



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ACTUALIZACIÓN DEL MODELO DGA 2000 DEL ACUÍFERO  
MAIPO-MAPOCHO PARA EL ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL  
CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA SUSTENTABILIDAD FUTURA  
DEL SISTEMA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
MENCIÓN: HIDRÁULICA, SANITARIA Y AMBIENTAL

**DANIELA SOLANGE RIFFO DELGADO**

PROFESOR GUÍA:  
JULIO CORNEJO MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS  
MARÍA PAZ BOBADILLA PONCE

SANTIAGO DE CHILE  
2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL,  
MENCION HIDRAULICA, SANITARIA Y  
AMBIENTAL.**

**POR: Daniela Riffo Delgado**

**FECHA: 2022**

**PROFESOR GUÍA: Julio Cornejo Morales**

## **Resumen**

La Región Metropolitana, al igual que variados sectores de Chile, se encuentra actualmente en una crisis hídrica que afecta a toda la comunidad que reside en ella. La principal fuente de agua para la región se encuentra de manera superficial, sin embargo, debido a la escasez del recurso, cada vez se considera más importante fomentar el uso y cuidado de nuevas reservas de agua. En este sentido, el agua subterránea genera un gran interés para la diversificación de las fuentes, lo que tiene como objetivo de aumentar la certeza de abastecimiento. El acuífero Maipo-Mapocho, se considera la reserva subterránea más amplia e importante de la región, se encuentra ubicada bajo la confluencia de ambos ríos y los principales usos que se les entrega a las extracciones de agua subterránea son el riego y el agua potable. Debido a sus extracciones actuales y su potencial en el futuro, surge la necesidad de caracterizar su funcionamiento con el objetivo de estudiar su sostenibilidad futura.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo modelar el funcionamiento del sistema subterráneo, para luego, a partir de escenarios de cambio climático, estudiar la sustentabilidad futura del acuífero como reserva de agua. Para llevar a cabo el modelo se utilizan como base los estudios realizados por DGA 2000 del acuífero, actualizando, entre otros, la información de recarga y descarga del sistema. La metodología requiere de un modelo conceptual que traza las características principales del sistema, para luego construir el modelo numérico que permite simular de forma simplificada el funcionamiento del acuífero. El modelo numérico se elabora en la plataforma de modelación ModelMuse, que trabaja con base en el código de diferencias finitas, MODFLOW y que es de acceso libre.

Para la aplicación de escenarios futuros, se utilizan Modelos de Circulación Global (GCMs), los cuales entregan proyecciones futuras sobre diversas variables meteorológicas como la precipitación y temperatura. A partir de estas variables establecidas en la zona de interés y considerando los escenarios más realistas en la actualidad, es posible obtener proyecciones del comportamiento del recurso a nivel superficial. Dichas proyecciones entregan información de un periodo de 50 años, comprendido entre el 2020 y el 2070. Como el objetivo es analizar el funcionamiento futuro del acuífero, es necesario establecer la implicancia de las interacciones superficiales del ciclo del agua sobre el sistema subterráneo. Para esto se establece una función de transferencia que representa la relación entre el ciclo superficial y el comportamiento subterráneo de la zona.

Finalmente, ya aplicados los escenarios de cambio climático sobre el modelo, se procede a realizar un análisis de la sustentabilidad futura de la reserva subterránea. Para esto, se aplican criterios derivados de las normas y procedimientos establecidos por la Dirección General de Aguas (DGA), lo que permite concluir sobre las repercusiones del cambio climático sobre el acuífero Maipo-Mapocho.

*A mis padres.*

## Agradecimientos

Terminar el proceso universitario y por fin convertirme en una profesional, significa para mí haber tenido que superar un montón de barreras, principalmente inseguridades, miedo a no ser capaz, dentro de una larga lista de obstáculos. Es por esto que llegar al final de este camino me hace sentir inmensamente orgullosa por todo lo que afronté y nunca me rendí. Sin embargo, no hubiera sido capaz de enfrentar sola los desafíos, gracias a Dios, en cada uno de ellos estuve acompañada de grandes personas, que me entregaron apoyo y me acompañaron en cada éxito y fracaso de la carrera.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres Iris y Carlos, sin duda son lo mejor que tengo en la vida y fueron mis principales pilares en cada pasito que daba. Ellos me vieron caer muchas veces, sin embargo, siempre estuvieron ahí para levantarme, para decirme que yo era capaz y para acompañarme en todo momento. De verdad les agradezco demasiado todo lo que nos entregan, la alegría, la buena vibra, el cariño, la confianza y, sobre todo, el esfuerzo por darnos lo mejor, los quiero mucho. Por otra parte, quiero agradecer a mis hermanos Camila y Carlitos, que estuvieron ahí en cada uno de los pasitos que di dentro de este proceso, acompañándome, aguantándome y apoyándome, cada uno a su manera. De verdad agradezco demasiado cada conversación, cada vez que iban a molestar a la pieza y me ayudaban a desestresarme, cada llanto y cada risa, gracias por creer siempre en mí y por su cariño inmenso, espero poder acompañarlos también en cada uno de sus procesos, los adoro.

También quisiera agradecer a mi tía Inés, por ser tan atenta, comprensiva y por alentarme a no bajar los brazos, a mi Tata que siempre estuvo preocupado por mis estudios y me apoyó durante este camino, y a mi Yaya, que, si bien no se encuentra físicamente con nosotros, fue muy importante en todo mi crecimiento, desde que era chiquitita, y siempre he sentido su apoyo y cariño.

Un tercer grupito de personas a quienes quisiera agradecer, es el de mis amigos y todos aquellos a quienes fui conociendo en el camino. A mis amigas de la infancia a quienes considero mis hermanas y con quienes he compartido cada etapa de la vida. A mis amigas del colegio, con quienes soñamos hace varios añitos atrás en convertirnos en profesionales y hoy vamos de a poquito cumpliendo este sueño. A mis amigos de la universidad, y a todos quienes formaron parte, en algún momento, de este camino. Ellos estuvieron acompañándome y viviendo los procesos tanto académicos como personales, y son lo mejor que me llevo de este proceso. A mi pololo Ariel, a quien conocí en los últimos momentos del camino, en un momento nada normal como la pandemia, pero que se transformó en alguien muy importante para mí. Gracias por aguantar mi estrés y brindarme tu cariño y apoyo para finalizar esta etapa.

Finalmente, pero no menos importante, quería agradecer profundamente a la comisión y a mi profesor guía Julio Cornejo, quien tuvo una paciencia increíble, me ayudó y comprendió en todo momento. Espero encontrarme durante mi desarrollo profesional con más colegas con la calidad académica y humana del profesor. Muchas gracias.

# Tabla de Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción y motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Metodología.....	2
1.3.1. Actualización del modelo hidrogeológico Maipo-Mapocho.....	2
1.3.2. Escenarios de cambio climático.....	3
1.3.3. Análisis de sustentabilidad.....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes.....	4
2.2. Aguas Subterráneas: funcionamiento y relación con la superficie y el clima.....	5
2.3. Cambio climático y sus implicancias a nivel global.....	6
2.4. Cambio climático en Chile.....	9
2.4.1. Cambio climático en la Región Metropolitana de Chile y en la cuenca del Río Maipo.....	9
2.5. Efecto del cambio climático en aguas subterráneas.....	11
2.6. Modelación numérica para la evaluación de escenarios futuros.....	12
<b>3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>15</b>
3.1. Antecedentes generales de la cuenca del Río Maipo.....	15
3.2. Climatología e hidrología de la cuenca.....	16
3.3. Caracterización hidrogeológica del área de estudio.....	17
3.4. Recopilación y preparación de datos.....	18
3.4.1. Disponibilidad de información hidrogeológica.....	18

3.4.2.	Disponibilidad de información meteorológica .....	19
<b>4.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO .....</b>	<b>20</b>
4.1.	Modelo conceptual.....	20
4.1.1.	Límites y composición del acuífero Maipo-Mapocho.....	20
4.1.2.	Recargas y descargas .....	22
4.1.3.	Parámetros del modelo .....	27
4.1.4.	Condiciones de borde .....	28
4.2.	Modelo numérico.....	30
4.2.1.	Discretización espacial .....	30
4.2.2.	Discretización temporal.....	32
4.2.3.	Recargas y descargas .....	33
4.2.4.	Condiciones de borde .....	34
4.2.5.	Pozos de Observación.....	35
4.2.6.	Régimen permanente .....	37
4.2.7.	Régimen transiente .....	41
<b>5.</b>	<b>ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>52</b>
5.1.	Datos históricos estación Cerro Calán.....	52
5.2.	Modelos de Circulación Global (GCM) representativos de la zona.....	53
5.3.	Tendencias de precipitación según los GCMs escogidos, aplicadas a la estación Cerro Calán. ....	56
5.4.	Función de transferencia para definir recargas .....	58
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....</b>	<b>59</b>
6.1.	Balances hídricos .....	59
6.2.	Equipotenciales .....	60
6.3.	Niveles proyectados sobre el acuífero .....	61

6.4.	Análisis de sustentabilidad futura del sistema .....	66
6.4.1.	Análisis cualitativo de niveles piezométricos.....	67
6.4.2.	Consumo de almacenamiento del acuífero.....	68
6.4.3.	Satisfacción de la demanda .....	71
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>78</b>
	Anexo A.....	78
	Anexo B.....	80

## Índice de Figuras

Figura 2-1.	Contribuciones al calentamiento global (IPPC, 2014) .....	6
Figura 2-2.	Emisiones de CO2 emitidas y proyectadas según escenarios RCP (Sanford, 2014).....	7
Figura 2-3.	Proyecciones de precipitación y temperatura (IPCC).....	8
Figura 2-4.	Proyecciones de cambio futuro respecto al periodo control para temperatura y precipitaciones (Centro de Cambio Global UC, 2017). .....	10
Figura 2-5.	Proyección de temperatura para la estación Embalse del Yeso. (Bocchiola, 2017).....	11
Figura 2-6.	Proyección de precipitaciones para la estación San Gabriel (Bocchiola, 2017).....	11
Figura 3-1.	Ubicación de la cuenca del río Maipo. ....	15
Figura 3-2.	Hidroclimograma de la cuenca del río Maipo. Precipitación y temperatura de la estación Quinta Normal (560 msnm) y caudal del río Maipo en el Manzano (1.230 msnm) (Centro de Cambio Global UC, 2017).....	16
Figura 3-3.	Ubicación del acuífero Maipo-Mapocho.....	17
Figura 3-4.	Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHACs), pertenecientes al acuífero.....	18
Figura 3-5.	Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Maipo .....	19
Figura 4-1.	Composición vertical de la zona hidrogeológica de estudio (DGA, 2000) .....	21
Figura 4-2.	Zonas de recarga dentro del acuífero.....	22
Figura 4-3.	Correlación entre precipitación media anual en estaciones meteorológicas presentes en el acuífero y recarga anual utilizada en el Modelo DGA 2000.....	23
Figura 4-4.	Correlación entre precipitación y recarga - Cerro Calán.....	24
Figura 4-5.	Pozos de Bombeo totales dentro del acuífero.....	26
Figura 4-6.	Parámetros iniciales del modelo.....	27
Figura 4-7.	Condiciones de borde de nivel constante .....	28
Figura 4-8.	Cauces situados sobre el acuífero.....	29
Figura 4-9.	A la izquierda discretización de todo el acuífero, a la derecha zoom de la zona alta del río Mapocho.....	30

Figura 4-10. A la izquierda vista en planta con línea (morada) de corte Oeste-Este. A la derecha vista frontal del corte. ....	31
Figura 4-11. A la izquierda vista en planta con línea (morada) de corte Norte-Sur. A la derecha vista frontal del corte. ....	32
Figura 4-12. Detalle de la discretización temporal del modelo.....	33
Figura 4-13. Recargas y descargas aplicadas al modelo. A la izquierda zonas de recarga. A la derecha pozos de bombeo.....	34
Figura 4-14. Condiciones de borde aplicadas al modelo. A la izquierda condiciones de nivel constante y a la derecha condiciones tipo río.....	35
Figura 4-15. Coeficientes de permeabilidad inicial para el régimen permanente. ....	38
Figura 4-16. Conductividad hidráulica final en régimen permanente.....	38
Figura 4-17. Gráfico de ajuste de Niveles Observados versus Niveles Simulados en régimen permanente .....	39
Figura 4-18. Distribución de los coeficientes de almacenamiento (S).....	42
Figura 4-19. Gráfico de ajuste lineal entre Niveles Observados y Simulados en régimen transiente.....	43
Figura 4-20. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Buin .....	44
Figura 4-21. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Colina Inferior .....	45
Figura 4-22. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Colina Sur.....	45
Figura 4-23. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de El Monte Nuevo .....	46
Figura 4-24. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Lampa .....	46
Figura 4-25. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Lo Barnechea.....	47
Figura 4-26. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Paine .....	47
Figura 4-27. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Pirque.....	48
Figura 4-28. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Santiago Central (1).....	48
Figura 4-29. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Santiago Central (2).....	49
Figura 4-30. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Santiago Norte.....	49
Figura 4-31. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Vitacura .....	50
Figura 5-1. Criterio de elección de GCM basado en la comparación de deltas de precipitación y temperatura, entre los datos observados y simulados .....	54
Figura 5-2. Variación Estacional histórica para la variable Temperatura .....	55
Figura 5-3. Variación estacional histórica para la variable Precipitación .....	56
Figura 5-4. Tendencia de precipitación proyectadas según GCMs para la estación Cerro Calán.....	57
Figura 5-5. Recarga proyectada a ingresar al modelo.....	58
Figura 6-1. Equipotenciales. A la izquierda mapa del 2020, al centro mapa del 2070 (CMCC-CESM) y a la derecha (CSIRO-Mk3-6-0).....	60
Figura 6-2. Diferencia de equipotenciales (2070-2020). A la izquierda según CMCC-CESM. A la derecha según CSIRO-Mk3-6-0.....	61
Figura 6-3. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Buin.....	62
Figura 6-4. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Colina Inferior.....	62
Figura 6-5. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Colina Sur .....	62
Figura 6-6. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector El Monte Nuevo .....	63
Figura 6-7. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Lampa.....	63
Figura 6-8. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Lo Barnechea .....	63
Figura 6-9. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Paine.....	64
Figura 6-10. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Pirque .....	64
Figura 6-12. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Santiago Norte.....	64
Figura 6-11. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Santiago Central.....	65
Figura 6-13. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Vitacura.....	65
Figura 6-14. Sustentabilidad futura del acuífero, considerando el descenso de niveles .....	68

Figura 6-15. Cambios en el volumen almacenado para cada SHAC según CSIRO-Mk3-6-0.....	70
Figura 6-16. Satisfacción de la demanda en cada SHAC.....	72
Figura 0-1. Modelos CMIP5 .....	80

## Índice de Tablas

Tabla 3-1. Factor de uso del agua .....	19
Tabla 3-2. Estaciones meteorológicas ubicadas dentro del acuífero Maipo-Mapocho. Información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas (Dirección General de Aguas).....	20
Tabla 4-1. Límites del acuífero en coordenadas UTM (contacto roca-relleno) .....	20
Tabla 4-2. Tasas de recarga anual a ingresar al modelo.....	24
Tabla 4-3. Caudal de extracción anual.....	26
Tabla 4-4. Pozos de observación presentes en el acuífero .....	36
Tabla 4-5. Valores del Error Absoluto Medio y Error Cuadrático Medio luego de la calibración del modelo en régimen permanente. ....	40
Tabla 4-6. Balance hídrico global del modelo actualizado al año 1998.....	40
Tabla 4-7. Balance hídrico global del modelo DGA 2000.....	40
Tabla 4-8 Estadísticos para la medida de errores del modelo post calibración.....	43
Tabla 4-9. Balance Hídrico Global para el año 2020.....	50
Tabla 4-10. Balance Hídrico Global promedio del periodo (1998-2020) .....	51
Tabla 5-1. Datos históricos de precipitación y temperatura observados en la estación Cerro Calán.....	52
Tabla 5-2. Variación promedio de las precipitaciones en el periodo futuro (2020-2070) .....	56
Tabla 5-3. Variación del promedio histórico observado según los dos GCMs que definen el rango de cambio.....	57
Tabla 6-1. Balance hídrico global promedio del acuífero para el periodo proyectado, sin considerar cambios en la recarga.....	59
Tabla 6-2. Balance hídrico global promedio del acuífero para el periodo proyectado según CMCC-CESM.....	59
Tabla 6-3. Balance hídrico global promedio del acuífero para el periodo proyectado según CSIRO_Mk3-6-0.....	60
Tabla 6-4. Sustentabilidad futura del acuífero considerando el descenso de niveles.....	67
Tabla 6-5. Volúmenes por SHAC al año 1998 y 2070.....	69
Tabla 6-6. Variación porcentual de volúmenes.....	69
Tabla 6-7. Satisfacción de la demanda en el año 2070 .....	71
Tabla 6-8. Niveles de sustentabilidad futura para cada SHAC del acuífero .....	72
Tabla 0-1. Distribución de la recarga.....	78

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción y motivación

Las diversas problemáticas asociadas al cambio climático se han vuelto el foco de atención a la hora de gestionar los recursos naturales, debido al creciente consenso sobre la magnitud de sus efectos. Dentro de los recursos naturales amenazados por dicho cambio, el agua, debido a su importancia para la vida, representa el principal y más perjudicial medio de expresión de los efectos del cambio climático. En consecuencia, resulta primordial estudiar la relación entre cambio climático y los recursos hídricos para lograr una gestión sustentable que permita la adaptación a los cambios. En particular, la Región Metropolitana de Chile no es ajena a estas problemáticas, debido a que es una de las regiones con mayor densidad de población e industrias, por lo que presenta una gran demanda del recurso, en donde una parte de estos proviene de fuentes subterráneas. Dentro de los almacenamientos de agua subterránea de la región, se encuentra el acuífero Maipo-Mapocho, el cual alberga gran parte de las extracciones necesarias para el consumo.

A partir de lo anterior, el presente trabajo consiste en la actualización del modelo hidrogeológico del acuífero Maipo-Mapocho, la cual pretende entregar una representación vigente del estado del acuífero que permita la aplicación de escenarios de cambio climático y con esto, un análisis de la sustentabilidad futura del acuífero. En general, la documentación que existe de los efectos del cambio climático sobre el recurso hídrico es limitada y reciente. Sin embargo, existen diversos estudios que han logrado investigar, con algún grado de detalle, el impacto del cambio climático sobre las aguas superficiales a diferencia de lo que sucede con las aguas subterráneas. En este sentido, los estudios equivalentes sobre el agua presente en el subsuelo se han quedado atrás, presentando algunos avances solo durante los últimos años (Green et al, 2011; Taylor et al, 2013).

Si bien existen variados métodos para el análisis de respuestas de los acuíferos frente al cambio climático, los modelos numéricos son primordiales a la hora de integrar información que permita generar conclusiones sobre las consecuencias del cambio climático en las aguas subterráneas. A pesar de la importancia de los otros métodos, como las observaciones (que se utilizan de forma complementaria en los modelos numéricos) los modelos numéricos tienen la particularidad de generar comprensión retrospectiva y predicciones al futuro. Es decir, los modelos matemáticos permiten una comprensión con base en los cambios observados (predicción retrospectiva) y también predecir respuestas futuras frente a escenarios de cambio (previsión) (Green, 2016).

A partir de lo anterior se puede concluir que el interés sobre la relación del cambio climático y el recurso hídrico es reciente y por lo tanto la documentación sobre el tema es limitada. En específico, los estudios sobre aguas subterráneas son aún más escasos, lo que da paso a la motivación del presente estudio, la cual está enfocada en ampliar este campo de investigación al evaluar y analizar las respuestas de una fuente de aguas subterráneas frente a diversos escenarios que propone el cambio climático.

En particular, el presente trabajo se enfoca en el acuífero Maipo Mapocho, con el objetivo de desarrollar respuestas frente a diferentes escenarios de cambio climático, que permitan generar conclusiones sobre la sustentabilidad y gestión futura del acuífero. El análisis requerirá de las herramientas que entrega la modelación numérica y los criterios que aplican las instituciones encargadas como la Dirección General de Aguas.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una actualización del modelo Maipo-Mapocho para un posterior análisis de los efectos potenciales del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica del sistema y la sustentabilidad futura del acuífero.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Construir la herramienta de modelación del acuífero Maipo Mapocho, sobre la base de los criterios establecidos por el estudio DGA-AC (2000) utilizando un software de código libre del USGS que permita aprovechar el uso de mallas no estructuradas en su construcción.
- Actualizar la información relevante de las componentes del balance hídrico, entre estas, la recarga superficial y las extracciones, sobre la base de supuestos razonables.
- Generar un mecanismo simplificado que permita relacionar los efectos del cambio climático en el recurso superficial con los procesos que rigen las aguas subterráneas.
- Analizar la sustentabilidad del acuífero y sus sectores hidrogeológicos a partir de estudios de los efectos del cambio climático sobre los niveles futuros, el volumen almacenado y afectación a terceros.

## 1.3. Metodología

La metodología de trabajo se divide en 3 etapas principales:

### 1.3.1. Actualización del modelo hidrogeológico Maipo-Mapocho

En primera instancia se utilizará el Catastro Público de Derechos de Agua del Banco Nacional de Aguas (BNA) para obtener la información actualizada sobre las extracciones de aguas subterráneas (pozos) y la evolución temporal de los niveles de agua en el acuífero por sectores hidrogeológicos. La información actualizada se complementa con los informes del Ministerio de Obras Públicas “Modelo de simulación hidrológico operacional, cuencas de los ríos Maipo y Mapocho”, 2000 y memorias del departamento de geología que caracterizan la cuenca de Santiago.

El software que se utiliza es ModelMuse debido a su código libre, su capacidad de utilizar grilla no estructurada y con el objetivo de demostrar su aplicabilidad en importantes acuíferos. El periodo por modelar es el comprendido entre los años 1998- 2020 lo que permitirá ajustar los parámetros hidráulicos, como el coeficiente de almacenamiento ( $S_y$ ) y la conductividad hidráulica ( $K$ ).

### 1.3.2. Escenarios de cambio climático

Para la construcción de los escenarios se procederá como se presenta a continuación: Se llevará a cabo una revisión de estudios de efectos del cambio climático en la cuenca de Santiago, en específico, la revisión busca generar un análisis de los efectos sobre precipitación y caudales superficiales. Luego se llevará a cabo una extensión de las series de recarga, la cual en un principio será de 50 años debido a que los criterios de la Dirección General de Aguas consideran este horizonte de tiempo, como largo plazo. Finalmente, luego de la extensión de series de recargas se llevará a cabo un análisis de potenciales extracciones futuras y así poder comparar entre los efectos del cambio climático y la creciente demanda futura, sobre el acuífero.

### 1.3.3. Análisis de sustentabilidad

En este punto se busca aplicar los criterios de la DGA sobre los escenarios construidos anteriormente y así poder generar un análisis de los efectos del cambio climático sobre la tendencia de los niveles futuros del acuífero, su volumen almacenado y afectación a terceros (satisfacción de la demanda). Para esto se dividirá el acuífero en 15 zonas que corresponden a diferentes Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento Común SHACs, los cuales se estudiarán de formas individual y en conjunto (acuífero). Finalmente, considerando que los criterios de la DGA son utilizados para el otorgamiento de derechos de aguas, se realizará un diagnóstico de la situación futura del acuífero en cuanto al uso del agua subterránea.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

El estudio del ciclo del agua, como herramienta para el análisis de la cantidad y calidad del recurso hídrico, es de suma importancia a la hora de gestionar su uso. Es común pensar en dicho ciclo como una relación entre lo que ocurre en la superficie de la tierra y en la atmósfera, olvidando los procesos que ocurren bajo la superficie terrestre. A pesar de esto y la limitada documentación que existe sobre la componente subterránea del recurso, se debe tener en cuenta que en regiones el agua subterránea tiene un rol fundamental en la relación agua-alimentos-energía y clima, y que históricamente ha sido un amortiguador contra la variabilidad climática (Green, 2016). Actualmente sigue siendo el agua superficial la principal encargada de abastecer a la población humana del recurso, sin embargo, se espera que, en un futuro probable, la dependencia de los recursos de agua subterránea vaya en ascenso a medida que las fuentes superficiales se vean afectadas por el aumento de la población y el cambio climático (Green, 2016). Debido a esto surge la necesidad integrar de forma flexible los estudios sobre aguas subterráneas en los planes actuales de adaptación a los cambios y gestión del recurso. Para poder llevar a cabo el presente trabajo es necesario una comprensión acabada de las diferentes componentes de los acuíferos y los procesos que regulan el flujo de las aguas subterráneas, la cual se llevará a cabo en la presente revisión bibliográfica.

Gran parte de las alteraciones que afectarán al recurso hídrico en un futuro, provienen del cambio climático. Para esto es necesario en primer lugar saber que es el cambio climático para luego estudiar sus efectos sobre el recurso hídrico, y en específico sobre el agua subterránea. Si bien, el interés por el cambio climático y sus impactos en los acuíferos va en ascenso, aún son pocas las investigaciones que logran cuantificar la sensibilidad del agua subterránea frente a variaciones en parámetros que son afectados por el cambio climático (Allen y Scibek, 2006). Como una primera respuesta de los sistemas de aguas subterráneas a los cambios climáticos, se espera que las alteraciones en la precipitación y temperatura impacten en la recarga de los acuíferos lo que provocaría cambios en los niveles freáticos (Changnon et al., 1988; Zektser y Loaiciga, 1993).

Debido a que la relación entre el cambio climático y las aguas subterráneas no es directa, es complejo realizar una evaluación de los efectos de este sobre el acuífero. A pesar de esto, es posible llegar a una aproximación de dichos impactos a través de una caracterización exhaustiva de las diferentes propiedades que hacen único a cada acuífero, es decir, es necesario caracterizar aspectos como la geología, geometría, conexiones con las fuentes de aguas superficial, entre otras. Esta caracterización es el modelo conceptual del acuífero, y si bien es una caracterización detallada, requiere de simplificaciones para facilitar la comprensión y aplicación de las propiedades (Bredehoeft, 2005). Ya realizado este modelo conceptual se puede proceder a la construcción de un modelo numérico que permita representar el acuífero y sus respuestas frente a variables como la recarga.

La ventaja de llevar a cabo un modelo numérico de aguas subterráneas es la posibilidad de realizar predicciones sobre las respuestas del acuífero frente a escenarios futuros, lo que lo hace una herramienta de gran utilidad para este tipo de estudios (Green, 2016).

Dado el contexto, se hace necesario analizar algunos estudios de impactos del cambio climático sobre la Región Metropolitana, en la cual se encuentra ubicado el acuífero que se estudiará en el presente trabajo. Estos impactos del cambio climático se ven acentuados por el acelerado crecimiento urbano, la erosión del suelo, entre otros. (Müller & Höfer, 2014). En general, los principales pronósticos sobre la región sugieren un aumento de la temperatura media y una disminución de las tasas anuales medias de precipitación (Cortés et al., 2012). En particular el balance hídrico llevado a cabo por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) el año 2021, presenta un descenso de las precipitaciones acumuladas de aproximadamente un 70% con respecto al promedio histórico en la Región Metropolitana. Esto podría entregar un primer enfoque para la aplicación sobre el acuífero.

El caso particular de Santiago de Chile y su principal acuífero (Maipo-Mapocho) se estudiará a través de la modelación numérica la cual se basará en la simulación realizada entre los años 1990 y 1998, la cual corresponde al modelo DGA (2000), y el que entregará las principales características del acuífero en estudio. Dentro de las características que entrega dicho estudio se encuentran los límites del acuífero, discretización espacial, algunas condiciones de borde, los parámetros hidráulicos que entregarán un punto de partida para luego ser calibrados y un balance hídrico preliminar. A partir de este modelo actualizado se procederá a una evaluación de los efectos del cambio climático sobre las aguas almacenadas en dicho acuífero.

El principal objetivo de la presente revisión bibliográfica es contextualizar las diferentes aristas del problema y analizar la información disponible para abordarlo. Esto se lleva a cabo a través de una detallada recopilación de estudios e investigaciones sobre aguas subterráneas, modelación y cambio climático, que explican estas temáticas y sus relaciones. Sumado a lo anterior se realizó un resumen de la información disponible sobre el cambio climático en la región a estudiar (Región Metropolitana) y sobre las propiedades y características del acuífero a partir del estudio del modelo DGA (2000).

## 2.2. Aguas Subterráneas: funcionamiento y relación con la superficie y el clima

Antes de comenzar a modelar y estudiar los efectos del cambio climático sobre el acuífero con el cual se trabajará en la presente memoria, se hace necesaria una breve explicación del funcionamiento de los recursos subterráneos y su relación con el agua superficial y el clima.

La base teórica de la disciplina de hidrogeología en el siglo XIX se encuentra en la Ley de Darcy, la cual a grandes rasgos describe el caudal de agua que fluye en un medio poroso en función de la conductividad hidráulica, gradiente hidráulico y sección transversal al flujo (Betancur y Palacios, 2009). Para poder aplicar esta ley, junto con las leyes de la hidrodinámica sobre el acuífero, es necesario describir los flujos de agua que se dan en el acuífero, es decir, se hace necesario entender las principales entradas y salidas que afectan dicha fuente de agua subterránea. Algunas entradas comunes que forman parte de la recarga del acuífero corresponden a infiltración y percolación desde cuerpos de aguas superficiales y desde la precipitación. Por su parte las salidas (descargas) se deben principalmente a afloramientos o descargas al océano. Sumado a estas entradas y salidas, hay flujos internos que mueven el agua dentro del acuífero y entre acuíferos vecinos (Betancur y Palacios, 2009). Esto da cuenta de la relación entre el agua subterránea, el agua en cuerpos superficiales, la precipitación y evapotranspiración, en donde estas últimas son las que se vinculan directamente con el cambio climático.

### 2.3. Cambio climático y sus implicancias a nivel global

Como definición de Cambio Climático, según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se tiene que se trata del cambio de clima el que puede ser atribuido o no a la actividad humana y que altera la composición de la atmósfera mundial, lo que se suma a la variabilidad natural del clima. Como lo indica dicha definición, las causas de este cambio pueden ser por forzamientos naturales o antropogénicos, sin embargo, la contribución de las forzantes naturales es mínima en comparación al aumento de gases efecto invernadero (GEI) y otras contribuciones procedentes de procesos antropogénicos. Debido a esto es que en la actualidad se consideran a los GEI como los principales responsables del cambio climático (IPCC 2014).

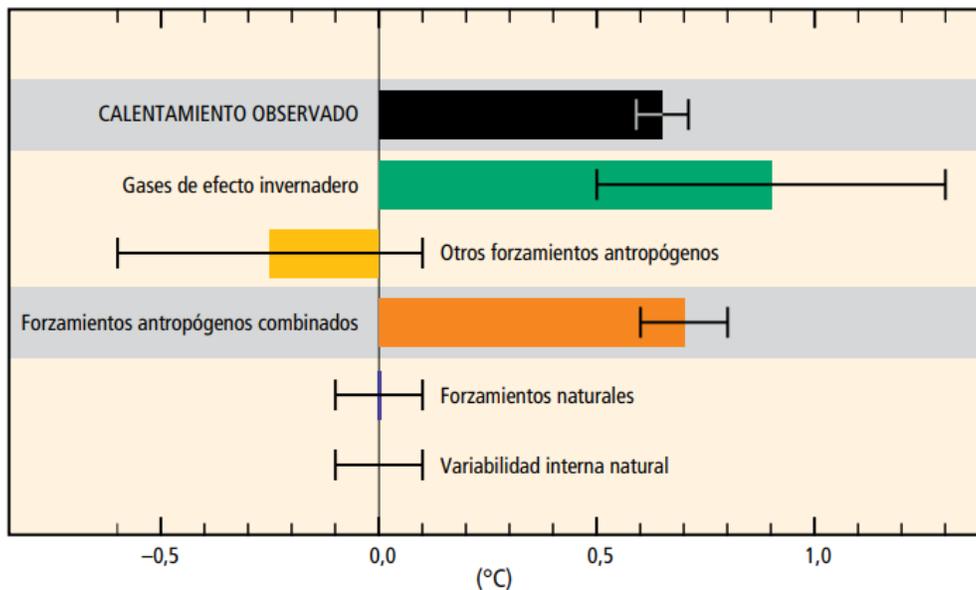


Figura 2-1. Contribuciones al calentamiento global (IPCC, 2014)

Algunos de los principales Gases Efecto Invernadero que han propiciado el calentamiento global son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), siendo el CO<sub>2</sub> el contribuyente de aproximadamente el 78% del aumento total de emisiones de GEI entre los años 1970 y 2010. Por este motivo el CO<sub>2</sub> es considerado el principal GEI forzante del cambio climático y su concentración se utiliza como referencia para la cuantificación de otros gases GEI. Previo al quinto informe de evaluación del IPCC desarrollado en el año 2014, se trabajaba con un conjunto de escenarios SRES los cuales representaban el progreso de la población mundial en aspectos demográficos, tecnológicos y las acciones que las naciones aplicarían para su desarrollo. Sin embargo, debido a que un mismo escenario climático considerando concentraciones de GEI o forzantes radiativas puede ser alcanzado a partir de diferentes condiciones de desarrollo, el IPCC en su quinto informe de evaluación propuso un cambio de escenarios dejando obsoletos los escenarios SRES. Actualmente las proyecciones de escenarios climáticos se basan en trayectorias de concentración representativas (escenarios, RCP), que indican el comportamiento de las emisiones de GEI, en donde cada escenario representa una cantidad de radiación que es retenida en la atmósfera debido a las concentraciones de gases. De este modo el cambio climático se proyecta según las respuestas frente a estos escenarios (Green, 2016). Dichas trayectorias describen 4 escenarios diferentes para el siglo XXI en donde una describe un escenario de mitigación estricto (RCP 2,6), dos trayectorias describen escenarios intermedios (RCP4,5 y RCP6,0) y el tercer escenario es el más desfavorable con emisiones muy elevadas de gases de efecto invernadero (RCP 8,5) (IPCC, 2014).

Si bien, estos escenarios son los utilizados actualmente, los estudios demuestran que las observaciones de concentración de GEI se encuentran por sobre lo proyectado en el escenario RCP8.5, que es el escenario más desfavorable (Sanford, 2014). Por este motivo, el IPCC ya se encuentra trabajando en nuevos escenarios que representen el contexto actual y posibles realidades futuras.

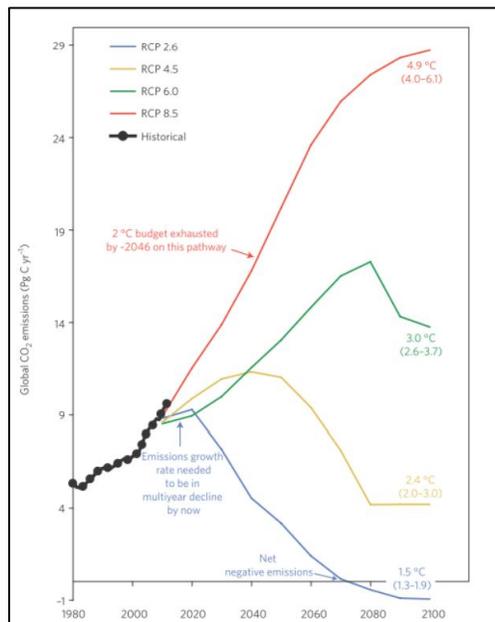


Figura 2-2. Emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas y proyectadas según escenarios RCP (Sanford, 2014)

Cabe destacar que a pesar de que el principal tema de interés público es el calentamiento global, el cambio climático posee diferentes variables de cambio como lo son las precipitaciones, lo que tiene un impacto directo en los procesos hidrológicos, y en consecuencia en los hidrogeológicos (Green, 2016). Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) las proyecciones muestran alteraciones en la cantidad y frecuencia de las precipitaciones para el siglo XXI (Le Treut et al, 2007; Mearns et al, 2007).

Para tener un contexto global del cambio climático se estudiarán sus impactos sobre la temperatura y precipitación ya que estas podrían repercutir de forma indirecta en el comportamiento de los acuíferos. En el informe del 2014 del IPCC se contrastan los cambios de ambas variables para los escenarios menos y más favorables. Esto se presenta en la Figura 2-3.

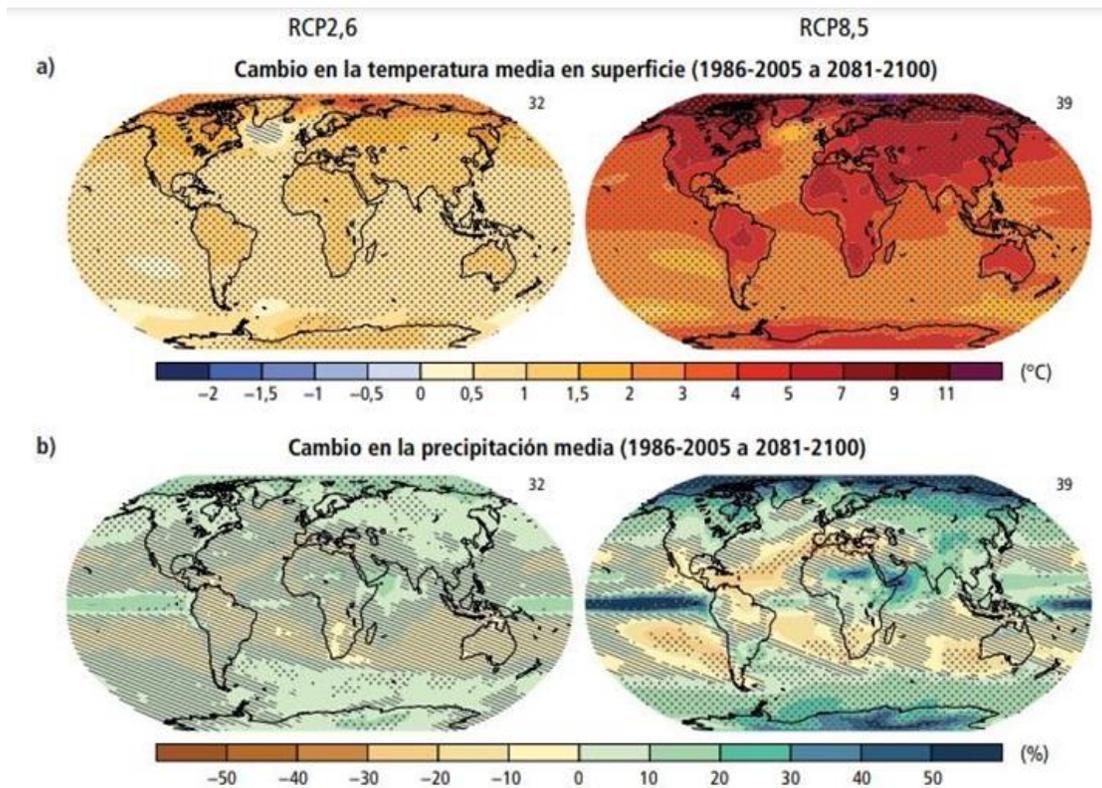


Figura 2-3. Proyecciones de precipitación y temperatura (IPCC)

Se puede concluir que las tendencias futuras sobre temperatura son mucho más claras y evidentes que las de precipitación. En el caso de las temperaturas en ambos casos se observa que casi en el 100% de la tierra habrá un aumento al menos de 0.5°C. Por su parte en el caso de las precipitaciones es más difuso y se presentan zonas en donde se espera un aumento y zonas en las que se podría esperar una disminución.

Esto dependería principalmente de la latitud del sector. Según el RCP 8,5 en las zonas de latitudes altas, del océano Pacífico ecuatorial y regiones húmedas de latitud media se experimenten aumentos de la precipitación media anual, mientras que en las regiones secas de latitud media y subtropicales podrían experimentar una disminución de precipitaciones medias.

## 2.4. Cambio climático en Chile

Chile debido a su gran variabilidad de paisajes y climas, presenta una alta vulnerabilidad frente al cambio climático, por lo que no es ajeno a sus diversos impactos. Un resumen de los principales efectos lo presenta el Ministerio del Medio Ambiente (2016) a través del “Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022”.

- Impactos sobre la temperatura  
Considerando aquellos escenarios con menores emisiones GEI, las proyecciones indican un aumento de temperatura a lo largo de todo el país, siendo la zona norte la más afectada. En la zona sur se espera como mínimo un aumento de 0.5°C, mientras que para el norte grande se espera un aumento de 1.5°C. Por su parte, los datos históricos muestran un incremento de temperaturas tanto en las zonas cordilleranas como el valle central, siendo únicamente las estaciones costeras las que muestren un decaimiento de temperaturas. Sin embargo, esta tendencia al enfriamiento de la zona costera no presenta significancia estadística.
- Impactos sobre las precipitaciones  
Las principales consecuencias del cambio climático sobre las precipitaciones en el país se presentan en la zona centro-sur, que está comprendida entre el Río Aconcagua en la Región de Valparaíso y la Región del Maule. En dicha zona, la información histórica presenta una significativa disminución de precipitaciones (Quintana y Aceituno, 2012; Schulz et al, 2011). Por su parte, las proyecciones indican que para el año 2030 las precipitaciones se verían reducidas entre un 5% y 15%, para la zona ubicada entre los ríos Copiapó y Aysén, disminución que se vería intensificada en el periodo posterior (2031-2050). Al igual que en la zona centro-sur, las proyecciones de precipitación sobre el sector ubicado entre los ríos Mataquito y Aysén hacia el año 2030, indican una relevante tendencia a la disminución. Finalmente, en la zona de Magallanes se espera un ligero aumento del parámetro, sin embargo, este vendría acompañado de una disminución de la precipitación nival.

### 2.4.1. Cambio climático en la Región Metropolitana de Chile y en la cuenca del Río Maipo

La principal cuenca de la Región Metropolitana corresponde a la del río Maipo. Sus límites coinciden casi en su totalidad por lo que el comportamiento de la cuenca indica de forma casi indistinta las condiciones de toda la región.

Para generar y estudiar las proyecciones climáticas sobre la cuenca es necesario el uso de Modelos de Circulación General (GCMs) los cuales entregan resultados para diferentes escenarios.

Un Estudio llevado a cabo por el Centro de Cambio Global UC en el año 2017 utilizó dos grupos de escenarios: SRES (IPCC 2007) y RCP (IPCC 2013) y la información obtenida desde los GCMs fue escalada para representar las condiciones en la estación Quinta Normal.

En dicho estudio se proyectaron las precipitaciones y temperaturas para tres periodos de tiempo: futuro cercano (2010-2040), futuro medio (2040-2070) y futuro lejano (2070-2100), como se muestra en la Figura 2-4.

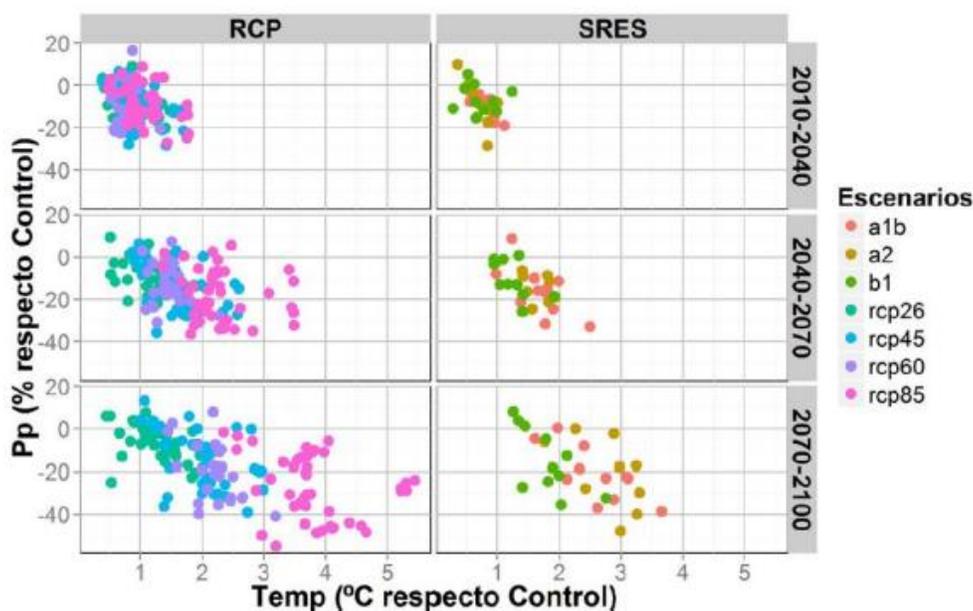


Figura 2-4. Proyecciones de cambio futuro respecto al periodo control para temperatura y precipitaciones (Centro de Cambio Global UC, 2017).

La figura muestra que para ambos grupos de escenarios las precipitaciones se encuentran disminuyendo con respecto al periodo base mientras que las temperaturas van aumentando. Esta tendencia se ve acentuada en periodos más lejanos y para emisiones más elevadas de GEI. A pesar de que los SRES ya se encuentran obsoletos, estos coinciden con los RCP, sin embargo, estos últimos presentan tendencias más desfavorables. Al observar los escenarios RCP, se aprecia que los cambios de temperatura van desde los 0,5°C hasta los 5°C para los modelos más desfavorables. Por su parte las precipitaciones muestran descenso que van aproximadamente desde el 10% en el futuro cercano hasta un 40% en el futuro lejano. Como primer acercamiento a los que se proyecta en la región, se puede decir que esta se encuentra alineada con los estudios a nivel global.

Otro estudio, cuyas proyecciones fueron escaladas para las estaciones Embalse del Yeso y San Gabriel a nivel interanual, demuestran una tendencia similar para el caso de la temperatura, mientras que para las precipitaciones la tendencia no es clara, fluctuando constantemente en torno al periodo de control (Bocchiola et al, 2018).

En este caso el estudio permite inferir que las proyecciones de precipitación muestran variaciones significativas en la estacionalidad de sus curvas, pero que no son observables de forma interanual.

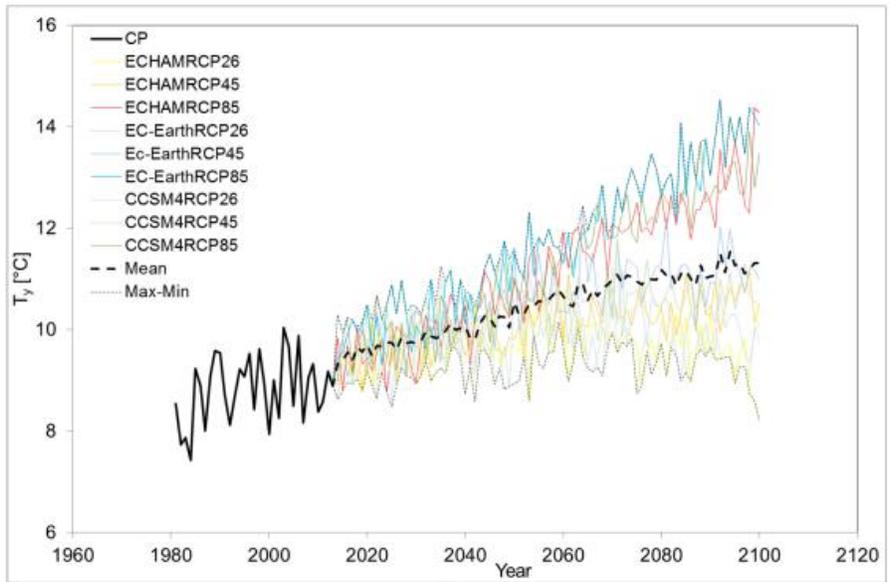


Figura 2-5. Proyección de temperatura para la estación Embalse del Yeso. (Bocchiola, 2017)

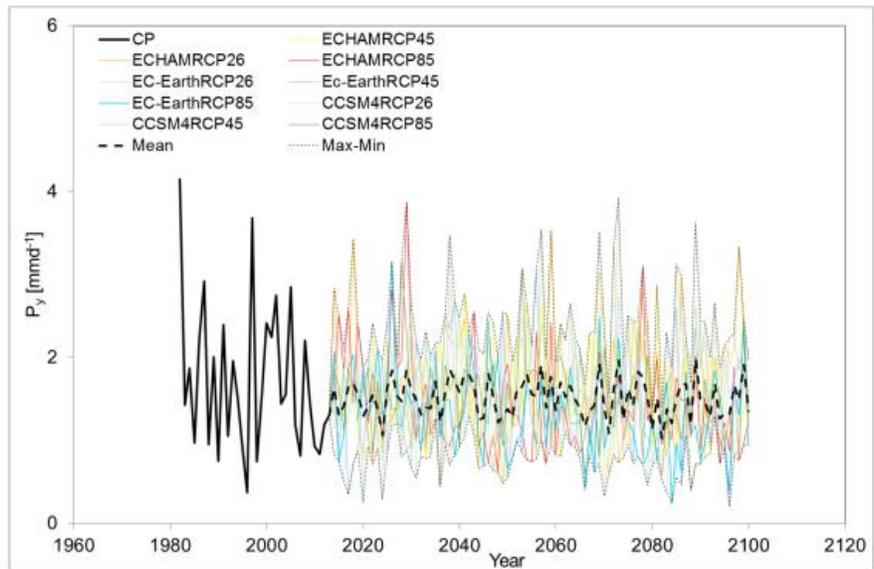


Figura 2-6. Proyección de precipitaciones para la estación San Gabriel (Bocchiola, 2017)

## 2.5. Efecto del cambio climático en aguas subterráneas

Como se ha mencionado anteriormente, los estudios sobre los efectos del cambio climático en los recursos hídricos se han enfocado principalmente en las fuentes de aguas superficiales, debido a su accesibilidad, amplio uso y a que la relación con los cambios atmosféricos es más directa.

Sin embargo, paulatinamente se ha comenzado a reconocer la importancia de las aguas subterráneas para abastecer las demandas actuales y sostenimiento de ecosistemas. Es por esto que actualmente se ha comenzado a hacer esfuerzos para poner al día los estudios sobre este tema (Green, 2016).

Se reconoce que los principales componentes del ciclo hidrológico superficial que pueden ser afectados por el cambio climático son el comportamiento de la precipitación, el derretimiento de hielo y glaciares, la temperatura, escorrentía, entre otros (Bates et al, 2008). Dichas variaciones en las componentes superficiales y atmosféricas resultarán en cambios en el ciclo hidrológico de los diversos acuíferos del mundo (Van Dijk et al, 2006). Estudiar la sostenibilidad del agua en los acuíferos es de gran utilidad ya que se considera que los efectos ambientales, sociales y económicos, podrían impactar de forma multigeneracional, es decir, podrían alcanzar escalas de tiempo de 50 a 100 años (Gleeson et al, 2012). A la dificultad de estudiar los impactos del cambio climático sobre las aguas subterráneas se le suma la gran variabilidad de los tiempos de residencia de las aguas subterráneas, las cuales se encuentran entre días a decenas de miles de años. Esto provoca dispersiones del cambio climático y por lo tanto dificulta la detección de respuestas de los sistemas acuíferos (Chen et al, 2004).

A partir de los estudios que existen en la actualidad se puede deducir que el cambio climático afectara de forma indirecta a las aguas subterráneas, ya que, al alterar el ciclo hidrológico, como por ejemplo las precipitaciones (y por ende los caudales de aguas superficiales), las recargas a los acuíferos se verán afectadas. Esto quiere decir, que a pesar de que los principales impactos se observarán en los niveles y calidad de las aguas superficiales, también existirán efectos sobre la cantidad y calidad de aguas subterráneas (Bear y Cheng, 1999; Zektser y Loaiciga, 1993).

## 2.6. Modelación numérica para la evaluación de escenarios futuros

Existen diversos métodos que permiten detectar variaciones en las aguas subterráneas ya sea en calidad o cantidad, y estos presentan notables diferencias en temas de confiabilidad y escala. Las mediciones in situ son la base de la información ya que son confiables y se pueden utilizar como entrada para otros métodos, estas también se pueden utilizar de forma directa, sin embargo, el gran problema es el nivel de escala que se alcanza, ya que al ser puntuales no entregan la variabilidad espacial en su totalidad. Sumado a lo anterior hay muchas zonas del mundo donde es difícil el acceso y no es posible contar con observaciones (Green, 2016).

Green et al. (2011) realizaron un estudio de los diferentes métodos, los cuales se señalan a continuación. En general, para el estudio de recursos hídricos, la percepción remota se ha convertido en gran aliada para estudiar aquellos sectores de difícil acceso, en donde las mediciones puntuales se hacen difíciles de obtener. Sin embargo, esta metodología tiene capacidad limitada en temas de agua subterránea, por lo que para su utilización es esencial el uso conjunto con datos de pozos y la hidrogeofísica (Green, 2016).

Otro método de gran utilidad y los cuales juegan un papel esencial a la hora de integrar información y generar respuestas de las aguas subterráneas son los modelos matemáticos. Estos modelos proporcionan una estructura para sistematizar la información obtenida in situ, son útiles para entender el funcionamiento del acuífero y reconocer áreas donde falta información. A modo general los modelos numéricos permiten simular el flujo a través de un acuífero para diferentes tipos de suelo y condiciones (saturada y no saturada) (Anderson y Woessner, 1992).

Los modelos numéricos pueden ser de diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. En particular ModelMuse (Modflow), que es el modelo que se utilizará en este estudio, corresponde a un modelo de diferencias finitas. Para representar la hidrodinámica dentro del acuífero, un modelo numérico debe describir el flujo de aguas subterráneas a través de una combinación matemática entre las ecuaciones de balance de masas y la ley de Darcy, lo que se representa en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

donde:

- $K_i$  : Conductividad hidráulica del medio en la dirección i
- $\frac{\partial h}{\partial l}$  : Gradiente hidráulico en la dirección l
- $S_s$  : Coeficiente de almacenamiento específico
- $\frac{\partial h}{\partial t}$  : Variación de la carga piezométrica en el tiempo.
- W: Entradas y salidas al acuífero.

Cuando la variable  $\partial h / \partial t = 0$ , es decir el flujo no varía en el tiempo, se dice que el sistema está en una condición permanente, mientras que en el caso contrario el sistema se encuentra en condición transiente. Para caracterizar el régimen transiente es necesario una discretización del tiempo en periodos denominados periodos de stress, que son los cuales reciben las variaciones, y están determinados por las condiciones iniciales. Sumado a lo anterior para generar respuestas, el modelo numérico requiere de condiciones de borde.

Dentro de las condiciones de borde se encuentra la discretización espacial, definida en la mayoría de los casos a través del contacto roca-relleno (que limita el acuífero), las condiciones de fuentes de aguas superficiales, extracción desde pozos, recargas por precipitaciones y riego, los flujos entre acuíferos, entre otros.

La ecuación, junto con estas condiciones constituyen la representación matemática del flujo de agua subterránea en el acuífero, para el modelo numérico (Betancur y Palacios, 2009).

Los modelos numéricos continúan mejorando su representatividad y algunos han comenzado a integrar relaciones con el medio terrestre y la atmosfera, sin embargo, siguen siendo limitados los estudios que integren el agua subterránea con los cambios humanos y socioeconómicos, que son los que generan finalmente el cambio climático (Holman, 2006).

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1. Antecedentes generales de la cuenca del Río Maipo

La cuenca del río Maipo, nace en las faldas del volcán Maipo (5.523 m.s.n.m) y se extiende en casi la totalidad de la Región Metropolitana, coincidiendo en la mayoría de sus límites, excepto en la zona de desembocadura y algunos sectores que se situados en la Región de Valparaíso. La cuenca se encuentra ubicada en la zona central de Chile como se muestra en la Figura 3-1, drenando una superficie de aproximadamente 15.000 km<sup>2</sup>. Su cauce principal, que lleva el mismo nombre, posee una longitud que bordea los 250 km y un caudal promedio anual de 92,3 m<sup>3</sup>/s. En su nacimiento, los cauces afluentes son el río Volcán, Yeso y Colorado, en el tramo intermedio, los principales aportes provienen del río Mapocho, el cual presenta un caudal medio anual de 35 m<sup>3</sup>/s y finalmente, en la zona baja, posee cauces afluentes menores, desembocando con un caudal de 150 m<sup>3</sup>/s (Centro de Cambio Global UC, 2017).

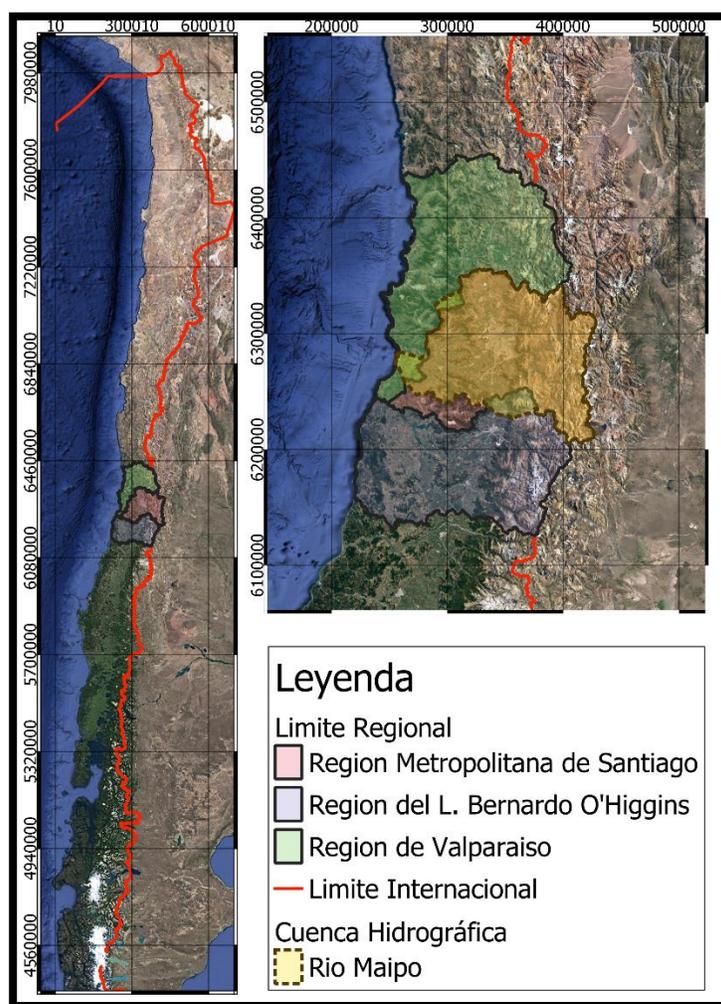


Figura 3-1. Ubicación de la cuenca del río Maipo.

En cuanto al uso del agua, se encuentra una fracción importante de uso agrícola con aproximadamente 136.000 hectáreas y con una demanda predominante durante las estaciones de primavera y verano. En segundo lugar, se encuentra el sector urbano que, debido a su crecimiento, propicia un aumento continuo en el uso de recursos, ya sea para consumo domiciliario o industrial. Por otra parte, se encuentran las centrales hidroeléctricas, las cuales se sitúan en las zonas cordilleranas y precordilleranas de la cuenca. Sumado a lo anterior, existen las obras mineras ubicadas en el sector norte, dedicadas principalmente a la extracción de cobre. Con respecto al ámbito ambiental, el río es fuente principal de un ecosistema mediterráneo, el cual presenta una las biodiversidades más amplias de Chile (Centro de Cambio Global UC, 2017).

### 3.2. Climatología e hidrología de la cuenca

El clima que predomina en la cuenca es mediterráneo semiárido, con una concentración de precipitaciones en la estación de otoño-invierno y temperaturas máximas durante el verano, dando origen a una estación seca y calurosa.

El régimen hidrológico de la cuenca es mixto, presentando una componente nival en la zona alta (cordillera) y una componente pluvial en las zonas medias y bajas (depresión intermedia y cordillera de la costa, respectivamente).

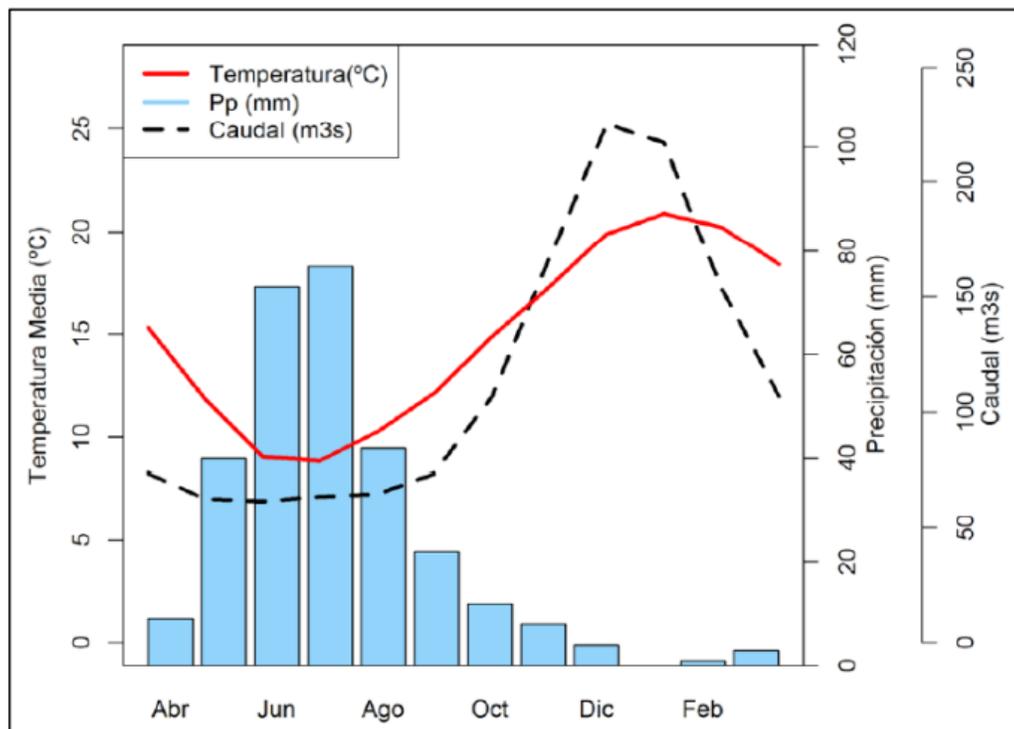
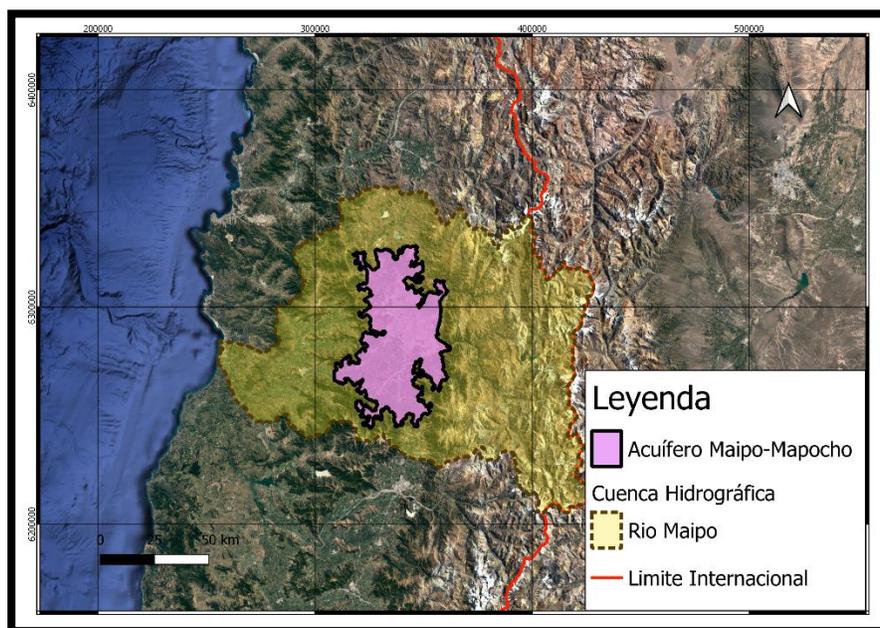


Figura 3-2. Hidroclimograma de la cuenca del río Maipo. Precipitación y temperatura de la estación Quinta Normal (560 msnm) y caudal del río Maipo en el Manzano (1.230 msnm) (Centro de Cambio Global UC, 2017)

### 3.3. Caracterización hidrogeológica del área de estudio

El acuífero Maipo-Mapocho se encuentra situado bajo la cuenca del río Maipo, como se muestra en la Figura 3-3 y corresponde a la formación hidrogeológica más importante de la zona. En la mayor parte de su extensión se comporta como un acuífero no confinado, a excepción de algunos sectores al norte del río Mapocho. Verticalmente el acuífero está compuesto de tres estratos principales. El estrato superior se encuentra no saturado en la mayor parte del área y con un bajo espesor. El estrato intermedio, al presentar una alta permeabilidad, alberga la mayor parte del acuífero y es donde se efectúan la mayoría de las extracciones por bombeo. Finalmente, el estrato inferior presenta una permeabilidad menor que el anterior y se encuentra sobre el basamento rocoso (Ayala et al, 2000).



*Figura 3-3. Ubicación del acuífero Maipo-Mapocho*

El gradiente va disminuyendo en la dirección y sentido del flujo de los ríos Maipo, Mapocho y Angostura. En la junta de estos, se presenta un angostamiento de la sección acuífera que provoca afloramiento en los últimos tramos de los ríos mencionados. De forma simplificada se puede afirmar que el sistema se recarga en las zonas altas y medias, y descarga en los sectores bajos de desembocadura.

Las principales recargas del sistema corresponden a la infiltración por precipitación, por riego y recargas desde los cauces naturales. Por su parte, las descargas corresponden a los bombeos, a los afloramientos naturales y al flujo propio que sale por el extremo aguas abajo de la zona.

El acuífero Maipo-Mapocho se encuentra fragmentado en Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) definidos por la Dirección General de Aguas, que se son determinados según características espacio temporales.

Dichos sectores, tienen un rol administrativo en la distribución de derechos de agua y permiten simplificar los análisis que se requieran de forma puntual.

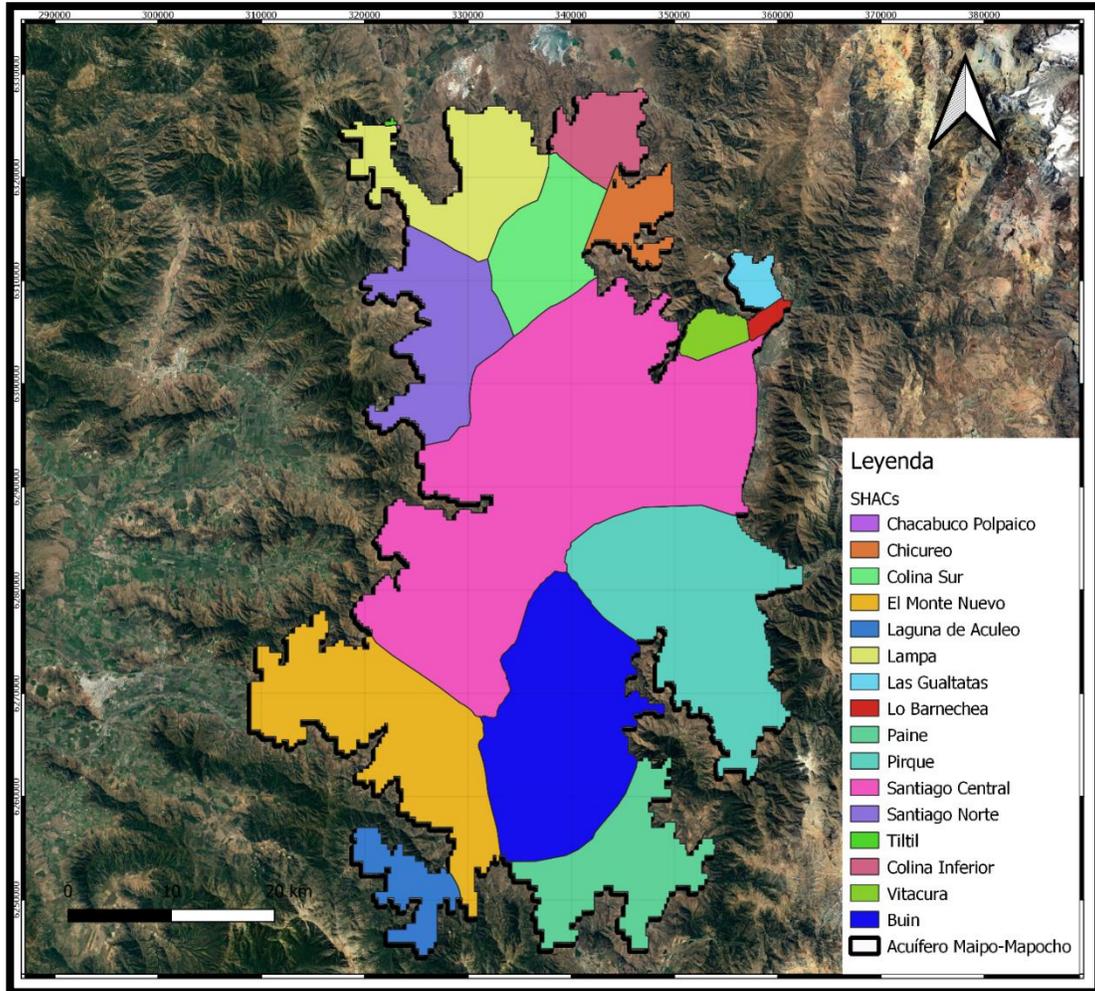


Figura 3-4. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHACs), pertenecientes al acuífero.

### 3.4. Recopilación y preparación de datos

#### 3.4.1. Disponibilidad de información hidrogeológica

Los datos de extracciones por bombeo corresponden a la principal descarga del sistema y estos se dividen según su uso: Agua Potable (AP), Riego (R), Industrial (I) y Minería (M). Para el caso de riego, industria y minería, los datos de caudales de extracción se encuentran en el catastro de pozos de bombeo de la Dirección General de Aguas (DGA), en este catastro se encuentra la fecha de otorgamiento, las coordenadas y el uso. Estos caudales son ajustados según un factor de uso que depende del tipo de utilización que se le entregue al recurso. Este factor, es presentado en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Factor de uso del agua

Uso del agua	Factor de uso (%)
Agua Potable	30
Riego	18
Industrial	80
Minería	100

Por su parte, los datos de extracciones para el uso de agua potable, no se encuentran de forma pública en el catastro, sin embargo, la DGA cuenta con un control de extracciones que es informada por los titulares de derechos de aprovechamiento de aguas en la actualidad. Si bien, la precisión de este control es menor al catastro de pozos, entrega una referencia confiable del orden de magnitud de las extracciones para el uso de agua potable del acuífero. Debido a que estos datos son los informados en la actualidad, se procedió a realizar una regresión lineal hacia el año 1998 que corresponde a la fecha considerada como inicio del presente modelo (fecha de término del modelo DGA 2000). A esta fecha, se tomó como supuesto que el caudal de extracción era el 50% del caudal actual. Dicho supuesto guarda relación con los caudales de balance presentados en el modelo DGA 2000.

### 3.4.2. Disponibilidad de información meteorológica

La cuenca del río Maipo cuenta con un total de 71 estaciones, sin embargo, solo 24 estaciones cuentan con una data que considere desde el año 1990 que es desde cuando se tiene información de la recarga y que considere al menos 30 años de datos, para que permita generar una función de transferencia confiable. De estas 24 estaciones solo 6 se encuentran dentro de los límites del acuífero, como se observa en la Figura 3-5.

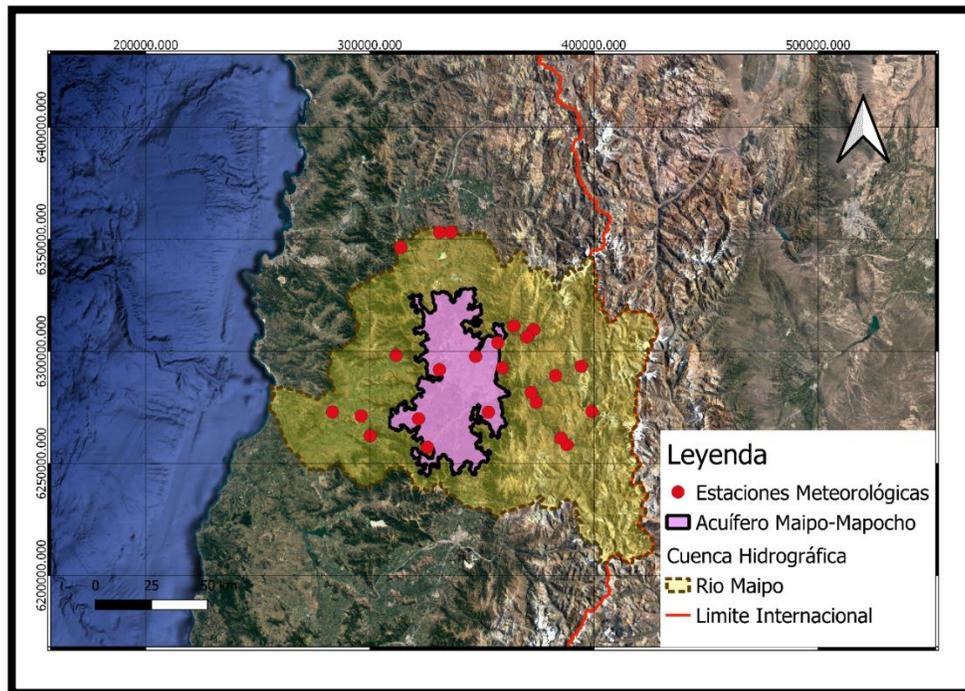


Figura 3-5. Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Maipo

Las estaciones ubicadas dentro de los límites del acuífero Maipo-Mapocho se presentan en la Tabla 3-2.

*Tabla 3-2. Estaciones meteorológicas ubicadas dentro del acuífero Maipo-Mapocho. Información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas (Dirección General de Aguas).*

<b>Nombre de estación</b>	<b>UTM Norte</b>	<b>UTM Este</b>	<b>Vigencia</b>	<b>Fecha de Inicio</b>
Cerro Calán	6303869	357078	Vigente	02-06-1975
Pirque	6272884	352897	Vigente	01-10-1967
Río Angostura En Valdivia de Paine	6257179	325665	Vigente	01-01-1900
El Vergel	6269904	321707	Vigente	01-04-1988
Río Mapocho Rinconada de Maipú	6291804	331049	Suspendida	01-05-1965
Terraza Oficinas Centrales DGA	6297768	347173	Vigente	01-01-1960

## 4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

### 4.1. Modelo conceptual

Para comenzar a construir el modelo numérico que permitirá representar el sistema acuífero de forma simplificada, es necesario describir cada una de las componentes que lo conforman, lo que se denomina como modelo conceptual. Dicho modelo, entrega la información teórica que rige el funcionamiento del acuífero y que sirve como base para la construcción del modelo numérico. Para la caracterización conceptual, se utiliza como base los informes del estudio llevado a cabo por la DGA, denominado “Modelo de simulación hidrológico operacional, cuencas del río Maipo y Mapocho” publicado el año 2000 (Dirección General de Aguas, 2000). Dicho estudio comprende la creación del Modelo DGA 2000 del acuífero Maipo-Mapocho, elaboración de un Modelo Superficial de la zona, construcción de modelos de acuíferos vecinos, entre otros.

#### 4.1.1. Límites y composición del acuífero Maipo-Mapocho

Los límites en planta del acuífero se presentaron en la Figura 3-3, estos comprenden la zona de interfluvio de los ríos Maipo y Mapocho y fueron determinados por el contacto roca-relleno de la cuenca. De forma aproximada el acuífero se encuentra dentro de la zona definida por los límites que se indican en la Tabla 4-1.

*Tabla 4-1. Límites del acuífero en coordenadas UTM (contacto roca-relleno)*

Límite Norte	Norte 6.328.600
Límite Sur	Norte 6.244.000
Límite Oeste	Este 309.000
Límite Este	Este 362.400

Por su parte, la profundidad máxima del relleno sedimentario alcanza aproximadamente los 400 m y está compuesta por 3 estratos principales que caracterizan el funcionamiento del acuífero. Estos fueron determinados utilizando antecedentes de sondajes basadas en las características granulométricas del relleno y se representan de forma simplificada en la Figura 4-1.

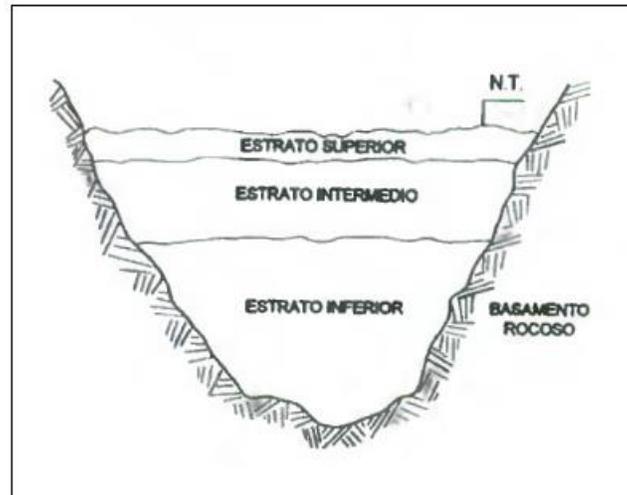


Figura 4-1. Composición vertical de la zona hidrogeológica de estudio (DGA, 2000)

- Estrato superior:

El estrato superior se presenta de forma discontinua en la zona y está constituido por una fracción mayor de arenas gruesas a medias, con sectores puntuales de gravas y la matriz está compuesta por arenas finas con abundantes porciones de arcillas. Se estima que la permeabilidad media de este estrato se encuentra entre los  $10^{-3}$  y  $10^{-5}$  m/s. Debido a esta permeabilidad y a su discontinuidad en la zona, no posee las condiciones óptimas para el asentamiento de acuíferos.

- Estrato intermedio:

La matriz que conforma este estrato está compuesta por arena media a fina, con reducidas porciones de limos y arcillas. Los sedimentos poseen una granulometría gruesa y media con una fracción mayor de gravas, arenas gruesas y ripios. Si bien, en los diferentes sectores que posee la zona de estudio se presentan diferentes fracciones de sedimentos, en toda la zona el estrato presenta una permeabilidad óptima para el establecimiento de acuíferos. Esta se encuentra entre los  $10^{-2}$  y los  $10^{-4}$  m/s.

- Estrato inferior:

Se ubica sobre el basamento rocoso, presentando una fina granulometría con elevadas proporciones de arcillas. La matriz es abundante y se encuentra compuesta principalmente por arcillas. Y la fracción clástica exhibe arenas medias a finas.

Este alto contenido de finos le otorgan un carácter de estrato impermeable con una permeabilidad estimada entre los  $10^{-4}$  y los  $10^{-6}$  m/s.

#### 4.1.2. Recargas y descargas

Las recargas y descargas del sistema se deben a diferentes procesos que relacionan el ciclo de aguas superficiales con los procesos subterráneos. Dentro de estos se encuentra la infiltración desde cauces, precipitaciones, riego y pérdidas desde el sistema de agua potable, los afloramientos desde los cauces, las extracciones por bombeo y el flujo desde y hacia acuíferos vecinos.

- Recargas

Las recargas, como se mencionó con anterioridad, se deben a infiltraciones desde cauces, precipitación, riego y pérdidas desde el sistema de agua potable. Para determinar dichas recargas el Modelo DGA 2000 utilizó el modelo superficial elaborado para el mismo estudio (Dirección General de Aguas, 2000), dichas recargas se sectorizaron en 46 zonas según la fuente predominante de infiltración.

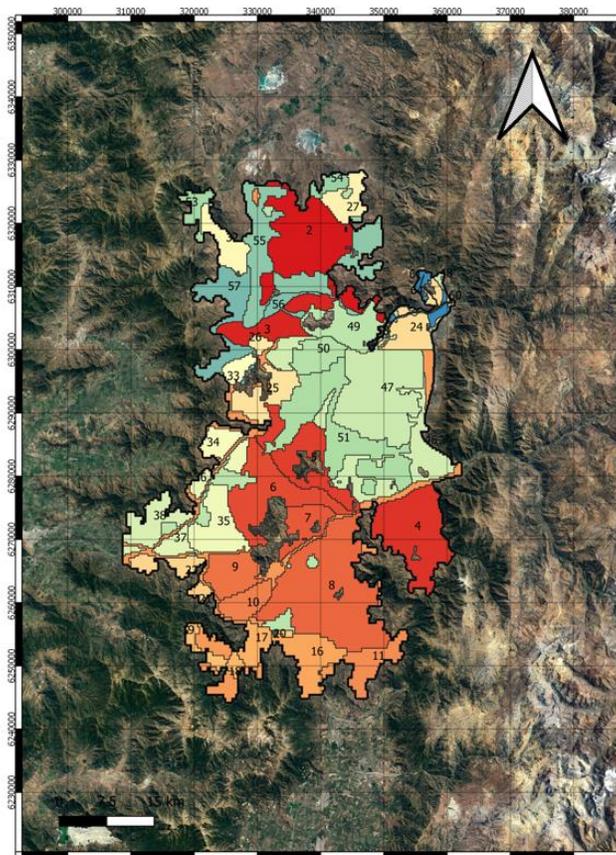


Figura 4-2. Zonas de recarga dentro del acuífero

De este modo, se definieron zonas que incluyen las recargas desde riego, cauces y precipitación, zonas que incluyen recargas desde infiltración de la red de agua potable y precipitación (determinadas en el Modelo Superficial) y finalmente zonas que dependían completamente de la precipitación. Como el Modelo DGA 2000 abarca el periodo desde el 1990 hasta el 1998, esta recarga solo está definida para ese periodo. Las zonas de recarga y sus montos, definidas en el Modelo DGA 2000 para el periodo 1990-1998 se utilizan en el modelo actualizado, y dicho espacio temporal será considerado como el régimen permanente del presente estudio (se profundizará en el tema en la sección 5.2).

Para determinar las recargas en el periodo comprendido entre el 1998 y 2020 es necesario encontrar una función que permita transferir los efectos del proceso de precipitación sobre la recarga del acuífero. Para encontrar dicha función de transferencia, se utiliza la información histórica de las cinco estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de los límites del acuífero y cuentan con información en el periodo y las recargas anuales utilizadas en el Modelo DGA 2000. Se elabora un gráfico de precipitaciones medias anuales (PMA) de cada una de las estaciones versus las recargas anuales del modelo, el cual permite establecer una correlación entre ambos procesos, como se muestra en la Figura 4-3.

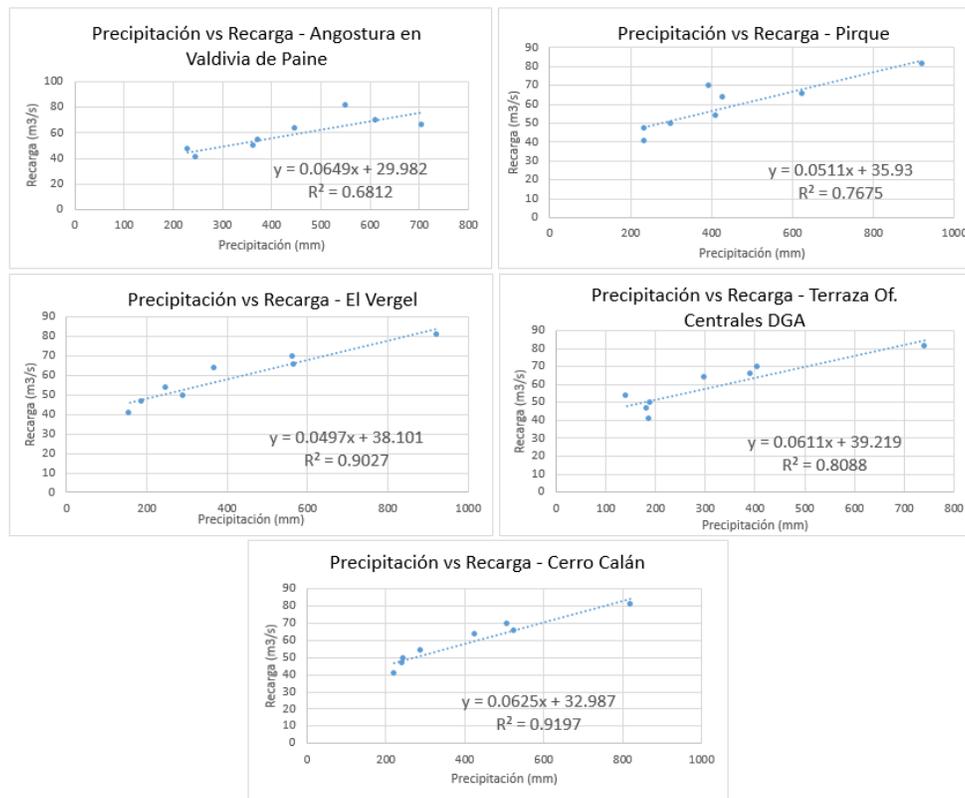


Figura 4-3. Correlación entre precipitación media anual en estaciones meteorológicas presentes en el acuífero y recarga anual utilizada en el Modelo DGA 2000.

Al observar la Figura 4-3, se aprecia que la estación que establece una relación más confiable entre precipitación y recarga es Cerro Calán, presentando un coeficiente de determinación de 0,92. Por este motivo, se utiliza la regresión lineal de dicha estación como función de transferencia.

$$RA = 0.0625 \cdot PMA + 32.987 \quad (2)$$

donde:

- RA = Recarga anual utilizada en el Modelo DGA 2000 en m<sup>3</sup>/s.
- PMA = Precipitación Media Anual en la estación Cerro Calán en mm

Utilizando la función (2) se proyectaron las recargas anuales desde el 1998 hasta el 2020, y luego se distribuyó en cada una de las zonas (dicha distribución se encuentra en la sección de anexos). En la Figura 4-4 se presenta la correlación entre las precipitaciones, la recarga utilizada y la recarga proyectada, en esta se aprecia que al año 2020 el caudal de recarga es aproximadamente de 50 m<sup>3</sup>/s. Cabe destacar que la función de transferencia se utilizará para proyectar las precipitaciones en los escenarios futuros, correspondientes al periodo 2020-2070.

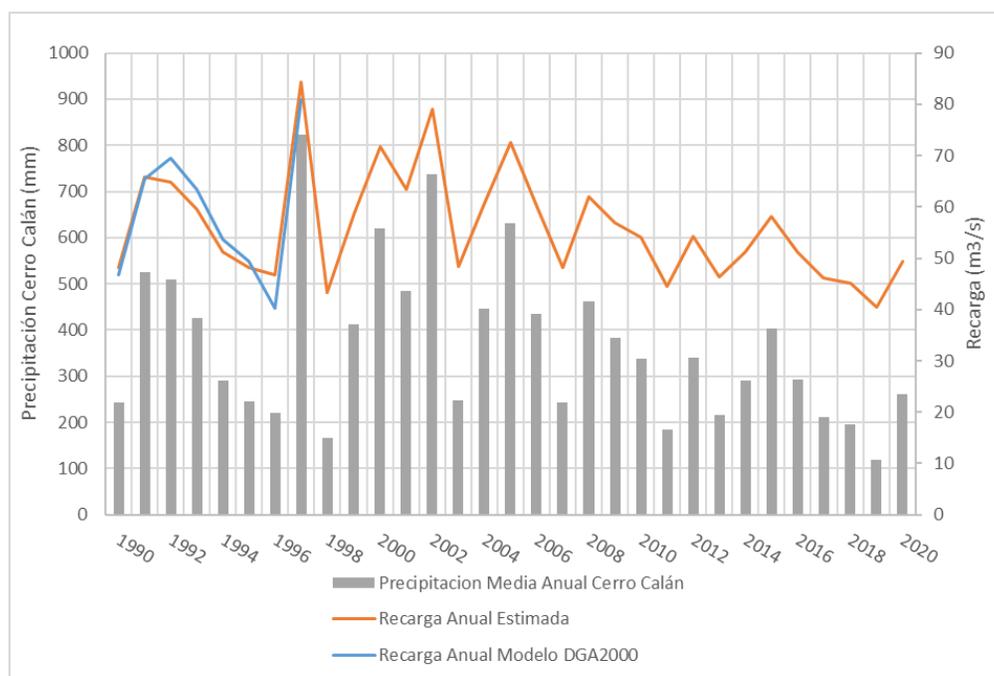


Figura 4-4. Correlación entre precipitación y recarga - Cerro Calán

Tabla 4-2. Tasas de recarga anual a ingresar al modelo

Año	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Área (km <sup>2</sup> )	Tasa (m/d)
1998	56.198	2350	0.522
1999	59.117	2350	0.528
2000	72.234	2350	0.645
2001	63.716	2350	0.569
2002	79.642	2350	0.711
2003	48.684	2350	0.434
2004	61.190	2350	0.546

Año	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Área (km <sup>2</sup> )	Tasa (m/d)
2005	72.945	2350	0.651
2006	60.503	2350	0.540
2007	48.451	2350	0.432
2008	62.286	2350	0.556
2009	57.334	2350	0.512
2010	54.776	2350	0.489
2011	44.734	2350	0.399
2012	54.518	2350	0.486
2013	46.700	2350	0.417
2014	51.488	2350	0.459
2015	51.973	2350	0.464
2016	58.178	2350	0.519
2017	56.622	2350	0.505
2018	44.369	2350	0.396
2019	40.680	2350	0.363
2020	56.652	2350	0.506

- Descargas

Por su parte, las descargas del acuífero corresponden principalmente a afloramientos desde cauces, salidas desde aguas abajo del acuífero y pozos de bombeos para diferentes usos. Los datos de bombeos se obtienen desde el Catastro Público de pozos de extracción perteneciente a la DGA para el caso de aguas destinadas al Riego, Industrias y Minería. Para el caso de Agua Potable, los datos fueron obtenidos a través del Control de Extracciones también perteneciente a la DGA. En total, los pozos de bombeo son 1803, repartidos en todo el acuífero, y el caudal de extracción aproximado año tras año se presenta en la Tabla 4-3.

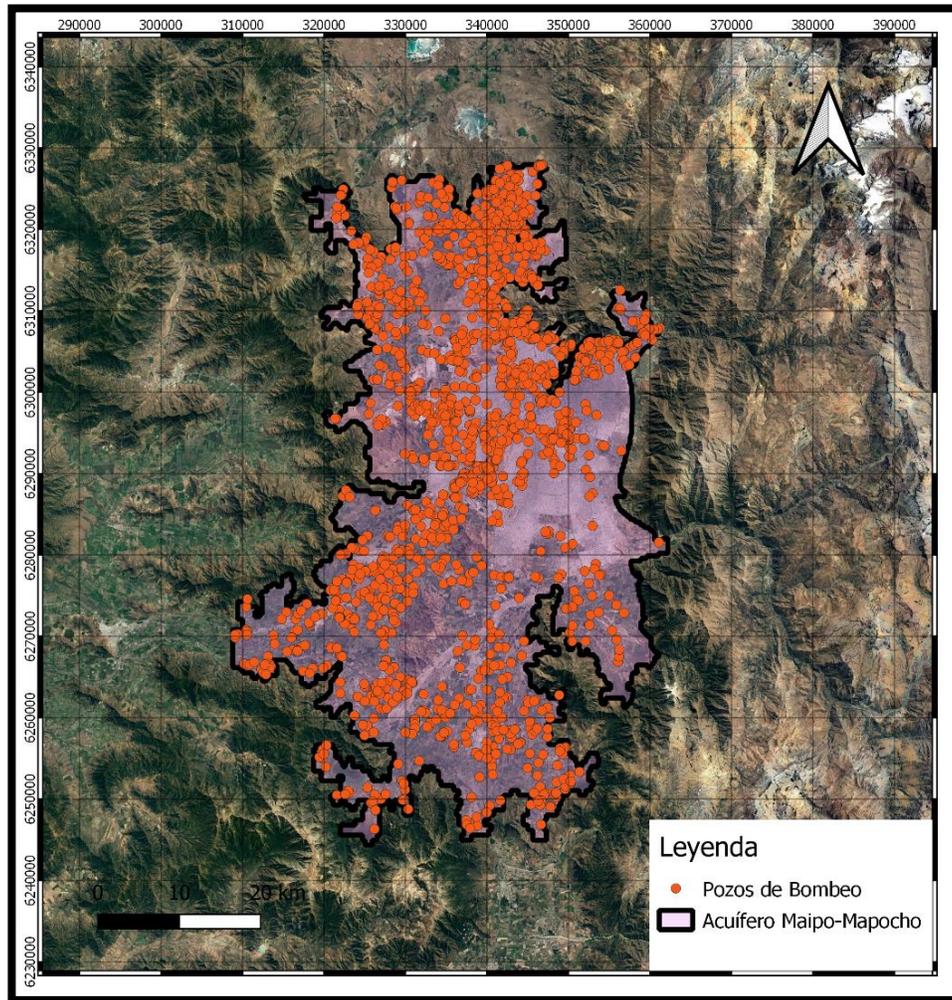


Figura 4-5. Pozos de Bombeo totales dentro del acuífero

Tabla 4-3. Caudal de extracción anual

Año	Caudal de Extracción (m <sup>3</sup> /s)
1998	23.2
1999	24.0
2000	24.6
2001	25.1
2002	25.6
2003	26.0
2004	26.2
2005	26.4
2006	26.5
2007	26.6
2008	26.7
2009	26.8
2010	26.9
2011	27.0

Año	Caudal de Extracción (m <sup>3</sup> /s)
2012	27.1
2013	27.3
2014	27.4
2015	27.5
2016	27.6
2017	27.7
2018	27.8
2019	27.9
2020	28.0

#### 4.1.3. Parámetros del modelo

Para determinar las constantes elásticas, es necesario asignar valores iniciales de permeabilidad y coeficiente de almacenamiento que permitan establecer el orden en los que se moverán dichos valores. El rango asignado como punto de partida será modificado en el proceso de calibración, llegando así a los parámetros definitivos.

En el presente modelo se utilizarán los valores de los parámetros definidos en el Modelo DGA 2000. La permeabilidad en dicho modelo, se obtuvo llevando a cabo un plano de curvas de isotransmisibilidades el cual se dividió por el espesor del medio permeable. En el caso del coeficiente de almacenamiento el modelo basó sus asignaciones en el estudio del Proyecto Maipo (IPLA, 1984). En la Figura 4-6 se presentan las asignaciones del modelo previo, que serán utilizadas como referencia para la actualización.

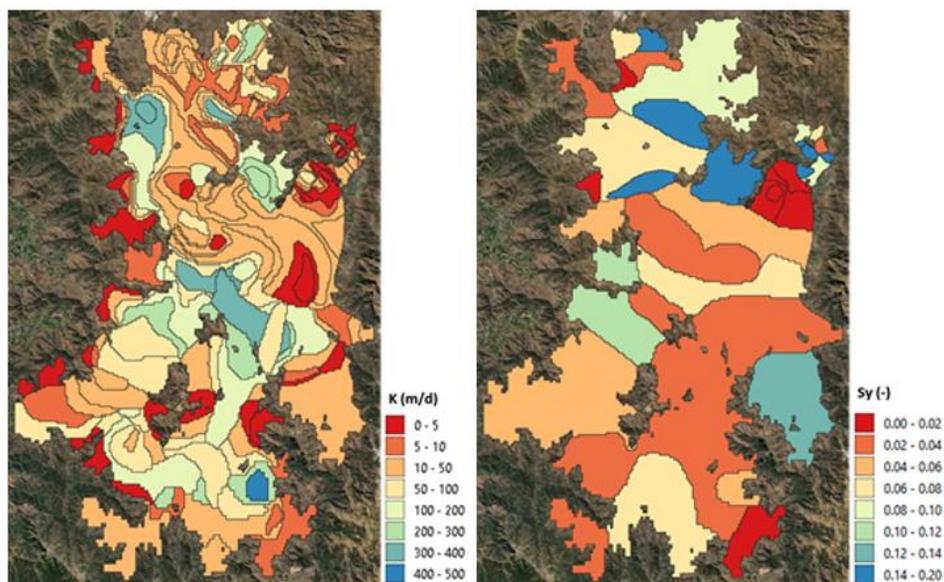


Figura 4-6. Parámetros iniciales del modelo

#### 4.1.4. Condiciones de borde

Las condiciones de borde que rigen el funcionamiento del sistema son las que imponen los niveles constantes y los cauces.

- Condiciones de borde de nivel constante

Las condiciones de nivel constante fueron determinadas a partir de datos históricos de niveles, con el objeto de representar el comportamiento histórico en las secciones escogidas. Las secciones elegidas se encuentran ubicadas en los límites del acuífero considerando las características del flujo dentro del sistema y son las consideradas en el modelo DGA (2000). Se determinan 5 secciones con la condición de borde de nivel, cuatro de ellas se encuentran aguas arriba del flujo y una aguas abajo. Esto se representa en la Figura 4-7.

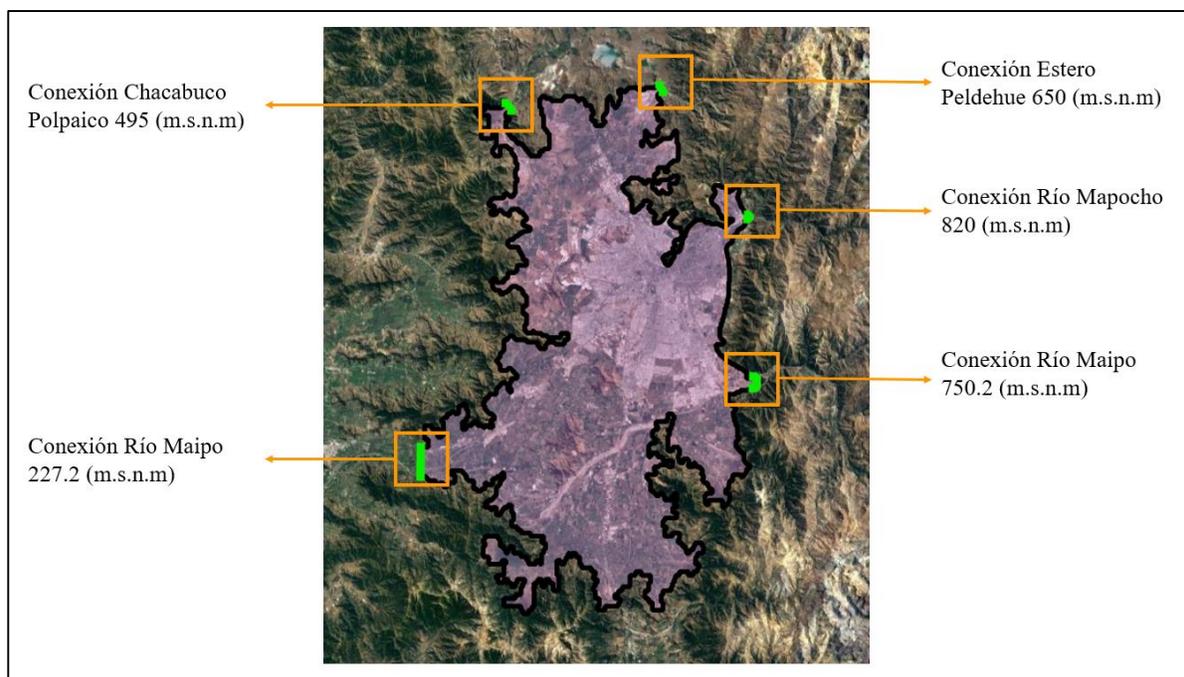


Figura 4-7. Condiciones de borde de nivel constante

Una de las condiciones aguas arriba se ubica al noroeste del área modelada en el sector de Polpaico en Chicauma, otra se encuentra situada al este de la anterior en el sector de Peldehue, la siguiente condición corresponde a la entrada del río Mapocho y la última coincide con la entrada al río Maipo. En todos los casos los niveles fueron determinados con datos de pozos de observación cercanos. La sección aguas abajo corresponde a la salida del flujo del acuífero en donde el flujo es abundante lo que permite que los niveles se mantengan constantes (Dirección General de Aguas, 2000).

- Condiciones de borde tipo río

Los diferentes cauces que se encuentran presentes en el área de estudio imponen condiciones relevantes de recarga y descarga al sistema.

Aguas arriba, la mayor parte de los ríos poseen un comportamiento de recarga, como es el caso del río Mapocho y del río Maipo, que actúan recargando el acuífero desde su inicio hasta que comienza el tramo revestido. Aguas abajo se encuentra la zona de afloramientos, en donde el agua subterránea al no poder salir del acuífero completamente a través del medio subterráneo comienza a descargar hacia el río (Dirección General de Aguas, 2000). Dichos comportamientos quedan determinados por las equipotenciales de nivel freático que indican que las aguas se muevan desde zonas con mayor nivel hacia zonas con un nivel menor. Sumado a esto, la magnitud del comportamiento de recarga o descarga se encuentra definida por la conductividad hidráulica del lecho. Los principales cauces que regulan el comportamiento del medio subterráneo se presentan en la Figura 4-8.

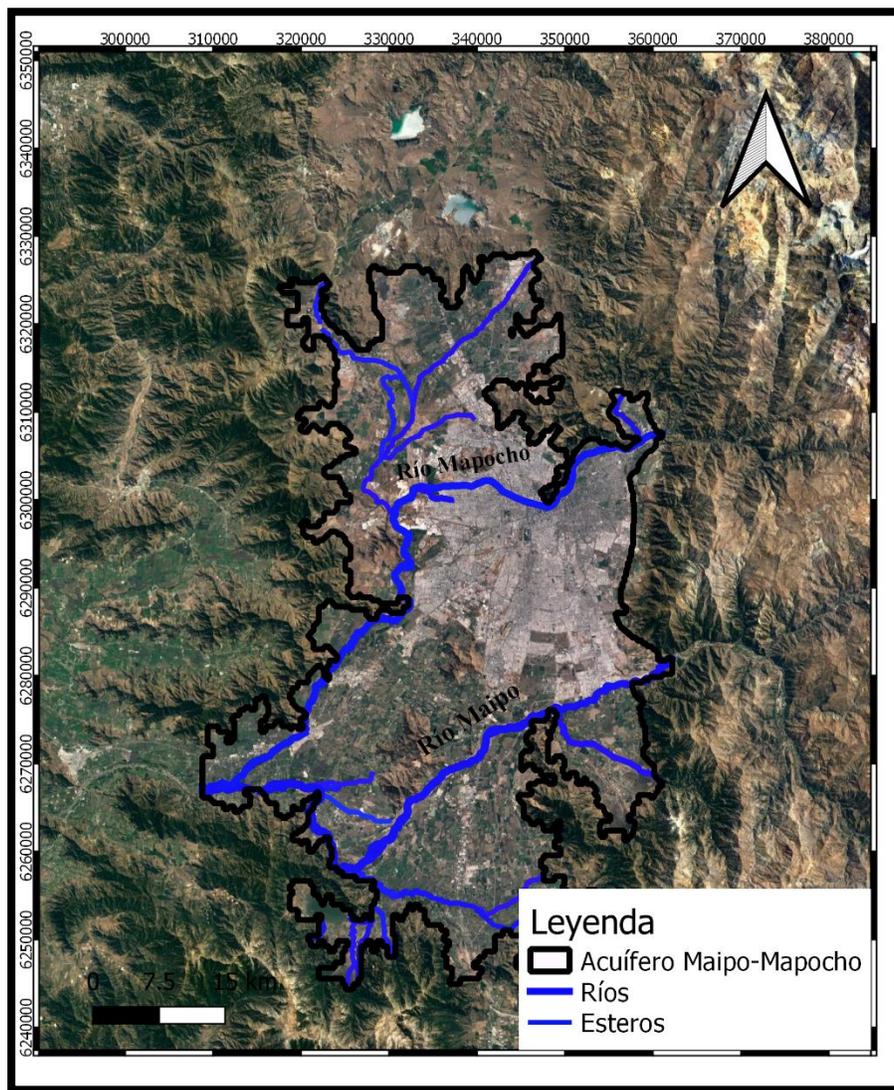


Figura 4-8. Cauces situados sobre el acuífero

## 4.2. Modelo numérico

Ya definido el modelo conceptual se procede a la construcción del modelo numérico, utilizando como base cada una de las componentes descritas en el capítulo 4.1.

Como se menciona en el capítulo 1, el software a utilizar para llevar a cabo el modelo numérico es Modelmuse (MODFLOW 6), debido a la flexibilidad para trabajar con malla no estructurada.

### 4.2.1. Discretización espacial

- Discretización en planta

Se comienza la construcción del modelo estableciendo los límites del área a modelar y la división de dicha área en celdas rectangulares. Los límites en planta fueron presentados en la caracterización hidrogeológica del área de estudio, y la división general del área se efectuó en celdas cuadradas de 300m x 300m. En algunos sectores del área de estudio se realizó un refinamiento, dividiendo gradualmente dichos sectores en celdas más pequeñas. Los sectores a los que se les aplicó refinamiento corresponden a los límites del acuífero, el sector alto del río Mapocho y a los cauces. En el caso de los límites del acuífero y el sector alto del río Mapocho las celdas quedaron con dimensiones de 150m x 150m, mientras que los cauces fueron divididos en celdas de 75m x 75m. Dichos refinamientos tienen como objetivo entregar un mayor nivel de detalle en aquellos sectores que cumplen un rol importante en el funcionamiento del acuífero.

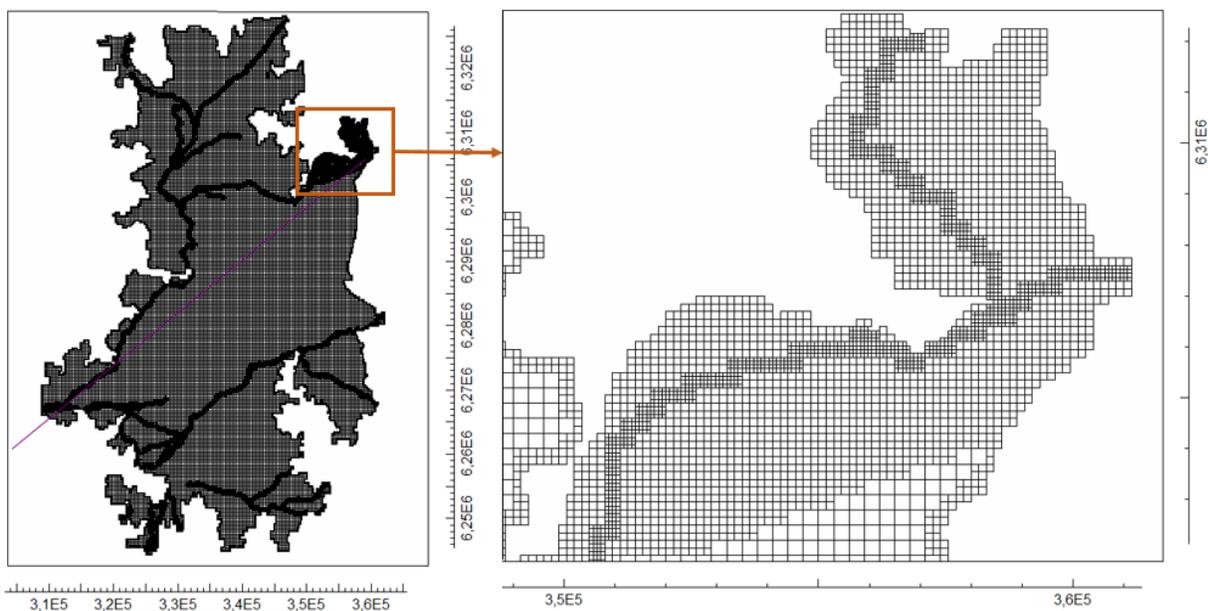


Figura 4-9. A la izquierda discretización de todo el acuífero, a la derecha zoom de la zona alta del río Mapocho

En la Figura 4-9 se aprecia por una parte la discretización general del acuífero y las zonas con refinamiento (sectores más oscuros) y a la derecha, al hacer acercamiento al sector alto del río Mapocho, se pueden observar las celdas refinadas.

Se distingue que tanto los bordes como el sector alto presenta celdas de lados que miden la mitad de las aristas de las celdas generales y en el caso de los cauces, sus lados abarcan un cuarto de las aristas generales.

- Discretización vertical

Los límites en la vertical fueron definidos según el Modelo DGA 2000, el cual a su vez se basó en planos de la Comisión Nacional de Riego, utilizando AUTOCAD para la digitalización de las curvas de terreno y el software SURFER para la generación de una superficie tridimensional. Lo que se obtuvo a partir de este procedimiento fue una capa vectorial de puntos que describen el relieve tanto de la cota de terreno (Top) como del basamento rocoso (Bottom). Cabe destacar, que en el modelo conceptual se definieron tres estratos, sin embargo, solo el estrato intermedio albergaba la principal parte del acuífero, mientras que el superior se encuentra seco en el 80% de su área y el inferior presenta características mayoritariamente impermeables. Debido a esto, resulta más apropiado modelar el acuífero como un único estrato, manteniendo las características de las tres unidades que lo conforman. Debido a las condiciones de los estratos extremos, para definir los parámetros iniciales de permeabilidad y coeficiente de almacenamiento se utilizan las características del estrato intermedio, en el cual se encuentran la mayor cantidad de sondajes y dentro de los límites que se encuentra la napa freática. Los límites verticales del sistema y su discretización se presentan en la Figura 4-10 y en la Figura 4-11.

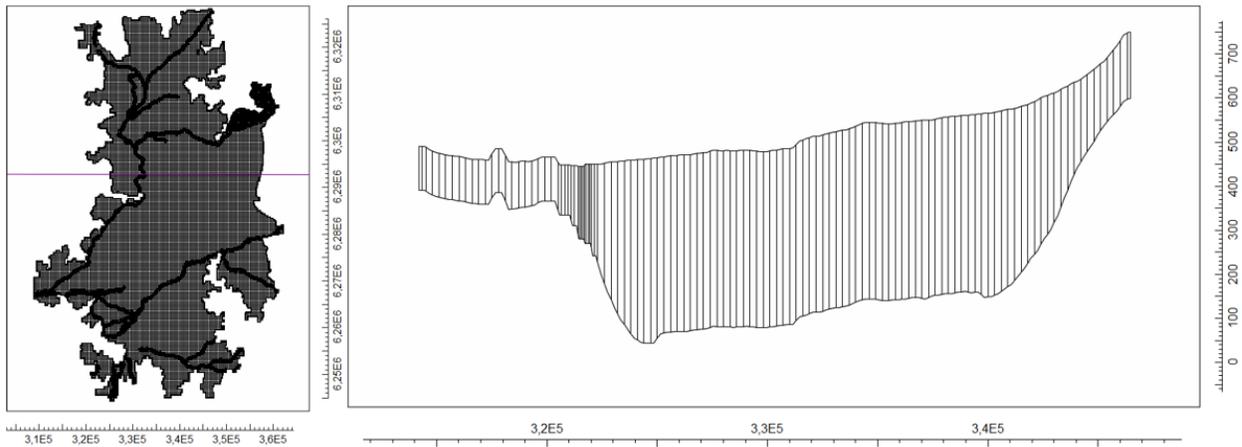


Figura 4-10. A la izquierda vista en planta con línea (morada) de corte Oeste-Este. A la derecha vista frontal del corte.

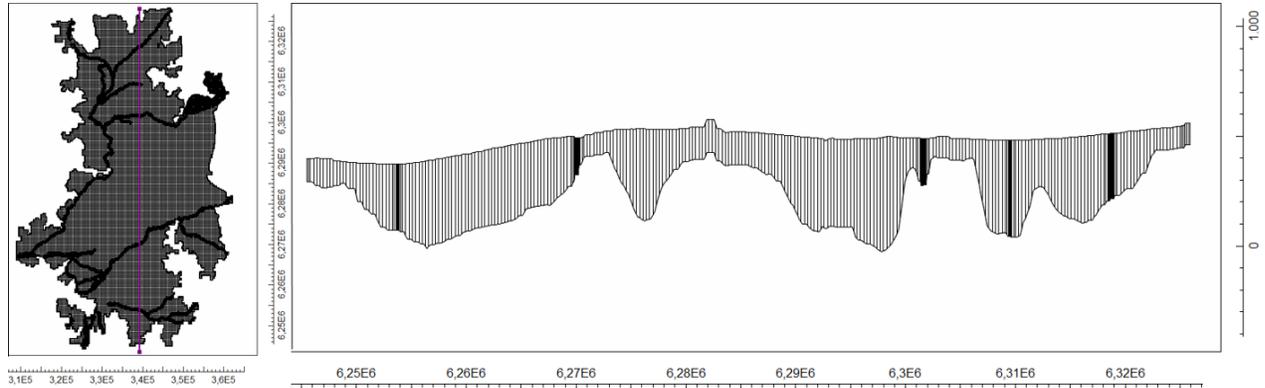


Figura 4-11. A la izquierda vista en planta con línea (morada) de corte Norte-Sur. A la derecha vista frontal del corte.

#### 4.2.2. Discretización temporal

El periodo considerado para modelar es el transcurrido desde enero de 1998 hasta diciembre del 2020. El año de inicio fue escogido debido a que es el año de término del modelo DGA (2000), el que se utiliza como punto de partida y presenta la información suficiente para ser la condición inicial del modelo. Por su parte, se modelo hasta el año 2020 para que represente la realidad actual del acuífero, existe información robusta en estos años y al ser más de 20 años de actualización presenta confiabilidad en las tendencias durante el periodo.

La totalidad del periodo fue dividido en 23 intervalos principales que corresponden a los 23 años que se representan en el modelo. Dichos intervalos son denominados “periodos de stress o stress period” y cada uno es dividido en 12 sub intervalos que coinciden con los meses de cada año y se denominan “paso de tiempo o time step”. Como se trata de meses del año, cada paso de tiempo tiene un largo de 31 días. Todos los periodos de stress son divididos en 12 pasos de tiempo a excepción del que corresponde al año 1998 el cual solo es conformado por 1 paso. Esta excepción se da debido a que el año, 1998 al ser la condición inicial del modelo, se considera como un periodo de stress en régimen permanente. Los demás periodos representan un régimen transiente que depende del tiempo. El total de pasos de tiempo modelados es de 265, lo que corresponde a 264 meses más el año 1998.

El desglose de la discretización temporal se observa en la siguiente figura obtenida desde Modflow Time del modelo.

Stress period	Starting time	Ending time	Length	Max first time step length	Multiplier	Steady State/ Transient	Drawdown reference	Number of steps (calculated)
1	-1	0	1	1	1	Steady state	<input checked="" type="checkbox"/>	1
2	0	365	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
3	365	731	366	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
4	731	1096	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
5	1096	1461	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
6	1461	1826	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
7	1826	2192	366	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
8	2192	2557	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
9	2557	2922	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
10	2922	3287	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
11	3287	3653	366	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
12	3653	4018	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
13	4018	4383	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
14	4383	4748	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
15	4748	5114	366	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
16	5114	5479	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
17	5479	5844	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
18	5844	6209	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
19	6209	6575	366	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
20	6575	6940	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
21	6940	7305	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
22	7305	7670	365	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12
23	7670	8036	366	31	1	Transient	<input type="checkbox"/>	12

Figura 4-12. Detalle de la discretización temporal del modelo

### 4.2.3. Recargas y descargas

- Recargas:

Como se mencionó en el capítulo de modelo conceptual, las principales recargas del sistema se deben a precipitaciones y riego. En dicho capítulo se presentaron las zonas de recarga del acuífero, así como también la metodología para proyectar la recarga desde el 1998 hasta el 2020. Para aplicar dicha información en el modelo se utilizó la capa Shape que representa las zonas de recarga (Figura 4-2) y a cada una de estas se le asoció el paquete de recarga del modelo. Este paquete corresponde a RCH: Recharge package, perteneciente a la categoría de condiciones de borde de flujo específico. En este paquete las recargas se ingresan en tasas, con unidades de m/d, por lo que el caudal de recarga es dividido por las áreas de cada zona. Debido a que cada año presenta cambios en la recarga esto también se debe representar en cada periodo de stress del modelo. Las recargas anuales se presentan en la tabla 4-3, mientras que la fracción que ocupa cada zona del área total del acuífero se presenta en la sección de anexos, dichas proporciones se utilizan para dividir las recargas anuales.

- Descargas

Las principales descargas del sistema corresponden a los pozos de extracción. Para representar los bombeos en el modelo se utilizó el Shape que se presenta en el modelo conceptual, el cual ubica los pozos en el acuífero.

Luego a cada uno de estos pozos se le asigna el paquete WEL: Well package, perteneciente a la categoría de condiciones de borde de flujo específico al igual que el paquete RCH. Las tasas de bombeo se ingresan en unidad de caudal en  $m^3/d$ , con el signo negativo que indica que está saliendo agua del acuífero. A cada periodo de stress se le ingresa valores distintos y crecientes ya que la demanda va aumentando año a año en el periodo de modelación.

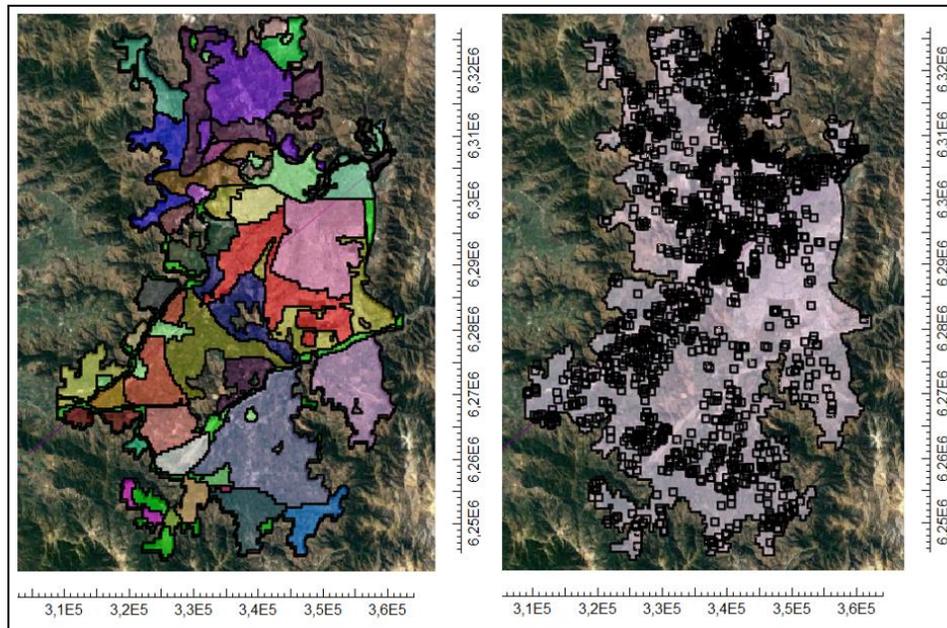


Figura 4-13. Recargas y descargas aplicadas al modelo. A la izquierda zonas de recarga. A la derecha pozos de bombeo.

#### 4.2.4. Condiciones de borde

- Condición de nivel constante

La ubicación de los sectores que presentan un comportamiento histórico constante fueron presentadas en el capítulo Modelo conceptual. La misma capa vectorial fue ingresada a ModelMuse para ubicar los sectores en el acuífero. A estos sectores se les asignó el paquete CHD: Time-Variant Specified-Head package, perteneciente a la categoría de condiciones de borde de nivel específico. La unidad de los valores ingresados corresponde a metros y al tratarse de un nivel constante, este no cambia para ninguno de los 23 periodos de stress del modelo.

- Condición de río

Los ríos y esteros que componen esta condición se encuentran ubicados según lo que se aprecia en el modelo conceptual. La misma capa vectorial es aplicada al modelo para señalar donde se sitúan los cauces. Cabe destacar que los ríos Maipo y Mapocho fueron seccionados en 3 tramos que permiten representar las zonas de recarga y descarga de los mismos. El paquete utilizado para representar la condición de río es RIV: River package, que pertenece a la sección de flujos dependiente del nivel, de la categoría de condiciones de borde y permite representar los flujos desde los cauces al acuífero y viceversa.

Para cada uno de los cauces ingresados se solicita el periodo de tiempo de ejecución que en este caso corresponden a los 23 periodos de stress, un valor de conductancia, un valor del pelo de agua del río y un valor del fondo del río. La conductancia indica, en simples palabras, el grado de “apertura” del fondo del río para que circule el agua, este parámetro se utiliza en el periodo de calibración por lo que su valor final puede ser distinto al inicial. Este parámetro tiene unidades de  $L^2/T$ , sin embargo, para ingresarlo a ModelMuse se utiliza la conductancia por unidad de longitud por lo que para ingresar al modelo se utilizan unidades de  $L/T$ . Como punto de partida se tomaron los valores de 2 y 3 (m/d) para para esteros y ríos respectivamente. El pelo de agua de los ríos se asumió como la cota de superficie o Top del acuífero, mientras que el fondo se determinó según este valor siendo 0,5 metros bajo el Top en el caso de esteros y un valor entre 0,5 y 3 metros bajo el nivel de la superficie en el caso de los ríos.

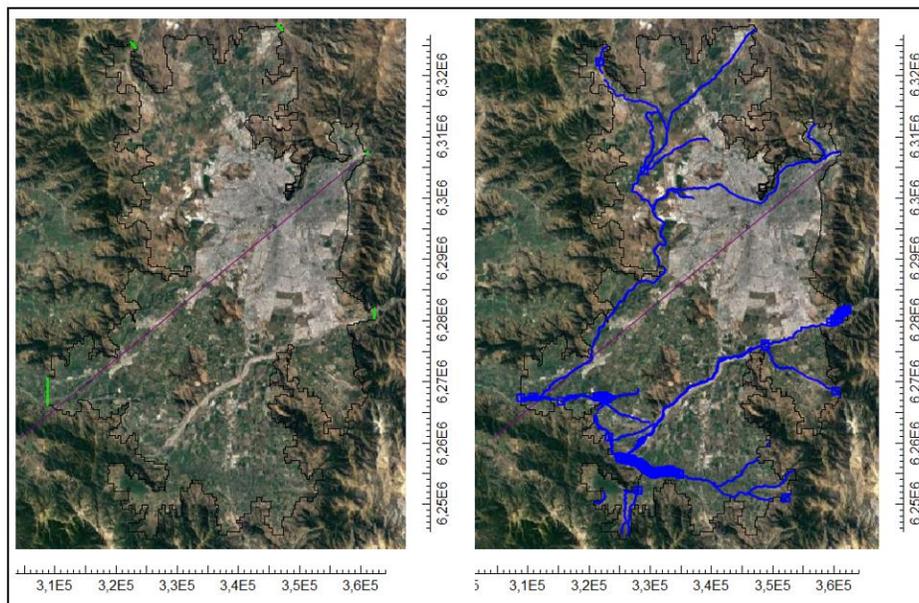


Figura 4-14. Condiciones de borde aplicadas al modelo. A la izquierda condiciones de nivel constante y a la derecha condiciones tipo río.

#### 4.2.5. Pozos de Observación

Para llevar a cabo el proceso de calibración del modelo, tanto en el periodo en régimen permanente como transiente, es necesario contar con datos históricos que permitan conocer la realidad del acuífero y comparar con los resultados del modelo. Para esto, se utilizó la información de 46 pozos de observación distribuido en todo el acuífero y presentes en los diferentes SHACs que lo conforman. Dichos pozos presentan los niveles piezométricos en el periodo de calibración, mostrando concordancia en sus valores. Los pozos que presentaban anomalías con respecto a su entorno fueron excluidos de la selección utilizada para la calibración. Para ingresar los pozos de observación al modelo se utilizó el paquete OBS: Observation Utility junto con las coordenadas de cada punto de sondaje.

Tabla 4-4. Pozos de observación presentes en el acuífero

Pozo	Código BNA	Coord. UTM (*)		Cota (msnm)
		E (m)	N (m)	
5 DE ABRIL 4534 DINAMIC OIL	05730028-0	342,515	6,296,619	502
A.P. EL MONTE	05737013-0	316,677	6,272,450	298
A.P. HUELQUEN	05714002-K	348,896	6,254,096	433
A.P. SANTA ROSA	05737015-7	334,401	6,284,677	466
AEROPUERTO PUDAHUEL	05736002-K	335,682	6,304,090	477
AMUNATEGUI 42	05730055-8	346,227	6,298,629	546
ASENTAMIENTO EL TAQUERAL	05735010-5	334,990	6,314,699	484
ASENTAMIENTO EL VALLE	05734009-6	321,900	6,320,420	505
ASENTAMIENTO LAGUNA	05734007-K	330,921	6,324,011	483
ASENTAMIENTO LAS VERTIENTES	05715002-5	333,235	6,257,927	370
ASENTAMIENTO MALLOCO	05737011-4	329,236	6,281,948	413
AV. KENNEDY 6774	05730017-5	354,806	6,304,158	703
CASAS DE SAN LUIS	05737012-2	323,930	6,274,997	365
CHACRA ANDALUCIA	05737010-6	330,992	6,281,577	432
COLONIA DE PAINE	05715003-3	337,228	6,257,525	387
CONSEJO NACIONAL DE MENORES	05730026-4	334,638	6,298,089	479
COOPERATIVA PINTUE	05716007-1	337,420	6,247,173	391
CURAMAVIDA 729	05730019-1	358,256	6,305,315	786
EL CRUCERAL	05710008-7	350,600	6,275,595	643
ENTEL BATUCO	05734005-3	331,852	6,321,162	485
ESCUELA 22 VILUCO	05712005-3	332,857	6,261,443	395
ESTADIO SAN JORGE	05730020-5	357,349	6,304,729	756
FDO. EL ALMENDRAL	05734008-8	329,731	6,318,880	480
FUNDO CACHANTUN	05712004-5	346,756	6,258,680	401
FUNDO LA CADELLADA	05734003-7	333,919	6,324,665	491
FUNDO LA LAGUNA	05734006-1	328,517	6,325,389	482
FUNDO LA MONTAÑA	05735009-1	339,688	6,312,605	487
FUNDO REINA SUR 2	05735008-3	341,621	6,326,307	567
FDO SAN ALBERTO MARRUECOS	05737009-2	332,674	6,286,498	447
FUNDO SANTA LUCIA	05737014-9	330,505	6,285,873	425
FDO SANTA MARTA CULITRI	05714001-1	348,532	6,252,073	428
FDO SANTA ROSA DE LAMPA	05734004-5	335,009	6,320,270	497
HIJUELA EL OLIVO	05730027-2	335,920	6,295,481	470
LA CAPERANA	05712006-1	330,760	6,264,490	406
LIBERTAD 1227	05730051-5	344,504	6,300,011	532
LO ARCA YA	05735006-7	342,366	6,321,402	541
MANIZALES 1980	05730018-3	353,715	6,305,051	690
MATUCANA 741	05730050-7	344,009	6,299,412	524
MOLINA 704	05730049-3	344,995	6,296,985	525
OCHAGAVIA 5601	05730023-K	345,257	6,292,186	542
PARCELA 62 NOVICIADO	05736003-8	324,469	6,303,364	493

Pozo	Código BNA	Coord. UTM (*)		Cota (msnm)
		E (m)	N (m)	
PARCELA 7 LIRAY	05735011-3	337,766	6,321,124	515
PORTUGAL 125	05730054-K	347,976	6,298,680	566
POZO MISION CORAZON DE MARIA	05737016-5	321,982	6,273,340	343
VIGNA SANTA INES	05717010-7	326,947	6,265,514	352

#### 4.2.6. Régimen permanente

El régimen permanente considerado para este modelo corresponde al año 1998 y queda determinado por un periodo de stress que va desde el -1 al 0, ya que no hay variación en el tiempo, y es la condición inicial para lo que resta del periodo a modelar.

Al modelo en este régimen se le ingresaron todas las condiciones de borde, recargas y descargas presentadas anteriormente en este capítulo, en donde en el caso de los ríos se consideraron parámetros iniciales que pueden ser ajustados en el periodo de calibración. Sumado a estas condiciones es necesario agregar parámetros que representen las características del suelo, en este caso la conductividad hidráulica (k) que se estudia en la siguiente sección.

##### 4.2.5.1 Parámetro del modelo: Conductividad Hidráulica (k)

La conductividad hidráulica (k) determinado por la Ley de Darcy, es una característica del suelo y determina la capacidad de este para permitir el paso de algún fluido. Este coeficiente depende del tipo de suelo, de la viscosidad del agua, entre otros.

Para el caso del presente modelo, este parámetro toma un valor inicial que es el presentado en la Figura 4-15 el que a su vez se encuentra basado en lo presentado en el modelo conceptual. Cabe destacar que el valor escogido es el medio para cada rango. Este valor se va ajustando en el proceso de calibración y permite llegar a márgenes adecuados de error. Como se considera que el medio es isotrópico el k establecido será el mismo para las tres dimensiones del volumen del acuífero, es decir,  $k_x=k_y=k_z$ .

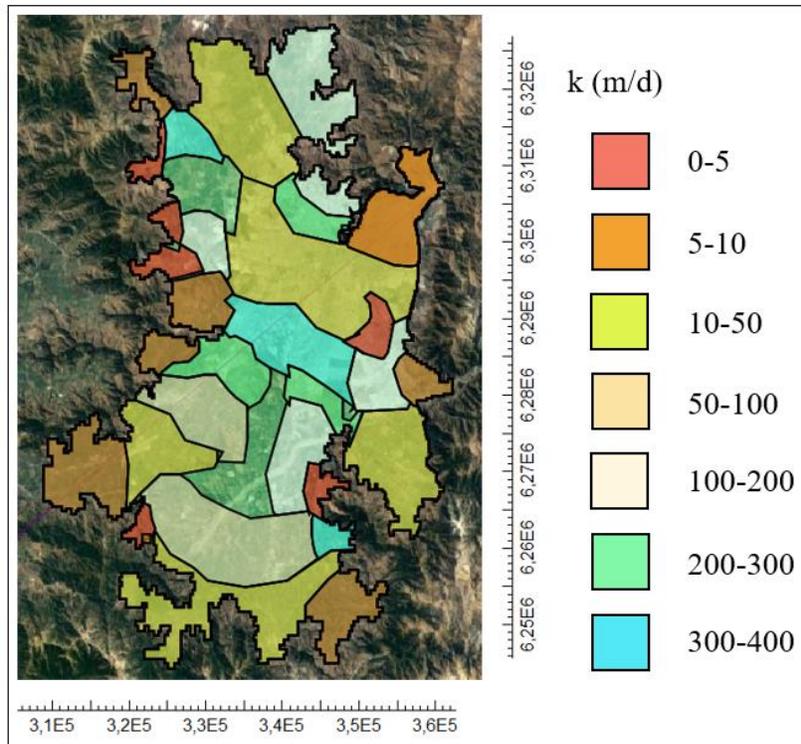


Figura 4-15. Coeficientes de permeabilidad inicial para el régimen permanente.

Al finalizar la calibración en régimen permanente, el parámetro quedó determinado por los valores que se presentan en la siguiente figura.

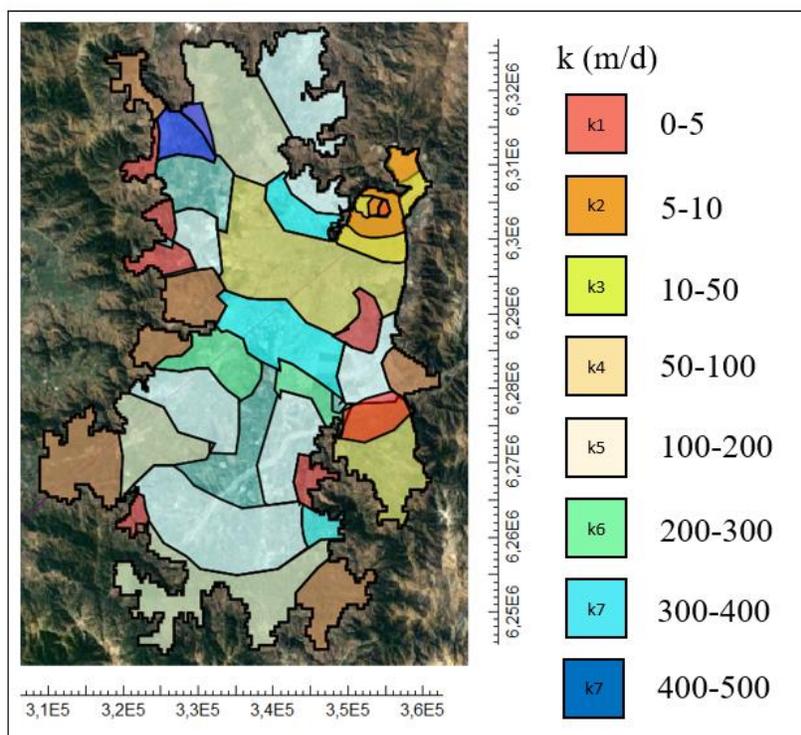


Figura 4-16. Conductividad hidráulica final en régimen permanente

Para la configuración final de los coeficientes de permeabilidad, los valores utilizados no fueron los medios de cada rango, si no que tomaron valores variados dentro del rango.

#### 4.2.5.2 Calibración y balance

- Calibración

En el periodo de calibración se ajustaron valores como el k que se presentó en la sección anterior y las conductancias de los ríos. Al final del proceso de calibración el ajuste entre niveles observados y niveles simulados resultante se presenta en la

Figura 4-17. Este gráfico muestra el ajuste para cada uno de los SHACs que conforman el acuífero. Para establecer los errores del modelo al ser comparado con los datos históricos, se utilizan los estadísticos de Error Absoluto Medio (MAE) y Error Cuadrático Medio (RMSE) que se presentan en las ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum |r_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum r_i^2} \quad (4)$$

donde:

- n: Total de datos
- r<sub>i</sub>: Diferencia entre valor observado y valor simulado

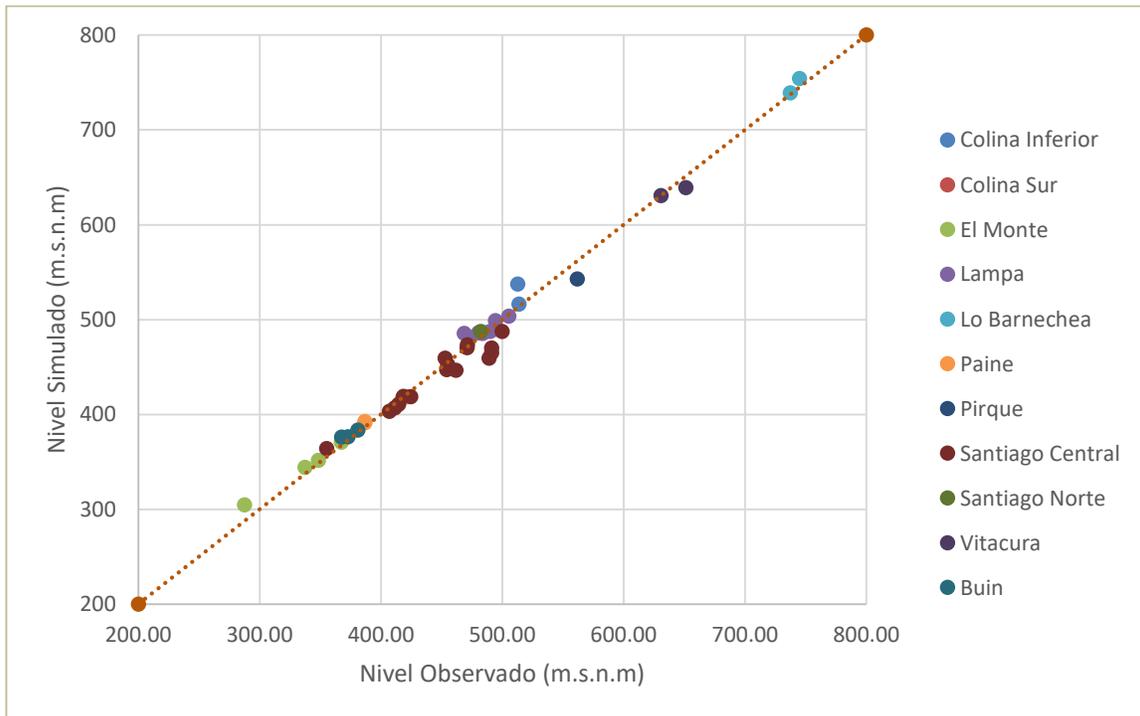


Figura 4-17. Gráfico de ajuste de Niveles Observados versus Niveles Simulados en régimen permanente

Por otra parte, los errores obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

*Tabla 4-5. Valores del Error Absoluto Medio y Error Cuadrático Medio luego de la calibración del modelo en régimen permanente.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Nivel Máximo (m.s.n.m)	744.89
Nivel Mínimo (m.s.n.m)	287.61
Diferencia Máxima (m)	457.28
5% Diferencia Máxima (m)	22.86
N° Pozos	45
MAE (m)	7.49
RMSE (m)	10.43
NMAE (%)	1.64
NRMS (%)	2.28

Se aprecia que luego de la calibración el Error Absoluto Medio es menor que el 5% de la diferencia máxima de niveles piezométricos observados, por lo que según la Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental), se considera un valor aceptable de error.

- Balance

Finalmente, el balance hídrico global del sistema se presenta en la Tabla 4-6

*Tabla 4-6. Balance hídrico global del modelo actualizado al año 1998.*

<b>Entradas (m<sup>3</sup>/s)</b>		<b>Salidas (m<sup>3</sup>/s)</b>	
Recarga	59.00	Recarga	0
Ríos	12.86	Ríos	57.91
C. Constante	9.80	C. Constante	0.70
Bombeo	0	Bombeo	23.05
Total	81.66	Total	81.66

Por su parte, el balance hídrico del Modelo DGA 2000 se presenta en la siguiente tabla.

*Tabla 4-7. Balance hídrico global del modelo DGA 2000*

<b>Entradas (m<sup>3</sup>/s)</b>		<b>Salidas (m<sup>3</sup>/s)</b>	
Recarga	58.74	Recarga	0
Ríos	10.57	Ríos	46.6
C. Constante	2.9	C. Constante	2.49
Bombeo	0	Bombeo	17.75
Total	72.21	Total	66.84

Al comparar ambos balances se observan algunas variaciones, sin embargo, todos los parámetros evaluados coinciden en el orden de magnitud, por lo que las diferencias se encuentran en rangos aceptables.

#### 4.2.7. Régimen transiente

El régimen transiente del modelo será aplicado al espacio de tiempo comprendido entre enero del año 1999, hasta finales del año 2020. Como se mencionó al principio del capítulo, este rango temporal es dividido en 22 periodos de estrés (correspondientes a cada año), en donde cada uno de estos es sub dividido en 12 pasos de tiempo (correspondientes a cada mes). Para modelar este periodo se mantuvo la información ingresada hasta el régimen permanente, incluyendo la conductividad hidráulica. Como se trata de un régimen en el que hay cambios de condiciones en el tiempo, el volumen almacenado del acuífero toma relevancia y puede presentar variaciones, por lo que es necesario ingresar un nuevo parámetro, el coeficiente de almacenamiento  $S$ .

##### 4.2.6.1 Parámetro del modelo: Coeficiente de almacenamiento ( $S$ )

El coeficiente de almacenamiento se describe como, el volumen de agua almacenado o liberado, por unidad de área, frente a un cambio de la carga hidráulica. En términos generales se define con la siguiente expresión:

$$S = S_s \cdot b + S_y \quad (5)$$

donde:

- $S$ : Coeficiente de almacenamiento (-)
- $S_s$ : Almacenamiento específico ( $L^{-1}$ )
- $S_y$ : Capacidad específica (-)
- $b$ : Espesor del acuífero (L)

En condiciones de acuífero libre, el almacenamiento se caracteriza principalmente por el valor de la capacidad específica ( $S_y$ ) que coincide con porosidad eficaz, ya que el acuífero disminuye su nivel por vaciado. Por su parte en el caso de acuíferos confinados el coeficiente de almacenamiento se asocia al almacenamiento específico ( $S_s$ ) que es el volumen liberado por  $1 \text{ m}^3$  de acuífero confinado.

Para este estudio en régimen transiente, los valores del coeficiente de almacenamiento previo a la calibración, son los que se presentan en la Figura 4-18 y fueron basados en el modelo conceptual. En cada uno de los rangos se consideró el valor menor, sin embargo, estos no serán los definitivos ya que serán ajustados en el proceso de calibración lo que permitirá reducir los errores del modelo.

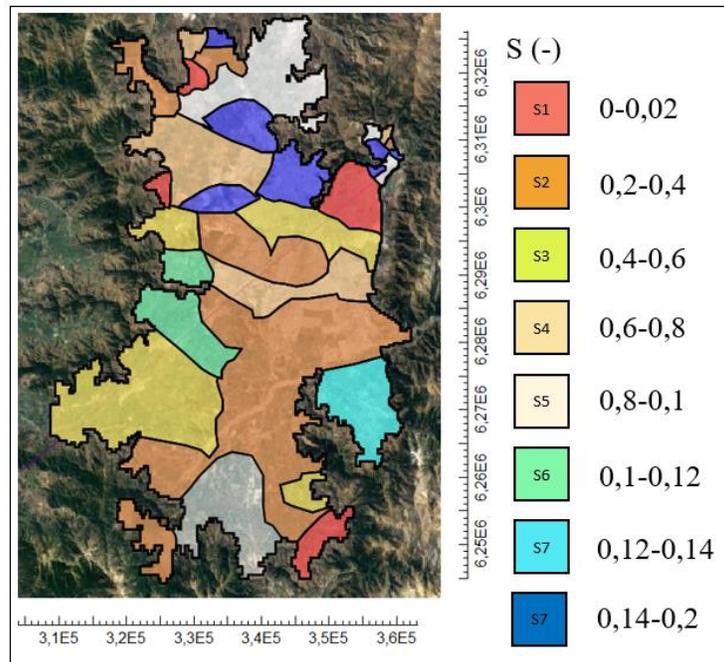


Figura 4-18. Distribución de los coeficientes de almacenamiento (S)

Luego de la calibración la distribución de zonas con sus rangos de valores no sufrió cambios, sin embargo, en algunos sectores se definió como S al mayor valor del rango, debido a que dichas zonas presentaban descensos bruscos en comparación a los niveles observados.

#### 4.2.6.2 Calibración y balance

- Calibración

El proceso de calibración, al igual que en el caso del régimen permanente, se llevó a cabo comparando los niveles piezométricos observados con los simulados, para analizar el ajuste lineal entre ambos. Al graficar dichos datos se obtuvo el ajuste que se presenta en la siguiente figura.

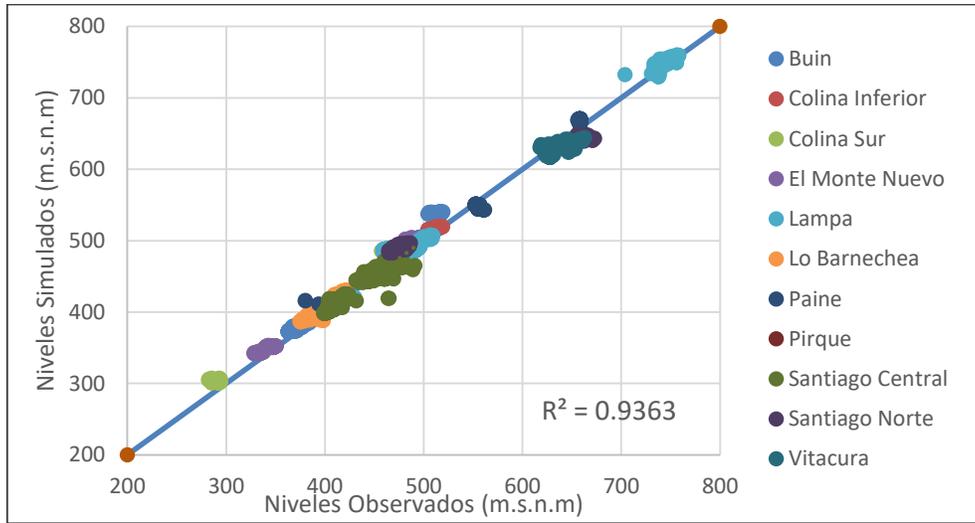


Figura 4-19. Gráfico de ajuste lineal entre Niveles Observados y Simulados en régimen transiente

Por otra parte, los estadísticos calculados para el régimen transiente, considerando los datos de niveles de todos los pozos y años del periodo, se presentan en la Tabla 4-8. Sumado a los estadísticos utilizados para el régimen permanente, se define para este régimen el concepto de residual, que corresponde a la diferencia entre el valor simulado y el observado.

Tabla 4-8 Estadísticos para la medida de errores del modelo post calibración.

Parámetro	Valor
Nivel Máximo (m.s.n.m)	758.25
Nivel Mínimo (m.s.n.m)	282.06
Diferencia Máxima (m)	476.19
5% Diferencia Máxima (m)	23.81
Nº Datos	3898
MAE (m)	6.84
RMS (m)	8.49
Máximo Residual (m)	35.93
Mínimo residual (m)	-45.55
NMAE (%)	1.44
NRMS (%)	1.78

Al igual que en el régimen transiente el valor del MAE se encuentra significativamente por debajo del 5% de la diferencia máxima de niveles observados, lo que indica un margen de error aceptable de las simulaciones. Sumado a esto, se destaca que el coeficiente de determinación  $R^2$  presenta un valor de 0,94, que por su cercanía al 1, indica una confiable bondad de ajuste del modelo.

- Resultados de la calibración

Al finalizar el proceso de calibración es importante presentar las tendencias temporales y analizar el ajuste de los datos simulados con los datos observados. En las siguientes figuras se muestran las tendencias de 23 pozos de observación, representando el comportamiento de cada uno de los SHACs que componen el acuífero.

- Buin

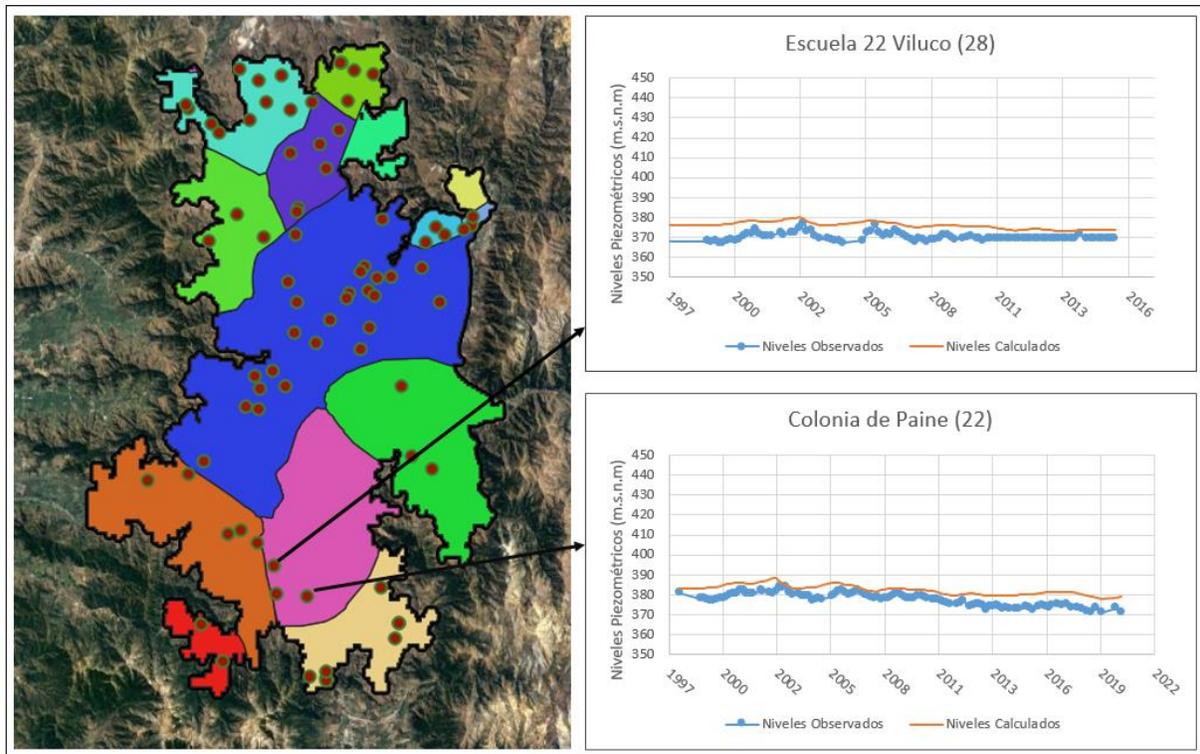


Figura 4-20. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Buin

- Colina Inferior

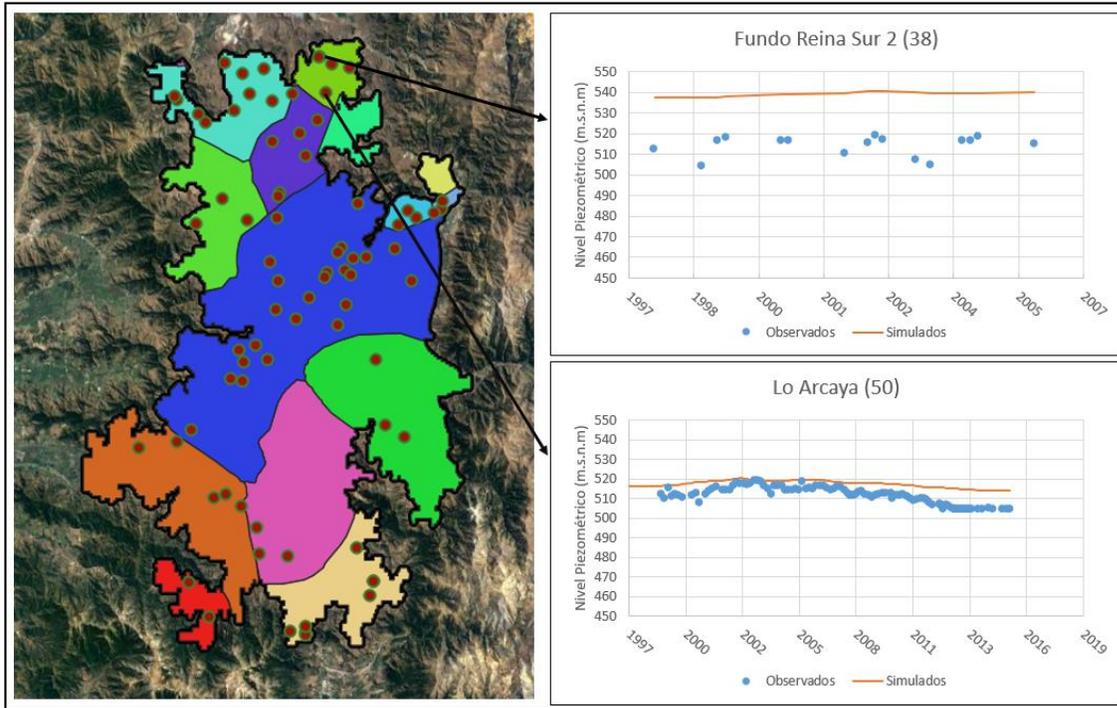


Figura 4-21. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Colina Inferior

- Colina Sur

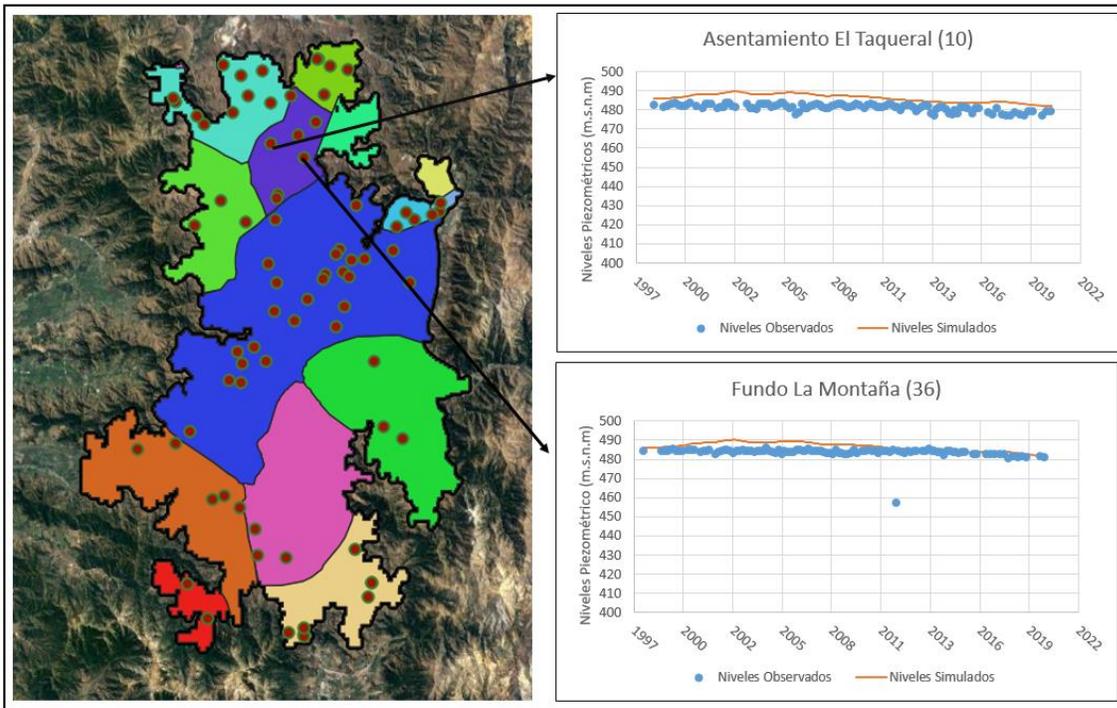


Figura 4-22. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Colina Sur

- El Monte Nuevo

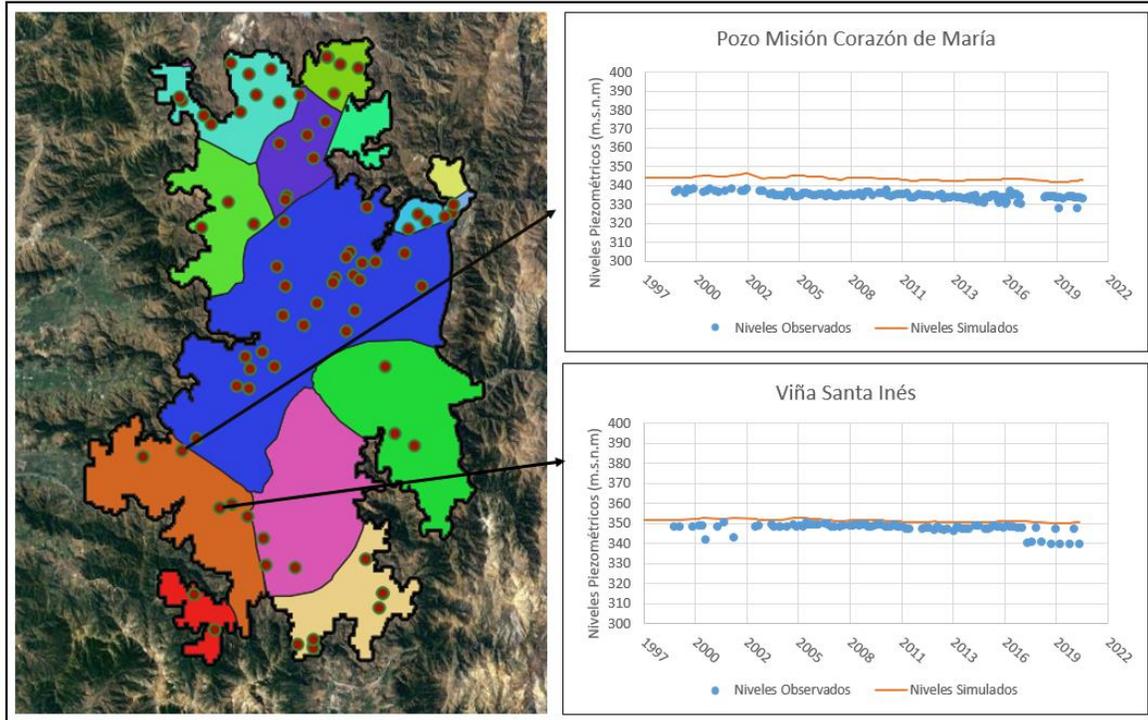


Figura 4-23. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de El Monte Nuevo

- Lampa

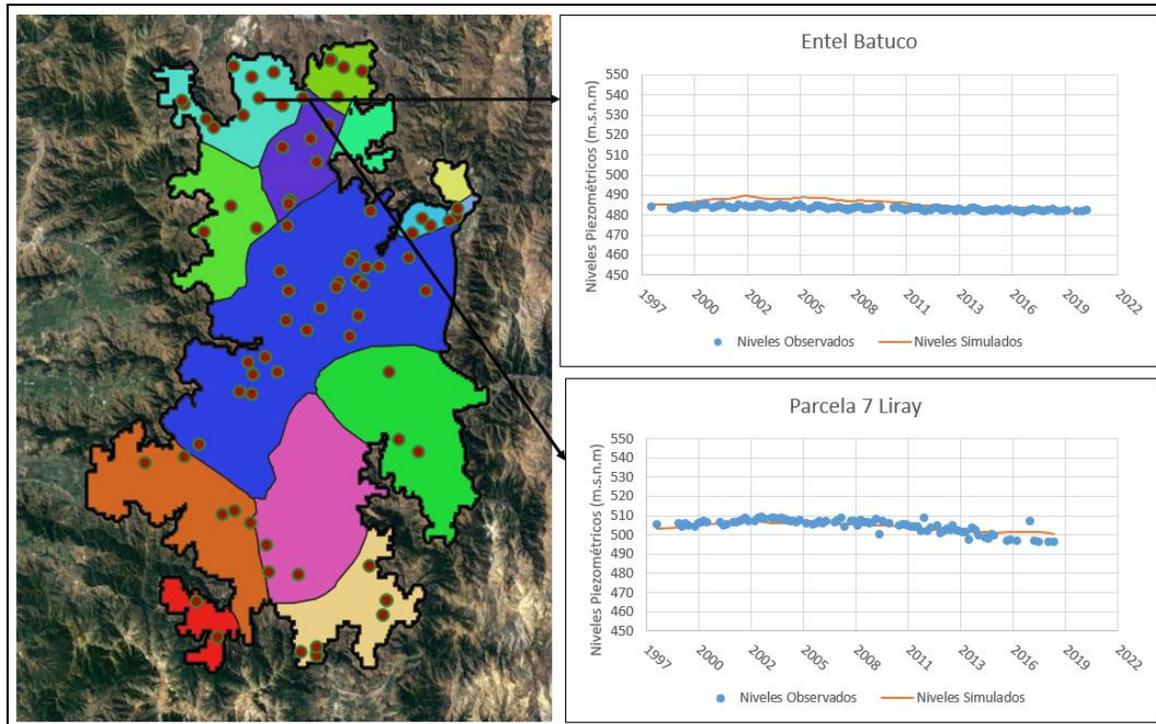


Figura 4-24. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Lampa

- Lo Barnechea

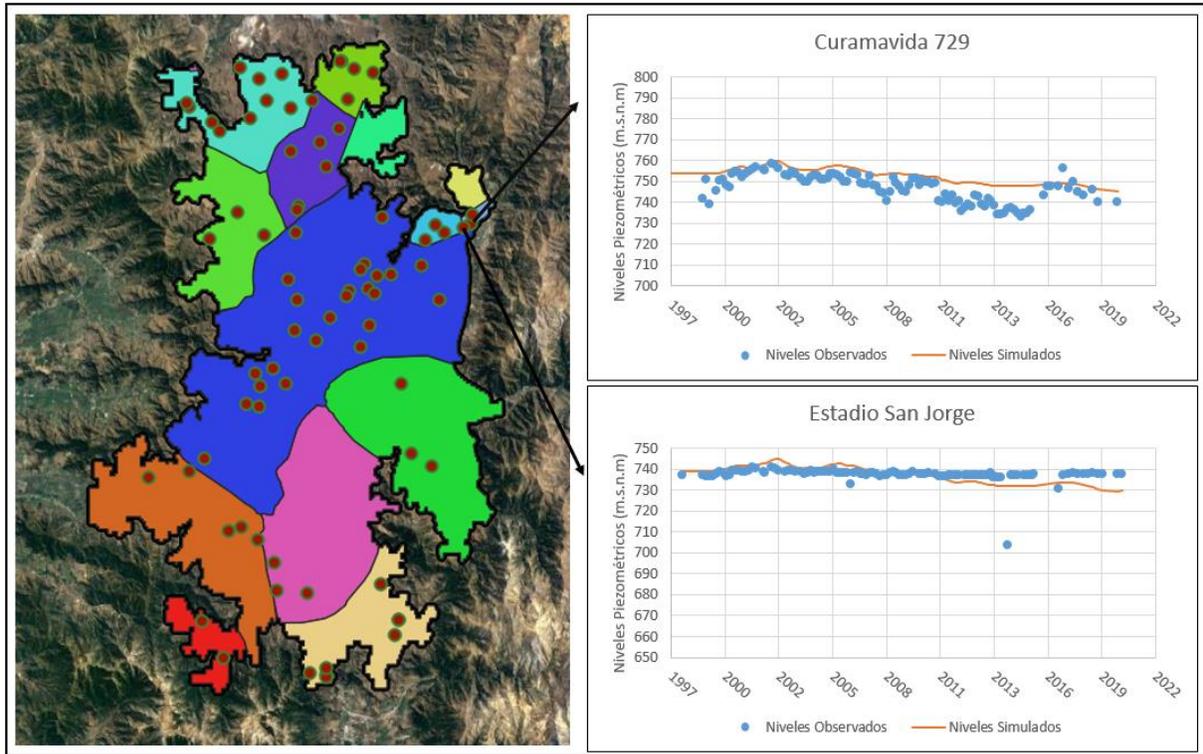


Figura 4-25. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Lo Barnechea

- Paine

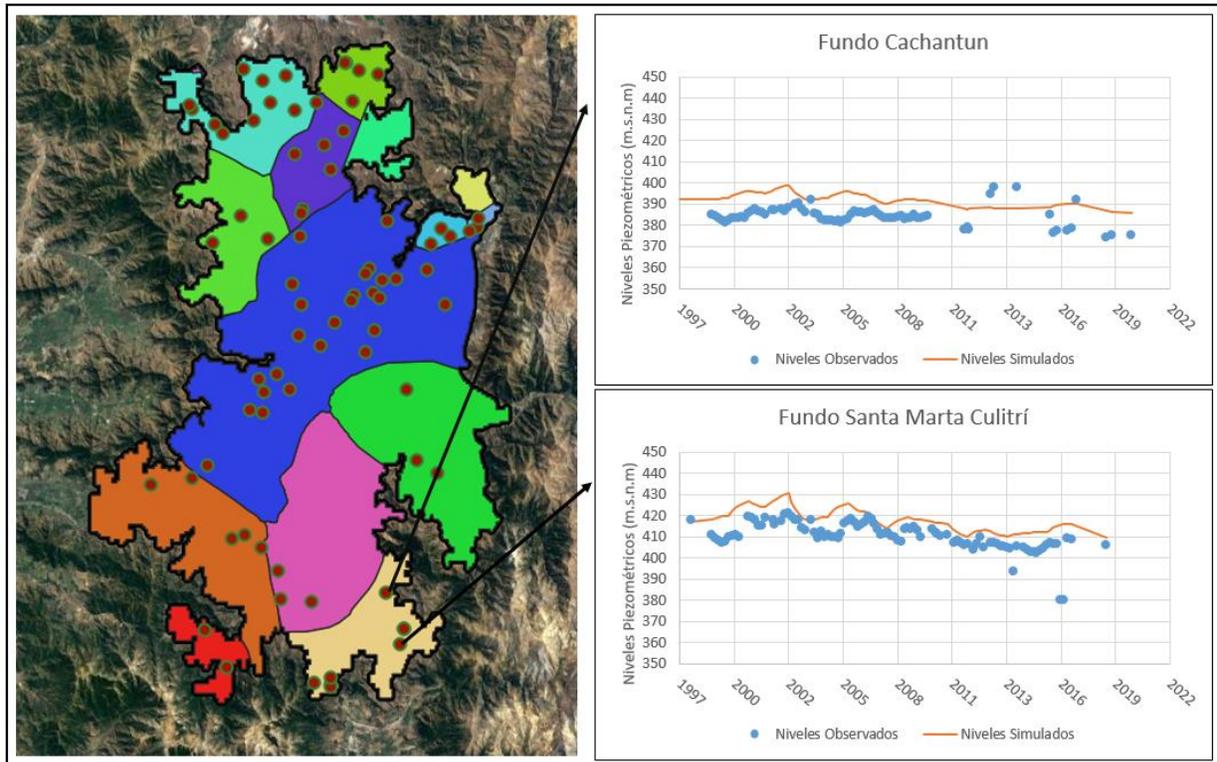


Figura 4-26. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo en pozos de Paine

- Pirque

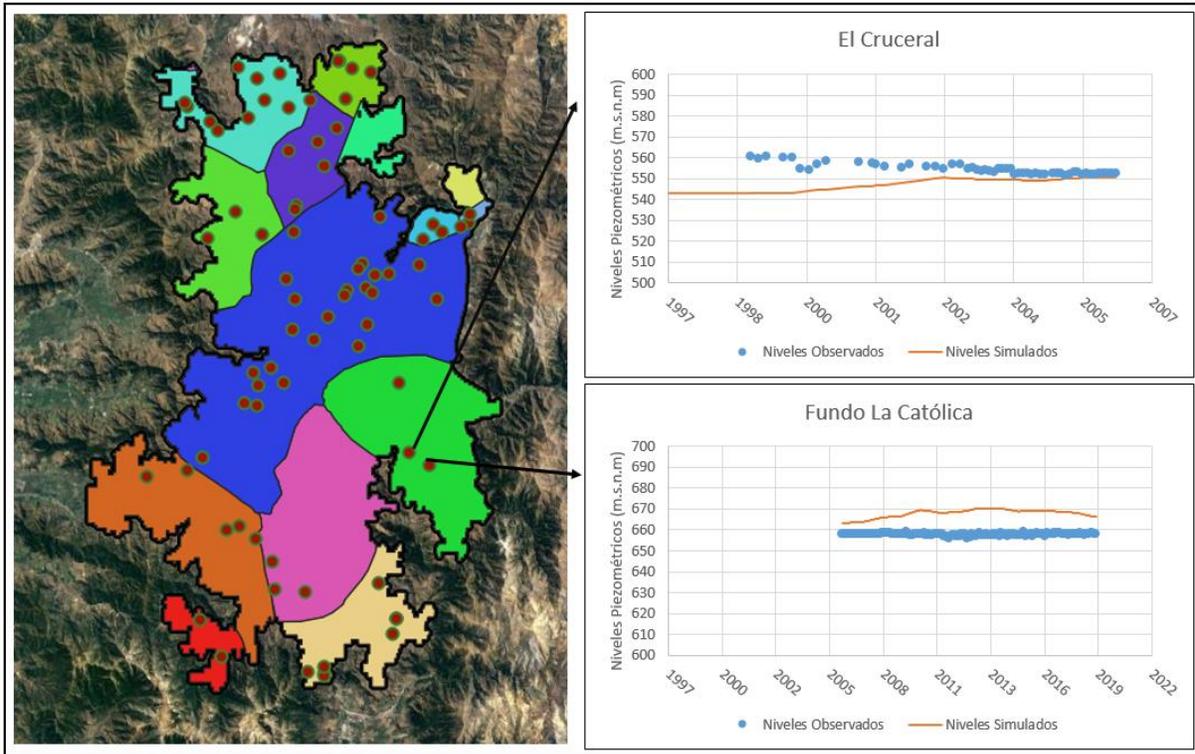


Figura 4-27. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Pirque

- Santiago Central

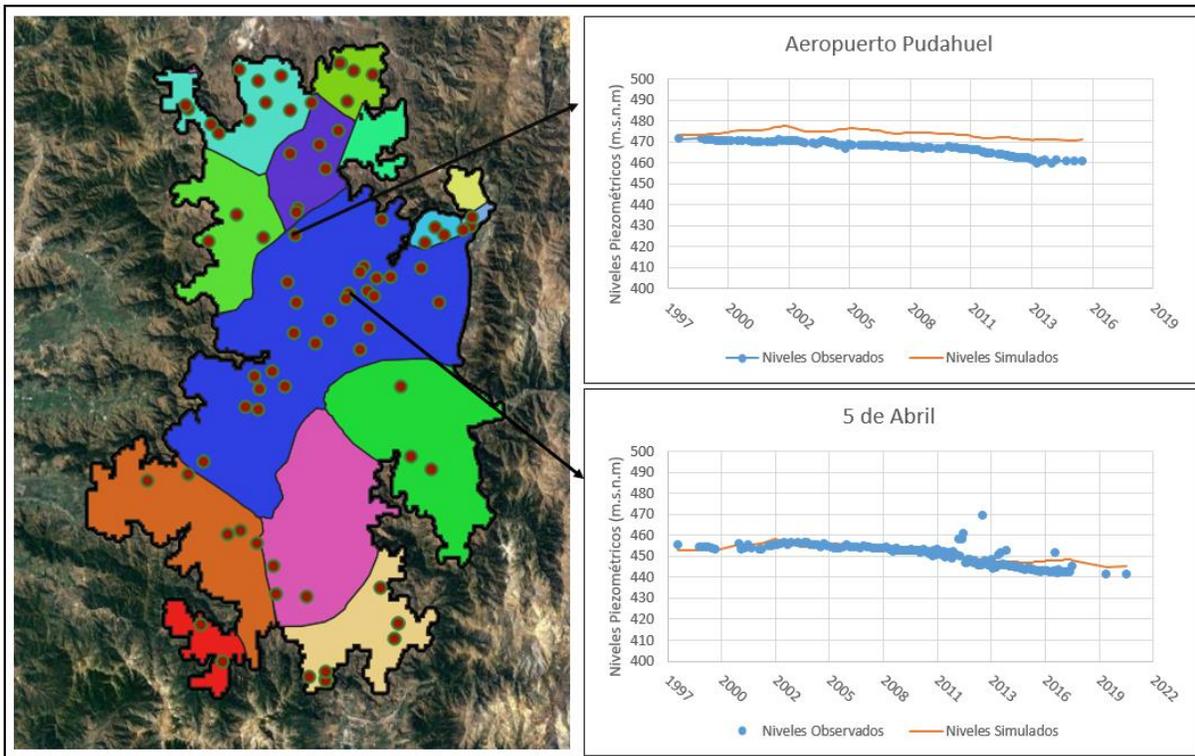


Figura 4-28. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Santiago Central (1)

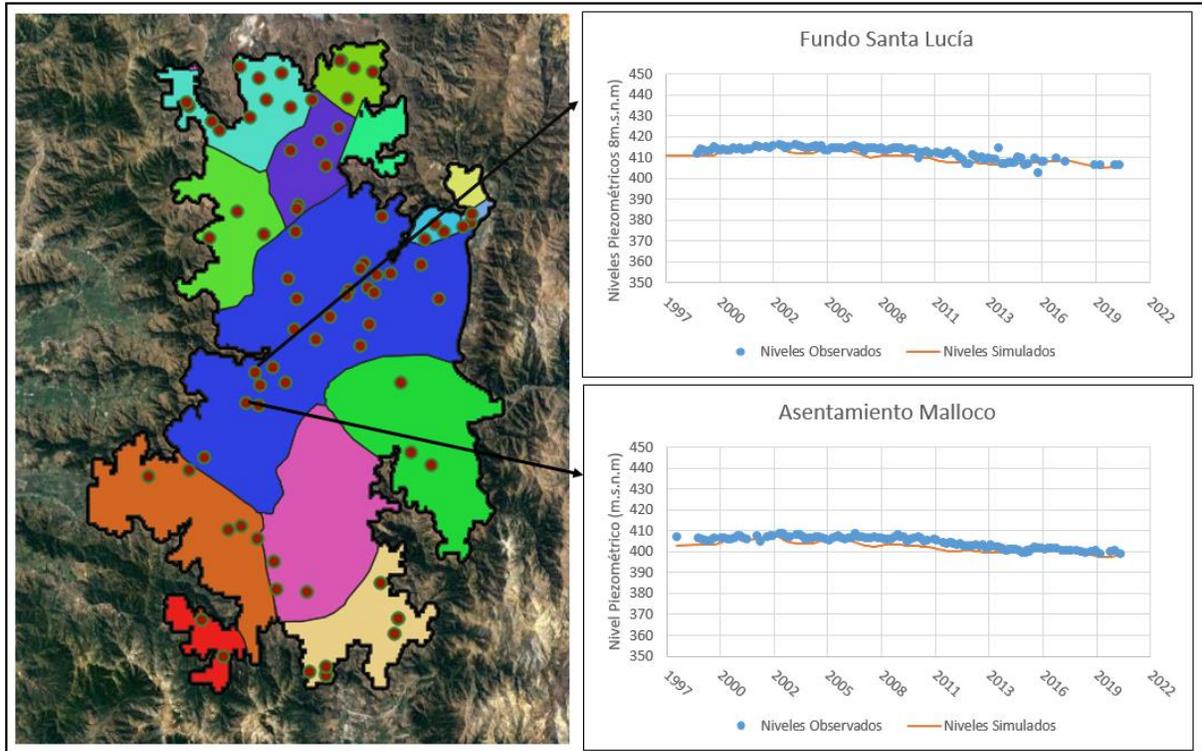


Figura 4-29. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Santiago Central (2)

- Santiago Norte

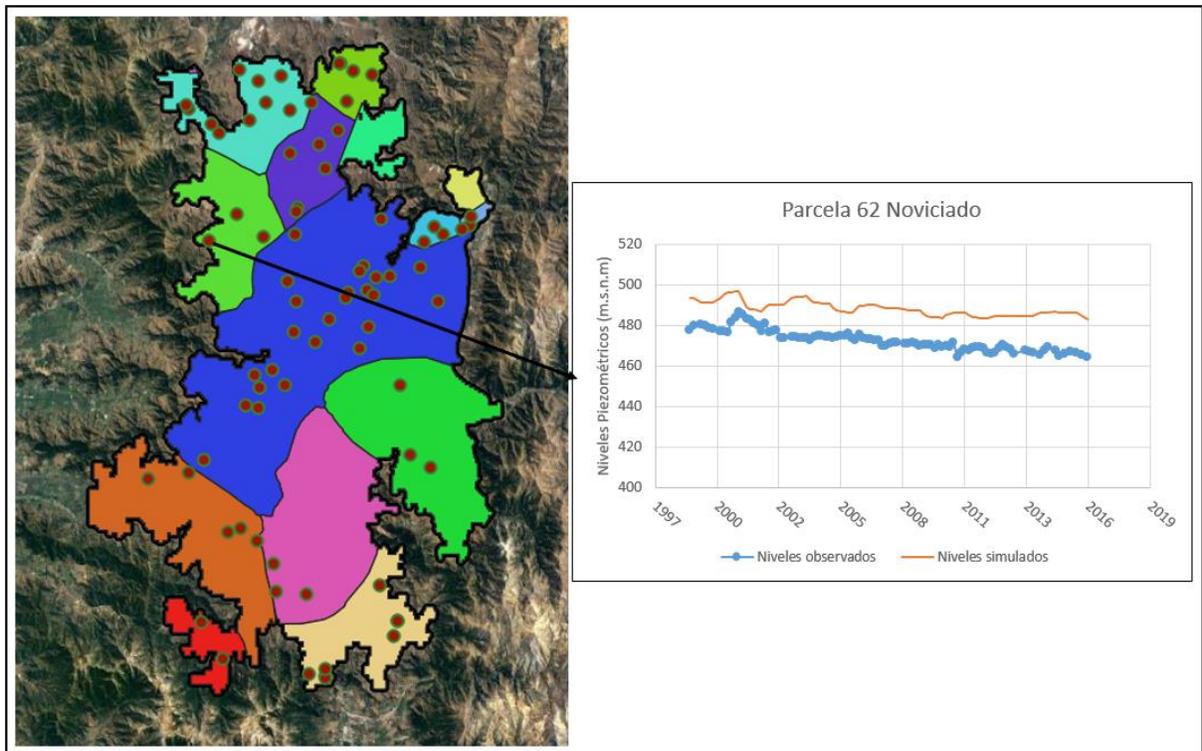


Figura 4-30. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Santiago Norte

- Vitacura

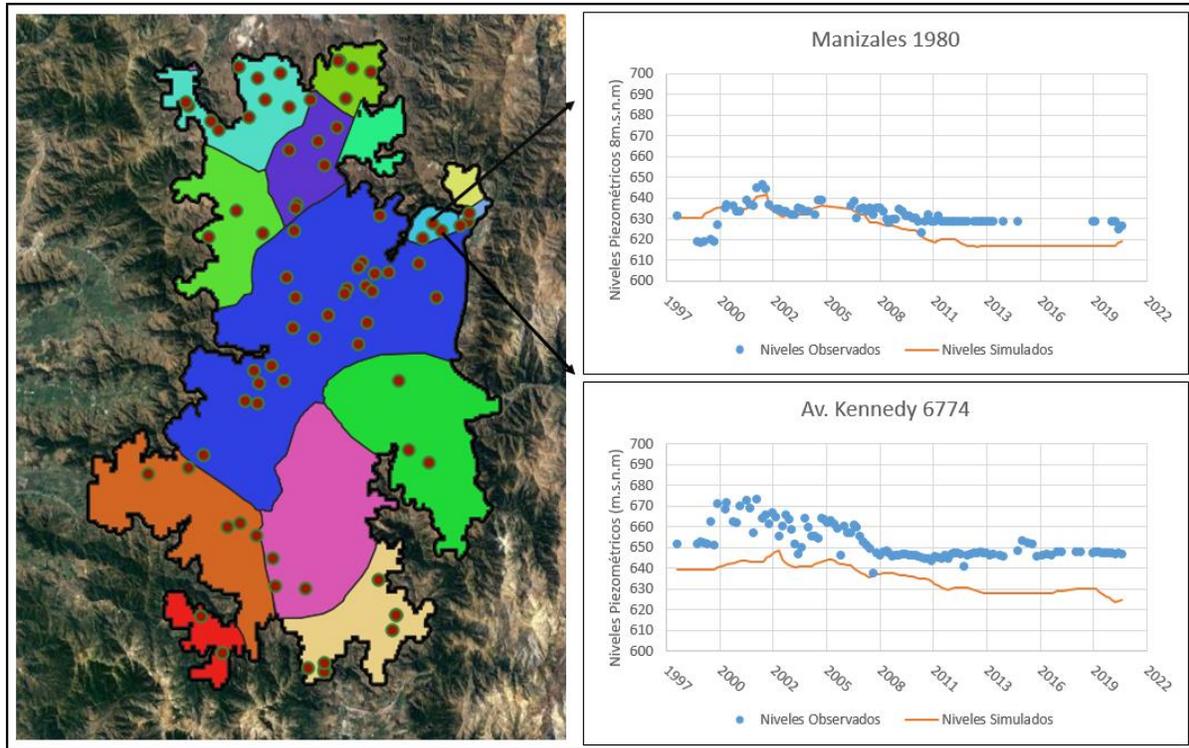


Figura 4-31. Tendencias de niveles observados y simulados en el tiempo, en pozos de Vitacura

Al observar las figuras de las tendencias en cada SHAC, se aprecia que en la mayor parte de los casos estas coinciden tanto en tendencia como en orden de magnitud, una parte menor coincide en tendencias presentando cierta sobreestimación de valores como es el caso de Vitacura, Santiago Norte y Paine. Si bien, estas sobreestimaciones podrían arrastrar errores, el objetivo principal del estudio es comparar tendencias en el tiempo, por lo que las diferencias de magnitud no se apreciarán de manera significativa en el análisis.

- Balance

Finalmente, el balance hídrico global del modelo para el año 2020, periodo que marca el inicio de las proyecciones futuras, se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4-9. Balance Hídrico Global para el año 2020

<b>Entradas (m3/s)</b>		<b>Salidas (m3/s)</b>	
Recarga	59.49	Recarga	0
Ríos	13.58	Ríos	51.09
C. Constante	10.60	C. Constante	0.97
Bombeo	0	Bombeo	27.73
Total	83.67	Total	79.79
Variación del almacenamiento		3.89	

Tabla 4-10. Balance Hídrico Global promedio del periodo (1998-2020)

<b>Entradas (m3/s)</b>		<b>Salidas (m3/s)</b>	
Recarga	59.99	Recarga	0
Ríos	13.11	Ríos	56.65
C. Constante	10.07	C. Constante	1.02
Bombeo	0	Bombeo	26.40
Total	83.17	Total	84.07
Variación del almacenamiento			0.89

## 5. ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El análisis de sustentabilidad del sistema acuífero considera la aplicación de escenarios de cambio climático al modelo. Para establecer escenarios representativos del área de estudio es necesario recordar que la relación entre las aguas superficiales y el acuífero se da principalmente por las recargas debido a las precipitaciones. En el capítulo 4 se presentó la función de transferencia que determina la influencia de la precipitación en la recarga, la cual se encuentra representada por la estación meteorológica Cerro Calán. Por este motivo, los escenarios se definen para las coordenadas de Cerro Calán utilizando Modelos de Circulación Global que entregan proyecciones para distintos casos influidos por el cambio climático.

### 5.1. Datos históricos estación Cerro Calán

Antes de obtener las proyecciones en el punto de interés (Cerro Calán) es necesario contar con la información histórica en la estación. En la Tabla 5-1 se presenta la Precipitación Media Anual y Temperatura Media Anual, para el periodo comprendido entre el 1976 (desde que está activa la estación) hasta el 2020.

*Tabla 5-1. Datos históricos de precipitación y temperatura observados en la estación Cerro Calán.*

Año	Precipitación Media Anual (mm)	Temperatura Media Anual (°C)
1976	224.4	14.21
1977	474.5	16.83
1978	481.1	16.58
1979	365.4	16.15
1980	446.1	15.92
1981	325.9	16.18
1982	835.1	15.73
1983	420.4	15.78
1984	517.5	15.26
1985	293.6	15.87
1986	438.9	16.21
1987	883.6	16.23
1988	196.5	16.38
1989	537.1	16.52
1990	198.4	16.36
1991	380.3	16.21
1992	418.1	15.75
1993	299.1	16.29
1994	151.7	16.53
1995	189.5	16.69
1996	175.2	16.75
1997	746.8	16.75
1998	112.2	16.80
1999	400.3	16.23

Año	Precipitación Media Anual (mm)	Temperatura Media Anual (°C)
2000	628.9	16.32
2001	489.3	17.01
2002	739.7	16.21
2003	243.3	17.22
2004	435.5	16.48
2005	660.3	16.23
2006	399.9	17.15
2007	263.9	15.86
2008	471.1	16.99
2009	389	17.06
2010	335.6	16.14
2011	187	16.80
2012	338.6	16.72
2013	215.6	16.79
2014	263.4	16.63
2015	315.9	17.23
2016	414	17.19
2017	291.4	16.57
2018	212.4	17.13
2019	98.5	17.10
2020	302	17.63

## 5.2. Modelos de Circulación Global (GCM) representativos de la zona

Los GCMs son modelos grillados que permiten generar simulaciones del clima a través de la resolución de ecuaciones de balance de masa, momentum y energía. La grilla de los GCM abarca todo el globo terrestre y posee una resolución gruesa en donde las dimensiones de las cuadrículas horizontales abarcan típicamente valores entre los 100 y 600 km.

Debido a que el dimensionamiento de la grilla es amplio, para aplicar los GCMs a zonas pequeñas es necesario aplicar un escalamiento espacial y temporal a la zona de estudio. Adicionalmente existe los Modelos de Circulación Regional que poseen resoluciones más altas y representan sectores más pequeños. Los GCMs son utilizados habitualmente para la predicción del comportamiento del cambio climático debido a las proyecciones que genera para diversas variables climáticas y escenarios probables de cambio climático. En el capítulo 2 se presentaron los escenarios RCP, utilizados en la actualidad y se mostró que la trayectoria real al día de hoy, ha tomado el camino de emisiones del escenario RCP8.5. Por este motivo, este será el escenario aplicado en el presente modelo ya que los otros escenarios no representan la realidad actual del clima.

Para realizar las proyecciones de variables, como la temperatura y precipitación en la zona del acuífero, se utilizarán simulaciones climáticas extraídas desde la plataforma de simulaciones climáticas perteneciente al Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2). Dichas simulaciones se basan en GCMs y GCRs combinados con observaciones. Los GCMs utilizados poseen una resolución aproximada de 100 a 200 km y corresponden a modelos pertenecientes a aproximadamente 30 grupos de investigación internacionales (Anexos). Como se mencionó anteriormente, al tratarse de modelos de resolución gruesa es necesario llevar a cabo un escalamiento a la zona de estudio, sin embargo, la plataforma ofrece la descarga de simulaciones ya escaladas por lo que se puede prescindir del proceso de escalamiento.

Como nuestro punto de interés corresponde a la estación Cerro Calán, las proyecciones de precipitación y temperatura para cada uno de los GCMs, fueron obtenidas para las coordenadas de la estación. Luego, para escoger aquellos modelos más representativos de la zona, se descargó la información histórica (periodo comprendido entre el 1980 y 2005) para cada GCM y se contrastó con los datos observados en la estación para el mismo periodo. La metodología para comparar datos observados y simulados, fue calculando el promedio de sus deltas de precipitación y temperatura, y analizar cuales GCMs simulaban ambas variables en un rango aceptable de diferencia entre simulados y observados. Dicho rango se estableció en  $\pm 50$  mm para las precipitaciones y entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $-6^{\circ}\text{C}$  para el caso de las temperaturas. Se escogió un rango más estricto para las precipitaciones ya que estas son las que se encuentran directamente relacionadas con la recarga del sistema. El gráfico de deltas se presenta en la Figura 5-1.

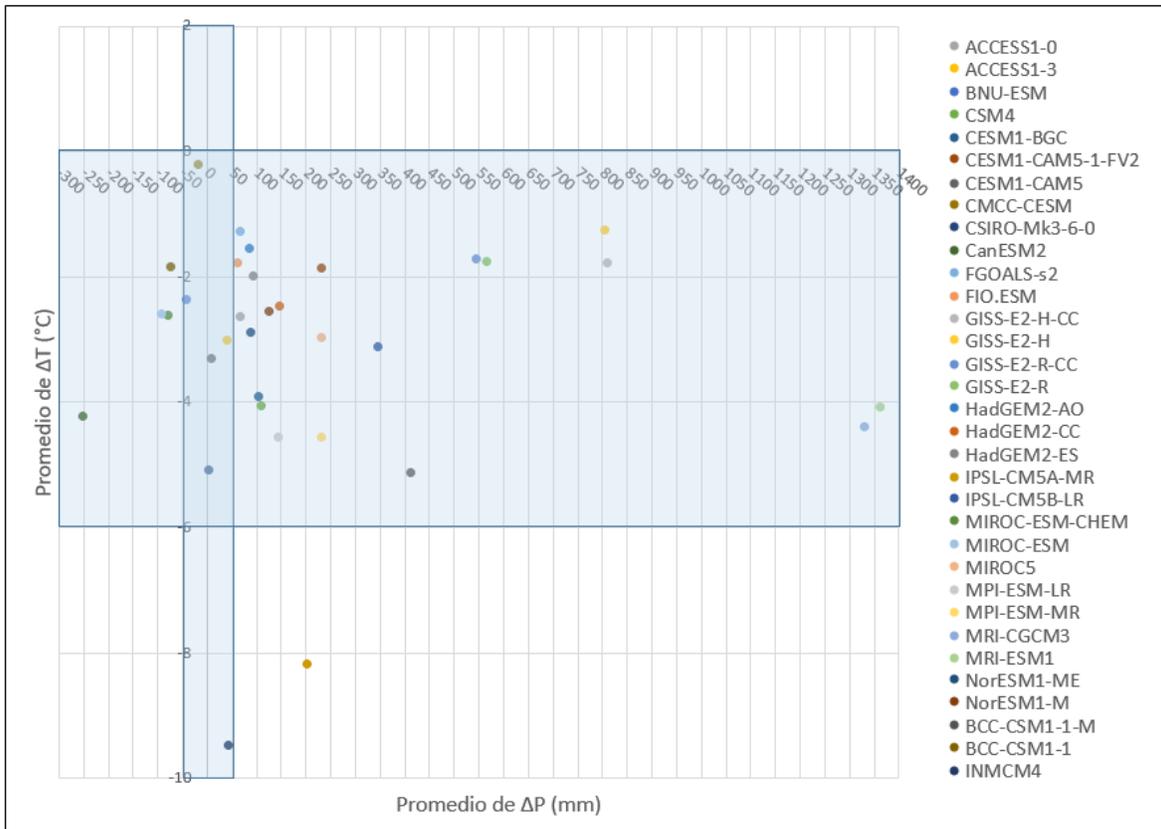


Figura 5-1. Criterio de elección de GCM basado en la comparación de deltas de precipitación y temperatura, entre los datos observados y simulados

La figura presenta en la intersección de ambos rangos aceptables, cinco modelos que cumplen con el criterio, Estos son ACCESS1-3, BNU-ESM, CMCC-CESM, CSIRO.Mk3-6-0 y BCC.CSM1-1-M. Antes de obtener las tendencias proyectadas según estos modelos es necesario evaluar otro criterio, que corresponde a la variación estacional de los datos simulados y observar si coinciden con la variación de los datos observados. La Figura 5-2 presenta la variación estacional histórica para la temperatura y se observa que a pesar de que algunos modelos subestiman los valores de la temperatura, todos presentan una misma tendencia con inviernos fríos y veranos cálidos. Cabe destacar que el GCM que representa de forma más fiel la variación estacional para esta variable es el CMCC-CESM. Por su parte la Figura 5-3 presenta la variación estacional histórica para la variable precipitación, en donde se aprecia que todos los modelos cumplen con una tendencia de aumento de precipitaciones en el periodo de invierno y una baja de estas en el verano. Cabe destacar que algunos modelos subestiman y otros sobrestiman la variable, así como también hay pequeños adelantos y/o atrasos en el inicio del periodo de precipitaciones, sin embargo, todos los modelos muestran rangos aceptables de diferencia. A partir de esto, se concluye que estos cinco modelos pueden ser utilizados para proyectar las precipitaciones en la estación meteorológica Cerro Calán.

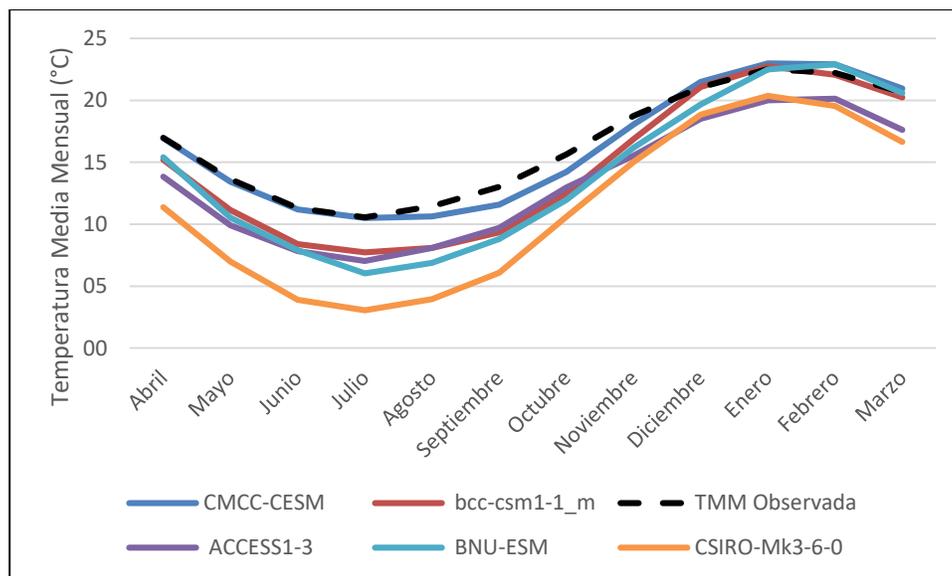


Figura 5-2. Variación Estacional histórica para la variable Temperatura

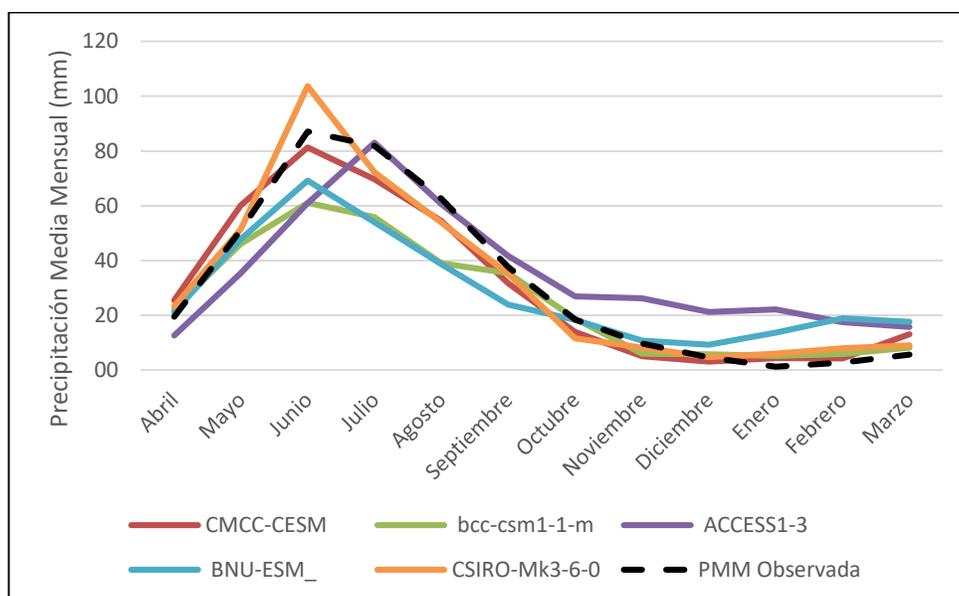


Figura 5-3. Variación estacional histórica para la variable Precipitación

### 5.3. Tendencias de precipitación según los GCMs escogidos, aplicadas a la estación Cerro Calán.

Los GCMs escogidos entregan simulaciones para dos periodos de tiempo, el histórico (1980-2005) y el futuro (2006-2100), el cual corresponde a las proyecciones. En la sección anterior se demostró que las simulaciones presentan una gran similitud con las observaciones, sin embargo, no son iguales, por este motivo, las tendencias presentadas por las proyecciones no se pueden utilizar directamente y se deben adaptar a los datos observados en la estación.

Para esto se descargaron las simulaciones para un periodo histórico y un periodo futuro de cada GCM elegido. Estos periodos contemplan 25 años (histórico) y 50 años (futuro), es decir desde el 1980 hasta el 2005 y desde el 2020 hasta el 2070, respectivamente.

Se calcularon, para cada modelo, los promedios de precipitaciones anuales en el rango temporal histórico y futuro, y se determinó el porcentaje de cambio del periodo futuro con respecto al periodo histórico para cada GCM. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5-2. Variación promedio de las precipitaciones en el periodo futuro (2020-2070)

GCM	ACCESS1-3	BNU-ESM	CMCC-CESM	CSIRO-Mk3-6-0	bcc-csm1-1
<b>Promedio Histórico (mm)</b>	424.09	348.40	360.12	373.92	310.13
<b>Promedio Proyectado (mm)</b>	385.54	328.52	364.55	328.63	281.93
<b>Diferencia (mm)</b>	-38.55	-19.88	4.43	-45.29	-28.20
<b>Diferencia (%)</b>	-9.09	-5.71	1.23	-12.11	-9.09

Al observar las diferencias porcentuales de las precipitaciones promedio de cada GCM, se distinguen 2 modelos de interés, los cuales definen el rango de variación de precipitaciones proyectadas que se utilizarán. Estos son el modelo CMCC-CESM y el CSIRO-Mk3-6-0, los cuales representan el cambio más optimista y pesimista respectivamente. A partir de estos dos modelos se determinarán las proyecciones en la estación Cerro Calán.

Al aplicar estas variaciones a los datos observados históricos de la estación, el promedio de precipitaciones proyectado según cada modelo, es el que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5-3. Variación del promedio histórico observado según los dos GCMs que definen el rango de cambio

GCM	Proyección según CMCC-CESM	Proyección según CSIRO-Mk3-6-0
<b>Promedio Histórico Observado (mm)</b>	428.69	428.69
<b>Promedio Proyectado (mm)</b>	433.97	376.76
<b>Diferencia (mm)</b>	5.28	-51.92
<b>Diferencia (%)</b>	1.23	-12.11

La diferencia porcentual entre el promedio histórico y el promedio proyectado, se distribuyó de forma creciente en los 50 años que conforman el periodo proyectado y utilizando como base las precipitaciones históricas entre los años (1980-2005), repetida dos veces. Cabe destacar que este periodo no considera los últimos años (los cuales son los más desfavorables en cuanto a precipitaciones) debido a que los modelos GCMs fueron calibrados hasta este periodo, por lo que al usar los últimos años se estaría trabajando sobre datos proyectados que no fueron calibrados según observaciones.

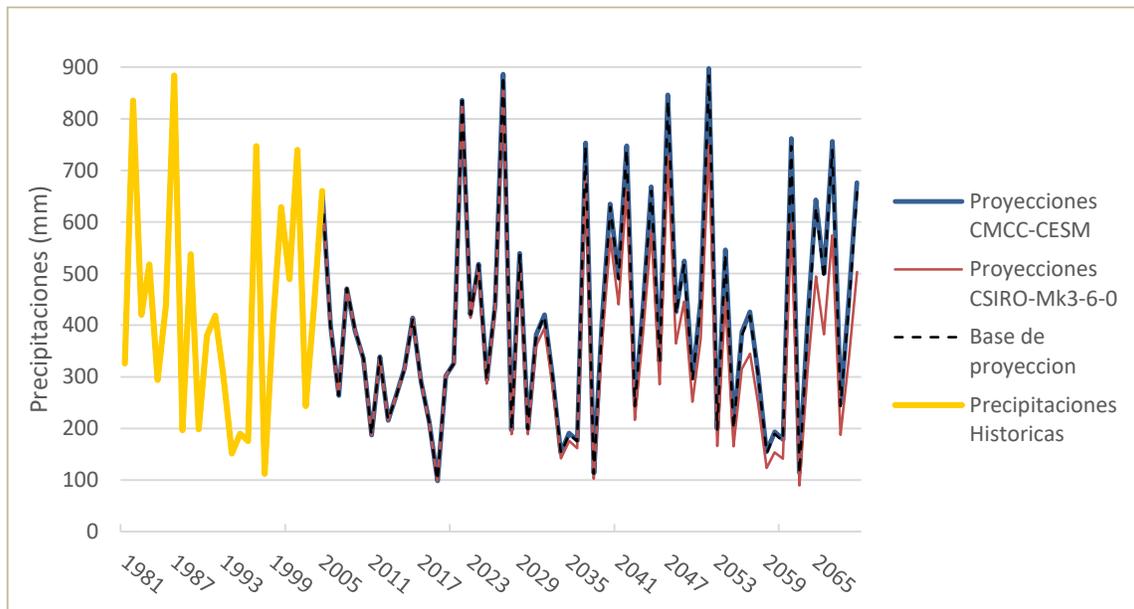


Figura 5-4. Tendencia de precipitación proyectadas según GCMs para la estación Cerro Calán

## 5.4. Función de transferencia para definir recargas

Las precipitaciones proyectadas corresponden al input de la función de transferencia que permite calcular las recargas, las cuales son el dato de interés para ingresar al modelo hidrogeológico. La función de transferencia fue determinada en el capítulo 4 y corresponde a la ecuación (2) que se presenta en el mismo capítulo. Al aplicar dicha función a los datos históricos y proyectados de precipitación de la estación Cerro Calán, las proyecciones de recarga del acuífero son las que se presentan en la Figura 5-5.

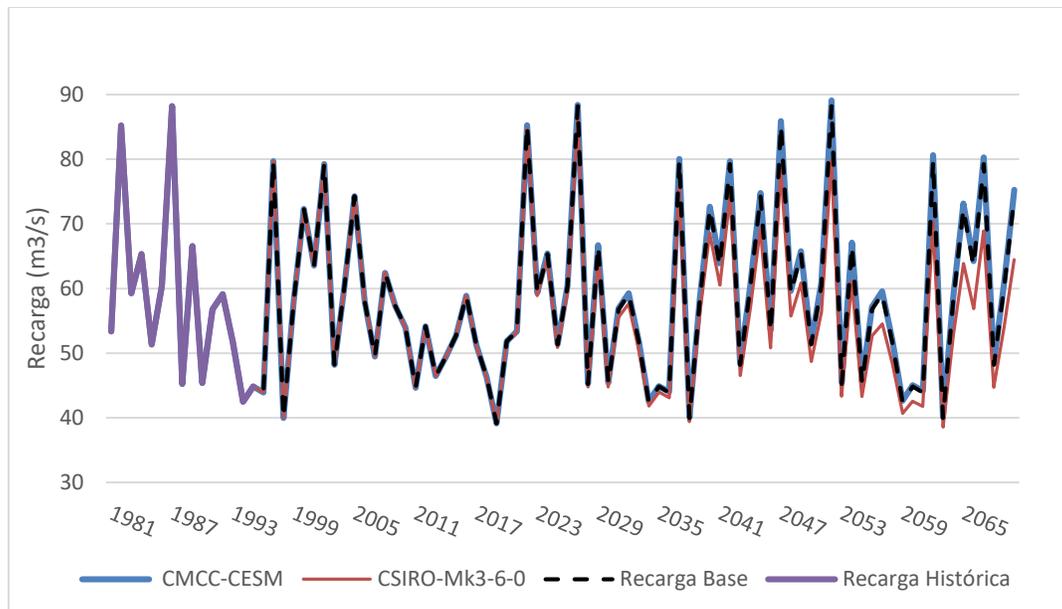


Figura 5-5. Recarga proyectada a ingresar al modelo

## 6. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La modelación hidrogeológica junto con los escenarios futuros, permiten hacer estimaciones del estado del acuífero a través de diferentes resultados. A partir del modelo actualizado y los escenarios de recarga construidos en el capítulo anterior, se presentarán diferentes resultados para el periodo histórico del modelo hidrogeológico (1998-2020) y el periodo proyectado (2020-2070). El objetivo principal, es comparar el estado del sistema durante ambos periodos y con esto, analizar cómo el cambio climático influye sobre la sostenibilidad del sistema. Los resultados que se presentan en el capítulo son: Balances hídricos, equipotenciales y niveles piezométricos, para finalmente concluir con un análisis de sustentabilidad del acuífero.

### 6.1. Balances hídricos

Los balances hídricos indican las entradas y salidas de caudal al acuífero, y se calculan para cada paso de tiempo dentro de cada periodo de stress. En este caso se presentarán el promedio histórico y los promedios proyectados para cada GCM de forma global. Las variables que presenta el balance corresponde a las recargas, las entradas y salidas de agua desde y hacia los ríos, los ingresos y egresos a través de la condición de nivel constante (C.Constante), las extracciones por bombeo y finalmente el cambio de almacenamiento (Delta V). Esta última componente será estudiada en la sección 6.4, ya que corresponde a una de las variables presentes en los criterios de análisis de sustentabilidad.

*Tabla 6-1. Balance hídrico global promedio del acuífero para el periodo proyectado, sin considerar cambios en la recarga*

<b>Entradas (m3/s)</b>		<b>Salidas (m3/s)</b>	
Recarga	63.29	Recarga	0
Ríos	13.04	Ríos	57.12
C. Constante	10.17	C. Constante	1.05
Bombeo	0	Bombeo	27.73
Total	86.5	Total	85.90
Variación del almacenamiento			0.61

*Tabla 6-2. Balance hídrico global promedio del acuífero para el periodo proyectado según CMCC-CESM*

<b>Entradas (m3/s)</b>		<b>Salidas (m3/s)</b>	
Recarga	63.68	Recarga	0
Ríos	12.99	Ríos	57.52
C. Constante	9.97	C. Constante	0.71
Bombeo	0	Bombeo	27.76
Total	86.64	Total	85.99
Variación del almacenamiento			0.65

Tabla 6-3. Balance hídrico global promedio del acuífero para el periodo proyectado según CSIRO\_Mk3-6-0

Entradas (m3/s)		Salidas (m3/s)	
Recarga	59.89	Recarga	0
Ríos	13.24	Ríos	54.62
C. Constante	10.16	C. Constante	0.68
Bombeo	0	Bombeo	27.76
Total	83.29	Total	83.06
Variación del almacenamiento			0.22

Al comparar los tres balances se observa que en el caso del promedio de proyecciones llevado a cabo a partir del modelo CMCC-CESM, la recarga presenta un aumento de aproximadamente  $0.35\text{m}^3/\text{s}$ , mientras que en el caso del promedio según CSIRO esta presenta una disminución de aproximadamente  $4.4\text{m}^3/\text{s}$ , ambos comparados con la situación de una proyección sin cambios en la recarga.

## 6.2. Equipotenciales

El mapa de equipotenciales esquematiza las cargas hidráulicas presentes en el acuífero a través de líneas que unen puntos que poseen igual carga. En este caso se presentarán los mapas equipotenciales para el año 2020 y 2070, para cada GCM. En la Figura 6-2 se aprecian las diferencias entre equipotenciales del año 2020 y 2070, según cada modelo.

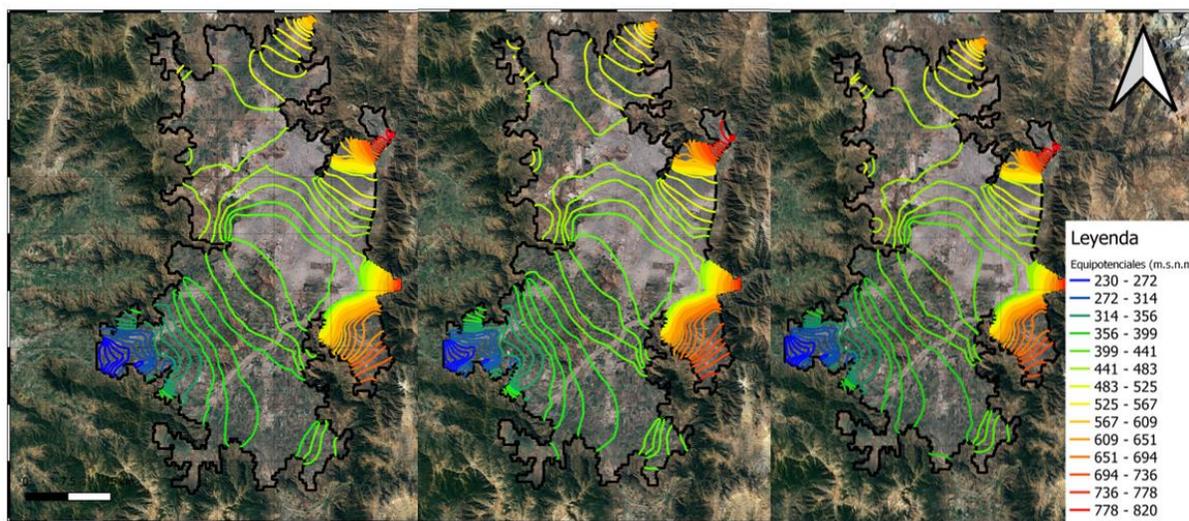


Figura 6-1. Equipotenciales. A la izquierda mapa del 2020, al centro mapa del 2070 (CMCC-CESM) y a la derecha (CSIRO-Mk3-6-0)

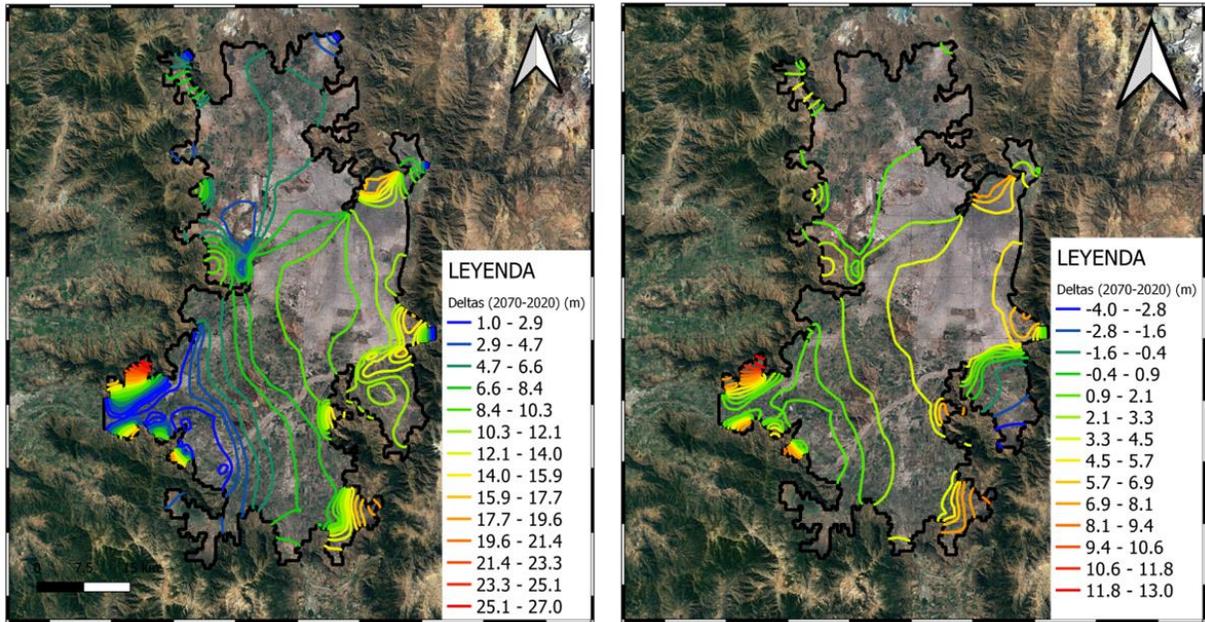


Figura 6-2. Diferencia de equipotenciales (2070-2020). A la izquierda según CMCC-CESM. A la derecha según CSIRO-Mk3-6-0

En la Figura 6-2 se pueden apreciar diferencias en el comportamiento de las equipotenciales para ambos casos. Por una parte, el escenario según CMCC presenta solo ascensos de niveles desde el 2020 hasta el 2070, siendo la mayor alza de aproximadamente 25 metros en partes del sector de descarga del acuífero. Por su parte, el escenario según CSIRO presenta descensos en algunos sectores como Pirque, mientras que los ascensos solo alcanzan los 13 metros aproximadamente. También se aprecia que en el caso del GCM CMCC-CESM, las equipotenciales se encuentran cercanas unas con otras lo que se debe al mayor gradiente a diferencia de lo que sucede con CSIRO, en donde los niveles presentan un comportamiento más plano.

### 6.3. Niveles proyectados sobre el acuífero

Los niveles históricos y proyectados según cada GCM se presentan para cada SHAC que compone el acuífero. En estos se pueden observar y analizar las variaciones que tendrá la napa freática a consecuencia del cambio climático.

- Buin

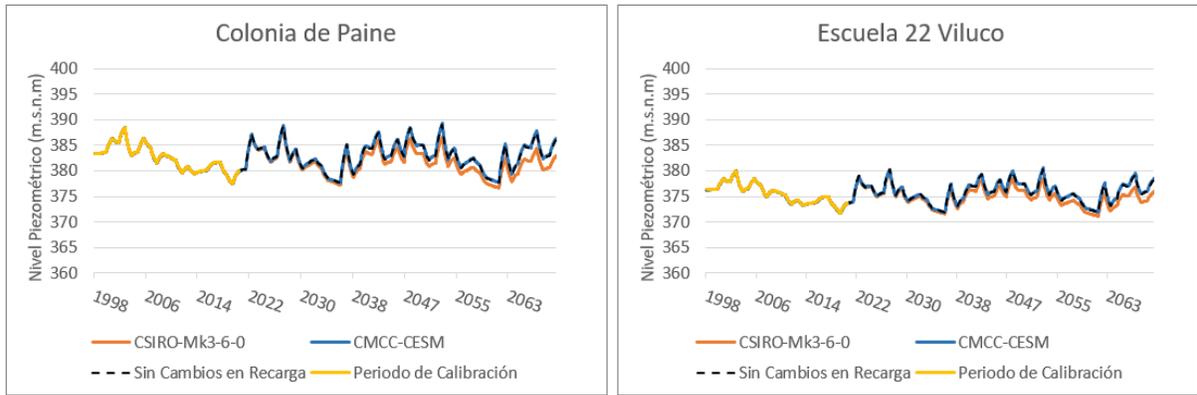


Figura 6-3. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Buin

- Colina Inferior

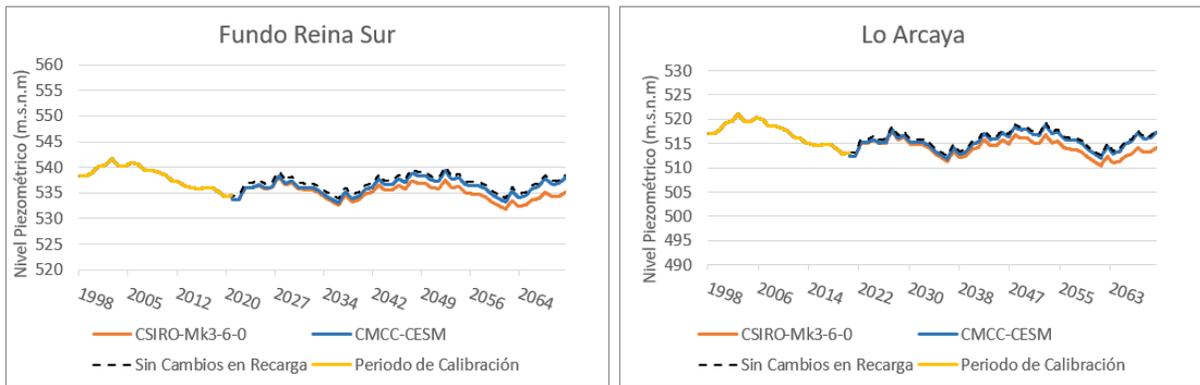


Figura 6-4. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Colina Inferior

- Colina Sur

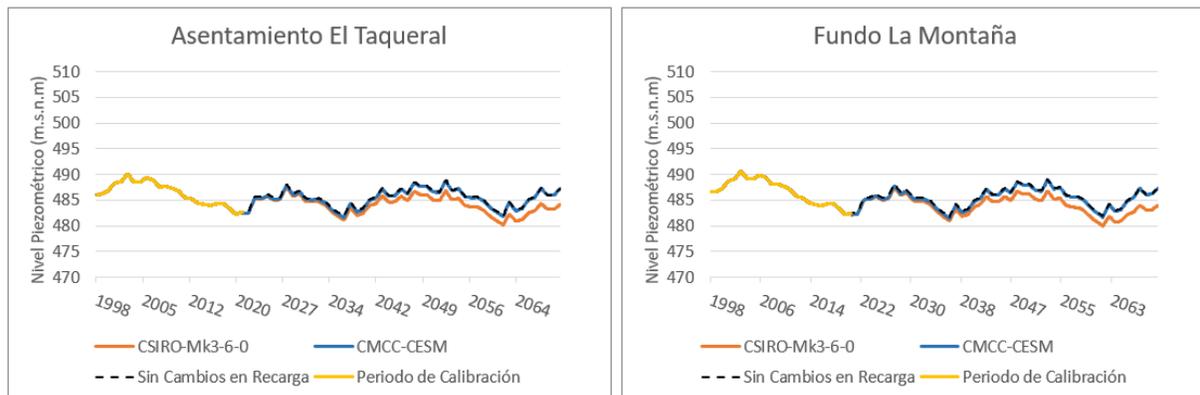


Figura 6-5. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Colina Sur

- El Monte Nuevo

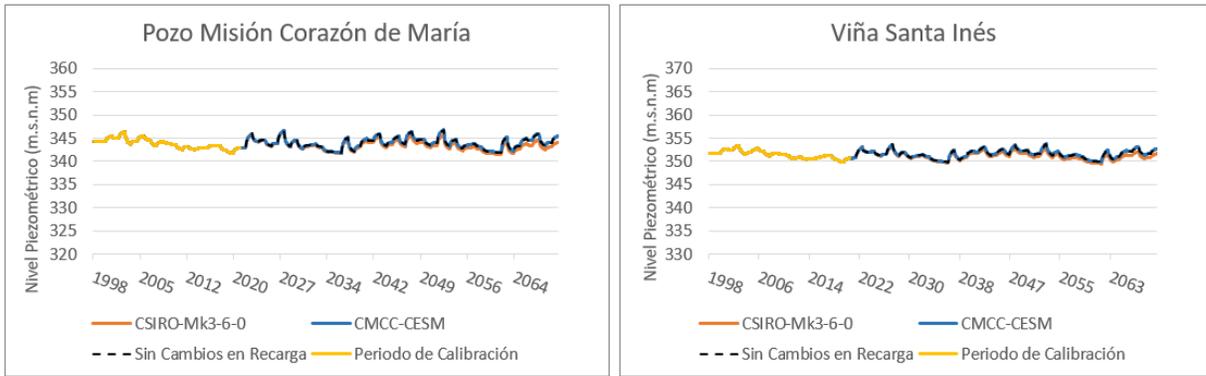


Figura 6-6. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector El Monte Nuevo

- Lampa

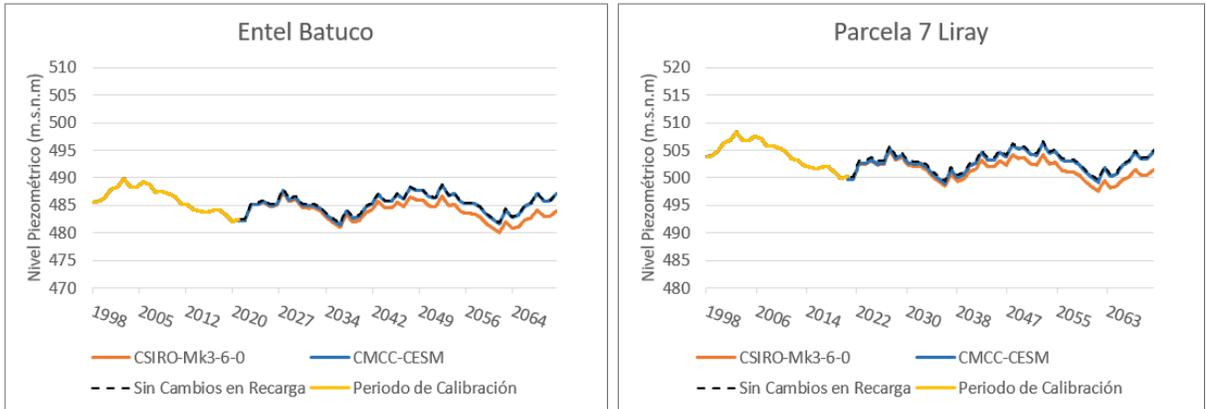


Figura 6-7. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Lampa

- Lo Barnechea

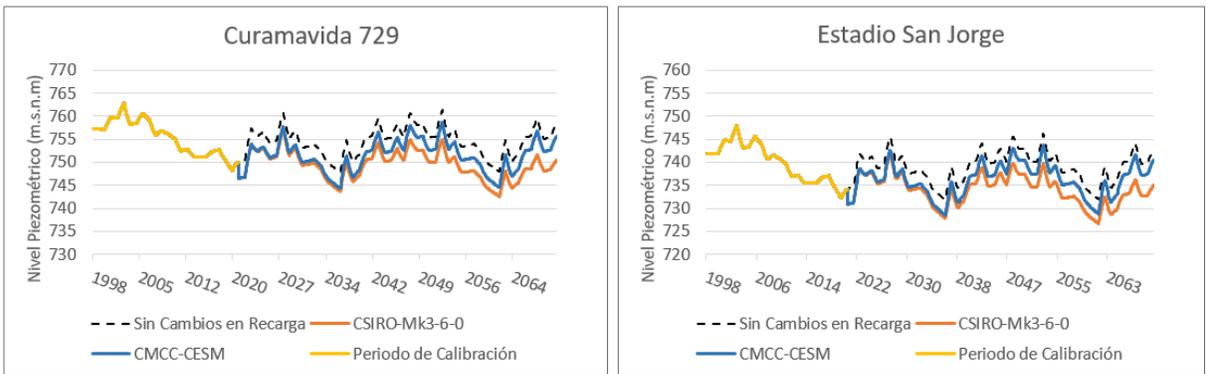


Figura 6-8. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Lo Barnechea

- Paine

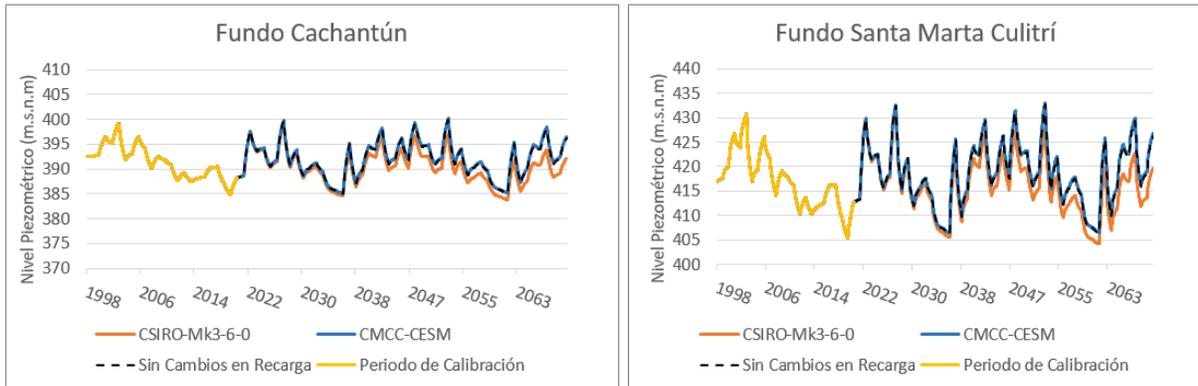


Figura 6-9. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Paine

- Pirque

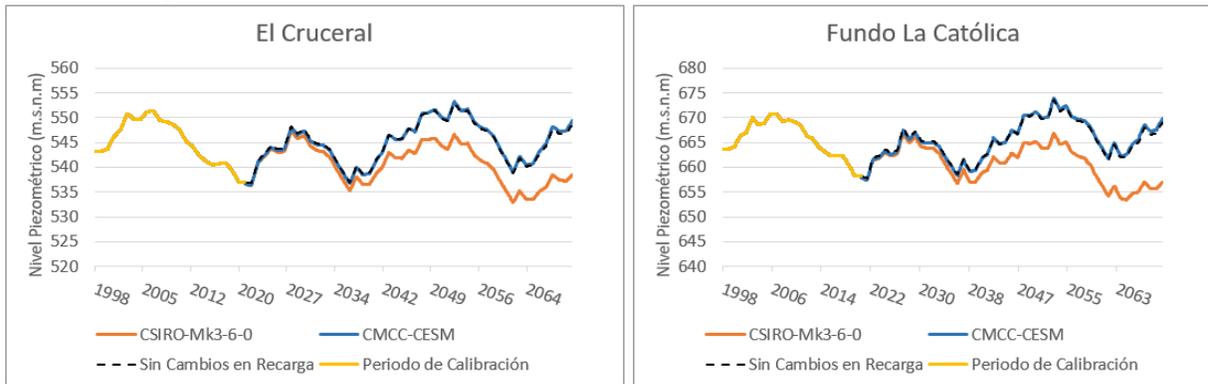


Figura 6-10. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Pirque

- Santiago Norte

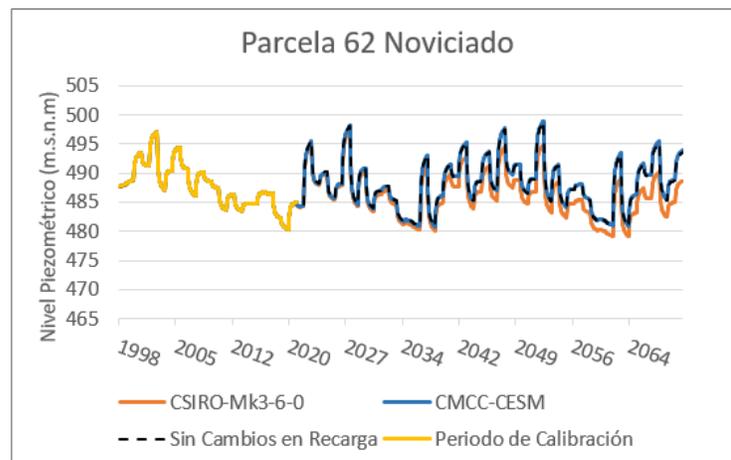


Figura 6-11. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Santiago Norte.

- Santiago Central

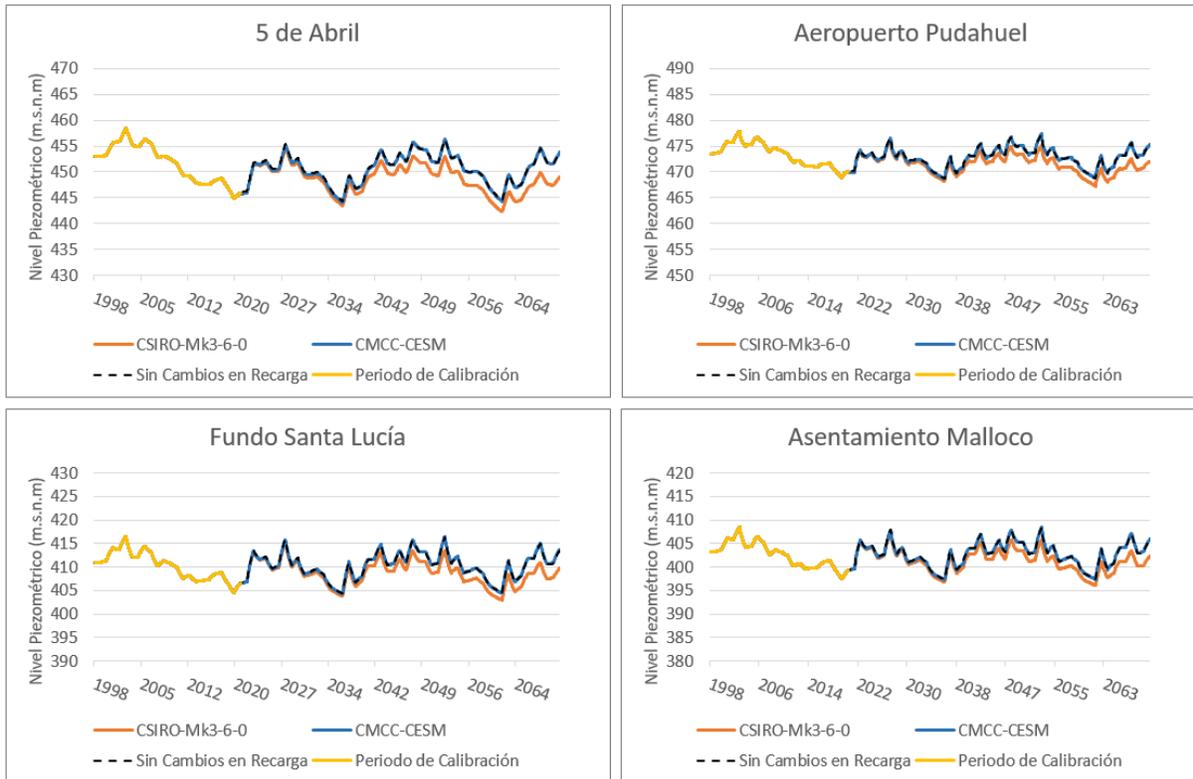


Figura 6-12. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Santiago Central

- Vitacura

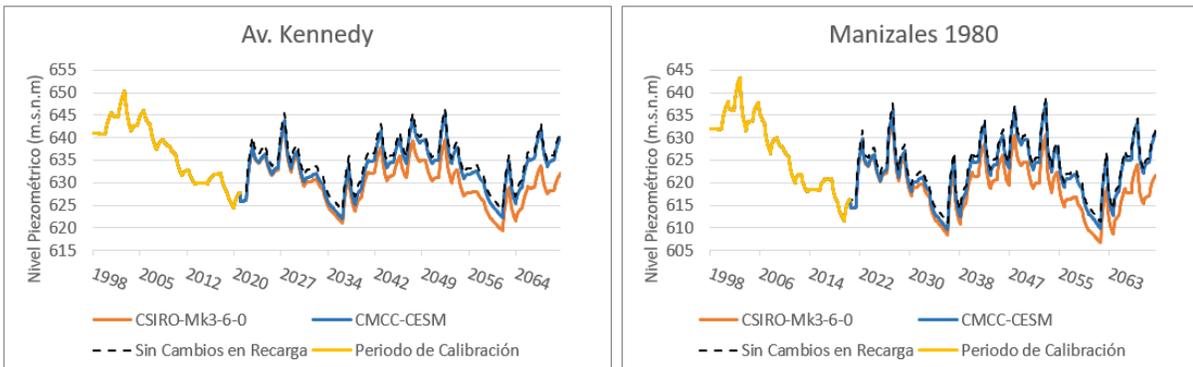


Figura 6-13. Niveles históricos y proyectados en pozos del sector Vitacura

Al finalizar la presentación de resultados, se deben destacar dos aspectos. Por una parte, al comparar el balance hídrico proyectado con el del 2020, se aprecia un cambio mayor de almacenamiento para el escenario según el CMCC-CESM, que el escenario según CSIRO. Y, por otra parte, al observar los niveles en cada SHAC se aprecia que en todos los casos el nivel al año 2070 es mayor que en el 2020. Esto puede parecer poco intuitivos, sin embargo, se debe a que las proyecciones de recarga se llevaron a cabo en base a un periodo altamente variable (1980-2005) que no contiene los mínimos históricos, mientras que el año 2020 se encuentra dentro de estos mínimos históricos.

Por este motivo las proyecciones replican niveles mayores en comparación a las cotas de nivel del año 2020. Sin embargo, si se observan los peak de cada periodo (histórico y proyectado) se puede apreciar la disminución de nivel.

## 6.4. Análisis de sustentabilidad futura del sistema

Finalizada la presentación de resultados, es necesario realizar un análisis a futuro sobre la sustentabilidad del acuífero, considerando que, con el avance del tiempo, el clima tome algunas de las trayectorias propuestas en el presente estudio. El objetivo principal del análisis es conocer y evaluar si los caudales de explotación actuales, desde cada subsector del acuífero, son sostenibles en el tiempo, en este caso en un periodo de 50 años. Para llevar a cabo el análisis, la Dirección General de Aguas establece criterios que son utilizados para determinar áreas de restricción según lo descrito en la resolución 425 de 2007.

Si bien los criterios que decreta la DGA para el análisis son variados, en el presente capítulo se estudian tres los cuales se ajustan a las condiciones del caso estudiado. En primer lugar, se llevará a cabo un diagnóstico cualitativo de la serie anual de niveles piezométricos proyectados para cada GCM. En segundo lugar, se aplicará el criterio de consumo de almacenamiento del acuífero, a nivel de sector acuífero. En este se detalla que el volumen de almacenamiento afectado, en un plazo de 50 años, no debe superar el 5% del volumen total inicial del acuífero. En este caso, debido a la limitante en la proyección de la recarga presentada al finalizar la sección anterior, no resulta concluyente comparar los volúmenes del año 2070 con los del 2020. Por este motivo, en el presente análisis, el volumen inicial será considerado como el volumen que presentaba el acuífero al año 1998 y no el del 2020. Esto se refleja en la siguiente expresión.

$$\frac{V_0 - V_f}{V_0} < 0,05 \quad (6)$$

donde:

- $V_0$ : Volumen del acuífero al inicio del periodo de análisis.
- $V_f$ : Volumen del acuífero, al final del periodo de estudio.

En este caso el  $V_0$  corresponde al volumen almacenado en el año 1998, mientras que  $V_f$  corresponde al volumen en el año 2070.

Finalmente, se utiliza el criterio de satisfacción de la demanda. En este se propone a grandes rasgos que en el futuro la oferta sea mayor o igual que la demanda en cada sector del acuífero. Específicamente, esto se evalúa según la siguiente expresión.

$$Q_{OFERTA} \geq Q_{DEMANDA} \quad (7)$$

donde:

- $Q_{OFERTA}$ : Es el caudal futuro que el modelo considera que es factible de extraer a través de los pozos.
- $Q_{DEMANDA}$ : Es el caudal de extracción ingresado al modelo como demanda.

#### 6.4.1. Análisis cualitativo de niveles piezométricos

Los niveles proyectados sobre el acuífero que se presentaron en la sección 6.3 entregan un primer acercamiento al análisis de la sustentabilidad del acuífero. Estos se analizan para cada sector hidrogeológico de aprovechamiento común, comparando las proyecciones según ambos escenarios de cambio climático con respecto a una proyección en donde la recarga no se ve afectada por el cambio climático.

*Tabla 6-4. Sustentabilidad futura del acuífero considerando el descenso de niveles*

<b>SHAC</b>	<b>Rango de Descenso (m)</b>	<b>Grado del descenso</b>
Buin	1.5 - 2.5	Bajo
Colina Inferior	1.5 - 2.5	Bajo
Colina Sur	1.5 - 2.5	Bajo
Lampa	1.5 - 2.5	Bajo
El Monte Nuevo	1.0 - 1.5	Bajo
Lo Barnechea	4.0 - 4.5	Medio
Paine	4.0 - 6.0	Medio
Santiago Central	2.0 - 4.0	Medio
Santiago Norte	3.5 - 4.0	Medio
Pirque	9.0 - 10.0	Alto
Vitacura	7.0 - 8.0	Alto

La sustentabilidad futura, según este criterio, se presenta de forma gráfica en la siguiente figura.

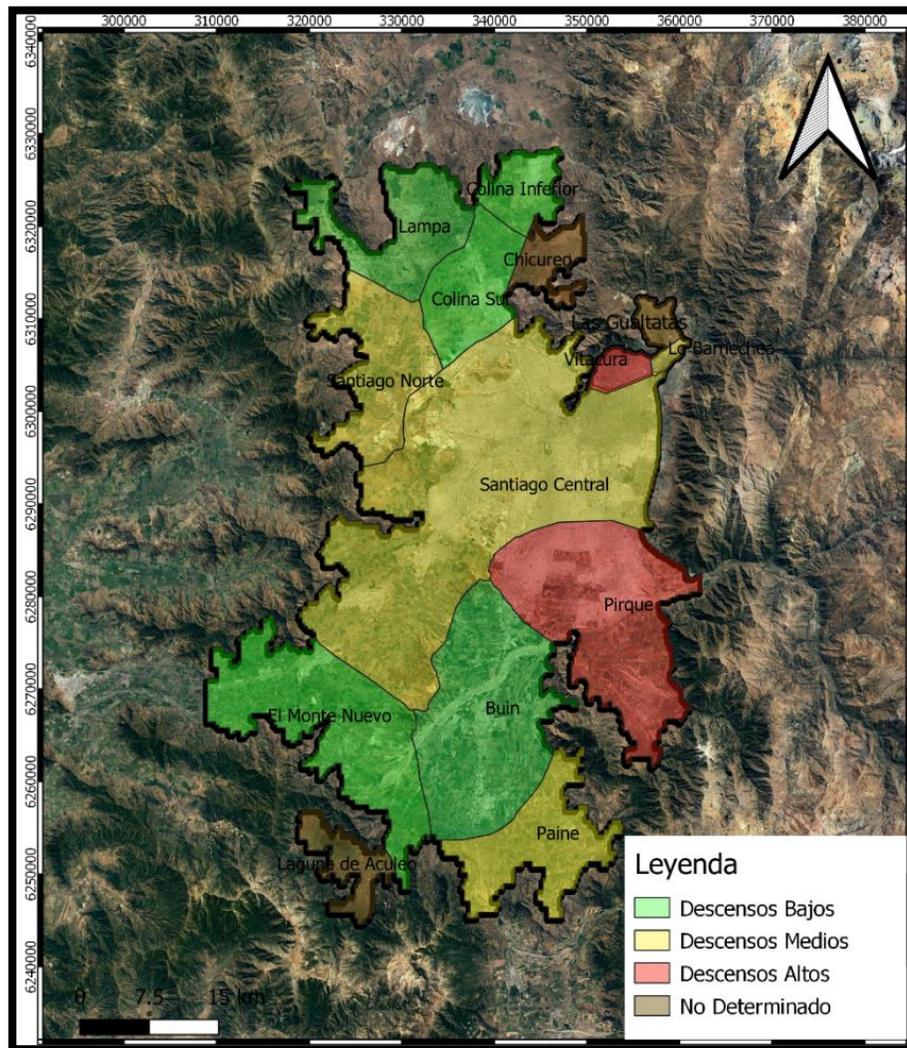


Figura 6-14. Sustentabilidad futura del acuífero, considerando el descenso de niveles

#### 6.4.2. Consumo de almacenamiento del acuífero

Para estudiar este criterio, es necesario conocer el volumen almacenado de agua antes y después del periodo de estudio, para comprender como ha sido afectado por los cambios en recarga. Este cálculo se lleva a cabo tanto en el total del acuífero como en cada uno de sus SHACs. El volumen en el año 1998 se calcula a través del software QGIS y luego, el volumen en el año 2070 es estimado a partir de los deltas de volumen en cada paso de tiempo.

Tabla 6-5. Volúmenes por SHAC al año 1998 y 2070

Volumen de agua almacenado en el acuífero (Millones de m <sup>3</sup> )			
SHAC	1998	2070 CMCC-CESM	2070 CSIRO-Mk3-6-0
Buín	2807.68	2853.58	2798.10
Chicureo	204.52	207.54	194.91
Colina Inferior	525.88	529.36	514.86
Colina Sur	3575.37	3590.22	3552.12
El Monte Nuevo	2402.60	2435.14	2406.36
Laguna de Aculeo	116.59	117.86	115.96
Lampa	1105.97	1122.30	1096.38
Las Gualtatas	107.23	108.64	100.59
Lo Barnechea	117.77	118.96	115.17
Paine	984.12	1009.82	983.98
Pirque	2915.83	3057.15	2806.49
Santiago Central	8163.87	8264.32	8060.94
Santiago Norte	2144.63	2159.35	2135.46
Vitacura	59.70	60.53	59.70
Acuífero Completo	25231.76	25634.77	24941.00

Tabla 6-6. Variación porcentual de volúmenes

SHAC	$\Delta$ Volumen CMCC-CESM (%)	$\Delta$ Volumen CSIRO Mk3-6-0 (%)
Buín	1.6%	-0.3%
Chicureo	1.5%	-4.7%
Colina Inferior	0.7%	-2.1%
Colina Sur	0.4%	-0.7%
El Monte Nuevo	1.4%	0.2%
Laguna de Aculeo	1.1%	-0.5%
Lampa	1.5%	-0.9%
Las Gualtatas	1.3%	-6.2%
Lo Barnechea	1.0%	-2.2%
Paine	2.6%	0.0%
Pirque	4.8%	-3.7%
Santiago Central	1.2%	-1.3%
Santiago Norte	0.7%	-0.4%
Vitacura	1.4%	0.0%
Acuífero Completo	1.6%	-1.2%

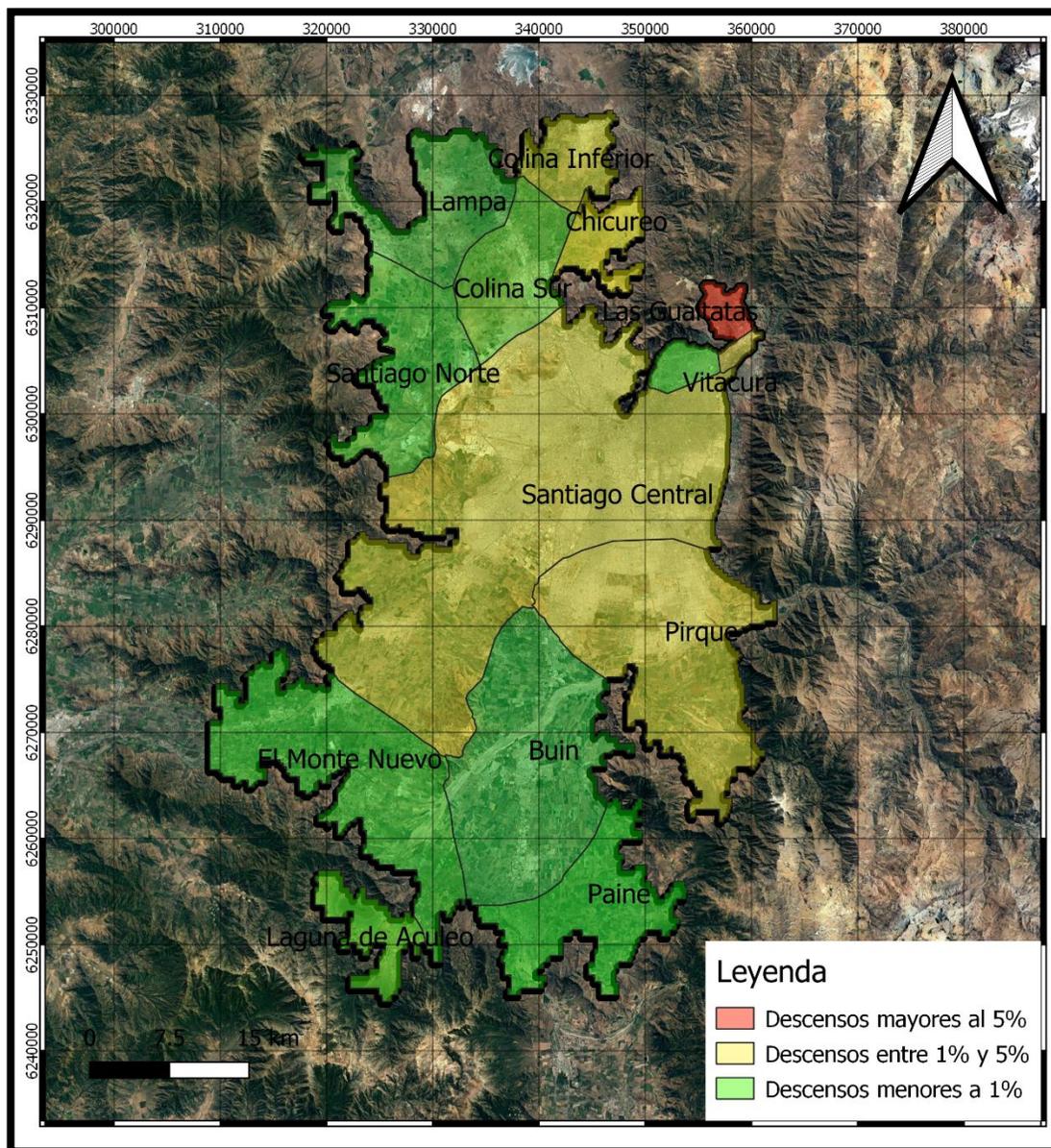


Figura 6-15. Cambios en el volumen almacenado para cada SHAC según CSIRO-Mk3-6-0

Al observar las variaciones de volúmenes en cada SHAC se aprecia por una parte que para el escenario optimista (CMCC-CESM) todos los niveles se ven favorecidos, lo que tiene sentido considerando que en este caso hubo un aumento de recargas. Por otra parte, en el escenario CSIRO-Mk3-6-0 casi la totalidad de los niveles presentan descensos, siendo el sector de Las Gualtatas el más afectado y el único que incumple el criterio de sustentabilidad de la DGA, de Chicureo que presenta un descenso de 4,7%. Cabe destacar que la mayoría de las zonas alta y medianamente afectadas se encuentra hacia el norte del acuífero y en la zona del Mapocho alto, lo que guarda sentido con las propiedades del sector, el cual, debido a su elevado gradiente hidráulico y altas transmisividades presenta baja capacidad acumuladora.

### 6.4.3. Satisfacción de la demanda

Al transcurrir los 50 años de proyección, el modelo calcula si es posible seguir bombeando el mismo caudal impuesto en el tiempo inicial, es decir, si el almacenamiento de agua se reduce de forma significativa, el acuífero puede disminuir sus salidas ya que no cuenta con el agua suficiente para bombear. Por este motivo, es necesario comparar el bombeo impuesto al año 2020 (el cual corresponde a la demanda) con el bombeo que se podrá efectuar al año 2070 (oferta).

*Tabla 6-7. Satisfacción de la demanda en el año 2070*

SHAC	Demanda2020 (m3/s)	Oferta 2070 CMCC- CESM (m3/s)	Oferta 2070 CSIRO- Mk3-6-0 (m3/s)
Buin	2.47	2.47	2.47
Chicureo	0.67	0.67	0.67
Colina Inferior	1.80	1.80	1.80
Colina Sur	1.79	1.79	1.79
El Monte Nuevo	1.74	1.74	1.74
Laguna de Aculeo	0.10	0.10	0.10
Lampa	1.20	1.20	1.20
Las Gualtatas	0.04	0.04	0.04
Lo Barnechea	0.39	0.39	0.39
Paine	0.35	0.35	0.35
Pirque	0.87	0.87	0.87
Santiago Central	14.40	14.40	14.40
Santiago Norte	1.34	1.34	1.34
Vitacura	0.58	0.58	0.58

Al observar la Tabla 6-7. Satisfacción de la demanda en el año 2070, se aprecia que para ambos escenarios la demanda se satisface en el año 2070, ya que el modelo permite seguir extrayendo la misma tasa de bombeo que en el año 2020. Según este criterio y considerando las limitaciones propias consideradas en el modelo, el acuífero es sustentable en todos sus sectores, y la variación única sobre la recarga no presenta una amenaza a la satisfacción futura de la demanda. De forma gráfica, el cumplimiento de este criterio permite que la sustentabilidad futura del sistema se aprecie como se muestra en la siguiente figura.

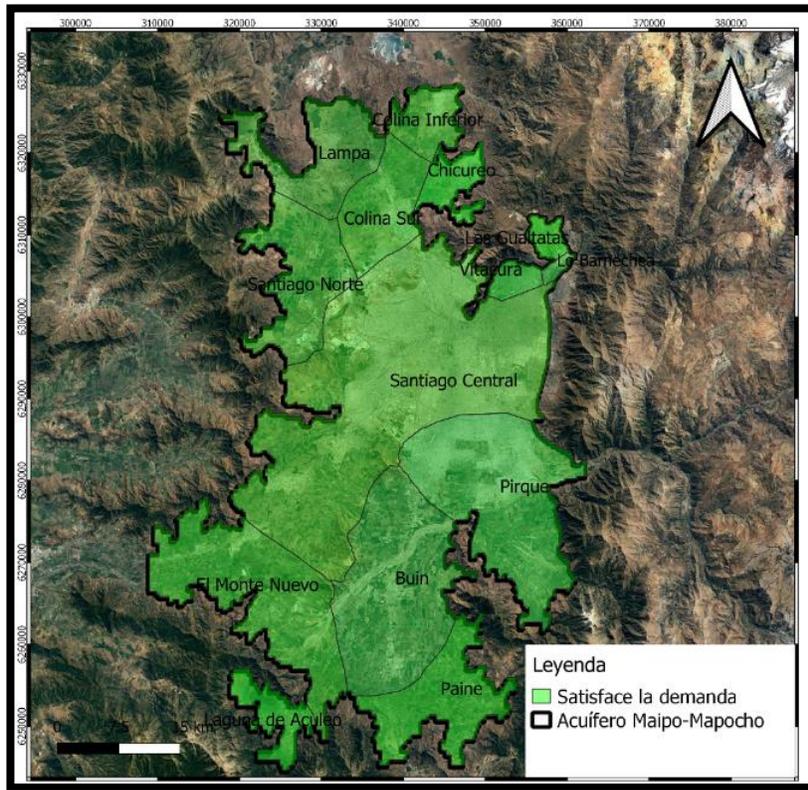


Figura 6-16. Satisfacción de la demanda en cada SHAC

El resumen de los tres criterios utilizados para analizar la sustentabilidad futura del acuífero Maipo-Mapocho se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 6-8. Niveles de sustentabilidad futura para cada SHAC del acuífero

SHAC	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Buin	Alto	Alto	Alto
Chicureo	Alto	Medio	Alto
Colina Inferior	Alto	Medio	Alto
Colina Sur	Alto	Alto	Alto
El Monte Nuevo	Alto	Alto	Alto
Laguna de Aculeo	Alto	Alto	Alto
Lampa	Alto	Alto	Alto
Las Gualtatas	Alto	Bajo	Alto
Lo Barnechea	Alto	Medio	Alto
Paine	Medio	Alto	Alto
Pirque	Bajo	Medio	Alto
Santiago Central	Medio	Medio	Alto
Santiago Norte	Medio	Alto	Alto
Vitacura	Bajo	Alto	Alto

## 7. CONCLUSIONES

Al finalizar el presente estudio, se concluye que simular los efectos del cambio climático sobre aguas subterráneas es un proceso indirecto y, por lo tanto, presenta una importante dificultad en su desarrollo. Para llevar a cabo dicho proceso se recurrió a diversas simplificaciones como, por ejemplo, basar la función de transferencia en una sola variable (precipitación) y un solo punto (estación Cerro Calán), determinar a partir de estimaciones las extracciones (por no contar con datos concretos del total de extracciones en el acuífero), considerar una demanda constante en el periodo proyectado, entre otras. Dichas simplificaciones derivan en limitaciones sobre el análisis de resultados y, por lo tanto, cierta incertidumbre en su precisión. En futuros estudios puede ser de gran utilidad considerar otras variables para el análisis de impacto del cambio climático sobre el acuífero como por ejemplo cambios en la permeabilidad del suelo, considerar nuevos catastros de pozos que elabore la DGA, considerar cambios futuros de las tasas de extracción, entre otros. De todas formas, considerando que dichas simplificaciones permiten una calibración aceptable del modelo, y por lo tanto, una representación confiable de la realidad, el estudio logra definir rangos coherentes de proyecciones frente a variaciones atmosféricas, y presenta un aporte en la determinación de consecuencias del cambio climático sobre aguas subterráneas.

La construcción del modelo numérico presentó algunas diferencias con lo propuesto en el modelo conceptual. En el caso del parámetro conductividad hidráulica, las discrepancias se produjeron en el momento de la calibración, en donde zonas que solo comprendían valores entre 10 y 50 m/d, llegaron a abarcar valores entre 50 y 100 m/d. Sumado a esto, algunos sectores fueron fraccionados para detallar de forma más precisa las variaciones espaciales del parámetro. En el modelo conceptual el parámetro fue definido según lo utilizado en el Modelo DGA 2000, sin embargo, se puede concluir que el paso del tiempo y las afectaciones naturales y/o antropogénicas en el sector, generaron consecuencias en los parámetros hidráulicos del subsuelo. Esto finalmente fue plasmado en los niveles de los pozos de observación y, en consecuencia, en el modelo numérico.

El proceso de calibración tanto en régimen permanente como en régimen transiente, permitió llegar a resultados con errores estadísticos significativamente confiables. Si bien los valores extremos de los residuales presentan valores altos, estos son casos aislados, y la mayor cantidad de residuales se concentra en torno al 0. En el caso del MAE en metros, representa solo el 1,4% de la diferencia máxima. Según lo que establece la “Guía para el uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA” de la Dirección General de Aguas, un MAE igual a un 5% de la diferencia máxima entre niveles observados y simulados, representa una cota máxima de error aceptable, por lo que luego de la calibración, el modelo entrega resultados confiables en sus simulaciones.

Al analizar los resultados del modelo para los diferentes escenarios, se aprecian resultados que requieren de un análisis mayor para su entendimiento. En primera instancia se puede ver un aumento de niveles al comparar el año 2020 y el año 2070, sin embargo esto se debe a las limitantes a la hora de proyectar la recarga del sistema. Debido a la disponibilidad de información de los GCMs no es posible comparar los mínimos históricos con las proyecciones futuras, lo que dificulta el análisis de resultados. Al realizar el análisis considerando esta limitante se aprecia que el balance según el modelo CMCC-CESM representa un comportamiento muy similar al escenario que representa un futuro sin cambios en la recarga, mientras que el CSIRO-Mk3-6-0 muestra variaciones más importantes debido a su mayor disminución en la recarga.

Las equipotenciales grafican el comportamiento del acuífero, presentando las zonas de recarga, principalmente aguas arriba del río Mapocho y río Maipo y de descarga en la zona aguas abajo. Por su parte, la zona del Mapocho alto es el sector con una mayor variación de niveles debido a su condición de zona de recarga y a una alta transmisividad, que no permite la acumulación del recurso. En cuanto a los niveles proyectados, los descensos van desde 1 hasta 10 metros, comparando la proyección según los escenarios con la proyección sin cambios en la recarga. La zona de Pirque es la más afectada en cuanto a los niveles piezométricos, al contrario que el sector de Monte Nuevo, el cual presenta el comportamiento más estable del acuífero.

Al llevar a cabo el análisis de sustentabilidad a partir de tres criterios definidos por la DGA, se puede concluir que los impactos modelados en el presente estudio afectan de distinta forma a cada sector del acuífero, siendo las zonas del Mapocho alto y zona norte las que presentan un desarrollo menos sustentable. Al analizar las variaciones de niveles se aprecia que uno de los sectores más perjudicados es el de Pirque. En cuanto a los volúmenes almacenados de agua, en el escenario según CSIRO, se observa, en la mayoría de los casos, una tendencia a la disminución que, en el caso del sector de Las Gualtatas, supera los 5% por lo que no cumple con el criterio impuesto por la DGA y por lo tanto requiere de medidas para su gestión. Por su parte al observar el criterio de satisfacción de la demanda, el modelo entrega resultados positivos, que proyecta una aceptable sustentabilidad en todos los sectores. Esto permite inferir que la alta capacidad de almacenamiento del acuífero amortigua los efectos del cambio climático y que los mayores efectos futuros sobre la sostenibilidad del acuífero se pueden atribuir a la acción antropológica directa, como por ejemplo mayores extracciones.

Finalmente, se concluye que el cambio climático, al afectar de una forma indirecta a los acuíferos, dificulta el dimensionamiento de sus impactos en comparación con los efectos sobre aguas superficiales, por lo que estos pueden parecer menores e incluso insignificantes. Al considerar esta diferencia entre ambas fuentes del recurso, se puede concluir que el agua superficial es más susceptible al cambio climático, por lo que futuras acciones sobre la gestión del recurso hídrico podrían estar enfocadas en robustecer la infraestructura de extracciones de agua potable en el acuífero para sostener la demanda en periodos que el recurso superficial se vea afectado. Si bien, las proyecciones hechas en este proyecto presentan márgenes de error debido a las simplificaciones consideradas y las limitantes presentadas a lo largo del informe, este análisis representa una guía de las posibles condiciones que podría tener el acuífero en el futuro. En consecuencia, el conocimiento del estado actual del sistema y sus posibles realidades a futuro, establecen una guía sobre las decisiones que se deban tomar a futuro para una gestión sustentable del recurso hídrico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allen D. y Scibek J. (2006) Comparing modelled responses of two high-permeability, unconfined aquifers to predicted climate change. *Global and Planetary Change* 50, 50 – 62.
- Anderson, M. P. y Woessner, W. W.(1992) *Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic Press, San Diego.
- Ayala, Cabrera y Asociados (2000) Modelo de simulación hidrológico operacional. Cuenca de los ríos Maipo y Mapocho. Tomo I. Informe para la Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.
- Ayala, Cabrera y Asociados (2000) Modelo de simulación hidrológico operacional. Cuenca de los ríos Maipo y Mapocho. Tomo II. Informe para la Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.
- Ayala, Cabrera y Asociados (2003) Diagnóstico del Riego y Drenaje en la Región Metropolitana. Informe final. Informe para la Comisión Nacional de Riego, Gobierno de Chile.
- Bates B, Kundzewicz ZW, Wu S, Palutikof JP (2008) Climate change and water, Technical paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat, Geneva, 210.
- Bear J, Cheng HD (1999) *Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts methods and practices*. Kluwer, Dordrecht/Boston/London, 625.
- Betancur T y Palacios C. (2009) La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño). *Universidad Nacional de Colombia. Dyna*, vol 76, num 160, pp. 39-49.
- Bocchiola Daniele, Diolaiuti Guglielmina, Senese Antonella and Soncini Andrea (2018) *Modelling Hydrological Components of the Rio Maipo of Chile, and Their Prospective Evolution under Climate Change*.
- Bredehoeft, J.(2005) The conceptualization model problem—surprise. *Hydrogeology journal*, 13:37–46.
- Centro de Cambio Global UC, *Estrategia de Resiliencia Gobierno Regional Metropolitano de Santiago*, Capítulo Cambio Climático en la Región Metropolitana de Santiago, 2017.
- Changnon, S.A., Huff, F.A., Hsu, C.-F., 1988. Relations between precipitation and shallow groundwater in Illinois. *Journal of Climate* 1, 1239 – 1250.

- Chen Z, Grasby SE, Osadetz KG (2004) Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba. *Can J Hydrol* 290(1–2):43–62.
- Cortés, G., Schaller, S., Rojas, M., García, L., Descalzi, A., Vargas, L. & McPhee, J. (2012). *Assessment of the current climate and expected climate changes in the Metropolitan Region of Santiago de Chile*. Leipzig: UFZ (Helmholtz Centre for Environmental Research) Report
- Green TR, Taniguchi M, Kooi H, Gurdak JJ, Allen DM, Hiscock KM, Treidel H, Aureli A (2011) Beneath the surface of global change: impacts of climate change on groundwater. *J Hydrol* 405, 532–560.
- Green TR (2016) Linking Climate Change and Groundwater. A.J. Jakeman et al. (eds.), *Integrated Groundwater Management*, 97-141.
- Holman IP (2006) Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty, shortcomings, and the way forward? *Hydrogeol J* 14(5):637–647.
- IPCC (2014) *Cambio Climático 2014, Informe de Síntesis*, Ginebra, Suiza.
- Le Treut H, Somerville R, Cubasch U, Ding Y, Mauritzen C, Mokssit A, Peterson T, Prather M (2007) Historical overview of climate change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Climate change 2007: the physical science basis, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge/New York.
- Mearns LO, Hulme M, Carter TR, Leemans R, Lal M, Whetton P (2007) Climate scenario development. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Climate change 2007: the physical science basis, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge/New York, pp 739–768.
- Ministerio del Medio Ambiente (2016) *Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022*, pp 13-14.
- Müller, A. & Höfer, R. (2014). The impacts of climate and land-use change on flood and heat hazards. En K. Krellenberg & B. Hansjürgens (Eds.), *Climate Adaptation Santiago* (pp. 107-126). Heidelberg: Springer.
- Petit JR, Jouzel J, Raynaud Det al (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399(6735):429–436.
- Sadoff C., Muller M (2009) *La Gestión del Agua, la Seguridad Hídrica y la Adaptación al Cambio Climático: Efectos Anticipados y Respuestas Esenciales*. TEC Background Papers. No. 14.

San Juan, A. (2015) Caracterización Hidrogeoquímica de Recursos Hídricos de la Cuenca de Santiago. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Taylor RG, Scanlon B, Döll P et al (2013) Ground water and climate change. *Nat Clim Chang* 3(4): 322–329.

Urtubia, B. (2015) Análisis para la infiltración artificial de agua en la cuenca de Santiago. Memoria para optar al título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Van Dijk SJE, Laouina A, Carvalho AV et al (2006) Desertification in northern Morocco due to effects of climate change on groundwater recharge. In: Kepner WG, Rubio JL, Mouat DA, Pedrazzini F (eds) *Desertification in the Mediterranean region: a security issue*. Springer, Dordrecht, pp 549–577.

Zektser, I.S., Loaiciga, H.A., 1993. Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present, and future. *Journal of Hydrology* 144, 405 – 427.

# ANEXOS

## Anexo A.

Tabla 0-1. Distribución de la recarga

Zona	Área km2	Fracción del área total	Fracción del caudal de recarga Total
2	150.899	0.064	0.042
3	58.362	0.025	0.055
4	120.272	0.051	0.066
5	76.168	0.032	0.070
6	105.25	0.045	0.077
7	36.818	0.016	0.007
8	234.561	0.100	0.167
9	49.838	0.021	0.025
10	32.24	0.014	0.005
11	39.121	0.017	0.010
12	133.229	0.057	0.000
16	56.299	0.024	0.040
17	23.218	0.010	0.008
18	6.691	0.003	0.002
19	12.75	0.005	0.002
20	2.194	0.001	0.005
21	6.479	0.003	0.012
22	21.975	0.009	0.035
24	46.42	0.020	0.002
25	45.342	0.019	0.048
26	7.796	0.003	0.004
27	31.178	0.013	0.013
32	32.9	0.014	0.018
33	14.867	0.006	0.005
34	22.192	0.009	0.010
35	71.363	0.030	0.070
36	8.532	0.004	0.003
37	17.991	0.008	0.012
38	44.871	0.019	0.033
46	108.271	0.046	0.070
47	171.407	0.073	0.017
48	9.373	0.004	0.001
49	97.542	0.042	0.010
50	37.131	0.016	0.004

Zona	Área km2	Fracción del área total	Fracción del caudal de recarga Total
51	158.855	0.068	0.015
53	16.252	0.007	0.001
54	13.998	0.006	0.000
55	132.101	0.056	0.004
56	13.909	0.006	0.001
57	65.498	0.028	0.002
58	0.86	0,000	0.008
59	0.321	0,000	0.009
60	0.293	0,000	0.011
61	0.19	0,000	0.001
62	0.557	0,000	0.002
64	13.532	0.006	0.001

## Anexo B.

<b>Modelo CMIP5</b>	<b>Institución/descripción</b>
ACCESS1-0 ACCESS1-3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia and Bureau of Meteorology (BOM), Australia.
bcc-csm1-1 bcc-csm1-1-m	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China.
BNU-ESM	Beijing Normal University Earth System Model, China.
CanCM4 CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canadá.
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, Estados Unidos.
CESM1-BGC CESM1-CAM5 CESM1-CAM5-1-FV2 CESM1-FASTCHEM CESM1-WACCM	National Science Foundation, Department of Energy, NCAR, Estados Unidos.
CMCC-CESM CMCC-CM CMCC-CMS	Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italia.
CNRM-CM5 CNRM-CM5-2	Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo-France, Francia.
CSIRO-Mk3-6-0 CSIRO-Mk3L-1-2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia.
EC-EARTH	Consortium of European Research Institutions and Researchers, Based on State-of-the-Art Models for the Atmosphere, the Ocean, Sea Ice and the Biosphere.
FGOALS-g2 FGOALS-s2	The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China.
FIO-ESM	The First Institute of Oceanography Earth System Model, SOA, China.
GFDL-CM2p1 GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Estados Unidos.
GISS-E2-H GISS-E2-H-CC GISS-E2-R GISS-E2-R-CC	The Goddard Institute for Space Studies, NASA, Estados Unidos.
HadCM3 HadGEM2-AO HadGEM2-CC HadGEM2-ES	Hadley Centre, Reino Unido.
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics, Rusia.
IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, Francia.
MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM MIROC4h MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón.
MPI-ESM-LR MPI-ESM-MR MPI-ESM-P	Max Planck Institute for Meteorology, Alemania.
MRI-CGCM3 MRI-ESM1	Meteorological Research Institute, Japón.
NorESM1-ME NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Noruega.

*Figura 0-1. Modelos CMIP5*