esta cuenca con la hoya hidrográfica del Estero Lampa, corre muy próxima a la localidad de Peldehue. Desde este último sector hacia aguas abajo, se desarrolla una amplia cobertura de sedimentos que se disponen en forma de abanico (Abanico Colina) que se abre hacia el sector de la Depresión Central (Ayala y Cabrera, 2000).

La consultora Ayala y Cabrera levantó un perfil longitudinal (Perfil Longitudinal Colina) a partir del sector de las cabeceras de esta amplia cobertura detrítica hasta el área de la desembocadura del Estero Lampa, que muestra la distribución de las unidades sedimentarias definidas en los rellenos. Este perfil se complementó con cinco perfiles transversales, que presentan la cobertura lateral de estas a lo ancho del sector medio y superior del abanico del Estero Colina. La descripción de las unidades se muestra a continuación y la ubicación de dichos perfiles se puede ver en la Figura 3.4.

Unidad Colina 1: Es la más profunda y aladaña al basamento rocoso, está formada por una fracción clástica mayor escasa con arenas finas y gravas subordinadas en una matriz

abundante de arcillas y limos. El valor medio de su conductividad hidráulica está cerca de los 10^{-6} m/s (Ayala y Cabrera, 2000).

Unidad Colina 2: Esta capa está entre la unidad 1 y 2, posee gran cantidad de gravas y ripios, subordinados, con una matriz de arena media a fina con escasas arcillas y limos. Los espesores máximos se encuentran en el eje del valle y alcanzan hasta los 100 m. Su conductividad hidráulica está entre 10^{-4} y 10^{-5} m/s (Ayala y Cabrera, 2000).

Unidad Colina 3: Esta es la unidad más superficial, y corresponde a sedimentos finos, con poca cantidad de arena y una gran matriz arcillosa. Se estima que la conductividad hidráulica media va entre 10^{-6} y 10^{-7} m/s (Ayala y Cabrera, 2000).

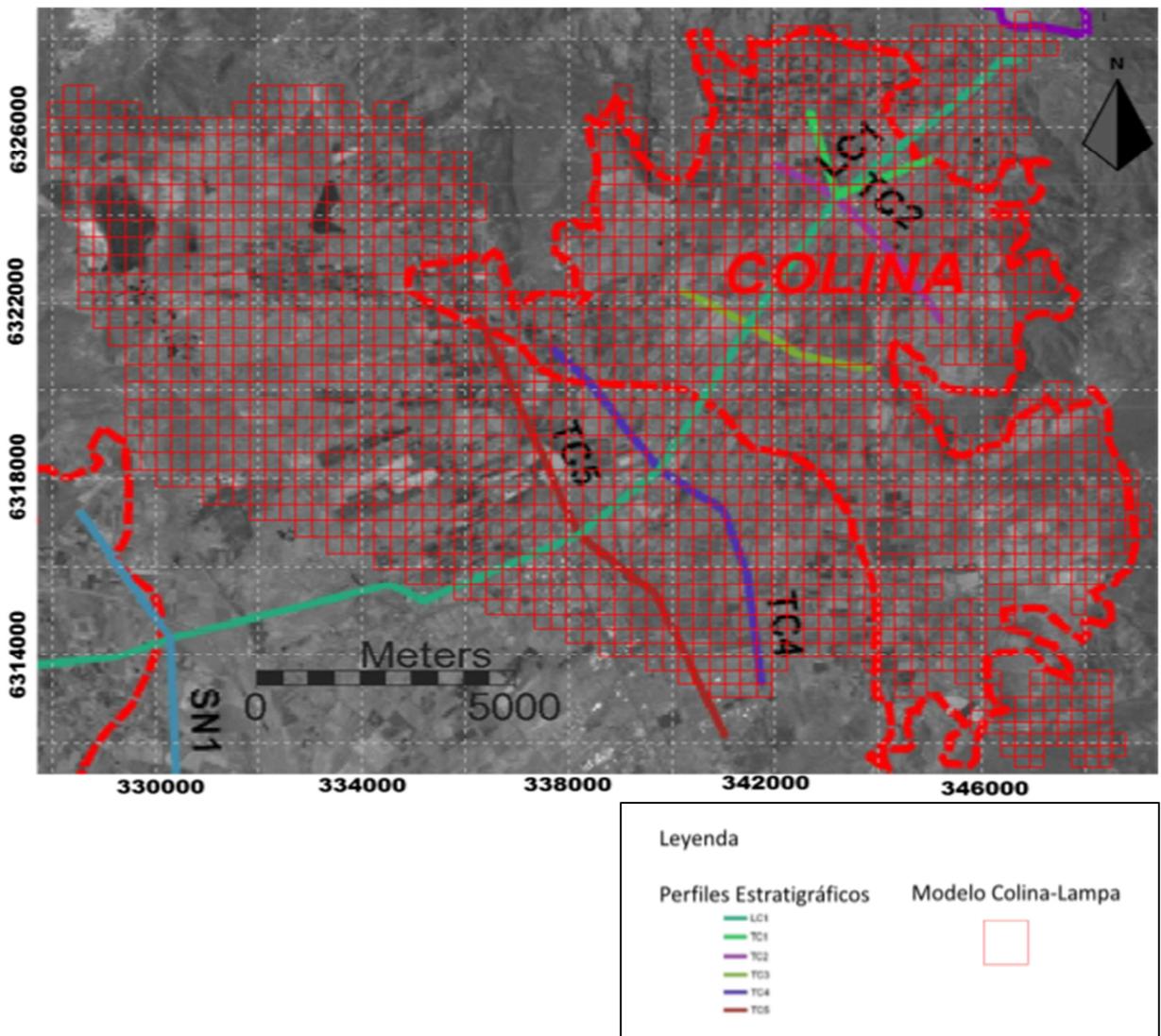


Figura 3.4: Ubicación de los perfiles estratigráficos existentes dentro del modelo Colina-Lampa (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

Los detalles estratigráficos de cada uno de los perfiles mostrados en la Figura 3.4 se muestran en las siguientes figuras:

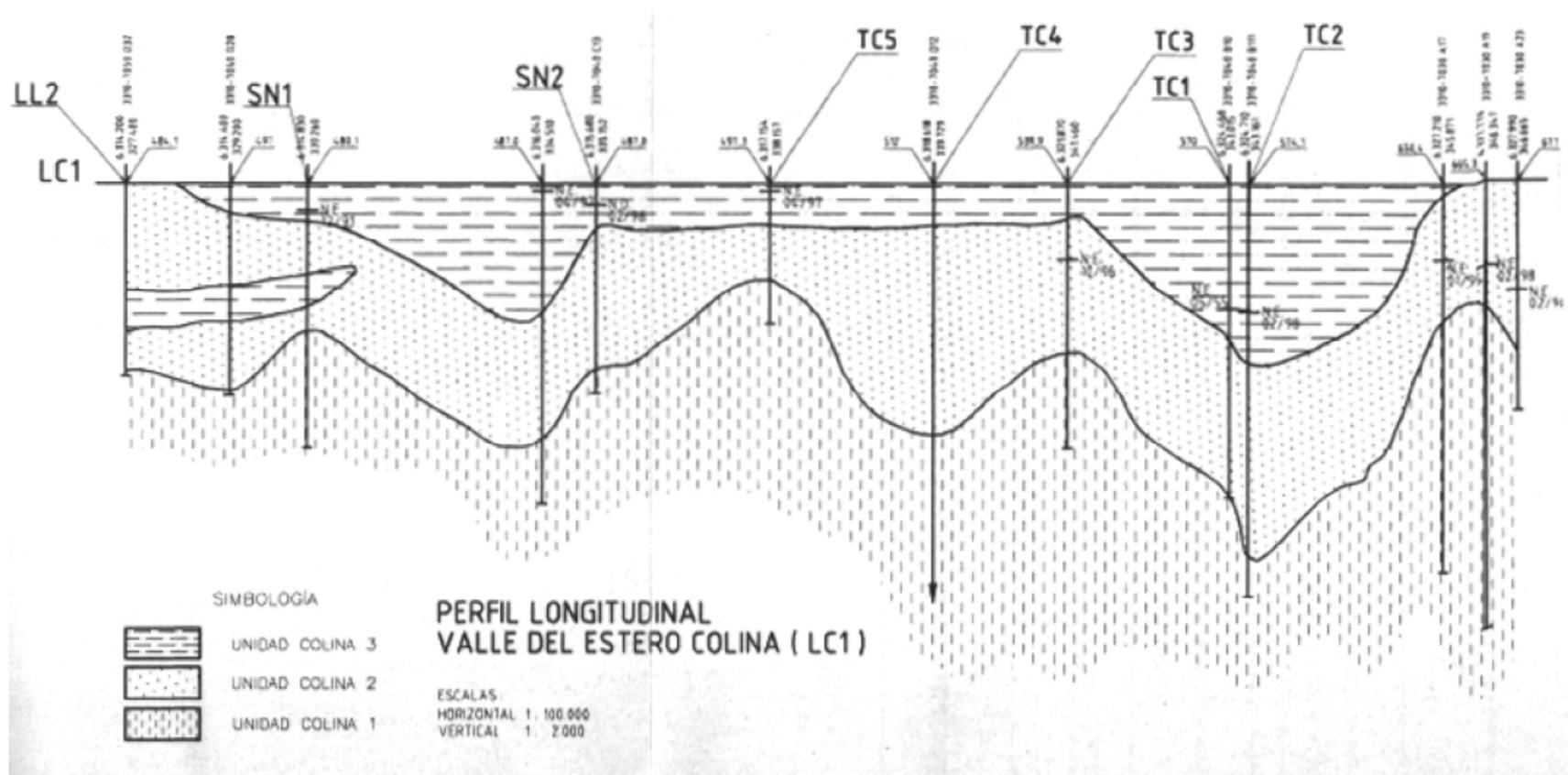


Figura 3.5: Perfil estratigráfico longitudinal del valle del Estero de Colina LC1. Escala vertical 1:2.000 (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

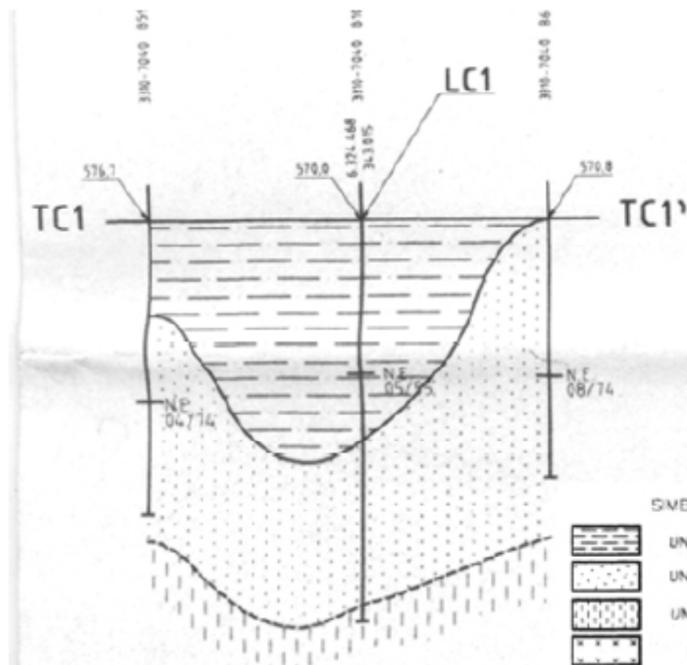


Figura 3.6: Perfil estratigráfico transversal del valle del Estero de Colina TC1. Escala vertical 1:2.000 (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

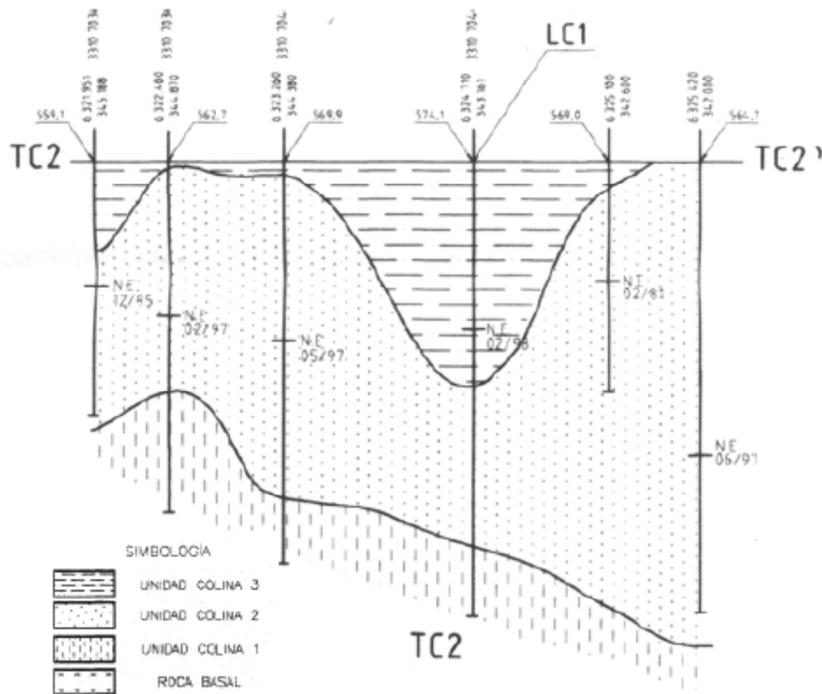


Figura 3.7: Perfil estratigráfico transversal del valle del Estero de Colina TC2. Escala vertical 1:2.000 (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

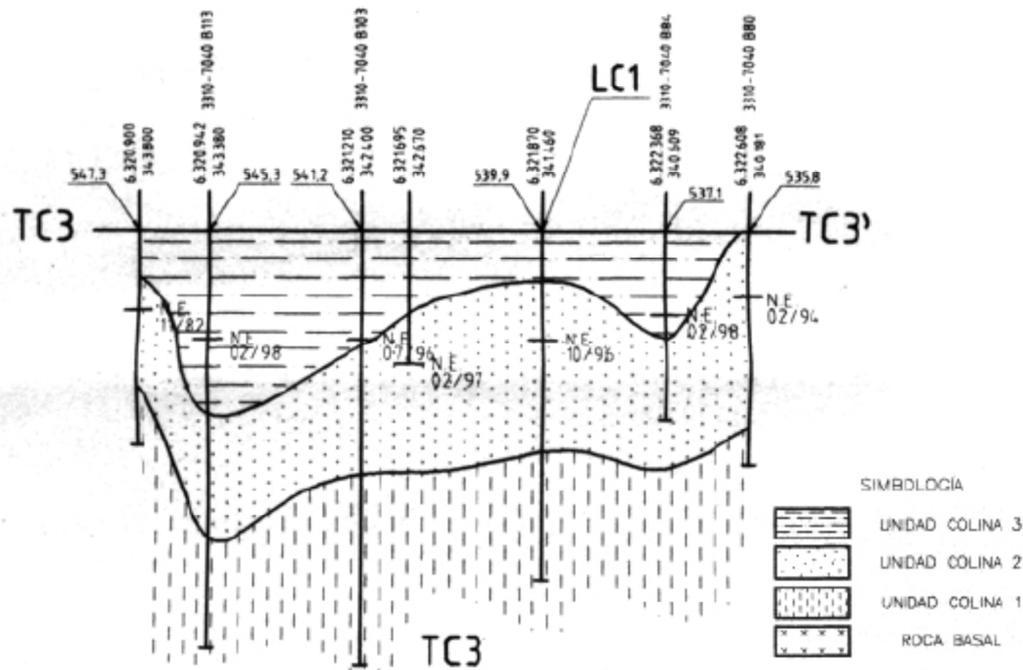


Figura 3.8: Perfil estratigráfico transversal del valle del Estero de Colina TC3. Escala vertical 1:2.000 (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

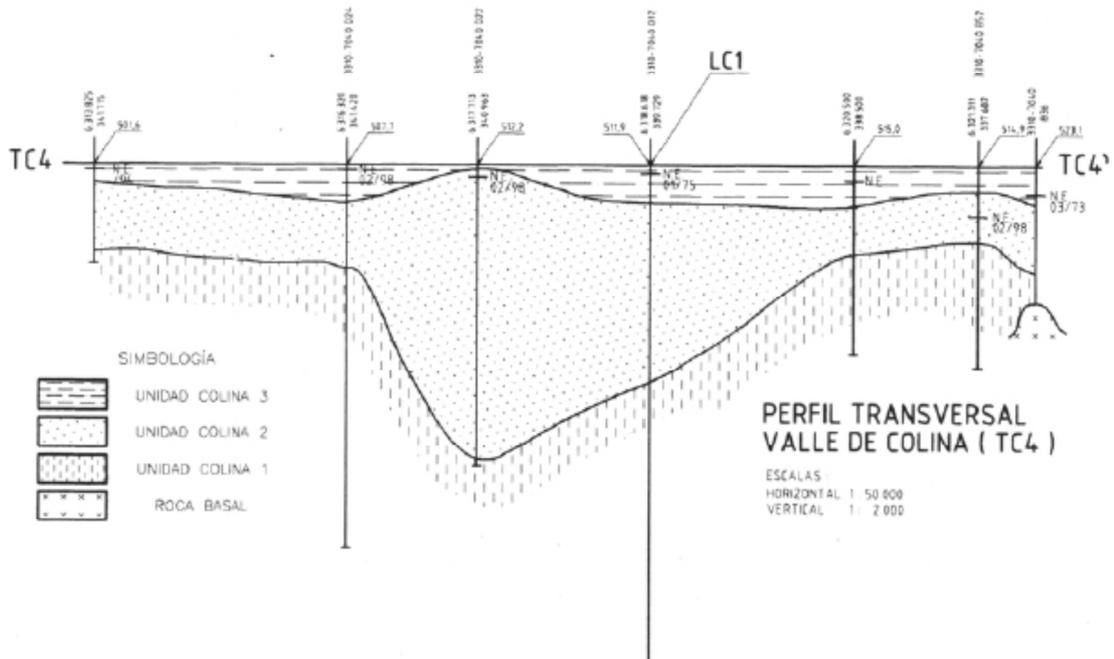


Figura 3.9: Perfil estratigráfico transversal del valle del Estero de Colina TC4. Escala vertical 1:2.000 (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

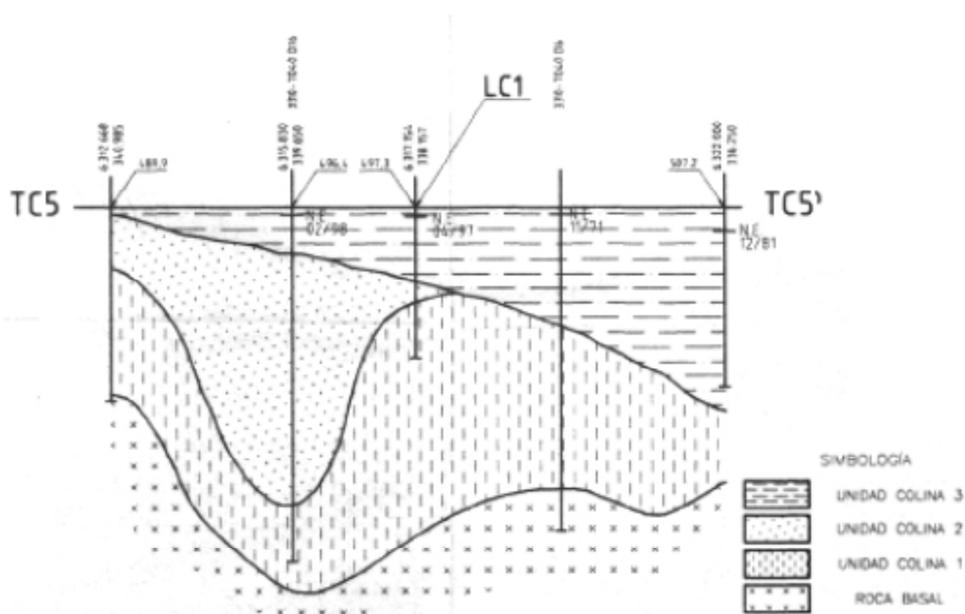


Figura 3.10: Perfil estratigráfico transversal del valle del Estero de Colina TC5. Escala vertical 1:2.000 (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

Los tres estratos, mostrados en los perfiles anteriores serán representados en un solo estrato para efectos de la modelación en el modelo Maipo-Mapocho tal como se muestra en la Figura 3.11. Este será equivalente a las tres unidades reales de Colina, de espesor igual a la suma de dichas unidades. El coeficiente de almacenamiento y la permeabilidad de este estrato único se debieron definir de manera de representar el comportamiento real de la napa mediante la simulación del año 2000.

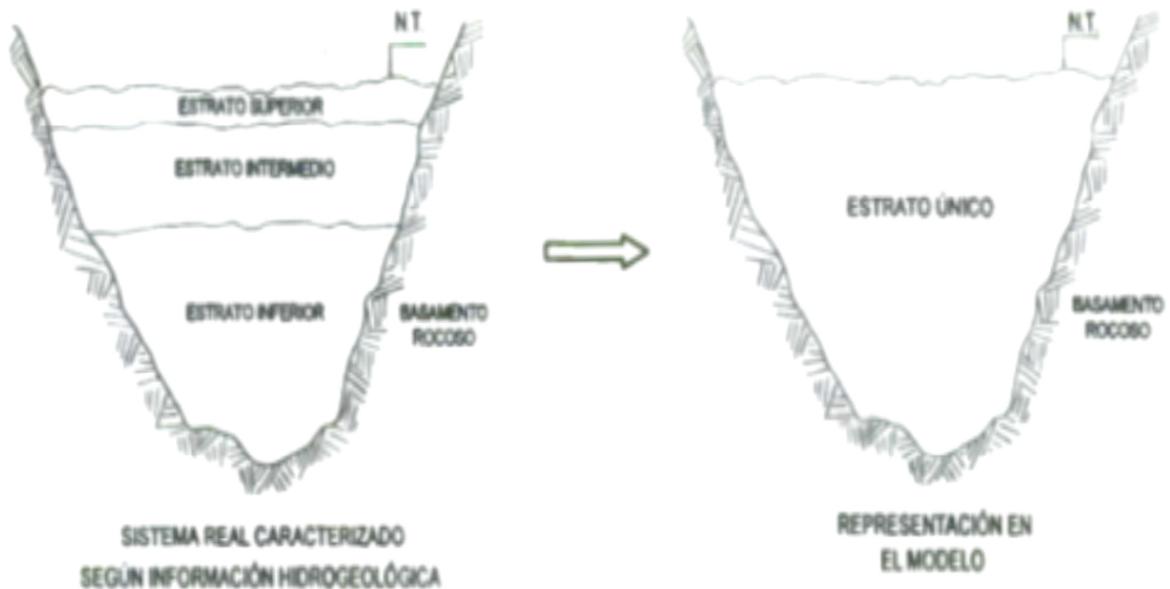


Figura 3.11: Representación espacial vertical en un único estrato (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

3.6 Información de pozos de la Dirección General de Aguas (DGA)

La DGA posee 14 pozos con información de niveles en la zona de estudio, con datos desde 1958 hasta el año 2010. La mayor parte de la información presenta series incompletas y variaciones bruscas de nivel, que pueden representar anomalías en la medición o inicios de ciclos de bombeo en los respectivos pozos. La información y ubicación de estos pozos se presenta en la Tabla 3.4, Figura 3.12 y Figura 3.13.

Tabla 3.4: Datos de los pozos de monitoreo de la DGA en la zona de Colina y Lampa, en el DATUM WGS84, HUSO 19.

Nombre Pozo	Cota m.s.n.m	NORTE m	ESTE m	Nivel Piezométrico Promedio últimos 5 años m.s.n.m	Descenso Promedio últimos 5 años m
SANITARIOS COLINAS	494	6318871	331801	588,49	2,51
FUNDO SANTA ROSA DE LAMPA	496	6320162	335197	494,64	1,36
ENTEL BATUCO	485	6321157	332124	483,41	1,59
FUNDO LA LAGUNA	482	6324369	329064	464,11	17,89
ASENTAMIENTO LAGUNA	487	6326161	329344	485,19	1,81
FDO. EL ALMENDRAL	429	6328943	344584	419,97	9,03
LO ARCAYA	542	6321019	342328	514,21	27,79
FUNDO REINA SUR 2	570	6326307	341621	517,79	52,21
FUNDO LA MONTAÑA	494	6312541	340138	491,56	2,44
ASENTAMIENTO EL TAQUERAL	459	6314552	335111	456,80	2,20
PARCELA 7 LIRAY	519	6321067	337719	510,31	8,69
FUNDO REINA SUR 1	591	6325378	343216	526,59	64,41
SAN LUIS DE COLINA	*	6324802	345764	494,22	55,78
POZO FUNDO EL ALGARROBAL	*	6316446	341497	519,40	30,06

3.7 Calidad del agua subterránea

La información sobre calidad de agua subterránea de la zona de interés fue obtenida mediante información entregada por la Secretaria Regional Ministerial de Salud de la Región Metropolitana. Esta información corresponde a la vigilancia realizada a los servicios de agua potable rural (APR), que corresponde a una actividad anual, la cual incluye la fiscalización, capacitación y muestreo físico-químico y bacteriológico de las aguas.

Los datos resumidos en la Tabla A.3 - 1 corresponden a muestras tomadas en el año 2008 en las comunas de Lampa y Colina, y todas se encuentran cloradas en el momento de su obtención. Las ubicaciones de estos pozos se muestran en la Figura 3.13 y los valores de las muestras para el año 2008 se incluyen en el Anexo A.3.

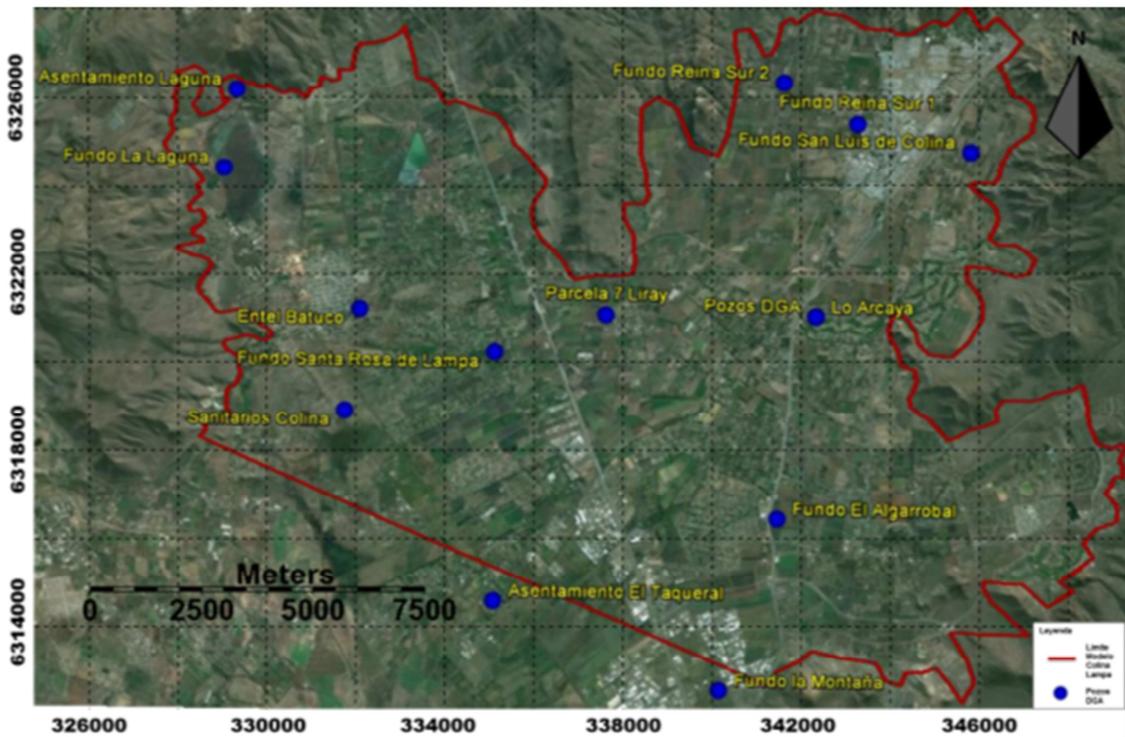


Figura 3.12: Ubicación de los pozos con información de niveles de agua subterránea que posee la DGA en la zona que abarca el modelo Colina-Lampa.

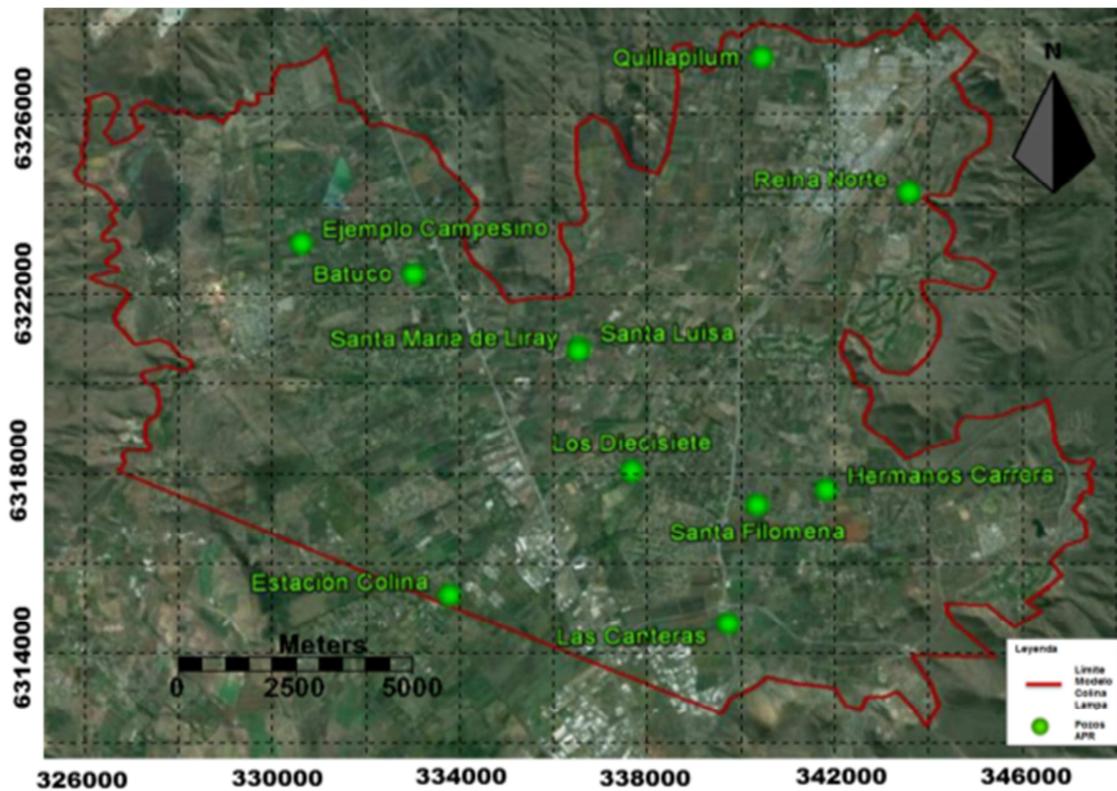


Figura 3.13: Ubicación de los pozos APR donde la SEREMI de Salud realizó muestreos de calidad en los años 2008, 2009, 2010 y 2011.

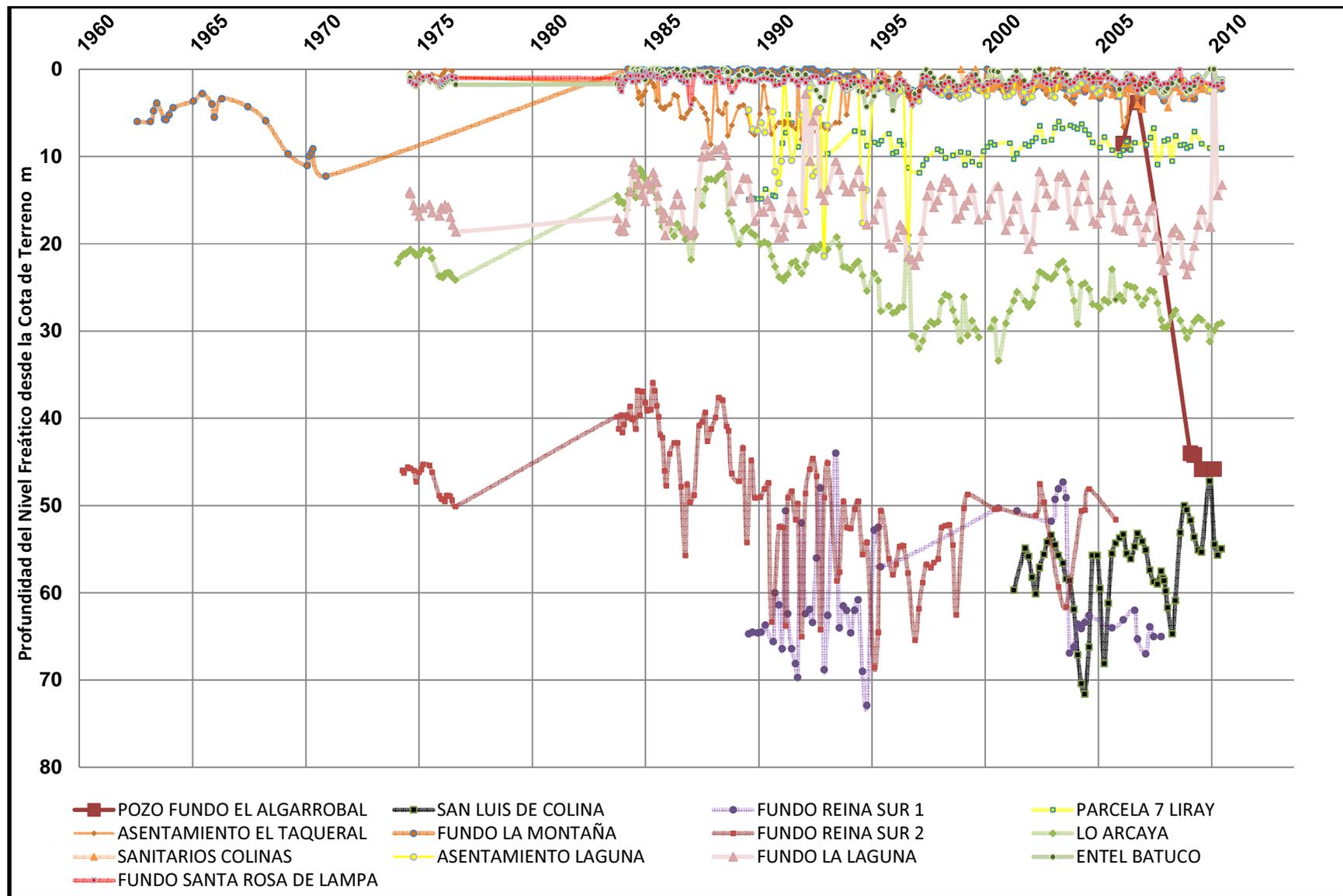


Figura 3.14: Series de tiempo de los niveles para los pozos de la DGA en la zona de Colina y Lampa.

4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

4.1 Modelo de simulación hidrológico operacional de las cuencas de los ríos Maipo y Mapocho.

El “Modelo de simulación hidrológico operacional de las cuencas de los ríos Maipo y Mapocho” (Modelo Maipo-Mapocho), consiste en un estudio solicitado a “Ayala, Cabrera y Asociados Ltda.” (AC) por la Dirección General de Aguas (DGA), a fines de la década de los 90, con el fin de disponer de una herramienta de análisis y planificación de los recursos del río Maipo y sus afluentes, tanto de forma superficial como subterránea.

El capítulo relacionado con aguas subterráneas que considera el valle del gran Santiago del estudio de Ayala y Cabrera es muy relevante, ya que el modelo que se desarrolla en esta memoria está basado íntegramente en dicho capítulo.

El área del modelo de AC está comprendida aproximadamente entre las coordenadas UTM 6.328.600 N por el Norte, 6.244.000 N por el Sur, 309.000 E por el Oeste y 362.400 E por el Este. Dicha zona corresponde al interfluvio de los ríos Maipo y Mapocho, incluyendo a los sectores de Lampa y Colina por el norte y Angostura de Paine y otros, por el Sur.

En la zona anteriormente descrita se construyó un modelo hidrogeológico, el cual tiene una discretización espacial en celdas rectangulares, definida por filas y columnas horizontales y verticales, respectivamente. El número definido de filas (sentido Norte-Sur) es de 265, y el número de columnas (sentido Este-Oeste) es de 236, lo que implica un total de 62.540 celdas en planta, aunque no todas son activas. En cuanto a la separación entre filas o columnas, varía entre 100 m y 310 m en el sentido Norte-Sur y entre 100 m y 620 m en el sentido Este-Oeste. Además, para efectuar la calibración y la validación del modelo, se seleccionó un intervalo de 99 meses comprendido entre enero de 1990 y marzo de 1998 en que las producciones de las captaciones de agua subterránea pudieron ser estimadas con relativa precisión, a partir de encuestas de terreno efectuadas durante la construcción del modelo. Por otro lado, durante este periodo se cuenta con información suficiente de niveles estáticos, incluyendo la recopilación de un censo de captaciones correspondiente a un periodo que incluye años secos y húmedos. La discretización principal del tiempo está determinada por las reglas de bombeo de las captaciones y por las variaciones de las recargas. De acuerdo a dichos factores, el intervalo temporal fue establecido en un 1 mes, por lo que el modelo opera para un total de 99 periodos o intervalos de tiempo principales (“stress period”), cada uno de los cuales se divide en 10 sub-períodos (“time step”). Dichos periodos no han sido cambiados para la modelación del sistema hidrogeológico Colina-Lampa.

4.2 Descripción del software propuesto para la modelación numérica

4.2.1 Descripción de GMS y MODFLOW

Groundwater Modeling System (GMS) es un software desarrollado por Aquaveo Inc. en Utah, Estados Unidos. GMS es actualmente uno de los softwares más sofisticados y fácil de usar para la modelación de problemas en agua subterránea. Provee herramientas para cada fase de la modelación incluyendo la caracterización, desarrollo, calibración, post-proceso, y visualización. Además, GMS soporta modelos de diferencias finitas y elementos finitos para modelos en 2D y 3D para simular flujo y transporte de masa y calor en sistemas de aguas

subterráneas a través de interfaces con modelos como: MODFLOW 2000, MODPATH, MT3DMS, RT3D, SEAM3D, UTCHEM, FEMWATER, PEST, MODAEM, SEEP2D y UTEXAS.

En particular, GMS actúa como una interfaz gráfica de MODFLOW, que es un programa gratuito para la modelación de agua subterránea mediante diferencias finitas en 3D, desarrollado por el "U.S. Geological Survey" de Estados Unidos. Este programa fue originalmente concebido en 1984 como un código exclusivo para la simulación de agua subterránea, pero su estructura modular ha proporcionado un marco sólido para la integración de capacidades adicionales ampliando su uso inicial (Harbaugh, 2005). La familia de programas relacionados con MODFLOW permite simular el agua subterránea acoplada a sistemas de agua superficial, transporte de solutos, flujo en la zona no saturada, compactación de acuíferos, estimación de parámetros y gestión de aguas subterráneas.

La versión utilizada para la modelación de este trabajo es MODFLOW-NWT, que permite manejar de mejor forma las situaciones donde las celdas se secan o se inundan, en comparación a las versiones anteriores de MODFLOW que ante estas situaciones presentan problemas de convergencia. Por ejemplo, la versión NWT, tiene una característica única para acuíferos libres o no confinados, la cual es capaz de reducir el bombeo cuando en una celda el nivel piezométrico cae bajo un porcentaje de su espesor. La forma de la reducción del bombeo es definida por el programa y su comienzo puede ser especificado por el usuario, pero típicamente ocurre cuando el espesor saturado de una celda cae bajo un 25 % de ella. Para el caso de la inyección, esta se reduce a cero cuando el nivel del agua en la celda sobrepasa la cota de terreno.

4.3 Modelo matemático utilizado por MODFLOW

El movimiento tridimensional del agua subterránea de densidad constante a través de un material de medio poroso puede describirse por la ecuación diferencial siguiente (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1)$$

Donde:

- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : Conductividad hidráulica.
- W : Entradas o salidas del sistema, como recarga y bombeo.
- S_s : Almacenamiento específico.
- h : Carga hidráulica o nivel de agua.

En general K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} pueden ser funciones del espacio y W puede ser función del tiempo y del espacio. La ecuación anterior describe el flujo de agua subterránea en condiciones de régimen transiente, en un medio heterogéneo y anisotrópico, siempre que los ejes de coordenadas estén alineados con los ejes principales de la conductividad hidráulica. Junto con las ecuaciones de borde de flujo, niveles de agua y las condiciones iniciales, constituyen la representación matemática del sistema de flujo de aguas subterráneas. Para resolver esta ecuación, MODFLOW utiliza el método de diferencias finitas, donde el sistema continuo descrito por la ecuación es reemplazado por un set finito de puntos discretos en el espacio y en el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por términos calculados de la diferencia de carga hidráulica en esos puntos. De esta forma la ecuación diferencial original es transformada en un sistema de ecuaciones algebraicas lineales, cuya solución entrega valores de carga en puntos y tiempos específicos. Estos valores constituyen una

aproximación a la distribución continua de cargas hidráulicas variando en el tiempo que entregaría una solución analítica de la ecuación diferencial parcial de flujo (Anderson y Woessner, 2002).

4.4 Construcción del modelo

La determinación de las condiciones de borde de un modelo es una de las etapas más importantes en su construcción. Estas condiciones a menudo corresponden a la profundidad del basamento rocoso la cual representa una condición de no flujo, o de ríos, lagos y divisorias de agua, las que pueden estar localizadas a una gran distancia desde el sitio de interés. En tales casos es conveniente desarrollar el modelo de estudio en dos fases. En la primera fase, debe ser construido un modelo “regional” a gran escala, este modelo es lo suficientemente grande para poder determinar las condiciones de borde. Durante una segunda etapa, un modelo “local” a una escala más refinada en una zona específica del modelo regional. Típicamente la profundidad del agua subterránea calculada en el modelo regional sirve como condición de borde de carga constante o variable en el modelo local. También, la información de los estratos tales como las elevaciones del terreno y la profundidad del basamento rocoso, transmisividad, coeficiente de almacenamiento y recargas, son interpoladas desde el modelo regional al modelo local. La representación más detallada de las condiciones del suelo y del flujo superficial y subterráneo puede ir agregándose para poder lograr un modelo más completo. Lo anterior permite un refinamiento de la grilla en la zona de interés, donde es importante conocer con detalle la profundidad del nivel freático, las direcciones de los flujos, etc (AQUAVEO, 2011).

El procedimiento anterior, comúnmente se llama *modelación telescópica*. En este estudio se aplicará para transferir información de niveles desde el modelo hidrogeológico Maipo-Mapocho, desarrollado por “Ayala, Cabrera y Asociados (2000)”, hacia el modelo local implementado para este proyecto denominado “Colina-Lampa”, con el objeto de determinar las condiciones de borde de este nuevo modelo.

4.5 Modelo Colina – Lampa.

La Figura 4.1 muestra la zona seleccionada del modelo regional Maipo – Mapocho (AC 2000) que ha sido escogida para la construcción del modelo local (Colina–Lampa). Todos los datos para la construcción del modelo hidrogeológico de la zona de Colina-Lampa se obtuvieron del modelo regional Maipo – Mapocho (Ayala y Cabrera, 2000), el cual es un acuífero libre de una sola capa.

Por ejemplo, los parámetros hidrogeológicos como la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, la cota de terreno y la cota del basamento rocoso se obtuvieron desde el modelo construido por Ayala y Cabrera (2000). Además, se obtuvo el nivel de agua subterránea para crear condiciones iniciales y de borde del sistema local.

En la Figura 4.2 se puede apreciar los puntos con información hidrogeológica de la zona Colina-Lampa obtenidos desde el Modelo Maipo–Mapocho (Ayala y Cabrera, 2000). Cada uno de los puntos con información fue interpolado tal que cada celda de la grilla del modelo local tuviera información consistente, obteniéndose así la cota de terreno, basamento rocoso, el espesor del acuífero, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento.

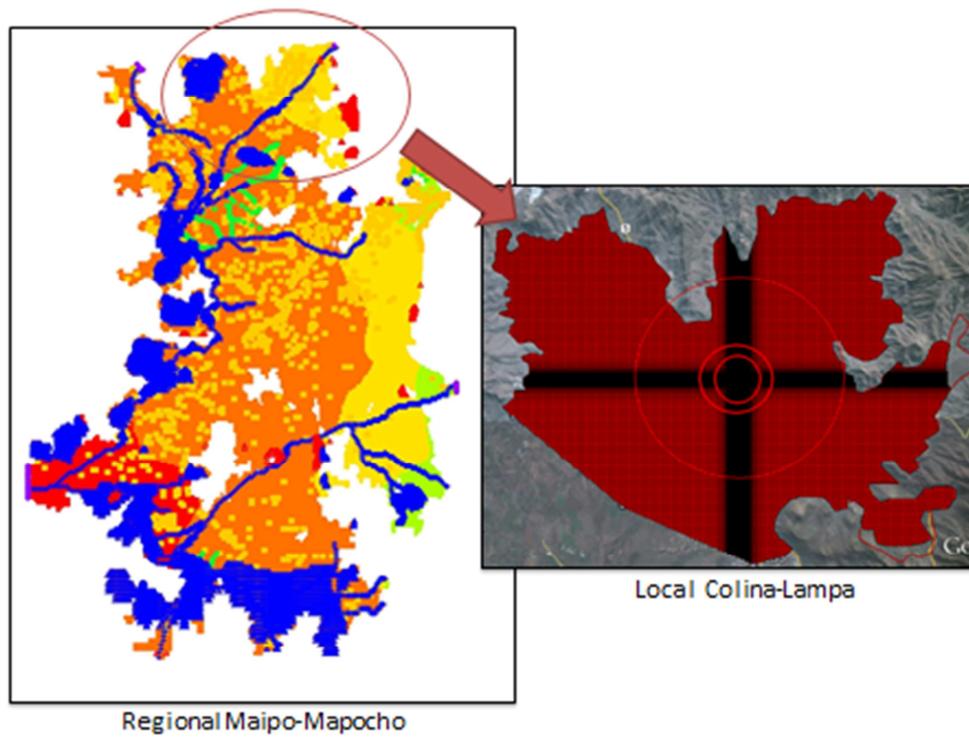


Figura 4.1: Esquema para la modelación telescópica del Modelo Colina-Lampa.

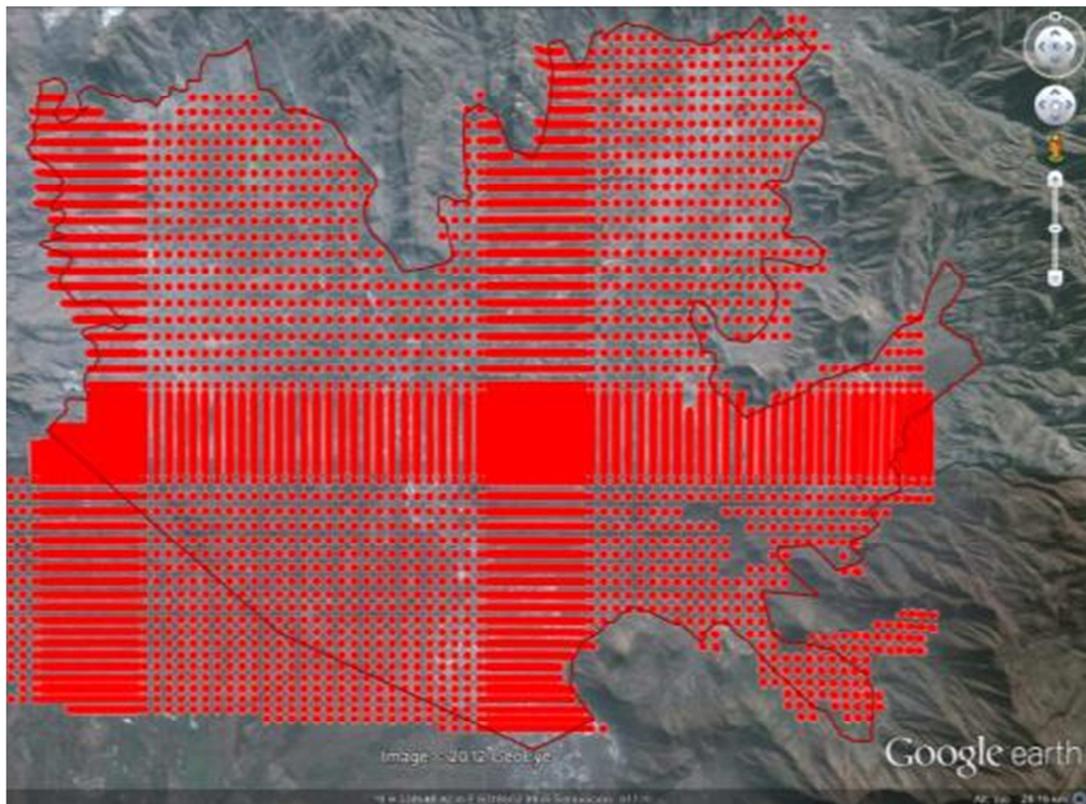


Figura 4.2: Puntos con información para el Modelo Colina-Lampa obtenidos desde el Modelo Maipo - Mapocho (Ayala y Cabrera, 2000).

4.5.1 Límites del modelo

La zona considerada en este modelo corresponde a la zona noreste del denominado valle del Gran Santiago, comprendida aproximadamente entre las coordenadas UTM (PSAD 1956, HUSO 19), 6.329.000 N por el Norte, 6.311.000 N por el Sur, 327.000 E por el Oeste y 350.000 E por el Este. Dicha zona corresponde al valle del Estero Colina y abarca las comunas de Colina y Lampa.

Los límites del modelo se trazaron en los perímetros del contacto roca–relleno de la cuenca. Se puede observar con una imagen satelital que este contacto es aproximadamente igual al comienzo de los cordones montañosos. Además se estableció un límite arbitrario, representado por una línea recta, desde las coordenadas: 329.000 E, 6.319.000 N por el poniente y 342.000 E, 6.313.000 N por el oriente, que es representada por una zona de celdas de cargas variable como límite sur del modelo.

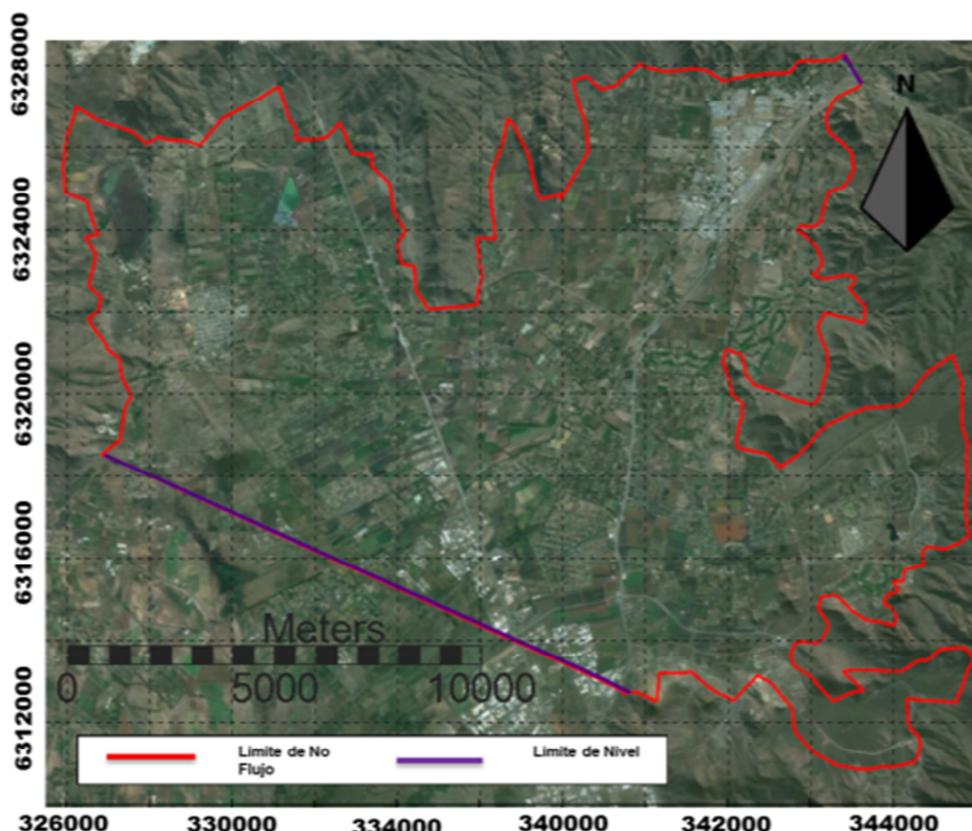


Figura 4.3: Límites de la zona activa o de flujo y condiciones de borde de niveles en el modelo Colina – Lampa.

4.5.2 Discretización espacial horizontal

La discretización espacial en planta del modelo se refiere a la forma en que es subdividida el área de estudio en celdas rectangulares, definidas por filas y columnas horizontales y verticales. El modelo en la situación base, Figura 4.4, tiene celdas de dimensiones aproximadas de entre los 400x300 metros, mientras el modelo refinado, Figura 4.5, que es usado para todos los cálculos de infiltración, tiene celdas de 30x30 cm alrededor de los pozos 4 y 6, mientras que el resto del modelo tiene celdas de 400x300 metros.

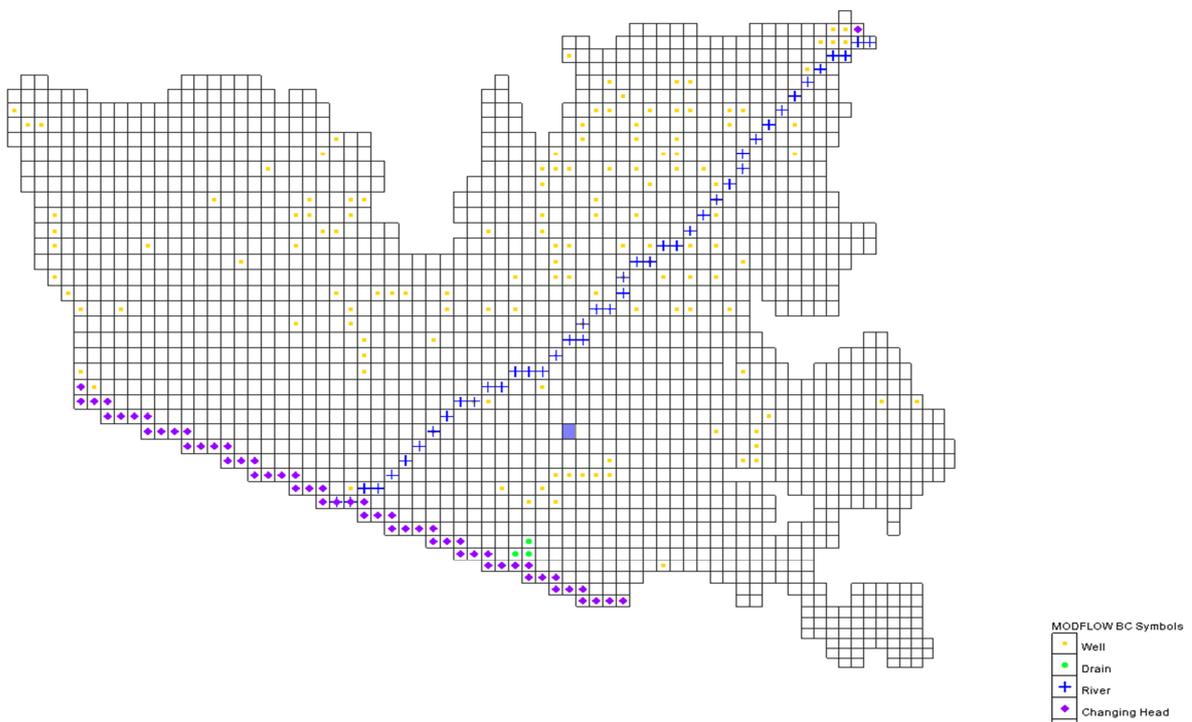


Figura 4.4: Modelo Colina-Lampa base con 1884 celdas activas.

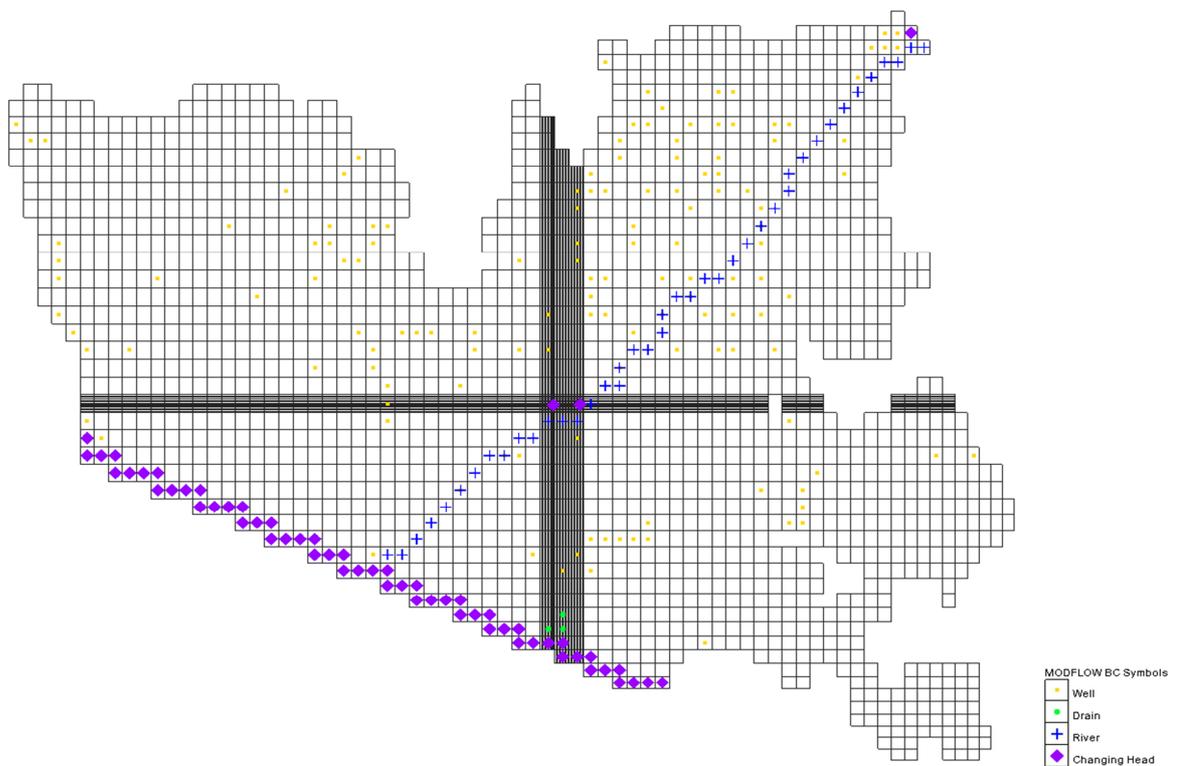


Figura 4.5: Modelo Colina-Lampa refinado 12987 celdas activas.

4.5.3 Cota de terreno

La cota de terreno en este sector va desde los 479 hasta los 700 m.s.n.m. Se puede observar en la Figura 4.6 que en el sector poniente del modelo, en la comuna de Lampa, el nivel de terreno es cercano a los 500 m.s.n.m. En esta zona, debido al menor nivel del terreno, el nivel freático es cercano a la superficie, existiendo afloramientos de aguas subterráneas. Además, se observa que el gradiente del terreno sigue la línea de la Quebrada de Colina, representada por una línea de celdas tipo río en el modelo.

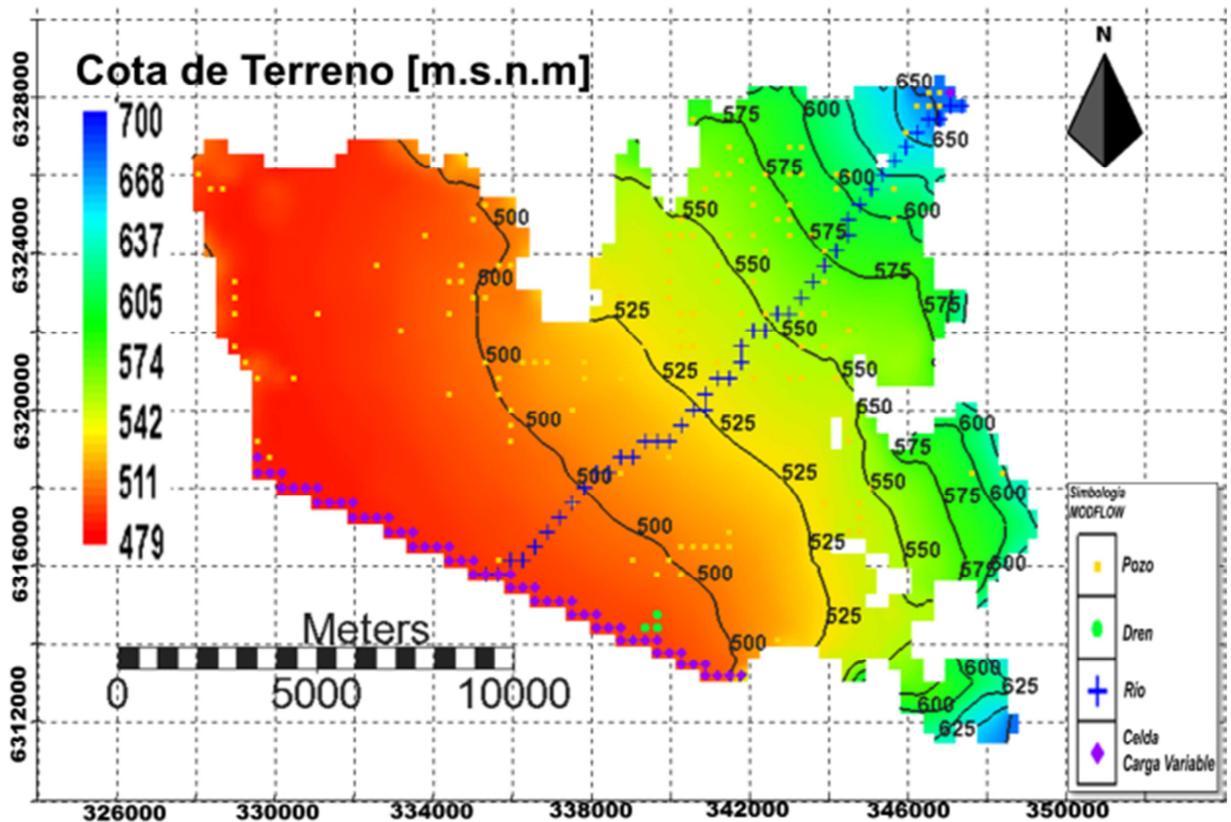


Figura 4.6: Cota de terreno para el modelo Colina-Lampa.

4.5.4 Basamento rocoso

El basamento rocoso tiene dos concavidades importantes como se muestra en la Figura 4.7. En la primera zona el basamento rocoso se encuentra a 105 m.s.n.m. y en el otro sector a 235 m.s.n.m. La zona en color rojo es la que posee un mayor profundidad y por ende un mayor espesor del acuífero.

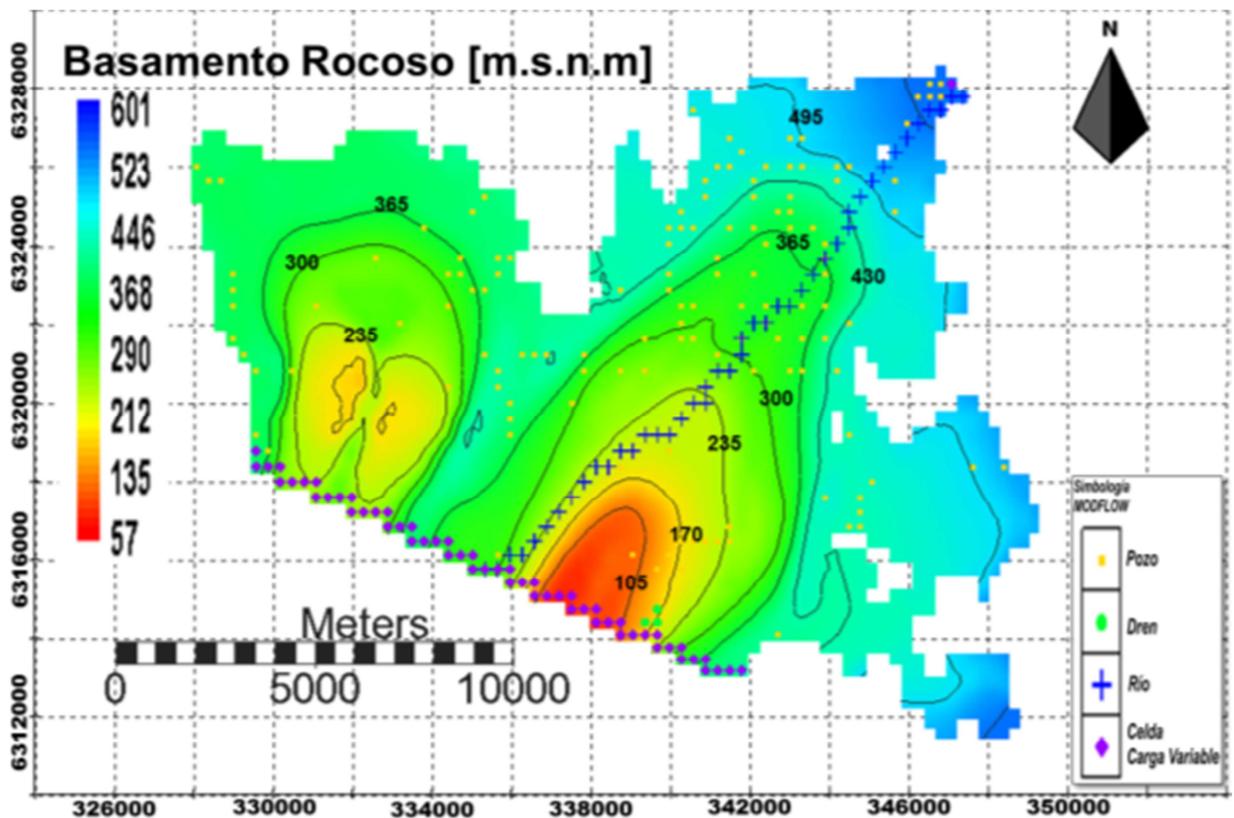


Figura 4.7: Cota de basamento rocoso para el modelo Colina-Lampa.

4.5.5 Espesor del acuífero

El espesor del acuífero va desde los 64 hasta los 432 metros como se muestra en la figura 4.8. Las mayores profundidades se encuentran en la zona de la intersección entre la ruta 5 Norte y la autopista Nororiental y en la zona rural de Lampa. Debido a problemas de convergencia del modelo en simulaciones preliminares, fue necesario modificar el espesor en las zonas aledañas a los límites oriente, poniente y norte, ahí se observa que el espesor es constante e igual a 100 metros, así se evitan los problemas de convergencia, en el modelo, por disminución brusca de las dimensiones entre celdas.

También, se puede observar en la Figura 4.8, dos pequeñas franjas de color rojo, donde el espesor alcanza su valor mínimo, igual a los 64 m, que es bastante menor en relación al resto del acuífero, lo cual crea una separación entre las dos concavidades o zonas más profundas.

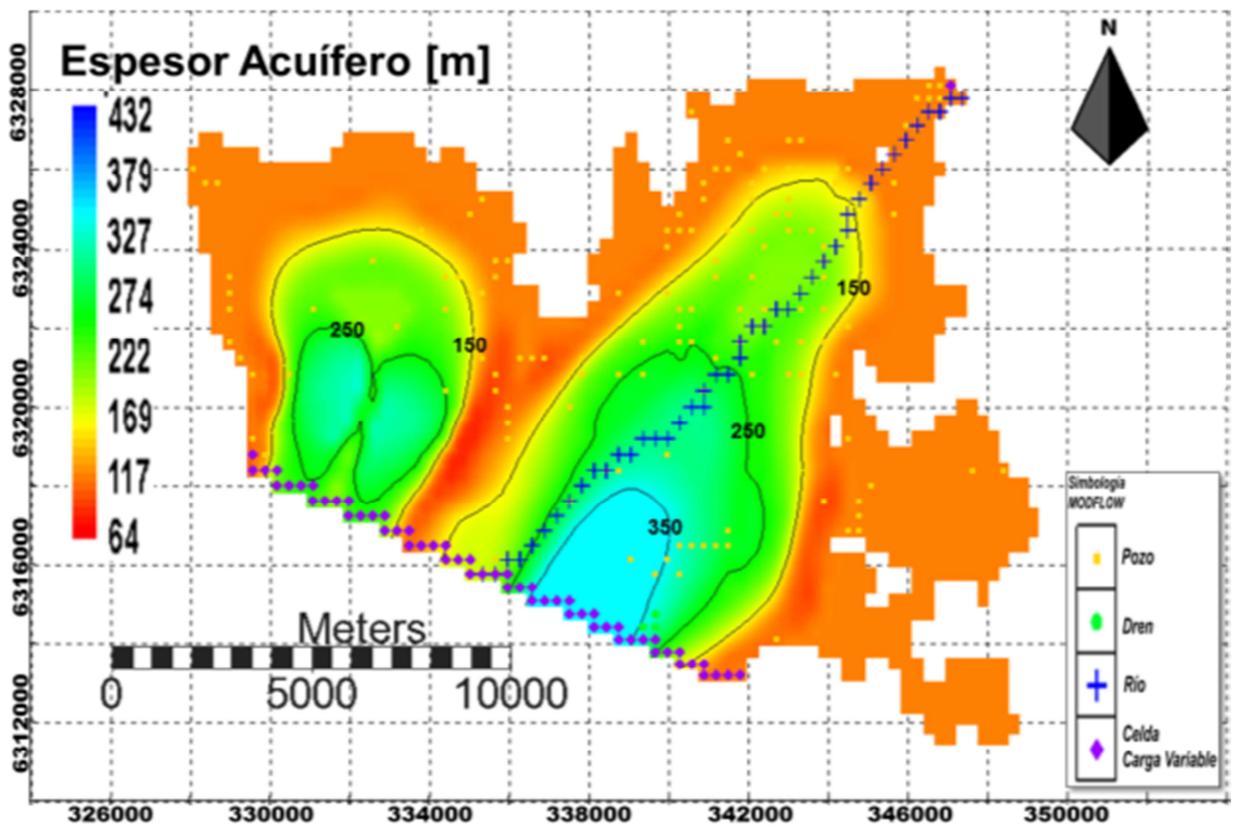


Figura 4.8: Espesor del acuífero para el modelo Colina-Lampa.

4.5.6 Conductividad hidráulica

Los valores de permeabilidad o conductividad hidráulica, usados en el modelo Colina-Lampa, corresponden a los estimados como resultado de la calibración final del modelo Maipo-Mapocho del año 2000. Estos valores para las zonas asignadas en el modelo varían entre los 4 y 475 m/d.

Los valores iniciales de conductividad usados antes de la calibración del modelo Maipo-Mapocho fueron determinados mediante planos de isotransmisibilidades, construidos mediante la recopilación de estudios hidrogeológicos previos. Los valores de transmisividad de esos planos, fueron divididos por los espesores del medio permeable modelado, para así obtener finalmente la permeabilidad del estrato único del modelo.

La asignación de los valores en la grilla, para el modelo Colina-Lampa, se realizó creando una cobertura y luego dibujando polígonos que representan a cada una de las zonas con distinta conductividad. La distribución final de conductividad hidráulica se muestra en la figura 4.9.

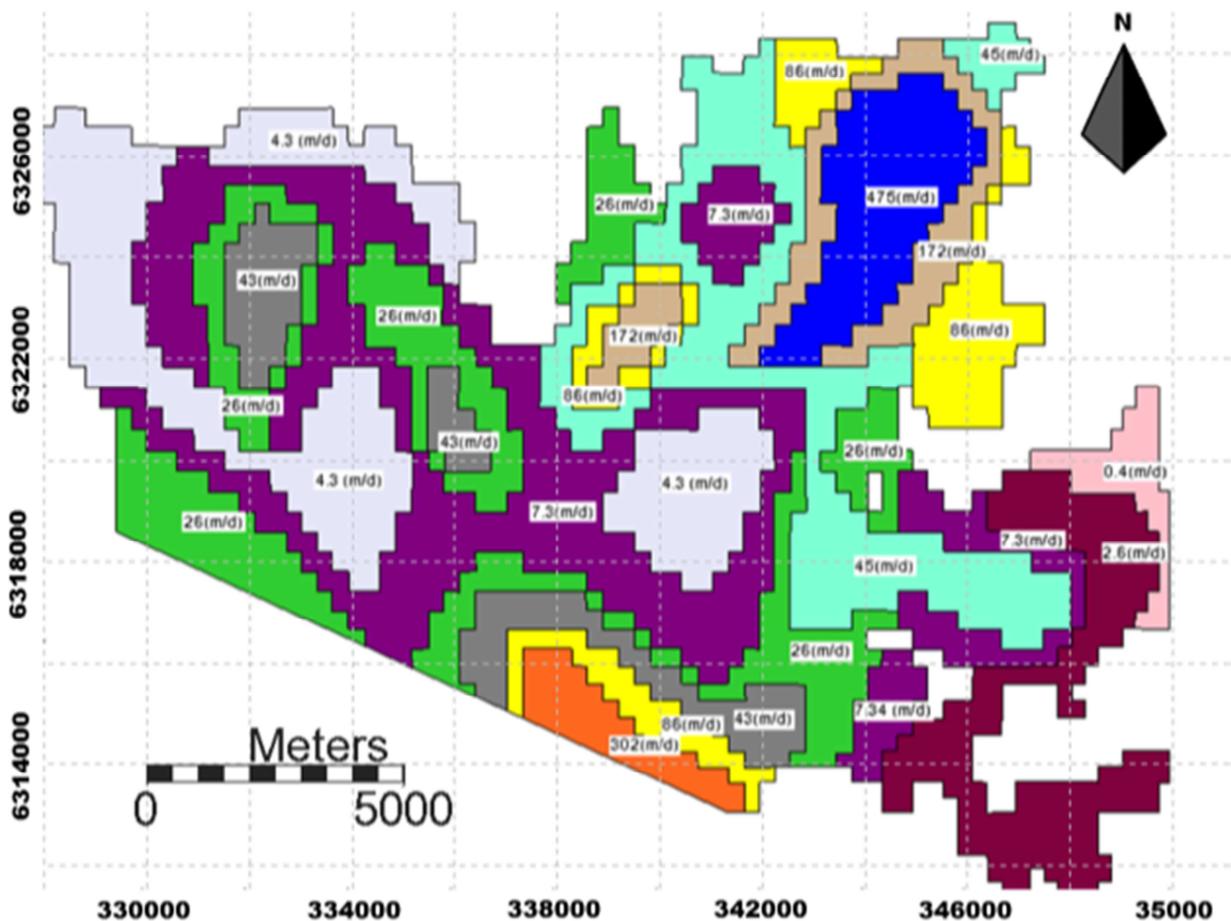


Figura 4.9: Zonas con los distintos valores de conductividad hidráulica asignados al modelo Colina-Lampa.

4.5.7 Coeficiente de almacenamiento

Igual que en el caso de la conductividad hidráulica los valores del coeficiente de almacenamiento (Figura 4.10), fueron obtenidos del modelo regional Maipo-Mapocho del año 2000. La ecuación que define el coeficiente de almacenamiento es la siguiente:

$$S = S_y + b \cdot S_s \quad (4.1)$$

Donde:

- S : Coeficiente de almacenamiento.
- S_y : Capacidad específica.
- S_s : Coeficiente de almacenamiento específico.
- b : Espesor saturado del acuífero.

En esta cobertura solo se utilizó el valor de la capacidad específica (S_y), despreciándose el valor de coeficiente de almacenamiento específico (S_s), ya que este en acuíferos libres es muy pequeño en relación a S_y .

En el modelo Colina-Lampa se define un coeficiente de almacenamiento específico, S_s , igual a cero, ya que no se obtuvo información de este valor para la zona que abarca la simulación. La distribución del coeficiente de almacenamiento se puede observar en la Figura 4.10.

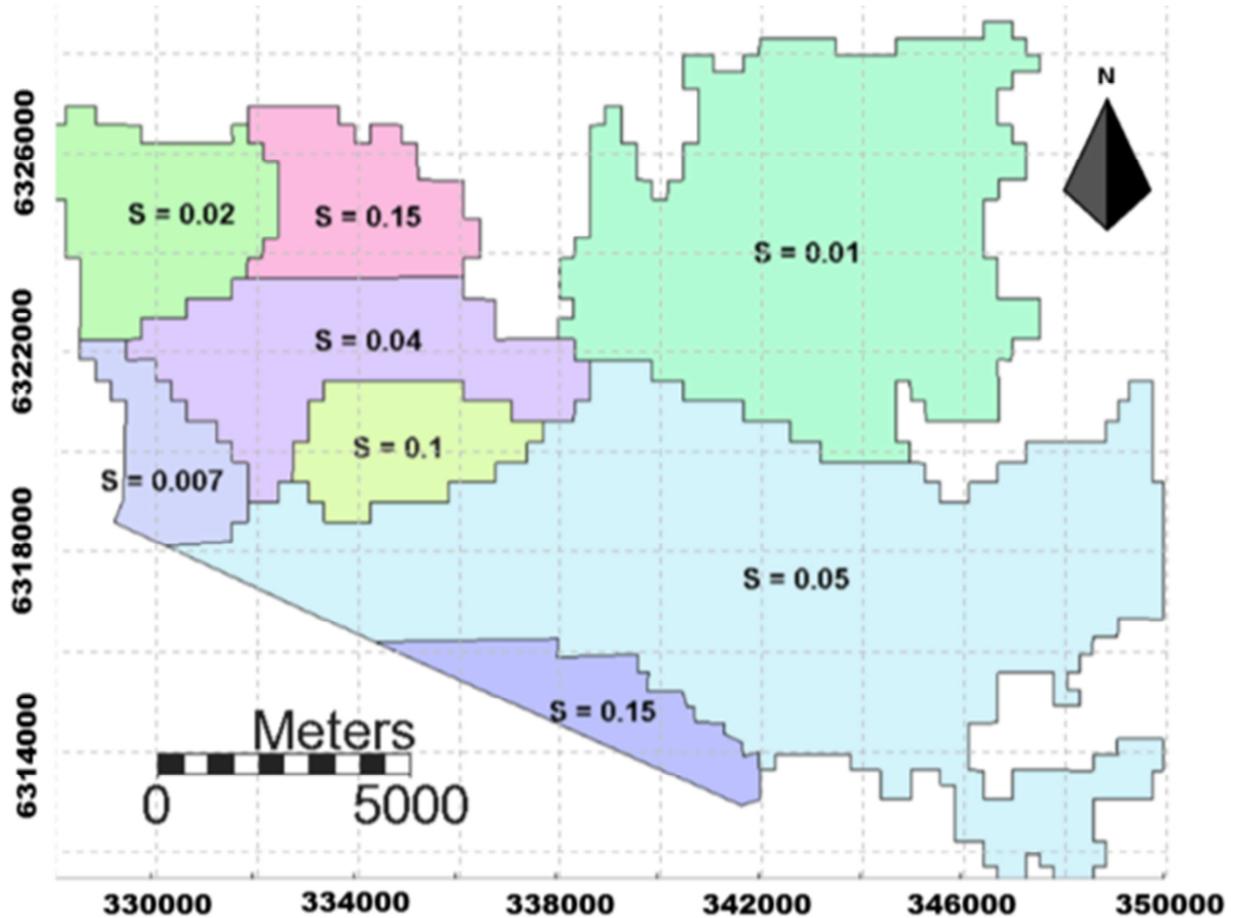


Figura 4.10: Zonas con los valores del coeficiente de almacenamiento asignado al modelo Colina-Lampa.

4.5.8 Condiciones de borde

Las condiciones de borde están separadas principalmente en tres: condición de borde de nivel variable sur, condición de borde de nivel variable nororiente y condición de no flujo. La explicación de cada una de ellas junto con las condiciones tipo río y dren, siguen a continuación:

Condición de borde de nivel variable sur: Esta condición está representada por 57 celdas de nivel variable, ubicadas en la parte sur del modelo. Cada una de estas celdas posee la información de nivel para ese punto en el espacio y tiempo del modelo Maipo-Mapocho. La ubicación de dichas celdas se puede observar en la Figura 4.11 y su comportamiento en el tiempo en la Figura 4.12.

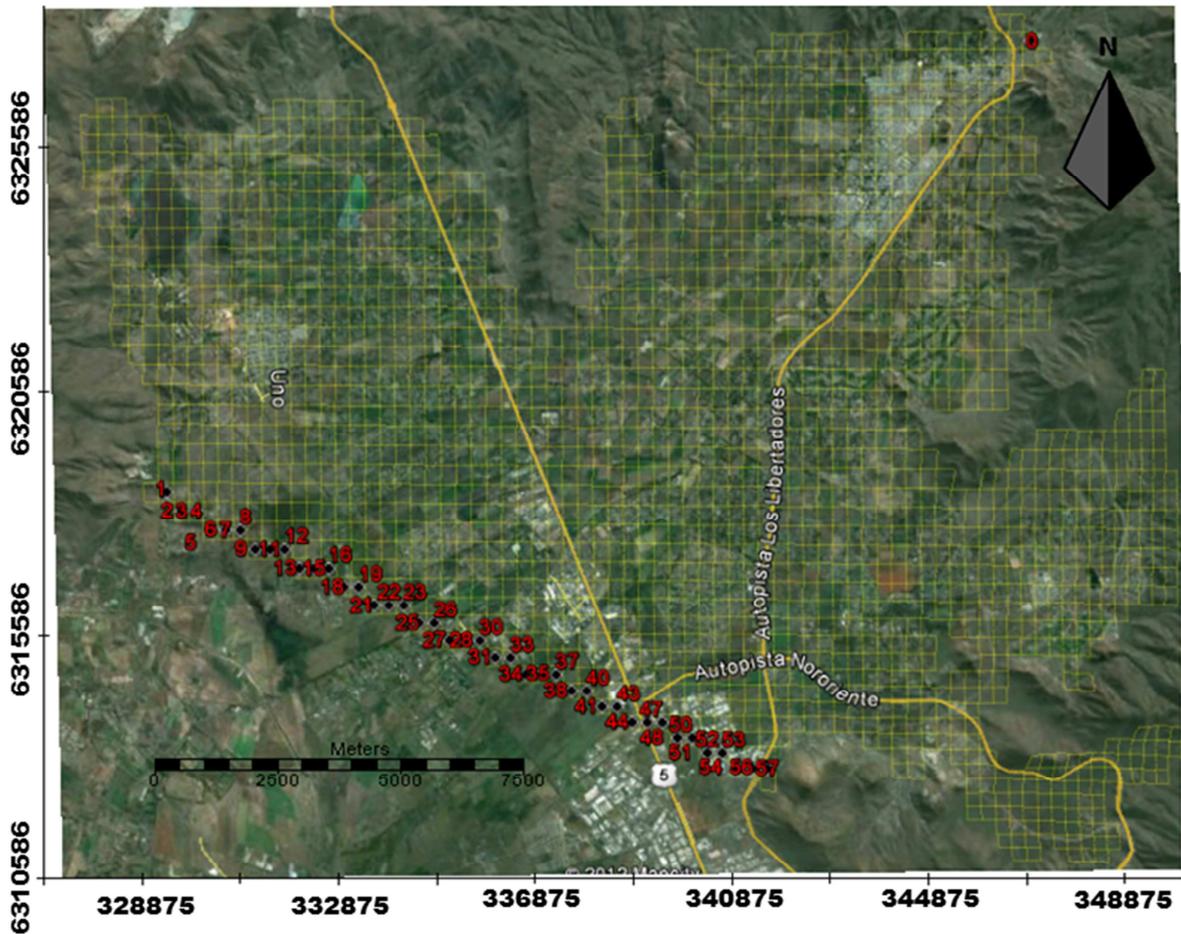


Figura 4.11: Ubicación de las celdas de nivel variable, que representan la condición de borde sur y nororiente del modelo Colina-Lampa.

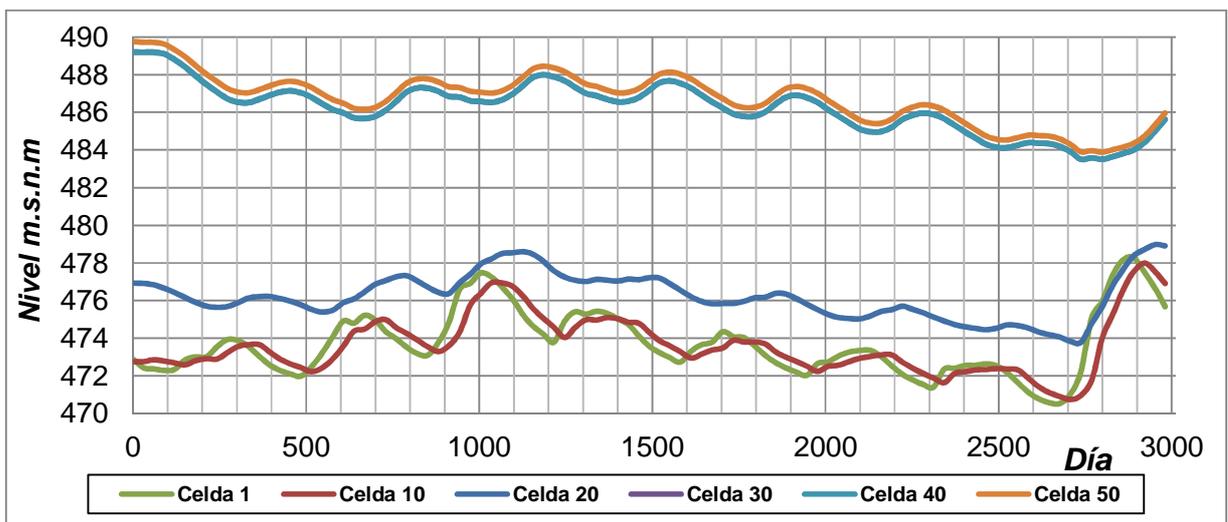


Figura 4.12: Niveles de algunas de las celdas de nivel variable, que representan la condición de borde sur del modelo Colina-Lampa.

Condición de borde de nivel variable nororiente: Esta condición se ubica en la cabecera del acuífero, en el extremo nororiente de este. Está representada por una única celda de nivel

variable entre 645 y 650 m.s.n.m. Su ubicación se puede observar como la celda número 0 en la parte superior derecha de la Figura 4.11.

Condición de borde de no flujo: Los contactos roca-relleno, incluyendo los cerros en el centro del modelo, se consideran como zonas de no flujo las cuales se representan como celdas inactivas.

Condiciones tipo río: La quebrada de Colina es representada por celdas de tipo río las cuales son capaces de entregar o extraer agua al sistema dependiendo del nivel de agua del río y del nivel piezométrico del acuífero. Para este modelo, el nivel de agua y el del lecho del río no varían y están a 5 y 10 m bajo la cota de terreno respectivamente. Además, el valor de la conductancia para cada una de estas celdas es de $500 \text{ m}^2/\text{d}$.

Condición tipo dren: Existen tres celdas en el modelo tipo dren las cuales se usan para representar sectores de afloramiento. Cada una de estas celdas está definida por su elevación, que determina la cantidad de agua en la celda, y por su conductancia ($500 \text{ m}^2/\text{d}$), que determina la cantidad de agua extraída desde el subsuelo en función del nivel de la napa.

4.5.9 Condición inicial

MODFLOW necesita la definición del nivel freático inicial para todas las celdas del modelo. Por lo tanto, a partir del modelo Maipo-Mapocho, se definieron los valores iniciales para cada celda para el 1 de enero de 1990, que corresponde al inicio del periodo de modelación. En la Figura 4.13 se muestran las equipotenciales para dicha fecha. Los detalles del procedimiento que se usó para estimar la condición inicial se presentan en el informe de Ayala y Cabrera, 2000.

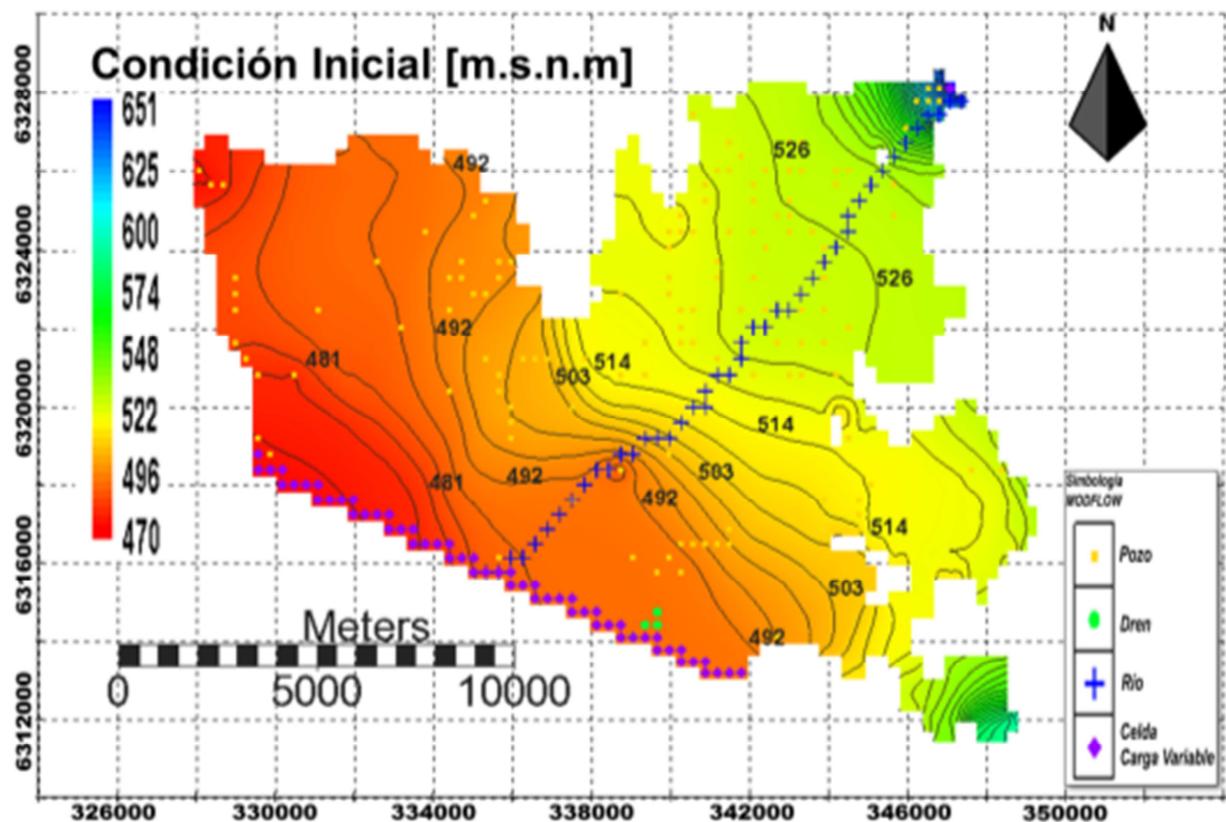


Figura 4.13: Equipotenciales para el 1 de enero de 1990, ocupadas como condición inicial en el modelo Colina-Lampa.

4.5.10 Recargas y descargas

Las recargas incluidas en el modelo corresponden a aportes de agua debidas al riego, la infiltración desde canales, la recarga desde los cauces naturales, las pérdidas de la red de agua potable y la infiltración de precipitaciones.

Los valores de la recarga usados en el modelo Colina-Lampa corresponden a los asumidos por el modelo Maipo-Mapocho para los sectores de Colina y Lampa. Estos corresponden a las zonas: 2, 27, 49, 54 y 55. Para las sectores donde se encuentran la laguna Batuco y los cerros, la recarga es de 0 mm/año.

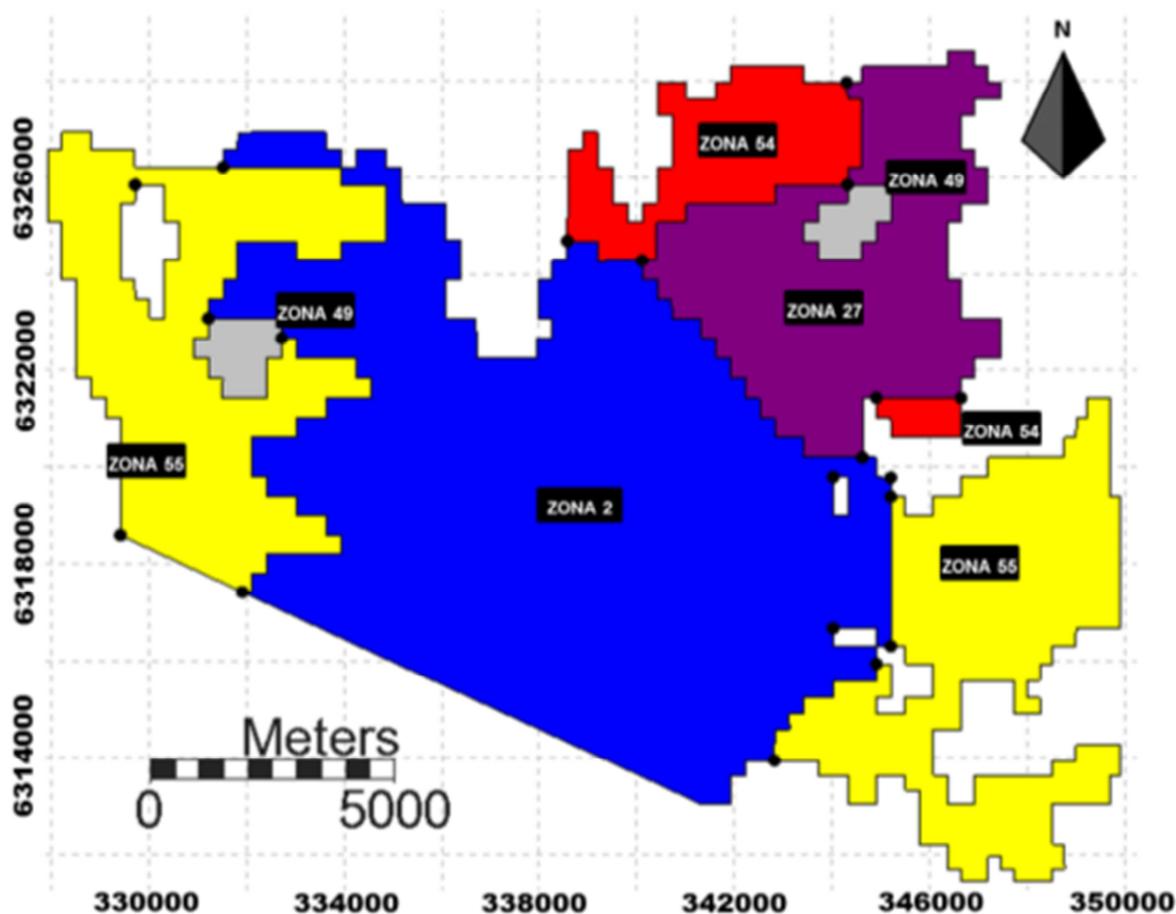


Figura 4.14: Ubicación de las zonas de recarga para el modelo Colina-Lampa.

Para las zonas 2 y 27 pertenecientes a los sectores de riego definidos en el modelo superficial de los ríos Maipo y Mapocho (Ayala y Cabrera, 2000) las recargas fueron obtenidas directamente de dicho modelo e incluyen las recargas de riego, las pérdidas desde los canales y la infiltración de las precipitaciones.

Los centros urbanos de las comunas de Colina y Lampa son representados por las zona 49, cuyo valor de recarga se determinó a través del modelo superficial, considerando las infiltraciones provocadas por la red de agua potable y las precipitaciones. Para las zonas 54 y 55, que no se ubican en ningún sector urbano ni de riego, se determinó una recarga producto de la infiltración de precipitaciones únicamente (Ayala y Cabrera, 2000). Los valores máximos, mínimos y promedio para cada una de las zonas nombradas anteriormente aparecen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores mínimo, máximos y promedio para cada una de las zonas de recarga del modelo Colina-Lampa (Fuente: Ayala y Cabrera, 2000).

Zona	Recarga Mínima mm/año	Recarga Máxima mm/año	Recarga Media mm/año
2	35	1244	508
27	14	2366	920
49	97	799	179
54	0	476	49
55	0	615	64

La variación en el tiempo de la recarga para las distintas zonas, se puede observar en la Figura 4.15. Las zonas 2 y 27 tienen los mayores valores, debido al riego agrícola en ellas. En la misma figura también se puede notar la variación estacional de estos valores.

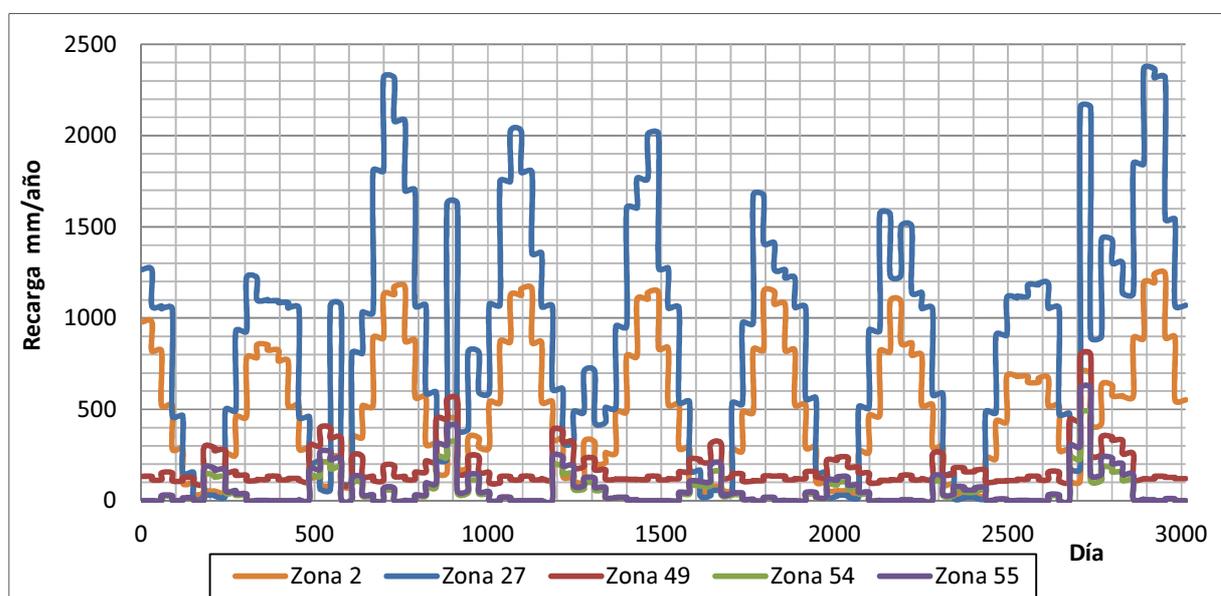


Figura 4.15: Valores de la recarga para distintas zonas del modelo Colina-Lampa.

Las principales descargas del modelo están representadas por los bombeos desde pozos y norias, por los afloramientos naturales y por el flujo que sale por la condición de borde sur. Los caudales de extracción de los pozos y norias de la zona fueron determinados a partir de las encuestas de terreno y de la información de producciones de las diferentes empresas que usan agua subterránea. La información fue rellenada e interpolada cuando no era completa. Además, en la parte baja de la Quebrada de Colina existen afloramientos que son calculados con el módulo *River* de MODFLOW. La cantidad total de pozos para el Modelo Colina-Lampa es de 167.

4.5.11 Resultados de modelo en situación base

4.5.11.1 Entradas de flujo al modelo

La entrada de flujo desde el acuífero Chacabuco, en la zona de Peldehue, hacia el modelo Colina-Lampa es representada por una única celda de carga variable en el extremo nororiente del modelo. Esta celda provoca un flujo de entrada al modelo entre los 1,0 y 1,2 m³/s, durante los 8 años de modelación. La variación del nivel piezométrico de la celda de carga variable junto

a la variación del caudal de entrada que ingresa a la cabecera del acuífero se muestra en la Figura 4.16 y en la Figura 4.17:

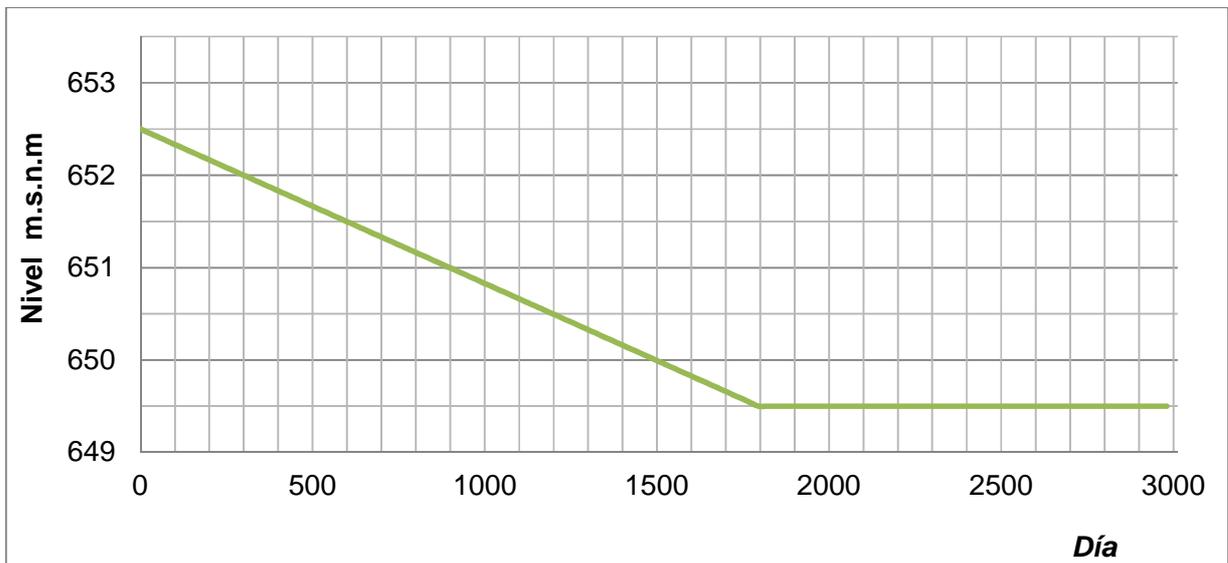


Figura 4.16: Nivel piezométrico de la celda de carga variable ubicada en la cabecera del modelo Colina-Lampa.

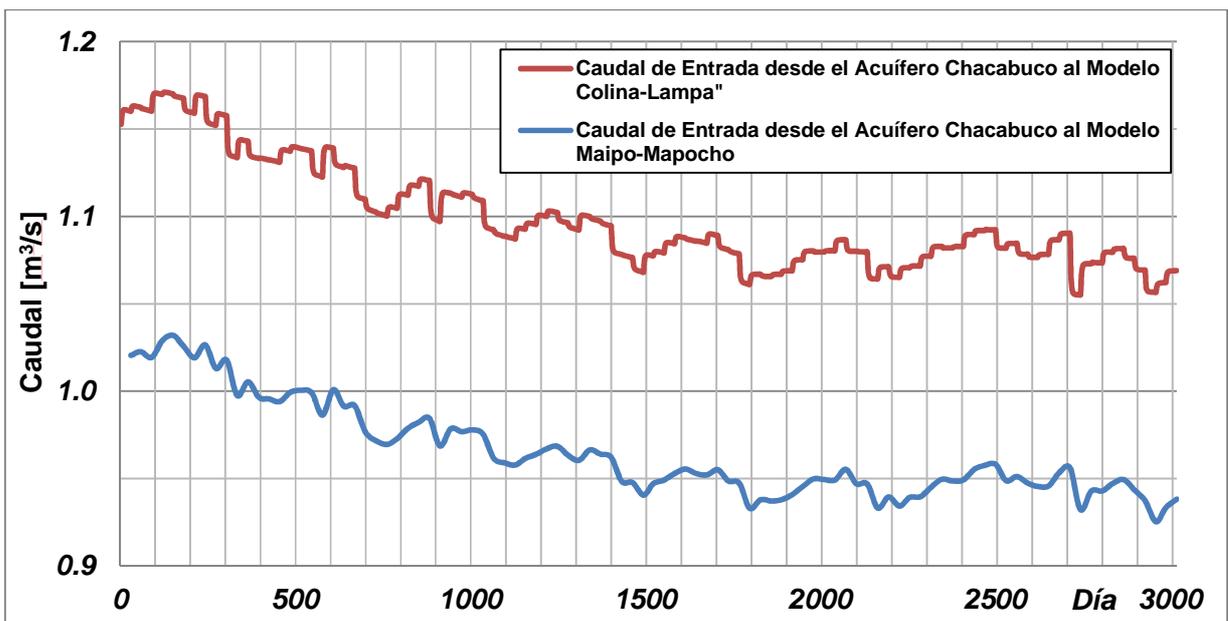


Figura 4.17: Caudal de entrada al modelo Colina-Lampa, desde el modelo Chacabuco, en comparación con el modelo Maipo-Mapocho.

El flujo de entrada subterráneo del modelo Colina-Lampa es un 14% mayor respecto de la entrada que ocurre en el modelo Maipo-Mapocho en la misma zona. A pesar del problema anterior, se respetarán de todos modos los niveles asignados a la celda de carga variable de la cabecera del modelo, para que ambos modelos tengan la misma condición de borde.

La recarga alcanza un valor promedio de 2.7 m³/s. El valor de la recarga en el tiempo se muestra en la Figura 4.18:

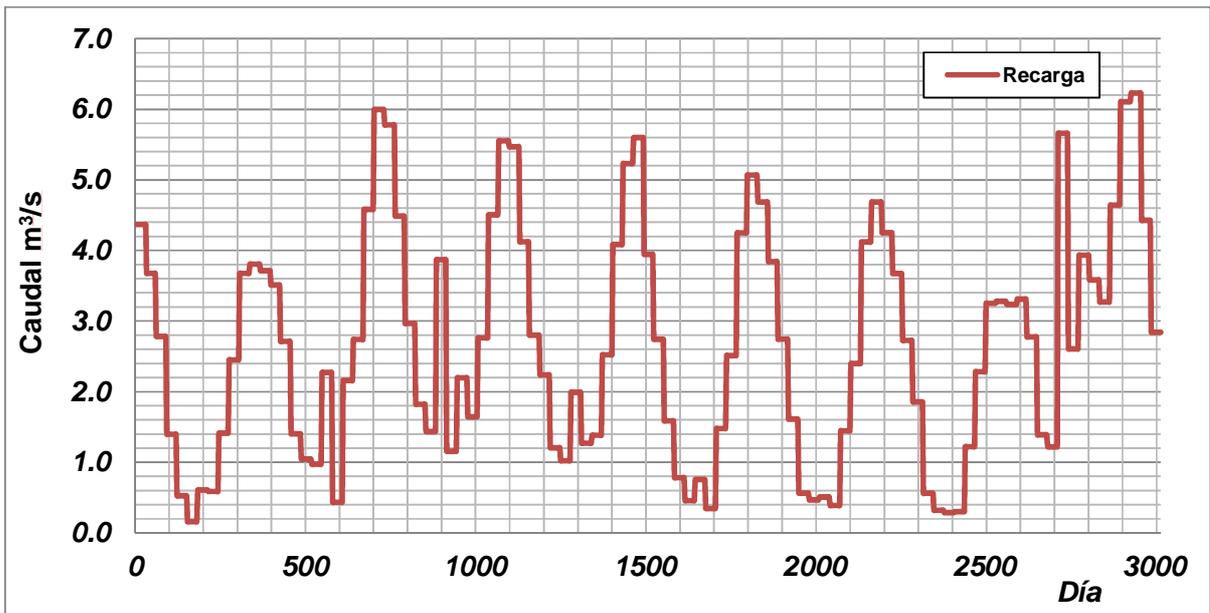


Figura 4.18: Caudal de entrada al modelo Colina-Lampa desde recarga.

También existen recargas que provienen de las celdas tipo río. Las entradas desde estas celdas son constantes durante la mayor parte del tiempo de modelación, ya que el nivel freático no supera el nivel de agua en el río, por lo que el caudal de entrada hacia el acuífero se mantiene constante. Las celdas tipo río más cercanas a la condición de borde sur son una excepción, puesto que en algunos periodos de tiempo estas extraen agua desde el acuífero (Figura 4.19).

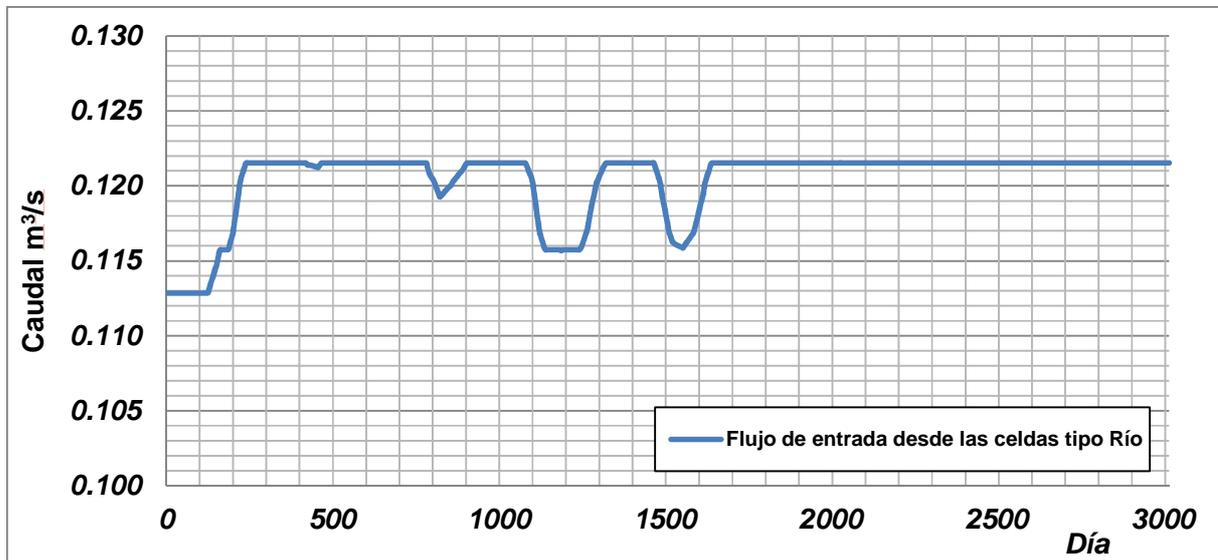


Figura 4.19: Caudal de entrada desde el Estero Colina al modelo Colina-Lampa, representado por celdas tipo río.

4.5.11.2 Salidas de flujo desde el modelo

Las salidas del modelo corresponden a los bombeos realizados por los pozos, las salidas de flujo subterráneo por la condición de borde de carga variable en la zona sur, las extracciones desde algunas celdas tipo río y tipo dren. Una comparación de la variación temporal del caudal

de las extracciones correspondientes a los pozos de bombeo en los modelos Colina-Lampa y Maipo-Mapocho se muestra en la Figura 4.20.

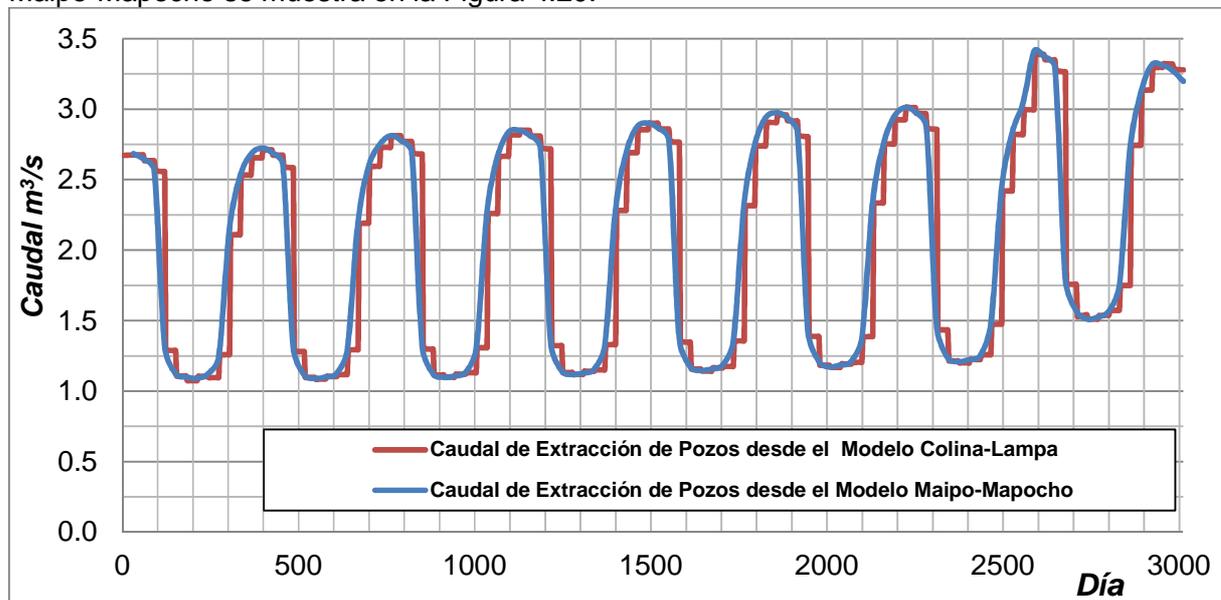


Figura 4.20: Extracciones de pozos desde el modelo Colina-Lampa.

Otras salidas están representadas por el agua que sale por las celdas de carga variable del sector sur, que representan una de las condiciones de borde. Los valores de estas salidas se muestran en la Figura 4.21. Se puede observar que hay oscilaciones que no existen en el modelo regional debido a los cambios bruscos en los niveles provocados en las celdas de carga variable en el límite sur del modelo.

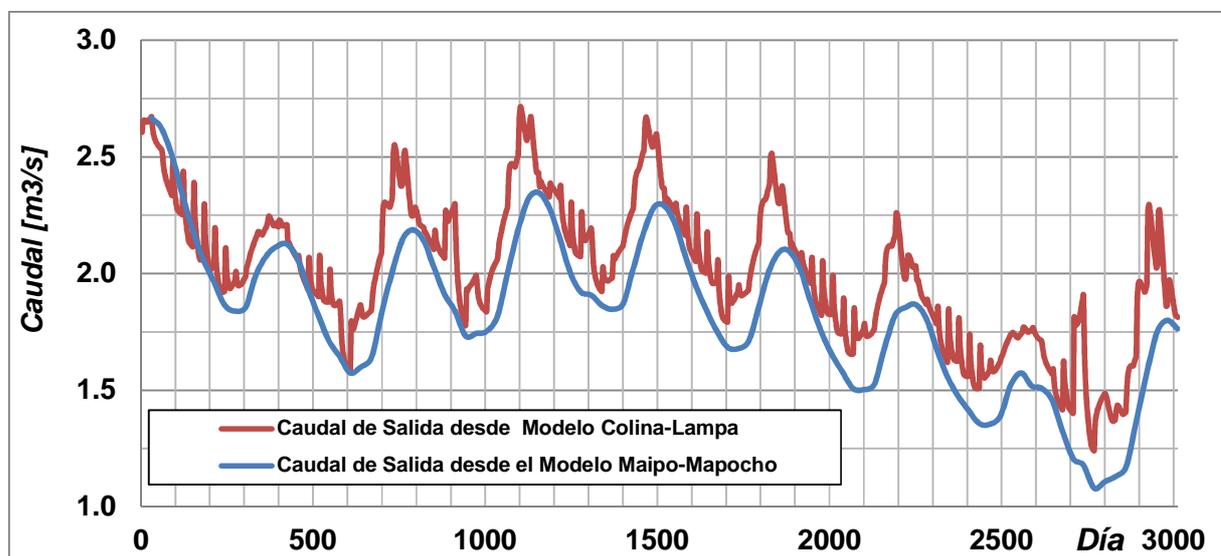


Figura 4.21: Caudal de salida desde el modelo Colina-Lampa desde la condición de borde sur.

El caudal de salida desde las celdas tipo río y las celdas tipo dren, son inferiores al 1% respecto de las salidas desde la condición de borde sur o las extracciones desde los pozos. Además, se puede observar en la Figura 4.22 que en la mayor parte del tiempo las salidas, desde estos puntos, son iguales a cero.

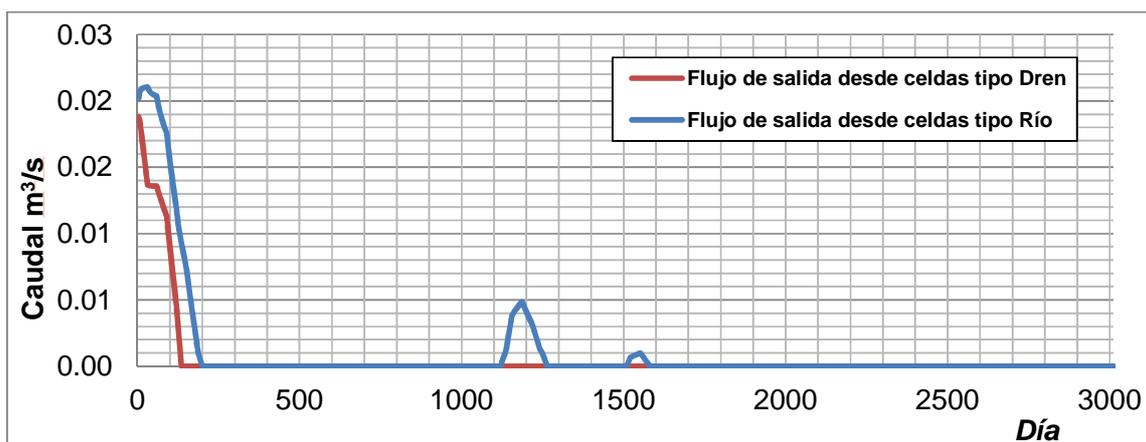


Figura 4.22: Caudal de salida desde las celdas tipo dren y las celdas tipo río.

En las figuras anteriores se observan diferencias debido a que en GMS los bombeos, las recargas y las condiciones de borde se deben especificar de forma escalonada para cada uno de los períodos de modelación, no así en Visual MODFLOW.

4.5.12 Situación base

La situación base, trata de emular al modelo regional Maipo-Mapocho, en las comunas de Colina y Lampa. Por lo anterior, en la mayoría de los gráficos de esta sección Figura 4.15 se comparan los caudales del modelo local con el regional.

Finalizando la situación base, el resumen de los promedios de los flujos de entrada y de salida, junto con la variación de almacenamiento en un modelo sin refinar, para los 3012 días de modelación se muestra en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Balance hídrico global para el periodo de modelación (1990-1998).

FLUJOS DE ENTRADA		m³/s
Condición de nivel aguas arriba		+1,099
Condición de nivel aguas abajo		+0,044
Recarga de riego, canales y precipitaciones		+2,667
Recarga desde cauces		+0,120
Entrada de flujo desde almacenamiento		+0,733
Total flujo de entrada		+4,665
FLUJOS DE SALIDA		m³/s
Condición de nivel de aguas abajo		-2,010
Pozos de bombeo		-2,039
Recuperaciones a los cauces		-0,001
Recuperaciones a los drenes		-0,001
Salidas de flujo hacia almacenamiento		-0,614
Total flujo de salida		-4,655

5. MODELACIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFERO MEDIANTE POZOS

5.1 Generalidades de la aplicación

Los escenarios de modelación consisten en ocupar los pozos 4 y 6 como puntos de infiltración, y el pozo 5 como un pozo de observación. La infiltración será de forma gravitacional, sin la existencia de una bomba de por medio. Ambos pozos (P4 y P6) funcionan de forma alternada, un pozo está lleno durante un mes y el otro está vacío, al siguiente mes se alterna la situación.

Para ver el comportamiento del acuífero se usarán dos pozos de observación, uno a 1 km aguas arriba y otro a 1 km aguas abajo. La ubicación de los pozos se puede ver en la Figura 5.1.



Figura 5.1: Ubicación de los pozos de infiltración P4 y P6, junto los tres pozos de observación.

Diferentes escenarios de modelación

Para estudiar los efectos del sistema de recarga se asumieron dos escenarios de modelación, uno donde los pozos se modelan como niveles constantes y otro donde se modelan como niveles entrantes al sistema, en ambas situaciones el caudal de infiltración es prácticamente idéntico.

Escenario A:

Los pozos 4 y 6 se modelan como celdas de carga variable durante los meses que estén en funcionamiento. En las celdas que representan los pozos y las celdas directamente aledañas a estos, se cambió la conductividad hidráulica para que la transmisividad de estas sea equivalente a la que representa un pozo con cribas. Para lo anterior, se muestra la siguiente expresión de la transmisividad hidráulica:

$$T = K \cdot b \quad (5.1)$$

Donde:

T = Transmisividad en m²/día.

b = Espesor del acuífero en m.

Se debe cumplir que la transmisividad de la celda que representa al pozo sea equivalente a la que provocaría un pozo con cribas de 45 m, para lo cual la conductividad hidráulica en ella debe ser modificada mediante el siguiente cálculo:

$$T = 4,32\text{m/d} \cdot 45\text{m} \quad (5.2)$$

$$T = K_{\text{pozo}} \cdot 300\text{m} \quad (5.3)$$

$$K_{\text{pozo}} = 4,32\text{m/d} \cdot 45\text{m}/300\text{m} = 0,65\text{m/d} \quad (5.4)$$

Además, se usan tres valores distintos de conductividad hidráulica para la zona aledaña a los pozos. Los valores de K asignados a la zona se explican a continuación:

- **K₁ = 4,32 m/día.** Es el valor asignado por el modelo hidrogeológico de Ayala y Cabrera del año 2000 para esta zona. La conductividad en la zona de los pozos ajustadas para representar las cribas es de **K_{pozo1} = 0,65 m/día.**
- **K₂ = 1,7 m/día.** Este valor se obtuvo en las pruebas de "Slug Test" hechas para el pozo 6 durante noviembre de 2011. Usando la expresión para obtener la conductividad en la zona de los pozos de infiltración obtenemos, **K_{pozo2} = 0,25 m/día.**
- **K₃ = 0,5 m/día.** Este valor fue obtenido para la zona mediante una prueba de bombeo realizada en 1995 para el pozo 5. Dado lo anterior, la conductividad en la zona de infiltración es de **K_{pozo3} = 0,08 m/día.**

Escenario B:

Los Pozos 4 y 6 inyectan los caudales obtenidos en el escenario A, para los mismos periodos de tiempo. El objetivo es observar si el comportamiento del flujo es similar al escenario anterior y además observar si hay un aumento en el nivel piezométrico en el pozo que sobrepase la cota de terreno. Si lo anterior ocurre significa que el escenario "A" no es adecuado para representar los pozos de infiltración.

5.2 Tasas de infiltración preliminares obtenidas con el modelo

En el escenario de modelación "A", los caudales de infiltración obtenidos para las tres distintas conductividades aplicadas a los pozos P4 y P6, se muestran en las figuras 5.2 y 5.3. Las variaciones en los caudales se deben a la variación de los niveles en el acuífero debido a los cambios en los bombeos, las recargas y las condiciones de borde del sistema.

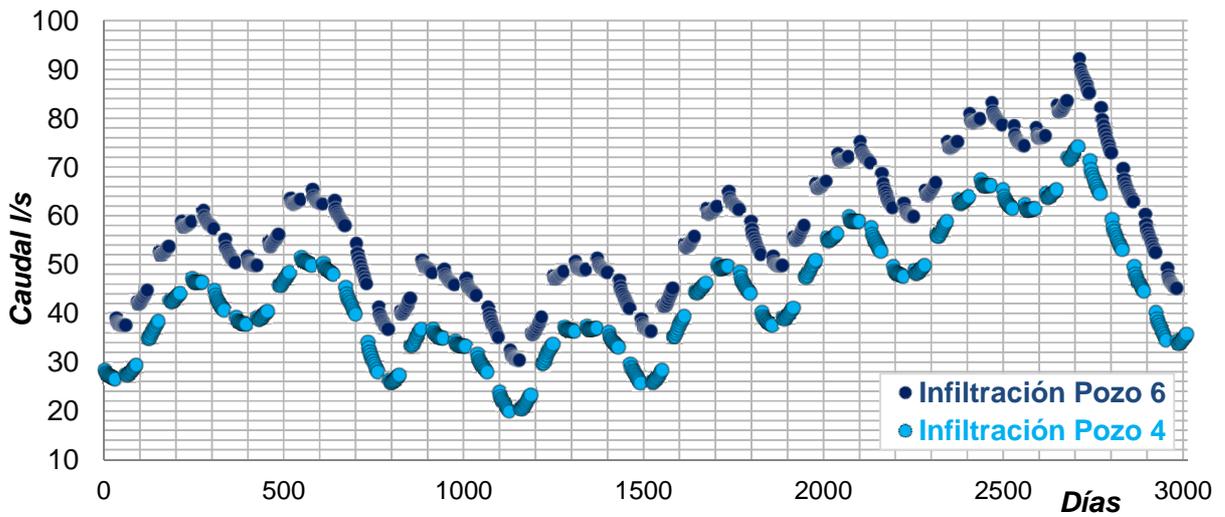


Figura 5.2: Caudal de infiltración para los pozos 4 y 6, representados como celdas de carga variable cuando la conductividad en ellos es de 0,65 m/d.

Para una conductividad de 0,65 m/d, el agua infiltrada oscila entre los 22 y 73 l/s para el pozo 4 y entre 32 y 92 l/s para el pozo 6.

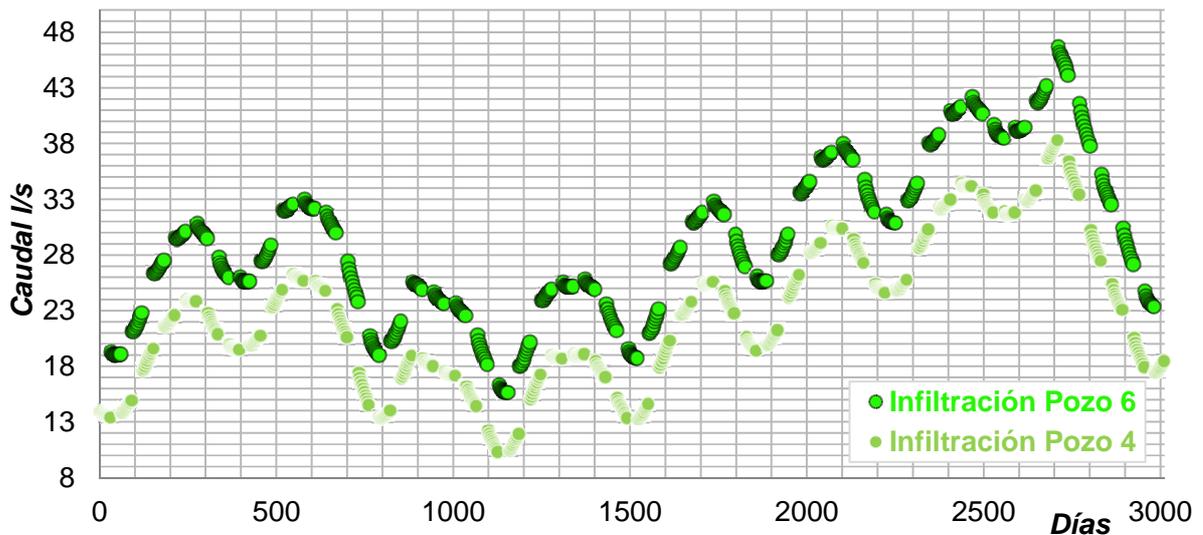


Figura 5.3: Caudal de infiltración para los pozos de infiltración 4 y 6, representados como celdas de carga variable cuando la conductividad en ellos es de 0,25 m/d.

En la figura 5.3, para una conductividad de 0,25 m/día, los valores máximos y mínimos son los siguientes: 11 y 38 l/s para el pozo 4 y 16 y 47 l/s para el pozo 6.

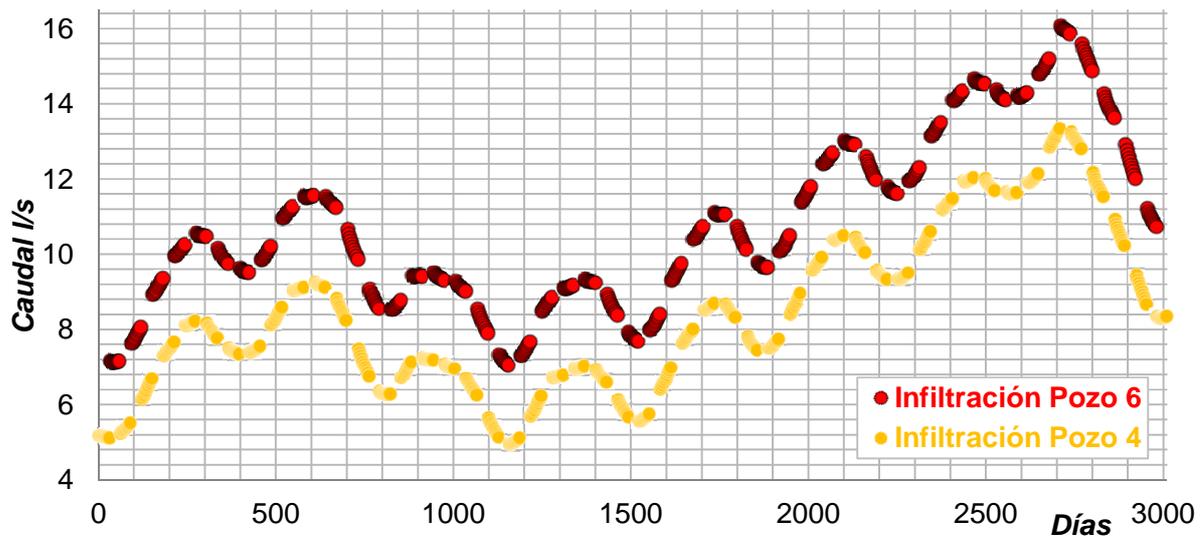


Figura 5.4: Caudal de infiltración para los pozos de 4 y 6, representados como celdas de carga variable cuando la conductividad en ellos es de 0,08 m/d.

Para la menor conductividad (0,05 m/d), se alcanzan caudales entre 7 y 16 l/s para el pozo 6 y entre 5 y 13 l/s para el pozo 4. Se observa que el caudal de infiltración del pozo 4 es menor, esto se debe a que el nivel de la cota de terreno de ese pozo es de 526 m.s.n.m, dos metros menor a la del pozo 6 (528 m.s.n.m). Por lo anterior, el pozo 6 posee alrededor de 2 metros adicionales de carga para realizar la recarga gravitacional.

Con los tres gráficos anteriores, si extraemos el tiempo y creamos series que involucren el ascenso en el nivel del pozo con respecto al nivel freático normal, junto con el caudal que ese ascenso provoca al infiltrar en el acuífero, obtenemos la Figura 5.5. Esta de cierta forma representa el rendimiento del pozo a la infiltración gravitacional, para distintas conductividades hidráulicas. Para el valor de conductividad hidráulica igual a 1,7 m/d se puede observar que caudal de infiltración es equivalente al caudal de bombeo para el mismo descenso o ascenso de nivel de agua en el pozo. También se observa que una variación desde 1,7 a 4,3 m/d en la conductividad puede aumentar al doble el caudal que se puede infiltrar de forma gravitacional, por lo tanto se debe ser cuidadoso en la elección de este valor para la modelación.

Las discontinuidades de los puntos en las curvas de la Figura 5.5 se deben a, que para un mismo ascenso de nivel, no ocurre la misma infiltración. Dentro del período de modelación (8 años) se dio el mismo ascenso de nivel en el pozo en distintos momentos, pero los niveles en las celdas aledañas pueden ser distintos debido a que la recarga en el sistema junto con los bombeos y las condiciones de borde no son las mismas.

También se puede observar que para una mayor conductividad hidráulica la respuesta a un ascenso dado puede entregar caudales muy distintos. Por ejemplo, para un ascenso de nivel en el pozo de 14 m, el caudal que se infiltra está entre 45 y 62 l/s, o sea, una diferencia del 37% para una conductividad de 4,3 m/d. En cambio, para la conductividad de 0.6 m/d, la infiltración puede variar entre 8 y 10 l/s, presentando una diferencia del 25%. Además, para esa conductividad se puede observar que los puntos tienden a estar más agrupados, es decir, que para un mismo ascenso los caudales de infiltración son similares. Por otra parte, para una mayor conductividad, la infiltración esperada para un mismo ascenso tiene una mayor variación.

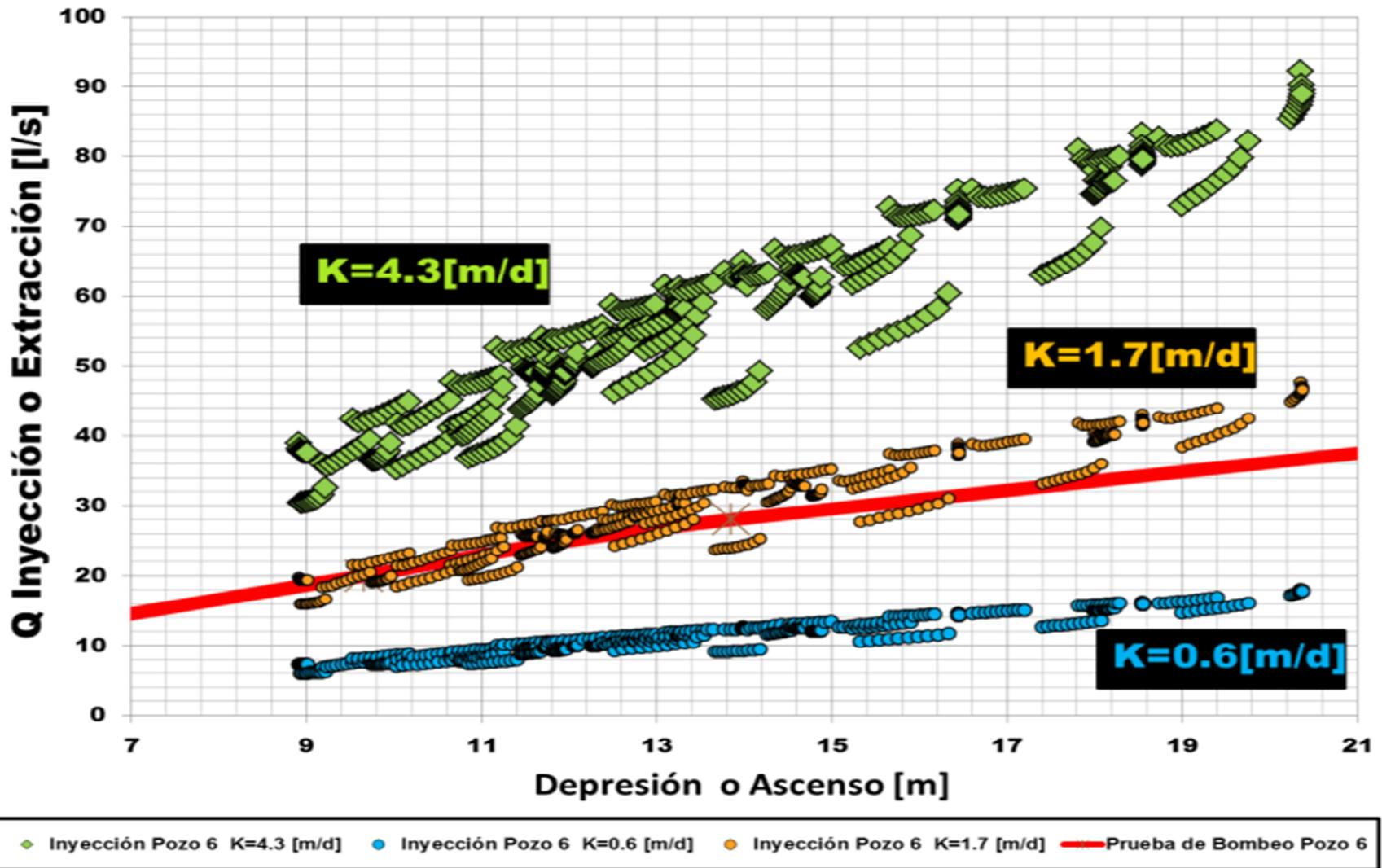


Figura 5.5: Caudales de infiltración obtenidos en función del ascenso en el pozo 6, para distintas conductividades hidráulicas en la zona aledaña a este.

Pozos de observación

Se usaron tres pozos de observación cercanos a los pozos donde se realiza la infiltración. Estos pozos se utilizan para analizar dos variables del sistema:

- A. Niveles en los pozos de observación en la condición base, sin operaciones de recarga.
- B. Niveles en los tres pozos de observación cuando la infiltración se realiza en los pozos 4 y 6 mediante celdas de carga variable, funcionando de forma alternada mensualmente. Estos son los resultados del escenario de la modelación "A" con un valor de $K=4,32$ m/d en la zona de la realización del proyecto.

Pozo de Observación Norte

El comportamiento del nivel en el pozo norte, 1 km aguas arriba de la zona de infiltración, para la situación sin recarga e infiltración mediante celdas de carga variable es bastante similar. La respuesta a la recarga es en promedio 10 cm mayor, alcanzando un valor máximo de sólo 16 cm.

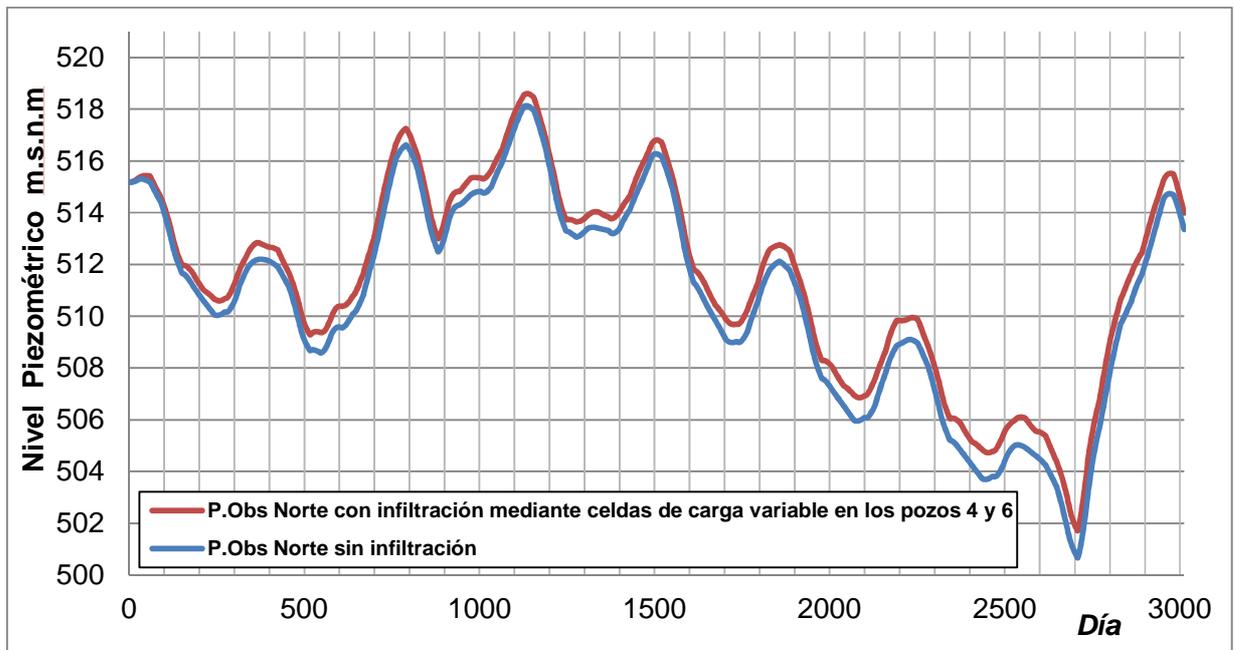


Figura 5.6: Nivel piezométrico en el pozo de observación norte para los dos escenarios de modelación.

Pozo de Observación 5

En la figura 5.7 se puede observar la respuesta de este pozo en el escenario con recarga, alcanzando un aumento máximo de 44 cm y un incremento promedio de 25 cm en el nivel.

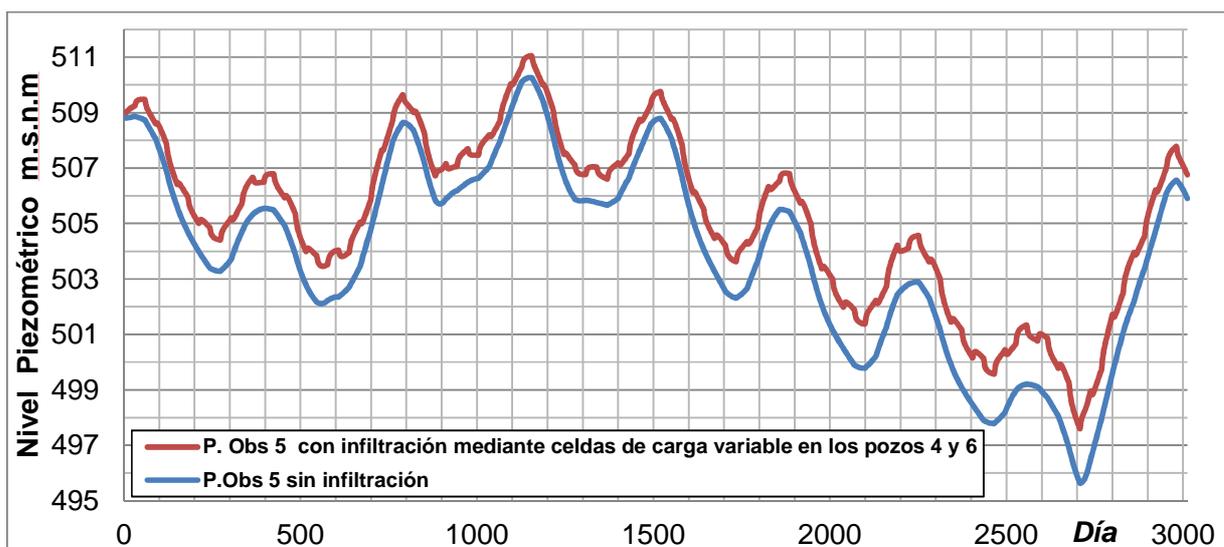


Figura 5.7: Nivel piezométrico en el pozo de observación 5 para los dos escenarios de modelación.

Pozo de Observación Sur

En la figura 5.8, el aumento de nivel del pozo sur en el escenario con recarga, tiene un máximo de 16 cm y un promedio de 10 cm en comparación al escenario sin obras de infiltración.

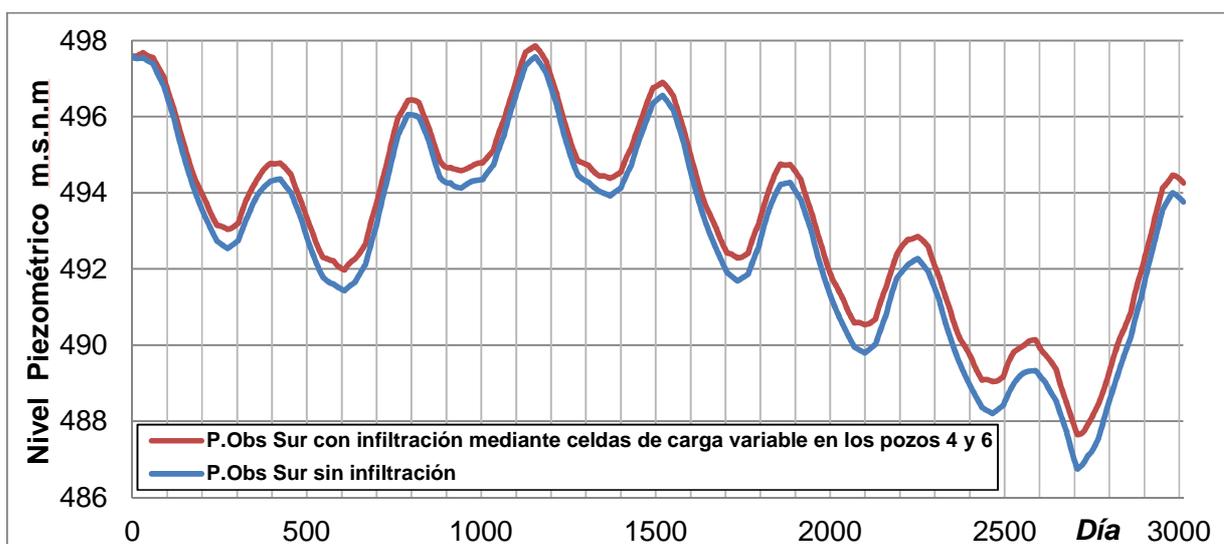


Figura 5.8: Nivel piezométrico en el pozo de observación sur para los dos escenarios de modelación.

Escenario B

Para el escenario B, los niveles dinámicos que alcanzan los pozos de inyección se pueden obtener al colocar dos pozos de observación en los puntos del pozo 4 y 6. Los resultados de los niveles dinámicos para los pozos 4 y 6 se muestran en las Figura 5.9 y Figura 5.10. En ellas se puede observar que el nivel de la cota de terreno es sobrepasada por un máximo de 94 cm para el pozo 6 y de 77 cm para el pozo 4. Con esto se estima que los caudales a infiltrar deben ser menores para que el nivel dinámico de los pozos no supere el nivel de la superficie.

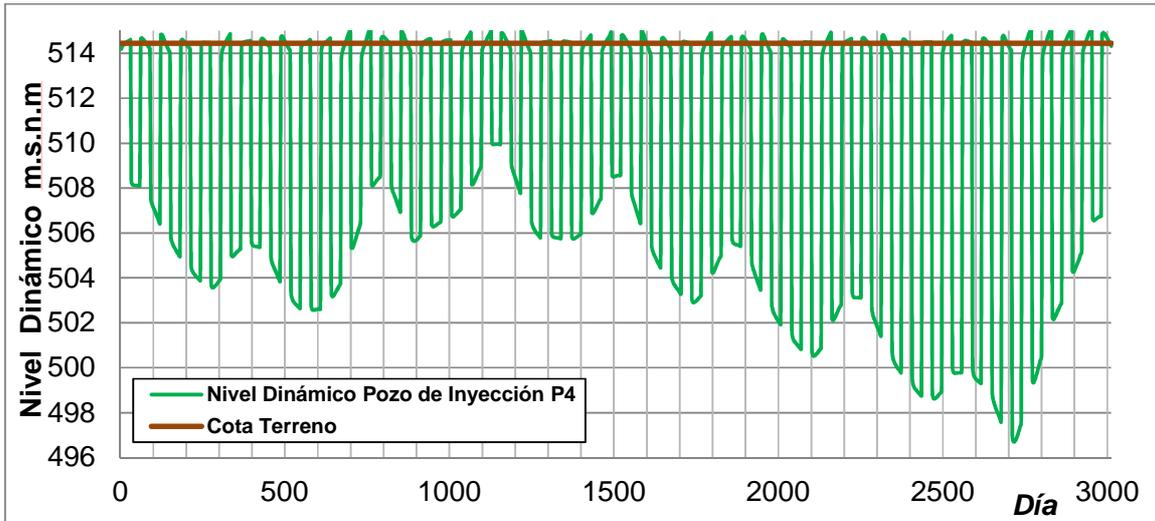


Figura 5.9: Nivel dinámico alcanzado por el pozo de inyección 4, cuando se aplican los caudales de infiltración obtenidos en el escenario “A”.

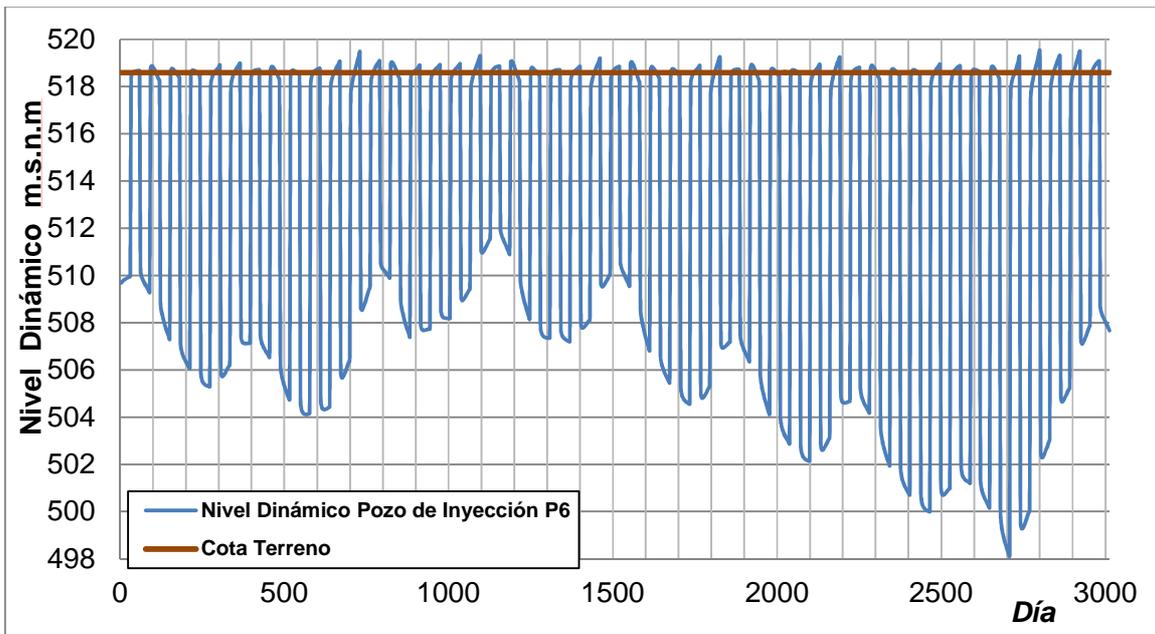


Figura 5.10: Nivel dinámico alcanzado por el pozo de inyección 6, cuando se aplican los caudales de infiltración obtenidos en el escenario “A”.

5.3 Comportamiento del flujo subterráneo

La comparación de los niveles piezométricos con y sin obras de recarga se puede ver en las Figura 5.11 y Figura 5.12. En ellas se observa que la variación de niveles globales entre los escenarios con y sin recarga es leve o casi nula.

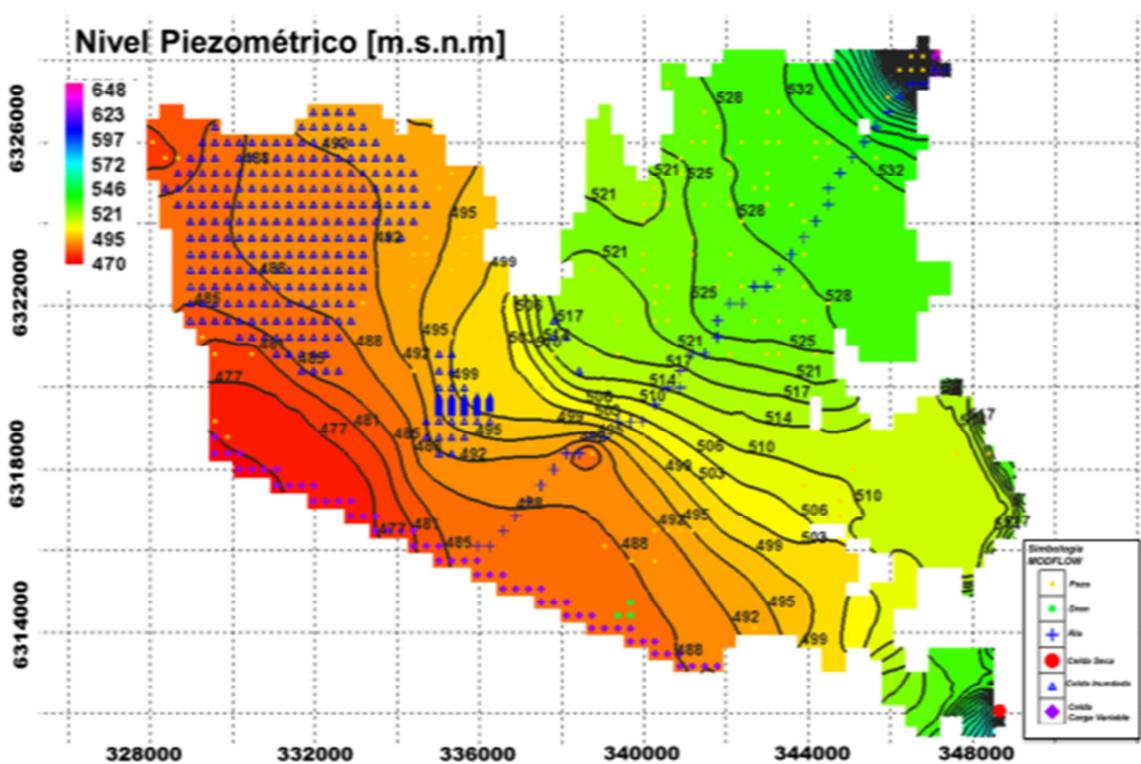


Figura 5.11: Niveles piezométricos para el modelo Colina-Lampa para el día 1500 sin recarga de pozos.

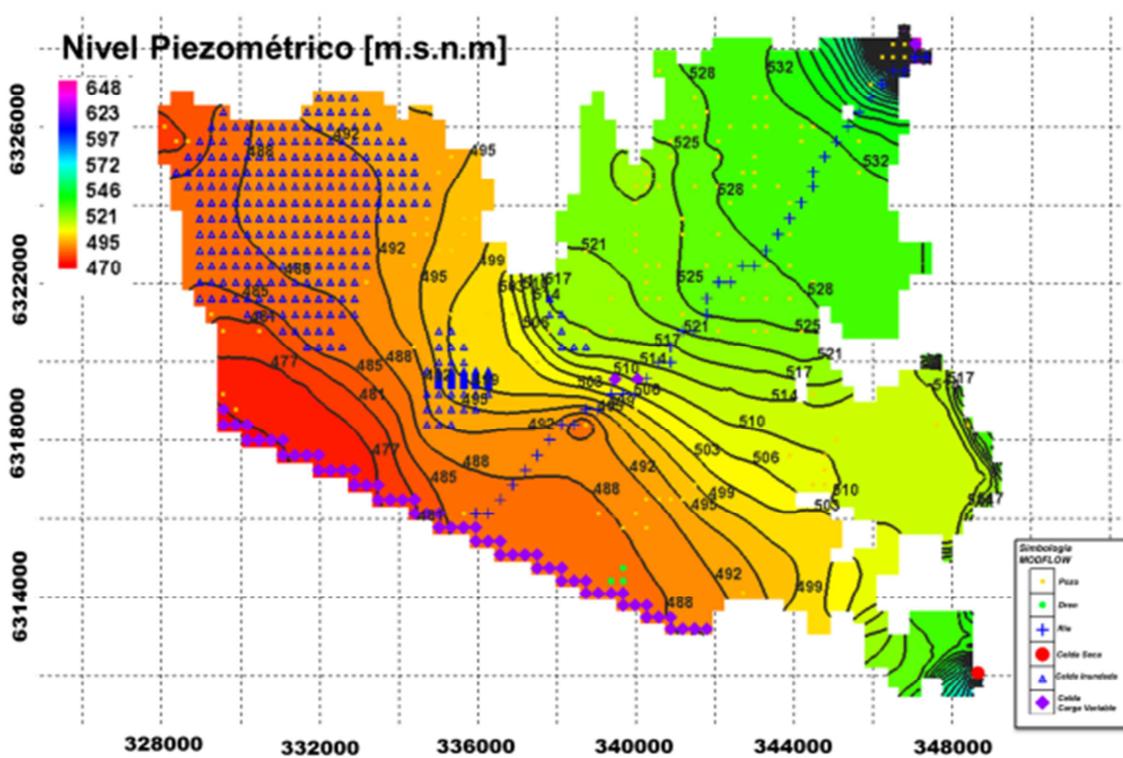


Figura 5.12: Niveles piezométricos para el modelo Colina-Lampa para el día 1500 con recarga alternada en los pozos 4 y 6, y una conductividad en ellos de 0,25 m/d.

5.4 Balance de masa después de la recarga

El resumen de los promedios de los flujos de entrada y de salida, junto con la variación de almacenamiento para los 3012 días de modelación con la aplicación de la recarga alternada mediante pozos gravitacionales, se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Balance hídrico global para el periodo de modelación con recarga (1990-1998).

FLUJOS DE ENTRADA	Sin Recarga	Con Recarga $K_{\text{pozo}} 0.65$ m/día	Con Recarga $K_{\text{pozo}} 0.25$ m/día
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Condición de nivel aguas arriba	+1,100	+1,099	+1,098
Condición de nivel aguas abajo	+0,341	+0,339	+0,342
Infiltración desde pozos	+0,000	+0,051	+0,026
Recarga de riego, canales y precipitaciones	+2,673	+2,673	+2,673
Recarga desde cauces	+0,120	+0,120	+0,120
Entrada de flujo desde almacenamiento	+0,737	+0,733	+0,734
Total flujo de entrada	+4,971	+5,015	+4,993
FLUJOS DE SALIDA	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Condición de nivel de aguas abajo	-2,315	-2,354	-2,335
Pozos de Bombeo	-2,039	-2,039	-2,039
Recuperaciones a los cauces	-0,001	-0,001	-0,001
Recuperaciones a los drenes	-0,001	-0,001	-0,001
Salidas de flujo hacia almacenamiento	-0,616	-0,620	-0,618
Total flujo de salida	-4,971	-5,015	-4,993

La recarga desde los pozos 4 y 6, es igual a un 1% de todo el flujo de entrada al sistema para el caso de $K_{\text{pozo}} = 0,65$ m/día y de un 0,5%, de las entradas, para el caso $K_{\text{pozo}} = 0,25$ m/día.

6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones sobre el modelo Colina-Lampa

El modelo Colina-Lampa analiza la operación de dos pozos gravitacionales recargados alternadamente, para una modelación entre enero de 1990 y abril de 1998. Para este sector, con una conductividad hidráulica de 4,32 m/d, el caudal de infiltración oscila entre 22 y 92 l/s, lo cual es bastante alto. Por lo tanto, se utilizó un valor de conductividad determinado en la campaña de terreno del 11 de noviembre de 2011, mediante una pequeña prueba de infiltración. El valor resultante fue de 1,7 m/d, el cual entrega en el modelo caudales de infiltración entre 11 y 47 l/s y un caudal de 20 l/s para un ascenso del nivel del pozo de 10 metros, que es un valor similar al obtenido en una prueba de bombeo hecha en 1995. El caudal de infiltración mediante los pozos 4 y 6, no supera el 2% del flujo total de entrada del sistema.

Actualmente, muchos de los parámetros usados para la construcción del modelo han cambiado en los últimos años, como por ejemplo la recarga. Las comunas de Colina y Lampa tienen un gran crecimiento inmobiliario, por lo cual el uso del suelo está sufriendo una transición de agrícola a urbano, provocando una gran disminución en la recarga al no existir el riego producto de la actividad agrícola, que es una fuente importante de la recarga de esta zona. También, los bombeos han sufrido cambios ya que las fuentes de agua para la población provienen del recurso subterráneo, a lo que se suma el escaso control por parte de la DGA, existiendo un sinnúmero de pozos no inscritos, de acuerdo a lo observado durante las visitas a terreno realizadas los años 2011 y 2012.

Otro aspecto de la modelación tiene relación con la caracterización de la conductividad hidráulica de la zona, que es de suma relevancia, puesto que la variación de este valor puede entregar resultados muy distintos, como se puede ver en la Figura 5.5.

La modelación supone un acuífero libre de un solo estrato cuando este es realmente confinado y posee al menos tres capas importantes. Teniendo esto en consideración, se obtendrán resultados distintos en la influencia de la recarga y el comportamiento del flujo subterráneo, debido a la disminución del coeficiente de almacenamiento en aproximadamente dos órdenes de magnitud. El modelo considera estas capas como un único estrato equivalente para la simplificación de la modelación, por lo que los resultados sirven como una aproximación global.

El modelo Colina-Lampa sólo se pudo ejecutar en la versión de MODFLOW-NWT porque en las versiones anteriores, por ejemplo MODFLOW 2005, no converge debido a que las celdas en la zona nororiente y este del modelo se secan.

La conductividad hidráulica que aparece en la Figura 4.9, es el resultado de la calibración del año 2000 para el modelo regional. La obtención de una nueva distribución para este parámetro se podría realizar con una nueva calibración, agregando nuevos pozos de observación para el mismo periodo.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar una recopilación de todos los planos y columnas estratigráficas de los pozos en las comunas de Colina y Lampa, realizando un estudio de cada uno de ellos para determinar los estratos existentes y así elaborar perfiles que permitan construir un acuífero detallado, más cercano a la realidad. De esta forma, se complementarán los cinco perfiles que se muestran en la Figura 3.4. La idea anterior se intentó desarrollar como parte de este trabajo, pero lamentablemente fue imposible conseguir los expedientes de pozos de la comuna de Lampa de parte de la DGA.

Se deben realizar pruebas de bombeo de larga duración que permitan determinar de forma más precisa los valores de la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento de la zona donde se realizará la recarga, debido a que las tasas de recarga obtenidas en el modelo son sensibles a esos parámetros. También, es conveniente determinar la cota de terreno real de los pozos, junto con realizar estudios geofísicos que permitan conocer la ubicación del contacto roca-relleno y realizar una mejor caracterización de los estratos existentes.

Es necesario tener información en el tiempo de la calidad físico-química y bacteriológica del agua que se recargará y la nativa del acuífero. Por lo anterior, es deseable tener un monitoreo preferentemente mensual del canal Batuco, que llega a la zona de infiltración, para poder desarrollar las instalaciones adecuadas para el pretratamiento de las aguas.

Realizar un muestreo de calidad del agua subterránea en las comunas de Colina y Lampa, luego de haber obtenido muestras sin cloro, para conocer de forma más precisa la calidad del agua. Esto porque todas las muestras obtenidas de los pozos APR de Colina y Lampa han pasado por un proceso de cloración antes del muestreo.

Proponer algunas estaciones de tipo fluviométricas y limnigráficas, que midan el caudal y el nivel del Estero Colina, para así analizar de mejor manera la interacción río-acuífero y determinar las zonas donde el acuífero entrega agua al estero y viceversa.

Por último, es recomendable complementar el modelo de flujo Colina-Lampa, con un modelo hidrogeoquímico que permita evaluar los impactos asociados a la recarga de agua de distinta calidad a la del acuífero, junto con una red de monitoreo de calidad que permita complementar dicho modelo y pueda controlar algún tipo de contaminación eventual que se provocaría por la puesta en marcha de la recarga artificial.

6.3 Conclusiones generales

Cada proyecto sobre recarga artificial de acuíferos es particular y depende de la geología, disponibilidad de terrenos aptos, la calidad física, química y bacteriológica de las aguas de recarga. Por lo anterior, no es posible crear pautas específicas de diseño y cada proyecto deberá realizar los estudios necesarios para el éxito del sistema de infiltración.

De esta forma, se hace necesario crear una red de pozos de monitoreo debido al riesgo de provocar contaminación al acuífero. Esta red permitiría detener la infiltración cuando ocurran problemas ambientales, y además ir controlando el movimiento del agua recargada.

Finalmente, el proceso de colmatación es uno de los factores más relevantes, porque provoca fallas importantes en los pozos de infiltración o inyección. Este proceso se debe prevenir porque disminuye las tasas de infiltración drásticamente y es muy difícil de revertir.

7. REFERENCIAS

AL-SULAIMI, J., MUKHOPADHYAY, A. y AL-SUMAIT, A. Creation of potable water reserve in Kuwait through artificial recharge. Third International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater (TISAR'98), Amsterdam, Sept. 21-25, 1998.

ANDERSON, P. y WOESSNER, W. Applied Groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. California. Academic Press. 1992. 381p.

AQUAVEO. GMS 8.2 Tutorial MODFLOW – Regional to Local Model Conversion, Steady State [en línea] <<http://gmstutorials-8.2.aquaveo.com/MODFLOW-RegionalToLocalSs.pdf>> [consulta: 20 enero, 2012].

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA. Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuencas de los Ríos Maipo y Mapocho. Estudio para el Ministerio de Obras Públicas. Santiago. 2000.

CHERRY, J.A. y FREEZE, R.A. Groundwater. Englewood Cliff. Prentice-Hall Inc. 1979. 604p.

CUELLAR, A. Análisis numérico del impacto físico en las aguas subterráneas debido al drenaje de minas a cielo abierto. Tesis para optar al grado de magister en recursos y medio ambiente hídrico. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2009. 168p.

DAVID, R. y PYNE, G. Groundwater recharge and wells: a guide to aquifer storage recovery. Florida. Lewis publishers. 1995. 400p.

DOH, Dirección de Obras Hidráulicas. Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de la Provincia de Chacabuco. RM. Realizado por CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería. 2002.

FERRANDO, F. Diagnóstico del sector medio ambiental. Contexto físico y riesgos Comuna de Lampa. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 1999.

HARBAUGH, A. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model - the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. Reston, Virginia. 2005.

KORTLEVE, M.W. Berkheide well recharge system: Design, implementation and initial experience of operation. Third International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater (TISAR'98), Amsterdam, Sept. 21-25, 1998.

MELLADO, C. Caracterización hídrica y gestión ambiental del humedal de Batuco. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2008. 147p.

Ministerio de Secretaría General de la Presidencia. Decreto supremo 46: Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. 2002.

MORLANS, A. Contaminación en acuíferos: Estudio de caso en la comuna de Colina, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2010. 100p

ORREGO, J. El estado de las aguas terrestres en Chile: Cursos y aguas subterráneas. Publicación de la Fundación Terram. Santiago, Chile. 2002. 69p.

SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa Geológico de Chile: Escala 1:1.000.000. 2003.

WILMANS, W. Recarga Artificial de acuíferos en la zona alta del río Mapocho. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2001. 92p.

ANEXOS

A.1. TERRENO 25 DE NOVIEMBRE DE 2011

El objetivo del terreno fue determinar el valor de la conductividad hidráulica de los pozos que se utilizarán para la futura infiltración. Este consistió en llenar los pozos con agua potable proveniente de un camión aljibe y medir la variación del nivel freático después del llenado. Los resultados de esta prueba se analizaron mediante la fórmula entregadas por Bower y Rice para pruebas de “slug test”, y los valores obtenidos en esas pruebas son los siguientes:

Tabla A.1 - 1: Valores obtenidos mediante la prueba de infiltración para el pozo 6.

Caudal de llenado l/s	5
Tiempo de llenado del pozo minutos “Prueba 1”	1.5
Tiempo de llenado del pozo minutos “Prueba 2”	4
Nivel estático m	10.93

Prueba de infiltración #1		Prueba de infiltración #2	
Tiempo (s)	Descenso (m)	Tiempo (s)	Descenso (m)
0	10.30	0	10.55
10	10.80	10	10.72
20	-	20	10.78
30	10.90	30	10.87
40	-	40	10.88
50	10.90	50	10.89
60	10.91	60	10.90
70	10.91	70	10.91
80	10.92	80	10.91
90	10.92	90	10.92
100	10.93	100	10.93

Tabla A.1 - 2: Valores obtenidos mediante la prueba de infiltración para el pozo 5.

Caudal de llenado l/s	4.31
Tiempo de llenado del pozo minutos "Prueba 1"	4
Tiempo de llenado del pozo minutos "Prueba 2"	4
Nivel estático m	10.09

Prueba de infiltración #1	
Tiempo (s)	Descenso (m)
0	-
10	9.71
20	9.95
30	10.01
40	10.03
50	10.04
60	10.06
70	10.08
80	10.08

Prueba de infiltración #2	
Tiempo (s)	Descenso (m)
0	9.33
10	9.90
20	9.96
30	9.99
40	10.01
50	10.02
60	10.04
70	10.05
90	10.06
100	10.07
110	10.07
120	10.07
130	10.08

A.1.1 CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA MEDIANTE EL MÉTODO DE BOWER-RICE (SLUG TEST).

Este método se desarrolló para acuíferos libres (Bower y Rice, 1976) y para pozos que atraviesan total o parcialmente el acuífero. No obstante, Bower (1989) admite que puede proporcionar valores fiables en acuíferos confinados. La fórmula para dicho cálculo se muestra a continuación.

$$K = \frac{r_{tu}^2 \cdot \ln\left(\frac{R_e}{r_f}\right)}{2L} \cdot \frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_t}\right) \quad (\text{A.1-1})$$

Donde el significado de cada término se muestra a continuación:

- L : Longitud de la zona filtrante
- h_0 : Nivel (desde de la superficie freática) antes del intervalo de tiempo t
- r_f : Radio de la zona filtrante
- H : Espesor saturado del acuífero libre
- r_{tu} : Radio de la entubación
- h_t : Nivel (desde la superficie freática) antes del intervalo de tiempo f
- L_w : Altura de la superficie freática desde el límite inferior del filtro
- t : Diferencia entre el tiempo inicial y final
- Re : Radio de influencia de la prueba, no es posible medirlo o calcularlo

Gráficamente los valores anteriores se representan en la siguiente figura:

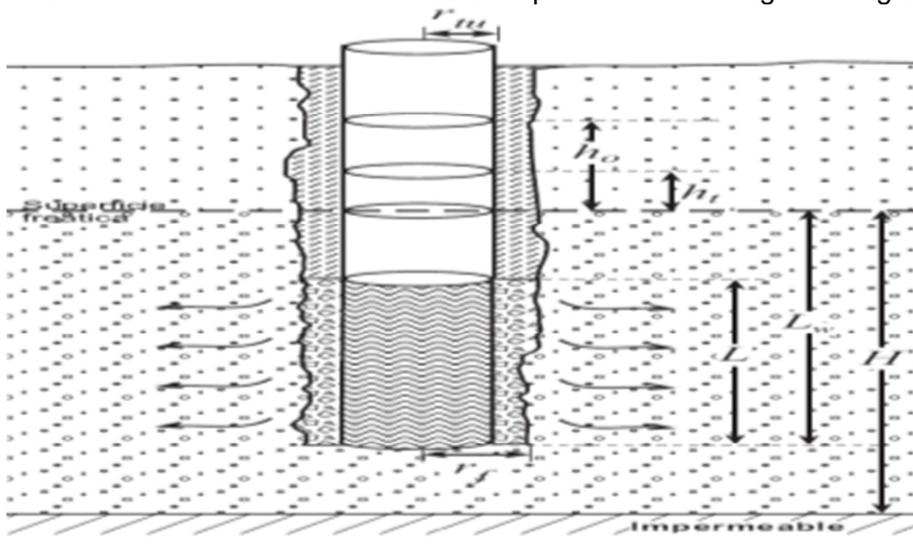


Figura A.2 - 1: Esquema conceptual del método de Bower – Rice.

Para el pozo 5 y 6, se seleccionará la segunda prueba de infiltración por poseer una cantidad de datos más confiables. En el método de Bower-Rice muchas veces los primeros puntos de un gráfico $\ln(h_t) = m \cdot t + c$, forman una recta de mayor pendiente; Bower (1989) sugiere que puede deberse al efecto del empaque de grava en la zona inmediata a la captación que puede haberse desarrollado por bombeos previos. Por lo anterior, este tramo inicial debe despreciarse.

Al graficar los datos obtenidos de la prueba de terreno se puede observar que los datos son adecuados para realizar un análisis mediante este método.

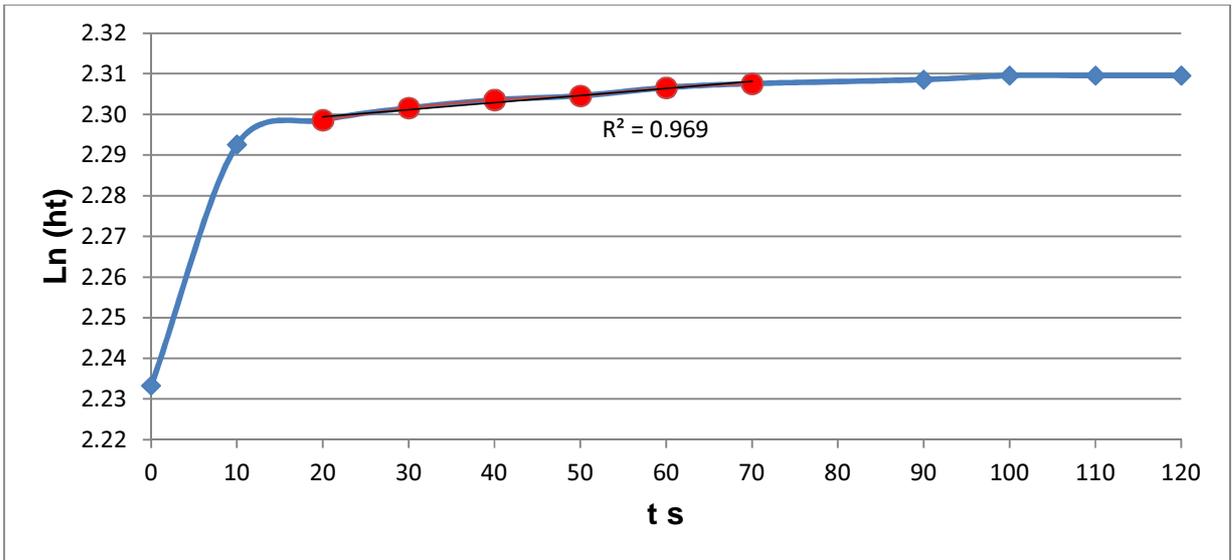


Figura A.2 - 2: Slug test para el pozo 5. Puntos en rojo representa valores usados para el cálculo de la conductividad hidráulica.

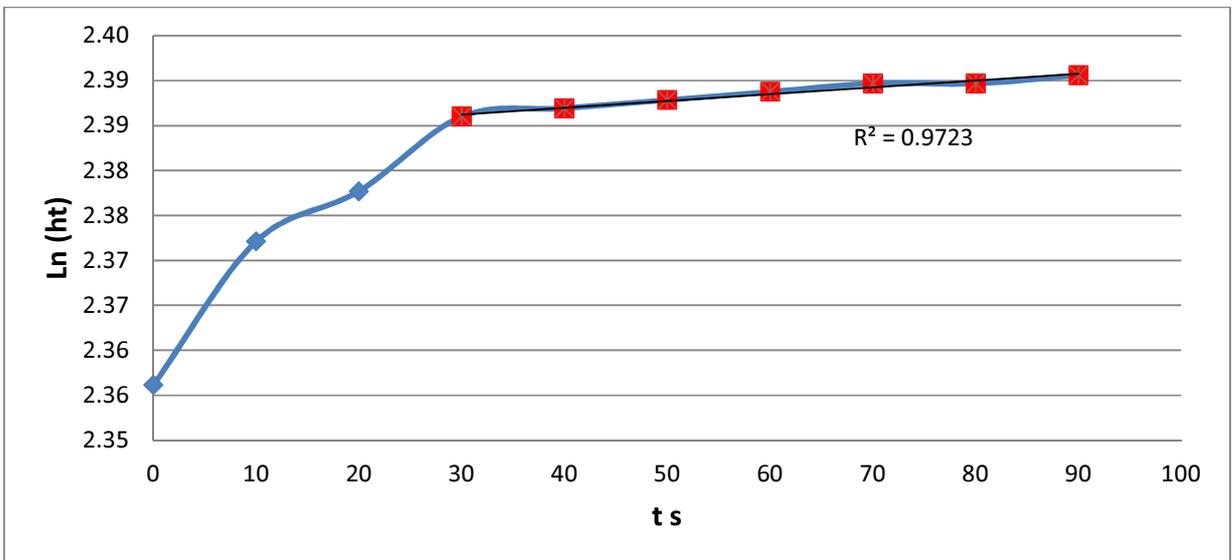


Figura A.2 - 3: Slug test para el pozo 6. Puntos en rojo representa valores usados para el cálculo de la conductividad hidráulica.

En el gráfico para el pozo 5 se define una recta entre los 20 y 70 segundos por lo cual:

$$h_0 = h(t = 20 \text{ s}) \quad \text{y} \quad h_t = h(t = 70 \text{ s}).$$

Para el pozo 6, un buen ajuste es desde los 30 a 90 segundos, por lo cual los valores corresponden a:

$$h_o = h(t = 30 \text{ s}) \text{ y } h_t = h(t = 90 \text{ s}).$$

Con lo anterior, los valores para la determinación de K (conductividad hidráulica) para los pozos 5 y 6 son los siguientes:

Tabla A.1 - 3: Valores necesarios para la determinación de la conductividad hidráulica mediante el método de Bower y Rice.

Pozo 5		Pozo 6	
L	42 m	L	45 m
r_{tu}	0.16 m	r_{tu}	0.16 m
h_o	0.12 m	h_o	0.06 m
h_t	0.03 m	h_t	0.01 m
r_f	0.26 m	r_f	0.26 m
L_w	90.67 m	L_w	89.07 m
H	300 m	H	300 m
T	50 s	t	60s

Para determinar la expresión de K, primero se debe determinar el término $\ln\left(\frac{R_e}{r_f}\right)$ con la siguiente expresión para un pozo que no penetra totalmente la napa:

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_f}\right) = \left(\left(\frac{1.1}{\ln\left(\frac{L_w}{r_f}\right)} \right) + \left(\frac{A \cdot B \cdot \ln\left(\frac{H-L_w}{r_f}\right)}{\left(\frac{L}{r_f}\right)} \right) \right)^{-1} \quad (\text{A.1-2})$$

Donde el valor de A y B se obtiene de la siguiente figura, después de calcular el valor de L/rf para cada pozo.

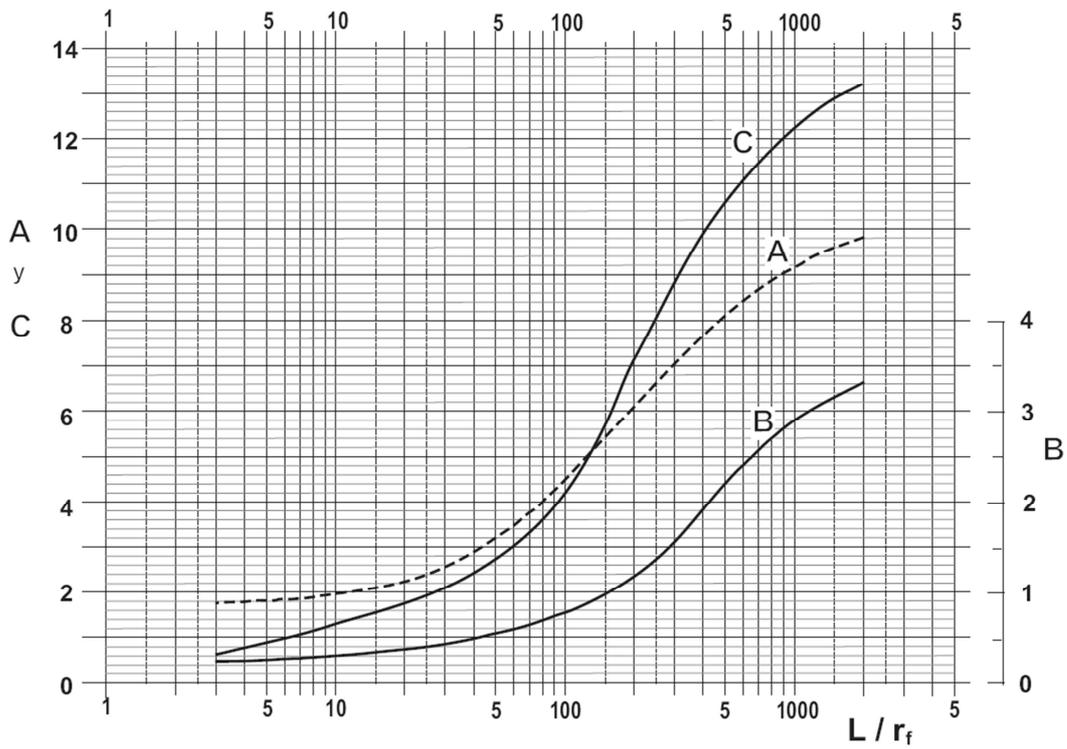


Figura A.2 - 4: Valor de parámetro adimensional A y B, en función de L/rf.

El resumen de los valores necesarios para el cálculo de K, junto con el valor de la conductividad hidráulica, se muestra a continuación:

Tabla A.1 - 4: Valores obtenidos para la conductividad hidráulica para el pozo 5 y 6.

Pozo 5		Pozo 6	
L/r_f	162	L/r_f	173
A	5.62	A	5.78
B	1.03	B	1.08
$\ln\left(\frac{R_e}{r_f}\right)$	2.34	$\ln\left(\frac{R_e}{r_f}\right)$	2.32
K	1.35 m/día	K	1.70 m/día

A.2. TERRENO 1 DE MARZO DE 2012

El terreno se realizó con el fin de analizar la influencia del canal Batuco sobre el nivel estático (N.E.) del agua en los pozos que se encuentran cercanos a este. Información entregada por habitantes de la zona da cuenta que los pozos al norte de este cauce se encuentran secos o tienen oscilaciones considerables en los niveles que no permiten su óptima operación; en cambio, al sur del canal los pozos tienen un nivel estático que no se condice con los niveles encontrados en el norte.

La ubicación en coordenadas UTM de los pozos visitados, junto a sus niveles estáticos y cotas de terreno se muestran a continuación:

Tabla A.2 - 1: Pozos visitados en la campaña del 1 de marzo.

Código	Dueño	UTM E m	UTM N m	Cota m.s.n.m	N.E m	N.D m	Q l/s	Fecha medición
P574	Sergio Acuña	341534	6321358	544	*	72	18- 21	01-03-2012
P575	Isabel Soto	341380	6321872	539	33.00	37	26	04-02-2012
P579	*	341380	6321436	536	30.00	*	*	01-03-2012
P581	Pedro Barrientos	342184	6321718	540	*	*	*	01-03-2012
P585	Marcelo Ameuxeu	340907	6320156	536	22.00	*	*	01-03-2012
P#6	Harry Fleege	339850	6319235	528	11.60	*	*	01-03-2012
P#5	Harry Fleege	339600	6319233	526	10.29	*	*	01-03-2012

* Sin Información

La campaña de terreno comprobó que existen varios pozos secos que son principalmente de uso domiciliario y que no superan una profundidad de 30 metros, a su vez se observa que los niveles de la napa al norte del canal Batuco están 20 metros por debajo de la superficie de terreno y al sur del canal están bajo los 10 metros, haciendo pensar en una influencia del canal en los niveles por el cambio drástico en ellos. Se recomienda una comparación del agua entre el pozo P585 y el canal Batuco y quizás la utilización de un trazador para ver el movimiento del agua en esa zona.

A.3. CALIDAD DE AGUA DE LOS POZOS DE AGUA POTABLE RURAL

Los datos de calidad físico química de pozos pertenecientes al programa de agua potable rural para el año 2008 se muestran en las siguientes tablas.

Tabla A.3 - 1: Valores de calidad de agua en pozos APR en la comuna de Colina en el año 2008.

Parámetros	Unidad	Límite Permitido (D.S. 735/69)	Chacabuco	Ejemplo Campesino	El Colorado	Hermanos Carrera
Cloro Libre Residual	mg/l	0.2-2.0	SD	SD	SD	SD
Olor		Inolora	0	0	0	0
Color Verdadero	Unidad Pt-Co	20	< 11	< 11	< 11	< 11
pH		6.5 – 8.5	7.75	7.73	8.1	7.82
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	1500	368	1024	286	1140
Conductividad	µS/cm		SD	1557	SD	SD
Amoniaco	mg/l	1.5	SD	SD	SD	SD
Arsénico	mg/l	0.01	0.004	0.006	0.005	< 0.003
Cadmio	mg/l	0.01	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Cloruro	mg/l	400	14	135	11	184
Cobre	mg/l	2.0	< 0.15	0.2	< 0.15	< 0.15
Cromo	mg/l	0.05	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Fluoruro	mg/l	1.5	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Hierro	mg/l	0.3	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08
Magnesio	mg/l	125.0	14.5	43.5	11.9	38.6
Manganeso	mg/l	0.1	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Mercurio	mg/l	0.0010	< 0.0007	< 0.0004	< 0.0007	< 0.0007
Nitratos	mg/l	50.0	< 22	< 22	< 22	< 22
Nitritos	mg/l	3.0	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07
<	mg/l	0.05	< 0.016	< 0.016	< 0.016	< 0.016
Sulfato	mg/l	500	74	322	55	352
Zinc	mg/l	3.0	< 0.17	0.36	< 0.17	< 0.17
Fecha			08-04-2008	27-05-2008	08-04-2008	10-04-2008

SD: Sin datos.

<: Bajo el nivel de medición del instrumento.

Tabla A.3 - 2: Valores de calidad de agua en pozos APR en la comuna de Colina en el año 2008 (Continuación).

Parámetros	Unidad	Límite Permitido (D.S. 735/69)	Las Canteras				Los Diecisiete			
Cloro Libre Residual	mg/l	0.2-2.0	SD		0.5		0.4		SD	
Olor		Inolora	0		0		0		0	
Color Verdadero	Unidad Pt-Co	20	<	11	<	11	<	11	<	11
pH		6.5 – 8.5	7.92		7.85		7.4		7.41	
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	1500	480		448		1092		1176	
Conductividad	µS/cm		SD		842		1480		SD	
Amoniaco	mg/l	1.5	SD		SD		<	0.1	SD	
Arsénico	mg/l	0.01	0.011		0.008		0.005		0.004	
Cadmio	mg/l	0.01	<	0.004	<	0.004	<	0.004	0.008	
Cloruro	mg/l	400	99		98		136		184	
Cobre	mg/l	2.0	<	0.15	<	0.15	0.29		<	0.15
Cromo	mg/l	0.05	<	0.02	SD		<	0.01	<	0.02
Fluoruro	mg/l	1.5	<	0.1	<	0.1	0.13		<	0.1
Hierro	mg/l	0.3	<	0.08	<	0.08	<	0.08	<	0.08
Magnesio	mg/l	125.0	16.1		15.6		30.5		38.5	
Manganeso	mg/l	0.1	<	0.02	<	0.02	<	0.02	<	0.02
Mercurio	mg/l	0.0010	<	0.0007	<	0.0004	<	0.0004	<	0.0007
Nitratos	mg/l	50.0	<	22	<	22	<	22	<	22
Nitritos	mg/l	3.0	<	0.07	<	0.07	<	0.07	<	0.07
<	mg/l	0.05	<	0.016	<	0.016	<	0.016	<	0.016
Sulfato	mg/l	500	103		99		358		335	
Zinc	mg/l	3.0	0.17		<	0.17	<	0.17	<	0.17
Fecha			08-04-2008		18-12-2008		23-02-2008		10-04-2008	

SD: Sin datos.

<: Bajo el nivel de medición del instrumento.

Tabla A.3 - 3: Valores de calidad de agua en pozos APR en la comuna de Colina en el año 2008 (Continuación).

Parámetros	Unidad	Límite Permitido (D.S. 735/69)	Quilapilum		Reina Norte			Santa Filomena-San Luis				
Cloro Libre Residual	mg/l	0.2-2.0		SD	0.3	SD	SD	SD				
Olor		Inolora		0	0	0	0	0				
Color Verdadero	Unidad Pt-Co	20	<	11	<	11	<	11	<	11		
pH		6.5 – 8.5		8.24		9.02		8.04		8.16		8.16
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	1500		276		314		356		384		226
Conductividad	µS/cm			SD		SD		SD		610		SD
Amoníaco	mg/l	1.5		SD		SD		SD		SD		SD
Arsénico	mg/l	0.01		0.007	<	0.003	<	0.003		0.003		0.003
Cadmio	mg/l	0.01	<	0.004	<	0.004	<	0.004	<	0.004	<	0.004
Cloruro	mg/l	400		177		18		21		24		11
Cobre	mg/l	2.0	<	0.15		0.15	<	0.15	<	0.15	<	0.15
Cromo	mg/l	0.05	<	0.02		0.04	<	0.02	<	0.02	<	0.02
Fluoruro	mg/l	1.5	<	0.1	<	0.1	<	0.1	<	0.1	<	0.1
Hierro	mg/l	0.3	<	0.08	<	0.082	<	0.08	<	0.08	<	0.08
Magnesio	mg/l	125.0		9.9		13.5		14.2		15.1		7.2
Manganeso	mg/l	0.1	<	0.02	<	0.02	<	0.02	<	0.02	<	0.02
Mercurio	mg/l	0.0010	<	0.0007	<	0.0007	<	0.0007	<	0.0004	<	0.0007
Nitratos	mg/l	50.0		25		48		36		46		27
Nitritos	mg/l	3.0	<	0.07		0.08	<	0.07	<	0.07	<	0.07
<	mg/l	0.05	<	0.016	<	0.016	<	0.016	<	0.016	<	0.016
Sulfato	mg/l	500		37	<	10		48		10		52
Zinc	mg/l	3.0	<	0.17	<	0.168	<	0.17	<	0.17	<	0.17
Fecha				08-04-2008		14-01-2008		08-04-2008		30-09-2008		10-04-2008

SD: Sin datos.

<: Bajo el nivel de medición del instrumento.

Tabla A.3 - 4: Valores de calidad de agua en pozos APR en la comuna de Colina en el año 2008 (Continuación).

Parámetros	Unidad	Límite Permitido (D.S. 735/69)	Santa Luisa		Santa Marta de Liray	Manuel Rodríguez	
Cloro Libre Residual	mg/l	0.2-2.0	SD	0.3	SD	0.5	
Olor		Inolora	0	0	0	<	11
Color Verdadero	Unidad Pt-Co	20	< 11	< 11	< 11		7.87
pH		6.5 – 8.5	7.5	7.83	7.78		366
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	1500	1546	530	648		530
Conductividad	µS/cm		SD	834	SD		SD
Amoniaco	mg/l	1.5	SD	SD	SD		0.003
Arsénico	mg/l	0.01	0.013	0.004	0.007	<	0.004
Cadmio	mg/l	0.01	< 0.004	< 0.004	< 0.004		12
Cloruro	mg/l	400	220	100	53	<	0.15
Cobre	mg/l	2.0	< 0.15	< 0.15	< 0.15	<	0.02
Cromo	mg/l	0.05	< 0.02	< 0.02	< 0.02	<	0.1
Fluoruro	mg/l	1.5	< 0.1	< 0.1	< 0.1	<	0.008
Hierro	mg/l	0.3	< 0.08	< 0.08	< 0.08		8.7
Magnesio	mg/l	125.0	63.7	15.8	17.7	<	0.02
Manganeso	mg/l	0.1	< 0.02	< 0.02	< 0.02	<	0.0004
Mercurio	mg/l	0.0010	< 0.0007	< 0.0004	< 0.0007		27
Nitratos	mg/l	50.0	26	22	49	<	0.07
Nitritos	mg/l	3.0	< 0.07	< 0.07	< 0.02	<	0.016
<	mg/l	0.05	< 0.016	< 0.016	< 0.016		36
Sulfato	mg/l	500	448	96	126	<	0.17
Zinc	mg/l	3.0	< 0.17	< 0.17	< 0.17		
Fecha			08-04-2008	18-12-2008	08-04-2008	26-08-2008	

SD: Sin datos.

<: Bajo el nivel de medición del instrumento.

Tabla A.3 - 5: Valores de calidad de agua en pozos APR en la comuna de Lampa en el año 2008.

Parámetros	Unidad	Límite Permitido (D.S. 735/69)	Lugar			
			Batuco	El Lucero		Nuevo Porvenir
Cloro Libre Residual	mg/l	0.2-2.0	SD	SD	0.2	SD
Olor		Inolora	0	0	0	0
Color Verdadero	Unidad Pt-Co	20	< 11	< 11	< 11	< 11
pH		6.5 – 8.5	7.66	7.2	7.21	7.75
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	1500	958	472	466	685
Conductividad	µS/cm		1377	745	740	1002
Amoniaco	mg/l	1.5	SD	SD	SD	SD
Arsénico	mg/l	0.01	0.005	0.004 <	0.003	0.003
Cadmio	mg/l	0.01	< 0.004	< 0.027	< 0.004	< 0.004
Cloruro	mg/l	400	132	28	SD	43
Cobre	mg/l	2.0	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.15
Cromo	mg/l	0.05	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Fluoruro	mg/l	1.5	< 0.1	0.14	0.13	< 0.1
Hierro	mg/l	0.3	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08
Magnesio	mg/l	125.0	33.2	25.7	21.7	32.2
Manganeso	mg/l	0.1	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Mercurio	mg/l	0.0010	< 0.0004	< 0.0004	< 0.0004	< 0.0004
Nitratos	mg/l	50.0	< 22	34	29	45
Nitritos	mg/l	3.0	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07
Sulfato	mg/l	500	349	92	105	141
Zinc	mg/l	3.0	< 0.17	< 0.17	< 0.17	< 0.17
Fecha			29-05-2008	29-05-2008	07-08-2008	29-05-2008

SD: Sin datos.

<: Bajo el nivel de medición del instrumento.