



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

**INVESTIGACIÓN DE ACUÍFEROS  
DE GRAN VOLUMEN Y  
BAJO NIVEL DE RECARGA, FASE II**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**S.I.T. N° 431**

**REALIZADO POR:**

**CON POTENCIAL CONSULTORES SPA**

**Santiago, Marzo 2018**

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

**Ministro de Obras Públicas**

Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

**Director General de Aguas**

Constructor Civil Sr. Miguel Silva Rodríguez

**Inspector Fiscal**

Ingeniero Civil Sr. Juan Carlos Salgado González

**Inspector Fiscal Subrogante**

Sr. Jorge Candia Díaz

**CON POTENCIAL CONSULTORES SPA**

**Jefe de Proyecto**

Ingeniero Civil Sr. Alejandro Arenas Herrera

**Profesionales**

Ingeniero Civil Sr. Juan Torres Cubillos

Ingeniero Civil Sr. Rodrigo Saraiva Hermosilla

Ingeniero Civil Sr. Marco Matamala Castro

Ingeniero Civil Sr. Jonás Valdivieso Bravo

Ingeniero Civil Sr. Diego Soto Rodríguez

Ingeniero Sr. Luis Alberto Arenas Herrera

Geógrafa Sra. Soledad Huerta Miranda

Sr. Rodrigo Arenas Herrera

Sr. Roberto Sánchez Valdés

---

## ÍNDICE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	OBJETIVOS .....	1
2.1	Objetivo general.....	1
2.2	Objetivos específicos .....	1
3	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	2
3.1	Ubicación general .....	2
3.2	Contexto geológico y geográfico de la Pampa del Tamarugal .....	4
3.3	Morfología de la Pampa del Tamarugal .....	5
3.4	Condiciones climáticas generales de la zona de estudio .....	5
3.5	Situación general del acuífero de la Pampa del Tamarugal .....	5
4	REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES .....	6
5	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	6
5.1	Estudio hidrológico .....	6
5.2	Instalación de estación meteorológica .....	8
6	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	12
6.1	Marco geológico local .....	12
6.2	Campaña de terreno .....	12
6.3	Construcción de estación de medición de niveles de aguas subterráneas.....	13
7	MODELO HIDROGEOLÓGICO .....	15
7.1	Generalidades .....	15
7.2	Flujos subterráneos de entrada y recarga desde las quebradas.....	16
7.3	Flujos subterráneos de salida .....	16
7.4	Evapotranspiración y evaporación en zonas de salares.....	17
7.5	Extracciones a través de pozos de bombeo .....	17
7.6	Piezometría y niveles observados.....	17
7.7	Modelo numérico .....	17
7.7.1	Construcción del modelo subterráneo.....	17
7.7.2	Dominio espacial del modelo .....	18
7.7.3	Dominio temporal .....	18
7.7.4	Parámetros elásticos .....	18
7.7.5	Evaporación y evapotranspiración.....	20
7.7.6	Recarga subterránea desde las quebradas. ....	20
7.7.7	Condición de nivel conocido del límite sur .....	20
7.7.8	Pozos de explotación.....	21

7.7.9	Niveles freáticos .....	23
7.8	Calibración del régimen permanente .....	23
7.8.1	Resultados de la calibración .....	23
7.8.2	Balace hídrico .....	23
7.9	Calibración del régimen transiente .....	23
7.10	Modelación de escenarios futuros.....	24
7.11	Resultados.....	27
8	CAPACITACIÓN A FUNCIONARIOS DE LA DGA .....	31
9	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	32
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	32
10.1	Conclusiones .....	32
10.2	Recomendaciones.....	35
10.2.1	Recomendaciones técnicas .....	35
10.2.2	Recomendaciones administrativas y de gestión .....	36

### **ÍNDICE DE FIGURAS**

FIGURA 3-1:	VISTA GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO – PAMPA DEL TAMARUGAL .....	3
FIGURA 5-1:	CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL QUEBRADA DE TARAPACÁ.....	8
FIGURA 5-2:	ESTACIÓN METEOROLÓGICA QUEBRADA CAYA INSTALADA. ....	9
FIGURA 5-3:	UBICACIÓN DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA QUEBRADA CAYA.....	10
FIGURA 5-4:	ESTACIÓN METEOROLÓGICA QUEBRADA CAYA EN LA PÁGINA WEB DE LA DGA. ....	12
FIGURA 6-4:	PERFIL LONGITUDINAL PERFORACIONES EN QUEBRADA AROMA. ....	15
FIGURA 7-1:	DISTRIBUCIÓN DE LAS ZONAS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN EL DOMINIO DEL MODELO. ....	19
FIGURA 7-2:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL PARA POZOS CON DERECHOS DE EXTRACCIÓN CONSUNTIVOS SUPERIOR A 8 [L/s]. ....	22
FIGURA 7-2:	EXTRACCIÓN POR BOMBEO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LOS 6 ESCENARIOS MODELADOS. ....	26
FIGURA 7-3:	COMPARACIÓN PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO SITUACIÓN CAT AÑO 2017 vs CFT E1 AÑO 2074. ....	27
FIGURA 7-4:	COMPARACIÓN PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO SITUACIÓN CFT E2 AÑO 2074 vs CFT E4 AÑO 2074. ....	28
FIGURA 7-5:	COMPARACIÓN PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO SITUACIÓN CAT AÑO 1960 vs CFT E3 AÑO 2074. ....	29
FIGURA 7-6:	COMPARACIÓN PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO SITUACIÓN CFT E5 AÑO 2074 vs CFT E6 AÑO 2074. ....	30

### **ÍNDICE DE TABLAS**

TABLA 5.1:	RESUMEN DE CAUDALES DE CRECIDA PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO EN CUENCAS APORTANTES AL ACUÍFERO DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL. ....	7
TABLA 5.2:	UBICACIÓN ESTACIÓN QUEBRADA CAYA. ....	9
TABLA 6.1:	SONDAJES PERFORADOS.....	14
TABLA 7.1:	VALORES DE RECARGA CONSIDERADA CON POZOS DE INYECCIÓN EN MODELO (CNP) .....	20
TABLA 7.2:	RESUMEN DE CAUDALES DE BOMBEO UTILIZADOS EN EL MODELO. ....	21
TABLA 7.3:	BALANCE HÍDRICO FLUJOS MODELO PERMANENTE (CNP) (L/s).....	23
TABLA 7.4:	BALANCE HÍDRICO AÑO 2017, FLUJOS MODELO EN RÉGIMEN TRANSIENTE (CAT) (L/s) .....	24
TABLA 7.5:	RESUMEN DE ESCENARIOS DE MODELACIÓN.....	26
TABLA 7.6:	TASA DE DESCENSO DE NIVELES FREÁTICOS EN LOS 6 ESCENARIOS DE MODELACIÓN PARA POZOS ANALIZADOS . ....	31

---

## **1 INTRODUCCIÓN**

La disponibilidad de recursos hídricos en la zona norte de Chile está condicionada por la existencia de un clima árido, siendo el origen de esos recursos las escasas precipitaciones que ocurren en la parte alta de la cordillera de los Andes durante algunos meses del año. Estas precipitaciones recargan los acuíferos, los cuales son el único medio en donde se acumula agua, constituyendo la principal fuente de abastecimiento para la población de la zona. Muchos de estos acuíferos se caracterizan por tener un gran volumen y su escasa recarga se produce en zonas puntuales.

La Pampa del Tamarugal es la cuenca endorreica más grande de Chile, con un área de 17.353 km<sup>2</sup>, lo que corresponde al 41% del área de la región de Tarapacá. Este sistema hídrico se caracteriza por tener un gran volumen de almacenamiento subterráneo, el cual es recargado en zonas muy localizadas durante algunos meses del año. Conceptualmente, es un acuífero del tipo libre, el cual recibe aportes desde quebradas y riachuelos que bajan desde el sector oriental, además de flujos subterráneos provenientes del Salar del Huasco y de otras cuencas vecinas.

Hasta la fecha se han realizado, en numerosos estudios, consideraciones teóricas del mecanismo de recarga de la Pampa del Tamarugal. Sin embargo, la carencia de datos certeros ha llevado a tener una gran incertidumbre respecto a la real magnitud de la recarga en el largo plazo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

El objetivo general del estudio consistió en investigar el acuífero de gran volumen y bajo nivel de recarga de la Pampa del Tamarugal, generando nuevos insumos para robustecer la metodología de sustentabilidad establecida en el estudio "Investigación de acuíferos de gran volumen y bajo nivel de recarga en la zona norte, fase I" (DGA, 2016) y generando así un nuevo conocimiento de los recursos hídricos disponibles, y sobre los mecanismos de funcionamiento de este sistema hídrico.

### **2.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

- Identificar de quebradas aportantes y abanicos aluviales.
- Realizar análisis de crecidas de quebradas aportantes.

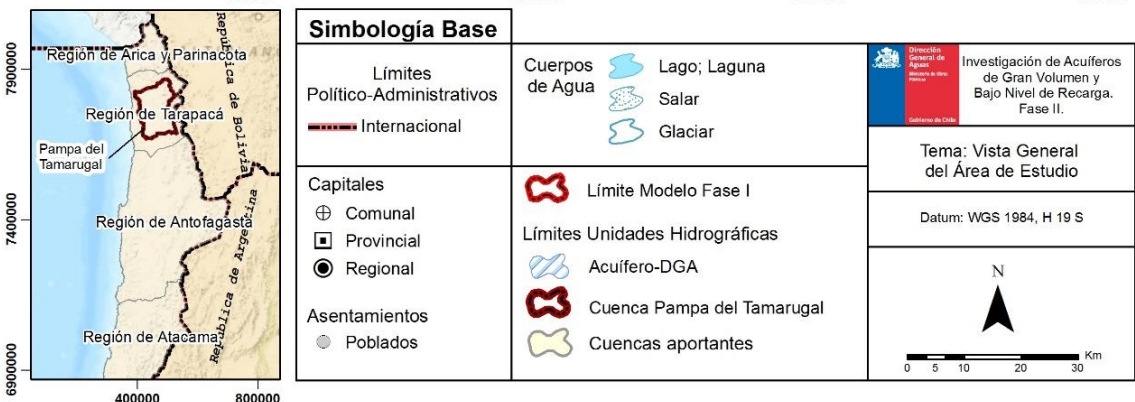
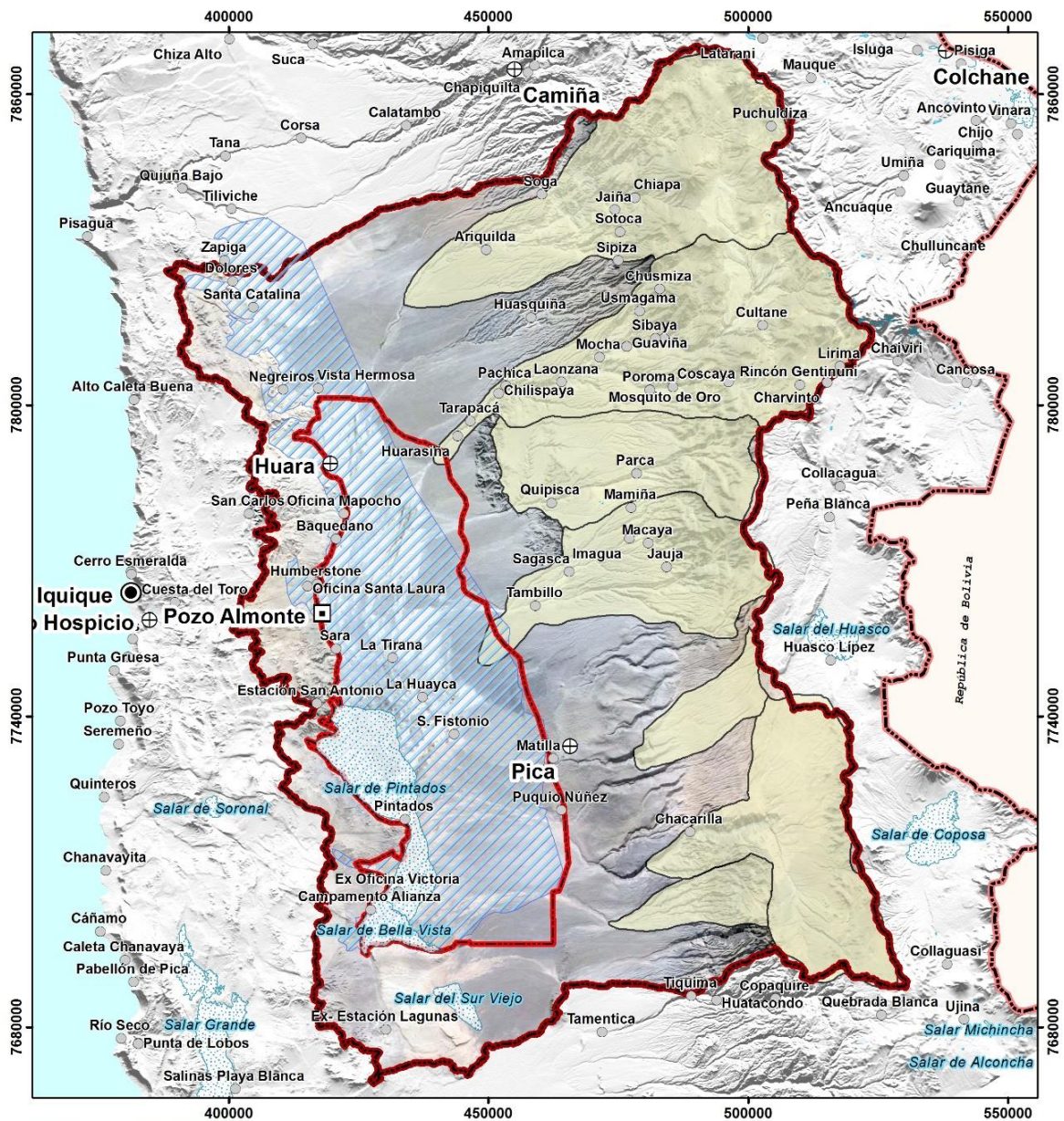
- 
- Estimar la recarga promedio y durante eventos de crecida.
  - Implementar los resultados en un Sistema de Información Geográfica.
  - Instalación de una estación hidrometeorológica y perforación de piezómetros de monitoreo del nivel de aguas subterráneas.
  - Actualización del modelo numérico en Visual Modflow.
  - Capacitación sobre modelo numérico a funcionarios de la DGA a nivel central y de la región de Tarapacá.
  - Definir el comportamiento hidrogeológico de la cuenca.
  - Definir la geometría del acuífero.

### **3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO**

#### **3.1 Ubicación general**

El área de estudio corresponde a la Pampa del Tamarugal, ubicada en la región de Tarapacá, se consideró el análisis de todas las subcuencas aportantes, debido a su importancia en la cuantificación de la recarga del acuífero existente en la Pampa del Tamarugal. La Figura 3-1 muestra una vista general de la Pampa del Tamarugal y de las subcuencas aportantes.

**Figura 3-1: Vista General del Área de Estudio – Pampa del Tamarugal**



Fuente: Elaboración propia

---

La Pampa del Tamarugal propiamente tal se identifica con el rasgo fisiográfico denominado depresión intermedia. Tiene aproximadamente 220 km de largo en el sentido longitudinal y de 40 a 60 km de ancho.

El sector de la cuenca de la Pampa del Tamarugal asociado al dominio del modelo hidrogeológico definido en el estudio de la fase I recibe principalmente los aportes de 6 subcuencas, las que, listadas en orden de norte a sur, corresponden a las quebradas de:

- Aroma
- Tarapacá
- Quipisca
- Juan Morales, Sagasca y El Tambillo
- Quisma
- Chacarillas

### **3.2 Contexto geológico y geográfico de la Pampa del Tamarugal**

En términos generales, la Pampa del Tamarugal corresponde geológicamente a una gran fosa tectónica del complejo basal (paleozoica o mesozoica), producida por fallas longitudinales antiguas y rellenada en parte en su piso por las rocas terciarias de la formación Altos de Pica y posteriormente con materiales andinos del Cuaternario.

El área de estudio presenta principalmente tres zonas de oeste a este:

- 1) la depresión intermedia, con una altitud media de 1.000 a 1.200 msnm, donde se encuentra ubicada la Pampa del Tamarugal;
- 2) la cordillera del medio con una altura media de 4.000 msnm, que divide el drenaje superficial entre la depresión intermedia y el Salar de Huasco, y
- 3) el altiplano, con una altura de 3.500 a 4.500 msnm, en el que se encuentran varias cuencas endorreicas que forman salares, como el de Huasco y el de Coposa.

Las rocas del complejo geológico-estructural están separadas por una discontinuidad que las divide en dos grandes grupos o sistemas: un basamento impermeable compuesto por rocas del Mesozoico y los materiales terciarios-cuaternarios que son los de interés hidrogeológico puesto que almacenan agua y permiten la existencia de flujos subterráneos. Esta formación se compone de una secuencia de depositaciones sedimentarias y volcánicas concordantes de fines de la Era Terciaria.

La actividad tectónica ha generado una serie de fallas de orientación norte-sur, las que delimitan el acuífero en estudio. En la parte alta (oriental), el Horst de Huasco genera una separación de los acuíferos y delimita la zona aportante con aquella que drena hacia el salar

---

de Huasco. En la parte occidental, el Horst de Pica delimita el acuífero de Pica-Matilla y limita el caudal de agua subterránea pasante hacia la Pampa del Tamarugal.

### **3.3 Morfología de la Pampa del Tamarugal**

Morfológicamente, la Pampa del Tamarugal se presenta como una meseta de muy suave declive hacia el sur, de aproximadamente 0,4% de pendiente media en sentido norte-sur, y una pendiente transversal del orden de 0,7% medida a la altura de la desembocadura de la quebrada de Juan Morales.

El acuífero de la Pampa del Tamarugal tiene su inicio en el sector norte, en una loma casi imperceptible frente a la localidad de Negreiros, que actúa como la línea divisoria entre la cuenca de Tana, al norte, y otra hacia el sur, que se identifica con el cono de deyección de las quebradas Soga y Aroma.

Asimismo, en el sur, la divisoria de aguas entre esta cuenca y la del Loa no está bien definida, a tal punto que hay autores que establecen que la quebrada de Guatacondo y otras menores que le siguen al sur pertenecerían a la cuenca del Loa.

### **3.4 Condiciones climáticas generales de la zona de estudio**

En términos generales, la región de Tarapacá se caracteriza por presentar un clima desértico, dentro de los cual se pueden distinguir 4 subtipos: costero nuboso, interior, marginal de altura y estepa de altura. La Pampa del Tamarugal queda caracterizada fundamentalmente por las últimas tres clases de clima mencionadas.

### **3.5 Situación general del acuífero de la Pampa del Tamarugal**

A grandes rasgos, el acuífero de la Pampa del Tamarugal es un embalse subterráneo de grandes proporciones, constituido por clastos cuaternarios y terciarios que rellenan la fosa y por los intersticios que ellos dejan entre sí. Representa una fuente estratégica para el abastecimiento de agua potable para diversas ciudades y localidades habitadas (Iquique, Alto Hospicio, La Huaica, Pozo Almonte, La Tirana, Huara y Pisagua), como también para la dotación de aguas para riego y para usos mineros. Así lo confirma la distribución de los derechos de agua otorgados establecida en el informe "Actualización de la oferta y la demanda de recursos hídricos subterráneos del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común Pampa del Tamarugal" (SDT N° 311, 2011), que los distribuye, según uso, de la siguiente manera:

- Derechos otorgados de aguas subterráneas para producción de agua potable: 50%
- Derechos otorgados de agua para riego: 25%

- 
- Derechos otorgados de agua para la minería: 25%

Si bien el volumen embalsado en el acuífero de la Pampa del Tamarugal es de gran cuantía, se ha determinado que la inercia volumétrica del acuífero no podrá soportar en el largo plazo el desbalance actual proyectado entre la demanda y la recarga, aun cuando el acuífero ha sido declarado, en términos administrativos, Área de Restricción desde 2009. Actualmente hay un descenso sostenido del acuífero, estimado en 11 cm al año.

Las precipitaciones no representan una fuente real de recarga del acuífero. Esta se produce por infiltración a lo largo del cauce de las quebradas, en zonas de alta conductividad, donde hay acumulación de material granular no consolidado, aguas arriba de los abanicos fluviales que se generan en el borde oriental de la Pampa del Tamarugal. Esta recarga se produce en todas las quebradas aportantes, pero se ha denominado cuenas aportantes sólo aquellas que poseen su cabecera en las altas cumbres de la cordillera del medio, ya que el aporte de las demás cuenas es tan pequeño que se considera despreciable para los efectos del balance hídrico del acuífero.

#### **4 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES**

Se realizó una recopilación, análisis y comprensión de gran parte de la información disponible a la fecha, referida al sistema hidrogeológico del sector en estudio, la que se refleja, fundamentalmente, en los siguientes aspectos:

- Información geofísica / geológica / geotécnica.
- Información hidrológica / hidrogeológica.
- Información geomorfológica.
- Situación de derechos de agua.
- Revisión y análisis de registros niveles estáticos en pozos.
- Revisión de informes de sondajes y estratigrafías disponibles.

#### **5 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA**

##### **5.1 Estudio hidrológico**

Se caracterizaron las cuenas de las quebradas que recargan al acuífero de la Pampa del Tamarugal atendiendo a una serie de parámetros hidrológicos y geomorfológicos: área, perímetro y ancho de la cuena, longitud del cauce principal, desnivel altitudinal, parámetros de forma y de relieve de la cuena.

Luego se estimaron los caudales medios y se realizaron los balances hídricos de las 6 quebradas tributarias de la Pampa del Tamarugal, de las cuales sólo la de Tarapacá

cuenta con información fluviométrica, obteniéndose información para las demás cuencas mediante transposición de caudales. Los caudales medios anuales de las quebradas aportantes permitieron calcular la recarga al sistema acuífero estudiado, que asciende a 415 l/s.

Por otra parte, se realizó un análisis hidrológico que permitió calcular los caudales de crecida de las quebradas aportantes, considerando las precipitaciones en las correspondientes cuencas para un período de retorno de 2 años. Este análisis consideró la realización del estudio de correlaciones entre caudales máximos instantáneos registrados en estaciones fluviométricas y precipitaciones máximas en 24 horas en estaciones pluviométricas existentes en la cuenca tributaria a las mencionadas estaciones fluviométricas, además de la validación, corrección y relleno de datos.

De esta manera fueron determinados los caudales máximos instantáneos corregidos en la estación fluviométrica Quebrada de Tarapacá en Sibaya para el período comprendido entre los años hidrológicos 1985/86 y 2012/13, los que fueron empleados para calcular mediante transposición los correspondientes caudales máximos instantáneos en el punto de descarga de las quebradas aportantes a la recarga del acuífero de la Pampa del Tamarugal, las que se muestran en la Tabla 5.1.

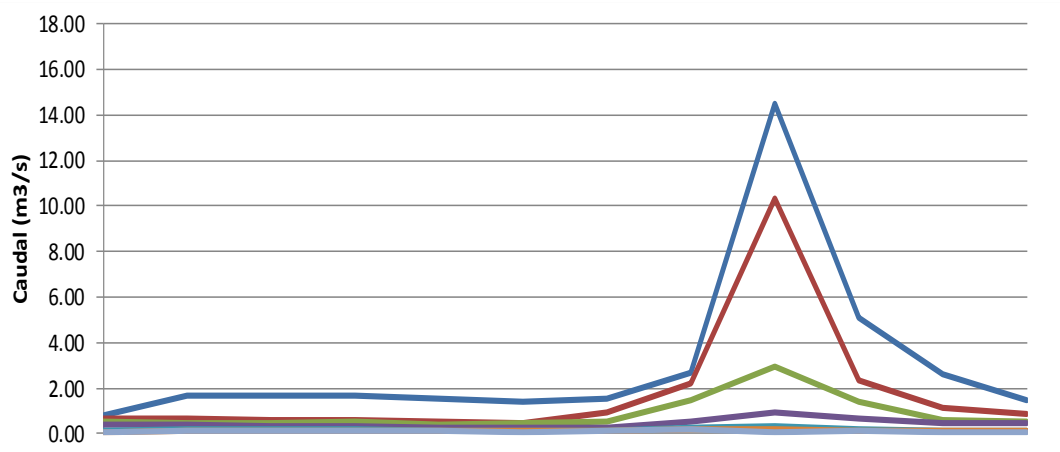
**Tabla 5.1: Resumen de Caudales de Crecida para Distintos Periodos de Retorno en Cuencas Aportantes al Acuífero de la Pampa del Tamarugal.**

Quebrada	Área (km <sup>2</sup> )	Área ef (km <sup>2</sup> )	Pp (mm)	Q 5 (m <sup>3</sup> /s)	Q 10 (m <sup>3</sup> /s)	Q 20 (m <sup>3</sup> /s)	Q 50 (m <sup>3</sup> /s)	Q 100 (m <sup>3</sup> /s)
<b>Aroma</b>	1.759	1.572	90,7	54,4	79,2	113,5	164,4	209,3
<b>Tarapacá</b>	1.735	1.600	96.4	58,9	85,7	122,9	177,9	226,5
<b>Quipisca</b>	881	775	25.9	7,7	11,2	16,0	23,7	29,5
<b>Sagasca</b>	999	782	36.7	10,9	15,9	22,8	33,1	42,1
<b>Quisma</b>	281	276	63.6	6,7	9,8	13,9	20,2	25,8
<b>Chacarillas</b>	1.211	1.200	98.2	44,9	65,5	93,9	135,9	173,1

*Fuente: Elaboración propia*

Se realizó un análisis de frecuencia de los caudales medios mensuales registrados en la estación fluviométrica Quebrada de Tarapacá en Sibaya. La curva de variación estacional en la salida de la quebrada de Tarapacá se muestra en la Figura 5-1, la que se consideró representativa de las 6 cuencas aportantes.

**Figura 5-1: Curva de Variación Estacional Quebrada de Tarapacá.**



		Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
—	Q5	0.77	1.65	1.66	1.66	1.51	1.42	1.53	2.68	14.51	5.12	2.63	1.45
—	Q10	0.63	0.69	0.60	0.57	0.51	0.48	0.91	2.19	10.36	2.36	1.14	0.85
—	Q20	0.54	0.48	0.48	0.56	0.42	0.45	0.55	1.46	2.93	1.42	0.60	0.52
—	Q50	0.39	0.39	0.36	0.35	0.27	0.27	0.24	0.53	0.92	0.66	0.45	0.45
—	Q85	0.15	0.18	0.21	0.18	0.12	0.12	0.16	0.27	0.34	0.19	0.14	0.15
—	Q90	0.09	0.15	0.16	0.15	0.12	0.12	0.15	0.19	0.22	0.15	0.11	0.14
—	Q95	0.09	0.12	0.15	0.12	0.12	0.09	0.12	0.18	0.06	0.15	0.05	0.06

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el caudal máximo se produce en verano, debido que, esta zona se caracteriza por presentar intensas precipitaciones en altura durante el verano, que son los eventos causantes de los grandes caudales representados en las curvas estacionales de baja probabilidad de excedencia.

Durante el resto del año, las quebradas presentan un caudal base asociado a las escasas precipitaciones que ocurren en el sector y a interacciones subsuperficiales.

## 5.2 Instalación de estación meteorológica

Entre las actividades desarrolladas en este estudio se cuenta la instalación una estación meteorológica. Se determinó ubicarla en la cuenca de la quebrada Chacarilla, por tratarse de una de las 6 aportantes a la recarga del acuífero de la Pampa del Tamarugal que carecía de instalaciones de este tipo.

La estación meteorológica se instaló en la naciente de la cuenca de la quebrada de Chacarilla (Quebrada Caya), a una cota superior a los 3.850 msnm.

Un aspecto relevante en este tema es la accesibilidad, tanto para la instalación como para la mantención de la estación y la recuperación de datos. La única ruta existente corresponde al camino de acceso a la faena de la compañía minera Quebrada Blanca. En la Figura 5-3

---

se indica con un triángulo de color rojo la ubicación en la que se instaló la estación meteorológica, correspondiente a las coordenadas señaladas en la

**Tabla 5.2.**

**Tabla 5.2: Ubicación Estación Quebrada Caya.**

<b>Estación Meteorológica Quebrada Caya</b>	
<b>Código Estación</b>	<b>56B0AE1E</b>
<b>UTM-S</b>	<b>7.705.766 m</b>
<b>UTM-E</b>	<b>507.485 m</b>
<b>Altitud</b>	<b>3.890 m.s.n.m.</b>

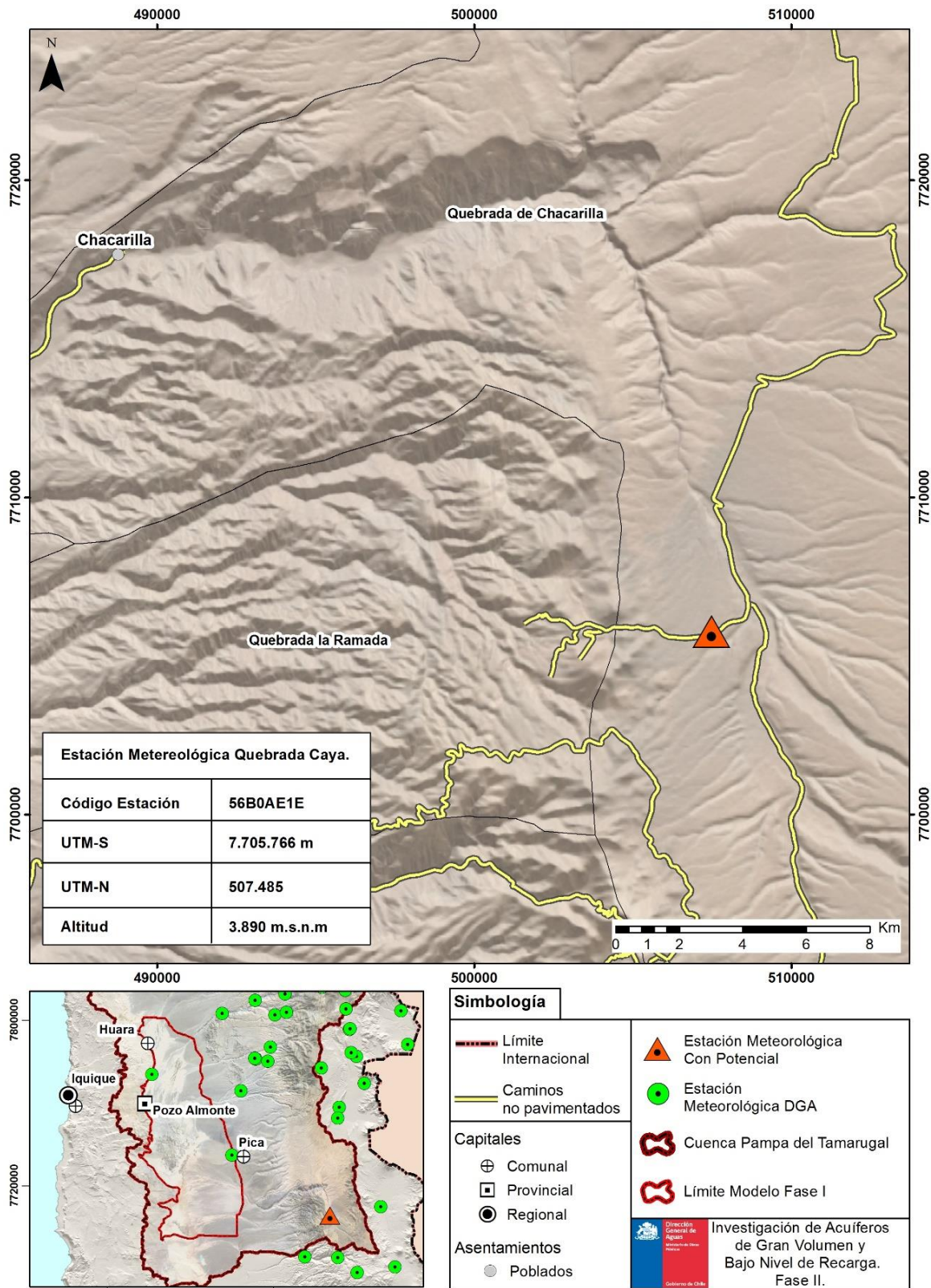
*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 5-2: Estación Meteorológica Quebrada Caya Instalada.**



*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 5-3: Ubicación de Estación Meteorológica Quebrada Caya.**



Fuente: Elaboración propia

Sus características son:

- Transmisión en tiempo real
- Transmisión satelital cada 1 hora de un paquete de datos meteorológicos con registros cada 30 minutos.
- *Variables meteorológicas:*
  - Temperatura
  - Humedad
  - Velocidad y Dirección Viento
  - Radiación Solar
  - Presión Atmosférica
  - Precipitación Líquida
  - Precipitación Instantánea
  - Precipitación Acumulada
- *Link Visualización datos:*

<https://dcs2.noaa.gov/Account/FieldTest>

- *Código Web Estación*

**DCP ADDRESS: 56B0AE1E**

The screenshot shows a web browser window with the URL <https://dcs2.noaa.gov/Account/FieldTest>. The page is divided into two main sections: "PLATFORM FIELD TEST" and "PDT INFORMATION".

**PLATFORM FIELD TEST**

DCP ADDRESS (REQUIRED)

56B0AE1E

GO BACK 10 HOURS

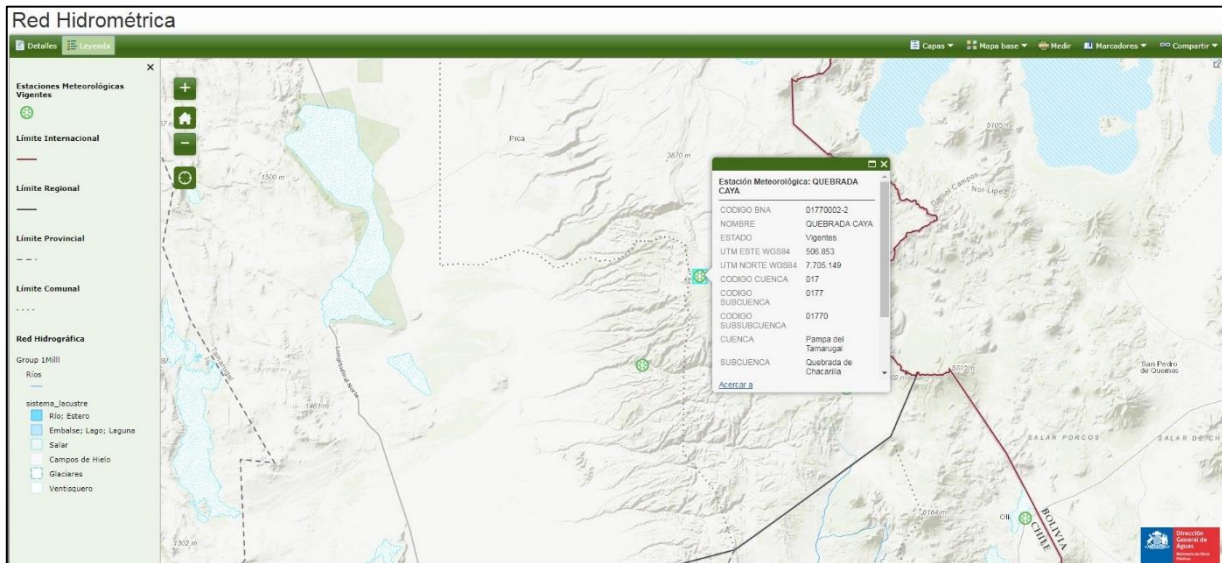
RETRIEVE

**PDT INFORMATION**

ADDRESS	56B0AE1E
GROUP	CHLDOH
P-CHAN	47
S-CHAN	0
FIRST	00:36:44
PERIOD	01:17:14
WINDOW	00:17:24

La estación meteorológica Quebrada Caya se encuentra en funcionamiento, tal como se muestra en la página web de la DGA (Figura 5-4).

**Figura 5-4: Estación Meteorológica Quebrada Caya en la página web de la DGA.**



Fuente: Página web de la DGA.

## 6 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

### 6.1 Marco geológico local

Las rocas que componen la Cordillera de la Costa son en su mayoría mesozoicas sedimentarias e ígneas intrusivas. En la zona de estudio estas rocas se encuentran en el sector oeste, limitando la Depresión Central, generalmente discordantes y cubiertas por depósitos coluviales, eólicos y/o salares. Estos últimos se encuentran interdigitando el relleno de la Depresión Central.

En el sector este de la Depresión Central se encuentra el piedemonte de la Precordillera, y a medida que se avanza hacia las quebradas la pendiente aumenta. Avanzando hacia el oeste, la inclinación se agudiza hasta finalizar en la Cordillera Occidental. Por último, se encuentra el Altiplano, donde se ubica el actual cordón volcánico.

La planicie de la Depresión Central se caracteriza por estar cubierta con depósitos sedimentarios continentales del periodo cenozoico. Su relleno corresponde al material de la respectiva quebrada que es erosionada, sedimentos que alojan los recursos hídricos subterráneos del acuífero de la Pampa del Tamarugal.

### 6.2 Campaña de terreno

Los trabajos realizados en la campaña de terreno del presente estudio son los siguientes:

- 
- Reconocimiento general de la zona: infraestructura, captaciones de aguas subterráneas y piezómetros de control de niveles, geomorfología, áreas de infiltración, etc.
  - Extracción de datos medidos en terreno a través del instrumental de monitoreo.
  - Campaña de registro de niveles de pozos de monitoreo DGA.
  - Construcción de sondajes.

Durante el mes de diciembre de 2017 se ejecutó una campaña en la que se inspeccionaron 51 puntos de medición, entre piezómetros de la red de monitoreo de la DGA, pozos privados y antiguos pozos abandonados de la CORFO, en función de la ubicación de los puntos de medición y su relevancia en el estudio de los acuíferos de la Pampa del Tamarugal, y el estado de los piezómetros existentes.

Los datos de niveles medidos fueron georreferenciados y acompañados con toda la información anexa que se consideró de utilidad: fecha y hora de la medición, materialidad, estado, elevación de terreno, diámetro del pozo o piezómetro, etc.

### **6.3 Construcción de estación de medición de niveles de aguas subterráneas**

Entre los objetivos del estudio se consideraba la construcción de un piezómetro de 150 m de profundidad, para ser utilizado posteriormente como piezómetro de la red de control de niveles del acuífero de la DGA. Este sondaje, para cumplir su objetivo, debía perforarse en unidades de sedimentos no consolidados, no en roca.

Además, este piezómetro permitiría registrar los efectos de las variaciones de la recarga debidas a las variaciones del flujo de las quebradas aportantes. Para tal efecto, este piezómetro fue ubicado en un punto cercano al contacto roca/relleno a nivel de terreno, en los abanicos de descarga de las quebradas, pues los efectos de las variaciones de caudales de las quebradas en el nivel freático se van reduciendo fuertemente a medida que este punto se interna en la Pampa del Tamarugal. Sin embargo, esta condición implica una mayor probabilidad de alcanzar la roca fundamental antes de concluir los 150 m de perforación, como en efecto ocurrió.

Se determinó emplazar este piezómetro en el abanico de descarga de la quebrada de Aroma, por tratarse de un sector monitoreado sólo por una estación de niveles, el pozo JICA-4 (código BNA 01700100-0), ubicado en un punto en que se estima imperceptible el efecto de las variaciones de caudal de la quebrada de Aroma.

Durante el desarrollo del presente estudio se plantearon dos alternativas de ubicación para la construcción de un nuevo pozo de observación. Como primera opción, el inicio del abanico

---

fluvial de la quebrada de Aroma (alternativa N°1) y como segunda opción el inicio del abanico fluvial de la quebrada de Chacarillas (alternativa N°2).

El proceso de la definición de su ubicación no contó con el apoyo de antecedentes, ya sea de perfiles estratigráficos de pozos, piezómetros existentes o de exploraciones geofísicas, ya que la zona del abanico fluvial de la quebrada de Aroma carece de información de este tipo, a diferencia de otras quebradas aportantes al acuífero de la Pampa del Tamarugal.

Definida la ubicación con la incertidumbre señalada, se perforó el sondaje para la instalación del mencionado piezómetro. Sin embargo, la perforación alcanzó el basamento rocoso a solo 23 m de profundidad. Se continuó perforando, para confirmar que se trataba de la roca fundamental y no un bloque de gran tamaño, alcanzando los 43 m de profundidad, se toma la decisión de detener la perforación y habilitar un nuevo piezómetro.

En vista de los resultados obtenidos en el sondaje S-1, se definió la ubicación de un nuevo punto para perforar el sondaje S-2, esperando detectar el nivel freático y que el espesor de rellenos sedimentarios fuese relevante. Sin embargo, se produjo una situación similar a la ya descrita, al alcanzar el basamento rocoso a una profundidad aproximada de 30 m.

En consecuencia, se definió una tercera ubicación para el piezómetro S-3, en esta ocasión se perforó hasta una profundidad de 76 m. se encontró conglomerado meteorizado a los 63 metros de profundidad.

Ni en S-1 ni en S-2 se detectó la presencia de aguas subterráneas. En la Tabla 6.1 se entregan las coordenadas, cota aproximada y profundidad de perforación de los tres puntos mencionados, con un total de 161 m de perforación.

**Tabla 6.1: Sondajes perforados**

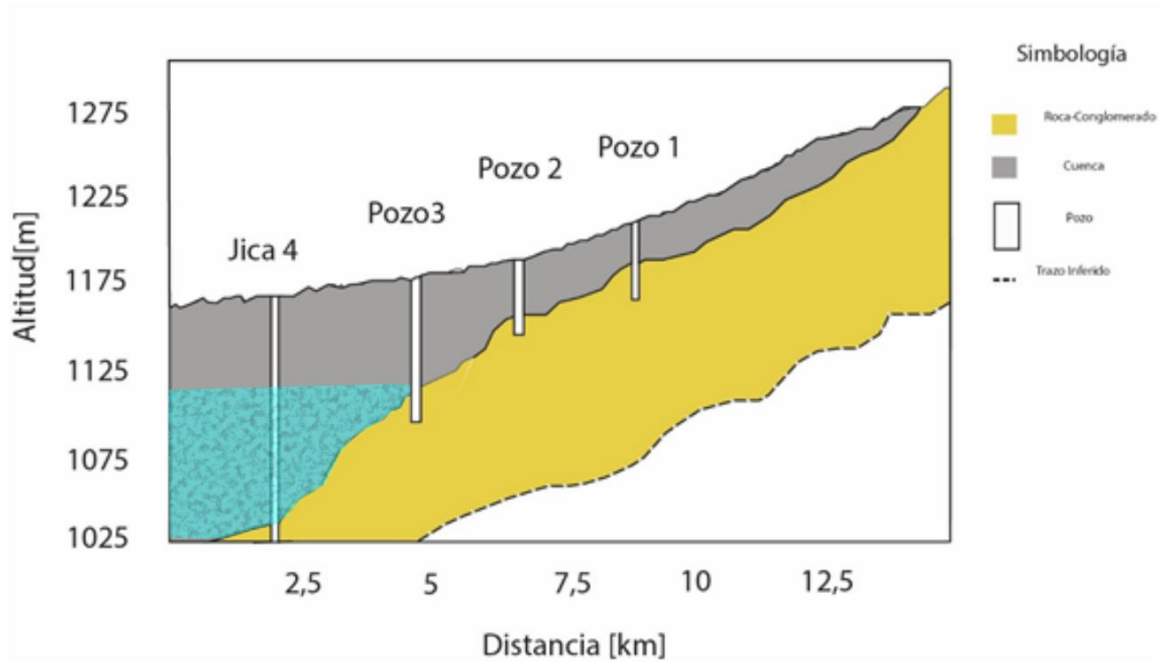
<b>SONDAJE</b>	<b>UTM-N (m)</b>	<b>UTM-E (m)</b>	<b>COTA (m.s.n.m.)</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>
<b>S-1</b>	7.805.057	427.126	1.213	43
<b>S-2</b>	7.804.049	425.997	1.199	42
<b>S-3</b>	7.803.884	423.891	1.188	76

*Fuente: Elaboración propia*

Al no detectarse agua subterránea en ninguno de los sondajes y no ser verificado el nivel de agua estabilizado del sondaje S-3, no fue posible realizar un ensayo de calidad físico química de las aguas ni un análisis isotópico.

En la Figura 6-1 se muestra un esquema con el perfil transversal de las perforaciones, se infiere el nivel freático basado en la lectura del pozo Jica 4. Las denominaciones Pozo 1, Pozo 2 y Pozo 3 corresponden a las perforaciones S-1, S-2 y S-3 respectivamente.

**Figura 6-1: Perfil longitudinal perforaciones en Quebrada Aroma.**



Fuente: Elaboración propia

## 7 MODELO HIDROGEOLÓGICO

### 7.1 Generalidades

Entre los objetivos del estudio se consideraba la actualización del modelo numérico presentado en la Fase I, el cual fue estudiado críticamente antes de emplearlo en la simulación de nuevos escenarios. Debido a las deficiencias detectadas en la calibración, así como las diferencias conceptuales en la recarga desde las quebradas y las limitaciones propias del software utilizado, fue necesario desarrollar un nuevo modelo numérico hidrogeológico para la cuenca de la Pampa del Tamarugal. En general se utiliza un modelo conceptual similar al entregado en Fase I. con algunas modificaciones:

- Se eliminó del modelo conceptual la recarga por crecidas o eventos extremos. Esto es porque el orden de magnitud de la recarga con respecto a los flujos medios es irrelevante para este modelo de largo plazo y para el volumen del acuífero.
- Se utilizó una recarga media constante durante el periodo de calibración/validación y no la variación anual propuesta por DICTUC 2016.

- 
- La cantidad de recarga estimada es menor que las mencionadas en la bibliografía revisada y que las utilizadas en Fase I.
  - La condición de altura constante en el límite sur se cambió y además se revisó en gradiente lineal creciente en la dirección oeste-este.
  - Se utilizó el modulo no lineal de evapotranspiración ETS corregido.
  - Se modificó el factor de uso para las extracciones por bombeo.
  - Se aumentó la cantidad de pozos de calibración para el régimen permanente, cubriendo de manera más homogénea el dominio.
  - Se modificó la distribución de las zonas de conductividad hidráulica.
  - Se construyó una nueva capa superficial en base a un SRTM de resolución 25 metros corregido.
  - Se construyó una nueva grilla de 250.000 celdas de 220 x 108 m. aumentando unas 5 veces la resolución, ya que el modelo anterior tenía 51.359 celdas de 500 x 500 m en general y de 250 x 250 m en la zona refinada.

El dominio del modelo se definió en consistencia con el modelo presentado en la fase I. Como primera aproximación, se consideraron los límites utilizados en 3 modelos numéricos realizados con anterioridad.

## **7.2 Flujos subterráneos de entrada y recarga desde las quebradas**

Los aportes de las quebradas y los sectores acuíferos colindantes se consideraron como recarga subterránea. Como consecuencia de los análisis hidrológicos y las conclusiones de la Fase I (DGA 2016), se consideró despreciable el aporte de la recarga producto de eventos extremos de precipitación.

Los aportes se dividen en 7 zonas: el aporte desde el límite norte, aporte desde la zona de Pica-Matilla y las quebradas Aroma, Tarapacá, Quipisca, Quisma, Sagasca y Chacarilla. Las recargas asociadas a eventos extremos que podrían generarse en los abanicos aluviales son despreciadas de la modelación, debido a la baja permeabilidad de los primeros centímetros de los depósitos y que los caudales de crecidas obtenidos para estos eventos son del mismo orden de magnitud que el flujo base.

## **7.3 Flujos subterráneos de salida**

Corresponde a la descarga subterránea observada en un estudio anterior en el límite sur oriente del modelo, hacia la zona del salar Sur Viejo. El flujo subterráneo pasante se estima del orden de los 100 l/s. Se impuso una carga constante en el modelo en régimen permanente, medida en pozos de observación que colindan con el límite del modelo. Otros

---

flujos subterráneos se descartan debido a la naturaleza rocosa de los contornos correspondiente al límite del modelo.

#### **7.4 Evapotranspiración y evaporación en zonas de salares**

La cuenca de la Pampa del Tamarugal presenta zonas localizadas con bajas cotas de terreno, donde el nivel freático es relativamente somero. En esas zonas existen salares y se produce evaporación; dentro del dominio de la modelación estas zonas corresponden a los salares de Pintados y Bellavista.

En el presente modelo se modificó la curva de evapotranspiración propuesta en la fase I, ya que, si bien existe bastante bibliografía respecto al *Prosopis Tamarugo*, esta no es concluyente y no entrega un valor claro de la  $ET_0$  superficial, ni tampoco un comportamiento en función de la profundidad.

#### **7.5 Extracciones a través de pozos de bombeo**

Los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas consuntivos asignados en la actualidad dentro del dominio del modelo, corresponden a 4.133 l/s, en donde la mayor cantidad corresponde al uso sanitario (55%), seguido de los derechos otorgados a particulares y finalmente la actividad minera.

#### **7.6 Piezometría y niveles observados**

El flujo subterráneo regional en la Pampa del Tamarugal tiene dirección principal norte - sur, se observa también un importante flujo oriente - poniente proveniente de las recargas de las quebradas aportantes y de los sectores acuíferos contiguos.

Se contó con un set de 43 mediciones para la calibración del régimen permanente y se asumió que el acuífero se encuentra en su régimen natural. Para el régimen transiente se utilizaron los 38 pozos de monitoreo de la red hidrometeorológica de la DGA con mayor cantidad de registros que se encuentran dentro del dominio del modelo.

También se contó con los registros de niveles de aguas subterráneas realizados en terreno por Con Potencial Consultores en 2014 y los registrados en la campaña de terreno desarrollada para el presente estudio.

#### **7.7 Modelo numérico**

##### **7.7.1 Construcción del modelo subterráneo.**

La construcción del modelo se basó en la compilación de la información geológica, geofísica y geográfica de la zona de estudio, necesaria para construir una geometría que represente

---

las unidades geológicas y el acuífero. Por otro lado, con la información hidrometeorológica y basados en la bibliografía de estudios anteriores, se construyeron los flujos de entrada y de salida que posee el sistema.

El modelo numérico se realizó en el software Visual MODFLOW versión 4.6.0.169, utilizando los solver MODFLOW 2000 y MODFLOW NWT, obteniendo los caudales pasantes en distintas zonas y el nivel piezométrico en todo el dominio del modelo. El modelo se implementó en régimen permanente con una duración de un año (1960), asumiendo que la variación del almacenamiento en el periodo de modelación era nula. Para el régimen transiente se utilizó una ventana de modelación de 57 años (1961-2017). La condición inicial de niveles piezométricos de esta modelación corresponde al resultado obtenido con el modelo en régimen permanente.

#### 7.7.2 Dominio espacial del modelo

Se realizó la limpieza del dominio, disminuyendo la cantidad de celdas inactivas, eliminando del modelo numérico el espacio inútil fuera del dominio. El modelo abarca un rectángulo dentro de las siguientes coordenadas UTM:

Límites Norte y Sur: coordenadas UTM (WGS84) N 7.805.000 y 7.695.000

Límites Este y Oeste: coordenadas UTM (WGS84) E 411.500 y 465.5000

El dominio se dividió en 500 filas en dirección norte-sur y 500 columnas en dirección este-oeste, obteniendo 250.000 celdas de 220 x 108 m. En la vertical se consideró solo una capa al igual que en la fase I. La conductividad corresponde a un promedio en la vertical.

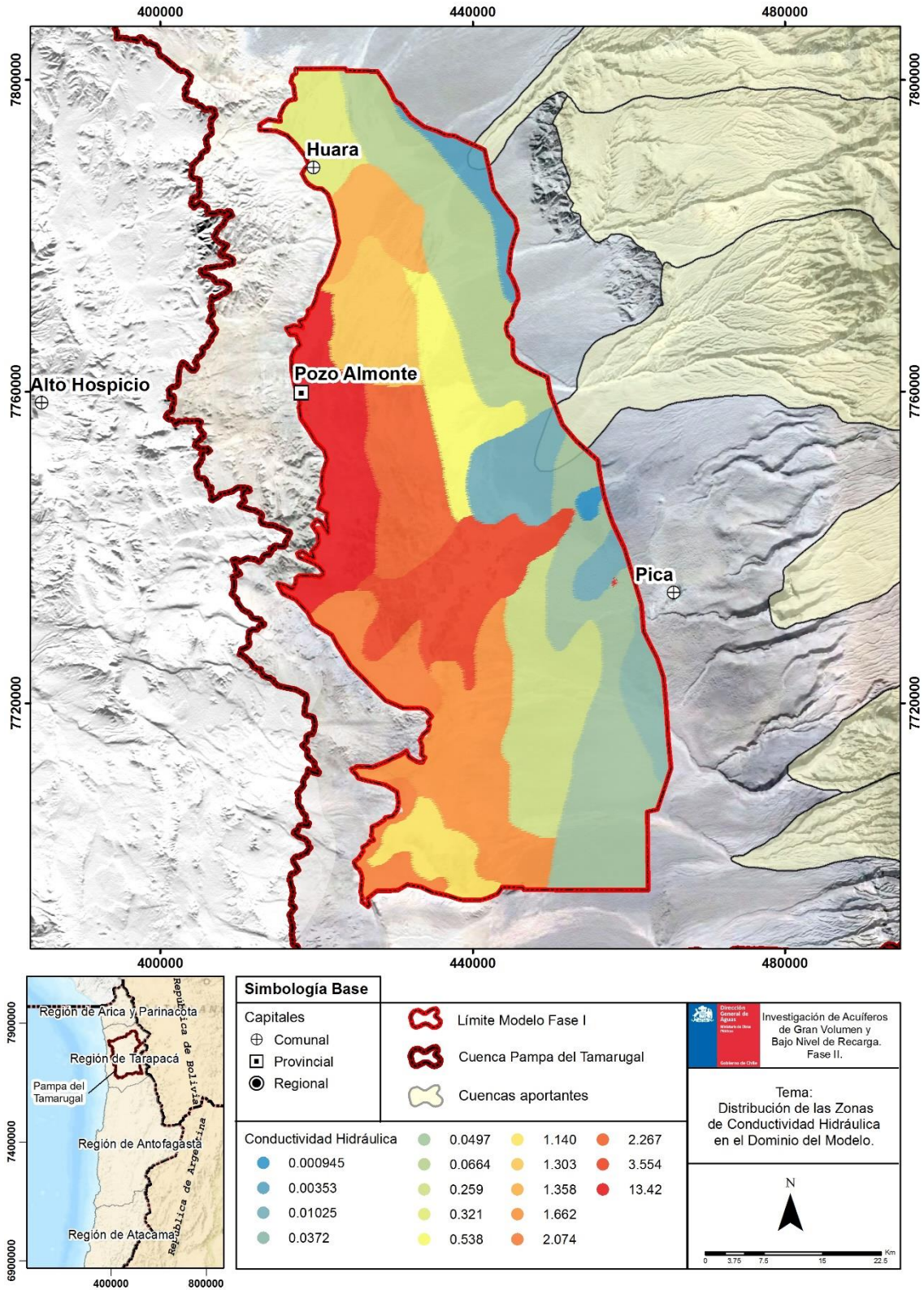
#### 7.7.3 Dominio temporal

Se mantuvo la discretización propuesta en la fase I, la supuso una escala anual para los periodos de stress, teniendo en cuenta que el objetivo es un análisis de largo plazo. En consecuencia, se consideran 57 pasos de tiempo para el periodo de calibración/validación y 50 para la proyección futura. Cada uno de esos periodos de stress el solver lo dividió en 10 pasos de tiempo de una duración 1,2 veces mayor que el anterior.

#### 7.7.4 Parámetros elásticos

Se determinó la conductividad hidráulica del modelo como un valor  $K'$ , el que corresponde a una conductividad hidráulica promediada en la vertical y que además corrige la discordancia entre la pendiente del basamento rocoso y el basamento impermeable. El coeficiente de almacenamiento varía entre 10% y 30%.

**Figura 7-1: Distribución de las Zonas de Conductividad Hidráulica en el Dominio del Modelo.**



Fuente: Elaboración propia

#### 7.7.5 Evaporación y evapotranspiración.

Para la evaporación se utilizó el modelo de decaimiento exponencial. Se asumió una evaporación superficial de 1.400 mm/año y una profundidad de extinción de 3,5 metros.

Con respecto a las superficies ocupadas por los tamarugos y las áreas correspondientes a los salares, se utilizaron las mismas que en el modelo de la fase I, así como los mismos periodos de estrés. En el caso de la evapotranspiración se asumieron valores de 260 mm/año y una profundidad de extinción de 16 metros.

#### 7.7.6 Recarga subterránea desde las quebradas.

La recarga subterránea se simuló mediante pozos de inyección. La recarga proveniente de la quebrada de Tarapacá se simuló con sólo un pozo de inyección, ya que la información geofísica indica que este cauce se encuentra encajonado, por lo tanto, se simula como un ingreso puntual que distribuye caudal hacia el acuífero. El resto de las quebradas y el ingreso de agua por el límite norte se realizan con pozos distribuidos con caudales no uniformes. El total de los caudales ingresados por cada quebrada se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 7.1: Valores de Recarga Considerada con Pozos de Inyección en Modelo (CNP)**

<b>Sector</b>	<b>Numero de Pozos</b>	<b>Caudal medio Pozo (l/s)</b>	<b>Caudal Total (l/s)</b>
Límite Norte	5	2,6	13
Quebrada de Aroma	5	9	45
Quebrada de Tarapacá	1	109	109
Quebrada de Quipisca	9	3,2	29
Quebrada de Quisma*	2	14,5	29
Quebrada de Sagasca	1	25	25
Quebrada de Chacarilla	8	14,4	116
Pica Matilla *	3	17	50

*Fuente: Elaboración propia*

#### 7.7.7 Condición de nivel conocido del límite sur

Se impuso la altura conocida en el límite sur, específicamente en la garganta de la zona oriente, donde el flujo se descarga hacia la zona del Salar Sur Viejo. Esta altura corresponde a un nivel piezométrico registrado en un pozo DGA que posee un código BNA asociado. Se asumieron dos gradientes lineales crecientes en dirección Oeste – Este, una pendiente baja en la zona plana (entre las cotas 968 y 974 msnm) y una pendiente mayor en la zona de alta caída de potencial (entre las cotas 974 y 999 msnm). Además, se asumió un decaimiento lineal temporal de 1 metro homogéneo en el dominio espacial.

### 7.7.8 Pozos de explotación

Se realizó un análisis de la información de pozos de producción existente que concluyó que existen alrededor de 15 pozos de bombeo de caudales considerables que no fueron incluidos en el modelo de la fase I, los cuales fueron ingresados en el actual proceso de modelación. Los pozos utilizados en el modelo se clasificaron dependiendo de su uso; diferenciándose entre aguas de uso minero, particular y de agua potable.

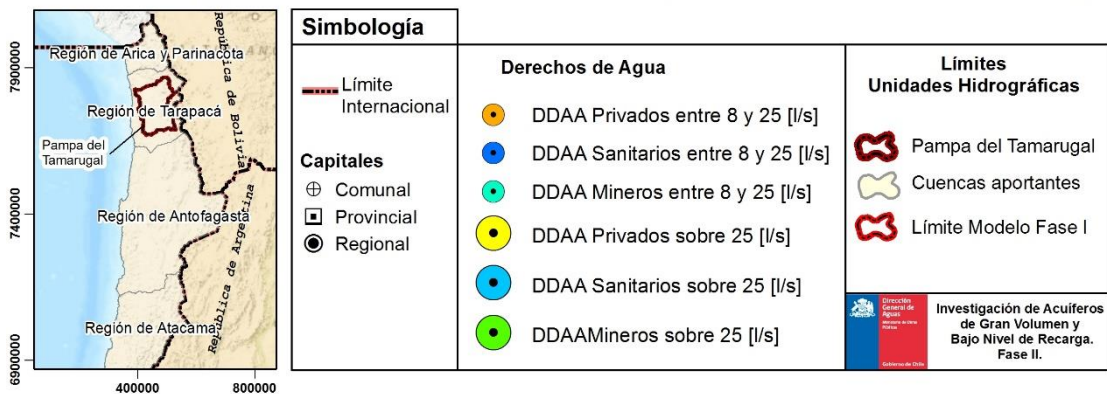
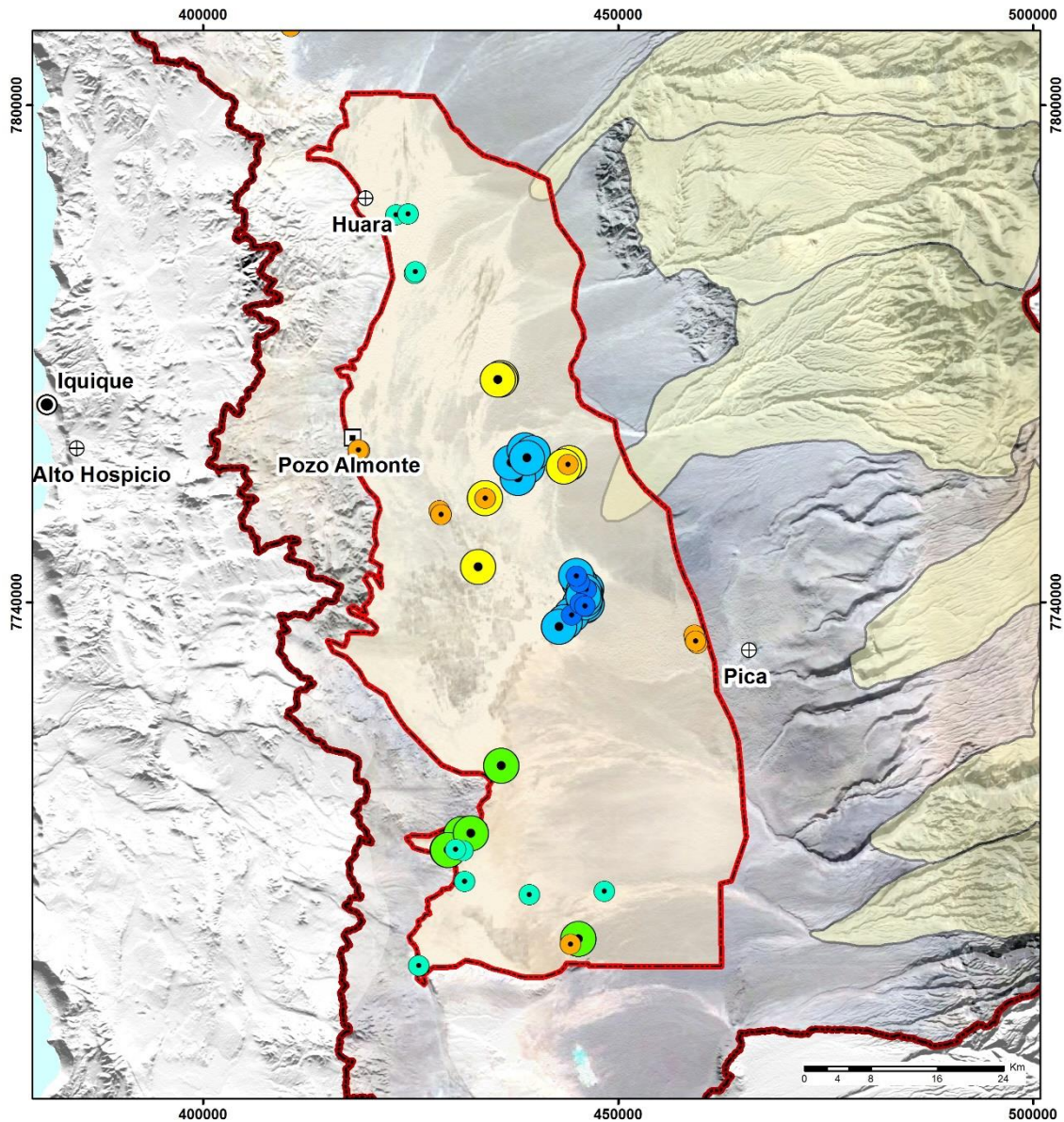
**Tabla 7.2: Resumen de caudales de bombeo utilizados en el modelo.**

Item	N° Derechos Pozos	N° Pozos con producción mayor a 20 [l/s]	Caudal total DGA[l/s]	Factor de Uso		Caudal total en pozos de extracción modelo [l/s]
Mineras	54	15	707,2	1		707
Particulares	367	10	1.067,5	0,5		534
Sanitarias	40	40	2.358,0	Con información	0,72	1.346
				Sin información	0,75	366
Total	461	65	<b>4.132,7</b>			<b>2.953</b>

*Fuente: Elaboración propia*

Los mayores caudales de extracción registrados en esta zona corresponden a empresas sanitarias y a empresas mineras.

**Figura 7-2: Distribución espacial para pozos con derechos de extracción consuntivos superior a 8 [l/s].**



Fuente: Elaboración propia

### 7.7.9 Niveles freáticos

Para el régimen transiente se utilizaron los 40 pozos con mayor cantidad de registros en el tiempo, pertenecientes a la red hidrometeorológica de la Dirección General de Aguas. En ambos casos se buscó cubrir de la manera más homogénea posible el dominio, sujeto a los datos disponibles y su confiabilidad. En promedio se tiene una tasa de descenso de 10 cm por año.

## 7.8 Calibración del régimen permanente

### 7.8.1 Resultados de la calibración

Al terminar el proceso de calibración se obtuvo una solución con un RMS del orden del 0,5%, pero se debió sacrificar la precisión del régimen permanente en función de mejorar los resultados en el régimen impermanente.

### 7.8.2 Balance hídrico

El balance global de la cuenca hidrogeológica para el modelo numérico calibrado en régimen permanente, presentado en el **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**, d esagregado por las principales componentes de entrada y salida del sistema

**Tabla 7.3: Balance Hídrico Flujos Modelo Permanente (CNP) (l/s)**

ENTRADAS			ERROR
Recarga Subterránea de Quebradas y otros	416	416	0,12%
Aroma	45		
Tarapacá	125		
Quipisca	13		
Quisma	29		
Chacarillas	116		
Límite Norte	13		
Sagasca	25		
Pica - Matilla	50		
SALIDAS			
Evaporación Salares	96,7	417	
Evapotranspiración	188,3		
Descarga Salar Sur Viejo	132		

Fuente: Elaboración propia

## 7.9 Calibración del régimen transiente

El resultado obtenido con el régimen permanente corresponde a la situación inicial de la modelación transiente, por lo tanto, el modelo CNP corresponde a un input de niveles piezométrico iniciales para el modelo CAT (distribución espacial en todo el dominio de la altura piezométrica). Durante la calibración/validación se realiza un proceso iterativo, en

donde los cambios a CNP afectan a CAT y si se realizan modificaciones en CAT estas significan correr nuevamente CNP para obtener la situación inicial.

**Tabla 7.4: Balance Hídrico año 2017, Flujos Modelo en régimen Transiente (CAT) (l/s)**

<b>ENTRADAS</b>			<b>ERROR</b>
Recarga Subterránea de Quebradas y otros	416	416	0,001%
<b>SALIDAS</b>			
Evaporación Salares	32,9	2.540,1	
Evapotranspiración	221,4		
Descarga Salar Sur Viejo	132,8		
Pozos de bombeo	2.255,1		
<b>VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO</b>			
Desembalse	2.124,1	2.124,1	

*Fuente: Elaboración propia*

Existen 6 zonas de stress hídrico importante en el acuífero de la Pampa del Tamarugal, las que se encuentran en las zonas de:

- producción de agua potable en sector Canchones.
- producción de agua potable en sector El Carmelo.
- salares de Bellavista y Pintados, correspondientes al proyecto Pampa Hermosa.
- derechos mineros e industriales ubicados a 6 km al norte de la zona El Carmelo.
- La Tirana, alrededor de 5 km en dirección sur de la localidad.
- al norte del límite superior del modelo (límite Norte), en donde a la fecha se la DGA ha asignado del orden de 175 l/s, cantidad superior a lo estimado que representa la recarga de la quebrada de Aroma.

De los resultados obtenidos la principal conclusión es que la variación del almacenamiento tiene relación directa con la cantidad bombeada, esto se debe a que la explotación de aguas subterráneas se realiza a expensas del almacenamiento y no de la recarga, lo que representa una condición de explotación no sostenible.

### **7.10 Modelación de escenarios futuros**

Una vez calibrado el modelo, se definieron y modelaron 6 escenarios futuros (CFT), entregando respuestas en base a la calibración realizada:

- **[CFT E1] No se realiza ningún cambio operacional desde 2017:** se proyecta un escenario con la explotación tal y como ocurre en la actualidad, en donde no se ejerce la totalidad de los derechos constituidos y la recarga media no disminuye. Este escenario corresponde a un caso favorable, ya que no toma en cuenta variables de cambio climático (disminución de la recarga) ni el aumento de la demanda de agua

---

potable. Permite visualizar el futuro del acuífero de la Pampa del Tamarugal si se siguiese explotando sin tomar ninguna medida.

- **[CFT E2] Dejan de operar los pozos de las empresas sanitarias:** es sabido el desbalance que posee el acuífero en estudio, en donde las extracciones superan del orden de 5 veces la recarga, en este escenario se eliminan las extracciones de las empresas sanitarias a partir del año 2017, pensando en una alternativa para la producción de agua potable, tal como la desalación de agua de mar, que permita disminuir el estrés hídrico al que se encuentra sometida la Pampa del Tamarugal. La recarga es la misma que el escenario anterior, permitiendo comparar si una alternativa de fuente de agua potable mejora o no la situación futura del acuífero.
- **[CFT E3] Dejan de operar todos los pozos de extracción en el dominio del modelo:** en este ejercicio de modelación, que se considera inviable de implementar, se eliminan las extracciones producto del bombeo a partir del año 2017. Este escenario entrega nociones del tiempo que necesita el acuífero para recuperar los niveles iniciales.
- **[CFT E4] Operan todos los pozos con la totalidad de los derechos de agua asignados:** este escenario corresponde a uno pesimista, en el que desde el año 2017 en adelante se hace usufructo del total de los derechos de aguas asignados y la recarga se mantiene igual que en los 3 años anteriores. Con este escenario se muestra el futuro de la Pampa del Tamarugal con la actual asignación de derechos de agua consuntivos establecida.
- **[CFT E5] En el año 2017 disminuye la recarga en un 10%:** en este escenario se muestra la sensibilidad del modelo y del acuífero a la variación en la recarga (disminución y aumento), sin focalizarse exclusivamente en la actual fase de cambio climático y cómo afecta esto a la situación de largo plazo, es decir, a los niveles piezométricos y a la variación del almacenamiento en los periodos finales de la modelación.
- **[CFT E6] La recarga es variable de forma aleatoria en un rango de [-40%; 40%]:** se crea un vector de variación aleatoria dentro de ese rango para los 57 pasos de tiempo y se aplica a las recargas provenientes de las quebradas, este ejercicio muestra el comportamiento del acuífero frente a una recarga variable a escala anual y cómo ésta afecta a la variación del almacenamiento en el largo plazo. Es importante tener en cuenta que el promedio de la recarga es el mismo que en los 4 primeros escenarios, por lo que este escenario es comparable con el escenario 1.

En la Tabla 7.5 se muestra el año de inicio y de fin para los escenarios de modelación, además el caudal inicial de extracción producto del bombeo y el valor de la recarga a lo largo de la modelación. Como ya se mencionó en el escenario E6 varía en torno a 416 l/s de manera aleatoria entre 40% y -40%.

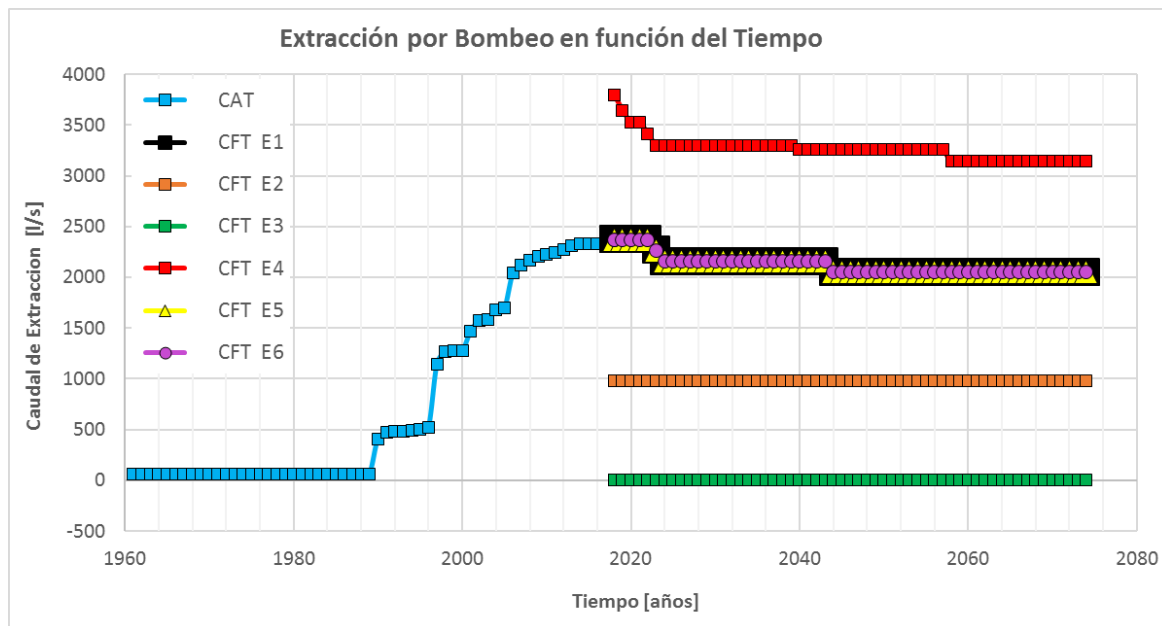
**Tabla 7.5: Resumen de Escenarios de Modelación.**

Escenario	Inicio modelación [año]	Fin modelación [año]	Caudal de Bombeo [l/s]	Recarga [l/s]
<b>CFT E1</b>	2017	2074	2.369	416
<b>CFT E2</b>	2017	2074	979	416
<b>CFT E3</b>	2017	2074	0	416
<b>CFT E4</b>	2017	2074	3.790	416
<b>CFT E5</b>	2017	2074	2.369	374,4
<b>CFT E6</b>	2017	2074	2.369	variable

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7-3 se muestra la evolución en el tiempo de los caudales totales de extracción por bombeo en el modelo CAT y en los distintos escenarios modelados. A partir de 2017 (escenarios simulados) se observan disminuciones conforme avanza el tiempo, ese fenómeno corresponde a pozos "colgados", es decir, el nivel freático está bajo el nivel inferior de las zonas de captación (cribas).

**Figura 7-3: Extracción por bombeo para los 6 escenarios modelados.**



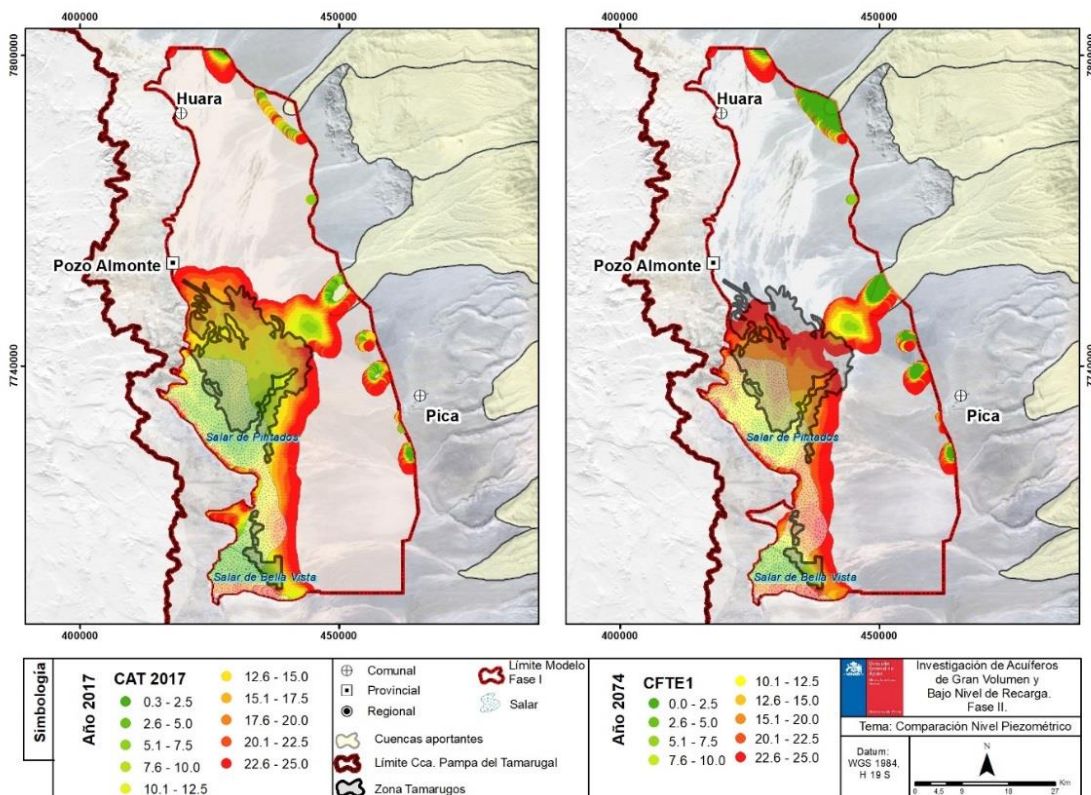
Fuente: Elaboración propia

## 7.11 Resultados

Los resultados que se presentan a continuación dan cuenta de algunos elementos esperables. Es importante mencionar que las zonas más someras del acuífero se encuentran en donde existen salares y plantaciones de tamarugos.

Se presenta un set de figuras en las que se comparan distintos escenarios entre sí; en particular las zonas con nivel freático menor que 25 metros los que, tal como se menciona en el párrafo anterior, corresponden al lugar hacia donde confluyen las aguas subterráneas.

**Figura 7-4: Comparación Profundidad del nivel piezométrico situación CAT año 2017 vs CFT E1 año 2074.**

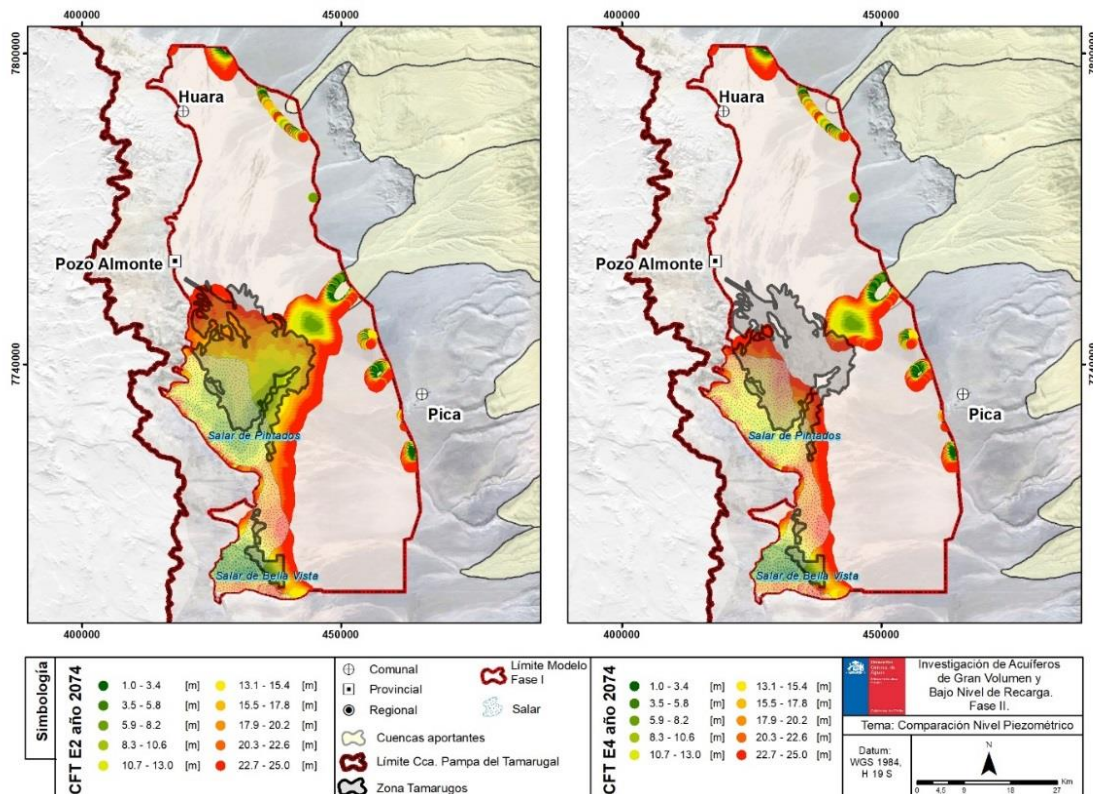


Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa la profundización nivel freático, en especial en la zona de tamarugos, lo que los afectaría directamente. La explicación de este fenómeno tiene dos causas principales: el desarrollo de los conos de depresión debido a la actividad de los pozos de agua potable en las zonas de El Carmelo y Canchones, que implica la presencia de extensos y profundos conos de depresión; y el descenso generalizado de los niveles de aguas subterráneas en la Pampa del Tamarugal producto de su explotación, pues los derechos de agua concedidos sobrepasan al menos 8 veces la recarga estimada y los caudales de extracción por bombeo que están operando en este escenario (CFT E1) son del orden de 5

veces mayores que la recarga. La situación prevista es un escenario muy desfavorable para la sustentabilidad del acuífero de la Pampa del Tamarugal, considerando que el escenario planteado no aumenta la demanda de agua potable y no considera una disminución de la recarga en función del tiempo. Por lo tanto, si no se toman medidas se espera un escenario aún más complejo que el actual para el año 2074.

**Figura 7-5: Comparación Profundidad del nivel piezométrico situación CFT E2 año 2074 vs CFT E4 año 2074.**



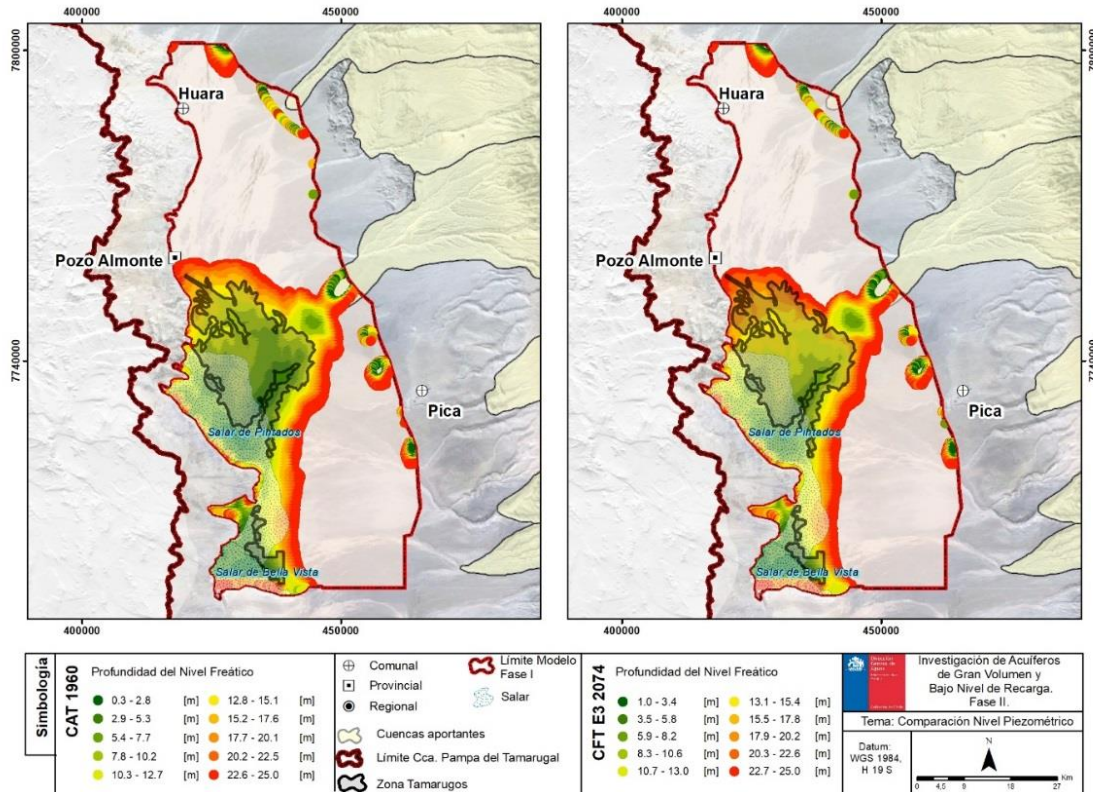
Fuente: Elaboración propia

En este caso se presenta una comparación entre la situación final para el escenario 2 y la situación final para el escenario 4. El escenario 2 supone que dejen de operar las empresas sanitarias. El escenario 4 por su parte corresponde a todos los derechos asignados por la DGA hasta el año 2017 operando con factor de uso igual a 1. La situación del escenario 2 es menos crítica que para el escenario 1, ya que los conos de depresión producto de la extracción de agua de las empresas sanitarias no se desarrollarían, pero aun así existe un desembalse importante en el acuífero.

El caudal extraído en el escenario 2 equivale a un 41% del extraído en el escenario 1, por tanto, reiterando que el desembalse es relación directa de la extracción mediante bombeo,

ya que la recarga apenas logra cubrir la evaporación en la zona de los salares, la evapotranspiración de los tamarugos y la salida por el límite sur.

**Figura 7-6: Comparación Profundidad del nivel piezométrico situación CAT año 1960 vs CFT E3 año 2074.**



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se comparó la condición natural del modelo CAT 1960 con la situación final para el escenario 3, en que desaparece el bombeo. Transcurridos 57 años de modelación se podría esperar que el acuífero recuperara sus niveles, pero esta proyección no se cumple, si bien la situación mejora bastante: los conos de depresión desaparecen, pero no se recupera el desembalse realizado al acuífero, observándose una distribución uniforme del descenso del nivel freático.

Con el argumento ya señalado del bajo valor de la recarga y su equilibrio con la evaporación, evapotranspiración y la salida por el límite sur, se puede afirmar que no existe un caudal sostenible de extracción en los 50 años considerado en las simulaciones realizadas, es decir, el acuífero se encuentra bajo un proceso de desembalse de no darse situaciones muy poco probables en el corto o mediano plazo, como podría ser el aumento de la recarga del modelo. Una consecuencia de ello sería la desaparición de los tamarugos.



del fenómeno en estudio son las extracciones producto del bombeo, las que se recomienda reducir lo más posible.

**Tabla 7.6: Tasa de descenso de niveles freáticos en los 6 escenarios de modelación para pozos analizados .**

Pozo	Tasa de descenso [m/año]					
	Escenarios					
	CFT E1	CFT E2	CFT E3	CFT E4	CFT E5	CFT E6
<b>El Carmelo 2</b>	-0,345	-0,050	0,063	-0,474	-0,345	-0,345
<b>Luis Quispe</b>	-0,169	0,003	0,040	-0,462	-0,169	-0,169
<b>Jica D</b>	-0,143	-0,113	-0,038	-0,191	-0,143	-0,143
<b>Hispania</b>	-0,134	-0,048	-0,006	-0,298	-0,134	-0,134
<b>Guillermo Araya</b>	-0,208	-0,111	-0,005	-0,357	-0,208	-0,208
<b>Jica 7</b>	-0,090	-0,046	-0,016	-0,170	-0,090	-0,090
<b>Bellavista 74</b>	-0,101	-0,100	0,008	-0,105	-0,101	-0,101
<b>Jica F</b>	-0,049	-0,049	-0,012	-0,051	-0,049	-0,049
<b>Pintados 2</b>	-0,093	-0,066	0,009	-0,137	-0,093	-0,093
<b>Mínimo</b>	-0,049	0,003	0,063	-0,051	-0,049	-0,049
<b>Máximo</b>	-0,345	-0,113	-0,038	-0,474	-0,345	-0,345
<b>Promedio</b>	<b>-0,148</b>	<b>-0,064</b>	<b>0,005</b>	<b>-0,249</b>	<b>-0,148</b>	<b>-0,148</b>

Fuente: Elaboración propia

## 8 CAPACITACIÓN A FUNCIONARIOS DE LA DGA

Se desarrollaron capacitaciones a nivel central y regional, ambas en dependencias de la DGA, los asistentes fueron funcionarios de la DGA.

La capacitación fue de carácter teórico – práctico, con dos módulos expositivos estilo cátedra y uno práctico enfocado en la creación de un modelo básico en VMOD Classic. Los contenidos corresponden a introducción a la hidrogeología e hidráulica de aguas subterráneas, conocimientos básicos de modelación numérica; introducción al software, su interfaz gráfica e infraestructura de archivos; en el último módulo se combina lo teórico y lo práctico para abordar el contexto de la Pampa del Tamarugal, el modelo conceptual utilizado, el modelo numérico realizado, funcionamiento y uso de PEST como herramienta complementaria y el uso de Python como herramienta complementaria.

Con respecto a la estación meteorológica, se realizó un módulo expositivo sobre su ubicación, características, parámetros que mide, la configuración utilizada, la instrumentación que posee con sus respectivos detalles técnicos y se comentó sobre su

---

mantención. Además, se realizó la entrega de la estación a la DGA en terreno en la que participó el director regional de Tarapacá de la DGA.

## **9 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

Se construyó un Sistema de Información Geográfica (SIG) que contiene y estructura de una forma lógica tanto la información de carácter espacial que se recopiló en las labores de gabinete y de terreno, incorporando toda la información secundaria relevante, recopilada y factible de ser espacializada, y que constituyen antecedentes de naturaleza hidrológica, geológica, hidrogeológica, geomorfológica, geofísica, de uso, gestión y monitoreo del recurso hídrico superficial y subterráneo, infraestructura asociada, suelo (de carácter bidimensional), relativos al área de estudio.

## **10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **10.1 Conclusiones**

- Los resultados del estudio son consistentes e indican que el acuífero está sometido a una explotación intensiva no sostenible, dado que las extracciones, asociadas a los derechos de agua otorgados, son un orden de magnitud mayor que la recarga global estimada del acuífero.
- El cálculo de la evapotranspiración de los tamarugos corresponde a una brecha de información a cubrir, existe bastante bibliografía al respecto, pero desde el enfoque agronómico y no desde el enfoque de un balance hídrico, es decir, se concentra en descripciones de la especie, índices de vida o mecanismos de succión y no a la demanda evapotranspirativa en particular; no se encuentra un valor de evapotranspiración potencial asociada al cultivo o experimentaciones realizadas con lisímetros o instrumentos similares.
- Desde el punto de vista del balance hídrico enfocado en la producción de aguas subterráneas, no aparece recomendable la reforestación de tamarugos, realizada hace algún tiempo, ya que el aumento de ejemplares genera un aumento de la descarga del acuífero, en detrimento de la explotación de aguas subterráneas (mucho menor a las extracciones actuales, pero si importante en la época en que se realizó). Si bien en la época que se propuso esta iniciativa no existían las herramientas adecuadas para esta toma de decisiones, la ubicación espacial en donde se realizó la reforestación también aparece como no recomendable, pues se plantaron los nuevos tamarugos en sectores en los que el nivel freático se profundiza en forma natural, tendencia que se acentúa debido a la producción de agua potable.

- 
- Las tasas medidas y las calculadas de descenso de los niveles del agua subterránea no son homogéneas en el dominio del modelo, es decir, hay sectores con tasas mayores (en especial en los radios de influencia de los conos de depresión que producen las extracciones de gran caudal), zonas de menor variación (en particular en las zonas cercanas a las condiciones de contorno, esto es, abanicos de recarga de las quebradas y condición de altura conocida impuesta en el modelo) y las zonas que representan el descenso generalizado de la Pampa del Tamarugal.
  - Por las condiciones particulares del acuífero, la variación del almacenamiento en el tiempo se encuentra determinada principalmente por el caudal de extracción por bombeo, por lo que los resultados de los distintos escenarios quedan notoriamente sujetos a la variable bombeo por sobre cualquier otra.
  - Los resultados de la simulación de escenarios futuros realizada mediante el modelo numérico implementado, en los que, o bien se mantiene la situación actual de explotación, o bien, se extrae un caudal igual a todos los derechos de aguas asignados a la fecha, entregan como resultado un descenso sostenido del acuífero y un desarrollo de importantes conos de depresión en las zonas de explotación intensiva. Esto provocará un descenso de los niveles freáticos, lo que impactaría en primera instancia los pozos menos profundos (usuarios agrícolas), y afectaría las zonas de niveles someros donde se encuentran los tamarugos, provocando una pérdida de cobertura vegetal irreversible en el contexto de los escenarios simulados.
  - Se confirmó que, en el contexto de los escenarios futuros simulados, el descenso de los niveles del agua subterránea del acuífero de la Pampa del Tamarugal es irreversible, dado que las extracciones de ese recurso sobrepasan las recargas. Asimismo, se constató que la variable que domina el descenso de niveles corresponde a las extracciones por bombeo, las que son un orden de magnitud mayor a la recarga, a la evaporación, a la evapotranspiración y al caudal de salida por el límite sur; es decir, se extrae al menos 7 veces más aguas subterráneas de lo que ingresa al acuífero como recarga.
  - Toda reducción en la extracción de agua mediante el bombeo es una mejora a la situación actual y futura. Para mejorar la situación futura de las zonas someras sin tener que disminuir la explotación, se propone trasladar las zonas de extracción intensiva a lugares donde los conos de depresión no afecten los niveles someros como lo hacen en la actualidad. Lo anterior implica trasladar estas extracciones a las zonas alejadas de los abanicos de las quebradas y de las zonas someras, por

---

tanto, los lugares disponibles tendrán el espejo de agua a mayor profundidad que en la actualidad.

- Los resultados de la variación del 10% en el valor de la recarga es equivalente a la variación del 2% en el caudal de extracción por bombeo para el escenario E1, esto se traduce en que los efectos de aumentar un 50% la recarga es equivalente a disminuir un 10% los caudales de extracción de bombeo. Y si bien es muy importante determinar la recarga del acuífero, las extracciones por bombeo dominan el comportamiento del acuífero.
- En cuanto al volumen de desembalse acumulado, continuar la explotación tal como ocurre en la situación actual (Escenario E1) durante 57 años, produciría un desembalse mayor del orden de 4.000 Mm<sup>3</sup> que el escenario de extracción cero (Escenario E3).
- Si a partir del año 2017 se bombeara un caudal equivalente a todos los derechos de agua asignados al año 2018 (Escenario E4), el desembalse acumulado al final de la modelación es del orden de 7.500 Mm<sup>3</sup>, es decir, un 136% más que en el escenario de continuar la situación actual (escenario E1).
- Respecto de las tasas de descenso de nivel freático, se determinó que, para el escenario más desfavorable, la tasa de descenso promedio del nivel freático será de 25 cm/año, lo que significa un descenso promedio esperado de al menos 12 metros en los próximos 50 años, 5 metros más que si se continua con la regla de operación actual. Específicamente en el sector de El Carmelo (pozo el Carmelo 2) estos descensos serán mayores, del orden de los 23 m al igual que en el sector de Canchones (pozo Luis Quispe).
- El escenario más favorable de los estudiados, correspondiente al cese de las extracciones sanitarias CFTE2 (en que las empresas sanitarias producirían agua potable mediante la desalación de agua de mar), se esperaría que dentro de 50 años los descensos promedios fuesen del orden de los 5 m. Se esperaría que, en el sector de El Carmelo, los descensos sean del orden de los 3 m y que en el sector de Canchones sean prácticamente nulos.
- Con respecto a las consecuencias de la actividad minera, en el sector del Salar de Pintados se esperan descensos del orden de los 6 m (pozo Pintados 2) y de 5 m en el sector del Salar Bellavista (pozo Bellavista 74), en los escenarios en donde estas extracciones no existen, los descensos se reducen a cero.

---

## 10.2 Recomendaciones

### 10.2.1 Recomendaciones técnicas

- Si bien el enfoque principal tiene que ver con la gestión, se propone instalar estaciones meteorológicas y fluviométricas en las quebradas aportantes, que permitan registrar tanto condiciones medias como eventos extremos. Las condiciones medias permitirán alimentar modelos con datos suficientes en cantidad y calidad, dimensionando con mayor precisión el aporte de las quebradas tributarias a la recarga del acuífero de la Pampa del Tamarugal. La medición de los eventos extremos y el monitoreo de las precipitaciones en tiempo real, permitirán a la región implementar un sistema de alerta temprana de efectos aluvionales, e implementar medidas de adaptación a los efectos del cambio climático.
- Con respecto a la modelación de aguas subterráneas, se propone realizar un modelo con estratificación en la vertical y con malla no estructurada, con posibilidad de refinamiento local. Una herramienta de modelación idónea es Groundwater Vistas (GWV) o similar. Se hace la salvedad que los resultados de largo plazo no cambiarían con un nuevo modelo, pero sí permitiría simular escenarios de corto plazo con mayor detalle, analizar operaciones de extracción local, y simular efectos puntuales en los conos de depresión.
- Con respecto a la instrumentación, se recomienda monitoreo de niveles en el perímetro de las zonas de extracción intensivas, que acompañen a la política de control de extracciones. Con respecto al monitoreo de niveles para futuros modelos numéricos, se recomienda instalar pozos de observación a la entrada y a la salida del modelo, como también monitorear el ingreso de caudales en las quebradas (condiciones de entrada y salida e inputs del modelo).
- Se recomienda implementar un monitoreo regular de las extracciones y descensos de las napas, ejerciendo un mayor control y fiscalización por parte de la autoridad en las zonas de extracción intensiva asociada a usuarios sanitarios e industriales.
- Se recomienda la instalación de estaciones de monitoreo de niveles piezométricos en las zonas de extracción intensiva (se sugiere realizar el monitoreo de niveles a ritmo mensual o semanal, para inferir las fluctuaciones producto de las reglas operacionales), con el fin de identificar, estudiar y cuantificar los conos de depresión generados producto de la extracción. Asimismo, se recomienda definir puntos de control y de alerta respecto a tasas de descenso.

- 
- Se propone que la implementación de elementos de monitoreo por parte de privados sea, al menos, un sensor en cada vértice del cuadrilátero inserto en el mapa correspondiente.
  - Adicionalmente, se propone instalar pozos de monitoreo de niveles en los abanicos fluviales de las quebradas para estimar la recarga que ingresa a la Pampa del Tamarugal e investigar como varían las condiciones de contorno del acuífero. También se propuso mejorar el monitoreo en la salida hacia el salar Sur Viejo, para conocer apropiadamente todas las condiciones de borde.
  - Se recomienda incluir el “agua del minero” en futuras ejecuciones del modelo generado en este estudio, o en nuevos modelos que se realizaren en el futuro, en el acuífero de la Pampa del Tamarugal. En efecto, esta extracción es relevante para estudiar la variación de niveles y almacenamiento de aguas subterráneas en ese acuífero, y no ha sido considerada hasta la fecha, por no tratarse de derechos de agua que constituya la DGA, sino que son derechos de agua automáticamente ejercidos por los dueños de pertenencias mineras. El “agua del minero”, en el caso de la zona sur de la Pampa del Tamarugal, se emplean en las faenas de obtención de litio, mediante la evaporación de las salmueras extraídas en ese sector, y forman parte de las descargas del balance hídrico.

#### 10.2.2 Recomendaciones administrativas y de gestión

- Las conclusiones de este estudio indican que el acuífero se encuentra sobreotorgado, por lo tanto, si bien mediante Resolución DGA N° 245, de 30 de diciembre de 2009, se declaró área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas el sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado Pampa del Tamarugal, en atención a los resultados de este estudio se propone declarar este sector como Zona de Prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas.
- A partir de los resultados de este estudio es posible anticipar que, en un mediano plazo, y de acuerdo con las hipótesis de los diversos escenarios simulados, se generará un aumento en los conflictos entre los usuarios (agrícolas, industriales, sanitarios), dados los significativos descensos que experimentarían los niveles freáticos en diferentes sectores dentro del acuífero.
- Se recomienda enfocar los esfuerzos en la gestión sostenible del acuífero, con la participación e involucramiento de todos los usuarios, priorizando un uso que permita minimizar los efectos negativos sobre el sector agrícola y la densidad de tamarugos.

- 
- Lo anterior hace imprescindible la organización legal de una Comunidad de Aguas Subterráneas (CASUB), de manera de que los distintos usuarios se involucren y coordinen para realizar una gestión eficiente del sector acuífero. Las principales tareas que la Comunidad de Aguas Subterráneas debería desarrollar son:
    - Mesas de trabajo (CASUB y Autoridades)
    - Evaluación de medidas de reducción temporal de extracciones
    - Control y monitoreo de extracciones
  - Se propone realizar mesas de trabajo con todos los actores involucrados, para anticiparse a la aparición de escenarios críticos y buscar soluciones para que las extracciones intensivas no afecten a ninguno de los usuarios actuales.
  - Tal como se mencionó, las soluciones pueden apuntar a un cambio de los puntos actuales de extracción intensiva del acuífero, o el cambio gradual de la fuente de abastecimiento de los principales usuarios (sanitarios e industriales), desde esas aguas subterráneas al uso de agua de mar, mediante desalinización.