



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

LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA MODELACIÓN DEL ACUÍFERO DE PICA, CUENCA DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL, REGIÓN DE TARAPACÁ

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

GHD

S.I.T. N° 294

Santiago, Diciembre 2012

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Abogada Sra. Maria Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas (TP)
Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sra. Andrea Osses Vargas

Profesionales División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Miguel Caro Hernández

GHD

Jefe de Proyecto
Oscar Bustamante

Profesionales
Adam Tilling
Sergio Payacan
Bárbara Soto
Chris Nicol

Agradecimientos

GHD le agradece al CIDERH por su valiosa información entregada incluyendo los datos de estratigrafía de sondajes y pozos, y los datos de pruebas de bombeo

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	1
1.2	Alcance.....	1
1.3	Metodología.....	2
1.4	Preguntas clave para el modelo conceptual.....	2
2.	Área del Estudio.....	3
3.	Recopilación de Antecedentes en Gabinete.....	4
3.1	Informes Anteriores.....	4
4.	Catastro de Pozos, Socavones y Vertientes.....	19
4.1	Metodología.....	19
4.2	Resumen de resultados.....	20
4.3	Demanda Total de Aguas Subterráneas.....	22
5.	Prospecciones Geofísicas.....	25
5.1	Objetivos.....	25
5.2	Resultados.....	25
6.	Caracterización Hidrológica.....	35
6.1	Clima.....	35
6.2	Hidrología.....	48
7.	Caracterización Hidrogeológica.....	50
7.1	Geología.....	50
7.2	Unidades Hidrogeológicas.....	58
7.3	Exploración de aguas subterráneas.....	59
7.4	Profundidad del agua subterránea.....	60
7.5	Tendencia del nivel de agua subterránea.....	60
7.6	Propiedades de los Acuíferos.....	62
7.7	Flujo de Aguas Subterráneas.....	63
7.8	Recarga.....	68
7.9	Descarga.....	75
7.10	Estimación del volumen del acuífero.....	76
8.	Modelo Conceptual.....	79
8.1	Brechas de datos clave y ambigüedades.....	86

9.	Recomendaciones para la red de monitoreo y la gestión del acuífero	86
9.1	Pozos y Sondajes	86
9.2	Áreas de Uso Restringido.....	87
9.3	Uso Neto Restringido	88
9.4	Red de Monitoreo	88
9.5	Perforación de los Sondajes y Pruebas de Propiedades de Acuífero	88
9.6	Modelo Numérico de Flujo de Agua Subterránea.....	89
10.	Referencias	91

Índice de Tablas

Tabla 4.1	Datos de Temperatura.....	21
Tabla 4.2	Datos de Conductividad Eléctrica	22
Tabla 4.3	Derechos de Agua Aprobada	23
Tabla 4.4	Estimación de la Demanda Real de Aguas Subterráneas de Pica / Matilla	24
Tabla 6.1	Información general de estaciones meteorológicas seleccionadas ..	36
Tabla 6.2	Precipitación media mensual y anual (mm)	38
Tabla 6.3	Evaporación anual (mm)	45
Tabla 7.1	Litología de la Formación Altos de Pica	52
Tabla 7.2	Resumen de los Datos de Estratigrafía	54
Tabla 7.3	Resultados del Análisis de las Pruebas de Bombeo	62
Tabla 7.4	Estimaciones Anteriores de Recarga	68
Tabla 7.5	Estimaciones Actualizadas de Recarga.....	71
Tabla 7.6	Estimaciones del Volumen del Acuífero Accesible	77
Tabla 8.1	Componentes del modelo conceptual	80
Tabla 9.1	Estimaciones de Radio de Influencia.....	87
Tabla 9.2	Sondajes de Monitoreo Adicionales Propuestas	89

Índice de Diagramas

Diagrama 1 Acuífero de Pica (modificado de DGA 1998)	5
Diagrama 2 Sistemas de Flujo de Aguas Subterráneas de Pica (modificado de DGA 2004)	7
Diagrama 3 Mapa Hidrogeológico del Área de Estudio (modificado de DGA 1989)	8
Diagrama 4 Cuencas de la Primera Región (modificado de DGA 1999)	11
Diagrama 5 Dos principales tipos de aguas de aporte en la cuenca de la Pampa del Tamarugal (modificado de DGA 1999)	12
Diagrama 6 Dos flujos principales de aguas de aporte desde la Cordillera de los Andes hacia el Valle Central (modificado de DGA 1999)	14
Diagrama 7 Resumen de resultados de parámetros físico-químicos	21
Diagrama 8 Perfil TEM 1	27
Diagrama 9 Perfil TEM 2	28
Diagrama 10 Perfil TEM 3	28
Diagrama 11 Perfil TEM 4	29
Diagrama 12 Perfil TEM 5	29
Diagrama 13 Perfil TEM 6	30
Diagrama 14 Perfil TEM 7	30
Diagrama 15 Perfil TEM 8	31
Diagrama 16 Perfil Gravimetría 1	32
Diagrama 17 Perfil Gravimetría 2	33
Diagrama 18 Perfil Gravimetría 3	33
Diagrama 19 Perfil Gravimetría 4	34
Diagrama 20 Perfil Gravimetría 5	34
Diagrama 21 Precipitación Anual (mm) – Estaciones Meteorológicas DGA	39
Diagrama 22 Relación entre precipitación media anual y altitud	40
Diagrama 23 Precipitación Acumulativa para Estaciones de Salar de Huasco	42
Diagrama 24 Precipitación Media Mensual (mm) – Estaciones Meteorológicas DGA	43
Diagrama 25 Evaporación Mensual (mm) – Estaciones Meteorológicas DGA	46
Diagrama 26 Temperatura Media Mensual (°C) – Estaciones Meteorológicas DGA	47
Diagrama 27 Temperatura Diaria (°C) – Estación Alto Huasco	48
Diagrama 28 Caudal medio diario (l/s) – Estaciones de la DGA	50

Diagrama 29 Diagrama Conceptual de la Geología Estructural del Área de Estudio	51
Diagrama 30 Sección Geología Norte de Pica (Galli 1962)	57
Diagrama 31 Niveles de agua subterránea (Pica, Esmeralda y Puquío de Núñez)	61
Diagrama 32 Zona de Fracturas Potenciales identificada por sondajes con alta permeabilidad, vertientes y el sondaje surgente de Chintaguay	63
Diagrama 33 Pendientes Hidráulicas de Pica	64
Diagrama 34 Las Zonas de Recarga	71
Diagrama 35 Flujo de aguas subterráneas hacia Pica / Matilla y Puquío de Núñez	74
Diagrama 36 Flujo de agua subterránea hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal	78
Diagrama 37 Condiciones de fronteras propuesta para un modelo numérico localizado del sistema de flujo Pica / Matilla	91

Figuras

- Figura 1 – Cuencas Hidrográficas y Área de estudio
- Figura 2 – Subcuencas de la Pampa del Tamarugal
- Figura 3 – Mapa de Hidrología del Área de estudio
- Figura 4 – Geología
- Figura 5 – Catastro de pozos, vertientes, socavones y sondajes
- Figura 5a – Catastro de los Pozos, Vertientes, Socavones y Sondajes
- Figura 6 – Mapa de Equipotenciales de Aguas Subterráneas
- Figura 7 – Isotermas
- Figura 8 – Isoconductividades
- Figura 9 – Derechos de Aguas Aprobados
- Figura 10 – Perfiles Geofísicos
- Figura 11 – Interpolación Cota Basamento
- Figura 12 – Interpolación Profundidad Basamento
- Figura 13 – Datos de Estratigrafía y Pruebas de Bombeo Analizadas
- Figura 14 – Derechos de Aguas Aprobados - Radio de Influencia Estimada
- Figura 15 – Esquema del Modelo Conceptual (Vista en Planta)
- Figura 16 – Esquema del Modelo Conceptual (Sección)
- Figura 17 - Puntos de Monitoreo Adicionales Propuestos

Anexos

Anexo A Catastro - Base de Datos

Anexo B Informe de Geofísica

Anexo C Datos de Estratigrafía

Anexo D Análisis de Pruebas de Bombeo

Anexo E Cálculos de Evapotranspiración

1. Introducción

La Dirección General de Aguas (DGA), dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP), ha adjudicado a GHD el proyecto denominado "Levantamiento de Información Hidrogeológica para Modelación Acuífero de Pica, Cuenca de la Pampa del Tamarugal, Región de Tarapacá". El área del estudio se indica en la Figura 1.

1.1 Objetivos

De acuerdo a los Términos de Referencia el *"objetivo general del estudio es el levantamiento de la información hidrogeológica para el desarrollo de un modelo conceptual de la cuenca hidrogeológica del acuífero de Pica y Matilla, con miras a la modelación matemática"*.

El propósito es ampliar el conocimiento de los recursos hidrogeológicos con los objetivos del mejoramiento de la red de monitoreo existente y efectuar recomendaciones para la gestión del acuífero, por ejemplo áreas de restricción para el acuífero.

Los objetivos específicos son:

1. Definición y caracterización de unidades de acuíferos principales;
2. Desarrollo de un modelo conceptual del acuífero;
3. Propuesta de un área de restricción para el acuífero;
4. Proposición de mejoramiento para la red de monitoreo del acuífero;
5. Efectuar recomendaciones para la gestión del acuífero; y
6. Representación territorial de los resultados del estudio (SIG).

1.2 Alcance

El alcance del trabajo incluye:

1.2.1 Etapa 1

- ▶ Recopilación de antecedentes en gabinete.
- ▶ Caracterización hidrológica e hidrogeológica.
- ▶ Definición y caracterización de los acuíferos principales;
- ▶ Desarrollo de una herramienta SIG acorde a las necesidades de visualización y evaluación regional que se requiere para este trabajo.
- ▶ Trabajo en terreno
- ▶ Prospecciones geofísicas
- ▶ Catastro de pozos

1.2.2 Etapa 2

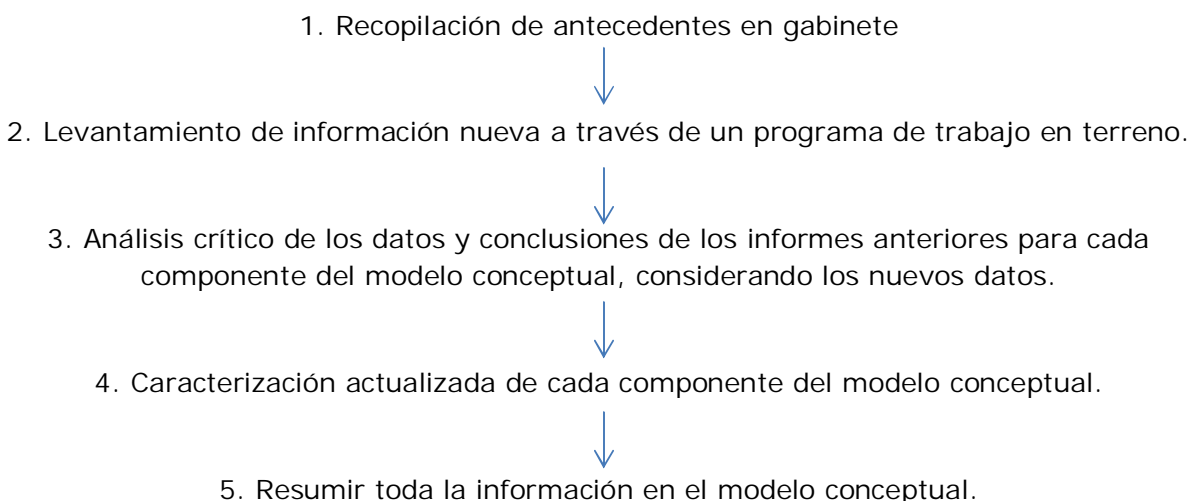
- ▶ Desarrollo del modelo conceptual (incluye recargas y descargas naturales)
- ▶ Recomendaciones para la red de monitoreo y la gestión del acuífero
- ▶ Conclusiones e informe final

En este documento se presentan los resultados de la Etapa 1 y Etapa 2 del estudio.

1.3 Metodología

Para lograr los objetivos del proyecto, la metodología involucra la recopilación y la evaluación de la información necesaria para completar los distintos componentes del modelo hidrogeológico conceptual que constituirán la base de un modelo numérico del acuífero. De acuerdo con el alcance del proyecto, esto incluye la revisión y evaluación de los informes y datos anteriores combinados con nueva información obtenida a través de un programa de trabajo de campo, incluyendo un catastro de pozos y prospecciones geofísicas.

El desarrollo del modelo conceptual involucra las siguientes etapas:



1.4 Preguntas clave para el modelo conceptual

Las preguntas clave para el modelo conceptual incluyen:

- ▶ ¿Hay flujo entre el acuífero de Pica / Matilla hacia la Pampa del Tamarugal? Si es así, ¿Cuál es el volumen aproximado de flujo?
- ▶ ¿Hay un descenso regional de la napa de Pica / Matilla debido a las extracciones y/o tendencias del clima?
- ▶ ¿Hay un sistema de acuífero dual que comprende un acuífero freático (no confinado) y un acuífero confinado (artesiano)?
- ▶ ¿Cuál es la fuente de agua de las vertientes y el mecanismo de surgencia?

- ▶ ¿Cuál es el volumen de recarga y descarga de aguas subterráneas en el sector de Pica?
- ▶ ¿Hay conexión hidráulica entre el acuífero de la cuenca de la Salar de Huasco y el acuífero de Pica / Matilla?

2. Área del Estudio

El sector de Pica está ubicado en la I Región de Chile en la provincia de Iquique, en el área oriental de la Pampa del Tamarugal, adyacente a la cuenca altiplánica del Salar de Huasco (ver Figura 1).

El área del estudio está definida por la extensión aproximada del acuífero de Pica / Matilla como se detalla a continuación (ver Figura 2):

- ▶ Límite Norte: frontera Sur de la subcuenca de Juan Morales, Sagasca y El Tambillo;
- ▶ Límite Sur: Quebrada de Chacarilla;
- ▶ Límite Este: a una altura promedio de 4.000 msnm existe una divisoria de los sistemas de drenaje que escurren al Este, hacia el salar de Huasco, y hacia la Pampa del Tamarugal, al Oeste.
- ▶ Límite Oeste: línea de falla ubicada al Oeste de Matilla.

La topografía de la región está definida por 5 grandes unidades fisiográficas de orientación norte-sur:

1. Cordillera de la Costa con altitud máxima de 1.700 a 1.750 msnm.
2. Depresión intermedia con superficie de plano inclinado al Oeste y una altitud media de 1.000 a 1.200 msnm
3. Cordillera del medio con altitud máxima de 5.500 a 5.750 msnm que representa la división hidrográfica entre la depresión intermedia y el altiplano:
4. Altiplano con una altitud entre 3.500 a 4.500 msnm, incluyendo cuencas cerradas con base de equilibrio conformada por salares.
5. Cordillera Oriental con altitud máxima entre 5.750 a 6.250 msnm que representa una divisoria hidrográfica que suele drenar hacia el Oriente, permitiendo en algunos sectores la descarga de aguas de cuencas altiplánicas hacia Bolivia.

El área del estudio abarca parte de la depresión intermedia y parte de la cordillera del medio con una superficie entre 4.500 msnm al noreste y 1.000 msnm al sur-oeste.

3. Recopilación de Antecedentes en Gabinete

GHD realizó una investigación inicial en gabinete que incluye el levantamiento y revisión de los datos disponibles, informes, literatura y mapas relativos a las características de hidrogeología, geología, hidrología, usuarios, derechos, etc.

A continuación se presenta un resumen de los documentos revisados.

3.1 Informes Anteriores

3.1.1 Referencia 1

Título: Evaluación de Recursos Hídricos en el sector de Pica, Hoya de la Pampa Del Tamarugal, I Región

Autor / compañía: DGA

Año: 1998

Objetivo: El objetivo del estudio se orienta a establecer una caracterización específica de la dinámica del ciclo hidrológico con el fin de obtener una estimación de la disponibilidad de aguas subterráneas (de Pica, Matilla y Esmeralda) sobre la base de la evaluación de la recarga media.

Alcance:

- ▶ Revisión de los principales estudios efectuados en la región (incluye un resumen de las estimaciones anteriores de recarga y descarga de la región).
- ▶ Dos campañas de muestreos.
- ▶ Caracterización hidrogeológica.
- ▶ Desarrollo de estudios isotópicos e hidrogeoquímicos.

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica:

- ▶ La extensión del acuífero de Pica se muestra en Diagrama 1 e indica que el acuífero está limitado al Oeste por la línea de falla y al Este a lo largo de la línea divisoria que separa las cuencas de Pica y del Salar de Huasco (esta separación hidráulica se apoya en los resultados del estudio DGA 2004). Los límites Norte y Sur se cree que representan la extensión hidráulica de la hoya, aunque la razón fundamental de dichos límites no está bien documentada.
- ▶ Se infiere que la zona de recarga principal está asociada con la red de fallas N-S y NE-SO localizada en los Altos de Pica (ver Diagrama 1)
- ▶ La diagrama también indica una potencial brecha en la falla (barrera hidráulica) que separa los acuíferos de Pica y de la Pampa del Tamarugal. Esto sugiere que posiblemente existe flujo desde el acuífero de Pica hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal.

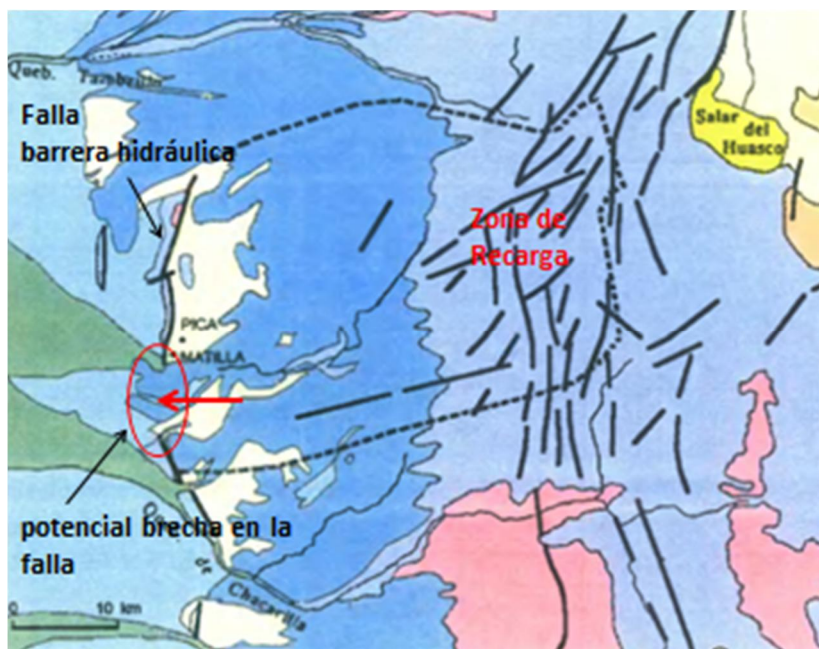


Diagrama 1 Acuífero de Pica (modificado de DGA 1998)

- ▶ Los resultados de análisis isotópico indican que la recarga del agua subterránea de Pica se produce a una altitud mayor que 3.500 m.s.n.m. Esto difiere de algunos estudios previos que han utilizado 3.000 m.s.n.m. como el límite de recarga.
- ▶ Una tasa aproximada de recarga al acuífero de 250 L/s se calculó en base a un área de recarga de 223 km² (zona de recarga sobre 3.500 m.s.n.m) y precipitación promedio de 175 mm/año (ver Sección 7.8 para más detalles).
- ▶ Utilizando la misma metodología de cálculo, pero con el límite de recarga sobre 3.000 m, la DGA 1998 calculó una recarga de 340 L/s que se basó en:
 - un área de 160 km² con precipitación promedio de 125 mm; y
 - un área de 223 km² con precipitación promedio de 175 mm.
- ▶ Las edades relativas indicadas por el contenido de ¹⁴C son aproximadamente:
 - 10.000 años para las aguas subterráneas de la salar de Huasco.
 - Entre 1.000 y 5.000 años para las aguas subterráneas de Pica (pozo de Concova) y vertientes de Pica (Miraflores)
 - Entre 500 y 1.000 años para las vertientes de Puquío Núñez
 - Los datos para otros pozos de Pica / Matilla indicaron una edad menor de 100 años, sin embargo esto fue debido al efecto de riego.
- ▶ La información isotópica indica que hay una discontinuidad entre el acuífero de Pica y la hoya del Salar de Huasco. A continuación se presentan los argumentos:
 - La existencia de vertientes que descargan desde los Altos de Pica hacia el Salar de Huasco, definen la existencia de una delimitación hidrológica entre ambas cuencas;
 - La edad relativa del acuífero del Salar de Huasco es similar a la que presentan las zonas terminales de los sistemas endorreicos, indicando la existencia de una

condición de impermeabilidad o desconexión para la cubeta contenedora del acuífero. En efecto, la zona terminal de la Pampa del Tamarugal presenta una edad relativa del mismo orden.

- El balance hídrico de la cuenca de Huasco (DGA 1987) da adecuada cuenta de los flujos involucrados.
- ▶ Se informa un caudal promedio total de las 4 vertientes principales de Pica de aproximadamente 50 L/s, de la siguiente manera:
 - Las Ánimas (5-10 L/s)
 - Miraflores (6-8 L/s)
 - Concova (9-10 L/s)
 - Resbaladero (28-30 L/s)

En general, las lecturas indicaron un caudal estable de las vertientes entre los años 1962 y 1995, con la excepción de las Ánimas, que registró una caída en el flujo entre los años 1980 (9,7 L/s) y 1995 (1,4 L/s). Esta vertiente fue encontrada totalmente seca durante el análisis en terreno llevado a cabo como parte de este estudio. El flujo constante de las vertientes se atribuyó a la larga trayectoria del flujo desde la zona de recarga en Altos de Pica, lo que significó que los niveles de agua (y, por tanto, los caudales) no están influenciados por las variaciones anuales de recarga por precipitación.

- ▶ Una tasa de extracción de aproximadamente 274 L/s (incluyendo la descargas desde las vertientes) se reportó para el área de Pica, en base a datos del año 1995, como sigue:
 - Uso doméstico de Pica/Matilla 33 l/s
 - Agua de riego Pica / Matilla 169 l/s
 - Extracción de Chintaguay 72 l/s
 - Total = 274 l/s

3.1.2 Referencia 2

Título: Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica

Autor / compañía: DGA, Realizado por Prof. Uwe Troger y Prof. Daniela Gerstner de la Technische Universität Berlin.

Año: 2004

Objetivos:

- ▶ Investigar si disminuye el caudal de los manantiales de Pica, si hay una extracción de agua subterránea del Salar de Huasco.
- ▶ Investigar si existe la posibilidad de un aprovechamiento de recursos hídricos del Salar de Huasco sin afectar al ecosistema del salar.

Alcance:

- ▶ Análisis de informes de antecedentes
- ▶ Visitas a terreno

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica:

- La zona de recarga para los manantiales de Pica está situada en los Altos de Pica.

Base de análisis isotópico: existen dos trayectorias del flujo de agua subterránea al acuífero de Pica (consultar Diagrama 2).

- Poco profundo y rápido, con 50 años entre recarga en los Altos de Pica y flujo a Pica. Esta agua tiene temperatura de aproximadamente 16 grados. Un flujo tan escaso es consecuente con la baja permeabilidad del acuífero y la distancia desde la zona de recarga (>20 km). Si bien la fuente de esta interpretación no está referenciada, podría tratarse de una mala interpretación de los datos relacionados con la edad indicados por la DGA 1988, que reveló que las aguas subterráneas "jóvenes" de Pica se deben a la influencia de irrigación y no necesariamente es un indicador de recorrido corto del flujo.
 - Más profundo y lento con más de 1.000 años entre recarga en los Altos de Pica y flujo a Pica. Esta agua es más cálida con un temperatura de aproximadamente 34 grados.
- El agua de los manantiales de Pica tiene menor edad que el agua en los acuíferos del Salar de Huasco. Por lo tanto, es muy poco probable una conexión hidráulica entre la cuenca sedimentaria del Salar del Huasco y los manantiales de Pica.

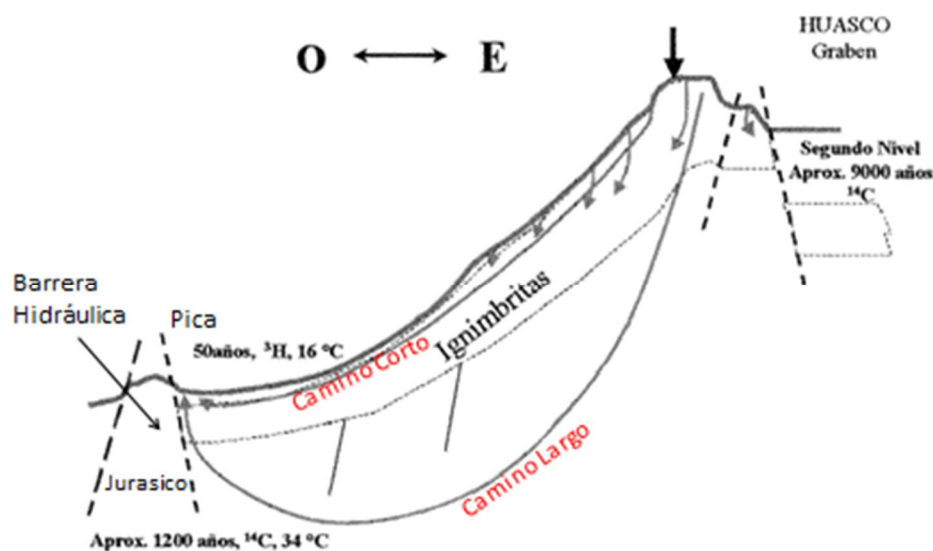


Diagrama 2 Sistemas de Flujo de Aguas Subterráneas de Pica (modificado de DGA 2004)

3.1.3 Referencia 3

Título: Mapa Hidrogeológico (de Chile)

Autor / compañía: DGA

Año: 1989

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica:

- ▶ El acuífero principal mostrado en la I Región es el acuífero Pampa del Tamarugal.
- ▶ Las vías de flujo de aguas subterráneas mostradas en el mapa indican flujo de Norte a Sur.
- ▶ Se observa que el acuífero en el área de Pica tiene un alcance limitado con productividad de pozos del orden de 1 – 4 m³/h/m.
- ▶ Se observa que las aguas subterráneas fluyen desde el área de Pica hacia la Pampa del Tamarugal. No obstante, esto parece estar basado en la diferencia de carga hidráulica entre la perforación en Pica y la perforación en Esmeralda.
- ▶ La escala del mapeo tiene un valor limitado para este estudio.



Diagrama 3 Mapa Hidrogeológico del Área de Estudio (modificado de DGA 1989)

3.1.4 Referencia 4

Título: Carta Geológica de Chile, Cuadrángulos Pica, Alca, Matilla y Chacarilla (con un estudio sobre los recursos de agua subterránea)

Autor / compañía: Galli y Dingman, Instituto de Investigaciones Geológicas

Año: 1962

Alcance: Investigación de la geología y recursos de agua subterránea de los cuadrángulos Pica, Alca, Matilla y Chacarilla.

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica:

- ▶ Esta referencia incluye mucha información relevante del acuífero de Pica incluyendo:
 - Una descripción en detalle de la geología del área, incluyendo la formación Altos de Pica y las estructuras;
 - Un análisis de los recursos de aguas subterráneas de Pica
- ▶ Las descripciones geológicas y geomorfológicas más relevantes del documento de Galli 1962 se mencionan en la Sección 7.1.
- ▶ El trabajo de Galli 1962 es el principal trabajo de geología en el sector de Pica. Las descripciones geológicas de la formación Altos de Pica de Galli 1962 se citan en muchos informes siguientes incluyendo JICA 1995, DGA 1998, DGA 2004 y Rojas 2006.
- ▶ El informe incluye mapas de geología de escala 1:50.000 y secciones de geología específicamente para la región de Pica. Estos se mencionan en la Sección 7.1.
- ▶ Las descripciones de Galli 192 del agua subterránea en relación con las formaciones sedimentarias se mencionan en la Sección 7.2 de este informe.
- ▶ Este estudio incluyó el análisis químico de ocho muestras de agua de pozos, vertientes y galerías, y una de agua superficial. Los análisis confirman que la calidad del agua subterránea de Pica es adecuada para la irrigación con total de sólidos disueltos que varía entre 211,6 y 594,1 miligramos por litro. Aunque algo dura, el agua subterránea de la región es potable.
- ▶ El informe incluye un mapa de curvas del nivel de agua subterránea en el área de Pica que indica un flujo Oeste con una gradiente hidráulica de aproximadamente 0.04 entre 1.380 msnm en el área de Concova y 1.300 msnm en el centro de Pica.
- ▶ Se concluyó que la permeabilidad de la mayor parte de las rocas de la formación Altos de Pica es muy baja principalmente debido a la cementación por minerales secundarios que se han depositado en los intersticios de las rocas. Sin embargo, en áreas localizadas existen fracturas de alta permeabilidad que permiten escurrimiento vertical ascendente del agua artesiana caliente como el agua que descarga en las vertientes de Pica.
- ▶ Recarga – La recarga de agua subterránea en los acuíferos de la formación Altos de Pica se calculó en base a las precipitaciones que reciben las áreas altas de más de 3.000 msnm. Una estimación de 4.000 L/s fue calculada usando una precipitación media de 200 mm para un área de 400 km² sobre 4.000 m de altura y 100 mm para un área de 600 km² entre 3.000 y 4.000 m de altura y asumiendo que la recarga corresponde al 20% de la precipitación. Como se presenta en la Referencia 1 (DGA 98) hay un error en este cálculo. Usando estos datos el cálculo de la recarga debería ser 888 L/s.
- ▶ Descarga - La cantidad de agua descargada por vertientes, galerías y pozos del área de Pica y zonas cercanas fue estimada en aproximadamente 140 L / s, incluyendo:
 - Vertientes Ánimas, Concova, Miraflores y Resbaladero) – 53 l/s

- Galerías – 37 L/s (incluyendo Sta. Rosita 17 L/s); y
- Pozos – 51 L/s (incluyendo >40 L/s del surgente de Chintaguay)

Se concluyó que hay un gran volumen de agua subterránea de la formación Altos de Pica que fluye hacia los acuíferos de la Pampa del Tamarugal. Considerando las estimaciones de recarga y descarga la cantidad de la recarga hacia la Pampa de Tamarugal es de aproximadamente 743 L/s (888 L/s recarga – 145 L/S descarga).

- ▶ Se concluyó que el uso de la totalidad del agua subterránea del acuífero freático, incluyendo la exploración y desarrollo de las áreas de dicho acuífero que contienen conductos de descarga ascendente, no tendrá ningún efecto sobre las actuales vertientes de Pica. En efecto, se concluyó que el acuífero freático es, esencialmente, un sistema hidráulico distinto del sistema artesiano profundo que alimenta las vertientes.
- ▶ El informe incluyó un resumen de exploración de agua subterránea de la región. Después de aproximadamente 40 perforaciones en la zona, se logró sólo un sondaje de alto rendimiento (surgente de Chintaguay). Esto fue atribuido a la permeabilidad relativamente baja de los sedimentos cementados por sílice, y el hecho de que las fracturas se encuentran en posición vertical. Estos aspectos reducen considerablemente la posibilidad de obtener pozos o sondajes con altos rendimientos.

3.1.5 Referencia 5

Título: Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II Y III Regiones – Chile.

Autor / compañía: DGA-UCN-IRD

Año: 1999

Objetivos:

Este estudio incluye el análisis de los datos de geoquímica de aguas en cuencas cerradas de las Regiones I, II y III de Chile con los siguientes objetivos.

1. Inventariar todos los manantiales que se vierten en las cuencas cerradas para tener una idea preliminar de la calidad química de las aguas subterráneas en las partes más altas de las cuencas de drenaje.
2. Cálculo del balance hídrico de las lagunas.
3. Determinar la composición química de las principales lagunas de todos los salares para establecer la línea base de la calidad de las aguas.
4. Investigar el origen de las sales y los factores que controlan la hidrogeoquímica del salar.

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica:

- ▶ En el Norte de Chile, hay un valor negativo de la diferencia entre las precipitaciones y la evaporación que indica un clima árido. En el región de Pica hay un déficit de aproximadamente 1200 – 1500 mm por año entre las precipitaciones y la evaporación.

- ▶ Existen dos grandes grupos de salares:
 1. los salares de la costa y del Valle Central. Son salares inactivos, fósiles, con costras de sales muy secas. Aquí se encuentran los yacimientos de nitratos y yodo.
 2. los salares de la Cordillera de los Andes. Están actualmente activos. Reciben aportes de agua de su cuenca de drenaje que se concentran por evaporación en lagunas superficiales donde precipitan sales evaporíticas.
- ▶ El estudio incluye análisis del Salar de Huasco (activo) ubicado en las zonas altiplánicas de la Cordillera de los Andes al oriente de la comuna de Pica (ver Figura 1). Los datos presentados para este salar incluyen precipitación de 150 mm y evaporación de 1260 mm/año.
- ▶ La división de la cuenca entre Huasco y Pampa del Tamarugal también es probablemente la división de aguas subterráneas con flujo al Este de esta línea hacia el Salar de Huasco y al Oeste de esta línea hacia Pica (ver Diagrama 4).
- ▶ El Salar de Pintados es un salar fósil con las costras que parecen desconectadas de las napas profundas.

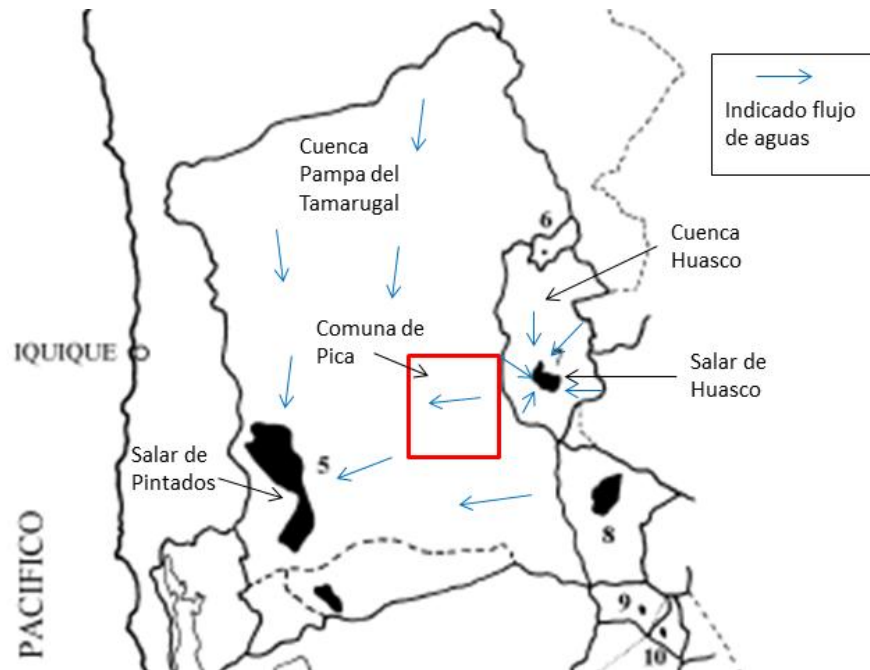


Diagrama 4 Cuencas de la Primera Región (modificado de DGA 1999)

- ▶ Basado en un análisis geoquímico de muestras de las aguas superficiales y subterráneas existen dos principales tipos de aguas de aporte en la cuenca del salar de Pintados (cuenca de la Pampa del Tamarugal). Ver Diagrama 5.

- i) Grupo 1 - El otro grupo corresponde a aguas de formaciones volcano-sedimentarias, más saladas (1000 - 6000 mg/l STD), de tipo cloruro-sulfatado y de vía evolutiva neutra sulfatada
- ii) Grupo 2 - Las aguas que drenan formaciones mayormente volcánicas son de tipo sulfatadas sódicas o bicarbonatadas sódicas y cálcicas. Son aguas dulce (200 - 700 mg/l STD) de vía evolutiva generalmente carbonatada. La mayor parte de las aguas termales y las aguas de la región de Pica pertenecen a este grupo.

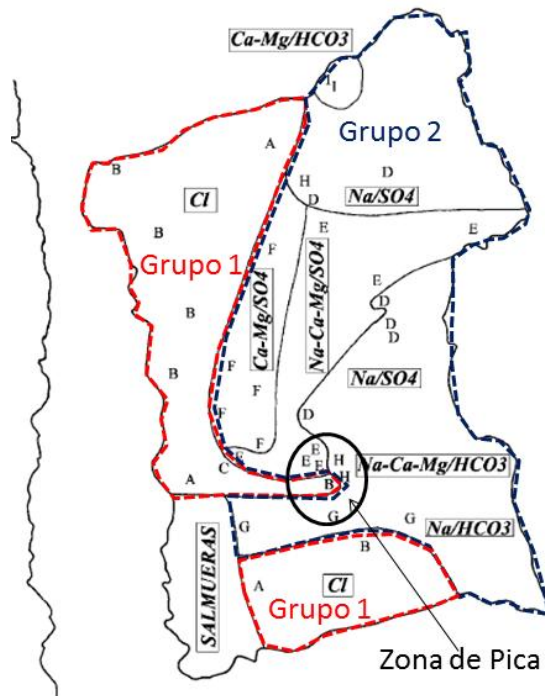


Diagrama 5 Dos principales tipos de aguas de aporte en la cuenca de la Pampa del Tamarugal (modificado de DGA 1999)

- ▶ La distribución de los tipos químicos (ver Diagrama 5). En el sector de Pica se mezclan cuatro tipos de aguas muy distintas unas de las otras.
 - Esmeralda (pozos) – Grupo 2 tipo E (Na-Ca- Mg / SO₄)
 - Pica (manantial corriente termal) – Grupo 2 tipo H (Na-Ca- Mg / HCO₃)
 - Matilla (manantial corriente) – Grupo 2 tipo E (Na-Ca- Mg / SO₄)
 - Chintaguay (pozos) – un pozo de Grupo 2 tipo H (Na-Ca- Mg / HCO₃) y uno de Grupo 1 con tipo B (Na-Ca- Mg / Cl)
 - Puquio de Núñez (manantial corriente) – Grupo 2 tipo G (Na / HCO₃)
- Esta mezcla es atribuible a la influencia de riego y también a los regímenes diferentes de flujo de aguas subterráneas de Pica, que incluye escurrimiento del acuífero freático y el ascenso de aguas profundas con presión artésiana a través fracturas.

- ▶ Basado en la relación entre los rasgos mayores de la geología de la Cordillera andina, la composición de las aguas de aporte y las vías evolutivas geoquímicas, se concluyó que existen dos flujos mayores de aguas de aporte desde la Cordillera de los Andes hacia el Valle Central (ver Diagrama 6):

1. Uno por la sub-cuenca del Tarapacá;

En el centro-norte de la Cordillera hay un sector con una mezcla compleja de rocas volcánicas y sedimentarias (Cretácico y Jurásico). A estas rocas están asociadas aguas de tipo Na-Ca- Mg / SO₄, dentro de las más saladas que se originan en la Cordillera, y de vía evolutiva neutra sulfatada, lo que refleja el contexto sedimentario de la litología.

Las aguas iniciales de las soluciones salobres y saladas del Valle Central provienen de la evaporación de las aguas de aporte de este tipo que han adquirido sus componentes disueltos por alteración de las formaciones volcano-sedimentarias cretácicas y jurásicas del centro norte de la Cordillera andina, esencialmente en el sector de la quebrada de Tarapacá.

2. Y el otro por el sector colindante con la cuenca del Huasco (Pica).

En el centro-sur de la Cordillera, en la región de Pica colindante con la cuenca del Huasco, se encuentran las ignimbritas riolíticas y dacíticas del Mioceno - Plioceno. Las aguas asociadas a estas formaciones son dulces, de tipo carbonatado y sulfatado y de vía evolutiva carbonatada, lo que corresponde muy bien a la litología volcánica de este sector de la Cordillera. Los datos indican que la influencia de este aporte penetra muy a dentro del Valle Central, prácticamente al contacto con las salmueras (Salar de Pintados)

- ▶ Las aguas dulces de la cuenca de Huasco parecen bien distintas de las aguas del sector adyacente de Pintados (Pampa del Tamarugal). Esto sugiere que no debería haber un flujo mayor de la cuenca de Huasco hacia la Pampa del Tamarugal. Esto está de acuerdo con las conclusiones de referencia 2 (DGA 2004).

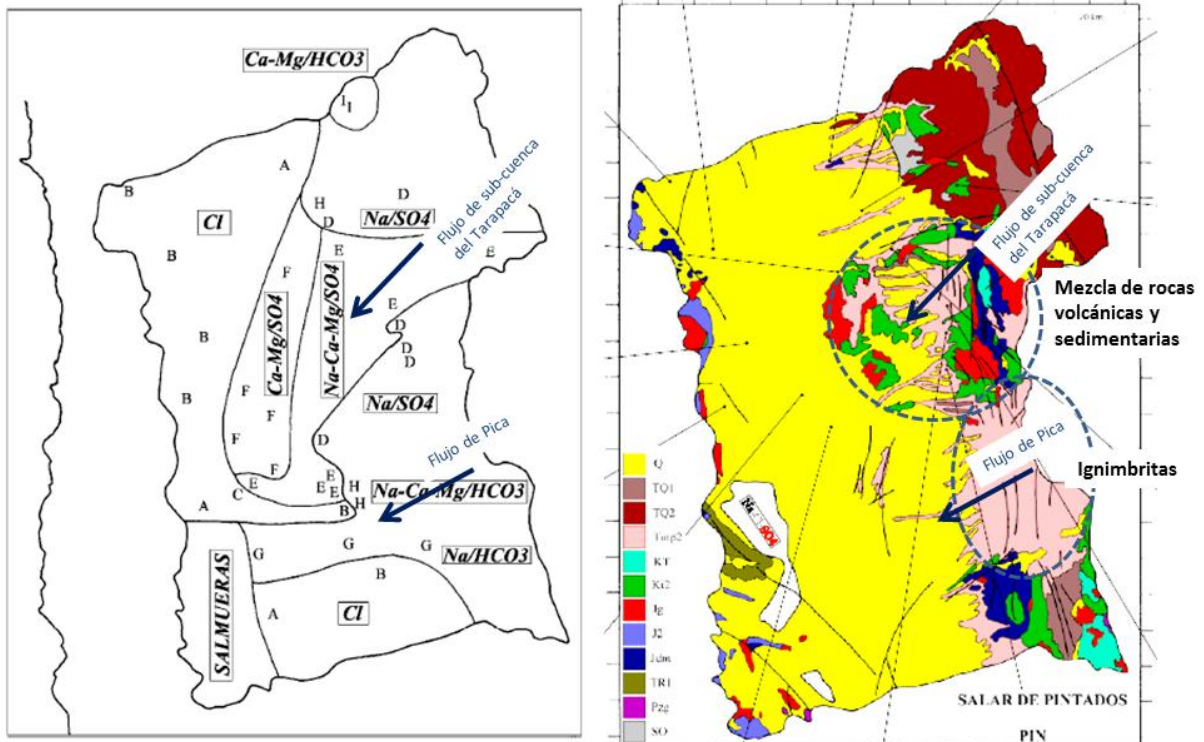


Diagrama 6 Dos flujos principales de aguas de aporte desde la Cordillera de los Andes hacia el Valle Central (modificado de DGA 1999)

3.1.6 Referencia 6

Título: Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar de Huasco (Norte de Chile)

Autor: O. Acosta y E. Custodio

Año: 2008

Publicación: Boletín Geológico y Minero (Instituto Geológico y Minero de España), Volumen 119, p 33-50

Objetivo: Estudiar el funcionamiento del acuífero del Salar de Huasco para determinar los impactos potenciales sobre los ecosistemas húmedos de grandes extracciones de agua subterránea.

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica:

- El sistema acuífero de la cuenca está en un estado natural, de modo que a largo plazo la recarga por la lluvia, única entrada, se iguala con la descarga por evaporación, única salida del sistema. Esto indica que no hay un flujo significativo de aguas subterráneas desde la hoya de Huasco hacia los acuíferos de Altos de Pica al oeste. Esto es consecuente con las conclusiones del reporte de DGA 2004 (Referencia 2).

- ▶ La recarga media total, contrastada con el modelo numérico, es cercana a 1100 L/s, 80% de la cual es descargada en el salar. Esta recarga estimada corresponde al 14% de la precipitación media.
- ▶ Se concluyó que un caudal de extracción de 200 L/s durante 25 años, es un compromiso entre conservación ecológica y satisfacción de las necesidades mineras.

3.1.7 Referencia 7

Título: Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II, y III.

Autor / compañía: DGA

Año: 2007 - 2009

Objetivos:

El levantamiento, generación y análisis de información hidrogeológica para avanzar en el estudio de los recursos hídricos del sector chileno del Altiplano. En este contexto, este estudio fue un apoyo concreto para el desarrollo de nuevas fuentes de agua subterránea en áreas prioritarias del Norte de Chile para satisfacer la demanda de agua existente y proyectada para los próximos 20 años en esta zona del Norte del país.

Alcance:

Realizado entre los años 2007 y 2009, el estudio consistió en el desarrollo de una serie de trabajos de terreno y gabinete, tanto a nivel regional como local. Los resultados obtenidos se presentan en 10 informes o partes independientes, cuyos contenidos son los siguientes:

Parte I Hidrografía Regional del Altiplano del Chile.

Parte II Geología Regional del Altiplano de Chile.

Parte III Hidrología Regional del Altiplano de Chile.

Parte IV Hidrogeoquímica e Isotopía Regional del Altiplano de Chile.

Parte V Implementación de Estaciones Meteorológicas.

Parte VI Campañas de Muestreo Geoquímicos e Isotópicos.

Parte VII Medición de la Evaporación Mediante Método del "Domo".

Parte VIII Sistema Piloto I Región: Salar del Huasco.

Parte IX Sistema Piloto II Región: Salares El Laco y Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Pampas Puntas Negras, Las Tecas y Colorada.

Parte X Sistema Piloto III Región: Salares de Maricunga y Pedernales.

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica

Fundamentalmente, los estudios se centraron en el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas altoandinos de las cuencas hidrográficas, que se han definido como aquellas que se encuentran en el límite oriental de las Regiones XV, I, II y III de Chile. Entonces,

estos estudios no incluyen información específica del sector de Pica o el Pampa del Tamarugal.

3.1.8 Referencia 8

Título: Hidrología Isotópica y El Recurso Agua del Sector Esmeralda – Pica – Matilla

Autor / compañía: O. Suzuki y R. Aravena,

Año: Abril 1985

Publicación: Comisión Chilena de Energía Nuclear, Nucleotecnica, Volumen 4 N° 8, p 41-51.

Objetivo: Definir las fuentes o áreas de recarga de las aguas del sector Esmeralda, Pica y Matilla, y su conexión con el acuífero de Canchones.

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica:

- ▶ El informe incluye referencia a un surgente de 44 L/s de Chintaguay y extracciones de pozos / sondajes de Esmeralda de 10 L/s.
- ▶ Las vertientes de Pica y por ende, en general, el agua subterránea de esta área tiene su fuente de recarga a una cota de 3500 a 4000 msnm como mínimo. Esto es consistente con los resultados del estudio isotópico de la DGA de 1998 (Referencia 1). En cambio, Puquío Núñez tiene su recarga a cota inferior y cercana a los 3000 msnm.
- ▶ La altura media de la cuenca que recarga al Puquío La Calera ubicado en la Pampa de Tamarugal es aún menor, 1500 y 2000 msnm; esto último indica que sus recursos son sumamente pobres ya que las lluvias a esa altitud son sólo ocasionales.
- ▶ Se obtuvieron muestras de los sondajes de Esmeralda, Canchones, Pica y Matilla y de las vertientes del sector precordillerano y el altiplano en la cuenca del Salar de Huasco.
- ▶ Los datos indican que Canchones - La Calera forman un solo sistema, en cambio Esmeralda posee un acuífero diferente y por los antecedentes isotópicos de las nieves muestreadas en Altos de Pica sobre un Altura de 3800 msnm, podríamos postular que su área de recarga se ubica en los Altos de Pica, lo cual concuerda con las apreciaciones desde el punto de vista puramente hidrogeológico.
- ▶ Se puede concluir que el área de recarga más probable del agua subterránea de La Calera y Canchones es la Cordillera del Medio a través de las quebradas de Quisma y Tambillo o Juan Morales. Esto se basó en sólo una muestra de la crecida del Tambillo que tuvo contenidos isotópicos muy similares al sondaje de Conchones y un sondaje de La Calera.
- ▶ En el sector de Pica-Matilla se pueden distinguir dos tipos de aguas desde el punto de vista isotópico:
 1. los vertientes Concova, Miraflores y Resbaladero, y el sondaje de vertientes de Chintaguay, con un contenido isotópico comprendido entre -13 y -13.2 ‰ oxígeno-18. Tomando en cuenta la altura mínima de recarga, la semejanza isotópica con otras vertientes de la zona altiplánica y el contenido isotópico de las nieves de los

Altos de Pica, se postuló que estas aguas están conectadas a la parte Sur de la cuenca de Huasco y el área comprendida entre este salar y el Coposa ubicada más al sur. Estos datos son consistentes con la hipótesis de que el agua subterránea de las vertientes asciende verticalmente por fracturas desde el acuífero profundo con presión artésiana, y este es el mismo acuífero perforado por el sondaje surgente de Chintaguay.

2. El otro tipo de aguas del área está represando por los sondajes con un contenido isotópico un poco mayor, entre -9.1% y -9.5% en oxígeno 18. Este mayor contenido isotópico está relacionado a precipitaciones a menor altura, por lo tanto, estas aguas deben provenir de la recarga producida en la zona alta de la quebrada de Quisma.

Los sondajes Matilla tienen contenidos isotópicos intermedios lo cual debe ser producto de la mezcla de aguas de los tipos antes mencionados. Esto concuerda con la hipótesis de que el acuífero freático en el área de Pica y Matilla incluye una mezcla del agua caliente que asciende verticalmente (largo camino por el acuífero profundo con presión artésiana) y el agua de retorno por riego.

3.1.9 Referencia 9

Título: Estudio sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la Parte Norte de Chile

Autor / compañía: Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA)

Año: 1995

Objetivo: Identificación de oportunidades para desarrollo de los recursos de agua (aguas superficiales y subterráneas) en el Norte de Chile para el suministro de agua para las ciudades de Arica e Iquique.

Alcance:

Extenso estudio de los recursos de Agua del Norte de Chile, incluyendo:

- El análisis de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas de las cuencas del río San José, río Lluta, Pampa del Tamarugal y Salar de Huasco.
- Trabajo en terreno incluyendo perforaciones de sondajes, pruebas de bombeo, prospecciones geofísicas, análisis de muestras de aguas.
- Evaluación del potencial para el desarrollo de los recursos de agua; y
- Formulación del plan de desarrollo de los recursos de agua.

Puntos clave con respecto al acuífero de Pica:

- Este informe incluye mucha información, investigaciones y datos para la Pampa del Tamarugal, sin embargo no presenta mucha información sobre el acuífero de Pica.
- "*Supporting Report A: Surface Water*" incluye información del clima e hidrología (ver Sección 6.1).
- Descripción geológica de los cinco miembros de la formación Altos de Pica basada en Galli 1962 (Ver Sección 7.1).

- ▶ El informe incluye el cálculo de un coeficiente de escorrentía utilizando los datos de estaciones de monitoreo de lluvias y medidores de flujo. Este coeficiente se utilizó para calcular la tasa de recarga de 976 L/s al acuífero Pampa del Tamarugal desde los 7 ríos afluentes principales.
- ▶ La descarga de aguas subterráneas está compuesta de transpiración de los arboles del bosque de Tamarugo y extracciones. No haya nada de descarga superficial afuera la cuenca.
- ▶ Para el cálculo de balance hídrico se supuso que 30% de las extracciones para agricultura y 60% de las extracciones para uso doméstica y minería es retorno de acuífero.
- ▶ Basado en cálculos de balance de agua, se infiere que una recarga adicional de agua subterránea de 288 L/s al acuífero Pampa del Tamarugal proviene del altiplano a través de profundas fracturas en las rocas del basamento.
- ▶ Se infiere que el sistema de fracturas NE-SO en la formación Altos de Pica es la zona de recarga primaria y la vía para las aguas subterráneas de Pica (ver Diagrama 1).
- ▶ La descarga natural de aguas subterráneas en Pica se debe a la barrera hidráulica causada por la falla situada al Oeste de Pica, que va en dirección Norte-Sur. El agua subterránea que fluye en dirección Oeste dentro del acuífero de Pica se cree que está confinada por esta barrera hidráulica y provoca su afloramiento forzado a la superficie, como vertientes en el área de Pica.
- ▶ Se infiere que la conexión hidráulica entre el acuífero de Pica y el acuífero de la Pampa del Tamarugal es despreciable debido a la separación de estos acuíferos por la barrera hidráulica descrita anteriormente.
- ▶ Los mapas de contorno de aguas subterráneas indicaban que al Oeste de Pica, el flujo de agua subterránea en el acuífero de la Pampa del Tamarugal se mueve en dirección Oeste hacia el Salar de Pintados.
- ▶ A escala regional, la profundidad del agua subterránea se incrementa hacia el Este de la cuenca, alcanzando más de 100 metros. Por esta razón, la parte oriental de la cuenca (incluyendo el área al Este de Pica) no se consideró económicamente viable para el desarrollo.
- ▶ La edad del agua subterránea de Pica y Esmeralda no pudo ser determinada con precisión debido a la influencia del flujo de retorno por irrigación.
- ▶ Datos de pruebas de bombeo de pozos de monitoreo instalados por JICA indican una amplia gama de propiedades del acuífero. Ninguno de estos pozos fue localizado dentro del acuífero de Pica. Los dos pozos más cercanos al acuífero de Pica, J-6 y J-8, reportaron valores de transmisividad (T) de 22 y 376 m³/d/m, respectivamente. En base al espesor observado del acuífero, se calculó una conductividad hidráulica (K) de 3.2×10^{-4} cm/seg y 5.18×10^{-3} cm/seg para estos pozos. Valores de coeficientes de almacenamiento de 0.3 a 0.35 se calcularon para las unidades principales del acuífero de la Pampa del Tamarugal teniendo presente la secuencia sedimentaria. Estos

valores son considerablemente mayores que los observados en el área de Pica /Matilla (ver Sección 7.6).

- ▶ La productividad de los pozos en el área de Pica se estima en menos de 10 L/s con una reducción de las aguas subterráneas que varía de 8 a 55 m. Esto es consistente con las conclusiones de Galli 1962 respecto de que el acuífero de Pica generalmente tiene una permeabilidad muy baja debido a la cementación de las rocas.
- ▶ A la fecha del informe (1995), la extracción total de agua subterránea del área Pica-Matilla se estimó en 111 L/s para fines de riego, más 52 L/s para suministro de agua para uso doméstico, procedente de Chintaguay.

4. Catastro de Pozos, Socavones y Vertientes

4.1 Metodología

La campaña de terreno se realizó entre el 20 y el 31 de agosto de 2012, la cual abarcó la superficie correspondiente al acuífero de Pica. Dos encuestadores se movilizaron en vehículo de doble tracción y utilizaron los siguientes equipos de terreno:

- ▶ Pozómetro (Solinst Water Level Meter Mod. 101,50m)
- ▶ Bailer de polietileno (Mod 1.5" x 3ft)
- ▶ Conductivímetro y termómetro Mod. AZ8351 (con un rango de 0 a 19,99 mS/cm, con una resolución de 0,01 mS/cm, rango de 0 a 65 °C y precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$)
- ▶ pH-metro: Mod pHep5 (Hanna Instruments), el cual posee un rango de detección de 0,00 a 14,00 pH y que cuenta con una precisión de $\pm 0,05$ pH (a 20°C)
- ▶ GPS Garmin Oregon 450
- ▶ Cámara fotográfica digital
- ▶ Huincha de medir de 5 m

4.1.1 Sitios de muestreo

Se muestrearon pozos, socavones y vertientes en un diseño aleatorio y privilegiando la mayor cobertura sobre el acuífero de Pica. Las ubicaciones de estos sitios se pueden observar en la Figura 5 y 5a.

4.1.2 Monitoreo de nivel freático

Se empleó un método manual con equipo pozómetro de un máximo de 50 m, el cual posee un sensor que activa una señal sonora al entrar en contacto con el agua. Los niveles se diferenciaron en estáticos y dinámicos, esto último cuando existía evidencia de uso continuo o reciente de extracción de agua.

4.1.3 Monitoreo de calidad del agua

Se obtuvieron muestras de agua, directamente de los pozos que contaban con bombas de extracción, a las cuales se midió la temperatura, conductividad eléctrica y pH. Para

aquellos pozos que no contaban con bombas habilitadas para la extracción de agua o no se encontraban operativas al momento de la visita se utilizaron bailer de 1,1 lt de capacidad para obtener muestras y efectuar las mediciones correspondientes.

4.1.4 Registro de datos

La pauta de trabajo consistió en completar una ficha de visita con los registros de las mediciones y antecedentes de uso de la fuente de agua, así como información complementaria como cultivos, superficie y método de riego. Los registros por cada fuente de agua fueron:

- ▶ Georeferenciación del pozo, sondaje, vertiente o socavón.
- ▶ Medición del nivel estático o dinámico de los pozos mediante el uso de pozómetro
- ▶ Caracterización de los pozos (tipo, profundidad, diámetro, uso de agua)
- ▶ Obtención de datos de uso y volúmenes extraídos
- ▶ Medición de conductividad eléctrica, pH y temperatura en muestras a nivel de campo.

4.2 Resumen de resultados

Se efectuó un catastro de 80 pozos, 12 sondajes, 5 vertientes, 5 socavones y 1 dren, totalizando la visita a 103 fuentes de agua en el área correspondiente al acuífero de Pica (Ver Figura 5 y 5a). Se trabajó un total de 12 días en terreno con una frecuencia promedio de visitas de 8,5 fuentes/día en jornadas diarias de 9 horas, dedicando un promedio de 1 hora por fuente monitoreada incluyendo tiempos de traslado. En el Anexo A se detalla la fecha y hora específica en que se realizó la medición para cada uno de los pozos, vertientes y socavones catastrados. Una selección de fotografías del catastro se presentan también en el Anexo A. A continuación se detalla un resumen de los datos recopilados.

4.2.1 Nivel de Agua Subterráneas

Los niveles estáticos varían generalmente entre 15 y 35 m bajo el nivel del suelo con un promedio de 22,7 m, considerando las mediciones efectuadas en pozos y sondajes. En Figura 6 se presentan equipotenciales de aguas subterráneas basados en los niveles estáticos. Esta figura indica una dirección de flujo al Oeste con un gradiente hidráulico promedio de 0.04. Ver Sección 7.7 para más detalles.

4.2.2 Calidad de Aguas Subterráneas

La representación gráfica de los resultados de parámetros físico-químicos medidos en terreno se presenta en el Diagrama 7.

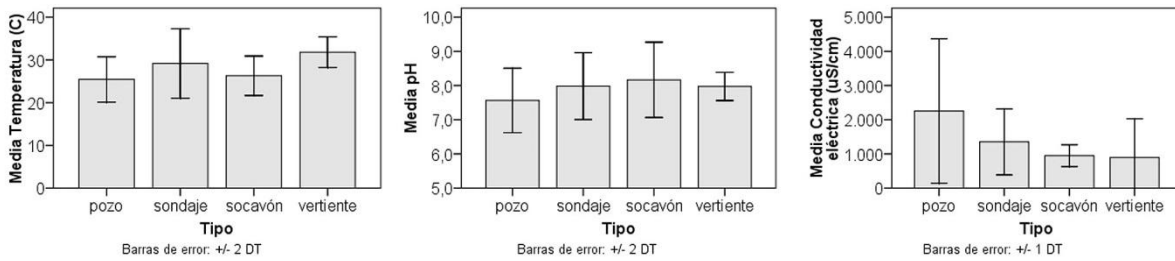


Diagrama 7 Resumen de resultados de parámetros físico-químicos

Temperatura

Los datos de temperatura se resumidos en la Tabla 4.1. Estos datos indican que la temperatura tiende a ser levemente mayor en las vertientes con un promedio de 31.7° C. Hay una gran variabilidad de temperatura en los pozos y los sondajes entre 18.6° y 34.6° C. La variabilidad de temperatura de las aguas subterráneas de Pica y Matilla es consistente con los informes anteriores (Galli 62, DGA 98) y es indicativo de la mezcla de aguas diferentes, incluyendo el agua fría de retorno por exceso de riego y el agua caliente del acuífero más profundo que asciende en forma vertical por las fracturas (ver Sección 7.7.3).

En la Figura 7 se presentan isotermas que indican que la influencia del riego hace disminuir la temperatura del agua en las áreas de Pica, Matilla y Chintaguay. Esto es consistente con los datos del reporte de la DGA 1998.

Tabla 4.1 Datos de Temperatura

	Min °C	Max °C	Promedio °C
pozos	18.6	32	25.4
socavones	24.1	28.7	26.3
sondajes	20.4	34.6	29.2
vertientes	29.4	33.4	31.7

pH

El pH es levemente alcalino con valores generalmente entre 7 y 8.5 unidades de pH.

Conductividad Eléctrica (CE)

Los datos de CE están resumidos en la Tabla 4.2. La CE presenta amplias variaciones en torno al promedio, siendo menores en los socavones y vertientes.

Los vertientes de Pica tienen valores de CE de 314, 317 y 337 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para Concova, Resbaladero and Miraflores, respectivamente, y un valor de 427 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el sondaje de Chintaguay indicando que el agua subterránea del acuífero profundo tiene una calidad muy dulce.

La CE de las aguas subterráneas menos profundas de los pozos varían generalmente entre 500 y 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que equivale a aproximadamente 300 a 3500 mg/L de sólidos disueltos totales (SDT). Esta variabilidad es consistente con la mezcla de diferentes fuentes de aguas como se explica en la Sección 7.7.3.

En la Figura 8 se presentan isoconductividades e indican que la mayor parte del agua subterránea de Pica / Matilla tiene una CE menor que 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Existen áreas de alta CE, incluyendo al lado de Quebrada de Quisma, al sur de Concava y en los pozos de San Martín. Esto es consistente con los resultados de la DGA 1998 y es atribuible a la disolución de evaporitas yesíferas y sal común que existen en acumulaciones variables del relleno cuaternario.

Tabla 4.2 Datos de Conductividad Eléctrica

	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
pozos	380	11530	2254
socavones	583	1155	948
sondajes	425	3590	1353
Vertientes*	314	2600	856

4.3 Demanda Total de Aguas Subterráneas

4.3.1 Utilización de las aguas subterráneas

En la localidad de Pica los pozos tienen una profundidad promedio de 30 m con destino del agua fundamentalmente para fines de riego y eventualmente como agua potable sin tratar. Los socavones tienen uso exclusivo en riego y las vertientes existentes se destinan para uso en riego y para fines de recreación, dando origen a las denominadas "Cochas" de Pica. En cuanto a los sondajes, se destinan para riego de superficies de cultivos que requieren mayor volumen de agua o que han adoptado técnicas de producción más intensivas. A excepción del sondaje de Chintaguay que tiene uso principalmente para proveer de agua potable al Valle de Quisma, Matilla, La Huayca y Pica, destinando un menor porcentaje del volumen producido para riego de cultivos de la localidad Matilla.

4.3.2 Derechos de Agua Aprobados

La base de datos de la DGA regional fue filtrada en base a las coordenadas consistentes con la zona de interés, con lo que se estimó como posible un universo de 403 fuentes (Ver Figura 9) con un volumen efectivo total de 371 L/s, como se resume en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Derechos de Agua Aprobada		
Volumen Total Solicitado	Volumen Total Otorgado	Volumen Efectivo*
29,257,082 m ³ /año	23,290,708 m ³ /año	11,712,231 m ³ /año
928 L/s	739 L/s	371 L/s

* Volumen efectivo = (derechos permanentes) x (factor de uso) calculo por la DGA usando un factor de uso de 0,4 por uso agrícola. El factor 0,4 se obtuvo directamente de la base de datos facilitada por la DGA.

El equipo de GHD visitó la zona de interés indicada en la base de datos de la DGA. Varias fuentes no fueron encontradas de acuerdo a las coordenadas entregadas y otras no fueron accesibles debido a ausencia e impedimentos por parte de los propietarios. Por ejemplo, la base de datos incluye 30 pozos de "Agrícola, Pesquera e Inversiones Trimar Ltda.", que forman una línea al lado de un camino al Norte de Pica y cada punto tiene un derecho aprobado de 7 L/s. El equipo de GHD visitó este camino y al parecer dichos pozos no existen.

De esta manera, por razones de fuerza mayor, el trabajo efectuado permitió obtener información útil de 103 fuentes. La cantidad y el espaciamiento de las fuentes antes mencionadas, así como la información obtenida, permiten caracterizar adecuadamente el acuífero.

4.3.3 Demanda Real

En términos de la demanda total real de aguas subterráneas, ésta es muy difícil de estimar debido a que:

1. No existen medidores de flujo.
2. Las estimaciones en terreno se basaron en comentarios del operador acerca del caudal y duración de la operación y se considera que tienen un alto grado de error potencial.
3. Muchas fuentes de la base de datos de la DGA regional no existen.

Entonces, no es posible confirmar si las extracciones reales corresponden a los volúmenes efectivos de la base de datos de la DGA.

Para el desarrollo de un modelo conceptual, la demanda real se estimó usando:

1. los datos de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (2012) de proyecciones de demanda de agua potable y agua servidas; y

2. Los datos del Censo Agropecuario 2007 del área de riego con un cálculo de consumo promedio de agua para frutales (cítricos y mangos deben tener un coeficiente parecido, porque son perennes y siempre verdes todo el año).

La estimación de la demanda real de las aguas subterráneas de Pica / Matilla en base a la referencia anterior se resume en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Estimación de la Demanda Real de Aguas Subterráneas de Pica / Matilla

	Volumen (m ³ /año)	Volumen (L/s)	Referencia
Agua Potable (2012)	362.080	11.5	SISS 2012
Aguas Servidas (2012)	325.226	10.5	SISS 2012
Evapotranspiración total por los cultivos	5.000.000	160	calculado**
Total		182	

** La determinación del consumo de agua (demanda bruta de agua para los cultivos) se efectuó mediante el cálculo de la evapotranspiración real (ETr) de los cultivos frutales (utilizando la fórmula empleada es $ETr = ETo * Kc$). Para el cálculo de ETr se utilizó la evapotranspiración de referencia (ETo) calculada según el mapa de evapotranspiración potencial desarrollado por CIREN, elaborado para la localidad de Pica; y el coeficiente de cultivo (Kc) para cultivo de hoja perenne mensualmente según la literatura especializada. Finalmente, se ha considerado la eficiencia del método de riego para la estimación de la demanda hídrica según métodos gravitacionales (tendido o platabandas) y por microrriego (goteo o microaspersión), determinado según superficies catastradas por el Censo Agropecuario del 2007 ($Tasa\ de\ Riego = Eficiencia\ riego * ETr$). La eficiencia del método de riego determinó los valores para caudales perdidos por infiltración o retención por el suelo.

Supuestos:

- ▶ igual edad de los frutales;
- ▶ igual consumo de los frutales; e
- ▶ igual comportamiento todos los meses.

El cálculo se basa en las áreas de riego del Censo Agropecuario del 2007.

Este cálculo indica que aproximadamente 185 L/s de riego corresponde a retorno por infiltración. Esto equivale a una eficacia de irrigación de aproximadamente 50%.

Ver Anexo E para más detalles que incluyen los cálculos, datos de Censo Agropecuario 2007 y una captura de pantalla con consulta de evapotranspiración.

5. Prospecciones Geofísicas

5.1 Objetivos

Los objetivos de las prospecciones geofísicas para apoyar el modelo conceptual son:

- ▶ Generar la geometría del acuífero (profundidad del basamento Mesozoico);
- ▶ Trazar un mapa de la estratigrafía del acuífero;
- ▶ Investigar la dirección del flujo y gradiente hidráulico (en combinación con mediciones de los pozos);
- ▶ Confirmar la barrera hidráulica ubicada a lo largo de la línea de falla;
- ▶ Identificación de las estructuras en y alrededor de la zona de descarga de Pica (incluyendo el pozo surgente de Chintaguay); e
- ▶ Investigar la brecha potencial en la barrera hidráulica entre el acuífero de Pica y el acuífero de Pampa del Tamarugal (ver Sección 3.1). Se postula que esto ocurre entre Pica y Puquio de Núñez. Esto es importante para determinar si el acuífero de Pica es un sistema cerrado con todas las descargas en Pica o si hay algún flujo hacia la Pampa del Tamarugal.

Para el desarrollo de esta actividad, se han considerado las siguientes cantidades de puntos:

- ▶ 100 Estaciones Transientes Electromagnético (TEM)
- ▶ 100 Estaciones de Gravimetría

Una combinación de TEM y gravimetría fue necesaria para levantar información del basamento y estratigrafía.

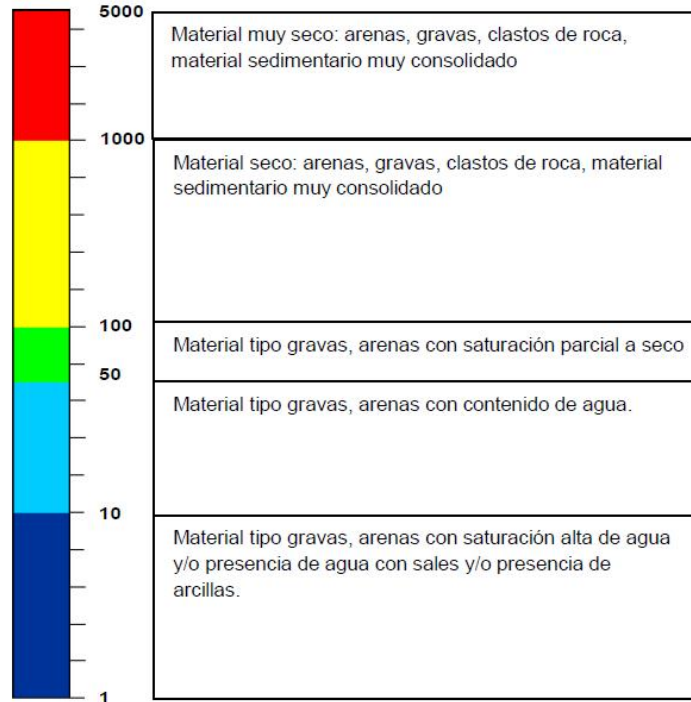
En la Figura 10 se presenta la ubicación de los perfiles geofísicos. .

5.2 Resultados

Los resultados de las prospecciones geofísicas se presentan en el Anexo B, incluyendo todos los perfiles TEM y gravimetría. Los puntos clave se resumen a continuación.

5.2.1 TEM

Se interpretó que los resultados de las mediciones TEM representaban la siguiente secuencia estratigráfica, en base a rangos de valores de resistividad (ohm-m).



Interpretación de los resultados de las mediciones TEM

La capa representada con color celeste (resistividad entre 10 y 50) se interpreta como el acuífero poco profundo dentro del Miembro 5 de la formación Altos de Pica. La parte superior de esta capa se interpreta como el nivel freático. El espesor de este acuífero es variable con un promedio de aproximadamente 100 a 150 m. El espesor del acuífero interpretado como superficial es mayor en el área entre Pica y Matilla indicando la presencia de una cuenca (ver Sección 5.2.2).

En general, hay concordancia entre el nivel freático en los perfiles TEM y las mediciones de profundidad de las aguas subterráneas de pozos y sondajes. Hay concordancia entre el gradiente hidráulico indicado por el nivel freático e interpretado con las curvas equipotenciales (ver Diagrama 10 y Figura 6).

La pronunciada gradiente del nivel freático entre los puntos 16 y 17 de la línea TEM 3 (ver Diagrama 10) es consecuente con las curvas equipotenciales que indican un aumento del gradiente hidráulico en el área de Matilla.

La profundidad del agua subterránea aumenta (>100 m) hacia el Oeste de Matilla y al Este de Pica (ver Diagrama 10).

El espesor del acuífero superficial hacia el Oeste de Matilla, a través del cual el agua subterránea fluye en la Pampa del Tamarugal está en el orden de 50 m aproximadamente (ver Diagrama 10).

Los datos TEM indican que existe potencialmente un horizonte de baja resistividad (<10 ohm-m) desde aproximadamente 100 a 200 m del piso. Esto se interpreta como la presencia de aguas con sales y/o presencia de arcillas. Esta última se considera más probable dado que la calidad del agua subterránea más profunda representada por

sondajes surgentes y vertientes corresponde generalmente a agua fresca. Este horizonte de arcilla podría representar la capa suprayacente que confina el acuífero artesiano más profundo. La existencia y espesor de esta capa de arcilla no pudo ser confirmada debido a los pocos datos estratigráficos disponibles a partir de los sondeos (ver Sección 7.1.6).

Esta zona de baja resistividad está mucho más cerca de la superficie en los perfiles de TEM 4 y 7 indicando que en el área de las localidades de Matilla y Pica el acuífero superficial puede tener un mayor contenido de arcilla. Esta baja resistividad también puede deberse en parte a la saturación de los sedimentos superficiales resultantes del riego.

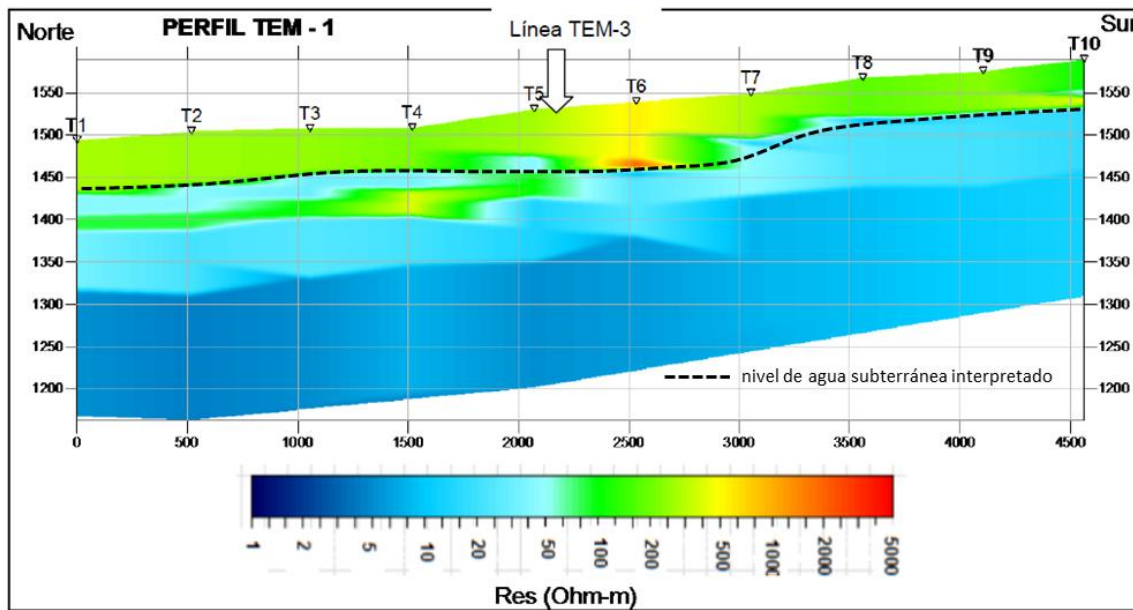


Diagrama 8 Perfil TEM 1

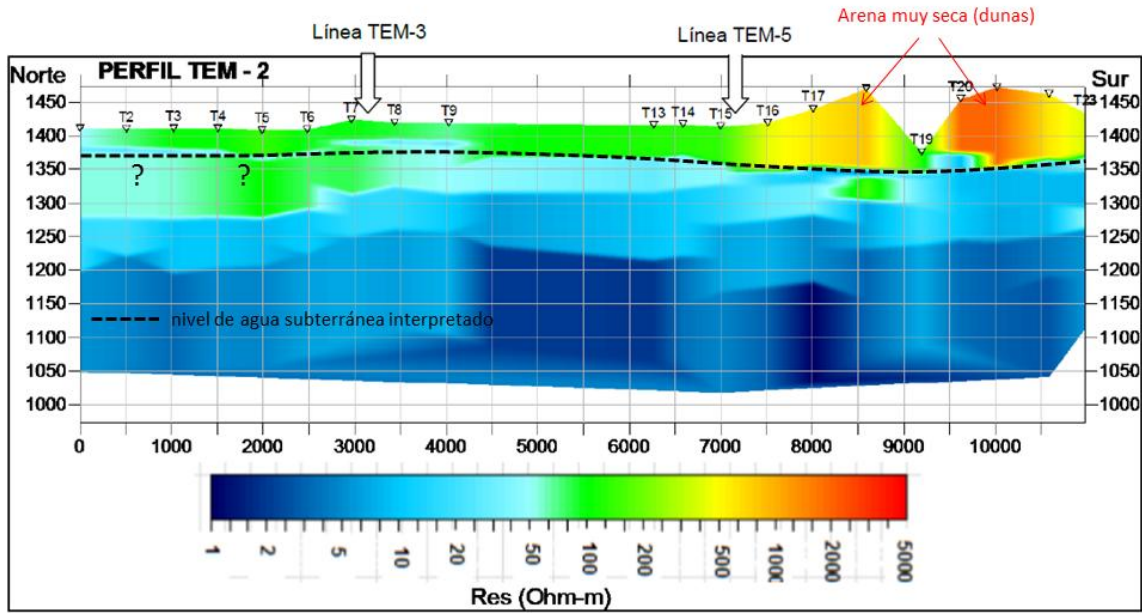


Diagrama 9 Perfil TEM 2

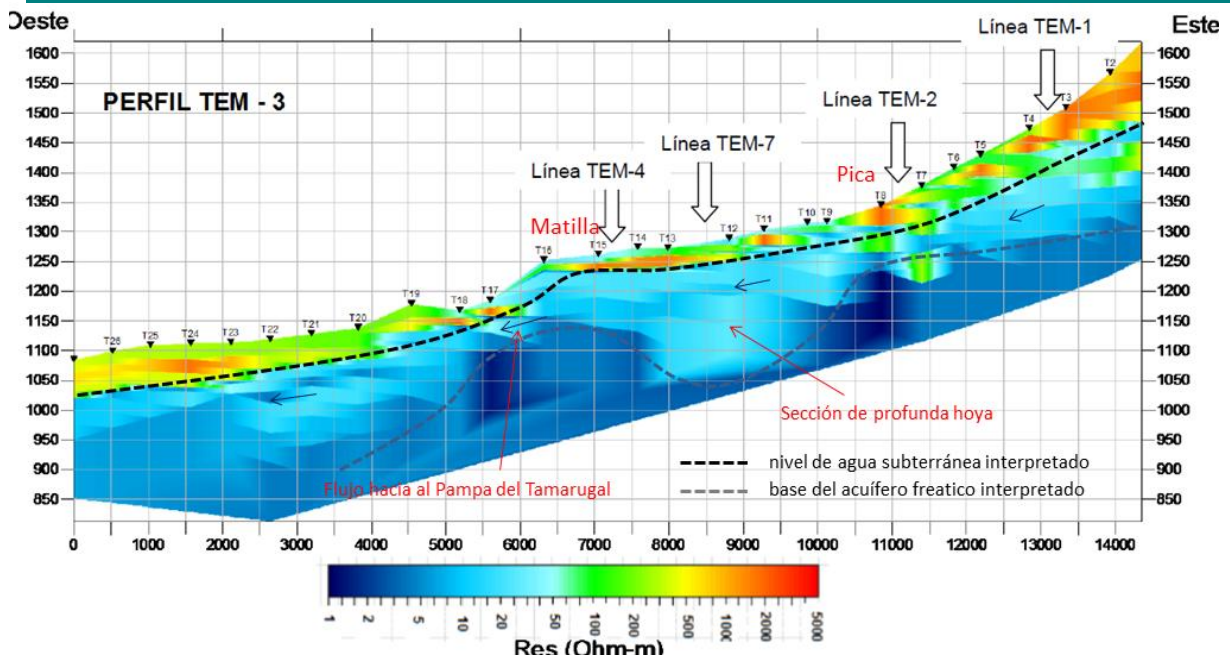


Diagrama 10 Perfil TEM 3

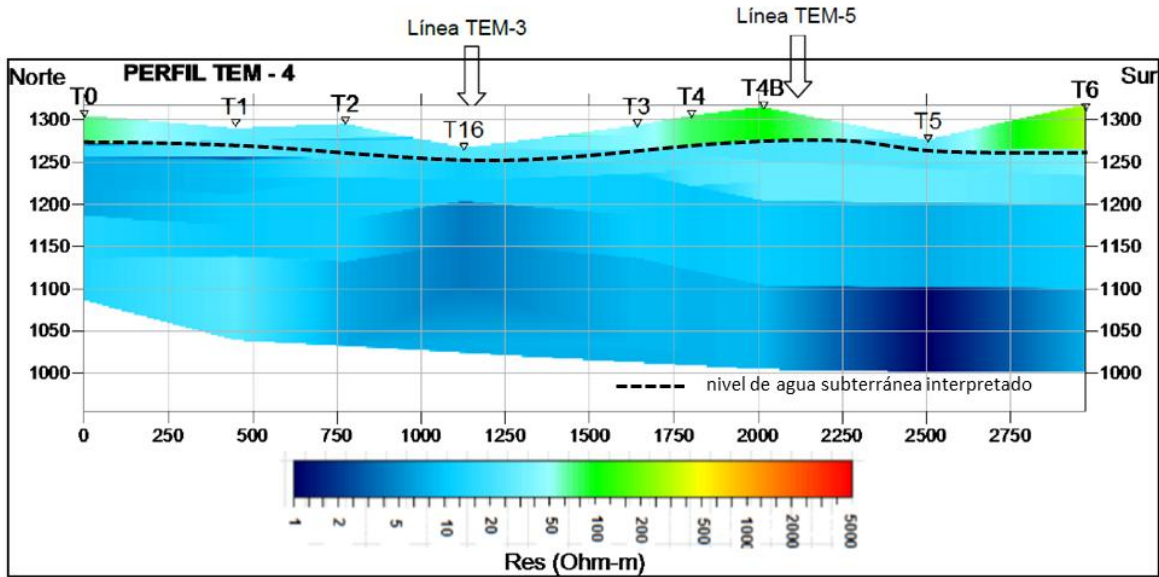


Diagrama 11 Perfil TEM 4

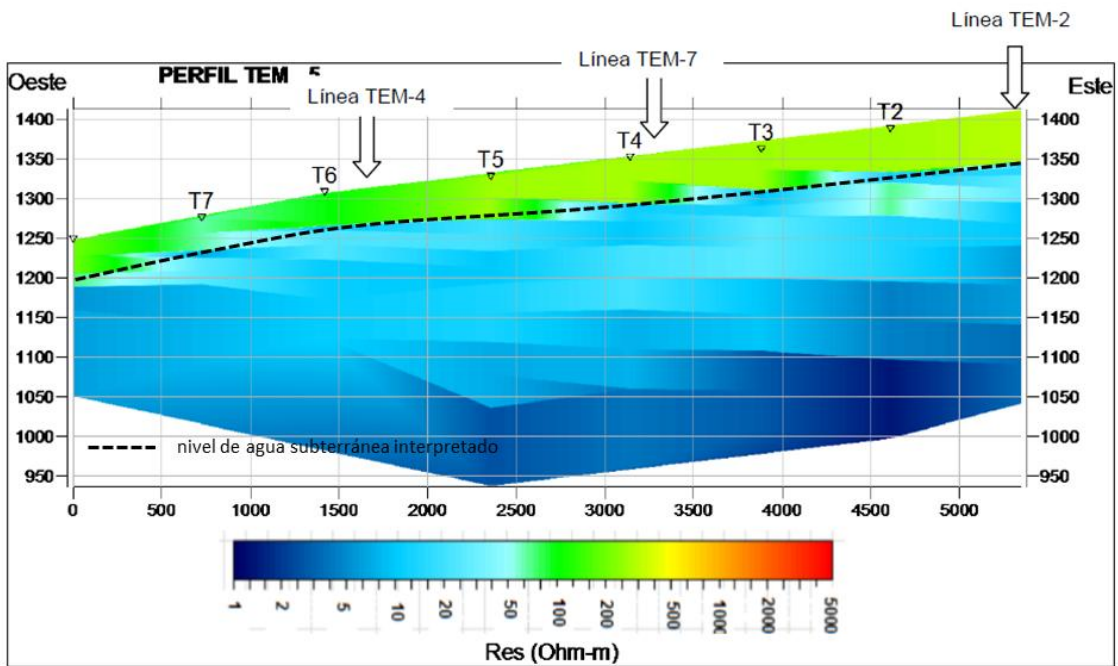


Diagrama 12 Perfil TEM 5

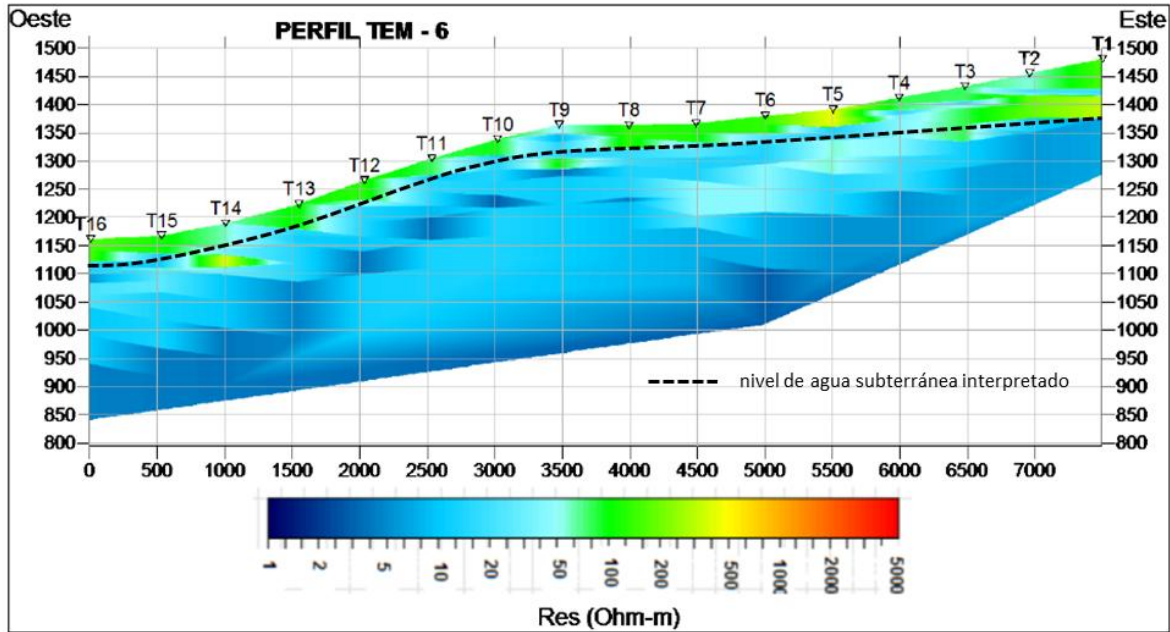


Diagrama 13 Perfil TEM 6

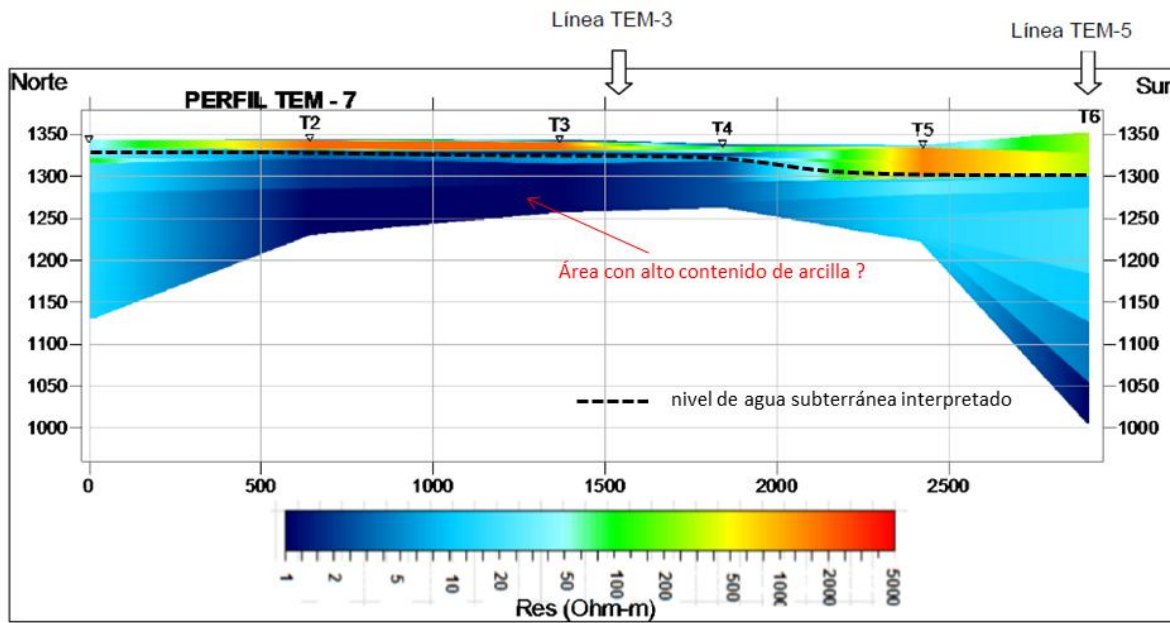


Diagrama 14 Perfil TEM 7

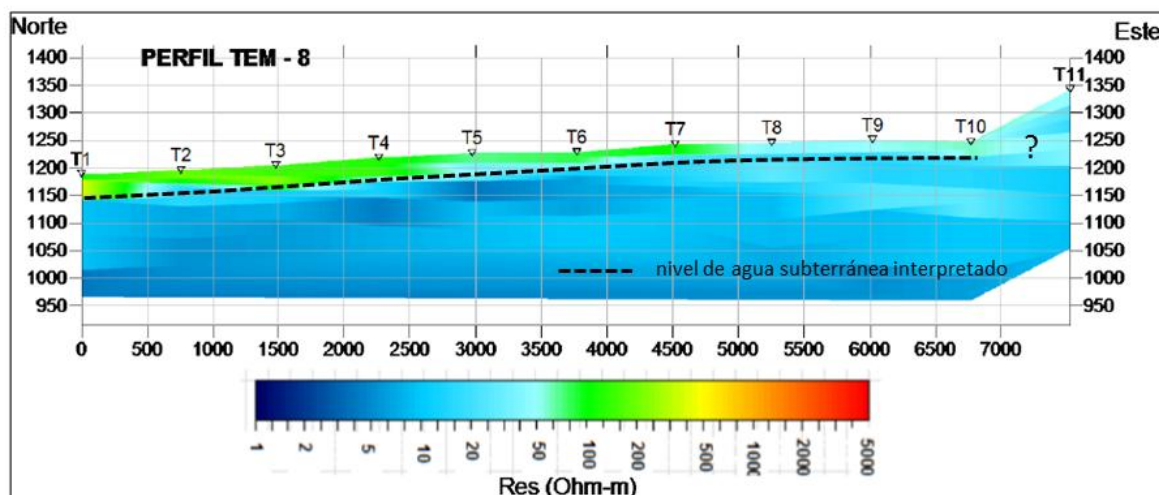


Diagrama 15 Perfil TEM 8

5.2.2 Gravimetría

A unos 500 m de profundidad bajo Pica y Matilla existe una cuenca sedimentaria significativa (ver Diagrama 16). Esto concuerda con la interpretación de un área de mayor espesor del acuífero somero (ver Diagrama 10).

La profundidad del basamento al Oeste de Matilla es de aproximadamente 200 m. La profundidad del agua subterránea en esta área (en base a datos TEM) se encuentra en el orden de 30-50 m, indicando un espesor saturado de aproximadamente 150 m. Esto indica que la barrera hidráulica provocada por el impulso ascendente del basamento no impide el paso del flujo de aguas subterráneas desde Pica / Matilla hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal (ver Diagrama 16).

En el Perfil de Gravimetría 1, entre puntos 20 – 26, se indica un basamento alto. Esto indica una considerable disminución en el espesor del acuífero en esta área de 300 m a menos de 100 m. La ubicación del basamento alto corresponde a la ubicación de las vertientes de Pica. Esto sugiere que la disminución del espesor de la secuencia sedimentaria en esta área tiene como resultado mayor presión del agua ya que el volumen de agua subterránea escurre a través de la sección más delgada de la ruta de flujo. Este aumento en la presión podría explicar el flujo surgente a través de las fracturas en esta área (ver Diagrama 16).

En base a los resultados del Perfil de Gravimetría 2, la cuenca sedimentaria parece tener un espesor relativamente constante de aproximadamente 200 – 300 m en dirección Norte-Sur (ver Diagrama 17). El alcance de la hoya pareciera estar bien definido por el Perfil de Gravimetría 2.

Los resultados del estudio de gravimetría indican que el basamento alto, representado por el afloramiento en Longacho, cae abruptamente hacia el Sur, con una profundidad del

basamento de aproximadamente 200 m indicada al Oeste de Pica (punto 10, perfil de gravimetría 1, ver Diagrama 16). El perfil de gravimetría 4 indica que más al Sur, a lo largo de la línea de falla, el basamento se eleva a 50 m sobre la superficie, aproximadamente 5 km al Sur de Matilla (ver Diagrama 19) antes de caer nuevamente en dirección Sur en el área de Puquío Núñez (ver Diagrama 18). Esto indica que la elevación en el basamento, a lo largo de la línea de falla, es variable y en algunas zonas puede redirigir el flujo de las aguas subterráneas (ver Figura 12).

Línea de gravimetría 3 (Diagrama 18) indica una cuenca de más de 400 m de espesor al Sur de Puquío Núñez. En base a la profundidad interpretada del nivel freático desde la Línea TEM 8 y los niveles de agua subterránea observados en los datos de perforación, el nivel freático se ubica aproximadamente a 1.150 msnm. Esto indica el potencial de la sección de paso hacia el acuífero Pampa del Tamarugal.

Los mapas que indican la elevación del basamento y su profundidad se presentan en las Figuras 11 y 12. Estas figuras muestran la gran cuenca sedimentaria entre Pica y Matilla y el basamento alto en el área de vertientes de Pica. También indican la cuenca al Sur de Puquío Núñez y la superficie ondulante del basamento a lo largo de la línea de falla Longacho. Estos datos indican dos sistemas principales de flujo dentro del área de estudio (ver Figura 12):

1. a través del área Pica/Matilla: y
2. a través del área Puquío de Núñez.

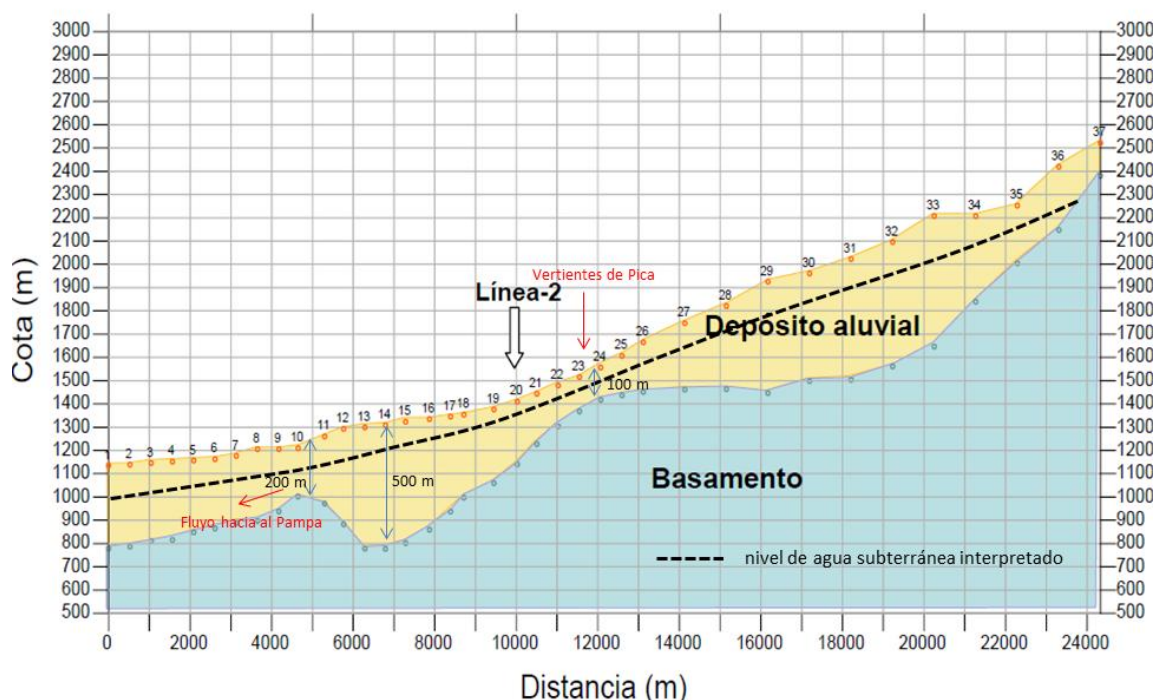


Diagrama 16 Perfil Gravimetría 1

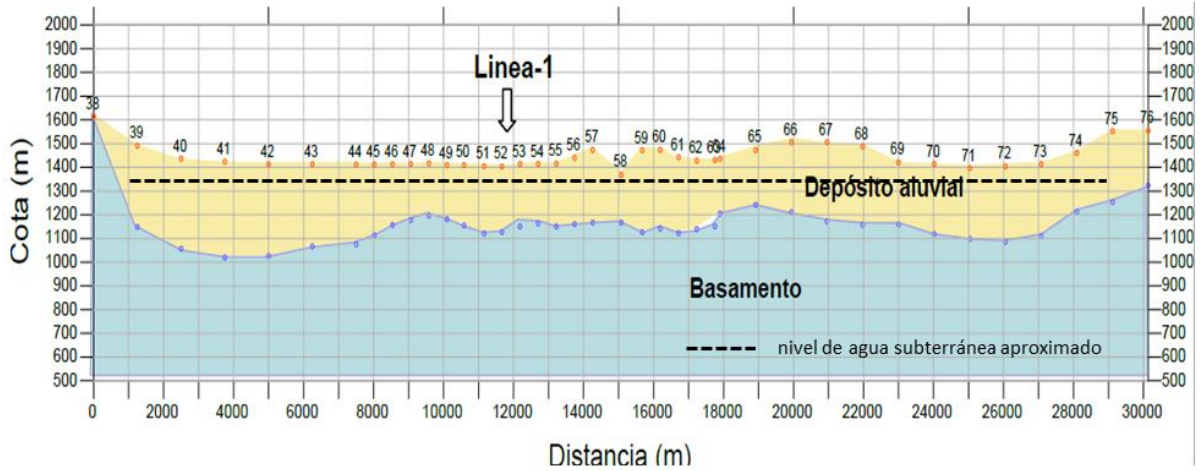


Diagrama 17 Perfil Gravimetría 2

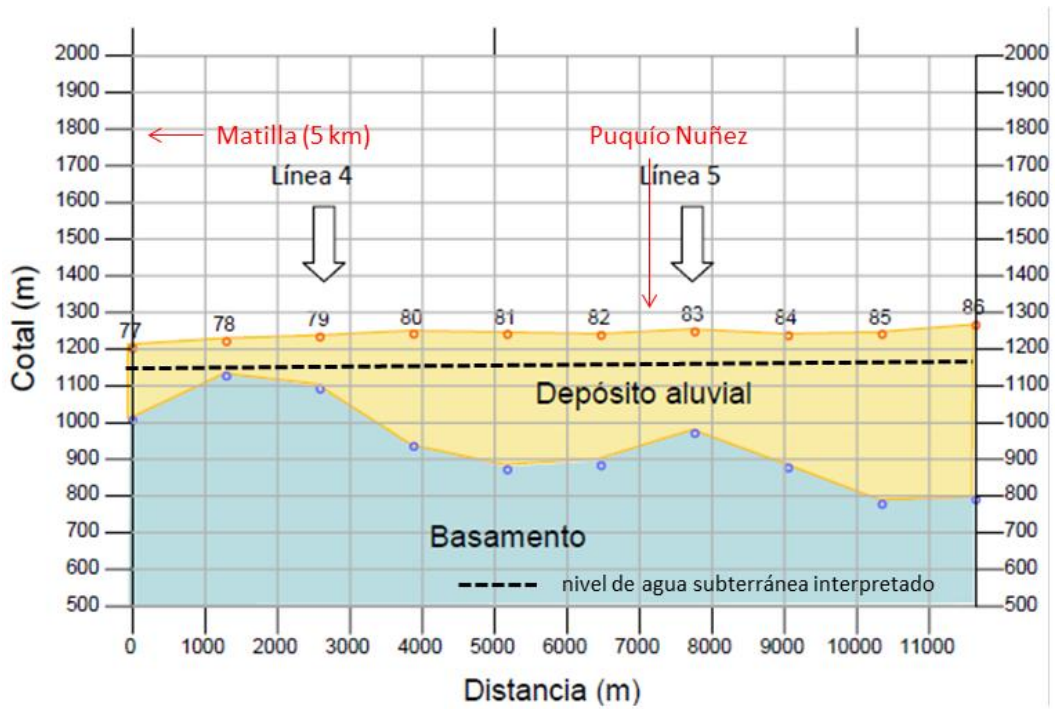


Diagrama 18 Perfil Gravimetría 3

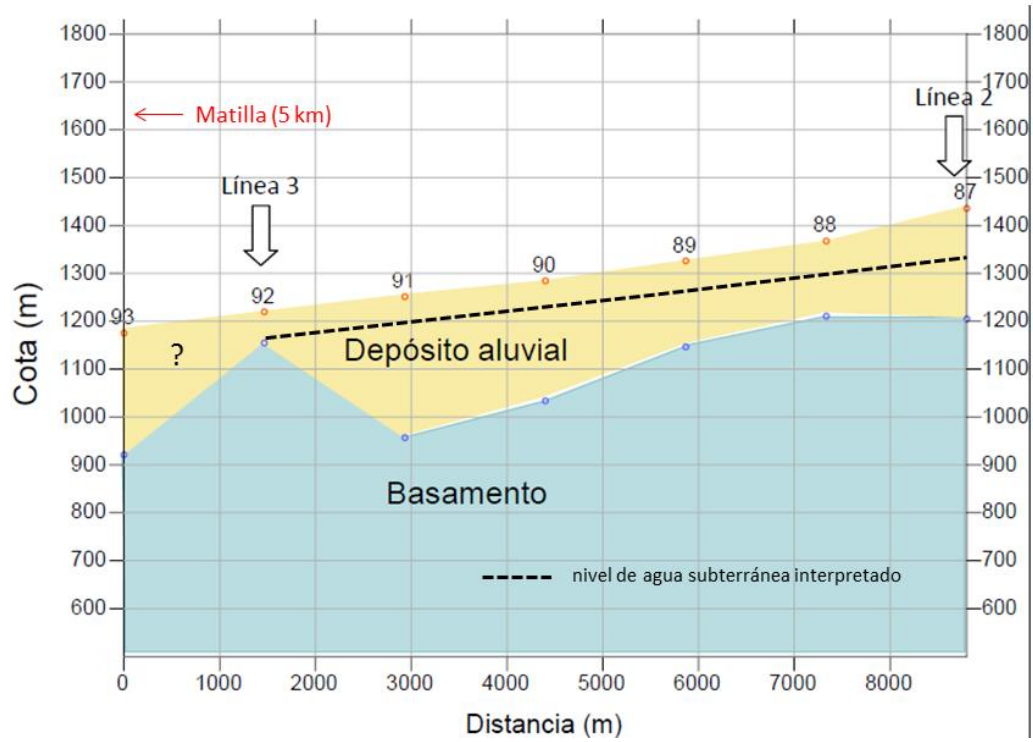


Diagrama 19 Perfil Gravimetría 4

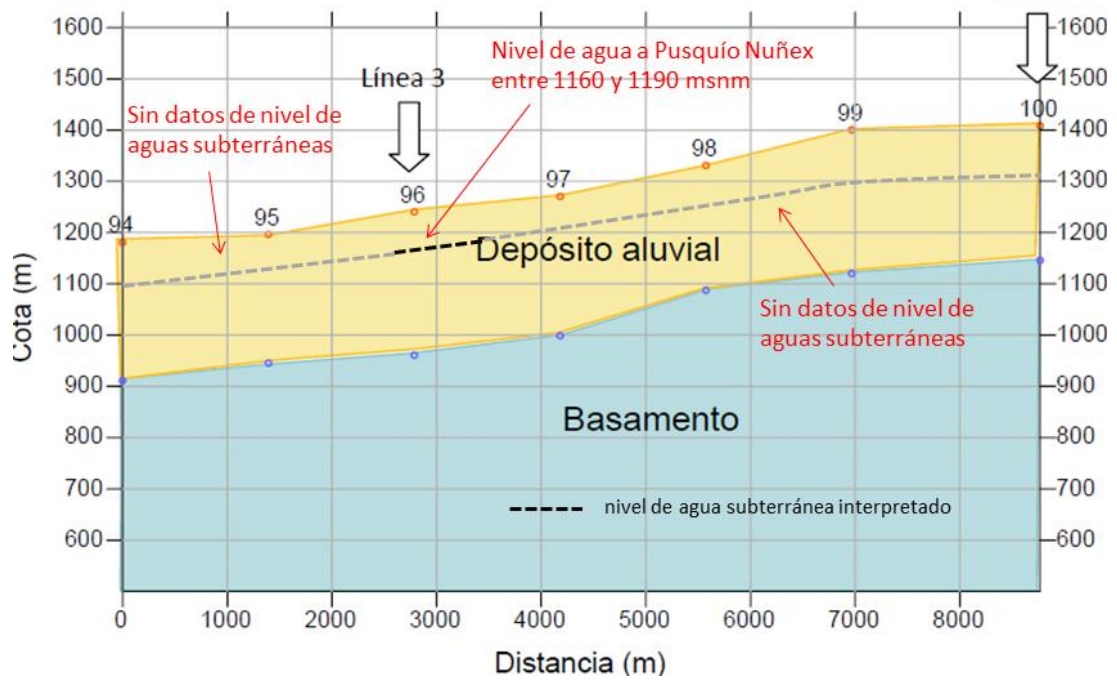


Diagrama 20 Perfil Gravimetría 5

6. Caracterización Hidrológica

6.1 Clima

En base a los datos hidrometeorológicos disponibles de la zona en estudio y a la recopilación de antecedentes de estudios anteriores, se presenta a continuación la caracterización de los principales componentes climatológicas: precipitación, evaporación y temperatura, y de esta manera disponer de antecedentes que permitan comprender el comportamiento de la recarga del acuífero de Pica.

La recopilación de datos se realizó en base a publicaciones e informes con contenidos de información climática enmarcada dentro del área de estudio. Específicamente, la información se obtuvo de:

- ▶ Ref. 1. "Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal, I Región – Chile", DGA 1998
- ▶ Ref. 9. "The Development of Water Resources in Northern Chile", JICA-DGA 1995
- ▶ Dirección Meteorológica de Chile
- ▶ Datos de estaciones meteorológicas de DGA
- ▶ Estaciones meteorológicas de la cuenca del Salar del Huasco (datos de la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC) probado por la DGA)

El clima de la región se caracteriza por presentar variaciones significativas a medida que aumenta la altitud. En el borde costero y hasta los 1000 m.s.n.m en la Cordillera de la Costa, se presenta un clima desértico cálido costero con escasa diferencia entre las temperaturas extremas diarias así como entre los meses más cálidos y fríos. Se caracteriza además por presentar abundante neblina matinal con alto contenido de humedad y casi inexistentes precipitaciones.

Desde los 1000 m.s.n.m y hasta los 2.500 m.s.n.m que corresponde a la zona denominada Pampa de la primera región, se desarrolla un clima desértico normal caracterizado por una masa de aire estable y seca que provoca una gran aridez, una humedad atmosférica baja que favorece una alta tasa de evaporación, y una alta oscilación térmica diaria.

Al Este de esta zona y hasta los 3.500 m.s.n.m se presenta un clima desértico marginal de altura. Este clima se caracteriza por presentar una masa de aire inestable que por efectos de la altura produce nubosidad que da origen a precipitaciones durante casi todos los veranos. La temperatura promedio en los meses más cálidos es de 14°C y en los más fríos de 9°C. Se caracteriza por una alta oscilación térmica diaria.

Por sobre los 3.500 m.s.n.m se desarrolla un clima de estepa de altura que se caracteriza por presentar bajas temperaturas, las cuales no sobrepasan los 5°C de promedio anual y con una gran amplitud térmica entre el día y la noche. Las bajas temperaturas, especialmente en los meses fríos, producen congelamientos de los cuerpos de agua existentes en la zona. En este tipo de clima el aire es muy seco, y a pesar de las bajas

temperaturas, se produce una evaporación intensa tanto de aguas superficiales, como de hielo y nieve.

6.1.1 Precipitación

La información de precipitación se obtuvo a partir de los datos de las estaciones meteorológicas vigentes de la Dirección General de Aguas más próximas al área de estudio, pero que se encuentran situadas fuera de la cuenca Pica-Matilla. La ubicación de las estaciones se presenta en la Figura 3.

Tabla 6.1 Información general de estaciones meteorológicas seleccionadas

N°	Estación	Código BNA	UTM		Altitud (msnm)
			Norte	Este	
1	Iquique	01820001-5	7.764.260	381.308	50
2	Huara en Fuerte Baquedano	01700010-1	7.773.836	421.635	1.100
3	Guatacondo DGA	02113005-2	7.685.876	495.262	2.460
4	Cerro Colorado	01740002-9	7.781.275	471.737	2.510
5	Parca	01740001-0	7.787.125	478.731	2.650
6	Mamiña	01750003-1	7.780.115	477.548	2.730
7	Coposa	01700009-8	7.710.041	531.847	3.760
8	Huaytani	01042002-4	7.788.402	544.924	3.950
9	Coyacagua	01050007-9	7.782.608	520.130	4.013
10	Lagunillas	01730018-0	7.795.860	517.064	4.020
11	Ujina	01080001-3	7.680.944	538.722	4.300

Fuente: DGA

La zona de estudio comprende desde la localidad de Pica situada a aproximadamente 1.500 m.s.n.m hasta el sector de Altos de Pica, ubicado sobre los 4.000 m.s.n.m, por lo que se analizaron dos grupos de estaciones según su altitud. Las estaciones ubicadas en la zona de cabecera de la Pampa por sobre los 3.500 m.s.n.m (Huaytani, Coyacagua, Lagunillas, Coposa y Ujina) y las ubicadas bajo esta cota (Iquique, Huara en Fuerte Baquedano, Guatacondo DGA, Parca, Mamiña y Cerro Colorado). En la Tabla 6.1 se indica la información general de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

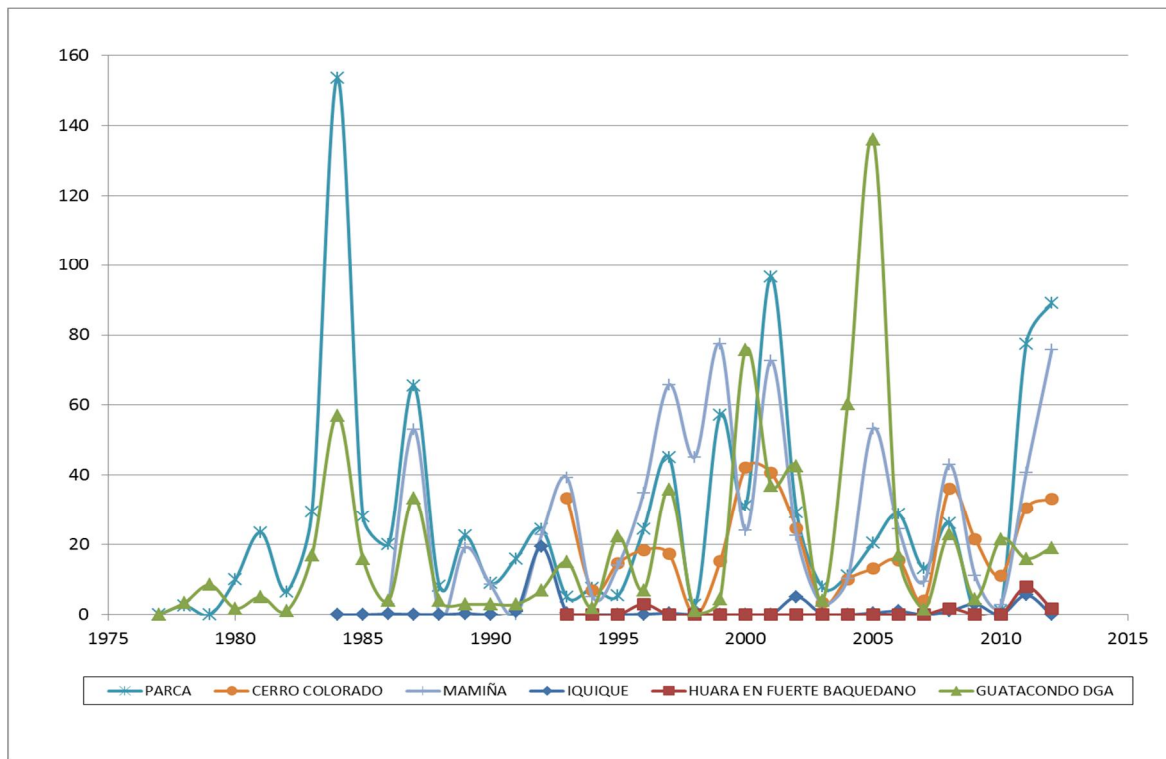
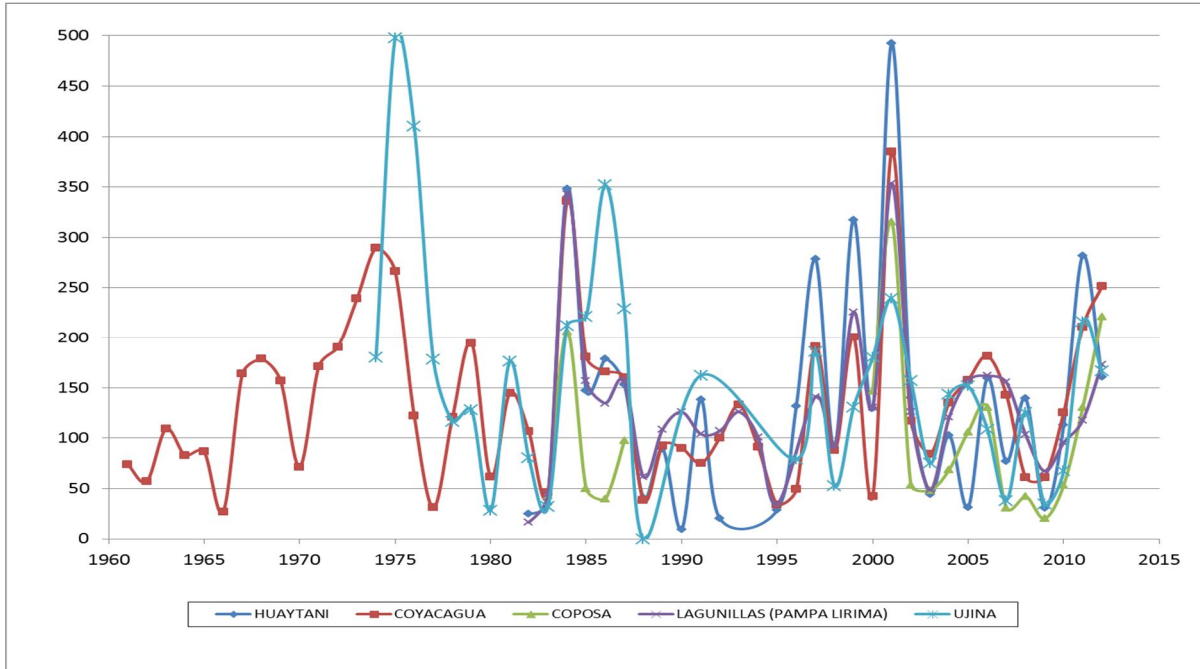
La metodología utilizada consistió en analizar los datos de precipitación media anual y media mensual para las estaciones antes mencionadas, considerando aquella información que fuera de la extensión y calidad adecuada, imponiendo un período mínimo de 10 años de registro. En la Tabla 6.2 se presenta la precipitación media mensual y la precipitación media anual para el año calendario.

Las estaciones ubicadas sobre los 3.500 m.s.n.m registran una precipitación media anual cercana a los 130 mm anuales, mientras que las ubicadas bajo esta cota presentan valores significativamente menores y que bordean los 25 mm anuales, según como se puede apreciar en el Diagrama 21.

Tabla 6.2 Precipitación media mensual y anual (mm)

Estación	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
Iquique	50	0,3	0,1	0,0	0,0	0,4	0,0	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	1,3
Huara En Fuerte Baquedano	1.100	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
Guatacondo	2.460	11,1	3,5	2,7	0,0	0,1	0,8	1,0	0,8	0,1	0,1	0,0	0,5	19,8
Cerro Colorado	2.510	8,2	5,1	3,0	0,3	0,0	0,4	0,5	2,6	0,1	0,0	0,2	0,4	19,6
Parca	2.650	9,2	11,7	4,8	0,2	0,0	0,3	0,9	0,8	0,3	0,2	0,0	1,2	27,8
Mamiña	2.730	10,0	10,0	5,1	0,4	0,0	0,0	0,5	2,3	0,7	0,1	0,0	1,2	28,9
Coposa	3.760	38,0	38,1	13,1	1,4	0,7	2,9	3,5	0,6	0,4	0,3	0,7	4,0	100,1
Huaytani	3.950	46,7	47,9	26,7	3,9	0,3	0,9	1,1	0,7	1,2	0,6	3,6	11,1	135,7
Coyacagua	4.013	48,9	47,8	22,1	1,9	0,6	1,1	0,8	1,6	1,4	1,2	2,4	11,0	134,1
Lagunillas	4.020	51,3	43,8	21,3	1,9	0,3	0,7	1,2	1,6	1,0	1,0	2,3	11,8	129,7
Ujina	4.300	60,0	54,6	19,6	1,4	1,4	3,6	1,3	6,7	2,6	1,9	2,2	14,9	156,1

Fuente: DGA



Fuente: Elaboración Propia

Diagrama 21 Precipitación Anual (mm) – Estaciones Meteorológicas DGA

Si se compara con la información recopilada de estudios anteriores, los valores de precipitación media anual son concordantes, la precipitación aumenta a medida que se incrementa la altitud. Como referencia se tiene que a nivel regional, la precipitación promedio anual varía entre 0 mm en la Pampa y 200 mm en los sectores montañosos más altos¹, y específicamente para la cuenca de Pica, la distribución de precipitaciones fluctúa entre 10 y 150 mm anuales².

El gradiente de variación que experimenta la precipitación con la altitud se determinó a partir de la precipitación media anual y se utilizó para trazar el mapa de isoyetas característico de las cuencas estudiadas. En el diagrama 22 se presenta la relación de la precipitación con la altitud en las estaciones seleccionadas. En él se observa un claro aumento de la precipitación.

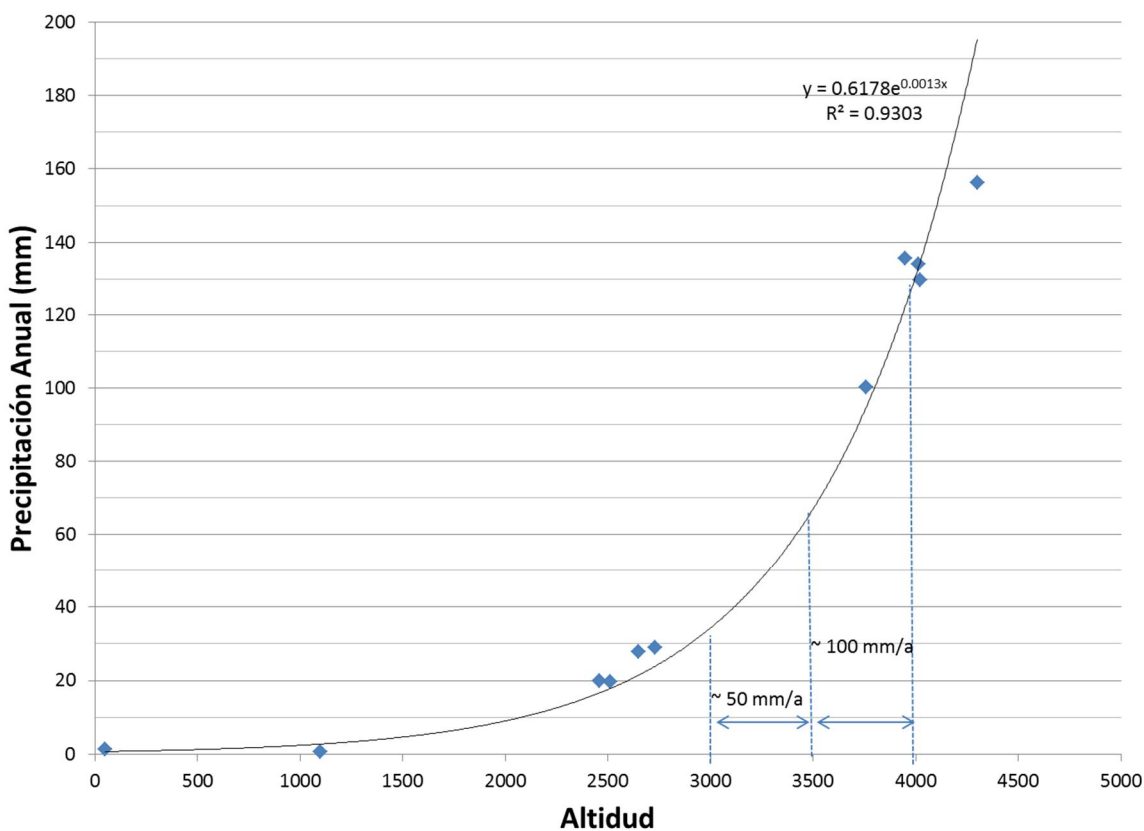


Diagrama 22 Relación entre precipitación media anual y altitud

La zona de recarga del acuífero de Pica se cree que es entre 3000 y 4000 msnm basado en los informes anteriores y la visita del área. Además, el informe de DGA 1985 y 1998 usó la zona de más de 3500 msnm en base a un análisis isotópico (ver las Secciones 3.1 y 7.8). En base a la relación entre precipitación media anual y altitud arriba, la precipitación anual de la zona de recarga es la siguiente:

¹ THE STUDY ON DEVELOPMENT OF WATER RESOURCES IN NORTHERN CHILE – JICA 1995
² EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL SECTOR DE PICA, HOYA DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL, I REGIÓN - 1998

- ▶ 3000 – 3500 msnm = ~ 50 mm/a
- ▶ 3500 – 4000 msnm = ~ 100 mm/a
- ▶ > 4000 msnm = ~ 150 mm/a

Estos números son más bajos que las estimaciones del informe de la DGA 1998, que usó 125 mm/a entre 3000 y 3500 msnm y 175 mm/a entre 3500 – 4000 msnm (basado en los datos de JICA 1995) para el cálculo de recarga del acuífero. Galli 1962 usó un promedio de 100 mm de precipitación entre 3000 y 4000 msnm para el cálculo de la recarga de acuífero. Ver Sección 7.8 para más detalles.

Adicionalmente, se incluyó en el análisis la información de las estaciones meteorológicas de la cuenca del Salar del Huasco. Las estaciones analizadas corresponden a:

- ▶ Alto Huasco (BNA 01051004)
- ▶ Diablo Marca (BNA 01050009)
- ▶ Sillillica (BNA 010510010)

La información disponible para estas estaciones es de 2011 y 2012. Por lo tanto, estos datos no pueden ser usados para inferir tendencias a largo plazo. En el Diagrama 23 se presenta la precipitación acumulada registrada en estas estaciones.

La precipitación total durante el período enero 2011 a junio 2011 fue de aproximadamente 150 mm en Diablo Marco (datos no disponibles durante este período en Alto Huasco).

Para el período junio 2011 a junio 2012 la precipitación fue de 180 mm para Alto Huasco, 250 mm para Diablo Marco, y 350 mm para Sillillica. Estas estaciones están ubicadas a aproximadamente 3.800 m y la precipitación registrada para este período es mayor que el promedio para esta altitud (ver Diagrama 22). No obstante, si bien se encuentra por sobre el promedio, la precipitación registrada se encuentra dentro del rango de las variaciones anuales registradas a lo largo del período de monitoreo (ver Diagrama 21) y de ningún modo es excepcional. Estas estaciones están situadas relativamente cerca entre ellas, sin embargo, la diferencia en la precipitación registrada para junio 2011 hasta junio 2012 fue significativa. Esto demuestra la alta variabilidad espacial de las precipitaciones en las altas montañas de los Andes, incluso a escala local. Por lo tanto, la recarga de las aguas subterráneas es probable que ocurra en áreas específicas durante cortos períodos de alta precipitación en enero y febrero.

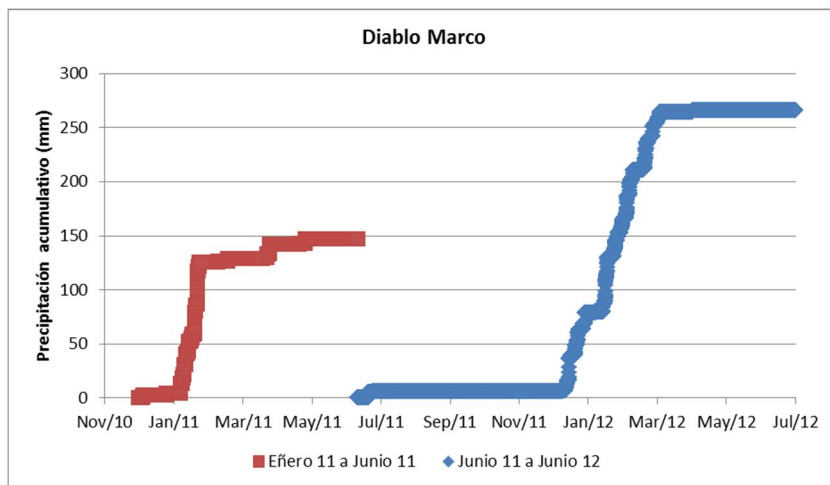
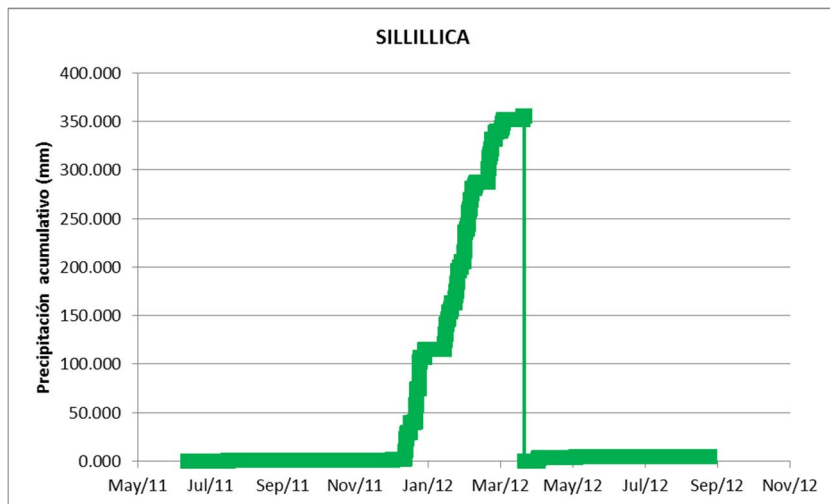
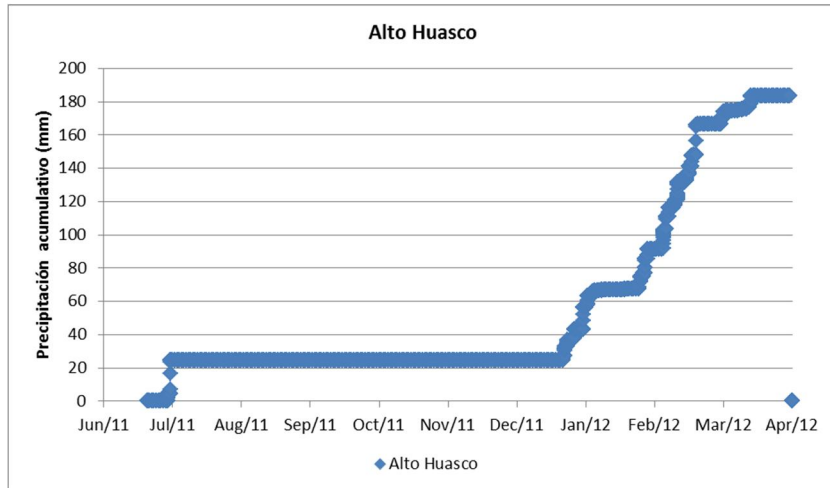


Diagrama 23 Precipitación Acumulativa para Estaciones de Salar de Huasco

Respecto a la precipitación media mensual, las estaciones registran un aumento significativo en los meses de verano, principalmente en enero y febrero, meses en los cuales se produce el "Invierno Altiplánico", donde las lluvias se caracterizan por ser intensas pero de corta duración, alcanzando valores cercanos a los 50 mm para las estaciones ubicadas sobre los 3.500 m.s.n.m y de 10 mm para las ubicadas bajo esta cota, tal como se puede apreciar en el Diagrama 24.

Esto concuerda con los datos de las estaciones meteorológicas en Salar de Huasco, que indican que la mayoría de las precipitaciones en esta área ocurrieron entre diciembre de 2011 y marzo de 2012 en estas estaciones meteorológicas (ver Diagrama 23).

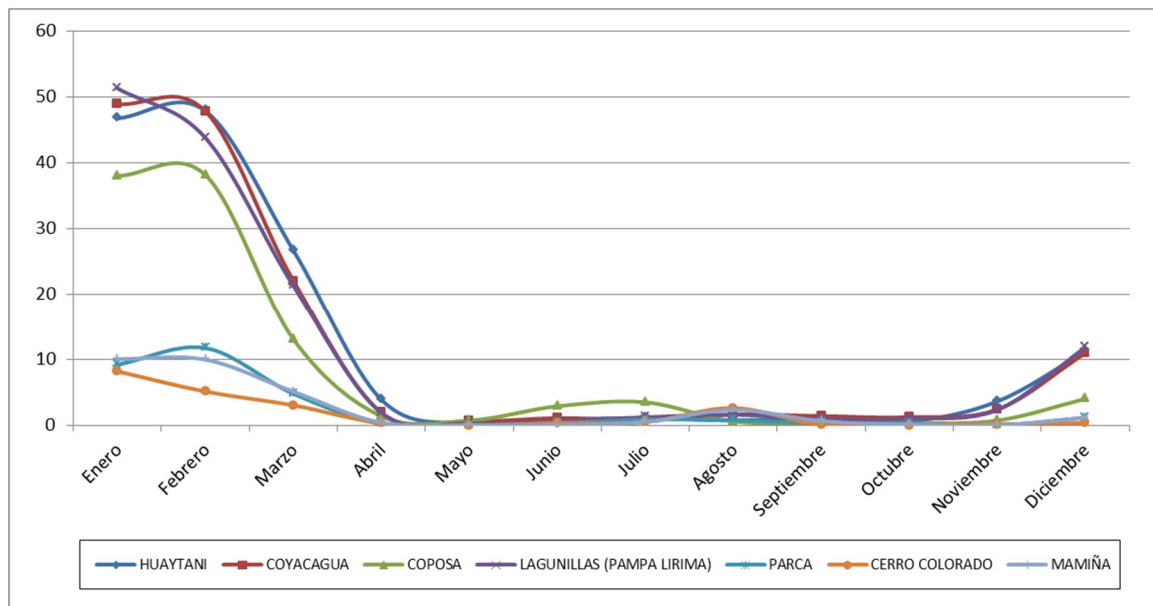


Diagrama 24 Precipitación Media Mensual (mm) – Estaciones Meteorológicas DGA

Fuente: Elaboración Propia

6.1.2 Evaporación

En el norte de Chile, se produce un valor negativo de la diferencia entre las precipitaciones y la evaporación que indica un clima árido. En la región de Pica hay un déficit de aproximadamente 1200 – 1500 mm / año entre las precipitaciones y la evaporación. (DGA-UCN-IRD 1999).

La información que se dispone de las estaciones cercanas al área de estudio, corresponde a datos de evaporación diaria para las estaciones Coyacagua, Ujina, Huara en Fuerte Baquedano, Lagunillas y Cerro Colorado, de donde se obtienen valores que se encuentran entre los 5 y 10 mm. En la Tabla 6.3 se presenta un resumen de la evaporación anual.

Estos datos indican un déficit entre lluvia y precipitación del orden de 1700 – 2100 mm en la zona altiplánica (Coyacagua, Ujina, Lagunillas) y >2500 mm en las áreas bajas del valle central (Huara, Cerro Colorado).

En el Diagrama 25 se presentan datos mensuales para las estaciones Coyacagua y Cerro Colorado. Estos datos indican que las tasas de evaporación en la región son más altas en verano, del orden de 250 mm/mes y más bajas en invierno, del orden de 150 mm/mes.

Tabla 6.3 Evaporación anual (mm)

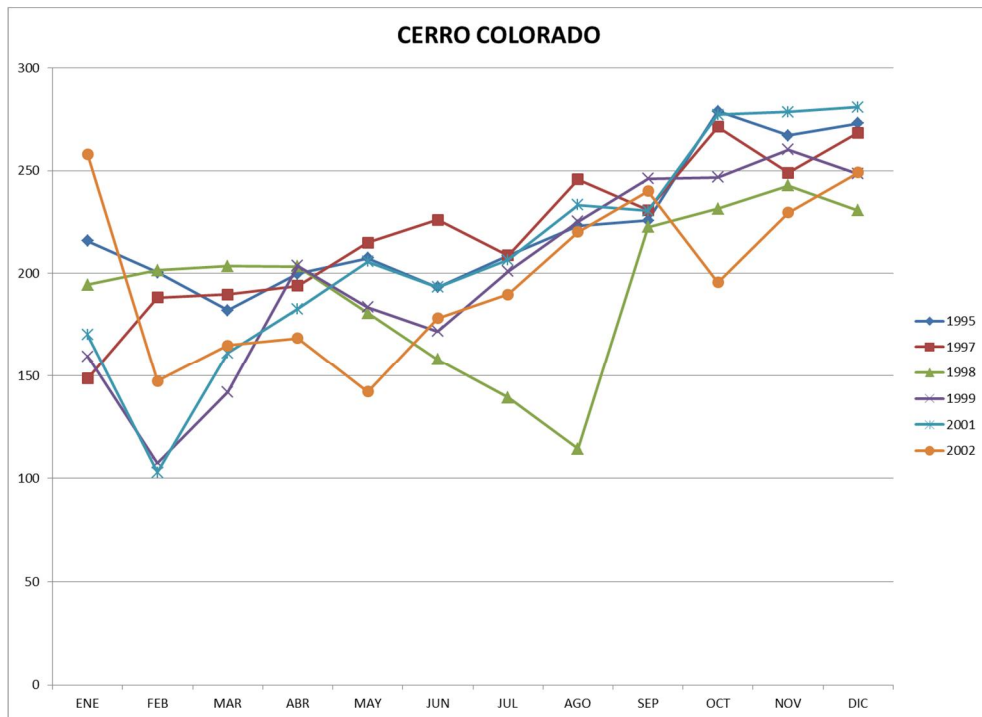
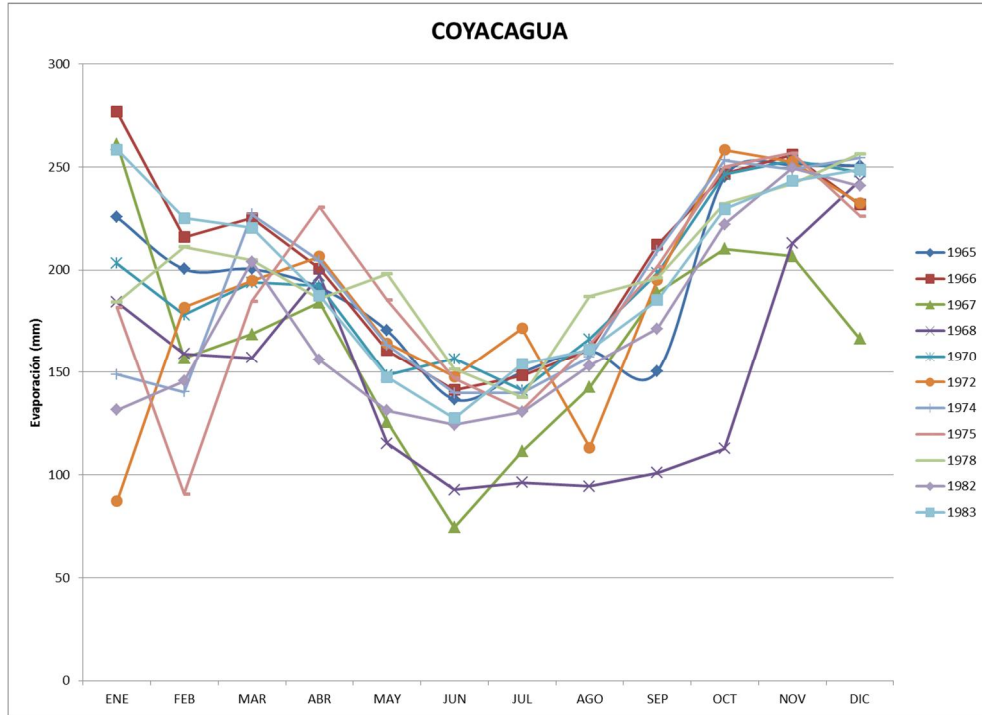
Estación	Periodo	no. de años completos ^(a)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	ppn (mm/año)	déficit
Coyacagua	1964 - 2011	11	1767	2477	2225	134	2091
Ujina	1973 – 1986 ^(b)	2	1759	2015	1887	156	1731
Huara	1993 – 2012 ^(c)	1	-	-	3408	1	3408
Lagunillas	1982 – 2011 ^(d)	1	-	-	2008	130	1879
Cerro Colorado	1993 - 2011	6	2323	2676	2489	20	2470

(a) con más de 95% de los datos diarios

(b) Ujina: 1978 – casi completo, 1977 – datos faltantes de febrero y marzo

(c) Huara en Fuerte Baquedano: datos completos disponibles sólo para 2006

(d) Lagunillas datos completos disponibles sólo para 1989



Fuente: Elaboración Propia

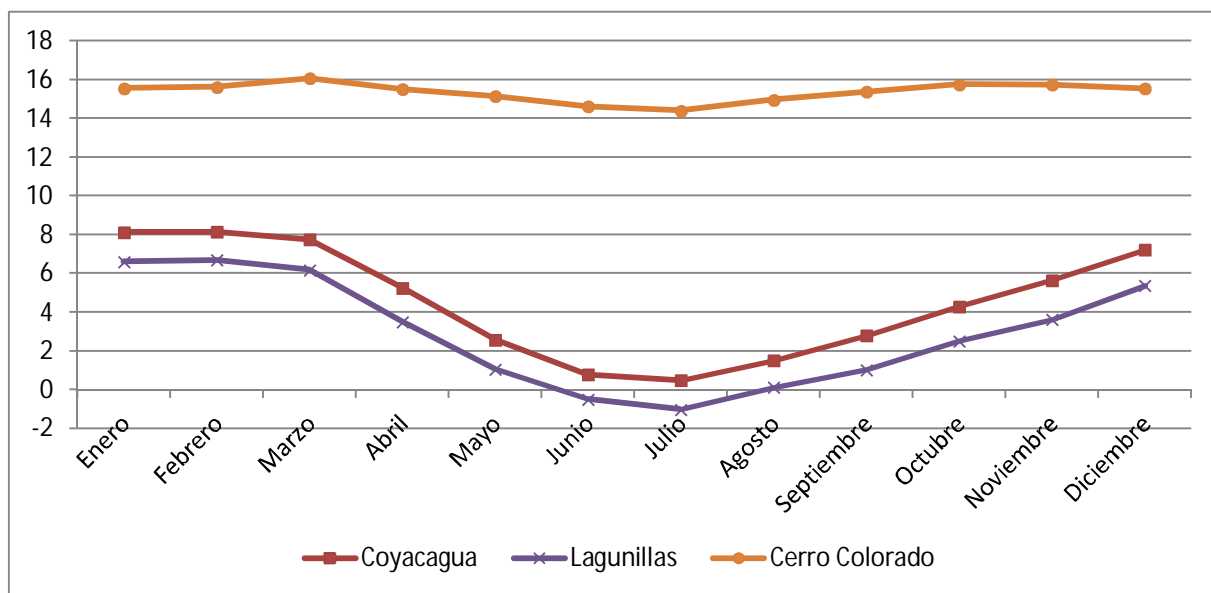
Diagrama 25 Evaporación Mensual (mm) – Estaciones Meteorológicas DGA

6.1.3 Temperatura

La información de temperatura se obtuvo a partir de los datos de las estaciones meteorológicas vigentes de la Dirección General de Aguas próximas al área de estudio, pero situadas fuera de la cuenca Pica-Matilla. De las estaciones analizadas, sólo tres de ellas presentan información de temperatura; éstas son las estaciones Coyacagua, Lagunillas y Cerro Colorado.

Las estaciones ubicadas a mayor altitud, sobre los 3.500 m.s.n.m, Coyacagua y Lagunillas, registran una mayor oscilación térmica entre los meses más cálidos con temperaturas medias que bordean los 8°C y los más fríos, que alcanzan los 0°C. La estación Cerro Colorado, a su vez, presenta una temperatura media mensual cercana a los 15°C, con una baja oscilación térmica estacional, según como se puede apreciar en el Diagrama 26.

Respecto a la oscilación térmica diaria, ésta es importante, presentando temperaturas máximas que bordean los 20°C en el día y las temperaturas cercanas a 0°C en la noche.



Fuente: Elaboración Propia

Diagrama 26 Temperatura Media Mensual (°C) – Estaciones Meteorológicas DGA

Adicionalmente, se incluyó en el análisis la información de las estaciones meteorológicas de la cuenca del Salar del Huasco. Estos datos se presentan en el Diagrama 27 e indican una amplia variación diaria en la temperatura, que va de -15 a 17 C durante gran parte del año a excepción del período de altas precipitaciones (invierno altiplánico) en enero y febrero, cuando las temperaturas fluctúan de 0 a 17 C.

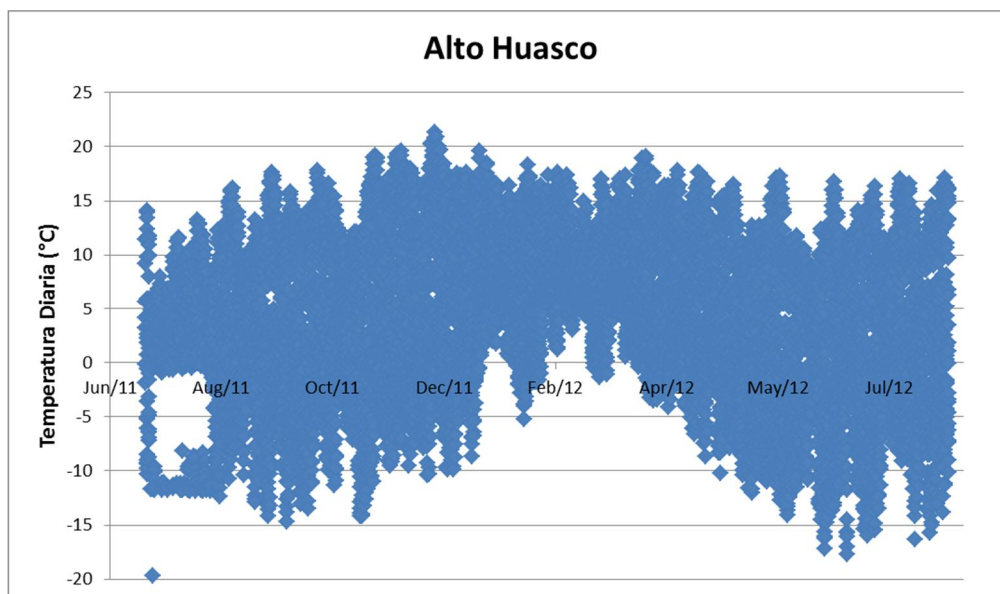


Diagrama 27 Temperatura Diaria (°C) – Estación Alto Huasco

6.2 Hidrología

La Pampa del Tamarugal corresponde a una zona extremadamente seca, donde la mayoría de los cuerpos de agua superficiales corresponden a cauces intermitentes que se reactivan durante el “Invierno Altiplánico”, en el cual se producen abundantes lluvias en la época de verano (ver Sección 6.1.1).

La cuenca de la Pampa del Tamarugal se compone de un sistema endorreico de subcuencas o quebradas con flujos intermitentes que provienen de la cordillera y el altiplano. Este sistema está conformado, de Norte a Sur, por las quebradas Juan Morales, Sagasca y El Tambillo, la Quebrada de Quisma, la cual conforma la cuenca de Pica-Matilla y la quebrada de Chacarilla. En el Figura 2 “Subcuencas de la Pampa del Tamarugal” se presentan las principales líneas de drenaje de las hoyas hidrográficas que componen la cuenca de la Pampa del Tamarugal.

La cuenca de Pica-Matilla, conformada por la Quebrada de Quisma, presenta escurrimientos de agua subterránea y cursos superficiales esporádicos que nacen en la Cordillera de los Andes y fluyen hacia el Oeste. La mayor parte de los cursos de agua, antes mencionados, desaparecen antes de llegar a la Pampa del Tamarugal debido a las altas tasas de evaporación e infiltración, lo que no sucede en el caso de aquellas quebradas que drenan sectores altos de la Pampa del Tamarugal, como el sector de Altos de Pica, donde las quebradas poseen una red de flujo bien definida.

Se analizó la información disponible de las estaciones fluviométricas vigentes de la Dirección General de Aguas, próximas al área de estudio y que corresponden a las estaciones Vertiente El Ermitaño, Vertiente Huasco Norte y Río Guatacondo en Copaquire,

ubicadas en la cabecera de la Pampa. La ubicación específica de las estaciones se presenta en la Figura 3.

Las mediciones de caudal para las estaciones Vertiente El Ermitaño y Vertiente Huasco Norte datan del año 1994. El valor del caudal medio diario fluctúa entre los 20 y 30 l/s, tal como se aprecia en el Diagrama 28. A pesar de que existen pocos datos de monitoreo a largo plazo disponibles para las vertientes de Pica, el flujo total se estima aproximadamente en 50 L/s.

Los flujos medidos de las vertientes El Ermitaño y Huasco son relativamente estables y al parecer no son afectadas considerablemente por las fluctuaciones estacionales. Esto concuerda con el flujo observado en la vertiente de Pica que al parecer ha permanecido relativamente estable, lo que indica un flujo de aguas subterráneas extenso.

En el caso de la estación Río Guatacondo en Copaquire, ésta presenta datos desde el año 1980. El caudal medio diario registrado ha presentado variaciones importantes durante el tiempo de registro, sin embargo, los últimos años ha ido disminuyendo gradualmente llegando a valores cercanos a 10 l/s.

La mayor parte de esta agua desaparece antes de llegar a la Pampa del Tamarugal debido a las altas tasas de evaporación e infiltración. El informe de JICA 1995 define una relación empírica entre la precipitación y la escurrentía para calcular el coeficiente de escurrentía usando la siguiente fórmula:

$$R = 1423.17f + 23.52$$

Dónde:

R = precipitación promedio

f = Coeficiente de escurrimiento

Basándose en esta fórmula y usando un precipitación promedio de 100 mm/año, se puede calcular que el 5,4% de la precipitación es conducida superficialmente por ríos y esteros, mientras que el restante se pierde principalmente por evaporación e infiltración (para más detalles, ver Sección 7.8).

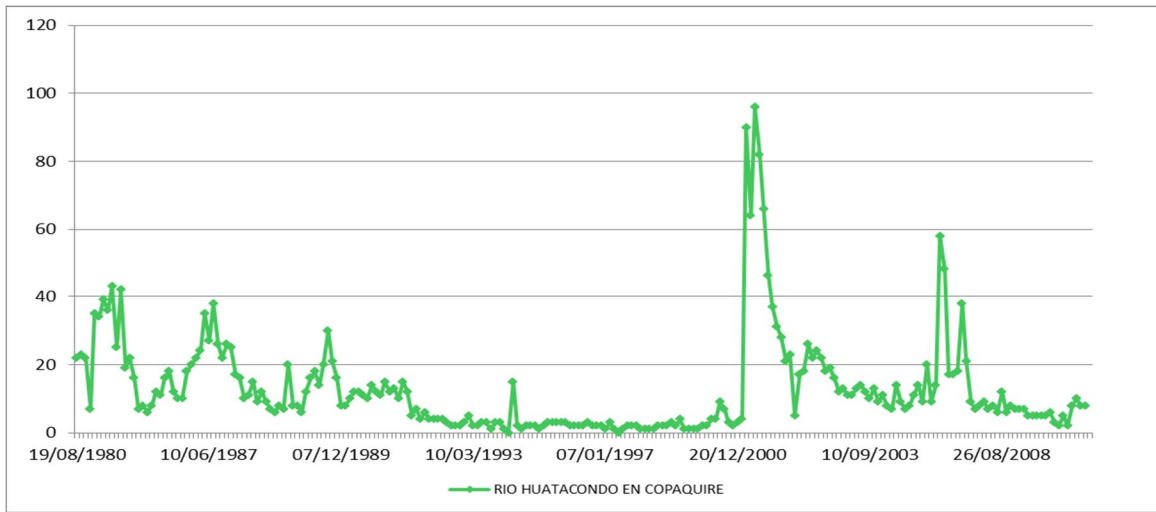
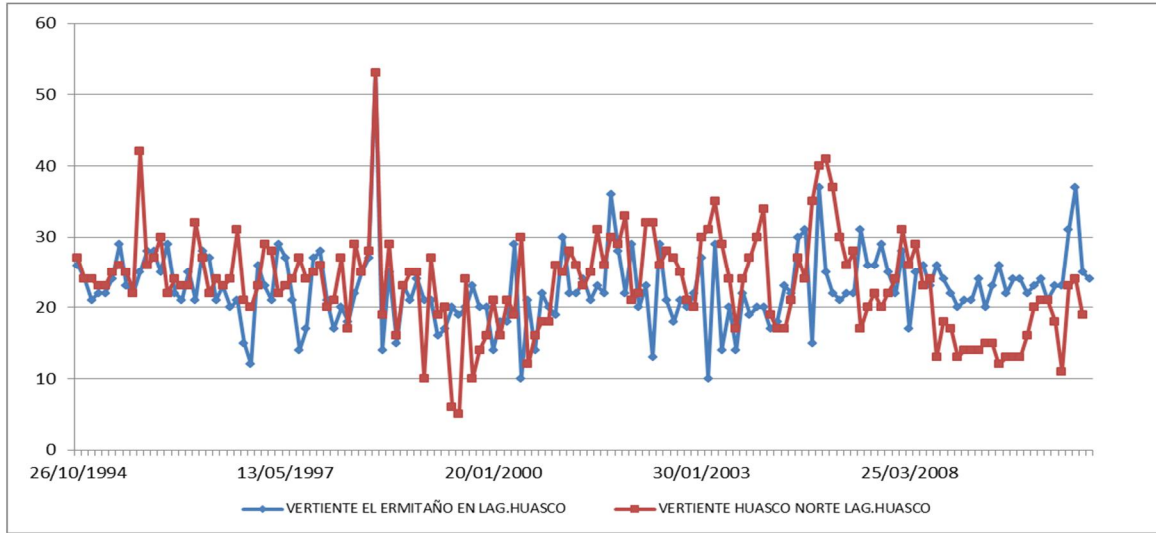


Diagrama 28 Caudal medio diario (l/s) – Estaciones de la DGA

Fuente: Elaboración Propia

7. Caracterización Hidrogeológica

7.1 Geología

7.1.1 General

En la Figura 4 se presenta un mapa de geología del área del estudio (creado usando datos de SIG de SERNAGEOMIN 2004). En general, la geología de la zona en estudio se compone de roca basal (formación Longacho) que han sido levantadas y deformadas por la actividad tectónica. Esto ha dado lugar a una serie de estructuras Horst y Graben,

orientadas de Norte a Sur. En el área de estudio los depósitos sedimentario y volcánico-sedimentario de la formación de Altos de Pica han llenado una cuenca que es el resultado de un confinamiento delimitado por el Horst de Pica en el Oeste y el Horst de Huasco por el Este (Diagrama 29). Las rocas de la Formación Altos de Pica afloran a través de la mayor parte del área de estudio (M1c y M3t en la Figura 4). En la zona inferior Oeste del área en estudio, estas rocas están cubiertas por depósitos relativamente jóvenes (cuaternario): depósitos fluviales y eólicos. En las siguientes secciones se presenta una descripción de estas unidades geológicas principales, de la más joven a la más antigua.

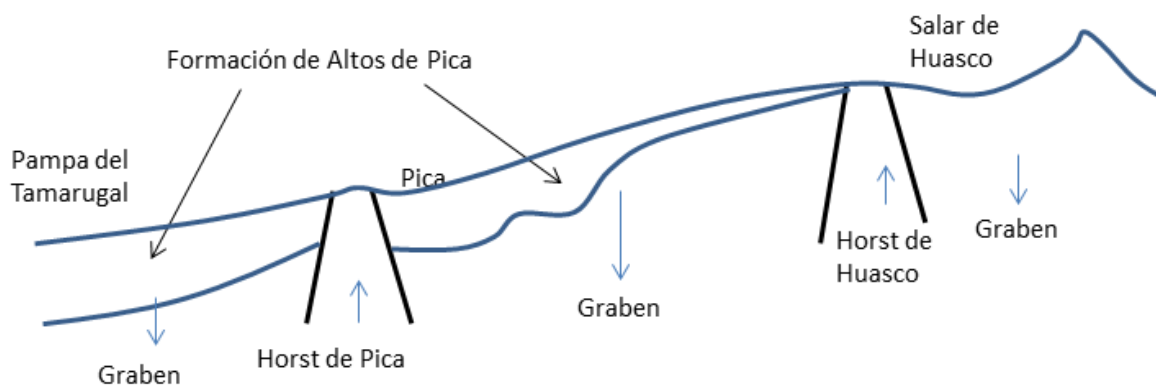


Diagrama 29 Diagrama Conceptual de la Geología Estructural del Área de Estudio

7.1.2 Cuaternario

Las acumulaciones de sedimentos cuaternarios se originaron durante períodos definidos de depósito y erosión. Una gran parte del área de estudio corresponde a depósitos cuaternarios (Qe) de origen eólico, dunas de arenas finas y medias.

Los depósitos cuaternario-recientes son acumulaciones de materiales aluviales y eólicos gruesos e irregulares, que ocupan, sobre todo, los sectores occidentales de la región.

En el área de Pica, los depósitos cuaternarios generalmente tienen un espesor menor de 30 m (DGA 1998). En el área del estudio estos depósitos no son significativos con respecto del almacenamiento de agua subterránea.

7.1.3 Altos de Pica

La primera formación geológica del área de estudio es la formación de Altos de Pica. La formación Altos de Pica es la más ampliamente distribuida en la región y la de más interés hidrogeológico.

La geología en el área de estudio de la formación de Altos de Pica se ha llenado una cuenca que es el resultado de un confinamiento delimitado por el Horst de Pica en el Oeste y el Horst de Huasco por el Este (Diagrama 29). El trabajo de Galli 1962 es el principal trabajo de geología en el sector de Pica y las descripciones geológicas de la formación Altos de Pica de Galli 1962 se citan en muchos informes posteriores, incluyendo JICA 1995, DGA 1998, DGA 2004, Rojas y Dassargues 2006.

Se estima que la unidad es de edad terciaria superior a pleistocena y ha sido dividida en tres miembros continentales sedimentarios distinguidos con los números 1, 3 y 5, y dos miembros integrados principalmente por tobas soldadas, el 2 y el 4 (ver Tabla 7.1). Las rocas sedimentarias constituyen la acumulación de materiales clásticos gruesos formados por la erosión de las montañas al este. Las rocas piroclásticas riolíticas (tobas soldadas) de los miembros 2 y 4 son fases de unidades ignimbríticas formadas por flujos piroclásticos y ceniza. Galli 1962.

Consultar Tabla 7.1 para ver un resumen de los cinco miembros. El afloramiento de esta formación se muestra en el mapa geológico como unidades M3t (secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderos de colapso) y M1c (secuencias sedimentarias de abanicos aluviales o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbríticas intercaladas).

Sumados los espesores parciales de los cinco miembros medidos en lugares distintos, el total es de aproximadamente 735 m (Galli 1962). Esta teoría se ha fundamentado en la observación de perforaciones en regiones cercanas y no representa la potencia real y máxima de la formación. Las prospecciones geofísicas (ver Sección 5.2) indican que la formación Altos de Pica tiene un espesor máximo de aproximadamente 500 m en el área del estudio.

Tabla 7.1 Litología de la Formación Altos de Pica

Miembro	Litología		Unido (Galli 1962)	Unido (SERNAGE- OMIN 2004)
Miembro 5	Galli 1962	Areniscas, conglomerados, bolones redondeados (espesor estimado 200 m)	TQa5	M1c
	SERNAGE-OMIN 2004	Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbríticas intercaladas		
Miembro 4	Galli 1962	Tobas riolíticas, ignimbríticas. Con fenoclastos de pumicita y cristalinos visibles a ojo desnudo (espesor estimado 23 m)	TQa4	M3t
	SERNAGE-OMIN 2004	Secuencias piroclásticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso		
Miembro 3	Galli 1962	Areniscas amarillenta media a gruesa, conglomerados (espesor estimado 173 m)	TQa3	MP1c
	SERNAGE-OMIN 2004	Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas.		
Miembro 2	Galli 1962	Tobas riolíticas, ignimbríticas andesíticas (espesor estimado 17 m)	TQa2	OM3t

Miembro	Litología		Unido (Galli 1962)	Unido (SERNAGE- OMIN 2004)
	SERNAGE- OMIN 2004	Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso		
Miembro 1	Galli 1962	Areniscas, conglomerados (espesor estimado 322 m)	TQa1	OM1c
	SERNAGE- OMIN 2004	Secuencias sedimentarias continentales parálicas o aluviales; conglomerados, areniscas, lutitas, calizas y montes de carbón.		

7.1.4 Formación Longacho

Las rocas de la formación Longacho, de edad jurásica inferior, es de origen marino, forman el basamento debajo de Altos de Pica en el Área del estudio. Otras rocas que forman basamento en la región incluyen la formación Chacarilla, de edad jurásica superior, de origen marino y continental, que aflora en el área al sudoriental del área del estudio (JK1c, Figura 4); y la formación Cerro Empexa, de edad cretácica, que cubre a la formación Chacarilla, en discordancia angular.

La unidad está muy poco expuesta en la región; es de edad jurásica y está formada por lutitas fisibles, fango-litas, areniscas finas y calizas, generalmente grises, que se depositaron en ambiente marino. Existe un afloramiento de esta roca en el cerro Longacho ubicado al norte de Pica (Ji1m, Figura 4).

7.1.5 Estructuras

Las estructuras regionales tienen, en general, orientación Norte. Las grandes fallas supuestas y la extendida flexura al Este de Pica limitan la Cordillera de los Andes, la depresión de Pica-Puquio Núñez, la serranía del Longacho, las serranías al norte de Pampa Esmeralda y la Pampa del Tamarugal, que son las mayores unidades estructurales de la región. Galli 1962

La línea de falla N-S ubicada al Oeste de Pica se muestra en la Figura 4 – La geología en el borde oriental de la serranía del Longacho constituiría el elemento estructural más importante de la región. La falla se extendería en la región estudiada desde los afloramientos más septentrionales de esa serranía hasta las proximidades del cerrito de Puquio Núñez (Galli 1962). Esto se evidencia por el afloramiento de Ji1m en el Cerro de Longacho situado el Norte de Pica y al Oeste de la línea de falla (véase Figura 4 – Geología). Esta estructura elevada también ha dado lugar al afloramiento de rocas más antiguas piroclásticas (OM3t) al oeste de la línea de falla.

7.1.6 Datos de Estratigrafía

La Inspección Fiscal entregó documentos digitalizados de pruebas de estratigrafía provenientes de expedientes de derechos de agua de la zona. De las 326 carpetas, hay 29 sondajes/pozos entre el área del estudio más 8 perforaciones de Esmeralda que con

datos de estratigrafía (ver Figura 13). Informes de perforaciones para ellos se probado en Anexo C.

Hay soló 3 sondajes de Pica con datos de estratigrafía y más de 100 m de profundidad (ND-0103-1240, ND-0103-1238 y ND-0103-1775).

En la Tabla 7.2. se presenta un resumen de los datos de estratigrafía

Tabla 7.2 Resumen de los Datos de Estratigrafía		
Expediente	Profundidad (m)	Descripción
ND-0103-1240	184	<p>Ubicado al Oeste de Matilla</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0-42 m arena y conglomerados - 42-71 m liparita - 72-76 m ceniza - 76-112 m arenisca - 112-158 m arcilla - 158 – 166 m ceniza - 166 – 184 m arenisca y arcilla <p>Este sondaje está ubicado cerca de la Serranía de Longacho donde el Miembro 2 (TQa2, OM3t) está más cerca de la superficie. Por lo tanto, la liparita y ceniza entre 42 y 76 m posiblemente representan Miembro 2 con sedimentos de Miembro 5 (TQa5, M1c) y Miembro 3 (TQa3, MP1c) arriba y Miembro 1 (TQa1, OM1c) abajo. Esto es consistente con la sección geológica de Galli 1962 (ver Diagrama 30)</p>
ND-0103-1238	115	<p>Ubicado entre Pica y Matilla</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0-32 m arena - 32-115 m arcillas con algunas capas de arena y un capa de grava 65-66m - Entrega de agua a las 31-32 m (mismo el napa), 65-66 (por gravas) y al base de sondaje.
ND-0103-1775	111	<p>Ubicado entre Pica y Matilla (1 km este de ND-0103-1238)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0-40 m arena - 40-111 m arcillas con algunas capas de arena - Entrega de agua a las 32.7 m (mismo el napa), aprox. 70 m (no es clara en log) y al base de sondaje.
ND-0103-346	12 sondajes 38.4 – 100	<p>Área Esmeralda</p> <p>Datos de estratigrafía disponibles para 8 sondajes (D11, D12, D27, D30, D31, D32, D33, D34) indican capas de arena y arcilla con algunas</p>

Expediente	Profundidad (m)	Descripción
		gravas desde de la superficie hasta aproximadamente 80 a 100 m y bajo esa profundidad laparitas (pumitas).
ND-0103-1309	80	Noreste de Pica - 0-32 m arenas - 30 – 80 m gravas y arenas
ND-0103-1759	80	noreste de Pica - 0-32 m Arenas - 30 – 80 m gravas y arenas
ND-0103-611	71	Ubicado en el área de Miraflores 0-40 m arenas 40 – 70 m roca desgranada roja 71 m arcillas
ND-0103-991	53.3	Noreste de Pica 0-23 m arena 24-50 m conglomerado de grava 50-53 m roca endurecida e ingreso de agua
ND-0103-1046	44	Entre Pica y Matilla 0-44 m capas de arena y arcilla Napa 32 m
ND-0103-1779	44	Noreste de Pica 0-18 m arena 18 – 40 m Conglomerado de grava 40 – 44 m roca endurecida ingreso de agua

En general, la información estratigráfica indica que los primeros 100 m del Miembro 5 de la Formación Altos de Pica en la zona de Pica y Matilla comprenden capas variables de arenas, gravas, conglomerados de gravas y arcillas. La capa freática se encuentra generalmente a profundidades de aproximadamente 30 m.

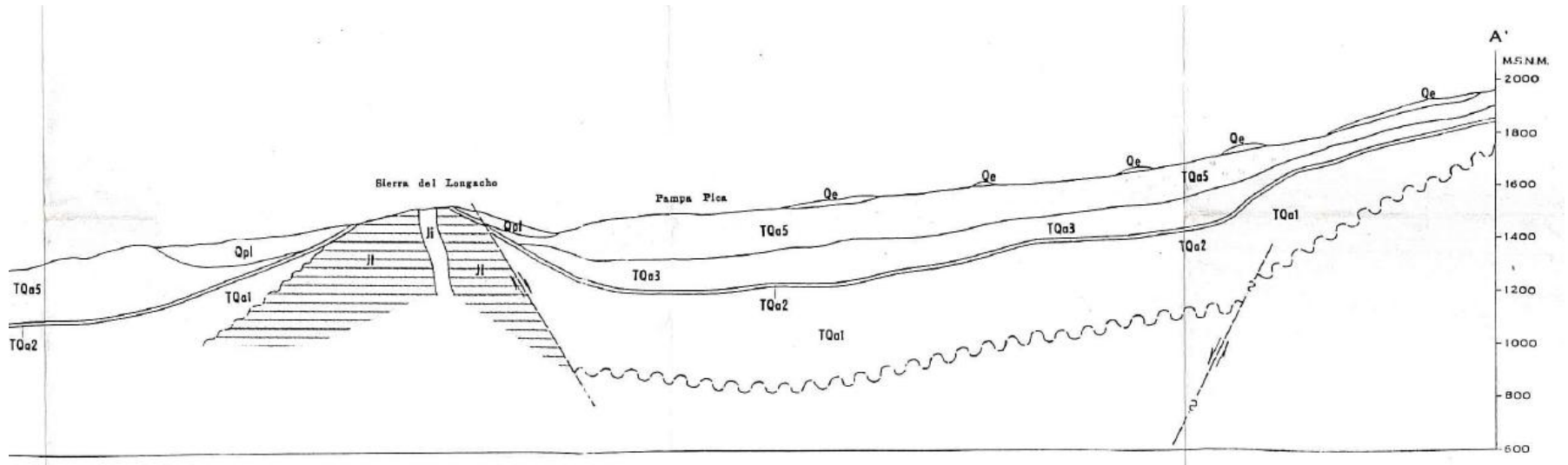
Esta estratigrafía es generalmente consistente con los resultados de los análisis por TEM discutidos en la sección 5.2.1. Los pozos en el Noreste de Pica (1309, 1759 y 1779) están de acuerdo con la interpretación de la línea TEM 1, con una arena seca y gravas a una profundidad de aproximadamente 30 – 50 m, sustentada por arenas saturadas y gravas.

El mayor contenido de arcilla observado en los pozos entre Pica y Matilla puede explicar los valores de resistividad relativamente bajos en las líneas de TEM 4 y 7.

En general, no fue posible identificar claramente los diferentes miembros de la formación Altos de Pica a partir de los datos estratigráficos disponibles, en particular teniendo en cuenta que estos miembros contienen muchos de los mismos materiales, tales como arenas, gravas y capas de ceniza y piedra pómez.

La sección transversal de Galli 1962 proporciona una estimación del espesor de los diferentes miembros de la formación Altos de Pica dentro de la zona de estudio (ver diagrama 30). La sección transversal de este a oeste atraviesa el afloramiento Jurásico de Longacho situado a 10 km al Norte de Pica. La sección transversal indica que el miembro 4 (TQa4, M3t) no se extiende en la cuenca bajo la zona de Pica. En contraste, el trabajo de Jica 1995 indica la existencia del Miembro 4 dentro de la Pampa del Tamarugal al Oeste de Pica con un espesor de más de 100 metros. La existencia de una importante cuenca oriental de la sierra del Longacho y el adelgazamiento de la secuencia aluvial hacia el Oeste es consistente con los resultados de los estudios gravimétricos (Sección 5.2.2).

Diagrama 30 Sección Geología Norte de Pica (Galli 1962)



7.2 Unidades Hidrogeológicas

7.2.1 Cuaternario

En ciertas localidades es posible la existencia de aguas subterráneas en los depósitos cuaternarios. Por ejemplo, el agua subterránea que escurre a través de los materiales aluviales cuaternarios de la quebrada Chacarilla. Sin embargo, esta agua no es significativa en la escala regional y representa sistemas muy localizados y pequeños. (Galli 1962, DGA 1998)

7.2.2 Formación Altos de Pica

Esta formación es la única formación en que existe agua subterránea en cantidades que tienen alguna importancia económica. La descarga natural o extracciones de aguas subterránea en el área del estudio proviene de los miembros de esta formación. Galli 1962

Basado en el trabajo de JICA (1995) los acuíferos principales de la región se localizan en las formaciones de Altos de Pica. Se cree que las areniscas y conglomerados del Miembro 5 (aproximadamente 200 m de espesor), así como los tobas subyacentes e ignimbritas del Miembro 4 (aproximadamente 23 m de espesor) representan las unidades acuíferas más productivas. Usando la clasificación estratigráfica más reciente de SERNAGEOMIN 2004, estas unidades están representadas por M1c y M3t, respectivamente (ver Figura 4). La mayoría de los pozos en la zona de Pica / Matilla corresponden a areniscas y conglomerados de la unidad M1c. La fotografía 1 indica los bolones redondeados de esta formación que fueron extraídos de un pozo del sector de Pica.



Fotografía 1 - Bolones redondeados extraídos de un pozo del sector de Pica

La existencia de sondajes surgentes (pozos artesianos) en el área de Pica, de los cuales el más notable es el sondaje de Chintaguay, indica que las unidades más profundas del acuífero están confinadas por sedimentos suprayacentes y bajo la presión suficiente para causar condiciones artesianas. Esto también sugiere la existencia de capas confinadas (ej: acuitardos arcillosos). De acuerdo con el análisis TEM, es posible la existencia de una capa de arcilla a partir de una profundidad de alrededor de 100 a 200 m por debajo de la superficie (ver Sección 5.2.1), aunque esto no pudo ser confirmado por los datos estratigráficos disponibles.

7.2.3 Formación Longacho

Las rocas de la unidad son sedimentos muy cementados y tienen muy baja permeabilidad. Es improbable que las rocas constituyan una fuente de agua subterránea significativa porque tienen una permeabilidad muy baja debido a la litificación de las rocas. Es probable que la fracturación haya producido una porosidad secundaria pero “aparentemente” las fracturas no están abiertas hasta gran profundidad. Galli 1962.

Entonces, en términos de la hidrogeología de la región, la formación Longacho representa el basamento impermeable con un muy bajo potencial de almacenamiento de volúmenes de aguas subterráneas significativos.

7.3 Exploración de aguas subterráneas

Entre los años 1916 y 1942 el Gobierno Chile perforó aproximadamente 20 sondajes en las áreas de Pica y Matilla y en la quebrada Chintaguay. Las profundidades de los pozos varían entre 35 y 320 m. Un sondaje ubicado en la quebrada Chintaguay tuvo un flujo surgente de 40 a 50 lt/seg y el agua fue utilizada para suministrar agua potable a la ciudad de Iquique. Hoy, esta agua es utilizada para a suministrar agua potable a Pica. Todos los otros sondajes produjeron menos de 5 lt/seg, y la mayor parte de ellos menos de 1 lt/seg. Galli 1962

Aproximadamente en 1952, la Dirección de Riego inició un programa de perforaciones de exploración en Esmeralda ubicado al Oeste de Pica. Los resultados de este programa de perforaciones han sido económicamente desfavorables y los rendimientos de los 13 pozos varían desde prácticamente cero hasta 15 lt/seg (solamente en uno de ellos). Galli 1962

Se concluyó que la perforación de pozos profundos en el área de Pica, Matilla y Esmeralda tiene pocas posibilidades de buen éxito debido a la pequeña probabilidad de la intercepción de las zonas de permeabilidad alta. Se considera que los conductos de alta permeabilidad en las rocas fracturadas, se encuentran en posición esencialmente vertical y por este motivo atravesar en una perforación uno o varios de ellos, es una circunstancia casual. Galli 1962

En muchos de los sondajes de exploración se encontró agua subterránea con presión artesianas (surgente). Estos sondajes surgentes tenían profundidades que varían de 35 m (Chintaguay) a 320 m lo que indica que el agua subterránea con presión artesianas existe a diferentes profundidades del perfil sedimentario y la magnitud del flujo está afectada por la red de fracturas existente. Esto indica que posiblemente existen múltiples capas de acuíferos confinados dentro de la secuencia sedimentaria en condiciones artesianas.

7.4 Profundidad del agua subterránea

La profundidad estática del agua subterránea en la región de Pica es difícil de determinar debido a la influencia del bombeo de pozos. En base a los resultados del trabajo de terreno, la profundidad del agua subterránea en pozos no operativos (nivel estático del agua) generalmente oscila entre 15 y 30 m bajo el nivel de suelo (ver Sección 4.2.1).

7.5 Tendencia del nivel de agua subterránea

Existen seis pozos de DGA en y cerca del área de estudio, incluyendo tres pozos de Esmeralda (11, 28 y 43) ubicados entre el acuífero de la Pampa del Tamarugal, tres pozos en el área de Pica y Matilla (Concova, Granja María José y Enrique Aguayo) y un pozo de Puquío Núñez. Las ubicaciones de estos pozos se presentan en la Figura 3. Los niveles de aguas subterráneas de estos pozos se presentan en el Diagrama 31.

Los datos de niveles de agua subterránea de pozos dentro del acuífero de la Pampa del Tamarugal (Esmeralda 11, 28, 34) indican un descenso de aproximadamente 2 m desde el año 1992 al 2010 (ver Diagrama 31). Esto indica que hay un descenso en el nivel del agua subterránea en la Pampa del Tamarugal de 10 cm cada año, debido a las extracciones de pozos. Esto es consistente con la tasa de descenso descrita en el informe de JICA 1995.

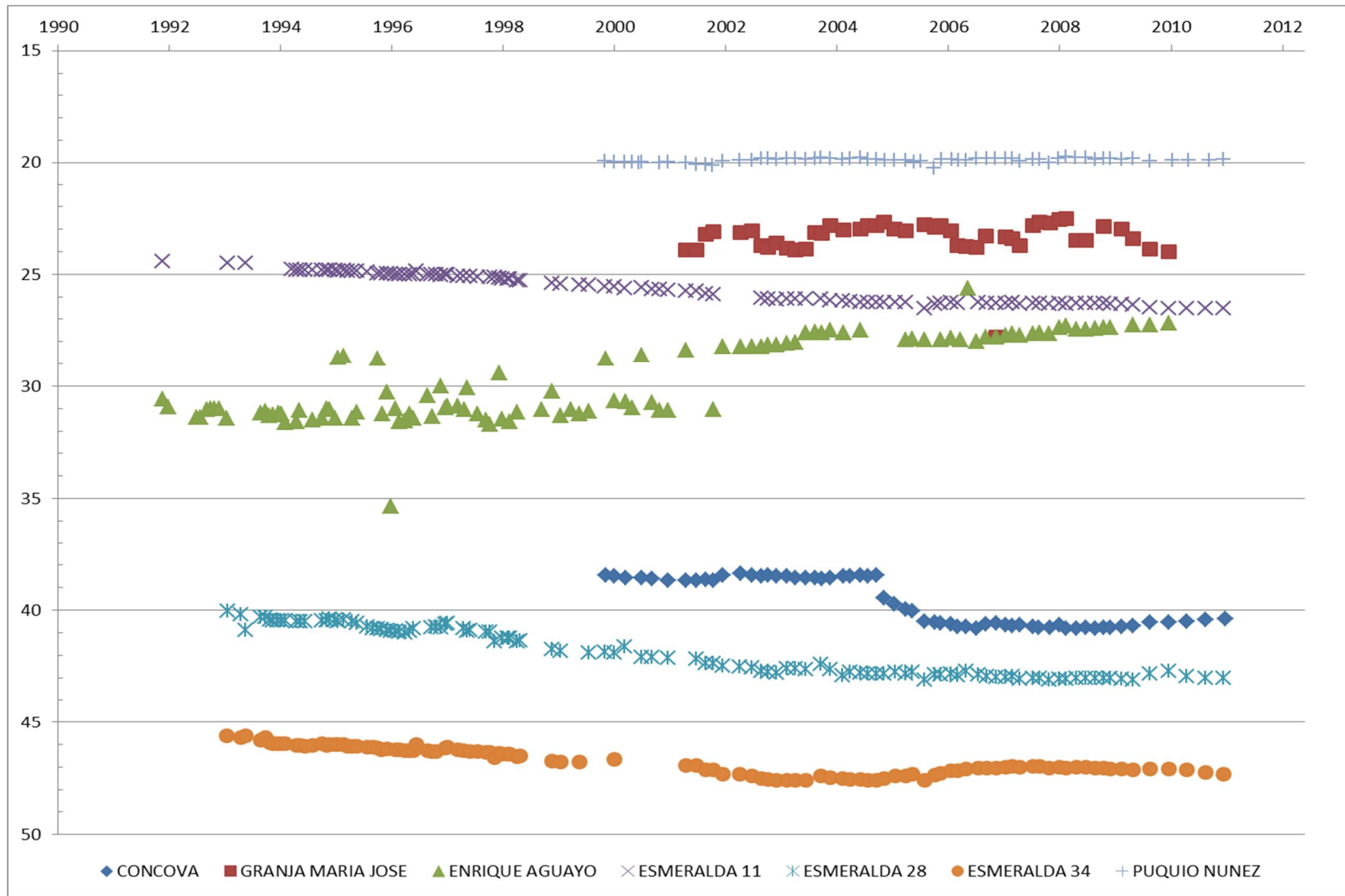
En el acuífero de Pica existen tres pozos con muestreos temporales de niveles de agua, estos son Concova, Granja María José y Enrique Aguayo. La información de Concova indica en general un nivel estable. El descenso de 2 m en el nivel de agua al pozo Concova observado entre los años 2005-2006 se puede atribuir posiblemente a la instalación de un pozo en las proximidades (lo que no está confirmado), aunque el nivel de agua se estabiliza poco después, indicando condiciones estables. Esto es consistente con el flujo relativamente estable observado para las vertientes principales de Pica.

Respecto a los niveles del pozo Enrique Aguayo, estos datos indican un incremento de nivel de aguas subterráneas de 1 m entre 2002 y 2010.

El nivel de aguas subterráneas de Puquío de Núñez también es estable.

Es difícil evaluar la tendencia que sigue el nivel regional de aguas subterráneas de Pica sobre la base de que se tiene una red limitada de tres pozos de monitoreo. Al parecer, la extracción de agua subterránea, si bien causa descensos localizados, no significa necesariamente un descenso generalizado del acuífero. Esto es un indicador de que las extracciones totales no exceden el volumen de agua subterránea que fluye hacia las áreas de Pica /Matilla. Sin embargo, se requieren monitoreos adicionales y una red de monitoreo más amplia para confirmar esto.

Diagrama 31 Niveles de agua subterránea (Pica, Esmeralda y Puquío de Núñez)



7.6 Propiedades de los Acuíferos

La Inspección Fiscal entregó documentos digitalizados de pruebas de bombeo. Estos datos fueron usados para calcular las propiedades de los acuíferos usando el software Aqtesolv. Los resultados del análisis se presentan en el Anexo D y están resumidos en la Tabla 7.3. Las ubicaciones de las pruebas de bombeo analizadas se indican en la Figura 13.

Tabla 7.3 Resultados del Análisis de las Pruebas de Bombeo

Pozo / Sondaje ID de CIDERH	Fecha	Profundidad (m)	Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /día)
ND-0103-1240	1969	184	6	22.5
ND-0103-1238	2001	115	3.33	2
ND-0103-1775	?	111	2.37	1.5
ND-0103-1092	2001	87.5	1	1.5
ND-0103-1940	2005	78	4 – 5.5	185
ND-0103-1938	2005	98	1.5 – 2.5	1.2
ND-0103-2038	2005	85.6	3 -3-5	6
Promedio				30

Estos datos indican que la permeabilidad del acuífero de Pica / Matilla es muy variable con valores de transmisividad calculados que van desde 1 hasta 185 m²/día. Los ensayos de bombeo no incluyen pozos de observación lo que significa que las propiedades de almacenamiento no se pueden calcular a partir de estos datos.

Generalmente los sondajes tienen bajo caudal y gran descenso de nivel, indicando muy baja permeabilidad. La mayoría de los pozos arrojaron valores bajos de transmisividad (<2 m²/día) y solo un pozo (ND-0103-1940), un valor mucho más alto de 185 m²/día. Estos datos son consistentes con las conclusiones de Galli 1962, en que existe una pequeña probabilidad de intercepción de las zonas de permeabilidad alta, debido a la posición esencialmente vertical de las fracturas. Esto también es consistente con los hallazgos de Jica 1995, que concluyó que el rendimiento potencial de las perforaciones en la zona de Pica / Matilla era considerablemente más bajo que el observado en la Pampa del Tamarugal.

Se puede concluir que el acuífero de Pica / Matilla es generalmente de bajo rendimiento con una baja permeabilidad con zonas de fracturas específicas de alta permeabilidad. Para efectos de cálculo de la velocidad del flujo del agua subterránea, se ha adoptado una transmisividad promedio de 30 m²/día. Basándose en los resultados del análisis de TEM, el espesor del acuífero superficial es del orden de 50 a 150 m, lo que equivale a una conductividad hidráulica del orden de 0,2 a 0,6 m / día.

La transmisividad elevada y el alto rendimiento de los pozos en Chintaguay y ND-0103 1940 así como las vertientes de Pica se localizan a lo largo de la misma orientación norte-sur (ver Diagrama 32). Esta línea coincide con la ubicación del basamento de poca profundidad ubicado en el sector (ver Sección 5.2.2) que indica la existencia de una zona de más alto rendimiento de orientación norte-sur en la zona de fractura a lo largo de esta línea.

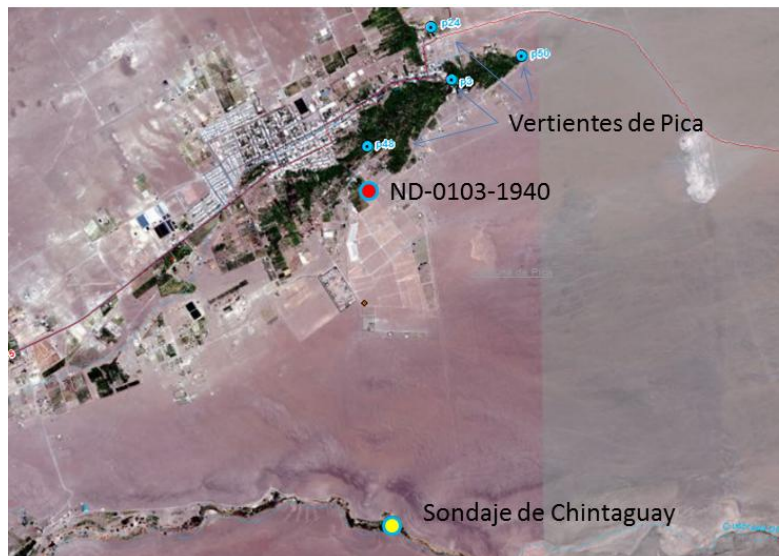


Diagrama 32 Zona de Fracturas Potenciales identificada por sondajes con alta permeabilidad, vertientes y el sondaje surgente de Chintaguay

7.7 Flujo de Aguas Subterráneas

7.7.1 Dirección y gradiente de flujo de las aguas subterránea

Un mapa de curvas del nivel de aguas subterráneas fue creado usando niveles estáticos de agua muestreados en terreno, los que se presentan en la Figura 6. Estos datos indican una dirección de flujo Oeste con un gradiente hidráulico promedio de aproximadamente 0.04.

El informe de Galli 1962 incluye un mapa de curvas del nivel de agua subterránea en el área de Pica que indica un flujo Oeste con un gradiente hidráulico de aproximadamente 0.04 entre 1380 msnm en el área de Concova y 1300 msnm en el centro de Pica. Estos

niveles, curvas y el gradiente hidráulico están de acuerdo con los datos del catastro de pozos que fue realizado como parte de este estudio (ver Sección 4.2.1 y Figura 6). Se indica que no hubo un gran cambio de situación de la hidrogeología de Pica durante los últimos 50 años. Esto es consistente con los niveles estables de aguas subterráneas observados (ver Sección 7.5)

Las curvas de nivel de las aguas subterráneas son consistentes con el mapa gravimétrico de la profundidad del basamento. Hay fuertes pendientes en el borde oriental de Pica y en el borde occidental de Matilla asociadas al basamento alto en estos sectores (baja transmisividad). La pendiente plana entre las localidades de Pica y Matilla es consistente con la cuenca identificada en esta área (mayor transmisividad). Ver Diagrama 33.

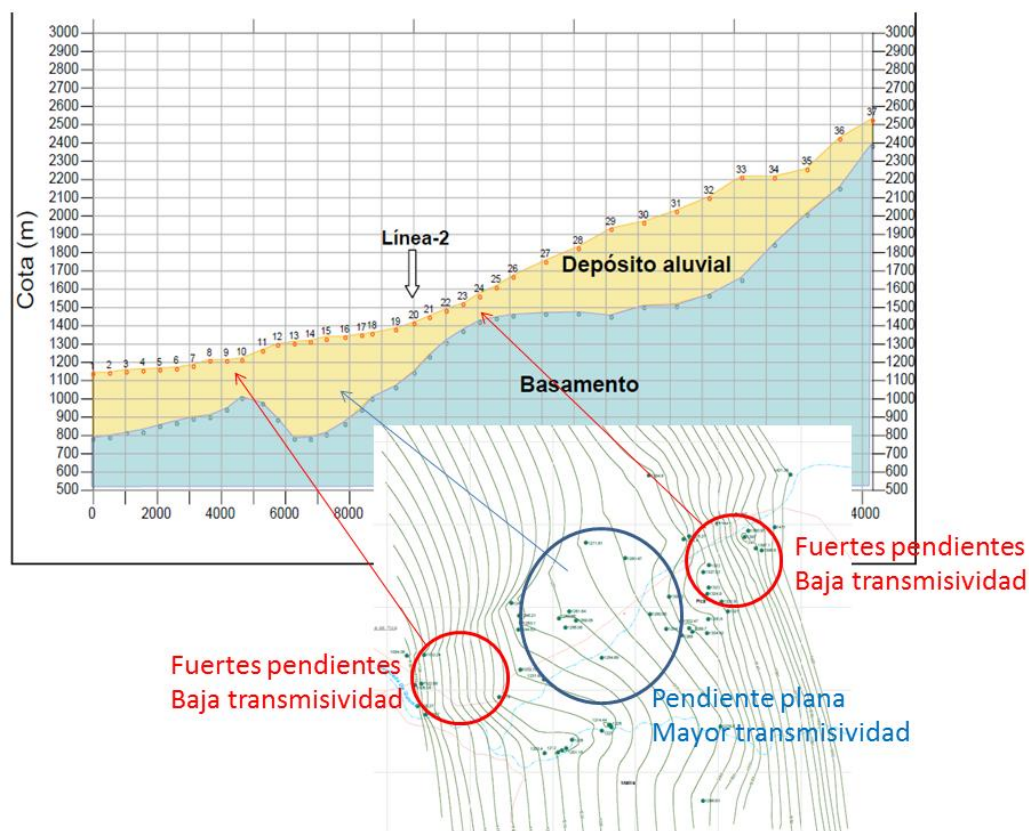


Diagrama 33 Pendientes Hidráulicas de Pica

En la zona sureste de Pica el nivel de agua subterránea y gradiente empinado es basado en TEM 1. En el área norte de Pica en Figura 6, ésta se basa en la extrapolación de software con acuerdo general con TEM 6. El extrapolación sur de Pica/ Matilla tiene un acuerdo general con TEM 5.

7.7.2 Velocidad de flujo de las aguas subterráneas

La velocidad lineal del flujo de agua subterránea se estimó usando la ley de Darcy:

$$V = K \cdot i$$

Donde V = velocidad del agua subterránea (m/día)

K = permeabilidad del acuífero (m/día)

i = gradiente hidráulico (m/m)

Los parámetros de entrada utilizados fueron los siguientes:

$K = 0,2$ a $0,6$ m/día (ver Sección 7.6).

$i = 0,04$ (ver Sección 7.7.1)

Según lo anterior, la tasa de flujo del agua subterránea estimada es de 0,008 a 0,025 m / día (aproximadamente 3 a 10 m / año). En este caso, el agua, para recorrer 25 km. desde Altos de Pica hasta Pica, demoraría aproximadamente 2500 a 8500 años. Esto es consistente con la información entregada en el reporte DGA 1998, lo que indica que las aguas subterráneas en la zona de Pica tienen una edad de entre 1000 y 10000 años. Los datos presentados en la DGA de 1998 también indican que el agua subterránea en Puquío de Núñez tiene una edad menor a 750 años. Esto es consistente con los resultados de los análisis isotópicos de la DGA de 1985, que indicaban que el agua subterránea de Puquío de Núñez fue recargada desde una altitud más baja (3000 msnm) que el agua subterránea de Pica / Matilla y, por lo tanto, tenía una trayectoria de flujo más corta.

La DGA 2004 informó que una trayectoria de flujo menor de 50 años también existe entre la zona de recarga y Pica. Esto requeriría una conductividad hidráulica del orden de 35 m / día que es de varios órdenes de magnitud más alta que la observada en los ensayos de bombeo. Como se discutió en la Sección 3.1.2, se considera que la existencia de aguas subterráneas de menor edad en algunas áreas de Pica se debe a la influencia del riego.

7.7.3 Movimiento de Aguas Subterráneas

Flujo lateral

Como se explica en las secciones anteriores, el agua de los acuíferos de la formación Altos de Pica fluye al Oeste de acuerdo con la topografía. El movimiento del agua en los acuíferos es muy lento y la velocidad es tal vez de unos pocos metros por año. El escurrimiento del agua subterránea desde Altos de Pica hasta la Pampa del Tamarugal tiene probablemente una duración de siglos o milenios. Este largo camino de flujo desde el área de recarga a Pica es consistente con el flujo estable observado en las vertientes. Debido al lento movimiento del agua, los periodos de sequía de poca duración tienen escasa influencia sobre la recarga media de la formación y, por lo tanto, sobre las vertientes artesianas de Pica (Galli 1962). Esto es consistente con la velocidad de flujo calculada en el apartado anterior.

Escurrimiento vertical

Según Galli 1962, el agua que descarga en las vertientes de Pica proviene del movimiento subterráneo a través de las rocas sedimentarias del Miembro 1. Esto no se pudo confirmar a partir de los datos disponibles. La descarga de esas aguas a la superficie se debe a un escurrimiento vertical ascendente a través de fracturas. Las fracturas pueden haberse mantenido abiertas debido a la ocurrencia de movimientos sísmicos intermitentes en la región (Galli 1962). Esto es consistente con evidencia verbal de los residentes de Pica, que observan que hay un incremento del escurrimiento en las vertientes después los terremotos o temblores.

Basándose en los resultados de la gravimetría se concluye la existencia de un basamento alto situado en la parte Este de Pica, que corresponde a la ubicación de las vertientes de Pica. Esto sugiere que la reducción del espesor de la capa sedimentaria en esta área no es compatible con el volumen del flujo, lo que ocasiona una presión del agua en el terreno. Este aumento de presión puede explicar el flujo surgente a través de las fracturas en esta zona.

El sondaje surgente de Chintaguay se ubica al Sur y en la misma orientación norte-sur con las vertientes de Pica, y es probable que la quebrada de Chintaguay intercepte la misma red de fracturas de Pica. Esto se reafirma debido a que la calidad del agua es similar en ambos lugares (ver Sección 3.1.8). El sondaje de Chintaguay se encuentra dentro de una incisión profunda (quebrada) y está a 35 m de profundidad.

Temperatura de las aguas subterráneas

El agua de riego que se infiltra en el suelo para recargar el acuífero freático, adquiere la temperatura de los sedimentos que atraviesa en su descenso. A pocos metros de profundidad la temperatura del agua puede variar entre, 14 y 17° C; valores que son aproximadamente los de la temperatura media anual del aire en el oasis de Pica. A mayor profundidad aumenta la temperatura de las rocas, con un incremento que se conoce como gradiente geotérmico. Galli 1962

Las temperaturas medidas en 1956, en el agua de los pozos Pampa Brügger y en el pozo 155, de CORFO, en Pampa Pica, tenían valores de 38° C a 300 m de profundidad, indicando un gradiente geotérmico de aproximadamente 1° C cada 15 m. Pero, las aguas subterráneas del acuífero freático en el área de Pica y Matilla tienen temperaturas que varían entre 14 y 31 C, basado en el catastro de pozos de Galli 1962, DGA 1998 y GHD 2012 (Sección 4.2.2).

Lo anterior puede explicarse considerando que el acuífero freático es recargado no sólo por la infiltración de aguas de riego de temperaturas relativamente bajas, sino que también por agua artesiana caliente que escurre a lo largo de fracturas desde gran profundidad.

El agua artesiana asciende verticalmente desde por lo menos 200 ó 300 m de profundidad, donde las rocas deben tener temperaturas aproximadas de 35 a 40° C. Probablemente, el escurrimiento vertical es muy rápido en ciertas vertientes como Resbaladero, no permitiendo que el agua adquiera la temperatura de las rocas que atraviesa y esa sería la razón por la cual se observan temperaturas tan altas.

Es muy probable que una parte del agua artesiana que asciende por las fracturas pueda escurrir lateralmente a través de las rocas sedimentarias más altas en la formación (Miembros 3 y 5). La lentitud de la percolación y el contacto prolongado con la roca reducirían la temperatura del agua subterránea. Entonces, es probable que la recarga de las aguas subterráneas de Pica sea una combinación de agua fría de riego y agua caliente que asciende verticalmente. Esto es posiblemente porque la temperatura del agua de galerías y pozos de Pica varía entre 14° y 31° C.

No es posible actualmente determinar qué proporción de la recarga total corresponde a agua fría, proveniente del agua de riego infiltrada, y qué proporción a agua artesiana caliente. Sin embargo, el aumento rápido de la temperatura del agua con la profundidad, indicaría que la parte de la recarga que proviene de agua artesiana caliente es volumétricamente más importante. Galli 1962.

Escurrimiento hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal

Como se mencionó en los informes anteriores, se infiere que la línea de falla de Longacho representa una barrera hidráulica al flujo de agua subterránea desde el acuífero de Pica al acuífero de la Pampa del Tamarugal. La razón de esto es que las rocas del basamento Jurásico de la formación Longacho (Ji1m) han sido removidas hacia el Oeste de esta línea de falla (Altos de Pica).

Sin embargo, el Informe de Galli 1962 dice *"El escurrimiento hacia el Oeste se interrumpe donde las aguas subterráneas encuentran el bloque levantado de la serranía de Longacho que, por estar constituido por rocas muy poco permeables, actúa como una barrera hidrológica. Esta barrera desvía el movimiento del agua subterránea hacia Matilla y otras áreas bajas cercanas, donde sobrepasa la serranía, semiculta por rocas de la formación Altos de Pica y en forma de cascada subterránea escurre hacia la Pampa del Tamarugal. Esta barrera impide, en parte, el escurrimiento hacia el Oeste del agua subterránea cuya recarga se produce en la parte alta de Altos de Pica, obstaculizando la recarga de los eventuales acuíferos que subyacen Pampa Esmeralda. Por este motivo, los niveles estáticos se encuentran comparativamente más bajos hacia el Oeste de la serranía."*

Galli en 1962 concluye que hay un gran volumen de agua subterránea en la formación Altos de Pica que fluye hacia los acuíferos de la Pampa del Tamarugal, que es apoyada por los análisis hidroquímicos de DGA-UCN-IRD 1999, que indican un flujo desde Altos de Pica hacia el mismo sector. Esto es significativo, ya que la mayoría de los informes desde ese momento (JICA 1995, DGA 1998, DGA 2004, Rojas 2005, Magaritz 1990) han interpretado la línea de falla como una barrera que impide el flujo significativo entre el acuífero de Pica y la Pampa del Tamarugal, mientras que los comentarios de Galli 1962 sugieren que la única barrera que desvía el flujo del agua subterránea antes de que escurra en la Pampa.

Los resultados de la prospección geofísica (Sección 5.2) son más consistentes con la conclusión de Galli 1962. Los datos de la gravimetría indican que la altura del basamento a lo largo de la línea de falla no puede impedir el flujo de las aguas subterráneas entre Pica y la Pampa del Tamarugal (consultar Sección 7.7.3). El estudio TEM (perfiles 3, 5 y

6) indicó un gradiente hidráulico desde Este a Oeste de la napa desde Matilla hacia la Pampa del Tamarugal, indicando el movimiento de las aguas subterráneas.

Los datos de gravimetría indican que existen dos sistemas principales de flujo dentro del área de estudio que descargan a la Pampa del Tamarugal; uno a través del área Pica/Matilla y el otro a través del área Puquío Núñez (ver Figura 12).

7.8 Recarga

Como se ha mencionado anteriormente, el mecanismo principal de recarga para el acuífero de Pica se cree que se produce a elevadas altitudes dentro de la red de fracturas de la formación Altos de Pica (ver Diagrama 1).

7.8.1 Estimaciones anteriores

El informe de Galli 1962 calculó recarga basada en las precipitaciones que se reciben en las áreas altas a más de 3000 msnm. Una estimación de 888 L/s fue calculada, usando una precipitación media de 200 mm para un área de 400 km² sobre 4 000 m de altura, y 100 mm para un área de 600 km² entre 3000 y 4000 m de altura, asumiendo que la recarga corresponde a 20% de la precipitación.

En cuanto a estimaciones de estudios anteriores, el informe de DGA 1998 utilizó un límite de recarga de 3.500 m de altitud, basado en un análisis isotópico para calcular un área de recarga de 223 km² (el área entre los 3.500 m y el límite oriental de la cuenca). Una precipitación media de 175 mm/año fue utilizada para esta altitud en base a isoyetas, lo que tuvo como resultado una precipitación total de 1237 L/s en la zona de recarga. La ecuación del coeficiente de escorrentía de JICA 1995 se utilizó para estimar la escorrentía de la zona de recarga (cerca de 10,6% - 132 L/s). Un nominal de 20 a 25% de la precipitación restante se consideró como la recarga (esto asume un 75 a 80% de evaporación). Esto dio como resultado el cálculo de 221 a 276 L/s de recarga (promedio aproximado de 250 L/s). Utilizando la misma metodología que la estimación anterior, la DGA 1998 calculó una recarga de 340 L/s, si el límite de recarga se fija en los 3.000 m.

Los cálculos del reporte DGA 1998 restan la escorrentía de la zona de recarga de la recarga estimada. Todos los ríos se secan en la precordillera y no descargan desde la cuenca (cuenca cerrada), por lo tanto, restando este volumen se supone que toda esta agua se pierde por evaporación.

Tabla 7.4 Estimaciones Anteriores de Recarga

Referencia	Área de Recarga	Promedio de Precipitación	Estimación de Recarga
Galli 1962	600 km ² (3000 a 4000 msnm) 400 km ² (>4000 msnm)	100 mm / año 200 mm / año	888 L/S

Referencia	Área de Recarga	Promedio de Precipitación	Estimación de Recarga
DGA 1998 (basado en Jica 1995)	160 km ² (3000 a 3500 msnm) 223 km ² (3500 a 4000 msnm)	125 mm / año 175 mm / año	340 L/s
DGA 1998	223 km ² (3000 a 3500 msnm)	175 mm / año	250 L/s

7.8.2 Estimación Actualizada

En este estudio se aplicaron dos métodos para evaluar la recarga de aguas subterráneas:

1. El primer método evaluó la recarga dentro de las áreas montañosas de recarga, usando métodos anteriores para evaluación del balance de aguas y porcentaje de lluvia como infiltración.
2. El segundo método evaluó la recarga a través del flujo entrante de aguas subterráneas hacia el sistema de flujo mapeado en las zonas de Pica-Matilla y Puquío de Núñez.

Estimaciones de recarga basadas en zonas de precipitación se consideran que tienen un gran potencial de error, sin embargo en este caso no son importantes debido al largo tiempo que toma el desplazamiento del agua subterránea desde la recarga a la descarga en el sistema de flujo regional. De ahí que las tasas (y estimaciones) de recarga en las condiciones climáticas actuales no tienen mayor influencia sobre el balance de aguas en el área local de Pica-Matilla. En esta área, el balance de aguas está determinado exclusivamente por los gradientes desde el Este de Pica hacia Pica-Matilla, y este seguirá siendo el caso a pesar de la variabilidad climática a largo plazo y la variabilidad resultante en las tasas de recarga en el área. Por lo tanto, el método 2 es considerado más confiable que la estimación de recarga del método 1.

Método 1 – Recarga por infiltración de las precipitaciones

Área de Recarga

Existen evidencia para apoyar un límite de recarga de 3.000 m dado que ésta es aproximadamente la altitud de la línea de vegetación y hay plena evidencia de agua con líneas de drenaje profundas causadas por las lluvias torrenciales que se presentan durante el Invierno Altiplánico. También, los datos de DGA 1985 indican que las aguas subterráneas de Puquío Núñez tiene su recarga a una cota inferior y cercan a los 3000 msnm.

Con base en el balance hídrico preliminar, se estima que la zona de recarga dentro de la subcuenca Quisma al este de Pica no es lo suficientemente extensa como para considerarla en las estimaciones de flujo de entrada de agua subterránea. Se considera como probable que el agua subterránea también puede fluir desde las partes altas de la

subcuenca de Chacarilla en la zona de estudio, consistente con la dirección de flujo subterráneo regional y que esto puede explicar el volumen adicional.

Esto es consistente con el informe de la DGA 1985 que postuló que una parte de las aguas subterráneas de Pica y Matilla están conectadas a la parte Sur de la cuenca de Huasco entre el Salar de Huasco y el Salar Coposa. Esto indica que algunas recargas también provienen desde la subcuenca ubicada en la zona alta de la Quebrada de Chacarilla. Por tal motivo, el cálculo del área de recarga por sobre los 3500 msnm incluye una porción de la subcuenca de la Quebrada de Chacarilla (ver Diagrama 34).

Precipitación Promedio

Las precipitaciones anuales usadas para la estimación de recarga se basan en el análisis del gradiente de precipitación presentado en la Sección 6.1.1

- 3000 – 3500 msnm = ~ 50 mm/a
- 3500 – 4000 msnm = ~ 100 mm/a
- > 4000 msnm = ~ 150 mm/a

Porcentaje de precipitación que contribuye a la recarga

No se han efectuado estudios para determinar la eficiencia con que la precipitación se convierte en recarga de los acuíferos de los Altos de Pica. Un factor importante que controla la recarga es el espaciamiento y las aberturas del sistema vertical de diaclasas del Miembro 4 observado en las áreas de afloramiento. La permeabilidad vertical de Miembro 4 probablemente es suficiente para permitir el paso del agua de recarga rápida hacia a las rocas subyacentes (Galli 1962).

Como se observa en la Sección 6.1.1, es probable que la recarga de las aguas subterráneas ocurra en áreas específicas durante cortos períodos de alta precipitación en enero y febrero. Estudios recientes de estimación de la recarga de los acuíferos de las cuencas de Coposa y Salar Michincha (Chadwick et al, 2012) demostraron que las lluvias de alta intensidad, por lo general de corta duración, producen más recarga de acuíferos que la misma cantidad de precipitaciones distribuidas de manera uniforme en un período más largo de tiempo. El estudio de Chadwick (et al) 2012 utilizó un modelo de distribución hidrológico para el cálculo de las pérdidas por evaporación, escorrentía e infiltración, utilizando datos diarios de precipitación, temperatura y evaporación. La estimación de la recarga resultante corresponde al 16% de la precipitación sobre la cuenca.

Esto es consecuente con el valor de 20% que se ha utilizado en informes anteriores. Un rango de 15 a 25 % se ha adoptado en el presente estudio.

Estimaciones Actualizadas de Recarga

Con base en los supuestos anteriores, se ha calculado una recarga de las aguas subterráneas de entre aproximadamente 410 y 685 l/s para el área del estudio, según se aprecia en Tabla 7.5. Las zonas de recarga se muestran en el Diagrama 34.

Retorno flujo de riego

Como se explica en las secciones anteriores, los datos de calidad de agua indican que las aguas subterráneas de Pica incluyen un componente de flujo de retorno de riego en exceso de aproximadamente 50% o 180 l/s (ver Sección 4.3.3).

Tabla 7.5 Estimaciones Actualizadas de Recarga

Zona	Altitud (msnm)	Área de Recarga (km ²)	Promedio de Precipitación (mm/año)	Porcentaje convertido a recargar (%)	Estimación de Recarga (L/s)
1	3000 - 3500	175	50	15	40
2	3500 - 4000	550	100	15	260
3	>4000	150	150	15	110
Total (15 %)					410 L/s
1	3000 - 3500	175	50	25	70
2	3500 - 4000	550	100	25	435
3	>4000	150	150	25	180
Total (25 %)					685 L/s

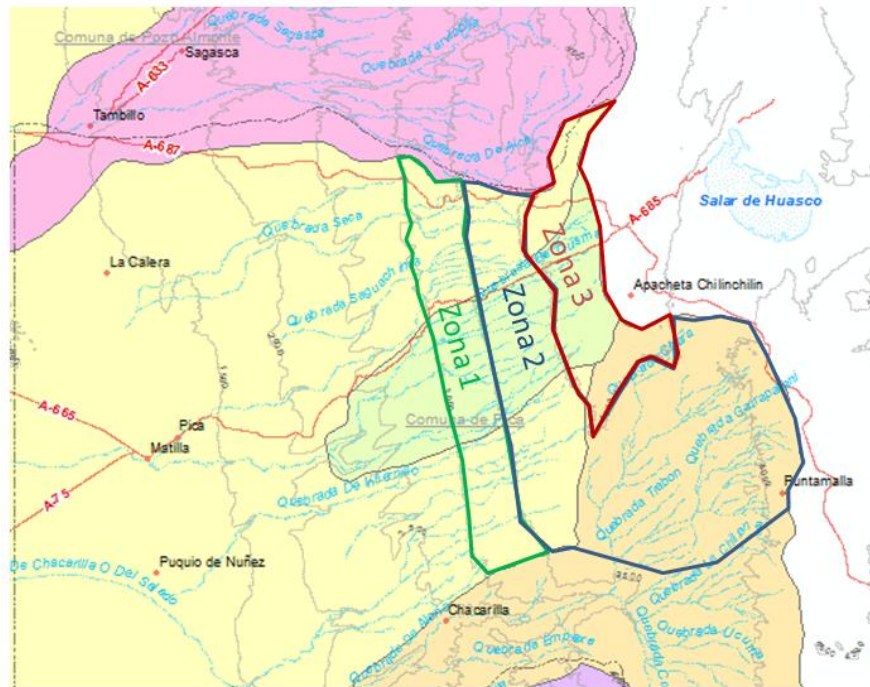


Diagrama 34 Las Zonas de Recarga

Método 2 - Flujo de aguas subterráneas

Para el extremo Este se ha estimado el flujo de aguas subterráneas hacia el sistema Pica-Matilla (mapeado en la Figura 6) y Puquío de Núñez.

Dado el significativo contraste en los gradientes a lo largo del sector de Pica (relativamente plano en la zona Norte y abrupto en la zona Sur), este análisis ha sido subdividido en dos cálculos de flujo (Ver Diagrama 35). El gradiente abrupto en la zona Sur se indica por la línea de TEM 1.

El volumen de flujo se calculó usando la ley de Darcy:

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

Donde Q = volumen de flujo ($m^3/día$)

K = permeabilidad del acuífero ($m/día$)

i = gradiente hidráulico (m/m)

A = Área de flujo

Los parámetros de entrada utilizados fueron los siguientes:

Sistema de Pica/Matilla		Sistema de Puquío de Núñez
Zona Norte	Zona Sur	
$K = 0.15 - 0.25 \text{ m/día}^*$	$K = 0.15 - 0.25 \text{ m/día}^*$	$K = 0.15 - 0.25 \text{ m/día}^*$
$i = 0.05$ (ver Figura 6)	$i = 0.1$ (ver Figura 6)	$i = 0.04$ (**)
$A = 900.000 \text{ m}^2$ (Ver diagrama 35)	$A = 900.000 \text{ m}^2$ (Ver diagrama 35)	$A_2 = 23.000.000 \text{ m}^2$ (Ver diagrama 35)
$Q = 6.750 \text{ a } 11.250 \text{ m}^3 / \text{ día}$	$Q = 13.500 \text{ a } 22.500 \text{ m}^3 / \text{ día}$	$Q = 13.800 \text{ a } 23.000 \text{ m}^3$
$Q = 80 \text{ a } 130 \text{ L/s}$	$Q = 155 \text{ a } 260 \text{ L/s}$	
	$Q = 235 \text{ a } 390 \text{ L/s}$	$Q = 160 \text{ a } 265 \text{ L/s}$
	$Q \text{ total} = 395 \text{ a } 655 \text{ L/s}$	

* $K = 0.2 \text{ m/día}$ basado en una transmisividad promedio de $30 \text{ m}^2/día$ y un espesor promedio del acuífero de 150 m . Valores $\pm 25\%$ se adaptaron para que reflejen de mejor manera la incertidumbre de estas estimaciones.

** No hay datos para esta área – se supone un gradiente basado en el gradiente regional observado en la zona Pica/ Matilla.

7.8.3 Resumen de las estimaciones de recarga

Para el área del estudio se calcularon las siguientes estimaciones de recarga utilizando los dos métodos diferentes:

- ▶ Método 1 – Recarga por infiltración de las precipitaciones ~ 410 a 685 L/s
- ▶ Método 2 - Flujo de aguas subterráneas ~ 395 a 655 L/s

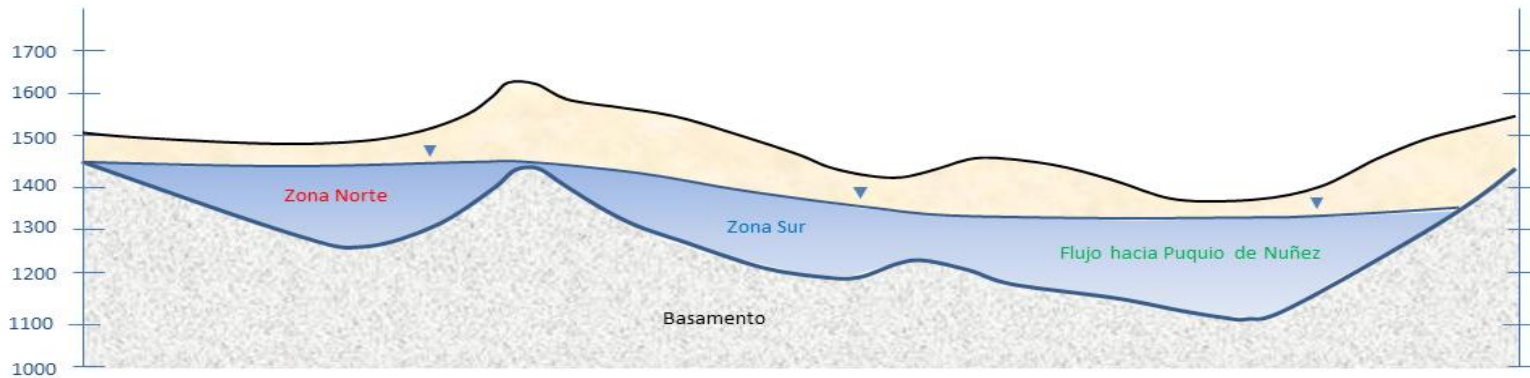
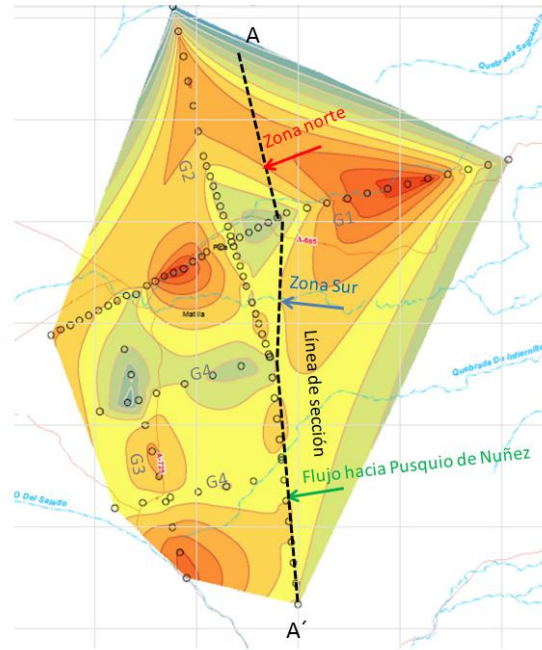


Diagrama 35 Flujo de aguas subterráneas hacia Pica / Matilla y Puquío de Nuñez

7.9 Descarga

La descarga de aguas subterráneas en el acuífero de Pica se produce por extracciones de pozos y sondajes, flujo de vertientes, evapotranspiración y a través de una sección de paso hacia la Pampa del Tamarugal. La descarga por evapotranspiración (no incluyendo áreas de riego) es probablemente muy baja porque existe poca área de vegetación autóctona (1 hectárea) en la quebrada Chintaguay (Galli 1962).

7.9.1 Estimaciones Anteriores

A continuación se resumen estimaciones previas de descarga basadas en una revisión de los informes anteriores (ver Sección 3.1).

- ▶ Galli 1962 – 145 L/s
- ▶ DGA 79 – 150 L/s
- ▶ JICA 95 – 205 L/s
- ▶ DGA 98 – 274 L/s

Todas las estimaciones incluyen 50 L/s de flujo de vertientes. La estimación más reciente de 274 L/s fue calculada usando datos del año 1995 (DGA 1998) e incluye una extracción de 72 L/s de Chintaguay (sondaje y vertiente). Basado en una entrevista con el operador durante el catastro de pozos, el caudal actual es de 33 l/s para el sondaje de Chintaguay y 10 l/s para la vertiente (caudal total = 43 l/s).

7.9.2 Estimación Actualizada

Extracciones

Como se discutió en la Sección 4.3.3, el cálculo de los volúmenes de extracción basado en derechos de agua no se considera fiable. Con el propósito de calcular un balance de agua preliminar, se considera la siguiente estimación de la demanda real (ver Sección 4.3.3).

▶ Agua Potable (SISS 2012)	11.5 L/s
▶ Aguas Servidas (SISS 2012)	10.5 L/s
▶ Riego 4957875	160 L/s
Total	~ 180 l/s

Flujo hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal

El flujo hacia el acuífero de la Pampa del fue calculado usando el método de Darcy.

Los cálculos se basan en la suposición de que el acuífero es homogéneo. Sin embargo, el acuífero se considera sumamente heterogéneo. Por lo tanto, se estima que estas estimaciones de volumen tienen un margen de error potencialmente alto y deben ser consideradas con cautela.

Los parámetros de entrada utilizados fueron los siguientes:

Sistema de Pica/Matilla	Sistema de Puquío de Núñez
$K = 0.15 - 0.25 \text{ m/día}^*$	$K = 0.15 - 0.25 \text{ m/día}^*$
$i = 0.07$ (ver Figura 6)	$i = 0.03$ (**)
$A1 = 800.000 \text{ m}^2$ (Ver diagrama 36)	$A2 = 3.200.000 \text{ m}^2$ (Ver diagrama 36)
$Q = 8.400 \text{ a } 14.000 \text{ m}^3 / \text{ día}$	$Q = 14.400 \text{ a } 24.000 \text{ m}^3$
$Q = 100 \text{ a } 160 \text{ L/s}$	$Q = 165 \text{ a } 275 \text{ L/s}$
$Q \text{ total} = 265 \text{ a } 435 \text{ L/s}$	

* $K = 0.2 \text{ m/día}$ basado en una transmisividad promedio de $30 \text{ m}^2/\text{día}$ y un espesor promedio del acuífero de 150 m . Valores +/- 25% se adaptaron para que reflejen de mejor manera la incertidumbre de estas estimaciones.

** No hay datos de pozos o sondajes suficientes en el sector de Puquío de Núñez para determinar el gradiente. Se supuso un gradiente basado en el gradiente entre líneas de TEM 2 y 8 ($1350 \text{ msnm} - 1150 \text{ msnm} / 6750 \text{ m} = 0.03$). Se considera que el gradiente relativamente bajo es apropiado debido a la hoya profunda que existe en esta área i.e. alta transmisividad.

Descarga total estimada

Basado en lo anterior, una estimación preliminar de la descarga desde el acuífero del área del estudio es de aproximadamente entre $445 \text{ a } 615 \text{ l/s}$ (180 L/s consumo por Pica / Matilla y entre $265 \text{ a } 435 \text{ L/s}$ flujo hacia la Pampa del Tamarugal), que está en el orden de la recarga estimada que sugiere un balance hídrico equilibrado para el acuífero. Esto es consistente con la estabilidad a largo plazo de los niveles de las aguas subterráneas.

7.10 Estimación del volumen del acuífero

Los rangos estimados de los volúmenes de acuíferos para las hoyas de Pica / Matilla y Puquío de Núñez se presentan en la Tabla 7.6. Estas estimaciones se basan en valores de la literatura en base a propiedades de almacenamiento, ya que no pudieron ser determinados a partir de los datos disponibles.

Se considera que estas estimaciones tienen un nivel muy alto de error potencial debido a la incertidumbre de las propiedades de almacenamiento (Specific Yield) y el espesor de las unidades hidrogeológicas dentro del perfil sedimentario. Para los fines de esta estimación, solo la porción superior del acuífero ($<200\text{m}$) ha sido considerada para representar el volumen accesible de éste.

Un rango de $0.05 \text{ a } 0.15$ se ha aplicado para el Specific Yield en base a valores de piedra arenisca presentados en ASCE 1996. Estos valores relativamente bajos son considerados apropiados en base a la permeabilidad generalmente baja del acuífero debido a la cementación de la secuencia sedimentaria (Galli 1962).

Tabla 7.6 Estimaciones del Volumen del Acuífero Accesible

Hoya	Area (m2)	Espesor promedio del Acuífero (m)	Specific Yield*	Volumen (m3)
Pica / Matilla	60.000.000	150	0,05	450.000.000
			0,15	1.350.000.000
Puquío de Nunez	100.000.000	150	0,05	750.000.000
			0,15	2.250.000.000

* Valores de piedra arenisca (ASCE 1996)

Es importante señalar que desde una perspectiva de gestión, las estimaciones de volúmenes de flujo de entrada (según la sección 7.8) son más importantes que las estimaciones del volumen del acuífero. Si los volúmenes de extracción exceden la recarga de entrada entonces el recurso se agotará.

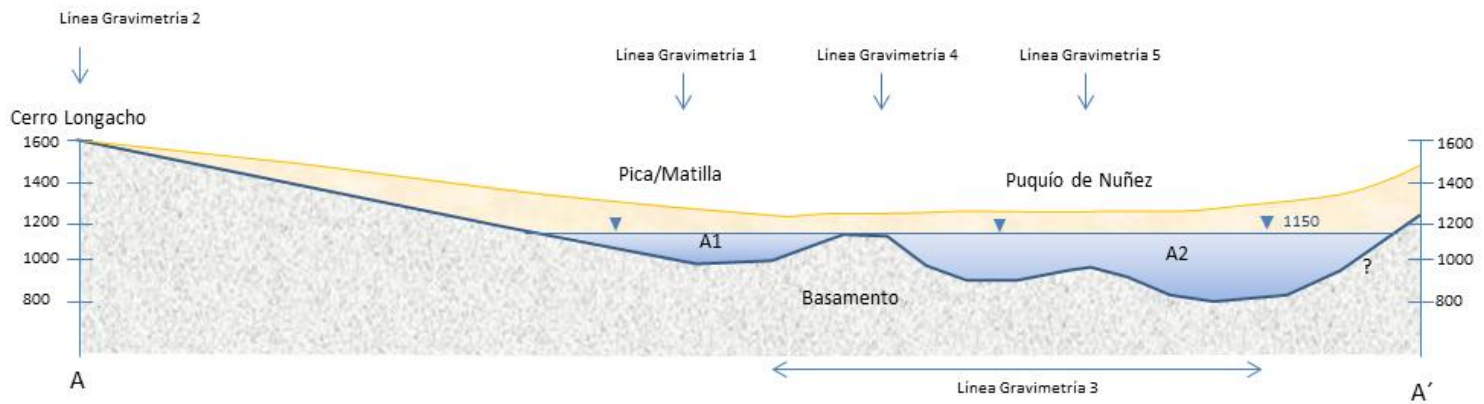
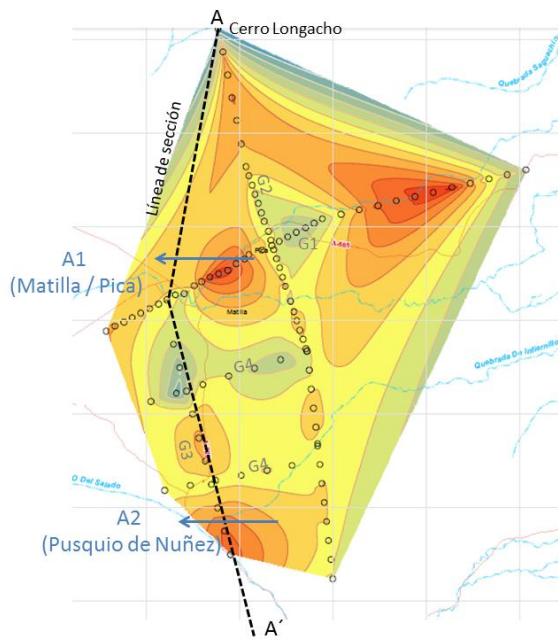


Diagrama 36 Flujo de agua subterránea hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal

8. Modelo Conceptual

El Modelo hidrogeológico conceptual proporciona un resumen detallado de la caracterización documentada en las secciones anteriores. Esto conformará la base del modelo numérico. Los Componentes del Modelo conceptual para el desarrollo de un modelo numérico se presentan en la Tabla 8.1.

Los esquemas explicativos del modelo conceptual se presentan como Figuras 15 y 16.

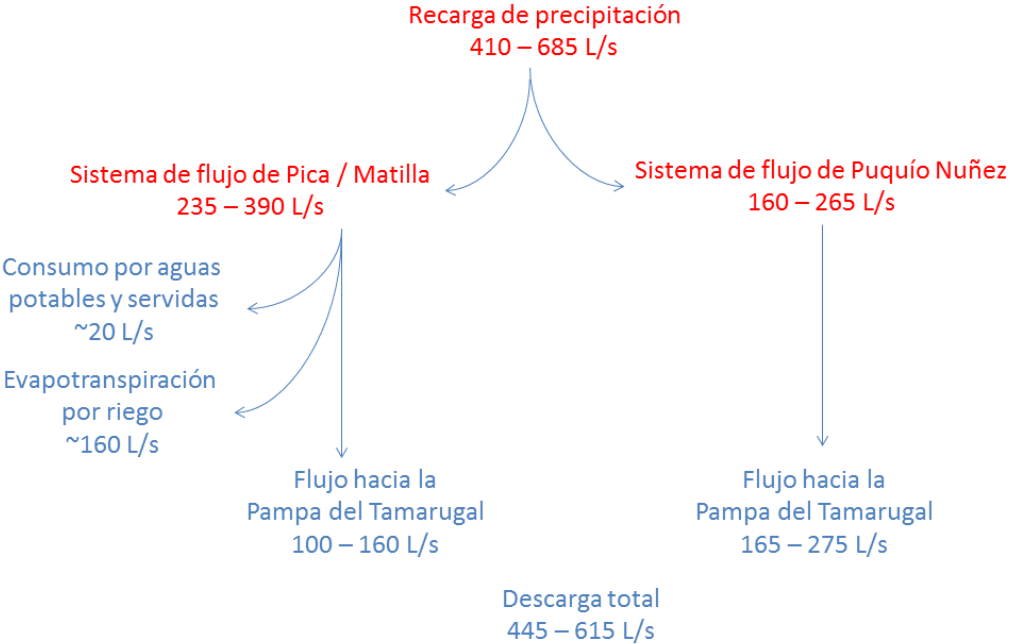
Tabla 8.1 Componentes del modelo conceptual

Componente	Descripción
Unidades Hidrogeológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Existe un sistema de acuífero que comprende un acuífero freático (no confinado) y posiblemente múltiples capas confinadas más profundas (artesianas). • El acuífero freático existe dentro del miembro 5 (M1c) del formación Altos de Pica y está compuesto por capas variables de arenas, gravas, conglomerados de gravas y arcillas. Este es el acuífero más importante del área del estudio desde que se extraen las aguas subterráneas • Existen múltiples capas de arcilla intercaladas dentro de la secuencia sedimentaria, lo que produce capas de acuífero confinado con la presión suficiente para causar condiciones artesianas. El agua subterránea con presión artésiana existe a diferentes profundidades del perfil sedimentario y la magnitud del flujo está afectada por la red de fracturas existente • Basado en el análisis TEM, es posible la existencia de una capa de arcilla a partir de una profundidad de alrededor de 100 a 200 m por debajo de la superficie. Ésta posiblemente constituye una capa confinada. • La formación Longacho representa el basamento impermeable.
Geometría de las capas hidrogeológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Basado en prospecciones de gravimetría, la cuenca sedimentaria parece tener un espesor relativamente constante de aproximadamente 200 – 300 m en dirección Norte-Sur • Existen tres cuencas de más de 400 m de espesor. <ol style="list-style-type: none"> 1. Entre Pica y Matilla 2. Este de Pica. 3. Al Sur de Puquio Núñez. • La superficie ondulante del basamento a lo largo de la línea de falla Longacho y en algunas zonas puede redirigir el flujo de las aguas subterráneas. • El espesor del acuífero freático es variable con un promedio de aproximadamente 100 a 150 m.
Niveles de agua subterránea (espacial)	<ul style="list-style-type: none"> • En el área de las localidades de Pica / Matilla la profundidad del agua subterránea en pozos no operativos (nivel estático del agua) generalmente oscila entre 15 y 30 m bajo el nivel de suelo. • La profundidad del agua subterránea aumenta (>100 m) hacia el Oeste de Matilla y al Este de

Componente	Descripción
	<p>Pica.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una dirección de flujo al Oeste con un gradiente hidráulico promedio de 0.04. • El gradiente hidráulico es más pronunciado en las zonas correspondientes a los puntos altos del basamento debido a la sección de más reducida (baja transmisividad).
Niveles de agua subterránea (temporal)	<ul style="list-style-type: none"> • Se observaron tendencias generalmente estables en el nivel de aguas subterráneas en las áreas Pica / Matilla y Puquío de Núñez durante el período monitoreado (1992 – 2011). Al parecer, la extracción de agua subterránea, si bien causa descensos localizados, no significa necesariamente un descenso generalizado del acuífero. Esto es un indicador de que las extracciones totales no exceden el volumen de agua subterránea que fluye hacia las áreas de Pica /Matilla, sin embargo, se requieren monitoreos adicionales y una red de monitoreo más amplia para confirmar esto.
Sistemas de flujo	<ul style="list-style-type: none"> • El agua de los acuíferos de la formación Altos de Pica fluye al Oeste de acuerdo con la topografía. • El área de estudio puede dividirse en dos sistemas principales de flujo de aguas subterráneas. <ol style="list-style-type: none"> 1. a través del área Pica/Matilla; y 2 a través del área Puquio Núñez. • En el área de Pica/Matilla, existe un ascenso vertical de agua artesiana desde por lo menos 200 o 300 m de profundidad con temperaturas entre 31 y 34° C. • La descarga de agua caliente en las vertientes de Pica se debe a un escurrimiento vertical ascendente a través de fracturas.

Componente	Descripción
Sistemas de flujo (continuado)	<ul style="list-style-type: none"> • De los sondajes surgentes, el más notable es el de Chintaguay, que intercepta la misma red de fracturas como las vertientes. • La existencia de un basamento alto situado en la parte Este de Pica que corresponde a la reducción del espesor de la capa sedimentaria puede explicar el flujo surgente a través de las fracturas en esta zona debido a un aumento de presión de las aguas subterráneas. • En el área de Pica/Matilla, una parte del agua artesiana que asciende por las facturas puede escurrir lateralmente a través de las rocas sedimentarias más altas en la formación (Miembros 3 y 5). • En el área de Pica/Matilla, la temperatura de las aguas subterráneas del acuífero freático varía entre 14° y 31° C debido a una combinación de recarga de agua fría de riego y agua caliente que asciende verticalmente.
Calidad de Agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> • Las vertientes de Pica y el acuífero profundo tienen un calidad de agua muy dulce con valores de CE < 500 µS/cm. • En el área de Pica/Matilla, la CE de las aguas subterráneas del acuífero freático varían generalmente entre 500 y 6000 uS/cm. Esta variabilidad es consistente con la mezcla de diferentes fuentes de agua. • La mayor parte del agua subterránea de Pica / Matilla tiene una CE menos que 2000 µS/cm • Existen áreas relativamente pequeñas de alta CE atribuible a la disolución de evaporitas yesíferas y sal común.
Propiedades de los acuíferos	<ul style="list-style-type: none"> • El acuífero de Pica / Matilla es generalmente de bajo rendimiento con una baja permeabilidad con valores de transmisividad < 2 m²/día. • Existen zonas de fracturas específicas de más alta permeabilidad entre 150 y 200 m²/día con una pequeña probabilidad de intercepción debido a la posición esencialmente vertical de las fracturas. • Basado en una transmisividad promedio de 30 m²/día y un espesor del acuífero superficial de 50 a 150 m, lo que equivale a una conductividad hidráulica del orden de 0,2 a 0.7 m / día.

Componente	Descripción
Propiedades de los acuíferos (continuado)	<ul style="list-style-type: none"> • El rendimiento del acuífero generalmente es menor que 5 L/s, y la mayor parte es menos de 1 lt/s. La única excepción es el sondaje de Chintaguay que tiene un caudal de más de 40 L/s. • Existe una zona de más alto rendimiento de orientación norte-sur en la zona de fractura entre Chintaguay y las vertientes de Pica.
Velocidad de flujo	<ul style="list-style-type: none"> • La tasa de flujo del agua subterránea estimada es del orden 0,008 a 0,025 m / día (aproximadamente 3 a 10 m / año). • En este caso el agua, para recorrer 25 km. desde Altos de Pica hasta Pica, demoraría aproximadamente 2500 a 8500 años.
Recarga	<ul style="list-style-type: none"> • El mecanismo principal de recarga para el acuífero del área de estudio se cree que se produce a elevadas altitudes dentro de la red de fracturas del Miembro 4 (M3t) de la formación Altos de Pica • La recarga de las aguas subterráneas ocurre en áreas específicas durante cortos períodos de alta precipitación en enero y febrero • Hay un límite de recarga de 3.000 m • Se utilizaron dos métodos diferentes para calcular las estimaciones de recarga: <ul style="list-style-type: none"> – Método 1 – Recarga por infiltración de las precipitaciones ~ 410 a 685 L/s – Método 2 - Flujo de aguas subterráneas ~ 395 a 655 L/s
Descarga	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda por agua potable y servida – aproximadamente 20 L/s • Consumo por riego (Evapotranspiración) – 160 L/s • Flujo hacia el acuífero del Pampa del Tamarugal entre aproximadamente 265 a 435 L/s a través de dos sistemas de flujo: <ol style="list-style-type: none"> 1. 100 a 160 L/s a través del área Pica/Matilla; y 2. 165 a 275 L/s a través del área Puquio Núñez. • Total descarga = 445 a 615 L/s

Componente	Descripción
Balance de Aguas Preliminar	<p data-bbox="653 248 1818 310">Un balance de aguas preliminar basado en las estimaciones de recarga y descarga se presenta a continuación.</p>  <p data-bbox="1152 342 1430 402">Recarga de precipitación 410 – 685 L/s</p> <p data-bbox="816 500 1178 560">Sistema de flujo de Pica / Matilla 235 – 390 L/s</p> <p data-bbox="1377 500 1755 560">Sistema de flujo de Puquío Nuñez 160 – 265 L/s</p> <p data-bbox="751 594 972 686">Consumo por aguas potables y servidas ~20 L/s</p> <p data-bbox="751 708 972 800">Evapotranspiración por riego ~160 L/s</p> <p data-bbox="993 805 1234 898">Flujo hacia la Pampa del Tamarugal 100 – 160 L/s</p> <p data-bbox="1440 805 1682 898">Flujo hacia la Pampa del Tamarugal 165 – 275 L/s</p> <p data-bbox="1247 924 1409 984">Descarga total 445 – 615 L/s</p>

Las condiciones de frontera	Este	<p data-bbox="898 1066 1879 1167">El límite Este del acuífero corresponde al límite de captación de la cuenca porque se infiere que no existe conexión hidráulica entre el acuífero de la cuenca del Salar de Huasco.</p> <p data-bbox="898 1195 1879 1333">No obstante, debido a la lentitud del flujo entre 1000 y 10.000 años, el flujo entrante al acuífero desde el área de recarga es relativamente constante en el largo plazo. Para los propósitos del modelo numérico, se propone usar un nivel constante para definir el límite Este como una fuente fija de flujo entrante.</p>
-----------------------------	------	--

Las condiciones de frontera (continuado)	Oeste	Flujo hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal a través de dos sistemas de flujo: 1. a través del área Pica/Matilla; y 2 a través del área Puquio Núñez.
	Norte - Sin Flujo	Ubicación de basamento alto definido por línea de gravimetría 2 y afloramiento de rocas Cretácicas (Ks2c y Ks1c)
	Sur – Sin Flujo	

8.1 Brechas de datos clave y ambigüedades

Las brechas de los datos clave e incertidumbres en el modelo conceptual se resumen a continuación:

- ▶ Los límites hidráulicos al norte y al sur del acuífero no están claramente definidos en la información disponible.
- ▶ El porcentaje del flujo del acuífero profundo que recarga el acuífero freático.
- ▶ La cantidad total de agua extraída para fines de riego y el porcentaje de esta agua que se pierde por evaporación o se devuelve al acuífero a través de infiltración.
- ▶ No fue posible identificar el espesor de los diferentes miembros de la formación Altos de Pica a partir de los datos estratigráficos disponibles, en particular debido a la profundidad, lo cual limita la información, generalmente menos de 100 m. Por otra parte, estos miembros contienen materiales uniformes, tales como arenas, gravas y capas de ceniza y piedra pómez.
- ▶ Una capa confinada de arcilla bajo el acuífero freático se desprende de la investigación geofísica, pero no pudo ser confirmada por los datos estratigráficos disponibles, por lo tanto, el espesor de dicha capa no se conoce.
- ▶ Las propiedades de almacenamiento del acuífero son desconocidas y sólo valores de la literatura están disponibles en este momento.
- ▶ Las estimaciones de la recarga y la descarga son muy inciertos.

9. Recomendaciones para la red de monitoreo y la gestión del acuífero

9.1 Pozos y Sondajes

Si se tiene en cuenta la extensa información de los niveles de agua disponibles en la DGA, es posible concluir que las extracciones no son las causantes de la depresión del nivel en la región.

Sin embargo el impacto potencial sobre los usuarios más próximos a los descensos localizados debe tenerse en cuenta para futuras asignaciones. Datos de pruebas de bombeo indican conos de descenso abruptos de radios de influencia limitados consistentes con la baja permeabilidad del acuífero. En la Tabla 9.1 se presentan estimaciones del radio potencial de influencia para diferentes tasas de bombeo basadas en el análisis Thies. Estas estimaciones se obtuvieron utilizando una transmisividad promedio de 30 m²/día calculada a partir de datos de pruebas de bombeo. Dichas estimaciones proporcionan una herramienta simple de apoyo de decisión que puede ser utilizada cuando se considera el impacto potencial de futuras aplicaciones sobre pozos/sondajes cercanos.

Tabla 9.1 Estimaciones de Radio de Influencia

Caudal (l/s)	Radios de Influencia Estimados (>1 m descenso)
10	900 m
7.5	750 m
5	625 m
4	550 m
3	400 m
2	300 m
1.5	200 m
1	100 m
0.5	25 m
0.25	10 m

**Basado en Theis 1935 usando una transmisividad de 30 m² /día, coeficiente de almacenamiento de 0.1 y 1000 días de bombeo.*

Cualquier sondaje profundo que intersecte un conducto o una zona de permeabilidad suficiente para producir un rendimiento apreciable (más de 10 L/s), posiblemente reduciría la presión artesiana sobre un área extensa, y si este pozo se ubicase cerca de las vertientes de Pica podría reducir el gasto de ellas (Galli 1962). Por lo tanto, si en esta zona se construyen sondajes de más de 10 L/s, se deben llevar a cabo estudios para investigar el impacto potencial en el flujo de las vertientes antes de conceder la aprobación.

9.2 Áreas de Uso Restringido

La Figura 14 proporciona un mapa de derechos de agua aprobados a partir de la base de datos de la DGA Regional con zonas de captación de caudales calculados en base a Theis. Este mapa muestra áreas de riesgo relativo a descensos excesivos e interferencia entre captaciones.

En base a la evaluación de interferencia en perforaciones llevada a cabo en este estudio, se recomienda que no se otorguen más licencias dentro de las zonas indicadas en el Figura 14. Con respecto a la zona de restricción propuesta para el Sondaje de Chintaguay, ésta es aplicable solo para sondajes profundos que interceptan la red de fracturas y no aplica a pozos menos profundos del acuífero aluvial de la Quebrada de Quisma.

9.3 Uso Neto Restringido

La estimación actual del uso neto de agua subterránea en el área de Pica/Matilla es aproximadamente 182 L/s. Para asegurar el manejo sustentable del recurso, el uso neto no debe exceder el flujo afluente estimado entre 235 y 390 L/s. Hay que señalar que estas cifras son preliminares y están sujetas a los resultados de la modelación numérica.

La actual base de datos de la DGA tiene 739 l/s de derechos de aguas aprobados, con 371 l/s considerados como volumen efectivo (ver Sección 4.3.2). La estimación preliminar del flujo afluente está entre 235 – 390 L/s. Esto indica que el acuífero está posiblemente sobre-asignado. Como medida de precaución, se recomienda que no se hagan más asignaciones en Pica / Matilla hasta que las estimaciones del balance de aguas hayan sido mayormente investigadas mediante un modelo numérico. Además, se recomienda la instalación de medidores de caudal para todas las extracciones de más de 0.5 L/s (90% del total de extracciones) de modo de obtener una mejor medición de los volúmenes reales de extracción.

9.4 Red de Monitoreo

Como se discutió en la sección 7.5, es difícil evaluar la tendencia que sigue el nivel regional de aguas subterráneas de Pica sobre la base de una red limitada de tres pozos de monitoreo. Por lo tanto, con el fin de monitorear mejor el impacto potencial de las extracciones de agua subterránea sobre los niveles de agua subterránea, se recomienda expandir la red de monitoreo de la DGA para incluir 4 nuevos sondajes de monitoreo (ver Figura 17 y Tabla 9.2) ubicados dentro de las zonas de descenso potencialmente altos identificados en la Figura 14.

En combinación con los puntos de monitoreo de la DGA existentes, los puntos adicionales prueban ser una buena cobertura de las áreas principales de extracción de Pica / Matilla.

La red permitirá una evaluación a largo plazo de las tendencias en el nivel de agua y de los posibles problemas de interferencia de pozos. La frecuencia actual de monitoreo es 3 veces al año (Marzo, Julio y Noviembre), que se considera suficiente para la evaluación de tendencias a largo plazo y fluctuaciones estacionales. Los datos en el largo plazo del nivel de agua subterránea permitirán la calibración del modelo numérico.

9.5 Perforación de los Sondajes y Pruebas de Propiedades de Acuífero

Existe incertidumbre sobre las capas litológicas de los miembros de formación Altos de Pica debido a los datos limitados disponibles a una profundidad mayor que 100 m. Por esta razón recomendamos que al menos uno de los nuevos sondajes (Sondaje 1 y/o 3) se deban perforar a más de 200 m de profundidad. La perforación deberá ser supervisada por un hidrogeólogo con experiencia y deberá efectuarse un registro detallado de la litología.

Se recomiendan las siguientes pruebas para levantar más datos de propiedades de acuífero:

- ▶ Se deben tomar muestras para análisis granulométrico y de esta manera permitir la definición unidades hidrogeológicas claves.
- ▶ *Packer Tests*; se deberán realizar cada 20 m de profundidad en él(los) sondaje(s) profundos para investigar la variabilidad vertical de permeabilidad del acuífero.
- ▶ Pruebas de bombeo se deberán realizar en al menos dos de los nuevos sondajes. Estas pruebas deberán incluir puntos de observación para permitir la estimación de las propiedades de almacenamiento del acuífero.

Tabla 9.2 Sondajes de Monitoreo Adicionales Propuestas

Punto	Coordenadas (WGS 84 UTM)	Prof.	Justificación
Sondaje 1	466447 7734893	~ 200 m	Investigar el descenso potencial dentro del área de extracción intensiva del sector este de Pica Investigar las capas litológicas
Sondaje 2	465399 7733730	~ 50 m	Investigar el descenso potencial dentro del área de extracción intensiva del sector oeste de Pica
Sondaje 3	464477 7734049	~ 200 m	Investigar el descenso potencial dentro del área de extracción intensiva nueva del sector noroeste de Pica Investigar las capas litológicas
Sondaje 4	462112 7731854	~ 50 m	Investigar el descenso potencial dentro del área de extracción intensiva de Matilla.

9.6 Modelo Numérico de Flujo de Agua Subterránea

Un modelo numérico de flujo de agua subterránea debe ser desarrollado para explorar más a fondo el balance de agua regional y local, y su incertidumbre. Este modelo también podría ser utilizado para explorar el uso de agua y escenarios de gestión y opciones para el área de Pica-Matilla. Un modelo en estado estacionario se recomienda en primera instancia. Este modelo debe ser calibrado para niveles de agua subterránea y posiblemente para temperaturas.

Se debe llevar a cabo un modelo de calibración automático y un análisis predictivo (balance hídrico) de incertidumbre utilizando un software como PEST (Doherty, 2010). Este software (y sus accesorios asociados) podría ser utilizado para evaluar el valor de la información en la reducción de la incertidumbre del modelo predictivo (balance hídrico), es decir, para perfeccionar y optimizar las recomendaciones de monitoreo de este informe.

El sistema de flujo en las áreas Pica / Matilla es más importante desde una perspectiva de manejo del recurso y debería ser el foco del modelo numérico. El objetivo principal del modelo sería investigar qué pasaría si todos usaran al máximo sus cuotas asignadas, y por lo tanto, informar las futuras condiciones de manejo. El modelo formaría una herramienta práctica para evaluar la normativa de gestión local y nuevas aplicaciones de permisos.

Las condiciones de límites propuestas para un modelo numérico localizado del sistema de flujo Pica /Matilla se indican en el Diagrama 37. La capa de basamento estará definida por los resultados de las prospecciones gravimétricas. El espesor de las diferentes capas de la secuencia sedimentaria Altos de Pica no pudo ser determinado a partir de los datos disponibles. Para los propósitos de desarrollar un modelo numérico, se proponen tres capas en primera instancia:

1. Acuífero freático (principalmente Miembro 5) – la geometría del acuífero somero puede ser estimada de manera muy general a partir de los datos TEM con la base definida por una resistividad de <10 ohm-m. El espesor promedio es aproximadamente 150 m.
2. Acuitardo arcilloso de espesor nominal para facilitar la simulación de las condiciones de confinamiento.
3. Capa profunda confinada (combinación de otros miembros de la formación Altos de Pica) con una base definida por la capa del basamento. .

Con el fin de simular los gradientes verticales observados de temperatura y niveles de aguas subterráneas, cada una de estas unidades requerirá ser simulada usando múltiples capas del modelo y las propiedades hidráulicas de cada una requerirán ser utilizadas como parámetros de calibración.

El nuevo código MODFLOW-USG podría ser usado para modelar fracturas como conductores dentro de la malla de diferencias finitas. Particularmente, esto podría ser usado para simular el movimiento vertical del agua subterránea desde una capa más profunda.

Se podrían usar datos satelitales sobre evapotranspiración de MODIS de la Nasa con el objetivo de calibrar las estimaciones de evapotranspiración para las áreas de irrigación de Pica / Matilla.

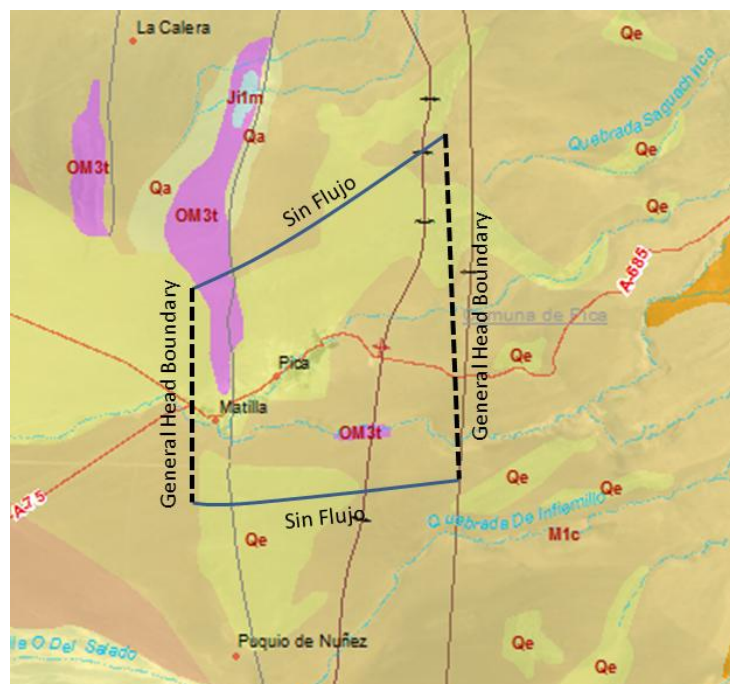


Diagrama 37 Condiciones de fronteras propuesta para un modelo numérico localizado del sistema de flujo Pica / Matilla

10. Referencias

American Society of Civil Engineers (ASCE, 1996), *Hydrology Handbook*, 2nd Edition.

O.Acosta y E.Custodio (Marzo 2008), *Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile)*, Boletín Geológico y Minero (Instituto Geológico y Minero de España), Volumen 119, p 33-50

Chadwick et al (June 2012), *Estimation of recharge by precipitation to the aquifers of Coposa and Minchincha Salar Basins*, Water in Mining 3rd International Congress on Water Management in the Mining Industry, Santiago, Chile.

DGA (2004), *Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica*, realizado por Prof. Uwe Troger y Prof Daniela Gerstner de la Technische Universität Berlin.

DGA-UCN-IRD (1999), *Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II Y III Regiones – Chile*.

DGA (2007-2009), *Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II, y III*.

DGA (1998), *Evaluación de Recursos Hídricos en el sector de Pica, Hoya de la Pampa Del Tamarugal, I Región*

DGA (1989), Mapa Hidrogeológico (de Chile)

Galli y Dingman (1962), *Carta Geológica de Chile, Cuadrángulos Pica, Alca, Matilla y Chacarilla - con un estudio sobre los recursos de agua subterránea*, Instituto de Investigaciones Geológicas.

JICA (1995), *El Estudio Sobre El Desarrollo de Las Recursos de Agua en El Parte Norte de Chile*

Magaritz et al (July-August 1990), *Source of Ground Water in the Deserts of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Ground Water from the Andes*, Ground Water, Vol 28, No. 4.

Rodrigo Rojas y Alain Dassargues (August 2006), *Groundwater flow modelling of the regional aquifer of the Pampa del Tamarugal, northern Chile*, Hydrogeology Journal (2007) 15: p 537-551

Superintendencia de Servicios Sanitarios (2012), *Estudio Tarifario Empresa de Servicios Sanitarios Aguas del Altiplano S.S. Periodo 2008-2012*.

O.Suzuki y R.Aravena (abril 1985), *Hidrología Isotópica y El Recurso Agua del Sector Esmeralda – Pica – Matilla*, Comisión Chilena de Energía Nuclear, Nucleotecnica, Volumen 4 N° 8, p 41-51.

Figuras

Anexo A

Catastro – Base de Datos

Anexo B

Informe de Geofísica

Anexo C

Datos de Estratigrafía

Anexo D

Análisis de Prueba de Bombeo

Anexo E

Cálculos de Evapotranspiración

