



Gobierno  
de Chile

**GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

# **ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN INTEGRADA Y SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ**

**INFORME FINAL**

**REALIZADO POR:**

HIDROMAS CEF LIMITADA

**S.I.T. N° 332**

**Santiago, Diciembre 2013**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Abogada Sra. Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas  
Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe División de Estudios y Planificación  
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal  
Ingeniero Civil Miguel Ángel Caro Hernández

### HIDROMAS CEF LIMITADA

Jefe de Proyecto  
Ingeniero Civil, Ph.D. Carlos Espinoza C.

#### Profesionales

Ingeniero Civil, M.Sc. Julio Cornejo M.  
Ingeniero Civil, M.Sc. René Figueroa L.  
Ingeniero Civil, M.Sc. Alexandra Cuellar P.  
Ingeniero Civil Pablo Zamora B.



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO Y ANÁLISIS SITUACIÓN ACTUAL.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....</b>	<b>2</b>
1.2.1	<i>General.....</i>	2
1.2.2	<i>Específicos .....</i>	2
<b>1.3</b>	<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>REVISION DE ANTECEDENTES.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>ESTUDIOS DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA).....</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>ESTUDIOS SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN) .....</b>	<b>6</b>
<b>2.4</b>	<b>OTROS ESTUDIOS .....</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>CARACTERIZACION ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>CLIMA Y METEOROLOGÍA .....</b>	<b>12</b>
3.2.1	<i>Aspectos Generales .....</i>	12
3.2.2	<i>Clima Desértico con Nublados Abundantes.....</i>	12
3.2.3	<i>Clima Desértico Marginal Bajo.....</i>	12
3.2.4	<i>Clima Desértico Marginal de Altura .....</i>	12
<b>3.3</b>	<b>MARCO HIDROLÓGICO .....</b>	<b>13</b>
3.3.1	<i>Aspectos Generales .....</i>	13
3.3.2	<i>Pluviometría .....</i>	13
3.3.3	<i>Fluviometría .....</i>	18
3.3.4	<i>Evaporación y Temperatura .....</i>	24
<b>3.4</b>	<b>MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>29</b>
3.4.1	<i>Aspectos Generales .....</i>	29
3.4.2	<i>Geología de Superficie.....</i>	29
3.4.3	<i>Geología de Subsuperficie .....</i>	38
<b>3.5</b>	<b>CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA .....</b>	<b>41</b>
3.5.1	<i>Aspectos Generales .....</i>	41
3.5.2	<i>Unidades Hidrogeológicas.....</i>	42
3.5.3	<i>Propiedades Hidrogeológicas.....</i>	44
3.5.4	<i>Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común.....</i>	49
3.5.5	<i>Niveles de Agua Subterránea .....</i>	51
<b>3.6</b>	<b>BALANCE HÍDRICO SECTOR LA PUERTA - ANGOSTURA .....</b>	<b>64</b>

<b>4.</b>	<b>MODELO OPERACIONAL AQUATOOL .....</b>	<b>67</b>
4.1	ASPECTOS GENERALES.....	67
4.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO OPERACIONAL AQUATOOL .....	67
4.3	ESTADÍSTICA FLUVIOMÉTRICA EN CUENCAS APORTANTES .....	74
4.3.1	Río Pulido.....	74
4.3.2	Río Jorquera.....	74
4.3.3	Río Manflas .....	74
4.3.4	Aportes Intermedios.....	74
4.4	ACTUALIZACIÓN DEMANDAS DE AGUA .....	79
4.4.1	Riego.....	79
4.4.2	Agua Potable.....	79
4.4.3	Minería .....	80
4.5	CAMBIOS REALIZADOS EN MODELO ORIGINAL (DICTUC, 2010) .....	81
4.5.1	Recarga por Pérdidas de Agua Potable.....	81
4.5.2	Topología Sector Alto (Embalse Lautaro y Zona de Recuperaciones) .....	87
4.5.3	Topología Sector Bajo.....	88
4.6	CALIBRACIÓN MODELO AQUATOOL.....	91
4.6.1	Objetivos de Calibración.....	91
4.6.2	Principales Resultados.....	91
4.7	CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	95
<b>5.</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO ACUIFERO COPIAPO .....</b>	<b>96</b>
5.1	ASPECTOS GENERALES.....	96
5.2	DESCRIPCIÓN MODELO VISUAL MODFLOW .....	96
5.3	ESTRUCTURA MODELO HIDROGEOLÓGICO SERNAGEOMIN (2012).....	96
5.3.1	Sector Alto (Subsectores 1 y 2).....	96
5.3.2	Sector Bajo (Subsectores 3, 4, 5 y 6).....	96
5.4	ESQUEMA DE ACOPLA DE LOS MODELOS AQUATOOL Y VISUAL MODFLOW .....	97
5.5	CAMBIOS REALIZADOS EN MODELO ORIGINAL (SERNAGEOMIN, 2012) .....	98
5.5.1	Geometría y Basamento.....	98
5.5.2	Parámetros Hidrogeológicos.....	103
5.5.3	Condiciones de Borde .....	107
5.5.4	Tasas de Recarga.....	108
5.5.5	Pozos de Bombeo .....	113
5.5.6	Pozos de Monitoreo e Información de Niveles Piezométricos .....	117
5.6	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN MODELO VISUAL MODFLOW.....	121
5.6.1	Esquemas de Calibración.....	121
5.6.2	Niveles Simulados versus Niveles Medidos.....	124
5.6.3	Balace Hídrico en el Acuífero de Copiapó.....	131
5.7	CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	136

<b>6.</b>	<b>ESCENARIOS DE ANALISIS .....</b>	<b>137</b>
6.1	ASPECTOS GENERALES.....	137
6.2	ESCENARIO 1: PLAN DE EXTRACCIÓN FUTURO DE POZOS DE AGUA POTABLE Y USO DE AGUA DESALADA .....	137
6.2.1	Descripción General.....	137
6.2.2	Principales resultados.....	147
6.2.3	Análisis de Resultados .....	160
6.3	ESCENARIO 2: EFECTO EN EL SECTOR 5 DE LA VENTA DE AGUA EFLUENTE DE LA PTAS A CANDELARIA.....	161
6.3.1	Descripción General.....	161
6.3.2	Principales resultados.....	161
6.3.3	Análisis de Resultados .....	182
6.4	ESCENARIO 3: EFECTO DEL PROYECTO CASERONES EN EL ACUÍFERO DE COPIAPÓ.....	183
6.4.1	Descripción General.....	183
6.4.2	Principales resultados.....	190
6.4.3	Análisis de Resultados .....	200
6.5	CONCLUSIONES PRELIMINARES .....	201
<b>7.</b>	<b>GEOFISICA DE PROSPECCION SECTOR ALTO ACUIFERO COPIAPO .....</b>	<b>203</b>
7.1	INTRODUCCIÓN.....	203
7.2	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	203
7.3	REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	203
7.4	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE .....	206
7.5	PROPUESTA DE PROSPECCIONES GEOFÍSICAS EN SECTOR ALTO ACUÍFERO COPIAPÓ .....	213
7.6	PRINCIPALES RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE TERRENO .....	217
7.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA GEOFÍSICA .....	223
7.7.1	Aspectos Generales .....	223
7.7.2	Sector 1: Junta Río Manflas, Pulido, Jorquera y Valle Copiapó .....	224
7.7.3	Sector 2: Valle del Río Copiapó – Sector Los Loros-La Puerta.....	226
<b>8.</b>	<b>PROPUESTA SECTORIZACIÓN SECTOR ACUÍFERO 1 .....</b>	<b>229</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>236</b>
9.1	CONCLUSIONES.....	236
9.2	RECOMENDACIONES .....	238
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>239</b>

## ANEXO DIGITAL

<b>ANEXO A.</b>	<b>Análisis de Demandas de Agua de la Cuenca</b>
<b>ANEXO B.</b>	<b>Generación de Caudales Medios Mensuales en Cuencas Intermedias</b>
<b>ANEXO C.</b>	<b>Resultados Modelo AQUATOOL (Caudales, Balances)</b>
<b>ANEXO D.</b>	<b>Resultados Modelo Visual MODFLOW (Niveles y Balances)</b>
<b>ANEXO E.</b>	<b>Análisis de la Pérdida de Rendimiento Captaciones Agua Potable Sector 5 y 6</b>
<b>ANEXO F.</b>	<b>Base de Datos Información Geofísica Acuífero Copiapó</b>
<b>ANEXO G.</b>	<b>Estudio Geofísico Gravimétrico y Electromagnético DPI Ingenieros</b>
<b>ANEXO H.</b>	<b>Base Cartográfica</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación del Estudio y Análisis Situación Actual

El balance hídrico en el acuífero de río Copiapó ha sido un tema de interés en el área de los recursos hídricos, debido al contraste entre la importante suma de derechos de agua subterránea otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA), en comparación con la recarga hidrológica del sistema. Esta situación ha generado un sistema acuífero en desequilibrio, con descensos importantes en algunos sectores hidrogeológicos, lo que ha hecho disminuir la satisfacción de las demandas hídricas en la cuenca.

La delicada situación de las aguas superficiales inherente a una zona desértica, acentuada por una condición de sequía que se ha extendido por cerca de una década, y la sobreexplotación del acuífero, producen que el escenario hídrico actual en la cuenca del río Copiapó sea bastante complejo.

En la década de los 80, la expansión agrícola del valle de Copiapó ante la llegada de la uva de mesa para exportación, generó una fuerte demanda por recursos hídricos subterráneos en la cuenca. Álamos y Peralta (1987) realizó un estudio hidrogeológico del acuífero, estableciendo un balance hídrico y valores de recarga para un periodo, que en Copiapó es considerado húmedo. Este estudio y la presión por derechos de agua, implicó un significativo otorgamiento de derechos de agua subterránea, que hoy en día supera los 19 m<sup>3</sup>/s.

Desde la década de los 90 hasta el presente, el acuífero de Copiapó ha presentado descensos sostenidos de los niveles de agua subterránea, llegando hoy en día a convertirse en una situación crítica desde el punto de vista del uso de agua subterránea para satisfacer los diversos requerimientos de agua por parte de los usuarios. Los mayores descensos de los niveles de agua subterránea se han detectado en el sector localizado entre Mal Paso y Copiapó, donde se encuentran los pozos de la empresa sanitaria Aguas Chañar y los pozos de los proyectos mineros.

El estudio DGA-DICTUC (2010) denominado “Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del Río Copiapó”, a partir de un robusto estudio de modelación establece que para satisfacer una demanda de agua subterránea sobre el acuífero de Copiapó del orden de los 5,0 m<sup>3</sup>/s, se requiere del consumo paulatino del volumen embalsado en el acuífero a tasas de 1,4 m<sup>3</sup>/s. De estos antecedentes, se concluye que el desbalance o déficit hídrico de la cuenca del Copiapó sería del orden de un 30%. Estos antecedentes han sido validados con estudios posteriores realizados por organismos como SERNAGEOMIN (2012).

Antecedentes adicionales de pruebas de bombeo de pozos de la empresa sanitaria de Copiapó, han mostrado que con la disminución del nivel freático, también se ha producido una merma en el rendimiento o caudal específico de producción (L/s/m), llegando muchos de estos pozos a quedar fuera de operación. De esta forma, la empresa sanitaria ha tenido que buscar nuevos pozos, arrendar derechos, solicitar traslados de derechos y pensar en la búsqueda de agua en otras fuentes tales como proyectos de desalación o el trasvase de agua desde otras cuencas.

Debido a lo anterior, surge la necesidad de contar con herramientas actualizadas para ayudar en el desarrollo de la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca del río Copiapó. Como consecuencia de esto, la Dirección General de Aguas (DGA) ve con gran interés la posibilidad de actualizar la modelación integrada e hidrogeológica de la cuenca del río Copiapó.

La gran demanda de agua, la escasez de nuevas fuentes de agua dulce para explotación, el posible traslado de derechos, la instalación de plantas desalinizadoras, así como las medidas necesarias a

implementar para lograr una explotación sustentable de los recursos hídrico plantean la necesidad de una herramienta dinámica que permita evaluar diferentes escenarios de explotación de los recursos hídricos en la zona.

En el marco anterior, la Dirección General de Aguas ha contratado a HIDROMAS CEF Limitada para llevar adelante la actualización e integración del modelo de asignación de aguas AQUATOOL y de aguas subterráneas Visual MODFLOW, los que serán utilizados para llevar a cabo diversos análisis sobre la situación futura del sistema acuífero río Copiapó.

## **1.2 Objetivos del Estudio**

### **1.2.1 General**

El objetivo general de este trabajo es actualizar el modelo numérico para los recursos hídricos del acuífero del río Copiapó, el que consta de dos módulos independientes desarrollados en trabajos liderados por DGA y SERNAGEOMIN:

- Modelo hidrológico integrado, AQUATOOL Copiapó, desarrollado en el reporte DGA/DICTUC (2010), y
- Modelo hidrogeológico, MODFLOW 4.2, desarrollado por SERNAGEOMIN (2012) para el acuífero de Copiapó.

El área de estudio, y por ende de modelación, se extiende entre el tramo comprendido por las estaciones fluviométricas de cabecera de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas y el sector denominado río Copiapó en Angostura, con antecedentes más precisos de las demandas de agua potable y minería, considerando además, la nueva información hidrológica y de niveles de agua subterránea.

### **1.2.2 Específicos**

Como objetivos específicos del estudio se identifican los siguientes:

- a. Actualizar el balance hídrico conceptual de la DGA en el tramo comprendido entre las salidas de las estaciones fluviométricas de cabecera de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas y el sector denominado río Copiapó en Angostura, con la información hidrométrica más reciente (precipitación, caudales superficiales, caudales de bombeo y niveles de agua subterránea), hasta diciembre de 2012.
- b. Complementar el catastro de la demanda de aguas subterráneas para la cuenca del Copiapó, considerando la información de demanda de agua potable entregada por la empresa sanitaria Aguas Chañar a la SISS, la demanda minera, la demanda industrial, así como también la demanda agrícola.
- c. Evaluar el efecto de la pérdida de rendimiento de los pozos de la empresa sanitaria y otros pozos que cuenten con información, y establecer una metodología para incorporar este efecto en el modelo hidrogeológico.
- d. Realizar un análisis crítico a la actual subdivisión de acuíferos en el Sector 1 de la cuenca del río Copiapó realizado por DGA/DICTUC (2010) "Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del Río Copiapó", y de ser necesario, plantear una nueva subdivisión para ese sector.

- e. Recalibrar el modelo hidrológico integrado AQUATOOL y el modelo hidrogeológico de Copiapó en el tramo comprendido entre las salidas de las estaciones fluviométricas de cabecera de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas y el sector denominado río Copiapó en Angostura, considerando las demandas actualizadas de agua potable y minería, y la última información hidrométrica disponible hasta diciembre de 2012.
- f. Definición e implementación de escenarios, de acuerdo a las necesidades DGA, para analizar el efecto en el balance hídrico de futuros proyectos. Se realizarán tres escenarios (similares para cada modelo), los cuales serán acordados entre el Consultor y la Inspección Fiscal.

### **1.3 Metodología de Trabajo**

El presente trabajo se dividió en tres etapas, las que abordan una serie de actividades para su desarrollo.

La Etapa 1 consistió en una revisión inicial de los nuevos antecedentes que dan sustento a la actualización de los modelos AQUATOOL y Visual MODFLOW. Las principales actividades desarrolladas en esta etapa fueron:

- Recopilación y Revisión de Antecedentes
- Actualización del Balance Hídrico del Acuífero de Copiapó
- Actualización de las Demandas
- Visita a terreno Copiapó
- Revisión y operación de los modelos AQUATOOL y MODFLOW

La Etapa 2 corresponde a la actualización de los modelos. Para ello, se ejecutó una calibración de los modelos operacional e hidrogeológico, ajustando los caudales superficiales medidos en las estaciones fluviométricas y los niveles de agua subterránea medidos por la DGA. Se definió un sistema de acople de los modelos superficial y subterráneo a partir de la recarga y el bombeo agrícola.

Adicionalmente, se realizó una revisión de la geofísica existente en la cuenca, que permite inferir la profundidad del basamento rocoso, definiendo aquellos sectores del acuífero, que requieren de mayores análisis. Las principales actividades desarrolladas en esta etapa son:

- Geofísica de prospección
- Actualización y Calibración AQUATOOL
- Actualización y Calibración MODFLOW

Finalmente, la Etapa 3, responde a la definición de una serie de escenarios que permitan a la DGA proyectar el funcionamiento del acuífero de Copiapó, frente a futuros cambios que se espera ocurran en la cuenca, tales como satisfacción de la demanda de agua potable y la instalación de nuevos proyectos mineros a la cuenca. Adicionalmente, se ha propuesto a la DGA una sectorización del acuífero 1, cabecera hasta el embalse Lautaro, de acuerdo a las condiciones hidrológicas, e hidrogeológicas de la cuenca. Las principales actividades desarrolladas en esta etapa son:

- Redefinición de Sectores del Acuífero I: Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro.
- Propuesta de Escenarios de Simulación

## 2. REVISION DE ANTECEDENTES

### 2.1 Aspectos Generales

La revisión bibliográfica del presente trabajo se ha desarrollado a partir de una serie de informes solicitados a la Dirección General de Aguas, realizados posteriormente a los trabajos de DICTUC (2010) y SERNAGEOMIN (2012). Dentro de la información recopilada se cuenta con informes desarrollados por empresas privadas y organismos públicos tales como DGA, SISS y CNR. La Tabla 2.1 muestra los antecedentes más recientes que aportan información adicional para la actualización de los modelos hidrogeológicos.

**Tabla 2.1**  
**Estudios recientes, con énfasis hidrogeológico, desarrollados en la cuenca del río Copiapó**

PROYECTO	MANDANTE	ELABORADO POR	AÑO
Análisis Integrado de Gestión en la Cuenca del Río Copiapó	DGA	DICTUC	2010
Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca del Río Copiapó, con Énfasis en Cuantificación, Dinámica y Calidad Química de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos.	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	2012
Situación de los Pozos de Aguas Chañar en Copiapó y Alternativas de Abastecimiento de Agua para Copiapó, Caldera y Chañaral	AGUAS CHAÑAR	FERNANDO PERALTA	2009
Estudio Determinación de Tarifas 2010 – 2015 Empresa Aguas Chañar S.A.	SISS	SISS	2010
Hidrogeología e Hidrogeoquímica de la Cuenca de la Quebrada Paipote, Región de Atacama	SERNAGEOMIN	TESIS MAGISTER U. DE CHILE	2011
Estudio Hidrogeológico para Precisar el Límite entre el Tercer y Cuarto Sector del Acuífero de la Cuenca del Río Copiapó	AGUAS CHAÑAR	GCF	2011
Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento del Sistema de Aguas Subterráneas para su Utilización en Riego en el Río Copiapó	CNR	JORQUERA Y ASOCIADOS S.A. CONSULTORES	2012
Análisis Crítico de la Red de Niveles de Aguas Subterráneas del Acuífero de Copiapó	DGA	H2 CUENCA	2012
Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas Otorgados en la Cuenca del Río Copiapó (SDT 327)	DGA	DGA	2012

## 2.2 Estudios Dirección General de Aguas (DGA)

- **DGA-DICTUC 2010. Análisis Integrado de Gestión en la cuenca del río Copiapó.**

Este estudio fue desarrollado durante los años 2008 a 2010 por la empresa DICTUC para la DGA, con el fin de desarrollar un modelo operacional de la cuenca, bajo la plataforma del programa AQUATOOL, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Éste modelo define los caudales superficiales de acuerdo a la operación a demanda del sistema Copiapó.

El modelo AQUATOOL parte desde la cabecera de los sistemas considerando las estaciones fluviométricas de Pulido en vertedero, Jorquera en vertedero y Manflas en vertedero y culmina en la estación río Copiapó en Angostura. Desde el punto de vista hidrogeológico, se definen 11 sectores acuíferos, identificados de acuerdo al comportamiento de los niveles de agua subterránea de los pozos DGA, que se representan en la topología del sistema como elementos de volumen que satisfacen zonas demandas.

Como parte de éste estudio, se realizó un balance hídrico conceptual de los tramos La Puerta Angostura, analizando la información fluviométrica y de niveles de agua subterránea. Adicionalmente, se realizó un completo Catastro a nivel de bocatoma, pozos y predios, para identificar la demanda actual de riego de la cuenca.

Como resultado de este trabajo se identifica que el déficit de la cuenca de Copiapó corresponde al 30% de la explotación actual. Es decir, cualquier escenario de sustentabilidad de la explotación estaría basado en la reducción o cambio de fuente de al menos ese porcentaje de usos superficiales y subterráneos de la cuenca.

Como aporte de este trabajo se construyó un modelo operacional robusto para representar el balance hídrico del acuífero de Copiapó. Una de las debilidades de éste trabajo consistió en que las demandas mineras y de agua potable provienen de estimaciones indirectas a partir de otros estudios que no han sido validados por la autoridad y tampoco por los usuarios del sistema.

- **DGA - H2 Cuenca 2012. Análisis crítico de la red de niveles de aguas subterráneas del acuífero de Copiapó.**

Este trabajo fue desarrollado por la empresa H2 Cuenca para la DGA. El objetivo general del estudio fue realizar un análisis crítico de la red de observación de niveles de aguas subterráneas de la DGA en la cuenca del río Copiapó, y establecer con esto una metodología adecuada para la optimización del funcionamiento de la red, que resulte en la propuesta de una red mejorada.

Como aporte al presente estudio, este trabajo ha realizado una completa caracterización topográfica de la red de niveles, obteniéndose coordenadas UTM actualizadas (Norte, Este y Cota) de los pozos vigentes, medidas con GPS doble frecuencia, el que permite obtener precisión del orden de centímetros, en contraste con GPS navegadores, los que tienen precisión de metros.

Esta información es fundamental para la precisión de la calibración del modelo hidrogeológico.

- **DGA 2012. Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados en la cuenca del río Copiapó (SDT 327).**

Este trabajo fue desarrollado por la Dirección General de Aguas, con el objeto de establecer la cifra oficial de derechos de aprovechamiento otorgados en el acuífero de Copiapó. La cifra obtenida en éste trabajo indica un total de 19,6 m<sup>3</sup>/s otorgados entre los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común 1 a 6 del acuífero.

### **2.3 Estudios Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)**

- **SERNAGEOMIN 2012. Evaluación hidrogeológica de la cuenca del río Copiapó, con énfasis en cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.**

En este trabajo se ha realizado un completo análisis hidrogeológico de la cuenca de Copiapó, considerando desde la zona de cabecera de la cuenca hasta la zona de Angostura, donde DGA mide los recursos hídricos en la estación fluviométrica río Copiapó en Angostura. En este trabajo, SERNAGEOMIN ha realizado un catastro generalizado de los niveles de agua subterránea durante el desarrollo del proyecto, que le ha permitido diseñar mapas de isopiezas de la situación actual de la cuenca. Adicionalmente ha realizado campañas de muestreo de aguas y estudios de prospección geofísicos a lo largo del relleno sedimentario de la cuenca.

Uno de los puntos relevantes de este trabajo corresponde a la generación del modelo hidrogeológico para la cuenca de Copiapó. Este modelo fue desarrollado en la plataforma Visual MODFLOW versión 4.2. El acuífero de Copiapó fue representado a través de dos modelos denominados modelo Sector Alto, para el acuífero comprendido entre la cabecera y Copiapó en La Puerta, y el modelo Sector Bajo para el acuífero comprendido entre La Puerta y Angostura. El modelo de agua subterránea fue alimentado con información de recarga y bombeo resultantes del modelo de gestión AQUATOOL desarrollado por DGA-DICTUC (2010). El periodo de calibración/validación considerado abarca el período 1993-2006, debido a que se considera más representativo y con mejor información de la demanda hídrica de la cuenca. La calibración de este modelo es considerada satisfactoria, debido a que logra representar de buena forma los niveles de agua subterránea y el balance hídrico del acuífero. Los valores de error NRMS se encuentran muy por debajo del 5% que considera una calibración como adecuada.

Los escenarios de simulación planteados en el informe de SERNAGEOMIN, responden a definiciones de interés regional, tales como el impacto en el balance hídrico y niveles de agua subterránea de la construcción y puesta en marcha del proyecto minero Caserones y el efecto en el acuífero del cambio de fuente del agua potable (hacia el agua de mar), que deja de explotar el acuífero.

- **SERNAGEOMIN 2011. Hidrogeología e hidrogeoquímica de la cuenca de la Quebrada Paipote, región de Atacama.**

Corresponde a la Tesis de Magister U. de Chile de la Geóloga María Eliana Lorca, donde se desarrolla un estudio hidrogeológico de la quebrada de Paipote y los caudales aportantes a la cuenca del río Copiapó.

Las aguas subterráneas en la cuenca se distribuyen principalmente en los depósitos no consolidados a moderadamente consolidados, siendo los acuíferos de mayor importancia los de los rellenos aluviales de las quebradas Paipote y San Andrés, y del abanico aluvial de Llano de Varas. La estimación de la recarga total de la cuenca, sobre la base de los antecedentes disponibles, es del orden de los 90 l/s y se concentra en las zonas más elevadas.

Este trabajo estimó un rango de descarga desde Quebrada de Paipote hacia la cuenca del río Copiapó en un rango de 35 y 56 L/s. El análisis se realizó con mediciones puntuales de niveles realizadas en los años 1992 y 2009 en los pozos Biocobre pertenecientes a la empresa Pucobre. Para la estimación se consideró una transmisividad del área de estudio entre 3.000 y 4.859 m<sup>2</sup>/día, un ancho del valle de 297 m y un gradiente hidráulico de 0,34%. Además, se observó un continuo descenso en los niveles en la zona más baja de la cuenca, por lo que los caudales extraídos no son sustentables a largo plazo.

En la cuenca se han identificado 63 pozos, de los cuales sólo 29 tienen información presentada en la DGA para solicitud de derechos de agua. En total, en la cuenca se han otorgado derechos por 111 L/s.

Finalmente, se caracterizó la composición química de las aguas, consideradas de mala calidad ya que la mayoría de las muestras de agua de la cuenca se encuentran sobre los límites permitidos por las normas de agua potable y de riego.

## **2.4 Otros Estudios**

- **Aguas Chañar 2009. Situación de los pozos de Aguas Chañar en Copiapó y alternativas de abastecimiento de agua para Copiapó, Caldera y Chañaral,**

Este estudio fue desarrollado por el Ingeniero Civil Sr. Fernando Peralta para la empresa Aguas Chañar, encargada del abastecimiento de agua potable de Copiapó, Caldera y Chañaral, que dispone de 30 pozos de captación de agua subterránea, de los cuales 26 de ellos se encuentran en el acuífero denominado Mal Paso - Copiapó (sector 4) y 4 en el acuífero La Puerta - Mal Paso (sector 3).

El objetivo de este estudio es realizar un diagnóstico de las captaciones de agua potable pertenecientes a Aguas Chañar localizadas en el sector 4 y determinar la vida útil de los pozos ubicados en este sector y al mismo tiempo plantear alternativas de soluciones en el corto, medio y largo plazo para disponer de los caudales necesarios para abastecer sus demandas de agua potable.

El conjunto de pozos tiene una capacidad instantánea de producción de 929 l/s, al momento del estudio (año 2009). Desde el año 2003 al 2009, los niveles estáticos y dinámicos de los pozos descendieron entre 5 y 12 metros por año con la consiguiente disminución de los caudales de producción.

Este estudio indica que la proyección de la capacidad de producción al año 2011 es de 550 l/s y al año 2013 sólo 340 l/s, teniendo en cuenta tanto la situación general del acuífero, como la situación particular de cada uno de los pozos. Las profundizaciones de los pozos, o su reemplazo por pozos nuevos han otorgado alivio a la situación en forma transitoria pero no significa seguridad en el futuro.

- **SISS 2010. Estudio determinación de tarifas 2010 – 2015 empresa Aguas Chañar S.A.**

Este trabajo fue desarrollado por la SISS para el estudio tarifario de la empresa Aguas Chañar que satisface de agua potable a Copiapó, Caldera y Chañaral. En este trabajo se analiza la capacidad de las fuentes de agua potable, considerando los que han quedado secos o han disminuido su producción, producto de la progresiva disminución de los niveles freáticos.

La importancia de este trabajo es que entrega información de pozos operativos de Aguas Chañar y la presencia de pozos fuera de uso.

- **Aguas Chañar 2011. Estudio hidrogeológico para precisar el límite entre el tercer y cuarto sector del acuífero de la cuenca del río Copiapó**

Este trabajo fue desarrollado por la empresa de hidrogeología GCF Consultores para Aguas Chañar. Este estudio tiene por objeto identificar y precisar el límite hidrogeológico entre el Sector 3 y Sector 4 del acuífero de Copiapó, debido a que los pozos pertenecientes a la planta Nantoco de Aguas Chañar de acuerdo a la delimitación DGA se encuentran en el Sector 4, sin embargo, el estudio original de Alamos y Peralta (1987) contiene estos pozos en un listado del Sector 3.

El origen de este trabajo, se basa en el interés de la empresa sanitaria de trasladar sus derechos hacia aguas arriba, debido a que los pozos de la planta Nantoco, se encontrarían profundizados hasta la roca y sin la presencia de aguas subterráneas. A la fecha del estudio, Aguas Chañar construyó pozos en el sector de Cerrillos, que tuvieron buen rendimiento.

Para precisar el límite, Aguas Chañar realizó un estudio de prospección geofísica gravimétrica, que interpretó con mayor precisión el alzamiento del basamento rocoso. Como resultado final de este trabajo, los pozos de la planta Nantoco se encontrarían en el Sector 4, aunque la propuesta de la geofísica de este estudio es que el límite se encontraría 600 m aguas abajo de la delimitación actual de la DGA.

- **Plan de Gestión Sanitaria 2011**

Este trabajo fue desarrollado por la SISS durante el periodo 2011, y tiene por finalidad caracterizar la gestión de cada empresa sanitaria en lo relativo a la satisfacción de la demanda de agua potable, tarifas, costos de producción, nivel de inversión, etc.

En lo relativo a Copiapó, presenta valiosa información de la empresa Sanitaria Aguas Chañar, con información de caudales de producción, pérdida de rendimiento de los pozos, medidas adoptadas para paliar la escasez y pérdidas por filtraciones de la red de agua potable.

- **CNR 2012**

Este trabajo fue desarrollado por la empresa Jorquera y Asociados para la comisión Nacional de Riego durante los años 2011-2012, con el fin de evaluar un proyecto de recarga artificial en el acuífero de Copiapó. A partir de los censos agrícolas y catastros frutícolas se ha estimado las demandas de los tipos de cultivos principales presentes en la cuenca, tales como uva de mesa, olivos hortalizas y granados entre otros, que han desarrollado la actividad agrícola de la cuenca. Complementariamente, se desarrolló un catastro del 80% de la demanda agrícola, identificado las hectáreas plantadas en los sectores 4 y 5 de Copiapó. En el catastro de 2011 de ODEPA, 88% lo constituyen los tres rubros de frutales predominantes, uva de mesa, olivos, granado, y un 12% las hortalizas según datos de la encuesta frutícola. Sin embargo la encuesta realizada en la consultoría indica una cantidad mucho menor de hortalizas.

De las 10.000 há regadas un 80% lo hacen con riego mecanizado de alta eficiencia, disminuyendo drásticamente la infiltración predial. El revestimiento de los canales matrices ha producido el mismo efecto. El río Copiapó en su lecho en épocas normales, solo lleva agua en un tramo del sector 3 entre Elisa de Bordos y Pabellón, con lo que el acuífero no ha dispuesto de esta recarga histórica.

A partir de la información hidrológica, se determinó potenciales excedentes de agua para recarga artificial, definiendo zonas ribereñas de los sectores 4 y 5 de Copiapó para el dimensionamiento de 124 ha totales de balsas de infiltración. Cada una de las alternativas de recarga artificial fueron evaluados utilizando el modelo Visual MODFLOW desarrollado por SERNAGEOMIN (2012).

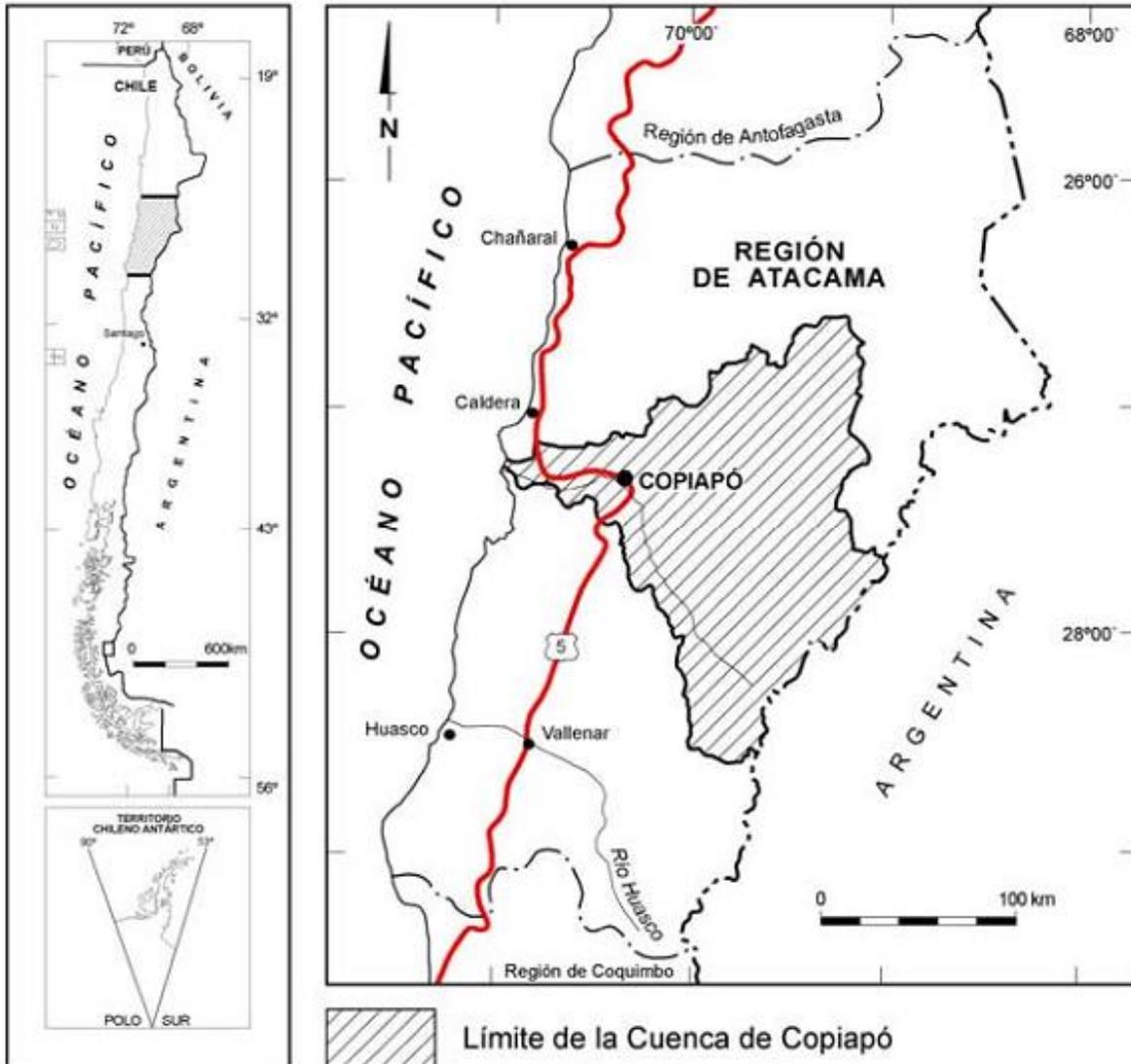
Una de las principales conclusiones de este estudio es que el acuífero del río Copiapó, es susceptible de ser recargado con aguas superficiales, provenientes del escurrimiento en épocas de crecidas, hasta por un volumen de 436 Mm<sup>3</sup>, adicionales a la recarga natural, considerando un período de retorno de 20 años.

### 3. CARACTERIZACION ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 Aspectos Generales

La cuenca del río Copiapó nace en la Cordillera de los Andes y desemboca al mar en el océano Pacífico, en el sector de Puerto Viejo, en la zona norte de Chile. Más exactamente, se encuentra ubicada entre los paralelos  $26^{\circ} 38'$  y  $28^{\circ} 38'$  de latitud sur y entre los meridianos  $70^{\circ} 55'$  y  $69^{\circ} 00'$  de longitud oeste. Tiene una extensión cubierta aproximada de  $18.400 \text{ km}^2$ . En la Figura 3.1 se presenta la zona de estudio.

**Figura 3.1**  
**Cuenca del Río Copiapó**



El río Copiapó, se forma al juntarse los ríos Pulido y Jorquera, en el sector de La Junta a 1230 m.s.n.m., recibiendo aguas abajo el aporte proveniente del río Manflas, el que accede desde del sur con un reducido caudal. Prácticamente estos ríos son los únicos que aportan caudales superficiales, lo que implica que sólo aproximadamente un tercio de la hoya hidrográfica es activa.

El río de mayor aporte es el Pulido, pese a que su hoya (2.100 km<sup>2</sup>) es aproximadamente la mitad que la del Jorquera (4.160 km<sup>2</sup>). Esto se debe a la existencia en las cabeceras de dos de los subafuentes del Pulido de sendos ventisqueros, en los ríos Del Potro y Montosa.

En general, el aporte de la quebrada Paipote, tanto superficial como subterráneo, es despreciable con respecto al aporte de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas. Esto debido a que la quebrada presenta un escurrimiento ocasional que, debido al tamaño de la cuenca, puede ser relevante en términos de tasas de escurrimiento en cortos intervalos de tiempo, pero en ningún caso lo es en términos de volúmenes totales de un periodo de tiempo importante. Además, no se aprecia un impacto de la quebrada en el comportamiento del nivel de pozos aguas arriba y aguas abajo, por lo que subterráneamente los flujos son imperceptibles en término de los niveles de agua en pozos de observación.

Una vez formado el río Copiapó en La Junta, su cauce toma un rumbo hacia el NNW hasta la confluencia de la quebrada de Paipote, con una longitud de 90 km. A partir de este punto, describe un arco suave hacia el NW para tomar, a la altura de la ciudad de Copiapó, un franco rumbo al W (CADE-IDEPE, 2004).

De acuerdo a la Minuta Técnica DGA N° 61 de 1997, y con el fin de realizar una mejor gestión de cuenca y explotar los recursos de manera sustentable, el valle del río Copiapó fue dividido en seis subsectores acuíferos, los que se presentan a continuación:

- Sector 1: Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro.
- Sector 2: Embalse Lautaro hasta la Puerta.
- Sector 3: La Puerta hasta Mal Paso.
- Sector 4: Mal Paso hasta Copiapó.
- Sector 5: Copiapó hasta Piedra Colgada.
- Sector 6: Piedra Colgada hasta Angostura.

En el presente capítulo se busca caracterizar el área de interés en lo referente a recursos hídricos y suelo, incluyendo descripciones e información más detallada en los siguientes temas:

- Clima
- Hidrología
- Marco Geológico (Geología de Superficie y Subsuperficie)
- Hidrogeología
- División Administrativa del Acuífero de Copiapó

## **3.2 Clima y Meteorología**

### **3.2.1 Aspectos Generales**

La Tercera Región de Atacama presenta climas desérticos pero el incremento de las precipitaciones hace que la condición de desierto no sea tan rigurosa, destacándose tres condiciones climáticas: una en el sector costero, con influencias marítimas, otra en la pampa intermedia y por último el sector cordillerano con incremento de las precipitaciones y régimen térmico frío.

### **3.2.2 Clima Desértico con Nublados Abundantes**

Está presente en todo el sector costero de la región y penetra hasta las proximidades de Copiapó y Vallenar, ya que el relieve no presenta barreras a la influencia marítima. Se caracteriza por abundante y densa nubosidad que se presenta durante la noche y disipa durante la mañana, a veces acompañada de intensas nieblas y lloviznas. Esto también define una alta cantidad de días nublados y pocos días despejados. La influencia oceánica produce un régimen térmico moderado con poca amplitud térmica tanto diaria como anual.

Las precipitaciones son mayormente de tipo frontal y aumentan de norte a sur. Por ejemplo en Chañaral se alcanzan 12 mm al año, en Caldera 27 mm y en el Totoral 32 mm. Estas precipitaciones ocurren casi exclusivamente en invierno.

### **3.2.3 Clima Desértico Marginal Bajo**

Este clima corresponde a la mayor parte de la región, cubriendo la zona que va desde donde comienzan las tierras altas de la cordillera hasta donde alcanza la influencia marítima intensa por el oeste. De Copiapó al norte es de una rigurosa sequedad, en cambio de Copiapó al sur, la inexistencia de la Cordillera de la Costa permite alguna forma de efecto marítimo en la humedad sin nubosidad, que atenúa las características desérticas.

La amplitud térmica es mucho mayor que en el litoral. La diferencia entre el mes más cálido y el más frío es de 7°C a 8°C en Copiapó y Vallenar mientras que se estima inferior a 6°C en la zona costera. Mucho mayor es la amplitud térmica diaria que alcanza del orden de 13°C a 15°C, lo que es una buena muestra de la continentalidad.

Las zonas con este clima se ubican bajo el nivel de la inversión de temperatura, con temperaturas moderadas y humedad suficiente para permitir la generación de algún tipo de vegetación de estepa en los sectores bajos.

Las precipitaciones aumentan con la latitud y con la altura, concentrándose en los meses de invierno. Los totales anuales llegan a 12 mm en Copiapó (291 m.s.n.m.), 19 mm en El Salvador (2.400 m.s.n.m.), 32 mm en Vallenar (470 m.s.n.m.) y 34 mm en Los Loros (948 m.s.n.m.).

### **3.2.4 Clima Desértico Marginal de Altura**

Se manifiesta sobre los 2.000 m de altura. El régimen térmico es más frío pero las oscilaciones térmicas son menores que en el desierto marginal bajo, debido a la altura. La humedad relativa es baja, los cielos son predominantemente despejados, diáfanos y limpios, lo que motivó la instalación del observatorio astronómico de Las Campanas.

Las precipitaciones son más abundantes en este clima y se producen casi exclusivamente en los meses de invierno, de mayo a agosto. Estas son de origen frontal y muchas veces son nivosas.

Las temperaturas bajas y las apreciables cantidades de nieve en el invierno hacen que la línea de nieves eternas se ubique entre los 5.000 y 6.000 m.s.n.m., por lo que a los más altos picachos de la cordillera de la región, localmente se les denomine "nevados", como el Incahuasi, Tres Cruces, Ojos del Salado, etc. (Dirección Meteorológica de Chile).

### **3.3 Marco Hidrológico**

#### **3.3.1 Aspectos Generales**

En esta sección se presentan los antecedentes necesarios para entender y cuantificar el comportamiento de los recursos hídricos superficiales de la cuenca del río Copiapó. Para ello se ha recopilado información tanto pluviométrica como fluviométrica, así como los parámetros meteorológicos que permiten determinar la evaporación en la zona de estudio.

La información presentada en esta sección corresponde a la integración de la información recopilada en los diversos estudios realizados en la zona, los cuales fueron descritos brevemente en la revisión de antecedentes.

Además, se presenta en forma resumida el desarrollo de las principales variables consideradas para la realización del balance hídrico de la cuenca, desde el punto de vista hidrológico. Las variables meteorológicas consideradas son la precipitación, evaporación, temperatura y escorrentía, las cuales se presentan a nivel mensual y promedio anual.

Acorde a lo anterior la presente sección se desarrolla de la siguiente forma:

- Pluviometría
- Fluviometría
- Evaporación y Temperatura

#### **3.3.2 Pluviometría**

La información pluviométrica disponible para el desarrollo del presente informe corresponde a la de 13 estaciones de monitoreo que se detallan en la Tabla 3.1. En la Figura 3.2 se presenta un mapa con la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

**Tabla 3.1**  
**Grupos de Estaciones Meteorológicas**

Nº	Estación Meteorológica	Código	UTM WGS84		Altitud
		BNA	Este	Norte	m.s.n.m.
P1	Caldera	03340001-2	319.889	7.004.743	15
P2	Canto de Agua	03701001-4	324.832	6.890.108	330
P3	Conay Albaricoque	03802006-4	391.477	6.796.399	1.600
P4	Copiapó	03450004-5	367.723	6.971.879	385
P5	El Totoral	03604001-7	307.153	6.911.671	150
P6	Elabor Campamento	03431004-1	381.881	6.933.193	750
P7	Hacienda Manflas	03421004-7	404.408	6.887.808	1.410
P8	Iglesia Colorada	03414002-2	413.312	6.884.641	1.550
P9	Jorquera en la Guardia	03404002-8	425.947	6.920.575	2.000
P10	Las Vegas	03210001-5	431.750	7.048.466	2.250
P11	Embalse Lautaro	03430006-2	401.647	6.904.993	1.110
P12	Los Loros	03430007-0	389.976	6.920.933	940
P13	Pastos Grandes	03441001-1	443.897	7.000.375	2.260

Fuente: DICTUC (2010)

La información original de precipitación fue procesada por DICTUC (2010), con lo cual se generó un conjunto de datos actualizados, los que fueron utilizados para caracterizar la distribución regional de precipitación. Los datos de precipitación media rellenados para las diferentes estaciones estudiadas se presentan en la Tabla 3.2, junto con ellos se muestran los datos de precipitación media anual.

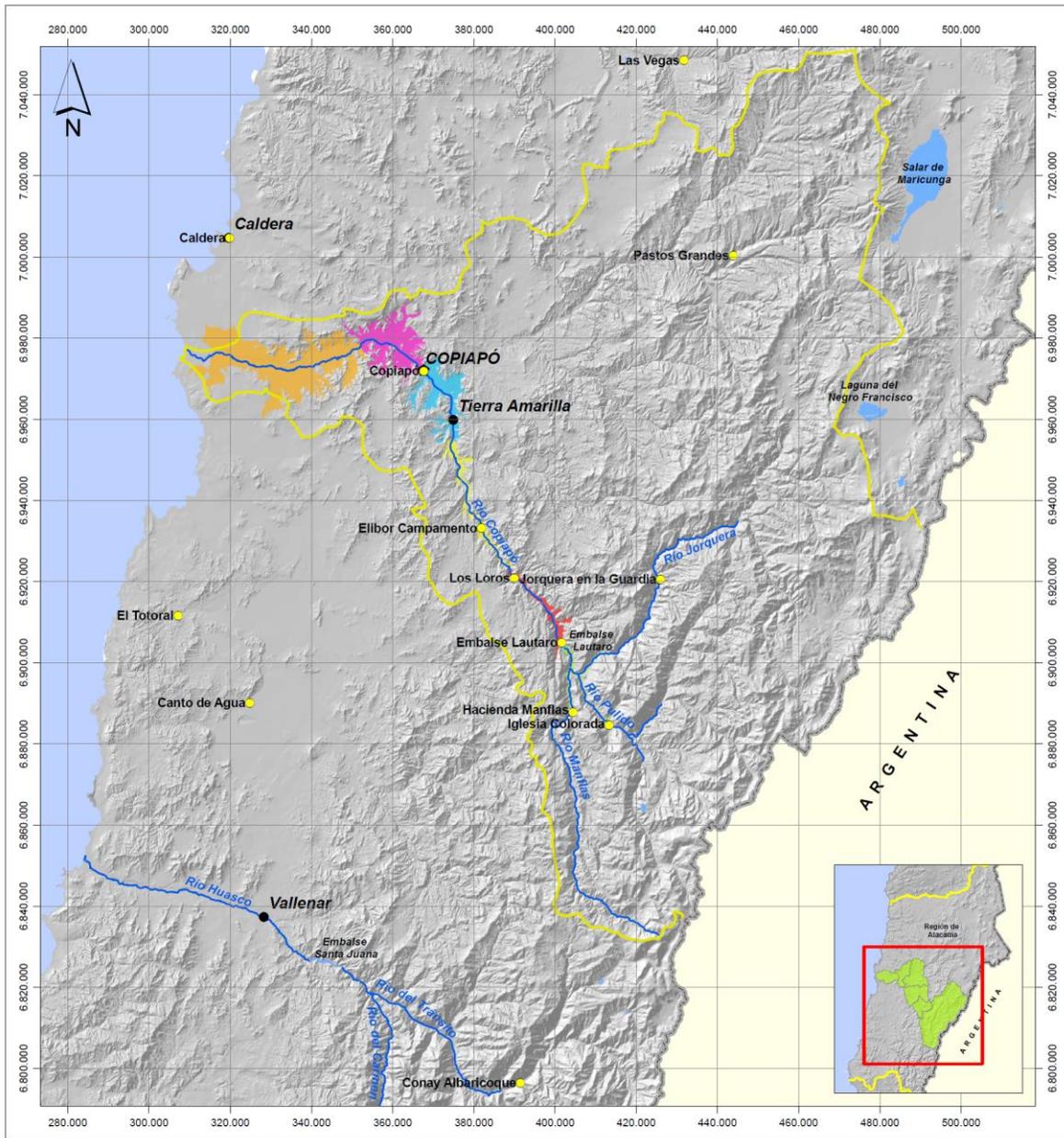
**Tabla 3.2**  
**Precipitación Media en Estaciones Rellenadas**

Estación	Altitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Nº	m.s.n.m.	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
P1	15	0,0	0,0	0,8	0,4	1,3	5,3	4,9	5,1	0,5	0,0	0,0	0,0	17,6
P2	330	0,2	0,0	0,4	1,2	3,1	9,7	8,8	6,6	0,4	0,4	0,0	0,2	30,6
P3	1.600	0,1	1,8	2,6	3,1	8,5	26,1	19,8	14	0,5	0,0	0,8	1,0	64,8
P4	385	0,0	0,0	1,1	0,2	1,4	6,0	4,3	3,8	0,2	0,0	0,0	0,1	17,6
P5	150	0,2	0,0	0,7	0,9	3,0	10,1	7,6	5,0	0,3	0,3	0,0	0,0	28,9
P6	750	0,0	0,0	1,0	0,6	2,6	9,1	7,5	5,9	0,4	0,1	0,0	0,0	27,7
P7	1.410	0,2	0,2	1,9	2,9	4,8	13,3	10,2	10,3	1,0	0,6	0,0	0,1	44,7
P8	1.550	0,2	0,2	1,5	4,0	6,0	12,2	10,9	9,5	1,4	0,8	0,0	0,3	50,4
P9	2.000	0,2	1,4	3,2	3,5	6,4	13,3	7,3	7,6	2,8	1,3	0,1	0,3	47,9
P10	2.250	0,0	1,0	2,9	0,8	5,7	6,6	26,4	4,5	0,8	0,2	0,0	0,0	49,4
P11	1.110	0,3	0,4	2,7	2,4	4,2	8,9	8,1	8,8	1,5	0,3	0,2	0,2	36,8
P12	940	0,0	0,0	1,2	1,4	2,8	10,5	9,3	8,1	0,9	0,1	0,0	0,1	35,6
P13	2.260	0,0	1,6	3,2	1,8	3,4	8,9	9,8	4,8	2,3	0,7	0,0	0,2	36,3

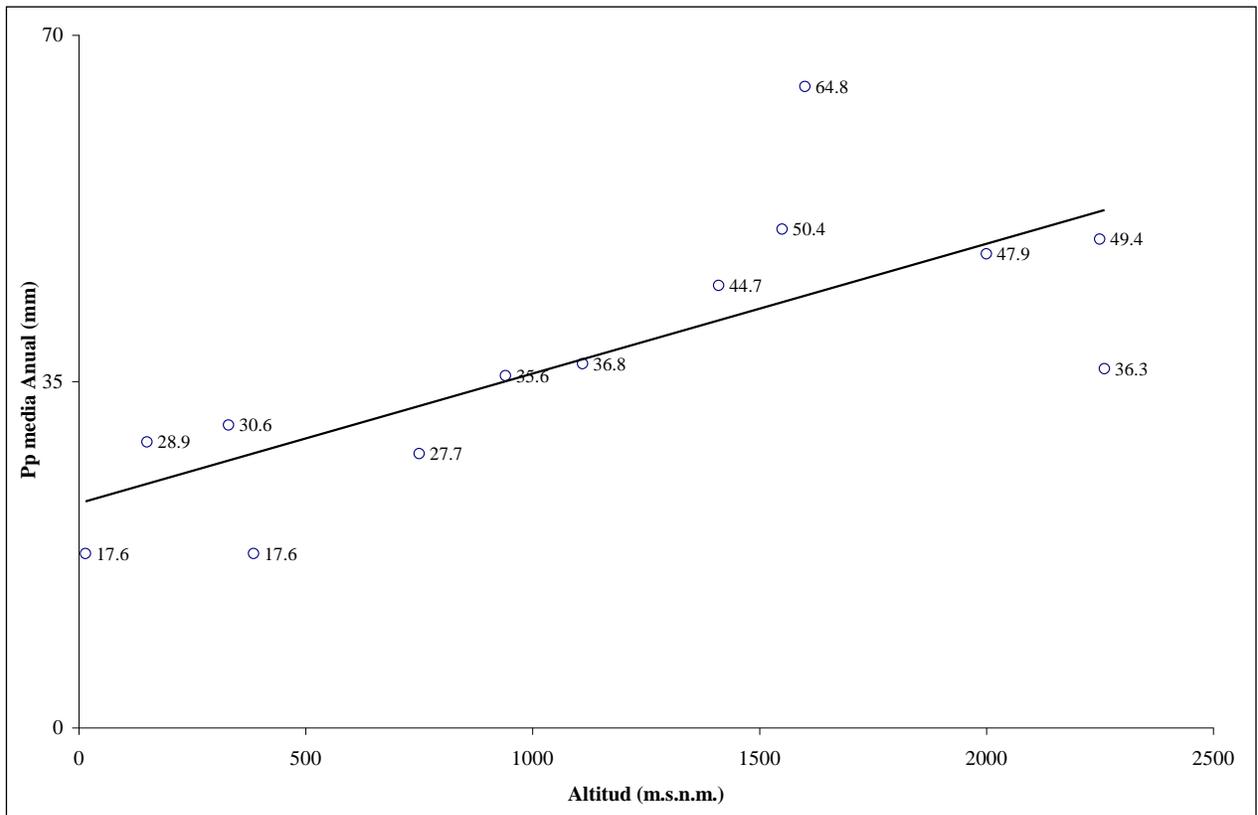
Fuente: DICTUC (2010)

La información anterior fue utilizada por DICTUC (2010) para obtener el gradiente de precipitación media anual, lo que se muestra en la Figura 3.3. En esta figura es posible observar el gradiente de precipitación media anual, donde claramente se observa un aumento de las precipitaciones con la altura; en promedio es posible estimar este aumento en 1 mm cada 70 metros de altitud. En base a este gradiente, se preparó un mapa de isoyetas característico para las zonas altas de la cuenca en estudio, el cual se presenta en la Figura 3.4.

**Figura 3.2**  
**Ubicación Estaciones Meteorológicas**

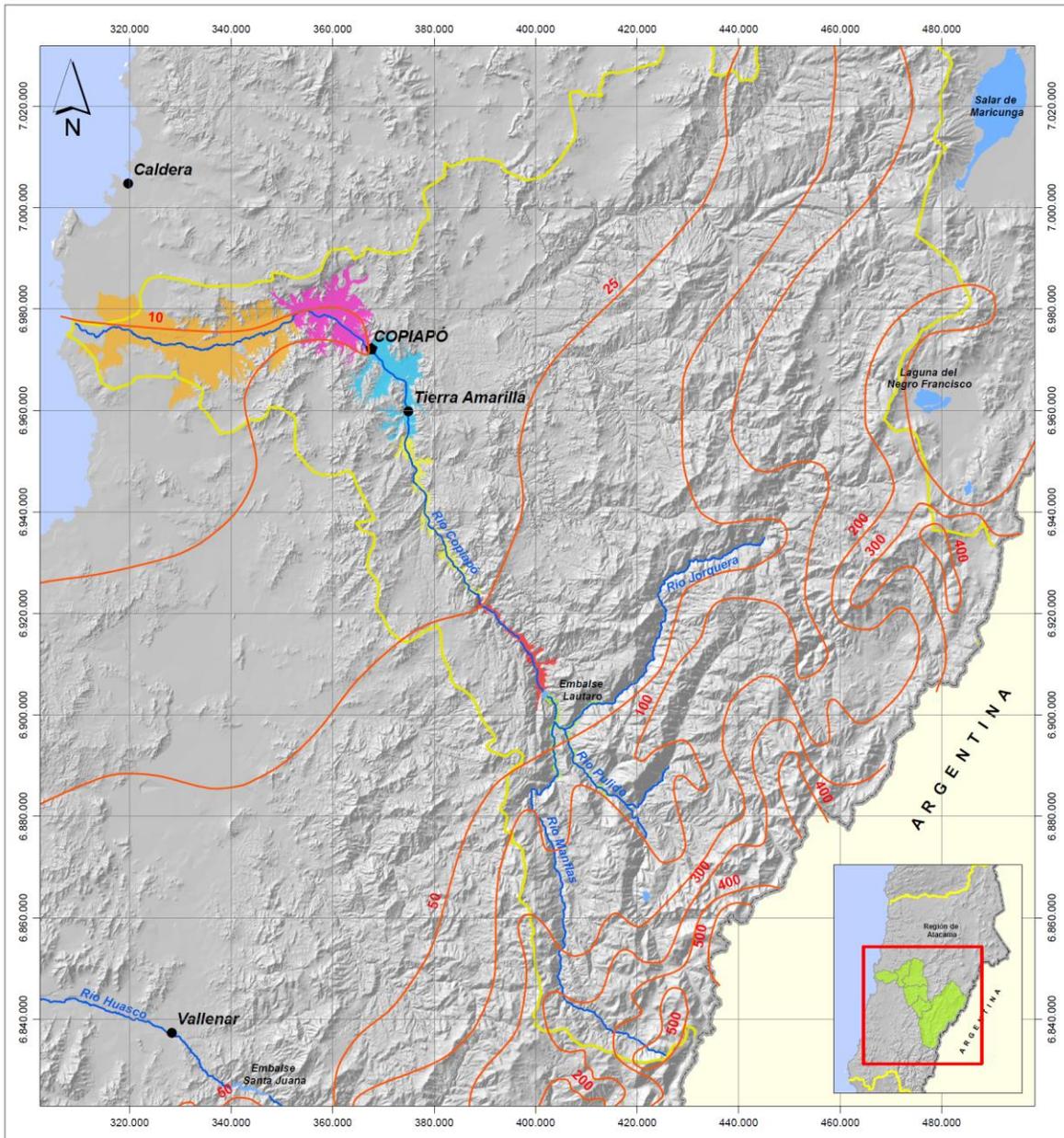


**Figura 3.3**  
**Gradiente Pluviométrico**



Fuente: DICTUC (2010)

**Figura 3.4**  
**Mapa de Isoyetas**



El trazado de las líneas de isoprecipitación media anual se realizó a través de una interpolación de valores de precipitaciones medias anuales para el año hidrológico de las estaciones analizadas, el que fue corregido por la topografía de la zona en función de los gradientes de precipitación calculados y teniendo como antecedentes generales las isoyetas trazadas en el Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987).

### 3.3.3 Fluviometría

#### 3.3.3.1 Caracterización Fluvial del Río Copiapó

Para caracterizar el régimen fluvial del río Copiapó se ha utilizado la información correspondiente a las estaciones presentadas en la Tabla 3.3. La información recabada en estas estaciones permite caracterizar los principales afluentes al Copiapó, así como determinar el régimen fluvial de la parte alta, media y baja del río Copiapó.

**Tabla 3.3**  
**Grupos de Estaciones Fluviométricas**

Régimen	Nombre Estación	Coordenadas UTM		COTA
		Norte	Este	m.s.n.m.
Nival	Río Pulido en Vertedero	6.892.980	407.600	1.310
	Río Manflas en Vertedero	6.885.893	402.510	1.550
	Río Copiapó en Pastillo	6.902.323	404.151	1.300
	Río Copiapó en Lautaro	6.905.180	401.850	1.200
Nivo-Pluvial	Río Jorquera en Vertedero	6.897.739	406.060	1.250
	Río Copiapó en La Puerta	6.924.018	389.168	758
	Río Copiapó en Mal Paso	6.955.767	375.167	431
	Río Copiapó en Ciudad de Copiapó	6.972.680	367.579	380

Fuente: Golder (2006)

El régimen del río Copiapó es mixto, ya que se puede apreciar una superposición de distintos regímenes. En sus afluentes de cabecera se observan regímenes nivales y mixtos, mientras que en el cauce principal se observa régimen nival en su parte alta, para luego adoptar las características de régimen mixto. Para el análisis fluvial de esta cuenca se han considerado dos grupos de estaciones, el primero corresponde a un régimen nival, el cual contiene cuatro estaciones, y el segundo reúne las estaciones con régimen mixto.

- **Grupo 1, Régimen Nival:** Este grupo lo conforman cuatro estaciones fluviométricas, Río Manflas en vertedero, Río Pulido en Vertedero, Río Copiapó en Pastillo y Río Copiapó en Lautaro. En estas estaciones los mayores caudales ocurren en los meses de primavera y verano, producto de los deshielos.
- **Grupo 2, Régimen Mixto:** Este régimen es una superposición de los regímenes nival y pluvial, sin mostrar una clara superioridad de uno sobre el otro. Este régimen se observa en la parte baja del río Copiapó y en uno de sus afluentes, el río Jorquera. Cuatro estaciones conforman este grupo; Río Jorquera en Vertedero, Río Copiapó en La Puerta, Río Copiapó en Mal Paso y Río Copiapó en Ciudad de Copiapó.

#### 3.3.3.2 Régimen Hidrológico por Subcuenca

A partir de las curvas de variación estacional correspondientes a cada estación fluviométrica, se presenta a continuación una caracterización del régimen por subcuenca, especificando el período de estiaje de cada una.

#### **a) Subcuenca del Manflas**

Corresponde al área drenada por el río Manflas, desde su nacimiento en la cordillera de Los Andes hasta su junta con el río Copiapó. Se observa un régimen nival, con los mayores caudales entre noviembre y enero en años húmedos, producto de los deshielos. En años secos los caudales se distribuyen de manera más homogénea, sin mostrar variaciones importantes. El período de estiaje ocurre en el trimestre dado por los meses de mayo, junio y julio.

#### **b) Subcuenca del Pulido**

Corresponde al área drenada por el río Pulido, desde su nacimiento en la cordillera de Los Andes hasta su junta con el río Jorquera, dando origen al río Copiapó. Muestra un régimen nival, con sus mayores caudales entre diciembre y febrero en años húmedos, producto de deshielos tardíos. En años secos los caudales se presentan sin grandes variaciones a lo largo del año, sin embargo se aprecian leves aumentos entre enero y marzo. El período de estiaje ocurre en el trimestre dado por los meses de agosto, septiembre y octubre.

#### **c) Subcuenca del Jorquera**

Corresponde al área drenada por el río Jorquera, desde su nacimiento en la junta de los ríos Figueroa y Turbio hasta su junta con el río Pulido, dando origen al Copiapó. Muestra un régimen mixto, ya que los caudales se muestran bastante parejos durante el año. En años muy húmedos los mayores caudales ocurren entre diciembre y febrero, sin embargo en años normales y secos los menores caudales ocurren en ese período, de manera que el período de estiaje se define en el trimestre dado por los meses de diciembre, enero y febrero.

#### **d) Subcuenca alta del Copiapó**

Es la hoya hidrográfica de la parte alta del río Copiapó, desde su origen en la junta de los ríos Pulido y Jorquera hasta aguas arriba de la estación fluviométrica Copiapó en La Puerta. Muestra un régimen nival, con sus mayores caudales entre diciembre y marzo en años húmedos y normales. En años secos se observan caudales similares durante todo el año. El período de estiaje ocurre en el trimestre dado por los meses de junio, julio y agosto.

#### **e) Subcuenca media del Copiapó**

Corresponde al área drenada por la parte media del río Copiapó, desde la estación fluviométrica Copiapó en La Puerta hasta aguas arriba de la estación Copiapó en Ciudad de Copiapó. Muestra un régimen mixto, con importantes aportes pluviales y nivales. En años húmedos se observan mayores aportes nivales, mientras que en años normales y secos los caudales no muestran variaciones importantes. El período de estiaje ocurre en el trimestre dado por los meses de agosto, septiembre y octubre.

#### **f) Subcuenca baja del Copiapó**

Es la hoya hidrográfica de la parte baja del río Copiapó, desde la estación fluviométrica Copiapó en Ciudad de Copiapó hasta su desembocadura en el océano Pacífico. Muestra un régimen mixto, con importantes caudales en invierno y verano en años muy húmedos. Sin embargo, en años normales y secos la influencia nival disminuye notablemente producto del uso de agua para el riego de zonas agrícolas emplazadas en las laderas del río, de manera que se presentan los menores caudales en ese período, entre diciembre y febrero.

A continuación se presenta la Tabla 3.4, la que muestra un resumen con los períodos de estiaje para las distintas subcuencas de la cuenca del río Copiapó.

**Tabla 3.4**  
**Períodos de Estiaje para Subcuencas de la Cuenca del Río Copiapó**

Cuenca	Subcuenca	Período Estiaje
Manflas	Manflas	Mayo – Junio – Julio
Pulido	Pulido	Agosto – Septiembre – Octubre
Jorquera	Jorquera	Diciembre – Enero – Febrero
Copiapó	Alta	Junio – Julio – Agosto
	Media	Agosto – Septiembre – Octubre
	Baja	Diciembre – Enero – Febrero

Fuente: CADE-IDEPE (2004)

### 3.3.3.3 Cuantificación de los Caudales en Diferentes Estaciones Fluviométricas en la Cuenca

El régimen de escurrimiento del río Copiapó es permanente desde su nacimiento en La Junta hasta Copiapó, aunque su caudal presenta variaciones debido a las demandas de riego y a la conexión río acuífero existente, razón por la cual su caudal disminuye cuando se extrae una parte para consumo o se infiltra naturalmente, y aumenta cuando se producen afloramientos, como se observa en el sector de La Puerta.

Con el fin de cuantificar de mejor manera el flujo superficial, especialmente en la cuenca media, se agrega un grupo de estaciones complementarias, las que se presentan en conjunto con las anteriores en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5**  
**Estaciones Fluviométricas Utilizadas para la Cuantificación del Caudal Superficial**

Nº	Estación Fluviométrica	Código	UTM WGS84	
		BNA	Este	Norte
F1	Río Copiapó en Angostura	03340001-2	317.937	6.976.386
F2	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	03701001-4	374.492	6.954.377
F3	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Abajo Canal	03802006-4	374.894	6.955.304
F4	Río Copiapó en ciudad de Copiapó	03450004-5	367.359	6.972.122
F5	Río Copiapó en Lautaro	03604001-7	401.673	6.904.738
F6	Río Copiapó en Pastillo	03431004-1	403.963	6.901.926
F7	Río Copiapó en La Puerta	03421004-7	388.794	6.923.493
F8	Río Copiapó en San Antonio	03414002-2	394.793	6.916.652
F9	Río Jorquera en Vertedero	03404002-8	405.776	6.897.200
F10	Canal Mal Paso después de Bocatoma	03210001-5	374.920	6.955.458
F11	Río Manflas en Vertedero	03430006-2	402.212	6.885.569
F12	Río Pulido en Vertedero	03430007-0	407.369	6.892.473

Fuente: DICTUC (2010)

La Figura 3.5 muestra la ubicación de todas las estaciones fluviométricas utilizadas. En la Tabla 3.6 se presentan la superficie aportante y el gasto medio anual de cada una de las 12 estaciones fluviométricas consideradas. Es necesario mencionar que los gastos registrados corresponden a los caudales medios en

condiciones no naturales o de sobre-explotación, por lo que los caudales registrados en los sectores más bajos de la cuenca se ven seriamente afectados.

En la Tabla 3.7 se puede apreciar la distribución mensual del caudal superficial en las estaciones seleccionadas para el año hidrológico (Abril – Marzo), mientras que en la Figura 3.6 se presentan de manera gráfica.

**Tabla 3.6**  
**Caudal Medio Anual en las Estaciones Fluviométricas**

Nº	Estación Fluviométrica	Superficie de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Caudal medio (l/s)
F1	Río Copiapó en Angostura	18.420	441
F2	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	10.151	1.065
F3	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Abajo Canal	10.157	985
F4	Río Copiapó en ciudad de Copiapó	17.122	1.933
F5	Río Copiapó en Lautaro	7.478	1.292
F6	Río Copiapó en Pastillo	7.454	1.792
F7	Río Copiapó en La Puerta	8.333	2.405
F8	Río Copiapó en San Antonio	7.809	1.500
F9	Río Jorquera en Vertedero	4.207	722
F10	Canal Mal Paso después de Bocatoma	10.157	722
F11	Río Manflas en Vertedero	981	455
F12	Río Pulido en Vertedero	2.023	1.432

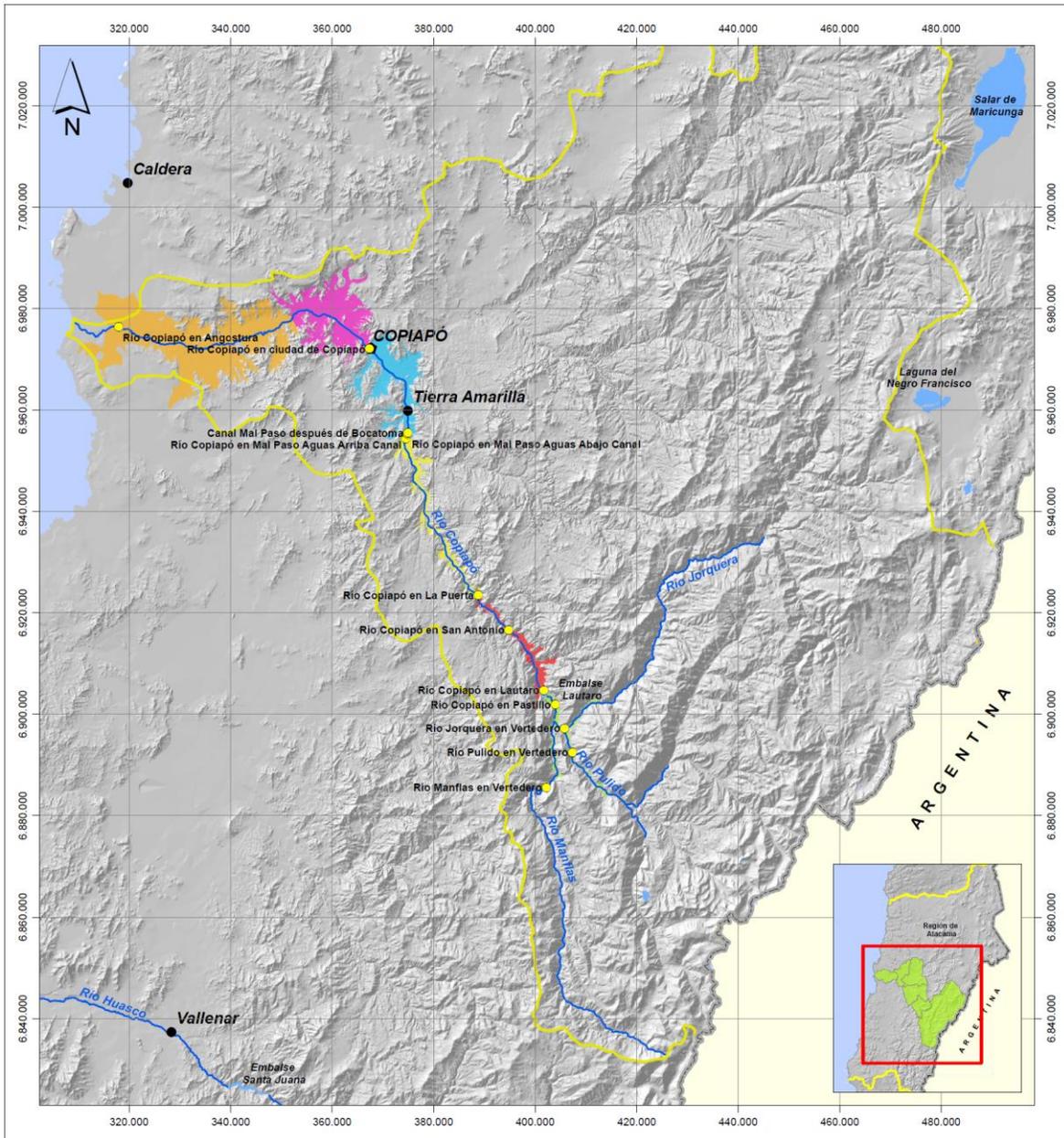
Fuente: DICTUC (2010)

**Tabla 3.7**  
**Caudal Medio Mensual en las Estaciones Fluviométricas m<sup>3</sup>/s**

Estación Nº	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
F1	0,42	0,50	0,53	0,49	0,41	0,30	0,26	0,26	0,49	0,67	0,55	0,46
F2	1,21	1,23	1,30	1,16	1,03	1,05	1,08	1,11	1,45	1,80	1,20	1,22
F3	0,84	1,35	1,46	0,86	1,21	0,67	0,36	0,26	0,30	1,15	1,24	0,77
F4	1,33	1,45	1,44	1,58	1,27	1,02	1,05	0,95	1,78	2,34	1,88	1,62
F5	1,24	1,15	1,00	0,94	1,06	1,19	1,31	1,53	1,51	1,80	1,77	1,55
F6	1,84	1,92	2,01	2,00	2,06	1,92	1,87	1,91	2,48	2,80	2,48	1,94
F7	2,31	2,26	2,22	2,08	2,09	2,09	2,11	2,21	2,60	2,93	2,91	2,57
F8	1,45	1,29	1,33	1,26	1,28	1,50	1,77	2,12	2,78	2,99	1,75	1,66
F9	0,67	0,72	0,77	0,76	0,79	0,78	0,71	0,71	0,79	0,72	0,69	0,64
F10	0,80	0,85	0,75	0,68	0,67	0,64	0,66	0,68	0,76	0,74	0,74	0,78
F11	0,41	0,42	0,46	0,46	0,46	0,45	0,55	0,67	0,61	0,62	0,59	0,45
F12	1,47	1,33	1,24	1,16	1,07	0,97	0,93	1,11	1,91	2,70	2,30	1,74

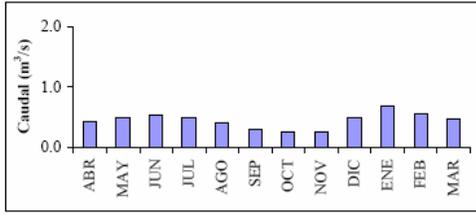
Fuente: DICTUC (2010)

**Figura 3.5**  
**Ubicación Estaciones Fluviométricas**

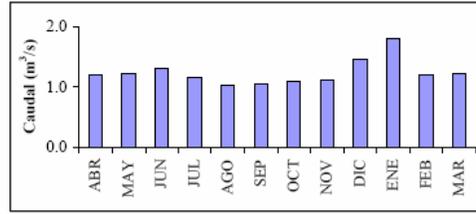


**Figura 3.6**  
**Curvas de Variación Estacional**

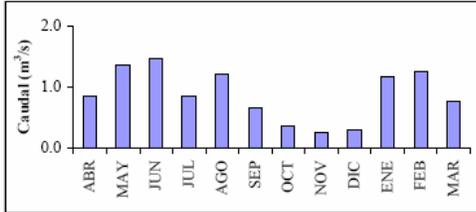
1. Río Copiapó en Angostura



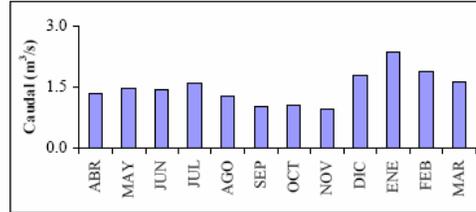
2. Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal



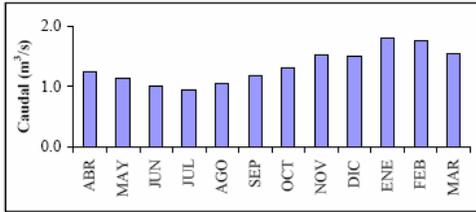
3. Río Copiapó en Mal Paso Aguas Abajo Canal



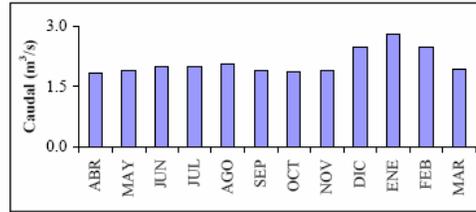
4. Río Copiapó en ciudad de Copiapó



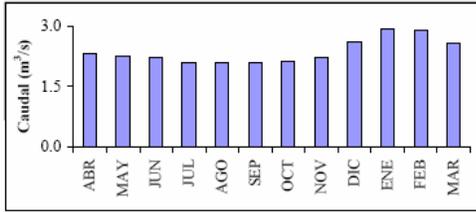
5. Río Copiapó en Lautaro



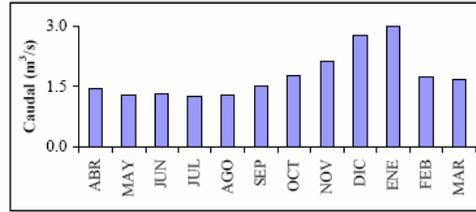
6. Río Copiapó en Pastillo



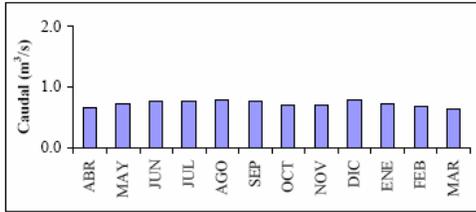
7. Río Copiapó en La Puerta



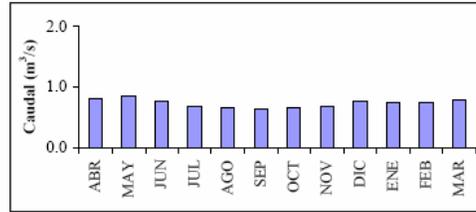
8. Río Copiapó en San Antonio



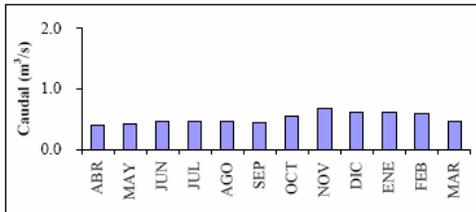
9. Río Jorquera en Vertedero



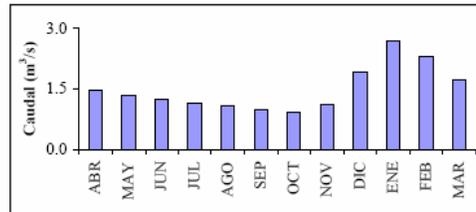
10. Canal Mal Paso después de Bocatomá



11. Río Manflas en Vertedero



12. Río Pulido en Vertedero



Fuente: DICTUC (2010)

Al observar la Figura 3.6 es posible observar lo siguiente:

- En general el río Copiapó experimenta su mayor crecida en el mes de Enero, debido principalmente a los deshielos provenientes de la cuenca del río Pulido.
- El sector en que se aprecia mayor cantidad de agua superficial es el sector de La Puerta, donde se producen los afloramientos de la mayor parte de las aguas subterráneas. Esto hace que este punto sea un excelente punto de control para determinar la disponibilidad total de agua en la cuenca.
- Al comparar los gráficos de Copiapó en La Puerta y Copiapó en Angostura, se observa un consumo medio de agua superficial cercano a los 1,92 m<sup>3</sup>/s, con un máximo de 2,36 m<sup>3</sup>/s para el mes de Febrero.

### 3.3.4 Evaporación y Temperatura

Existe información registrada de temperaturas medias mensuales y evaporación media mensual en seis estaciones meteorológicas, cuatro de las cuales se ubican dentro de la cuenca, mientras que las dos restantes se encuentran cercanas al límite sur de la misma. En la Figura 3.7 es posible apreciar la distribución espacial de las estaciones, mientras que sus coordenadas geográficas y altitud se presentan en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8**  
**Ubicación de las Estaciones de Temperatura y Evaporación**

Nº	Estación	Altitud	UTM WGS84	
		m.s.n.m.	Este	Norte
1	Canto de Agua	330	324.832	6.890.108
2	Conay Albaricoque	1.600	391.477	6.796.399
3	Copiapó	385	367.723	6.971.879
4	Iglesia Colorada	1.550	413.312	6.884.641
5	Embalse Lautaro	1.110	401.647	6.904.993
6	Los Loros	940	389.976	6.920.933

Fuente: DICTUC (2010)

Las temperaturas medias anuales registradas en las diferentes estaciones no presentan gran variación, la máxima se registra en la estación Embalse Lautaro, mientras que la mínima se presenta en la ciudad de Copiapó. De acuerdo a los registros de temperatura para los valores medios mensuales, las mayores temperaturas se registran en los meses de Enero y Febrero, en tanto las mínimas se observan para Junio y Julio. En la Tabla 3.9 es posible observar los valores medios mensuales y medio anual para las diferentes estaciones.

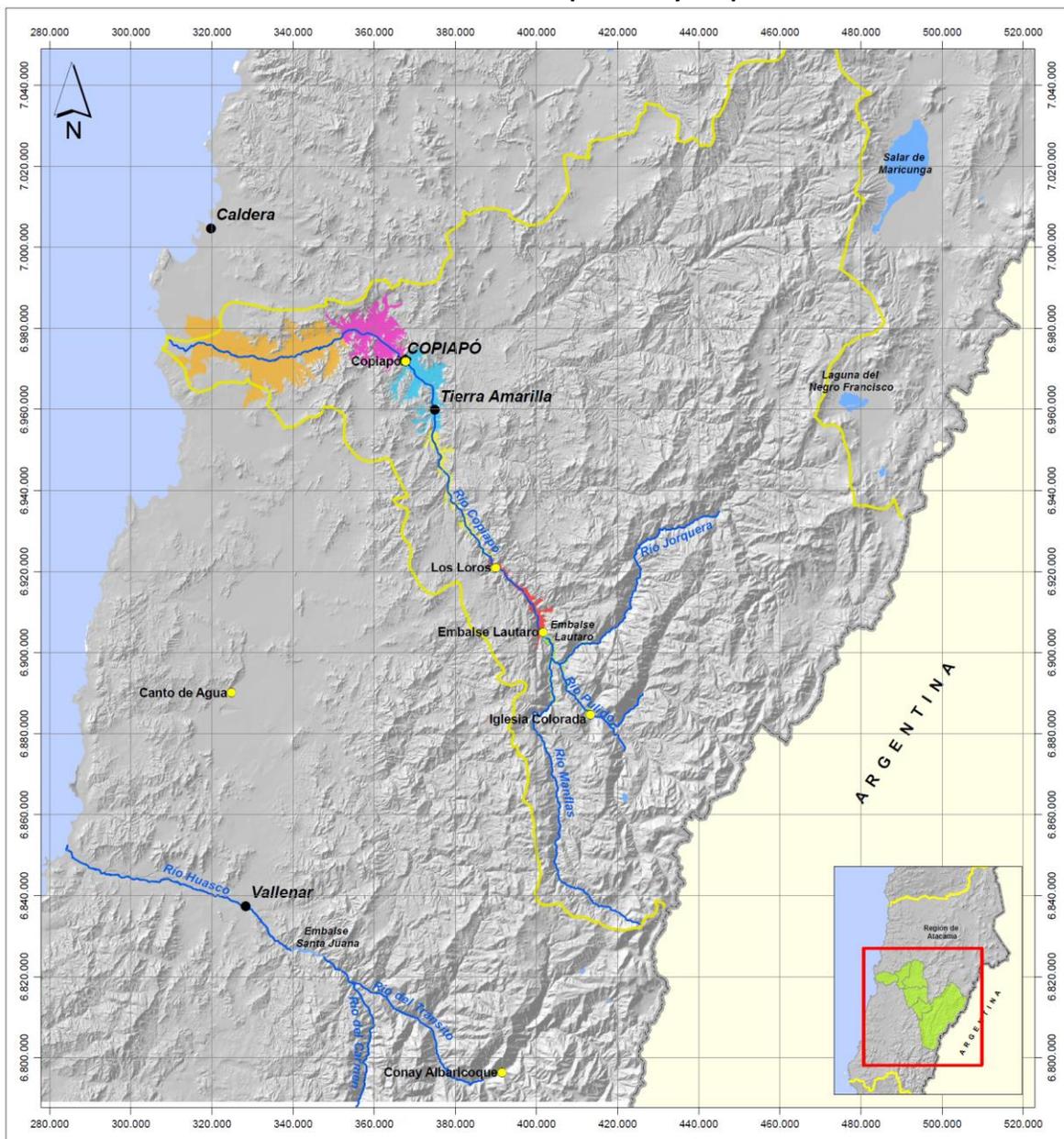
La Tabla 3.10 muestra los valores medios de evaporación mensual en las estaciones de monitoreo. En consecuencia con las altas temperaturas observadas en la región, los valores medios mensuales de evaporación son muy altos, superando con creces los pequeños valores asociados a las precipitaciones medias mensuales. Esto quiere decir que prácticamente el total del agua precipitada en la parte media y baja de la Cuenca, retorna rápidamente a la atmósfera. Este hecho es consecuente con el mapa de líneas de igual precipitación y evaporación del Balance Hídrico de Chile, el cual se presenta en la Figura 3.8.

**Tabla 3.9**  
**Temperatura Media Mensual (°C)**

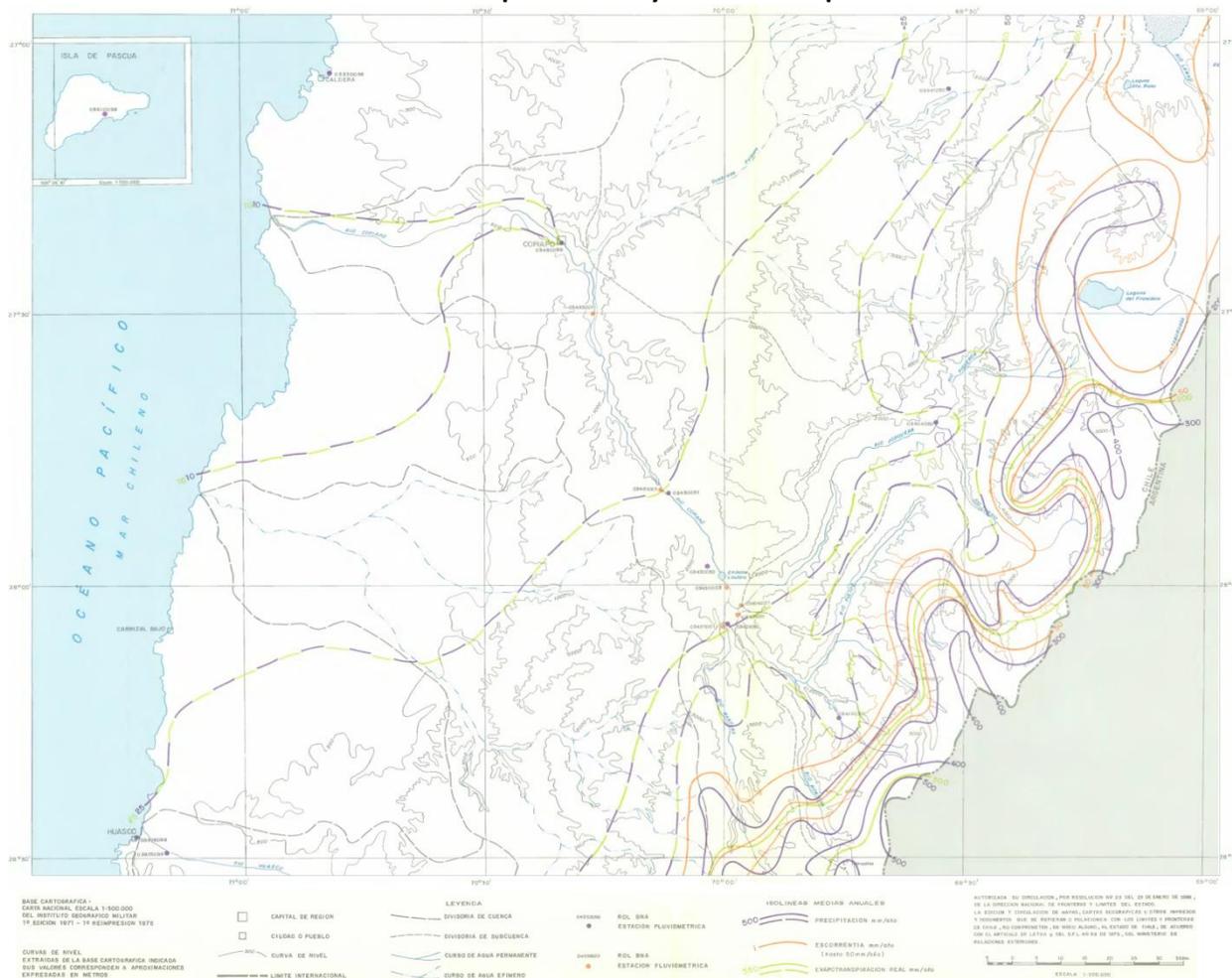
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Canto de Agua	20,5	20,3	19,7	17,4	15,1	13,1	12,9	14,2	15,5	16,5	18,0	19,3	16,9
Conay Albaricoque	20,5	20,3	19,4	17,1	15,1	13,9	13,7	14,9	15,8	17,4	18,6	19,9	17,2
Copiapó	20,4	20,4	19,5	17,3	15,1	13,4	12,5	14,0	15,1	16,3	17,5	19,1	16,7
Iglesia Colorada	20,9	21,2	20,3	19,1	17,0	16,0	15,7	16,3	17,0	18,9	19,6	20,7	18,6
Embalse Lautaro	22,1	22,0	21,5	19,7	18,0	16,6	16,7	17,7	18,3	19,7	20,7	21,6	19,6
Los Loros	21,6	20,9	20,1	17,9	16,0	15,4	14,8	15,9	16,5	18,1	19,7	20,6	18,1
<b>Promedio</b>	<b>21,0</b>	<b>20,9</b>	<b>20,1</b>	<b>18,1</b>	<b>16,1</b>	<b>14,7</b>	<b>14,4</b>	<b>15,5</b>	<b>16,4</b>	<b>17,8</b>	<b>19,0</b>	<b>20,2</b>	<b>17,8</b>

Fuente: DICTUC (2010)

**Figura 3.7**  
**Ubicación Estaciones de Temperatura y Evaporación**



**Figura 3.8**  
**Distribución Espacial de Isoyetas e Iso Evaporación**



Fuente: Balance Hídrico DGA (1987)

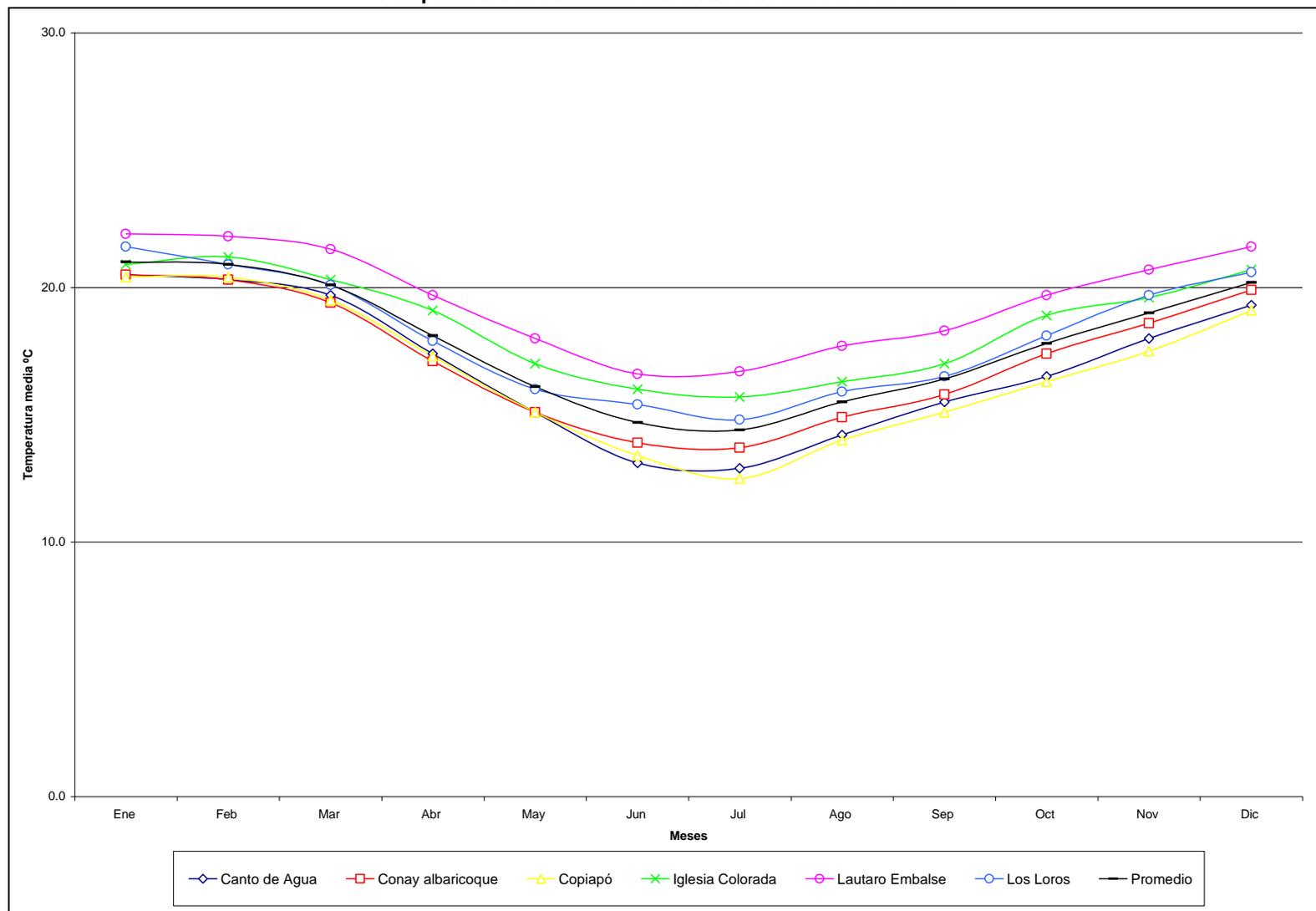
**Tabla 3.10**  
**Evaporación Media Mensual (mm.)**

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Canto de Agua	195,3	179,2	176,7	141,0	89,9	60,0	65,1	71,3	93,0	124,0	138,0	161,2
Conay Albaricoque	325,5	291,2	294,5	249,0	217,0	189,0	192,2	217,0	222,0	285,2	306,0	337,9
Copiapó	217,0	190,4	173,6	123,0	89,9	84,0	77,5	102,3	132,0	139,5	165,0	186,0
Iglesia Colorada	399,9	364,0	365,8	306,0	269,7	267,0	251,1	291,4	300,0	353,4	381,0	412,3
Embalse Lautaro	325,5	282,8	269,7	204,0	173,6	150,0	158,1	195,3	219,0	272,8	297,0	325,5
Los Loros	350,3	299,6	285,2	213,0	164,3	135,0	145,7	170,5	210,0	279,0	312,0	344,1
<b>Promedio</b>	<b>302,3</b>	<b>267,9</b>	<b>260,9</b>	<b>206,0</b>	<b>167,4</b>	<b>147,5</b>	<b>148,3</b>	<b>174,6</b>	<b>196,0</b>	<b>242,3</b>	<b>266,5</b>	<b>294,5</b>

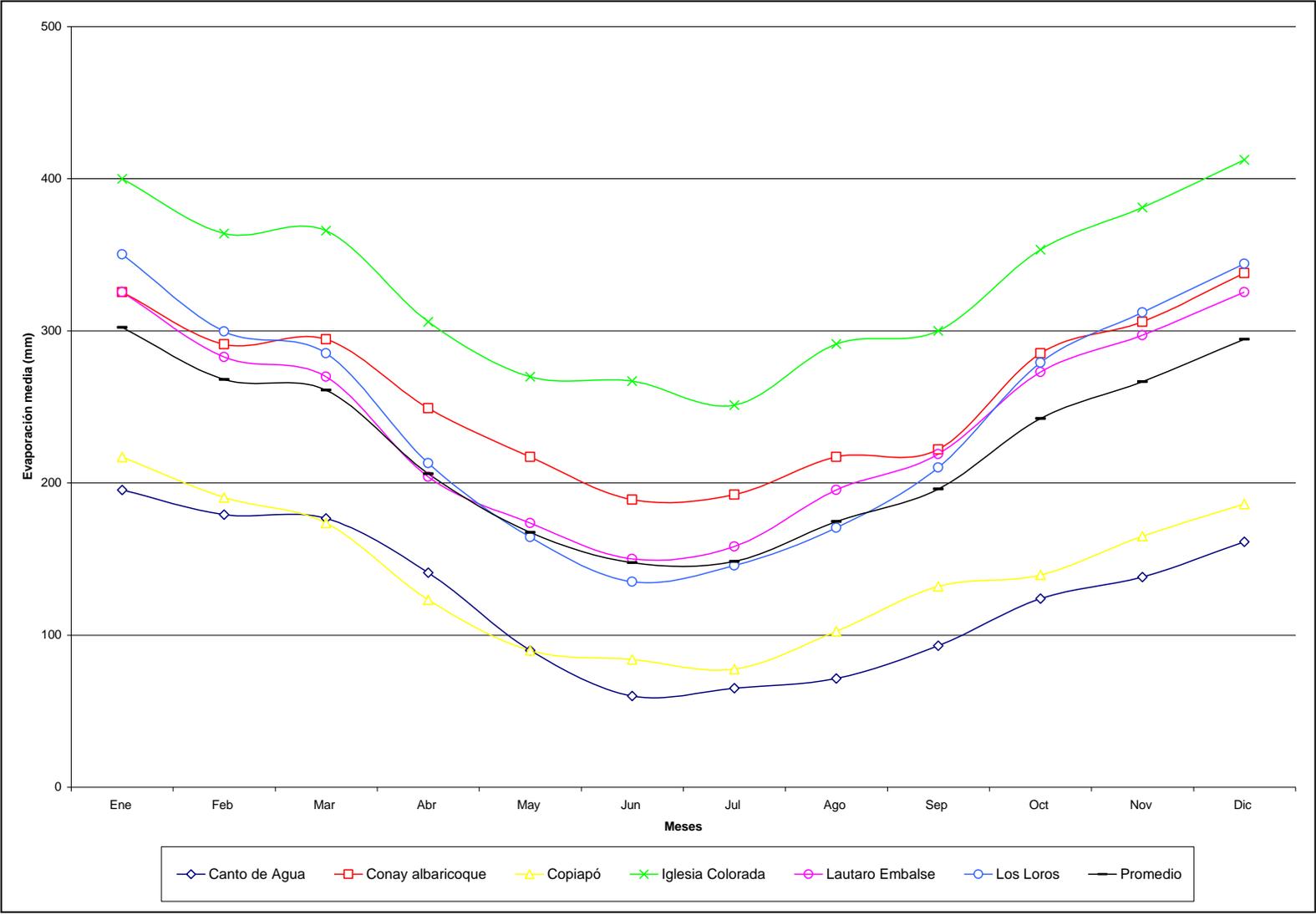
Fuente: DICTUC (2010)

Los gráficos correspondientes a la temperatura y evaporación media mensual se presentan en la Figura 3.9 y Figura 3.10, respectivamente.

**Figura 3.9**  
**Temperatura Media Mensual en Estaciones Seleccionadas**



**Figura 3.10**  
**Evaporación Media Mensual en Estaciones Seleccionadas**



### **3.4 Marco Geológico**

#### **3.4.1 Aspectos Generales**

La información geológica necesaria para establecer la distribución y configuración del acuífero que conforma el valle, necesariamente considera los siguientes puntos: geología de superficie y geología de subsuperficie.

Los antecedentes recopilados que abarcan toda el área y además todos los tópicos dan cuenta de un exhaustivo análisis del valle del río Copiapó, con un completo mapeo de la zona en donde se muestran las características geológicas y geofomas del lugar, basados en uso de cartografía existente, fotogeología obtenida del estudio realizado por SERNAGEOMIN en 1999. Esta información además, se complementa con la información geológica y geomorfológica descrita en el estudio de Álamos y Peralta en 1995. Por otra parte, el estudio de Álamos y Peralta en 1987 y 1995 más el estudio realizado por SERNAGEOMIN en 1999, comprenden campañas en terreno (sondeos, bosquejos, encuestas, etc.) que profundiza aún más los aspectos geológicos y geomórficos de la zona.

Para el estudio, reconocimiento y definición de la geología de sub-superficie en el valle del río Copiapó, se consideró los planos realizados por el estudio de Álamos y Peralta (1987 y 1995), donde se muestra la profundidad del basamento rocoso y el espesor del sedimento a través de curvas de isoprofundidad. Esta información además, se complementa con la información recopilada de las profundidades del basamento rocoso por SERNAGEOMIN para el estudio “Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca del Río Copiapó, con Énfasis en Cuantificación, Dinámica y Calidad Química de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos, SERNAGEOMIN (2012)”.

#### **3.4.2 Geología de Superficie**

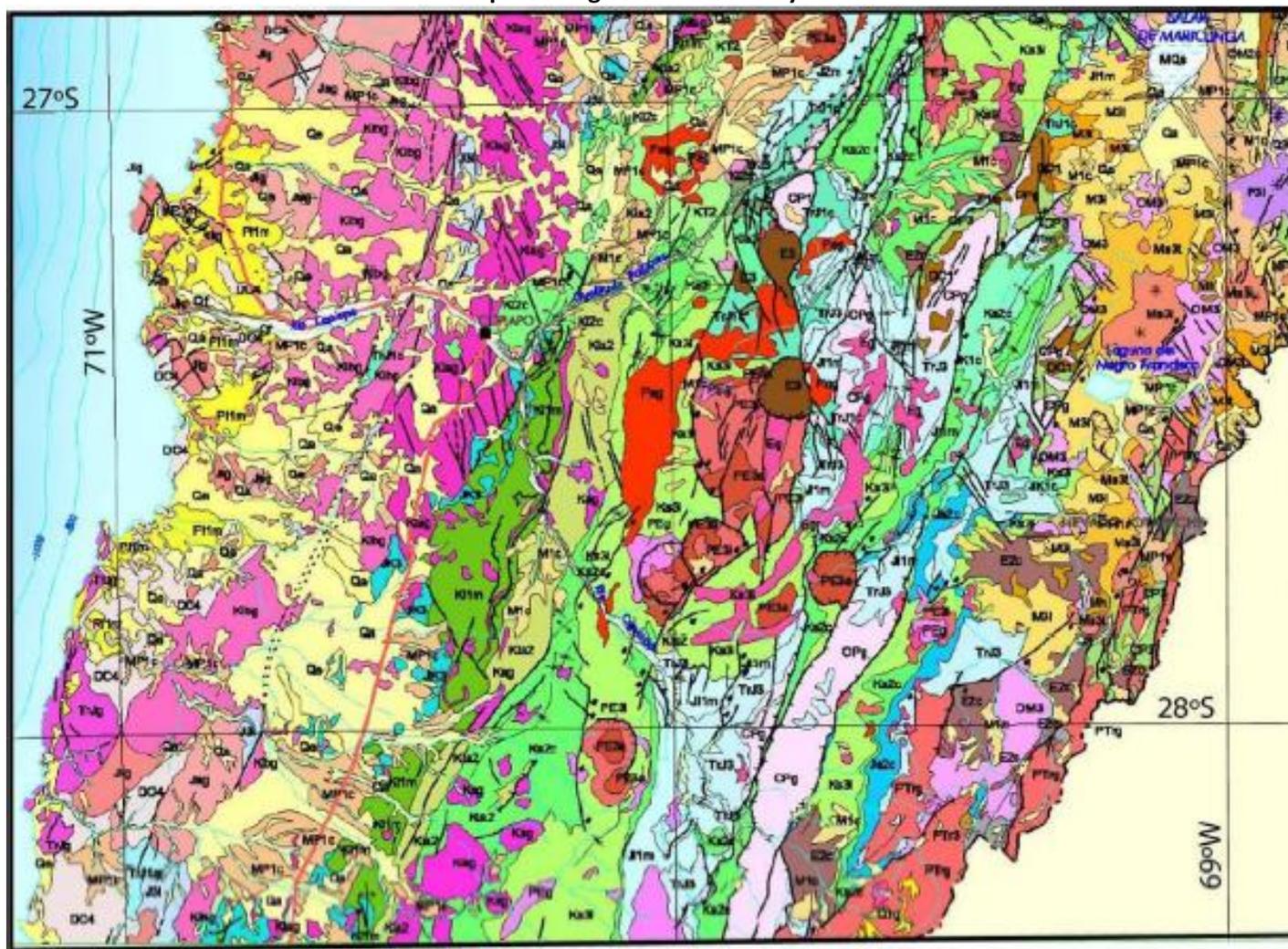
##### **3.4.2.1 Geología**

La región de Atacama, entre los 27° y 28° Latitud Sur, se caracteriza por la presencia de unidades litológicas de edades entre el Paleozoico y el presente. La distribución de los afloramientos de las distintas formaciones geológicas es, en general, de forma elongada en dirección NNE-SSW (Figura 3.11).

La cordillera de la costa en esta región está conformada principalmente por rocas intrusivas con edades que van desde el Triásico-Jurásico al Cretácico, que corresponderían a las raíces del arco magmático mesozoico. Estos últimos intruyen a rocas más antiguas, del Paleozoico (Devónico-Carboníferas) que corresponden mayoritariamente a rocas sedimentarias, tanto marinas como continentales, metamorizadas y muy deformadas que se han interpretado como una asociación de prisma de acreción y/o cuencas de antearco de dicho período (Hervé et al., 1981).

Afloran también, en la Cordillera de la Costa, rocas volcánicas jurásicas (Formación La Negra) hasta cretácicas (Formación Arqueros). A todo este arreglo litológico se superponen, discordantemente, secuencias sedimentarias desde semi consolidadas hasta no consolidadas, con edades desde el Mioceno al Presente (y que a su vez rellenan la depresión central); éstas corresponden principalmente a secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, Gravas del Copiapó, terrazas marinas emergidas, depósitos aluviales y fluviales (SERNAGEOMIN, 2003).

Figura 3.11  
Mapa Geológico entre los 27° y 28° S



Fuente: SERNAGEOMIN (2003)

En la precordillera, desde la ciudad de Copiapó hacia el Este, el basamento rocoso está conformado por una gruesa cubierta de rocas del Cretácico: secuencias sedimentarias marinas litorales y lacustres, intercaladas con rocas volcánicas (sobre todo andesitas). También aparecen afloramientos más antiguos que constituyeron el sustrato sobre el cual se depositaron las siguientes secuencias sedimentarias y volcánicas cretácicas: rocas intrusivas, graníticas, del Paleozoico y rocas sedimentarias marinas (sobre todo areniscas y calizas) con edades triásicas y jurásicas. Este conjunto se encuentra intruído por rocas ígneas (monzodioritas, granodioritas y granitos), con edades que van entre el Paleoceno y Eoceno, que se encuentran asociados a secuencias y complejos volcánicos continentales ácidos (con edades incluso Miocenas) como lavas, domos y rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas, asociadas a calderas de colapso, y que cubren discordantemente a las secuencias del Mesozoico (SERNAGEOMIN, 2003).

Este volcanismo del Cenozoico superior compone dos cadenas montañosas de orientación N-S, una al borde occidental de la cordillera de los Andes y la otra bordeando la depresión preandina, donde se ubican las cuencas altiplánicas: Salar de Pedernales, Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco (DICTUC, 2010).

De manera sincrónica al emplazamiento de estratovolcanes los sedimentos clásticos continentales son depositados. Estos representan acumulaciones de espesor variable de gravas, conglomerados y arenas con intercalaciones de ignimbritas. Estos materiales están esparcidos en el área de estudio, especialmente al este de la cordillera de la costa. Estos sedimentos han sido denominados gravas de Atacama, y corresponden a la superficie definida por la Peneplanicie de Atacama, con edades entre el Mioceno medio y el Plioceno (DICTUC, 2010).

Las estructuras geológicas presentes en la zona se pueden agrupar en varios tipos: i) las que afectan a las rocas de la cordillera de la costa (Sistema de Falla de Atacama, segmento El Salado-Vallena; Thiele & Hervé, 1984), ii) las diversas fallas geológicas que afectan a las secuencias Paleozoicas y Mesozoicas ubicadas al Este de Copiapó y iii) el plegamiento que afecta principalmente a las secuencias jurásicas y cretácicas (DICTUC, 2010).

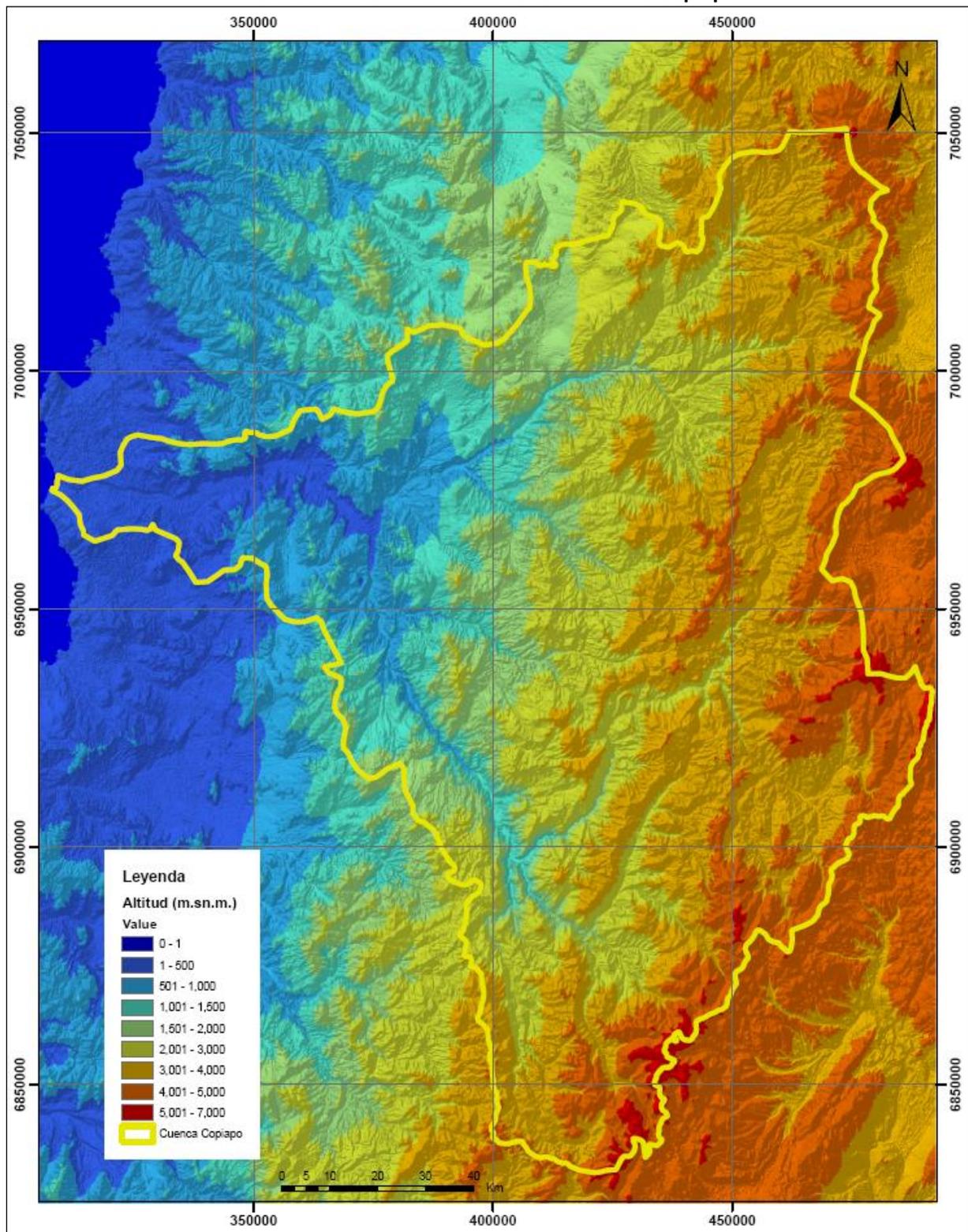
La deformación de primer orden en la zona ha estado íntimamente ligada al arco magmático y controlada principalmente por el ángulo de convergencia de subducción, lo que ha permitido el desarrollo de dos mega sistemas de fallas de rumbo de orientación N-S. Estos sistemas son: Sistema de Fallas de Atacama (SFA) que se formó en conjunto con el arco magmático Jurásico y está situado en la posición actual de la Cordillera de la Costa, y el Sistema de Fallas de Domeyko (SFD) situado en la precordillera y que se asocia al arco magmático del Cretácico Superior-Paleógeno (DICTUC, 2010).

En el valle del río Copiapó, sector de Hornito, se observa plegamiento de las secuencias sedimentarias, cretácicas principalmente: una serie de anticlinales y sinclinales de ejes oblicuos a las fallas de borde (DICTUC, 2010).

### **3.4.2.2 Geomorfología**

La cuenca del río Copiapó está formada por montañas áridas y desérticas, que muestran la acción intensa de la erosión, con frecuentes barrancos. La altura promedio de la cuenca es del orden de 2.700 m.s.n.m, demostrando una distribución de meseta elevada con grandes extensiones entre los 2.500 y 3.500 m.s.m. Pacífico (Golder, 2006). En la Figura 3.12 se muestra la distribución de sus elevaciones.

**Figura 3.12**  
**Distribución de Alturas en la Cuenca del Río Copiapó**



Esta área puede considerarse la zona de inicio del Desierto de Atacama, siendo la primera zona agrícola viniendo desde el Norte. Los afluentes principales del Copiapó son los ríos Manflas, Jorquera y Pulido, los cuales aportan caudales superficiales continuos y de relativa magnitud, aunque suelen desaparecer parcial o totalmente en algunas zonas aluvionales permanentes. Los afluentes del curso medio e inferior del Copiapó, como la Quebrada Paipote, aunque nacen en zonas de precipitación relativamente abundantes, están generalmente secos en superficie, salvo después de las breves y escasas tormentas (Golder, 2006).

El valle del río Copiapó tiene una anchura promedio de 1,5 km y una longitud de 160 km medidos desde el embalse Lautaro hasta su desembocadura, en Puerto Viejo, localidad que está situada a 60 km al oeste de la ciudad de Copiapó (Golder, 2006).

### **3.4.2.3 Depósitos No Consolidados**

El estudio más acabado acerca de los depósitos no consolidados que rellenan el valle del río Copiapó es el realizado por Aguirre *et al* (1999). Dicho trabajo se enfocó en el segmento del valle comprendido entre el Embalse Lautaro y el sector de Piedra Colgada, tramo en el cual se realizó una detallada identificación, delimitación y caracterización de cada una de las unidades de depósitos no consolidados, maleables en superficie, que participan de su relleno sedimentario. Sin embargo, los rasgos litológicos de los flancos rocosos y del basamento del valle del río son llamados de manera genérica como Basamento Rocosos Indiferenciado (BRI), el cual es considerado impermeable (Aguirre et al, 2000).

Basándose en el trabajo anteriormente nombrado, DICTUC en el año 2010 realizó una revisión de las unidades definidas, intentando rescatar sus características primordiales, la cual se presenta a continuación.

- **Depósitos de Dunas (Qd(a)) y Paleodunas (Qd(b)) - Holoceno**

En el valle del río Copiapó, entre Tierra Amarilla y Piedra Colgada, conforman depósitos poco extensos (no más de 3 km<sup>2</sup>) pero granulométricamente muy homogéneos, modelando formas onduladas que generalmente culminan en crestas subparalelas cuyas morfologías señalan direcciones de viento predominante en sentido noreste.

*Relaciones de contacto:* Los depósitos dunarios se disponen mayoritariamente sobre el basamento rocoso local (BRI) y en menor grado sobre los depósitos fluviales, fluvioaluviales, conos aluviales, conos de deyección, flujos aluviales antiguos y depósitos lacustres a fluviolacustres.

*Espesor:* Segerstrom (1962, p. C 92) señala espesores probables para depósitos dunarios activos ubicados al norte del sector de Chamonate: 300 m en el cerro Medanoso y 230 m en la quebrada Corralillos. En el área estudiada, los depósitos de dunas inactivas, se observan con un espesor menor al exhibido por las dunas activas, del orden de hasta decenas de metros.

*Granulometría:* Los depósitos de dunas activas están constituidos, exclusivamente, por fracciones arenosas muy finas a medias, no consolidadas, de colores ocre a levemente amarillentas. Los granos presentan buena selección y buen redondeamiento; están constituidos mayoritariamente por cuarzo, feldespatos, anfíbola y algunas micas; junto con fragmentos líticos y ocasionales minerales pesados. Las dunas inactivas o paleodunas están constituidas, casi exclusivamente, por fracciones arenosas medias, grises a grises levemente ocre, de similares características a la descrita para los depósitos netamente dunarios.

- **Depósitos Fluviales de Cauces Actuales (Qfca) - Holoceno**

Se desarrollan en torno a la actual zona de meandros del río Copiapó; compromete cauces activos y gran parte de su llanura de inundación. Ello determina el desarrollo conjunto de facies de relleno de canal y facies de llanura de inundación. En las facies de relleno de canal es posible reconocer alargados lentes gravosos o bien gravas depositadas al interior de los cauces del río Copiapó. Las facies de llanura de inundación alcanzan gran desarrollo en sectores con escasa gradiente hidráulica, sus depósitos están caracterizados por secuencias sedimentarias finas y de reducido espesor; conforman los terrenos ubicados hacia los márgenes del río Copiapó. En el área de estudio, los depósitos presentan hasta 7,5 km de longitud, con secciones medias en el rango de 100 a 750 m

*Relaciones de contacto:* Se apoyan subhorizontalmente sobre los depósitos fluviales, fluvioaluviales, lacustres y fluviolacustres subactuales.

*Espesores:* En perfiles expuestos en las paredes de pozos de empréstito localizados en torno a Tierra Amarilla y San Fernando, se observaron espesores medios del orden de 12 a 15 m.

*Granulometría:* En las facies de relleno de canal, predominan los elementos clásticos del tipo bolones, ripios, gravas, gravillas arenosas y arenas gruesas, principalmente. La matriz está constituida por material arenoso a limoarcilloso. Los elementos granulares se presentan no consolidados y sin cementar; se observan clastosoportados, discoidales, esféricos, bien redondeados a subredondeados. Denotan superficies desgastadas, bien pulimentadas; resistentes e inalteradas. En las facies asociadas a llanura de inundación dominan granulometrías correspondientes a arenas medias a finas junto a variadas proporciones de limos y arcillas.

- **Depósitos Lacustres y Fluviolacustres (Qfl) - Holoceno**

Se observan discontinuamente cubiertos por sedimentos lacustres a fluviolacustres, los que conforman un típico modelado de planicie o llano de escasa pendiente y gran continuidad lateral. Los depósitos lacustres se reconocen aguas arriba de zonas en las cuales el valle del río Copiapó exhibe notables estrechamientos. Ambientes con predominio de rocas resistentes, graníticas y volcánicas, ubicadas en torno a Los Loros-La Puerta, Copiapó y Piedra Colgada, resultan particularmente propicios para el desarrollo de estas morfologías. En torno a estos sectores, los depósitos lacustres poseen una amplia distribución areal, de hasta 15 km<sup>2</sup>, con un espesor medio de 5 a 30 m.

Por otra parte, zonas de escasa pendiente donde confluyen al valle del río Copiapó grandes quebradas tributarias: Cerrillos, Paipote, Cardones, son particularmente propicias a la depositación de secuencias fluviolacustres.

*Relaciones de contacto:* La unidad engrana con los depósitos fluviales, aluviales y coluviales más recientes, sobreyaciendo a los depósitos fluviales preexistentes. Los depósitos de esta unidad pueden ser considerados como lentes o intercalaciones de depósitos finos en el relleno fluvial del valle del río Copiapó.

*Espesores:* La secuencia incorpora frecuentes niveles lenticulares alternantes, con escaso desarrollo en potencia y continuidad lateral. Los niveles constituidos por granulometrías finas alcanzan espesores aproximados de: 11-30 m, aguas arriba de Los Loros, disminuyendo a un espesor mínimo por exposición de terrazas en el rango de 5-10 m en La Puerta; en Cerrillos, el espesor mínimo es de 3-8 m; entre Paipote y Viñita Azul el espesor mínimo es de 5-12 m,; en Piedra Colgada el espesor deducido por descripciones de sondajes fluctúa entre 5 y 17 m.

*Granulometría:* La secuencia lacustre, en torno al sector de Buen Retiro-La Puerta, incorpora una serie de bancos alternantes de distinta granulometría, color y composición, con espesores individuales de 1 a 5 cm, hasta 40 cm. Comprenden niveles de limos, limos arcillosos, arenas finas a medias de color gris blanquecino a violáceas, alternadas con niveles de gravillas y gravas arenosas mal seleccionadas.

- **Depósitos de Conos de Deyección (Qcd) - Holoceno**

Los depósitos no consolidados de esta unidad modelan pequeñas superficies cónicas, de hasta 1 km<sup>2</sup>, con elevadas pendientes de 20°, 40° e incluso 55°, mucho mayores a las desarrolladas por los conos aluviales. La inclinación que adquieren los conos de deyección, se ajusta al relieve de los respectivos flancos de valle o eje de las quebradas que los albergan.

*Relaciones de contacto:* Se disponen directamente sobre las rocas que constituyen el basamento rocoso del sector considerado. En sectores puntuales, suelen engranar con depósitos, aluviales, lacustres, fluviales y fluvioaluviales.

*Granulometría:* Se engloban en esta categorización, depósitos coluviales no consolidados, constituidos por mezclas de fragmentos rocosos sueltos, predominantemente clastosoportados, monocomposicionales, angulosos a subangulosos; de muy mala selección granulométrica, de variados tamaños, con máximos correspondientes a bloques, englobados en escasa matriz del tipo gravilla, gravilla arenosa y arena.

- **Depósitos de Conos Aluviales (Qca) - Holoceno**

Esta unidad está conformada por depósitos no consolidados que rellenan fondos de quebradas menores; comprometen superficies menores a los 4 km<sup>2</sup>, con pendientes medias de 4° a 5°. Los conos aluviales alcanzan gran desarrollo en ambos flancos del valle del río Copiapó, en el segmento comprendido entre Embalse Lautaro y Elisa de Bordos. En particular, zonas donde el actual piso del valle del río Copiapó es anormalmente estrecho, 100 a 130 m. Ejemplos característicos de estos depósitos corresponden al relleno sedimentario de las quebradas Los Loros, Majadita, Buen Retiro, Buenos Aires, Jardín, Hornito, El Sauce.

*Relaciones de contacto:* Los conos aluviales se disponen sobre basamento rocoso indiferenciado, depósitos fluviales, fluvioaluviales, flujos aluviales antiguos, lacustres a fluviolacustres, flujos de barro y detritos preexistentes.

*Espesores:* Su espesor varía de unos pocos metros a varias decenas de metros.

*Granulometría:* Consignan una secuencia caracterizada por variadas intercalaciones de niveles constituidos por una compleja mezcla de gravas y gravillas arenosas que incluyen ocasionales bloques erráticos; junto a numerosos niveles de gran continuidad lateral, constituidos esencialmente por arenas y gravillas de diversos tamaños. Los elementos clásticos, se observan mal seleccionados, de contornos angulosos a subangulosos, inalterados.

- **Depósitos Fluvioaluviales (Qfa) - Holoceno**

Se engloban en esta categorización, todos los depósitos no consolidados, que con espesores de decenas de metros, rellenan el fondo de extensas quebradas tributarias al cauce principal del valle del río Copiapó. Alcanzan superficies mayores a los 4 km<sup>2</sup>, caracterizadas por pendientes muy suaves y continuas de 2° a 4° en sus extremos terminales. Ejemplos típicos al respecto, corresponden al

relleno sedimentario de las quebradas Amolanas, Calquis, Cinchado, Carrizalillo o Cerrillos, Nantoco, Meléndez, Paipote, Sacramento, Cardones, Las Cruces, El Bronce y del Llano de Chamonate.

*Relaciones de contacto:* La secuencia, engrana con depósitos fluviales, fluvioacústicos, conos aluviales y conos de deyección. Interrumpe la continuidad de depósitos fluviales, fluvioaluviales y depósitos de flujos aluviales antiguos; su base se apoya directamente sobre el basamento rocoso indiferenciado.

*Espesor:* Tienden a aumentar su espesor hacia aguas abajo del ápice de la unidad. Los espesores de estos depósitos, en sus extremos distales, es decir, donde la unidad desarrolla rasgos morfológicos propios de abanicos aluviales, son del orden de decenas de metros, variables según la sección a considerar.

*Granulometría:* Consigna secuencias depositacionales integradas por gravas y gravillas arenosas, con abundantes niveles francamente arenosos y en ocasiones limoarenosos, de acuerdo a configuraciones lenticulares de gran continuidad lateral y longitudinal.

- **Depósitos Fluviales (Qf) – Holoceno Temprano**

Los depósitos de la unidad modelan morfologías llanas, con un perfil longitudinal inclinado hacia aguas abajo, que para el segmento de estudio considera 100 km de extensión. Estos depósitos abarcan la totalidad del ancho del valle, con valores medios de 1 km en el segmento Embalse Lautaro-Paipote y desde Paipote hasta Piedra Colgada comprenden anchos medios, variables de 2,0-2,5 km. Esta unidad engloba la mayor parte del relleno sedimentario del valle del río Copiapó. Las informaciones referidas a sondajes mecánicos señalan espesores máximos de hasta 177,5 m.

*Relaciones de contacto:* En sus niveles superficiales, engrana con depósitos fluvioaluviales, fluvioacústicos, aluviales y coluviales, mientras que su base descansa directamente sobre el basamento rocoso indiferenciado.

*Espesores:* Se estima que el espesor medio para el relleno sedimentario comprendido en el segmento aguas abajo de Elisa de Bordos y aguas arriba de Paipote es de aproximadamente 100 m. En torno al sector de Paipote-San Fernando se estima un espesor promedio de 150 m. En torno al sector de La Chimba-Cerro Pichincha el espesor medio se estima en 80 m.

*Granulometría:* Constituida por una compleja y variada secuencia de sedimentos sueltos a semiconsolidados, en ellos se pueden observar variaciones granulométricas donde el dominio de bolones, ripios, gravas, gravillas y arenas indican el predominio de facies de relleno de canal; por el contrario granulometrías más finas: arenas, limos y arcillas se pueden asociar al dominio de facies de llanura de inundación y/o sedimentación lacustre.

- **Depósitos de Flujos de Barro y Detritos (Qfbd) – Holoceno Temprano**

Esta unidad adquiere máximo desarrollo en ambos flancos del valle del río Copiapó en el segmento comprendido entre el Tranque Lautaro y Villa del Cerro. Cubren con espesores variables el fondo de pequeñas quebradas y depresiones ubicadas en las laderas de los relieves rocosos del sector, con superficies individuales que en general no superan los 3 km<sup>2</sup>.

*Espesores:* Los espesores son muy variables, se estima que los mayores espesores se registrarían a lo largo del eje de las quebradas que albergan a estos depósitos y/o en torno a sus secciones basales.

Frente a la quebrada Calquis, se observan niveles aterrazados con espesores estimados entre 15 y 25 m para la sección basal de la respectiva unidad.

*Granulometría:* Conformados por alternancias de niveles constituidos por una mezcla de fragmentos líticos de variados tamaños regularmente consolidados y de escasa continuidad lateral. Los elementos clásticos cuyo diámetro promedio comprende rangos medios de entre 5 a 10 cm, pudiendo alcanzar valores de hasta 50 cm de diámetro, se observan muy mal seleccionados, angulosos a muy angulosos. La matriz está constituida por variadas proporciones de barro, arena y fragmentos líticos de diversos tamaños cementados con carbonato de calcio.

- **Depósitos de Flujos Aluviales Antiguos (TQfaa) – Mioceno - Pliopleistoceno?**

Afloran en numerosos y discontinuos sectores del valle del río Copiapó entre Tierra Amarilla y Piedra Colgada; particularmente entre Paipote y Piedra Colgada, rellenan morfologías depresionarias correspondientes al fondo de quebradas menores, tributarias al río Copiapó, comprometen superficies individuales de 2 km<sup>2</sup>, pudiendo alcanzar hasta 8 km<sup>2</sup> de extensión.

*Espesores:* Aumenta desde las cabeceras de la unidad hacia las zonas depresionarias o distales, en dirección hacia su confluencia con el valle del río Copiapó. En estos sectores, es posible reconocer niveles aterrazados, en los cuales se registran espesores mínimos de 30 a 50 m. En los taludes, correspondientes a los bancos del rajo abierto de la ex-mina Cerro Imán, se reconocen espesores medios del orden de 50 a 65 m.

*Granulometría:* Presentan tamaños variables de gravillas a bloques, con diámetros medios en el rango de 0,1 a 1,5 m. La matriz de estos depósitos está integrada por diversos porcentajes de barro y arena fina, según lo cual, y sobre la base de sus estructuras sedimentarias, es posible asociar su origen a flujos de grano del tipo barro y/o detritos finos.

*Edad:* La interdigitación con secuencias fluviales y fluvioaluviales antiguas, junto a su característica morfológica de pedimento o nivel llano, permite asignar estos depósitos a una probable edad plioleistocena. Sin embargo, mediante correlaciones de carácter litológico, Arévalo (1994 y 1995), incluye estos depósitos en la unidad denominada Gravas de Atacama; ello le permite asignar una edad Miocena a estos depósitos.

- **Depósitos Fluviales a Fluvioaluviales de terrazas antiguas (TQfta) - Mioceno - Pliopleistoceno ?**

La unidad, reconocida como remanente de terrazas fluviales antiguas, se dispone en segmentos focalizados, y a diferentes alturas por sobre el actual nivel base del río Copiapó. Las terrazas altas alcanzan particular desarrollo en el flanco occidental del valle, sector Hornito-Elisa de Bordos. En este lugar, denominado Cerros de Totoralillo, los depósitos comprometen una superficie aproximada de 60 km<sup>2</sup>, dispuestos de acuerdo a formas alargadas, modelan una típica red de drenaje con padrón dendrítico.

*Espesores:* En el sector de Hornito-Elisa de Bordos, la unidad exhibe superficies aterrazadas a gran altura sobre el actual nivel base del río Copiapó, ello permite reconocer espesores medios del orden de aproximadamente 100 m. Hacia aguas abajo, en el sector de Punta del Cobre, dos sondeos determinaron un espesor medio de 62 m.

*Granulometría:* Compuesta por una serie de bancos alternantes, integrados por gravas y gravillas mal seleccionadas, con clastos heterocomposicionales, angulosos a subangulosos, de regular a mala esfericidad, con finos intersticiales del tipo arenas, limos y arcillas, que les otorga una elevada

compacidad. Incluyen numerosas intercalaciones constituidas por niveles de arenas y limos de gran continuidad lateral y longitudinal.

*Edad:* Estos depósitos han sido denominados por Arévalo (1994 y 1995) como Gravas de Atacama; fueron correlacionados con secuencias litológicas afines reconocidas en la cuesta El Jardín (Potrerillos), permitiendo vincular la génesis de esta unidad a etapas iniciales en el ciclo evolutivo del río Copiapó, ocurridas a partir de Terciario superior (Mioceno-Pliopleistoceno ?).

#### **3.4.2.4 Topografía**

Con respecto a la carta topográfica se puede señalar que el sistema está representado de oeste a este por la quebrada de Paipote y los ríos Jorquera, Pulido y Manflas, principales tributarios del río Copiapó. Topográficamente los cerros se muestran menos escarpados y más bajos a medida que el valle se ensancha, mientras que en los sectores más angostos como Hornito-La Puerta-San Antonio las formas del relieve son más abruptas, en el sector de Piedra Colgada hacia Angostura la característica geomorfológica está representada por una extensa planicie litoral (DGA, 2003).

#### **3.4.3 Geología de Subsuperficie**

##### **3.4.3.1 Basamento Rocoso**

En la Figura 3.13 se muestra un perfil longitudinal realizado a lo largo del valle del río Copiapó con las profundidades de basamento determinadas mediante información recopilada por DGA (2003).

De acuerdo a la información geofísica recopilada, se observa que las zonas con mayor espesor corresponden al segmento ubicado en torno a Goyo Díaz – Villa del Cerro, Hornito – Elisa de Bordos, Paipote – Copiapó, Chamonate y Piedra Colgada en donde se observa algunas secciones con espesores de relleno entre 500-600 m. Desde la ciudad de Copiapó al sur las secciones tienen entre 200-400 m de espesores, y en el sector entre Angostura y Piedra Colgada hay espesores variables entre 200 y 400 m. Por otra parte, se puede observar que el ancho de las secciones es mayor, principalmente, en zonas en las que confluyen quebradas laterales. El menor espesor de relleno sedimentario se encontraría en torno al sector de Los Loros y La Puerta (DICTUC 2010).

Los tramos ubicados en las zonas extremas del segmento de estudio, se caracterizan por una morfología de basamento impermeable fuertemente contrastante, con una silueta de basamento que evidenciaría la presencia de amplias depresiones vinculadas a zonas de falla y/o fractura, que separan estrechos altos en zonas donde la sección del valle es mínima. El segmento central (Elisa de Bordos – Paipote), se caracteriza por presentar una morfología de basamento mucho más homogénea y regular en cuanto a las variaciones que muestra la profundidad de su basamento. En detalle las características morfológicas del basamento rocoso para los tramos: Embalse Lautaro – Elisa de Bordos; Elisa de Bordos – Paipote y Paipote – Angostura, son:

- **Embalse Lautaro – Elisa de Bordos**

En este sector las variaciones en la morfología del basamento impermeable describen una silueta de basamento con forma de “W”. A partir del Embalse Lautaro la profundidad aumenta gradualmente hacia el sector de Goyo Díaz, desde donde disminuye progresivamente hasta el sector de San Antonio. Aguas abajo de esta localidad, entre Los Loros y La Puerta, la profundidad del basamento, caracterizada por un alto de basamento, es muy homogénea y mínima en una zona donde el valle desarrolla marcados estrechamientos en su sección transversal. Desde La Puerta y hacia el sector de

Hornito, la profundidad del basamento aumenta gradualmente, para disminuir drásticamente en el sector de Elisa de Bordos (DGA, 2003).

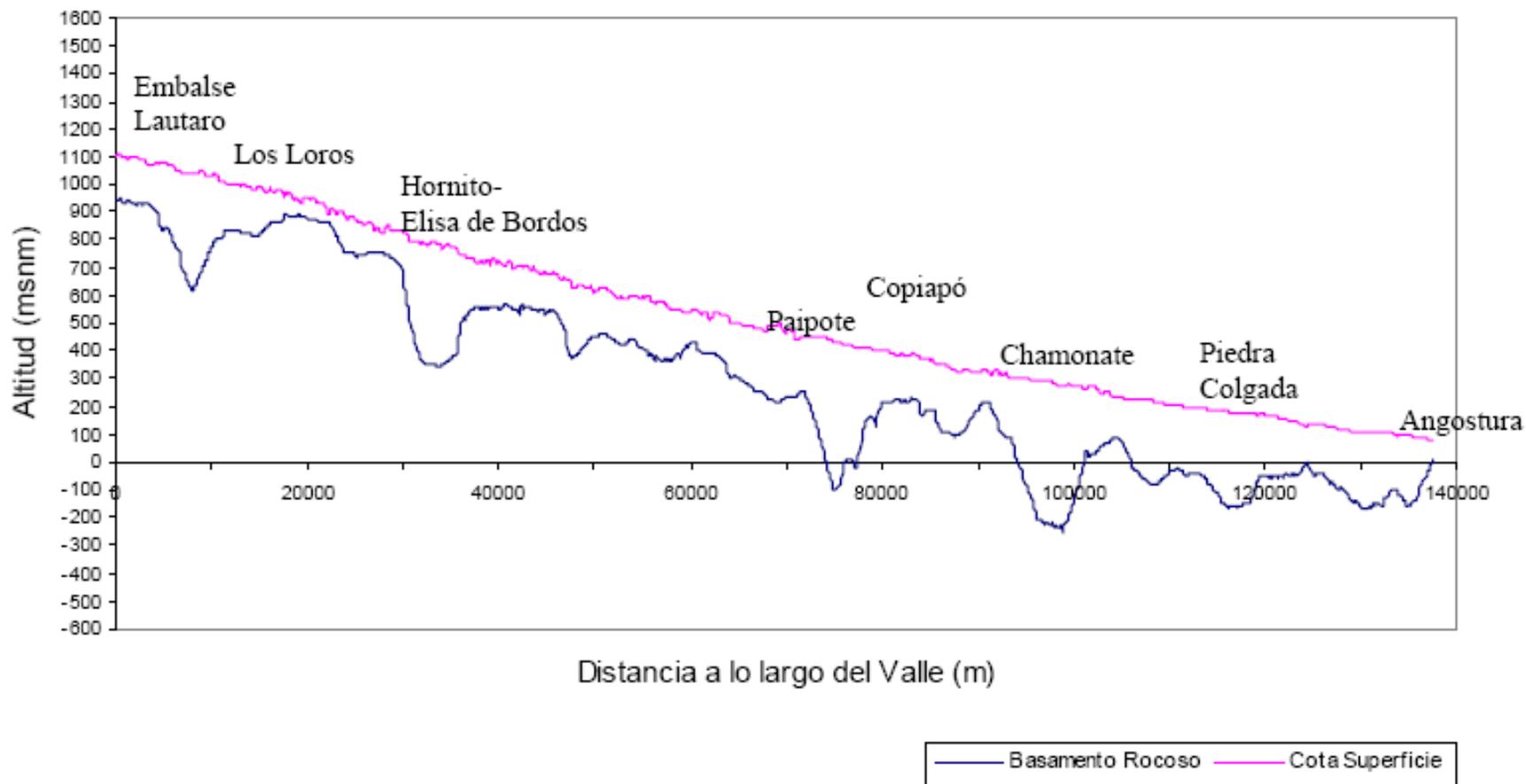
- **Elisa de Bordos – Paipote**

La morfología del basamento impermeable es muy homogénea y subhorizontal con valores que fluctúan aproximadamente entre los 108 y 265 metros de profundidad. El tramo Tierra Amarilla – Paipote, la profundidad del basamento tiende a aumentar con valores máximos de 200 metros. Este sector que evidencia un aumento en la profundidad del basamento rocoso impermeable, coincide con una zona de gran demanda de aguas subterráneas (DGA, 2003).

- **Paipote - Angostura**

Este sector está caracterizado por una profundidad de basamento con una silueta similar al segmento Embalse Lautaro – Elisa de Bordos (“W”). Se reconoce una disminución en la profundidad de basamento, localizada en una zona con un alto de basamento hacia una zona caracterizada por estrechamientos del valle y por la presencia de los cerros islas: La Cruz y Pichincha. El basamento impermeable aumenta su profundidad (mayor a 300 metros) hacia sectores que coinciden con una mayor sección de valle y donde el tamaño y ancho de las quebradas tributarias es significativamente mayor que el resto del sector estudiado. Corresponden a los sectores de San Fernando – San Miguel y Chamonate – Piedra Colgada. Desde el sector Piedra Colgada hasta Angostura la profundidad del basamento disminuye gradualmente hasta valores menores de 150 metros (DGA, 2003).

Figura 3.13  
Profundidad del Basamento Rocoso v/s Cota de la Superficie



Fuente: DGA (2003)

### **3.4.3.2 Geometría del Acuífero**

La geometría del acuífero queda definida por la topografía superficial y por su basamento rocoso. En el presente estudio la profundidad del basamento rocoso del acuífero del valle del río Copiapó fue definida a partir de información recopilada por SERNAGEOMIN para el estudio “Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca del Río Copiapó, con Énfasis en Cuantificación, Dinámica y Calidad Química de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos, SERNAGEOMIN (2012)”.

La información recopilada por SERNAGEOMIN de la profundidad del basamento rocoso incorpora datos obtenidos por medio del método de resistividad eléctrica tipo transiente electromagnético (TEM), sondajes eléctricos verticales (SEV), pozos profundos que penetran el basamento y perfiles gravimétricos del acuífero del valle del río Copiapó. Posteriormente se exportan las coordenadas y cotas de la profundidad del basamento al programa SURFER, con el que se interpola para obtener las curvas de nivel del fondo del acuífero.

La topografía superficial del sector acuífero del valle del río Copiapó fue determinada a partir del modelo de elevación digital (DEM) obtenido del USGS.

### **3.4.3.3 Estratigrafía**

Para caracterizar los estratos de los sedimentos que componen el acuífero, la DGA empleó información estratigráfica obtenida a partir de 100 pozos y norias, cuyas profundidades variaban entre 6 y 170 m (DGA, 2003). En ningún caso, la cantidad de arcilla supera el 50% y, cuando aparece, lo hace en compañía de arenas y gravas. Por ello puede descartarse la presencia de estratos impermeables en el acuífero. Además, la diferencia granulométrica media entre estratos, en general, no es considerable.

Las texturas de mayor presencia a lo largo del valle son arenosa, franco arenosa, franco limosa y franco arcillosa.

Una vez separados los estratos en dos clases, de textura fina (> 33% de arcilla) y de textura gruesa (<33%), y analizados los perfiles longitudinales, realizados en pozos representativos distribuidos a lo largo del valle, se observó que los estratos finos no tienen ninguna continuidad. En consecuencia, se comportan como bolsones de sedimentos más finos intercalados en un estrato mayor, lo que permite considerar al acuífero como un solo estrato mono-capa, debido a su continuidad tanto en sentido longitudinal como vertical, ésto mientras no exista un análisis estratigráfico de mayor densidad y que alcance mayores espesores que muestren continuidad de otros estratos.

## **3.5 Caracterización Hidrogeológica**

### **3.5.1 Aspectos Generales**

La caracterización hidrogeológica tiene como objetivo entender el funcionamiento general del acuífero, estableciendo conceptualmente criterios para la sectorización y estimación de parámetros relevantes relacionados con este funcionamiento. Se requiere recopilar y analizar la información referente a las características hidrogeológicas del valle. La información esencial en este punto la constituyen los siguientes temas: unidades hidrogeológicas, propiedades hidrogeológicas del sistema y niveles de agua subterránea.

La descripción que permite caracterizar la hidrogeología del valle del río Copiapó fue seleccionada de los informes elaborados por la DGA en 2003 (“Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Valle del Río Copiapó”), el que recoge los resultados de los informes elaborados por Álamos y Peralta para la DGA en 1987 y 1995 (“Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos en el Valle del Río Copiapó, III Región”), SITAC en 2009 (“Modelo Hidrogeológico Cuenca Río Copiapó, Sector Ramadillas – La Puerta, Proyecto Caserones”), DICTUC en 2010 (“Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del Río Copiapó”) y SERNAGEOMIN en 2013 (“Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca del Río Copiapó, con Énfasis en Cuantificación, Dinámica y Calidad Química de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos”). Se eligieron estas fuentes y, particularmente la primera de las citadas, por contener un análisis exhaustivo y sectorizado de las condiciones hidrogeológicas del valle.

### **3.5.2 Unidades Hidrogeológicas**

En el mapa hidrogeológico realizado por Aguirre *et al* (1999) cada unidad ha sido representada cartográficamente, según su distribución espacial, teniendo cada una de ellas un comportamiento y potencial hidrogeológico distinto.

Las unidades geológicas del valle del río Copiapó, poseen propiedades específicas, que determinan su comportamiento como elementos para experimentar recarga, almacenar y transmitir el agua subterránea; admiten ser agrupados en: depósitos no consolidados y basamento rocoso indiferenciado (BRI). Este último concepto engloba a todas las unidades rocosas que conforman los flancos y el basamento rocoso del valle del río Copiapó (DICTUC 2010).

Los depósitos no consolidados constituyen el relleno sedimentario del valle del río Copiapó. Están conformados por secuencias mayoritariamente permeables a semipermeables con porosidad intergranular. Desarrollan potentes, continuos y extensos niveles estratificados, multiacuíferos (libres a semiconfinados), radicados en depósitos granulares modernos: ripios, gravas, gravas arenosas y arenas fluviales a fluvioaluviales. Porosidades y permeabilidades menores se registran en depósitos macizos de flujos de barro y/o detritos y en secuencias fluviales a fluvioaluviales antiguas.

Estos depósitos concentran el mayor atractivo o potencial hidrogeológico, considerando que debido a sus características granulométricas y constantes hidráulicas, están en condiciones de experimentar o favorecer la recarga, de transmitir y almacenar importantes volúmenes de agua subterránea. En general, esta agua está provista de una adecuada calidad físico-química, con restringida a alta vulnerabilidad a agentes contaminantes y efectiva capacidad de renovación (SERNAGEOMIN, 2013).

El Basamento está conformado por las rocas que constituyen los flancos y el basamento rocoso del valle del río Copiapó. Estos materiales, prácticamente impermeables, con permeabilidad secundaria local vinculada a la alteración y/o fracturamiento superficial, poseen baja a nula capacidad para almacenar y/o transmitir el agua subterránea (SERNAGEOMIN, 2013).

A continuación se describen las características hidrogeológicas más relevantes de las unidades geológicas presentes en el segmento entre Piedra Colgada y el Embalse Lautaro. Estas han sido agrupadas desde el punto de vista de la ocurrencia del agua subterránea, en cuatro categorías o grados de importancia hidrogeológica relativa: alta, media a baja, baja y baja a nula.

- **Acuíferos de Alta Importancia Hidrogeológica**

Esta unidad hidrogeológica incluye a los depósitos, descritos anteriormente, fluviales (Qf), fluviales de cauces actuales (Qfca) y secuencias del tipo sobreyacidas e intercaladas por depósitos fluvioalacustres (Qfl). Se ubican a lo largo y ancho del valle del río Copiapó y en la confluencia de éste con las quebradas que lo tributan.

Corresponden a secuencias sedimentarias no consolidadas y con eficaz interconexión entre muy buenos acuíferos y las fuentes de recarga. Su característica fundamental es la gran capacidad de almacenamiento que poseen. Predominan valores de almacenamiento de entre 0,16 y 15,0% y valores de transmisividad del orden de 1.000 a 20.000 m<sup>3</sup>/día/m (DGA, 1987b y 1995). Cálculos hidrogeológicos indican permeabilidades relativamente buenas, del orden de  $3-6 \times 10^{-4}$  m/s para la mayor parte de los acuíferos. Niveles con lentes de escasa permeabilidad presentarían valores de  $2 \times 10^{-5}$  m/s.

Tasas de descenso de los niveles estáticos, establecidas como resultado de comparaciones entre niveles para prolongados periodos de sequía señalan valores del orden de 0,3 a 4,5 m/año (DGA, 1987b). Registros muy puntuales para la permeabilidad superficial de estos depósitos fluctúan entre  $10^{-5}$  y  $10^{-7}$  m/s, con tasas de infiltración del orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  m/s (Dames y Moore, 1996).

Los espesores que alcanzan estas secuencias, según perforaciones de sondajes mecánicos, son de hasta 180 m, los que interpretados como resultado de determinaciones geofísicas, comprenden valores del orden de 100 a 200 m. En determinadas zonas pueden alcanzar hasta más de 250-300 m. y en otras más de 300 m. Este último valor, correspondería a eventuales "cubetas tectónicas" situadas en el valle del río Copiapó en torno a grandes zonas de falla o sectores relacionados con la presencia de acuíferos en roca (Vertiente Goyo Díaz).

Según los niveles de descenso y los espesores de los acuíferos, las aguas subterráneas podrían alcanzar tiempos de residencia que posiblemente fluctúen entre 30 y 200 años. Tiempos de residencia predominantemente entre 80 y 160 años podrían presentar las aguas subterráneas de la parte baja del área estudiada. En los niveles más profundos de las "cubetas geológicas" y especialmente en la parte baja del valle, podrían llegar a ser incluso fósiles (mil o miles de años).

- **Acuíferos de Importancia Hidrogeológica Media a Baja**

Corresponden a depósitos no consolidados, porosos y permeables, que carecen de continuidad en los procesos de recarga, cuando ella ocurre, fundamentalmente es por efecto de repentinas y esporádicas lluvias. Esta característica, en conjunto con el escaso volumen que en general presentan estos depósitos, le confiere una importancia hidrogeológica media a baja con respecto al resto de las unidades hidrogeológicas del valle. Las unidades incluyen a los depósitos fluvioaluviales (Qfa) y a los depósitos de conos aluviales (Qca).

- **Acuíferos Locales de Baja Importancia Hidrogeológica en Depósitos no Consolidados a Semiconsolidados**

En la zona de estudio, el potencial hidrogeológico de los depósitos de Dunas (Qd(a)) y Qd(b)) y de los depósitos de conos de deyección (Qcd) ocupan áreas muy localizadas y/o de reducida extensión generalmente apoyadas sobre el basamento rocoso indiferenciado, impermeable. Esto permite que sean considerados como de importancia hidrogeológica baja a nula; este carácter, se vincula a sus

escasas capacidades para retener o almacenar agua subterránea (acuíferos de paso), producto de infiltraciones conexas a esporádicas precipitaciones que ocurren directamente sobre las áreas en las cuales se distribuyen estos depósitos.

Pero también se consideran dentro de esta cualificación los depósitos de flujos de barro y/o detritos (Qfbd) los depósitos fluviales a fluvioaluviales de terrazas antiguas (TQfta) y los depósitos de flujos aluviales antiguos (TQfaa), los cuales presentan diversos factores que condicionan su bajo a nulo potencial hidrogeológico. Estos factores son principalmente el dominio de sedimentos con abundantes finos intersticiales, baja porosidad, baja permeabilidad y el hecho de que gran parte de estos depósitos se encuentra cementados.

- **Acuíferos Locales de Baja a Nula Importancia Hidrogeológica en Rocas**

Corresponden a rocas y depósitos con escasa a nula porosidad e incluye a todas las unidades rocosas que conforman tanto los flancos como el basamento rocoso (Bri) del valle del río Copiapó, a las unidades de depósitos de flujos de barro y detritos (Qfbd), a los depósitos fluviales a fluvioaluviales de terrazas antiguas (TQfta), y a los depósitos de flujos aluviales antiguos (TQfaa). Posibles acuíferos se encontrarían en rocas porosas y/o fracturadas con adecuada interconexión hidráulica, pero con reducidas y en ocasiones esporádicas fuentes de recarga. Esta característica en conjunto con el predominio de rocas prácticamente impermeables indica el escaso a nulo potencial hidrogeológico que poseen estas unidades.

### **3.5.3 Propiedades Hidrogeológicas**

Las principales propiedades hidrogeológicas a analizar son: transmisividad (T), permeabilidad (K) y coeficiente de almacenamiento (S). Estas propiedades fueron estimadas en base a recopilación de información existente en informes anteriores.

#### **3.5.3.1 Transmisividad (T)**

La transmisividad de un sistema acuífero, mide la cantidad de agua, por unidad de ancho, que puede ser transmitida horizontalmente a través del espesor saturado de un acuífero con un gradiente hidráulico igual a 1 (unitario).

Los valores de transmisividad extraídos de Álamos y Peralta (1987), muestran que las transmisividades del valle en general oscilan entre los 1.000 (m<sup>3</sup>/día/m) hasta los 20.000 (m<sup>3</sup>/día/m). Los sectores con valores más elevados se presentan en Lautaro, El Yeso y Totoralillo, mientras que los más bajos corresponden a Villa María, Hornitos, La Puerta y Los Loros. En la Tabla 3.11 se presentan los valores de transmisividad extraídos de Álamos y Peralta (1987).

La información de transmisividad para la parte alta de la cuenca del río Copiapó se extrajo del estudio “Modelo Hidrogeológico Cuenca Río Copiapó, Sector Ramadillas – La Puerta, Proyecto Caserones, SITAC (2009)”. En este estudio la transmisividad se determinó directamente del análisis de las pruebas de bombeo realizadas en los pozos e indirectamente por medio de la relación transmisividad con caudal específico obtenida en el informe DGA 1987. Esta relación fue obtenida mediante la correlación de más de 80 pozos en el valle de Copiapó que tenían prueba de bombeo y también valores de caudal específico. Los valores determinados tanto de las pruebas de bombeo como indirectamente se muestran en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.11**  
**Valores de Transmisividad – Álamos y Peralta (1987)**

Sector	Transmisividad (m <sup>3</sup> /día/m)
Embalse Lautaro – Valle Hermoso	< 15.000 – 20.000
San Antonio – La Puerta	1.000 – 5.000
Elisa de Bordos	< 20.000
Elisa de Bordos – Jotabeche	1.000 – 5.000
Jotabeche – Nantoco	< 15.000 – 20.000
Tierra Amarilla – Paipote	1.000 – 5.000
San Fernando	< 15.000 – 20.000
Copiapó	1.000 – 10.000
Bodega	10.000 – 15.000
La Chimba – P. Colgada	1.000 – 5.000

Fuente: SERNAGEOMIN (1999), citando DGA (1987)

En la zona de las cuencas del Ramadillas y en su confluencia con el Pulido las transmisividades son medias a altas con valores entre 400 y 500 m<sup>2</sup>/día. Salvo para el pozo WE-4 en que la transmisividad es baja, con aproximadamente 55,7 m<sup>2</sup>/día. Sin embargo, es importante notar que estos valores están influenciados por el acuífero inferior (roca basal alterada) lo que hace que estos valores sean más bajo que en otros sectores.

En la zona de Iglesia Colorada las transmisividades son medias a alta a muy altas, con valores entre 500 y 3.000 m<sup>2</sup>/día.

La zona de Las Juntas (sector de confluencia de los ríos Pulido, Jorquera y Manflas) presenta transmisividades alta a muy altas con valores entre 800 a 10.000 m<sup>2</sup>/día. Bajo el embalse Lautaro las transmisividades son medias a muy altas con valores del orden de 1.000 a 20.000 m<sup>2</sup>/día.

DICTUC en el año 2010 recopiló y analizó información de estratigrafía y pruebas de bombeo en pozos localizados a lo largo del valle. Las pruebas de bombeo analizadas fueron realizadas sin utilizar un pozo de observación, por consiguiente las pérdidas de carga en el radio del pozo fueron corregidas mediante la fórmula de Babbitt-Caldwell (Kresic, 1997).

Una vez corregida las pérdidas se utilizó el Software AcuíferTest v.4.2 para calibrar, mediante el análisis de Theis, las pruebas de bombeo y de esta forma obtener la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento para cada pozo.

En aquellos pozos donde no existe el detalle de la prueba de bombeo y sólo se presenta la curva de agotamiento del acuífero, la transmisividad se estimó de acuerdo a la fórmula de Razack & Huntley (1991). La Tabla 3.12 presenta los valores de transmisividad (T) y permeabilidad (K) calculados mediante las pruebas de bombeo por el DICTUC en el año 2010.

**Tabla 3.12**  
**Valores de Transmisividad**

<b>Código</b>	<b>Sector</b>	<b>Transmisividad (m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>Fuente</b>
WE-01	Río Ramadillas	303	*
WE-02	Río Ramadillas	56	*
WE-03	Río Ramadillas	447	*
WE-04	Río Pulido-Ramadillas	399	*
WEO-04	Río Pulido-Ramadillas	462	*
CCH-1	Iglesia Colorada	2.810	*
CCH-2	Iglesia Colorada	3.000	*
CCH-3	Iglesia Colorada	2.470	*
CCH-4	Iglesia Colorada	500	*
M-III-107	Jorquera	10.353	*
ND-305	Manflas	431	*
ND-326	Pulido	216	*
M-II-204	Pulido	2.381	*
ND-344	Pulido	803	*
M-III-097	San Antonio-Los Loros	1.266	*
M-III-051	Lautaro-San Antonio	3.435	*
M-III-168	Lautaro-San Antonio	561	*
ND-287	Lautaro-San Antonio	39.300	*
M-3-116	Lautaro-San Antonio	3.440	*
M-III-096	Lautaro-San Antonio	1.809	*
M-III-073	Lautaro-San Antonio	4.767	*
M-III-122	Lautaro-San Antonio	5.127	*
M-III-041	Lautaro-San Antonio	1.935	*
M-III-050	Lautaro-San Antonio	3.859	*
M-III-058	Lautaro-San Antonio	3.895	*
M-III-068	Lautaro-San Antonio	22.800	*
M-III-070	Lautaro-San Antonio	1.926	*
ND-229	Lautaro-San Antonio	1.073	*
M-3-115	Los Loros-La Puerta	6.452	*
ND-365	La Puerta-Mal Paso	5.758	*
ND-0302-282	Pulido	936	**
ND-0302-302	Pulido	565	**
ND-0302-287	Junta Jorquera, Pulido y Manflas	1.770	**
NR-0302-74	Junta Jorquera, Pulido y Manflas	427	**
ND-0302-229	Junta Jorquera, Pulido y Manflas	1.044	**
ND-0302-145	Paipote-La Brea	820	**

**Tabla 3.12**  
**Valores de Transmisividad. Continuación**

<b>Código</b>	<b>Sector</b>	<b>Transmisividad (m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>Fuente</b>
ND-0302-222	Paipote-La Brea	1.640	**
ND-0302-289	Lautaro-La Puerta	1.330	**
ND-0302-960	Lautaro-La Puerta	299	**
ND-0302-268	Lautaro-La Puerta	362	**
ND-0302-307	Lautaro-La Puerta	670	**
ND-0302-232	Pabellón-Mal Paso	1.097	**
ND-0302-272	Pabellón-Mal Paso	1.970	**
ND-0302-240	Pabellón-Mal Paso	642	**
ND-0302-364	Pabellón-Mal Paso	2.450	**
ND-0302-341	Pabellón-Mal Paso	10.900	**
ND-0302-313	Mal Paso-Copiapó	2.410	**
UA-0302-1(2)	Mal Paso-Copiapó	868	**
ND-0302-309	Copiapó-Piedra Colgada	3.820	**
ND-0302-288	Copiapó-Piedra Colgada	12.200	**
ND-0302-593	Copiapó-Piedra Colgada	1.170	**
ND-0302-635(2)	Piedra Colgada-Desembocadura	249	**
ND-0302-665	Copiapó-Piedra Colgada	149	**
ND-0302-594	Piedra Colgada-Desembocadura	1.590	**
ND-0302-603	Piedra Colgada-Desembocadura	513	**
ND-0302-329	Piedra Colgada-Desembocadura	997	**
ND-0302-599	Piedra Colgada-Desembocadura	289	**
ND-0302-577(1)	Piedra Colgada-Desembocadura	151	**
ND-0302-606(3)	Piedra Colgada-Desembocadura	143	**
ND-0302-606(2)	Piedra Colgada-Desembocadura	260	**
ND-0302-606(1)	Piedra Colgada-Desembocadura	101	**

(\*) SITAC (2006)

(\*\*) DICTUC (2010)

Fuente: SITAC (2006) y DICTUC (2010)

### **3.5.3.2 Permeabilidad (K)**

Se define la permeabilidad como el cociente entre transmisividad y el espesor saturado. La permeabilidad en los rellenos sedimentarios del valle del Río Copiapó fluctúa entre  $10^{-4}$  y  $2 \times 10^{-3}$  m/s (10 y 200 m/día) (SERNAGEOMIN, 1999). Sin embargo, los limos, arcillas y arenas que se depositan en las zonas colindantes a los cauces durante las inundaciones son mucho menos permeables y sus valores oscilan entre  $10^{-6}$  y  $10^{-5}$  m/s (SERNAGEOMIN, 1999), mientras que en las secciones superficiales de los depósitos fluvioaluviales la permeabilidad puede estar en un rango entre  $10^{-7}$  y  $10^{-5}$  m/s (Dames & Moore 1996, citado en SERNAGEOMIN 1999). Estos valores son los esperados para los rellenos sedimentarios (bolones grandes y pequeños, situados en las cabeceras, hasta limos y arcillas que se depositaron en las cercanías de la desembocadura) presentes en el valle.

En la Tabla 3.13 se presentan los valores de permeabilidad o conductividad hidráulica calculados por el DICTUC (2010) mediante pruebas de bombeo.

**Tabla 3.13**  
**Valores de Conductividad Hidráulica – DICTUC (2010)**

Código	WGS 84		Conductividad (m/d)
	UTM Este	UTM Norte	
ND-0302-282	414.742	6.884.195	17
ND-0302-302	407.563	6.895.221	19
ND-0302-287	401.580	6.904.987	21
NR-0302-74	400.839	6.905.251	27
ND-0302-229	400.365	6.909.931	15
ND-0302-145	399.689	6.910.781	22
ND-0302-222	399.487	6.911.477	25
ND-0302-289	397.907	6.914.045	27
ND-0302-960	394.758	6.916.883	4
ND-0302-268	391.678	6.920.439	9
ND-0302-307	391.188	6.920.839	46
ND-0302-232	387.303	6.924.263	20
ND-0302-272	385.282	6.928.292	39
ND-0302-240	383.922	6.929.192	15
ND-0302-364	382.300	6.932.605	33
ND-0302-341	376.523	6.945.164	300
ND-0302-313	374.579	6.965.575	63
UA-0302-1(2)	368.709	6.970.441	14
ND-0302-309	365.630	6.974.298	184
ND-0302-288	359.066	6.979.902	467
ND-0302-593	358.310	6.980.454	41
ND-0302-635(2)	356.199	6.980.927	5
ND-0302-665	354.433	6.979.671	5
ND-0302-594	348.465	6.975.698	119
ND-0302-603	346.948	6.975.670	34
ND-0302-329	344.562	6.976.016	24
ND-0302-599	339.518	6.974.302	19
ND-0302-577(1)	336.415	6.969.069	23
ND-0302-606(3)	324.080	6.975.085	3
ND-0302-606(2)	324.067	6.974.795	6
ND-0302-606(1)	323.235	6.974.626	2

Fuente: DICTUC (2010)

### **3.5.3.3 Coeficiente de Almacenamiento (S)**

El coeficiente de almacenamiento es el volumen del agua que un acuífero puede entregar o retener del depósito general por unidad de superficie del acuífero y por unidad de cambio en la componente normal a esa superficie. En un acuífero no confinado el coeficiente de almacenamiento se denomina como  $S_y$  y en el largo plazo puede ser aproximado a la porosidad eficaz.

Para la determinación del coeficiente de almacenamiento se cuenta con muy poca información, los datos disponibles (Álamos y Peralta, 1987) señalan cifras entre 0,016 y 0,11. Otros datos (Álamos y Peralta, 1995) indican valores medios de 0,05, 0,10 y 0,15. Por otra parte, se tiene que por la naturaleza libre descubierta en embalses subterráneos estudiados, cabe esperar que este coeficiente se ubique ente 0,10 y 0,20. En los cálculos realizados por DGA en 1995 y 2003 y SERNAGEOMIN en 1999 se asumió el valor de 0,10 como el más representativo del embalse subterráneo, estimándose que esta cifra era conservadora.

### **3.5.4 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común**

Los sectores hidrogeológicos que definen las secciones administrativas del acuífero fueron interpretadas por el estudio de Álamos y Peralta (1987), a partir de criterios hidrogeológicos en que las divisiones de los sectores corresponden a angostamientos del ancho del valle y disminución del espesor de acuífero debido al ascenso de la posición de la roca basal.

Debido a la condición húmeda del periodo en que se desarrolló este trabajo, en la mayoría de los límites de las secciones corresponden a sectores en que existían afloramientos de agua subterránea que alimentaban al caudal superficial del río Copiapó. Los afloramientos reconocidos e identificadas por el estudio de Álamos y Peralta (1987) corresponden a las zonas de La Puerta, Nantoco (Mal Paso), Copiapó, Piedra Colgada y Angostura.

Actualmente, los únicos afloramientos que siguen entregando aguas en forma importante al cauce superficial, son los de La Puerta y Angostura, siendo La Puerta la de más caudal y que constituye el flujo base del río Copiapó desde ese punto hacia aguas abajo. El resto de los afloramientos se han secado debido a la secuencia de años secos de los últimos años y al descenso del nivel estático causado tanto por el escurrimiento natural de las aguas subterráneas como por la explotación de estas aguas mediante pozos.

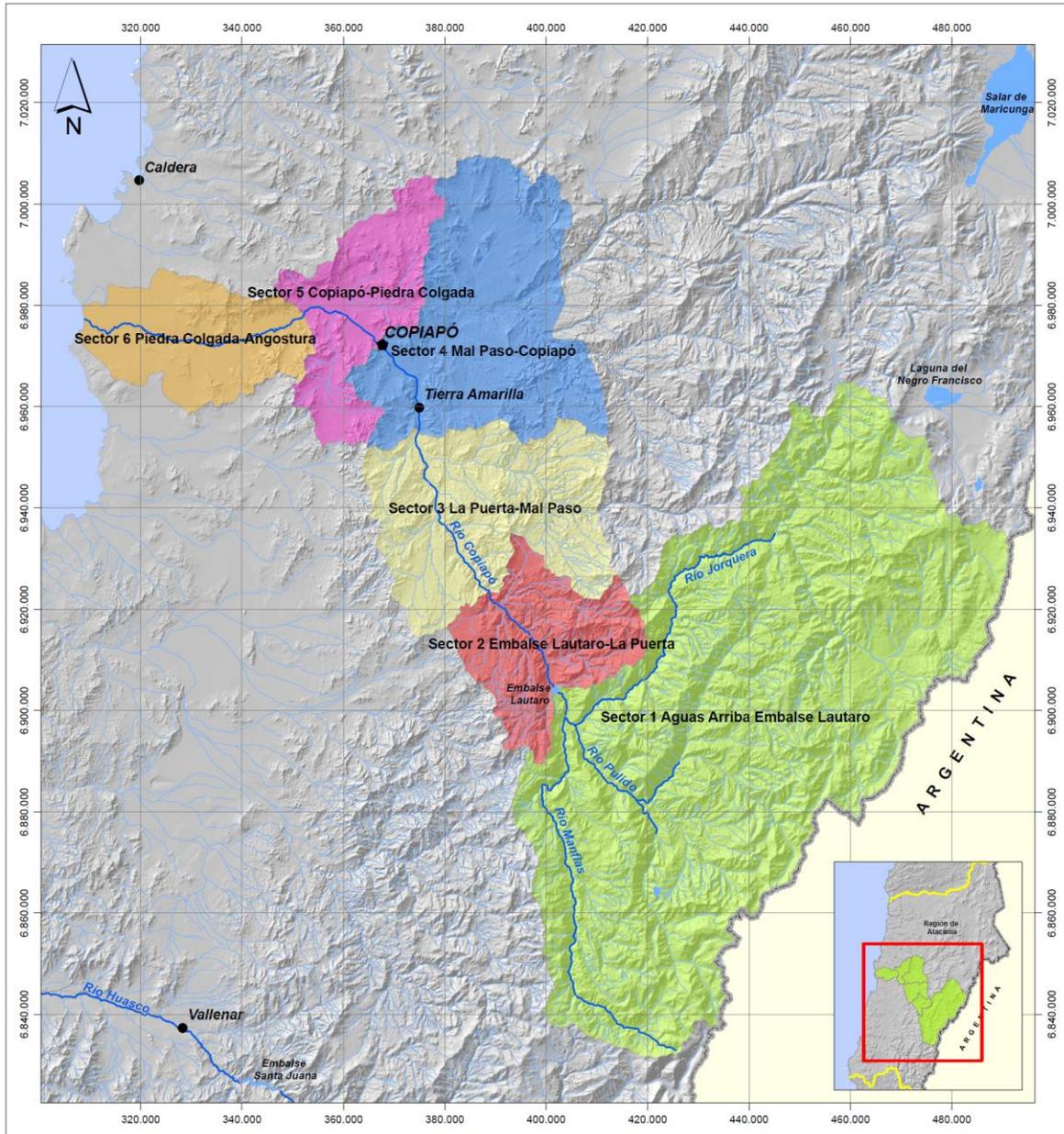
De acuerdo a la Minuta Técnica DGA N° 61 de 1997, y con el fin de realizar una mejor gestión de cuenca y explotar los recursos de manera sustentable, el valle del río Copiapó fue dividido en seis subsectores acuíferos, los que se presentan a continuación:

- Sector 1: Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro.
- Sector 2: Embalse Lautaro hasta la Puerta.
- Sector 3: La Puerta hasta Mal Paso.
- Sector 4: Mal Paso hasta Copiapó.
- Sector 5: Copiapó hasta Piedra Colgada.

- Sector 6: Piedra Colgada hasta Angostura.

La Tabla 3.14 muestra los límites administrativos que actualmente utiliza la Dirección General de Aguas para la administración de recursos hídricos de la cuenca.

**Figura 3.14**  
**Sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común DGA**



### **3.5.5 Niveles de Agua Subterránea**

#### **3.5.5.1 Generalidades**

Se recopiló, unificó y estructuró la información de niveles de 63 pozos de observación, cuya ubicación geográfica (coordenadas UTM, Datum WGS84), numeración correlativa, en función de la altitud, código BNA, altitud, sector del acuífero al que pertenecen, periodo histórico que abarca el registro de información y número de datos registrados, se presenta en la Tabla 3.14. En la Tabla 3.15 se muestra la localización de cada pozo en la zona de estudio.

Por lo general, el registro de datos se efectuó de manera mensual o quincenal. Las mediciones más antiguas datan del año 1930, pero la mayor parte de las mediciones comienza en la década de los '80. Para este estudio se han considerado los registros desde enero de 1970 hasta marzo de 2010. Varias de las estaciones fueron suspendidas debido a que los pozos se secaron. Sin embargo, no fueron reemplazadas por nuevos pozos de monitoreo.

Los cotas históricas observadas en las estaciones subterráneas de la DGA, agrupadas con la sectorización de Álamos y Peralta (1987), se presentan en las Figura 3.16 a Figura 3.21.

Para visualizar de mejor manera los niveles de agua subterránea en esta cuenca se consideró una escala vertical de 350 m. El Sector 1 antes indicado fue dividido en dos subsectores donde se agrupan los pozos con altitudes comprendidas entre los 1000 y 1350 msnm por un lado y entre 1300 y 1650 msnm por otro. En los otros cinco sectores no hubo problema con la presentación de los datos.

#### **3.5.5.2 Análisis de Información de Niveles por Sector**

##### **Sector 1**

Comprende al sector ubicado aguas arriba del embalse Lautaro, abarcando las subcuencas de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas. Contiene 8 pozos de la red de monitoreo, los cuales inician sus mediciones a partir del año 1986. Como se mencionó anteriormente, el Sector 1 se dividió en dos sectores para su mejor visualización.

En la Figura 3.16a, se muestra la profundidad del nivel del agua subterránea de los pozos del sector 1A. En esta figura se observa que los pozos presentan fluctuaciones de nivel que pueden ser atribuidas a la estacionalidad.

En la Figura 3.16b, se muestra la profundidad del nivel del agua subterránea de los pozos ubicados en el sector 1B. En esta figura se observa que los pozos presentan fluctuaciones de nivel que pueden ser atribuidas a la estacionalidad, pero con una tendencia a la profundización de los niveles.

En ambas figuras se observa, aproximadamente en los años 1997 y 1998, un alza en los niveles de agua, que podría asociarse a los eventos de precipitación que ocurrieron durante el año 1997.

## **Sector 2**

Corresponde al sector ubicado entre el embalse Lautaro y La Puerta. Contiene 7 pozos de la red de monitoreo, los cuales inician sus mediciones a partir del año 1971. En la Figura 3.17, se muestra la profundidad del nivel del agua subterránea de los pozos ubicados en el sector 2, observándose que el nivel del agua se ha mantenido constante para el período analizado.

## **Sector 3**

Corresponde al tramo del acuífero ubicado entre los sectores de La Puerta y Mal Paso. Contiene 9 pozos de la red de monitoreo, los cuales inician sus mediciones principalmente a partir de la década de los '70. En la Figura 3.18, se muestra la profundidad del nivel del agua subterránea de los pozos ubicados en el sector 3.

En la Figura 3.18 se observa que los pozos, a partir del año 1986, presentan una tendencia a la profundización de los niveles, exceptuando los pozos Parcela Nantoco y Canal Mal Paso, los cuales en todo el período de análisis presentan una profundidad relativamente pareja. En algunos pozos se observa un alza de los niveles de agua en los años 1997 y 1998, los que están asociados a los eventos de precipitación ocurridos en el año 1997.

## **Sector 4**

Corresponde al sector del acuífero que se encuentra entre Mal Paso y Copiapó. Consta de 10 pozos de monitoreo, los cuales inician sus mediciones a partir de la década de los '60. En la Figura 3.19, se muestra la profundidad del nivel del agua subterránea de los pozos ubicados en el sector 4. En esta figura se observan tendencias similares en el comportamiento de los pozos de monitoreo de este sector, presentándose un ascenso de los niveles en el año 1984 y luego un descenso a partir del año 1994.

## **Sector 5**

Corresponde al sector que se encuentra ubicado entre Copiapó y Piedra Colgada. Consta de 10 pozos de monitoreo, los cuales inician sus mediciones principalmente a partir de la década de los '70. En la Figura 3.20, se muestra la profundidad del nivel del agua subterránea de los pozos ubicados en el sector 5. En esta figura se observan tendencias similares en el comportamiento de los pozos de monitoreo de este sector, presentándose un ascenso de los niveles en el año 1984 y luego un descenso a partir del año 1988.

## **Sector 6**

Corresponde al sector acuífero ubicado entre Piedra Colgada y Angostura. Consta de 19 pozos de monitoreo, los cuales inician sus mediciones a partir de la década de los '60. En la Figura 3.21, se muestra la profundidad del nivel del agua subterránea de los pozos ubicados en el sector 6, observándose que el nivel del agua se ha mantenido constante para el período analizado.

**Tabla 3.14**  
**Pozos de Observación Cuenca Río Copiapó**

Nº	Código BNA	NOMBRE	WGS 84		Altitud	Desde	Hasta	Nº Datos	Sector
			UTM Este	UTM Norte					
1	03414005-7	Iglesia Colorada	414.758	6.884.116	1.600	10/11/1986	02/03/2010	215	1 A
2	03414004-9	Quebrada Seca	411.888	6.886.283	1.500	10/11/1986	02/03/2010	196	1 A
3	03421006-3	Hacienda Manflas	403.276	6.886.921	1.421	10/11/1986	02/03/2010	203	1 A
4	03421005-5	Hacienda Manflas (Manflas Antes)	403.714	6.891.839	1.298	10/11/1986	02/03/2010	200	1 B
5	03404003-6	Fundo Rodeo	407.450	6.898.067	1.250	10/11/1986	02/03/2010	142	1 B
6	03414003-0	Hosteria Cabo de Hornos	406.121	6.896.100	1.240	27/02/1989	09/09/1997	68	1 B
7	03430012-7	Junta Manflas	403.592	6.898.054	1.195	27/02/1989	02/03/2010	175	1 B
8	03430013-5	Algarrobo La Virgen	403.892	6.902.277	1.151	10/11/1986	03/03/2010	202	1 B
9	03430014-3	Embalse Lautaro	401.541	6.904.757	1.111	10/11/1986	03/03/2010	98	2
10	03430008-9	Quebrada Calquis	400.071	6.910.157	1.071	28/05/1971	15/01/2010	273	2
11	03430011-9	Pueblo San Antonio	396.120	6.915.864	1.008	28/05/1971	03/03/2010	188	2
12	03430015-1	Fundo San Antonio	396.321	6.915.787	1.003	17/01/1989	27/02/1989	2	2
13	03430009-7	Vegas El Giro	394.750	6.916.908	988	28/05/1971	28/03/2002	228	2
14	03430010-0	Escuela 17 Los Loros	390.934	6.921.084	955	28/05/1971	03/03/2010	300	2
15	03431009-2	Fundo La Puerta	388.880	6.923.454	880	09/10/1974	15/01/2010	244	2
16	03431005-K	Hornitos	384.938	6.927.902	820	09/10/1974	12/02/1998	40	3
17	03431011-4	Hornitos (Rojas)	383.848	6.929.449	792	16/10/1986	04/03/2010	142	3
18	03431006-8	Planta Elisa de Bordos	382.038	6.933.530	748	09/10/1974	03/03/2010	282	3
19	03431007-6	Villa María - Hornitos	379.525	6.936.358	712	04/05/1975	04/03/2010	249	3
20	03431008-4	Pabellón	378.647	6.942.382	652	25/01/1979	04/03/2010	222	3
21	03431010-6	Quebrada Cerrillos	376.663	6.949.687	598	18/03/1963	15/01/2010	269	3
22	03431012-2	Quebrada Cerrillos Amancay	376.753	6.949.611	598	30/01/2006	04/03/2010	49	3
23	03434005-6	Parcela 8 Nantoco	374.747	6.952.915	549	09/06/1930	22/12/1999	267	3
24	03434006-4	Canal Mal Paso	374.819	6.955.219	528	10/11/1970	27/09/2002	248	3

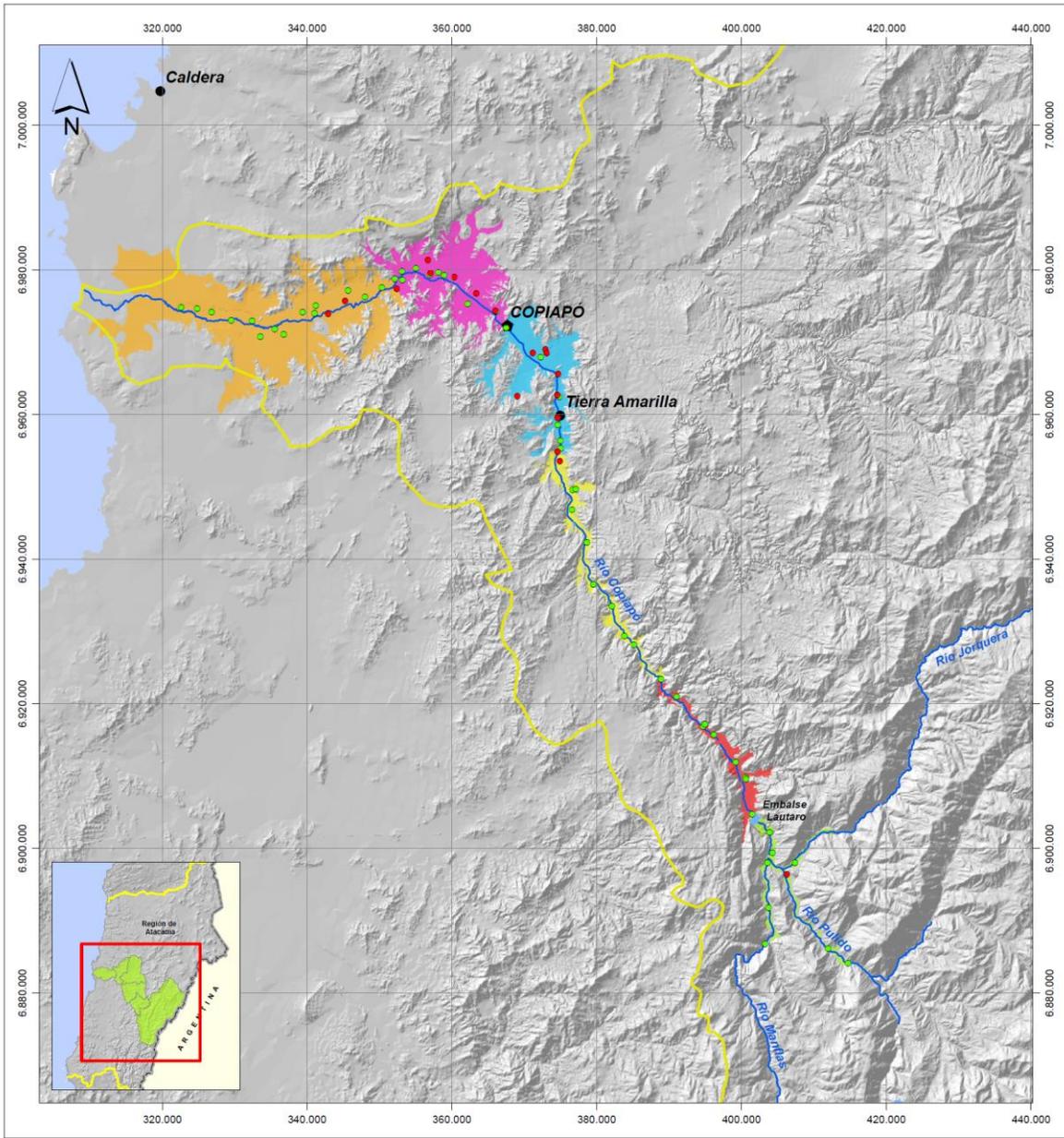
**Tabla 3.14**  
**Pozos de Observación Cuenca Río Copiapó. Continuación**

Nº	Código BNA	NOMBRE	WGS 84		Altitud	Desde	Hasta	Nº Datos	Sector
			UTM Este	UTM Norte					
25	03434007-2	Fundo Palermo	374.637	6.958.930	496	14/10/1966	08/02/1994	225	4
26	03434008-0	Alcaparrosa	374.703	6.962.322	468	09/10/1974	28/09/2000	245	4
27	03434009-9	Punta Negra	374.491	6.965.730	443	09/10/1974	07/07/1994	198	4
28	03445001-3	Cruce Paipote	373.877	6.967.925	439	13/01/1973	06/09/1985	36	4
29	03450006-1	Pueblo San Fernando (Fundo el Sauce)	372.702	6.967.297	435	15/11/1966	26/07/2001	234	4
30	03450015-0	Pueblo San Fernando (Las Cañas)	372.237	6.968.087	429	21/10/1961	04/03/2010	313	4
31	03450005-3	Pueblo San Fernando A18	371.412	6.968.565	421	15/11/1966	11/01/2010	302	4
32	03450007-K	Plazuela Sierra Alta	370.146	6.970.207	405	14/11/1980	28/09/2000	214	4
33	03450017-7	Planta Castellón	368.046	6.970.092	402	09/06/1987	21/11/2001	124	4
34	03450009-6	Recinto Endesa	367.894	6.969.986	384	30/06/1930	30/12/1988	93	4
35	03450008-8	La Chimba	366.097	6.974.750	351	11/06/1930	18/04/1997	230	5
36	03450010-K	Fundo Renacer (Bodega)	363.495	6.975.201	336	10/10/1974	28/03/1989	69	5
37	03450012-6	Hacienda Bodega 1	363.064	6.976.128	330	17/01/1986	22/10/1996	123	5
38	03450016-9	Valle Dorado	362.222	6.975.250	324	11/06/1987	05/03/2010	176	5
39	03450014-2	Hacienda Bodega 2	361.534	6.978.565	313	10/01/1967	17/07/1985	131	5
40	03450013-4	Aeropuerto Copiapó	359.855	6.979.186	300	04/08/1974	13/12/1999	216	5
41	03451003-2	Hacienda Chamonate	358.407	6.980.840	290	10/10/1974	10/11/1995	189	5
42	03451005-9	Hacienda Toledo	356.977	6.979.347	288	11/11/1980	11/01/2010	225	5
43	03451010-5	Chamonate 14	356.598	6.981.231	282	18/05/1987	19/06/1995	95	5
44	03450011-8	Fundo Santa Luisa 2 (Vegas de Lo Aguirre)	371.097	6.978.976	267	10/05/1982	29/12/1988	73	5
45	03451004-0	Hacienda San Francisco	355.008	6.980.223	274	20/10/1980	05/03/2010	252	6
46	03451011-3	Piedra Colgada (13)	353.054	6.979.865	264	18/05/1987	11/01/2010	153	6
47	03451012-1	Noria Santelices	353.141	6.978.571	257	11/06/1987	05/03/2010	176	6
48	03451013-K	Fundo El Carmen 12	352.404	6.976.977	248	18/05/1987	23/02/1999	131	6

**Tabla 3.14**  
**Pozos de Observación Cuenca Río Copiapó. Continuación**

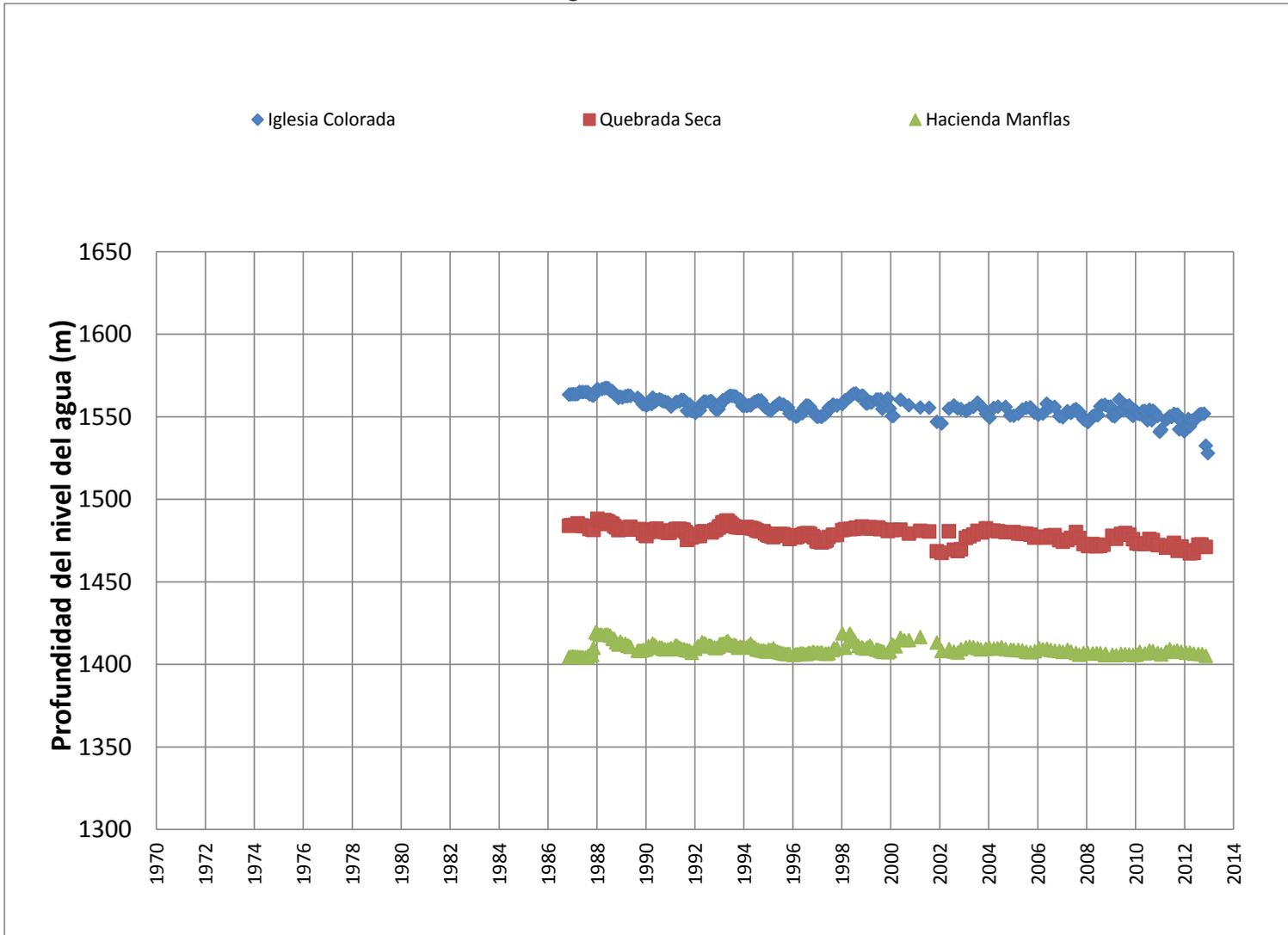
Nº	Código BNA	NOMBRE	WGS 84		Altitud	Desde	Hasta	Nº Datos	Sector
			UTM Este	UTM Norte					
49	03451006-7	Fundo San Juan	350.324	6.977.622	234	15/11/1966	05/03/2010	314	6
50	03451014-8	San Pedro (11)	345.612	6.977.245	213	18/05/1987	11/01/2010	154	6
51	03451007-5	Fundo San Pedro	345.647	6.977.211	212	10/02/1967	21/11/2001	253	6
52	03451015-6	Hacienda Perales 10	342.453	6.973.334	199	18/05/1987	22/05/2000	139	6
53	03451016-4	Hacienda Margarita (Matamoros)	341.198	6.975.125	188	14/02/1989	17/11/2003	115	6
54	03451008-3	Hacienda Margarita	340.994	6.974.020	189	11/06/1930	11/01/2010	320	6
55	03451017-2	Valle Fértil (7)	336.802	6.971.141	179	08/06/1987	05/03/2010	183	6
56	03451018-0	San Camilo (8)	335.566	6.971.869	164	18/05/1987	12/01/2010	180	6
57	03451019-9	San Camilo (6)	333.561	6.970.781	159	18/05/1987	05/03/2010	198	6
58	03451020-2	Punta Picazo (5)	332.380	6.973.062	148	18/05/1987	05/03/2010	197	6
59	03451021-0	Monte Amargo (2)	329.518	6.973.114	133	18/05/1987	05/03/2010	166	6
60	03453005-K	Hacienda María Isabel (4)	326.770	6.974.247	121	18/05/1987	05/03/2010	203	6
61	03453006-8	Hacienda María Isabel (3)	324.858	6.974.666	105	18/05/1987	05/03/2010	195	6
62	03453007-6	Hacienda María Isabel (1)	322.648	6.974.774	95	18/05/1987	05/03/2010	191	6
63	03451009-1	Hacienda María Isabel	330.824	6.972.334	89	15/07/1964	29/05/2001	55	6

**Figura 3.15**  
**Ubicación Pozos de Observación**

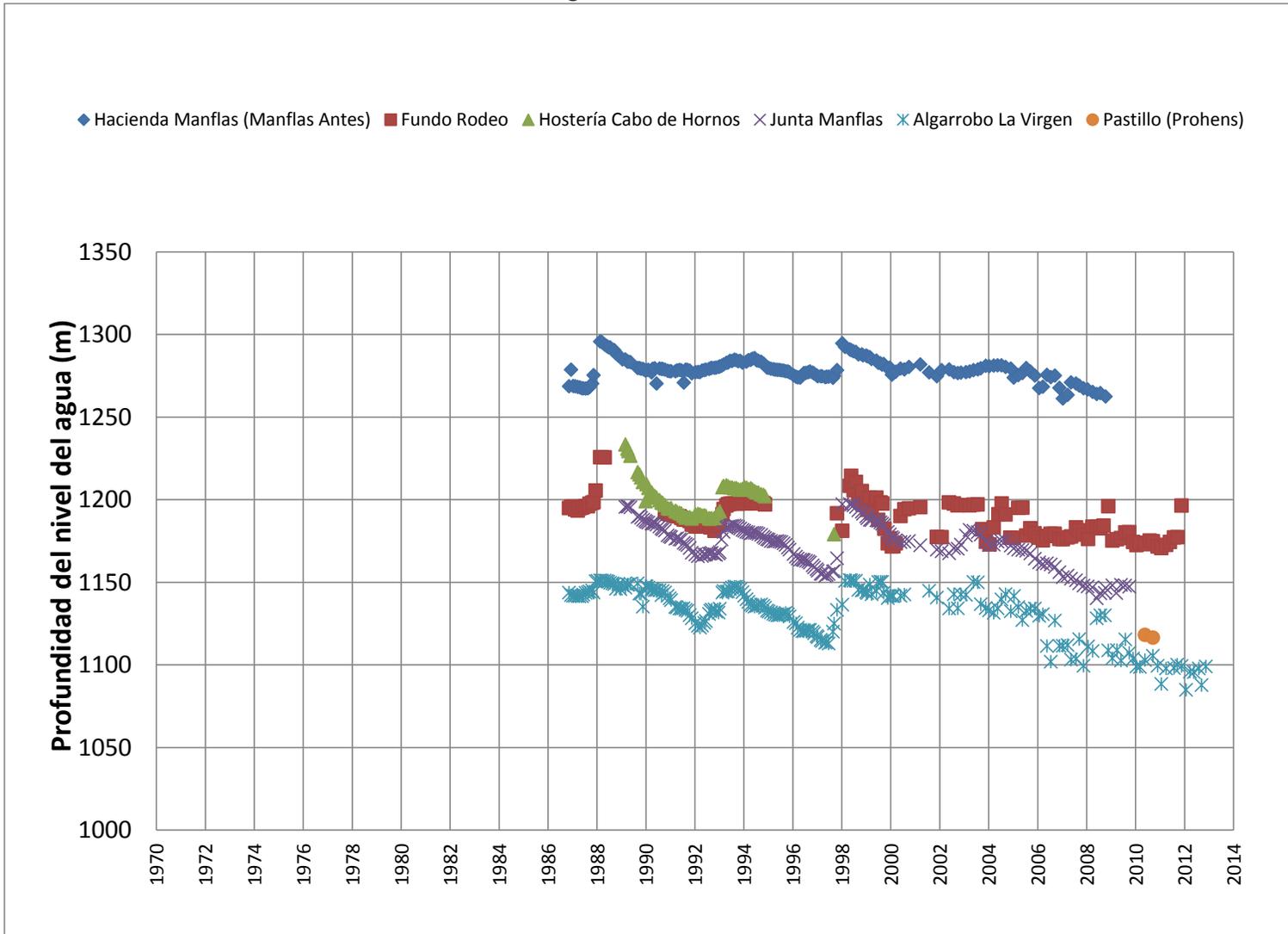


<p><b>Simbología</b></p> <p>1. División Política Administrativa</p> <p>2. Hidrología</p> <p>3. Centros poblados</p> <p>4. Cuenca hidrográfica</p> <p>5. Relienu sedimentario (DICTUC) por sectores hidrogeológicos</p> <p>6. Pozos de observación (DGA)</p>	 <p><b>DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS</b> <b>MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS</b></p>
<p>● Capital regional</p> <p>● Centros poblados principales</p> <p>● Vigentes</p> <p>● No vigentes</p> <p>Escala 1:700.000</p> 	<p><b>POZOS DE OBSERVACIÓN</b> <b>ACUÍFERO DEL RÍO COPIAPO</b></p> <p>Fuente: Base Cartográfica (MOP, 2012) Proyección: Universal Transversal de Mercator (UTM) Datum: Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84) Huso: 19 Sur</p> <p><b>MAPA N° 7</b></p> <p>Fecha: Octubre del 2013</p> 

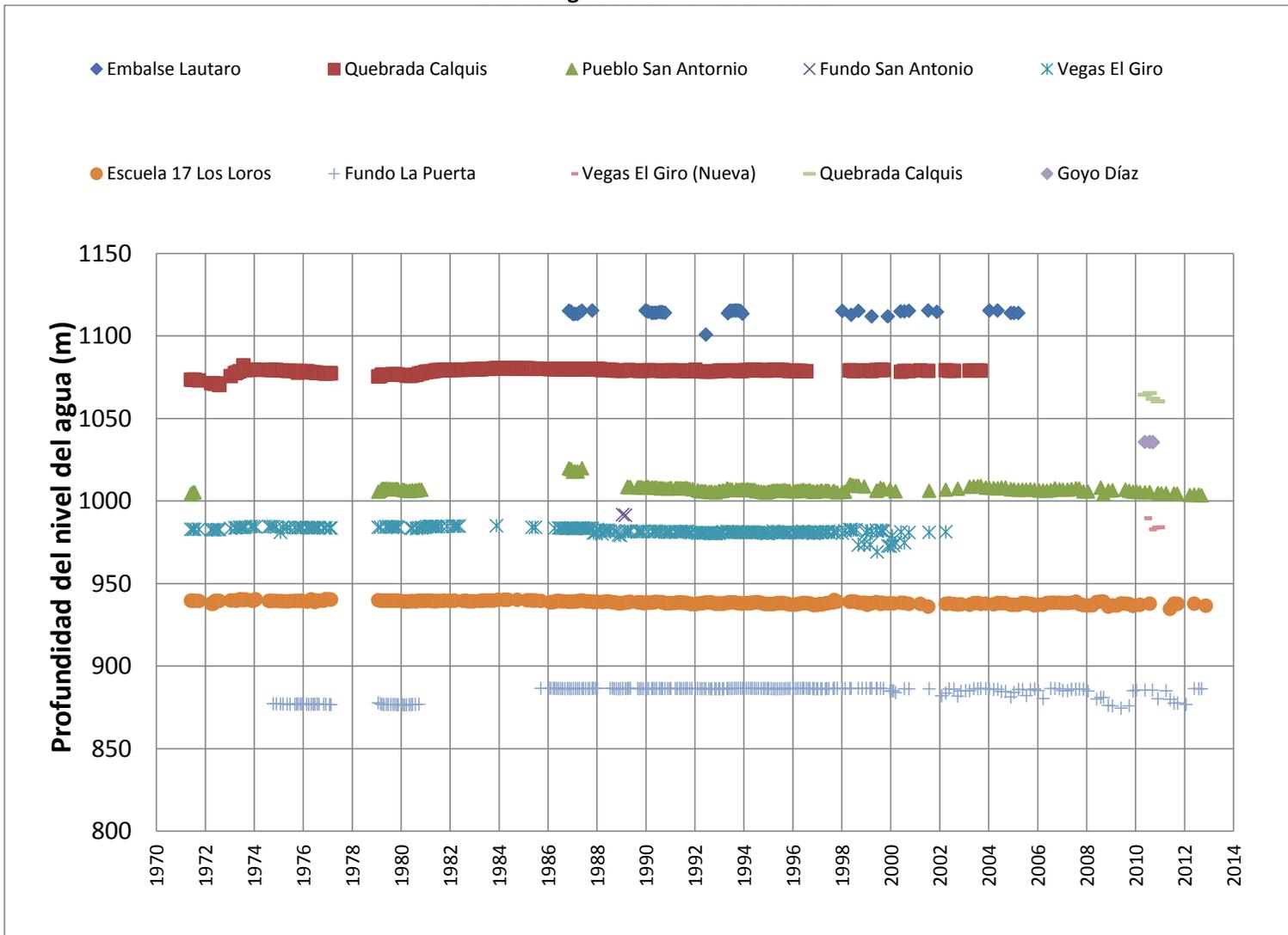
**Figura 3.16a**  
**Niveles de Agua Subterránea en Sector 1**



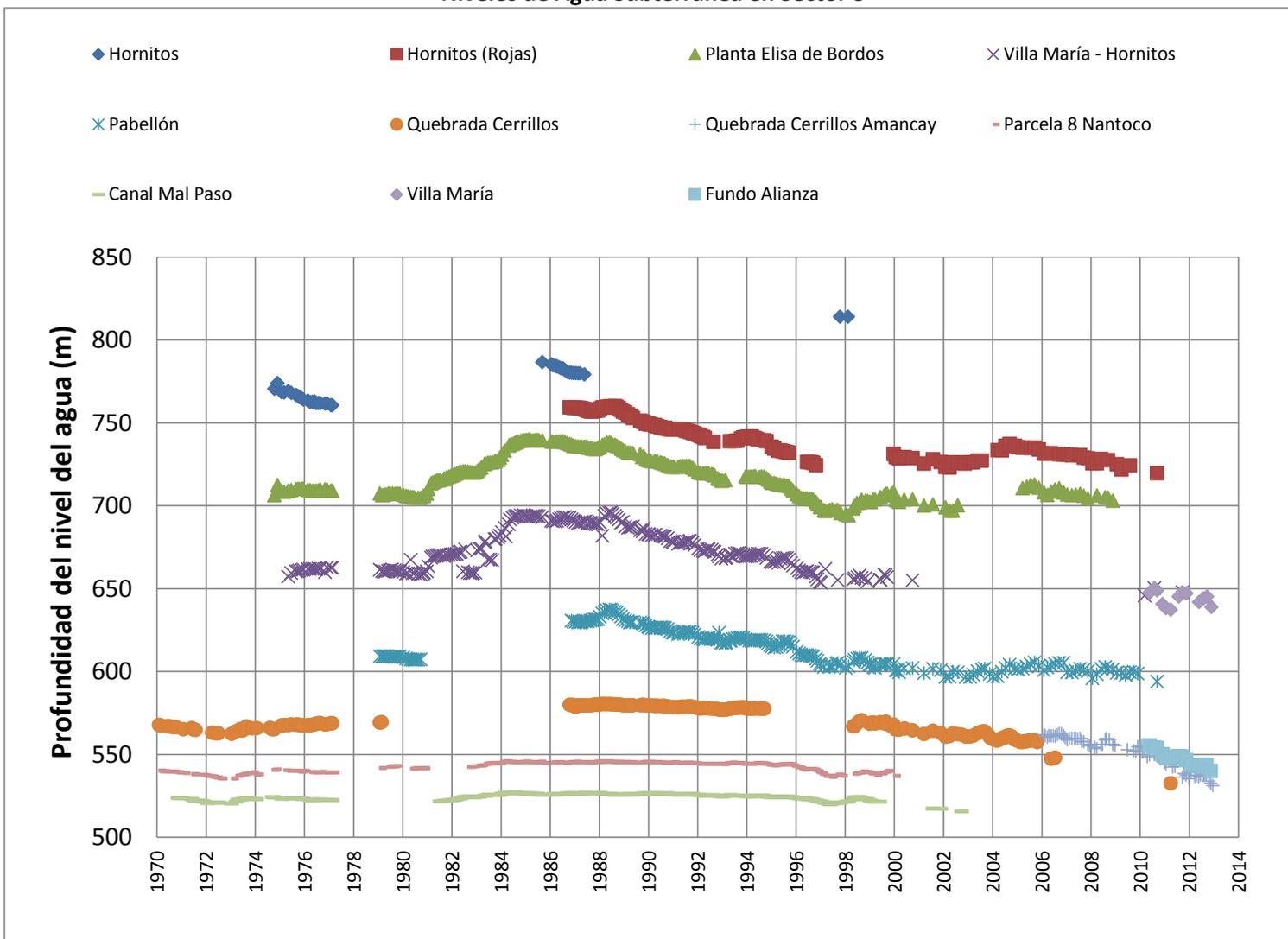
**Figura 3.16b**  
**Niveles de Agua Subterránea en Sector 1**



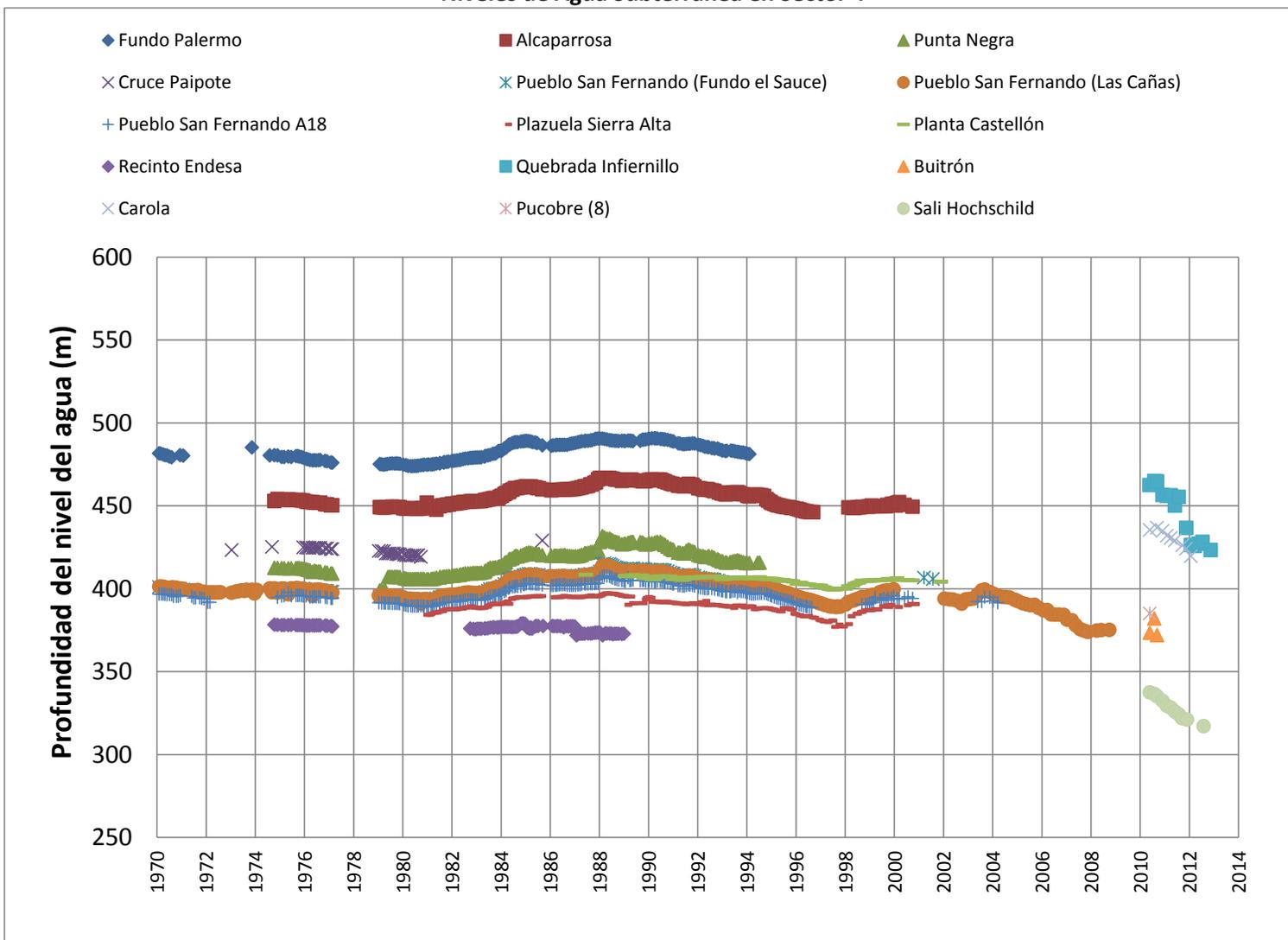
**Figura 3.17**  
**Niveles de Agua Subterránea en Sector 2**



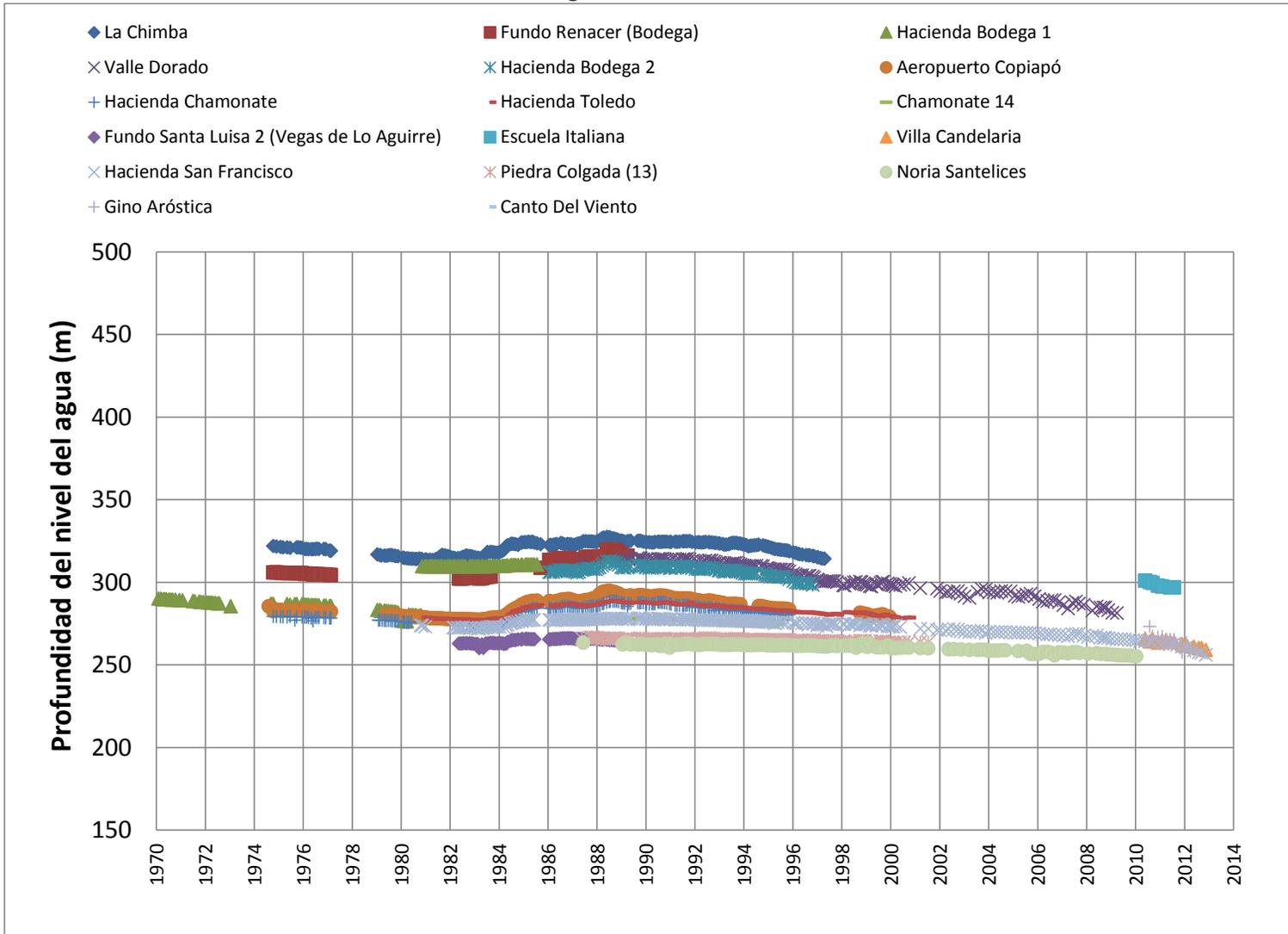
**Figura 3.18**  
**Niveles de Agua Subterránea en Sector 3**



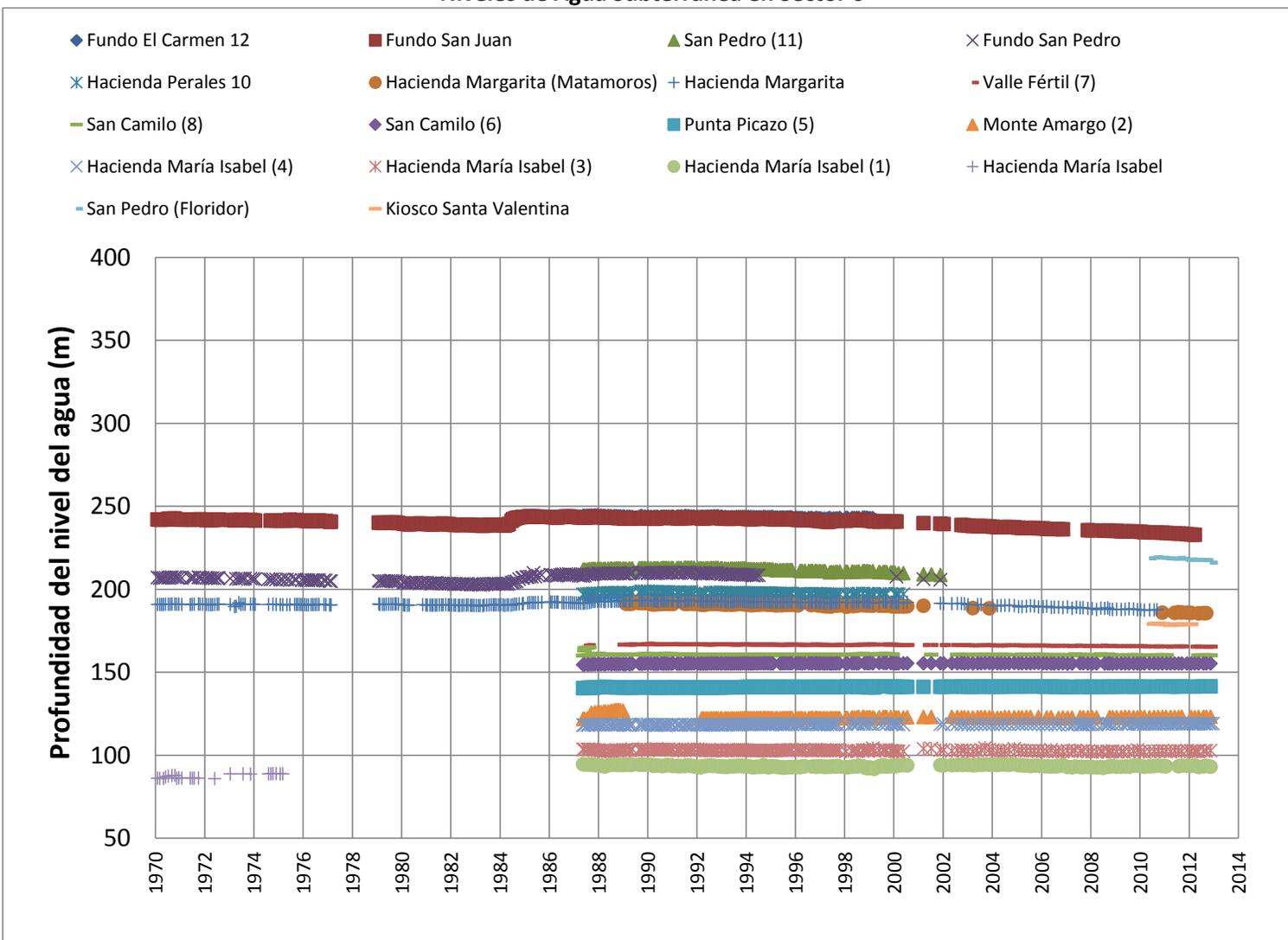
**Figura 3.19**  
**Niveles de Agua Subterránea en Sector 4**



**Figura 3.20**  
**Niveles de Agua Subterránea en Sector 5**



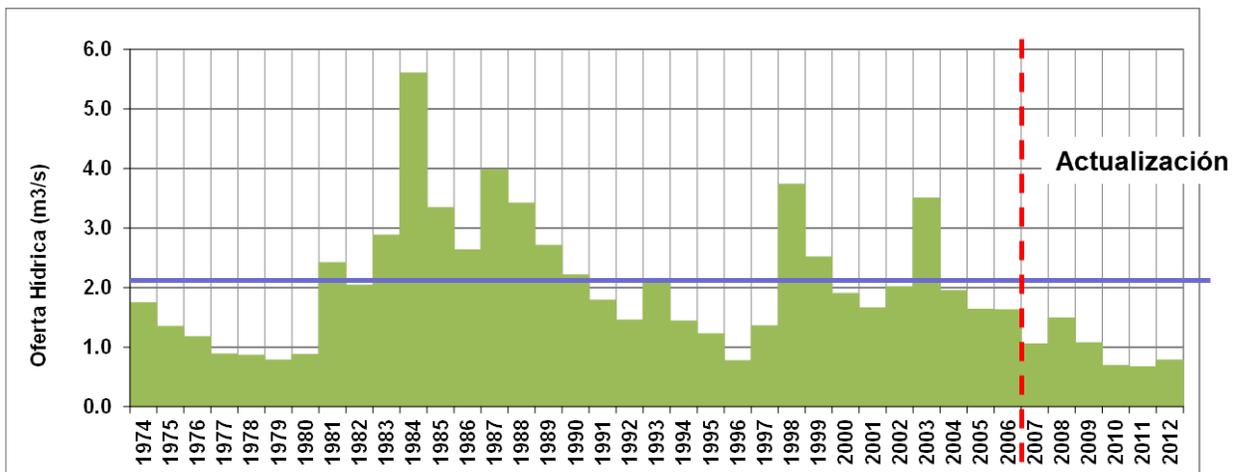
**Figura 3.21**  
**Niveles de Agua Subterránea en Sector 6**



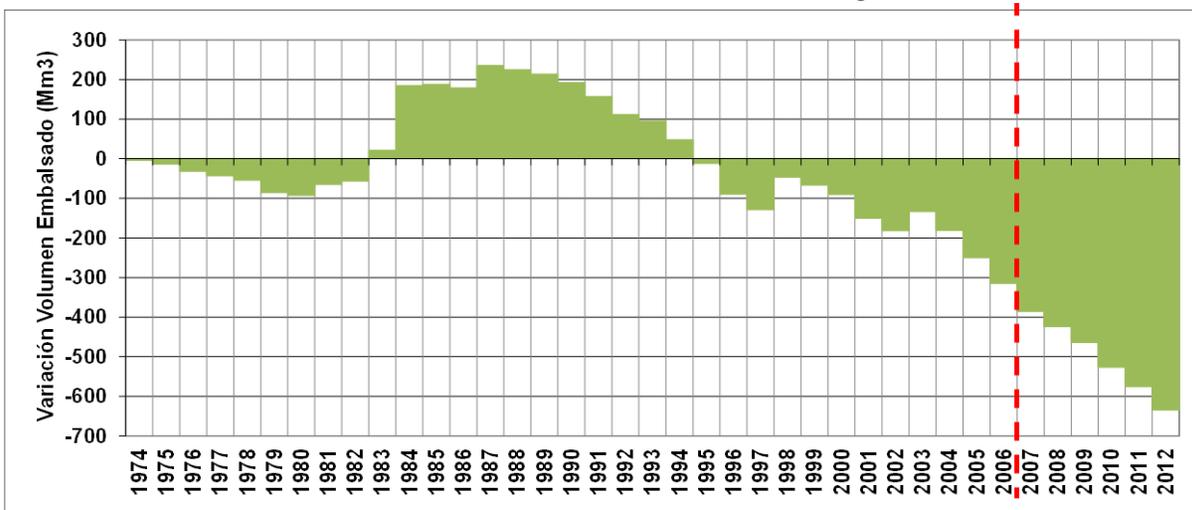
### 3.6 Balance Hídrico Sector La Puerta - Angostura

Se utilizó la información hidrométrica de la DGA para actualizar la información relevante para el balance hídrico del acuífero de Copiapó, específicamente para los sectores ubicados entre La Puerta y Angostura, que corresponden a la parte más crítica en lo que respecta a la oferta de aguas subterráneas. Para ello, se siguió la metodología implementada por DGA-DICTUC (2010) para actualizar los valores entre 2007-2011. La Figura 3.22 muestra la oferta hídrica del sistema La Puerta - Angostura, definida para este análisis como la diferencia de los caudales medidos entre las estaciones fluviométricas de la DGA en las secciones de control Copiapó en La Puerta y Copiapó en Angostura, respectivamente. El objetivo de este gráfico es identificar los montos de caudales del escurrimiento superficial que quedaron en esta zona, ya sea por consumo o recarga al acuífero. La Figura 3.23 muestra la variación de volumen embalsado interpretando los datos de niveles de agua subterránea contenida de la red hidrométrica de la DGA.

**Figura 3.22**  
**Oferta Hídrica de Agua Sector La Puerta - Angostura**



**Figura 3.23**  
**Variación de Volumen Embalsado La Puerta - Angostura**

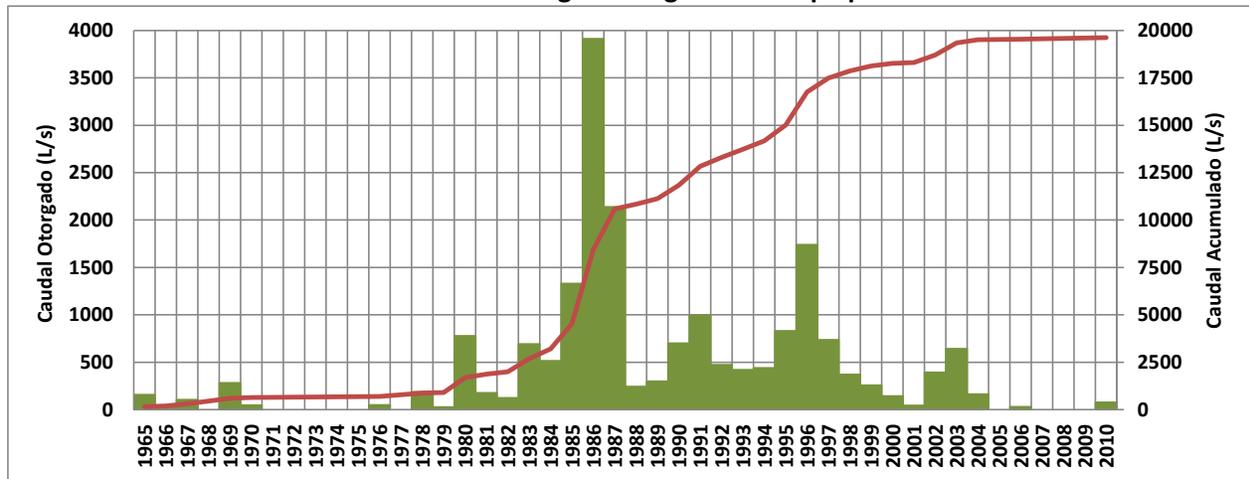


De la interpretación conceptual de éstos gráficos, se desprende de la Figura 3.22 que la oferta hídrica media del sistema La Puerta - Angostura es de 2,1 m<sup>3</sup>/s, considerando que entre los años 1984 a 1989 existió un período húmedo en Copiapó, lo que se reflejó en importantes caudales superficiales, que

recargaron fuertemente el acuífero de Copiapó. Este efecto se aprecia en la Figura 3.23, en que coincidentemente, en el mismo periodo 1984 – 1989, el acuífero aumentó su volumen embalsado hasta llegar a contener 200 Hm<sup>3</sup> más que en el año 1974.

La Figura 3.24 muestra los derechos de agua subterránea otorgados en la Cuenca del río Copiapó. En esta figura se aprecia el alto porcentaje de derechos otorgados ente 1985 y 1987, coincidentemente con el periodo húmedo existente en Copiapó y la expansión agrícola debido a la llegada de la uva de mesa.

**Figura 3.24**  
**Derechos de Agua Otorgados en Copiapó**



A partir del año 1990, nunca más existió en Copiapó una secuencia de años húmedos como la anteriormente descrita, lo que sumado al aumento en la explotación debido a las fuertes presiones por otorgamiento de derechos de agua producto de la expansión agrícola de la uva de mesa, han generado disminuciones sostenidas de los niveles de agua subterránea y los volúmenes embalsados, que se estiman en una reducción de 300 Hm<sup>3</sup> menos que el año 1974 para el año 2006 y de acuerdo a ésta actualización, se estima en 600 Hm<sup>3</sup> menos que el año 1974 para el año 2012.

Realizando un balance hídrico general para el sistema La Puerta – Angostura, considerando dos periodos de interés, uno histórico comprendido entre 1990–2012 y una situación actual comprendida entre 2005–2012, es posible conocer el comportamiento del acuífero.

Considerando que el balance hídrico está dado por la siguiente expresión:

$$O - C = \Delta S$$

Donde “O” corresponde a la oferta hídrica que se muestra en la Figura 3.22, “C” es el consumo de agua entre La Puerta y Angostura, y “ΔS” es el consumo de almacenamiento desde el acuífero que se muestra en la Figura 3.23. Por lo tanto, conocida la oferta y pérdida de almacenamiento es posible conocer el consumo de agua.

La Tabla 3.15 muestra la estimación del balance hídrico, considerando ambos periodos de interés. De este balance, se obtiene que el consumo de agua del sistema La Puerta-Angostura es de 2,9 m<sup>3</sup>/s. Otro aspecto relevante, es la disminución de la oferta hídrica que ha existido los últimos años debido al déficit hidrológico expresado en la estación de Copiapó en La Puerta, lo que se traduce en un aumento significativo del uso de aguas subterráneas para compensar el déficit de agua superficial.

**Tabla 3.15**  
**Balance Hídrico La Puerta Angostura**

Componente	Balance Hídrico	
	1990-2012	2005-2012
$\Delta t$ (años)	22	7
$\Delta V$ (Hm <sup>3</sup> )	827	385
$\Delta S$ (Hm <sup>3</sup> /año)	38	55
$\Delta S$ (m <sup>3</sup> /s)	1,2	1,7
O (m <sup>3</sup> /s)	1,7	1,2
C (m <sup>3</sup> /s)	2,9	2,9

Fuente: Elaboración Propia

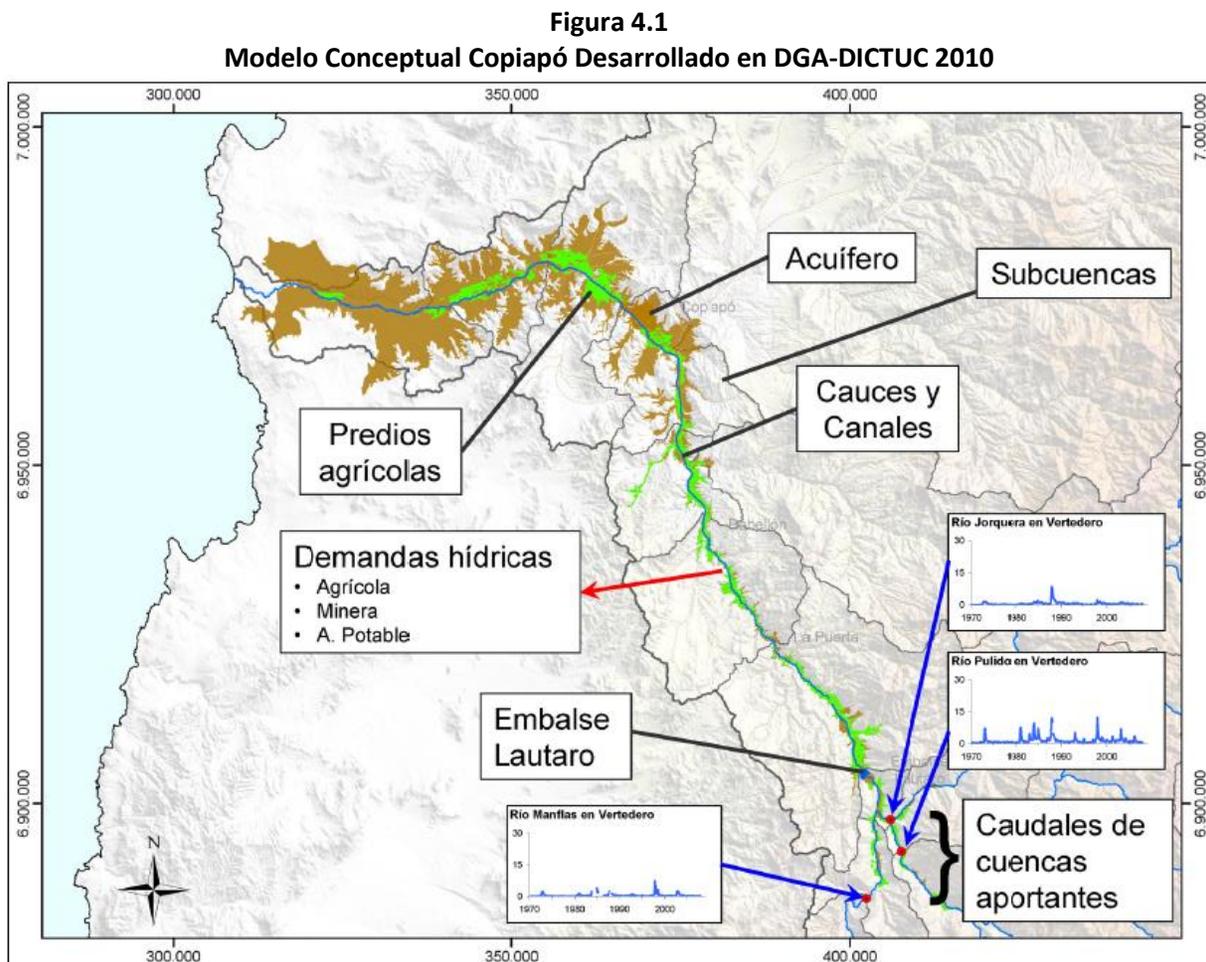
## 4. MODELO OPERACIONAL AQUATOOL

### 4.1 Aspectos Generales

En este proyecto se ha utilizado el modelo operacional AQUATOOL desarrollado por DICTUC (2010) para la DGA. Este modelo representa de forma muy robusta el balance hídrico de la cuenca del río Copiapó, bajo la operación del flujo superficial y subterráneo. Entre los principales elementos utilizados para la definición de la topología del sistema de modelación, se tiene:

- Caudales aportantes en cuencas de cabecera y aportes intermedios
- Cauces y canales
- Embalse Lautaro
- Zonas de demanda agrícolas, mineras y de agua potable
- Acuíferos

La Figura 4.1 muestra el modelo conceptual simplificado utilizado para el desarrollo del modelo AQUATOOL en la cuenca del río Copiapó



Fuente: DICTUC 2010

### 4.2 Descripción General del Modelo Operacional AQUATOOL

El modelo operacional AQUATOOL fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), con el fin de evaluar la operación de cuencas y el uso optimizado de las aguas superficiales y subterráneas.

AQUATOOL posee distintos elementos que permiten representar la topología de los sistemas superficiales. Algunos de los elementos principales utilizados en el modelo de Copiapó son nodos, conducciones, embalse, zonas de demanda, tomas, retornos, aportes de agua y acuíferos. La Tabla 4.1 muestra los tipos de elementos utilizados en la modelación de AQUATOOL.

**Tabla 4.1**  
**Elementos utilizados en el modelo operacional AQUATOOL del acuífero de Copiapó**

Elemento	Tipo	Número de Elementos
Nodos		87
Aportes		35
Conducciones	Tipo 1	5
	Tipo 2	63
	Tipo 3	11
Embalses		1
Retornos		1
Zonas de Demanda	Riego	20
	Agua Potable	5
	Minería	5
	Industria	2
Acuíferos		11

Fuente: Elaboración Propia.

Los nodos fueron diseñados en aquellos puntos en que se requieren balances de agua. En estos nodos confluyen tramos de río (conducciones), tomas de agua a zonas de demandas, retornos, afloramientos de acuíferos, entre otros. Algunos de los nodos son coincidentes con las estaciones fluviométricas de la DGA, de modo que permitan la comparación de los caudales simulados con los caudales observados en las estaciones.

Las conducciones fueron implementadas con el objetivo de simular el flujo de agua por los tramos del río Copiapó, canales de riego, afloramientos y flujos subterráneos que conectan acuíferos, entre otros. El elemento embalse corresponde a la representación del embalse Lautaro, que posee un elemento de retorno de agua en función de los vertimientos en épocas de abundancia.

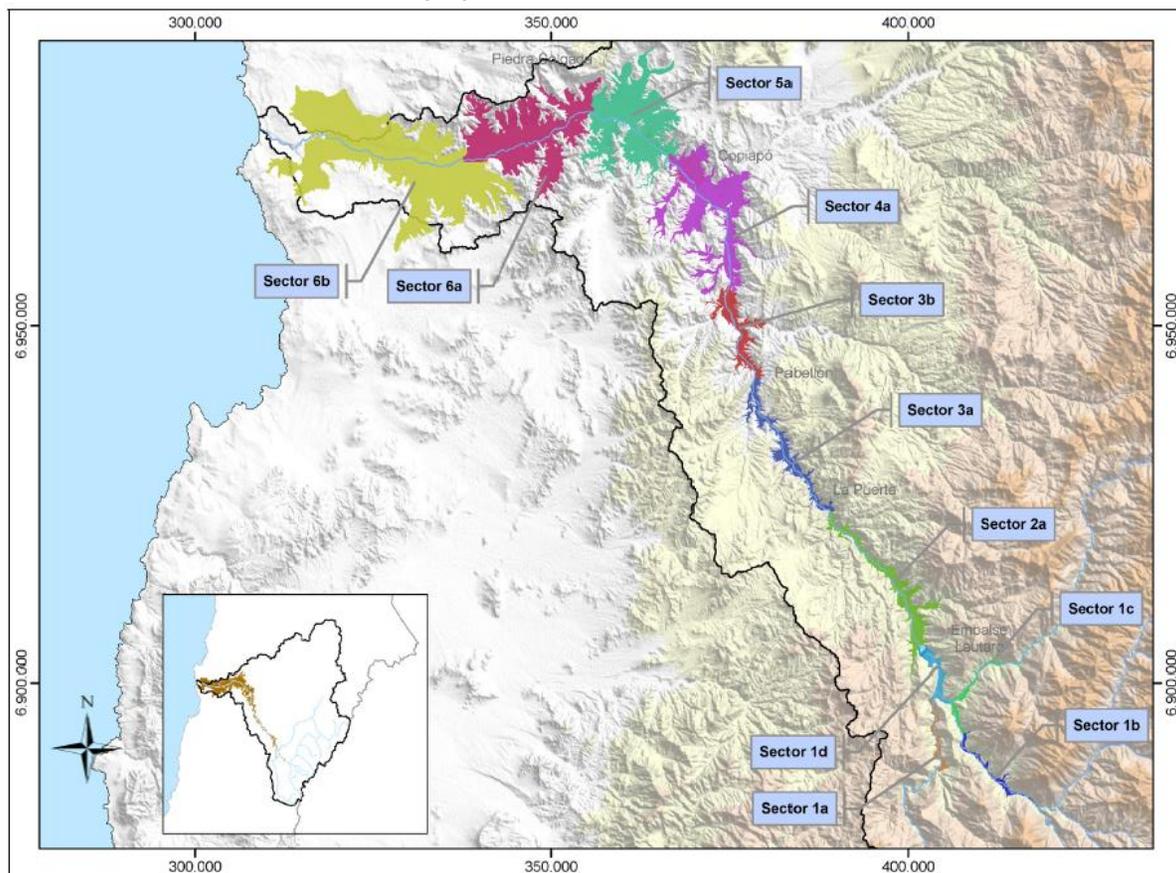
La sectorización de los acuíferos identificada en el estudio DGA-DICTUC (2010) se llevó a cabo en función del comportamiento histórico de los niveles de agua subterránea, tomando como punto de partida los 6 sectores propuestos por Álamos y Peralta (1987). Del análisis de la información, DICTUC (2010) definió 11 sectores para el acuífero del valle del Copiapó, los que se presentan en la Figura 4.2. La Tabla 4.2 resume la información de los acuíferos del estudio DGA-DICTUC (2010).

**Tabla 4.2**  
**Acuíferos Definidos en el modelo operacional AQUATOOL del acuífero de Copiapó**

Acuífero DGA	Sector DICTUC 2010	Nombre Sector
1	1a	Río Manflas – Junta
	1b	Río Pulido
	1c	Río Jorquera
	1d	Junta –Lautaro
2	2a	Lautaro - La Puerta
3	3a	La Puerta –Pabellón
	3b	Pabellón - Mal Paso
4	4a	Mal Paso – Copiapó
5	5a	Copiapó - Piedra Colgada
6	6a	Piedra Colgada - Valle Fértil
	6b	Valle Fértil – Angostura

Fuente: Elaboración Propia a partir de DICTUC (2010).

**Figura 4.2**  
**Acuíferos Copiapó Desarrollado en DGA-DICTUC 2010**

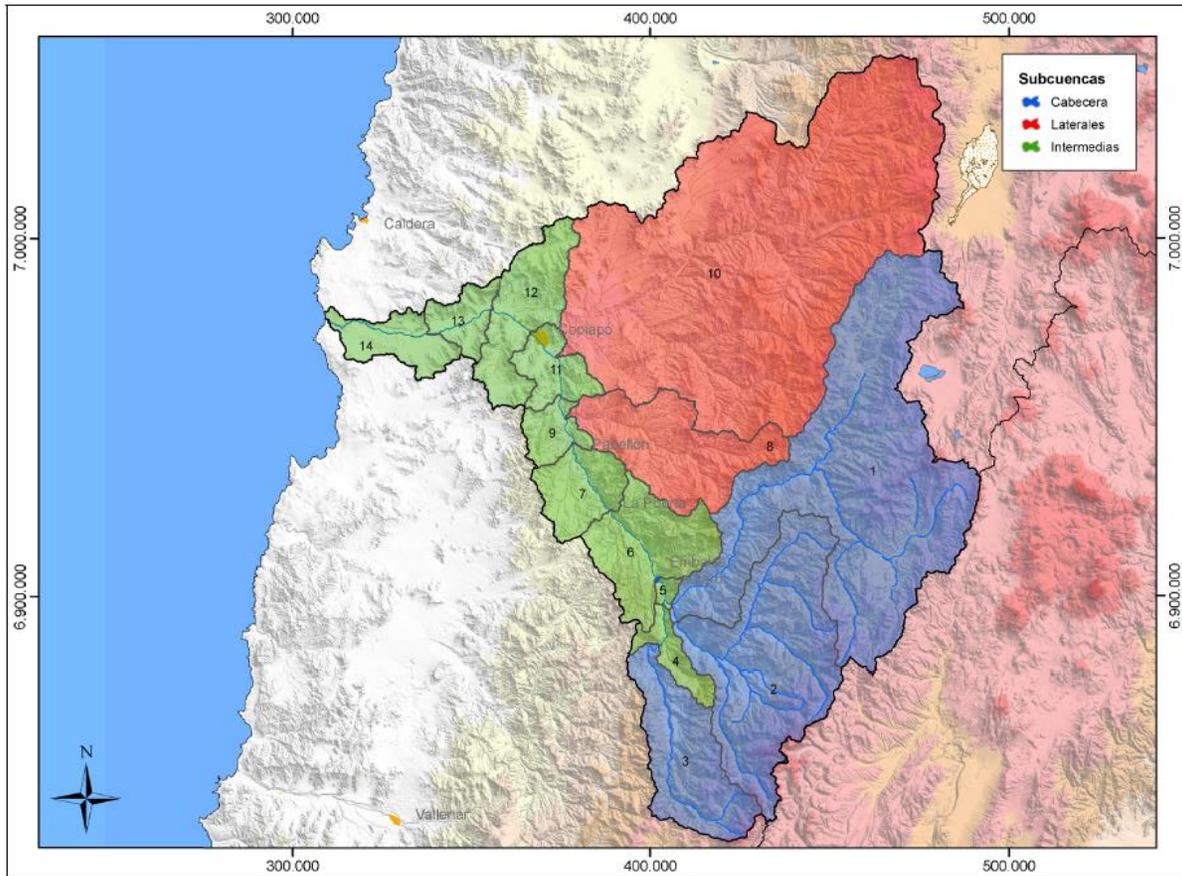


Fuente: DICTUC 2010

Para los aportes superficiales considerados en el modelo, se definen 14 subcuencas, de las cuales 3 son de subcuencas de cabecera (Pulido, Jorquera y Manflas), 2 subcuencas laterales (Quebradas Carrizalillo y

Paipote) y 9 subcuencas de aportes intermedios. La Figura 4.3 muestra las subcuencas definidas para el modelo AQUATOOL y la Tabla 4.3 describe el nombre de la subcuenca, el tipo y área aportante.

**Figura 4.3**  
**Sectorización de Sub-cuencas Desarrollado en DGA-DICTUC 2010**



Fuente: DICTUC 2010

**Tabla 4.3**  
**Subcuencas utilizadas en el modelo operacional AQUATOOL del acuífero de Copiapó**

<b>Nº</b>	<b>Nombre Subcuenca</b>	<b>Tipo</b>	<b>Área (km2)</b>
1	Río Jorquera	Cabecera	4.207
2	Río Pulido	Cabecera	2.023
3	Río Manflas	Cabecera	981
4	Manflas - Junta	Intermedia	221
5	Junta - Lautaro	Intermedia	46
6	Lautaro - La Puerta	Intermedia	855
7	La Puerta - Pabellón	Intermedia	471
8	Quebrada Carrizalillo	Lateral	1.116
9	Pabellón - Mal Paso	Intermedia	237
10	Quebrada Paipote	Lateral	6.649
11	Mal Paso - Copiapó	Intermedia	338
12	Copiapó - Piedra Colgada	Intermedia	733
13	Piedra Colgada - Valle Fértil	Intermedia	264
14	Valle Fértil - Angostura	Intermedia	396
<b>Total</b>			<b>18.537</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de DICTUC (2010).

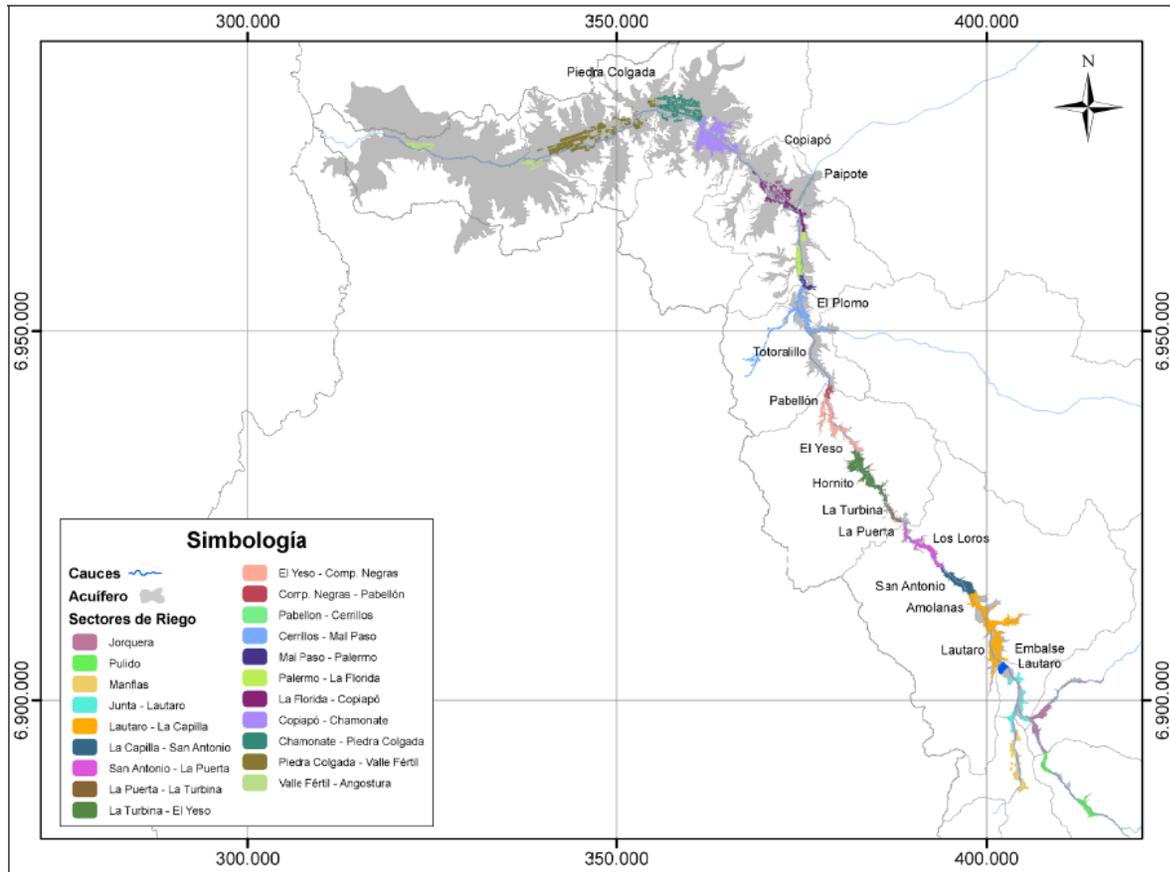
Las demandas de agua, se han identificado en el estudio de DICTUC (2010), principalmente como Agrícolas, Mineras y de Agua Potable. Las demandas mineras y de agua potable fueron estimadas en función de la ubicación de los derechos de agua que cada empresa tiene en el valle de Copiapó y los montos provienen de estimaciones indirectas obtenidos de los estudios:

- DGA - Proust Consultores (2008) "Derechos, Extracciones y Tasas Unitarias de Consumo de Agua del Sector Minero. Regiones Centro-Norte de Chile" (SIT N°146)
- DGA- Ayala Cabrera y Asociados Ltda (2007) "Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV" (SIT N°122).

Para la presente consultoría, se ha obtenido datos reales de producción, entre 2007 y 2012, tanto para los proyectos mineros como de producción de agua potable, situación que dará mayor confiabilidad a los resultados del modelo.

Para efectos de la representación de la demanda agrícola en el valle del Copiapó, DGA-DICTUC (2010) identifica 20 sectores o zonas de riego. La Figura 3.4 muestra las zonas de riego identificadas a partir de los catastros existentes y la Tabla 3.4 describe las zonas de riego y las áreas representativas.

**Figura 4.4**  
**Sectores de Riego Considerados en el modelo AQUATOOL DGA-DICTUC 2010**



Fuente: DICTUC 2010

**Tabla 4.4**  
**Sectores de riego en el Valle del Copiapó para AQUATOOL**

<b>Código</b>	<b>Sector de Riego</b>	<b>Área Regada (ha)</b>
R1a-01	Manflas	421
R1b-02	Pulido	344
R1c-03	Jorquera	404
R1d-04	Junta - Lautaro	417
R2a-05	Lautaro - La Capilla	1.419
R2a-06	La Capilla - San Antonio	453
R2a-07	San Antonio - La Puerta	415
R3a-08	La Puerta - La Turbina	73
R3a-09	La Turbina - El Yeso	711
R3a-10	El Yeso - Comp. Negras	616
R3a-11	Comp. Negras - Pabellón	95
R3b-12	Pabellón - Cerrillos	759
R3b-13	Cerrillos - Mal Paso	943
R4a-14	Mal Paso - Palermo	130
R4a-15	Palermo - La Florida	280
R4a-16	La Florida - Copiapó	709
R5a-17	Copiapó - Chamonate	1.383
R5a-18	Chamonate - Piedra Colgada	1.043
R6a-19	Piedra Colgada - Valle Fértil	1.393
R6b-20	Valle Fértil - Angostura	485
<b>Total</b>		<b>12.494</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de DICTUC (2010)

### **4.3 Estadística Fluviométrica en Cuencas Aportantes**

#### **4.3.1 Río Pulido**

El aporte de cabecera del río Pulido ha sido extendido del modelo original hasta el año 2012, a partir de la información de la estación fluviométrica de la DGA Río Pulido en Vertedero. Para obtener el caudal de aporte de la cuenca, aguas arriba de la estación, se ha sumado la demanda intermedia identificada por DICTUC (2010).

La Tabla 4.5 muestra el caudal medio mensual para la estación fluviométrica de la DGA y el valor estimado para el aporte de cabecera. Esta información es resumida en la Figura 4.5.

#### **4.3.2 Río Jorquera**

El aporte de cabecera del río Jorquera ha sido extendido del modelo original hasta el año 2012, a partir de la información de la estación fluviométrica de la DGA Río Jorquera en Vertedero. Para obtener el caudal de aporte de la cuenca, aguas arriba de la estación, se ha sumado la demanda intermedia identificada por DICTUC (2010).

La Tabla 4.6 muestra el caudal medio mensual para la estación fluviométrica de la DGA y el valor estimado para el aporte de cabecera. Esta información es resumida en la Figura 4.6.

#### **4.3.3 Río Manflas**

El aporte de cabecera del río Manflas ha sido extendido del modelo original hasta el año 2012, a partir de la información de la estación fluviométrica de la DGA Río Manflas en Vertedero.

La Tabla 4.7 muestra el caudal medio mensual para la estación fluviométrica de la DGA y el valor estimado para el aporte de cabecera. Esta información es resumida en la Figura 4.7.

#### **4.3.4 Aportes Intermedios**

Para el caso de otros cursos de aguas de aporte a la cuenca del río Copiapó se preparó un modelo de simulación basado en el modelo MPL, el que permitió estimar las variaciones estacionales del caudal de aporte.

En el Anexo B se resume la metodología utilizada, cuyo objetivo principal es la estimación de las series de caudales medios mensuales en las subcuencas del río Copiapó donde no se dispone de información.

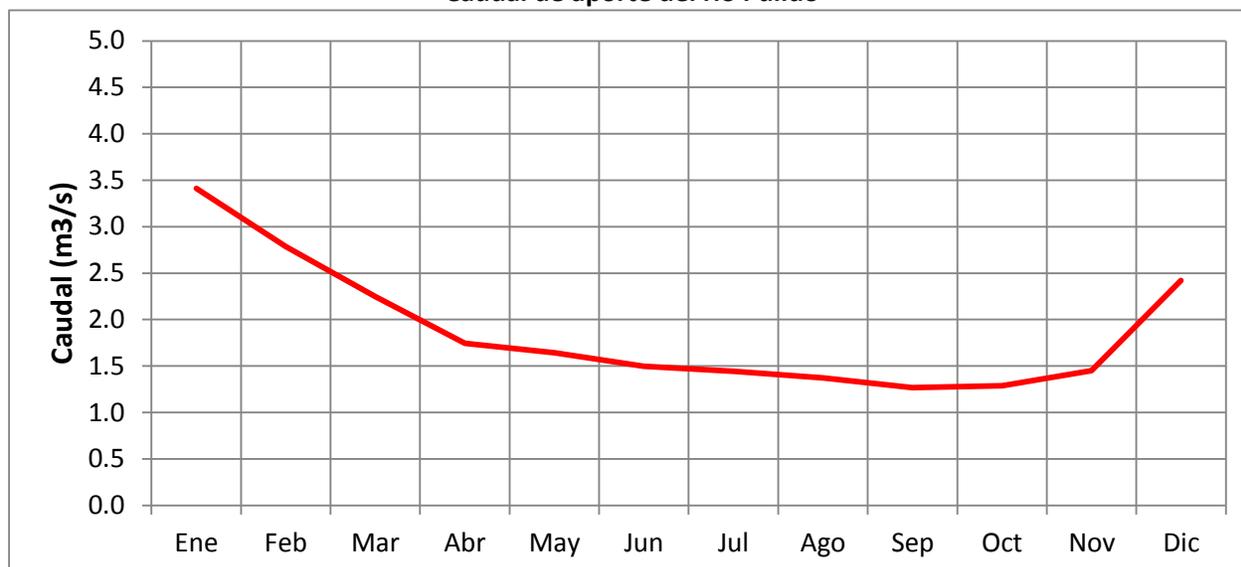
En la Tabla 4.8 se resumen los caudales anuales para cada una de las subcuencas consideradas en el análisis. La información a nivel mensual se incluyó directamente en los archivos de entrada del modelo AQUATOOL.

**Tabla 4.5**  
**Caudal medio de aporte del río Pulido (1971-2012)**

Mes	Estación Fluviométrica Pulido en Vertedero (m <sup>3</sup> /s)	Aporte de Cabecera Río Pulido (m <sup>3</sup> /s)
Enero	2,79	3,41
Febrero	2,38	2,79
Marzo	1,79	2,25
Abril	1,51	1,74
Mayo	1,36	1,64
Junio	1,27	1,50
Julio	1,18	1,45
Agosto	1,10	1,37
Septiembre	0,98	1,27
Octubre	0,92	1,29
Noviembre	1,09	1,45
Diciembre	1,94	2,42
<b>Promedio</b>	<b>1,53</b>	<b>1,88</b>

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 4.5**  
**Caudal de aporte del río Pulido**



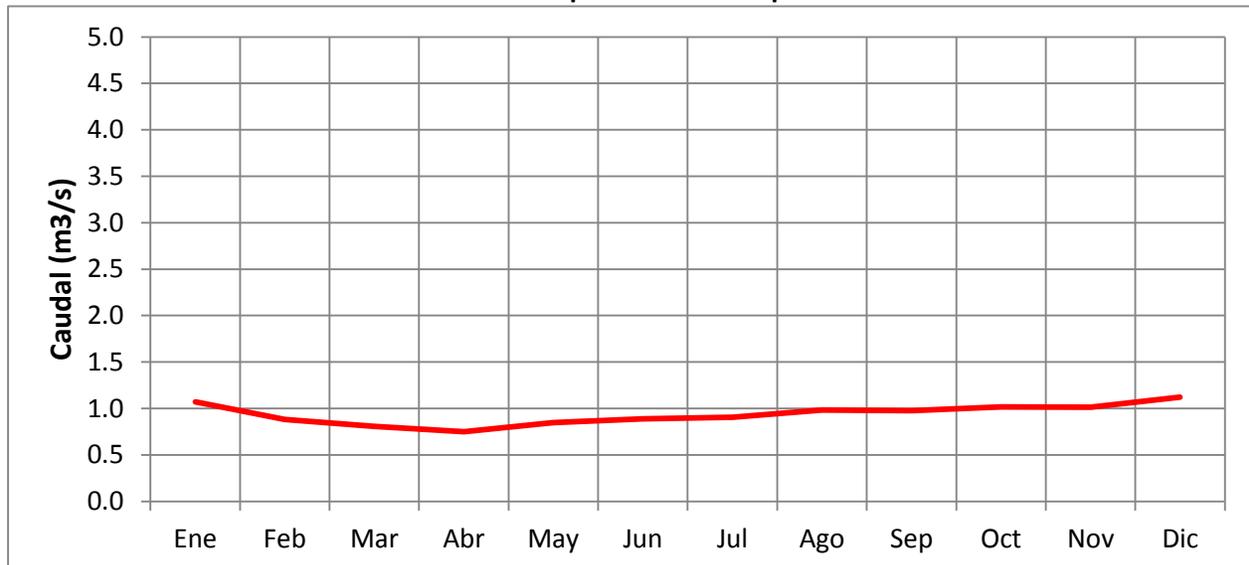
Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 4.6**  
**Caudal medio de aporte del río Jorquera 1971-2012**

Mes	Estación Fluviométrica Jorquera en Vertedero (m <sup>3</sup> /s)	Aporte de Cabecera Río Jorquera (m <sup>3</sup> /s)
Enero	0,71	1,07
Febrero	0,64	0,88
Marzo	0,59	0,81
Abril	0,63	0,75
Mayo	0,70	0,85
Junio	0,76	0,89
Julio	0,75	0,91
Agosto	0,79	0,98
Septiembre	0,75	0,98
Octubre	0,71	1,02
Noviembre	0,70	1,01
Diciembre	0,76	1,12
<b>Promedio</b>	<b>0,71</b>	<b>0,94</b>

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 4.6**  
**Caudal de aporte del río Jorquera**



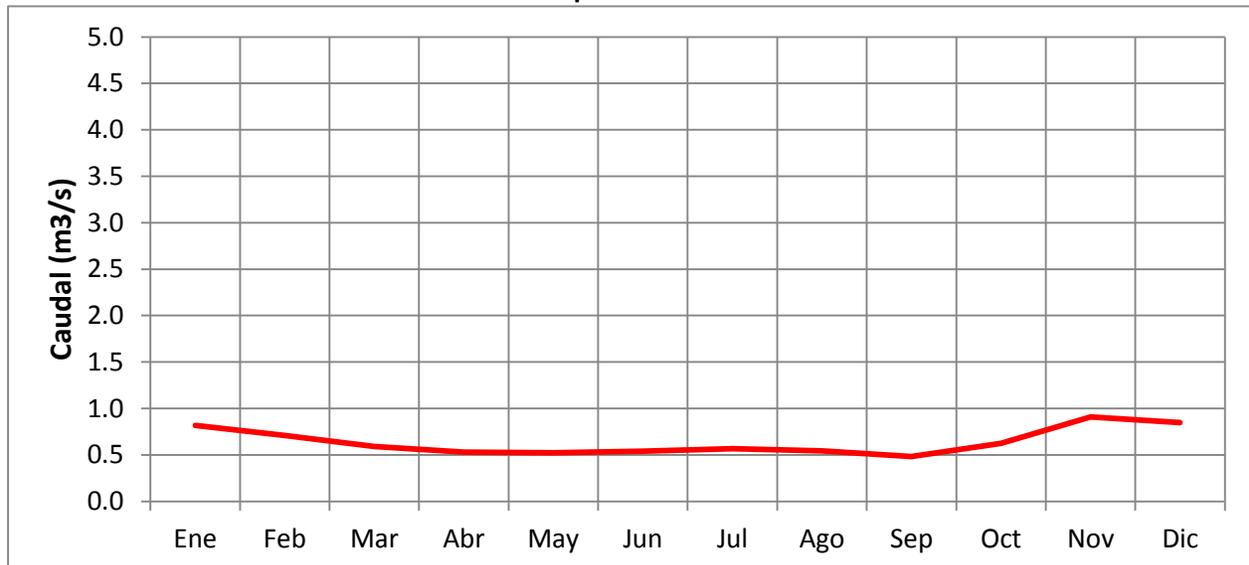
Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 4.7**  
**Caudal medio de aporte del río Manflas 1971-2012**

Mes	Estación Fluviométrica Manflas en Vertedero (m <sup>3</sup> /s)
Enero	0,82
Febrero	0,71
Marzo	0,59
Abril	0,53
Mayo	0,52
Junio	0,54
Julio	0,57
Agosto	0,54
Septiembre	0,48
Octubre	0,62
Noviembre	0,91
Diciembre	0,85
<b>Promedio</b>	<b>0,64</b>

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 4.7**  
**Caudal de aporte del río Manflas**



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 4.8**  
**Series de Caudales Medios Anuales para Subcuencas Aportantes sin Registro**

Subcuenca	Caudal Medio Anual	
	Miles m <sup>3</sup> /Año	l/s
Cuenca Quebrada Paipote	670,42	21,3
Intermedia Manflas - Junta	118,27	3,8
Intermedia Junta - Lautaro	5,48	0,2
Intermedia Lautaro - La Puerta	77,61	2,5
Intermedia La Puerta - Pabellón	27,75	0,9
Intermedia Pabellón - Mal Paso	187,44	5,9
Cuenca Quebrada Carrizalillo	96,07	3,0
Intermedia Mal Paso - Copiapó	41,56	1,3
Intermedia Copiapó - Piedra Colgada	52,73	1,7
Intermedia Piedra Colgada - Valle Fértil	11,57	0,4
Intermedia Valle Fértil - Angostura	9,73	0,3

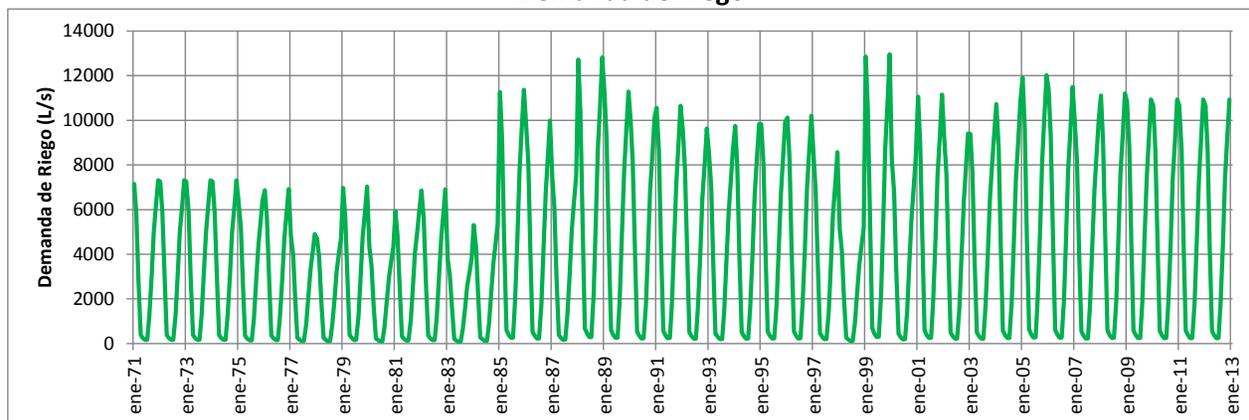
Fuente: Elaboración Propia.

## 4.4 Actualización Demandas de Agua

### 4.4.1 Riego

El consumo agrícola fue determinado en función de las zonas de demanda agrícola generadas por DICTUC (2010) de acuerdo al catastro predial. Para efectos de este estudio se ha supuesto que la demanda agrícola actual es equivalente a la interpretada por el catastro de DICTUC (2010), sin embargo, la satisfacción de la demanda será función de la disponibilidad de aguas superficiales y/o subterráneas en la cuenca. Cabe resaltar que la evolución histórica de la demanda agrícola, es decir desde el periodo 1971 – 2006 fue interpretada por DICTUC, en función de los estudios previos y de obtener una buena calibración del modelo. La Figura 4.8 muestra la evolución temporal de la demanda impuesta al modelo AQUATOOL.

**Figura 4.8**  
**Demanda de Riego**



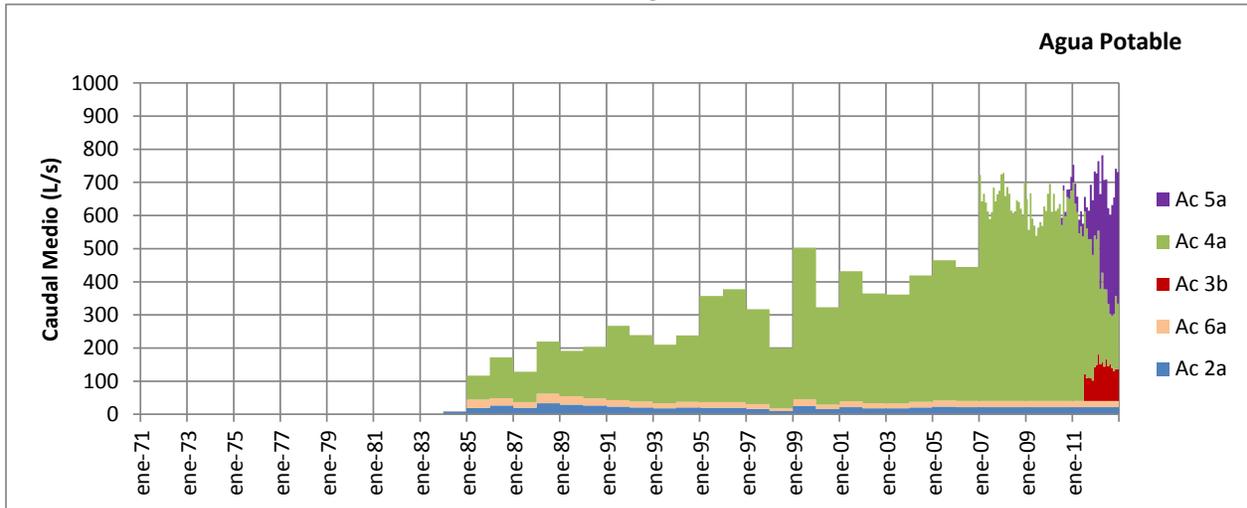
Fuente: Elaboración Propia.

### 4.4.2 Agua Potable

Las demandas de agua potable fueron estimadas hasta el año 2006 por el estudio DICTUC (2010). Para esta consultoría, se ha contado con información a nivel mensual y por pozo del caudal de producción desde 2007 a 2012.

De acuerdo a la información disponible, toda la demanda de agua potable se obtenía de los pozos que la empresa Aguas Chañar tenía en el sector 4, por lo que se reinterpreto la extracción de la situación histórica, llevando toda la demanda de agua potable al sector 4. Otros de los aspectos que se puede apreciar es que de acuerdo a la información actual de agua potable aportada por ECONSSA, es que a partir del año 2011, la sanitaria comienza a explotar desde los sectores administrativos 3 y 5 del acuífero de Copiapó, debido a la disminución de la producción de los pozos de sus plantas. La Figura 4.9 muestra la serie histórica de demanda de agua potable considerada en el modelo AQUATOOL.

**Figura 4.9**  
**Demanda de Agua Potable**



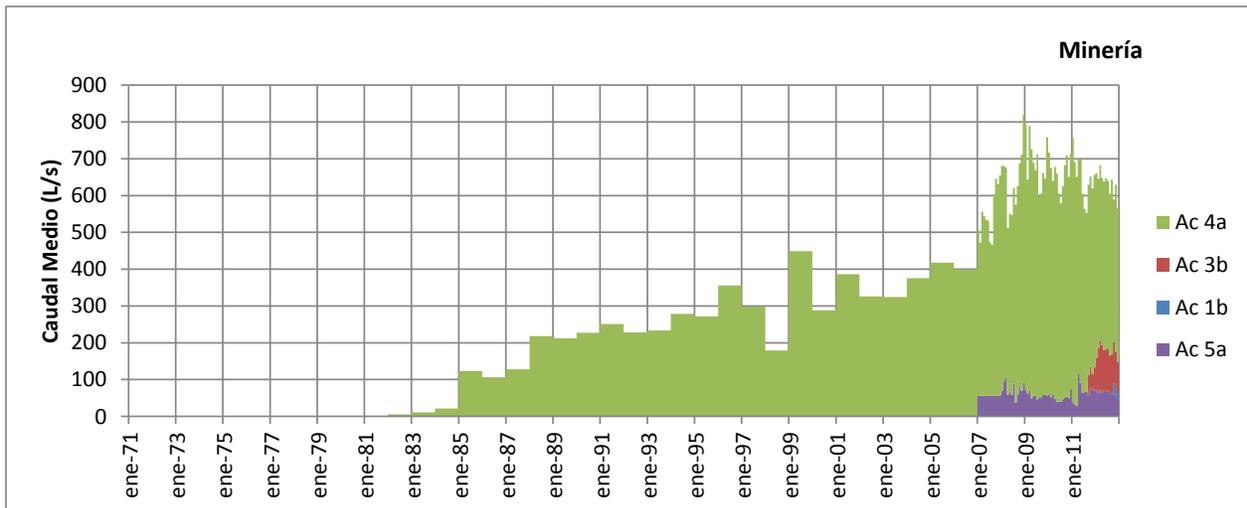
Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.4.3 Minería

Con las demandas mineras se ha realizado un análisis similar al de agua potable. Se ha obtenido la extracción medida e informada por los titulares de proyectos mineros a nivel mensual y por pozo de bombeo desde 2007 a 2012.

La demanda histórica fue corregida en su distribución espacial, asociando prácticamente toda la explotación de aguas subterráneas a los proyectos mineros localizados en el sector 4. La Figura 4.10 muestra la serie histórica de la demanda ingresada al modelo AQUATOOL.

**Figura 4.10**  
**Demanda Minera**



Fuente: Elaboración Propia.

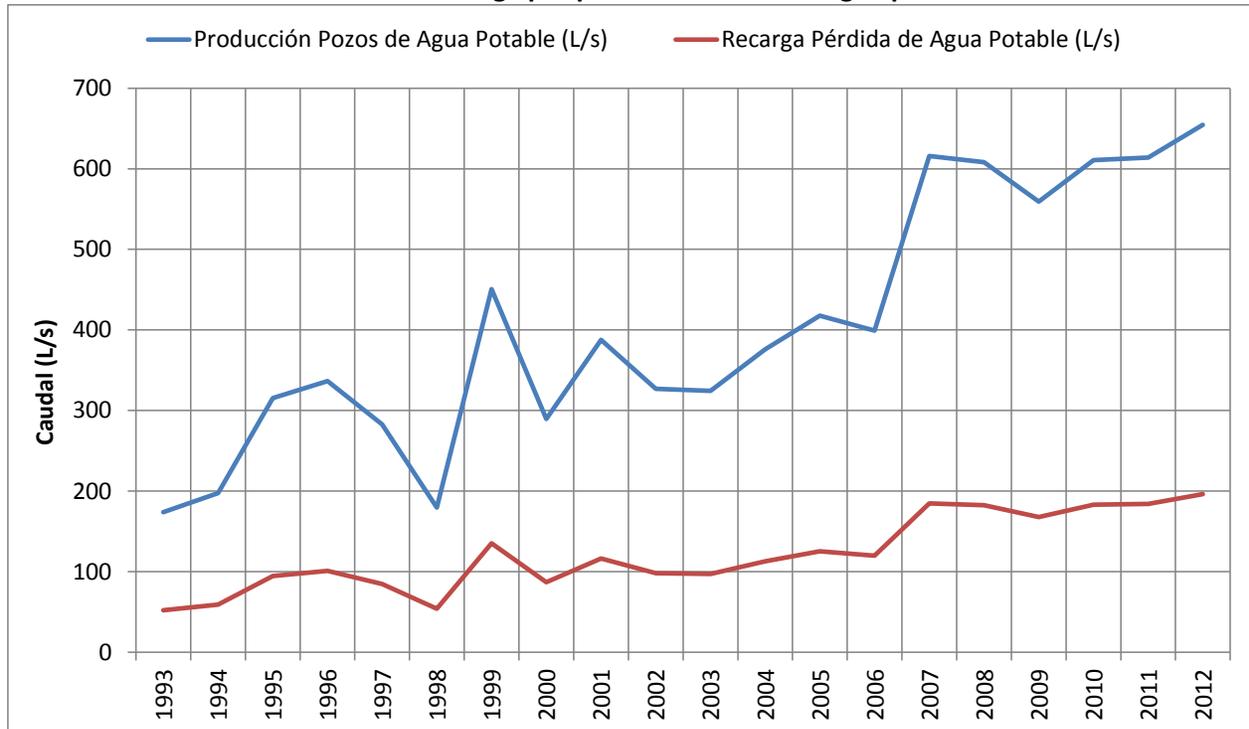
## 4.5 Cambios Realizados en Modelo Original (DICTUC, 2010)

### 4.5.1 Recarga por Pérdidas de Agua Potable

Dentro de los cambios considerados en el modelo original, está la implementación de la recarga por pérdidas del sistema de distribución de agua potable asociada al sector 4 del acuífero de Copiapó. Para lo anterior, se ha considerado que el total de la extracción de los pozos conduce el agua para consumo a la ciudad de Copiapó y Tierra Amarilla.

Las pérdidas del sistema de conducción se han estimado en un 40% de la producción total de los pozos. Según SISS (2011), el 30% del total corresponde a pérdidas físicas del sistema que vuelven al acuífero. La diferencia, es decir el 10% de la producción total corresponde a otras pérdidas, tales como gratuidades, hurtos de agua, grifos, etc. La Figura 4.11 y Tabla 4.9 siguientes muestran los valores anuales de la recarga estimada por pérdida de la red de agua potable, que han sido ingresadas como aporte al sector 4 del acuífero de Copiapó.

**Figura 4.11**  
**Caudales de recarga por pérdida de la red de agua potable**



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 4.9**  
**Estimación de la recarga por pérdida de la red de agua potable**

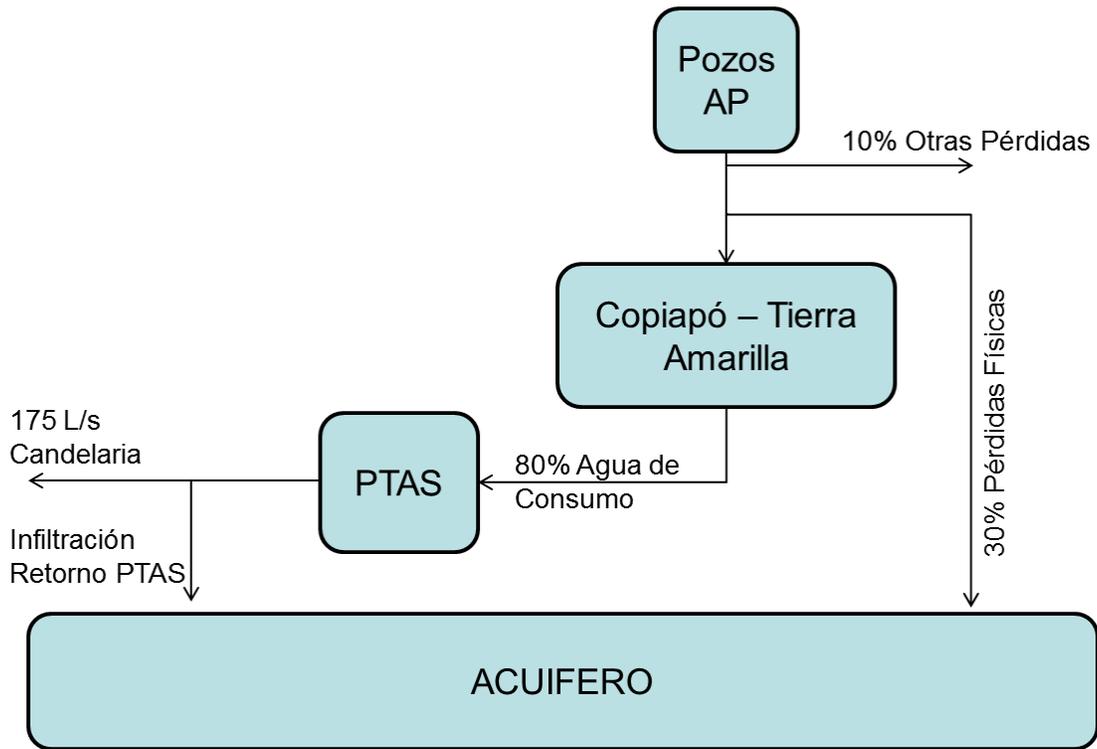
<b>Año</b>	<b>Producción Pozos de Agua Potable (L/s)</b>	<b>Recarga Pérdida de Agua Potable (L/s)</b>
1993	174	52
1994	198	59
1995	316	95
1996	337	101
1997	283	85
1998	180	54
1999	451	135
2000	290	87
2001	388	116
2002	327	98
2003	324	97
2004	376	113
2005	418	125
2006	399	120
2007	616	185
2008	608	182
2009	559	168
2010	611	183
2011	614	184
2012	654	196

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a SISS (2011), se estima que el 60% del agua de producción de los pozos es consumida en las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla. Para efectos del análisis, se ha aplicado un factor de retorno de 80% para determinar el monto de aguas residuales enviadas a tratamiento. De esta forma, se considera que el 80% del agua potable de consumo de la población va a la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa sanitaria Aguas Chañar por la red de alcantarillado.

Luego de su tratamiento, históricamente el agua efluente de la planta de tratamiento ha sido descargada en su totalidad al cauce superficial en el sector 5 del acuífero de Copiapó, donde se infiltra a lo largo del cauce. Lo anterior se considera válido hasta el año 2010, momento en que la empresa sanitaria Aguas Chañar entrega 175 L/s de las aguas tratadas a través de un acueducto hasta el proyecto minero de Compañía Minera Candelaria. El esquema conceptual simplificado del manejo e infiltración del sistema de agua potable y de las aguas tratadas se muestra en la Figura 4.12.

**Figura 4.12**  
**Esquema conceptual simplificado del sistema de recarga red de agua potable y PTAS**



Fuente: Elaboración Propia.

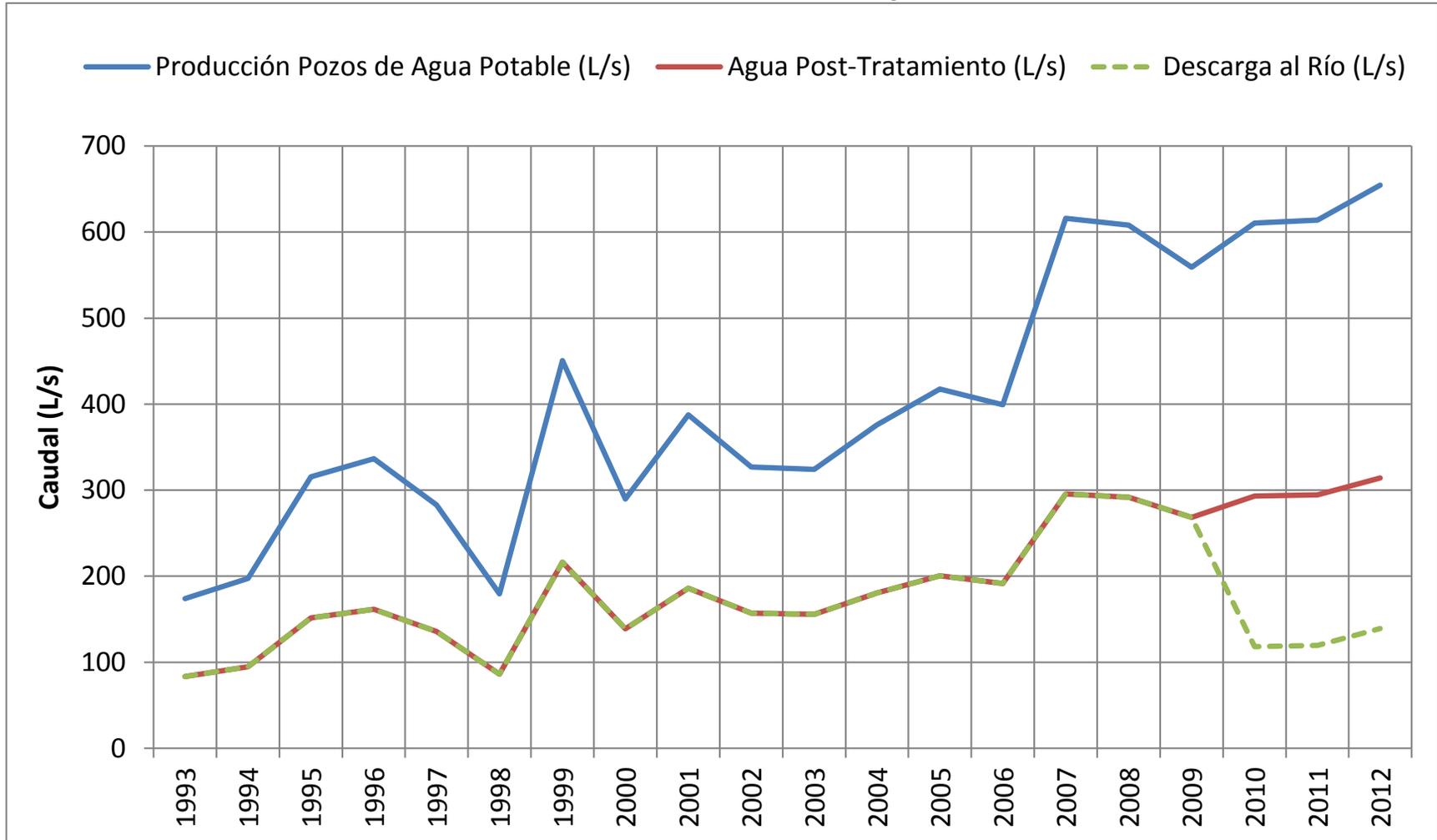
En términos de los caudales disponibles para la descarga hacia el acuífero, en la Tabla 4.10 se presenta una estimación a nivel anual, la que cubre el período entre los años 1993 y 2012. En esta tabla se presenta el cambio de situación a partir del año 2010, lo que se resume en la Figura 4.13. En la Figura 4.14 se muestra la implementación de este cambio en la topología de AQUATOOL.

**Tabla 4.10**  
**Estimación de la Infiltración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales**

<b>Año</b>	<b>Producción Pozos de Agua Potable (L/s)</b>	<b>Recarga Pérdida de Agua Potable (L/s)</b>	<b>Agua Post-Tratamiento (L/s)</b>	<b>Descarga al Río (L/s)</b>
1993	174	52	83	83
1994	198	59	95	95
1995	316	95	151	151
1996	337	101	162	162
1997	283	85	136	136
1998	180	54	86	86
1999	451	135	216	216
2000	290	87	139	139
2001	388	116	186	186
2002	327	98	157	157
2003	324	97	156	156
2004	376	113	180	180
2005	418	125	200	200
2006	399	120	192	192
2007	616	185	296	296
2008	608	182	292	292
2009	559	168	268	268
2010	611	183	293	118
2011	614	184	295	120
2012	654	196	314	139

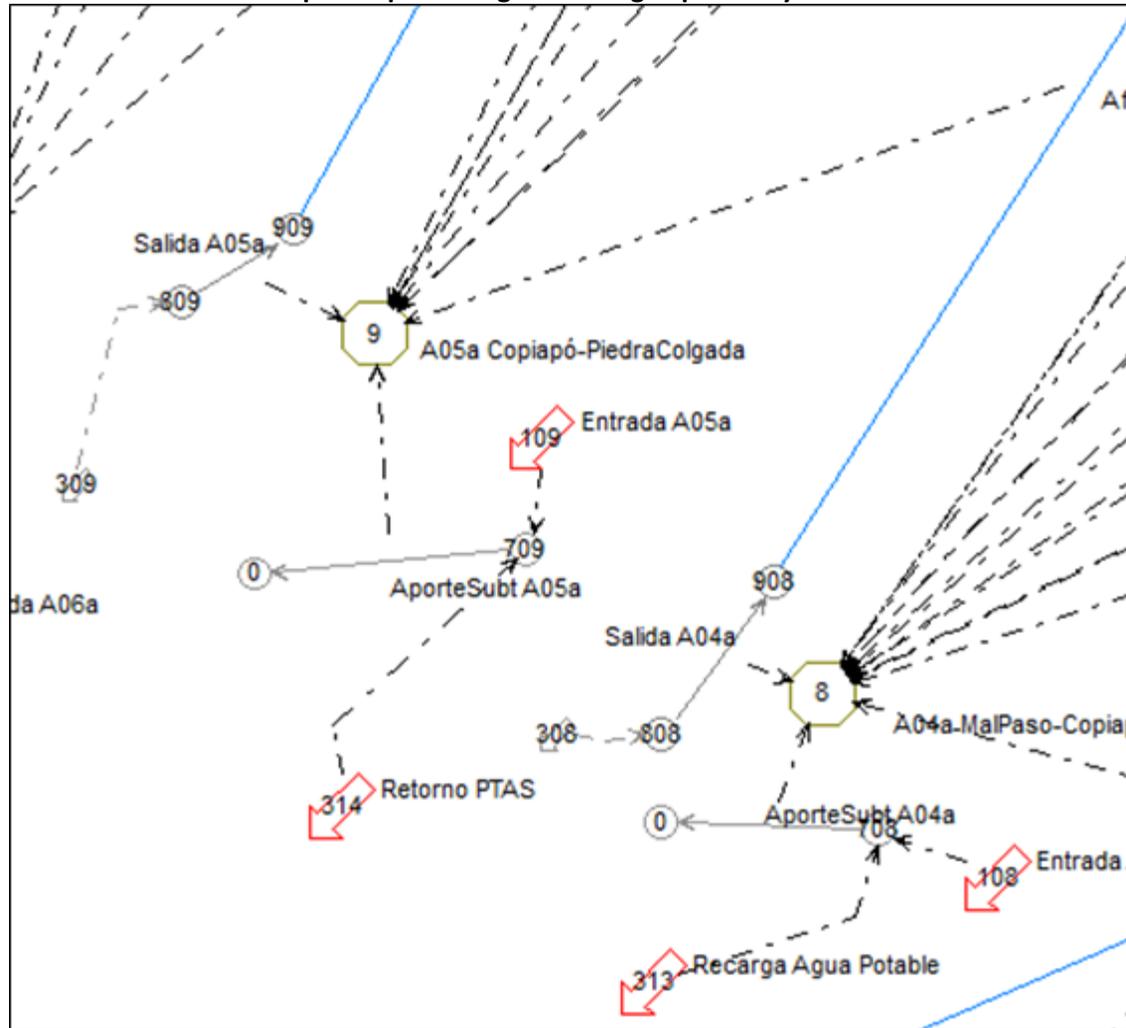
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 4.13**  
**Caudales Anuales en Planta de Tratamiento de Aguas Residuales**



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.14  
Aportes por recarga red de agua potable y PTAS



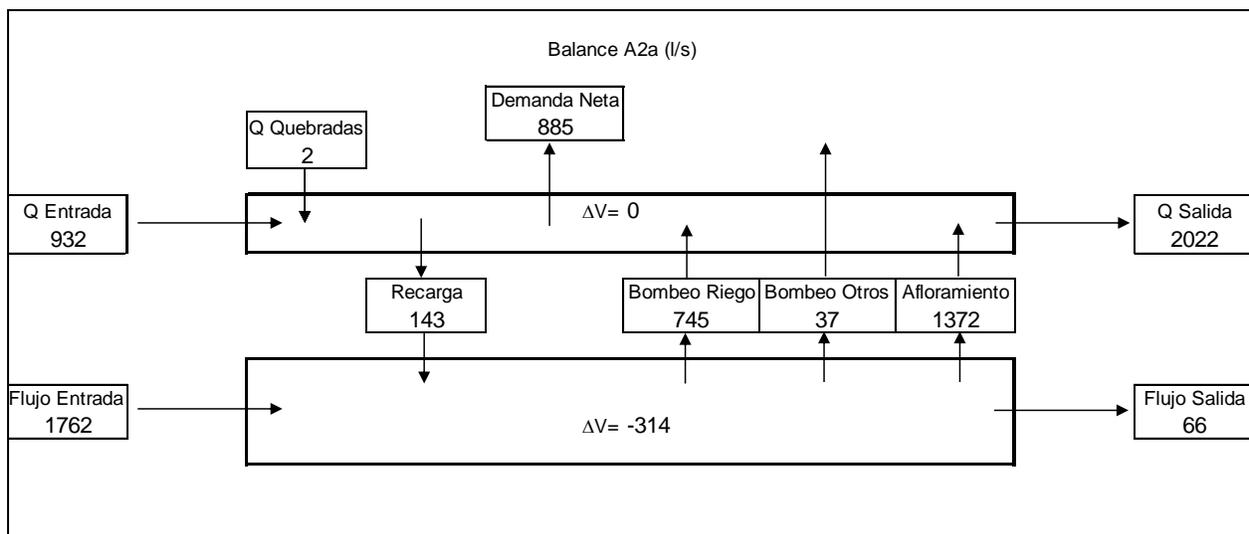
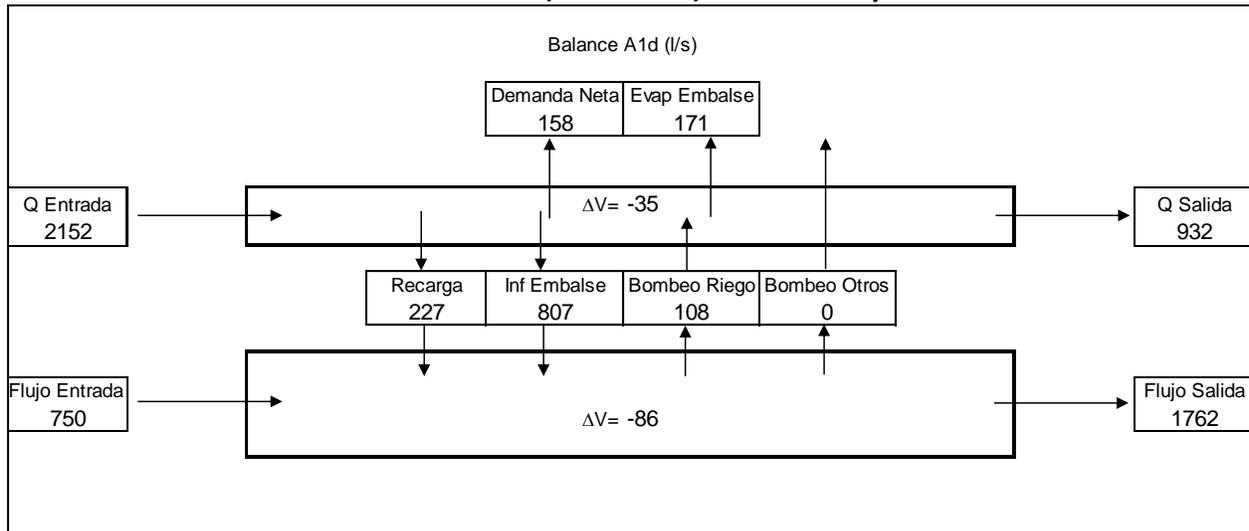
Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.5.2 Topología Sector Alto (Embalse Lautaro y Zona de Recuperaciones)

Como parte de este trabajo, se ha reinterpretado el balance hídrico del sector alto de la cuenca, es decir sectores 1 y 2 del acuífero de Copiapó. De acuerdo al informe DGA-DICTUC (2010), se indica que el afloramiento aparece en el acuífero 01d y es del orden de los 1300 L/s, así como en La Puerta se interpreta como 150 L/s. En la topología del modelo AQUATOOL, la descarga del afloramiento efectivamente está impuesta en un nodo aguas abajo del embalse Lautaro, por lo que los afloramientos se reciben en el acuífero 02a.

De acuerdo a lo anterior, es que se corrige la interpretación del balance de los acuíferos 01 y acuífero 02, de modo que los balances interpretados de los acuíferos tengan una conceptualización más realista. El resultado de este análisis se presenta resumido en la Figura 4.15.

**Figura 4.15**  
**Balance Hídrico Histórico (1993 - 2012) Acuífero 01d y Acuífero 02**



Fuente: Elaboración Propia.

### 4.5.3 Topología Sector Bajo

Otro de los aspectos referente a la revisión del modelo y que se ha identificado como aspecto a mejorar, corresponde a la representación del caudal de salida de la cuenca, debido a una subestimación de los flujos bases medidos en la estación Copiapó en Angostura. Como parte de este proceso, se ha incrementado el coeficiente de desagüe del modelo original, de modo que permita el afloramiento, tal como se observa en la estación fluviométrica Figura 4.16.

La visita a terreno junto a la inspección fiscal del proyecto, permitió observar que la hacienda María Isabel, localizada en la parte baja de la cuenca e inmediatamente aguas arriba de la estación Copiapó en Angostura, extrae sus aguas desde un tranque lateral localizado junto al río Copiapó, tal como se muestra en la Figura 4.17. Este tranque eleva sus aguas a través de una estación de bombeo a la terraza superior, donde se encuentran las plantaciones de olivos (ver Figura 4.18). La representación de esta extracción superficial en el modelo se realizó a través de un elemento de toma superficial en el nodo 26, que conduce agua superficial a la zona de demanda de riego. Con este cambio en la topología del sistema se logra representar la variación estacional del flujo base de la estación Copiapó en Angostura.

La topología de la parte baja se muestra en la Figura 4.19, en tanto los caudales simulados y calculados se muestran en la Figura 4.20

**Figura 4.16**  
**Estación Copiapó en Angostura**



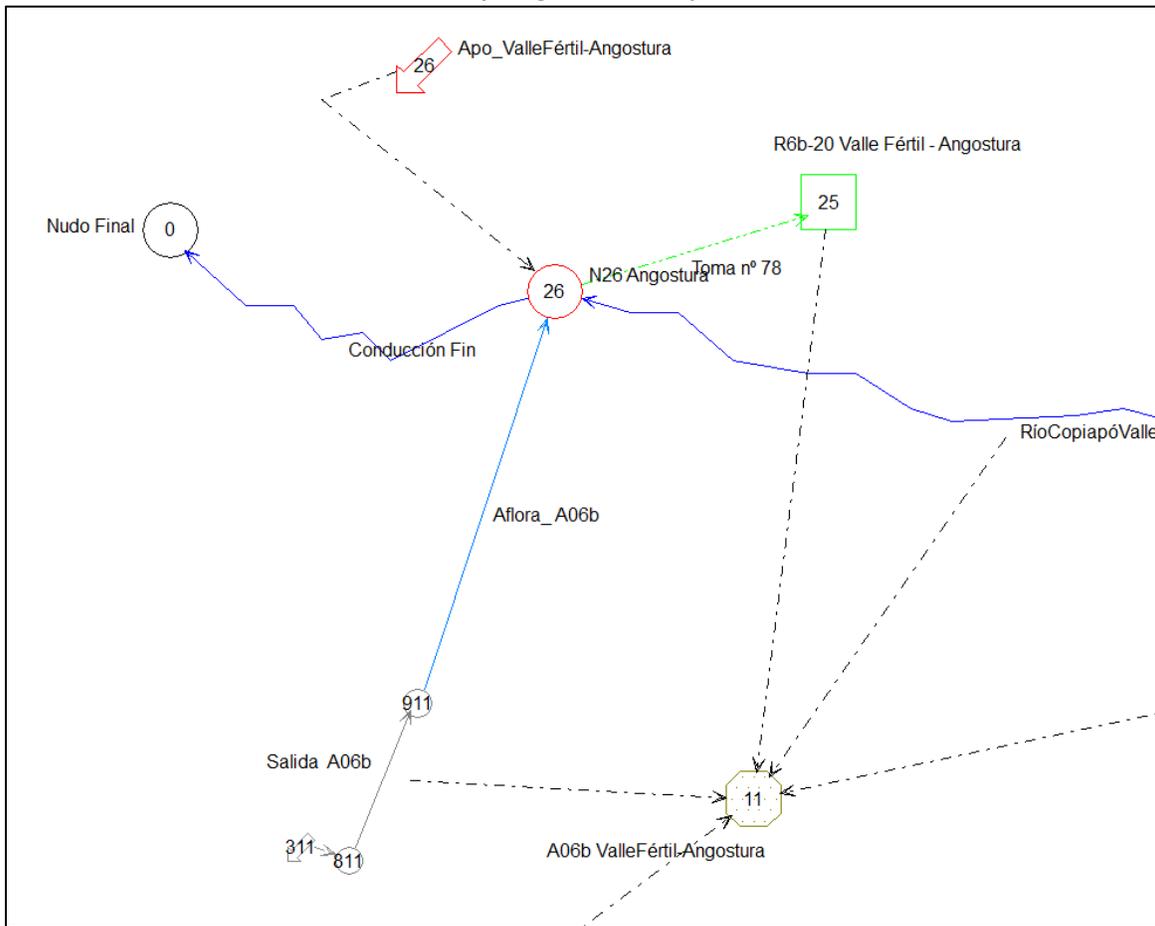
**Figura 4.17**  
**Tranque de acumulación nocturno para riego Hacienda María Isabel**



**Figura 4.18**  
**Sala de operación de bombeo desde tranque de riego Hacienda María Isabel**

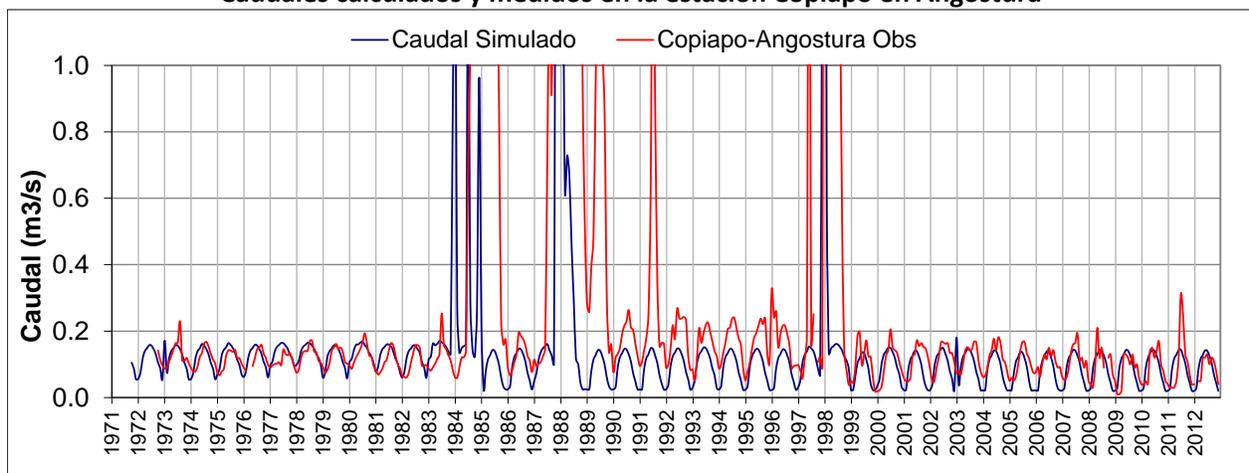


**Figura 4.19**  
**Topología Sector Bajo**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 4.20**  
**Caudales calculados y medidos en la estación Copiapó en Angostura**



Fuente: Elaboración Propia.

## 4.6 Calibración Modelo AQUATOOL

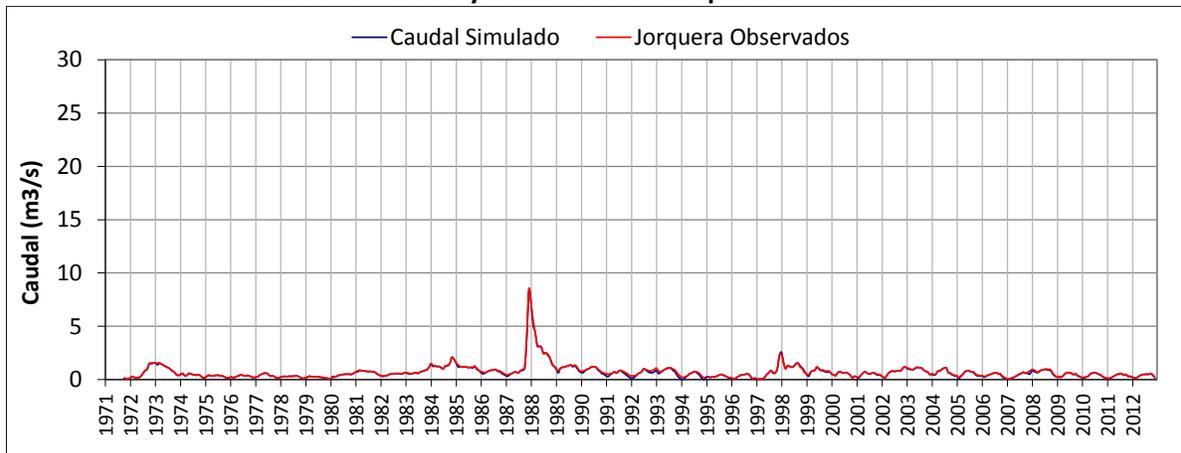
### 4.6.1 Objetivos de Calibración

Como objetivo de calibración, al igual que en el informe de DICTUC (2010) se ha definido la importancia de representar los caudales superficiales medidos en las estaciones fluviométricas, además de verificar que los balances de los acuíferos sean consistentes con los del modelo Visual MODFLOW.

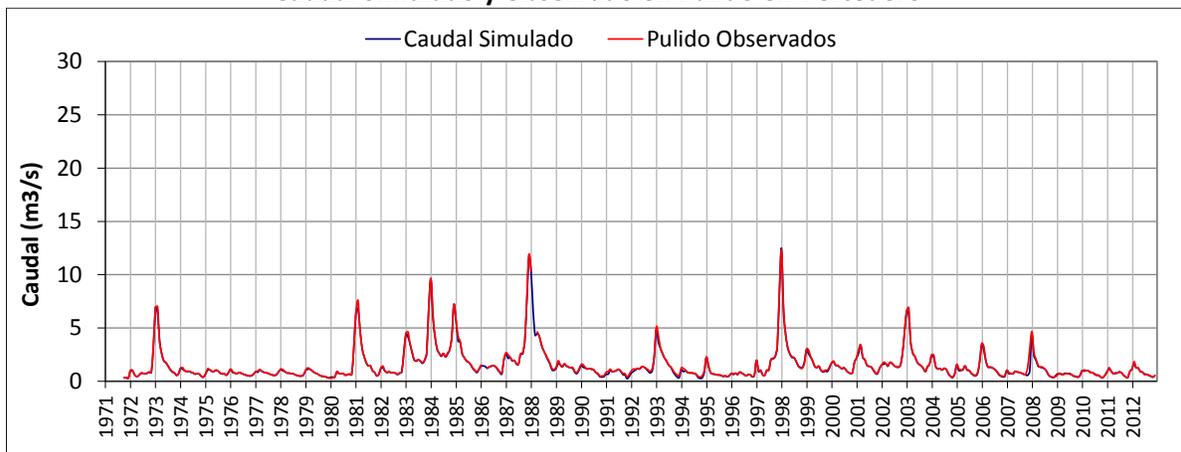
### 4.6.2 Principales Resultados

La Figura 4.21 a la Figura 4.28 muestran los caudales simulados y medidos en cada estación fluviométrica de la cuenca del río Copiapó. En este análisis se puede apreciar que a pesar de los cambios realizados al modelo AQUATOOL, la representación del sistema superficial se reproduce de buena forma.

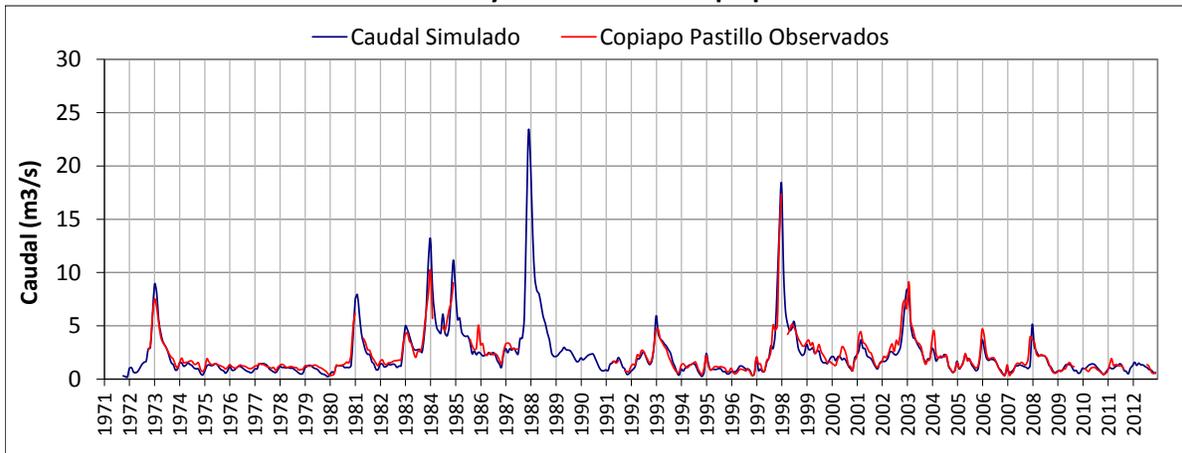
**Figura 4.21**  
**Caudal Simulado y Observado en Jorquera en Vertedero**



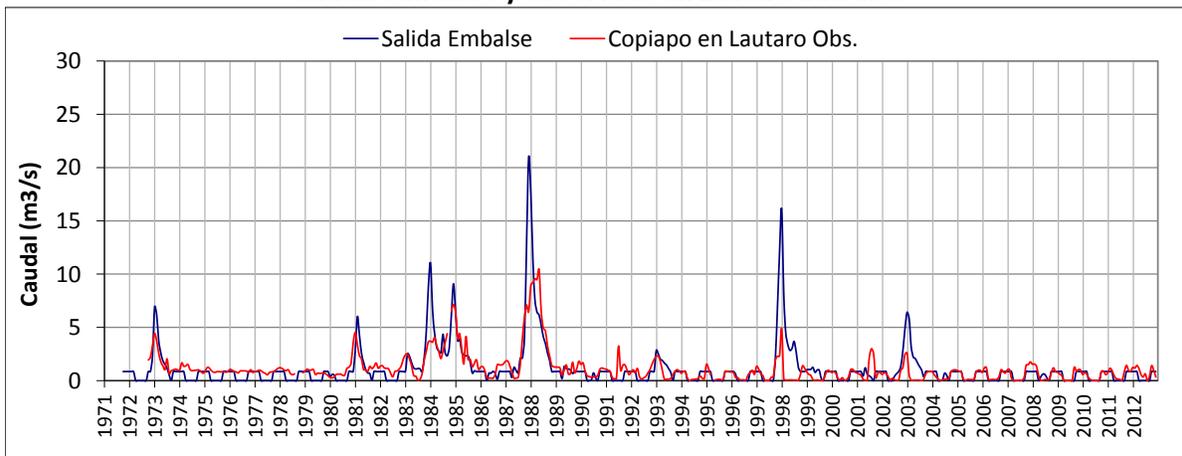
**Figura 4.22**  
**Caudal Simulado y Observado en Pulido en Vertedero**



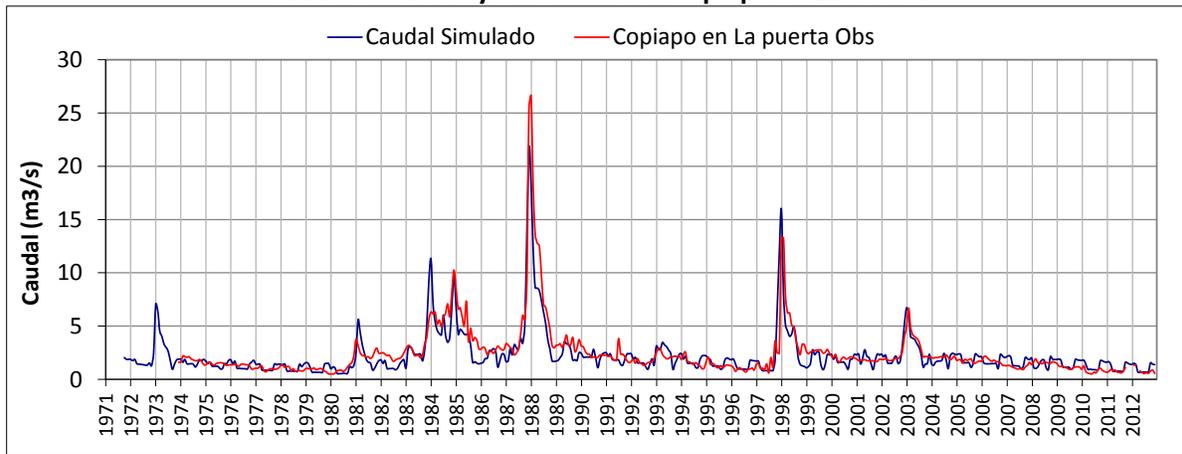
**Figura 4.23**  
**Caudal Simulado y Observado en Copiapó en Pastillo**



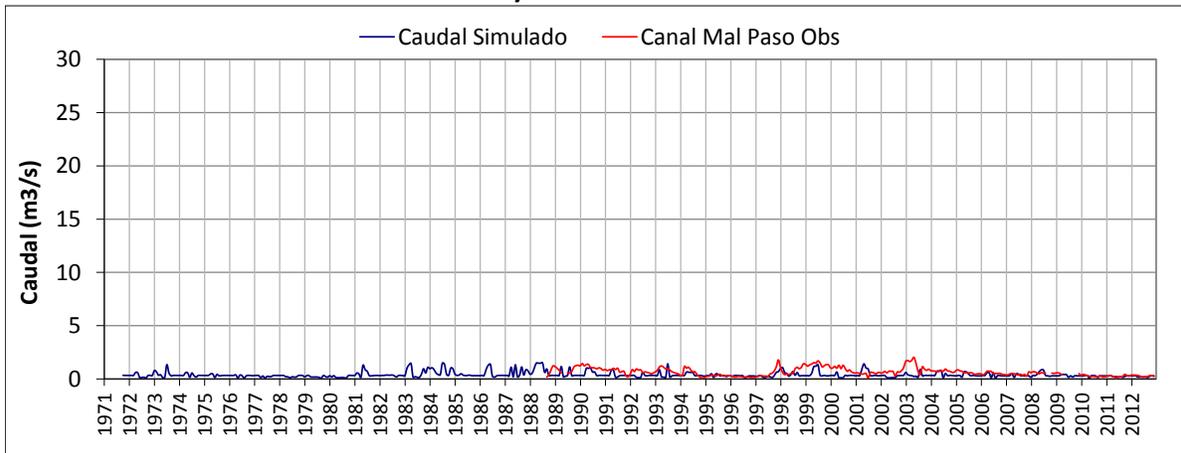
**Figura 4.24**  
**Caudal Simulado y Observado en Lautaro Embalse**



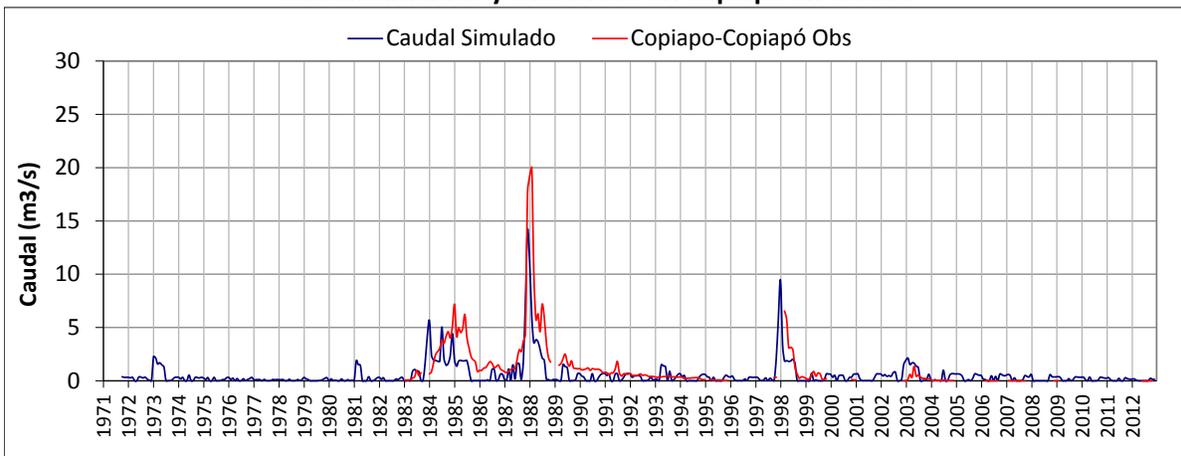
**Figura 4.25**  
**Caudal Simulado y Observado en Copiapó en La Puerta**



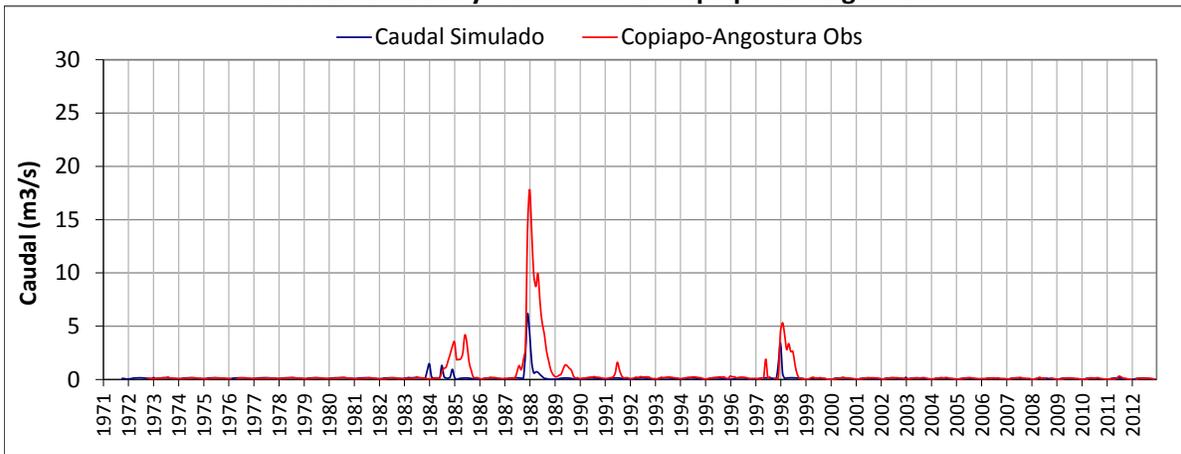
**Figura 4.26**  
**Caudal Simulado y Observado en Canal Mal Paso**



**Figura 4.27**  
**Caudal Simulado y Observado en Copiapó en Ciudad**



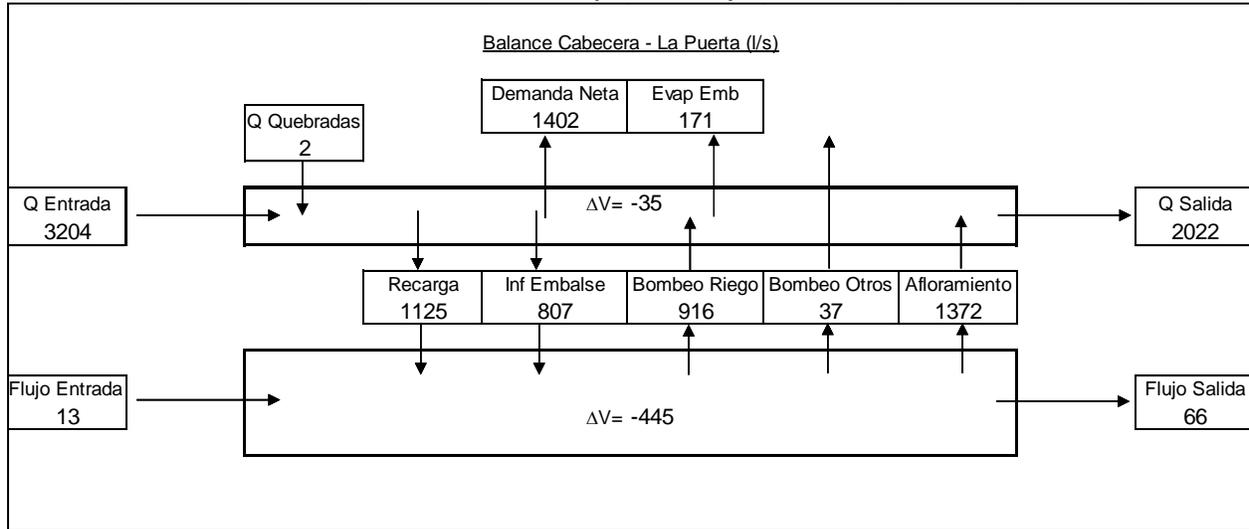
**Figura 4.28**  
**Caudal Simulado y Observado en Copiapó en Angostura**



La Figura 4.29 muestra el balance hídrico medio del sector alto para el periodo 1993-2012, periodo coincidente con el modelo de aguas subterráneas. Se aprecia que las condiciones de recarga son mayores a las extracciones del acuífero y se generan afloramientos en el sector de La Puerta, que se

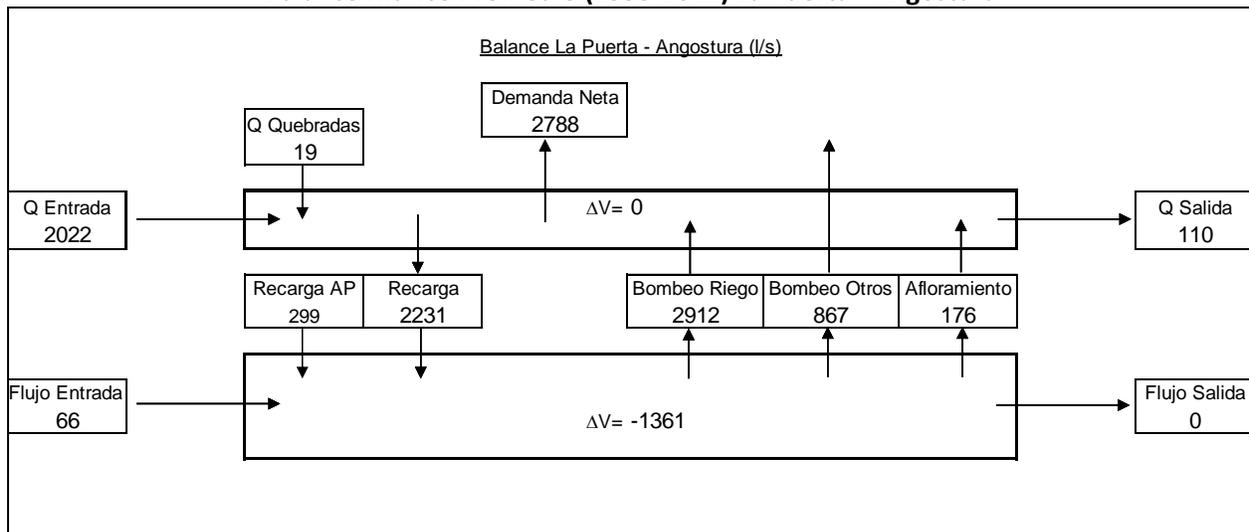
suman al caudal superficial en la estación. La Figura 4.30 muestra el balance hídrico medio del sector bajo para el periodo 1993-2012, periodo coincidente con el modelo de aguas subterráneas. Se aprecia que las extracciones desde el acuífero superan las recargas superficiales, lo que provoca que el volumen embalsado desde el acuífero se esté consumiendo a tasas de 1.361 L/s.

**Figura 4.29**  
**Balance Hídrico Promedio (1993-2012) Cabecera - La Puerta**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 4.30**  
**Balance Hídrico Promedio (1993-2012) La Puerta - Angostura**



Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.7 Conclusiones Preliminares

Como parte de este proyecto, se ha actualizado el modelo operacional AQUATOOL del río Copiapó, desde la cabecera de la cuenca hasta Angostura. Para lo anterior, se ha considerado:

- Actualización de los caudales de aporte de cabecera, ríos Pulido, Jorquera y Manflas, usando la información fluviométrica de las estaciones de la DGA
- Generación de caudales usando el modelo MPL para las cuencas de Paipote, Carrizalillo y cuencas de aporte intermedias.
- Ubicación y demandas actualizadas de los pozos de minería, a partir de la información entregada por los propios titulares de proyectos mineros a la DGA.
- Ubicación y demandas actualizadas de los pozos de agua potable, a partir de la información entregada por ECONSSA a la DGA.
- Recarga por pérdidas del sistema de agua potable en el sector 4 del acuífero de Copiapó
- Retorno de la planta de tratamiento de aguas residuales en el sector 5 del acuífero de Copiapó.
- Mejoramiento de la topología de la parte baja (sector 6), considerando una toma superficial para satisfacer la demanda agrícola.
- Cambio en los coeficientes de desagüe de los acuíferos de la parte baja, para representar flujos subterráneos similares a los modelados en Visual MODFLOW.
- Recargas por infiltración en tramos de río, canales y percolación de las zonas de riego resultantes desde el modelo operacional AQUATOOL.
- Se ha considerado la demanda agrícola, en función de la información del modelo operacional AQUATOOL, que satisface las demandas agrícolas en función del agua superficial y subterránea disponible.

Como resultado, se ha obtenido tanto para el modelo sector alto, como el modelo sector bajo:

- Representación de caudales superficiales para el periodo 1993-2012
- Balance hídrico superficial y subterráneo para el periodo 1993-2012
- Recargas por sector acuífero para al modelo hidrogeológico Copiapó Visual MODFLOW
- Bombeos agrícolas por sector acuífero para el modelo hidrogeológico de Copiapó Visual MODFLOW

Considerando que el modelo se encuentra calibrado para el periodo 1993-2012, se considera preparado para definir escenarios adecuados, en conjunto con la inspección fiscal. Algunos escenarios propuestos son:

- **Operación de largo plazo de los pozos de agua potable**, usando los pozos actuales. Evaluación del rendimiento de sus pozos ante la satisfacción de la demanda. Efecto en niveles y afloramiento en el sector 6 por operación de los pozos de Piedra Colgada.
- **Entrada en operación del proyecto Caserones**. Considerar el efecto de la disminución de la recarga verificando los niveles de pozos.
- **Operación de plantas desaladoras**. Proyectos mineros o de agua potable que cambian de fuente a agua desalada. Verificar el efecto en los niveles de agua subterránea.

## 5. MODELO HIDROGEOLÓGICO ACUIFERO COPIAPO

### 5.1 Aspectos Generales

En este capítulo se describe el proceso de actualización de los modelos hidrogeológicos del acuífero de Copiapó, desarrollados por SERNAGEOMIN (2012). Para el acuífero de Copiapó, existen dos modelos numéricos: el modelo sector alto, comprendido desde la junta hasta La Puerta y el modelo sector bajo, localizado desde La Puerta hasta Angostura.

### 5.2 Descripción Modelo Visual MODFLOW

La actualización se ha desarrollado en el modelo Visual MODFLOW 4.6 Classic, contenido en la última versión del Visual MODFLOW Flex.

Como parte del desarrollo del proyecto, se realizó el traspaso del modelo Copiapó desarrollado por SERNAGEOMIN (2012) a una versión actualizada. El modelo original fue desarrollado en la versión Visual MODFLOW 4.2 utilizando el motor numérico MODFLOW 2000. La Tabla 5.1 siguiente muestra algunos detalles del cambio realizado en el traspaso del modelo a Visual MODFLOW 2012 versión 4.6.

**Tabla 5.1**  
**Detalles del traspaso de software de modelación hidrogeológica**

PROYECTO	SERNAGEOMIN (2012)	DGA-HIDROMAS (2013)
Versión	Visual MODFLOW 4.2	Visual MODFLOW 4.6
Motor	Modflow 2000	Modflow 2005
Solver	SAMG	PCG
Grilla	200x200	200x200

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.3 Estructura Modelo Hidrogeológico SERNAGEOMIN (2012)

El modelo hidrogeológico de Copiapó desarrollado por SERNAGEOMIN (2012), posee dos modelos numéricos independientes, el modelo Sector Alto y Modelo Sector Bajo.

#### 5.3.1 Sector Alto (Subsectores 1 y 2)

Este modelo representa los sectores administrativos 1 y 2, comprendidos desde las estaciones fluviométricas de cabecera hasta Copiapó en La Puerta, lugar en que existe un alzamiento del basamento rocoso que limita el paso de flujo subterráneo al acuífero siguiente.

#### 5.3.2 Sector Bajo (Subsectores 3, 4, 5 y 6)

Este modelo está asociado a los acuíferos 3 a 6 correspondientes al tramo comprendido entre Copiapó en La Puerta y Copiapó en Angostura. En la zona terminal de este acuífero, también existe un alzamiento del basamento rocoso, que limita el flujo subterráneo y genera afloramientos medidos en la estación fluviométrica.

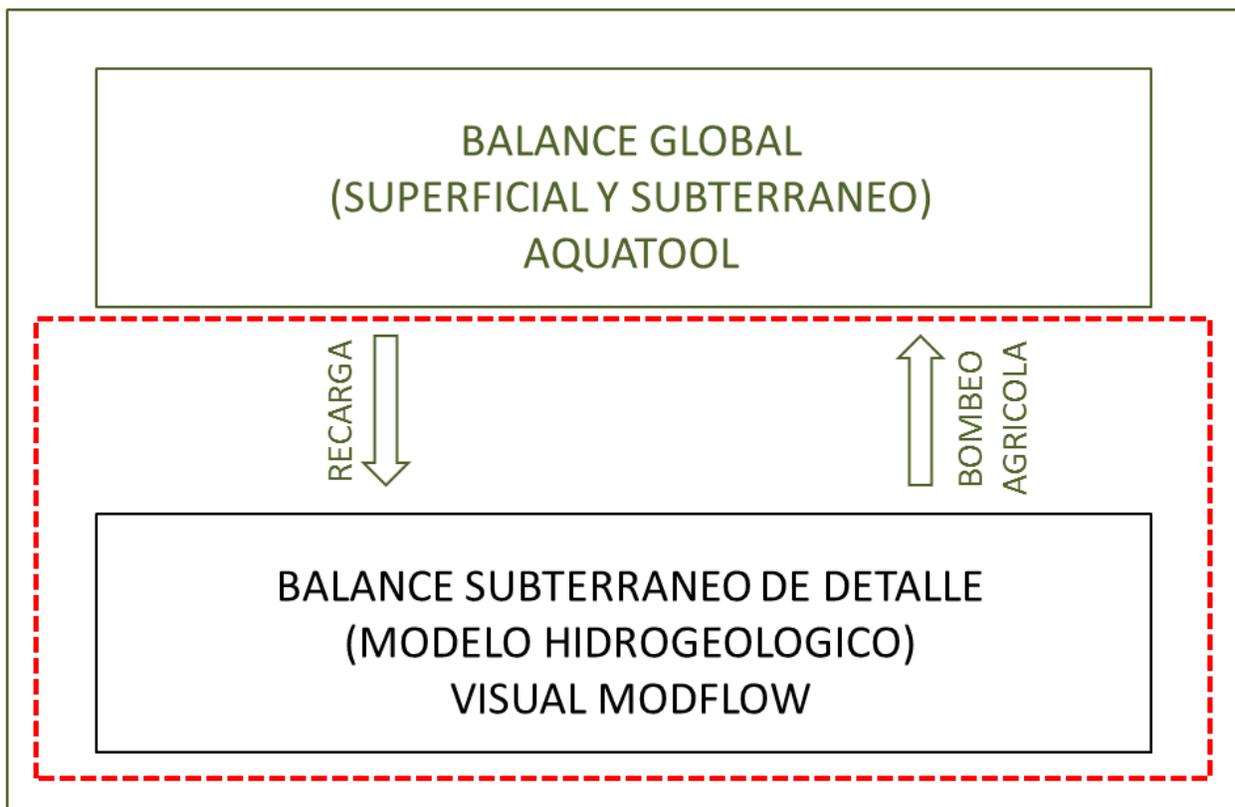
#### 5.4 Esquema de Acople de los Modelos AQUATOOL y Visual MODFLOW

Para la modelación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca del río Copiapó, se ha acoplado la información y resultados del modelo AQUATOOL al modelo subterráneo Visual MODFLOW. Para lo anterior, se utiliza un esquema de cálculo externo que permite la incorporación de la información de forma simplificada.

El modelo AQUATOOL, que genera el balance hídrico a nivel mensual, entrega al modelo de aguas subterránea la serie de recarga superficial (ríos, canales y zonas de riego) para cada elemento acuífero definido en AQUATOOL. Asimismo, se generan los bombeos agrícolas, en función de la satisfacción de las demandas de riego impuestas. Las series de recarga, son incorporadas a nivel anual y distribuidas espacialmente por acuífero en todo el dominio del acuífero del modelo Visual MODFLOW. Las series de bombeo agrícola obtenidas de AQUATOOL, se reparten a cada pozo ubicado en los sectores acuíferos definidos en el dominio del modelo Visual MODFLOW, según una prorrata realizada a nivel anual de acuerdo a las capacidades de las bombas indicadas en el catastro de DICTUC (2010).

La Figura 5.1 muestra de forma simplificada, la relación de las componentes del balance hídrico, que permite el acople de los modelos

**Figura 5.1**  
**Esquema de Acople Propuesto**



Fuente: Elaboración Propia.

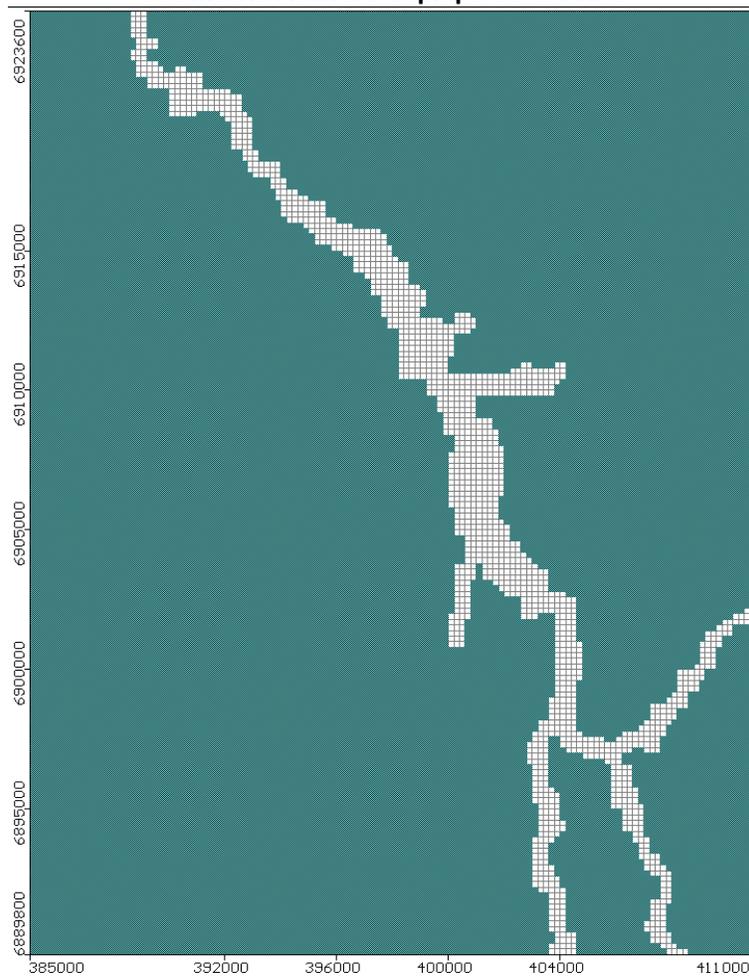
## 5.5 Cambios Realizados en Modelo Original (SERNAGEOMIN, 2012)

### 5.5.1 Geometría y Basamento

La geometría en planta del modelo Copiapó, tanto para los modelos de la Sector Alto y Sector Bajo, están limitados por el acuífero sedimentario definido por el contacto roca-relleno, definido inicialmente en el estudio DGA-DICTUC 2010. En las Figura 5.2 y Figura 5.3.

se muestra la geometría en planta de los modelos sector alto y sector bajo, desarrollados por SERNAGEOMIN (2012), y traspasada a la versión actual de Visual MODFLOW. Para ambos modelos numéricos la grilla implementada es de 200m x 200m, homogénea para todo el sistema acuífero.

**Figura 5.2**  
**Geometría Acuífero Copiapó Sector Alto**



Fuente: Elaboración Propia.

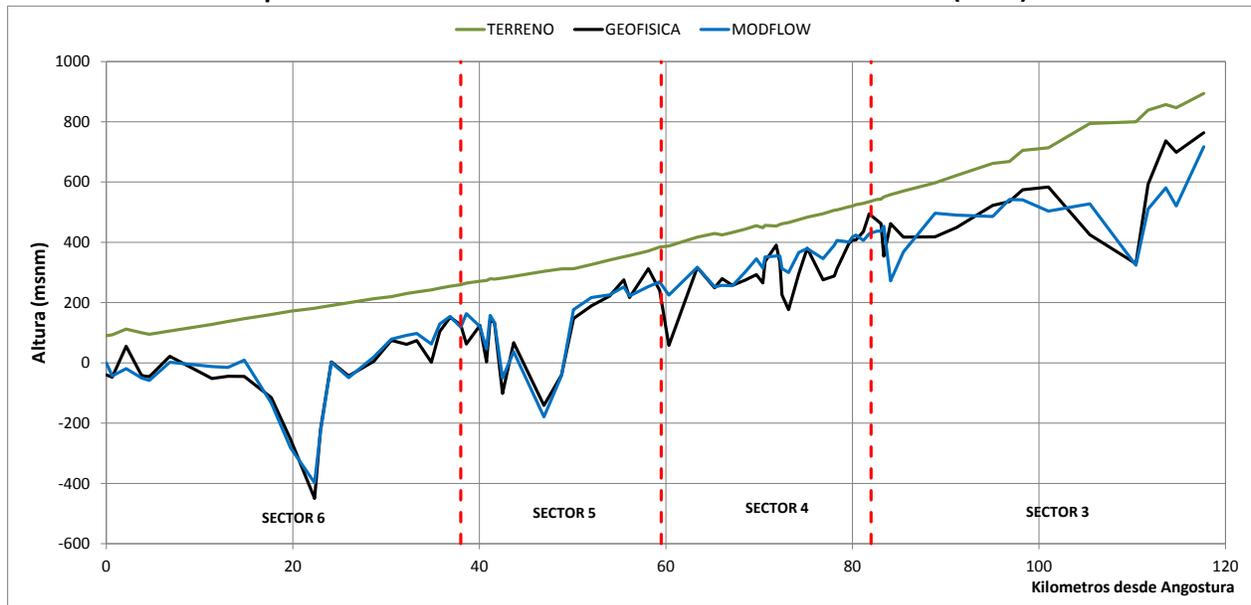
**Figura 5.3**  
**Geometría Acuífero Copiapó Sector Bajo**



Fuente: Elaboración Propia.

El modelo original de SERNAGEOMIN (2012) representó la geometría vertical con la información geofísica disponible al momento del desarrollo del modelo hidrogeológico. La Figura 5.4 muestra una comparación en un perfil longitudinal de la posición del basamento según la geofísica disponible en el sector bajo del acuífero y la representada por el modelo SERNAGEOMIN (2012). En la figura es posible apreciar que los sectores 5 y 6 muestran una mejor representación del basamento rocoso en el modelo numérico según lo definido por la información geofísica, mientras que los acuíferos 3 y 4 presentan una representación menos precisa.

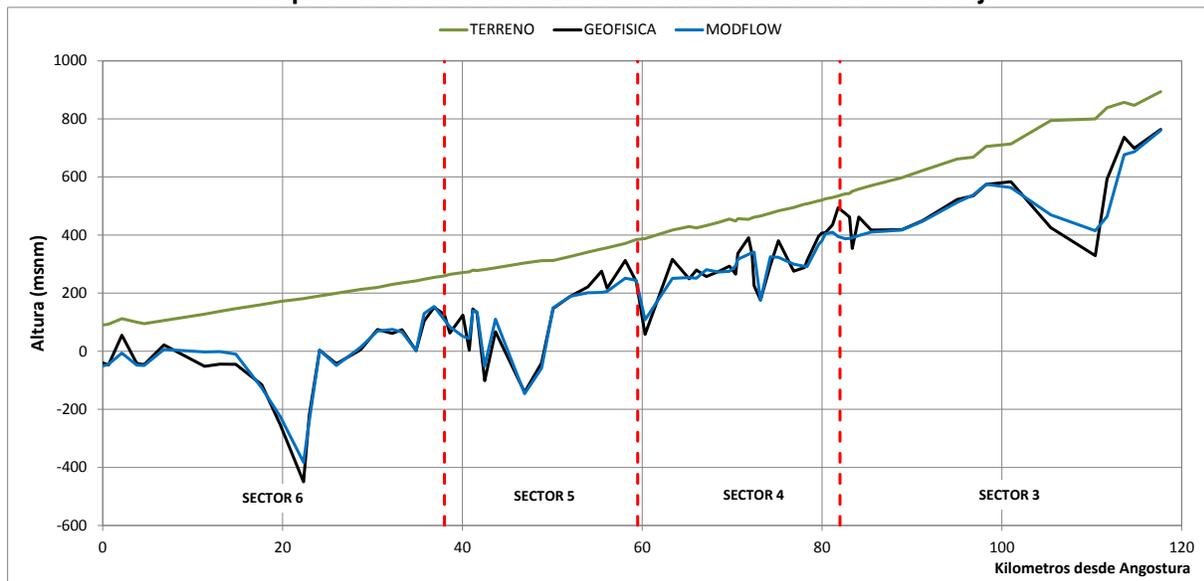
**Figura 5.4**  
**Representación del basamento del modelo SERNAGEOMIN (2012)**



Fuente: Elaboración Propia.

En este trabajo, se ha mejorado la representación del basamento rocoso del modelo hidrogeológico parte baja, principalmente en los sectores 3 y 4, obteniéndose una representación del modelo mucho más cercano a la interpretada en las diferentes estaciones de geofísica. La Figura 5.5 muestra esta comparación del basamento para el modelo actual, con la geofísica disponible.

**Figura 5.5**  
**Representación del basamento del modelo actual sector bajo**



Fuente: Elaboración Propia.

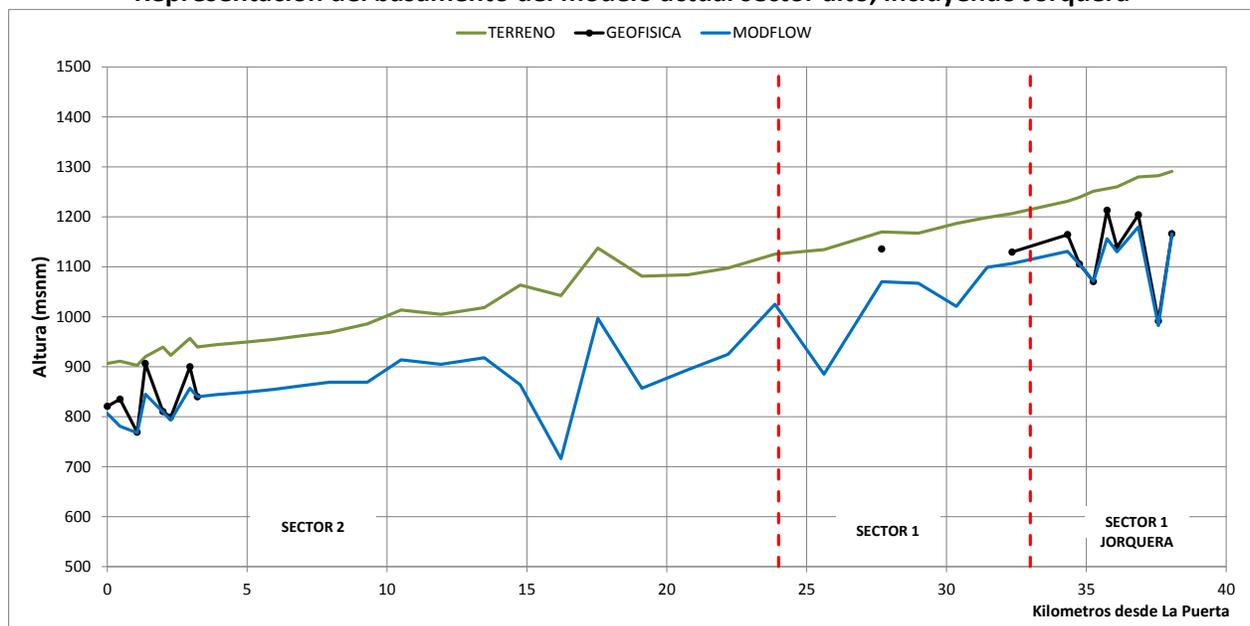
La Figura 5.6,

Figura 5.7 y Figura 5.8 muestran los perfiles longitudinales de la posición del basamento rocoso para el modelo del sector alto de Copiapó, es decir, los sectores acuíferos 1 y 2, incluyendo los afluentes de Pulido, Jorquera y Manflas. Estos perfiles del modelo hidrogeológico, incorporan la interpretación de las profundidades del basamento obtenidas de la geofísica desarrollada en el presente trabajo.

Cabe resaltar que un criterio de representación del basamento en el modelo numérico está asociado a mantener un espesor mínimo de relleno sedimentario de 100 m, para no generar problemas numéricos asociados a secado de celdas.

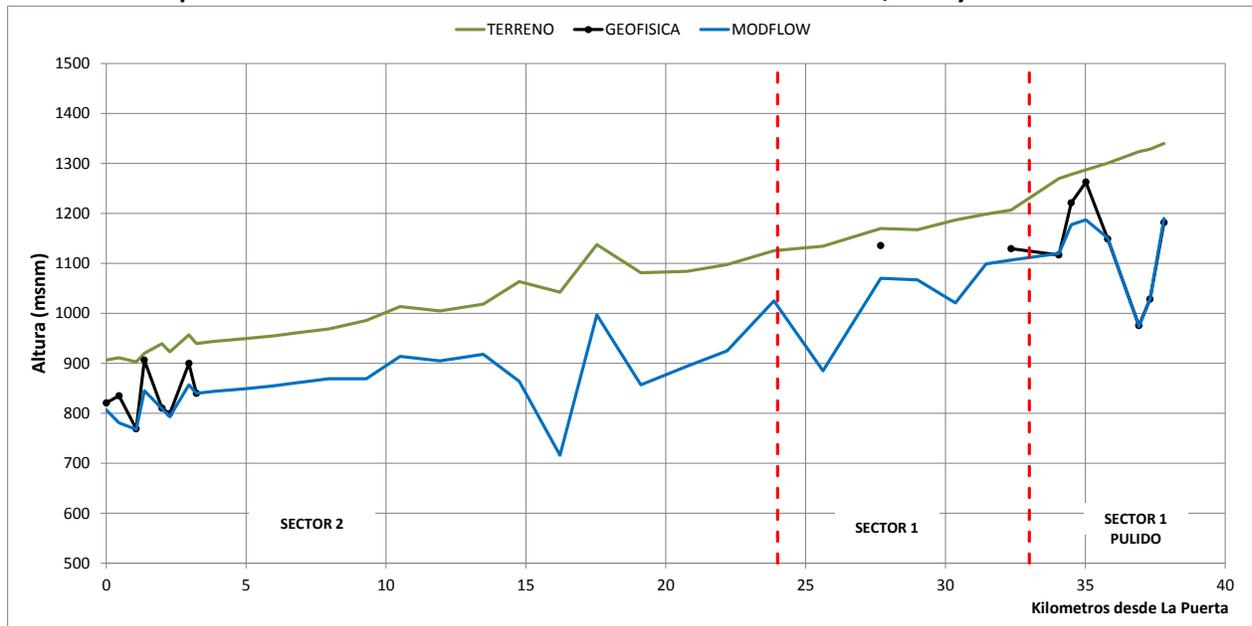
Otro de los aspectos relevantes referente al cambio en la geometría de los modelos parte alta y modelo parte baja, es que no generó mayores cambios en la representación de los niveles y balance hídrico. Los cambios más importantes están asociados con la nueva representación de los bombeos y recargas del acuífero.

**Figura 5.6**  
**Representación del basamento del modelo actual sector alto, incluyendo Jorquera**



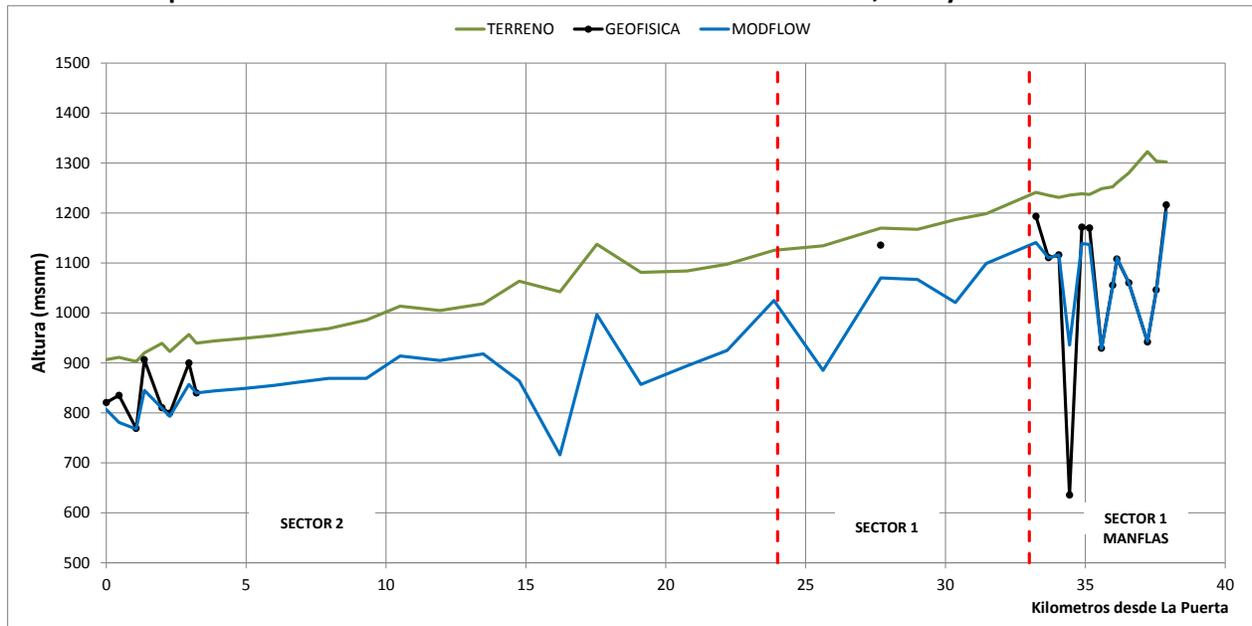
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.7**  
**Representación del basamento del modelo actual sector alto, incluyendo Pulido**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.8**  
**Representación del basamento del modelo actual sector alto, incluyendo Manflas**

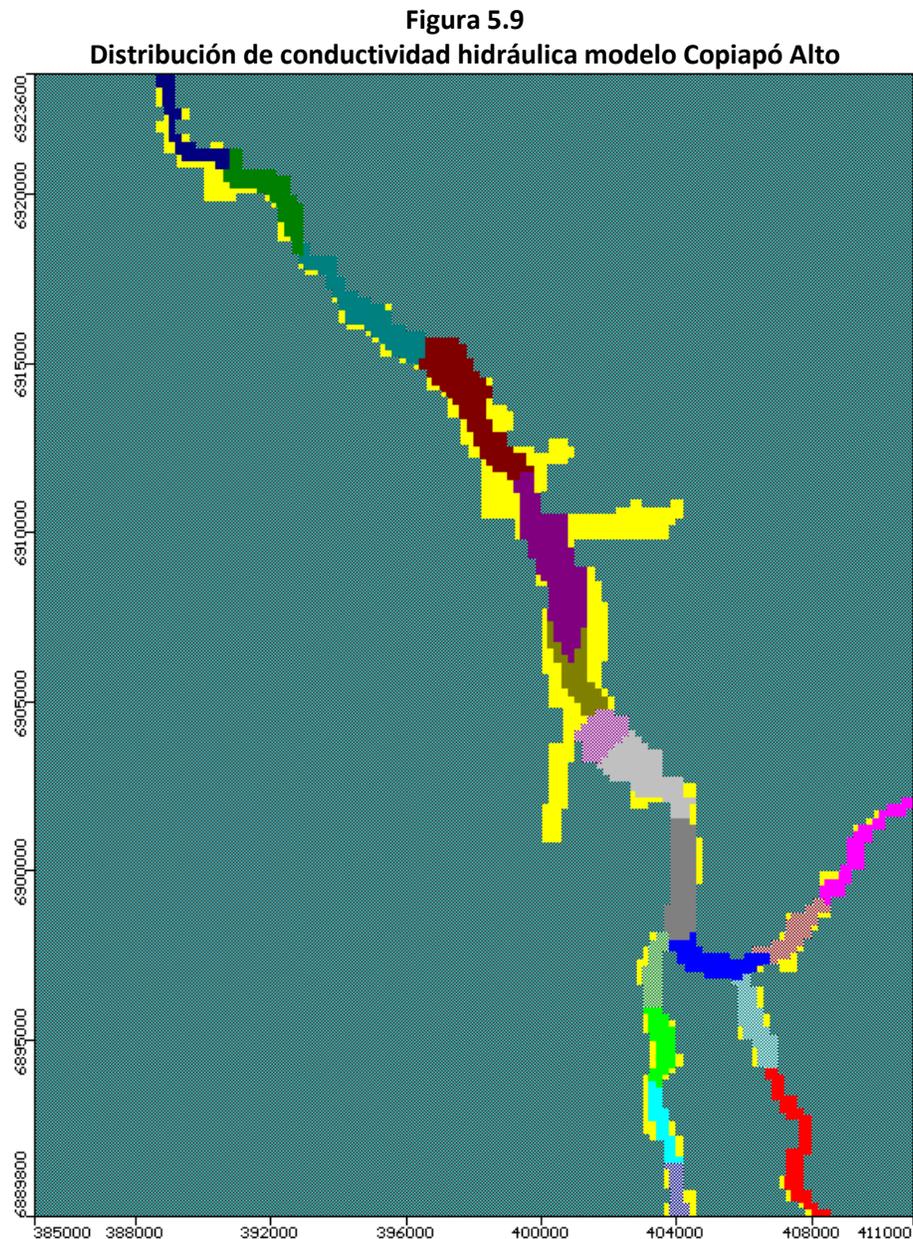


Fuente: Elaboración Propia.

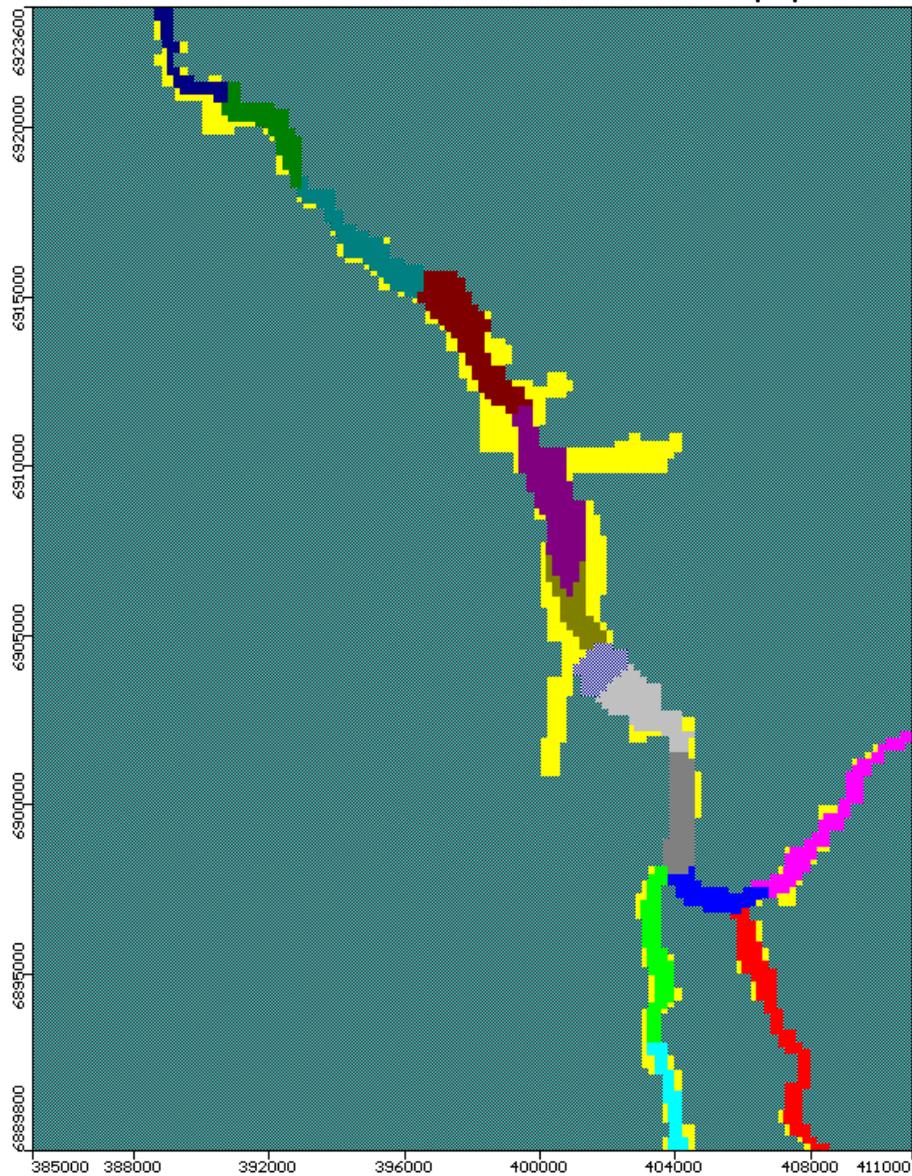
### 5.5.2 Parámetros Hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos del modelo numérico de Copiapó, corresponden a la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. Estos parámetros han resultado del proceso de calibración y validación realizado, considerando rangos adecuados de acuerdo a las condiciones físicas del acuífero de Copiapó. Los valores generales no han variado mayormente desde el modelo original.

Para el modelo del sector alto, se han considerado 20 zonas de conductividad hidráulica, tal como se muestra en la Figura 5.9 y 16 zonas de coeficiente de almacenamiento, Figura 5.10, de tal forma reproducir de la mejor forma posible los niveles de agua subterránea en el acuífero.



**Figura 5.10**  
**Distribución de coeficiente de almacenamiento modelo Copiapó Alto**

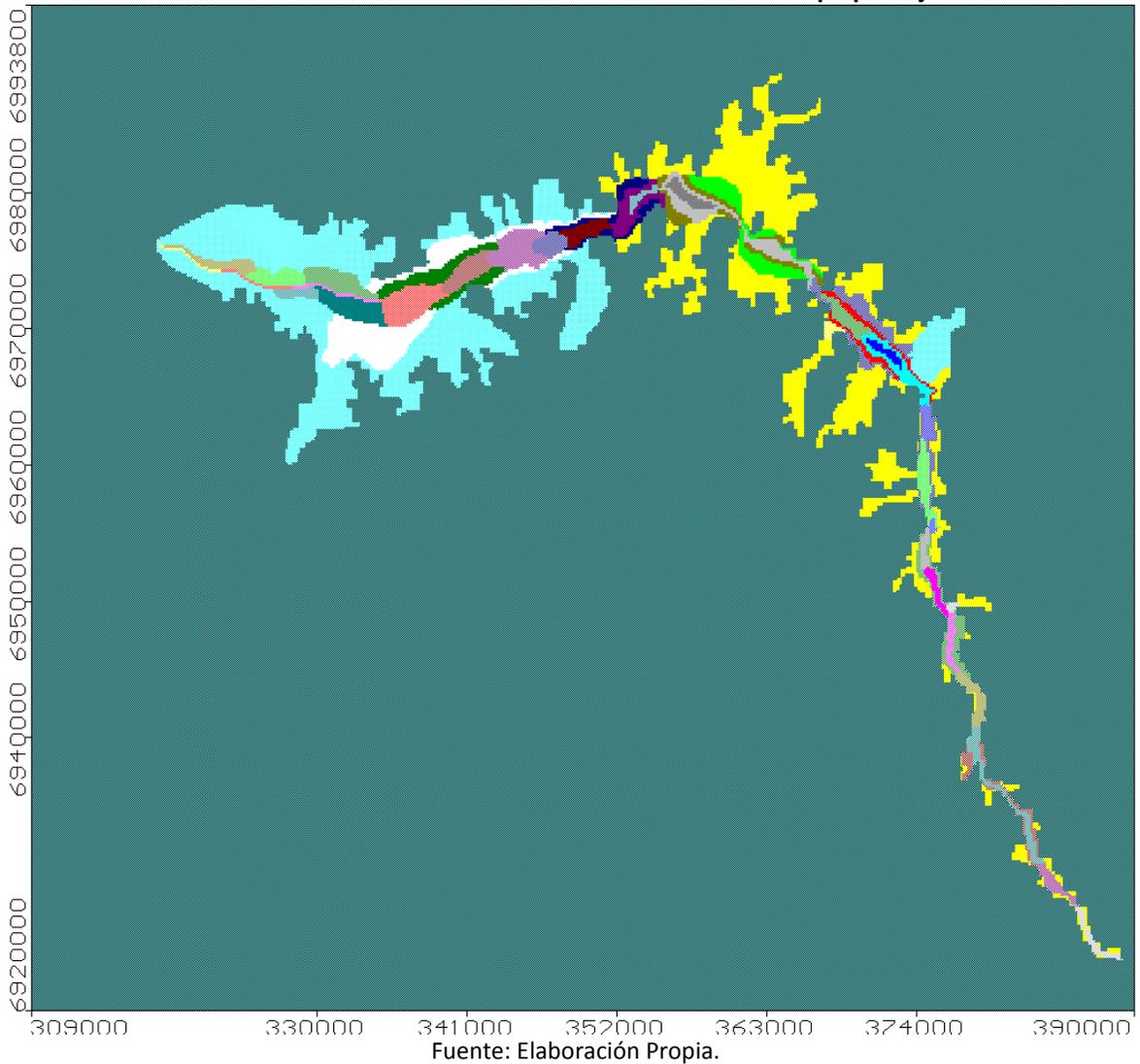


Fuente: Elaboración Propia.

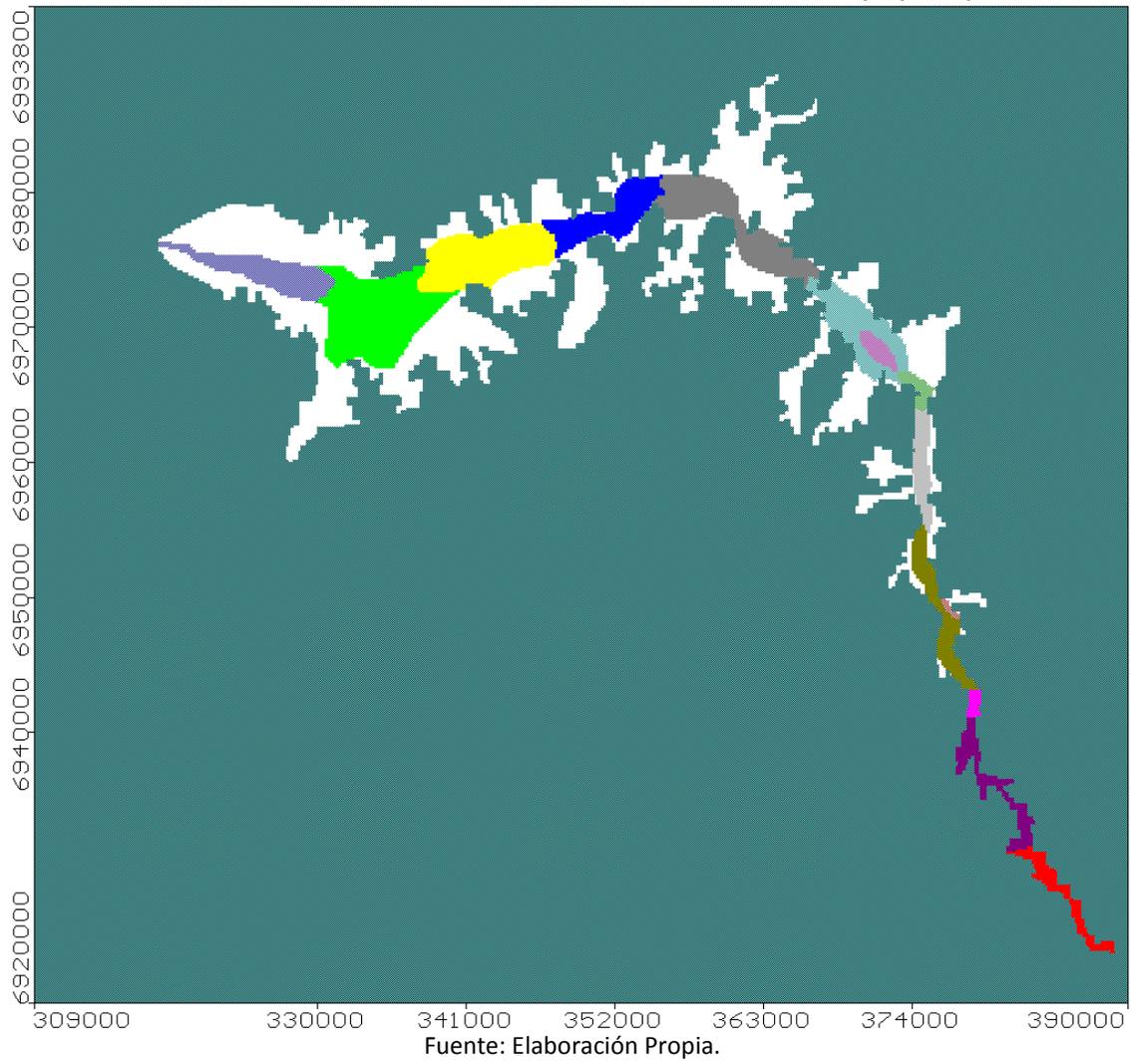
En el caso del modelo de la zona baja de la cuenca, se ha definido 46 zonas de conductividad hidráulica y 16 zonas de coeficiente de almacenamiento, tal como se muestra en las Figura 5.11 y Figura 5.12, respectivamente.

En este caso, se ha modificado la distribución de las zonas de permeabilidad del modelo original, principalmente en el Sector 6, de modo de tener una condición más representativa de los niveles de agua subterránea. Cabe resaltar, que los cambios de las zonas de conductividad mantienen los órdenes de magnitud de los valores definidos en los estudios anteriores.

**Figura 5.11**  
**Distribución de conductividad hidráulica modelo Copiapó Bajo**

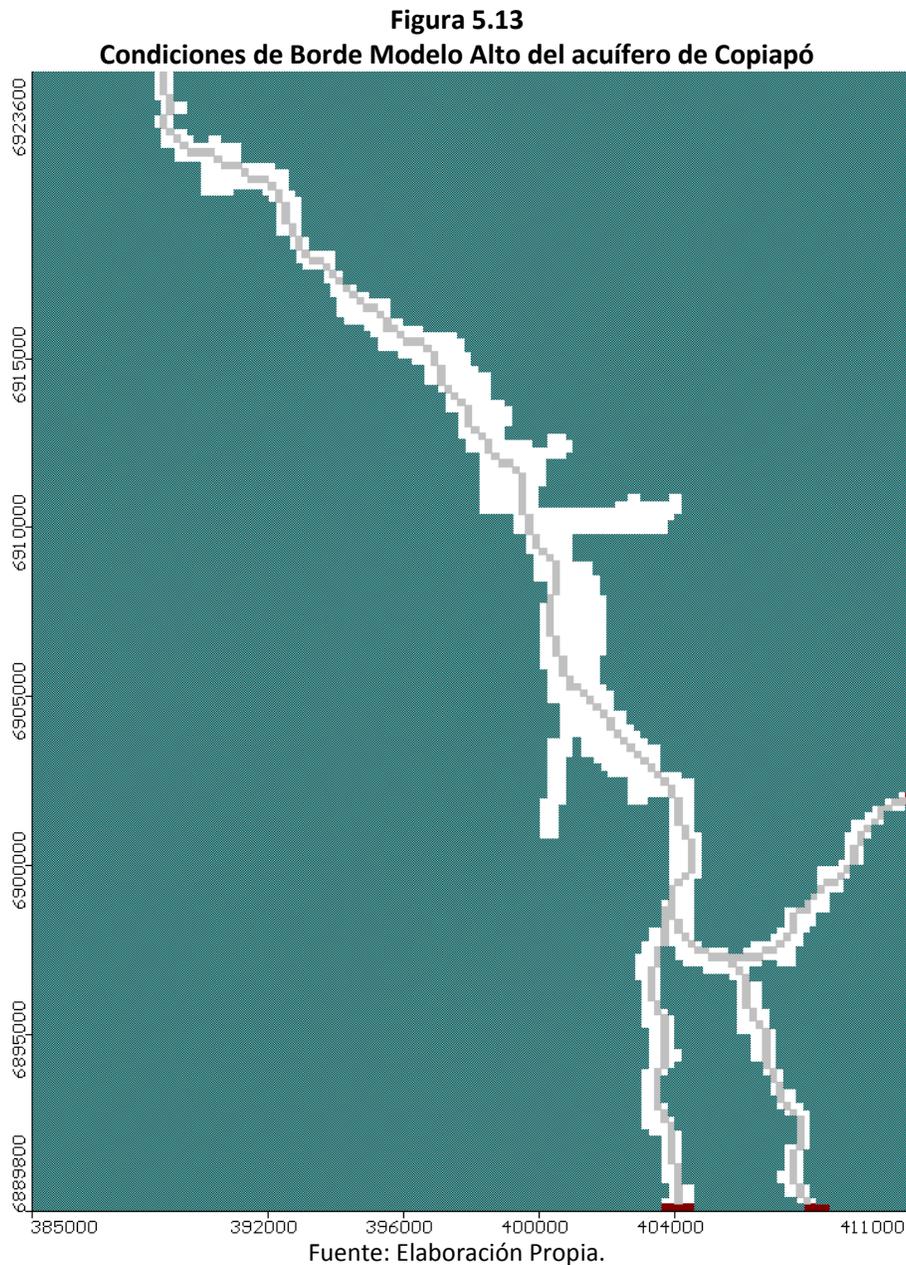


**Figura 5.12**  
**Distribución de coeficiente de almacenamiento modelo Copiapó Bajo**



### 5.5.3 Condiciones de Borde

En el modelo sector alto, las condiciones de borde se han mantenido del modelo original y considera tres niveles conocidos en la cabecera de los afluentes Pulido, Jorquera y Manflas. Adicionalmente, se ha impuesto una condición de drenaje en el eje del cauce que permita reflejar los afloramientos del sistema, en los lugares en que la napa freática se encuentre somera, tal como ocurre en el Sector 2 en la localidad de los Loros, aguas arriba de la estación fluviométrica de Copiapó en La Puerta. Desde el punto de vista temporal, las condiciones de borde se han extendido desde el año 1993 hasta el año 2010 en el periodo de calibración y hasta el año 2012 para la validación del modelo numérico. La Figura 5.13 muestra las condiciones de borde utilizadas en el modelo de la zona alta del acuífero.



En el modelo sector bajo, las condiciones de borde se han mantenido del modelo original y considera una condición de drenaje en el eje del cauce principal del río Copiapó, que permita reproducir los

afloramientos, que se identifican aguas abajo de la localidad de Piedra Colgada hasta la zona de Angostura donde la napa freática se encuentra cercana a la superficie del terreno. Desde el punto de vista temporal, las condiciones de borde se han extendido desde el año 1993 hasta el año 2010 en el periodo de calibración y hasta el año 2012 para la validación del modelo numérico. La Figura 5.14 muestra las condiciones de borde utilizadas en el modelo de la zona baja del acuífero.

**Figura 5.14**  
**Condiciones de Borde Modelo Bajo del acuífero de Copiapó**



#### **5.5.4 Tasas de Recarga**

Los montos de recarga para el modelo alto y bajo han sido estimadas a partir del modelo AQUATOOL, en que para cada sector se define un monto de recarga a nivel mensual por cada elemento de acuífero del modelo integrado. La Tabla 5.2 muestra los montos de recarga por acuífero provenientes del modelo AQUATOOL que se disponen en Visual MODFLOW Modelo Alto, de acuerdo a la zonificación de la Figura 5.15.

Es importante mencionar que la recarga proveniente del modelo integrado se define como recarga por infiltración de las zonas agrícolas, infiltración de canales e infiltración de los tramos de río, las que se han agrupado como la recarga de cada acuífero. Adicionalmente, se ha identificado los caudales de

infiltración desde el embalse Lautaro en el Sector 1, las pérdidas del sistema distribución de agua potable en el Sector 4 y la infiltración de la descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas en el Sector 5.

**Tabla 5.2**  
**Recarga Acuífero Modelo Alto**

Año	RECARGA (m <sup>3</sup> /s)						
	SA01a	SA01b	SA01c	SA01d	Embalse	SA02a	TOTAL
1993	0,41	0,33	0,16	0,27	1,22	0,15	2,53
1994	0,20	0,21	0,11	0,17	0,50	0,13	1,32
1995	0,21	0,22	0,11	0,17	0,38	0,13	1,22
1996	0,15	0,20	0,11	0,16	0,26	0,12	1,01
1997	0,72	0,33	0,14	0,29	0,63	0,13	2,24
1998	0,86	0,43	0,20	0,38	1,30	0,13	3,30
1999	0,38	0,31	0,18	0,26	1,25	0,19	2,57
2000	0,26	0,28	0,14	0,22	1,04	0,13	2,06
2001	0,33	0,32	0,14	0,25	1,12	0,16	2,32
2002	0,54	0,33	0,16	0,28	1,07	0,15	2,52
2003	0,56	0,39	0,18	0,32	1,27	0,17	2,89
2004	0,32	0,26	0,16	0,22	1,12	0,16	2,24
2005	0,26	0,25	0,15	0,21	0,73	0,15	1,76
2006	0,23	0,28	0,13	0,22	1,03	0,15	2,05
2007	0,25	0,22	0,12	0,18	0,43	0,13	1,33
2008	0,37	0,28	0,17	0,24	1,11	0,15	2,32
2009	0,13	0,20	0,13	0,17	0,47	0,14	1,23
2010	0,15	0,21	0,13	0,18	0,39	0,13	1,19
2011	0,21	0,22	0,12	0,18	0,35	0,13	1,20
2012	0,17	0,23	0,12	0,18	0,47	0,13	1,30
<b>1993-2012</b>	<b>0,33</b>	<b>0,27</b>	<b>0,14</b>	<b>0,23</b>	<b>0,81</b>	<b>0,14</b>	<b>1,93</b>

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 5.3 muestra los montos de recarga por acuífero provenientes del modelo AQUATOOL que se disponen en Visual MODFLOW Modelo Bajo, de acuerdo a la zonificación de la Figura 5.16.

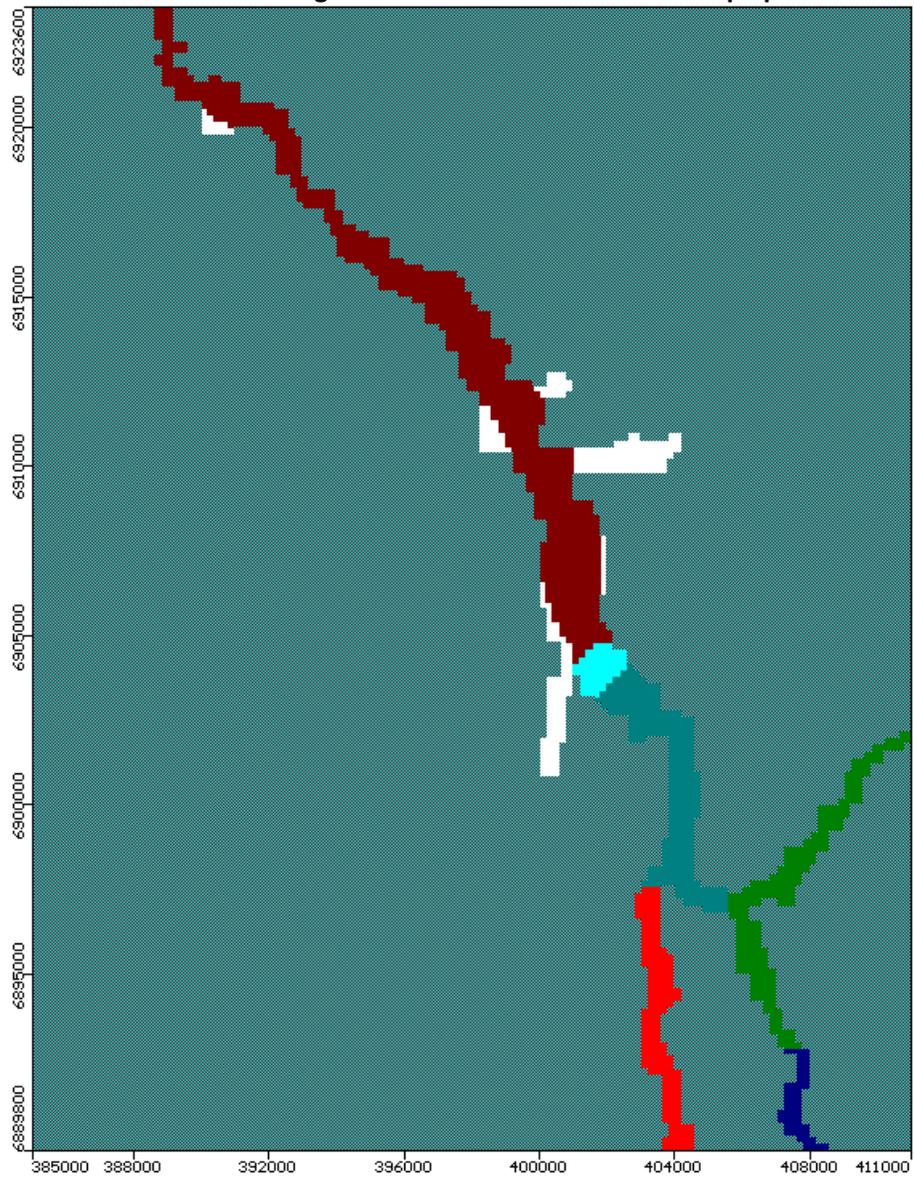
Por último, la Figura 5.17 muestra la distribución histórica de la recarga del acuífero de Copiapó, que considera un promedio de 4,5 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 5.3**  
**Recarga Acuífero Modelo Bajo**

Año	RECARGA (m <sup>3</sup> /s)								
	SA03a	SA03b	SA04a	SA05a	SA06a	SA06b	AP A04a	PTAS A05a	TOTAL
1993	0,56	0,66	0,80	0,39	0,15	0,02	0,05	0,08	2,72
1994	0,46	0,58	0,74	0,23	0,03	0,00	0,06	0,10	2,20
1995	0,43	0,54	0,71	0,23	0,02	0,00	0,10	0,15	2,19
1996	0,40	0,50	0,67	0,18	0,01	0,00	0,10	0,16	2,03
1997	0,49	0,58	0,74	0,42	0,21	0,07	0,09	0,14	2,74
1998	0,75	0,81	1,01	0,94	0,62	0,19	0,05	0,09	4,45
1999	0,48	0,64	0,82	0,15	0,04	0,00	0,14	0,22	2,49
2000	0,46	0,55	0,71	0,32	0,05	0,00	0,09	0,14	2,32
2001	0,50	0,64	0,81	0,23	0,05	0,00	0,12	0,19	2,53
2002	0,53	0,60	0,78	0,42	0,11	0,01	0,10	0,16	2,71
2003	0,65	0,72	0,96	0,64	0,34	0,07	0,10	0,16	3,64
2004	0,48	0,60	0,78	0,22	0,05	0,00	0,11	0,18	2,42
2005	0,50	0,59	0,86	0,33	0,06	0,00	0,13	0,20	2,67
2006	0,46	0,56	0,79	0,26	0,03	0,00	0,12	0,19	2,43
2007	0,44	0,55	0,74	0,26	0,03	0,00	0,18	0,30	2,49
2008	0,43	0,56	0,72	0,15	0,02	0,00	0,18	0,29	2,34
2009	0,43	0,53	0,73	0,21	0,00	0,00	0,17	0,27	2,33
2010	0,40	0,49	0,68	0,18	0,00	0,00	0,18	0,12	2,05
2011	0,37	0,46	0,65	0,14	0,00	0,00	0,18	0,12	1,92
2012	0,35	0,44	0,62	0,08	0,00	0,00	0,20	0,14	1,83
<b>1993-2012</b>	<b>0,48</b>	<b>0,58</b>	<b>0,77</b>	<b>0,30</b>	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>	<b>0,12</b>	<b>0,17</b>	<b>2,52</b>

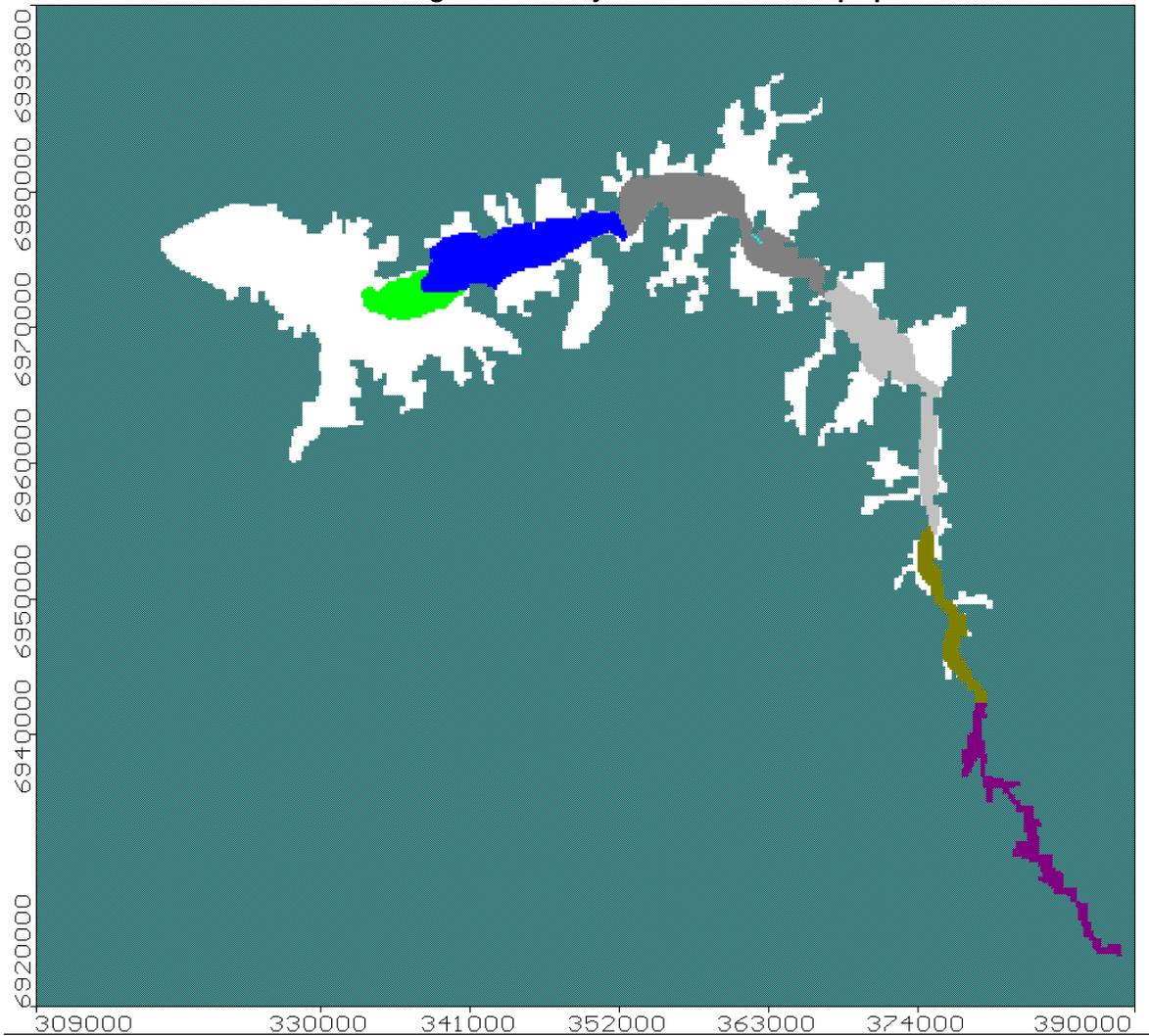
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.15**  
**Zonas de Recarga Modelo Alto del acuífero de Copiapó**



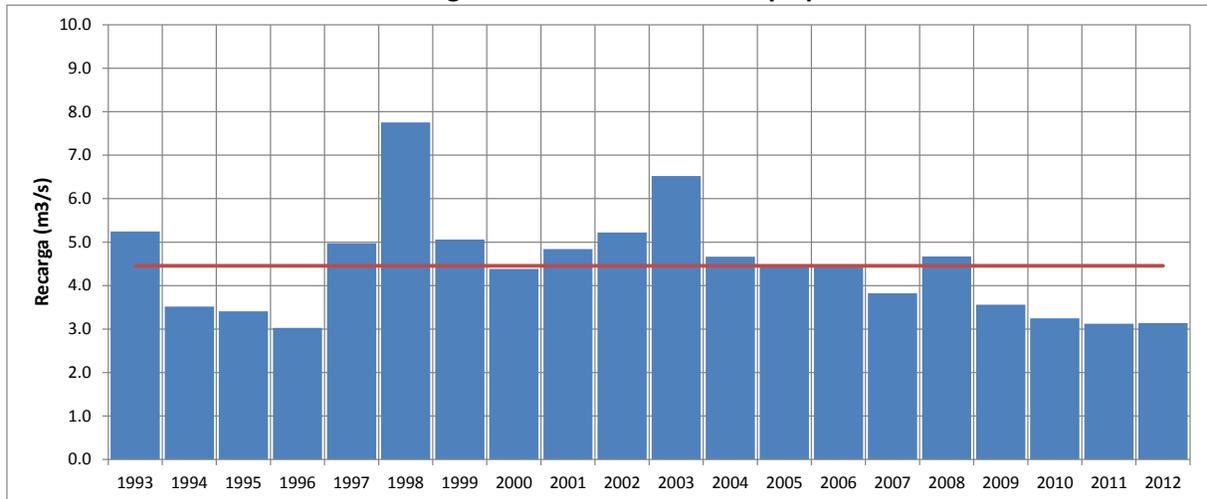
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.16**  
**Zonas de Recarga Modelo Bajo del acuífero de Copiapó**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.17**  
**Recarga Total del acuífero de Copiapó**



Fuente: Elaboración Propia.

### 5.5.5 Pozos de Bombeo

Para representar los pozos de extracción, se consideran tres usos principales asociados a pozos agrícolas, agua potable y minería. Para los pozos de bombeo agrícolas, se ha identificado la disposición espacial de los pozos en la cuenca de Copiapó desde el catastro realizado por DICTUC (2010). En este catastro, se identificó la posición, dueño y las capacidades de bombeo de cada uno de los pozos.

De la información de caudales de bombeo obtenida del modelo AQUATOOL, se genera el caudal total de bombeo para uso agrícola, por sector acuífero, el que se prorratea a nivel anual de acuerdo a las capacidades de las bombas indicadas en el catastro de DICTUC (2010). La Tabla 5.4 muestra los valores de bombeo para riego según sector hidrogeológico.

Para las extracciones de la Minería y Agua Potable, se ha estimado el uso desde 1993 a 2006, a partir del estudio de DICTUC (2010), corregida de acuerdo a los antecedentes de la localización de los proyectos. Adicionalmente, para esta consultoría, se cuenta con la información detallada, a nivel mensual, de los caudales de producción de los pozos de agua potable de la empresa Aguas Chañar y de los pozos de los distintos proyectos mineros que se encuentran en el acuífero de Copiapó, desde 2007 a 2012. La Tabla 5.5, resume la información de extracciones de agua potable y minería, utilizados en el modelo numérico. La Figura 5.18 y Figura 5.19 muestran la disposición espacial de los pozos de bombeo para los modelos del sector alto y sector bajo, respectivamente.

**Tabla 5.4**  
**Caudales de Bombeo para Riego 1993-2012**

Año	BOMBEO (m <sup>3</sup> /s)						TOTAL
	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06	
1993	0,12	0,38	0,91	0,54	0,58	0,27	2,81
1994	0,16	0,79	1,28	0,62	0,66	0,31	3,83
1995	0,16	0,88	1,30	0,64	0,66	0,32	3,96
1996	0,21	0,97	1,34	0,68	0,68	0,33	4,21
1997	0,11	0,50	0,87	0,53	0,58	0,27	2,86
1998	0,03	0,02	0,44	0,23	0,35	0,16	1,24
1999	0,25	0,74	1,64	0,83	0,87	0,43	4,75
2000	0,11	0,55	1,08	0,54	0,56	0,26	3,11
2001	0,19	0,83	1,43	0,70	0,75	0,36	4,26
2002	0,14	0,51	0,97	0,62	0,63	0,30	3,18
2003	0,14	0,36	0,96	0,59	0,64	0,30	2,98
2004	0,18	0,64	1,37	0,68	0,73	0,35	3,94
2005	0,22	1,07	1,57	0,77	0,81	0,39	4,83
2006	0,22	0,90	1,51	0,73	0,77	0,37	4,50
2007	0,16	0,92	1,33	0,65	0,68	0,32	4,07
2008	0,20	0,84	1,46	0,72	0,75	0,36	4,33
2009	0,22	0,98	1,44	0,71	0,73	0,35	4,43
2010	0,19	1,00	1,42	0,72	0,73	0,35	4,41
2011	0,19	1,01	1,42	0,72	0,73	0,35	4,42
2012	0,20	1,01	1,42	0,72	0,73	0,35	4,43
<b>1993-2012</b>	<b>0,17</b>	<b>0,75</b>	<b>1,26</b>	<b>0,65</b>	<b>0,68</b>	<b>0,33</b>	<b>3,83</b>

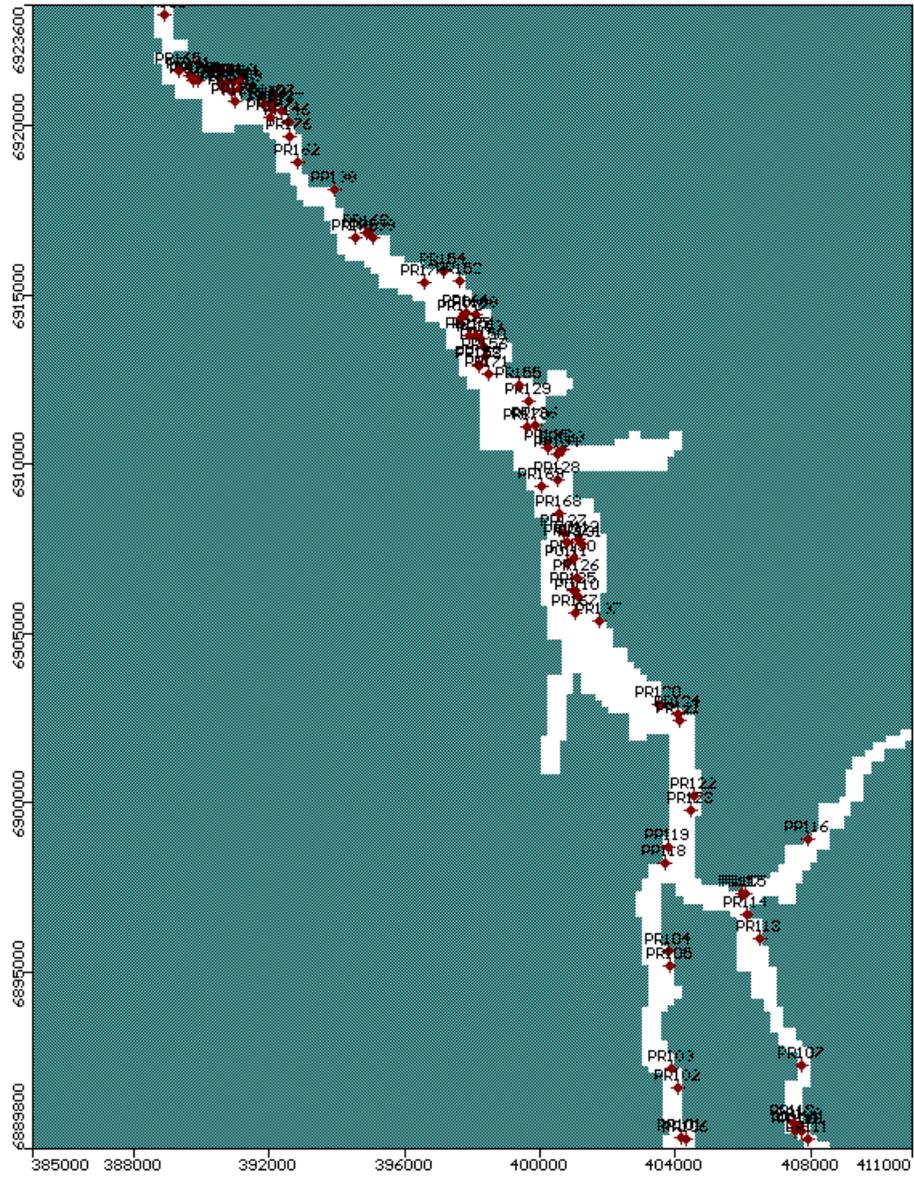
Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 5.5**  
**Caudales de bombeo para Agua Potable y Minería 1993-2012**

Año	Agua Potable (L/s)				Minería (L/s)				
	SA03	SA04	SA05	TOTAL	SA01	SA03	SA04	A05	TOTAL
1993	0	176	0	<b>176</b>	0	0	233	0	<b>233</b>
1994	0	200	0	<b>200</b>	0	0	279	0	<b>279</b>
1995	0	320	0	<b>320</b>	0	0	272	0	<b>272</b>
1996	0	341	0	<b>341</b>	0	0	356	0	<b>356</b>
1997	0	287	0	<b>287</b>	0	0	299	0	<b>299</b>
1998	0	182	0	<b>182</b>	0	0	179	0	<b>179</b>
1999	0	457	0	<b>457</b>	0	0	449	0	<b>449</b>
2000	0	294	0	<b>294</b>	0	0	288	0	<b>288</b>
2001	0	393	0	<b>393</b>	0	0	386	0	<b>386</b>
2002	0	332	0	<b>332</b>	0	0	326	0	<b>326</b>
2003	0	329	0	<b>329</b>	0	0	324	0	<b>324</b>
2004	0	381	0	<b>381</b>	0	0	376	0	<b>376</b>
2005	0	423	0	<b>423</b>	0	0	418	0	<b>418</b>
2006	0	405	0	<b>405</b>	0	0	399	0	<b>399</b>
2007	0	616	0	<b>616</b>	0	0	495	57	<b>552</b>
2008	0	608	0	<b>608</b>	0	0	567	73	<b>641</b>
2009	0	559	0	<b>559</b>	0	0	634	57	<b>691</b>
2010	0	599	12	<b>611</b>	0	0	610	51	<b>661</b>
2011	38	493	83	<b>614</b>	0	18	564	65	<b>648</b>
2012	109	232	314	<b>654</b>	5	111	453	63	<b>633</b>

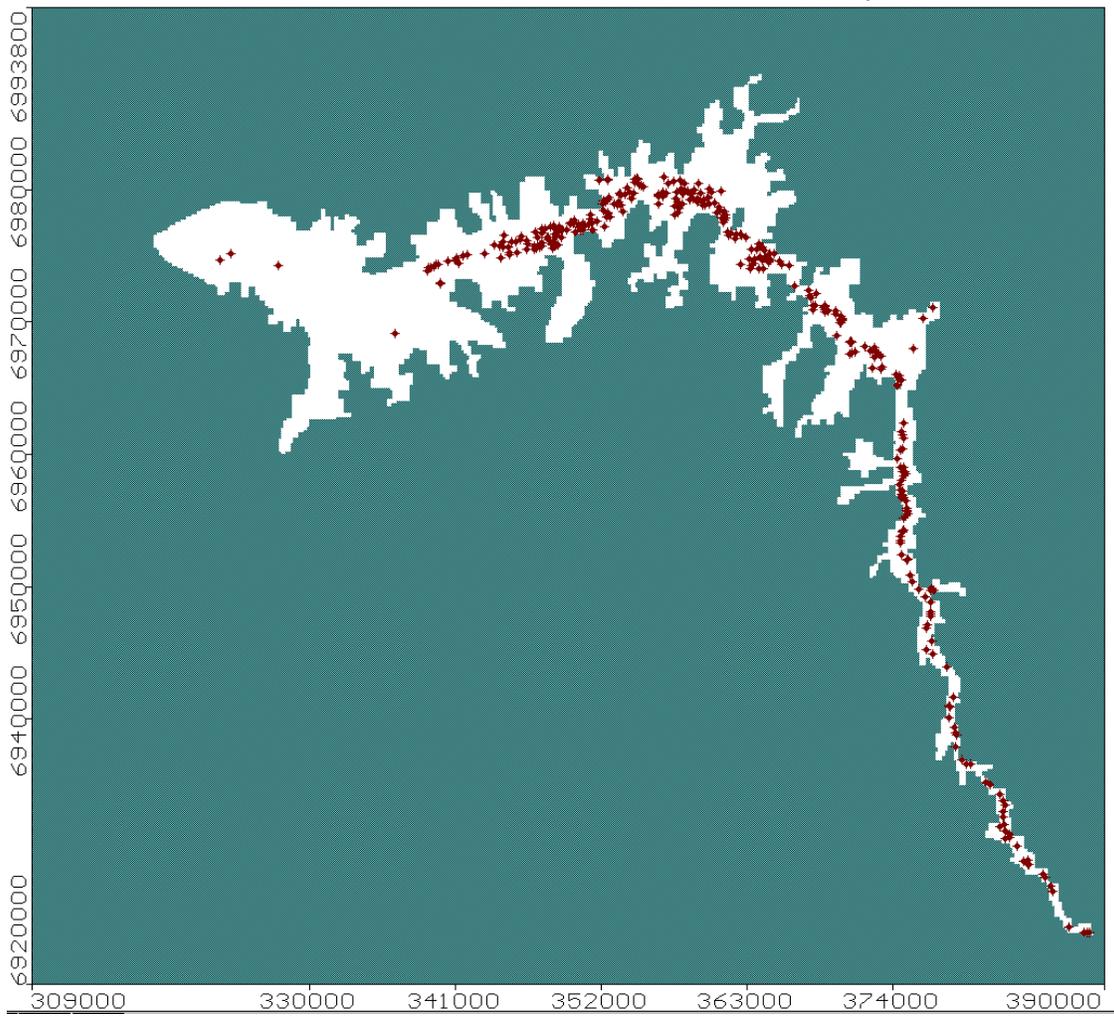
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.18**  
**Distribución de Pozos de Bombeo Modelo Sector Alto**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.19**  
**Distribución de Pozos de Bombeo Modelo Sector Bajo**



Fuente: Elaboración Propia.

### 5.5.6 Pozos de Monitoreo e Información de Niveles Piezométricos

Para efectos de la modelación se cuenta con un total de 54 pozos de observación, distribuidos entre los 6 sectores del acuífero de Copiapó, y que han sido utilizados para el ajuste del modelo hidrogeológico. El objetivo del ajuste del modelo numérico es reproducir el comportamiento histórico de los niveles de agua subterránea y de las direcciones del flujo principal de la napa en el acuífero.

Como parte de la actualización de la información de la red de niveles de agua subterráneas, se ha utilizado la última información de la DGA contenida en el estudio realizado por la empresa H2CUENCA (2012). La Tabla 5.6 muestra la información general de la red de observación de niveles de la DGA utilizada en el modelo numérico. La Figura 5.20 y Figura 5.21 muestran la representación espacial de los pozos de observación en los modelos de agua subterránea sector alto y sector bajo, respectivamente.

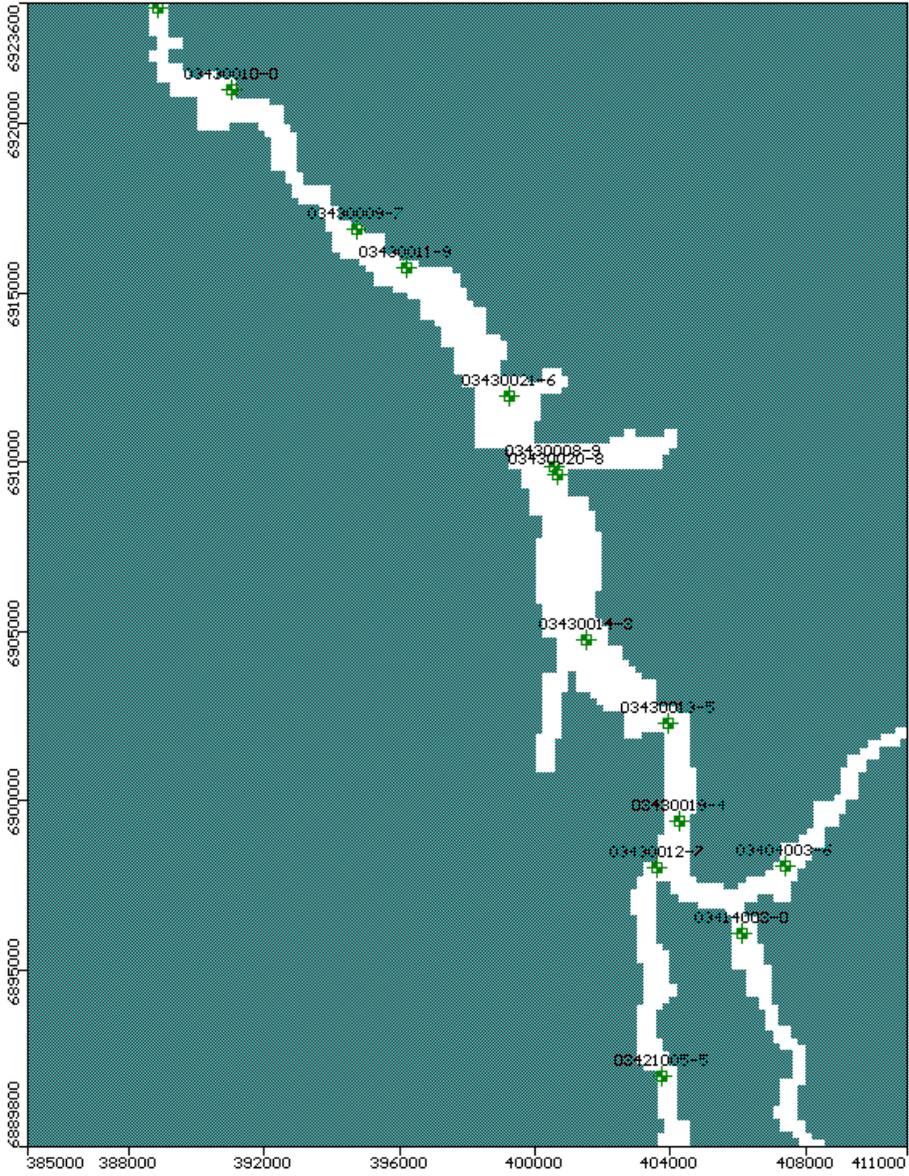
**Tabla 5.6**  
**Red de Pozos de Observación de Niveles de Agua Subterránea**

Código Pozo	Nombre Pozo	Coordenadas		Cota Terreno (msnm)	Nivel Freático Ene 1993 (msnm)	Fuente Cota de Terreno
		Este (m)	Norte (m)			
03414005-7	Iglesia Colorada	414735	6884188	1573,3	1556,7	H2Cuenca
03414004-9	Quebrada Seca	411977	6886169	1493,7	1483,9	H2Cuenca
03404003-6	Fundo Rodeo	407408	6898073	1248,1	1185,6	H2Cuenca
03421006-3	Hda. Manflas	403325	6886875	1429,7	1412,2	H2Cuenca
03421005-5	Hda. Manflas (Manflas ante Hda.)	403736	6891871	1296,7	1280,5	H2Cuenca
03414003-0	H. Cabo de Hornos	406121	6896100	1240,0	1192,9	H2Cuenca
03430012-7	Junta Manflas	403606	6898030	1198,2	1168,2	H2Cuenca
03430013-5	Algarrobo La Virgen	403915	6902276	1151,7	1133,9	H2Cuenca
03430008-9	Quebrada Calquis	400550	6909886	1075,0	1060,8	Inferido
03430011-9	Pueblo San Antonio	396199	6915749	1014,0	1000,0	Inferido
03430009-7	Vegas El Giro	394761	6916884	989,3	980,6	H2Cuenca
03430010-0	Escuela 17 Los Loros	391053	6921026	955,0	932,3	SERNAGEOMIN
03431009-2	Fundo La Puerta	388877	6923434	880,0	879,7	SERNAGEOMIN
03431006-8	Planta Elisa de Bordo	382092	6933492	753,2	715,1	H2Cuenca
03431008-4	Pabellón	378669	6942355	655,6	617,3	H2Cuenca
03431010-6	Quebrada Cerrillos	376689	6949649	597,8	576,8	H2Cuenca
03434005-6	Parcela 8 Nantoco	374747	6952915	549,0	544,0	SERNAGEOMIN
03434006-4	Canal Mal Paso	374819	6955219	528,0	524,7	SERNAGEOMIN
03434007-2	Fundo Palermo	374637	6958930	496,0	483,2	SERNAGEOMIN
03434008-0	Alcaparrosa	374703	6962322	468,0	457,3	SERNAGEOMIN
03434009-9	Punta Negra	374491	6965730	443,0	416,3	SERNAGEOMIN
03450006-1	P. San Fernando (Sauce)	372702	6967297	435,0	403,9	SERNAGEOMIN
03450015-0	Pueblo San Fernando (Las Cañas)	372277	6968006	432,3	403,6	H2Cuenca
03450005-3	Pueblo San Fernando A-18	371412	6968565	421,0	398,6	SERNAGEOMIN
03450017-7	Planta Castellón	368046	6970092	402,0	388,8	SERNAGEOMIN
03450007-K	Plazuela Sierra Alta	370146	6970207	405,0	389,4	SERNAGEOMIN
03450008-8	La Chimba	366097	6974750	351,0	323,4	SERNAGEOMIN

Código Pozo	Nombre Pozo	Coordenadas		Cota Terreno (msnm)	Nivel Freático Ene 1993 (msnm)	Fuente Cota de Terreno
		Este (m)	Norte (m)			
03450012-6	Hda. Bodega	363064	6976128	330,0	307,0	SERNAGEOMIN
03450016-9	Valle Dorado	362229	6975316	333,1	311,7	H2Cuenca
03450013-4	Aeropuerto Copiapó	359855	6979186	300,0	287,7	SERNAGEOMIN
03451003-2	Hda. Chamonate	358407	6980840	290,0	283,8	SERNAGEOMIN
03451005-9	Hda. Toledo	357004	6979338	291,7	285,2	H2Cuenca
03451010-5	Chamonate 14	356598	6981231	282,0	276,2	SERNAGEOMIN
03451004-0	Hda. San Francisco	355037	6980248	280,5	276,8	H2Cuenca
03451011-3	Piedra Colgada (13)	353128	6979848	268,4	265,5	H2Cuenca
03451012-1	Noria Santelices	353178	6978641	264,8	262,3	H2Cuenca
03451013-K	Fdo. El Carmen 12	352404	6976977	248,0	243,6	SERNAGEOMIN
03451006-7	Fundo San Juan	350340	6977601	246,1	242,6	H2Cuenca
03451014-8	San Pedro (11)	345669	6977201	214,8	212,6	H2Cuenca
03451007-5	Fundo San Pedro	345647	6977211	212,0	209,2	SERNAGEOMIN
03451015-6	Hacienda Perales 10	342453	6973334	199,0	197,9	SERNAGEOMIN
03451016-4	Hda. Margarita (Matamoros)	341043	6974008	193,4	190,9	H2Cuenca
03451008-3	Hda. Margarita	341191	6975101	195,0	192,6	H2Cuenca
03451018-0	San Camilo (8)	335543	6971846	166,7	160,4	H2Cuenca
03451017-2	Valle Fértil	336804	6971129	171,6	166,7	H2Cuenca
03451019-9	San Camilo (6)	333555	6970812	161,4	155,1	H2Cuenca
03451020-2	Punta Picazo(5)	332401	6972994	150,7	140,8	H2Cuenca
03451021-0	Monte Amargo (2)	329531	6973059	131,0	122,1	H2Cuenca
03453005-K	Hda. María Isabel (4)	326794	6974193	124,7	118,3	H2Cuenca
03453007-6	Hda. María Isabel (1)	322613	6974810	95,7	93,1	H2Cuenca
03453006-8	Hda. María Isabel (3)	324828	6974630	105,7	103,0	H2Cuenca
03431007-6	Villa María - Hornitos	379562	6936528	715,1	668,3	H2Cuenca
03431011-4	Hornito (Rojas)	383845	6929418	799,1	738,9	H2Cuenca
03430014-3	Embalse Lautaro	401524	6904769	1115,4	1113,7	H2Cuenca

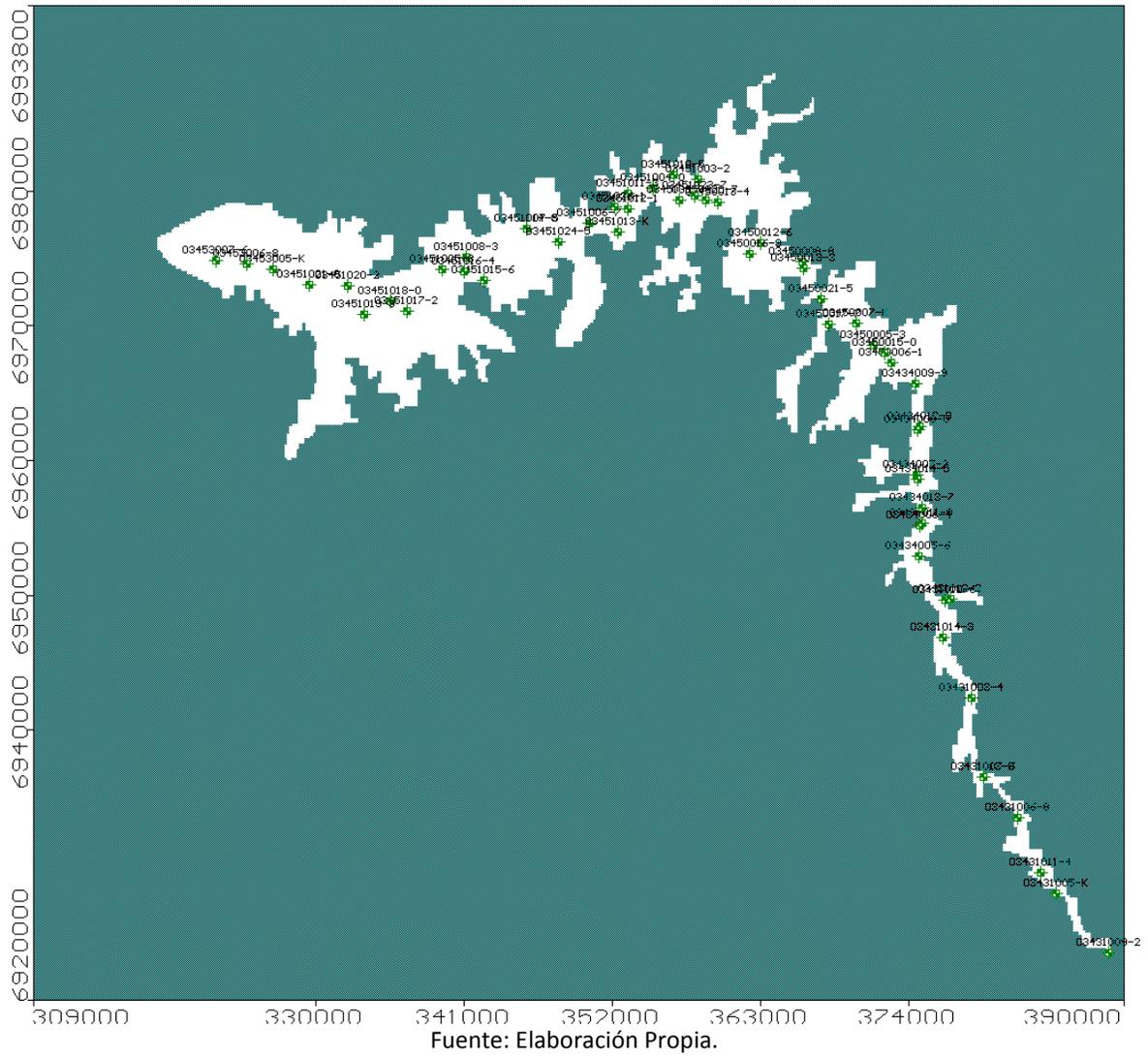
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.20**  
**Pozos de Observación Sector Alto**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.21**  
**Pozos de Observación Sector Bajo**



## 5.6 Calibración y Validación Modelo Visual MODFLOW

### 5.6.1 Esquemas de Calibración

En función de los antecedentes revisados y de los resultados de los modelos AQUATOOL y Visual MODFLOW, se ha propuesto el siguiente esquema de trabajo para la actualización de los modelos:

- **Calibración Histórica (1993-2006):** Se recalibra el modelo de aguas subterráneas, incorporando recargas y bombeos para el periodo 1993-2006. En este caso, se ha incorporado al modelo de aguas subterráneas la actualización de la ubicación de los pozos de monitoreo de la red hidrométrica de niveles de acuerdo a lo preparado en el estudio de H2 Cuenca, incluyendo la actualización de la cota de terreno de los pozos de observación.
- **Calibración Actual (2007-2010):** Se calibra de forma más detallada el modelo numérico Visual MODFLOW, incorporando las demandas de agua potable y minera por sector acuífero. Tal como se indica en este informe, se conocen a nivel mensual los valores de explotación para cada operación minera y sanitaria. Para el caso de la demanda de agua de riego se asignaron los caudales de bombeo en pozos de bombeo agrícolas en función de la demanda satisfecha por agua subterránea determinado por la repartición realizada por el modelo AQUATOOL.
- **Validación (2011-2012):** Se utiliza este periodo para validar el modelo de aguas subterráneas Visual MODFLOW. Al igual que la calibración actual se incorporará el detalle mensual de las demandas de agua potable y minería para este periodo.

Los ajustes logrados para el modelo Sector Alto y modelo Sector Bajo se muestran en la Tabla 5.7.

**Tabla 5.7**  
**Estimadores de Calibración y Validación del Modelo Copiapó**

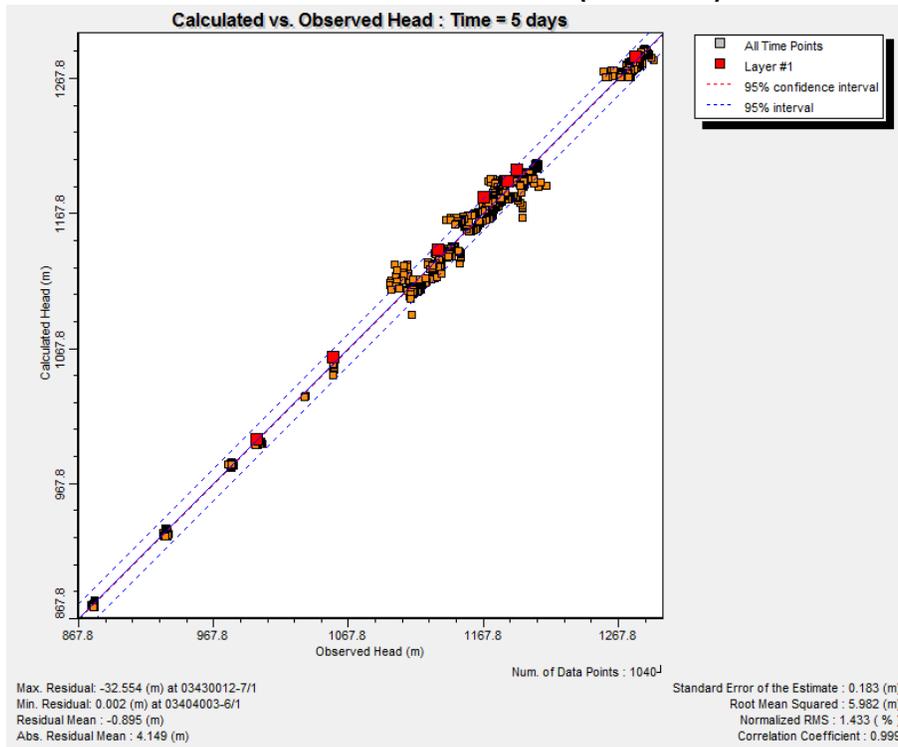
Modelo		Calibración Periodo 1993-2010	Calibración + Validación Periodo 1993-2012
Sector Alto	Error RMS Normalizado (%)	1,43	1,47
	Número de Datos	1.040	1.091
Sector Bajo	Error RMS Normalizado (%)	0,51	0,52
	Número de Datos	3.511	3.726

Fuente: Elaboración Propia.

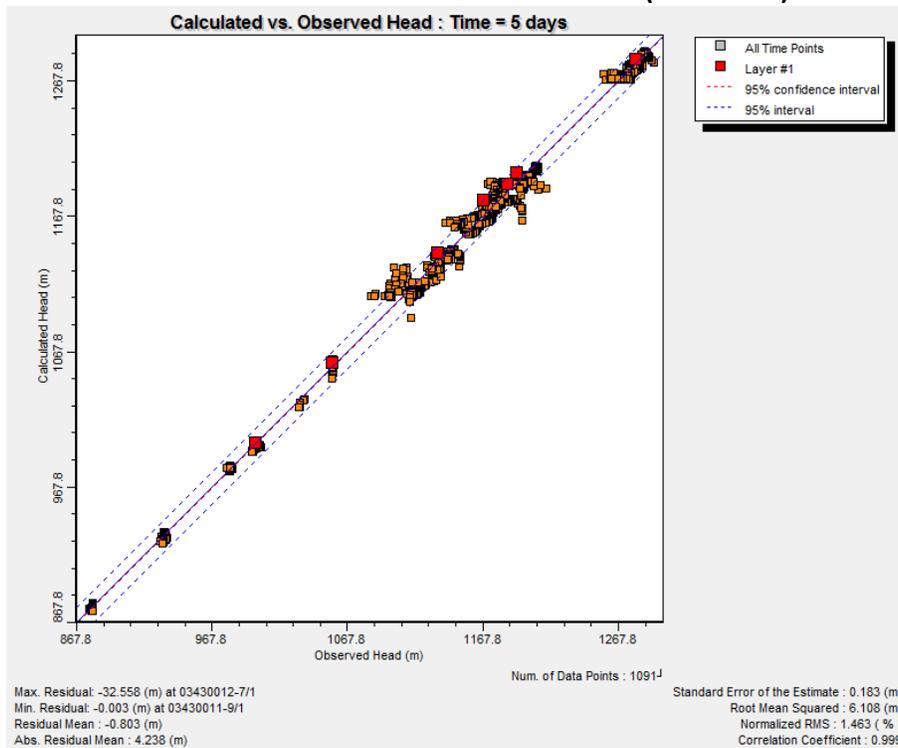
La Figura 5.22 y Figura 5.23, muestran la calibración y validación en el modelo numérico del sector alto. De estos gráficos, se aprecia que la calibración lograda es de buena calidad, logrando que el Error RMS Normalizado sea muy inferior al 5%, valor considerado válido para representar el gradiente hidráulico regional del acuífero entre la zona de cabecera y La Puerta.

La Figura 5.24 y Figura 5.25, muestran la calibración y validación en el modelo numérico del sector bajo. De estos gráficos, se aprecia que la calibración lograda es de buena calidad, logrando que el Error RMS Normalizado sea muy inferior al 5%, valor considerado válido para representar el gradiente hidráulico regional del acuífero entre La Puerta y Angostura.

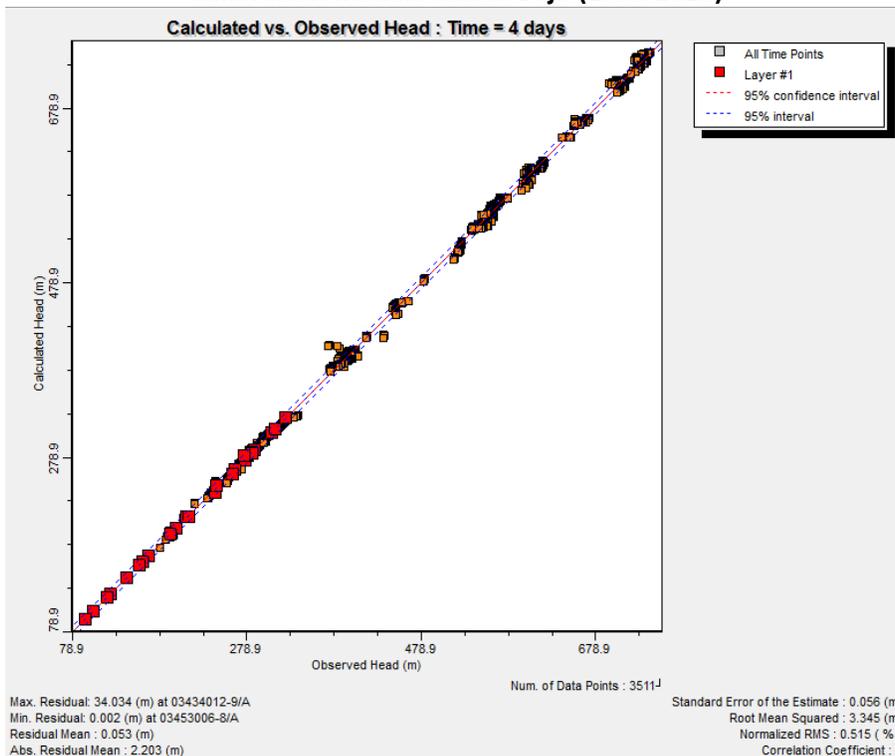
**Figura 5.22**  
**Calibración Modelo Sector Alto (1993-2010)**



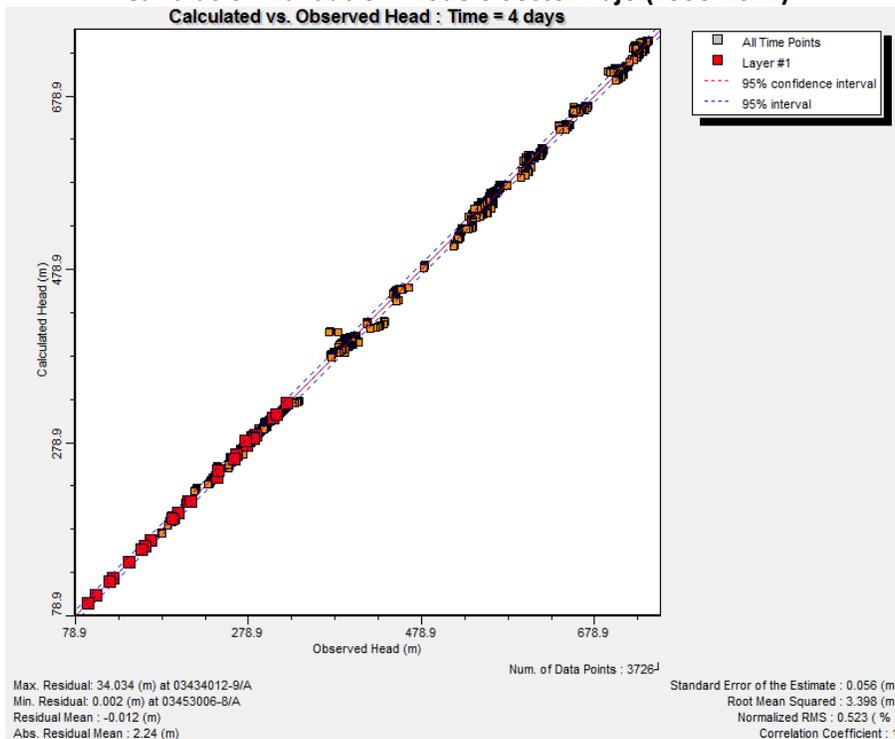
**Figura 5.23**  
**Calibración Validación Modelo Sector Alto (1993-2012)**



**Figura 5.24**  
**Calibración Modelo Sector Bajo (1993-2010)**



**Figura 5.25**  
**Calibración Validación Modelo Sector Bajo (1993-2012)**

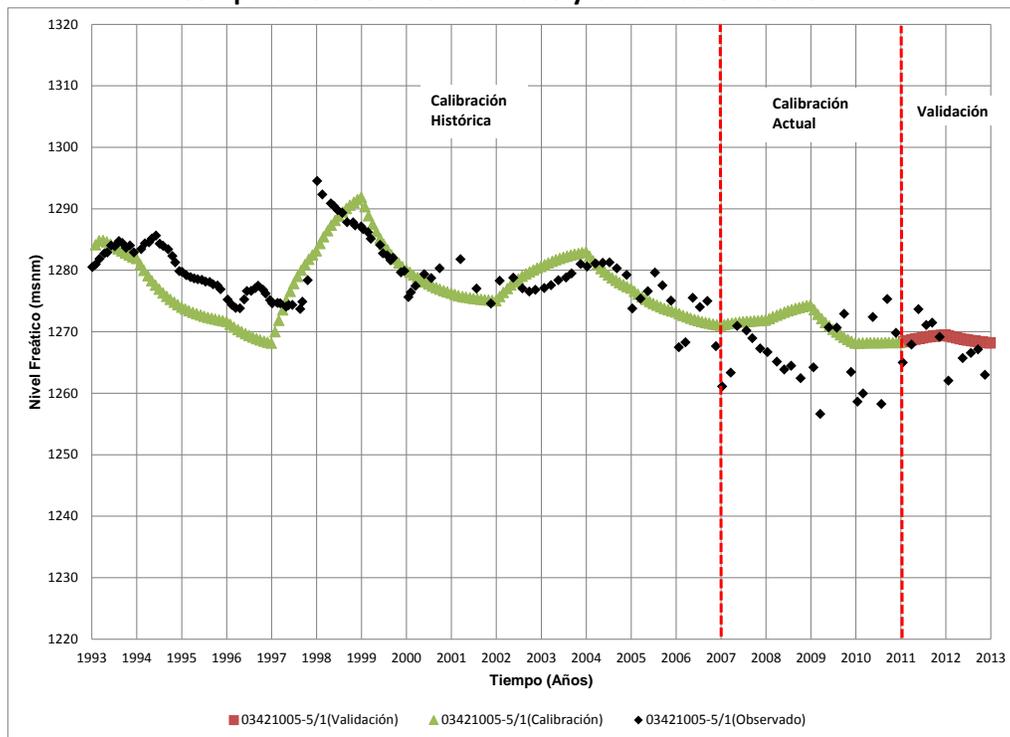


### 5.6.2 Niveles Simulados versus Niveles Medidos

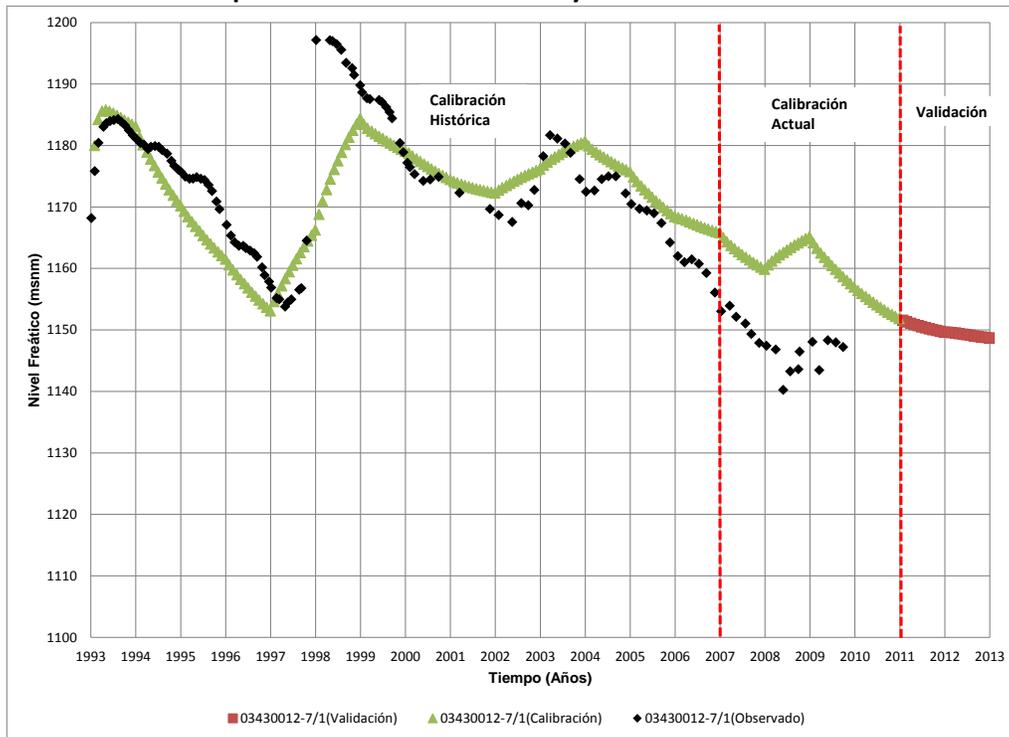
La Figura 5.26 a la Figura 5.39 muestran series de niveles de agua subterránea simuladas y medidas, para distintos pozos de observación de la DGA, en cada uno de los 6 sectores administrativos de la DGA.

Del ajuste de todos los pozos, se observa que se ha representado de muy buena forma los niveles de agua subterránea en todo el acuífero de Copiapó.

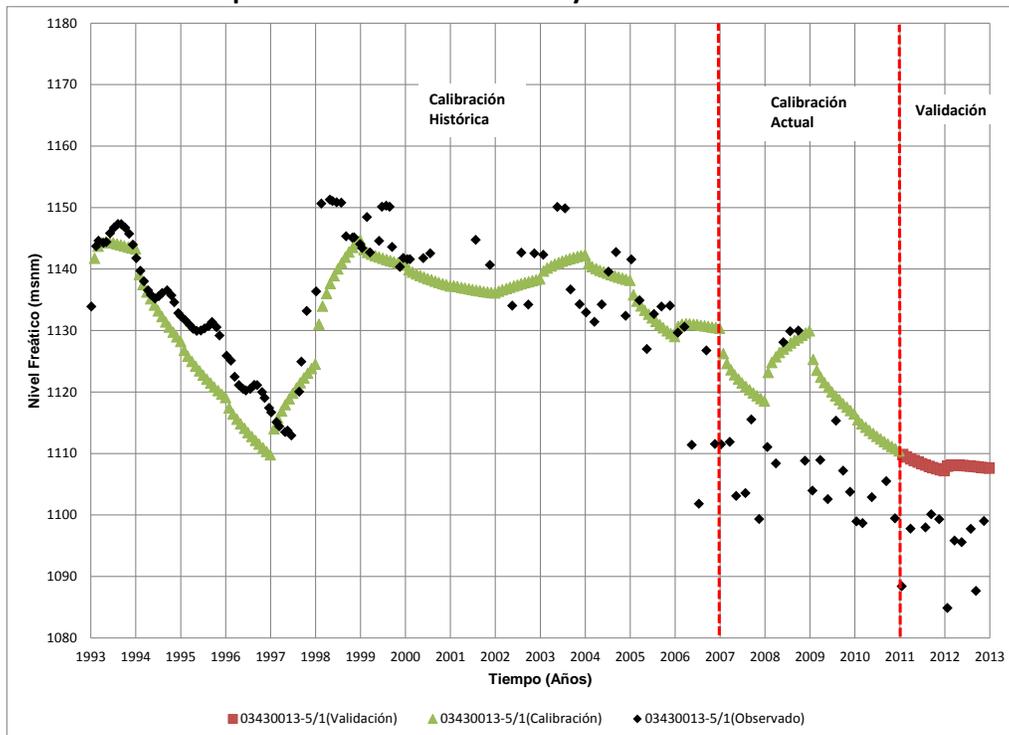
**Figura 5.26**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 1**



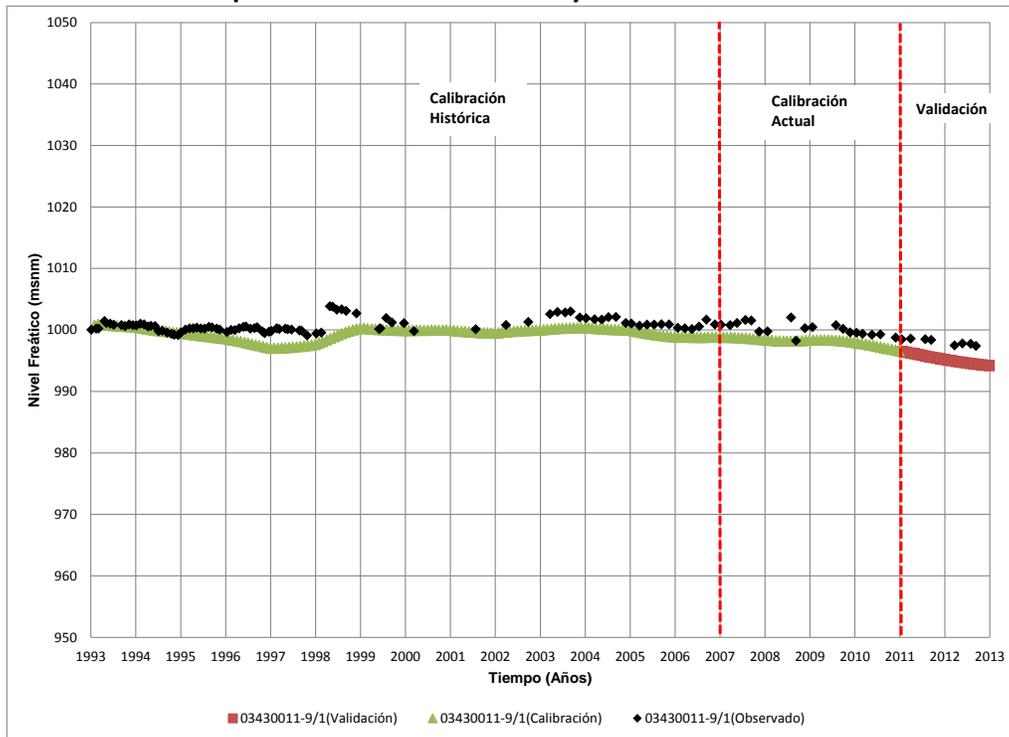
**Figura 5.27**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 1**



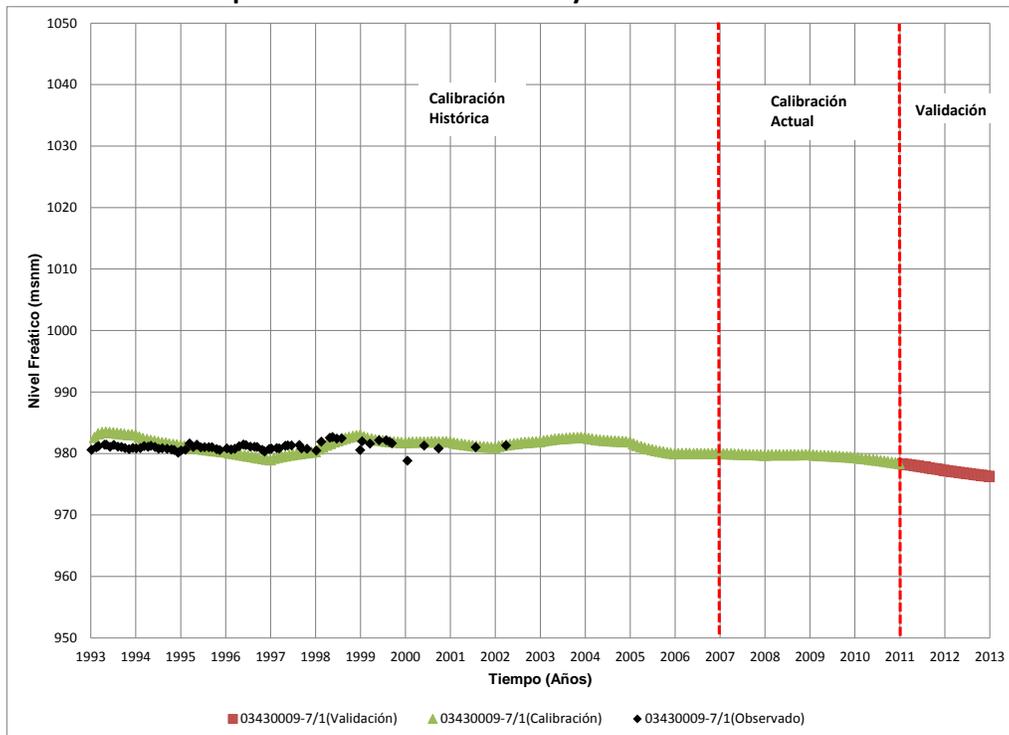
**Figura 5.28**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 1**



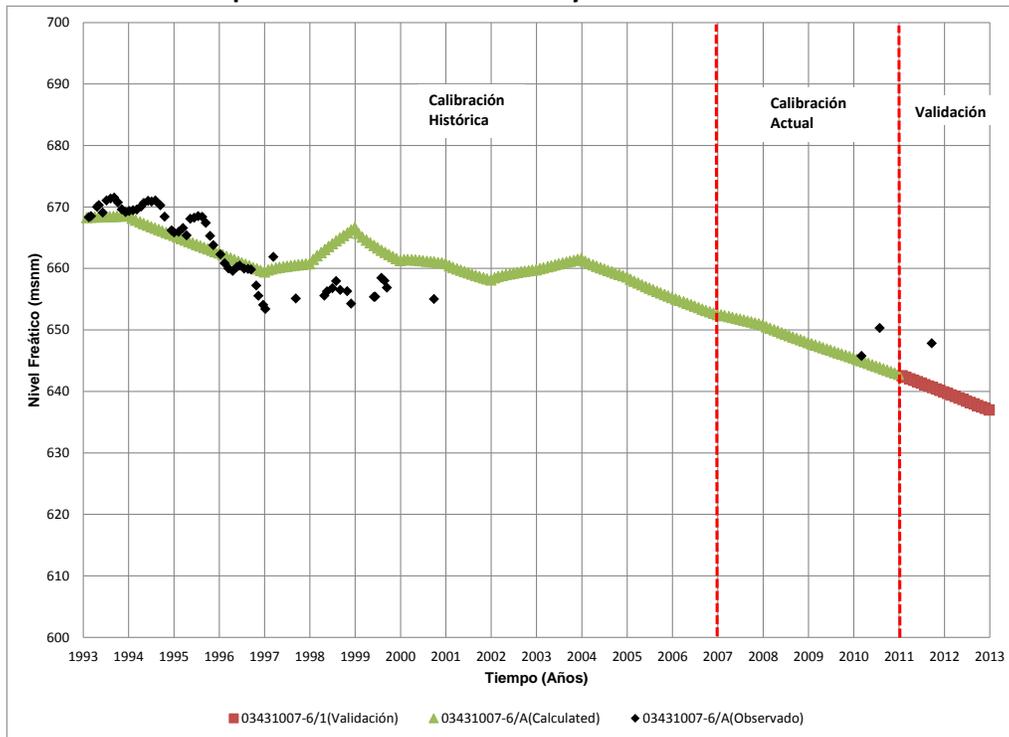
**Figura 5.29**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 2**



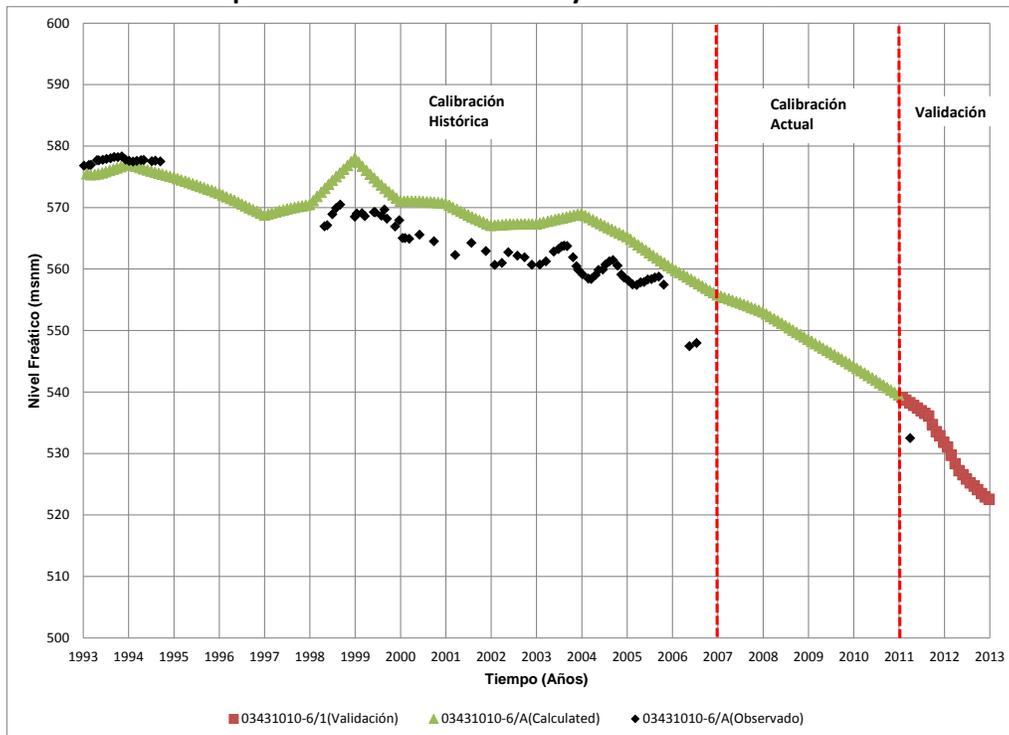
**Figura 5.30**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 2**



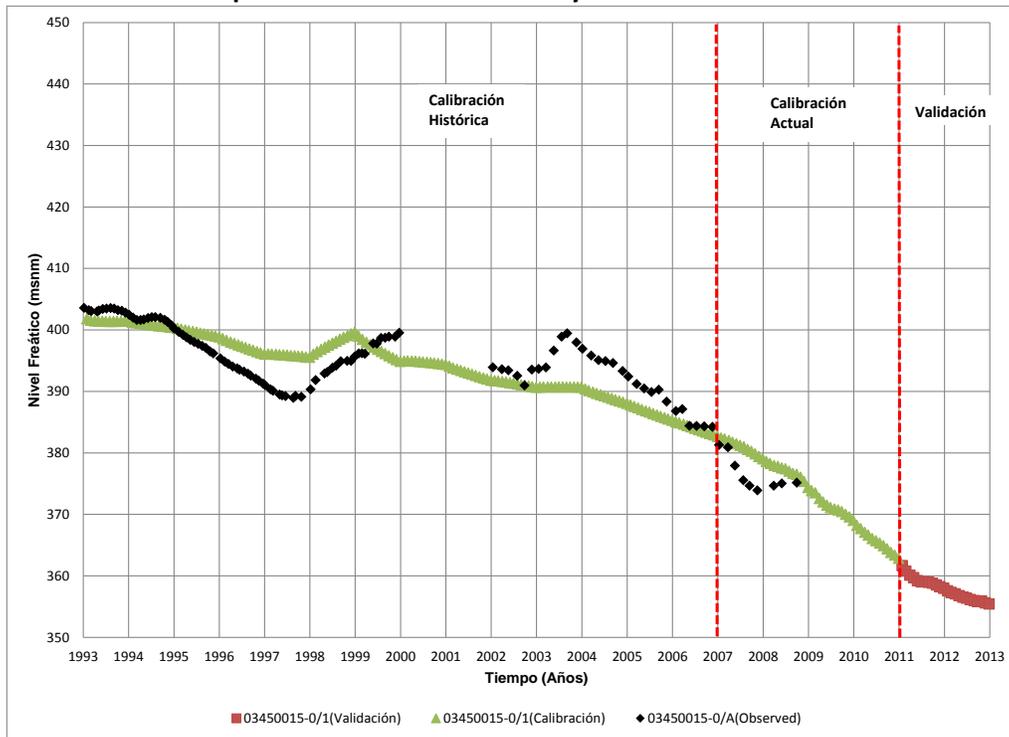
**Figura 5.31**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 3**



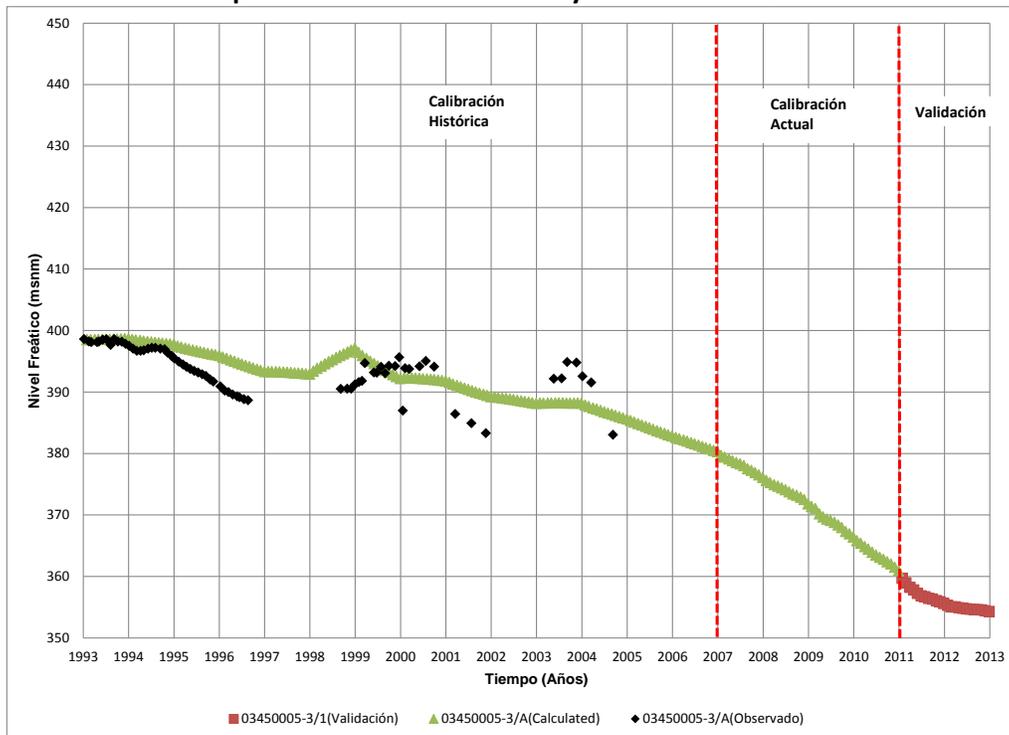
**Figura 5.32**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 3**



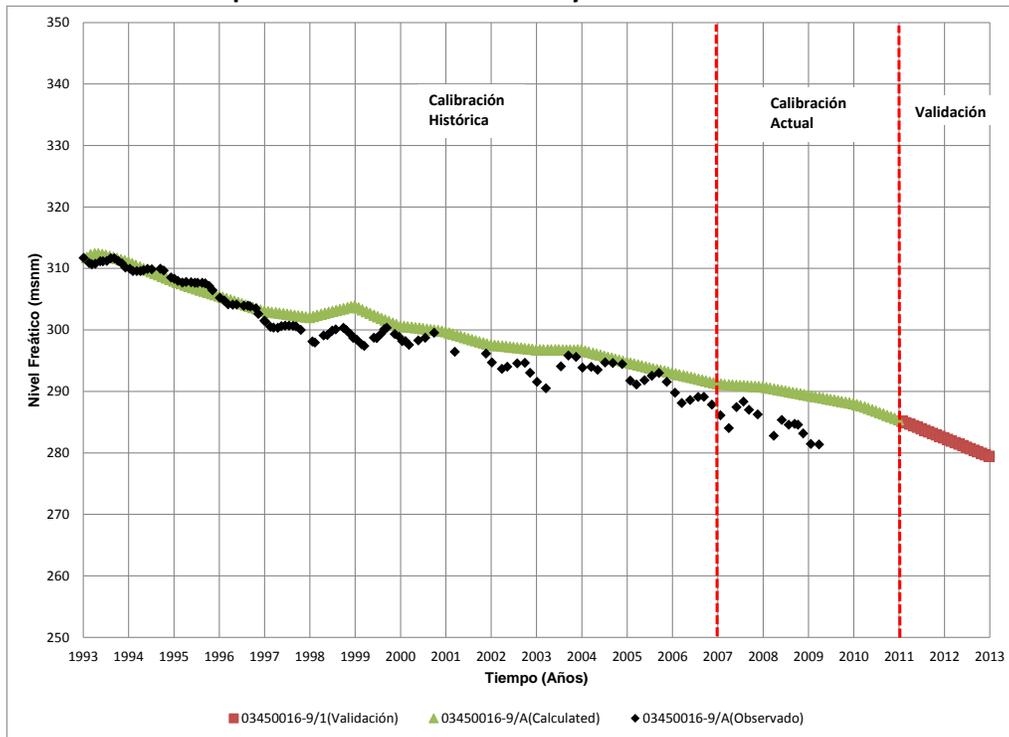
**Figura 5.33**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 4**



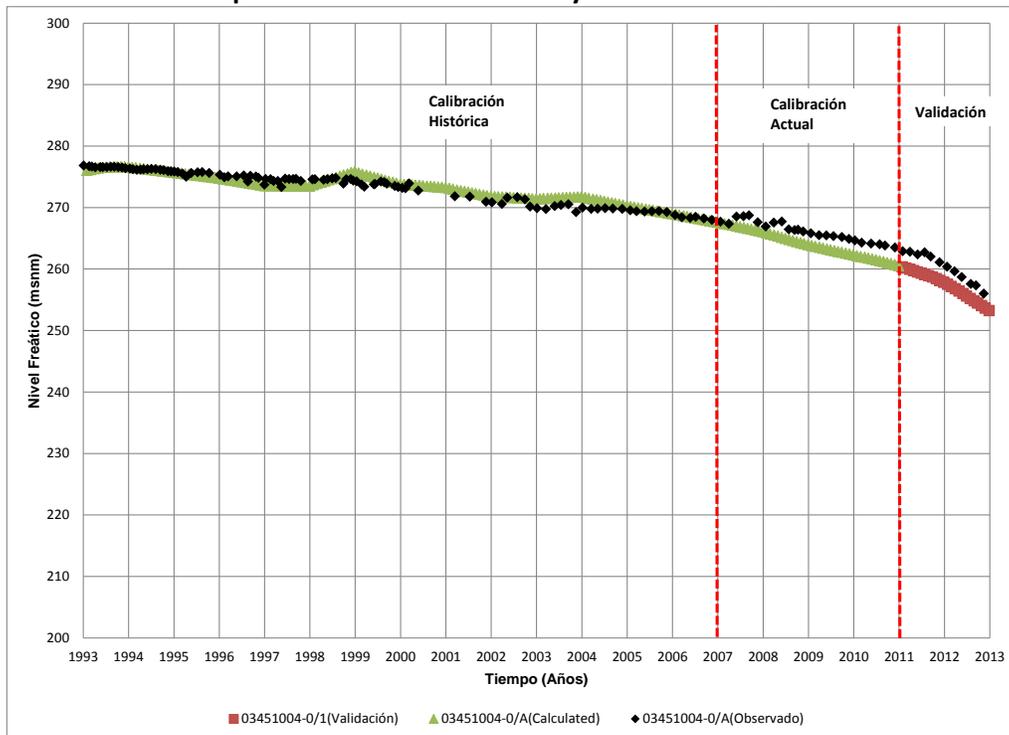
**Figura 5.34**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 4**



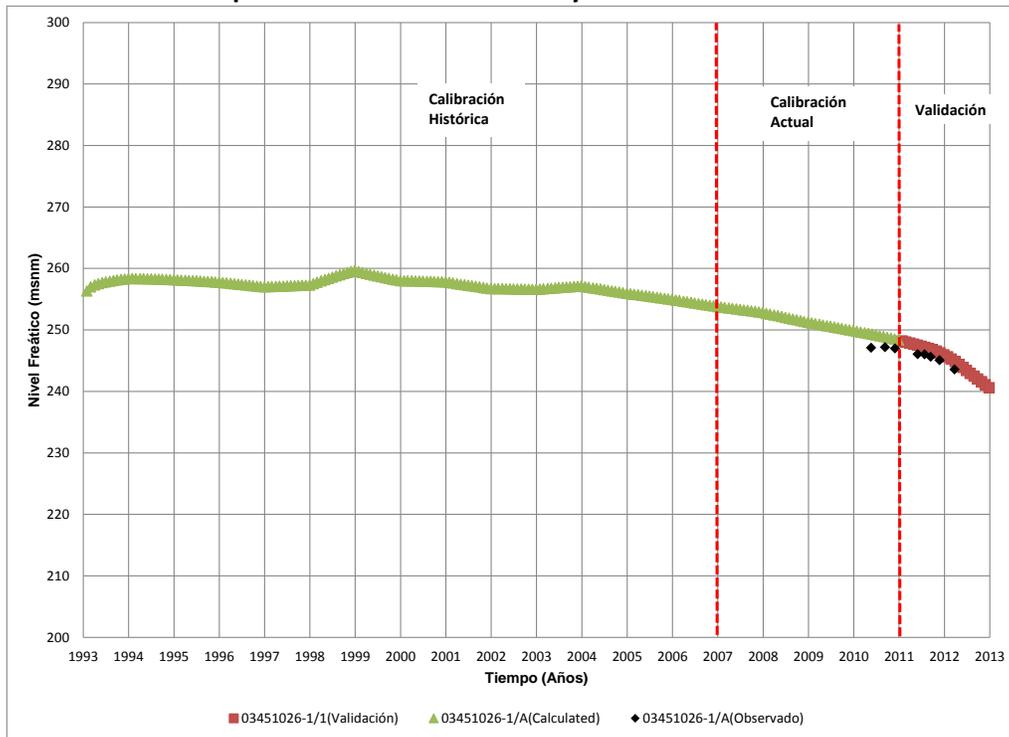
**Figura 5.35**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 5**



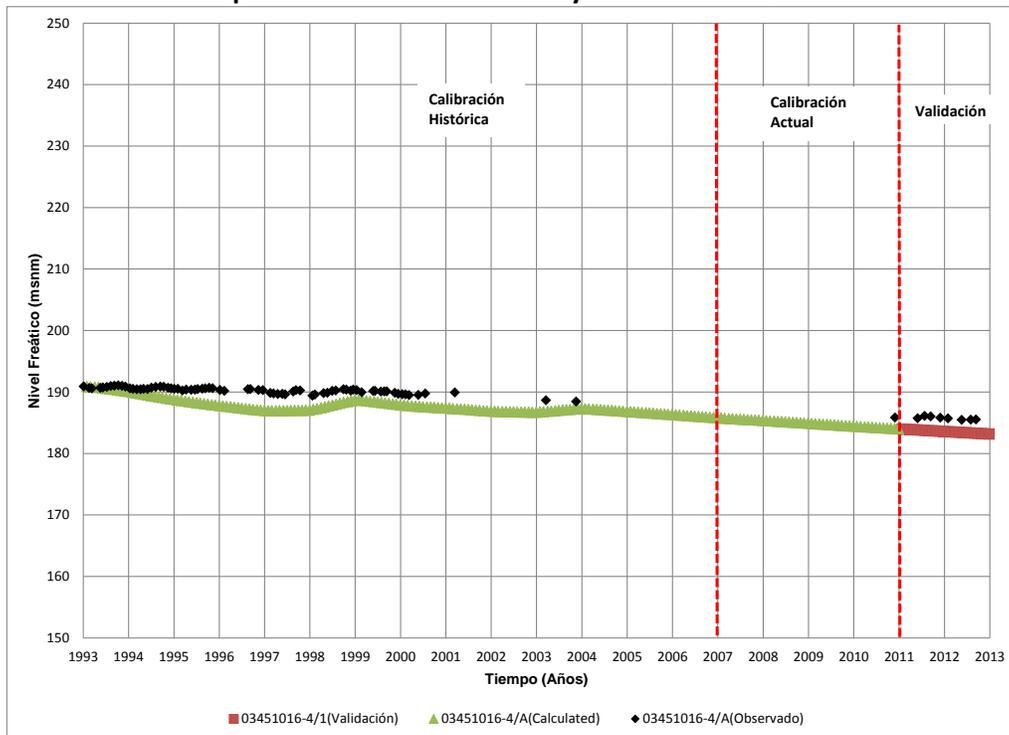
**Figura 5.36**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 5**



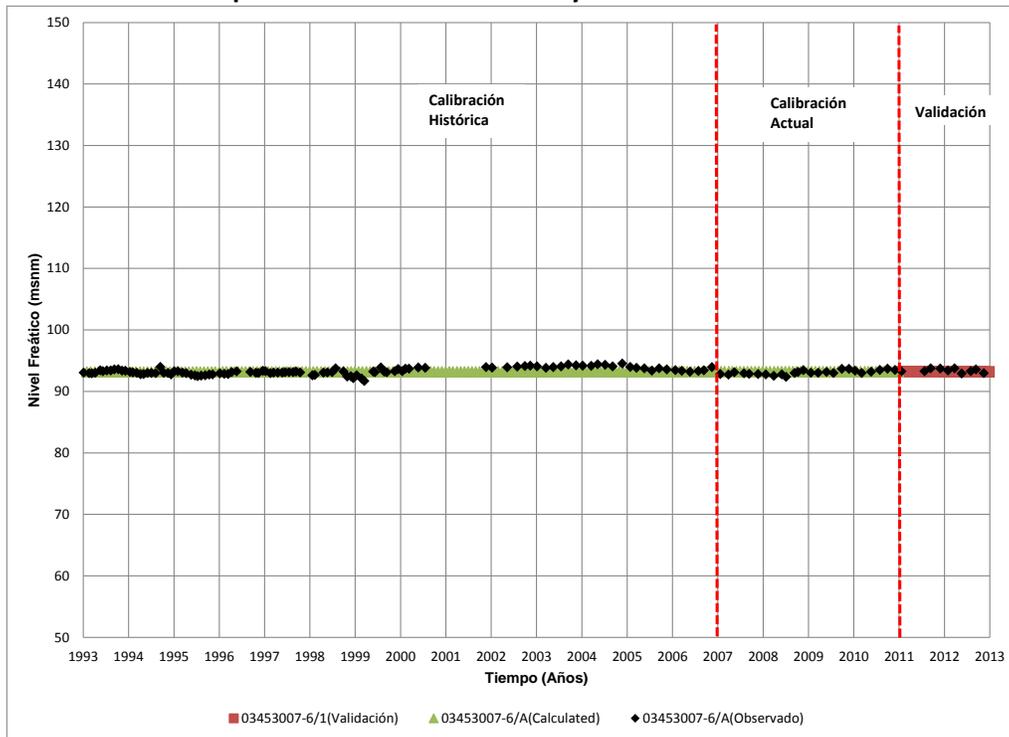
**Figura 5.37**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 5**



**Figura 5.38**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 6**



**Figura 5.39**  
**Comparación de Nivel Simulado y Calculado en Sector 6**

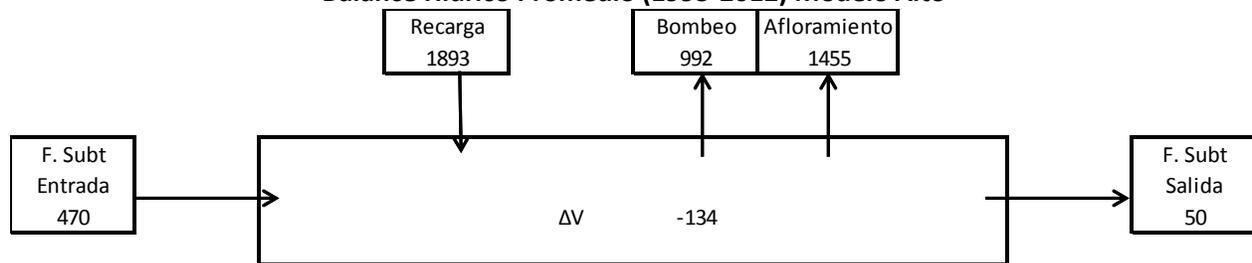


### 5.6.3 Balance Hídrico en el Acuífero de Copiapó

De la modelación de Visual MODFLOW para los modelos alto y bajo, es posible obtener el balance hídrico promedio para los periodos 1993-2012. De la Figura 5.40, se observa el balance hídrico del sector alto, en que se aprecia que la extracción total está muy por debajo de la recarga al acuífero, produciéndose importantes afloramientos, principalmente en el sector de Los Loros, localizado aguas arriba de la estación fluviométrica Copiapó en La Puerta. De forma general, se puede indicar que este sector se encuentra prácticamente en equilibrio entre recargas y descargas.

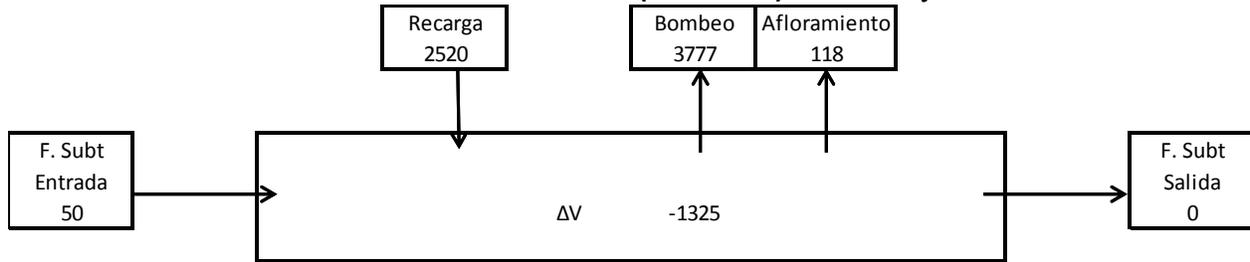
Al contrario, la Figura 5.41, muestra el desbalance del acuífero sector bajo, comprendido ente La Puerta y Angostura, donde las descargas por concepto de extracción desde pozos, supera ampliamente la recarga del acuífero. Esta situación deficitaria en el periodo analizado ha generado una disminución sostenidas del volumen embalsado del acuífero a tasas de  $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Figura 5.40**  
**Balance Hídrico Promedio (1993-2012) Modelo Alto**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.41**  
**Balance Hídrico Promedio (1993-2012) Modelo Bajo**



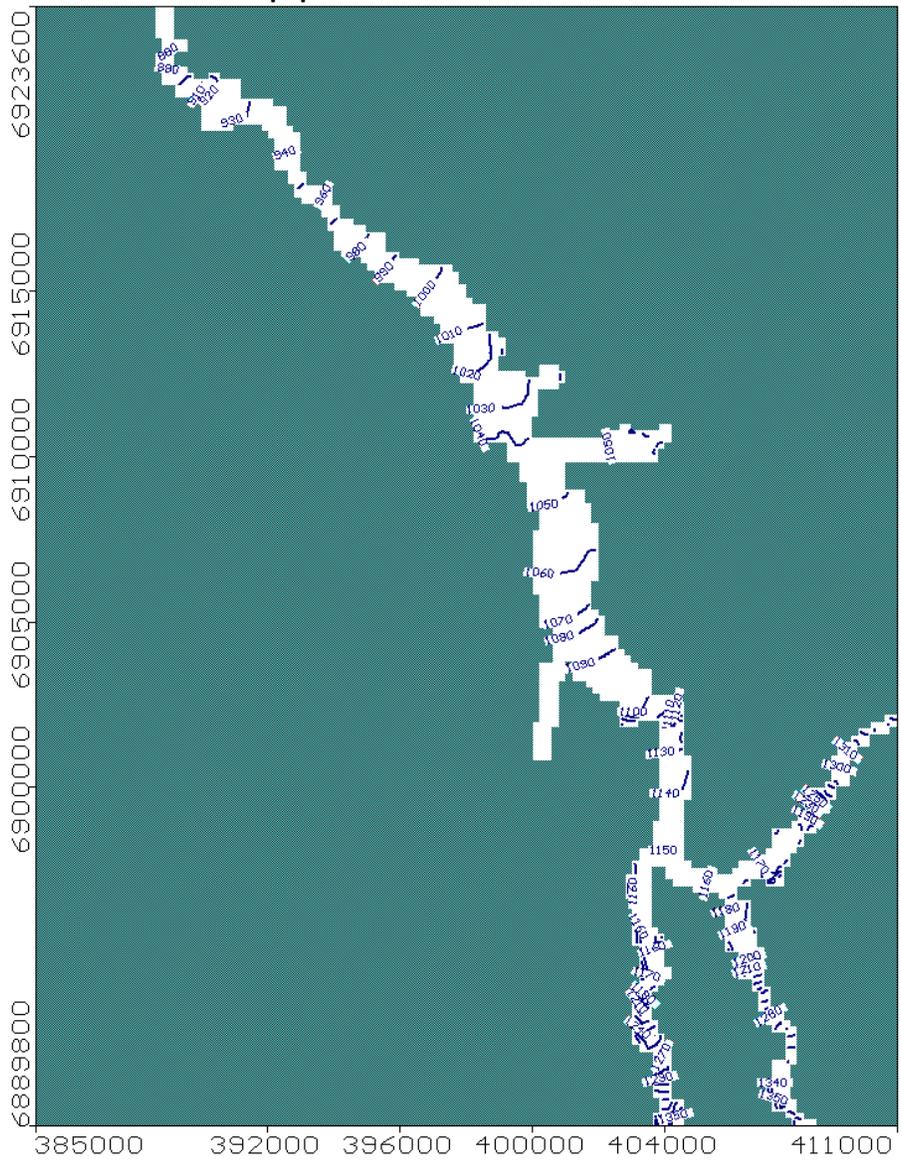
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 5.42 muestra las equipotenciales resultantes del modelo numérico para el sector alto del acuífero, para el año 2012. Del análisis de las equipotenciales, se observa que la dirección del flujo de agua subterránea es en la dirección del río Copiapó, con flujo de salida en la zona de Copiapó en la Puerta.

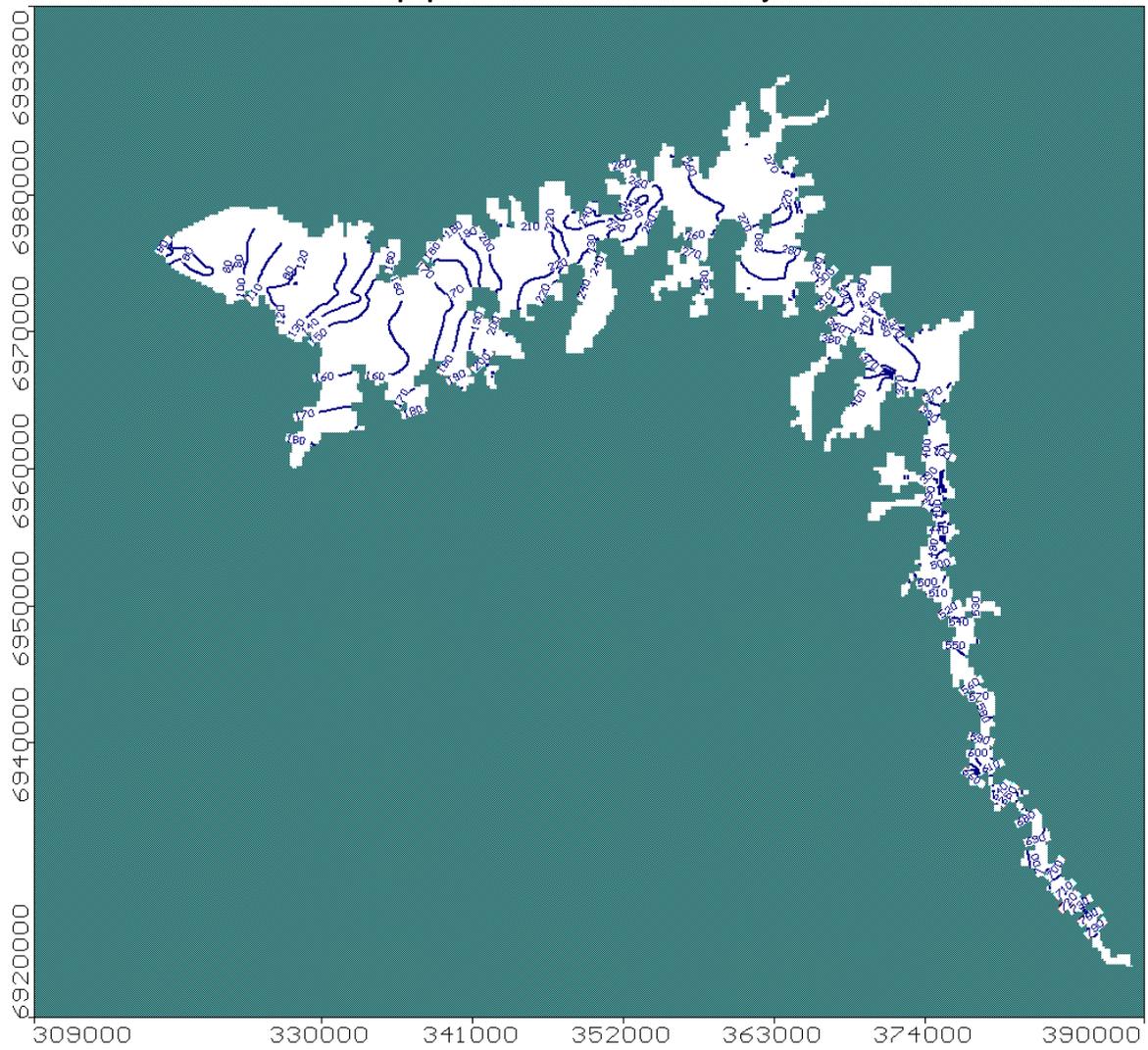
La Figura 5.43 muestra las equipotenciales resultantes del modelo numérico para el sector bajo del acuífero, para el año 2012. De las equipotenciales se concluye que la dirección del flujo de agua subterránea es en la dirección del río Copiapó, con flujo de salida en la zona de Angostura.

La Figura 5.43 muestra las equipotenciales resultantes del modelo numérico en la zona de Piedra Colgada para el año 2012, en la zona donde se localizan los pozos de Aguas Chañar. En esta figura se observa el efecto de depresión local producido por los pozos de la sanitaría, que comenzaron a operar a mediados del año 2010.

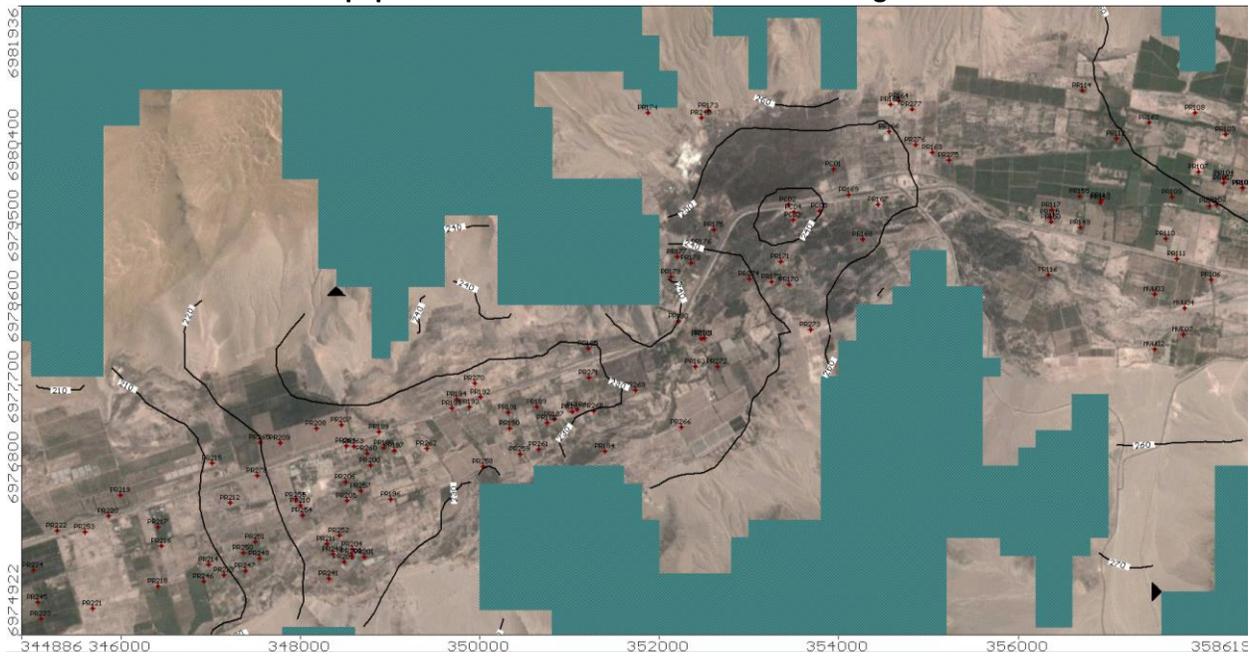
**Figura 5.42**  
**Equipotenciales 2012 Modelo Alto**



**Figura 5.43**  
**Equipotenciales 2012 Modelo Bajo**



**Figura 5.44**  
**Equipotenciales 2012 – Zona Pozos Piedra Colgada**



## 5.7 Conclusiones Preliminares

Como parte de este proyecto, se ha actualizado el modelo numérico de aguas subterráneas del acuífero del río Copiapó, tanto para el sector alto comprendido entre cabecera y La Puerta, y el sector bajo, entre La Puerta y Angostura. Para lo anterior, se ha considerado:

- Niveles de agua subterránea 1993-2012 de la red de niveles de la DGA, referenciada a la última actualización de la DGA.
- Ubicación y demandas actualizadas de los pozos de minería, a partir de la información entregada por los propios titulares de proyectos mineros a la DGA.
- Ubicación y demandas actualizadas de los pozos de agua potable, a partir de la información entregada por ECONSSA a la DGA.
- Recargas por infiltración en tramos de río, canales y percolación de las zonas de riego desde el modelo operacional AQUATOOL.
- Recarga por pérdidas del sistema de agua potable en el sector 4 del acuífero de Copiapó.
- Retorno de la planta de tratamiento de aguas residuales en el sector 5 del acuífero de Copiapó.
- Se ha considerado la demanda agrícola, en función de la información del modelo operacional AQUATOOL, que satisface las demandas agrícolas en función del agua superficial y subterránea disponible.
- Mejoramiento de la posición del basamento rocoso, considerando la información geofísica disponible hasta 2012.

En función de las consideraciones anteriores, se ha calibrado y validado el modelo hidrogeológico de Copiapó modificando:

- Zonas y valores de conductividad hidráulica
- Zonas y valores de coeficiente de almacenamiento

Como resultado, se ha obtenido tanto para el modelo sector alto, como el modelo sector bajo:

- Representación de los niveles de agua subterránea para el periodo 1993-2012
- Balance hídrico para el periodo 1993-2012

Considerando que el modelo se encuentra calibrado y validado para el periodo 1993-2012, se considera preparado para definir escenarios adecuados, en conjunto con la inspección fiscal. Algunos escenarios propuestos son:

- **Análisis de Sensibilidad.** Efecto del traspaso de zonas agrícolas del sector 4 a zonas urbanas. Efecto en los niveles de la distribución temporal de la recarga (1 año, 2 años y 4 años).
- **Operación de largo plano de los pozos de agua potable,** usando los pozos actuales. Evaluación del rendimiento de sus pozos ante la satisfacción de la demanda. Efecto en niveles y afloramiento en el sector 6 por operación de los pozos de Piedra Colgada.
- **Entrada en operación del proyecto Caserones.** Considerar el efecto de la disminución de la recarga verificando los niveles de pozos.
- **Operación de plantas desaladoras.** Proyectos mineros o sanitarios que cambian de fuente a agua desalada. Verificar el efecto en los niveles de agua subterránea.

## 6. ESCENARIOS DE ANALISIS

### 6.1 Aspectos Generales

La situación deficitaria del acuífero de Copiapó, que se ha observado en la disminución sostenida de los niveles de agua y la creciente demanda de agua subterránea asociado a proyectos mineros y expansión del servicio de agua potable, es una preocupación continua de la Dirección General de Aguas, así como de las autoridades de la región de Atacama. En base a lo anterior, es que se ha calibrado los modelos AQUATOOL y Visual MODFLOW, para representar de mejor forma posible los cambios futuros que se esperan para la cuenca.

Dentro de los principales temas de preocupación de la Dirección General de Aguas, se ha planteado la necesidad de tener respuestas, respecto a los potenciales impactos en los niveles de agua subterránea y la satisfacción de la demanda hídrica, de las siguientes situaciones:

- Uso de pozos de bombeo en los Sectores 5 y 6 hasta el año 2022, para abastecimiento de agua potable por parte de Aguas Chañar, previo al ingreso de una planta de tratamiento de osmosis inversa (PTOI) de agua de mar.
- Ingreso de una planta de tratamiento de osmosis inversa (PTOI) de agua de mar.
- Efecto en el acuífero de la venta del agua de descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) desde Aguas Chañar a la minería.
- Análisis de la entrada en operación del proyecto minero Caserones, que usará aguas subterráneas en la parte alta de la cuenca de Copiapó.
- Determinación de los potenciales efectos, debido a los cambios anteriormente mencionados en el acuífero de Copiapó, en la estación fluviométrica Copiapó en Angostura, cuyos caudales satisfacen la demanda hídrica del humedal costero de Copiapó.

Para llevar a cabo estas simulaciones se ha utilizado la serie de recarga resultante del modelo AQUATOOL para los años 2013-2053, generada para cada escenario en particular, de acuerdo a la distribución de la demanda en la cuenca. Los aportes superficiales son los mismos definidos para la calibración para el período 1972-2012, siendo los principales los correspondientes a los ríos Pulido, Jorquera y Manflas, más otros aportes intermedios entre ellos los de las cuencas de Paipote y Carrizalillo.

A continuación se describen tres escenarios de simulación planteados para el presente proyecto, que toman en consideración los requerimientos técnicos de la DGA, y los resultados obtenidos.

### 6.2 Escenario 1: Plan de Extracción Futuro de Pozos de Agua Potable y Uso de Agua Desalada

#### 6.2.1 Descripción General

Este escenario considera la evaluación de un potencial plan de explotación de agua subterránea por parte de la empresa sanitaria para la situación futura.

De acuerdo a lo informado por Aguas Chañar a la SISS, se utilizaría un conjunto de pozos construidos en el último tiempo en el Sector Acuífero 5 de Copiapó (PC01, PC02, PC03, PC04 y PC05) y se proyecta la construcción de dos nuevos sondajes en el Sector Acuífero 5 (PC06 y PC07) y tres nuevos sondajes en el Sector Acuífero 6 (PU01, PU02 y PU03). La Tabla 6.1 muestra los pozos construidos y en proyecto para satisfacer la demanda de agua potable.

**Tabla 6.1**  
**Caudales de Diseño de Pozos de Agua Potable en Sectores Acuíferos 5 y 6.**

Pozo	Situación	Caudal de Diseño (L/s)	Año de Inicio de Operación	Sector DGA	Sector Modelo
PC01	Construido	70	2013	Sector 5	A05a
PC02	Construido	71	2013	Sector 5	A05a
PC03	Construido	67	2013	Sector 5	A05a
PC04	Construido	72	2013	Sector 5	A05a
PC05	Construido	85	2013	Sector 5	A05a
PC06	En Proyecto	87	2014	Sector 5	A05a
PC07	En Proyecto	90	2014	Sector 5	A05a
PU01	En Proyecto	80	2014	Sector 6	A06a
PU02	En Proyecto	80	2014	Sector 6	A06a
PU03	En Proyecto	80	2015	Sector 6	A06a

NOTA: El caudal de diseño de los pozos construidos corresponde al valor de operación promedio de Junio 2012 a mayo 2013. Para los pozos en proyecto, se informa el caudal de diseño.

Adicionalmente, y de acuerdo al plan de explotación propuesto, se proyecta la operación de una planta desaladora que conducirá aguas tratadas desde Caldera a Copiapó y Tierra Amarilla. El año 2017, se contará con una impulsión de capacidad equivalente a 300 L/s y al año 2022 con capacidad de 900 L/s.

Para interpretar la demanda futura de agua potable, se ha utilizado una proyección de la población, de acuerdo a un modelo de proyección logística del tipo:

$$P(t) = \frac{K P_0 e^{rt}}{K + P_0 (e^{rt} - 1)}$$

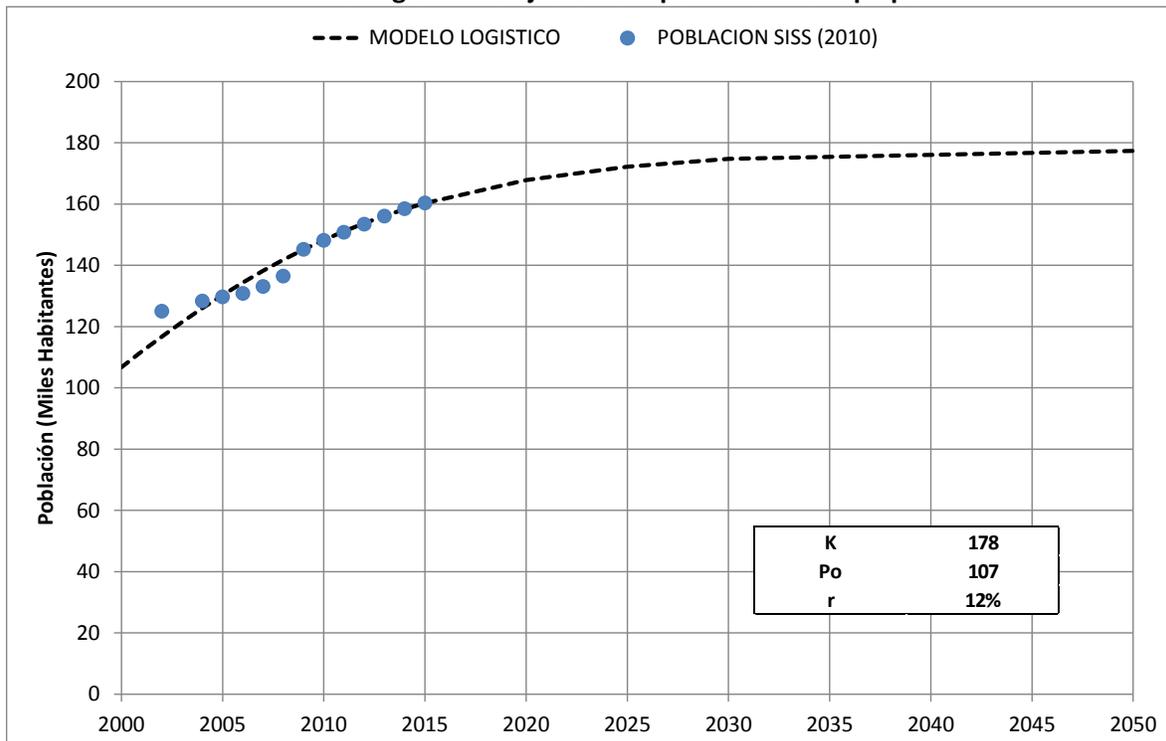
donde P(t), corresponde a la población en cualquier periodo, K corresponde a la población de largo plazo, P<sub>0</sub> es la población inicial y r es la tasa de crecimiento de la población. Cabe resaltar la dificultad de estimar la población de largo plazo, debido a la falta de información y la variabilidad de proyectos mineros en la región. Por lo tanto, todos los parámetros fueron ajustados para calibrar los datos de población actual.

Los datos de población para el ajuste son los indicados en el estudio tarifario de la SISS (2010) que se muestran en la Tabla 6.2 . La Figura 6.1 muestra el ajuste utilizado para la proyección de la población.

**Tabla 6.2**  
**Población abastecida Copiapó - Tierra Amarilla según estudio tarifario SISS (2010)**

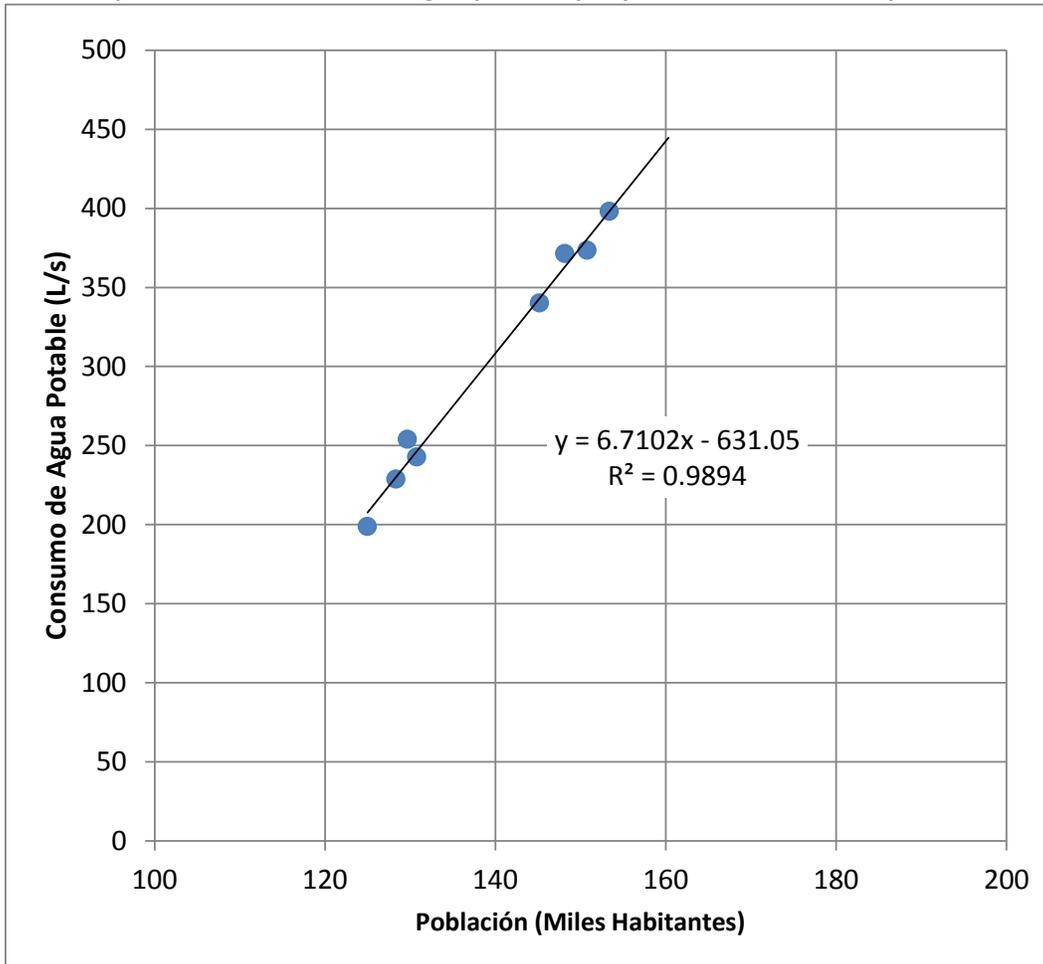
Año	Población Abastecida (hab)
2002	124.979
2004	128.317
2005	129.652
2006	130.759
2007	133.035
2008	136.434
2009	145.176
2010	148.132
2011	150.760
2012	153.373
2013	155.984
2014	158.467
2015	160.308

**Figura 6.1**  
**Modelo Logístico de ajuste de la población de Copiapó**



La Figura 6.2 muestra el ajuste entre los caudales de consumo de agua potable de la población de Copiapó y Tierra Amarilla con la población obtenida del informe del estudio tarifario de la SISS (2010). Cabe destacar que de acuerdo al plan de gestión SISS (2011), las pérdidas totales de la red de agua potable de Aguas Chañar alcanzan a un 40%, lo que permite corregir el valor de consumo a valor de explotación.

**Figura 6.2**  
**Ajuste entre consumo de agua potable y la población entre 2002 y 2012**



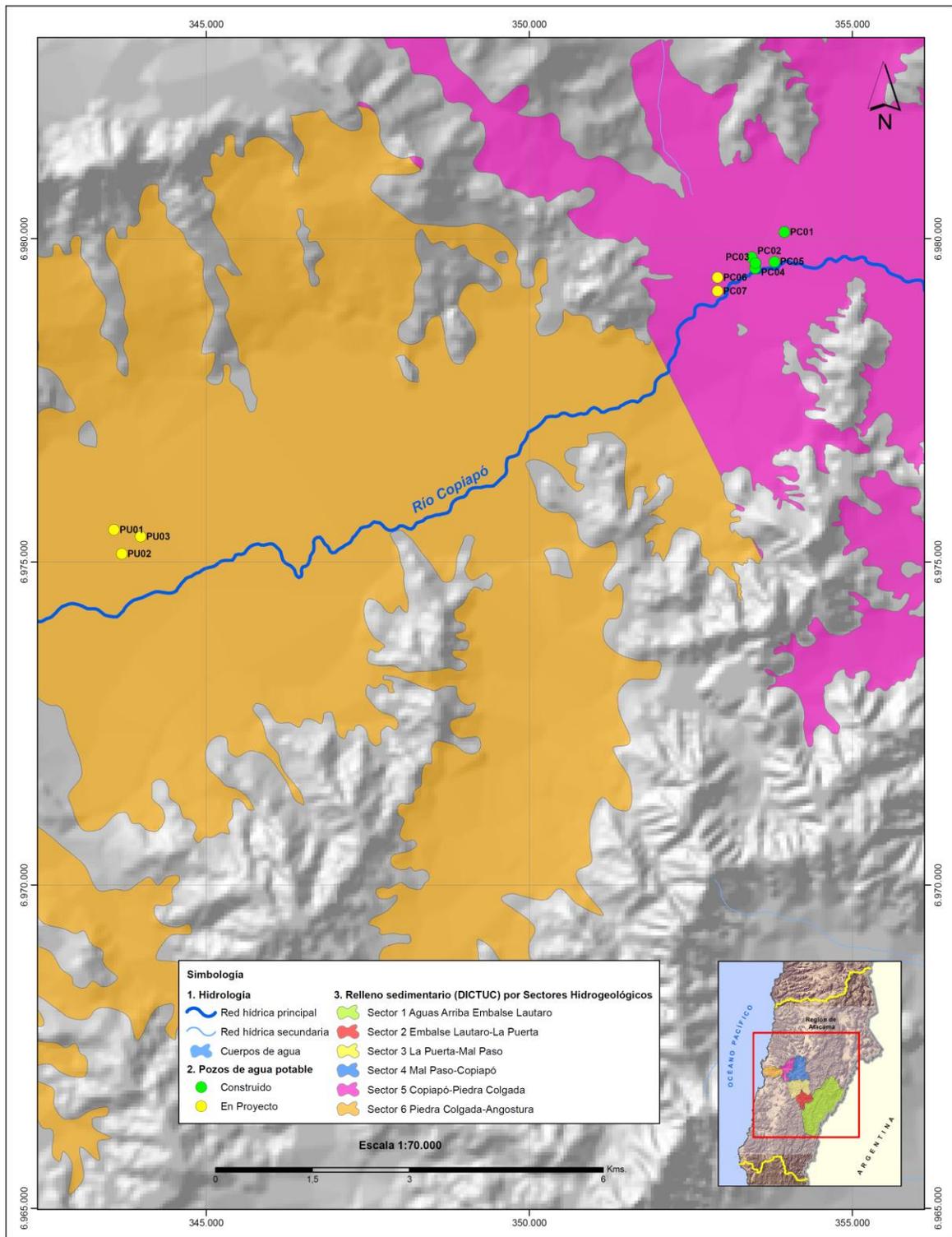
De acuerdo a los ajustes anteriores, la Tabla 6.3 muestra los caudales de operación necesarios para satisfacer la demanda de agua potable hasta el año 2053, considerando que a partir del año 2023, el 100% de la demanda se satisface con agua desalada. La Figura 6.3 muestra la ubicación espacial de los pozos construidos y la ubicación referencial de los pozos por construir (la ubicación referencial es un supuesto para efectos de la modelación). Cabe resaltar, que durante el año 2013, los pozos y caudales de operación del agua potable se han interpretado de forma equivalente al año 2012.

**Tabla 6.3**  
**Caudales de Producción de Agua Potable inferidos de acuerdo al Cronograma Base Sistema Copiapó-Tierra Amarilla**

AÑO	Caudales de Extracción de Agua Potable (L/s)												TOTAL
	PC01	PC02	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PU01	PU02	PU03	CE03	DESALADORA	
2014	70	71	67	72	85	74	77	68	68	0	67	0	719
2015	70	71	67	72	85	74	77	68	68	68	22	0	741
2016	70	71	67	72	85	74	77	68	68	68	42	0	761
2017	70	71	67	72	85	74	77	68	68	68	60	0	780
2018			67	72	85	74	77	68	68	68		218	796
2019			67	72	85	74	77	68	68	68		233	811
2020			67	72	85	74	77	68	68	68		246	825
2021			67	72	85	74	77	68	68	68		258	837
2022			67	72	85	74	77	68	68	68		269	848
2023												858	858
2024												866	866
2025												874	874
2026												881	881
2027												887	887
2028												893	893
2029												898	898
2030												902	902
2031												906	906
2032												910	910
2033												913	913
2034												915	915
2035												918	918
2036												920	920
2037												922	922

AÑO	Caudales de Extracción de Agua Potable (L/s)												
	PC01	PC02	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PU01	PU02	PU03	CE03	DESALADORA	TOTAL
2038												924	924
2039												925	925
2040												927	927
2041												928	928
2042												929	929
2043												930	930
2044												931	931
2045												931	931
2046												932	932
2047												933	933
2048												933	933
2049												934	934
2050												934	934
2051												934	934
2052												935	935

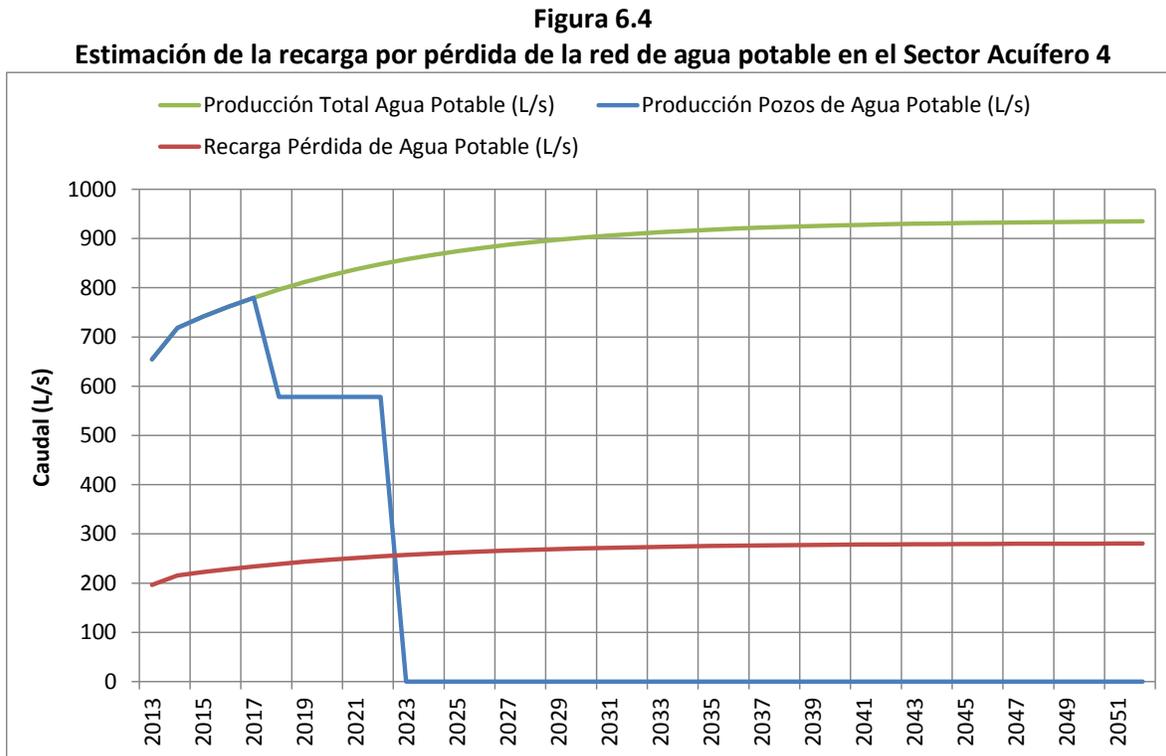
**Figura 6.3**  
**Ubicación Referencial de los Pozos de Bombeo para Agua Potable en sector 5 y sector 6**



Para el análisis de las pérdidas del sistema de conducción de agua potable, se ha utilizado el mismo criterio descrito en la calibración. Se ha estimado una pérdida total del sistema de distribución de un 40% de la producción total de los pozos. Según SISS (2011), el 30% del total corresponde a pérdidas

físicas del sistema que vuelven al acuífero. La diferencia, es decir el 10% de la producción total, corresponde a otras pérdidas, tales como gratuidades, hurtos de agua, y uso de grifos, entre otros.

Con base en lo anterior, en la Figura 6.4 se muestra la estimación de los caudales de recarga del Sector Acuífero 4, los que se mantienen en el tiempo, considerando que cuando dejan de operar los pozos, es la planta desaladora la que genera el agua que se distribuye por la red de agua potable.



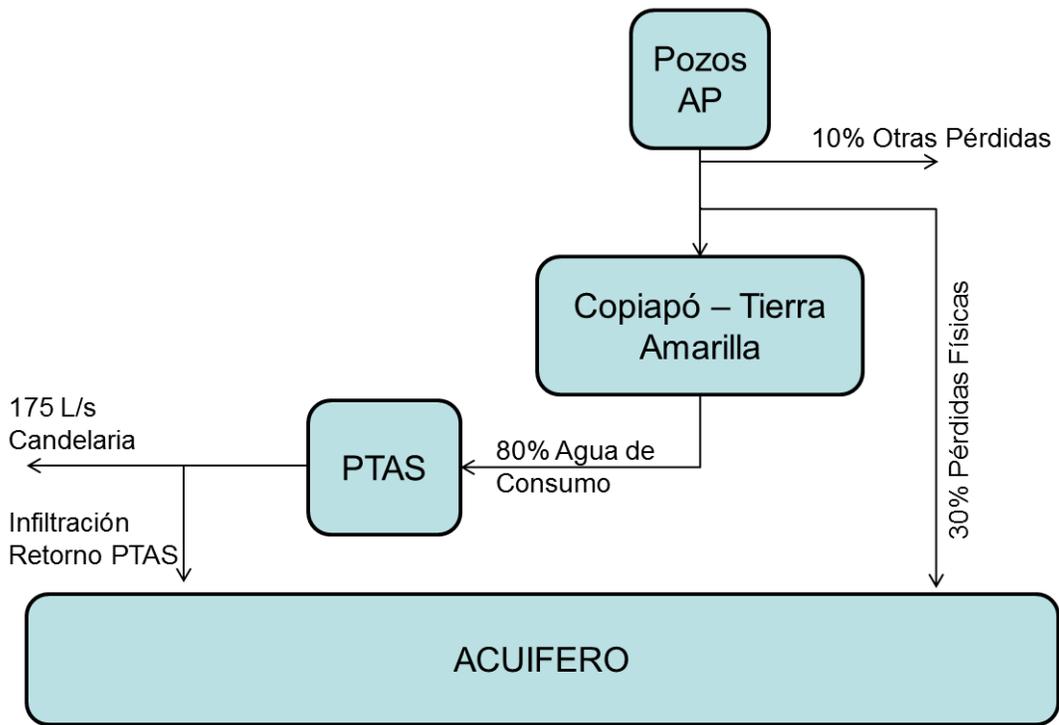
De acuerdo a SISS (2011), se estima que el 60% del agua de producción de los pozos es consumida en las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla. Para efectos del análisis se ha aplicado un factor de retorno de 80% para determinar el monto de aguas residuales enviadas a tratamiento. De esta forma, se considera que el 80% del agua potable de consumo por la población va a la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa sanitaria Aguas Chañar por la red de alcantarillado.

Luego de su tratamiento el agua tratada se descarga en su totalidad al cauce superficial en el Sector Acuífero 5 del acuífero de Copiapó, donde se infiltra a lo largo del cauce. Lo anterior se considera válido hasta el año 2010, momento en que la empresa sanitaria Aguas Chañar entrega 175 L/s de las aguas tratadas, a través de un acueducto, a la Compañía Minera Candelaria.

El esquema conceptual simplificado del manejo e infiltración del sistema de agua potable y de las aguas tratadas se muestra en la Figura 6.5, mientras que los caudales de infiltración al acuífero en el Sector Acuífero 5 se muestran en la Figura 6.6.

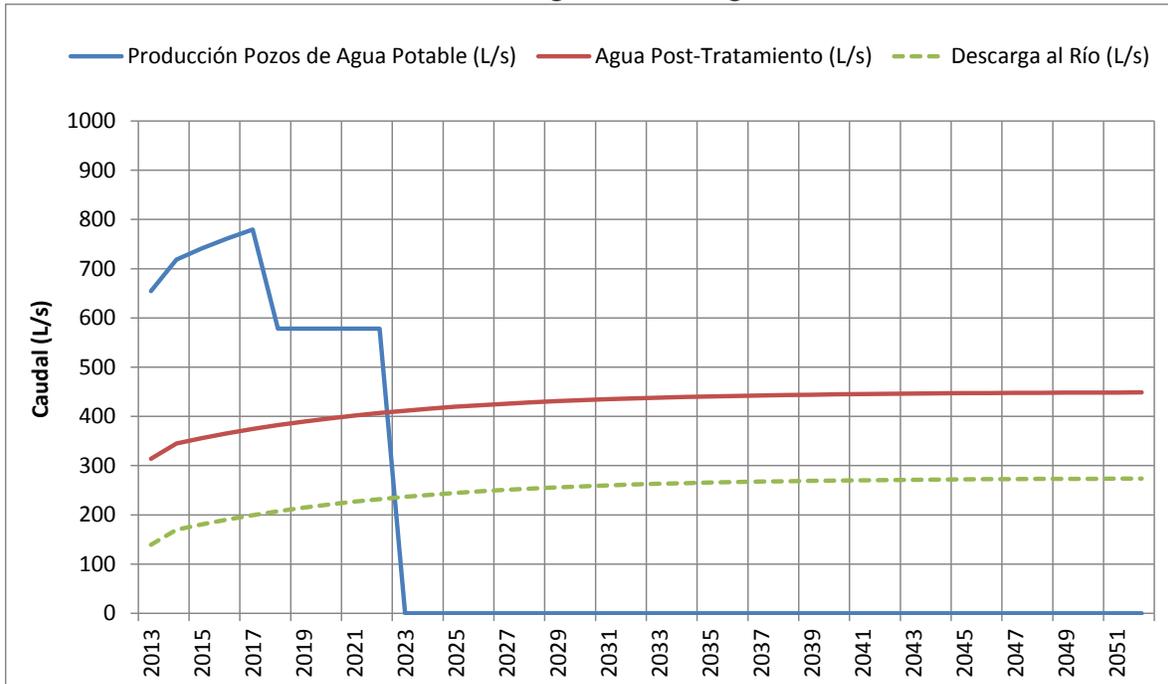
La Tabla 6.4 presenta la estimación de los caudales de recarga por pérdidas de la red de agua potable en el Sector Acuífero 4 y el caudal de infiltración por la descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas PTAS en el Sector Acuífero 5.

**Figura 6.5**  
**Esquema conceptual simplificado del sistema de recarga red de agua potable y PTAS**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 6.6**  
**Estimación del caudal de infiltración de las aguas de descarga de la PTAS en el Sector Acuífero 5**



**Tabla 6.4**

**Estimación de la recarga por pérdidas de la red de agua potable e infiltración por descarga PTAS**

<b>Año</b>	<b>Producción Pozos de Agua Potable (L/s)</b>	<b>Producción Planta Desaladora (L/s)</b>	<b>Producción Total Agua Potable (L/s)</b>	<b>Recarga Pérdida de Agua Potable (L/s)</b>	<b>Agua Post-Tratamiento (L/s)</b>	<b>Descarga al Río (L/s)</b>
2013	654	0	654	196	314	139
2014	719	0	719	216	345	170
2015	741	0	741	222	356	181
2016	761	0	761	228	365	190
2017	780	0	780	234	374	199
2018	578	218	796	239	382	207
2019	578	233	811	243	389	214
2020	578	246	825	247	396	221
2021	578	258	837	251	402	227
2022	578	269	848	254	407	232
2023	0	858	858	257	412	237
2024	0	866	866	260	416	241
2025	0	874	874	262	420	245
2026	0	881	881	264	423	248
2027	0	887	887	266	426	251
2028	0	893	893	268	429	254
2029	0	898	898	269	431	256
2030	0	902	902	271	433	258
2031	0	906	906	272	435	260
2032	0	910	910	273	437	262
2033	0	913	913	274	438	263
2034	0	915	915	275	439	264
2035	0	918	918	275	441	266
2036	0	920	920	276	442	267
2037	0	922	922	277	443	268
2038	0	924	924	277	443	268
2039	0	925	925	278	444	269
2040	0	927	927	278	445	270
2041	0	928	928	278	445	270
2042	0	929	929	279	446	271
2043	0	930	930	279	446	271
2044	0	931	931	279	447	272
2045	0	931	931	279	447	272
2046	0	932	932	280	447	272
2047	0	933	933	280	448	273
2048	0	933	933	280	448	273
2049	0	934	934	280	448	273

Año	Producción Pozos de Agua Potable (L/s)	Producción Planta Desaladora (L/s)	Producción Total Agua Potable (L/s)	Recarga Pérdida de Agua Potable (L/s)	Agua Post-Tratamiento (L/s)	Descarga al Río (L/s)
2050	0	934	934	280	448	273
2051	0	934	934	280	449	274
2052	0	935	935	280	449	274

### 6.2.2 Principales resultados

A continuación se presentan los principales resultados de la implementación del escenario 1 en el modelo AQUATOOL. La Tabla 6.5 a Tabla 6.8, muestran los estadísticos de caudal de probabilidad 10%, 50% y 85% para las estaciones superficiales de Copiapó en Pastillo, Copiapó en La Puerta, Copiapó en Ciudad y Copiapó en Angostura.

**Tabla 6.5**  
**Análisis de Probabilidad de Excedencia en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Pastillo, Escenario 1**

Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	8,66	7,86	5,99	4,42	4,03	3,87	3,81	3,69	2,77	3,69	5,78	9,65
50%	1,86	1,57	1,36	1,77	1,91	1,85	1,99	1,7	1,17	1,06	0,73	1,01
85%	0,76	0,76	0,87	1,01	1,19	1,23	1,21	0,95	0,75	0,63	0,36	0,48

**Tabla 6.6**  
**Análisis de Probabilidad de Excedencia en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en La Puerta, Escenario 1**

Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	6,5	5,78	4,08	4,1	3,78	3,71	3,76	3,21	1,6	2,43	3,68	7,35
50%	1,82	1,76	1,8	1,34	1,35	1,35	1,35	1,00	0,9	1,65	1,77	1,82
85%	1,27	1,28	1,29	0,6	0,59	0,6	0,6	0,61	0,61	1,32	1,35	1,34

**Tabla 6.7**  
**Análisis de Probabilidad de Excedencia en m<sup>3</sup>/s estación Copiapó en Ciudad, Escenario 1**

Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	1,99	1,85	1,39	1,77	1,64	1,63	1,64	1,15	0,17	0,61	0,67	2,53
50%	0,31	0,3	0,14	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,26	0,33	0,35
85%	0,11	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,12	0,12

**Tabla 6.8**  
**Análisis de Probabilidad de Excedencia en m<sup>3</sup>/s estación Copiapó en Angostura, Escenario 1**

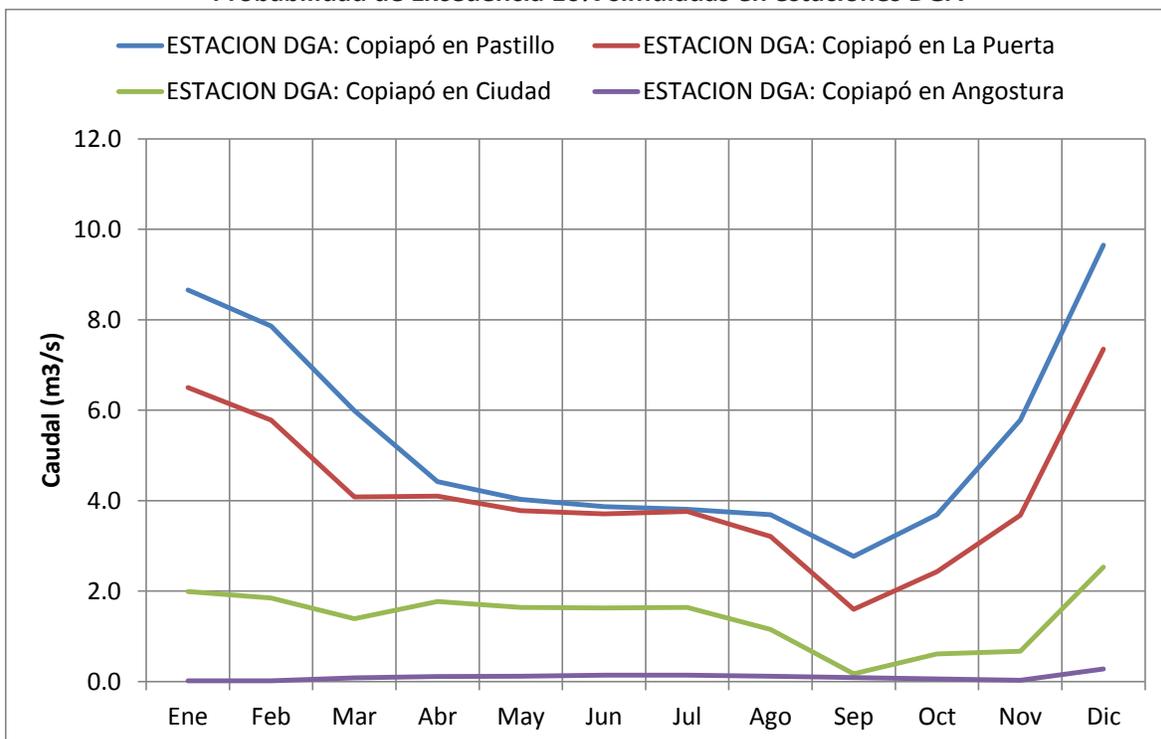
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,02	0,02	0,08	0,11	0,12	0,14	0,14	0,12	0,09	0,06	0,03	0,28
50%	0,02	0,02	0,07	0,11	0,12	0,14	0,13	0,12	0,09	0,05	0,03	0,02
85%	0,01	0,01	0,07	0,1	0,12	0,13	0,13	0,11	0,09	0,05	0,02	0,01

Desde la Figura 6.7 a la Figura 6.9 muestran, a nivel mensual, los caudales de probabilidad de excedencia 10%, 50% y 85% respectivamente. En la Figura 6.7 se aprecia la importancia del deshielo en épocas húmedas, que se transmite a todas las estaciones aguas abajo del río Copiapó. La Figura 6.8 muestra que para un año medio, la estación Copiapó en Pastillo no medirá más de 2 m<sup>3</sup>/s en ningún mes del año, además se aprecia el régimen pluvio-nival.

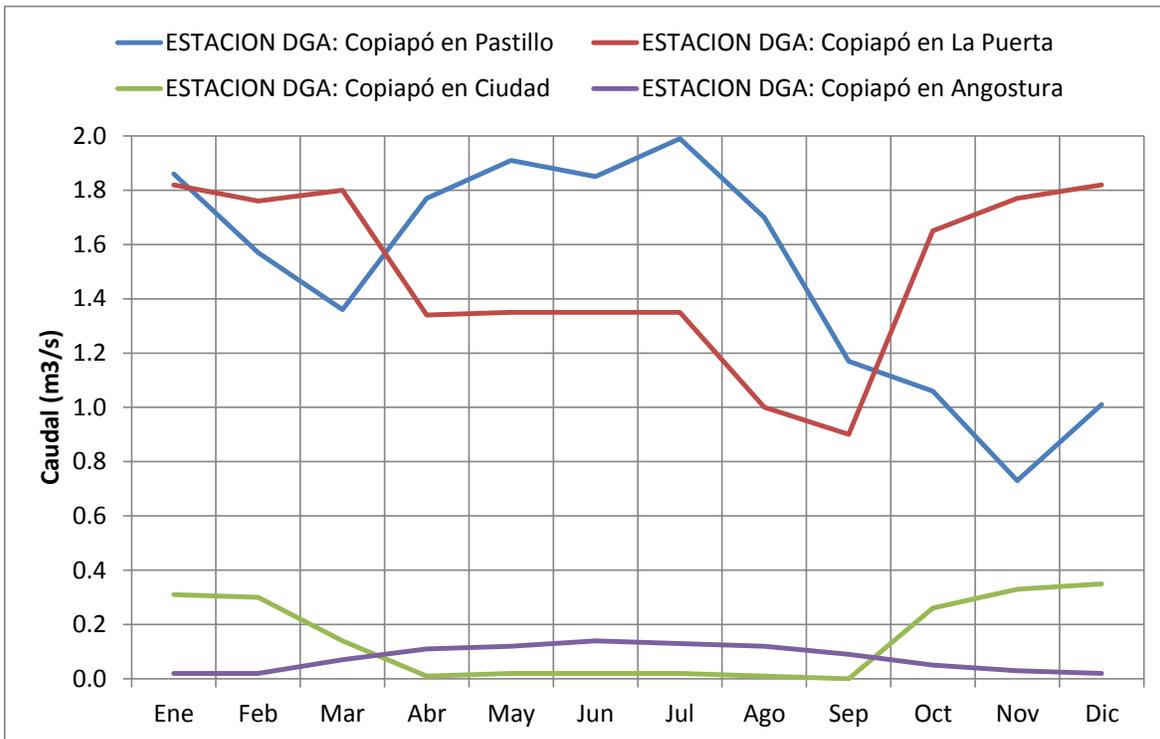
Aguas abajo, en la estación La Puerta, se aprecia el volumen regulado por el embalse Lautaro, que presenta mayores caudales en periodo de riego. Continuando hacia aguas abajo, se observa la disminución del caudal superficial hacia Copiapó y Angostura, producto del uso agrícola en la cuenca y se aprecia la recuperación del caudal superficial en el sector de Angostura producto de afloramientos.

La Figura 6.9, muestra los caudales de probabilidad de excedencia 85%, que representaría una condición más seca para la cuenca. En general, la situación es muy parecida a la observada para la situación media. Se observa además, que la oferta de agua no supera los 1,3 m<sup>3</sup>/s, simulados entre Pastillo y La Puerta.

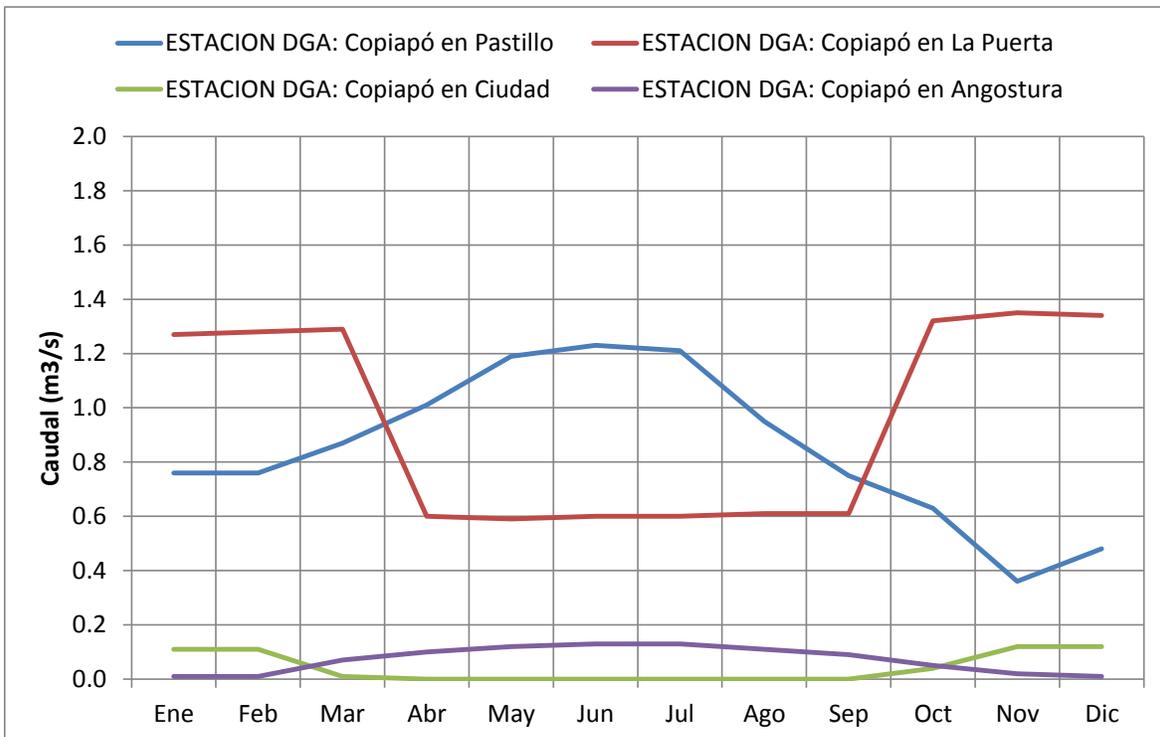
**Figura 6.7**  
**Probabilidad de Excedencia 10% simuladas en estaciones DGA**



**Figura 6.8**  
**Probabilidad de Excedencia 50% simuladas en estaciones DGA**



**Figura 6.9**  
**Probabilidad de Excedencia 85% simuladas en estaciones DGA**



La Tabla 6.9 muestra la demanda total anual impuesta a AQUATOOL para riego, minería, agua potable e industria. En la misma tabla se muestra información de los porcentajes de satisfacción de la demanda por cada zona de demanda impuesta al modelo. Adicionalmente, con estos resultados se muestra la demanda media anual satisfecha.

**Tabla 6.9**  
**Satisfacción Demanda Media 2013-2053. Escenario 1**

Uso	Sector	Demanda Anual Hm <sup>3</sup>	Satisfacción Demanda (%)			Demanda Anual m <sup>3</sup> /s	Demanda Satisfecha m <sup>3</sup> /s
			Mín.	Medio	Máx.		
Riego	R1a-01	4,899	59	99	100	5,07	4,48
	R1b-02	4,231	98	100	100		
	R1c-03	4,622	94	100	100		
	R1d-04	6,009	100	100	100		
	R2a-05	20,930	43	85	100		
	R2a-06	6,698	39	84	100		
	R2a-07	6,128	39	82	100		
	R3a-08	1,045	19	74	100		
	R3a-09	10,181	19	74	100		
	R3a-10	8,833	19	72	100		
	R3a-11	1,366	19	72	100		
	R3b-12	10,771	19	67	100		
	R3b-13	13,492	19	69	100		
	R4a-14	2,332	100	100	100		
	R4a-15	4,187	100	100	100		
	R4a-16	16,596	100	100	100		
	R5a-17	14,711	100	100	100		
	R5a-18	8,637	100	100	100		
	R6a-19	11,038	100	100	100		
	R6b-20	3,230	100	100	100		
Agua Potable	Sector 2a	0,688	50	87	100	0,67	0,66
	Sector 4a	0,732	100	100	100		
	Sector 5a	13,395	100	100	100		
	Sector 6a	6,155	100	100	100		
Minería	Sector 1b	0,694	100	100	100	0,65	0,62
	Sector 3b	3,498	25	78	100		
	Sector 4a	14,290	100	100	100		
	Sector 5a	1,999	100	100	100		
Industria	Sector 2a	0,517	50	87	100	0,03	0,03
	Sector 5a	0,393	100	100	100		
<b>Total</b>		<b>202,3</b>				<b>6,41</b>	<b>5,79</b>

La Tabla 6.10 presenta la información del número de años, asociados a la simulación, que se logra satisfacer determinados rangos de porcentaje de la demanda agrícola. Para el acuífero del Sector 1 se aprecia que durante los 41 años de simulación se satisface sobre el 85% de la demanda anual, mientras que para los Sectores 4, 5 y 6, en los mismos 41 años de simulación, se satisface el 100% de la demanda. Los sectores más deficitarios corresponden al Sector 2 y Sector 3, donde se satisface sobre el 85% de la demanda agrícola apenas durante 21 años y 14 años, respectivamente.

La Tabla 6.11 muestra las recargas medias anuales por sector acuífero, leídas desde AQUATOOL para ser ingresadas a Visual MODFLOW en el escenario 1. Cabe resaltar, que en el Sector Acuífero 2 se ha sumado la infiltración del embalse Lautaro, en el Sector 4 se suma la recarga por pérdidas de la red de agua potable y en el Sector 5 se agrega la infiltración de la descarga de la planta de tratamiento de agua potable.

**Tabla 6.10**  
**Número de Años que se satisface la demanda agrícola, Escenario 1**

Satisfacción de la Demanda Agrícola	Número de Años					
	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06
100%	40	19	9	41	41	41
85% - 99%	1	2	4	0	0	0
60% - 85%	0	12	10	0	0	0
40% - 60%	0	8	12	0	0	0
0% - 40%	0	0	6	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>

**Tabla 6.11**  
**Caudal de Recarga Media en m<sup>3</sup>/s, generada desde AQUATOOL para Visual MODFLOW Escenario 1**

Escenario	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06	TOTAL
1	1,06	0,93	1,00	1,06	0,55	0,14	4,75

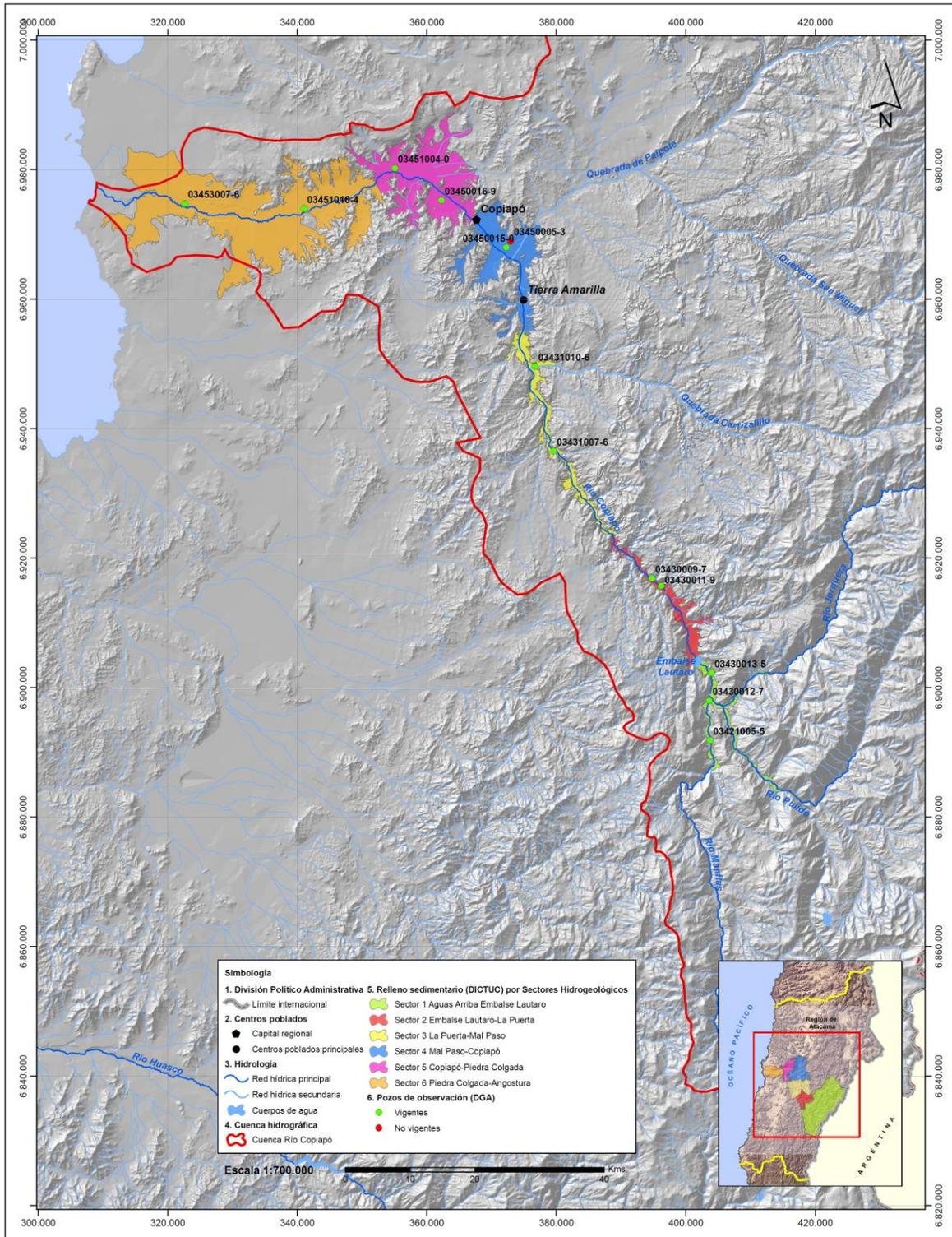
La Figura 6.10 muestra la ubicación en el relleno sedimentario del acuífero de Copiapó de algunos de los pozos representativos por sector hidrogeológico de la DGA, los que se muestran gráficamente para cada escenario de simulación.

La Figura 6.11 a muestra una comparación de los niveles de agua subterránea para la situación del escenario 1. A continuación se realiza una descripción general de los niveles de agua subterránea esperados en Copiapó:

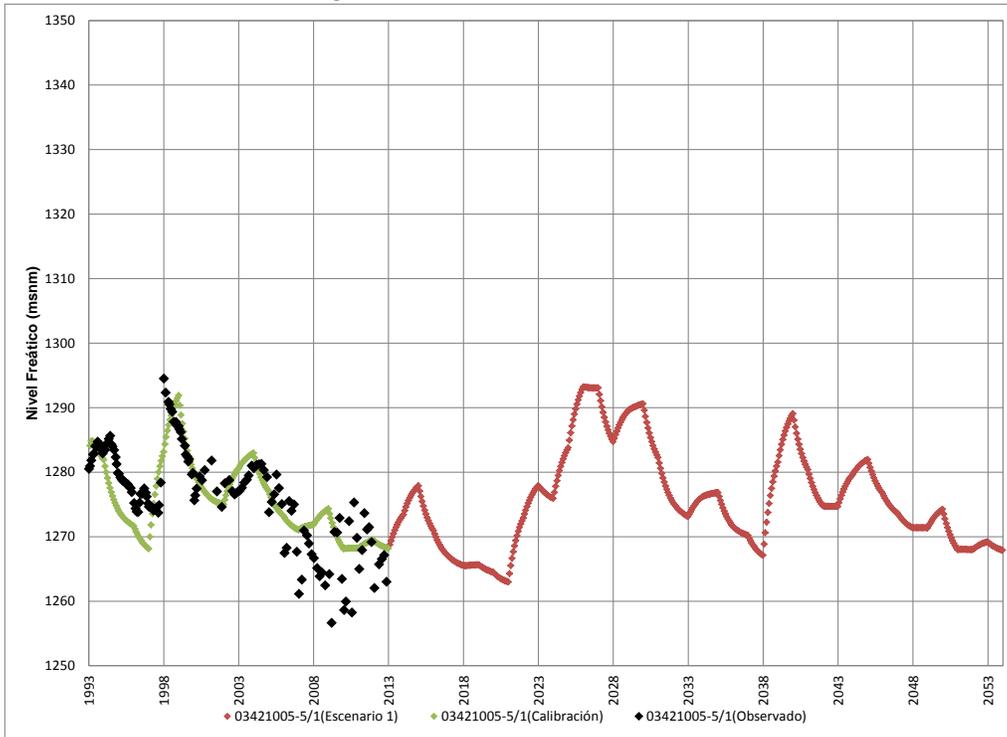
- En el Sector Acuífero 1, se presentan niveles de agua que presentan amplias variaciones entre los niveles mínimos y máximos, que oscilan entre 40 y 60 m. Esta variación depende de las condiciones hidrológicas de la recarga y el bombeo en el sector.
- En el Sector Acuífero 2, la situación de los niveles se presenta más estable, debido a que el río Copiapó en el sector de los Loros presenta afloramientos de agua.
- El Sector Acuífero 3, muestra una situación descensos sostenidos hasta el año 2015, hasta que se logra una estabilización de niveles, debido a disminuciones de los rendimientos de los pozos de riego, que no logran satisfacer la demanda agrícola total.

- El Sector Acuífero 4, que ha presentado descensos sostenidos debido principalmente a la fuerte presión de los pozos de los proyectos mineros y los pozos de agua potable. Se aprecia una especie de estabilización de sus niveles a partir del año 2013, producto de que los pozos de agua potable existentes en el sector 4 se trasladan totalmente al Sector 5 y Sector 6. A partir del año 2023 se genera un grado de recuperación del acuífero, debido a la entrada en operación de la planta desaladora. Sin embargo, los niveles esperados en el largo plazo son del orden de los actuales.
- En el Sector Acuífero 5, el acuífero presenta descensos sostenidos, que se intensifican a partir del año 2011 debido a la explotación de los pozos de agua potable localizados en Piedra Colgada. Se aprecia a partir del año 2023, una leve recuperación del sistema coincidente con un periodo hidrológico húmedo, pero los descensos sostenidos se aprecian hasta el final del periodo de simulación.
- Finalmente, en el Sector Acuífero 6, los niveles de agua subterránea presentan menores variaciones que el resto del acuífero. La zona de este acuífero que limita con el Sector 5, presenta descensos sostenidos, aunque a una menor tasa de descensos, producto de la importante demanda y gran volumen embalsado en el acuífero. Cabe resaltar que a partir del año 2014 -2015, empiezan a operar los pozos de la empresa sanitaria y a partir del año 2023, se detienen para dar paso a la operación de la planta desaladora. La zona de salida de la cuenca, más cercana a Angostura, presenta niveles estables, debido a que es una zona de angostamiento y los rellenos sedimentarios identificados son de tan baja permeabilidad que no presentan interés hidrogeológico.

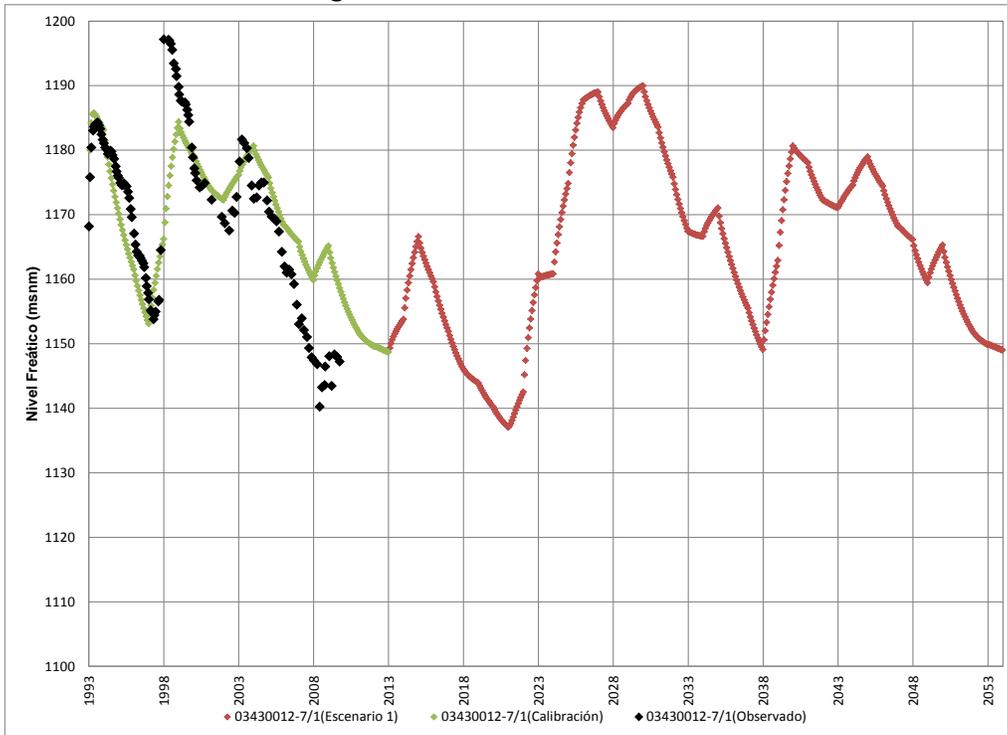
**Figura 6.10**  
**Ubicación red de niveles de agua subterránea para escenarios de simulación**



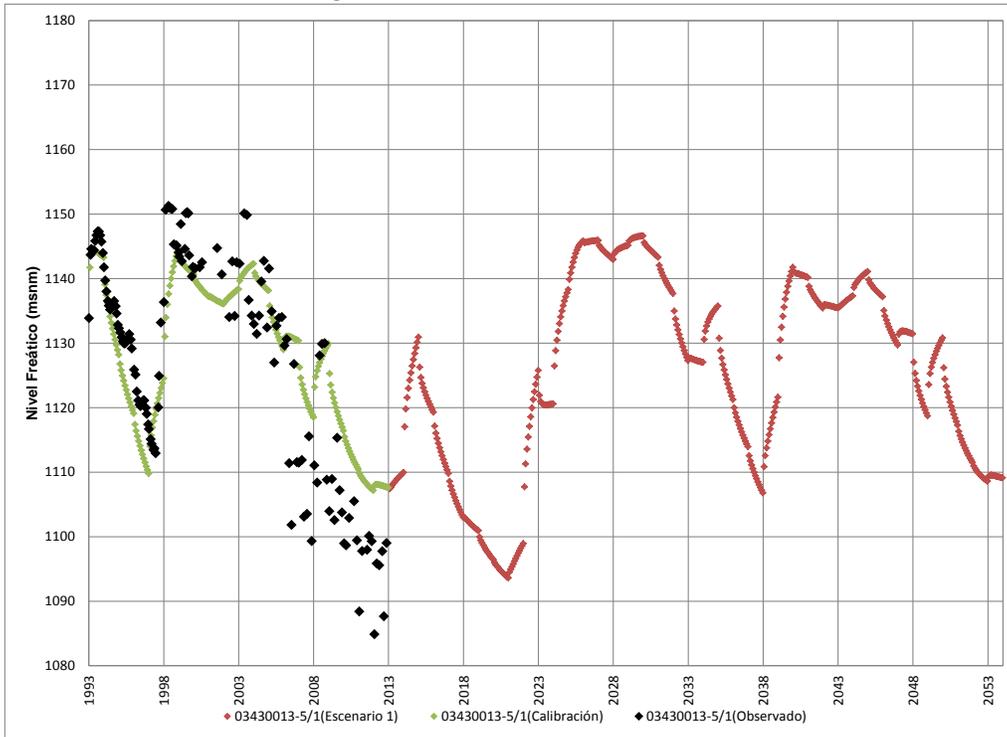
**Figura 6.11**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 1**



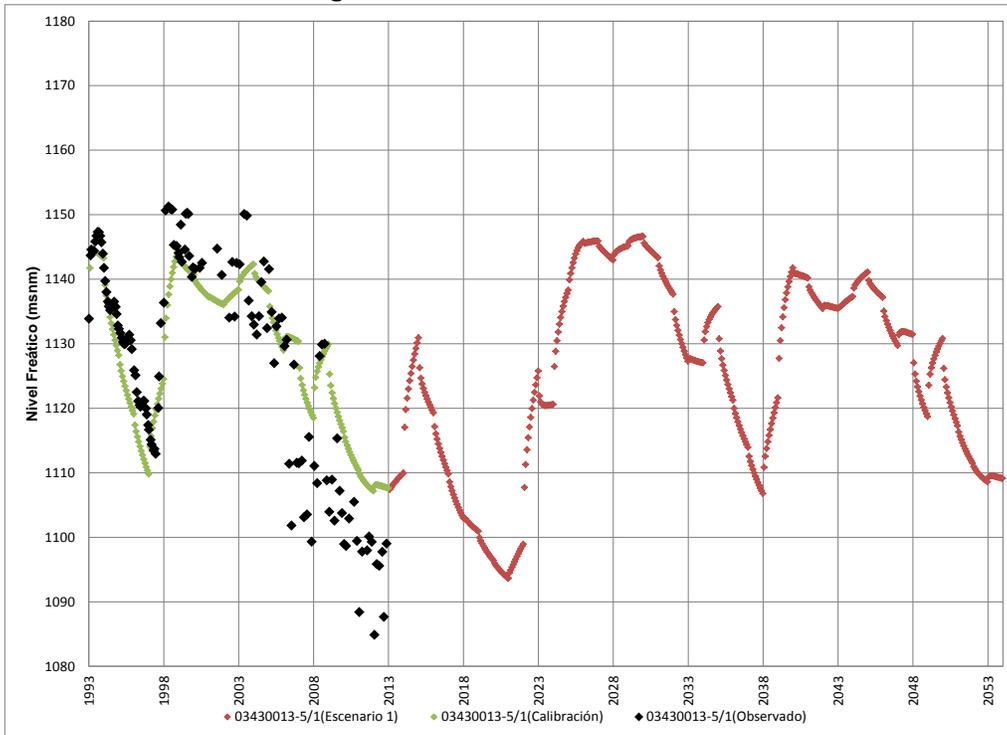
**Figura 6.12**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 1**



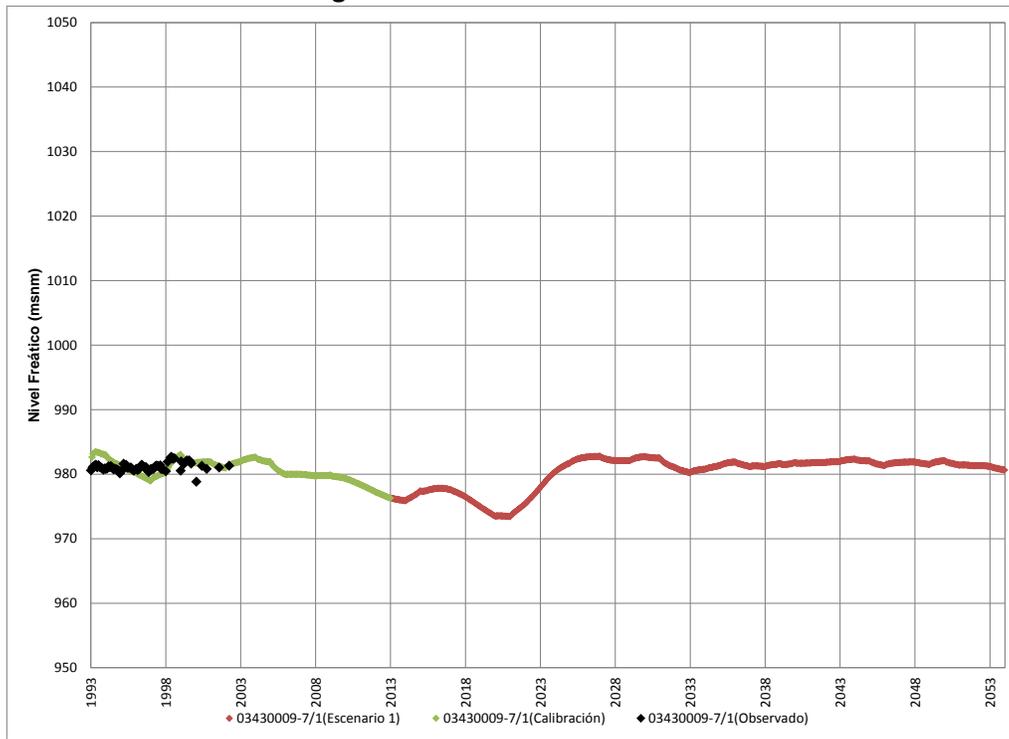
**Figura 6.13**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 1**



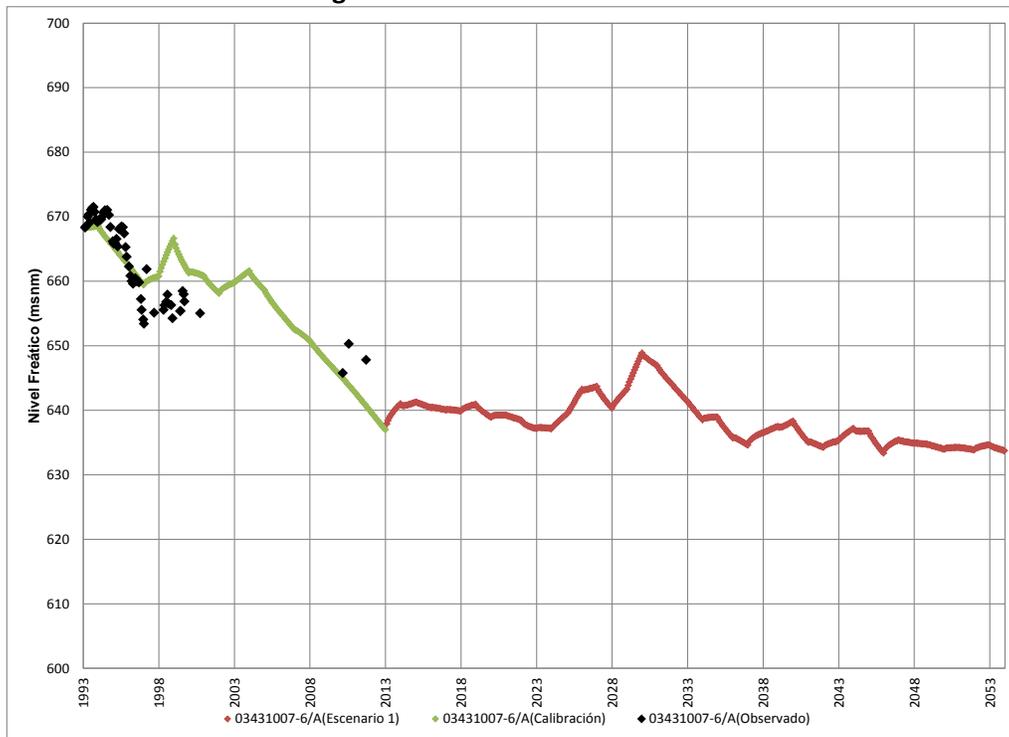
**Figura 6.14**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 2**



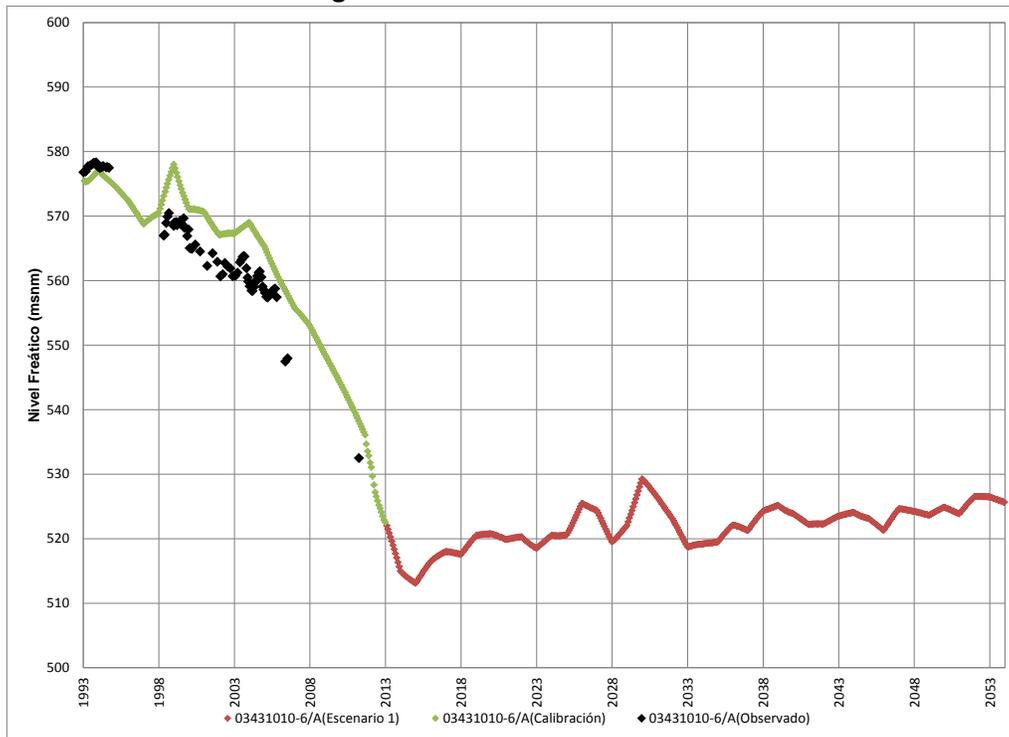
**Figura 6.15**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 2**



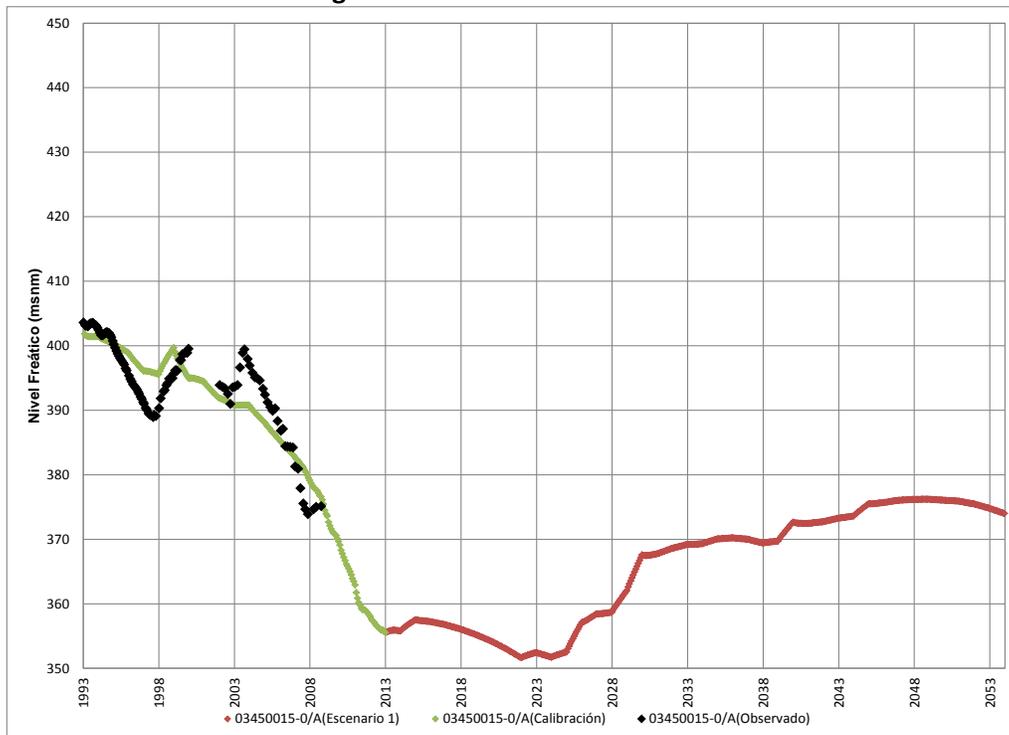
**Figura 6.16**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 3**



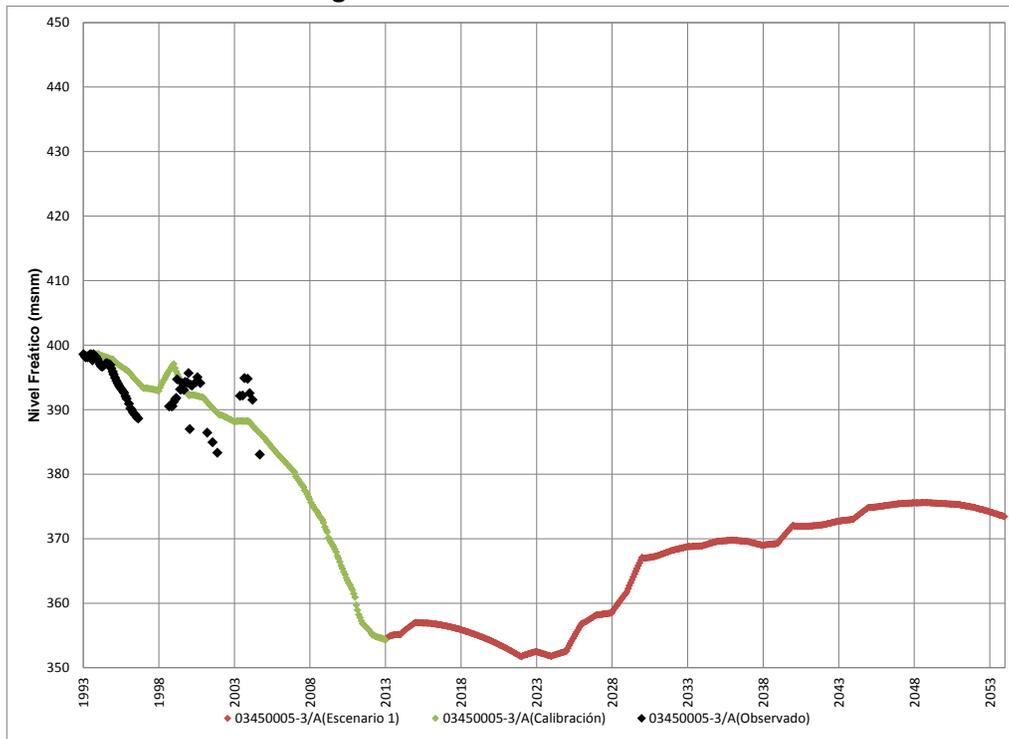
**Figura 6.17**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 3**



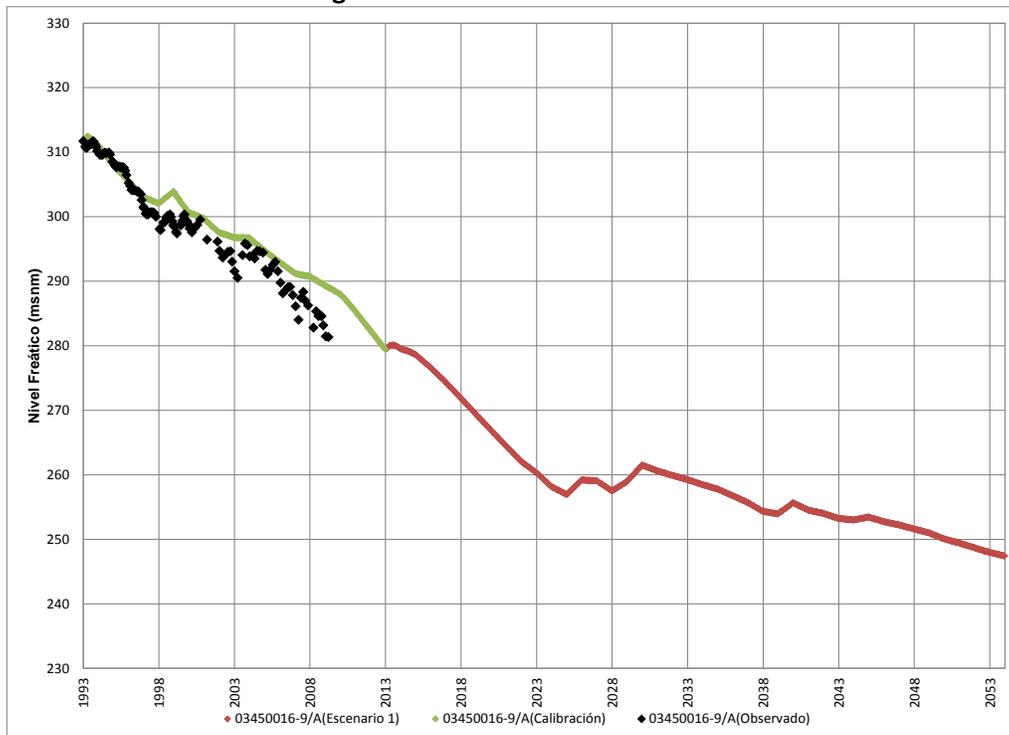
**Figura 6.18**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 4**



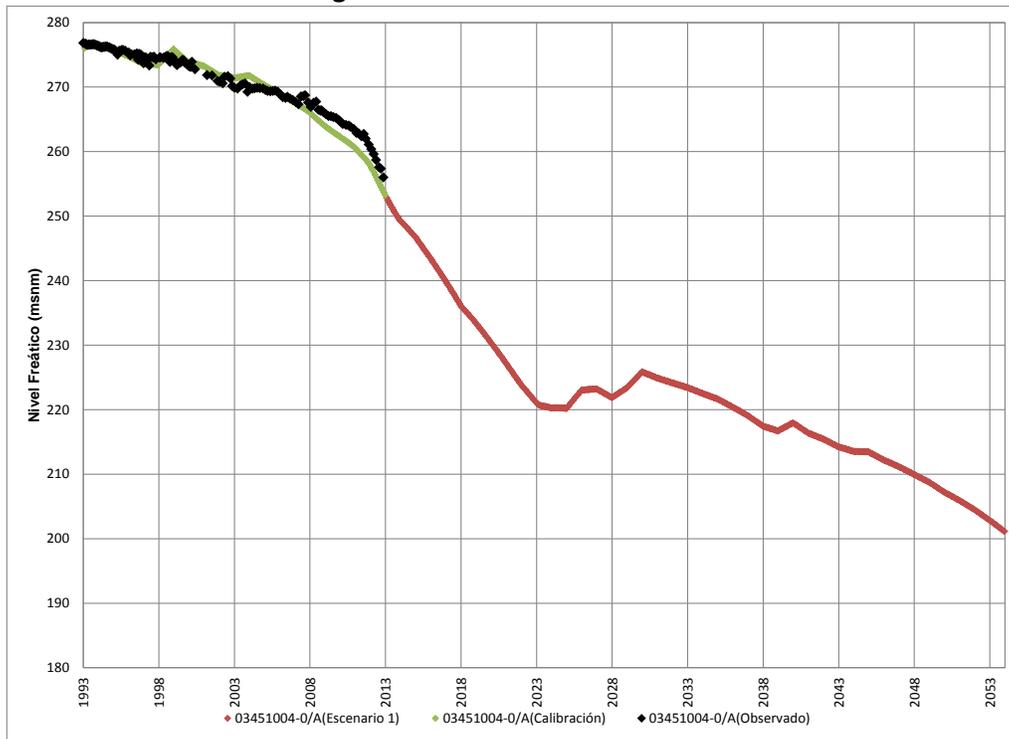
**Figura 6.19**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 4**



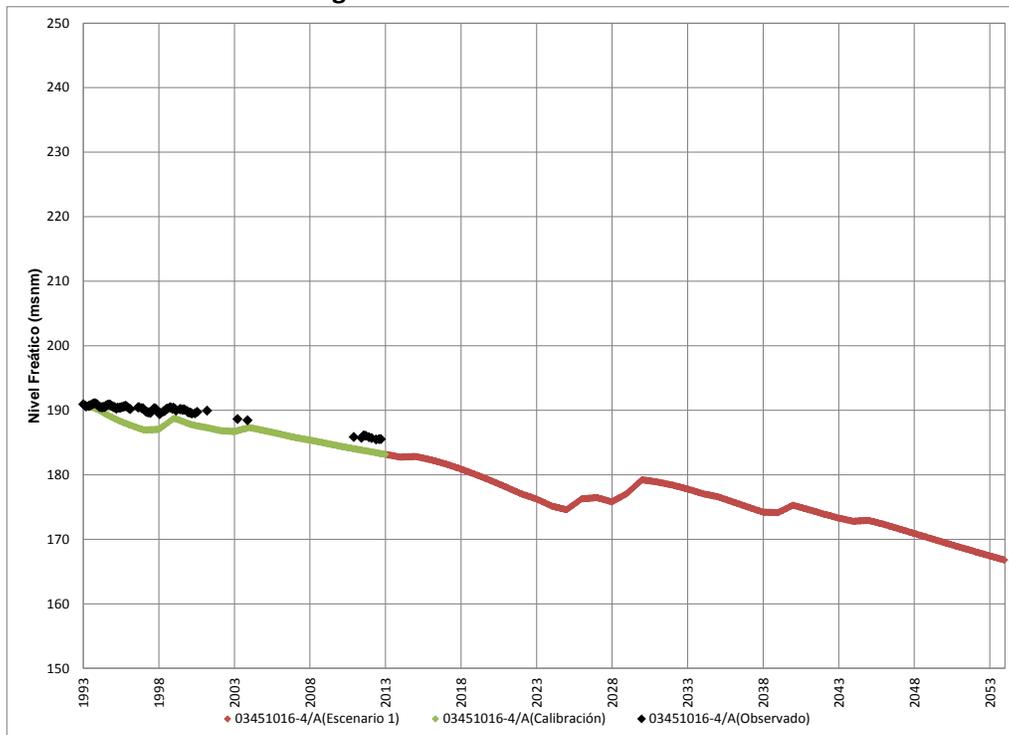
**Figura 6.20**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 5**



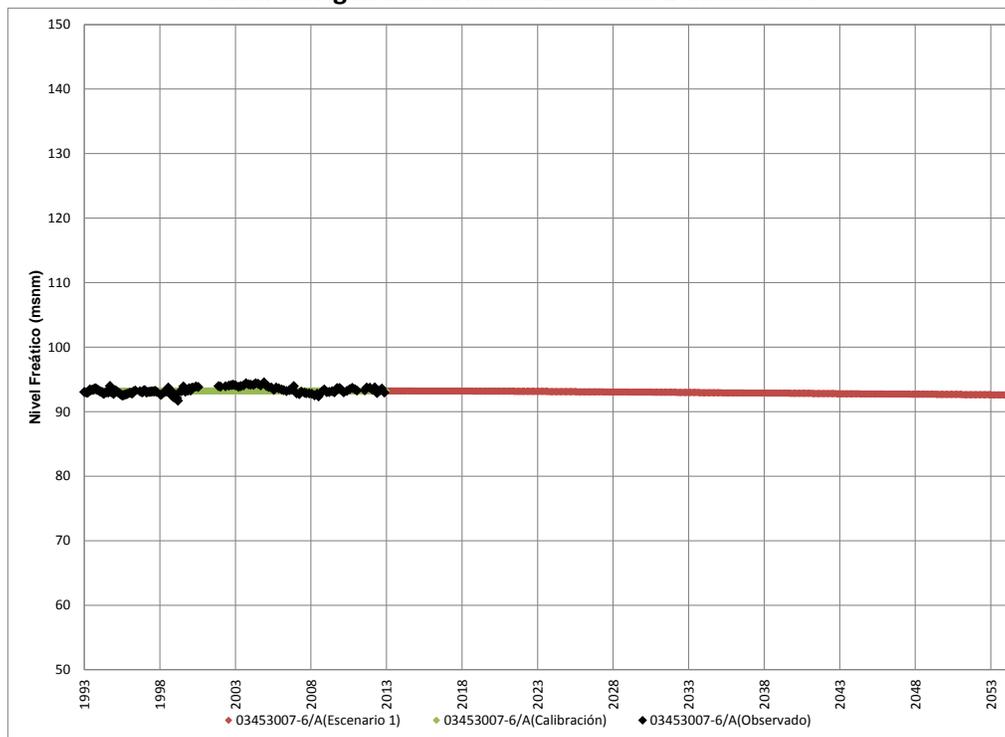
**Figura 6.21**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 5**



**Figura 6.22**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 6**



**Figura 6.23**  
**Nivel de Agua Subterránea Escenario 1 en Sector 6**



### 6.2.3 Análisis de Resultados

Los principales resultados obtenidos desde el acople de los modelos AQUATOOL y Visual MODFLOW para el Escenario 1 se describen a continuación.

- Se ha establecido este escenario como condición base para el resto de los modelos. Se asocia una extracción de agua potable desde pozos de bombeo de los Sectores Acuíferos 5 y 6 hasta el año 2023 en que opera una planta desaladora.
- La situación proyectada de acuerdo al modelo AQUATOOL, muestra que no es posible satisfacer las demandas de los pozos de riego desde los Aectores Acuíferos 2 y 3. Esta condición genera caudales de bombeo más reducidos para el modelo Visual MODFLOW.
- Se obtiene una recarga media para este escenario de 4,75 m<sup>3</sup>/s, aportados por infiltración de agua del río, percolación del riego y canales, filtración del embalse Lautaro, así como pérdidas del sistema de distribución de agua potable y desde la planta de tratamiento.
- Se proyectan importantes descensos del nivel de aguas subterráneas en los Sectores 3, 4 y 5 de los acuíferos de Copiapó, condicionados fuertemente por la extracción de los pozos de agua potable de Piedra Colgada y en el Sector 6.
- Se espera leves recuperaciones una vez que los pozos de agua potable dejen de operar por el intercambio de fuente a una planta desaladora.
- No se proyectan impactos a la salida del sistema, ya sea superficial en la estación Copiapó en Angostura y/o niveles de agua subterránea

### **6.3 Escenario 2: Efecto en el Sector 5 de la Venta de Agua Efluente de la PTAS a Candelaria.**

#### **6.3.1 Descripción General**

En este caso se definen dos simulaciones, usando como situación base el escenario 1:

- Escenario 2A: Considera que se descarga al río Copiapó el total del caudal efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas en el Sector Acuífero 5. En este caso, no se considera transferencia de aguas a Candelaria.
- Escenario 2B: Considera la reducción total del caudal de descarga efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas al río Copiapó en el Sector Acuífero 5 (Recarga Nula), con motivo de la transferencia de todo el recurso a otros usos.

#### **6.3.2 Principales resultados**

##### **6.3.2.1 Escenario 2A**

A continuación se presentan los principales resultados de la implementación del escenario 2A en el modelo AQUATOOL. Desde la Tabla 6.12 a la Tabla 6.15 se muestran los estadísticos de caudal de probabilidad 10%, 50% y 85% para las estaciones superficiales de Copiapó en Pastillo, Copiapó en La Puerta, Copiapó en Ciudad y Copiapó en Angostura y las diferencias respecto del escenario 1. No se aprecia un mayor efecto en los caudales superficiales.

La Tabla 6.16 muestra la demanda total anual impuesta a AQUATOOL para riego, minería, agua potable e industria. En la misma tabla se muestra información de los porcentajes de satisfacción de la demanda por cada zona de demanda impuesta al modelo. Con estos resultados, se muestra la demanda media anual satisfecha.

La Tabla 6.17 presenta la información del número de años, asociados a la simulación, que logra satisfacer rangos específicos de porcentaje de la demanda agrícola. Para el acuífero del Sector 1 se aprecia que durante los 41 años de simulación se satisface sobre el 85% de la demanda anual, y para los Sectores 4, 5 y 6 los 41 años de simulación satisfacen el 100% de la demanda. Los sectores más deficitarios corresponden a los Sectores 2 y 3, donde satisface sobre el 85% de la demanda agrícola apenas durante 21 años y 14 años, respectivamente.

**Tabla 6.12**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Pastillo, Escenario 2A**

<b>Escenario 2A</b>												
<b>Prob. Exc</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
10%	8,66	7,86	5,99	4,42	4,03	3,87	3,81	3,69	2,77	3,69	5,78	9,65
50%	1,86	1,57	1,36	1,77	1,91	1,85	1,99	1,70	1,17	1,06	0,73	1,01
85%	0,76	0,76	0,87	1,01	1,19	1,23	1,21	0,95	0,75	0,63	0,36	0,48
<b>Diferencia Escenario 2A respecto a Escenario 1</b>												
<b>Prob. Exc</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla 6.13**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en La Puerta, Escenario 2A**

<b>Escenario 2A</b>												
<b>Prob. Exc</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
10%	6,50	5,78	4,08	4,10	3,77	3,71	3,76	3,20	1,61	2,43	3,68	7,35
50%	1,82	1,76	1,80	1,34	1,35	1,35	1,35	0,99	0,90	1,65	1,77	1,82
85%	1,27	1,28	1,29	0,60	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	1,32	1,35	1,34
<b>Diferencia Escenario 2A respecto a Escenario 1</b>												
<b>Prob. Exc</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
85%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla 6.14**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Ciudad, Escenario 2A**

<b>Escenario 2A</b>												
<b>Prob. Exc</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
10%	1,99	1,85	1,39	1,77	1,64	1,63	1,64	1,14	0,17	0,61	0,67	2,53
50%	0,31	0,30	0,13	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,26	0,33	0,35
85%	0,11	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,12	0,12
<b>Diferencia Escenario 2A respecto a Escenario 1</b>												
<b>Prob. Exc</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
85%	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla 6.15**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Angostura, Escenario 2A**

<b>Escenario 2A</b>												
<b>Prob. Exc</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
10%	0,02	0,02	0,08	0,11	0,12	0,14	0,14	0,12	0,09	0,06	0,03	0,28
50%	0,02	0,02	0,07	0,11	0,12	0,14	0,13	0,12	0,09	0,05	0,03	0,02
85%	0,01	0,01	0,07	0,10	0,12	0,13	0,13	0,11	0,09	0,05	0,02	0,01
<b>Diferencia Escenario 2A respecto a Escenario 1</b>												
<b>Prob. Exc</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

La Tabla 6.18 muestra las recargas medias anuales por sector acuífero, leídas desde AQUATOOL para ser ingresadas a Visual MODFLOW en el escenario 2A. Cabe resaltar, que en el Sector 2 se ha sumado la infiltración del embalse Lautaro, en el Sector 4 se suma la recarga por pérdidas de la red de agua potable y en el Sector 5 se agrega la infiltración de la descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas. En el caso del escenario 2A, existe un aumento promedio de 180 L/s en la recarga del Sector 5, producto de que toda el agua de tratamiento de la PTAS se descarga al río Copiapó.

Desde la Figura 6.24 a la Figura 6.36 muestra una comparación de los niveles de agua subterránea para la situación del escenario 2A, en que se descarga toda el agua tratada al río Copiapó en el Sector 5, respecto de los niveles del escenario 1. Se aprecia, en general, que no existen mayores diferencias en los niveles de agua subterránea, salvo en el Sector 5 del acuífero de Copiapó, en que se aprecia que al recargar toda el agua de tratamiento al acuífero, genera localmente una mejor condición de los niveles generales del acuífero. Esta situación, se hace más notoria a partir del año 2023, periodo en el que dejan de operar los pozos de bombeo de agua potable en el Sector 5 y entra en operación la planta desaladora.

**Tabla 6.16**  
**Satisfacción Demanda Media 2013-2053. Escenario 2A**

Uso	Sector	Demanda Anual Hm <sup>3</sup>	Satisfacción Demanda (%)			Demanda Anual m <sup>3</sup> /s	Demanda Satisfecha m <sup>3</sup> /s
			Mín	Medio	Máx		
<b>Riego</b>	R1a-01	4,899	59	99	100	5,07	4,48
	R1b-02	4,231	98	100	100		
	R1c-03	4,622	94	100	100		
	R1d-04	6,009	100	100	100		
	R2a-05	20,930	43	85	100		
	R2a-06	6,698	40	84	100		
	R2a-07	6,128	40	82	100		
	R3a-08	1,045	19	74	100		
	R3a-09	10,181	19	74	100		
	R3a-10	8,833	19	72	100		
	R3a-11	1,366	19	72	100		
	R3b-12	10,771	19	68	100		
	R3b-13	13,492	19	69	100		
	R4a-14	2,332	100	100	100		
	R4a-15	4,187	100	100	100		
	R4a-16	16,596	100	100	100		
	R5a-17	14,711	100	100	100		
	R5a-18	8,637	100	100	100		
	R6a-19	11,038	100	100	100		
	R6b-20	3,230	100	100	100		
<b>Agua Potable</b>	Sector 2a	0,688	58	89	100	0,67	0,66
	Sector 4a	0,732	100	100	100		
	Sector 5a	13,395	100	100	100		
	Sector 6a	6,155	100	100	100		
<b>Minería</b>	Sector 1b	0,694	100	100	100	0,65	0,62
	Sector 3b	3,498	25	78	100		
	Sector 4a	14,290	100	100	100		
	Sector 5a	1,999	100	100	100		
<b>Industria</b>	Sector 2a	0,517	58	89	100	0,03	0,03
	Sector 5a	0,393	100	100	100		
<b>Total</b>		<b>202,3</b>				<b>6,41</b>	<b>5,79</b>

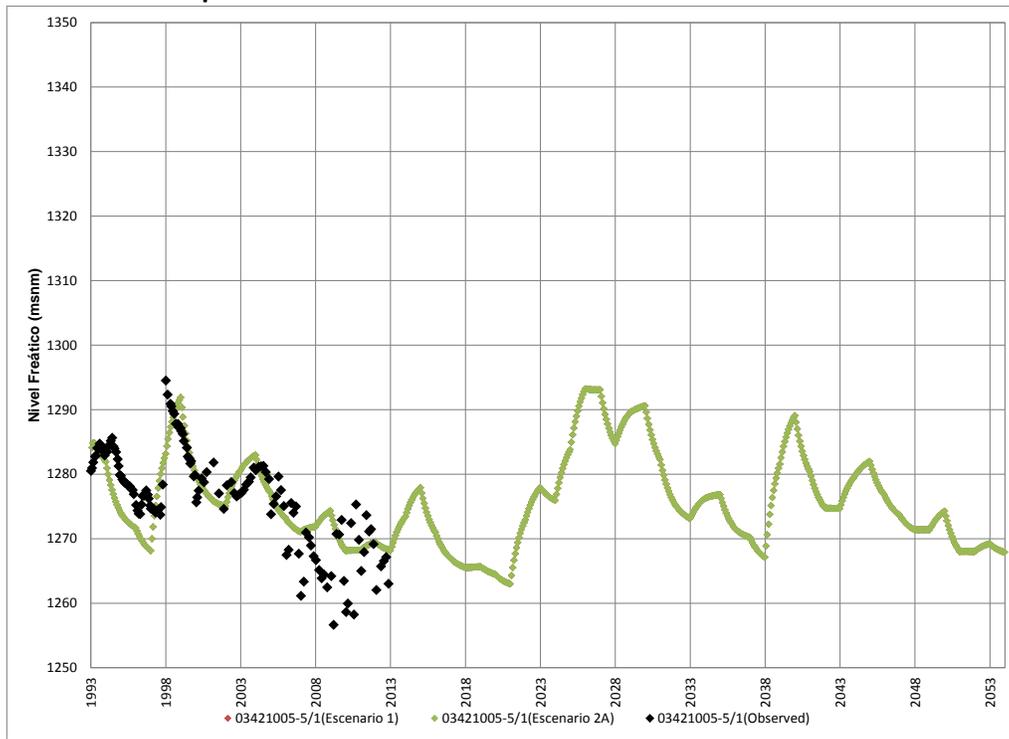
**Tabla 6.17**  
**Número de Años que se satisface la demanda agrícola, Escenario 2A**

Satisfacción de la Demanda Agrícola	Número de Años					
	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06
100%	40	19	10	41	41	41
85% - 99%	1	1	4	0	0	0
60% - 85%	0	10	9	0	0	0
40% - 60%	0	11	12	0	0	0
20% - 40%	0	0	6	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>

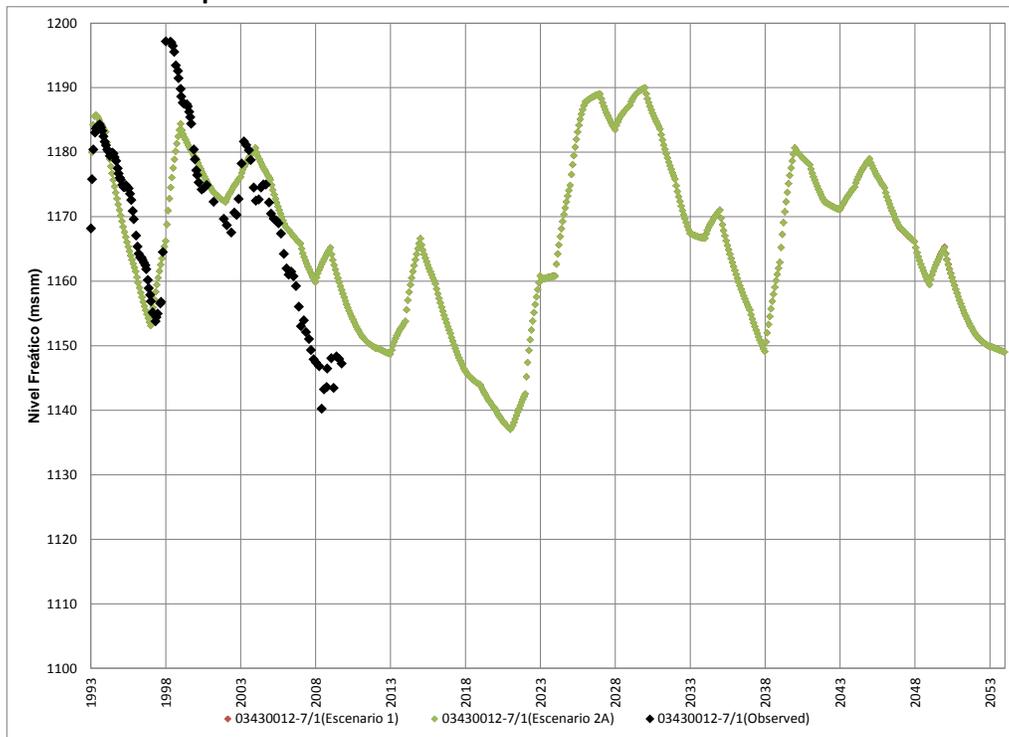
**Tabla 6.18**  
**Caudal de Recarga Media en m<sup>3</sup>/s, generada desde AQUATOOL para Visual MODFLOW Escenario 2A**

Escenario	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06	TOTAL
1	1,06	0,93	1,00	1,06	0,55	0,14	4,75
2A	1,06	0,93	1,00	1,06	0,73	0,14	4,92
<b>Diferencia</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,18</b>	<b>0,00</b>	<b>0,18</b>

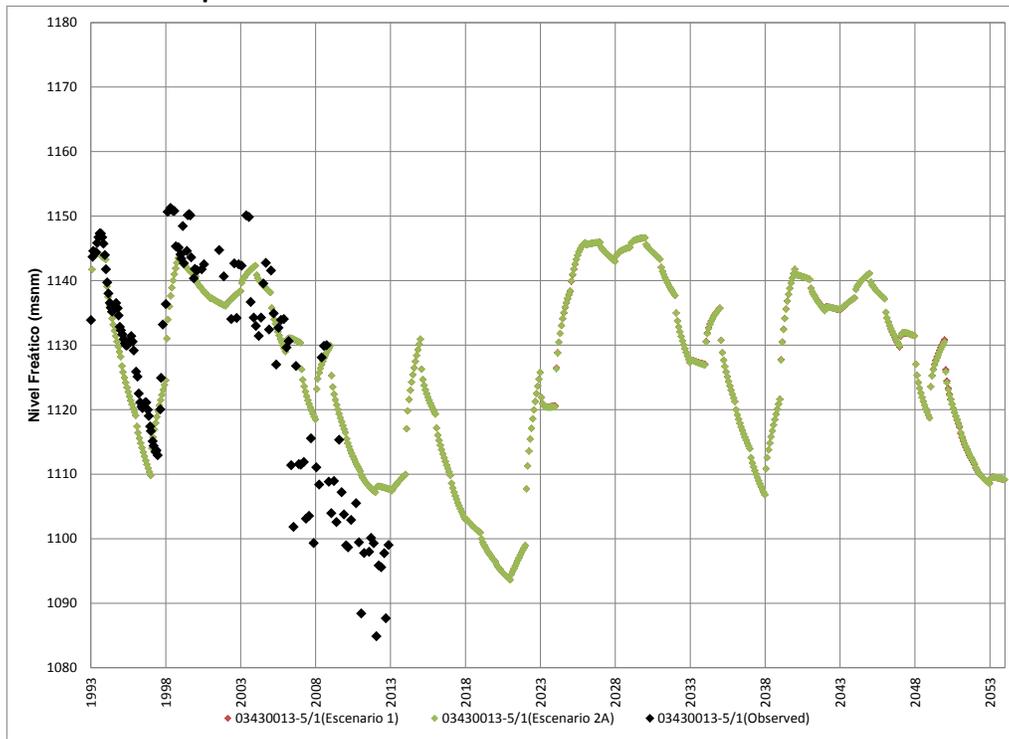
**Figura 6.24**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 1**



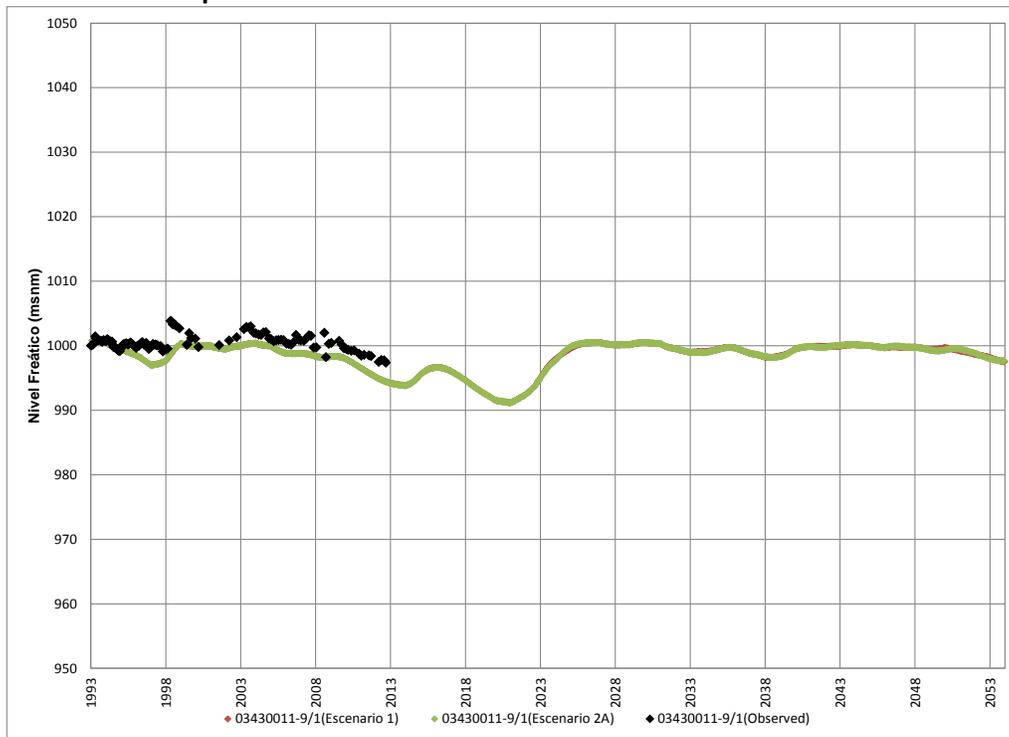
**Figura 6.25**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 1**



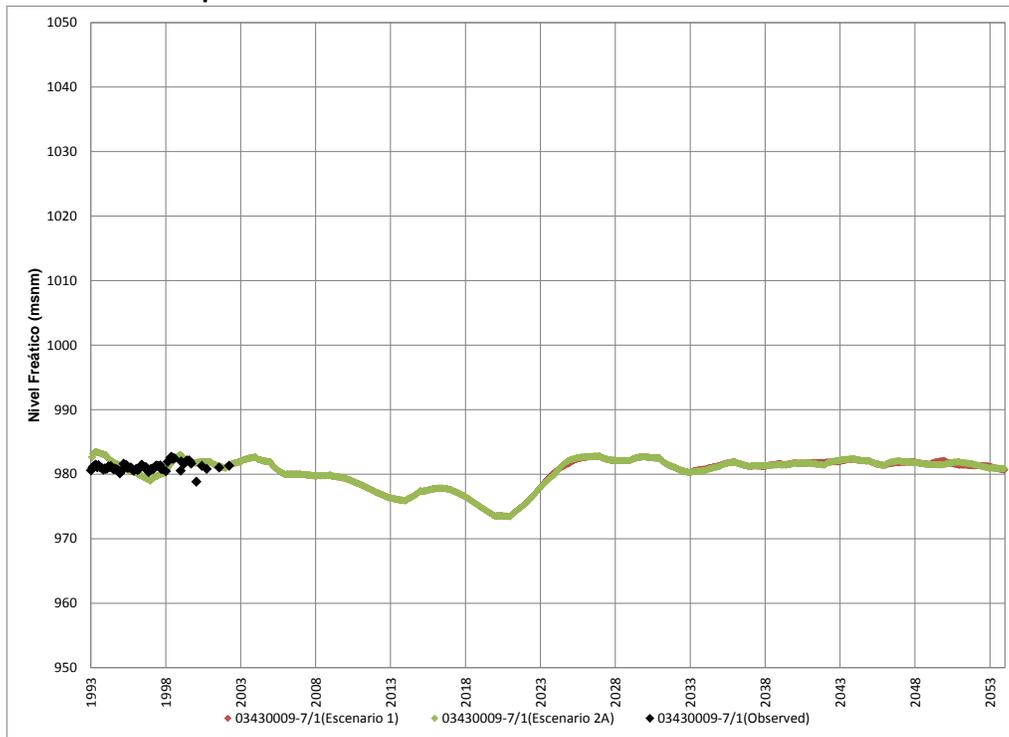
**Figura 6.26**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 1**



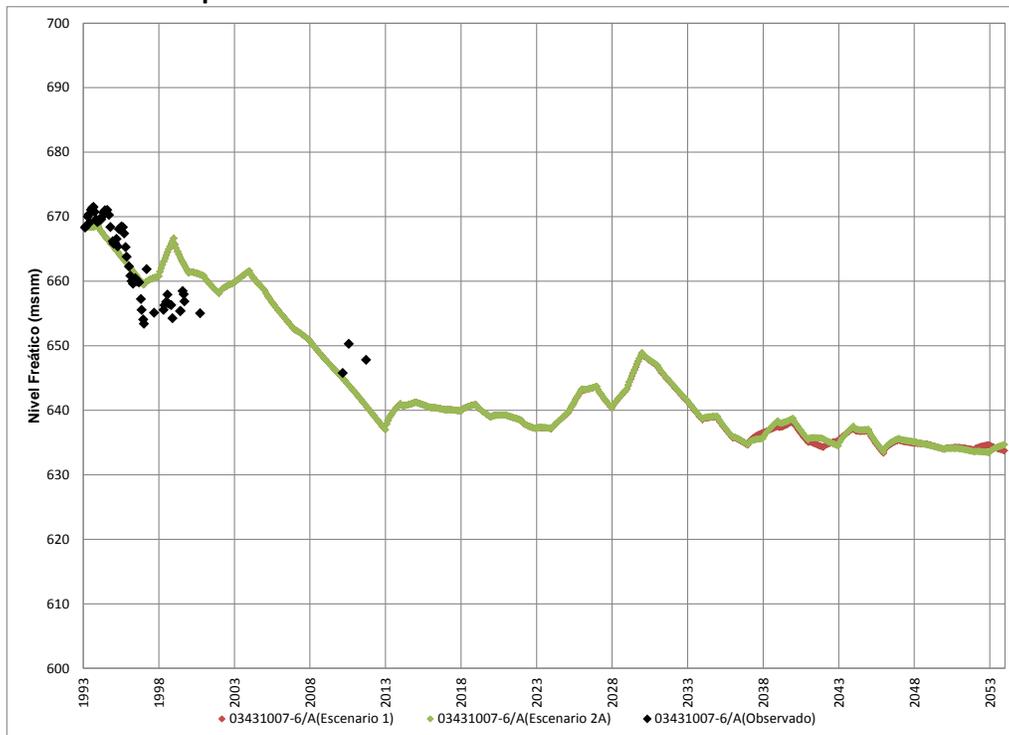
**Figura 6.27**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 2**



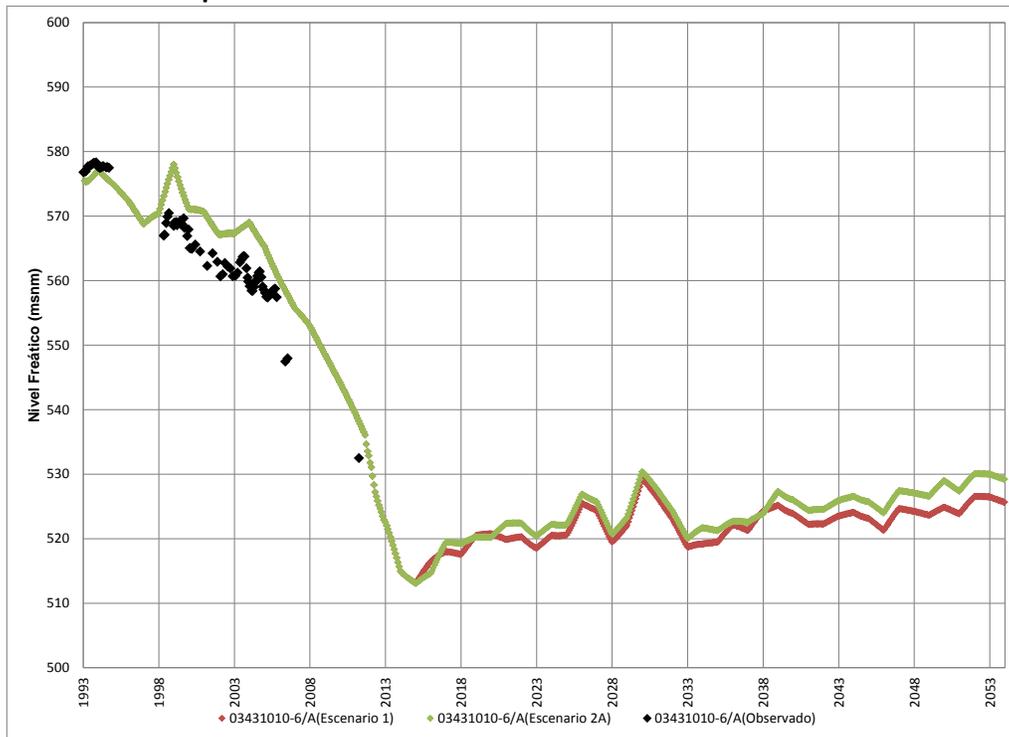
**Figura 6.28**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 2**



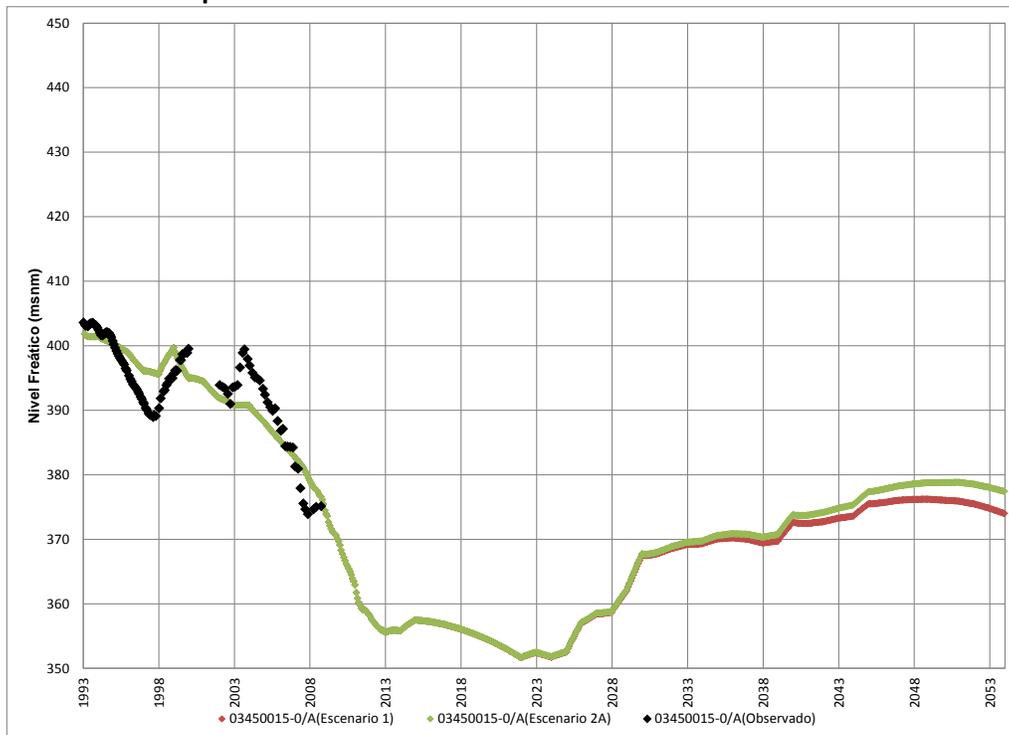
**Figura 6.29**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 3**



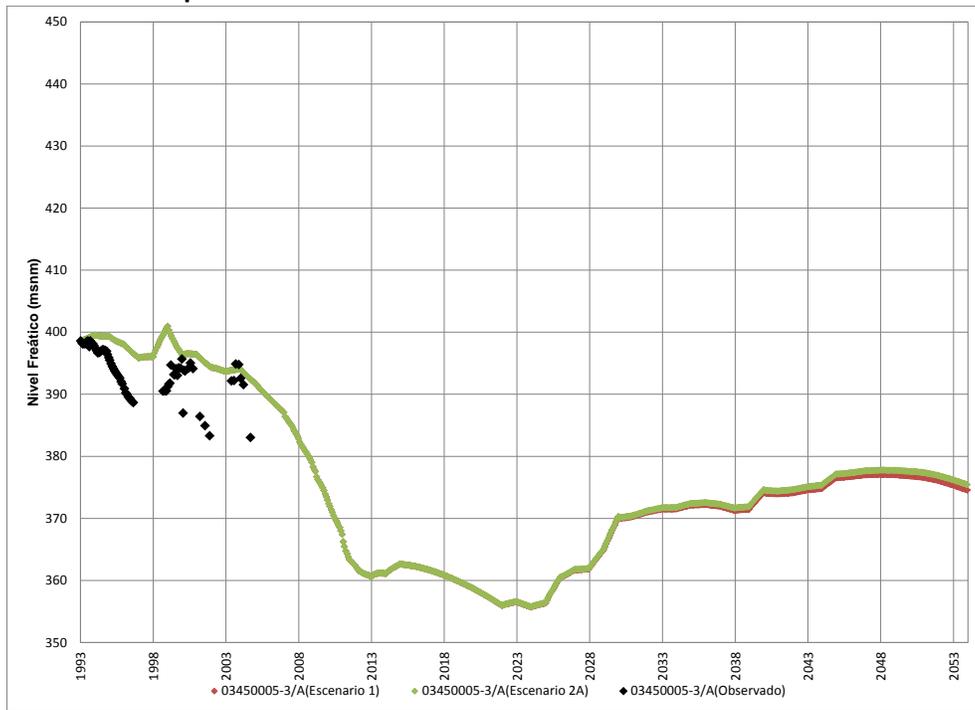
**Figura 6.30**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 3**



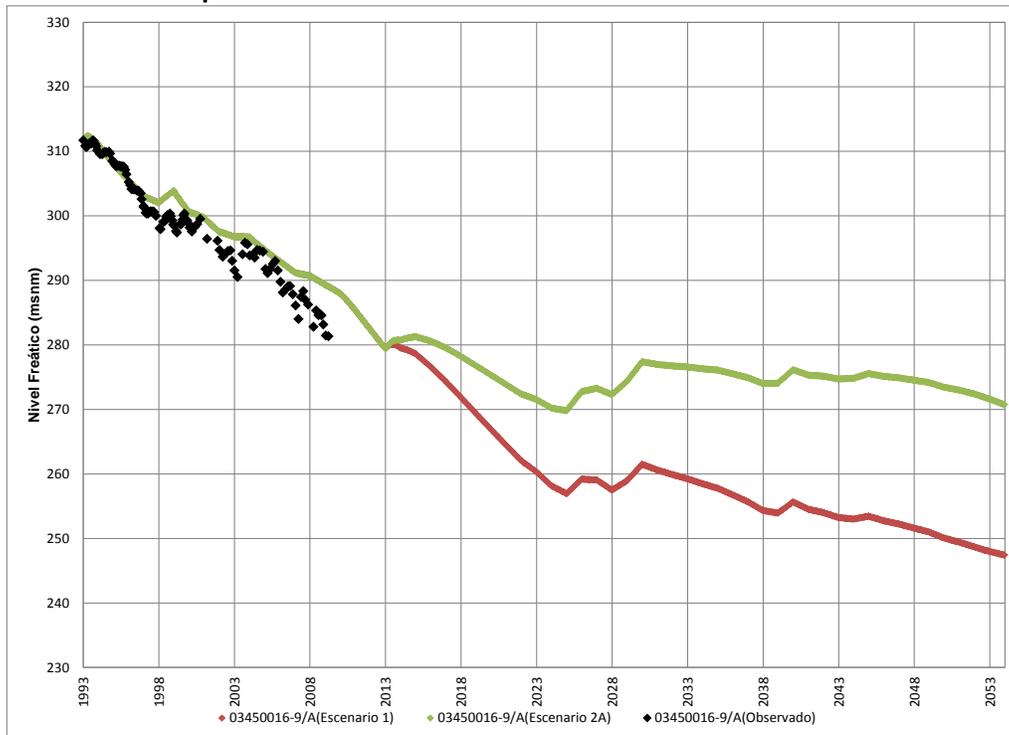
**Figura 6.31**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 4**



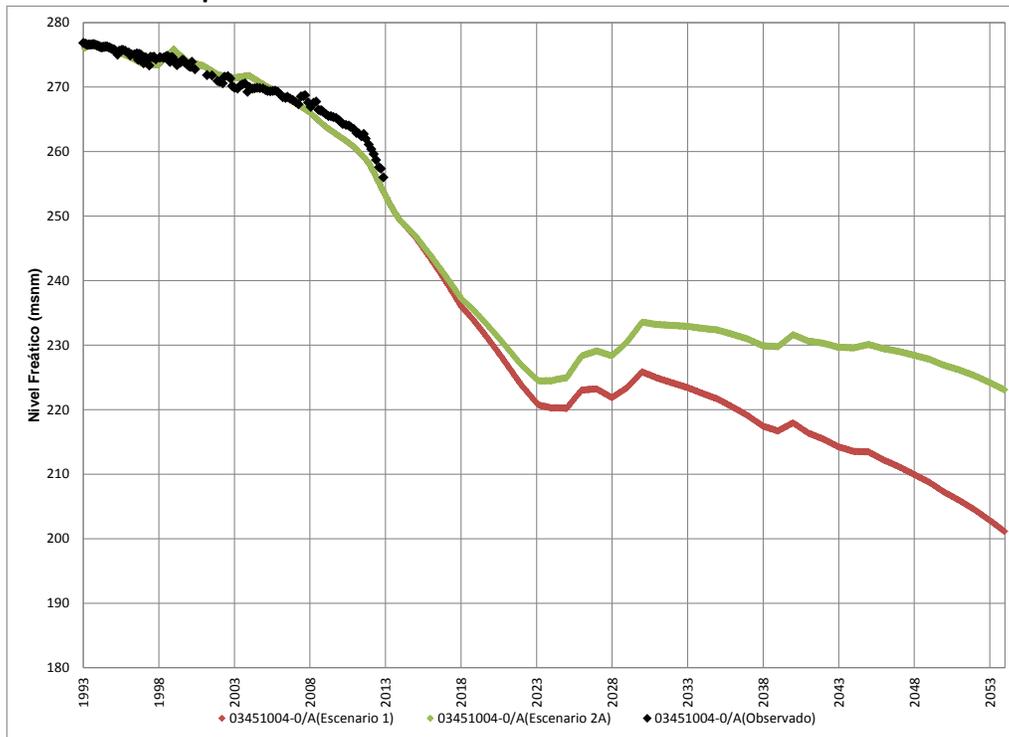
**Figura 6.32**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 4**



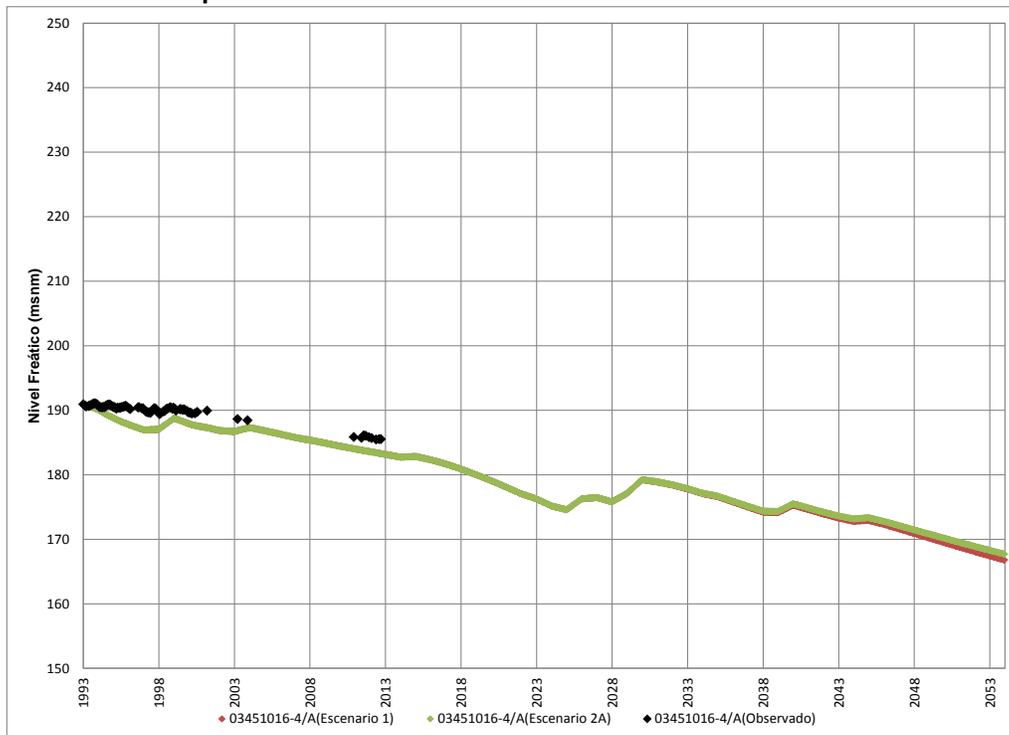
**Figura 6.33**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 5**



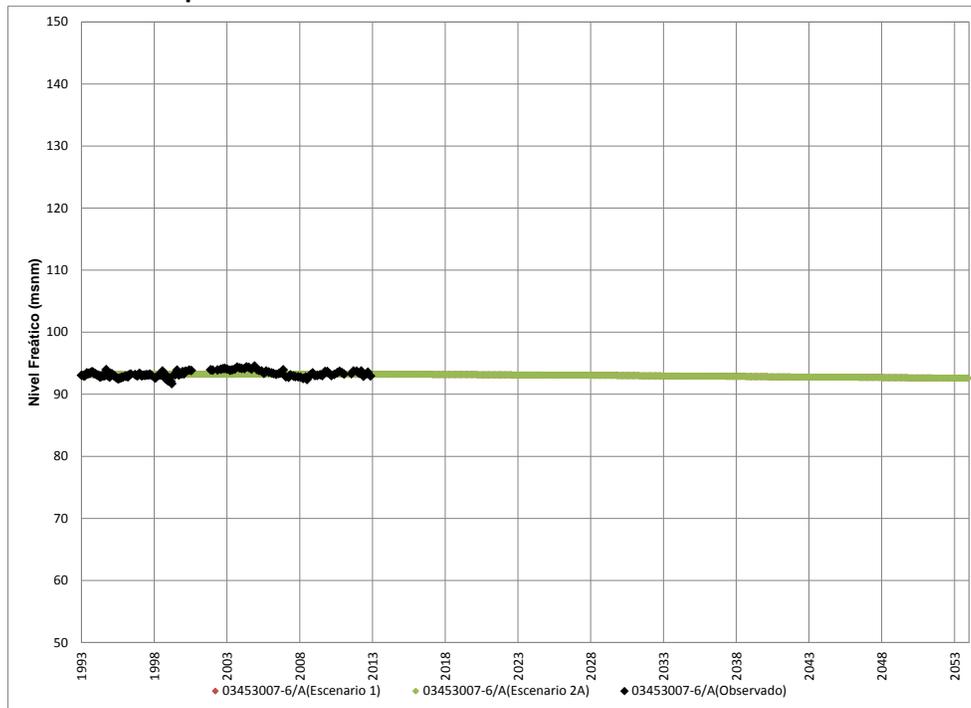
**Figura 6.34**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 5**



**Figura 6.35**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 6**



**Figura 6.36**  
**Comparación de Nivel Escenario 2A – Escenario 1 en Sector 6**



### 6.3.2.2 Escenario 2B

A continuación se presentan los principales resultados de la implementación del escenario 2B en el modelo AQUATOOL. La Tabla 6.19 a la Tabla 6.22 muestran los estadísticos de caudal de probabilidad 10%, 50% y 85% para las estaciones superficiales de Copiapó en Pastillo, Copiapó en La Puerta, Copiapó en Ciudad y Copiapó en Angostura y las diferencias respecto del Escenario 1. No se aprecia un mayor efecto en los caudales superficiales.

**Tabla 6.19**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Pastillo, Escenario 2B**

Escenario 2B												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	8,66	7,86	5,99	4,42	4,03	3,87	3,81	3,69	2,77	3,69	5,78	9,65
50%	1,86	1,57	1,36	1,77	1,91	1,85	1,99	1,70	1,17	1,06	0,73	1,01
85%	0,76	0,76	0,87	1,01	1,19	1,23	1,21	0,95	0,75	0,63	0,36	0,48
Diferencia Escenario 2B respecto a Escenario 1												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla 6.20**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en La Puerta, Escenario 2B**

Escenario 2B												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	6,50	5,78	4,08	4,10	3,77	3,71	3,76	3,20	1,61	2,43	3,68	7,35
50%	1,82	1,76	1,80	1,34	1,35	1,35	1,35	1,00	0,93	1,65	1,76	1,82
85%	1,27	1,28	1,29	0,60	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	1,33	1,35	1,34
Diferencia Escenario 2B respecto a Escenario 1												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	-0,01	0,00
85%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00

**Tabla 6.21**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Ciudad, Escenario 2B**

Escenario 2B												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	1,99	1,85	1,39	1,77	1,64	1,63	1,64	1,14	0,18	0,61	0,67	2,53
50%	0,31	0,30	0,14	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,26	0,33	0,35
85%	0,12	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,12	0,12
Diferencia Escenario 2B respecto a Escenario 1												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
85%	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla 6.22**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Angostura, Escenario 2B**

Escenario 2B												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,02	0,02	0,08	0,11	0,12	0,14	0,14	0,12	0,09	0,06	0,03	0,28
50%	0,02	0,02	0,07	0,11	0,12	0,14	0,13	0,12	0,09	0,05	0,03	0,02
85%	0,01	0,01	0,07	0,10	0,12	0,13	0,13	0,11	0,09	0,05	0,02	0,01
Diferencia Escenario 2B respecto a Escenario 1												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

La Tabla 6.23 muestra la demanda total anual impuesta a AQUATOOL para riego, minería, agua potable e industria. En la misma tabla se muestra información de los porcentajes de satisfacción de la demanda por cada zona de demanda impuesta al modelo. Con estos resultados, se muestra la demanda media anual satisfecha.

**Tabla 6.23**  
**Satisfacción Demanda Media 2013-2053. Escenario 2B**

Uso	Sector	Demanda Anual Hm <sup>3</sup>	Satisfacción Demanda (%)			Demanda Anual m <sup>3</sup> /s	Demanda Satisfecha m <sup>3</sup> /s
			Mín	Medio	Máx		
Riego	R1a-01	4,899	59	99	100	5,07	4,47
	R1b-02	4,231	98	100	100		
	R1c-03	4,622	94	100	100		
	R1d-04	6,009	100	100	100		
	R2a-05	20,930	43	85	100		
	R2a-06	6,698	39	84	100		
	R2a-07	6,128	39	82	100		
	R3a-08	1,045	19	74	100		
	R3a-09	10,181	19	74	100		
	R3a-10	8,833	19	72	100		
	R3a-11	1,366	19	72	100		
	R3b-12	10,771	19	68	100		
	R3b-13	13,492	19	69	100		
	R4a-14	2,332	100	100	100		
	R4a-15	4,187	100	100	100		
	R4a-16	16,596	100	100	100		
	R5a-17	14,711	100	100	100		
	R5a-18	8,637	100	100	100		
	R6a-19	11,038	100	100	100		
	R6b-20	3,230	100	100	100		
Agua Potable	Sector 2a	0,688	50	87	100	0,67	0,66
	Sector 4a	0,732	100	100	100		
	Sector 5a	13,395	100	100	100		
	Sector 6a	6,155	100	100	100		
Minería	Sector 1b	0,694	100	100	100	0,65	0,63
	Sector 3b	3,498	25	78	100		
	Sector 4a	14,290	100	100	100		
	Sector 5a	1,999	100	100	100		
Industria	Sector 2a	0,517	50	87	100	0,03	0,03
	Sector 5a	0,393	100	100	100		
<b>Total</b>		<b>202,3</b>				<b>6,41</b>	<b>5,79</b>

La Tabla 6.24 presenta la información del número de años, asociados a la simulación, que logra satisfacer rangos de porcentaje de la demanda agrícola. Para el acuífero del sector 1, se aprecia que durante los 41 años de simulación se satisface sobre el 85% de la demanda anual, y para los sectores 4, 5 y 6 los 41 años de simulación satisfacen el 100% de la demanda. Los sectores más deficitarios corresponden al sector 2 y sector 3, donde satisface sobre el 85% de la demanda agrícola apenas durante 20 años y 13 años, respectivamente.

**Tabla 6.24**  
**Número de Años que se satisface la demanda agrícola, Escenario 2B**

Satisfacción de la Demanda Agrícola	Número de Años					
	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06
100%	40	19	10	41	41	41
85% - 99%	1	2	3	0	0	0
60% - 85%	0	12	10	0	0	0
40% - 60%	0	8	12	0	0	0
0% - 40%	0	0	6	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>

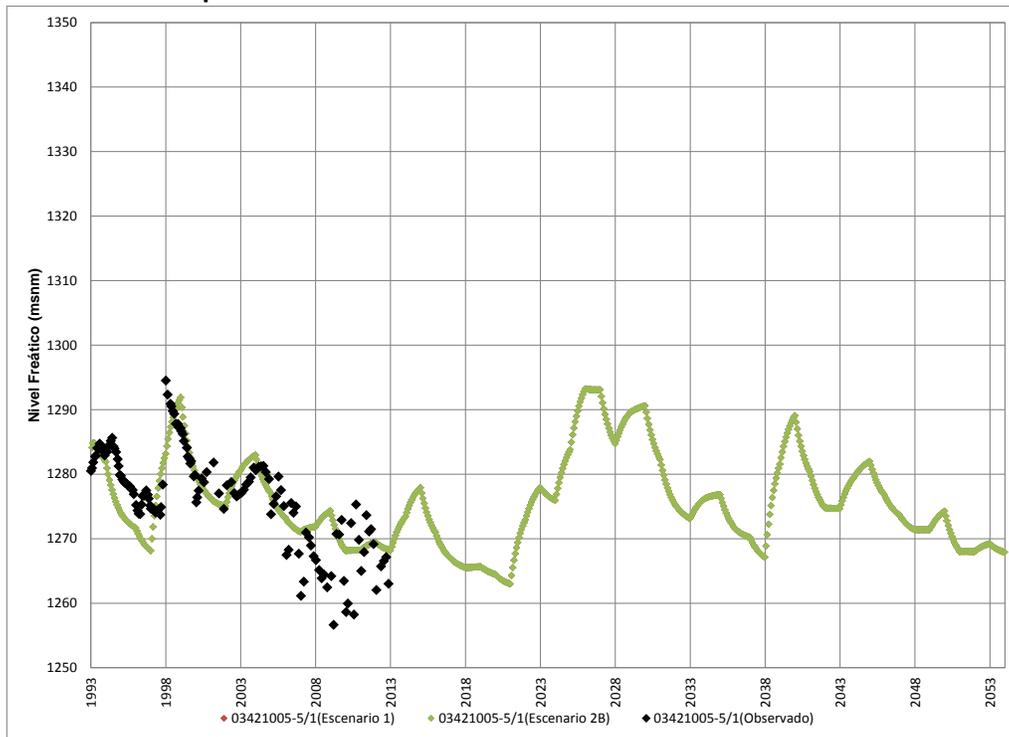
La Tabla 6.25 muestra las recargas medias anuales por sector acuífero, leídas desde AQUATOOL para ser ingresadas a Visual MODFLOW en el escenario 2B. Cabe resaltar, que en Sector 2 se ha sumado la infiltración del embalse Lautaro, en el Sector 4 se suma la recarga por pérdidas de la red de agua potable y en el Sector 5 se agrega la infiltración de la descarga de la planta de tratamiento de agua potable. En el escenario 2B se reduce la recarga en el acuífero del Sector 5 en un monto de 250 L/s, debido a que se considera que toda el agua de la descarga de la PTAS se trasvasa a proyectos de la minería, lo que implica asumir que el caudal de descarga en el río Copiapó es nulo.

**Tabla 6.25**  
**Caudal de Recarga Media en m<sup>3</sup>/s, generada desde AQUATOOL para Visual MODFLOW Escenario 2B**

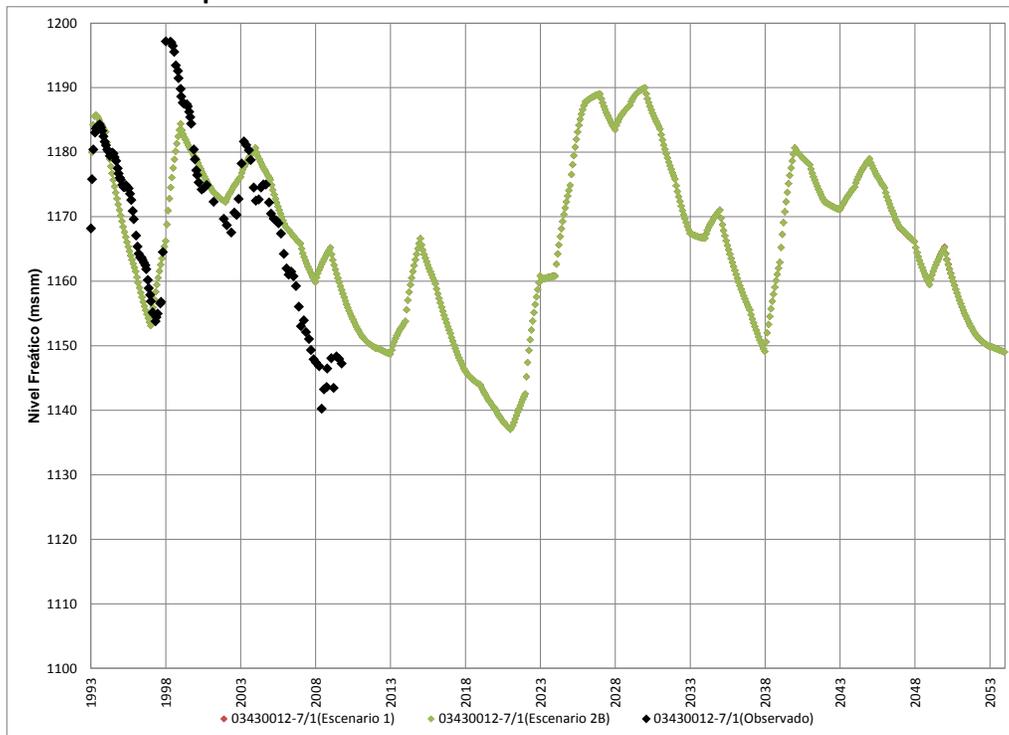
Escenario	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06	TOTAL
1	1,06	0,93	1,00	1,06	0,55	0,14	4,75
2B	1,06	0,93	1,00	1,06	0,30	0,14	4,50
<b>Diferencia</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,25</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,25</b>

La Figura 6.37 a Figura 6.49 muestra una comparación de los niveles de agua subterránea para la situación del escenario 2B respecto de los niveles del escenario 1, en que toda el agua de descarga de la planta de tratamiento se entrega a proyectos mineros. Se aprecia, en general, que no existen mayores diferencias en los niveles de agua subterránea, salvo en el Sector 5 del acuífero de Copiapó, en que se aprecia que al eliminar del sistema la condición de infiltración del agua de tratamiento al acuífero, genera localmente una condición desfavorable de los niveles en el Sector 5 del acuífero. Esta situación, se hace más notoria a partir del año 2023, periodo en el que dejan de operar los pozos de bombeo de agua potable en el Sector 5 y entra en operación la planta desaladora.

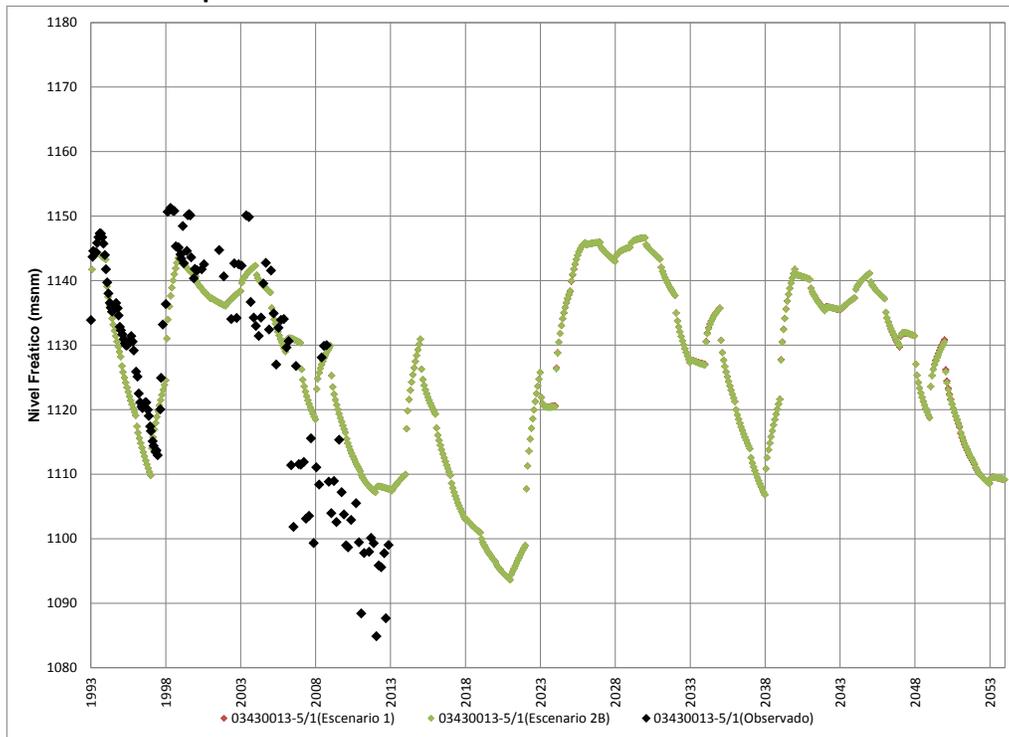
**Figura 6.37**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 1**



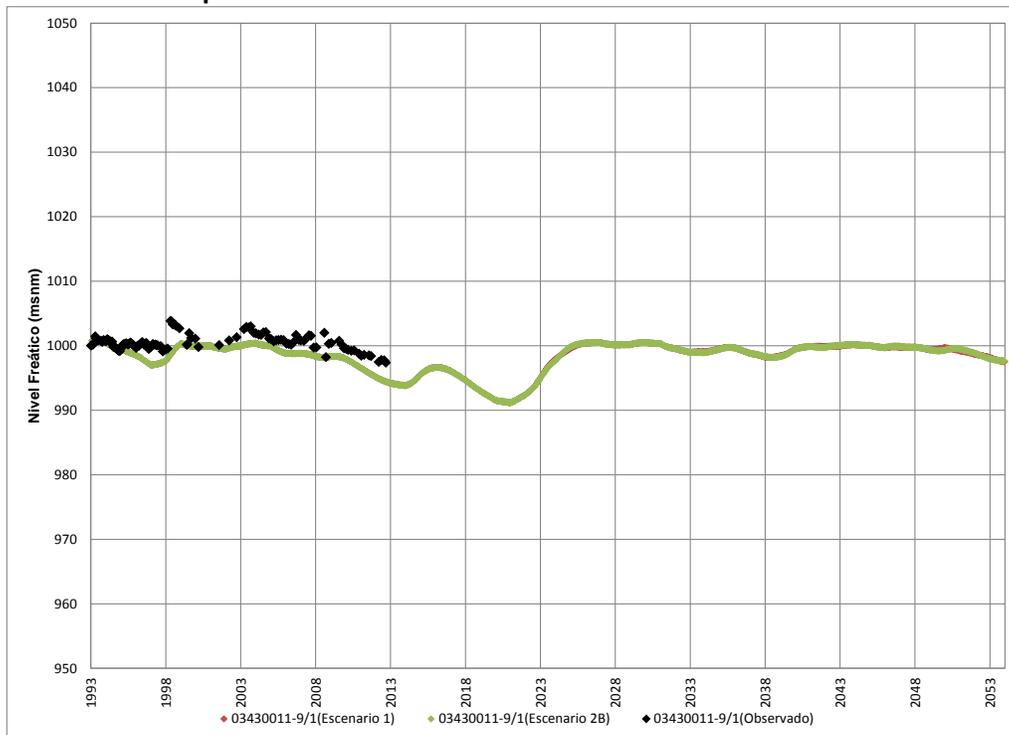
**Figura 6.38**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 1**



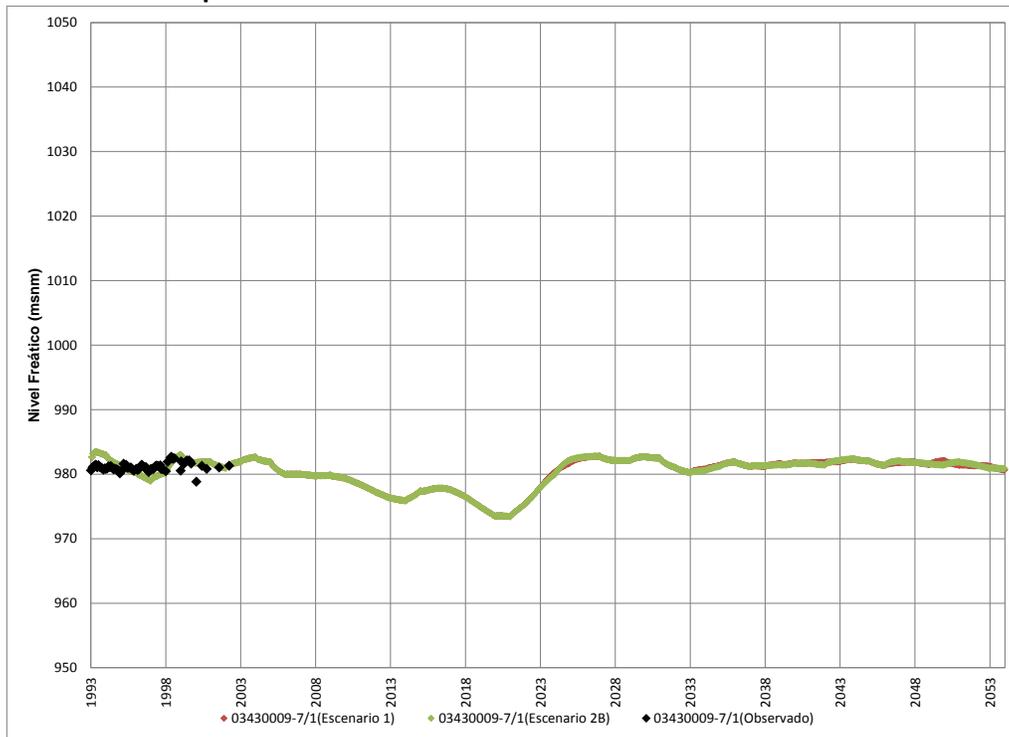
**Figura 6.39**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 1**



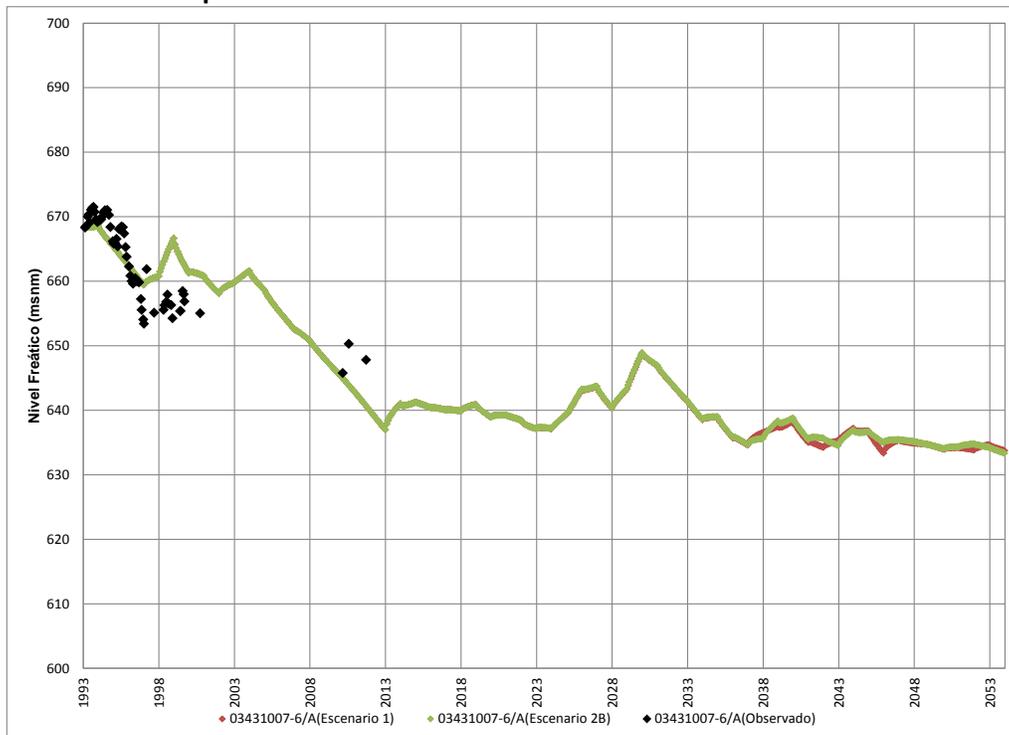
**Figura 6.40**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 2**



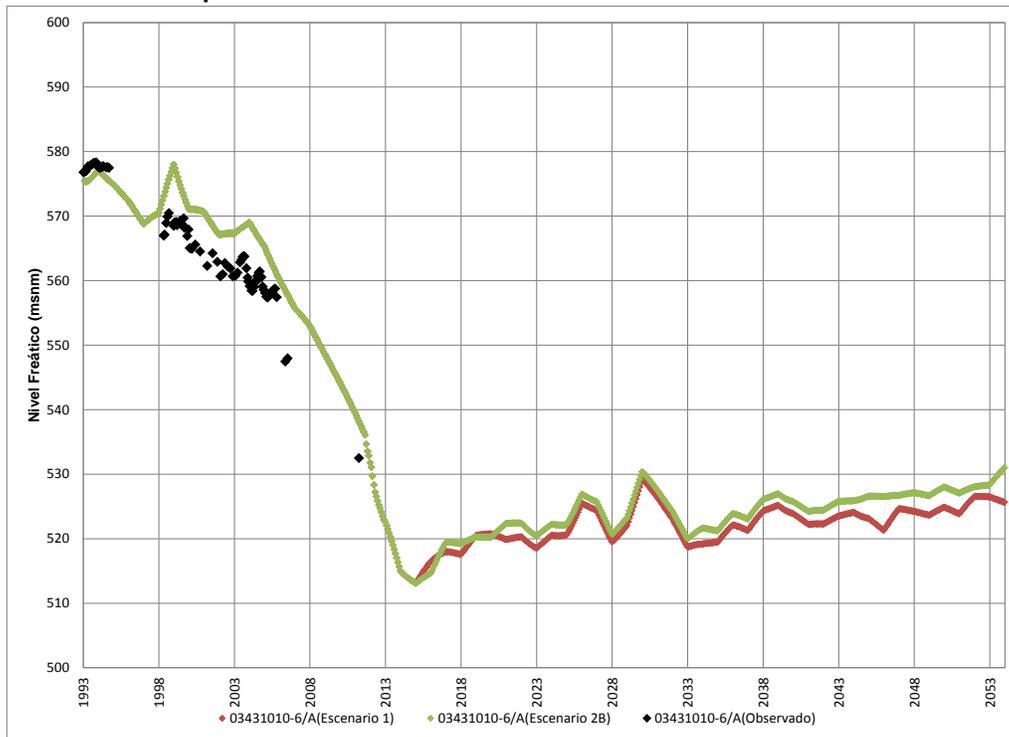
**Figura 6.41**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 2**



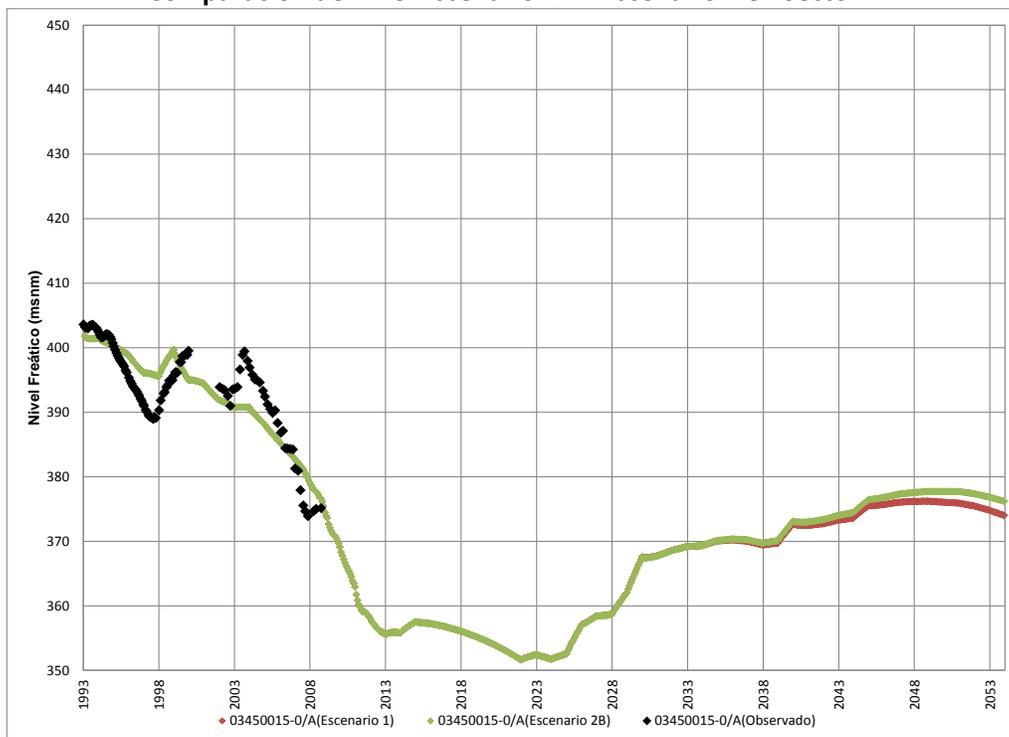
**Figura 6.42**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 3**



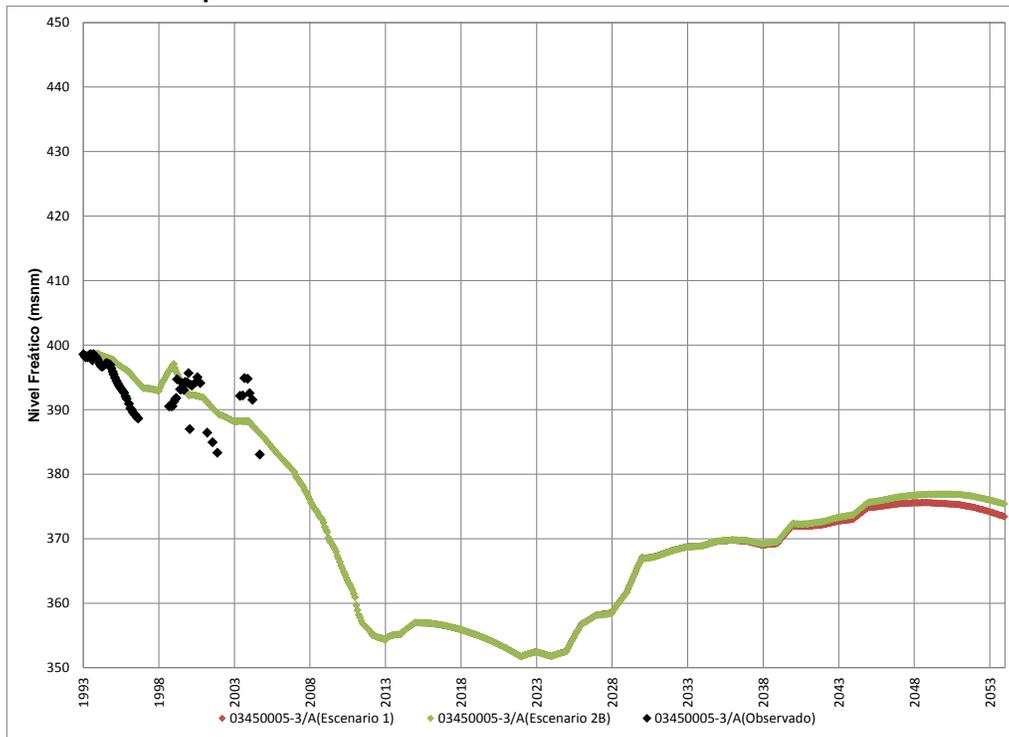
**Figura 6.43**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 3**



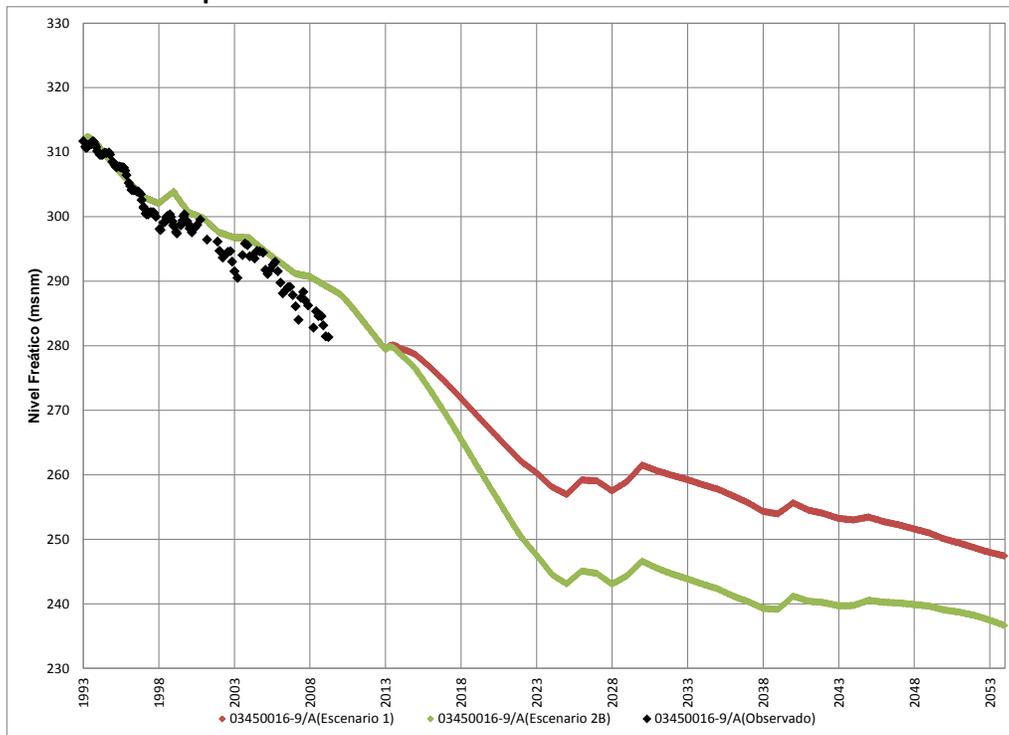
**Figura 6.44**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 4**



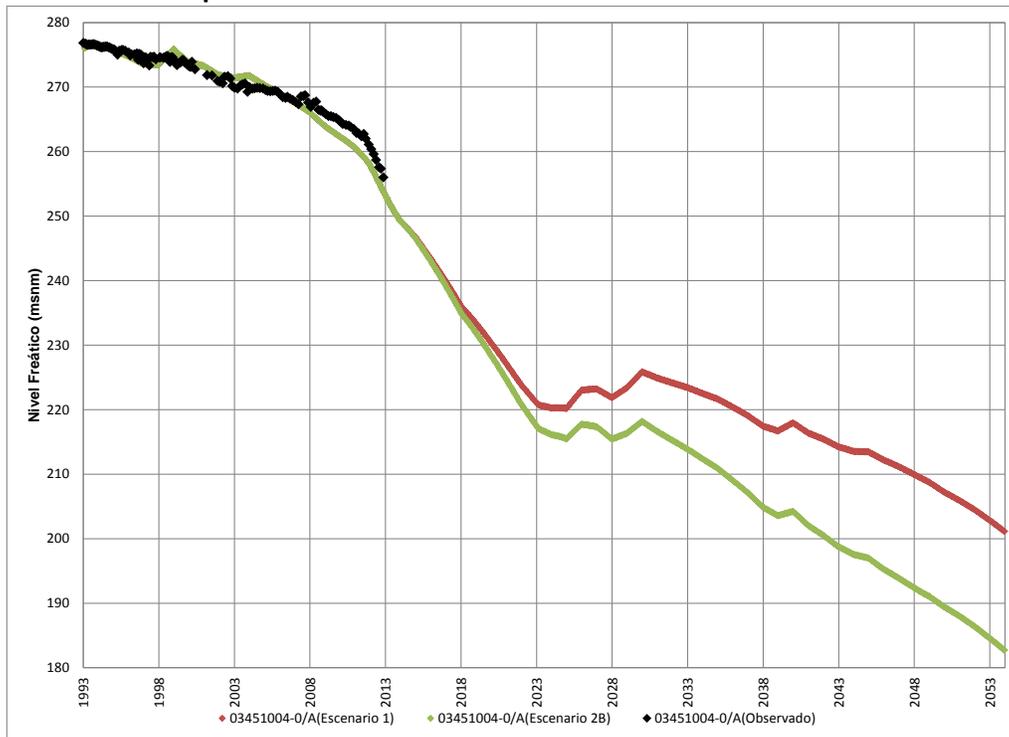
**Figura 6.45**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 4**



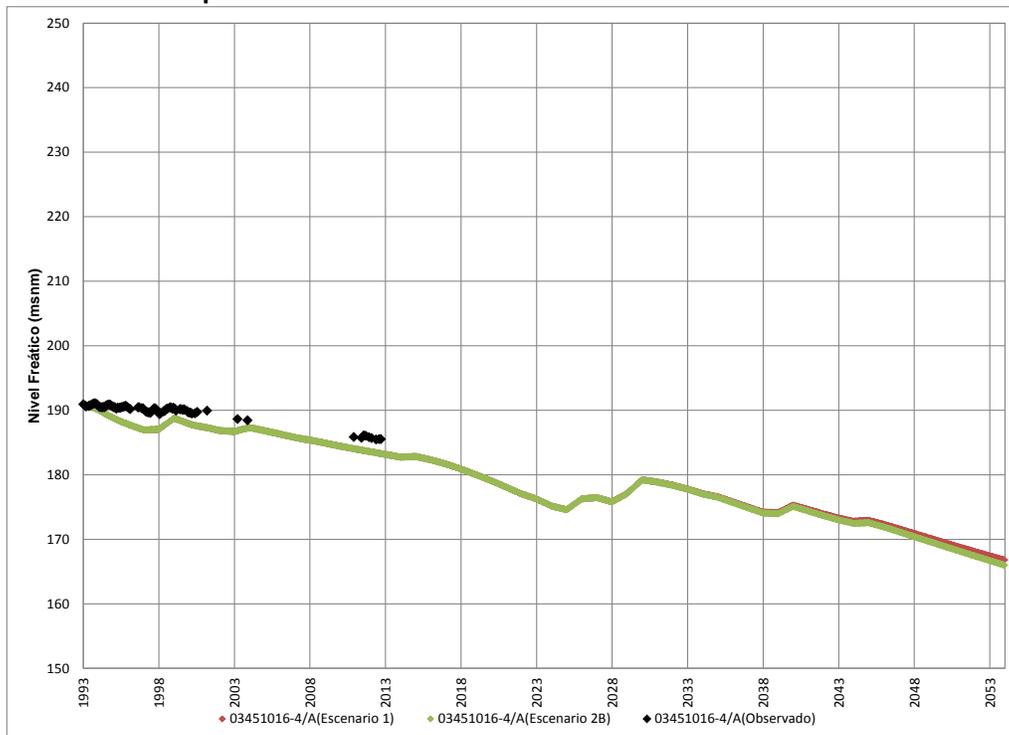
**Figura 6.46**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 5**



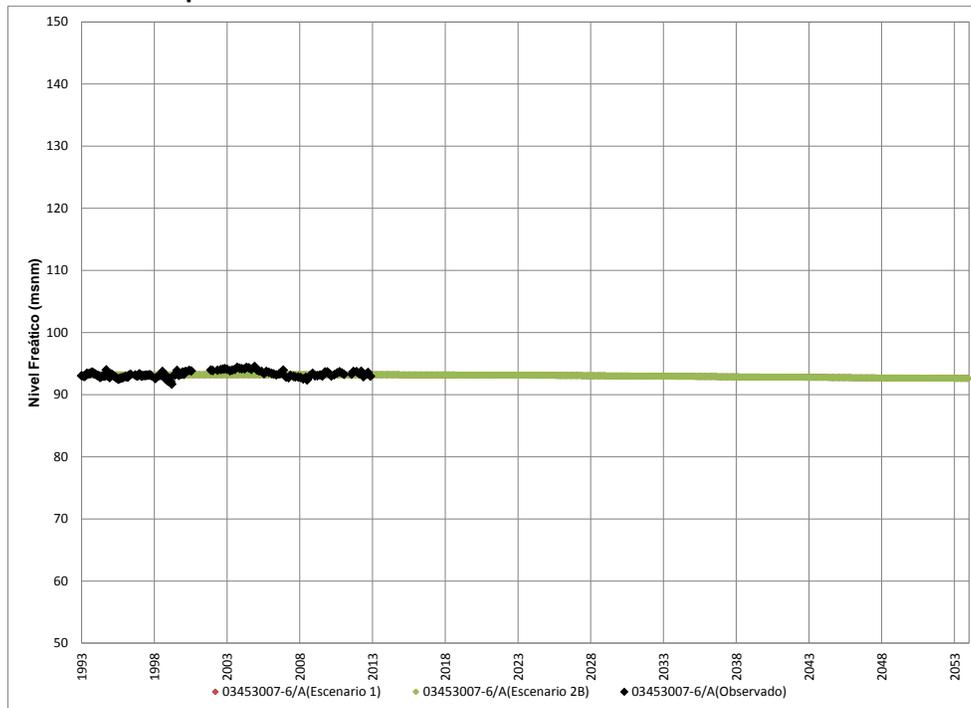
**Figura 6.47**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 5**



**Figura 6.48**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 6**



**Figura 6.49**  
**Comparación de Nivel Escenario 2B – Escenario 1 en Sector 6**



### 6.3.3 Análisis de Resultados

Los principales resultados obtenidos desde el acople de los modelos AQUATOOL y Visual MODFLOW para el Escenario 2 se describen a continuación:

- Se ha analizado el efecto de la descarga de la planta de tratamiento de agua potable en el Sector 5. Se han implementado dos escenarios considerando el supuesto de que toda el agua tratada se descarga al río Copiapó e infiltra en el acuífero o toda el agua se traslada por acueductos a proyectos mineros generando nula recarga por infiltración.
- El análisis de satisfacción de la demanda de acuerdo al modelo AQUATOOL no cambia mayormente, siendo las demandas satisfechas muy parecidas a la condición del escenario 1.
- Del análisis de la recarga se genera un aumento de 180 L/s promedio de recarga en el Sector 5 para el escenario 2A y una disminución de 250 L/s promedio para el escenario 2B, en comparación a la recarga media del Escenario 1.
- La situación general de los niveles de agua subterránea no es muy diferente a la proyectada en el Escenario 1, salvo en el acuífero 5 donde se proyecta un aumento potencial de los niveles para el Escenario 2A y una disminución sustancial de éstos en el Escenario 2B.
- En el caso del Escenario 2B, la explotación de los pozos de agua potable de Piedra Colgada y proyectados del Sector 6 aumentaría el efecto de disminución sostenida de los niveles en el Sector 5. Se espera leves recuperaciones una vez que los pozos de agua potable dejen de operar por el intercambio de fuente a una planta desalinizadora.
- No se proyectan impactos a la salida del sistema, ya sea superficial en la estación Copiapó en Angostura y/o niveles de agua subterránea.
- Se concluye que el impacto de la medida de la venta de aguas tratadas por parte de la sanitaria generaría un perjuicio local sobre los niveles de agua subterránea en el Sector 5.

## 6.4 Escenario 3: Efecto del Proyecto Caserones en el Acuífero de Copiapó

### 6.4.1 Descripción General

Este escenario tiene por finalidad analizar el potencial efecto de la operación del proyecto minero de Caserones, localizado en la cuenca del río Pulido, usando como base el Escenario 1.

De acuerdo a la RCA del proyecto Caserones, se establece en la Adenda 3, anexo 26, una modelación “con el objetivo analizar el efecto de las extracciones subterráneas requeridas para el desarrollo del proyecto caserones sobre el caudal superficial en el sector La Puerta frente a un nuevo ritmo de operación en los pozos de bombeo y además, con el objetivo de estimar el comportamiento de los descensos en pozos de observación ubicados a lo largo del sector modelado”.

Los supuestos de esta modelación son los siguientes:

- Los pozos pertenecientes a MLCC y que se encuentran en uso agrícola en la condición natural, una vez finalizado el proyecto no retoman el uso agrícola como en las modelaciones previas, sino que se consideran sin extracción durante todo el período de modelación post-proyecto (año 29 en adelante).
- Los pozos ex –agrícolas poseen una extracción media anual de 190 l/s como total.
- Se utilizó un nuevo ritmo de explotación de los pozos según se indica en la Tabla 6.26.

**Tabla 6.26**  
**Caudales de Bombeo Modelados para Uso de Agua en el Proyecto Caserones**

Pozo	Este	Norte	Período (días) 0-365	Período (días) 365-730	Período (días) 730-1095	Período (días) 1095-1460	Período (días) 1460-11315
WP-01	437257	6886990	0	0	0	-20	-34
WP-02	425955	6889597	0	0	0	-18	-18
WP-03	423171	6885993	0	0	0	-16	-16
WP-04	422851	6885711	0	0	0	-16	-16
CCH1	411523	6886995	-11	-40	-50	-12	-12
WP-05	407532	6898533	0	0	0	-68	-68
PPO-1	401009	6907193	0	0	0	0	-52
PPR-1	400828	6907669	0	0	0	0	-16
PDB-1	40123	6908510	0	0	0	0	-85
PEL1	40056	6909531	0	0	0	0	-51
PER2	398424	6913174	0	0	0	0	-47
PAF-1	397184	6915661	0	0	0	0	-21
PNI-1	393100	6918832	0	0	0	0	-21
RE2	389939	6921531	0	0	0	0	-31
RE3	390023	6921546	0	0	0	0	-30
<b>TOTAL</b>			<b>-11</b>	<b>-40</b>	<b>-50</b>	<b>-150</b>	<b>-518</b>

FUENTE: RCA Caserones

De acuerdo a la RCA, el resultado de la modelación indica que en los primeros cinco años del proyecto se produce un incremento en los caudales superficiales en el sector La Puerta, dado que se suspende el uso

de pozos que estaban en uso agrícola. En la segunda parte (desde el año 5 al año 31) se observa un efecto de disminución del caudal superficial en La Puerta que alcanza los 320 l/s. Finalmente, luego del año 31, se tiene una recuperación hasta alcanzar un caudal de 145 l/s por sobre el escenario natural, sin proyecto.

De acuerdo a estos antecedentes, se definen los siguientes supuestos para la implementación de este escenario:

- Para considerar el efecto de reducción del uso agrícola, debido a la adquisición de Caserones de derechos de agua subterránea por 1.095 L/s, principalmente en los Sectores Acuíferos 1 y 2, se considerará una disminución de la demanda agrícola por un valor equivalente a 190 l/s como promedio anual en el modelo AQUATOOL, lo que se verá reflejado en una disminución de los caudales de bombeo agrícolas en el modelo Visual MODFLOW Sector Alto.
- De acuerdo a la información de posición de los pozos del proyecto, los pozos WP-01, WP-02, WP-03, WP-04 se encuentran fuera del dominio de la modelación, aguas arriba del relleno sedimentario considerado para el acuífero del río Pulido. Para lo anterior, se procederá a descontar el volumen de explotación requerido por estos pozos desde el aporte superficial de cabecera del río Pulido.
- El resto de los pozos considerados como parte de la explotación proyecto Caserones, localizados en el sector 1 y 2, será implementado como pozos de bombeo con el caudal definido en la RCA.

La Tabla 6.27 muestra los caudales de explotación por año para el proyecto minero Caserones, en tanto la Figura 6.50, Figura 6.51 y Figura 6.52 muestra la ubicación de estos pozos en los sectores administrativos 1 y 2 de la DGA.

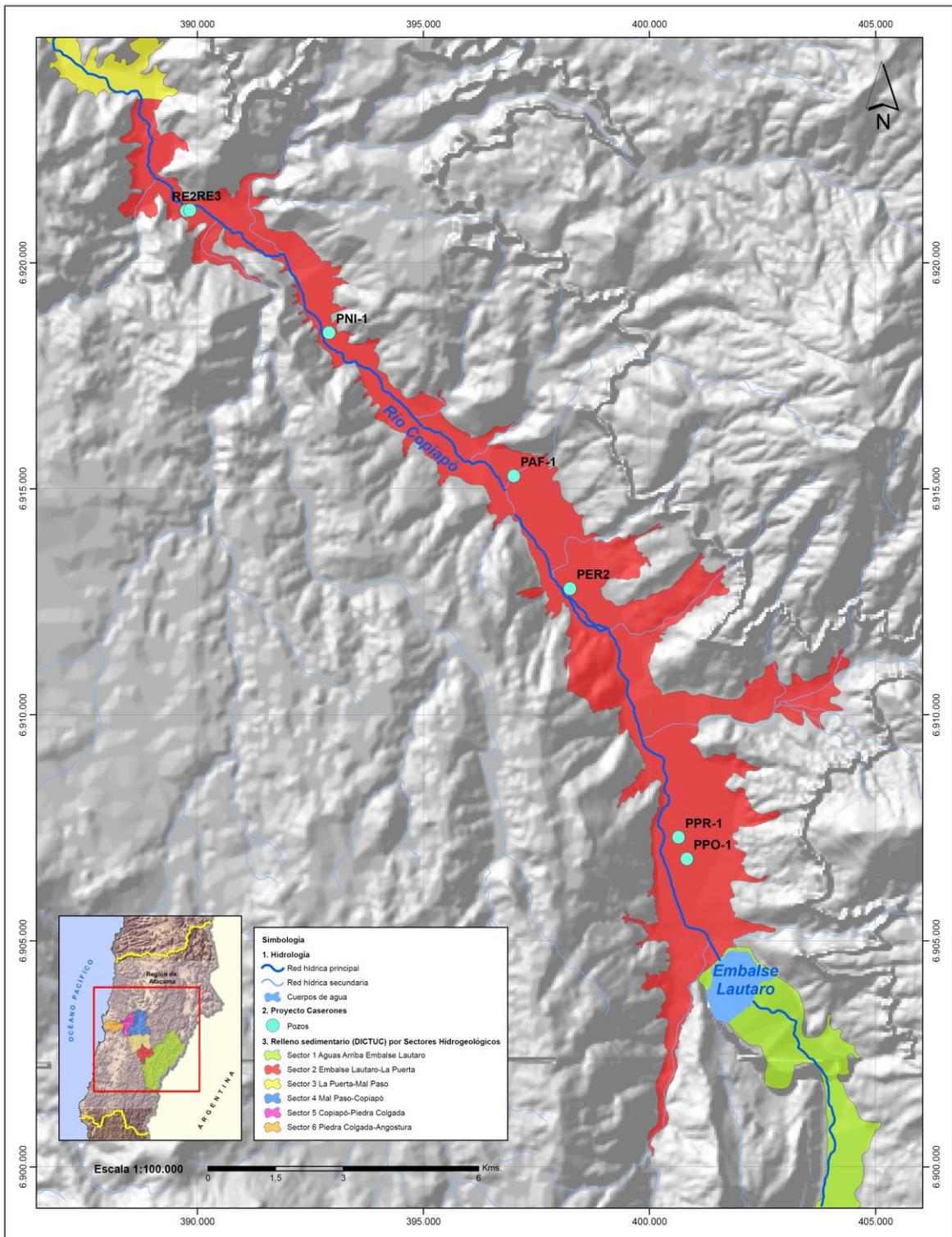
Tabla 6.27

Caudales de Producción del Proyecto Caserones en los Sectores 1 y 2 del Acuífero de Copiapó, inferidos de la RCA del proyecto

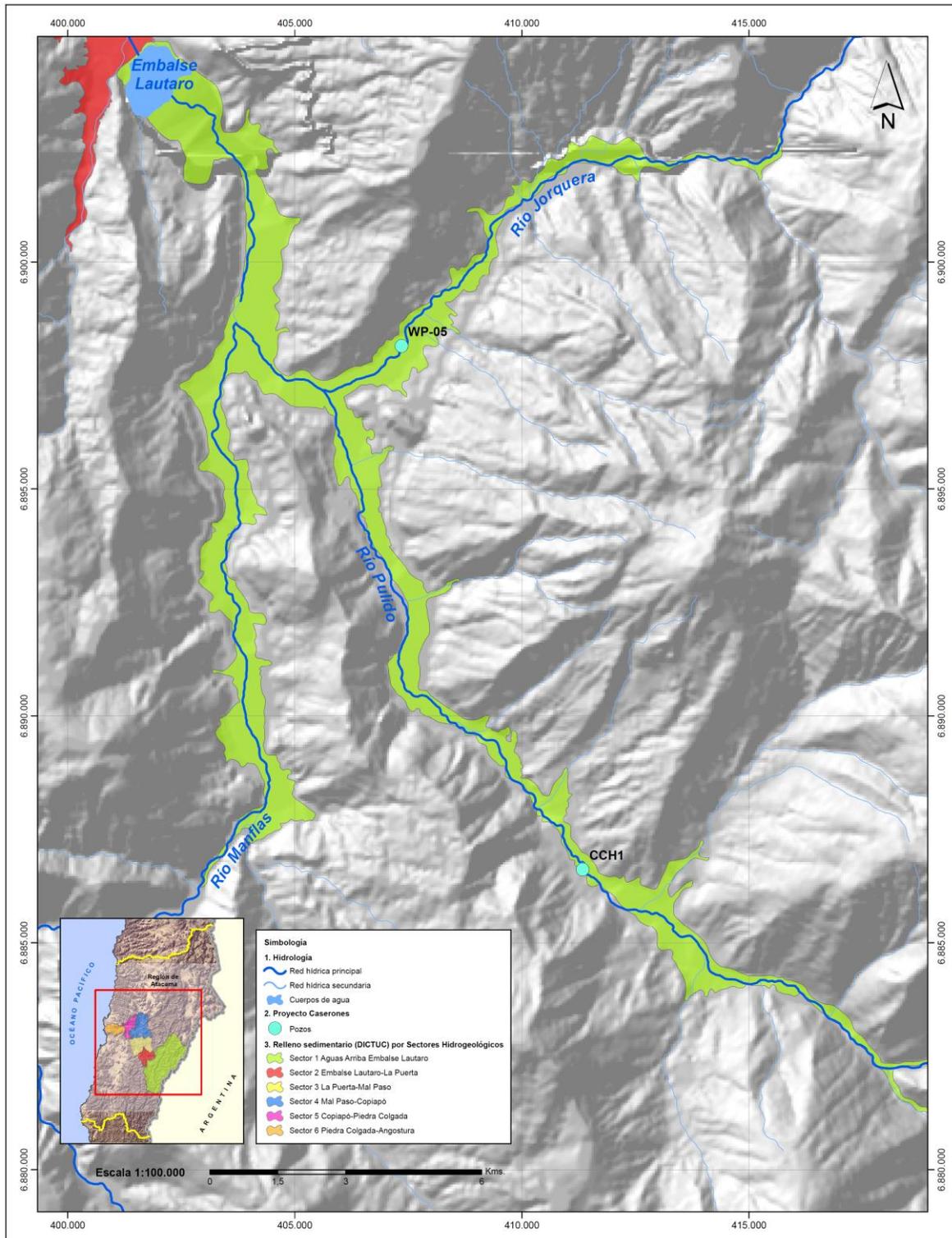
Año	Caudales de Extracción Proyecto Caserones(L/s)															
	WP-01	WP-02	WP-03	WP-04	CCH1	WP-05	PPO-1	PPR-1	PDB-1	PEL1	PER2	PAF-1	PNI-1	RE2	RE3	TOTAL
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
2015	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40
2016	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
2017	20	18	16	16	12	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
2018	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2019	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2020	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2021	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2022	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2023	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2024	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2025	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2026	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2027	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2028	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2029	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2030	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2031	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2032	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2033	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2034	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2035	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2036	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2037	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518

Año	Caudales de Extracción Proyecto Caserones(L/s)															
	WP-01	WP-02	WP-03	WP-04	CCH1	WP-05	PPO-1	PPR-1	PDB-1	PEL1	PER2	PAF-1	PNI-1	RE2	RE3	TOTAL
2038	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2039	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2040	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2041	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2042	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2043	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2044	34	18	16	16	12	68	52	16	85	51	47	21	21	31	30	518
2045	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2047	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2049	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2051	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2052	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2053	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

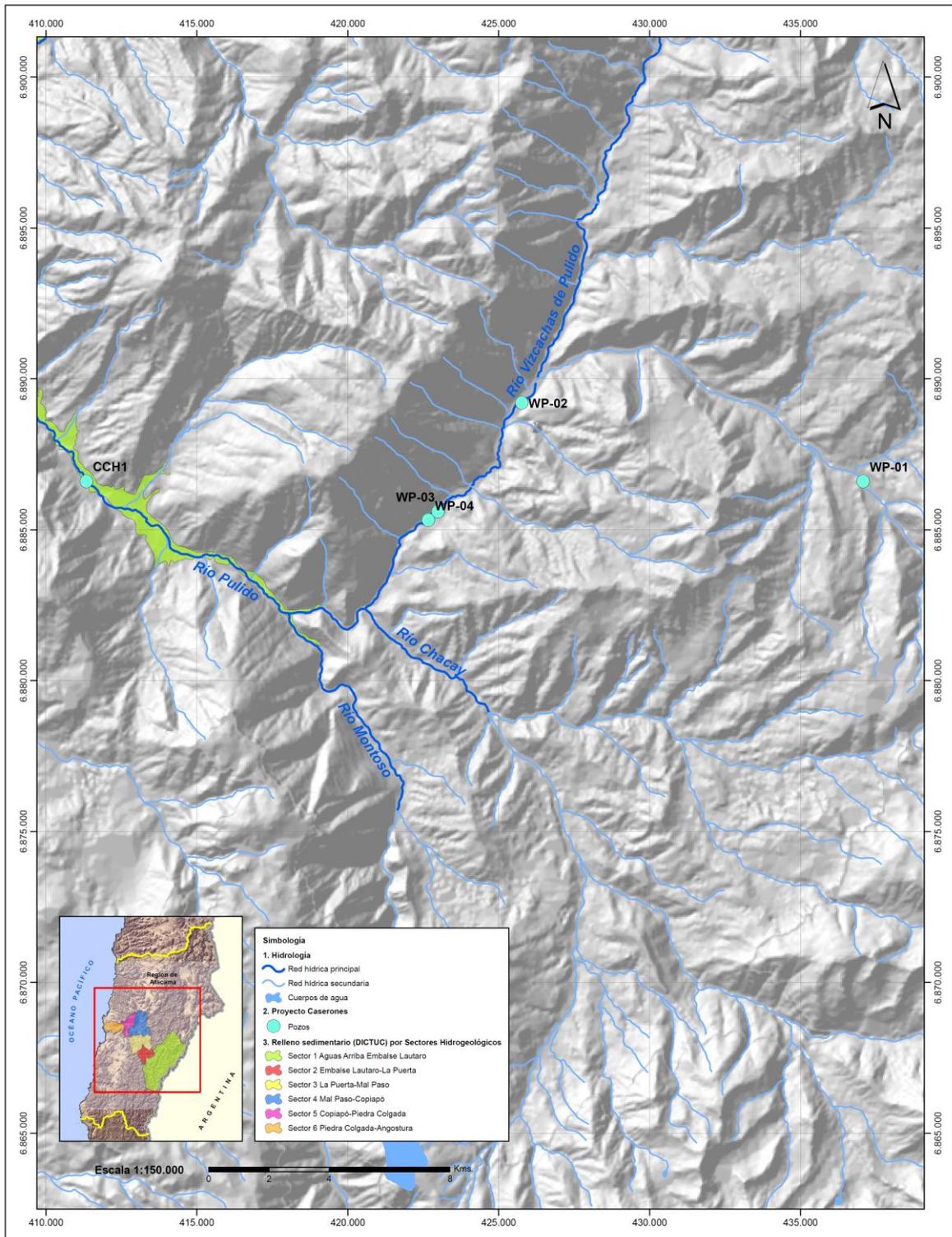
**Figura 6.50**  
**Ubicación de los pozos del proyecto Caserones en Sector 2**



**Figura 6.51**  
**Ubicación de los pozos del proyecto Caserones en Sector 1**



**Figura 6.52**  
**Ubicación de los pozos del proyecto Caserones Sector 1 (Aguas arriba de río Pulido)**



### 6.4.2 Principales resultados

A continuación se presentan los principales resultados de la implementación del Escenario 3 en el modelo AQUATOOL. La Tabla 6.28 a Tabla 6.31 muestran los estadísticos de caudal de probabilidad 10%, 50% y 85% para las estaciones superficiales de Copiapó en Pastillo, Copiapó en La Puerta, Copiapó en Ciudad y Copiapó en Angostura y las diferencias respecto del Escenario 1.

Los mayores efectos se pueden apreciar en la estación Copiapó en La Puerta, en que los caudales superficiales disminuyen entre 160 y 320 L/s para la situación de 85% de probabilidad de excedencia. En la estación Copiapó en Angostura, el efecto del proyecto Caserones es prácticamente despreciable, y nulo para los años de probabilidad de excedencia del 50% y 85%, que corresponden a la condición más crítica.

**Tabla 6.28**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Pastillo, Escenario 3**

Escenario 3												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	8,68	7,88	5,93	4,36	3,96	3,80	3,73	3,63	2,72	3,64	5,74	9,62
50%	1,82	1,53	1,30	1,77	1,84	1,85	1,91	1,64	1,19	1,02	0,72	1,05
85%	0,78	0,75	0,82	0,95	1,13	1,16	1,18	0,89	0,72	0,62	0,38	0,47
Diferencia Escenario 3 respecto a Escenario 1												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,02	0,02	-0,06	-0,06	-0,07	-0,07	-0,08	-0,06	-0,05	-0,05	-0,04	-0,03
50%	-0,04	-0,04	-0,06	0,00	-0,07	0,00	-0,08	-0,06	0,02	-0,04	-0,01	0,04
85%	0,02	-0,01	-0,05	-0,06	-0,06	-0,07	-0,03	-0,06	-0,03	-0,01	0,02	-0,01

**Tabla 6.29**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en La Puerta, Escenario 3**

Escenario 3												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	6,14	5,46	3,76	3,66	3,26	3,23	3,28	2,76	1,26	2,24	3,29	6,97
50%	1,74	1,73	1,43	0,99	1,06	1,04	0,99	0,93	0,86	1,51	1,77	1,73
85%	1,11	1,10	1,11	0,39	0,37	0,36	0,35	0,35	0,31	1,00	1,14	1,16
Diferencia Escenario 3 respecto a Escenario 1												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	-0,36	-0,32	-0,32	-0,44	-0,52	-0,48	-0,48	-0,45	-0,34	-0,19	-0,39	-0,38
50%	-0,08	-0,03	-0,37	-0,35	-0,29	-0,31	-0,36	-0,07	-0,04	-0,14	0,00	-0,09
85%	-0,16	-0,18	-0,18	-0,21	-0,22	-0,24	-0,25	-0,26	-0,30	-0,32	-0,21	-0,18

**Tabla 6.30**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Ciudad, Escenario 3**

Escenario 3												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	1,95	1,70	1,31	1,59	1,29	1,40	1,44	0,48	0,11	0,36	0,47	2,13
50%	0,32	0,23	0,11	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,18	0,32	0,32
85%	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,10	0,08
Diferencia Escenario 3 respecto a Escenario 1												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	-0,04	-0,15	-0,08	-0,18	-0,35	-0,23	-0,20	-0,67	-0,06	-0,25	-0,20	-0,40
50%	0,01	-0,07	-0,03	0,00	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	-0,08	-0,01	-0,03
85%	-0,05	-0,08	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,02	-0,04

**Tabla 6.31**  
**Probabilidad de Excedencia de Caudales en m<sup>3</sup>/s, estación Copiapó en Angostura, Escenario 3**

Escenario 3												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,02	0,02	0,07	0,11	0,12	0,14	0,14	0,12	0,09	0,06	0,03	0,18
50%	0,02	0,02	0,07	0,11	0,12	0,14	0,13	0,12	0,09	0,05	0,03	0,02
85%	0,01	0,01	0,07	0,10	0,12	0,13	0,13	0,11	0,09	0,05	0,02	0,01
Diferencia Escenario 3 respecto a Escenario 1												
Prob. Exc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10%	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,10
50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

La Tabla 6.32 muestra la demanda total anual impuesta a AQUATOOL para riego, minería, agua potable e industria. En la misma tabla se muestra información de los porcentajes de satisfacción de la demanda por cada zona de demanda impuesta al modelo. Con estos resultados, se muestra la demanda media anual satisfecha.

**Tabla 6.32**  
**Satisfacción Demanda Media 2013-2053. Escenario 3**

Uso	Sector	Demanda Anual Hm <sup>3</sup>	Satisfacción Demanda (%)			Demanda Anual m <sup>3</sup> /s	Demanda Satisfecha m <sup>3</sup> /s
			Mín	Medio	Máx		
Riego	R1a-01	4,899	59	99	100	4,88	4,25
	R1b-02	3,655	100	100	100		
	R1c-03	4,622	94	100	100		
	R1d-04	5,190	100	100	100		
	R2a-05	18,079	40	89	100		
	R2a-06	5,786	40	88	100		
	R2a-07	5,293	40	88	100		
	R3a-08	1,045	16	67	100		
	R3a-09	10,181	16	67	100		
	R3a-10	8,833	16	65	100		
	R3a-11	1,366	16	65	100		
	R3b-12	10,771	16	62	100		
	R3b-13	13,492	16	63	100		
	R4a-14	2,332	100	100	100		
	R4a-15	4,187	100	100	100		
	R4a-16	16,596	100	100	100		
	R5a-17	14,711	100	100	100		
	R5a-18	8,637	100	100	100		
	R6a-19	11,038	100	100	100		
	R6b-20	3,230	100	100	100		
Agua Potable	Sector 2a	0,688	58	91	100	0,67	0,66
	Sector 4a	0,732	100	100	100		
	Sector 5a	13,395	100	100	100		
	Sector 6a	6,155	100	100	100		
Minería	Sector 1b	0,694	100	100	100	0,94	0,91
	Caserones	9,152	100	100	100		
	Sector 3b	3,498	17	71	100		
	Sector 4a	14,290	100	100	100		
	Sector 5a	1,999	100	100	100		
Industria	Sector 2a	0,517	58	91	100	0,03	0,03
	Sector 5a	0,393	100	100	100		
<b>Total</b>		<b>205,5</b>				<b>6,52</b>	<b>5,85</b>

La Tabla 6.33 presenta la información del número de años, asociados a la simulación, que logra satisfacer rangos de porcentaje de la demanda agrícola. Para el acuífero del Sector 1, se aprecia que durante los 41 años de simulación se satisface sobre el 85% de la demanda anual, y para los Sectores 4, 5 y 6 los 41 años de simulación satisfacen el 100% de la demanda. Los sectores más deficitarios corresponden al Sector 2 y Sector 3, donde satisface sobre el 85% de la demanda agrícola apenas durante 25 años y 11 años, respectivamente.

**Tabla 6.33**  
**Número de Años que se satisface la demanda agrícola, Escenario 3**

Satisfacción de la Demanda Agrícola	Número de Años					
	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06
100%	39	23	8	41	41	41
85% - 99%	2	2	3	0	0	0
60% - 85%	0	8	8	0	0	0
40% - 60%	0	8	14	0	0	0
0% - 40%	0	0	8	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>

La Tabla 6.34 muestra las recargas medias anuales por sector acuífero, leídas desde AQUATOOL para ser ingresadas a Visual MODFLOW en el Escenario 3. Cabe resaltar, que en Sector 2 se ha sumado la infiltración del embalse Lautaro, en el Sector 4 se suma la recarga por pérdidas de la red de agua potable y en el Sector 5 se agrega la infiltración de la descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas.

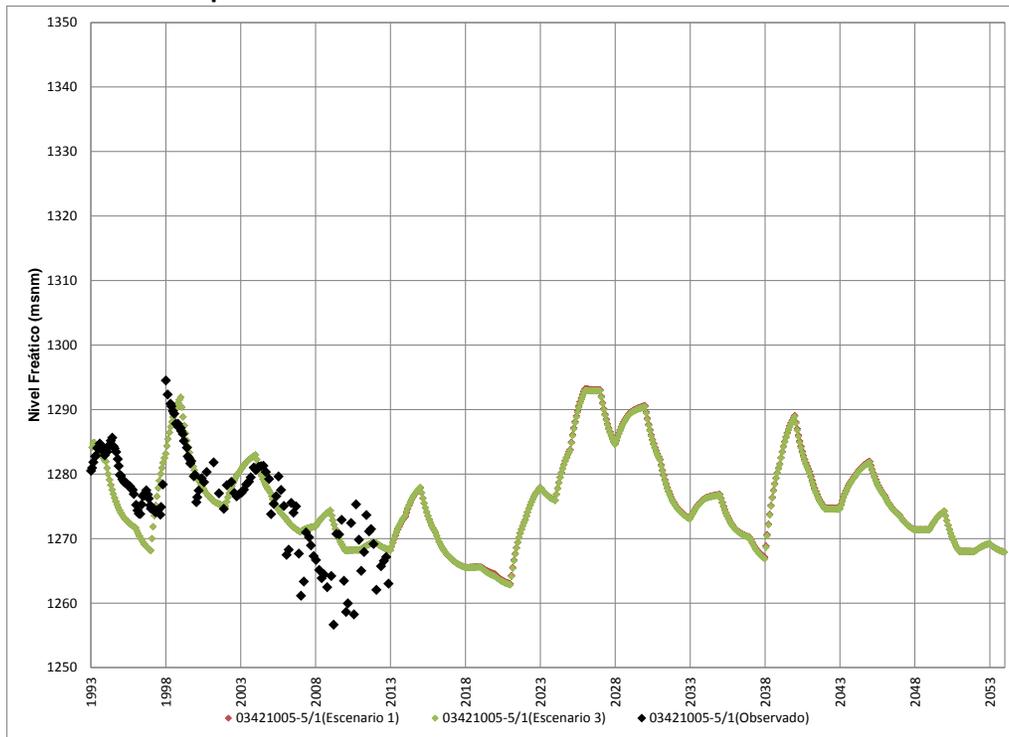
En este caso, se obtiene que al operar los pozos del proyecto minero Caserones, existe una disminución general de 250 L/s en el set de recargas al acuífero. Esta disminución considera que del orden de 30 L/s se dejan de recargar en la parte alta de la cuenca y 220 L/s entre Copiapó en la Puerta y Angostura (acuíferos 3, 4, 5 y 6).

**Tabla 6.34**  
**Caudal de Recarga Media en m<sup>3</sup>/s, generada desde AQUATOOL para Visual MODFLOW Escenario 3**

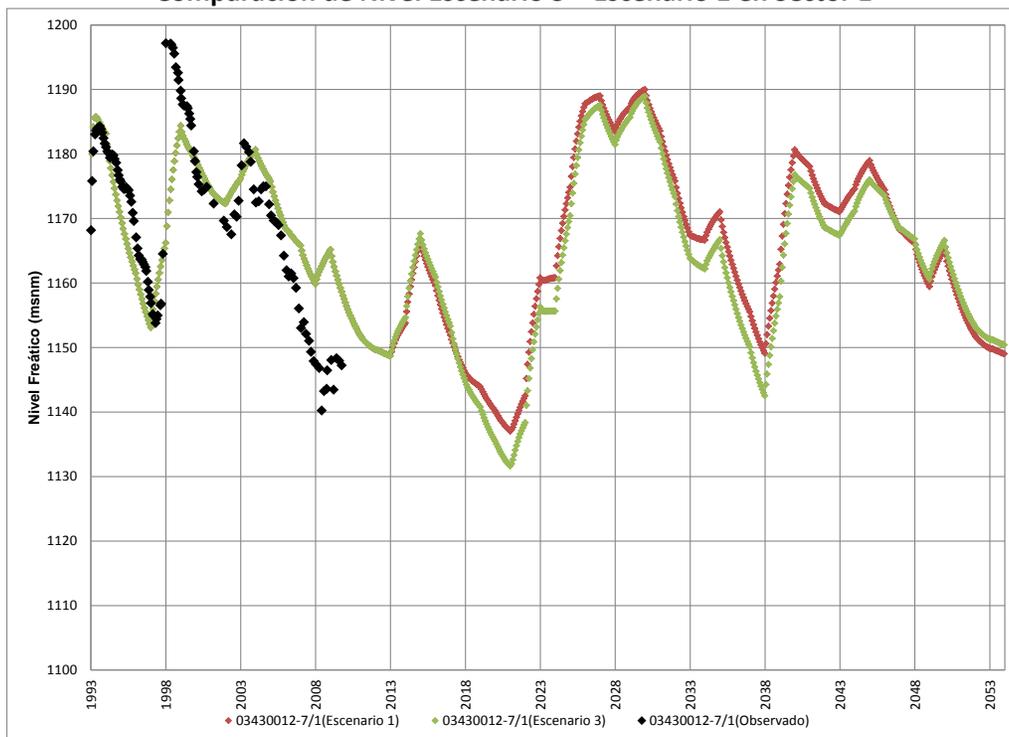
Escenario	SA01	SA02	SA03	SA04	SA05	SA06	TOTAL
1	1,06	0,93	1,00	1,06	0,55	0,14	4,75
3	1,05	0,91	0,92	1,01	0,50	0,11	4,49
<b>Diferencia</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,08</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,25</b>

Las Figura 6.53 a Figura 6.64 muestra una comparación de los niveles de agua subterránea para la situación del Escenario 3 respecto de los niveles del Escenario 1, considerando la entrada en operación del proyecto minero Caserones, que extrae una caudal de hasta 518 L/s en la parte alta de Copiapó (Sectores 1 y 2). Se aprecia, que las principales efectos se producen en los niveles de agua subterránea aguas abajo de Copiapó en La Puerta, principalmente desde el Sector 4, debido principalmente a la disminución de la oferta hídrica superficial en la estación del mismo nombre por el bombeo en la parte alta, lo que se traduce en una disminución de la recarga del acuífero de la parte baja.

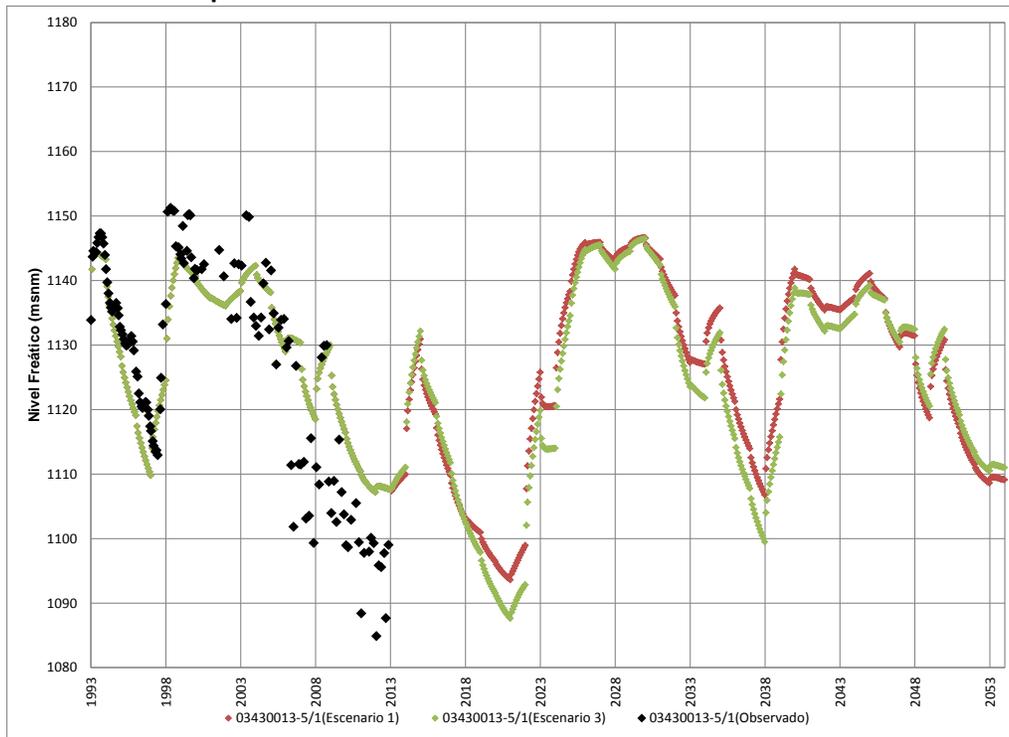
**Figura 6.53**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 1**



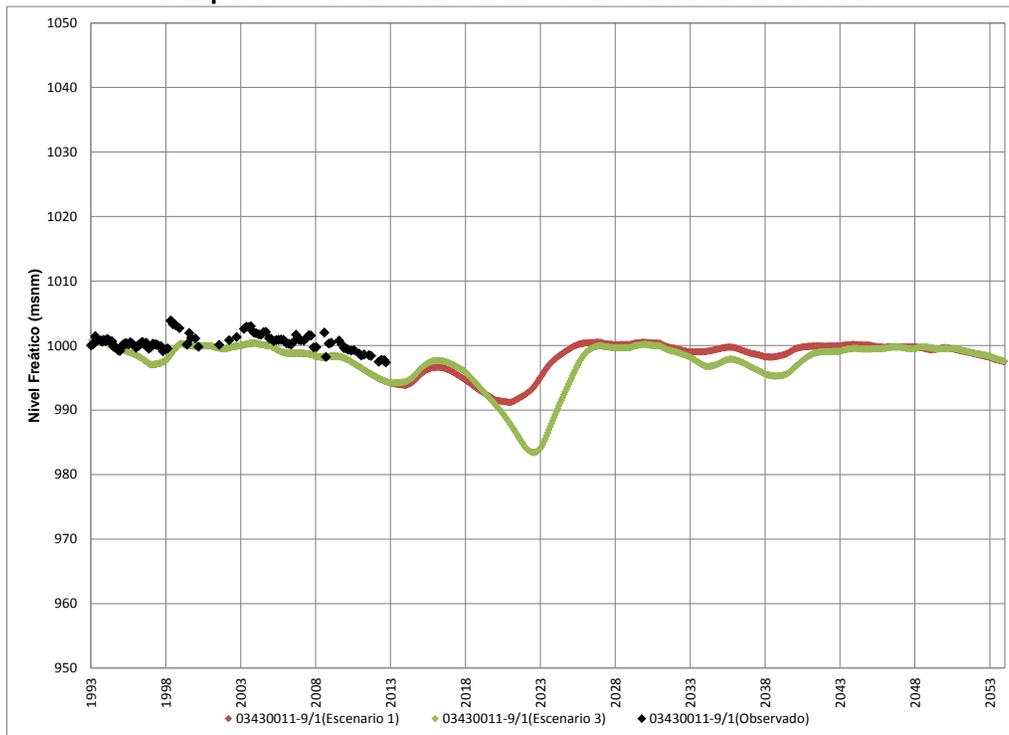
**Figura 6.54**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 1**



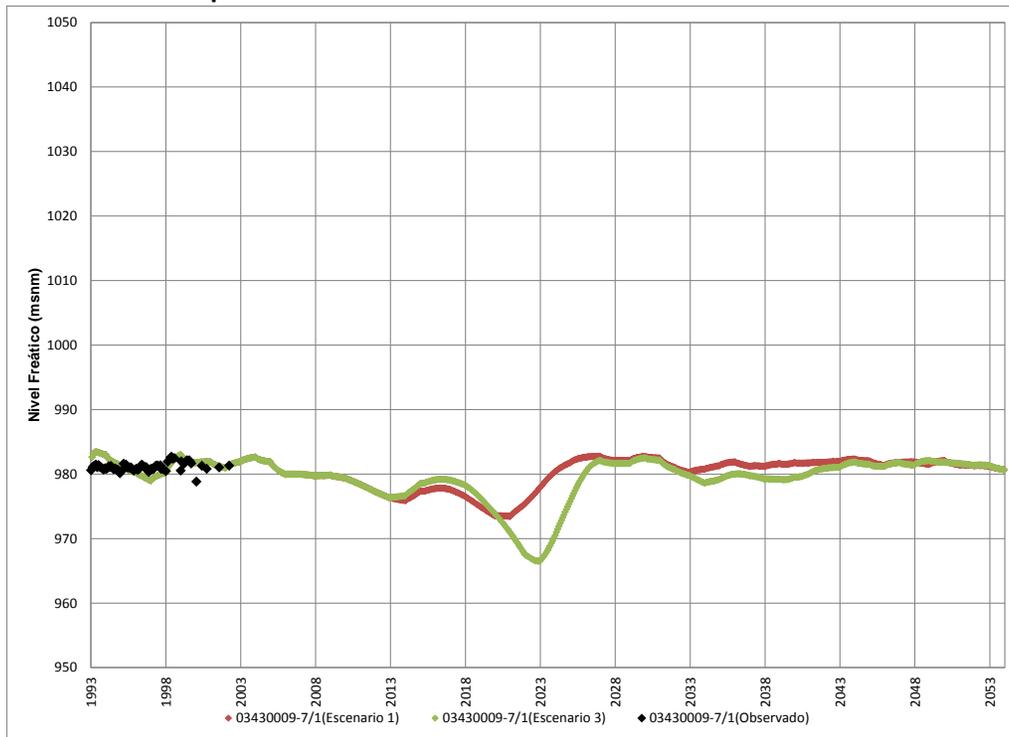
**Figura 6.55**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 1**



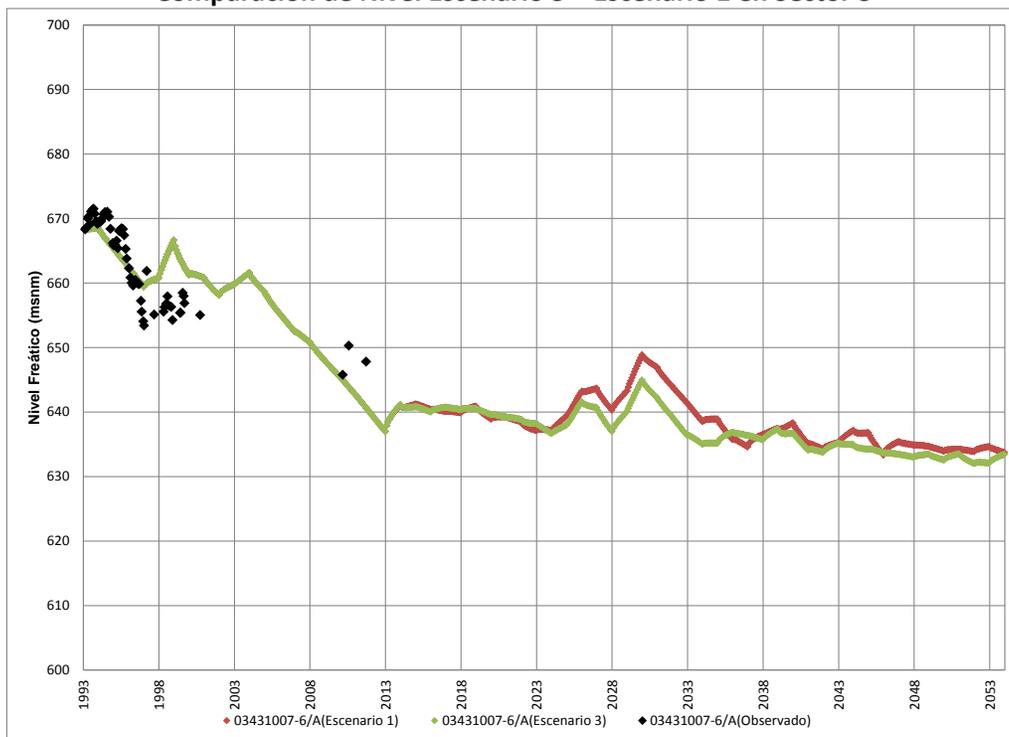
**Figura 6.56**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 2**



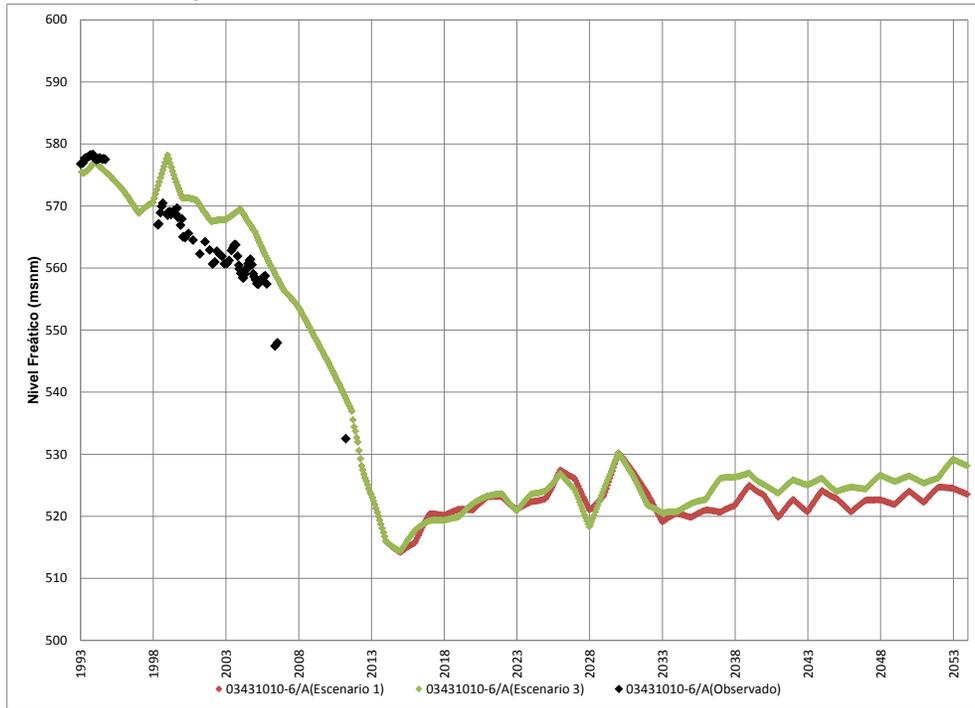
**Figura 6.57**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 2**



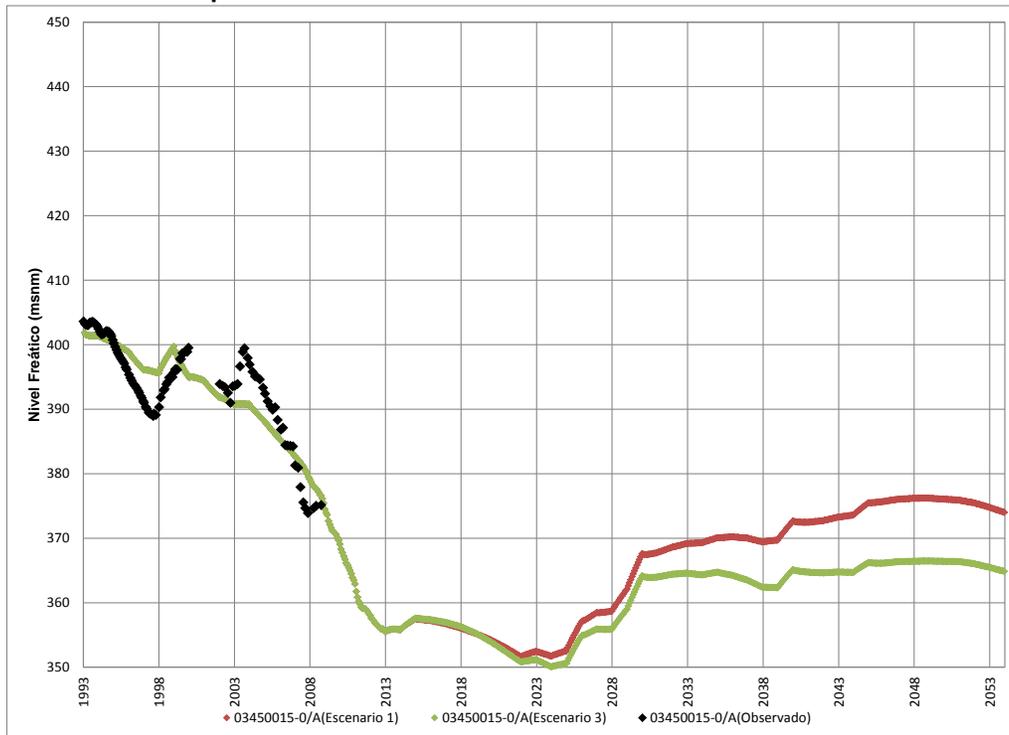
**Figura 6.58**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 3**



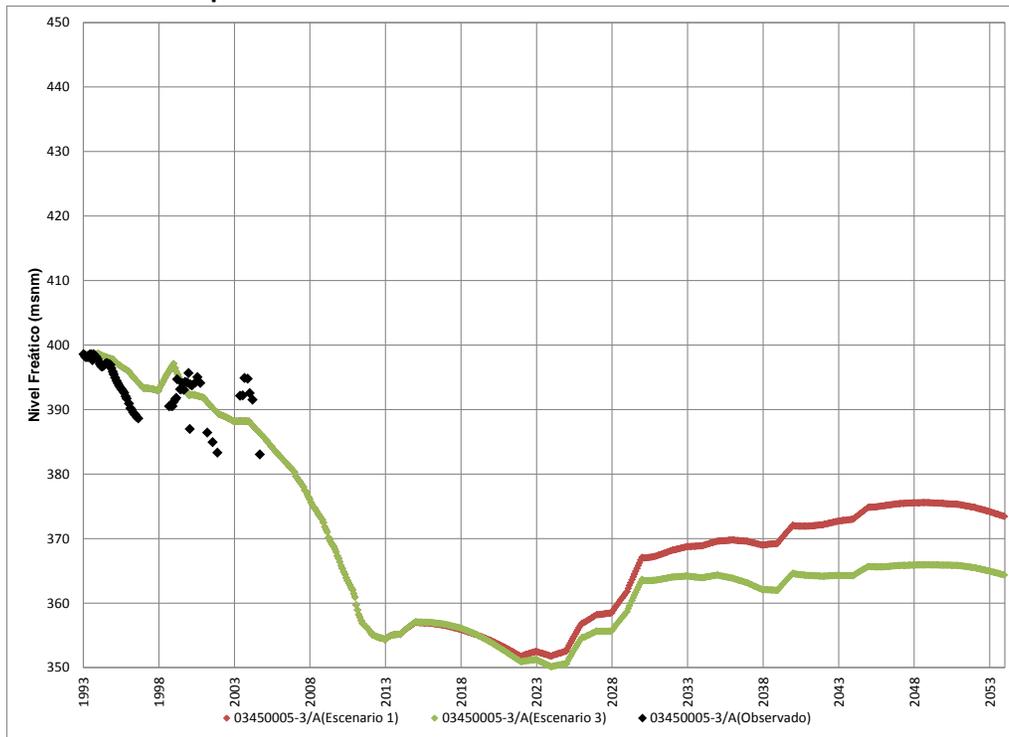
**Figura 6.59**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 3**



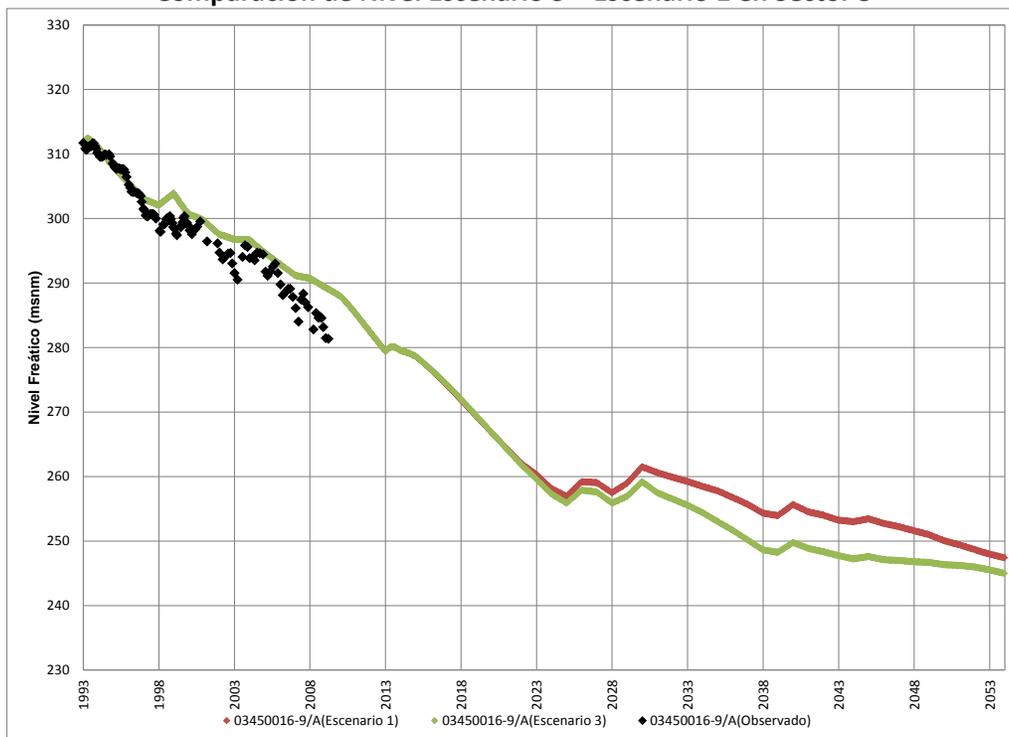
**Figura 6.60**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 4**



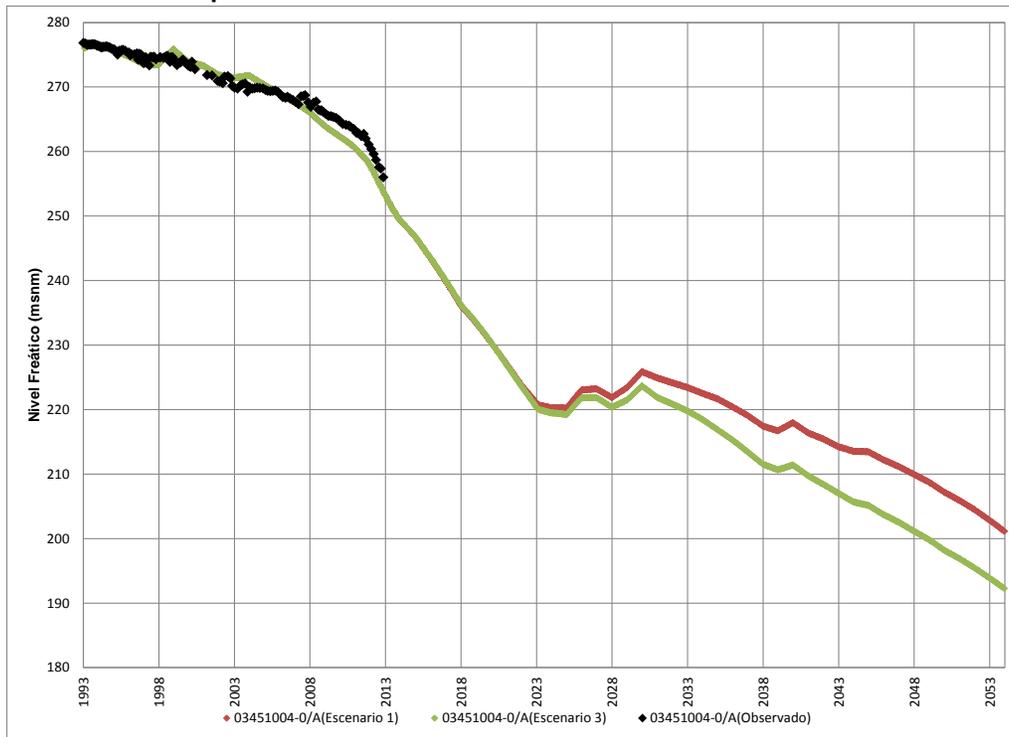
**Figura 6.61**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 4**



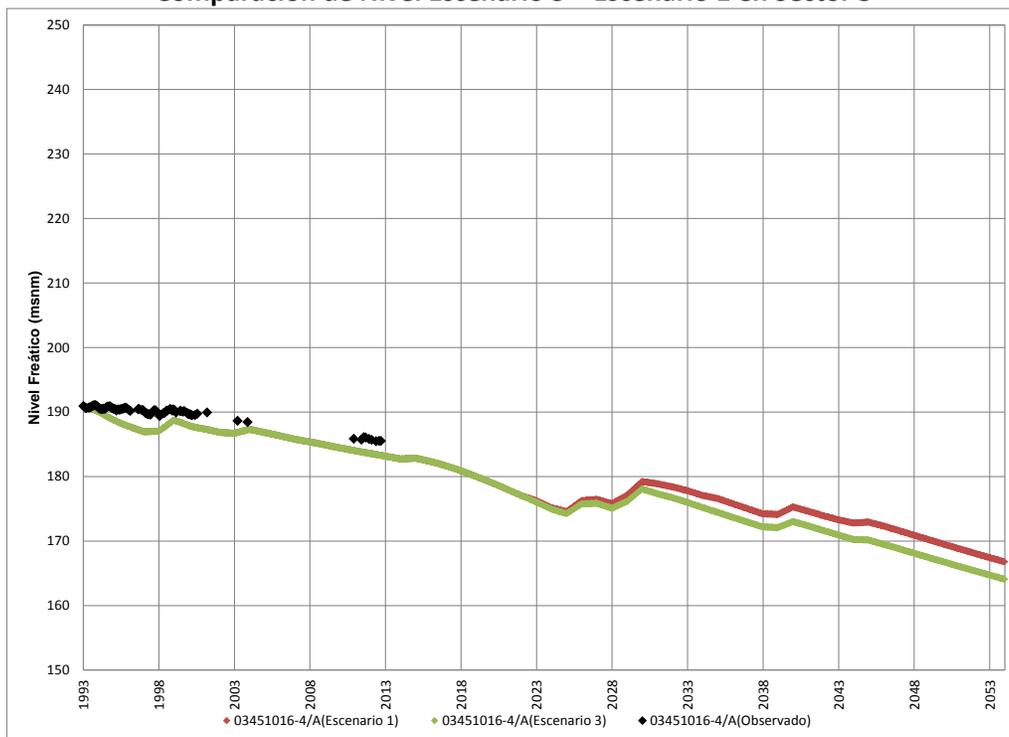
**Figura 6.62**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 5**



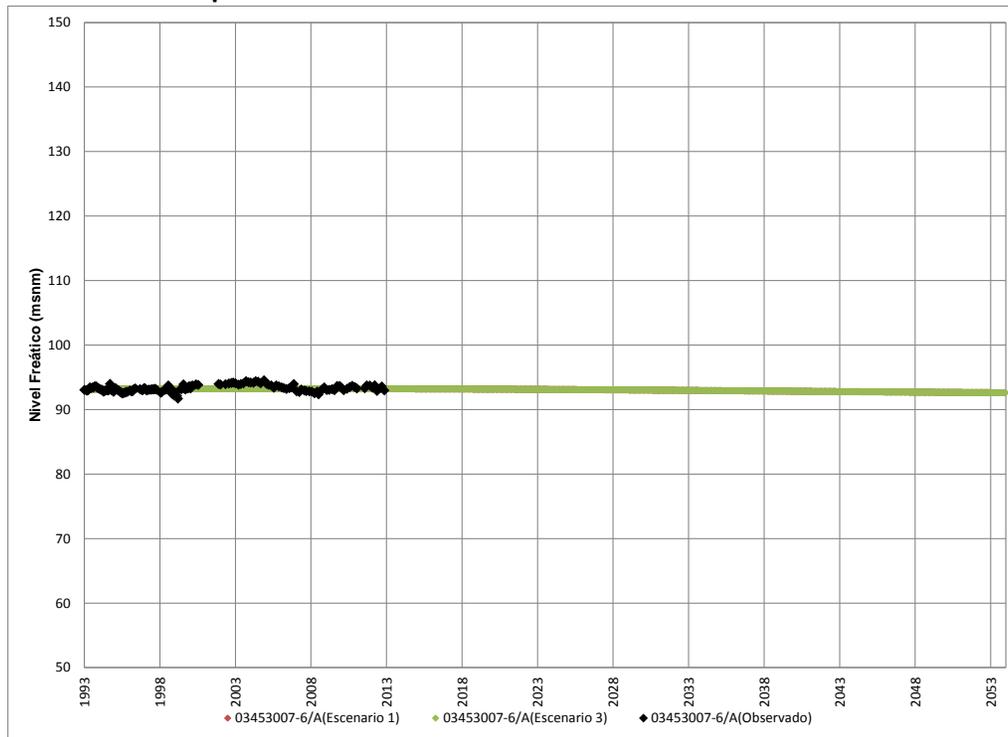
**Figura 6.63**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 5**



**Figura 6.64**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 5**



**Figura 6.65**  
**Comparación de Nivel Escenario 3 – Escenario 1 en Sector 6**



### 6.4.3 Análisis de Resultados

Los principales resultados obtenidos desde el acople de los modelos AQUATOOL y Visual MODFLOW para el Escenario 3 se describen a continuación:

- Se ha analizado el efecto de la entrada en operación del proyecto minero Caserones, que extrae sus aguas desde la parte alta de la cuenca.
- El análisis de satisfacción de la demanda de acuerdo al modelo AQUATOOL muestra una condición más deficitaria, principalmente en el Sector Acuífero 3, siendo las demandas satisfechas muy inferiores a la condición del Escenario 1.
- Del análisis del modelo AQUATOOL se desprende que existe un efecto de hasta 350 L/s en los caudales medios mensuales de probabilidad de excedencia 50% de la estación Copiapó en la Puerta, lo que indicaría una disminución de la oferta hídrica para el acuífero de Copiapó de la parte baja.
- Del análisis de la recarga para el Escenario 3, se obtiene que existe una disminución de 250 L/s en todo el acuífero de Copiapó. Este déficit se divide en 30 L/s como promedio en los acuíferos 1 y 2; y de 220 L/s como promedio desde los acuíferos 3 a 6.
- La situación general de los niveles de agua subterránea se presenta más deficitaria en los acuíferos 3, 4 y 5, presentando aumento de las tasas de descenso sostenido del acuífero.
- En el caso del escenario 2B, la explotación de los pozos de agua potable de Piedra Colgada y proyectados del Sector 6 aumentaría el efecto de disminución sostenida de los niveles en el Sector 5.
- Se espera leves recuperaciones una vez que los pozos de agua potable dejen de operar por el intercambio de fuente a una planta desaladora.
- No se proyectan impactos a la salida del sistema, ya sea superficial en la estación Copiapó en Angostura y/o niveles de agua subterránea.

- Se concluye que el impacto de la entrada en operación del proyecto Caserones, genera efectos ya sea de disminución en los niveles de agua subterránea en los Sectores 3, 4, 5 o en la satisfacción de la demanda de aguas subterráneas.

## 6.5 Conclusiones Preliminares

Se ha implementado el modelo operacional AQUATOOL acoplado a Visual MODFLOW para desarrollar una serie de escenarios de interés para la Dirección General de Aguas. A continuación se establece una serie de conclusiones respecto de este capítulo.

- El modelo AQUATOOL, es una herramienta flexible, que permite de manera simple incorporar cambios o nuevas demandas al sistema Copiapó. Por lo tanto, permite a DGA evaluar cualquier cambio futuro en los patrones de demandas del sistema.
- Como resultado, ha sido posible obtener caudales superficiales en los nodos correspondientes a las estaciones fluviométricas, así como los caudales de recarga a los distintos elementos acuíferos que fueron identificados en la representación del modelo. Estos montos de recarga fueron transformados a tasas de recarga como caudal por unidad de área, para el ingreso de estos datos al modelo Visual MODFLOW.
- Para cada escenario, AQUATOOL entrega las series de bombeo agrícola a nivel mensual. Estas series de datos se interpretaron a nivel anual para el ingreso de los datos al modelo Visual MODFLOW.
- A partir del modelo calibrado de AQUATOOL, se ha generado información de aportes de cabecera y aportes intermedios para el periodo 1972 – 2012, que consiste en 41 años de datos. A partir de esta información, ha sido posible generar escenarios futuros para el periodo 2013-2053.
- Se han implementado tres escenarios de interés para la modelación, que consideran cambios futuros en la cuenca del río Copiapó y se ha evaluado los efectos en la oferta de agua superficial, en la recarga al acuífero, los niveles de agua subterránea y la satisfacción de la demanda.
- Para la implementación de los escenarios de interés, se considera como caso base, que el agua potable extraerá sus recursos desde los acuíferos 5 y 6 hasta el año 2022, para ello, deberá construir pozos adicionales a los ya construidos, para satisfacer las demandas de agua potable. A partir del año 2023, se detienen la explotación del acuífero y comienza a operar la planta desalinizadora que se proyecta para Copiapó.
- Para proyectar la demanda, se ha utilizado un modelo de proyección logística, típico para población. Sin embargo, cabe considerar la dificultad de estimar la demanda de la población al año 2053, sobretodo porque el aumento de la población estará condicionada ampliamente por el desarrollo de la minería en la región.
- Los resultados indican que para el Escenario 1, se proyecta una situación deficitaria para la cuenca del Copiapó, tanto en la satisfacción de la demanda de algunos sectores como en los niveles que presentan descensos sostenidos en los acuíferos 3, 4 y 5.
- De acuerdo al resultado del Escenario 2, se espera que el efecto de la venta de agua se vea reflejado en una disminución de los niveles de agua subterránea sólo en el Sector 5 del acuífero de Copiapó. Este efecto se suma al impacto de la explotación de los pozos de agua potable en el sector de Piedra Colgada. La comparación de disponer de la totalidad del agua tratada en el río, a vender este recurso

para nuevos usos en la cuenca, significa una diferencia de niveles de agua subterránea, cercano a la zona de descarga de hasta 20 a 30 m en nivel de la napa.

- La operación del proyecto minero Caserones genera una disminución de los caudales superficiales disponibles en la estación Copiapó en la Puerta, lo que genera una disminución de la oferta hídrica del acuífero comprendido entre La Puerta y Angostura. Adicionalmente, se estima una disminución media de la recarga del orden de 220 L/s aguas abajo de Copiapó en La Puerta, lo que proyecta una condición de los niveles freáticos mucho más desfavorable que lo que proyecta la condición sin proyecto.
- Todos los escenarios muestran que el efecto a la salida de la cuenca es despreciable, debido a que no cambian los niveles de agua subterránea y tampoco los caudales superficiales de la estación Copiapó en Angostura.

## **7. GEOFISICA DE PROSPECCION SECTOR ALTO ACUIFERO COPIAPO**

### **7.1 Introducción**

En el marco de la propuesta técnica presentada por HIDROMAS CEF, se comprometió la realización de geofísica de prospección en la cuenca del río Copiapó que permitiera complementar la información ya existente de estudios anteriores. De esta forma, el sector prioritario establecido en dicha propuesta para el desarrollo de esta geofísica corresponde al Sector 1 del acuífero de Copiapó, de acuerdo a la interpretación de las bases técnicas desarrolladas por la DGA.

En una primera etapa, previo a la ejecución de la mencionada geofísica, se buscó responder a la pregunta de cuál es el propósito de realizar dichas prospecciones, llegándose a la conclusión de que los principales objetivos de ésta son los siguientes:

- Definir de forma más precisa la profundidad del basamento rocoso en algunos sectores acuíferos del Copiapó.
- Contar con más información de la extensión y características del relleno sedimentario en el Sector 1 del acuífero de Copiapó, lo que permitiría (en conjunto con el resto de la información hidrogeológica) analizar la necesidad de sub-sectorizar dicho sector.

### **7.2 Metodología de Trabajo**

En función de estos objetivos, el trabajo se desarrolló siguiendo la metodología que se explica a continuación:

- En una primera etapa se llevó a cabo una revisión de todos los antecedentes geofísicos disponibles, con el objetivo de definir la cobertura espacial de dicha información.
- En función de la revisión anterior, se definieron los sectores (del acuífero del Copiapó) en que se detectó un “déficit” de información geofísica.
- Basado en dicha definición y algunos antecedentes adicionales (que se detallan más adelante), se elaboró una propuesta de realización de prospecciones geofísicas en las áreas con “déficit”, en el marco de lo solicitado por la DGA, es decir, 60 gravimetrías y 20 Strata Gem.
- Dicha propuesta fue presentada finalmente a la DGA, consiguiéndose la aprobación para su ejecución.

De acuerdo a todo lo antes señalado, en esta sección se presenta el desarrollo del trabajo realizado para la definición de los sectores de ubicación de las prospecciones geofísicas, junto con los resultados obtenidos en la campaña de terreno desarrollada entre el 23 y 29 de Septiembre de 2013, por la empresa DPI Ingenieros.

Preliminarmente HIDROMAS CEF propuso, de acuerdo a las bases, la realización, dentro del área indicada en la Figura 7.1, de 60 puntos gravimétricos y 20 StrataGem, los que fueron procesados en terreno por DPI Ingenieros.

### **7.3 Revisión de Antecedentes**

En la cuenca del río Copiapó se cuenta con diversos estudios geofísicos desarrollados desde la década de 1980 en adelante, que cubren distintos sub-sectores del acuífero del Copiapó, en particular la zona ubicada aguas abajo del Embalse Lautaro.

**Figura 7.1**  
**Zona de Prospección Geofísica Propuesta Preliminarmente**



Fuente: Elaboración Propia a partir de imagen de Google Earth.

La revisión de los antecedentes geofísicos disponibles se basa en el estudio desarrollado por SERNAGEOMIN durante el año 2012, “Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca del río Copiapó, con Énfasis en la Cuantificación, Dinámica y Calidad Química de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos”. En dicho estudio se hace un completo diagnóstico en cuanto a los antecedentes actualmente existentes en todo el sistema acuífero asociado al río Copiapó.

Los principales estudios que se incorporan dentro del resumen desarrollado en el mencionado trabajo de SERNAGEOMIN, son los siguientes:

- DGA (1987). Prospección Geofísica y Mecánica Sistemas Acuíferos. Desarrollado por Alamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda y Geoexploraciones Ltda.
- Aguirre (1999). Hidrogeología del valle del Río Copiapó entre el Tranque Lautaro y Piedra Colgada (Inédito). Tesis para optar al Grado de Magíster en Geofísica y memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Departamento de Geología.
- Aguirre et al (1999). Estudio hidrogeológico del valle del río Copiapó, segmento Embalse Lautaro – Piedra Colgada, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Informe Registrado IR-99-17.
- BGR-SERNAGEOMIN (1999a). Informe acerca de mediciones geofísicas en la región de Copiapó, Norte de Chile, con ocasión del viaje al grupo alemán de trabajo geológico desde el 28.8.98 al 22.12.98. Proyecto: Creación de un Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental en el Servicio Nacional de Geología y Minería. BGR, Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales.
- BGR-SERNAGEOMIN (1999b). Fortalecimiento del Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental dentro del Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe sobre mediciones del campo electromagnético transiente realizadas en las inmediaciones de Copiapó, Norte de Chile del 28 de Noviembre al 9 de Diciembre de 1998.
- Errol Montgomery-Geodatos (2006a). Estudio Geofísico de Gravimetría sector del Valle del río Copiapó entre Chamonate y Nantoco III Región de Atacama, Chile Agosto 2006.
- Errol Montgomery-Geodatos (2006b). Estudio Geofísico Gravimétrico III Región de Atacama, Chile Agosto 2006.

- INVEREX LIMITADA (2006). Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM) Proyecto TEM, Valle Río Copiapó, Sector Los Loros, III Región de Atacama.
- Sitac-Geodatos (2007). Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM), Proyecto Extensión TEM Valle Río Copiapó Sector Los Loros, Copiapó, III Región. Informe Inédito.
- Sitac-Geodatos (2008). Estudio Geofísico mediante Transiente Electromagnético (TEM), Sector río Ramadillas, Estero Las Breas. Copiapó, III Región. Informe Inédito.
- Sitac-Geodatos (2009). Estudio Geofísico, Transiente Electromagnético (TEM), Sectores: Carrizalillo Grande, Caserones y La Brea, Los Loros-Copiapó-III Región. Informe Inédito.
- Rock Drilling-Geodatos (2009). Exploración aguas subterráneas, estudio geofísico de resistividad Dipolo-Dipolo, Valle río Copiapó, III región de Chile. Informe Inédito.
- Peralta-Geodatos (2009). Estudio de Resistividad Dipolo-Dipolo,  $a = 100$ , proyecto Piedra Colgada.
- Aguas Chañar-GEODATOS (2010). Estudio de resistividad dipolo-dipolo, Proyecto Placilla Sierralta, ciudad de Copiapó, 26 Marzo de 2010.
- SERNAGEOMIN (2011a). Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM), Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca del río Copiapó, III Región de Atacama, Chile. Realizado por GEODATOS en Agosto de 2011.
- Aguas Chañar (2011). Estudio Hidrogeológico para Precisar el Límite entre El Tercer y Cuarto Sector del Acuífero de la Cuenca del río Copiapó. Realizado por GCF Ingenieros Consultores en Octubre de 2011.
- SERNAGEOMIN (2011b). Estudio de Gravimetría, Proyecto Valle del río Copiapó Sector Los Loros, III Región de Atacama, Chile. Realizado por GEODATOS en Octubre de 2011.

A partir del análisis desarrollado en el estudio de SERNAGEOMIN (2012) indicado anteriormente, se preparó un resumen de los principales antecedentes de cada uno de los estudios con información geofísica disponible, lo que se muestra en la Tabla 7.1. Entre la información que se detalla se incluye: año del estudio; tipo de prospección geofísica desarrollada; número de estaciones asociadas (considerando las estaciones con información válida y no válida); los sectores del acuífero Copiapó que el estudio cubre; y si disponen información de la profundidad del basamento rocoso.

Respecto a esta información, es importante mencionar que no necesariamente todos los estudios recién listados poseen información disponible del basamento rocoso (o validada por el estudio de SERNAGEOMIN en referencia), lo que fue consultado directamente a SERNAGEOMIN, obteniendo como respuesta que lo que se estipula en su estudio se puede considerar como información válida y consolidada respecto a los datos geofísicos en el acuífero del Copiapó.

En función de lo anterior se tomó como base, para el presente trabajo, la Tabla 10.1 que se entrega en el mencionado estudio, en el que se indica el ID de la estación, sus coordenadas, la fuente (estudio base) y la profundidad del basamento rocoso.

**Tabla 7.1**  
**Resumen Datos Relevantes de Estudios Geofísicos Anteriores**

Estudio	Año	Tipo Prospección	N° Estaciones	Sectores	Profundidad Basamento Disponible?
DGA-ALAMOS y PERALTA- GEOEXPLORACIONES	1987	SEV	224	1 a 6	Sí
AGUIRRE	1999	-	-	-	-
AGUIRRE ET AL	1999	-	-	-	-
BGR-SERNAGEOMIN	1999a	SEV	40	3 a 6	Sí
BGR-SERNAGEOMIN	1999b	TEM	91	2 a 6	Sí
GEOEXPLORACIONES	2001	SEV	10	4	Sí
ERROL MONTGOMERY- GEODATOS	2006a	Gravimetría	873	3 a 6	Sí
ERROL MONTGOMERY- GEODATOS	2006b	Gravimetría	850	6	Sí
INVEREX-GEODATOS	2006	TEM	¿?	Aguas arriba Sector 1	No
SITAC-GEODATOS	2007	TEM	51	1 y 3	Sí
SITAC-GEODATOS	2008	TEM	56	Aguas arriba Sector 1	No
SITAC-GEODATOS	2009	TEM	50	Aguas arriba Sector 1	No
ROCK DRILLING-GEODATOS	2009	Dipolo-Dipolo	25	4	Sí
PERALTA-GEODATOS	2009	Dipolo-Dipolo	45	5 y 6	Sí
AGUAS CHAÑAR-GEODATOS	2010	Dipolo-Dipolo	5	4	Sí
SERNAGEOMIN	2011a	TEM	85	1 a 6	No
AGUAS CHAÑAR-GCF	2011	Gravimetría	198	3 y 4	Sí
SERNAGEOMIN	2011b	Gravimetría	52	2 y 3	No

Fuente: Elaboración Propia.

#### **7.4 Distribución Espacial de la Información Disponible**

A partir de la información disponible para cada uno de los estudios detallados en la Tabla 7.1 (tomando como base la Tabla 10.1 del estudio de SERNAGEOMIN (2012)), se hizo un filtro de las estaciones con información disponible de profundidad del basamento (considerando que uno de los objetivos es lograr una mejora en la definición de éste), generándose una base de datos que incluye el ID de la estación, sus coordenadas (en PSAD56 y WGS84), el método geofísico, la fuente (estudio base), la profundidad del basamento rocoso y el sector acuífero al que corresponde. Dicha base de datos se entrega en el Anexo F del presente informe.

En la Tabla 7.2 se muestra cómo se distribuyen los estudios disponibles en términos de los sectores acuíferos que cubren. Se observa que los Sectores 1 y 2 son los que concentran la menor cantidad de estudios geofísicos desarrollados en ellos.

**Tabla 7.2**  
**Distribución Espacial en Sectores Acuíferos Copiapó de Estudios Geofísicos**

Sector	SEV			TEM						Dipolo-Dipolo			Gravimetría				TOTAL ESTUDIOS GEOFÍSICOS
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	
Aguas Arriba Sector 1					X	X	X	X									4
1	X					X			X								3
2				X					X							X	3
3		X		X		X			X				X		X	X	7
4		X	X	X					X	X		X	X		X		8
5		X		X					X		X		X				5
6	X	X		X					X		X		X	X			7

DGA-ALAMOS y PERALTA-GEOEXPLORACIONES (1987)	(1)	SERNAGEOMIN (2011a)	(9)
BGR-SERNAGEOMIN (1999a)	(2)	ROCK DRILLING-GEODATOS (2009)	(10)
GEOEXPLORACIONES (2001)	(3)	PERALTA-GEODATOS (2009)	(11)
BGR-SERNAGEOMIN (1999b)	(4)	AGUAS CHAÑAR-GEODATOS (2010)	(12)
INVEREX-GEODATOS (2006)	(5)	ERROL MONTGOMERY-GEODATOS (2006a)	(13)
SITAC-GEODATOS (2007)	(6)	ERROL MONTGOMERY-GEODATOS (2006b)	(14)
SITAC-GEODATOS (2008)	(7)	AGUAS CHAÑAR-GCF (2011)	(15)
SITAC-GEODATOS (2009)	(8)	SERNAGEOMIN (2011b)	(16)

Fuente: Elaboración Propia.

En función de la base de datos depurada que se entrega en el Anexo F, se desarrolló un análisis orientado a conocer cómo se distribuyen en primer término los estudios geofísicos y posteriormente los puntos con información de profundidad del basamento (cualquiera sea el método), dentro de los sectores acuíferos del Copiapó.

En la Tabla 7.3 se muestra cómo se distribuyen los puntos con información de profundidad del basamento en términos de los sectores acuíferos que cubren. En la segunda columna se muestra el número total de estaciones con información de profundidad del basamento, mientras que en las siguientes columnas se muestra el número de estaciones por método geofísico. Se observa claramente que los Sectores 1 y 2 son los que cuentan con un menor número de estaciones total y para cada método geofísico también.

**Tabla 7.3**  
**Distribución Espacial en Sectores Acuíferos Copiapó de Estudios Geofísicos**

Sector	N° Estaciones	SEV	TEM	Dipolo-Dipolo	Gravimetría
Aguas Arriba Sector 1	12	0	12	0	0
1	40	0	40	0	0
2	39	22	1	0	16
3	197	39	12	0	146
4	477	50	14	18	395
5	431	60	21	15	335
6	703	45	26	0	632
<b>TOTAL</b>	<b>1899</b>	<b>216</b>	<b>126</b>	<b>33</b>	<b>1524</b>

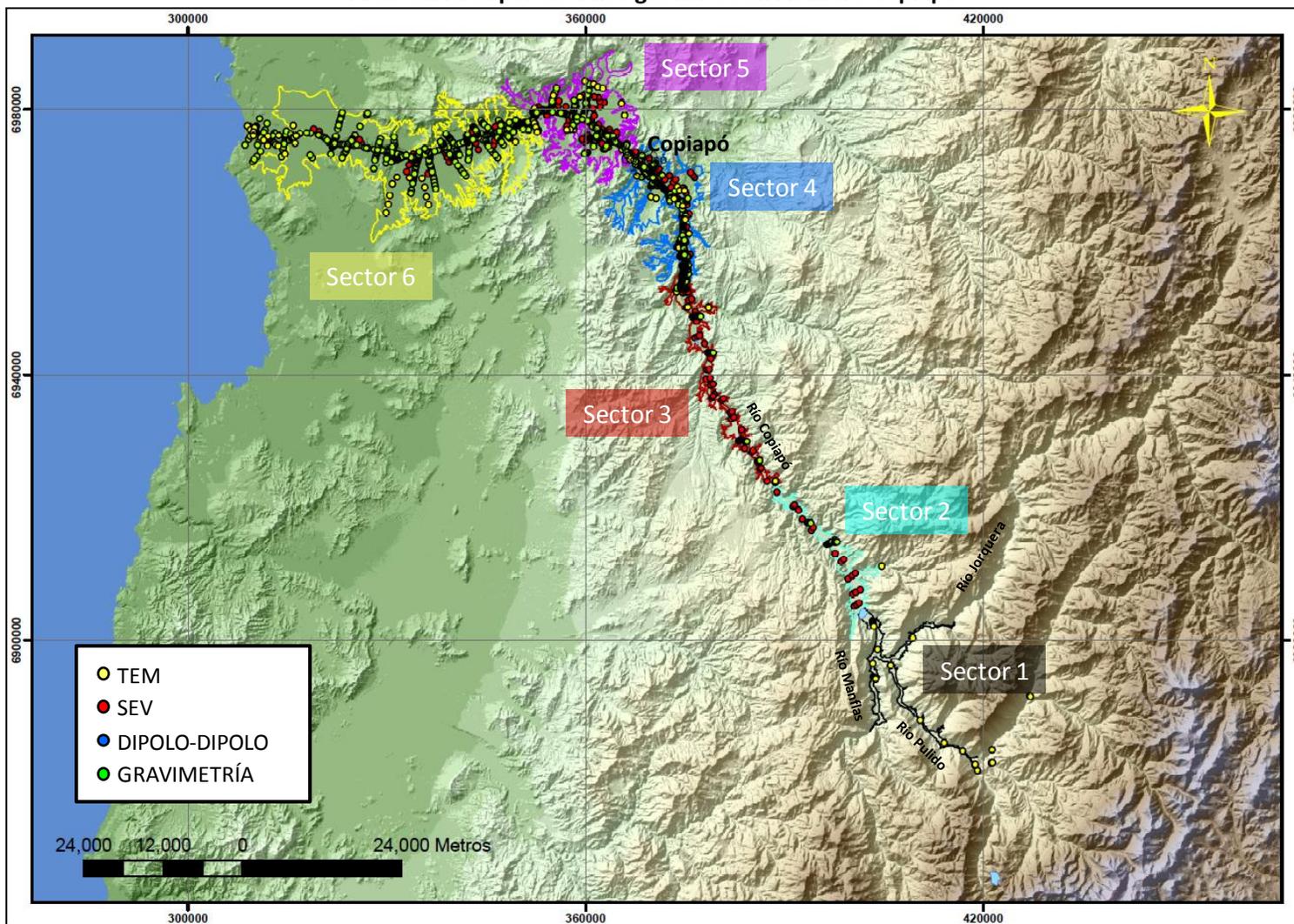
Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 7.2 se muestra de manera referencial la distribución de los puntos con información de profundidad del basamento rocoso, considerando los seis sectores del acuífero de Copiapó. En las Figuras 7.3 a 7.5 se muestra un acercamiento a los 6 sectores hidrogeológicos del acuífero Copiapó, para observar de mejor manera la extensión espacial de los puntos con información disponible.

A partir de lo entregado en las Tablas 7.2 y 7.3 y las Figuras 7.2 a 7.5 se observa que la mayor parte de los estudios y puntos con información de profundidad del basamento se concentra desde el Sector 3 (La Puerta a Mal Paso) al Sector 6 (Piedra Colgada a Angostura), lo que está directamente relacionado con la importancia relativa de dicho tramo del acuífero de Copiapó en términos de las actividades productivas presentes (sobre-explotación asociada) y los consecuentes descensos de niveles piezométricos registrados a la fecha.

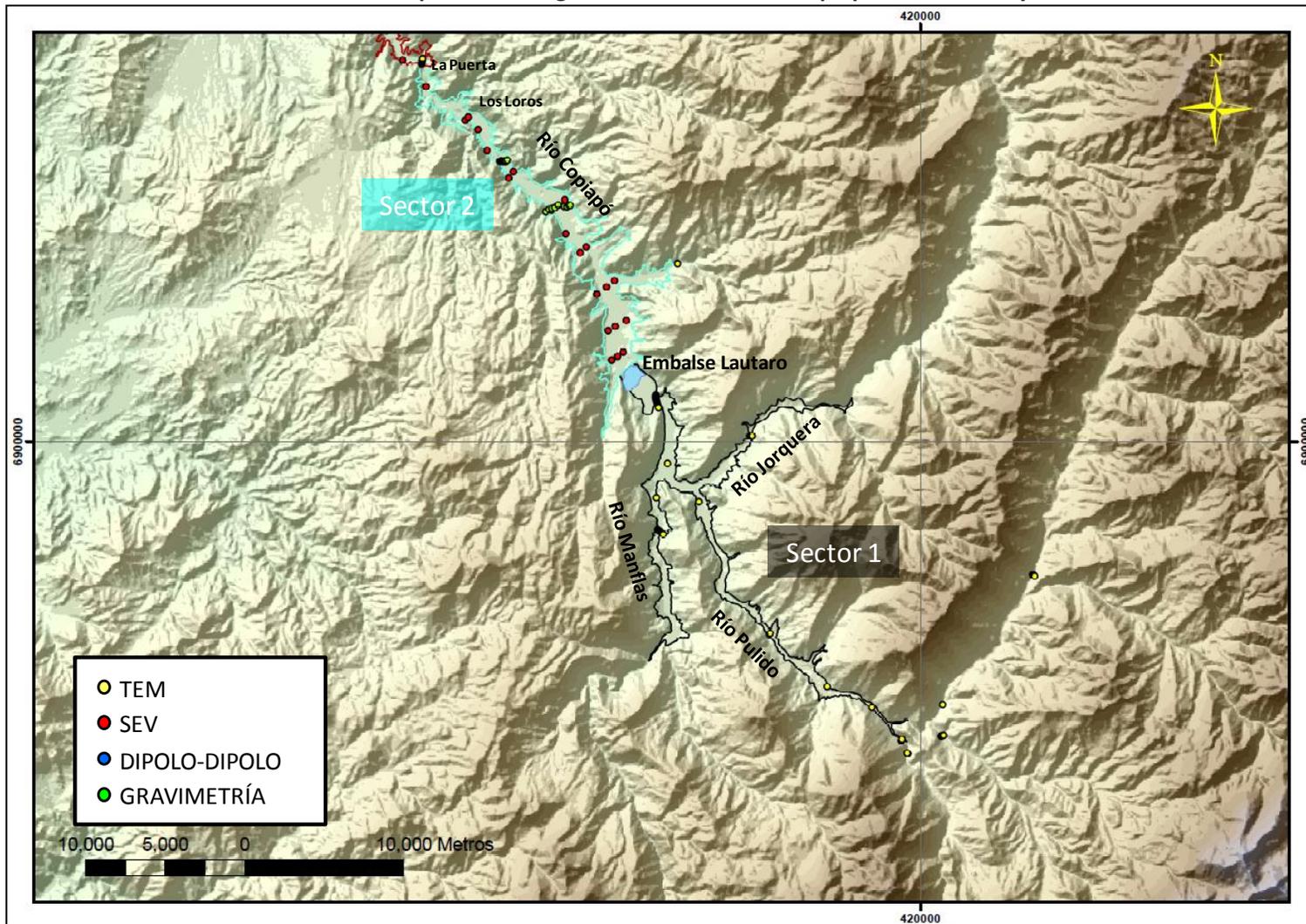
Lo anterior es consistente con lo presentado en el estudio de SERNAGEOMIN (2012), en que se indica que gran parte de la información disponible se localiza aguas abajo de la localidad de Tierra Amarilla (Sector 4), lo que permite una buena interpolación de los antecedentes, con puntos separados a distancias variables entre 100 a 5000 m; pero que sin embargo, para el tramo localizado desde la localidad de Cerrillos hacia el Embalse Lautaro y aguas arriba de éste (desde el Sector 3 hacia aguas arriba), la información recopilada es puntual y alcanza separaciones mayores entre puntos.

Figura 7.2  
Área cubierta por estudios geofísicos en Acuífero Copiapó



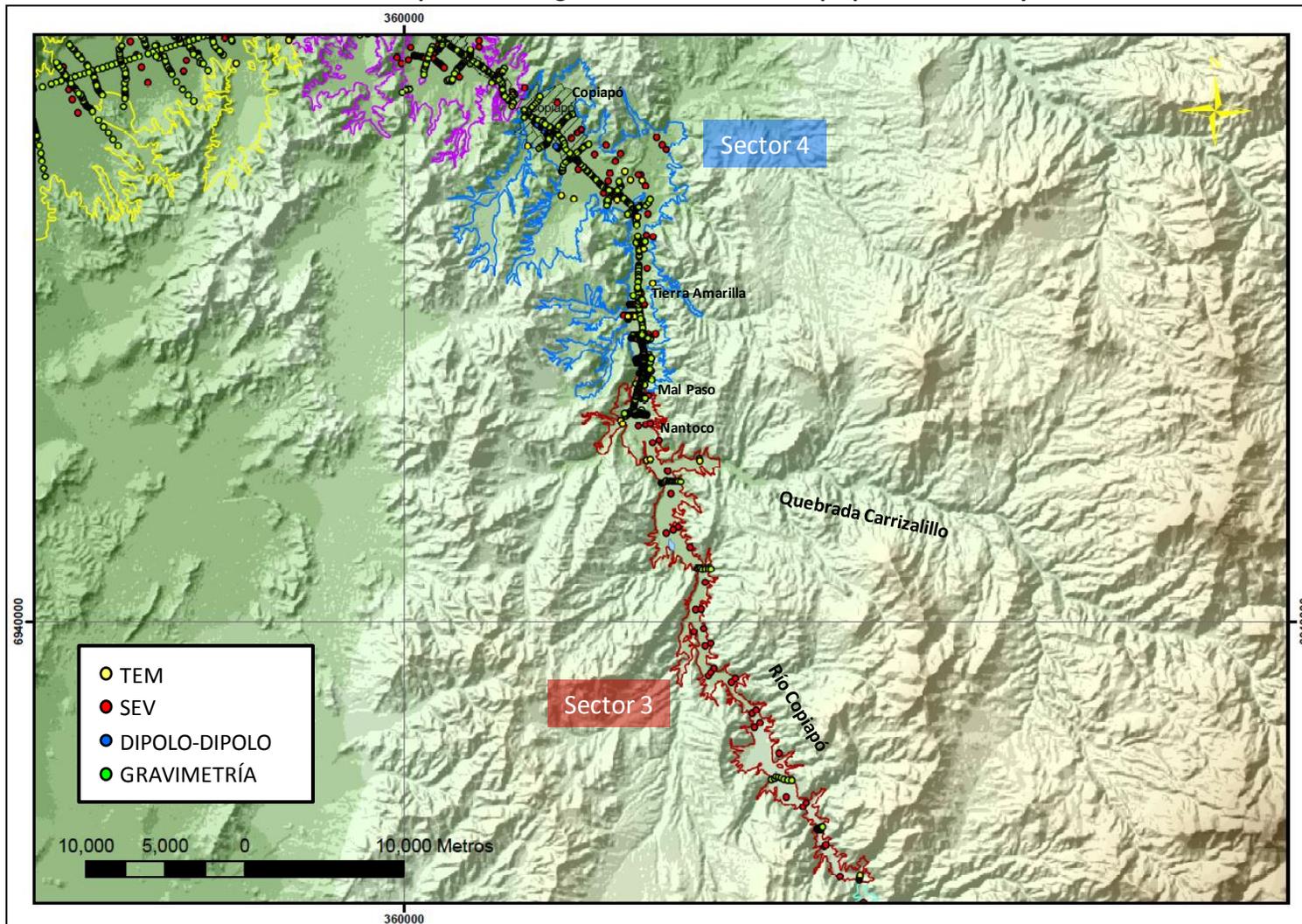
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7.3  
Área cubierta por estudios geofísicos en Acuífero Copiapó – Sectores 1 y 2



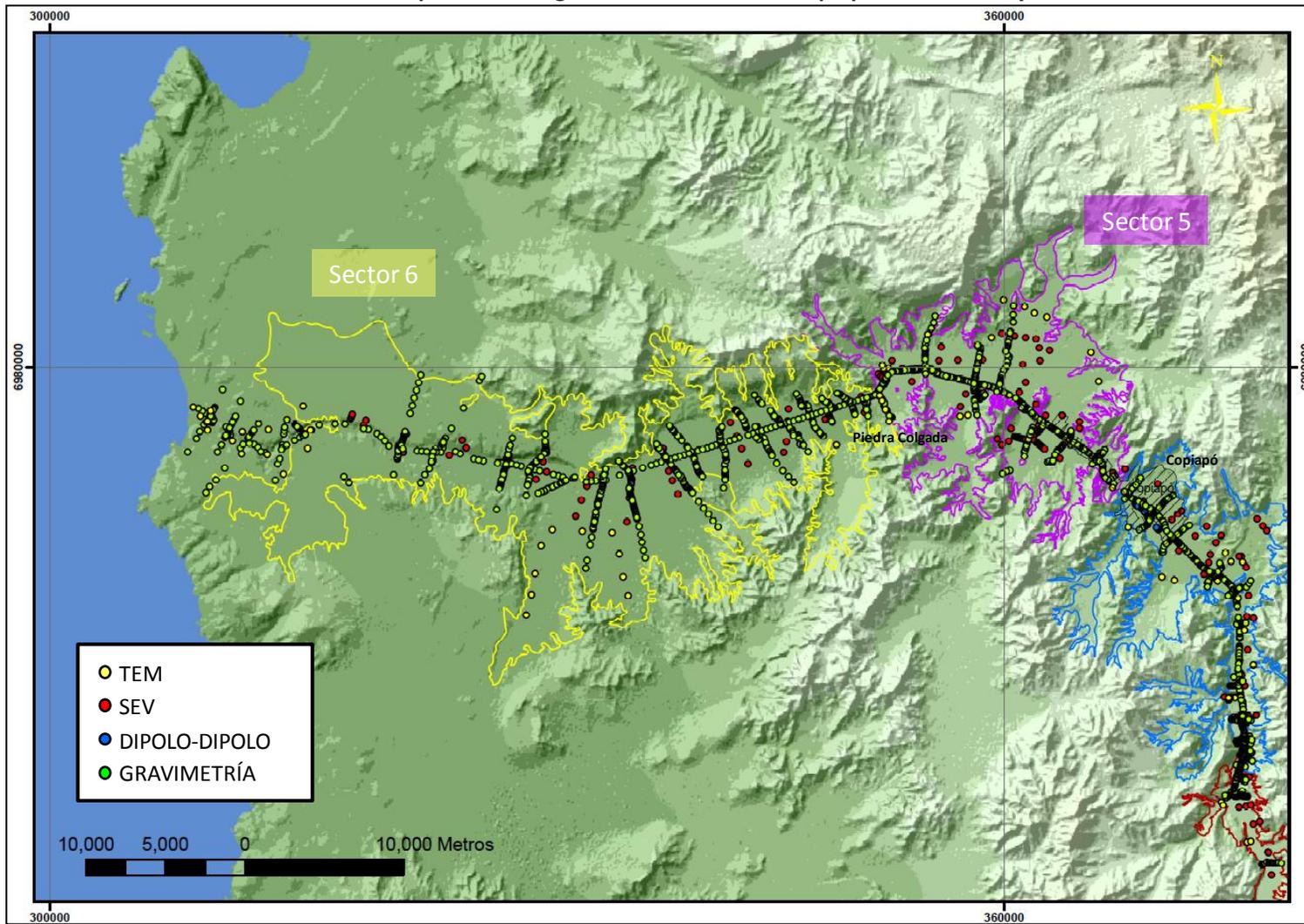
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7.4  
Área cubierta por estudios geofísicos en Acuífero Copiapó – Sectores 3 y 4



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7.5  
Área cubierta por estudios geofísicos en Acuífero Copiapó – Sectores 5 y 6



Fuente: Elaboración Propia.

De esta forma fue posible inferir de manera preliminar, basándose sólo en la información de estudios geofísicos realizados a la fecha, que los sectores en los que efectivamente se requería de una mayor profundización en la prospección geofísica eran los Sectores 1 y 2. Es importante mencionar también que si bien en ambos sectores existe un estudio TEM reciente, desarrollado por SERNAGEOMIN (2011a), la mayoría de los sondeos ejecutados en el área tuvieron que ser descartados, debido a que fueron medidos en sitios con presencia de parronales (redes alambradas) que alteran las señales en el subsuelo y consecuentemente los resultados que se obtienen.

## **7.5 Propuesta de Prospecciones Geofísicas en Sector Alto Acuífero Copiapó**

Como se indicó en el acápite anterior, existen dos sectores en los que había deficiencia de información (en función del análisis espacial de distribución), los que corresponden a los Sectores 1 y 2. En ambos casos existía la necesidad de profundizar la información disponible.

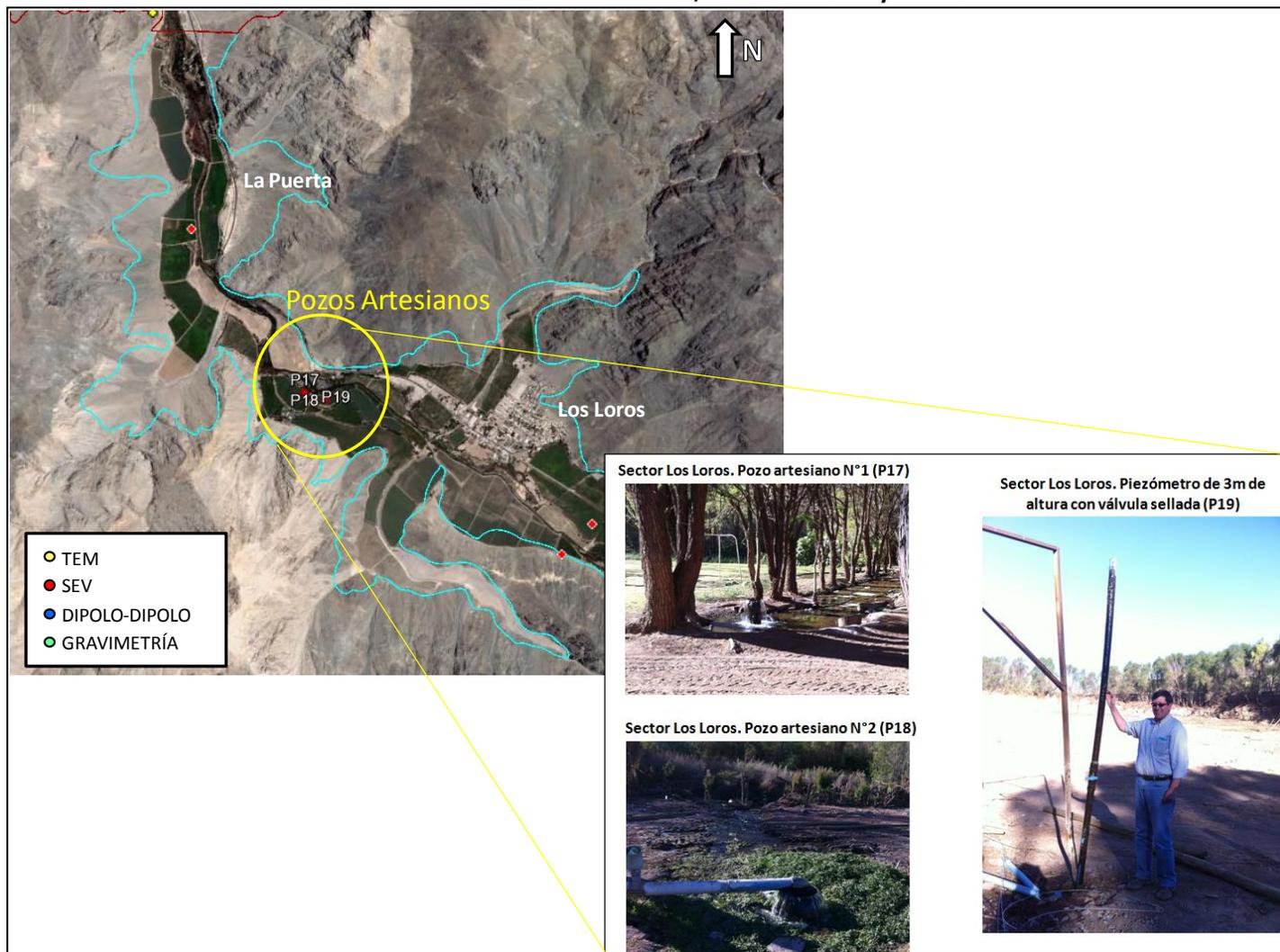
En el Sector 1 dicha necesidad estaba asociada a lograr un mayor conocimiento del basamento rocoso en términos de su profundidad (básicamente) y la extensión del relleno sedimentario, lo cual está asociado al análisis de sub-sectorización que forma parte de uno de los alcances de esta consultoría.

En el Sector 2, particularmente existe un tramo (Los Loros – La Puerta) donde existen algunas dudas respecto a la conformación del basamento. Lo anterior basado en los niveles piezométricos que se registran en el sector (pozos artesianos), que fue confirmado en la campaña de terreno desarrollada por HIDROMAS CEF en Agosto 2013 (ver Figura 7.6), lo cual no se condice totalmente con la definición del basamento en la zona (perfiles SERNAGEOMIN).

En la Figura 7.7 se muestra el perfil D-D' correspondiente al sector Hornito – Los Loros, este perfil hidrogeológico desarrollado por SERNAGEOMIN (2012), muestra que en el sector en el que se ubican los pozos artesianos observados en terreno (encerrados en óvalo amarillo) se registraría un alzamiento del basamento rocoso, lo que es consistente con los niveles piezométricos mayores a la cota de terreno que se observan en dicho sector. Sin embargo, si se observa aguas abajo, en el sector La Puerta (encerrado en rectángulo rojo), los niveles piezométricos seguirían estando por sobre la cota de terreno, lo que no es del todo consistente con la interpretación hecha por SERNAGEOMIN (2012), que muestra una profundización del basamento rocoso en ese mismo sector.

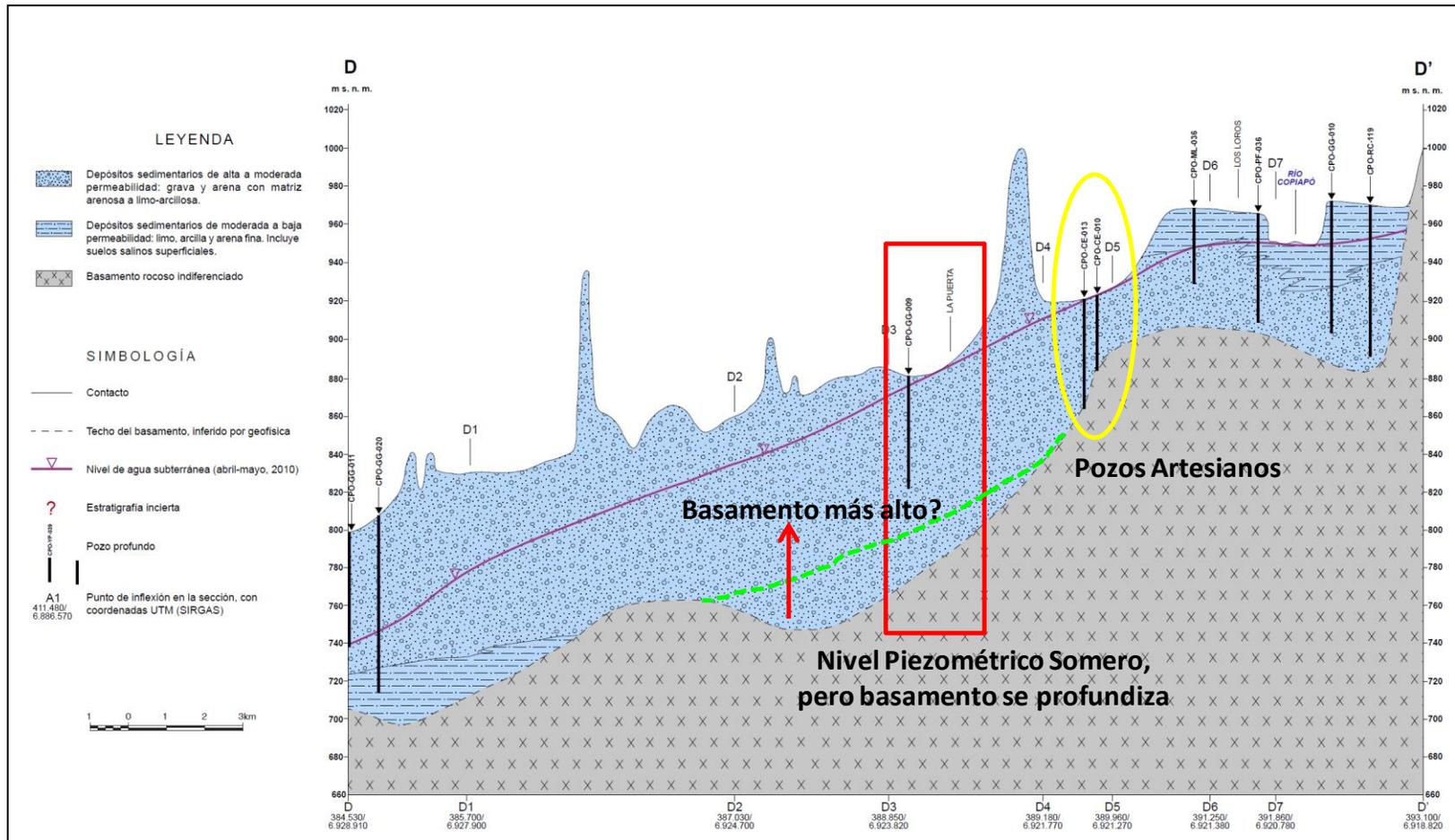
Lo anterior llevó a considerar que este sector también debía ser estudiado con más detalle, en lo que se refiere a la profundidad del basamento rocoso, lo que justificaría la necesidad de realizar prospecciones geofísicas en este sector.

**Figura 7.6**  
**Ubicación Pozos Artesianos Sector 2, entre Los Loros y La Puerta**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 7.7**  
**Perfil Hidrogeológico Sector Hornito – Los Loros**



Fuente: Elaboración Propia a partir de Figura 11.5 de SERNAGEOMIN (2012).

En función de todo lo antes señalado, en reunión con DPI Ingenieros (contratistas encargados de la ejecución de la campaña de geofísica) se planteó la posibilidad de realizar, con el número definido de 60 gravimetrías y 20 Strata Gem, un estudio que cubriera ambos sectores. Se plantearon dos alternativas, la primera en que se concentra toda la prospección en el Sector 1 y la segunda en que se distribuyen los puntos tanto en el Sector 1 como 2. La distribución de los puntos para ambas alternativas se muestra en las Tablas 7.4 y 7.5.

**Tabla 7.4**  
**Distribución Puntos Geofísica Alternativa 1**

	<b>Gravimetría</b>	<b>Strata GEM</b>
Manflas	17	4
Pulido	21	4
Jorquera	16	3
Copiapó (Sector 1)	6	9
<b>TOTAL</b>	<b>60</b>	<b>20</b>

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 7.5**  
**Distribución Puntos Geofísica Alternativa 2**

	<b>Gravimetría</b>	<b>Strata GEM</b>
Manflas	12	3
Pulido	17	3
Jorquera	13	3
Copiapó (Sector 1)	6	8
Copiapó (Sector 2)	12	3
<b>TOTAL</b>	<b>60</b>	<b>20</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez desarrolladas estas dos alternativas, se presentaron a la Dirección General de Aguas (en reunión con el Sr. Miguel Ángel Caro, inspector fiscal de esta asesoría, y el Sr. Guillermo Madariaga, sub-director de la DGA), llegándose a la conclusión que la mejor alternativa era la segunda, ya que permite incorporar nueva información tanto a los Sectores 1 y 2, considerando los objetivos que se tienen para ambos sectores (ya mencionados anteriormente).

De esta forma se llegó a la configuración preliminar de puntos que se muestra de manera referencial en las Figuras 7.8 a 7.10, en las que se observa la distribución de puntos de Gravimetría y Strata Gem en ambos sectores de interés.

Por último, es importante destacar que para la selección de la propuesta de ubicación preliminar de los puntos de prospección, se consideraron los siguientes aspectos:

- Pozos con estratigrafía que hayan alcanzado roca cercanos.
- Estaciones fluviométricas DGA cercanas.
- Puntos con prospección geofísica de estudios anteriores.
- Extensión modelo numérico subterráneo.
- Caminos existentes.
- Perfiles en el eje del valle.

## 7.6 Principales Resultados de la Campaña de Terreno

Los trabajos de terreno desarrollados por la consultora DPI Ingenieros, se desarrollaron entre los días lunes 23 de Septiembre y martes 01 de Octubre de acuerdo a lo que se describe en la Tabla 7.6.

**Tabla 7.6**  
**Distribución Puntos Geofísica Alternativa 2**

<b>Fecha</b>	<b>Actividad</b>
Lunes 23 Septiembre	Viaje Personal DPI desde Santiago a Copiapó, llegada a las 19:00 hrs.
Martes 24 Septiembre	Planificación trabajos y Reconocimiento de Terreno. Inicio mediciones Topográficas y Gravimétricas.
Miércoles 25 a Viernes 27 Septiembre	Mediciones Topográficas, Gravimétricas y Electromagnéticas. Finalizan mediciones gravimétricas.
Sábado 28 Septiembre	Se finalizan 60 mediciones gravimétricas.
Domingo 29 Septiembre	Desmovilización de equipos geofísicos en terreno y retorno a Santiago.
Lunes 30 Septiembre y Martes 01 Octubre	Término mediciones topográficas y desmovilización de equipos con retorno a Santiago.

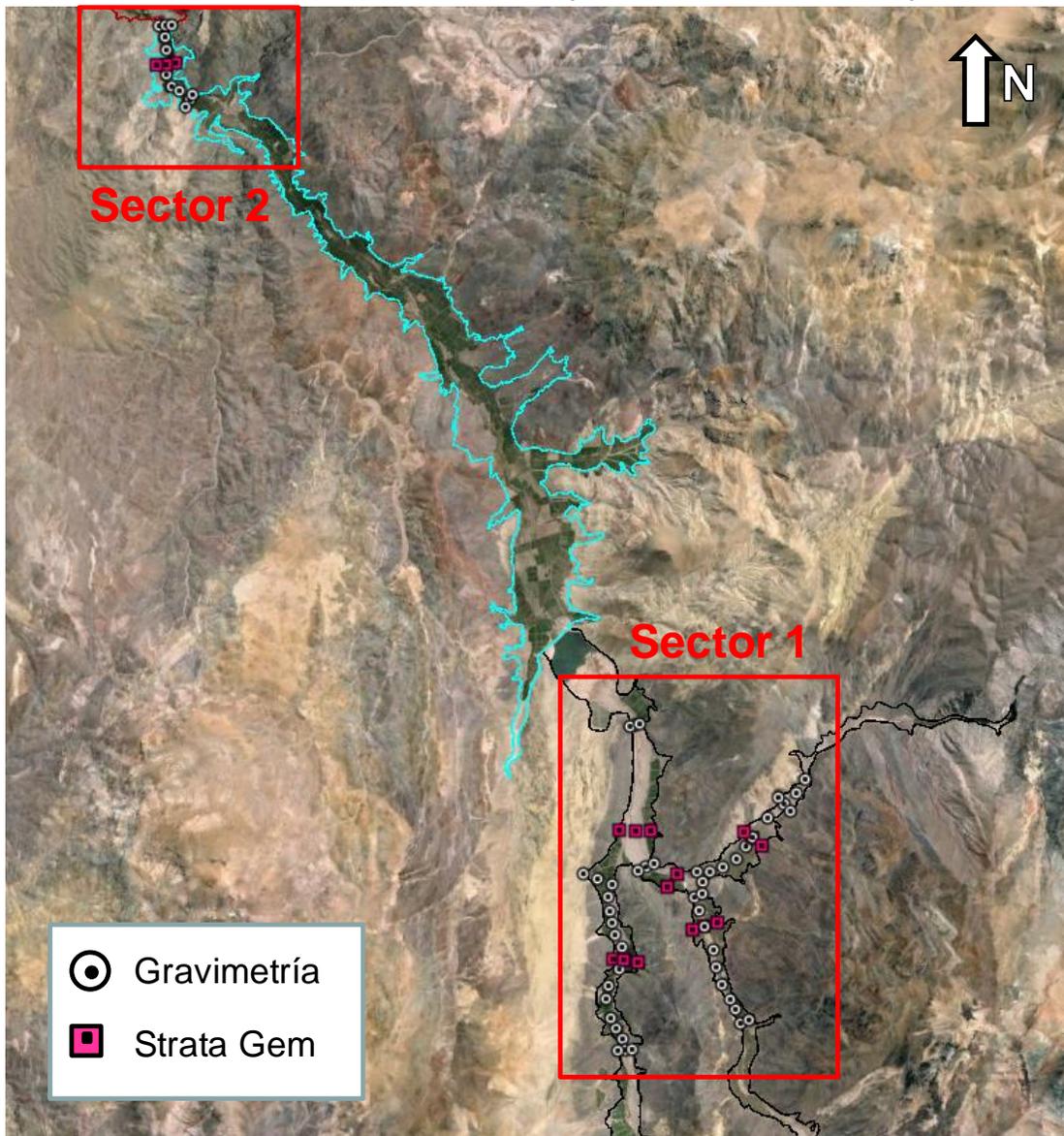
Fuente: DPI Ingenieros (2013).

De acuerdo a la planificación inicial descrita en los acápite anteriores, se llevó a cabo un total de 63 puntos gravimétricos (DPI incorporó 3 puntos más a los inicialmente solicitados) y 20 puntos electromagnéticos (Strata Gem), distribuidos en los Sectores 1 y 2 del acuífero del Copiapó.

Las coordenadas y cotas de terreno de los puntos de medición fueron determinados mediante una estación total, y sus principales características se describen en la Tabla 7.7 para el Sector 1 y en la Tabla 7.8 para el Sector 2.

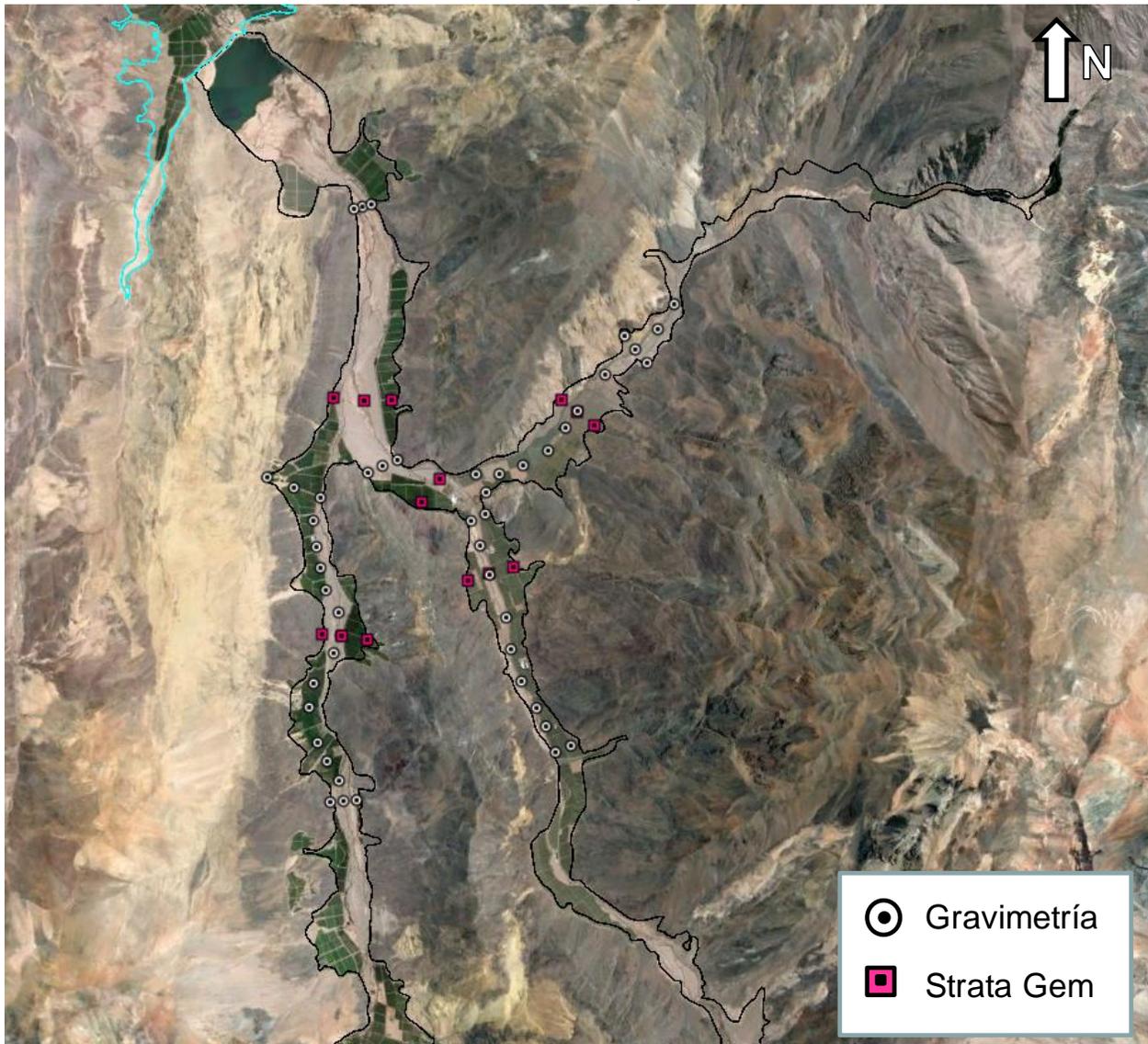
En el Anexo G del presente documento, se entregan más detalles respecto a los trabajos desarrollados en terreno.

Figura 7.8  
Ubicación Referencial Puntos de Prospección Geofísica Sectores 1 y 2



Fuente: Elaboración Propia a partir de imagen Google Earth.

**Figura 7.9**  
**Ubicación Referencial Puntos de Prospección Geofísica Sector 1**



Fuente: Elaboración Propia a partir de imagen Google Earth.

**Figura 7.10**  
**Ubicación Referencial Puntos de Prospección Geofísica Sector 2**



Fuente: Elaboración Propia a partir de imagen Google Earth.

**Tabla 7.7**  
**Características Topográficas Puntos Geofísicos – Sector 1**

<b>Nº</b>	<b>Punto</b>	<b>Característica</b>	<b>Sector</b>	<b>Valle</b>	<b>UTM Este</b>	<b>UTM Norte</b>	<b>Cota (m s.n.m.)</b>
1	C-G1-S1	Gravimetría	S1	Copiapó	404.673	6.897.642	1.248,5
2	C-G2-S1	Gravimetría	S1	Copiapó	404.427	6.997.415	1.245,3
3	C-G3-S1	Gravimetría	S1	Copiapó	404.147	6.897.330	1.242,5
4	C-G4-S1	Gravimetría	S1	Copiapó	404.188	6.901.891	1.203,1
5	C-G5-S1	Gravimetría	S1	Copiapó	403.994	6.901.924	1.190,6
6	C-G6-S1	Gravimetría	S1	Copiapó	403.791	6.901.877	1.190,1
7	M-G0-S1	Gravimetría	S1	Manflas	404.011	6.892.008	1.333,4
8	M-G1-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.592	6.891.934	1.335,0
9	M-G2-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.822	6.891.887	1.334,5
10	M-G3-S1	Gravimetría	S1	Manflas	404.068	6.892.003	1.338,6
11	M-G4-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.757	6.892.181	1.329,4
12	M-G5-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.821	6.892.535	1.324,5
13	M-G6-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.684	6.892.819	1.320,9
14	M-G7-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.362	6.893.404	1.306,3
15	M-G8-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.445	6.893.820	1.300,7
16	M-G1-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.498	6.893.964	1.297,0
17	M-G9-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.632	6.894.343	1.290,4
18	M-G10-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.712	6.894.758	1.282,8
19	M-G11-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.707	6.895.035	1.278,6
20	M-G12-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.481	6.895.413	1.272,5
21	M-G13-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.383	6.895.782	1.266,0
22	M-G14-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.309	6.896.144	1.259,3
23	M-G15-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.246	6.896.589	1.254,8
24	M-G16-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.387	6.896.962	1.248,8
25	M-G17-S1	Gravimetría	S1	Manflas	403.234	6.896.993	1.251,6
26	M-G18-S1	Gravimetría	S1	Manflas	402.635	6.897.379	1.322,9
27	P-G1-S1	Gravimetría	S1	Pulido	408.091	6.892.751	1.429,7
28	P-G2-S1	Gravimetría	S1	Pulido	407.206	6.893.129	1.339,8
29	P-G3-S1	Gravimetría	S1	Pulido	406.895	6.893.520	1.328,4
30	P-G4-S1	Gravimetría	S1	Pulido	406.737	6.893.461	1.339,2
31	P-G5-S1	Gravimetría	S1	Pulido	406.839	6.893.914	1.323,7
32	P-G6-S1	Gravimetría	S1	Pulido	407.119	6.893.591	1.331,6
33	P-G7-S1	Gravimetría	S1	Pulido	406.566	6.894.992	1.300,7
34	P-G8-S1	Gravimetría	S1	Pulido	406.270	6.895.716	1.287,1
35	P-G10-S1	Gravimetría	S1	Pulido	406.098	6.896.212	1.278,1
36	P-G11-S1	Gravimetría	S1	Pulido	405.939	6.896.625	1.269,9
37	P-G12-S1	Gravimetría	S1	Pulido	406.178	6.896.743	1.272,5

**Tabla 7.7 (Continuación)**  
**Características Topográficas Puntos Geofísicos – Sector 1**

Nº	Punto	Característica	Sector	Valle	UTM Este	UTM Norte	Cota (m s.n.m.)
38	J-G1-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	409.246	6.900.274	1.335,2
39	J-G2-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	409.065	6.899.919	1.328,5
40	J-G3-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	408.775	6.899.536	1.319,7
41	J-G4-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	408.774	6.899.691	1.321,5
42	J-G5-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	408.903	6.899.286	1.318,3
43	J-G6-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	408.180	6.899.136	1.309,4
44	J-G8-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	407.726	6.898.517	1.301,0
45	J-G9-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	407.522	6.898.230	1.287,4
46	J-G10-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	407.231	6.897.841	1.284,5
47	J-G11-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	406.809	6.897.573	1.275,1
48	J-G12-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	406.409	6.897.425	1.269,6
49	J-G13-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	406.009	6.897.414	1.264,0
50	J-G14-S1	Gravimetría	S1	Jorquera	406.215	6.897.057	1.269,1
51	C-SG1-S1	Electromag.	S1	Copiapó	404.548	6.898.657	1.234,7
52	C-SG2-S1	Electromag.	S1	Copiapó	404.079	6.898.645	1.229,3
53	C-SG4-S1	Electromag.	S1	Copiapó	403.562	6.898.674	1.232,0
54	C-SG5-S1	Electromag.	S1	Copiapó	403.836	6.898.668	1.227,4
55	C-SG3-S1	Electromag.	S1	Copiapó	405.092	6.896.925	1.260,8
56	C-SG5-S1	Electromag.	S1	Copiapó	405.392	6.897.327	1.257,3
57	M-SG1-S1	Electromag.	S1	Manflas	403.446	6.894.646	1.286,7
58	M-SG2-S1	Electromag.	S1	Manflas	403.617	6.894.669	1.285,2
59	M-SG3-S1	Electromag.	S1	Manflas	403.767	6.894.633	1.284,9
60	M-SG4-S1	Electromag.	S1	Manflas	403.962	6.894.615	1.307,4
61	P-SG1-S1	Electromag.	S1	Pulido	406.517	6.895.924	1.340,3
62	P-SG2-S1	Electromag.	S1	Pulido	406.223	6.895.819	1.285,2
63	P-SG3-S1	Electromag.	S1	Pulido	405.903	6.895.611	1.292,3
64	J-SG1-S1	Electromag.	S1	Jorquera	407.469	6.898.672	1.298,9
65	J-SG2-S1	Electromag.	S1	Jorquera	407.720	6.898.502	1.299,1
66	J-SG3-S1	Electromag.	S1	Jorquera	408.010	6.898.265	1.328,2

Fuente: DPI Ingenieros (2013).

**Tabla 7.8**  
**Características Topográficas Puntos Geofísicos – Sector 2**

Nº	Punto	Característica	Sector	Valle	UTM Este	UTM Norte	Cota (m s.n.m.)
1	C-G1-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	389.026	6.923.402	934,7
2	C-G2-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	388.889	6.923.442	919,9
3	C-G3-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	388.742	6.923.698	916,8
	C-G4-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	se omitió		
4	C-G5-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	389.003	6.923.000	924,6
5	C-G6-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	388.680	6.922.848	943,5
6	C-G7-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	389.131	6.922.866	931,8
7	C-G8-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	388.982	6.922.388	932,5
8	C-G9-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	389.013	6.922.096	937,7
9	C-G10-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	389.467	6.921.661	943,6
10	C-G11-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	389.516	6.921.387	948,6
11	C-G12-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	390.136	6.921.094	969,7
12	C-G13-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	390.230	6.920.865	987,7
13	C-G14-S2	Gravimetría	S2	Copiapó	390.394	6.921.024	967,7
14	C-SG1-S2	Electromag.	S2	Copiapó	389.232	6.922.433	942,7
15	C-SG2-S2	Electromag.	S2	Copiapó	389.128	6.922.496	934,0
16	C-SG3-S2	Electromag.	S2	Copiapó	388.888	6.922.377	934,2
17	C-SG4-S2	Electromag.	S2	Copiapó	388.758	6.922.389	955,2

Fuente: DPI Ingenieros (2013).

## **7.7 Análisis de Resultados de la Geofísica**

### **7.7.1 Aspectos Generales**

La empresa DPI Ingenieros realizó una investigación geofísica con la finalidad de mejorar el conocimiento, en los niveles superiores del valle del río Copiapó, ríos Manflas, Pulido, Jorquera, sector La Junta y Los Loros, de la geometría del sistema acuífero (definición del basamento rocoso).

Para tales efectos se aplicaron los métodos gravimétrico y electromagnético (Strata Gem) los cuales, midiendo los efectos de atracción del campo gravitacional de las masas del subsuelo y las resistividades que ellas presentan, permiten calcular las profundidades del basamento rocoso y caracterizar los materiales del relleno sedimentario.

Las áreas de estudio se diferenciaron en “Sector 1” correspondiente a la “Junta de los ríos Manflas, Pulido y Jorquera”, y “Sector 2” correspondiente al valle del río Copiapó, entre las localidades de Los Loros y La Puerta.

Se realizaron 63 mediciones gravimétricas y 20 mediciones electromagnéticas (Strata Gem), en las cuales los perfiles gravimétricos se ubicaron preferentemente en dirección longitudinal a los valles, mientras que los perfiles electromagnéticos se ubicaron transversales a éstos.

Los resultados obtenidos en el estudio gravimétrico se presentan en secciones verticales 1:5000 con indicaciones de la profundidad del basamento rocoso para un contraste de densidad de 0,5 mgal entre roca y relleno sedimentario (dichas secciones se entregan en el Anexo G). En el caso del estudio

electromagnético, los resultados se presentan en secciones verticales 1:1000 que muestran la distribución de la resistividad del subsuelo (dichas secciones se entregan en el Anexo G).

Dentro de los principales resultados y conclusiones del estudio desarrollado por DPI Ingenieros se pueden indicar, a modo de resumen, los siguientes temas (para más detalles consultar Anexo G).

### **7.7.2 Sector 1: Junta Río Manflas, Pulido, Jorquera y Valle Copiapó**

Se ejecutaron 4 perfiles gravimétricos y 5 perfiles electromagnéticos, cuya ubicación se muestra de manera esquemática en la Figura 7.11 (el detalle de los perfiles se puede ver en Anexo G).

En el valle del río Manflas se desarrolló el perfil gravimétrico G-1 y el perfil electromagnético EM-1; en el valle del río Pulido se desarrolló el perfil gravimétrico G-2 y el perfil electromagnético EM-2; en el valle del río Jorquera se desarrolló el perfil gravimétrico G-3 y el perfil electromagnético EM-3; aguas abajo de la junta de los ríos Jorquera y Pulido se desarrolló el perfil gravimétrico G-4 y el perfil electromagnético EM-4; y aguas abajo de la junta de los ríos Copiapó y Manflas se desarrolló el perfil EM-5.

- Perfiles Gravimétricos:

- *Valle Río Manflas:*

- Se detectaron tres cuencas a lo largo del perfil gravimétrico. La primera de éstas con una profundidad de 380 m, la segunda con una profundidad de 320 m y finalmente una tercera cuenca con profundidad de 600 m.

- *Valle Río Pulido:*

- Se detectaron dos cuencas. En la primera de ellas el basamento rocoso alcanza profundidades entre 325 m y 350 m.
- La segunda cuenca es bastante menor y se encuentra ubicada en el extremo NW del perfil. La roca alcanza una profundidad de 150 m.

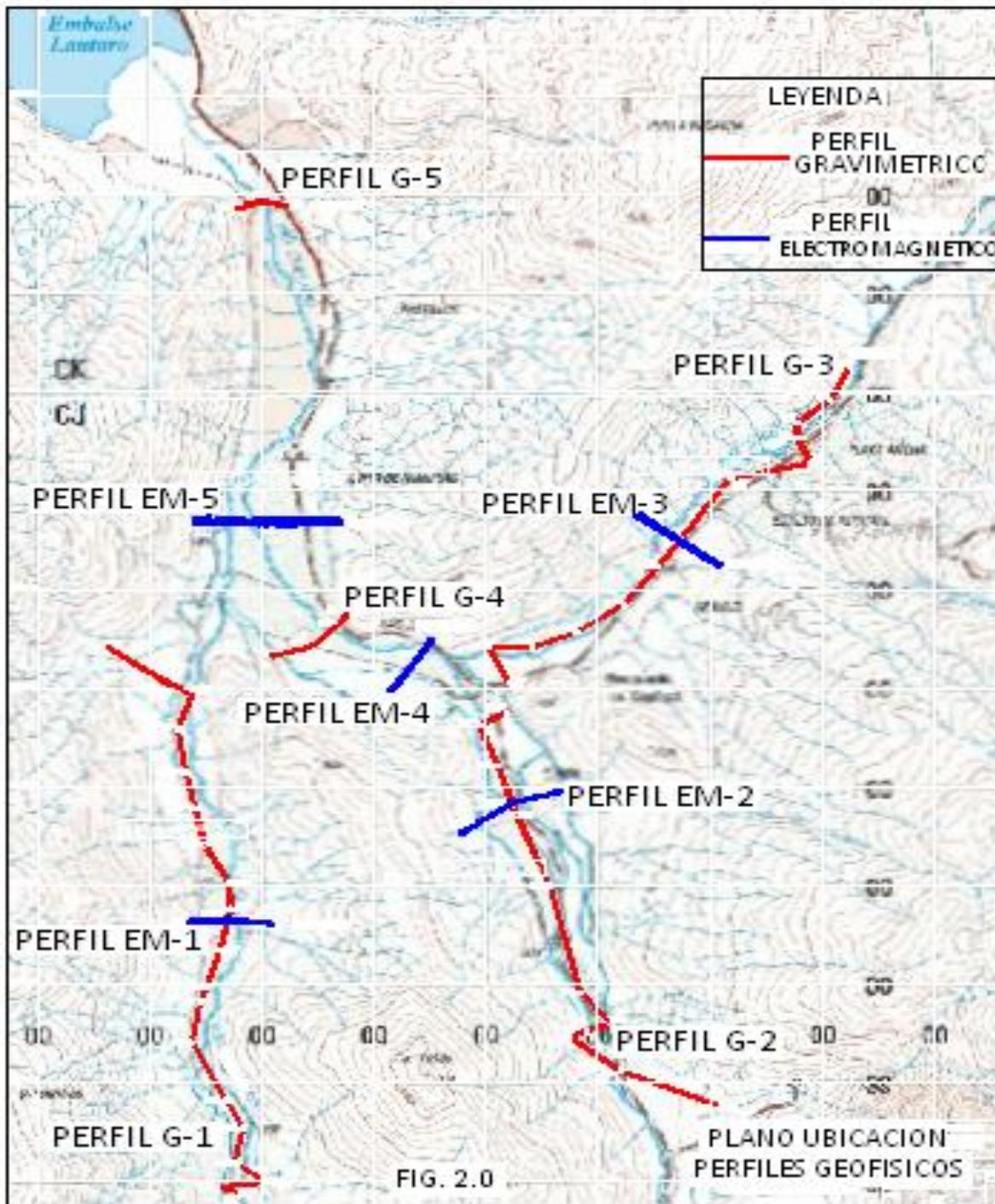
- *Valle Río Jorquera:*

- Se detectó en la parte inicial del perfil el desarrollo de una cuenca importante con una profundidad de 300 m.

- *Valle Río Copiapó, Sector La Junta:*

- La roca fundamental profundiza en los sectores correspondientes al actual curso del río Copiapó, observándose profundidades variables entre 35 y 80 m.

Figura 7.11  
Ubicación Perfiles Geofísicos Sector 1



Fuente: DPI Ingenieros (2013).

- Perfiles Electromagnéticos:

- *Valle Río Manflas:*

- Sobrecarga o cubierta sedimentaria. Esta unidad presenta un espesor máximo de 15 m preferentemente hacia el sector E del valle.
- Rocas descompuestas y/o Fracturadas. Estas unidades comprometen profundidades entre 10 y 40 m.
- Rocas Fracturadas a Sanas. Éstas presentan resistividades mayores que 250 ohm-m manifestándose a una profundidad mayor que 40 m.

- *Valle Río Pulido:*

- El subsuelo se caracteriza por la presencia de una gran masa rocosa, de alta resistividad, ubicada en la zona central del perfil.

- *Valle Río Jorquera:*

- Relleno sedimentario de aproximadamente 170 m y que se reduce a 50 m hacia el sector de la Junta.
- La base de esta unidad sedimentaria presenta resistividades propias de niveles saturados revelando la existencia de un acuífero de gran potencial.

- *Valle Río Copiapó, Sector La Junta:*

- Presenta una sobrecarga de muy bajo espesor, menor que 15 m. Bajo esta unidad se presentan rocas descompuestas y/o fracturadas.
- A mayor profundidad se observa un incremento sostenido de las resistividades, las que se asocian a la presencia de la roca fundamental.

### **7.7.3 Sector 2: Valle del Río Copiapó – Sector Los Loros-La Puerta**

Se ejecutaron 2 perfiles gravimétricos y un perfil electromagnético, cuya ubicación se muestra de manera esquemática en la Figura 7.12 (el detalle de los perfiles se puede ver en Anexo G). Ubicados en la misma quebrada del río Copiapó partiendo de la localidad de Los Loros se ejecutaron los perfiles gravimétricos G-6 y G-7 y el electromagnético EM-6.

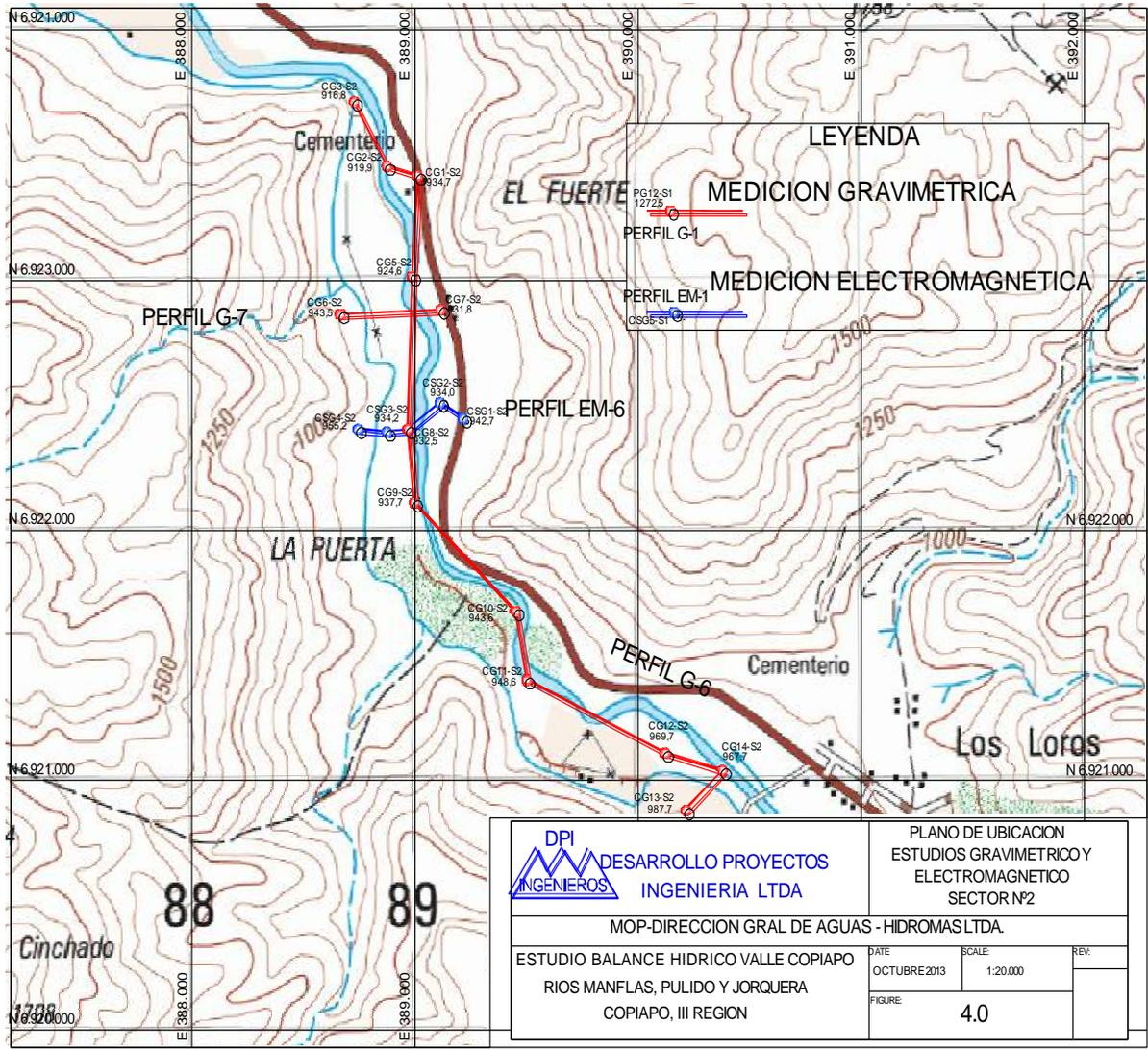
- Perfiles Gravimétricos:

Se observaron las siguientes características:

- Presentan una cobertura amplia con espesores promedio de 127 m, que disminuyen hacia ambos extremos del perfil en donde se ven algunos afloramientos rocosos.
- En el centro del perfil gravimétrico se observa un levantamiento del basamento coincidente con la angostura del sector La Puerta en donde se determinó una profundidad de 14 m a la roca.

**Figura 7.12**  
**Ubicación Perfiles Geofísicos Sector 2**

**SECTOR Nº2 VALLE RIO COPIAPO - LOS LOROS**



Fuente: DPI Ingenieros (2013).

- Perfil Electromagnético:

Se detectaron las siguientes características:

- Existe una estructura vertical que se estima corresponde a una falla con condiciones favorables para encauzar las aguas subterráneas que provienen de los sectores altos.
- Hacia ambos extremos del perfil el relleno sedimentario alcanza una profundidad de 30 m. A mayor profundidad sólo se detectaron rocas descompuestas y/o rocas fracturadas.

No obstante se detecta la presencia de una falla, se estima una alta probabilidad de que el relleno sedimentario constituya un acuífero de gran potencia.

## 8. PROPUESTA SECTORIZACIÓN SECTOR ACUÍFERO 1

Con base en resultados de la geofísica y el análisis de la información geográfica, hidrológica e hidrogeológica disponible se ha preparado una propuesta de sectorización del actual Sector Acuífero 1 del valle de Copiapó.

En este caso, y tal como se observa en la Figura 8.1, se pueden identificar cuatro subsectores que componen el Sector Acuífero 1:

- Subsector 01 – Río Jorquera (SS01RJ)
- Subsector 01 – Río Pulido (SS01RP)
- Subsector 01 – Río Manflas (SS01RM)
- Subsector 01 – Río Copiapó (SS01RC)

Tres de estos subsectores (Río Jorquera, Río Pulido y Río Manflas) se han separado principalmente en base a un criterio de tipo hidrológico en términos del origen de sus recursos tanto superficiales como subterráneos. Los recursos superficiales se pueden estimar de manera directa a través de la información hidrológica derivada de las estaciones fluviométricas en el sector.

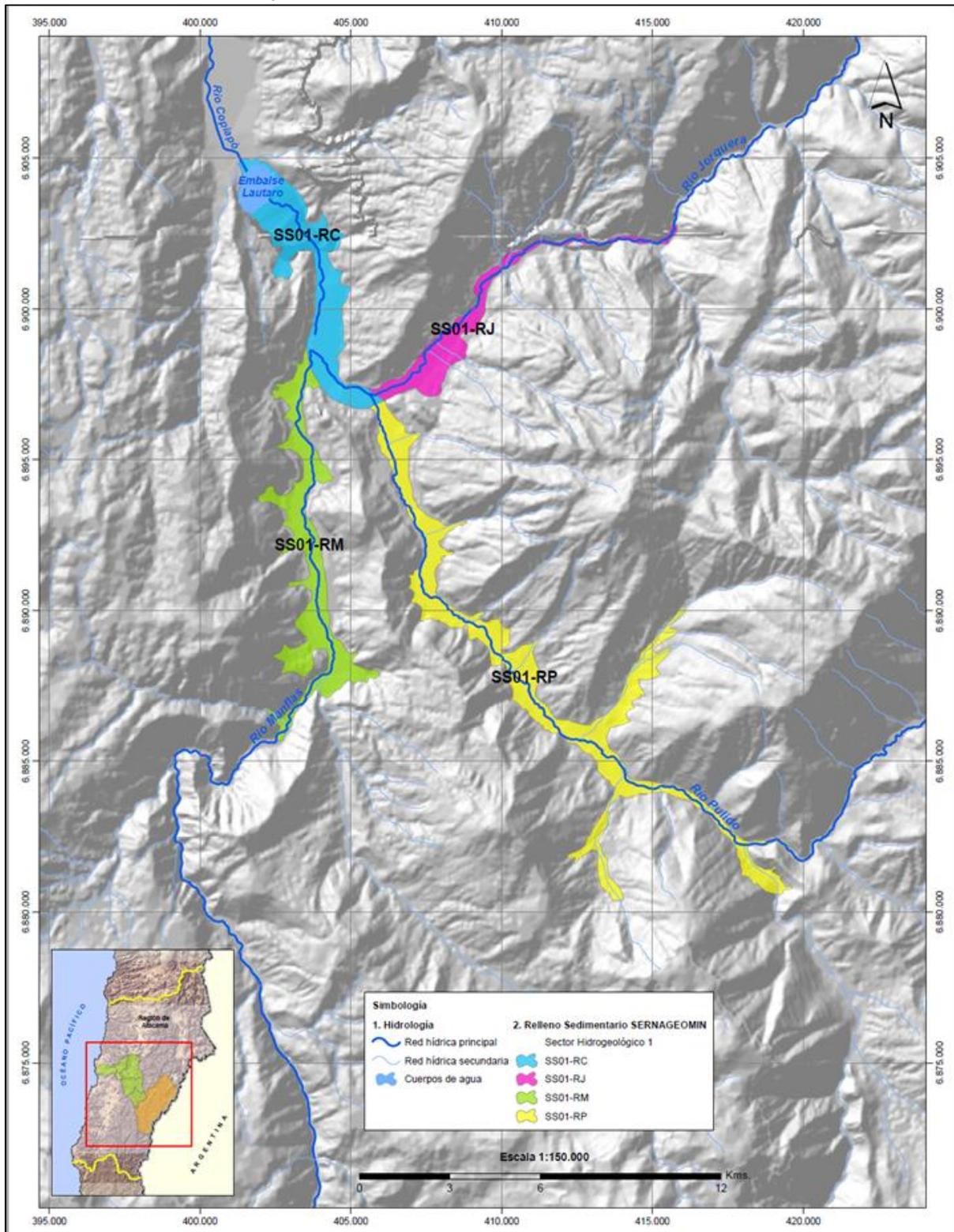
Adicionalmente, los estudios geofísicos desarrollados no evidencian una conexión entre los tres sistemas de cabecera (Jorquera, Pulido y Manflas), lo que también queda de manifiesto con la geología del área. Asimismo, tampoco se evidencia una discontinuidad del relleno sedimentario dentro de cada sistema de cabecera (longitudinalmente), ni una discontinuidad respecto a su conexión con el sistema Copiapó.

En la Figura 8.2 se presenta la ubicación de dos perfiles esquemáticos de las secciones altas y bajas del Sector Acuífero 01 del río Copiapó. Posteriormente en la Figura 8.3 se presentan los dos perfiles y se establece finalmente, de manera esquemática en la Figura 8.4, la sectorización propuesta.

La disponibilidad de agua subterránea en cada uno de estos subsectores está dada por el caudal pasante en una sección de control localizada en el área de la estación fluviométrica, más el caudal de bombeo que hoy día se encuentra en uso (derechos efectivamente en uso).

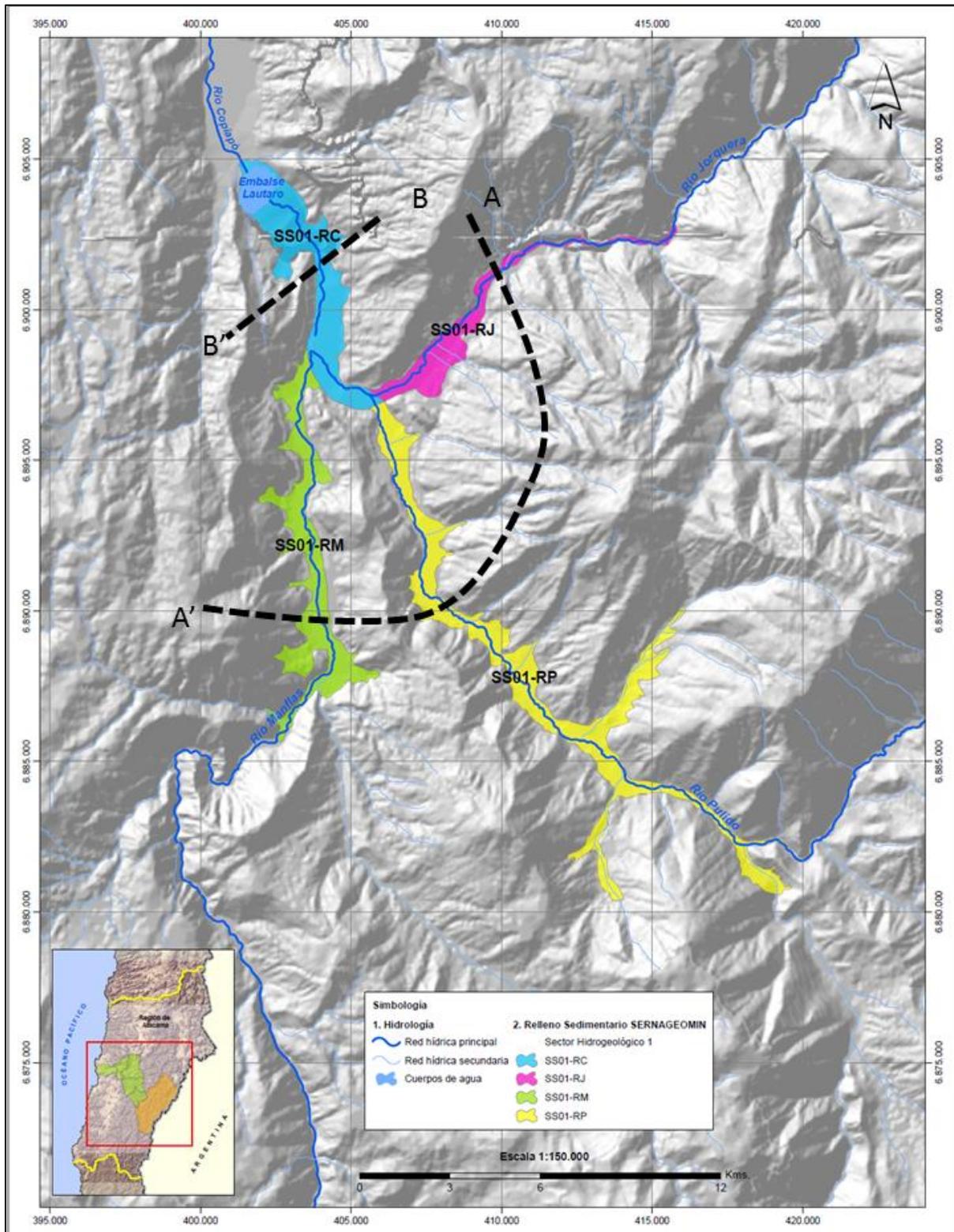
En cada uno de estas secciones es posible estimar el caudal pasante mediante Darcy, a partir de la geometría definida por los nuevos estudios de geofísica (área de escurrimiento), el gradiente hidráulico derivado de la topografía local (gradiente), y la transmisibilidad obtenida mediante el análisis de las pruebas de bombeo realizadas en pozos localizados en dicha área. En este caso específico la información contenida en el modelo subterráneo permite realizar una estimación de dicho caudal pasante, la que se resume en la Figura 8.5. Adicionalmente, en la Figura 8.6 se presenta un resumen con los derechos de aprovechamiento existentes en el área.

**Figura 8.1**  
**Separación de Sector Acuífero 01 en Subsectores**



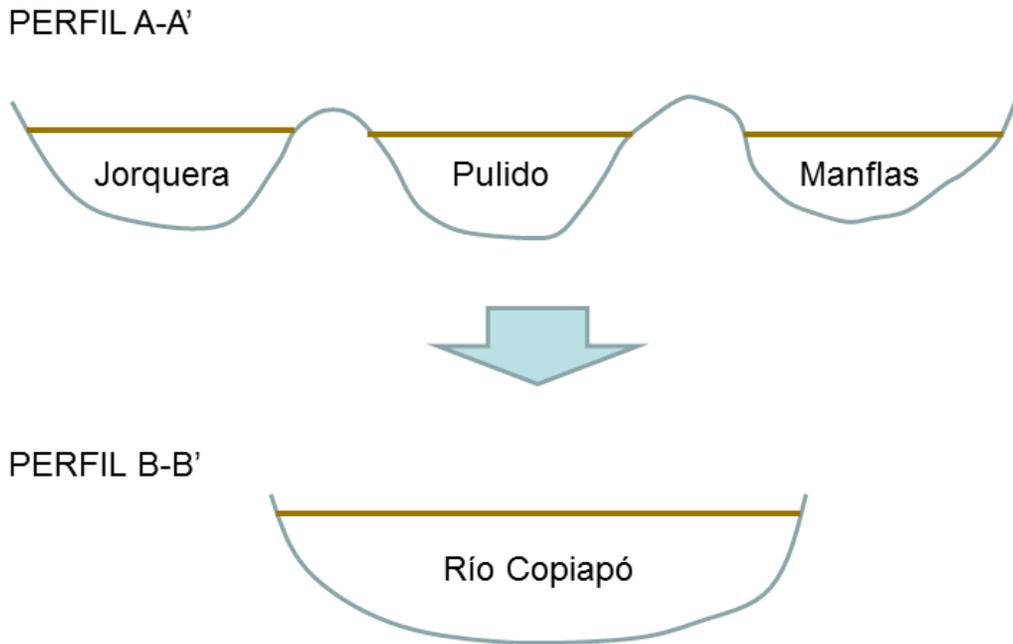
Fuente: Elaboración Propia a partir de imagen Google Earth.

**Figura 8.2**  
**Ubicación de Perfiles Sector Acuífero 01 en Subsectores**

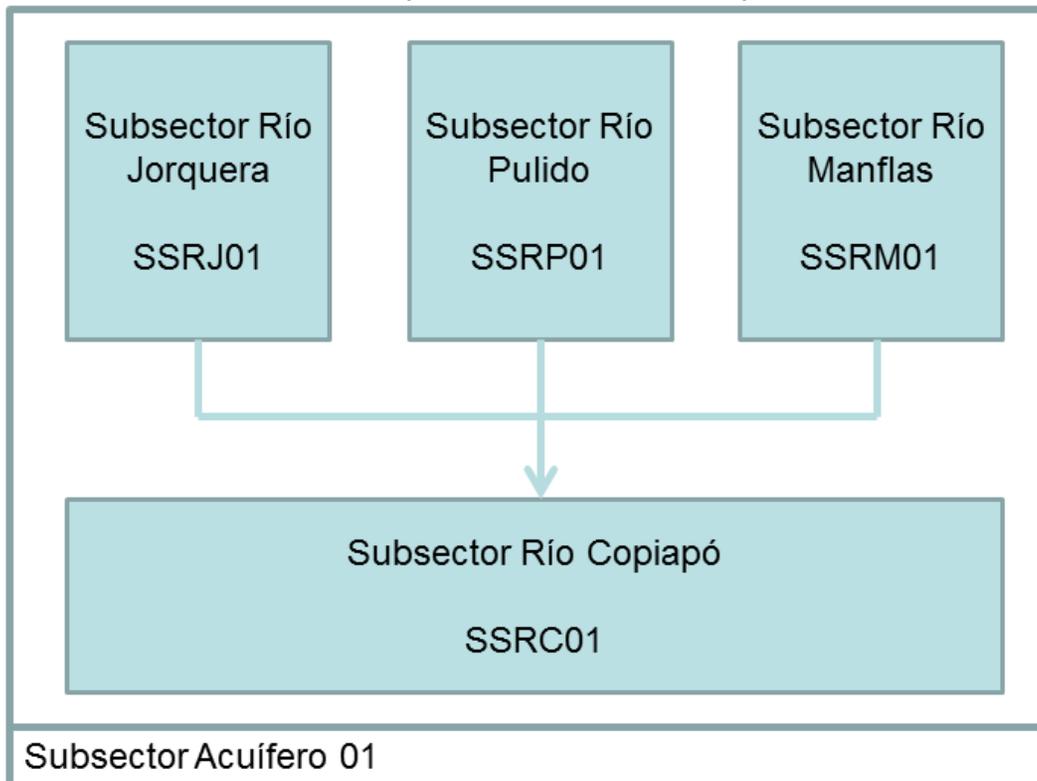


Fuente: Elaboración Propia a partir de imagen Google Earth.

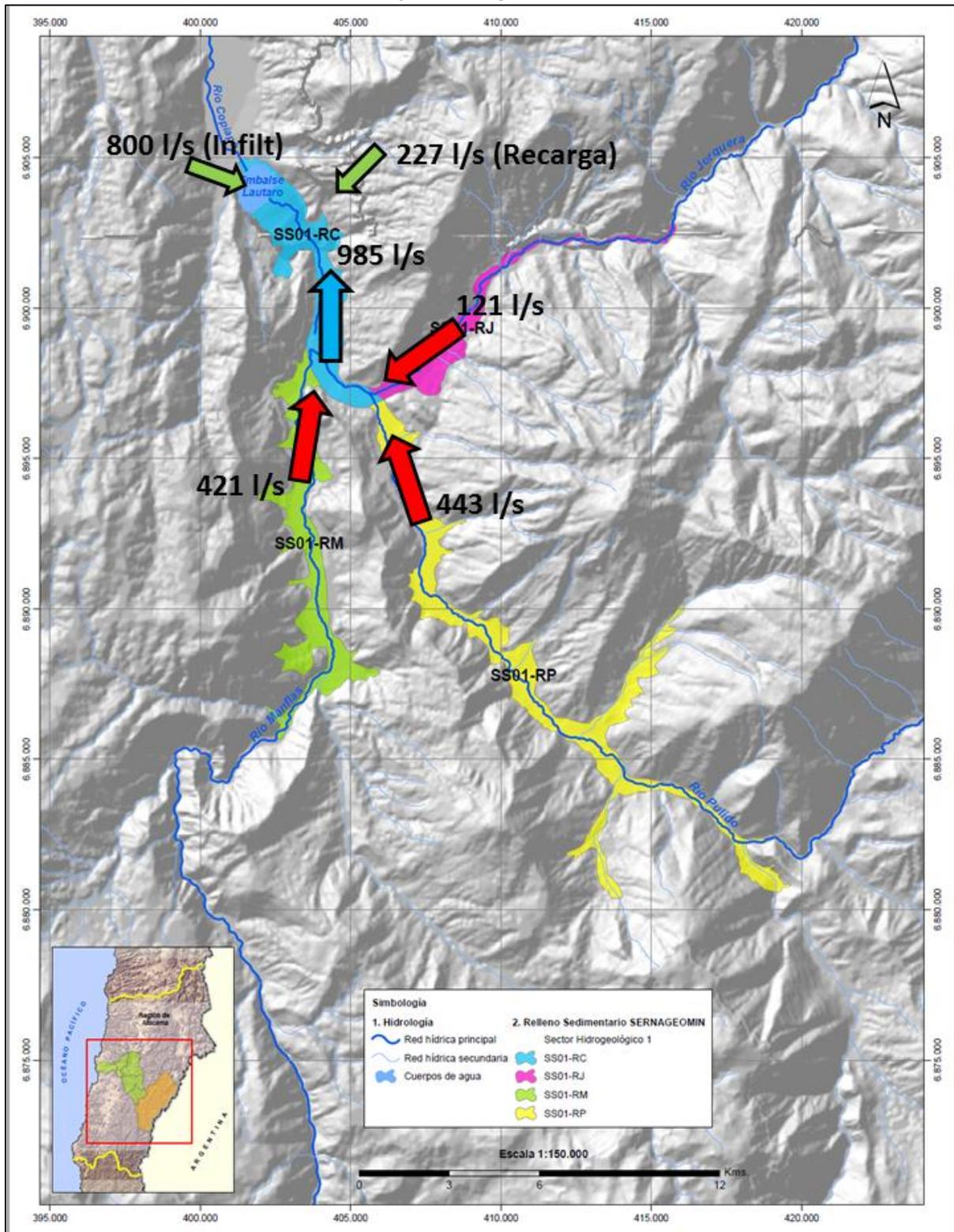
**Figura 8.3**  
**Perfiles Transversales Esquemáticos Sector Acuífero 01**



**Figura 8.4**  
**Definición Esquemática Sectorización Propuesta**

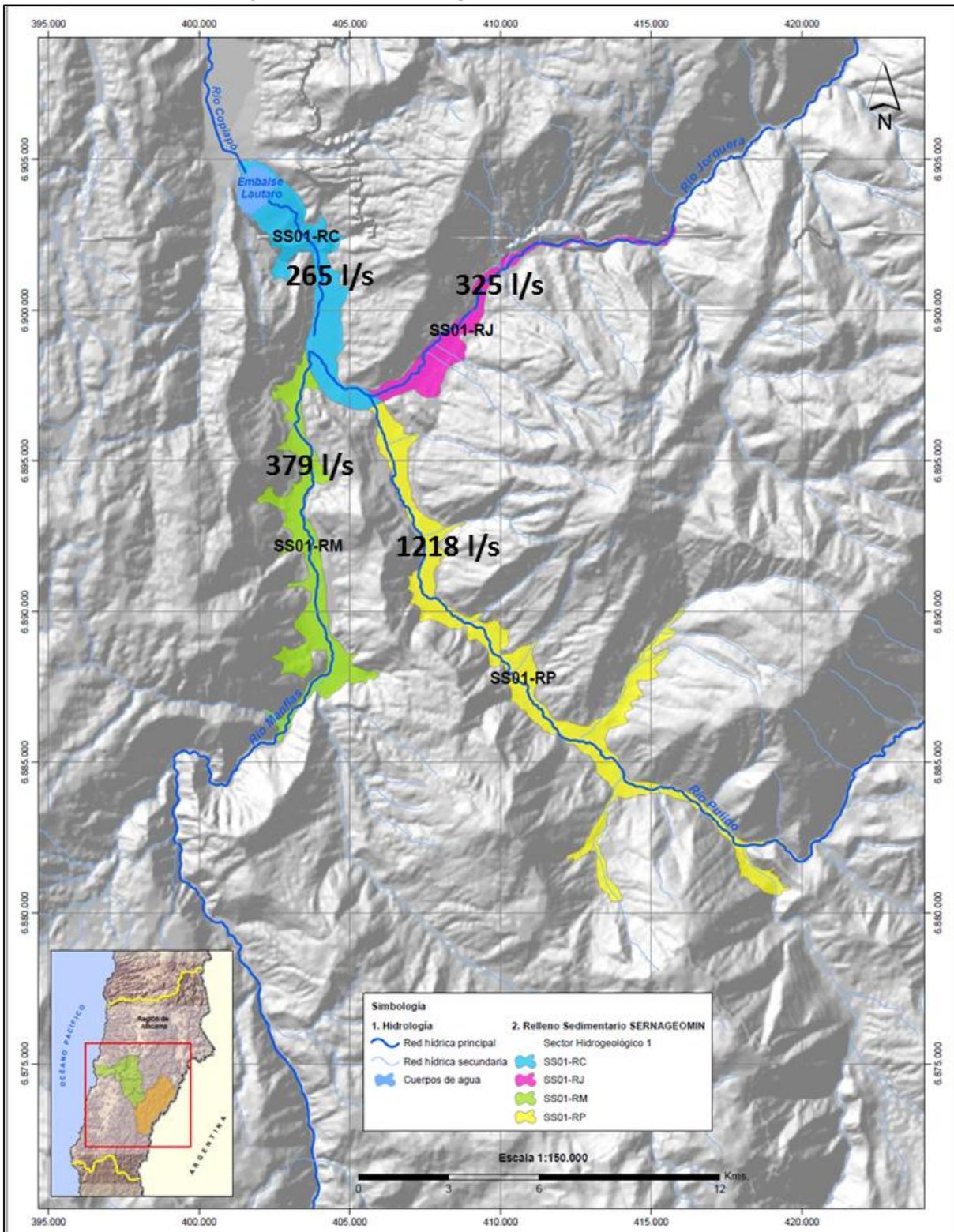


**Figura 8.5**  
**Caudales Pasantes y de Recarga en Secciones de Interés**



Fuente: Elaboración Propia a partir de imagen Google Earth.

**Figura 8.6**  
**Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en Sectores de Interés**



Fuente: Elaboración Propia a partir de imagen Google Earth.

Como reglas generales de funcionamiento de este sistema de asignación de derechos de agua subterránea es posible establecer las siguientes:

- Es posible distinguir dos casos de traslados: desde sectores altos hacia el sector bajo (Copiapó) y viceversa, es decir desde el sector Copiapó hacia los sectores altos.
- No hay posibilidad de trasladar derechos de agua subterránea entre subsectores altos (Jorquera, Pulido y/o Manflas), ya que son fuentes distintas.
- Traslados desde un subsector alto (por ejemplo Jorquera) y el Sector Copiapó son posibles sólo si se cumplen determinadas condiciones técnicas:
  - Oferta de agua disponible en sector de traslado.
  - Cumplimiento de criterios de sustentabilidad DGA.
  - Uso de modelo hidrogeológico para verificar posibilidad de traslado.
- Uso de modelo hidrogeológico permitiría determinar cantidad de agua subterránea que es factible de ser trasladada entre puntos solicitados.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 Conclusiones

Para este proyecto se ha revisado toda la información disponible, lo que abarca trabajos propios de la DGA, SERNAGEOMIN, Aguas Chañar, SISS y otras fuentes de información de tipo hidrogeológica

Se ha actualizado hasta el año 2012 el balance hídrico general del acuífero del río Copiapó comprendido entre la estación Copiapó en La Puerta y la estación Copiapó en Angostura. Para ello, se ha trabajado con la información hidrométrica de la DGA, específicamente los niveles de agua subterránea y los caudales superficiales de las estaciones fluviométricas de Copiapó en La Puerta y Copiapó en Angostura. El análisis propio de éstos datos, indica que la oferta media de este sector es del orden de los  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y las tasas de consumo de almacenamiento se han incrementado en los últimos 7 años desde  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , explicado por una disminución de la oferta hídrica generada por la escasez hidrológica de los últimos años.

Se ha contado para este proyecto con la información de las demandas mineras a nivel mensual desde 2007 a 2012, a partir del registro que los usuarios han entregado a la DGA en el marco del control de extracciones que se está implementando. Si bien, la mayoría de la información no está aprobada por la DGA, ya que se requiere un acto administrativo (resolución) para validar la instrumentalización de los pozos, se considera información de gran valor debido a que ningún trabajo de balance hídrico de esta cuenca ha contado con antecedentes de este nivel de detalle.

Se ha obtenido a partir de ECONSSA la información de los volúmenes de explotación mensual de todos los pozos de bombeo de Aguas Chañar, para el periodo 2007-2012. Esta información resulta valiosa, ya que da cuenta los cambios que ha debido realizar la empresa para poder satisfacer la demanda de agua potable en la zona. De acuerdo a los antecedentes disponibles, hasta el año 2011 toda la explotación de la empresa sanitaria provenía desde el Sector 4. Muchos de estos pozos del Sector 4 han dejado de producir el caudal de explotación original, lo que llevo a la empresa a construir nuevos pozos de bombeo en los Sectores Acuíferos 3 y 5, lo que ha permitido desconcentrar la explotación de los pozos de agua potable. Esta información se considera de alto valor para efectos de la calibración y actualización de los modelos.

Con base en nueva información de terreno se pudo actualizar la ubicación y elevación de los pozos de monitoreo de niveles de agua subterránea, así como la cota de referencia de los niveles freáticos. Todo esto se obtuvo del estudio que H2Cuenca desarrolló para la DGA. Esta información permitió generar series mejoradas de cotas piezométricas (o de nivel de agua subterránea) para el modelo hidrogeológico.

Se desarrolló una condición inicial de los niveles de agua subterránea para la fecha de enero de 1993 a partir de la información de niveles de agua subterránea.

Con base en la información anterior se calibra el modelo de asignación de recursos hídricos AQUATOOL, agregando la demanda Minera y de Agua Potable actualizada para el periodo 2007-2012, y se modifica el consumo de agua potable para los años 1993 a 2006, siguiendo la lógica de la explotación de los pozos de la empresa sanitaria. Esto implicó concentrar toda la explotación de la empresa sanitaria en el sector 4, tal como ocurrió en la realidad pero que no había sido correctamente considerado en estudios previos. Para la actividad minera se utilizó un procedimiento similar para reproducir la demanda histórica de este sector.

Se realizaron diversas mejoras a la topología del modelo AQUATOOL, en cuanto a la representación de los afloramientos en el Sector Acuífero 2, los afloramientos del sector de Angostura en base a imponer el uso de aguas superficiales en la parte baja de la cuenca (situación observada en la visita a terreno), recarga por pérdidas del sistema de agua potable en el Sector Acuífero 4 y descarga del efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas en el Sector Acuífero 5.

La calibración del modelo AQUATOOL para Copiapó, permitió obtener una buena representación de las series de caudal superficial y permitió generar los montos de recarga para el modelo Visual MODFLOW. Adicionalmente, entrega las series de bombeo agrícola que se utilizan en el modelo hidrogeológico, repartido en los pozos definidos en el catastro del estudio DICTUC (2010).

La calibración del modelo numérico de aguas subterráneas abarca el periodo 1993-2012, considerando un periodo de calibración 1993-2010 y de validación 2010-2012. Se obtienen muy buenos indicadores de ajuste tanto para el modelo alto como el modelo bajo. Una de las razones del buen ajuste logrado es la buena representación espacial de la demanda minera y de agua potable, así como el condicionamiento hidrológico que la da el modelo AQUATOOL a la demanda agrícola.

Se realizan tres escenarios de simulación de interés para el Copiapó, que consideran el uso de pozos de agua potable en los Sectores Acuíferos 5 y 6, la puesta en operación de la planta desaladora a partir del año 2023, el efecto de la descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas en el Sector Acuífero 5 y la puesta en operación del proyecto minero Caserones.

Los resultados indican que para el Escenario 1, se proyecta una situación deficitaria para la cuenca del Copiapó, tanto en la satisfacción de la demanda de algunos sectores como en los niveles que presentan descensos sostenidos en los Sistemas Acuíferos 3, 4 y 5.

De acuerdo al resultado del Escenario 2 se espera que el efecto de la venta de agua, se vea reflejado en una disminución de los niveles de agua subterránea sólo en el Sector Acuífero 5 del acuífero de Copiapó. Este efecto se suma al impacto de la explotación de los pozos de agua potable en el sector de Piedra Colgada. La comparación de descargar la totalidad del agua tratada en el río versus la venta de este recurso para nuevos usos en la cuenca, significa una diferencia de niveles de agua subterránea, cercano a la zona de descarga de hasta 20 a 30 m en nivel de la napa.

La operación del proyecto minero Caserones genera una disminución de los caudales superficiales disponibles en la estación Copiapó en Angostura, lo que genera una disminución de la oferta hídrica del acuífero comprendido entre La Puerta y Angostura. Adicionalmente, se estima una disminución media de la recarga hacia el acuífero del orden de 220 L/s aguas abajo de Copiapó en La Puerta, lo que indica una condición de los niveles freáticos mucho más desfavorable que lo que proyecta la condición sin proyecto.

Todos los escenarios muestran que el efecto a la salida de la cuenca es despreciable, debido a que no cambian tanto los niveles de agua subterránea como tampoco los caudales superficiales de la estación Copiapó en Angostura.

## 9.2 Recomendaciones

Se recomienda actualizar cada 2 años la información de entrada al modelo AQUATOOL y numérico Visual MODFLOW de Copiapó, de forma de hacer seguimiento con estas herramientas a los cambios que se observen en el acuífero.

Para lo anterior, es necesario que la DGA mantenga una base de datos de las demandas hídricas realizando el siguiente procedimiento:

- Generar una base de datos mensual de los volúmenes de agua de producción a nivel de pozo de los proyectos mineros, a partir del control de extracciones que rige a estos usuarios. Se considera esta información relevante la calibración del modelo hidrogeológico.
- Solicitar anualmente a Aguas Chañar y/o ECONSSA, que entregue a DGA la información de los volúmenes de producción mensual de los pozos de la sanitaria.
- Realizar catastros de predios y obras cada 10 años en la cuenca del Copiapó, que permitan cuantificar el uso agrícola en la cuenca.

## 10. REFERENCIAS

- Álamos y Peralta 1987. Análisis y Evaluación de los Recursos Hidrogeológicos del Valle del Río Copiapó.
- Aguas Chañar 2009. Situación de los pozos de Aguas Chañar en Copiapó y alternativas de abastecimiento de agua para Copiapó, Caldera y Chañaral,
- Aguas Chañar 2011. Estudio hidrogeológico para precisar el límite entre el tercer y cuarto sector del acuífero de la cuenca del río Copiapó
- CNR 2012. Mejoramiento del Sistema de Aguas Subterráneas para su Utilización en Riego en la Cuenca del Río Copiapó.
- DGA 1993. Resolución DGA Nº193. Declaración de zona de prohibición toda la cuenca para nuevas explotaciones de aguas subterráneas
- DGA 1997. Minuta Técnica DGA Nº 61. Cuantificación de la Disponibilidad de Agua Subterránea Por Sectores en el Acuífero del Río del Valle de Copiapó.
- DGA 2001. Resolución DGA Nº162. Alza la zona de prohibición y se declara área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas en los sectores acuíferos 5 y 6.
- DGA – AC Consultores 2007. “Estimaciones de Demandas de Agua en Chile y Proyecciones Futuras” (SIT 122)
- DGA-DICTUC 2010. Análisis Integrado de Gestión en la cuenca del río Copiapó.
- DGA - H2 Cuenca 2012. Análisis crítico de la red de niveles de aguas subterráneas del acuífero de Copiapó.
- DGA 2012. Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados en la cuenca del río Copiapó (SDT 327).
- SERNAGEOMIN 2012. Evaluación hidrogeológica de la cuenca del río Copiapó, con énfasis en cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.
- SERNAGEOMIN 2011. Hidrogeología e hidrogeoquímica de la cuenca de la Quebrada Paipote, región de Atacama.
- SISS 2010. Estudio determinación de tarifas 2010 – 2015 empresa Aguas Chañar S.A.
- SISS 2011. Plan de Gestión Sanitaria