



INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS



PROYECTO INNOVA CORFO COD. 12BPC2-13504

**“CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ PARA LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE RECARGA ARTIFICIAL DE  
ACUÍFEROS”**

Octubre 2014







## INDICE GENERAL

|       |  |           |
|-------|--|-----------|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....   | 1         |
| 2     | OBJETIVOS.....   | 3         |
| 3     | ZONA DE ESTUDIO .....  | 4         |
| 4     | RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.....   | 5         |
| 4.1   | RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS.....   | 11        |
| 4.1.1 | <i>Generalidades.....</i>  | <i>11</i> |
| 4.1.2 | <i>Objetivos y Beneficios de la RAA.....</i>   | <i>12</i> |
| 4.1.3 | <i>Problemas frecuentes proyecto RAA.....</i>  | <i>13</i> |
| 4.1.4 | <i>Métodos y Dispositivos de Recarga Artificial.....</i>                               | <i>15</i> |
| 4.2   | ASPECTOS LEGALES E INSTITUCIONALES.....  | 16        |
| 4.2.1 | <i>Derechos de Agua.....</i>   | <i>17</i> |
| 4.2.2 | <i>Código de Aguas.....</i>  | <i>17</i> |
| 4.2.3 | <i>Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas.....</i> | <i>17</i> |
| 4.2.4 | <i>Otros Disposiciones Legales Aplicables.....</i>                                     | <i>20</i> |
| 4.3   | DISPONIBILIDAD DEL RECURSO .....   | 23        |
| 4.4   | USO DEL RECURSO EN EL VALLE .....  | 24        |
| 5     | CARACTERIZACIÓN DEL ACUIFERO RECEPTOR .....  | 27        |
| 5.1   | INFILTRACIÓN SUPERFICIAL .....   | 27        |
| 5.2   | GEOLOGÍA.....  | 28        |
| 5.3   | GEOFÍSICA.....   | 29        |
| 5.4   | MONITOREO DE NIVELES.....  | 31        |
| 6     | CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE RECARGA .....  | 32        |
| 6.1   | HIDROLOGÍA.....  | 32        |
| 6.1.1 | <i>PLUVIOMETRIA.....</i>   | <i>33</i> |
| 6.1.2 | <i>FLUVIOMETRIA.....</i>   | <i>35</i> |

|       |   |                               |
|-------|---|-------------------------------|
| 6.2   | CALIDAD DE AGUA .....   | 40                            |
| 6.2.1 | <i>Monitoreo Permanente</i> .....   | 41                            |
| 6.2.2 | <i>Monitoreo de Calidad de Agua INH</i> .....                                     | 45                            |
| 6.3   | AGUAS RESIDUALES DE ARICA.....  | 53                            |
| 7     | IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RECARGA.....                                       | 55                            |
| 8     | DISEÑO A NIVEL DE PERFIL PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL POR POZOS INYECCIÓN ..... | 56                            |
| 8.1   | DISEÑO CONSTRUCTIVO.....  | 58                            |
| 8.1.1 | <i>Cálculo espaciamento entre pozos</i> .....                                     | 60                            |
| 8.2   | EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE INYECCIÓN .....                               | 62                            |
| 8.3   | PLANTA ELEVADORA.....   | 63                            |
| 9     | CONCLUSIONES.....   | 64                            |
| 10    | ANEXOS.....   | 67                            |
| 10.1  | TOMO I .....  | 67                            |
| 10.2  | TOMO II .....   | 67                            |
| 10.3  | TOMO III .....  | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| 10.4  | ANEXO DIGITAL.....  | 67                            |





## LISTADO DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 3-1.Deslindes Cuenca río San José .....  | 5  |
| Tabla 4-1 : Características de fuentes de abastecimiento para recarga artificial.....                    | 23 |
| Tabla 4-2. Evolución superficie regada Valle de Azapa .....  | 24 |
| Tabla 4-3. Resumen de demandas de agua según usos.....   | 25 |
| Tabla 6-1: Carga de sedimentos medio anual Río San José.....   | 39 |
| Tabla 6-2 : Curva de Duración de Caudales Medios Diarios. (Caudales altos) Río San Jose en Ausipar ..... | 39 |
| Tabla 6-3 Puntos de Muestreo de Calidad de Agua y Estaciones .....                                       | 40 |
| Tabla 6-4: Lugares y fechas de muestreo.....   | 46 |
| Tabla 6-5: Parámetros de calidad de agua considerando norma para riego.....                              | 47 |
| Tabla 6-6: Parámetros de calidad de agua considerando norma para agua potable.....                       | 48 |
| Tabla 6-7: Parámetros de calidad de agua considerando norma para riego.....                              | 49 |
| Tabla 6-8: Parámetros de calidad de agua considerando norma para agua potable.....                       | 49 |
| Tabla 6-9: Calidad del agua servida de Arica y calidad del agua en sistema experimental SAT.....         | 54 |
| Tabla 7-1. Ponderaciones de capas de acuerdo al tipo de sistema de recarga.....                          | 55 |
| Tabla 7-2. Clasificación de superficies de acuerdo a tipo de recarga artificial.....                     | 56 |
| Tabla 8-1 : Características de los pozos de inyección. ....  | 58 |
| Tabla 8-2: Presupuesto para la instalación de 9 pozos para la recarga. ....                              | 62 |
| Tabla 8-3 : Resumen de Costos.....   | 63 |



## LISTADO DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 3-1. Cuenca del Valle de Azapa.....   | 4  |
| Figura 4-1 Número de Operaciones RAA en el Mundo.....  | 11 |
| Figura 4-2. Distribución Espacial de Operaciones RAA en el Mundo.....  | 12 |
| Figura 4-3 : Infiltración a través de una capa colmatante.....   | 14 |
| Figura 4-4. Metodologías de Recarga Artificial.....  | 16 |
| Figura 4-5. Uso de Recurso Hídrico en el Valle de Azapa para el año 2005.....  | 24 |
| Figura 5-1. Sección de resistividad asociada a línea 1 (longitudinal).....   | 29 |
| Figura 5-2. Sección de resistividad asociada a línea 2 (transversal).....  | 30 |
| Figura 5-3. Sección longitudinal interpretada asociada a línea 1. ....   | 30 |
| Figura 5-4. Sección transversal interpretada asociada a línea 2.....   | 31 |
| Figura 6-1 Estaciones, Pluviométricas, Fluviométrica y Calidad de Agua Valle de Azapa.....                                 | 33 |
| Figura 6.2: Precipitación promedio mensual en estaciones relevantes.....   | 34 |
| Figura 6.3: Precipitación máximos diarios promedio en estaciones relevantes.....   | 34 |
| Figura 6.4: Precipitación diaria máxima en estaciones relevantes.....  | 34 |
| Figura 6.5: Precipitación promedio en estaciones representativas para los meses de Diciembre, Enero, Febrero, y Marzo..... | 35 |
| Figura 6.6: Caudales medios diarios y máximos medios diarios, y su varianza estacional.....                                | 36 |
| Figura 6.7: Hidrogramas de crecidas peak, secundarios y promedio.....  | 37 |
| Figura 6-8 . Curva de duración de caudales medias diarios para Río San José en punto Planta de Recarga.....                | 38 |
| Figura 6-9 : Niveles de Arsénico, sector antes de Bocatoma.....  | 41 |
| Figura 6-10 Niveles de Boro, sector antes de Bocatoma.....   | 42 |
| Figura 6-11 Conductividad Eléctrica, sector antes de Bocatoma.....   | 44 |
| Figura 6-12 Evolución de niveles de pH.....  | 45 |
| Figura 6-13: Esquema de Tipos de aguas deducidas de un diagrama de Piper - Hill - Langelier.....                           | 51 |
| Figura 6-14: Caracterización del agua superficial y subterránea.....   | 51 |





|   |    |
|---|----|
| Figura 6-15: Caracterización de las aguas subterráneas obtenidas de las campañas de terreno INH en los distintos pozos..... | 52 |
| Figura 6-16: Caracterización de las aguas superficiales obtenidas de las campañas de terreno INH en la bocatoma. ....       | 53 |
| Figura 7-1. Áreas más adecuadas según tipo de recarga artificial. ....  | 56 |
| Figura 8-1 : Esquema de una perforación de inyección/extracción de agua en un acuífero sedimentario no cementado. ....      | 58 |
| Figura 8-2. Diseño constructivo del sistema de pozos.....   | 59 |
| Figura 5-3: Distribución pozos de inyección.....  | 60 |



## 1 INTRODUCCIÓN

La Recarga Artificial de Acuíferos (RAA) o Gestión de Recarga Artificial (GRA o MAR) se define como “un conjunto de técnicas que permiten, mediante una intervención programada e introducción directa o inducida de agua, incrementar el grado de seguridad y disponibilidad de los recursos hídricos de un acuífero, así como también actuar sobre su calidad ” (Custodio, 1989) .

Aun cuando las experiencias de RAA a nivel mundial datan desde fines del siglo XIX y algunos países como USA, Australia y Holanda la consideran como una actividad de primer orden (Fernández, 2006), en la actualidad en Chile su desarrollo ha sido incipiente y de principalmente de corte experimental.

La Región de Arica y Parinacota presenta un déficit hídrico estructural característico de la zona norte del país, con una disponibilidad de agua inferior a 1.000 [m<sup>3</sup>/hab/año], umbral considerado internacionalmente como altamente restrictivo para el desarrollo económico. (MOP, 2012).

El acuífero de Azapa se encuentra ubicado al Este de la ciudad de Arica, y ha alcanzado una condición de sobreexplotación que lo podría llevar al colapso en un período de 10 años, si es que no se toman medidas que disminuyan su utilización a un nivel sustentable (DGA, 2010). Dado que los recursos hídricos del acuífero de Azapa se utilizan principalmente en actividades de tipo agropecuario, agua potable y uso industrial, el impacto sobre la productividad de la región y calidad de vida de los habitantes podría verse afectada si no se evalúan alternativas que permitan disminuir el riesgo de colapso del acuífero.

En relación a lo indicado anteriormente el Instituto Nacional de Hidráulica en conjunto con la Dirección General de Aguas de Arica y Parinacota postuló al 2<sup>do</sup> Concurso de Bienes Públicos para la Competitividad de Innova Corfo el proyecto “**CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS**” para el cual se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Generar información técnica respecto a la calidad y disponibilidad del recurso hídrico factible de recargar, metodologías de recarga aplicables e identificación de potenciales zonas de infiltración
- Desarrollar un modelo hidrogeológico que permita una mejor conceptualización del acuífero en el largo plazo bajo un escenario de recarga artificial.
- Proponer un diseño a nivel de perfil de Sistema de Recarga Artificial a implementar
- Difundir el proyecto y sus resultados a las autoridades y usuarios a través de seminarios, capacitaciones implementación de una página web.

El presente informe contiene los resultados del proyecto y se divide en 9 capítulos y un conjunto de Anexos, para los cuales se realiza una breve reseña a continuación:

- Capítulo 1. Introducción
- Capítulo 2. Objetivos.  
En este capítulo se presentan el objetivo general y los objetivos específicos del estudio
- Capítulo 3. Zona de estudio  
En este capítulo se presenta la zona de interés del estudio
- Capítulo 2. Revisión y Análisis de Antecedentes.  
En este capítulo se presenta una breve descripción de los antecedentes bibliográficos recopilados, que aportan información de interés para caracterizar la zona de estudio como demanda de recursos hídricos y explotación actual del acuífero de Azapa.
- Capítulo 5. Caracterización del Acuífero del Valle de Azapa  
En este capítulo se presenta un resumen de antecedentes relacionados con el infiltración superficial, geofísica, monitoreo de niveles y geología.
- Capítulo 6. Caracterización del Agua a Recargar  
En este capítulo se presenta un resumen de antecedentes relacionados con la disponibilidad del recurso a recargar y la calidad el agua.
- Capítulo 7. Identificación de las Zonas de Recarga  
En este capítulo se presenta un resumen de los aspectos a considerados para la selección de la zona de RAA.
- Capítulo 8. Diseño a Nivel de Perfil de Planta Piloto de RAA  
En este capítulo se presenta un resumen de los aspectos a considerados para el diseño de una planta piloto de recarga mediante pozos de inyección, así como de una planta elevadora de aguas servidas.
- Capítulo 9. Conclusiones  
En este capítulo se presenta las conclusiones de los aspectos más importantes del proyecto.
- Anexos.  
Se incluyen todos los informes y documentos generados para el desarrollo del proyecto

## 2 OBJETIVOS

Desarrollar un bien público en caracterizar la Cuenca del Río San José para identificar las potenciales zonas para implementar un programa de recarga de acuífero.

- Generar información técnica respecto a la calidad y la disponibilidad del recurso hídrico disponible para recarga, metodologías de recarga e identificación de zonas de infiltración.
- Desarrollar modelo hidrogeológico que permita una mejor conceptualización del comportamiento del acuífero en el largo plazo bajo un escenario de recarga artificial.
- Proponer un diseño a nivel de perfil de planta de recarga a implementar.

### 3 ZONA DE ESTUDIO

La hoya del río San José comprende una superficie total aproximada de 3.187 [km<sup>2</sup>], ubicada aproximadamente entre los 17°30' y 19°15' de latitud sur y los 68°55' y 70°30' de longitud oeste, sus nacientes se ubican en la ladera oeste del cordón occidental de la Cordillera de los Andes a unos 110 [km] al este de la ciudad de Arica (AC Ingenieros, 2002), en la cual se identifican sus principales tributarios: el río Tignamar, Seco y Laco (Figura 3-1). En las cercanías a la ciudad de Arica se encuentran afluentes secos como las quebradas del Diablo, de Lloyllas y de Acha o Higuierillas, entre las cuales el más importante es la quebrada de Acha con 1.180 [km<sup>2</sup>], que drena más de un tercio del total de la hoya del río San José. Esta última se origina en las elevaciones de la Pampa de Oxaya, las que no superan los 3.500 [m.s.n.m.].

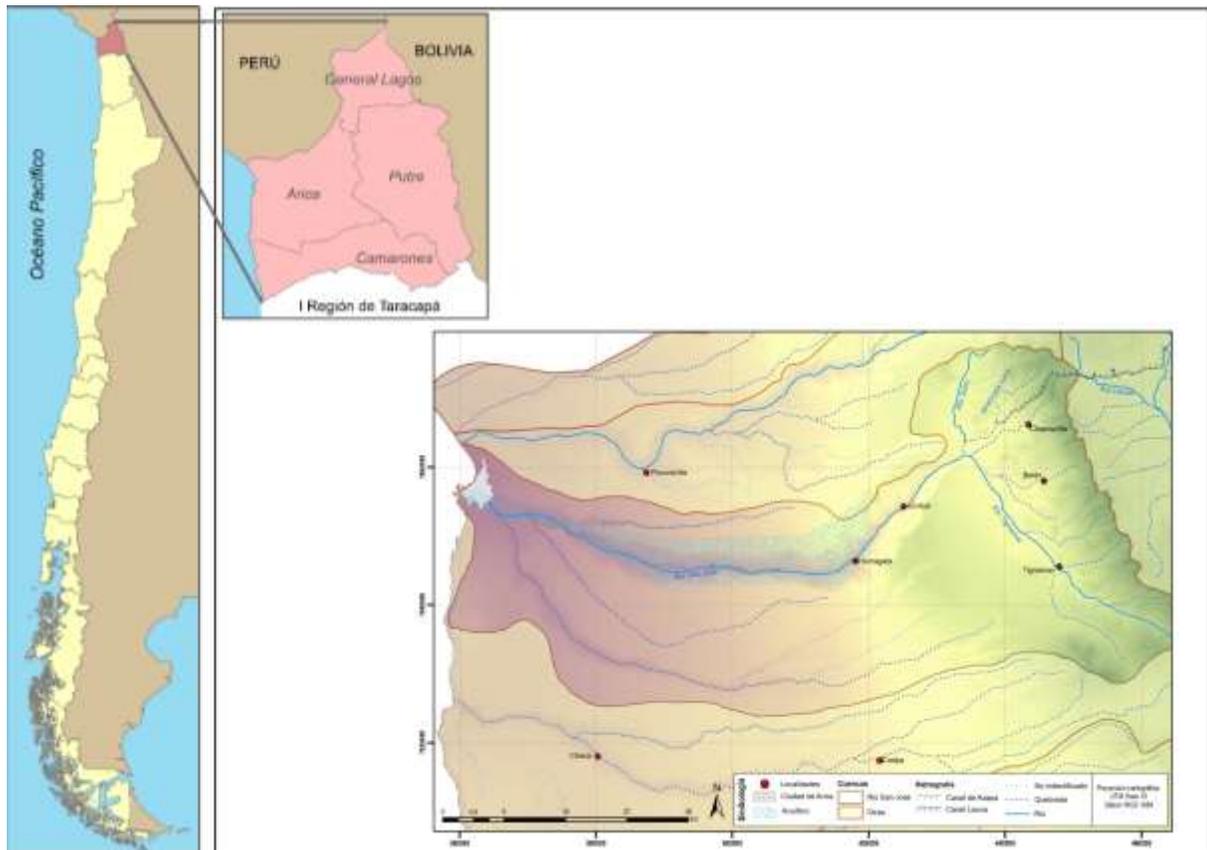


Figura 3-1. Cuenca del Valle de Azapa

Fuente: Elaboración Propia

La cuenca del río San José es la segunda (en sentido N-S) de carácter exorreico en la Región y deslinda según se señala en la siguiente tabla:

Tabla 3-1. Deslindes Cuenca río San José

Fuente: Elaboración Propia

| Orientación | Descripción                                       |
|-------------|---|
| Norte       | Cuenca del río Lluta                              |
| Sur         | Quebrada de Vitor                                 |
| Este        | Río Lauca afluente a la cuenca cerrada de Coipasa |
| Oeste       | Océano Pacífico                                   |

#### 4 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta una breve descripción de los antecedentes bibliográficos recopilados, que aportan información de interés para caracterizar la zona de estudio, el acuífero receptor, fuentes potenciales de agua para la recarga y definir los trabajos a abordar en la etapa de desarrollo del bien público.

*Ref. 1. Plan de Acción Estratégico para el Desarrollo Hídrico de la Región de Arica y Parinacota (Documento Propuesta Borrador). S.D.T. N° 306 División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas. Octubre 2010.*

El objetivo de este estudio es abordar un plan de acciones estratégicas y soluciones estructurales que permita aliviar la disponibilidad y seguridad de abastecimiento del recurso hídrico en el corto plazo, revertir el déficit en un mediano plazo y mantener la sustentabilidad en el largo tiempo, con una visión que supere lo puramente sectorial y que considere las particularidades propias de las fuentes de agua y de su aprovechamiento eficiente. En particular en este estudio se muestran antecedentes de recursos superficiales, recursos subterráneos, calidad de aguas y usos existentes en la Cuenca del Río San José.

*Ref. 2. Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras Zona I. Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. Ingenieros Consultores. S.I.T. N° 122. Dirección General de Aguas, Enero 2007.*

Este estudio actualiza la información disponible en referencia a la situación actual y futura de las demandas del recurso hídrico en el país para diferentes usos, a nivel regional, de cuencas y subcuencas. En particular, se estimaron las demandas futuras para horizontes de 10 y 25 años, identificando zonas críticas, ya sea por escasez del recurso o por uso intensivo del mismo.

*Ref. 3. Estudio sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la parte Norte de Chile. Japan International Cooperation Agency (JICA), Dirección General de Aguas, PacificConsultants International. 1995*

Este estudio pretendió entender el problema del abastecimiento de agua potable para las ciudades de Arica e Iquique. Para ello, abordó la búsqueda de nuevas fuentes hídricas en términos de cantidad, calidad y sustentabilidad ambiental. En Arica, a pesar de contar con una mejor calidad de agua, no se recomendó nuevos desarrollos en el acuífero del valle de Azapa debido al déficit existente, seleccionando finalmente el acuífero de la zona baja del valle de Lluta, básicamente por su disponibilidad, seguridad de abastecimiento, y factibilidad de implementar una desaladora.

*Ref. 4. AC. Ingenieros consultores Ltda. (2009). Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región. Ministerios de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.*

Este estudio se basa en definir estrategias para el manejo sustentable de los recursos hídricos del valle de Azapa, a través de la gestión de agua subterránea almacenada en el acuífero del valle de Azapa, usando como herramienta, un modelo de flujo subterráneo, elaborado con datos actuales.

*Ref.5 Abele Gerhard, (1981), Zonificación altitudinal morfológica e hídrica de la vertiente andina occidental en la región limítrofe Chileno-Peruano. Universidad de Maguncia, Republica General de Alemania.*

Estudio publicado el año 1981, en el que a través de un perfil altitudinal se distinguen 7 pisos morfológicos y ecológicos en el hinterland de Arica. Esta clasificación se logra través de un análisis que interrelaciona las características de las precipitaciones y la altura de las principales unidades geomorfológicas, identificando la importancia de las lluvias y humedad ambiental para la formación del relieve.

*Ref.6 AC. Ingenieros consultores Ltda. (2002). Estudios Básicos de los Recursos Hídricos Valles de Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, Primera Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección Obras Hidráulicas.*

En este estudio se plantea la necesidad de contar con una completa caracterización de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de las cuencas correspondientes a los valles de Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, todo lo cual se utilizará como base para un futuro estudio integral de los recursos hídricos de los valles señalados.

*Ref.7 Dirección General de Aguas. Informe Hídrico del Acuífero de Azapa.*

Este informe muestra el estado hídrico de las aguas subterráneas que se encuentra la región, en particular el valle de Azapa y su cuenca durante el año 2011.

*Ref.8 Carta Geológica de Chile, Cuadrángulos Arica y Poconchile (Vogel y Vila, 1980).*

Carta que grafica el levantamiento geológico (estratigrafía, estructuras, geología económica) y definen unidades formales de litología. Escala 1:100.000.

*Ref.9. Estrategias para la Gestión de Recarga Artificial de Acuíferos (GRA) en regiones Áridas y Semiáridas (UNESCO, 2005)*

El propósito de este documento es reunir experiencias sobre la aplicación de la GRA en regiones semiáridas con el fin de brindar una guía y algunos ejemplos de buenas prácticas alrededor del mundo.

*Ref. 10 Hoja Arica (García y otros, 2004).*

Realizan levantamiento geológico, definición y redefinición de unidades formales e informales. Escala 1:250.000

*Ref.11 El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile. (Revista Idesia 2008, volumen 26 N°3).*

El documento reúne antecedentes de los recursos de suelo y agua de los valles de Azapa y Lluta, sobre los cuales se proponen soluciones técnicas a las dificultades agronómicas relacionadas a la salinidad que limitan la producción de los valles.

*Ref 12. Formulación de Sistemas de Producción Limpia para los Principales Cultivos del valle de Azapa (Boletín INIA N°215, 2010).*

El documento resume, los principales protocolos de producción limpia para los cultivos más importantes del valle de Azapa, especialmente referido al manejo y control de problemas fitosanitarios y fertilización.

*Ref 13. Libro rojo de los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad en Chile.*

El texto corresponde a un extracto del simposio de Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica en Chile, del cual se extrae la identificación de los sitios prioritarios y los criterios que se utilizaron para la clasificación de los sitios.

*Ref 14. Las áreas Protegidas de Chile, Antecedentes, Institucionalidad, Estadísticas y Desafíos. (División de Recursos Naturales Renovables y Biodiversidad, Ministerio del Medio Ambiente, 2011).*

El artículo representa una síntesis de la historia, institucionalidad e información sobre las áreas protegidas de Chile. Contiene información sobre todo tipo de iniciativas de protección del patrimonio

ambiental en zonas marino-costeras y terrestres, emprendidas en la administración pública y una breve descripción de su institucionalidad.

*Ref 15. Criterios de Calidad de suelos y de aguas o efluentes tratados para el uso en Riego (División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2005).*

El estudio posee una descripción básica de los requerimientos de la calidad de agua de riego; una caracterización de los recursos hídricos, tanto de aguas naturales como intervenidas, disponibles para uso en riego.

*Ref. 16. Selección e Identificación de Masas de Agua donde es preciso plantear estudios y actuaciones de Recarga Artificial de Acuíferos (Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2010)*

El objetivo de este estudio es establecer criterios de selección para identificar masas de agua subterránea en la cuales se deberían realizar estudios de recarga artificial de acuíferos con el objetivo de aumentar la disponibilidad de aguas subterráneas, aminorar los problemas ligados a la explotación intensiva de aguas subterráneas, solucionar problemas en situaciones de sequía y favorecer el mantenimiento de ecosistemas y zonas húmedas de especial interés hídrico.

*Ref. 17. Informe del Estado del Medio Ambiente 2012 (Ministerio del Medio Ambiente (MMA), 2010) <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-52016.html>*

A través de este primer informe que elabora el Ministerio del Medio Ambiente, se da a conocer al país y a la comunidad internacional el estado del medio ambiente de Chile. El capítulo 8 de este estudio hace referencia a la situación actual del recurso hídrico a nivel país.

*Ref. 18. Gestión de la recarga de Acuíferos como práctica alternativa de Gestión Hídrica. El Proyecto DINA-MAR (Escalante, 2006)*

Documento en el cual se expone el estado de arte de la técnica de recarga artificial a nivel internacional.

*Ref. 19. Estudio Tarifario Aguas del Altiplano período 2013-2018 (SISS, 2012)*

Este documento corresponde al Estudio Tarifario Final de las concesiones de servicios sanitarios de la Empresa Aguas del Altiplano S.A. para el período 2013-2018.

*Ref. 20. Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021, Arica y Parinacota (DIRPLAN, 2012)*

El objetivo de este documento es, disponer de servicios de infraestructura pública de calidad, promoviendo el uso eficiente del recurso hídrico para mejorar la competitividad de los sectores

productivos y su integración en los mercados internacionales, de forma sustentable, mejorando la calidad de vida de sus habitantes y todo ello en un marco de preservación, conservación y desarrollo de su patrimonio natural y multicultural.

Ref. 21. Geología de los Cuadrángulos Arica y Poconchile: Región de Tarapacá, escala 1:100.000. Vogel B., Sonia; Vila G., Tomas. Año 1980. Carta Geológica de Chile n° 35. Instituto de Investigaciones Geológicas.

Realizan levantamiento geológico (estratigrafía, estructuras, geología económica) y definen unidades formales de litología. Escala 1:100.000

Ref. 22 Estudio Sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la parte Norte de Chile. Japan International Cooperation Agency (JICA). Dirección General de Aguas, Pacific consultants internacional.1995.

Informe que identifica las necesidades hídricas de la región de Arica e Iquique, identificando nuevas fuentes hídricas en términos de calidad, cantidad, sustentabilidad medio ambiental, geología del área de Arica, unidades hidrogeológicas en base a la geología e información de pozos.

Ref. 23. Hoja Arica, Región de Tarapacá, Escala 1:250.000. García G., Marcelo; Gardeweg P., Moyra; Clavero R., Jorge; Herail, Gerard. 2004.

Realizan levantamiento geológico, definición y redefinición de unidades formales e informales. Escala 1:250.000

Ref. 24 Definición de estrategias de manejo sustentable para el acuífero de Azapa, XV Región. AC Ingenieros Consultores Ltda, Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas 2009.

El aporte brindado por este informa hacía el estudio, comprende el área de geología e hidrogeología de Arica, especialmente el estudio geofísico TEM en el Valle de Azapa.

Ref. 25 Mapa Hidrogeológico de Chile Escala 1:2.500.000. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Contribución del Comité Chileno para el Programa Hidrológico, Internacional, al Mapa hidrogeológico de América del Sur. 1986.

Entrega una visión sintética de la naturaleza, existencia y ubicación del recurso hídrico subterráneo y presentar algunas de sus propiedades más relevantes

Ref. 26 Artificial Recharge - State of the Art (Brown y Signor, 1974)

Este documento presenta la situación hasta la década del 70, en materia de investigación sobre recarga artificial. Se establece la zona no saturada del acuífero como la de mayor potencial en el almacenamiento de agua y que se necesita profundizar la investigación en las propiedades del acuífero y la calidad del agua.

Ref. 27 Artificial Recharge of Groundwater: hydrogeology and engineering (Bouwer, 2002)

Presenta la mismas metodologías de recarga (lagunas de infiltración y pozos de inyección), pero presenta mayor detalle en cuanto a las variables que influyen en el proceso de recarga como la calidad del agua, la profundidad del nivel freático, agrega información sobre los fenómenos de colmatación en los pozos y lagunas de infiltración e introduce el reuso de aguas residuales.

Ref. 28 Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater health and regulatory considerations (Asano y Cotruvo, 2004)

Este documento presenta una discusión acerca del manejo de las aguas residuales y la importancia de establecer un marco regulatorio para su uso en la recarga artificial de acuíferos, en cuanto a factores como agentes patógenos, factibilidad de consumo humano, tratamiento previo, etc. Además presenta el caso del estado de California, como definición de criterios para la recarga artificial de acuíferos con aguas residuales.

Ref. 29 Infiltration Considerations for Ground-water Recharge with Waste Effluent (Houston et al., 1999)

Presenta una investigación acerca del uso de aguas residuales con énfasis en el tratamiento natural que ocurre al infiltrar este tipo de aguas en el suelo. Este tratamiento natural se relaciona con el tipo de suelo y el perfil en profundidad del mismo, y además estudia el fenómeno de colmatamiento.

Ref. 30 Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran (Ghayoumian et al., 2006)

Presenta una metodología para determinar las áreas más adecuadas para proyectar un sistema de recarga artificial de acuíferos, en base a una superposición de capas temáticas (pendiente, uso de suelo, permeabilidad, etc.) mediante operaciones lógicas discretas (boolean logic) y continuas (fuzzy logic) en un sistema de información geográfica (SIG).

Ref. 30 A quick and inexpensive method to quantify spatially variable infiltration capacity for artificial recharge ponds using photographic images (Pedretti et al., 2012)

Sostiene que la capa más superficial del suelo controla la eficiencia de los sistemas de recarga artificial, y que existe una dependencia de las propiedades hidráulicas de esta capa y de las imágenes satelitales (color) de una zona determinada, por lo que estas imágenes satelitales (DEM) pueden ser utilizadas para cuantificar la tasa de infiltración de una zona sin realizar mediciones de terreno.

Estos documentos ponen de manifiesto los factores que deben ser considerados a la hora de diseñar un sistema de recarga artificial, en cuanto al método a utilizar, la calidad del agua a utilizar y la facilidad que representan los sistemas de información geográfica para proyectar las instalaciones necesarias.

#### 4.1 RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS.

La recarga artificial de acuíferos consiste en sistemas de ingeniería donde el agua es puesta sobre o dentro del subsuelo para su infiltración y posterior movimiento hacia los acuíferos para aumentar el recurso de agua subterránea (Bouwer, 2002).

##### 4.1.1 Generalidades

Un operación de recarga artificial de acuíferos (RAA) se puede practicar, en principio, en cualquier tipo de formación permeable que tenga condiciones para almacenar y transmitir agua. La viabilidad de implementar un proyecto recarga artificial de acuíferos dependerá desde el punto de vista técnico, cuando confluyan al menos los siguientes tres factores:

- Que exista capacidad de almacenamiento
- Que exista disponibilidad hídrica
- Que exista una demanda del recurso

De acuerdo al inventario de instalaciones de Recarga Artificial que ha realizado el International Groundwater Resources Assesment Centre (IGRAC) existen 376 instalaciones en 57 países, entre los cuales destacan India, Estados Unidos, Holanda, Australia y España quienes concentran un 85% de las instalaciones en operación a nivel mundial. (Ver Figura 4-1 y Figura 4-2).

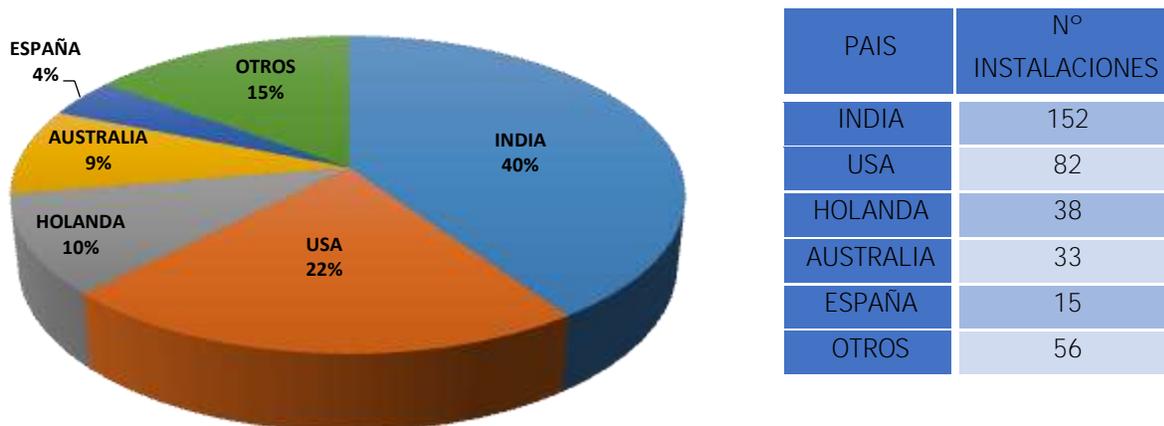


Figura 4-1 Número de Operaciones RAA en el Mundo

Fuente: IGRAC, 2013

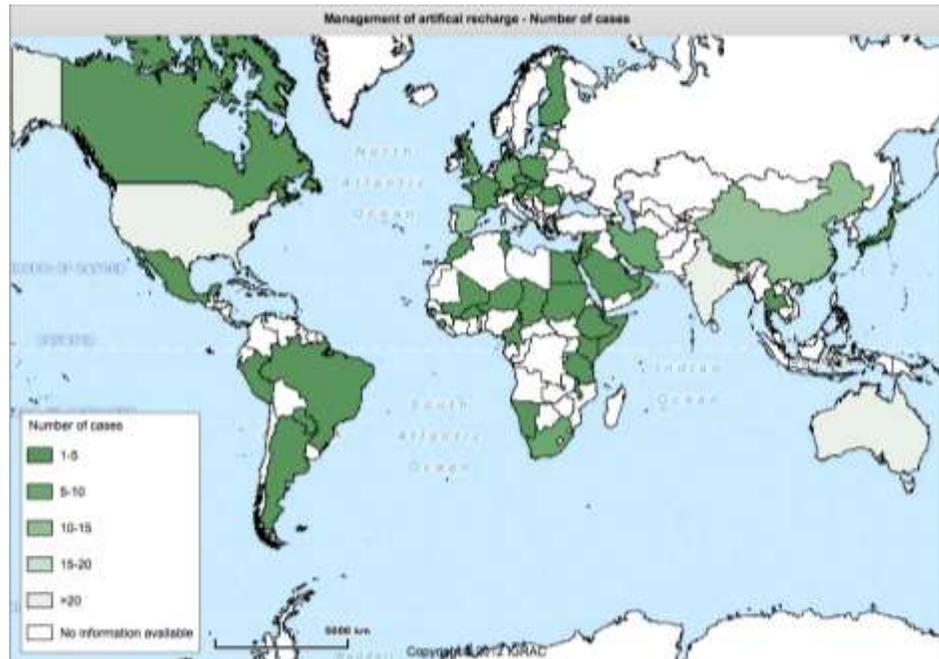


Figura 4-2. Distribución Espacial de Operaciones RAA en el Mundo

Fuente: IGRAC, 2013

#### 4.1.2 Objetivos y Beneficios de la RAA

Almacenar agua en los acuíferos, especialmente en zonas de escasa disponibilidad de terreno en superficie o sin posibilidad de otras formas de embalsamiento consiguiendo suavizar fluctuaciones en la demanda y reducir el descenso del nivel de agua por sobre-bombeo

Esto se logra al disminuir las fluctuaciones de la relación abastecimiento/demanda como parte de una estrategia de gestión integrada de los recursos hídricos hará estabilizar o aumentar los niveles de agua subterránea donde existe sobreexplotación. Además se reducen las pérdidas por evaporación, escorrentía como también se mejora y disminuyen las fluctuaciones de la calidad del agua eliminando agentes patógenos, sustancias químicas nocivas, etc. del agua durante el proceso de infiltración a través del suelo y su posterior residencia en el acuífero.

Otro beneficio de la RAA es la compensación de la pérdida de recarga natural en un acuífero por actividades antrópicas, o sirve de barrera para la intrusión salina en acuíferos costeros como es el caso del acuífero del Valle de Azapa.

Y uno de los aspectos más importantes es la mejora económica de zonas deprimidas, debido principalmente a la existencia de un nuevo recurso.

#### 4.1.3 Problemas frecuentes proyecto RAA

De las experiencias internacionales se identifican algunos problemas frecuentes en los proyectos de RAA que se deben tener en cuenta al momento de diseñar una planta de RAA, tiene relación con la conceptualización errónea de la geología y/ o hidrología del lugar, mal diseño de las estructuras de infiltración (poca estabilidad de la estructura de infiltración bajo condiciones operativas), pérdidas de agua infiltrada/ inyectada como también la mala operación o gestión del plan de recarga.

En zonas donde la carga de sedimentos es importante la colmatación o clogging es un factor a considerar dentro del diseño de una planta de recarga.

##### 4.1.3.1 Colmatación

La colmatación o clogging es producida por procesos físicos, químicos y biológicos. Físicos son principalmente la acumulación de sólidos suspendidos orgánicos e inorgánicos, pero también puede deberse al transporte de sedimento fino hasta un lugar más denso o fino del suelo donde éste forma una sub capa de colmatación. Biológicos son la acumulación de algas, bacterias y el crecimiento de microorganismo los cuales forman un biofilm. En los factores químicos se encuentran la precipitación de carbonato de calcio, yeso, fósforo u otros químicos, las cuales son inducidas por aumentos en el pH debido a la remoción de CO<sub>2</sub> por fotosíntesis. Otro factor importante es la acumulación de aire, el cual puede ser causado por diferencias de temperatura entre el agua de recarga y la del acuífero o por presiones negativas en la zona no saturada.

La temperatura también tiene un efecto en las tasas de infiltración producto de la variación en la densidad del agua. Si el sistema de recarga debe ser diseñado en base a una capacidad que se sabe con certeza, entonces se debe diseñar con las condiciones de invierno, donde la infiltración es menor. Sin embargo, la colmatación producida por la actividad biológica puede ser mayor en verano. Estos efectos son difíciles de predecir por lo que siempre la mejor alternativa es instalar plantas piloto para poder estimarlos.

La capa de colmatación generalmente es el factor dominante en la tasa de infiltración, si ésta es menor a la conductividad hidráulica del suelo, entonces la conductividad del suelo no saturado será igual a la tasa de infiltración (Ilustración 15).

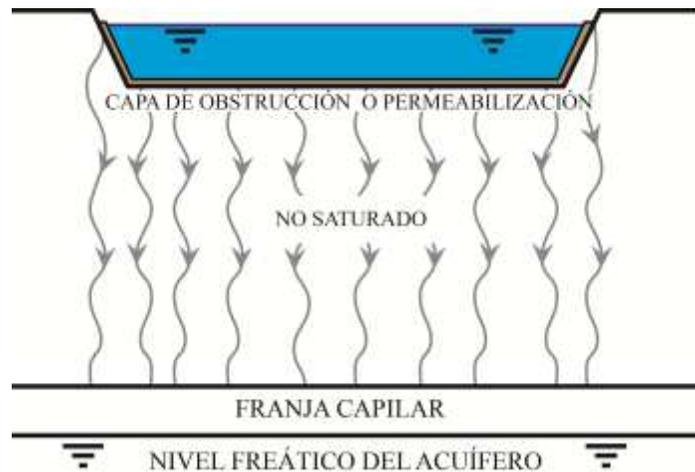


Figura 4-3 : Infiltración a través de una capa colmatante.

Fuente: Bouwer, 2002.

Para agua superficial la colmatación se evita mediante una pre-sedimentación para eliminar sólidos suspendidos, esto se logra mediante presas en el río, sedimentadores o agregando coagulantes para acelerar el proceso. Para la recarga con pozos es recomendable utilizar filtro de arena o membrana, además de reducir nutrientes y carbono orgánico para evitar actividad biológica. También es útil desinfectar con cloro y otro desinfectante para generar un efecto residual que impida la actividad biológica.

La colmatación se ve acelerada a mayores tasas de infiltración, ya que aumenta la carga de sólidos suspendidos, nutrientes y carbono orgánico. Por este motivo, aumentar la presión de inyección para aumentar el volumen recargado en pozos que han mostrado signos de colmatación en realidad acelera el proceso de colmatación, además de comprimir la capa colmatante y por ende disminuye la permeabilidad y tasa de infiltración.

En sistemas de infiltración superficial, el clogging se evita secando periódicamente la superficie de recarga, de este modo se produce un resquebrajamiento que permite recuperar las tasas de infiltración. Si aun así persisten problemas de colmatación, es posible remover mecánica o manualmente la capa colmatante.

Cuando la fuente de agua son ríos de caudales muy variables, los cuales por lo general traen alta carga de sedimentos, la mejor alternativa es almacenar el máximo de agua posible mediante una presa. De esta forma los sólidos suspendidos sedimentan y se puede extraer el agua limpia para ser colocada en la superficie de infiltración.

#### 4.1.4 Métodos y Dispositivos de Recarga Artificial

Distintas técnicas han sido aplicadas por milenios para gestionar los recursos hídricos disponibles. Las metodologías varían en complejidad, desde la simple recolección de agua de lluvia hasta la inyección de agua reciclada hacia el interior de un acuífero mediante pozos profundos.

Un tema muy importante es la probabilidad de colmatación de los sistemas de infiltración, aspecto que debe ser comprendido para que los impactos se puedan minimizar y gestionar de manera que la relación costo-beneficio sea positiva.

A continuación se muestran los métodos y dispositivos de recarga artificial, el detalle de cada uno de ellos se encuentra en el Anexo 01 - Métodos y Dispositivos de Recarga Artificial, en la Figura 4-4 se muestra un esquema con las distintas metodologías que se pueden utilizar en una operación de Recarga Artificial de Acuíferos.

- 1) Métodos de distribución
  - a) Estanque de infiltración
  - b) Tratamiento suelo acuífero (SAT)
  - c) Inundación controlada
  - d) Recarga incidental
- 2) Dispositivos de Recarga Artificial
  - a) Modificaciones en el interior del canal
    - i) Estanque de percolación
    - ii) Represa de arena
    - iii) Represa perforada
    - iv) Diques
  - b) Pozos y perforaciones
    - i) Pozo en la zona no saturada
    - ii) Pozo al acuífero
    - iii) Almacenamiento y recuperación
    - iv) Almacenamiento, transporte y recuperación
    - v) Zanja de infiltración
  - c) Infiltración inducida
    - i) Infiltración en ríos
    - ii) Infiltración inter-dunar

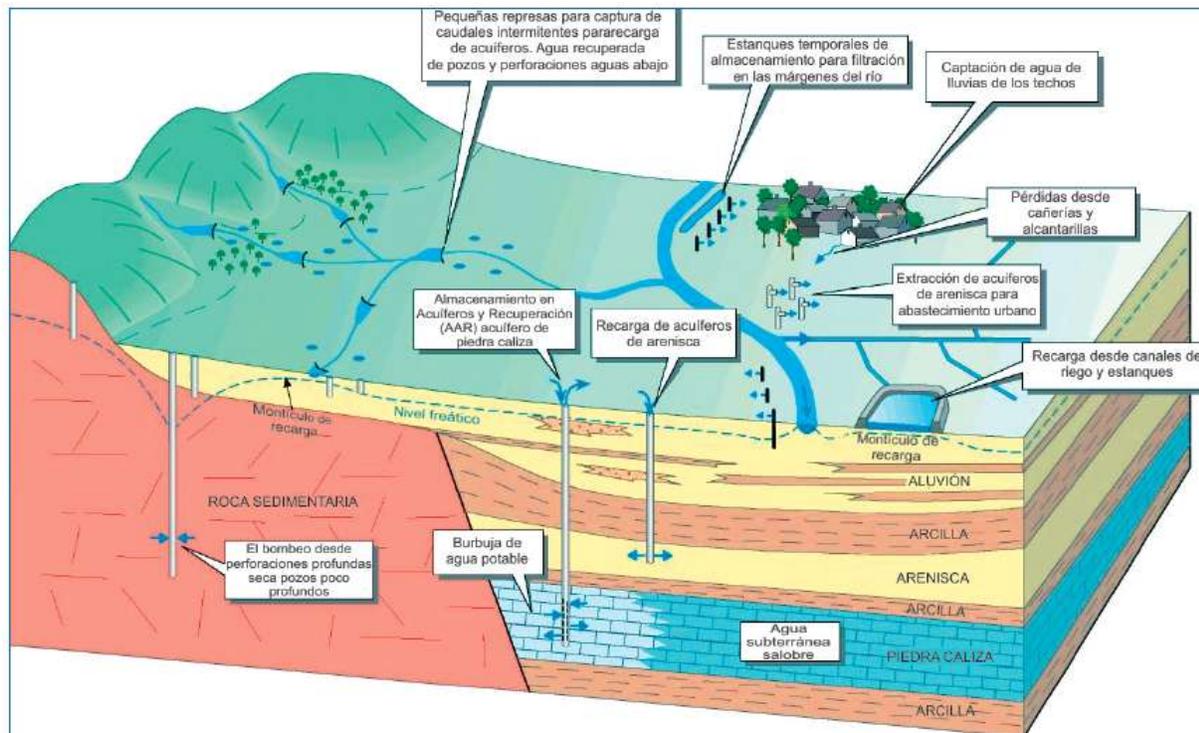


Figura 4-4. Metodologías de Recarga Artificial

Fuente: UNESCO, 2005

#### 4.2 ASPECTOS LEGALES E INSTITUCIONALES.

En Chile la Recarga Artificial de Acuíferos está regulada en el Código de Aguas en su modificación del año 2005, su Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas del año 2014.

Adicionalmente existen otras regulaciones que, aun cuando no se encuentran asociadas directamente a un programa de recarga artificial, si podrían impactar en el desarrollo de la implementación.

En el Anexo 07 - Documento Legal se adjuntan los siguientes documentos legales:

- Código de Aguas
- Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas
- Ley de Bases del Medio Ambiente

#### 4.2.1 Derechos de Agua

Actualmente la cuenca del Valle de Azapa, se encuentra con prohibición otorgamiento de cualquier nuevo derecho de aprovechamiento de agua subterránea. Esto ha sido dispuesto por la Dirección General de Aguas, dependiente del Ministerio de Obras Públicas, mediante resolución D.G.A. N°202 del 19 de marzo del 1996. En conformidad a lo dispuesto en el código de aguas artículo 122 quien entrega las atribuciones pertinentes a la DGA para realizar la planificación del desarrollo del recurso hídrico.

En dicha resolución se indica que la Dirección General de Agua puede mantener o alzar la prohibición de explotación, a petición justificada de parte, mediante la resolución correspondiente, si así lo aconsejan los resultados de nuevas investigaciones.

#### 4.2.2 Código de Aguas

El Código de Aguas en su modificación del año 2005 incorpora el concepto de recarga artificial en los Artículos 66 y 67, en éstos se hace referencia a la otorgación de derechos de aprovechamiento generados por un proyecto de recarga artificial de acuíferos.

*Art. 66. La Dirección General de Aguas podrá otorgar provisionalmente derechos de aprovechamiento en aquellas zonas que haya declarado de restricción. En dichas zonas, la citada Dirección limitará prudencialmente los nuevos derechos pudiendo incluso dejarlos sin efecto en caso de constatar perjuicios a los derechos ya constituidos.*

*Sin perjuicio de lo establecido en el inciso primero del artículo 67, y no siendo necesario que anteriormente se haya declarado área de restricción, previa autorización de la Dirección General de Aguas, cualquier persona podrá ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, teniendo por ello la preferencia para que se le constituya un derecho de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de tales obras y mientras ellas se mantengan.*

*Art. 67. Los derechos de aprovechamiento otorgados de acuerdo al artículo anterior, se podrán transformar en definitivos una vez transcurridos cinco años de ejercicio efectivo en los términos concedidos, y siempre que los titulares de derechos ya constituidos no demuestren haber sufrido daños. Lo anterior no será aplicable en el caso del inciso segundo del artículo 66, situación en la cual subsistirán los derechos provisionales mientras persista la recarga artificial.*

*La Dirección General de Aguas declarará la calidad de derechos definitivos a petición de los interesados y previa comprobación del cumplimiento de las condiciones establecidas en el inciso precedente.*

#### 4.2.3 Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas

La resolución N °203 del 20 de mayo del 2013, en su punto 8 Recarga artificial indica que:

Artículo 47. Cualquier persona podrá ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, previa autorización del proyecto por parte de la Dirección General de Aguas, en conformidad con lo dispuesto en el artículo 66 inciso segundo y artículo 67 inciso primero parte final del Código de Aguas y con lo establecido en el presente reglamento.

Artículo 48. La solicitud de autorización para ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos se tramitará conforme al procedimiento previsto en el párrafo 1º del Título I del libro Segundo del Código de Aguas, y deberá contener los siguientes antecedentes:

1.- Nombre, rol único tributario y demás antecedentes para la individualización del solicitante y de su representante legal, si corresponde.

2.- Una descripción de la naturaleza física y situación jurídica del agua a utilizar en la recarga artificial, debiendo acompañar los documentos necesarios para acreditar el dominio vigente del derecho de aprovechamiento de agua, si así correspondiere.

3.- Deberá acompañar una memoria técnica que contenga, a lo menos, lo siguiente:

- a) Descripción del proyecto de recarga artificial.
  - i. Tipo y disposición de obras.
  - ii. Plan de operación y mantención.
  - iii. Modelación del efecto de la recarga sobre la cantidad de las aguas del sector hidrogeológico de aprovechamiento común.
- b) Descripción y características geológicas e hidrogeológicas del sector de recarga, que contemple a lo menos:
  - i. Características de la zona no saturada
  - ii. Permeabilidad, almacenamiento y geometría del sector influenciado directamente por la recarga.
  - iii. Información de registros conocidos sobre el nivel del acuífero del sector
  - iv. Caracterización de la calidad de las aguas del sector de la recarga.
- c) Una caracterización de la calidad de las aguas que se infiltrarán artificialmente. Además, la Dirección General de Aguas podrá requerir al solicitante la elaboración de análisis fisicoquímicos o bacteriológicos adicionales del agua que se infiltraría, cuando las características del proyecto de recarga artificial así lo ameriten.
- d) Plan de monitoreo, que contemple al menos:
  - i. Monitoreo de la zona aledaña al emplazamiento de la obra de infiltración, con el objeto de observar el comportamiento de las aguas infiltradas, ya sea mediante la medición de niveles o no, a fin de evitar riesgos de inundaciones o afecciones a terceros.

- ii. Monitoreo de la calidad de las aguas en el sector influenciado directamente por la recarga
- iii. Monitoreo del caudal y volumen de recarga
- e) Plan de acción frente a la eventual contaminación del sector influenciado directamente por la recarga.

Artículo 49. La Dirección General de Aguas aprobará las obras de infiltración cuando el proyecto presentado cumpla con las disposiciones anteriores, no provoque la colmatación del acuífero ni la contaminación de las aguas.

Artículo 50. La solicitud de derechos de aprovechamiento de aguas de carácter provisional con cargo a la obra de recarga artificial aprobada en conformidad con los artículos anteriores, deberá ajustarse al procedimiento previsto en el párrafo 1º del Título I del Libro Segundo del Código de Aguas. Esta solicitud deberá contener los antecedentes señalados en el artículo 19<sup>1</sup> del presente reglamento.

Para hacer efectiva la preferencia establecida en el artículo 66 inciso segundo del Código de Aguas, el solicitante deberá indicar en su solicitud el hecho de contar con la aprobación de una obra de recarga de que trata el artículo anterior, identificando la resolución respectiva. Se considerará esta preferencia sólo sobre el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común influenciado directamente por la recarga.

Excepcionalmente, esta preferencia podrá considerarse en un Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común distinto al que recibe la recarga artificial siempre y cuando esté claramente interrelacionado, y el o los puntos de captación de derecho provisional se ubiquen en una zona directamente influenciada por la recarga artificial. Ambas situaciones deberán ser acreditadas por el solicitante y verificadas por la Dirección General de Aguas, en caso contrario, la petición será denegada.

La Dirección General de Aguas constituirá el derecho de aprovechamiento de carácter provisional cuando la solicitud cumpla con los siguientes requisitos:

---

<sup>1</sup> Artículo 19. La solicitud de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas se publicará y radiodifundirá conforme a lo dispuesto en el artículo 131 del Código de Aguas.

La solicitud deberá cumplir con los requisitos establecidos en el artículo 140 del Código de Aguas.

El o los puntos desde donde se desea captar el agua deberán indicarse mediante coordenadas expresadas en el sistema U.T.M., utilizando el Datum WGS84.

El o los puntos de captación se considerarán correctamente definidos para efectos de la solicitud, aun cuando exista una diferencia de hasta cien metros entre la ubicación señalada en la solicitud y la verificada en terreno por la Dirección General de Aguas.

No obstante lo anterior, la resolución que constituya el derecho de aprovechamiento deberá indicar el punto donde se captará el agua, de acuerdo con la ubicación exacta verificada en terreno por la Dirección General de Aguas, en virtud de lo establecido en el artículo 149 N° 4 del Código de Aguas.

Que sea legalmente procedente conforme a las normas establecidas en el Código de Aguas y en el presente Reglamento.

Que efectivamente exista la obra de recarga artificial aprobada a favor del solicitante y que esta se encuentre operando.

- a) Que el solicitante presente un balance hídrico que, considerando el volumen de agua infiltrado, las pérdidas existentes y los tiempos de circulación, permita definir el volumen adicional que la infiltración artificial genera en el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común donde se ubica el punto de captación del derecho de aguas solicitado.
- b) Que el ejercicio del derecho de aprovechamiento provisional que se constituya no provoque perjuicio a derechos de aprovechamiento de aguas existentes.

#### 4.2.4 Otros Disposiciones Legales Aplicables

##### 4.2.4.1 *Etapas Construcción*

El Código de Aguas en su modificación del año 2005 incorpora el concepto de modificación de cauces en los artículos 41, 171, 294, 295 y 296 que podría ser aplicable de acuerdo al diseño de obra de captación y conducción necesarios para desarrollar un proyecto de recarga artificial.

Artículo 41.- El proyecto y construcción de las modificaciones que fueren necesarias realizar en cauces naturales o artificiales, con motivo de la construcción de obras, urbanizaciones y edificaciones que puedan causar daño a la vida, salud o bienes de la población o que de alguna manera alteren el régimen de escurrimiento de las aguas, serán de responsabilidad del interesado y deberán ser aprobadas previamente por la Dirección General de Aguas de conformidad con el procedimiento establecido en el párrafo 1 del Título I del Libro Segundo del Código de Aguas.

La Dirección General de Aguas determinará mediante resolución fundada cuáles son las obras y características que se encuentran en la situación anterior.

Se entenderá por modificaciones no sólo el cambio de trazado de los cauces mismos, sino también la alteración o sustitución de cualquiera de sus obras de arte y la construcción de nuevas obras, como abovedamientos, pasos sobre o bajo nivel o cualesquiera otras de sustitución o complemento.

La operación y la mantención de las nuevas obras seguirán siendo de cargo de las personas o entidades que operaban y mantenían el sistema primitivo. Si la modificación introducida al proyecto original implica un aumento de los gastos de operación y mantención, quien la encomendó deberá pagar el mayor costo.

Art. 171. Las personas naturales o jurídicas que desearan efectuar las modificaciones a que se refiere el artículo 41 de este Código, presentarán los proyectos correspondientes a la Dirección General

de Aguas, para su aprobación previa, aplicándose a la presentación el procedimiento previsto en el párrafo 1° de este Título.

Cuando se trate de obras de regularización o defensa de cauces naturales, los proyectos respectivos deberán contar, además, con la aprobación del Departamento de Obras Fluviales del Ministerio de Obras Públicas.

Quedan exceptuados de los trámites y requisitos establecidos en los incisos precedentes, los Servicios dependientes del Ministerio de Obras Públicas, los cuales deberán remitir los proyectos de las obras a la Dirección General de Aguas, para su conocimiento, informe e inclusión en el Catastro Público de Aguas.

Art. 294. Requerirán la aprobación del Director General de Aguas, de acuerdo al procedimiento indicado en el Título I del Libro Segundo, la construcción de las siguientes obras:

- a) Los embalses de capacidad superior a cincuenta mil metros cúbicos o cuyo muro tenga más de 5m. de altura;
- b) Los acueductos que conduzcan más de dos metros cúbicos por segundo;
- c) Los acueductos que conduzcan más de medio metro cúbico por segundo, que se proyecten próximos a zonas urbanas, y cuya distancia al extremo más cercano del límite urbano sea inferior a un kilómetro y la cota de fondo sea superior a 10 metros sobre la cota de dicho límite;
- d) Los sifones y canoas que crucen cauces naturales. Quedan exceptuadas de cumplir los trámites y requisitos a que se refiere este artículo, los Servicios dependientes del Ministerio de Obras Públicas, los cuales deberán remitir los proyectos de obras a la Dirección General de Aguas, para su conocimiento, informe e inclusión en el Catastro Público de Aguas.

Art. 295. La Dirección General de Aguas otorgará la autorización una vez aprobado el proyecto definitivo y siempre que haya comprobado que la obra no afectará la seguridad de terceros ni producirá la contaminación de las aguas. Un reglamento especial fijará las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de dichas obras.

Art. 296. La Dirección General de Aguas supervisará la construcción de dichas obras, pudiendo en cualquier momento, adoptar las medidas tendientes a garantizar su fiel adaptación al proyecto autorizado. Las resoluciones que se dicten en conformidad a estas normas deberán ser fundadas y en contra de ellas procederán los recursos a que se refieren los artículos 136° y 137°, de este código, que en estos casos no suspenderán su cumplimiento.

#### 4.2.4.2 *Medio Ambiente*

Respecto de las disposiciones medio ambientales, en la Ley de Bases del Medio Ambiente no se hace mención especial a este tipo de proyectos, sin embargo en los artículos 10 y 11 se detalla la pertinencia de ingresar o no al sistema de evaluación ambiental.

#### 4.2.4.3 *Calidad del agua recargada*

El Decreto Supremo N° 46 de 2003 determina las concentraciones máximas de contaminantes permitidas en los residuos líquidos que son descargados por una fuente emisora, a través del suelo, a las zonas saturadas de los acuíferos mediante obras destinadas a infiltrarlo.

En éste decreto se detallan los límites máximos de emisión dependiendo de la vulnerabilidad del acuífero. Se destaca que si la calidad natural del agua del acuífero excede la normativa, entonces el límite máximo de descarga será igual a dicha concentración natural.

Por otro lado, respecto de la utilización del agua recargada, ésta debe cumplir con la normativa vigente según su uso. En la Norma Chilena 1333 (NCh 1333. Of 78) se establecen las concentraciones máximas de contaminantes en aguas para riego, recreación y vida acuática, mientras que en la NCh 409/1. Of 2005 se establecen los valores máximos para agua potable.

#### 4.2.4.4 *Operación de los Proyectos*

Debido a que los proyectos de recarga artificial podrían implementarse en cuencas donde los acuíferos están en áreas de restricción desde el punto de vista legal, en esos casos será necesario que se forme una Comunidad de Aguas Subterráneas a la que pertenezcan todos los posibles beneficiarios de cada proyecto. El Código de Aguas establece los requerimientos, estructura y procedimientos que deben cumplir estas comunidades.

Por otra parte, el análisis técnico con el que se desarrollan los proyectos de recarga artificial, consiste en evaluar la disponibilidad de agua superficial para infiltración a través de la modelación de balances hídricos, basados en establecer las demandas de agua en los valles y la disponibilidad para suplirlas, tanto superficial como subterránea. Sin embargo, desde el punto de vista jurídico, el requerimiento de los futuros proyectos, contar con el agua para infiltrarla, requiere disponer de los derechos que respalden las cifras de caudales previamente determinadas. Hay que recordar que los derechos de agua superficial contemplados en estos proyectos corresponden a caudales medios mensuales, de uso consuntivo y ejercicio eventual y discontinuo.

Puesto que será difícil conseguir derechos de agua superficial, las alternativas se reducen a: adquirir derechos de terceros, canales cercanos a los proyectos, o bien buscar un mecanismo que permita utilizar las aguas servidas tratadas de centros urbanos cercanos a los proyectos.

Contando legalmente con el agua para infiltrar y con el financiamiento, se analiza la pertinencia de ingresar al SEIA, lo que en general no se necesita, tal como se confirma de los análisis ambientales efectuados en estudios previos (CNR 2012).

#### 4.3 DISPONIBILIDAD DEL RECURSO

Un factor fundamental para la RAA es la disponibilidad de una fuente de agua de recarga, que tenga la calidad adecuada y en cantidad suficiente para realizar la recarga. Esto debido a la alta calidad del agua subterránea, la cual resulta del filtrado natural y del tratamiento microbiológico que sufre el agua de lluvia y el agua de los ríos mientras percola a través del suelo hacia el acuífero.

Es importante ser cuidadoso en la elección de la fuente de agua para recarga, la cual dependerá de su disponibilidad, del objetivo del sistema de infiltración, la calidad del agua del acuífero y del uso que se le dará al agua recargada.

En la Tabla 4-1 se muestran las posibles fuentes de agua y sus características de disponibilidad y calidad.

Tabla 4-1 : Características de fuentes de abastecimiento para recarga artificial  
Fuente: Elaboración propia

| Fuente                  | Disponibilidad  | Calidad  |
|-------------------------|---|--|
| Agua superficial        | Variable pero predecible en el caso de ríos. Constante en lagos | Ríos podrían contener carga importante de sólidos suspendidos (SS) o contaminantes. En lagos el agua podría ser recargada directamente |
| Escorrentía de tormenta | Incierta y espaciada temporalmente                              | En general sólo requiere remoción de sólidos suspendidos   |
| Agua residual           | Constante y predecible  | Requiere tratamiento secundario o terciario dependiendo del uso del agua recargada   |
| Agua potable            | Constante y predecible  | Calidad óptima, no requiere tratamiento  |

Se analizan las aguas superficiales y las aguas residuales como fuentes de agua a recargar. Las aguas provenientes de las escorrentías provenientes de tormentas presentan problemas la necesidad de contar con grandes espacios donde almacenar el agua para poder realizar la recarga gradualmente y por otro lado estos flujos son de gran energía por lo que transportan gran cantidad de sólidos en suspensión y por fondo, lo que colmata rápidamente las piscinas de recarga.

#### 4.4 USO DEL RECURSO EN EL VALLE

La Región de Arica y Parinacota presenta un déficit hídrico estructural característico de la zona norte del país, con una disponibilidad de agua inferior a 1.000 m<sup>3</sup>/hab/año, umbral considerado internacionalmente como altamente restrictivo para el desarrollo económico. (MOP, 2012).

En el caso particular del valle de Azapa, tal como se muestra en Figura 4-5, al año 2005 se ha identificado que 99% del usos de tipo productivo del agua superficial y subterránea se utiliza actividades de tipo agropecuario, agua potable y uso industrial (Ayala, 2007).

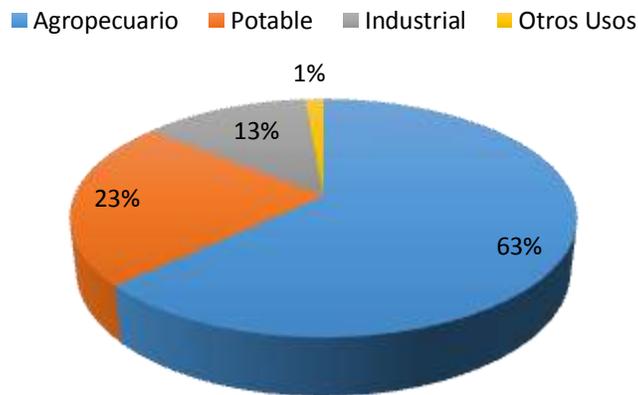


Figura 4-5. Uso de Recurso Hídrico en el Valle de Azapa para el año 2005

Fuente: DGA (2009)

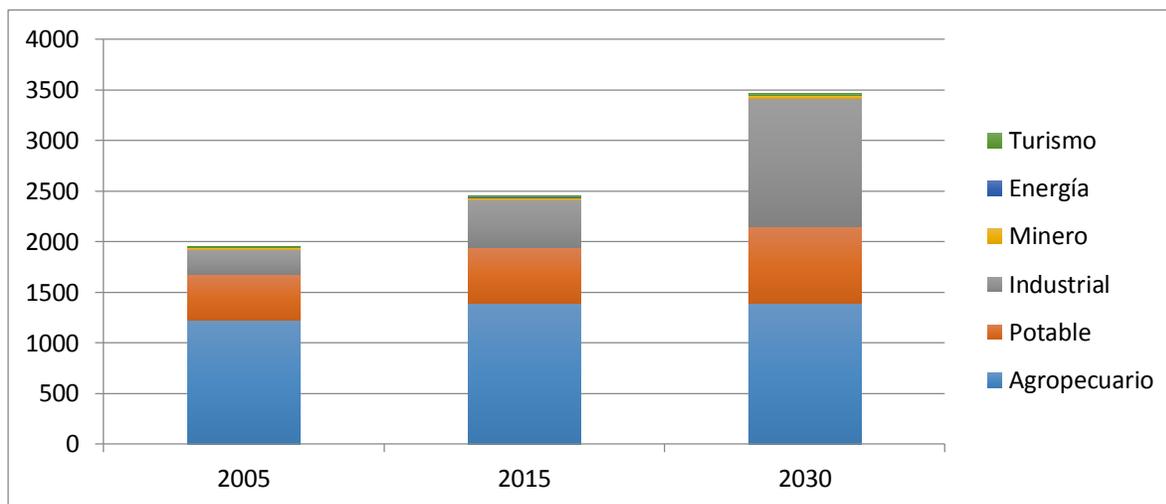
En el valle de Azapa se desarrolla una agricultura de riego intensiva, orientada hacia la producción frutícola (fundamentalmente Olivo, Mango) y hortícola (tomate, morrón, maíz híbrido, porotos). Este sector ha tenido un importante aumento en la superficie explotada lo que se observa en la Tabla que se indica a continuación:

| Año                    | 1942 | 1955  | 1965  | 1976  | 1983  | 1993  | 1996  | 2010* |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Superficie Regada (há) | 684  | 1.110 | 1.823 | 2.560 | 3.500 | 3.282 | 3.213 | 3.200 |

Tabla 4-2. Evolución superficie regada Valle de Azapa

Fuente: Torres (2008), \*DGA (2010)

Por otra parte, los escenarios futuros de demanda hídrica esperan un aumento debido a una estimación de crecimiento de superficie cultivada junto a mejoras en la eficiencia de riego, con lo cual las superficies cultivadas aumentarían en un 42% entre el escenario actual y futuro, sin embargo la demanda total aumenta en un 14% (DGA, 2009). En la Figura siguiente, además de recoger la situación del año 2005, se observan las proyecciones de consumo para los años 2015 y 2030.



| Año  | Agropecuario | Potable | Industrial | Minero | Energía | Turismo | Total |
|------|--------------|---------|------------|--------|---------|---------|-------|
| 2005 | 1228         | 447     | 247        | 17     | 6       | 4       | 2039  |
| 2015 | 1395         | 546     | 475        | 21     | 6       | 7       | 2540  |
| 2030 | 1395         | 751     | 1270       | 29     | 6       | 11      | 3552  |

Tabla 4-3. Resumen de demandas de agua según usos

Fuente: DGA 2009.

De acuerdo a los antecedentes del estudio "DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANEJO SUSTENTABLE PARA EL ACUÍFERO DE AZAPA, XV REGIÓN", realizado por la DGA durante el año 2009, el acuífero del valle de Azapa ha alcanzado una condición de sobreexplotación que lo podría llevar al

colapso en un período de 10 años, si es que no se toman medidas que disminuyan su explotación a un nivel de sustentable.

Lo anteriormente indicado se fundamenta en que la recarga media de largo plazo de 750 l/s, posee una marcada asimetría interanual dada por su principal componente, la infiltración de crecidas con período de retorno superior a 5 años. Confrontada a una demanda efectiva hipotética de 1.000 l/s, estimada a partir de los 3.540 l/s de derechos otorgados sobre el acuífero por medio de las distintas vías legales. En estas condiciones, la demanda es satisfecha por la recarga una vez cada 5 años, provocando que el 80 % del tiempo se satisfaga en parte con almacenamiento del acuífero (DGA, 2010).

Ahora bien, en términos de largo plazo, el almacenamiento del acuífero (350 MM de m<sup>3</sup>), tendría un volumen útil menor debido a condicionantes de calidad de agua y profundidad de la napa, y no superaría los 100 MM m<sup>3</sup>, dando un margen de regulación de aproximadamente 10 años para suplementar el déficit anual promedio (DGA, 2010).

El sector bajo del acuífero del valle de Azapa representado por el pozo las Vargas ubicado en el kilómetro 6 , es uno de los sectores más críticos dentro del valle debido a sus bajos niveles estáticos.

Desde 1985 en adelante ha presentado niveles cercanos a los 50 m, no obstante, entre el 2001-2002 debido a la crecida del río San José aumentó su llenado llegando a los 16 m. Actualmente el pozo se encuentra con niveles estáticos del alrededor de 49 metros a Julio del 2012, según los datos registrados por la DGA.

En el caso del sector las Riveras de Madrid, ha disminuido y aumentado su llenado, mostrando sus niveles críticos en el año 1998, actualmente se encuentra seco, según el último registro recibido por la DGA en Julio del 2012.

En el sector medio-alto del valle de Azapa, el acuífero a la altura de la noria de Pascual Rocco), presenta niveles estáticos superiores a 10 m, en el año 2001-2002 debido al aumento de caudal del río San José la noria presentó niveles altos alcanzando 4 m aproximadamente de altura, desde esa fecha en adelante se han mantenido bajos, encontrándose actualmente en estado crítico, presentando niveles superiores a los 20 m, según los datos registrados hasta Julio del 2012 por la DGA.

El sector alto del acuífero es representado por el pozo escuela Chitita (Figura 6-5), el cual no presenta grandes variaciones manteniéndose constante entre los 18-19 metros según la información obtenida desde 1985 en adelante, las únicas variaciones que presenta al igual que los otros pozos

representativos del valle son en los períodos 2000-2001 donde sus niveles más altos alcanzaron los 9 m. Actualmente el pozo según los registros obtenidos hasta Julio del 2012 por la DGA el pozo presenta niveles entre los 14-18 metros.

## 5 CARACTERIZACIÓN DEL ACUIFERO RECEPTOR

El éxito de un proyecto de recarga artificial depende en gran medida de las condiciones hidrogeológicas locales. Éstas determinan la capacidad del agua de recarga para percolarse a través de la zona no saturada y la capacidad del acuífero para almacenar.

Las condiciones hidrogeológicas en la superficie y en la zona no saturada son muy importantes en proyectos que usan técnicas de distribución, ya que, el agua debe moverse hacia abajo a través de estas zonas antes de alcanzar el acuífero. La tasa de infiltración depende de la permeabilidad vertical del suelo y de la zona no saturada. Una vez que el agua de recarga alcanza el nivel freático, la cantidad de agua que el acuífero puede almacenar depende de las características hidráulicas (transmisibilidad, capacidad de almacenamiento, coeficiente de almacenamiento o porosidad efectiva) su espesor y contenido de aire.

El detalle de la caracterización del acuífero receptor se encuentra en el Anexo 00 - Diagnostico y Caracterización Acuífero Receptor.

### 5.1 Infiltración superficial

Se logró determinar la conductividad hidráulica (Anexo 05 - Mediciones de Permeabilidad Superficial) de las terrazas fluviales adyacentes al lecho del río. La evolución de la infiltración en el tiempo se mostró acorde a lo que dice la teoría.

La elección de la alternativa fue la correcta debido a su simplicidad de implementar en terreno, sin embargo se recomienda utilizar la configuración de anillos de 15 y 30 [cm] de diámetro si el objetivo es estimar la infiltración para recarga artificial. Sin bien con anillos de mayor diámetro el resultado es más preciso al disminuir el porcentaje de agua que se infiltra lateralmente, éste aumento en la precisión pierde sentido al no considerar la colmatación. Por otro lado el aumento en el requerimiento de agua es considerable y cobra especial cuidado cuando no se tiene una fuente de abastecimiento cercana.

La tasa de infiltración última promedio en los 4 sitios restantes fue de 3,18 [m/d]. Se debe tener en cuenta que dicha tasa no representa la conductividad hidráulica de largo plazo esperada en un sistema de infiltración superficial. Esto se debe principalmente a que no se considera el fenómeno de la colmatación y además la infiltración horizontal no es del todo reducida.

Se consideró que un 15% de la conductividad obtenida en terreno sería representativa (Hofkes & Visscher, 1986), obteniéndose una tasa de infiltración para el largo plazo de 0,48 [m/d].

## 5.2 Geología

La geología que enmarca al valle del río San José de Azapa presenta rocas desde edad Proterozoica hasta actual.

El relleno del valle está formado por diferentes unidades sedimentarias no consolidadas actuales, las cuales conforman el acuífero del valle de Azapa, siendo las más importantes los depósitos de terrazas fluviales. No existen estructuras mayores que atraviesen el valle por lo cual no habría una discontinuidad geológica que afectara el flujo de agua subterránea.

La zona con mayor potencial acuífero es el área desde Cabuza (Km 25) hasta la desembocadura en Arica costa. Aguas arriba de Cabuza se considera con poco potencial acuífero, porque el valle se va cerrando hacia el este.

El acuífero es poroso, compuesto por gravas, arenas y lodo (limo y arcillas). Desde Alto Ramírez a Arica Costa se observa mayor cantidad de capas de lodo intercaladas en los sedimentos más gruesos. En Pago de Gómez también hay intercalación de lodos, pero en menor proporción. Desde Las Maitas hacia arriba del valle se ve que tienen buen desarrollo las capas más permeables.

El flujo en el acuífero es de oeste a este con alto gradiente. Los niveles bajo el terreno se pueden encontrar desde los 10 hasta 60m b.n.t. en las zonas con mayor concentración de captaciones (Saucache a Pago de Gómez).

El acuífero presenta valores de permeabilidad esperables para un depósito fluvial, del orden de  $10^{-2}$ . Y valores de porosidad efectiva de drenaje típica para estos depósitos, siendo de más alto valor las zonas centrales del valle y de menor valor los límites norte y sur del valle.

Dentro de las características geológicas que son necesarias conocer para indicar la mejor zona de infiltración, la capacidad de almacenamiento (dimensiones del acuífero) y las características del medio permeable (textura, permeabilidad) se conocen por los pozos profundos del área.

Como primera aproximación, se propone localizar la zona de eventual infiltración entre las zonas de Cabuza (Km 25) y Las Ánimas (Km 11), por tener grandes dimensiones el acuífero, buena potencia de capas permeables y menos intercalación de lodos.

Se recomienda concentrar la campaña de terreno exploratoria en el sector medio-inferior del valle, desde Cabuza hasta Arica costa, por las razones a las cuales ya se ha hecho referencia, las dimensiones del acuífero disminuyen desde Cabuza hacia el este.

Como resultado de la visita exploratoria se debería acotar más el área entre Cabuza y Pago de Gómez para indicar el lugar idóneo para infiltración.

### 5.3 Geofísica

El estudio geofísico (Anexo 03 - Estudio Geofísico) fue capaz de distinguir con claridad los sedimentos fluviales formados por estratos permeables. Las resistividades obtenidas hasta una profundidad de 400 [m] fueron coherentes distinguiendo el basamento de los medios más permeables. Sin embargo, en el sector de Cabuza no se logró distinguir el basamento por medio de los sondeos TEM, por lo que en esa zona existiría una potencial zona de explotación en profundidad. Además esta zona está cubierta por un estrato de material fino (según las resistividades obtenidas), lo que podría corresponder a una lente de arcilla. Sin embargo deberían considerarse realizar nuevas pruebas de bombeo en ese sector para caracterizar con seguridad aquella capa de material fino.

Se utilizó las secciones 2D obtenidas para asociar los valores de resistividad detectados a distintas capas de roca, sedimentos secos y sedimentos saturados. De esta forma se obtienen los perfiles interpretados que representan la geometría del acuífero, los que deben ser calibrados por medio de la litología de las captaciones (pozos y/o norias) presentes en el sector de estudio.

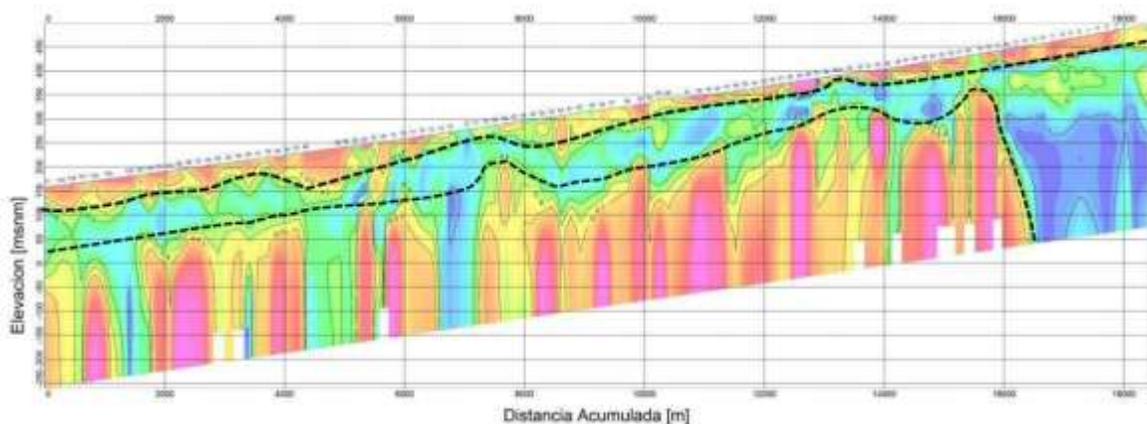


Figura 5-1. Sección de resistividad asociada a línea 1 (longitudinal).

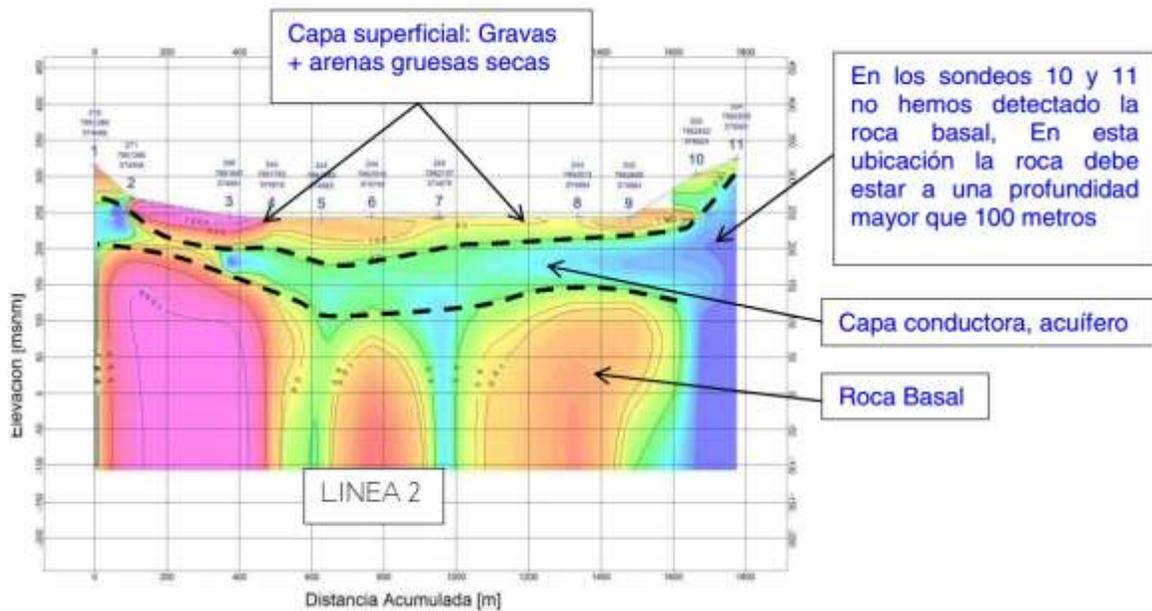


Figura 5-2. Sección de resistividad asociada a línea 2 (transversal).

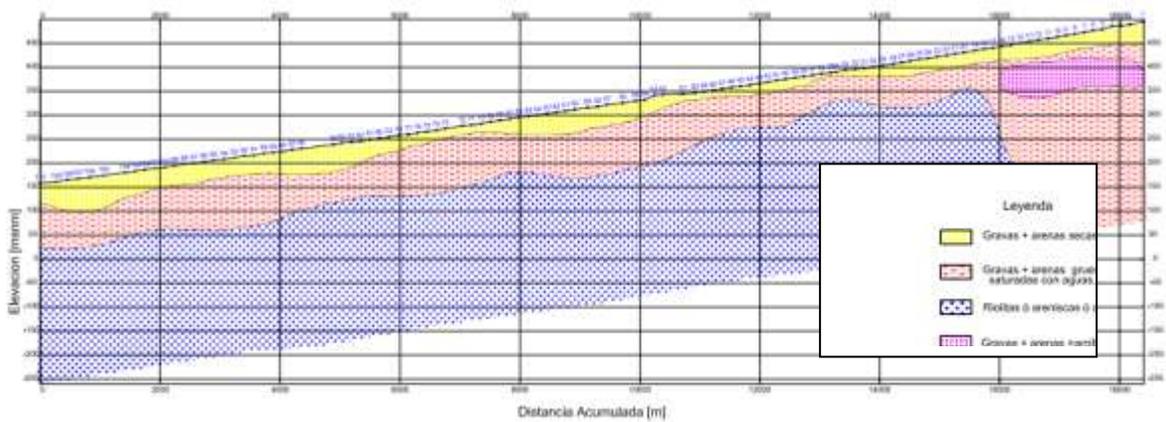


Figura 5-3. Sección longitudinal interpretada asociada a línea 1.

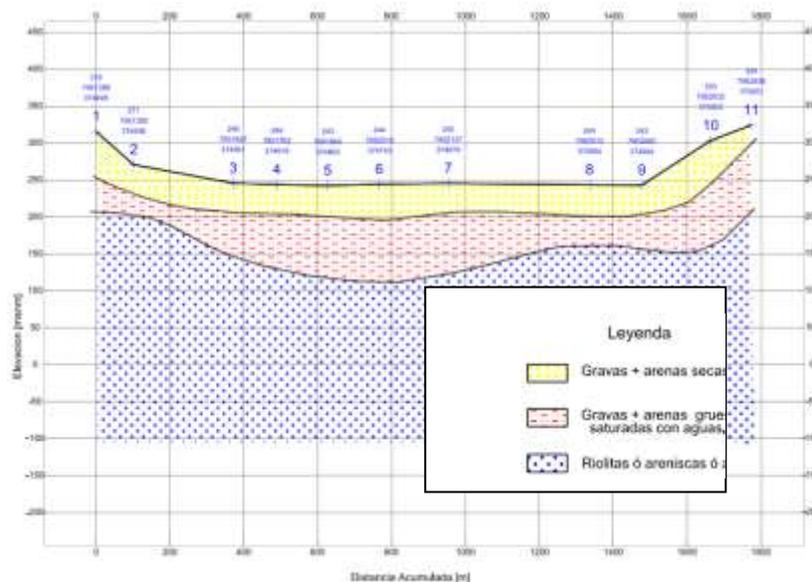


Figura 5-4. Sección transversal interpretada asociada a línea 2.

#### 5.4 MONITOREO DE NIVELES

Los antecedentes de las campañas de monitoreo de niveles se encuentran en el Anexo 02 - Programa de monitoreo de niveles y calidad de aguas.

De la totalidad de los Pozos estudiados se pudo constatar que al menos 4 se utilizarían solo en periodo de verano, debido a que el resto del año se utiliza las aguas provenientes del Canal Azapa.

El descenso de los niveles o aumento de la profundidad a la que se encuentra el agua es evidente para los meses de verano, ya que por un lado aumenta la demanda de agua por ser época estival, y aumenta también su uso para el riego de los cultivos de la zona. Ambos hechos confirman la razón de declive en los niveles para los meses de verano. Esta tendencia sucede en la totalidad de los pozos del estudio.

También es posible afirmar, que durante las grandes crecidas y mientras éstas más se prolonguen, el nivel de los pozos aumentará progresivamente hasta alcanzar niveles que sobrepasen la media.

El comportamiento en general de la mayoría de los pozos es similar y los que no siguen la misma tendencia de los niveles, se debe a que el funcionamiento de las bombas interrumpe la medición totalmente en estado estático.

Durante el periodo de mediciones, se pudieron encontrar pozos de gran profundidad en toda el área de estudio, desechando así la premisa que a mayor altura geográfica (m.s.n.m) se encontrarían

pozos más profundos, sin embargo se hace necesario mencionar que entre los kilómetros 13 y 17 (sector medio del valle) se encontraron niveles que bordeaban los 2mt de profundidad.

Las precipitaciones casuales coinciden con el ascenso de los niveles que manifiestan los pozos, al igual que los descensos de los niveles para las temporadas de riego.

El rango de las variaciones de nivel más habitual que se presenta en los diferentes sectores de estudio es el siguiente:

- Sector Alto: desde los 0,18 hasta 4,31
- Sector Medio: desde los 2,92 hasta 9,01
- Sector Bajo: desde los 1,85 hasta 12

Se asume por otra parte, que las diferencias entre los niveles más altos y más bajos o las variaciones que se encuentran por sobre el rango habitual mencionado anteriormente, suceden entre el sector medio y bajo de la zona de estudio, presumiblemente debido a que ahí se encuentran los sectores más productivos del valle, en donde por tanto existe mayor demanda del recurso.

## 6 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE RECARGA

### 6.1 HIDROLOGÍA

Se sabe que el caudal sobrepasa el Valle sólo durante las lluvias producidas por el invierno altiplánico, por lo tanto la disponibilidad de agua está directamente relacionada con las crecidas en la época estival.

Los registros más completos de caudales corresponden a la estación Ausipar. Ésta se extiende entre los años 1967 y 2011, sin embargo existe un vacío entre 1973 y 1989. El análisis de la disponibilidad de agua se realizó en base a la estadística completada y corregida en Ausipar entre los años 1991 y 2008 realizada por MN Ingenieros en 2011.

Se recopilaron datos de precipitación diaria de las estaciones meteorológicas de la DGA en la región de Arica y Parinacota las que se presentan en Anexo 08 - Estudio Hidrológico

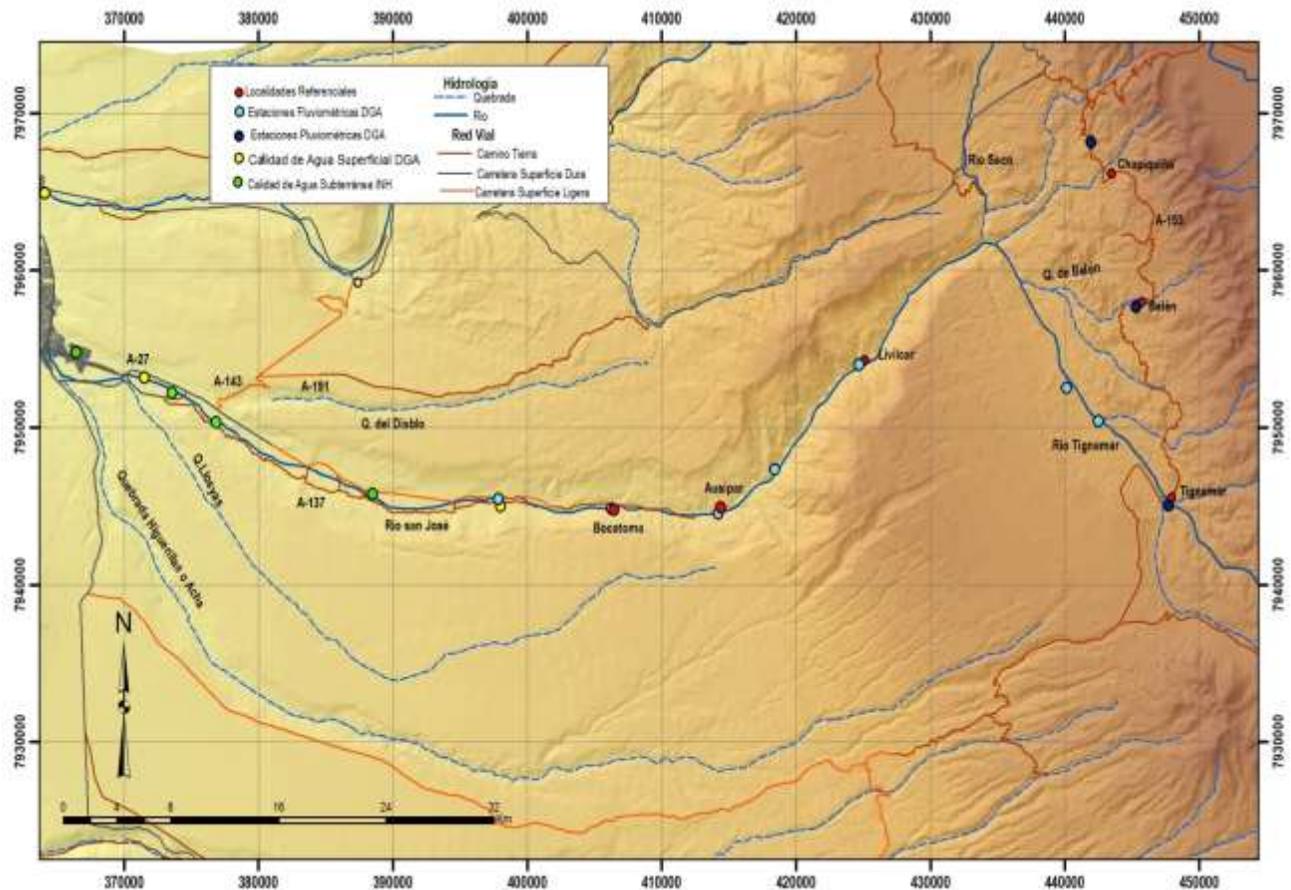


Figura 6-1 Estaciones, Pluviométricas, Fluviométrica y Calidad de Agua Valle de Azapa

Los detalles del análisis hidrológico se encuentran en el anexo Anexo 08 - Estudio Hidrológico

### 6.1.1 PLUVIOMETRIA

Se observa que existe un marcado predominio de las precipitaciones en los meses de verano (Diciembre a Marzo), donde las precipitaciones por lo general son mayores en términos de volumen e intensidad (ver Figura 6.2, Figura 6.3), sin embargo han existido eventos de intensidad importante durante los demás meses (ver Figura 6.4).

Comparando la precipitación registrada por las estaciones durante los meses de mayor precipitación, se desprende que en general la intensidad y el volumen de agua caída aumentan notablemente con la altura geográfica (ver Figura 6.5).

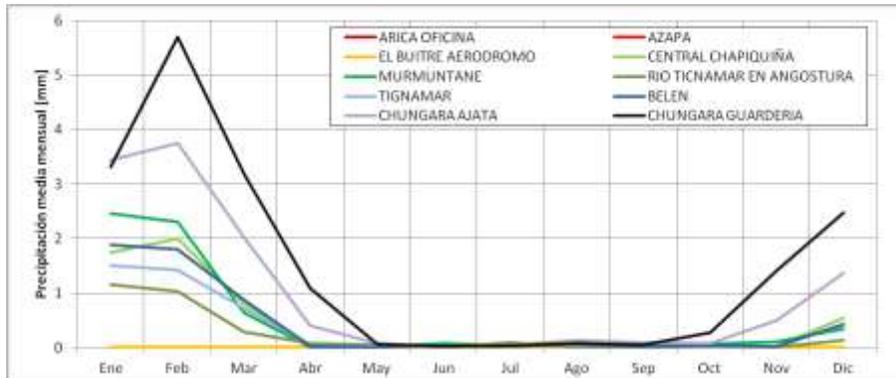


Figura 6.2: Precipitación promedio mensual en estaciones relevantes.

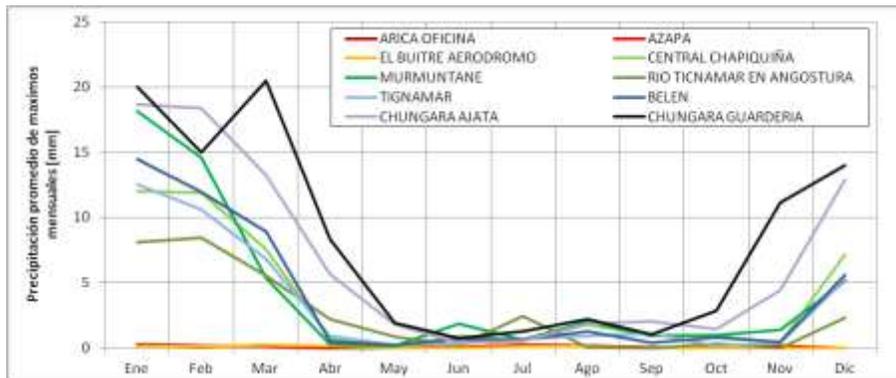


Figura 6.3: Precipitación máximos diarios promedio en estaciones relevantes.

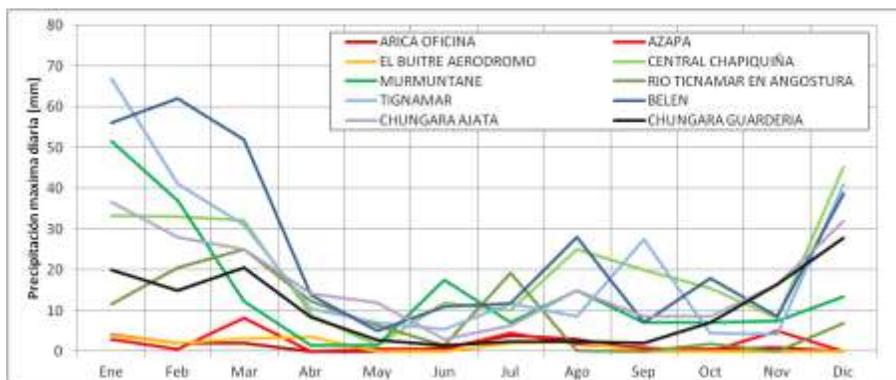


Figura 6.4: Precipitación diaria máxima en estaciones relevantes.

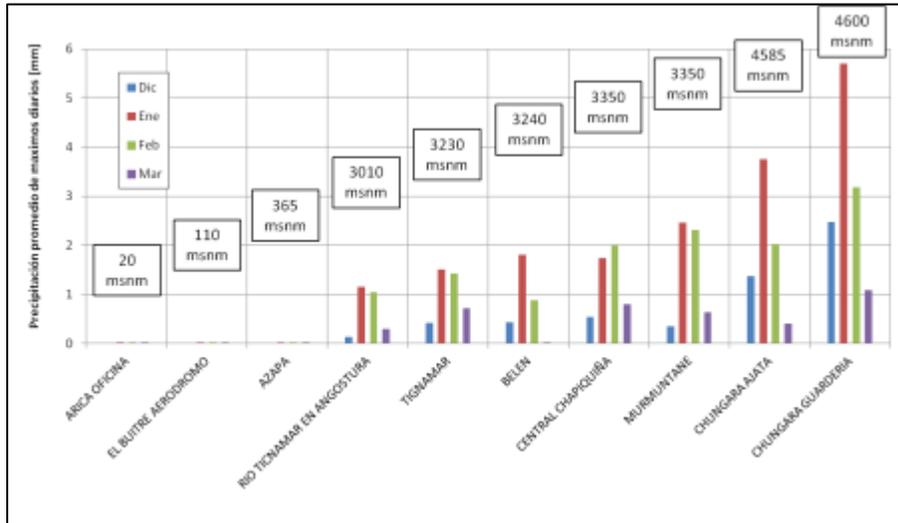


Figura 6.5: Precipitación promedio en estaciones representativas para los meses de Diciembre, Enero, Febrero, y Marzo.

### 6.1.2 FLUVIOMETRIA

La estación más relevante para el estudio, única estación fluviométrica vigente y que posee mayor cantidad de datos, es la estación "Río San José en Ausipar", ubicada en la parte alta del valle de Azapa y donde a partir de ahí hacia aguas abajo no existen afluentes importantes.

Se observa que durante los meses de Enero, Febrero y Marzo existe un marcado aumento de los caudales medios mensuales y máximos históricos. Sin embargo la variabilidad anual de los caudales durante estos meses es alta por lo que existen diferencias importantes entre los caudales de un año a otro, no así los demás meses del año. La Figura 6.6 muestra los caudales medios diarios y máximos medios diarios históricos, y su varianza estacional.

Es necesario mencionar que debido principalmente a las crecidas, la estación "Río San José en Ausipar" a resultado dañada en múltiples ocasiones, dejando un vacío en las mediciones por lo que las medias y máximos medios diarios estimados de los datos pueden estar influenciados por esta falta de información. Por la razón anterior, es posible que los caudales medios y máximos medios diarios mensuales sean mayores a los calculados.

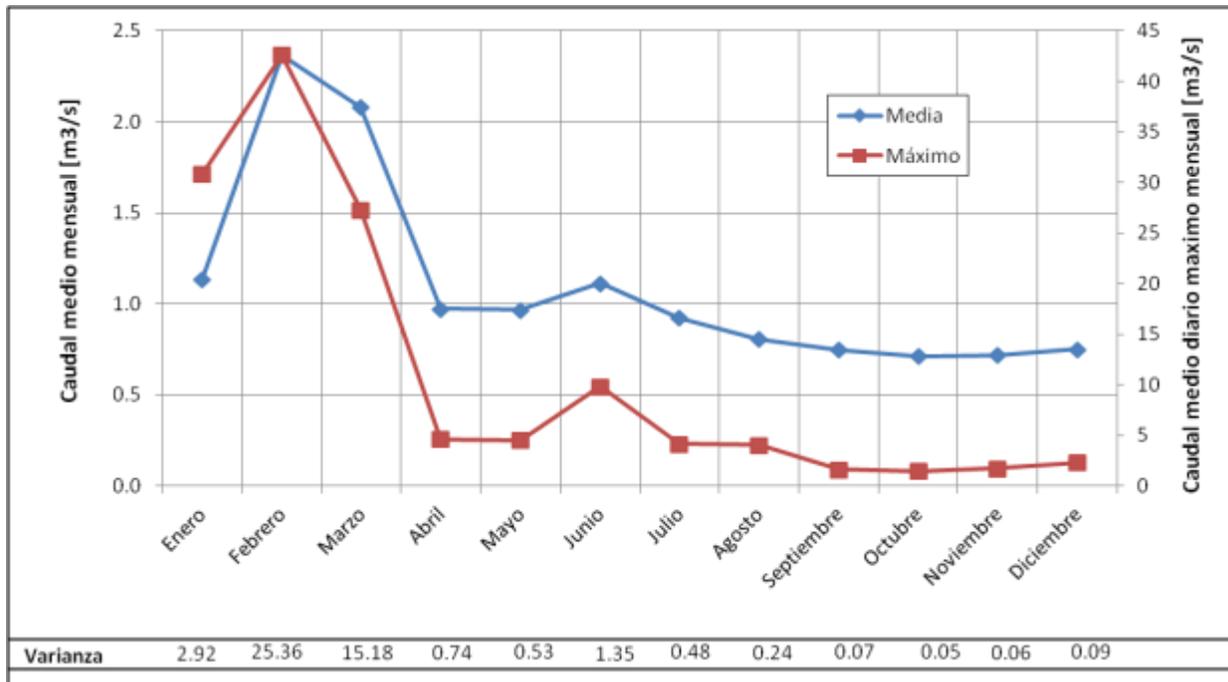


Figura 6.6: Caudales medios diarios y máximos medios diarios, y su varianza estacional.

Fuente: elaboración propia

### 6.1.2.1 Caudales asociados a periodos de retorno

Las precipitaciones presentan una variabilidad espacial y temporal importante, lo que provoca que los flujos de caudal sean también variables. Sin embargo, si se consideran solo los eventos peak, se puede distinguir una forma del hidrograma relativamente uniforme. La Figura 6.7 muestra los eventos de crecida peak de cada año, eventos secundarios de crecida y un histograma de crecida promedio. Se observa que la respuesta al proceso de precipitación - escorrentía en la cuenca es rápido, del orden de 3 a 6 horas.

Debido al heterogéneo comportamiento de las precipitaciones y en consecuencia de la respuesta de caudales, no es posible estimar con precisión el volumen de agua atribuible al periodo completo de crecidas, sin embargo a partir del hidrograma normalizado promedio podemos estimar un hidrograma de crecida asociado a periodo de retorno de un solo peak, equivalente a la respuesta precipitación - escorrentía de un solo evento peak de precipitación al multiplicar este hidrograma por el caudal máximo instantáneo asociado a un periodo de retorno.

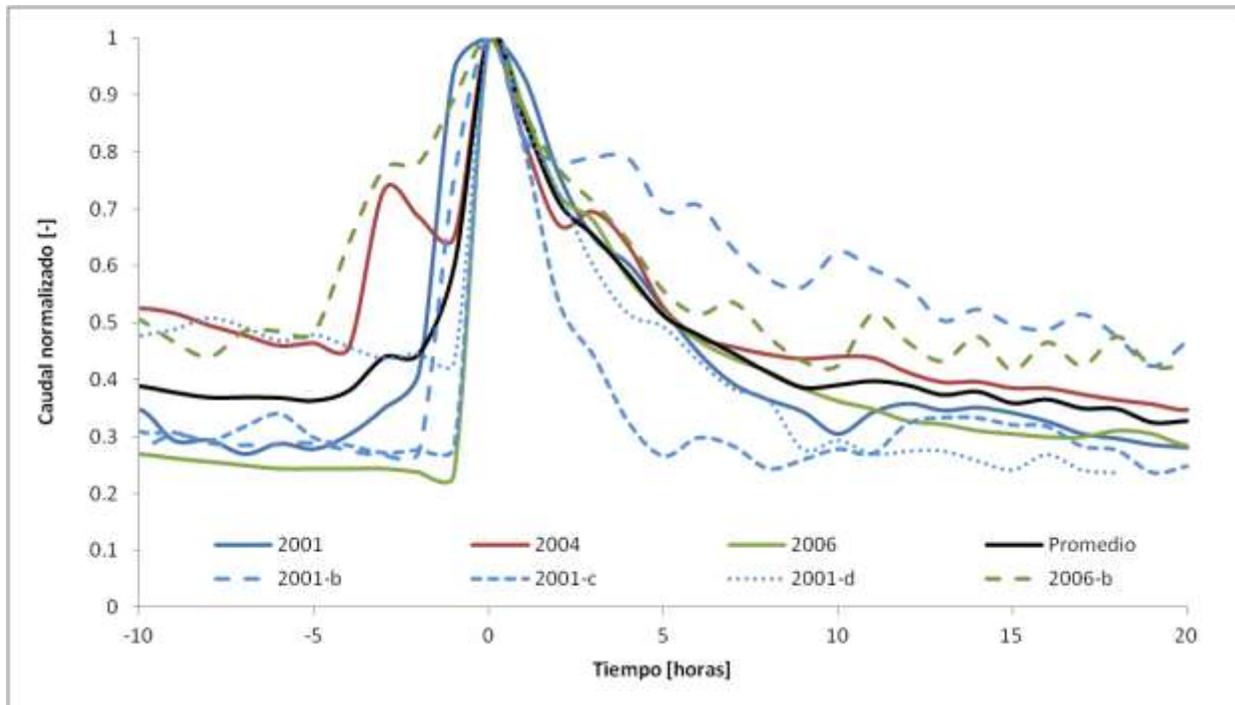


Figura 6.7: Hidrogramas de crecidas peak, secundarios y promedio.

Fuente: elaboración propia

### 6.1.2.2 Caudales Medios Diarios en el punto de recarga

#### 6.1.2.2.1 Caudales medios diarios

Los recursos hidráulicos que intervienen en el balance hidrológico de las zonas de riego del valle de Azapa provienen de la cuenca del río Lauca, cuyos recursos son exportados al río San José a través del canal Lauca y que posteriormente son nuevamente captados por el Canal Azapa

Asimismo existen recursos propios excedentes o sobrantes del río San José, una vez que se han satisfecho las demandas de riego de los pueblos altiplánicos, ubicados principalmente en el río Tignamar, el afluente más importante del río San José.

Un análisis de la estadística generada en base a la curva de duración presentada en, indica que más del 95% del tiempo el cauce se presenta seco en este sector. Asimismo se obtiene que solo un 4% del tiempo se presenta un caudal superior a 48 (l/s).

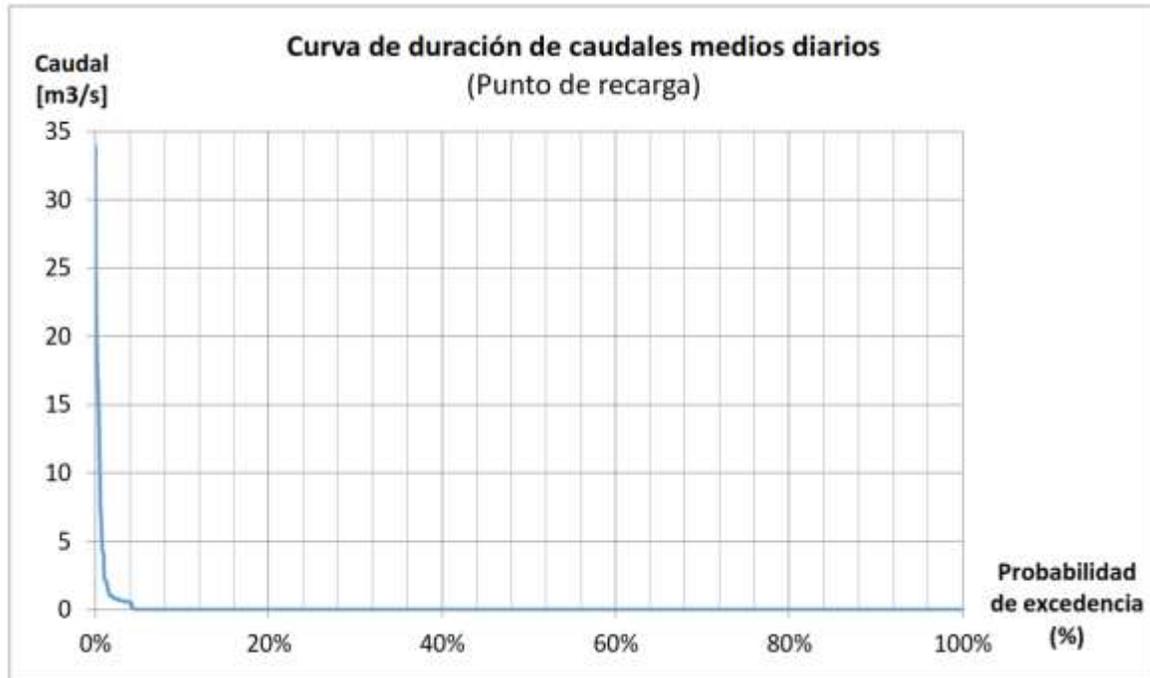


Figura 6-8 . Curva de duración de caudales medios diarios para Río San José en punto Planta de Recarga  
 Fuente: elaboración propia

### 6.1.2.3 Concentración De Sedimento En Suspensión En Punto De Recarga

La información disponible corresponde a un estudio sedimentológico realizado por MN Ingenieros en 2011 para el diseño del Embalse Livilcar. En dicho estudio se calcula la carga de sólidos suspendidos y el arrastre de fondo del río San José. Relacionando la Curva de Descarga de gasto sólido en suspensión del Río Lluta en Tocontasi con la curva de duración de los caudales medios diarios en la estación San José en Ausipar. El gasto sólido de fondo se calculó mediante el método de Meyer, Peter y Muller.

Los resultados obtenidos son los que se muestra a continuación.

Tabla 6-1: Carga de sedimentos medio anual Río San José.

Fuente: MN Ingenieros, 2011.

| Sedimento     | Arrastre promedio anual de sedimento [ton/año] | Volumen promedio anual de sedimento [m3/año] |
|---------------|--|--|
| En suspensión | 168.185  | 129.373                                      |
| De fondo      | 45.813   | 35.241                                       |
| Total         | 213.999  | 164.614                                      |

Los caudales diarios de carga de sedimento para diferentes probabilidades de excedencia. Son presentadas en la Tabla 6-2

Tabla 6-2 : Curva de Duración de Caudales Medios Diarios. (Caudales altos) Río San Jose en Ausipar

Fuente : Elaboración propia

| Probabilidad de excedencia (%) | Caudal (m3/s) |
|--------------------------------|---------------|
| 0,02%                          | 41,15         |
| 0,05%                          | 36,13         |
| 0,10%                          | 31,31         |
| 0,15%                          | 27,91         |
| 0,20%                          | 26,14         |
| 0,30%                          | 23,43         |
| 0,40%                          | 21,04         |
| 0,50%                          | 17,10         |
| 1,00%                          | 6,59          |

Para estos caudales, aplicando la relación anterior se puede obtener las concentraciones asociadas, obteniéndose concentraciones del orden de 55 (kg/m3) para el caudal de crecida más alto estimado en el período 1991/92 - 2007/08. Para un caudal medio diario asociado a una probabilidad del 1% ya la concentración baja a 3.5 (kg/m3)

## 6.2 CALIDAD DE AGUA

El problema de la calidad de agua de riego que existe en la agricultura surge como consecuencia del uso intensivo de aguas de buena calidad. La clasificación de las aguas de riego aptas para la agricultura tiene su base principal en las sales solubles (tipo y calidad).

La clasificación de las aguas de riego aptas para la agricultura tiene su base principal en la presencia de las sales solubles en ella (tipo y calidad). Así mismo, la adecuación del agua para riego depende no solo del acontecimiento total de sales sino también del tipo. A medida que el contenido total de sales aumenta los problemas de suelo y cultivos se agravan, lo que requiere el uso de prácticas especiales de manejo para mantener rendimientos aceptables. La calidad del agua y su adaptabilidad al riego se determinan, por lo tanto, por la gravedad de los problemas que acarrearán, de forma inmediata o después de un uso a largo plazo (DGA, 2010)

La dirección general de aguas (DGA) consta con 12 estaciones de monitoreo de agua superficial, actualmente en el valle de Azapa solo se encuentran vigentes 3 puntos. (San José antes de Bocatoma, Bocatoma Azapa y San José de Ausipar).

Según los datos recopilados se puede observar lo siguiente, con respecto a la calidad de agua superficial.

Tabla 6-3 Puntos de Muestreo de Calidad de Agua y Estaciones

| Estaciones Fluviométricas DGA               | UTM-N   | UTM-E  |
|---|---------|--------|
| Antes de Bocatoma                           | 7944975 | 397999 |
| Ausipar                                     | 7944933 | 414385 |
| Río Tignamar en Angostura                   | 7952900 | 440301 |
| Río Tignamar en Tignamar                    | 7950787 | 442653 |
| Estaciones Pluviométricas DGA               |         |        |
| Central Chapiquiña                          | 7968520 | 442101 |
| Belén                                       | 7958049 | 445437 |
| Tignamar                                    | 7945423 | 447886 |
| Calidad de Agua Superficial Subterráneo DGA |         |        |
| Albarracines ( Subterránea)                 | 7953168 | 371500 |
| Río san José Antes de Bocatoma              | 7944975 | 397999 |
| Bocatoma Azapa                              | 7944773 | 406443 |
| San José de Ausipar                         | 7944933 | 414385 |
| Calidad de Agua Subterránea INH             |         |        |
| Pozo Richter                                | 7954797 | 366431 |
| Pozo Yampara                                | 7952227 | 373557 |
| Pozo Madrid                                 | 7950836 | 377006 |
| Pozo Blanco                                 | 7945776 | 388488 |

La información recopilada en la DGA, se utilizó para establecer los parámetros aproximados de calidad de agua superficial que actualmente se encuentra afectando el valle de Azapa y los posibles aumentos de elementos químicos que han aumentado en la actualidad en el valle, como él es caso del Boro y el Arsénico.

Las muestras de calidad de agua subterráneas que han sido facilitadas por aguas del Altiplano se han utilizado a modo de comparación con los resultados obtenidos por las muestras realizadas por el INH en pozos en estudio del valle de Azapa, estas muestras son enviadas vía área a Santiago, específicamente al laboratorio Agriquem.

## 6.2.1 Monitoreo Permanente

### 6.2.1.1 *Arsénico*

Los efectos que produce el arsénico en la actividad agrícola, es la destrucción de la clorofila en el follaje como una consecuencia de inhibición de producción de enzimas, retarda el crecimiento, reduce el rendimiento estas fallas del cultivo son los efectos más comunes al aumento de concentración de arsénico.

Los niveles de arsénico en el sector antes de bocatoma del valle de Azapa son bastante variables al través del tiempo, sobrepasan el límite permitido por la Norma Chilena 1333, la cual indica que los niveles de arsénico no pueden sobrepasar los 0,10 Mg/l.

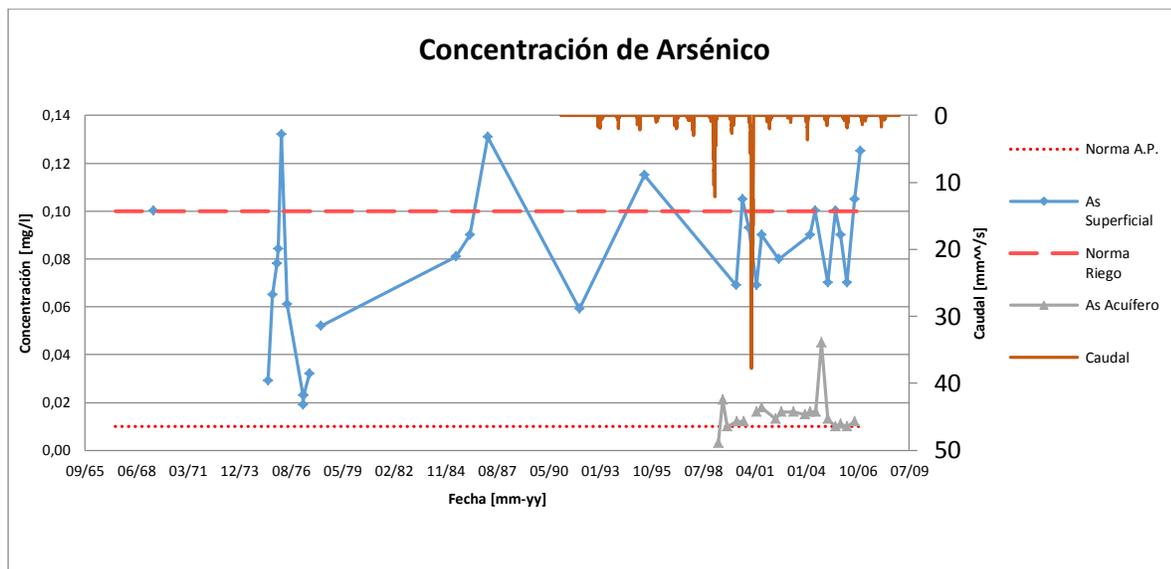


Figura 6-9 : Niveles de Arsénico, sector antes de Bocatoma

Fuente: DGA 2011

### 6.2.1.2 Boro

El boro es otro compuesto químico que ha comenzado a tener protagonismo en la calidad de agua de río San José. La toxicidad por boro se encuentra estrechamente relacionada con problemas de salinidad en climas cálidos y áridos como es el caso del área en estudio, el efecto que produce en el sector agrícola este problema es caracterizado por el crecimiento lento, malformación de las hojas, cambios de color (amarillento y café), clorosis, necrosis, problemas fitosanitarios (hongos), marchitez e inhibición de germinación de polen y crecimiento de tubos de polen. Reduciendo notablemente el rendimiento y la calidad en los cultivos en que son usados, incluso puede causar la muerte de la planta. Sin embargo los niveles de boro en el sector antes de bocatoma sobrepasan a lo permitido por la Norma Chilena 1333 la cual indica que su presencia no puede sobrepasar los 0,75 Mg/l en agua de riego. El año 2005 se presenta la mayor concentración de Boro de superando los 3 mg/l (ver Figura 2), esto es debido a la baja crecida del río San José y la mayor acumulación de sales totales disueltas (Universidad de Chile, 2005).

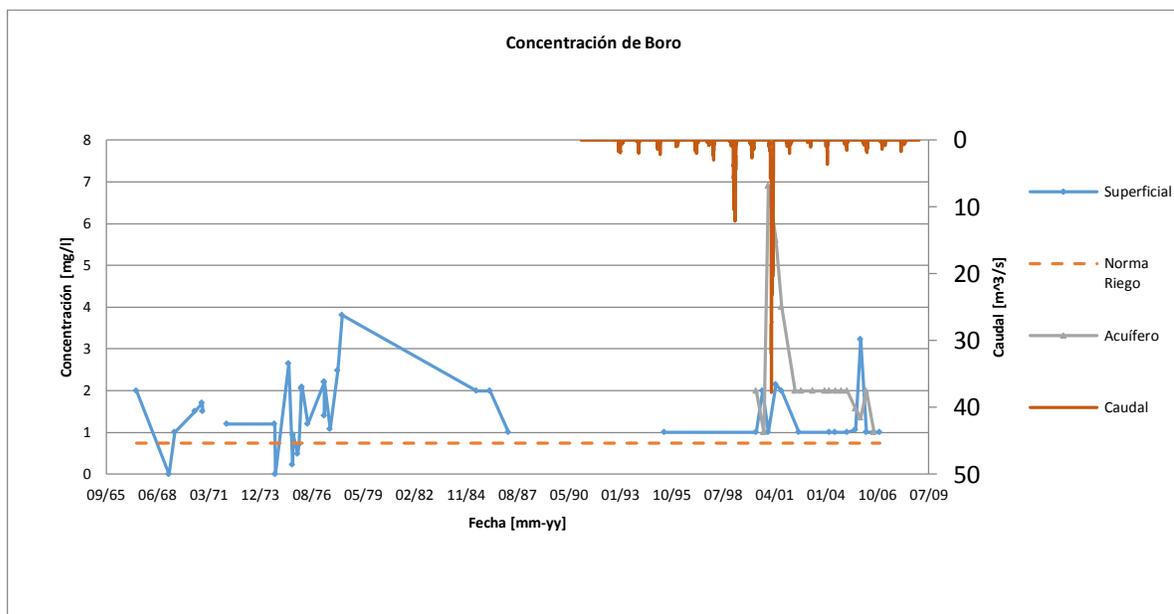


Figura 6-10 Niveles de Boro, sector antes de Bocatoma  
Fuente: Elaboración Propia

La variación temporal de las concentraciones de Boro superficial, en comparación a la calidad del acuífero, se muestra en la Figura 6-10. Adicionalmente se incluye la estadística de caudales y niveles de boro en el pozo Albarraçines ya que la DGA no cuenta con más estaciones de calidad química de agua subterránea. Por lo tanto la estadística podría no ser concluyente.

Si se puede distinguir un aumento de los niveles de Boro con la crecida del 2001, esto se puede deber a que al aumentar la los niveles del acuífero remueve boro que estaba en equilibrio.

#### 6.2.1.3 *Nitratos*

En el caso de los nitratos en aguas superficiales el boletín N° 215 realizado por el INIA “Formulación de Sistemas de Producción Limpia para los Principales Cultivos del valle de Azapa”, indica que la concentración de nitratos en los sectores altos, medios y bajos es ínfima, no observándose tendencia a la acumulación de estos hacia la sección más baja del valle, fundamentalmente puede deberse a que el canal abastece a los predios en forma de turnos, sin derrames.

#### 6.2.1.4 *Conductividad Eléctrica (Ce)*

La conductividad eléctrica de una solución es expresada a través de la cantidad de sales disueltas en ella, por lo que a mayor conductividad eléctrica, mayor es el contenido de sales disueltas. Valores altos de conductividad eléctrica en el agua de riego están generalmente asociados a problemas de salinidad, y por lo tanto a reducciones de rendimiento en los cultivos. En este sentido, la Norma Chilena (NCh) establece un nivel freático inferior o igual a  $750 \mu\text{S}/\text{cm}$  ( $0,75 \text{ dS}/\text{m}$ ), como límite para el agua de riego (Inia, 2010).

La variación estacional de sólidos totales disueltos es mayor en el agua de riego superficial, con menor valor durante los meses de verano. Esto se atribuye a una dilución por precipitación del agua extraída de Laguna Cotacotani a través del canal Lauca.

De acuerdo a la clasificación de agua por salinidad y sodicidad propuesta por Wilcox y Durum (1967), el agua del canal es generalmente alta en salinidad (C3), aunque en algunos casos durante el verano baja a la categoría de salinidad media (C2). La categoría de sodicidad es baja (S1) (Idesia, 2008)

En el sector agrícola, el incremento de sólidos totales disueltos en el agua para riego causa en los cultivos un potencial osmótico más bajo que el potencial hídrico. Ello afecta el balance de agua en la planta y en el suelo, puesto que las hojas necesitan tener un potencial más bajo para conservar un gradiente que permita el crecimiento, provocándose así un estado de escasez hídrico de la planta que reduce su área foliar (aumentando la producción de etileno favoreciendo la abscisión de las hojas), tamaño y producción de productos finales en el caso hortalizas y frutas (Idesia, 2008)

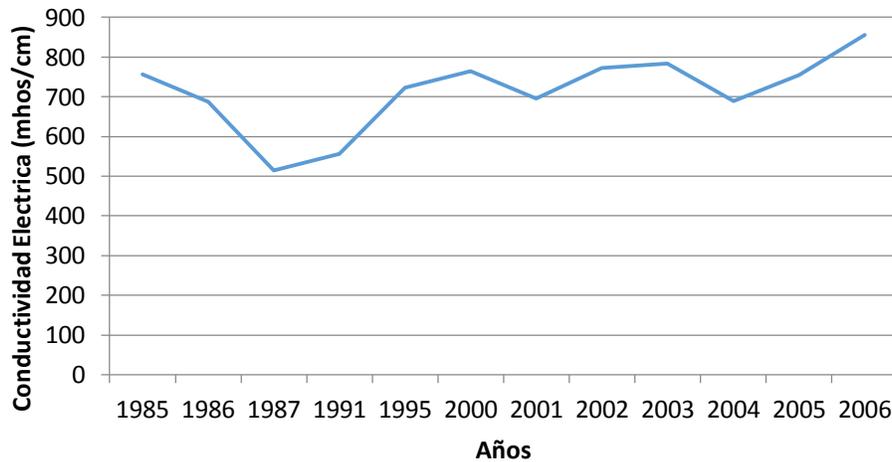


Figura 6-11 Conductividad Eléctrica, sector antes de Bocatoma

Fuente: Elaboración propia - Datos DGA, 2011

#### 6.2.1.5 pH

Uno de los valores que determinan la calidad química del agua es el de su pH, este parámetro orienta sobre las condiciones físicas que contiene el fluido y, por extensión sobre sus diferentes usos. Según el pH, las aguas pueden ser alcalinas o básicas, clasificada por una serie de rangos.

Las muestras obtenidas en el sector antes de bocatoma muestra que el pH que presentan las aguas superficiales en el río san José fluctúan entre 8 a 9 las aguas con este tipo de pH son clasificadas como agua duras o muy duras.

La norma Nch 1333.Of78 define los límites admisibles de pH para el uso del agua para riego entre 5.5 y 9, de los datos analizados no se encontraron valores por fuera de dicho rango en los últimos años.

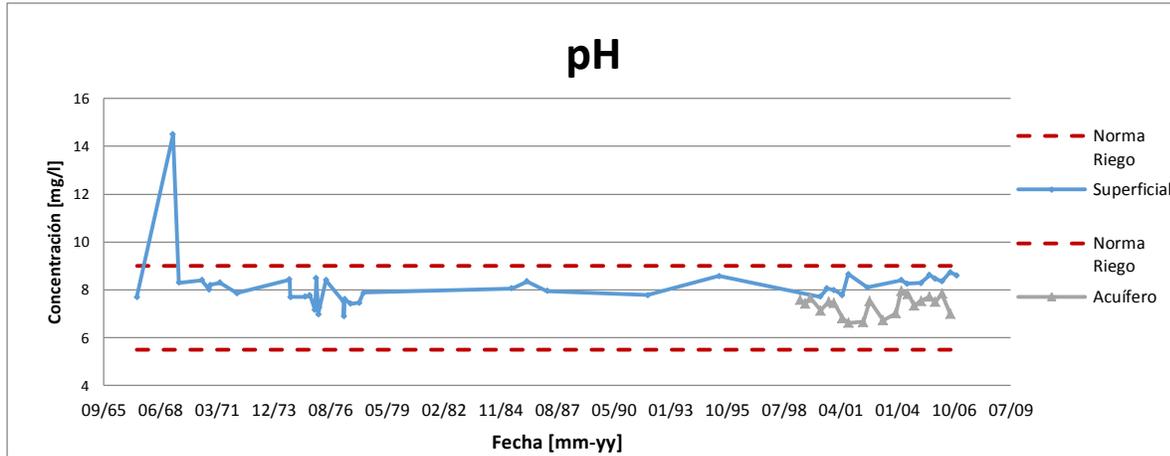


Figura 6-12 Evolución de niveles de pH

Fuente: Elaboración propia - datos DGA, 2011

### 6.2.2 Monitoreo de Calidad de Agua INH

Se realizaron 5 campañas de muestreo de calidad de agua en ellas se recogieron un total de 22 muestras de aguas subterráneas y 5 muestras de agua superficial (Tabla 6-4)

**Tabla 6-4: Lugares y fechas de muestreo.**

| Pozo               | Campaña de medición | Fecha      | UTM N [m] | UTM E [m] |
|--------------------|---------------------|------------|-----------|-----------|
| Bocatoma           | I                   | 16-05-2013 | 7944862   | 406791    |
| Bocatoma           | II                  | 18-07-2013 | 7944862   | 406791    |
| Bocatoma           | III                 | 27-09-2013 | 7944862   | 406791    |
| Bocatoma           | IV                  | 16-01-2014 | 7944862   | 406791    |
| Bocatoma           | V                   | 13-03-2014 | 7944862   | 406791    |
| Carlos Díaz        | II                  | 18-07-2013 | 7948676   | 380052    |
| Carlos Díaz        | V                   | 13-03-2014 | 7948676   | 380052    |
| Fabiola Ron        | III                 | 27-09-2013 | 7953710   | 370641    |
| Félix Puña         | III                 | 27-09-2013 | 7949100   | 380959    |
| Félix Puña         | IV                  | 16-01-2014 | 7949100   | 380959    |
| Gladys Ritcher     | II                  | 18-07-2013 | 7954797   | 366431    |
| Gladys Ritcher     | III                 | 27-09-2013 | 7954797   | 366431    |
| Gladys Ritcher     | IV                  | 16-01-2014 | 7954797   | 366431    |
| Gladys Ritcher     | V                   | 13-03-2014 | 7954797   | 366431    |
| Gladys Ritcher     | I                   | 16-05-2013 | 7954797   | 366431    |
| Jennifer Blanco    | I                   | 16-05-2013 | 7945776   | 388488    |
| M. Angela Corvacho | IV                  | 16-01-2014 | 7946040   | 386484    |
| Manuel Madrid-A    | I                   | 16-05-2013 | 7950338   | 376819    |
| Manuel Madrid-A    | IV                  | 16-01-2014 | 7950338   | 376819    |
| Manuel Madrid-A    | V                   | 13-03-2014 | 7950338   | 376819    |
| Pedro Vizcarra-A   | III                 | 27-09-2013 | 7945875   | 387935    |
| Pedro Vizcarra     | II                  | 18-07-2013 | 7945875   | 387935    |
| Pedro Vizcarra     | V                   | 13-03-2014 | 7945875   | 387935    |
| Romelio Yampara    | I                   | 16-05-2013 | 7945227   | 373557    |
| Romelio Yampara    | III                 | 27-09-2013 | 7945227   | 373557    |
| Roxana Dunstan     | II                  | 18-07-2013 | 7953544   | 372900    |
| Roxana Dunstan     | IV                  | 16-01-2014 | 7953544   | 372900    |

#### 6.2.2.1 Superficial

Según el balance iónico, de los 390 datos disponibles entre las 12 estaciones de monitoreo, 120 fueron excluidos ya que faltó la medición de algunos de los iones principales. De los restantes un 93% estuvo dentro del rango de valores confiables, correspondientes a un 65% del total de las muestras.

Respecto de la conductividad eléctrica, 138 datos fueron excluidos por falta de medición de alguno de los iones principales o porque no cumplió con el balance iónico. De los restantes un 82% estuvo dentro del rango de valores confiables, correspondientes al 53% del total de las muestras.

El 53% de las muestras confiables corresponde a 207 muestras. Sin embargo muchas no contaban con la medición de algunos de los elementos de interés. En la Tabla 6-5 se muestran los parámetros de calidad de agua para riego, el número de muestras con medición, el valor máximo que exige la norma y porcentaje de valores que la cumplen. De los valores que no cumplen con la norma, se incluye el promedio de en qué porcentaje ésta es excedida. Lo mismo en la

Tabla 6-6 Tabla 6-6 para el caso del agua potable.

Tabla 6-5: Parámetros de calidad de agua considerando norma para riego.

Fuente: Elaboración propia.

| Parámetro                | Datos válidos | Norma [mg/l] | Cumplimiento | % Sobre la norma |
|--------------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| pH                       | 172           | 5.5 - 9.0    | 100%         | Cumple           |
| Aluminio Al              | 14            | 5,000        | 86%          | 176%             |
| Arsénico As              | 107           | 0,100        | 84%          | 37%              |
| Boro B                   | 135           | 0,750        | 10%          | 162%             |
| Cadmio Cd                | 15            | 0,010        | 100%         | Cumple           |
| Cloruro Cl               | 172           | 200,000      | 99%          | 4%               |
| Cobalto Co               | 15            | 0,050        | 100%         | Cumple           |
| Cobre Cu                 | 28            | 0,200        | 96%          | 45%              |
| Cromo Cr                 | 14            | 0,100        | 100%         | Cumple           |
| Hierro Fe                | 67            | 5,000        | 99%          | 113%             |
| Manganeso Mn             | 14            | 0,200        | 93%          | 35%              |
| Mercurio Hg              | 14            | 0,001        | 100%         | Cumple           |
| Molibdeno Mo             | 14            | 0,010        | 64%          | 320%             |
| Níquel Ni                | 15            | 0,200        | 100%         | Cumple           |
| Plata Ag                 | 14            | 0,200        | 100%         | Cumple           |
| Plomo Pb                 | 14            | 5,000        | 100%         | Cumple           |
| Selenio Se               | 13            | 0,020        | 100%         | Cumple           |
| Sulfatos SO <sub>4</sub> | 172           | 250,000      | 87%          | 14%              |
| Zinc Zn                  | 15            | 2,000        | 100%         | Cumple           |

Tabla 6-6: Parámetros de calidad de agua considerando norma para agua potable.

Fuente: Elaboración propia.

| Parámetro    | Datos válidos | Norma [mg/l] | Cumplimiento | % sobre la norma |
|--------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| PH           | 172           | 6.5 - 8.5    | 96%          | N/A              |
| Arsénico As  | 107           | 0.01         | 12%          | 505%             |
| Cadmio Cd    | 15            | 0.01         | 100%         | Cumple           |
| Cloruro Cl   | 172           | 400          | 100%         | Cumple           |
| Cobre Cu     | 28            | 2            | 100%         | Cumple           |
| Cromo Cr     | 14            | 0.05         | 100%         | Cumple           |
| Hierro Fe    | 67            | 0.3          | 51%          | 348%             |
| Magnesio Mg  | 172           | 125          | 100%         | Cumple           |
| Manganeso Mn | 14            | 0.1          | 71%          | 68%              |
| Mercurio Hg  | 14            | 0.001        | 100%         | Cumple           |
| Plomo Pb     | 14            | 1            | 100%         | Cumple           |
| Sulfatos SO4 | 172           | 500          | 100%         | Cumple           |
| Zinc Zn      | 15            | 3            | 100%         | Cumple           |

### 6.2.2.2 Subterráneas

El análisis de muestras recolectadas por el Instituto Nacional de Hidráulica durante el año 2013 y 2014 se expresa en la

Tabla 6-7 y Tabla 6-8 Según el balance iónico de 22 datos disponibles, el 73% del total de las muestras estuvo dentro del rango de valores confiables. De las restantes un 88% estuvo dentro del rango de valores confiables. En la Tabla 6-7 se exponen los resultados del análisis de cumplimiento de las normas vigentes.

Según la Norma chilena NCH133 of78 el agua de riego debe tener un pH comprendido entre 5,5 y 9,0, ninguna de las muestras recogidas en las distintas campañas de terreno arrojó valores de pH fuera de los rangos. En ella también se especifican las concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego, las muestras obtenidas en las distintas campañas de terreno solo sobrepasarían los límites permitidos en los elementos Boro, Cloruros, Manganeso y sulfatos. Los demás elementos químicos medidos se encuentran dentro del rango permisibles para el uso del agua para riego. En

relación a la conductividad eléctrica solo 3 de las muestras no tienen clasificación tipo A que corresponde a agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales.

Tabla 6- 7: Parámetros de calidad de agua considerando norma para riego.

Fuente: Elaboración propia.

|           |     | Norma     | Datos válidos | Cumplimiento | Promedio no cumplimiento |
|-----------|-----|-----------|---------------|--------------|--------------------------|
| pH        |     | 5.5 - 9.0 | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Aluminio  | Al  | 5         | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Arsénico  | As  | 0,1       | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Boro      | B   | 0,75      | 20            | 0%           | 253%                     |
| Cadmio    | Cd  | 0,01      | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Cloruro   | Cl  | 200       | 20            | 15%          | 156%                     |
| Cobre     | Cu  | 0,2       | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Hierro    | Fe  | 5         | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Manganeso | Mn  | 0,2       | 20            | 95%          | 13%                      |
| Plomo     | Pb  | 5         | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Selenio   | Se  | 0,02      | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Sulfatos  | SO4 | 250       | 20            | 15%          | 71%                      |
| Zinc      | Zn  | 2         | 20            | 100%         | Cumple                   |

Según la Norma chilena NCH409/1 of2005 Agua Potable - Parte 1 - Requisito. Que establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional, las muestras de aguas recolectadas a lo largo del Valle presentan concentraciones por sobre la norma de algunos elementos como el Arsénico, Cloruro, Hierro, Manganeso y sulfatos.

Tabla 6-8: Parámetros de calidad de agua considerando norma para agua potable.

Fuente: Elaboración propia.

|          |    |           | Datos válidos | Cumplimiento | Promedio no cumplimiento |
|----------|----|-----------|---------------|--------------|--------------------------|
| PH       |    | 6.5 - 8.5 | 20            | 95%          | 2%                       |
| Arsénico | As | 0,01      | 20            | 30%          | 177%                     |
| Cadmio   | Cd | 0,01      | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Cloruro  | Cl | 400       | 20            | 50%          | 59%                      |
| Cobre    | Cu | 2         | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Hierro   | Fe | 0,3       | 20            | 55%          | 104%                     |
| Magnesio | Mg | 125       | 20            | 100%         | Cumple                   |

|           |     |      | Datos válidos | Cumplimiento | Promedio no cumplimiento |
|-----------|-----|------|---------------|--------------|--------------------------|
| Manganeso | Mn  | 0,1  | 20            | 90%          | 103%                     |
| Plomo     | Pb  | 0,05 | 20            | 100%         | Cumple                   |
| Sulfatos  | SO4 | 500  | 20            | 85%          | 11%                      |
| Zinc      | Zn  | 3    | 20            | 100%         | Cumple                   |

### 6.2.2.3 Hidrogeoquímica

Para el análisis de calidad de agua superficial se consideraron sólo las mediciones de calidad realizadas en la estación Río San José antes Bocatoma Azapa. El resto de las estaciones no se consideraron debido a que representan mediciones en vertientes con despreciable disponibilidad hídrica o el período de medición es muy acotado.

En lo que respecta a la calidad de agua del acuífero o aguas subterráneas se consideraron las mediciones realizadas en la estación de monitoreo de la DGA Pozo Albarracines. Lo anterior se complementó con mediciones realizadas por el INH.

#### 6.2.2.3.1 Análisis Piper- Hill- Langelier

En la Figura 6-14 se muestra una descripción general de todas las aguas superficiales del Valle (estación Río San José antes Bocatoma Azapa) y de las aguas subterráneas (DGA Pozo Albarracines) mediante un gráfico de Piper. Se observa que las aguas subterráneas son del tipo clorurada cálcica mientras que las aguas Superficiales son del tipo bicarbonatada cálcica.

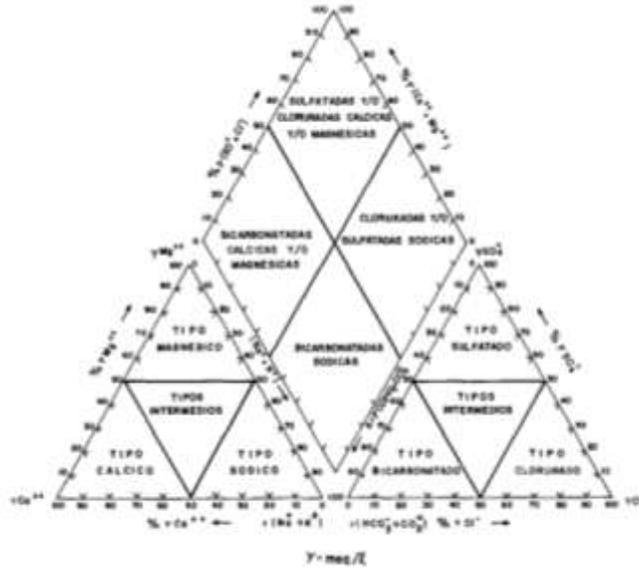


Fig 5. - TIPOS DE AGUAS DEDUCIDOS DE UN DIAGRAMA DE PIPER-HILL-LANGELIER

Figura 6-13: Esquema de Tipos de aguas deducidas de un diagrama de Piper- Hill- Langelier.

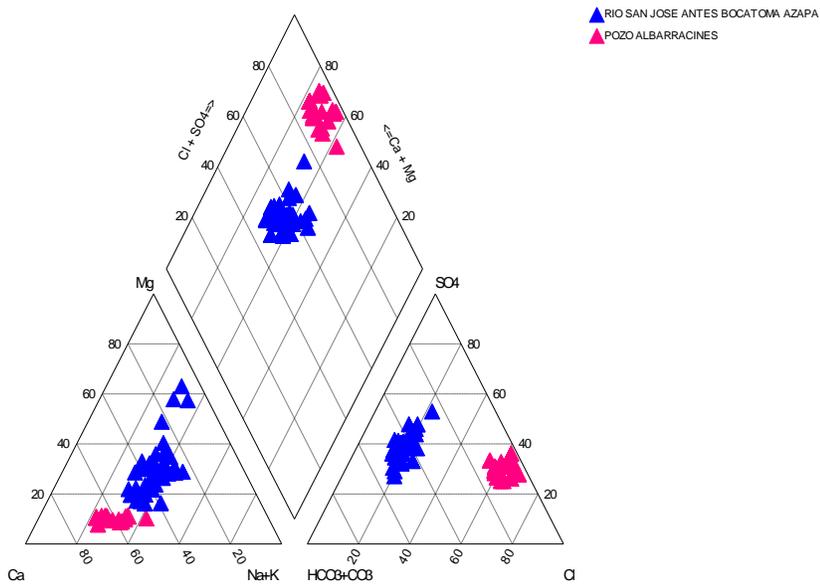


Figura 6-14: Caracterización del agua superficial y subterránea.

Fuente: Elaboración Propia

De las muestras recogidas en terreno Figura 6-15 se observa que las aguas subterráneas son del tipo clorurada cálcica, en concordancia con las aguas medidas en las estaciones de monitoreo, solo una de los especímenes muestra una variación en su composición pero de igual forma se clasifica como clorurada cálcica. Cabe mencionar que solo se cuenta con 1 medición en este pozo por lo que de requerir un mayor análisis del comportamiento de la calidad de agua en este pozo se deberá realizar un monitoreo adecuado para estudiar dicha variación.

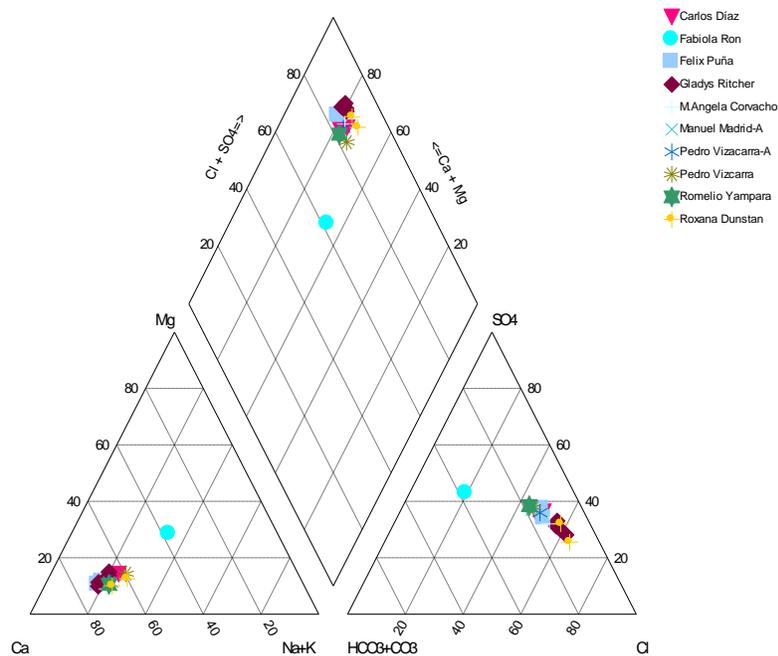


Figura 6-15: Caracterización de las aguas subterráneas obtenidas de las campañas de terreno INH en los distintos pozos.

Fuente: Elaboración Propia

Las aguas superficiales en la bocatoma son del tipo bicarbonatada cálcica, en concordancia con las mediciones en las estaciones de monitoreo.

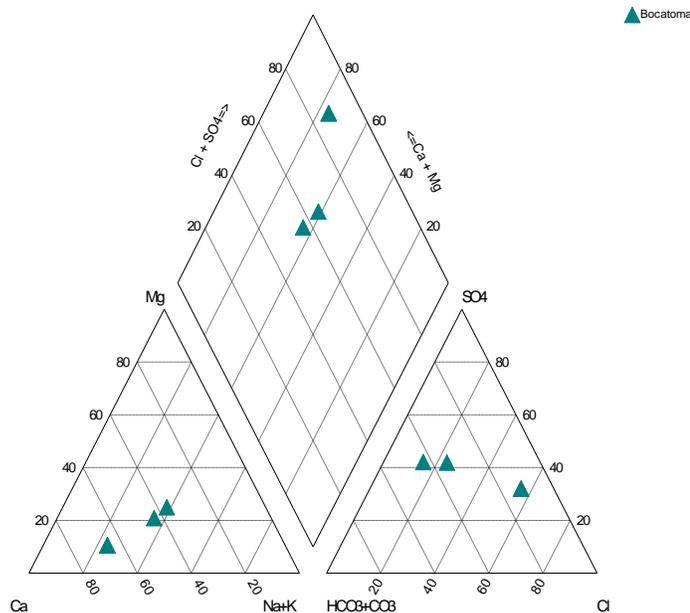


Figura 6-16: Caracterización de las aguas superficiales obtenidas de las campañas de terreno INH en la bocatomá.

Fuente: Elaboración Propia

### 6.3 AGUAS RESIDUALES DE ARICA

Las aguas servidas producidas por el consumo humano o desechos industriales y posteriormente procesadas en plantas de tratamiento de agua residual. Su disponibilidad es la más constante de todas, sin embargo la calidad del agua es inferior. Esta fuente es utilizada en sectores donde la disponibilidad de agua es reducida y es necesario su reutilización. En términos generales, si el efluente viene de una planta con tratamiento secundario, entonces ésta puede ser infiltrada y ser utilizada para riego, aprovechando la limpieza que realiza el suelo de forma natural a medida que el agua pasa a través de éste. Si el efluente viene de un tratamiento de tipo terciario, entonces el agua podría ser utilizada para uso potable nuevamente.

Con respecto a la calidad de las aguas servidas de Arica, actualmente ésta es recolectada en un centro de tratamiento donde se le aplica tratamiento primario a través de rejillas de filtración para luego ser descargadas al mar mediante un emisario submarino. Es factible infiltrar aguas residuales siempre y cuando se le aplique el tratamiento indicado. En ese sentido, una serie de trabajos de título de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile estudiaron entre 1998 y 2001 el

fenómeno de Tratamiento Suelo Acuifero como herramienta para la recuperación de aguas servidas en Arica y Copiapó.

En particular Honeyman en 1999 estudió la remoción de contaminantes a través del sistema SAT aplicado mediante lagunas de infiltración y pozos de inyección en la zona no saturada. En dicho trabajo se obtuvo como resultado que la calidad de agua que alcanza la zona saturada tiene calidad suficiente para ser utilizada en riego, sin embargo la débil remoción de nitrógeno imposibilita el uso como agua potable.

En la Tabla 6-9 se muestran los parámetros característicos de calidad en el emisario submarino de Aguas del Altiplano (A.A.) y la caracterización del agua que utilizó Honeyman en sus experimentos de laboratorio (SAT).

Tabla 6-9: Calidad del agua servida de Arica y calidad del agua en sistema experimental SAT.

Fuente: Aguas del Altiplano y (Honeyman, 1999)

| Parametro | Unidad | Valor A.A | N° muestra A.A | Valor SAT |
|-----------|--------|-----------|----------------|-----------|
| pH        |        | 7.1       | 7              | 7.5       |
| CE        | uS/cm  | 6750      | 1              | 2000      |
| DBO5      | mg/L   | 272       | 50             | 100       |
| DQO       | mg/L   | 823       | 2              | 300       |
| SST       | mg/L   | 312       | 178            | 75        |

Los parámetros de calidad utilizados por Honeyman son bastante mejores que la calidad del agua residual de Arica, por lo que inyectar esta agua, aunque sea a través del sistema SAT, no es una opción viable, por lo tanto necesariamente se requiere un tratamiento más avanzado de tipo secundario o terciario para realizar la recarga.

## 7 IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RECARGA

La metodología a utilizar en la determinación de las áreas más adecuadas para proyectar un sistema de recarga artificial, comprende la integración de distintas capas temáticas (o layers) por medio de la herramienta Weighted Overlay (Véase Anexo 10 - Metodología e Identificación de Zonas de Recarga)

Para los sistemas de recarga artificial considerados (de superficie o de profundidad), existen distintos factores como permeabilidad, estratigrafía, profundidad de la zona no saturada, y uso del suelo, son factores con distinto grado de importancia, por lo que se propuso una ponderación de acuerdo a un sistema de superficie y a uno subterráneo. Fueron considerados las 3 capas temáticas generadas (pendiente, permeabilidad, profundidad NE y uso de suelos), las que fueron ponderadas según la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Ponderaciones de capas de acuerdo al tipo de sistema de recarga.

| Capa           | Ponderación (%) |        |
|----------------|-----------------|--------|
|                | Caso 1          | Caso 2 |
| Profundidad NE | 55              | 40     |
| Permeabilidad  | 45              | -      |
| Uso de suelos  | -               | 60     |

La tabla anterior presenta los tipos de recarga considerados:

- Caso 1: Recarga profunda
- Caso 2: Recarga superficial

La superposición fue efectuada con la herramienta Wighted Overlay del software Arcmap, con las ponderaciones de la tabla anterior. El resultado obtenido arroja la distribución de áreas de la Figura 7-1, las ponderaciones asignadas corresponden en el primer caso, a que de las 3 capas consideradas sólo la zona no saturada y la permeabilidad del acuífero tienen verdadera influencia sobre el sistema de recarga, mientras que el uso de suelos de una planta de recarga en profundidad es mínimo. En el caso de la recarga superficial, el uso de suelos toma mayor relevancia ya que el gran requerimiento de área destinada a infiltración entra en conflicto con el área destinada al sector agrícola. La permeabilidad por su parte pierde relevancia ante la tasa de infiltración de la zona no saturada, que por ser constante no se incluye dentro de la Tabla 7-1.

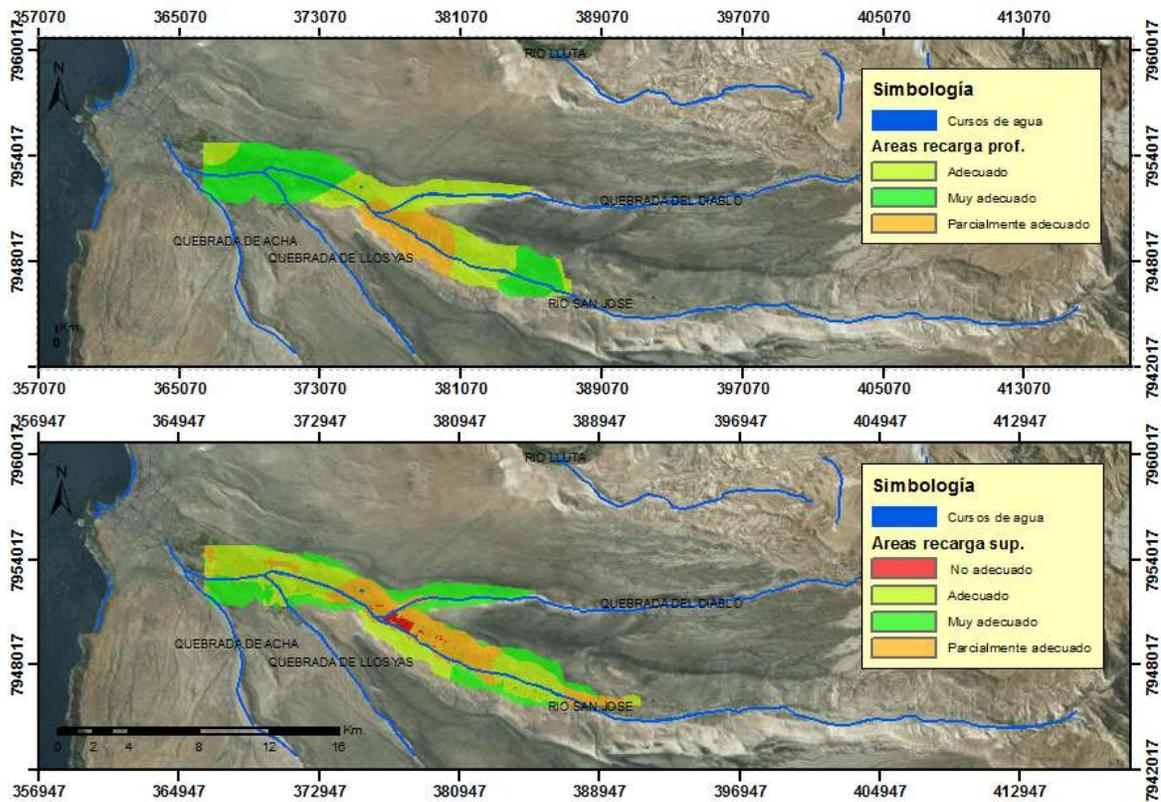


Figura 7-1. Áreas más adecuadas según tipo de recarga artificial.  
 De arriba a abajo: (a) recarga profunda. (b) recarga superficial.

Tabla 7-2. Clasificación de superficies de acuerdo a tipo de recarga artificial.

| Categoría             | Área caso 1 [ha] | Área caso 2 [ha] |
|-----------------------|------------------|------------------|
| Muy adecuado          | 2916             | 2325             |
| Adecuado              | 2703             | 2732             |
| Parcialmente adecuado | 1252             | 2099             |
| No adecuado           | -                | 116.7            |

## 8 DISEÑO A NIVEL DE PERFIL PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL POR POZOS INYECCIÓN

El objetivo es el diseño de un sistema que permita inyectar mediante pozos 48 l/s de agua tratada en el acuífero aluvial. En el diseño se ha considerado optimizar, tanto la vida útil del sistema, como el generar las menores pérdidas de carga a la inyección, para ello se abordan los siguientes ítems:

1. Diámetro necesario en función del caudal requerido.
2. Caudales óptimos y máximos admisibles.
3. Cálculo del macizo de grava.
4. Determinación de los esfuerzos mecánicos que deberá soportar la tubería.
5. Determinación del material de las tuberías y rejillas, en función de la hidroquímica del agua del acuífero.
6. Diseño constructivo del sistema de pozos
7. Controles a realizar durante la ejecución de las perforaciones.
8. Régimen de limpieza y mantenimiento de las perforaciones.

A modo de esquema se comenta el diseño básico de un pozo de inyección/bombeo (Figura 8-1).

La eficiencia de la perforación dependerá de una serie de tareas para habilitarla como un pozo de inyección/extracción de agua que comienzan con la elaboración del diseño constructivo del pozo. En función de dicho diseño se procederá a la entubación y cementación del pozo, y en el caso de un acuífero granular no cementado, a la colocación de rejillas y prefiltros o macizos de grava para retener los sedimentos del acuífero que podrían ser arrastrados por el agua hacia la bomba y también para evitar desmoronamientos de las paredes del taladro.

El uso de la rejilla es el componente más importante del pozo en estratos arenosos o de gravas. Se intenta optimizar el tipo de rejilla para evitar el ingreso de sedimentos al pozo sin disminuir sensiblemente el caudal de agua. Una rejilla bien proyectada debe permitir el pasaje de un caudal elevado libre de sedimentos con el mínimo de pérdidas de carga.

Para estabilizar estratos acuíferos constituidos por arenas debe colocarse además un prefiltro o macizo de arenas y gravas alrededor de la rejilla determinado en función de la granulometría de los sedimentos de la Formación acuífera.

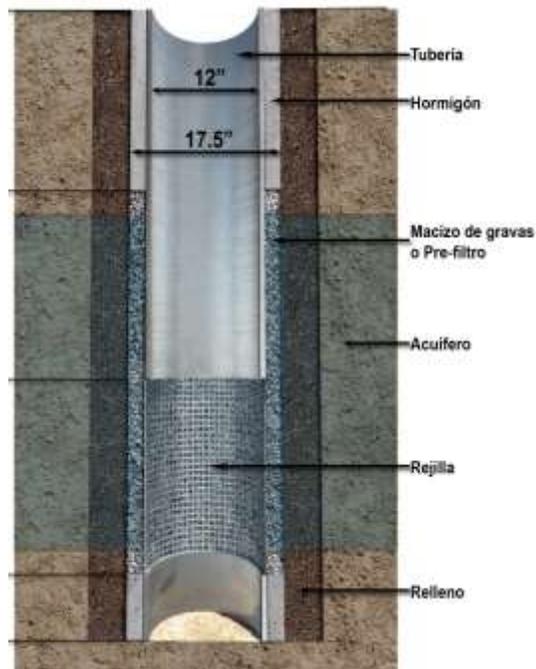


Figura 8-1 : Esquema de una perforación de inyección/extracción de agua en un acuífero sedimentario no cementado.

## 8.1 DISEÑO CONSTRUCTIVO

De este modo se propone la construcción de 9 pozos con las siguientes características (Figura 8-2):

Tabla 8-1 : Características de los pozos de inyección.

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Profundidad             | 50 m  |
| Rejilla                 | Ranura continua, con abertura a determinar en función de la granulometría del acuífero. |
| Ubicación de la rejilla | de 30 a 45 [m] de profundidad   |
| Diámetro del pozo       | 17.5"   |
| Diámetro de la tubería  | 12"   |
| Cemento                 | de 0 a 15 m de profundidad  |
| Macizo de gravas        | De 15 a 45 m de profundidad, gradada en función de la granulometría del acuífero.       |
| Tubería                 | De acero inoxidable de 10 mm d espesor  |

Cada perforación debe tener instalada una bomba sumergible de 12 [l/s] y 5 [kg] de columna de agua, para permitir las tareas de limpieza.

La inyección de agua se realizaría a través de la propia tubería de bombeo, para evitar la caída libre del agua, desde la superficie, con la consecuente formación de burbujas de aire, contraindicadas en éstas operaciones, sobre todo en un acuífero de permeabilidad pobre, como el de Azapa (menor a 20 [m/d], según antecedentes).

Otra posibilidad sería que las perforaciones tuvieran un diámetro mayor, y que el agua de inyección se descargara a través de tuberías de 60 - 80 [mm] de diámetro, anexadas a la de la bomba.

Los cabezales de los pozos deben ser estancos y los pozos están equipados con caudalímetros, electroválvulas automáticas para mantener el caudal constante y un sensor de presión para controlar el nivel de inyección.

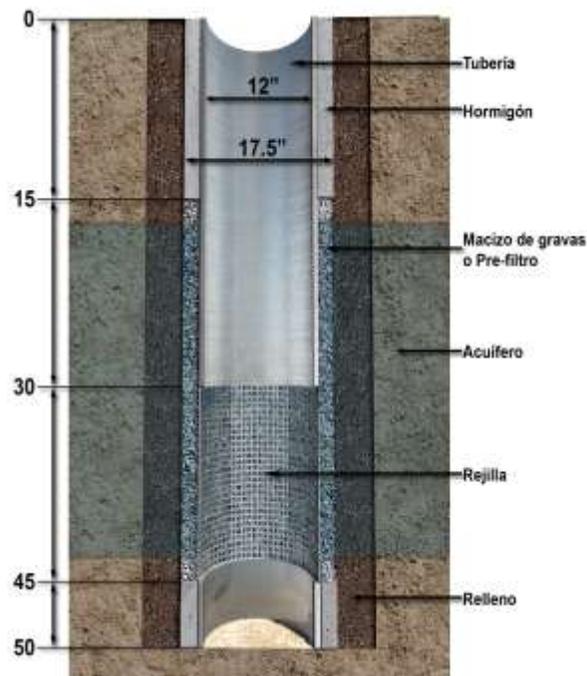


Figura 8-2. Diseño constructivo del sistema de pozos.

### 8.1.1 Cálculo espaciamento entre pozos

El cálculo del espaciamento entre pozos de inyección considera las mismas bases de cálculo que para los sistemas de bombeo en régimen permanente, ya que en un acuífero libre, el cono de descenso producido por un pozo que bombea un caudal  $Q$  es igual (pero invertido) al que resulta de inyectar ese mismo caudal  $Q$  al acuífero.

Esto se puede incorporar a la fórmula de Dupuit considerando un caudal negativo (según notación indicar un caudal negativo significa un caudal de inyección).

Para la aplicación de la fórmula de Dupuit se conocen ciertos parámetros de acuerdo al diseño de la planta de inyección. Estos son:

- El nivel freático en el sector de recarga presenta una profundidad de 18 [m].
- El caudal total de inyección considera 50 [l/s], repartidos uniformemente en 9 pozos de inyección.
- La permeabilidad del acuífero en el sector de recarga alcanza un valor de 14 [m/d].

Por lo tanto, el cálculo del espaciamento de los pozos de inyección se centra en los parámetros desconocidos ( $h$ ,  $R$ ,  $r$ ).

Se considera la siguiente disposición de los pozos de inyección:

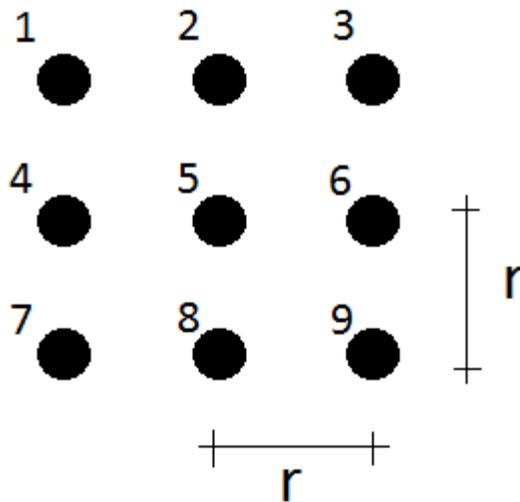


Figura 8-3: Distribución pozos de inyección.

La disposición de pozos propuesta considera la mínima longitud de la conducción del agua de recarga a los pozos de inyección. Dada la configuración propuesta, el punto más crítico en la zona de recarga corresponde al pozo nro. 5, pues en éste ocurren los mayores ascensos en el nivel freático, si es que se considera el funcionamiento de los 9 pozos simultáneamente.

Es por esto que el criterio de diseño para el espaciamiento de los pozos de inyección, considera una distancia “r” tal que el ascenso del nivel piezométrico no supere la cota de terreno, provocando problemas de afloramiento en lugares no deseados.

Además se considera un nivel de seguridad de 3 [m], lo que corresponde un espaciamiento “r” entre pozos que provoque un ascenso de 15 [m] máximo en el nivel freático.

Con respecto al radio de influencia (R) de cada pozo, se considera un valor variable entre 100 y 1000 [m] de acuerdo a lo expuesto a Villarroya .

#### 8.1.1.1 Descenso en el punto 5 debido a otros pozos

Utilizando la misma fórmula del punto anterior:

$$18^2 - h_i^2 = \frac{518.4}{\pi * 14} * \ln\left(\frac{R}{r_i}\right)$$

En este caso, el nivel dentro del pozo nro. 5 queda en función del radio de influencia (R) y de la distancia de cada pozo al punto nro. 5 (ri), y el abatimiento en el punto 5 producto de cada uno de los pozos corresponde a:

$$\Delta_i = h_0 - h_i$$

Luego, de acuerdo al principio de superposición el abatimiento total en el punto nro. 5, resulta de sumar todos los efectos (abatimientos) individuales ( $\Delta_i$ ) de cada pozo sobre el punto más crítico (pozo 5), obteniendo los abatimientos de la tabla siguiente:

| R [m] | r1 [m] | ln(R/r) | Q/( $\pi * K$ ) | ho <sup>2</sup> -<br>Q/(p*K)*<br>ln(R/r1) | h1 [m] | $\Delta h_1$ [m] | ln(R/r2) | ho <sup>2</sup> -<br>Q/(p*K)*<br>ln(R/r2) | h2 [m] | $\Delta h_2$ [m] | $\Delta h_1 + \Delta h_2$ [m] |
|-------|--------|---------|-----------------|---|--------|------------------|----------|---|--------|------------------|-------------------------------|
| 100   | 15     | 1.90    | 11.79           | 301.64                                    | 17.37  | 0.63             | 1.55     | 305.72                                    | 17.48  | 0.52             | 4.59                          |
| 200   | 15     | 2.59    | 11.79           | 293.47                                    | 17.13  | 0.87             | 2.24     | 297.55                                    | 17.25  | 0.75             | 6.48                          |
| 300   | 15     | 3.00    | 11.79           | 288.69                                    | 16.99  | 1.01             | 2.65     | 292.78                                    | 17.11  | 0.89             | 7.59                          |
| 400   | 15     | 3.28    | 11.79           | 285.30                                    | 16.89  | 1.11             | 2.94     | 289.38                                    | 17.01  | 0.99             | 8.39                          |
| 500   | 15     | 3.51    | 11.79           | 282.67                                    | 16.81  | 1.19             | 3.16     | 286.75                                    | 16.93  | 1.07             | 9.01                          |
| 600   | 15     | 3.69    | 11.79           | 280.52                                    | 16.75  | 1.25             | 3.34     | 284.61                                    | 16.87  | 1.13             | 9.52                          |
| 700   | 15     | 3.84    | 11.79           | 278.70                                    | 16.69  | 1.31             | 3.50     | 282.79                                    | 16.82  | 1.18             | 9.96                          |
| 800   | 15     | 3.98    | 11.79           | 277.13                                    | 16.65  | 1.35             | 3.63     | 281.21                                    | 16.77  | 1.23             | 10.33                         |
| 900   | 15     | 4.09    | 11.79           | 275.74                                    | 16.61  | 1.39             | 3.75     | 279.83                                    | 16.73  | 1.27             | 10.67                         |
| 1000  | 15     | 4.20    | 11.79           | 274.50                                    | 16.57  | 1.43             | 3.85     | 278.58                                    | 16.69  | 1.31             | 10.96                         |

Seleccionando el caso más crítico, esto es, para un radio de influencia de 1000 [m], se obtiene que el descenso máximo en el punto crítico es de 14.12 [m], para un espaciamiento entre pozos de 15[m], dado un caudal de 6[l/s] por pozo.

Este espaciamiento corresponde al mínimo que cumple con la condición de diseño.

## 8.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE INYECCIÓN

Se presenta un presupuesto a nivel de perfil de la construcción de las 9 perforaciones de inyección (Anexo 2), el cual asciende a la cifra de \$380.000.000 CLP (Tabla 8-2), adicionalmente se consideró un sistema de bombas para realizar las mantenciones según corresponda, con lo que se estima que la planta de recarga tendrían un valor aproximado de \$400.000.000 CLP.

Tabla 8-2: Presupuesto para la instalación de 9 pozos para la recarga.

| ITEM     | DESCRIPCIÓN   | UN  | CANT | P.U.              | TOTAL              |
|----------|---|-----|------|-------------------|--------------------|
|          |   |     |      | Pesos             | Pesos              |
| <b>1</b> | <b>OBRAS GENERALES</b>  |     |      |                   |                    |
| 1.1      | Movilización de un equipo, maquinarias, personal de perforación, materiales y herramientas hasta Valle de Azapa   | GL  | 1    | 26.000.000        | 26.000.000         |
| 1.2      | Desmovilización un equipo, maquinarias, personal de perforación   | GL  | 1    | 19.000.000        | 19.000.000         |
| 1.3      | Traslados entre puntos  | c/u | 8    | 1.000.000         | 8.000.000          |
|          |   |     |      | Sub Total I Neto  | 53.000.000         |
| <b>2</b> | <b>CONSTRUCCIÓN POZOS PRODUCCIÓN/BOMBEO</b>   |     |      |                   |                    |
|          | <b>Perforación Dual Rotary, diámetro mínimo 18"</b>   |     |      |                   |                    |
| 2.1      | Se considera sistema Dual Rotary con equipo Foremost DR24HD con un diámetro de perforación mínimo de 18", compresor de apoyo Atlas Copco, así como consumibles tales como Bits de perforación, escariadores, combustibles cañerías auxiliares ,lubricantes. Equipos de apoyo pensiones. Mantenciones programadas de equipos | m   | 450  | 360.000           | 162.000.000        |
| 2.2      | Pruebas de airlift  | c/u | 1    | 170.000           |                    |
| 2.3      | Toma de muestras cada dos metros  | m   | 225  | 8.000             | 1.800.000          |
| <b>3</b> | <b>SUMINISTRO DE MATERIALES POZO BOMBEO</b>   |     |      |                   |                    |
| 3.1      | Cañería de acero carbono 12" esp 6,35   | m   | 315  | 46.000            | 14.490.000         |
| 3.2      | Criba Acero Inoxidable 16" tipo Johnson Calidad AISI-304 slot 40, apta 200 Mts  | m   | 135  | 140.000           | 18.900.000         |
| 3.3      | Suministro de grava seleccionada de 3 a 6 mm.   | m3  | 54   | 195.000           | 10.530.000         |
| <b>4</b> | <b>HABILITACIÓN</b>   |     |      |                   |                    |
| 4.1      | Instalación de cañería de acero carbono 12" esp 6,35  | m   | 315  | 22.000            | 6.930.000          |
| 4.2      | Instalación de criba de acero Inox 12"  | m   | 135  | 35.000            | 4.725.000          |
| 4.3      | Instalación de empaque de grava o material estéril  | m   | 315  | 18.000            | 5.670.000          |
| <b>5</b> | <b>TERMINACIONES</b>  |     |      |                   |                    |
| 5.1      | Sello sanitario Cemento 15 mts y brocal de terminación incluye camisa de acero carbono 18"  | c/u | 9    | 2.200.000         | 19.800.000         |
| <b>6</b> | <b>LIMPIEZA Y DESARROLLO POZOS BOMBEO</b>   |     |      |                   |                    |
| 6.1      | Desarrollo de pozo mediante airlift   | Hrs | 72   | 290.000           | 20.880.000         |
|          |   |     |      | Sub Total II Neto | 265.725.000        |
|          |   |     |      | Neto I+II         | 318.725.000        |
|          |   |     |      | IVA               | 60.557.750         |
|          |   |     |      | <b>Total</b>      | <b>379.282.750</b> |

### 8.3 PLANTA ELEVADORA

Para elevar el caudal desde la planta elevadora agua servida Chinchorro Norte hasta el punto de recarga del acuífero Azapa, para ello se estudió el diseño de 2 impulsiones (en el Anexo 12 - Diseño de Planta de Recarga, se incluye un informe con los detalles de la planta elevadora)

- La impulsión N°1 elevará los recursos desde la planta Elevadora proyectada de agua servida N°1, ubicada en la planta de AS Chinchorro Nortel, propiedad de Aguas Altiplano, hasta la planta elevadora proyectada N°2, ubicada en las coordenadas 374734m E, 7951800m S. Se contempla la elevación de agua con un caudal de 72 (l/s).
- La impulsión N°2 elevará los recursos desde la planta elevadora N°2 proyectada hasta un punto de recarga del acuífero en coordenadas 386510m E, 7946199m S. Consistente al caso anterior, se considera la elevación de un caudal de 72 (l/s).

Las tuberías del sistema de impulsiones se dimensionaron en acero y HDPE para un caudal de 72 (l/s) y con velocidad máxima de 1(m/s) La Tabla N°1 muestra las dimensiones y características de las tuberías proyectadas para las dos impulsiones.

Los costos de inversión y operación asociados a estas 2 plantas elevadoras se resumen a continuación.

Tabla 8-3 : Resumen de Costos

| Impulsión     | Costo inversión  | Costo operación anual |
|---------------|------------------|-----------------------|
| Impulsión N°1 | \$ 3.407.719.311 | \$ 103.000.000        |
| Impulsión N°2 | \$ 3.402.796.138 | \$ 107.000.000        |

## 9 CONCLUSIONES

La tasa de infiltración última promedio en los sitios de medición fue de 3,18 [m/d]. Dicha tasa no representa la conductividad hidráulica de largo plazo que se espera en un sistema de infiltración superficial. Esto se debe principalmente a que no se considera el fenómeno de la colmatación o clogging, el cual hace disminuir dicho valor a largo plazo. Se consideró que solo un 15% de la conductividad obtenida en terreno sería representativa (Hofkes & Visscher, 1986), obteniéndose una tasa de infiltración para el largo plazo de 0,48 [m/d].

En términos generales, la infiltración superficial ofrece la ventaja, en comparación a la recarga con pozos, que los costos en infraestructura son considerablemente menores. Esto en condiciones ideales donde la disponibilidad de superficie y la calidad del agua son adecuadas, aspectos que en el Valle de Azapa no se cumplen.

El estudio geofísico fue capaz de distinguir con claridad los sedimentos fluviales formados por estratos permeables. Las resistividades obtenidas hasta una profundidad de 400 [m] fueron coherentes distinguiendo el basamento de los medios más permeables.

En el sector de Cabuza no se logró llegar al basamento por medio de los sondeos, esto nos indica que podría haber un sector de mayor potencia, esto quiere decir que existe una mayor diferencia entre el basamento del acuífero y el nivel freático que en otros lugares de él. Además en esta zona se identifica un estrato con menor resistividad que podría corresponder a materiales más fino (menos permeabilidad en dicho sector). Estas menores resistividades se asocian a una lente de arcilla. Para caracterizar de mejor manera el sector e identificar la existencia de este estrato más fino se deberán realizar nuevas pruebas bombeo y sondeos TEM a mayores profundidades.

Se identificó que en el sector seleccionado como adecuado para la recarga es un sector agrícola por lo que el uso de ese espacio es de gran importancia en el sector, lo que aumentaría los costos de emplazamiento de piscinas de infiltración por otra parte se sabe que las crecidas producto de las lluvias altiplánicas que bajan por el río San José provocan daños en distintos sectores del valle, en este sentido cualquier obra hidráulica en el sector se expone a un alto riesgo.

Por todos estos motivos la recarga artificial del acuífero del Valle de Azapa mediante lagunas de infiltración en el sector seleccionado no sería recomendable.

De lo anterior es que la RAA mediante pozos de inyección se posiciona como la opción más adecuada para recargar el acuífero e incrementar el recurso dentro del acuífero del Valle de Azapa. Sin embargo esta alternativa es más costosa en comparación con la recarga superficial, por cuanto requiere la implementación de una planta de tratamiento de las aguas residuales de tipo terciario y la conducción del caudal hasta el punto de recarga mediante impulsión.

En el caso de la recarga en profundidad, se distinguen claramente 2 zonas con clasificación de “muy adecuada” para proyectar un sistema de RAA, estas se encuentran en las localidades de Pago de Gómez al poniente, y Cabuza al oriente. Ambas zonas contarían con disponibilidad de agua para recarga por medio de la impulsión hasta el punto de recarga, sin embargo se decide optar por la zona ubicada en la localidad de Cabuza, por tener mayor influencia hacia aguas abajo del valle de Azapa y por tener una estratigrafía adecuada

En el punto identificado para la descarga se estima que solo el 4% del tiempo existiría el recurso suficiente proveniente del río San José, esto debido a que la mayor parte del año el río se encuentra seco producto de la conducción del agua por el canal Azapa y la infiltración natural. En consecuencia la fuente seleccionada como fuente de recarga es el agua servida de la ciudad de Arica, actualmente este recurso está siendo evacuado mediante un emisario submarino. Antes de ser vertida en el mar se le aplica un tratamiento primario mediante rejillas, por lo que para la utilización de este recurso para la RAA se le deberá aplicar un tratamiento secundario o terciario.

Para elevar el caudal desde la planta elevadora agua servida Chinchorro Norte hasta el punto de recarga del acuífero Azapa, para ello se estudió el diseño de 2 impulsiones La impulsión N°1 elevará 72 l/s a una altura piezométrica de 272 [m] hasta la impulsión N°2 elevará los recursos a una altura piezométrica de 288 [m] hasta la planta de recarga artificial por pozos ubicada aprox. a 492 m.s.n.m. La impulsión se dimensiono en acero y HDPE con una velocidad máxima de impulsión de 1[m/s]

Los costos de inversión para las 2 plantas alcanzan los \$M6800 CLP y su operación tendría un costo anual de \$M210 CLP .

Se estimó que para recargar el acuífero a una razón de 48 [l/s] se deben instalar 9 pozos de inyección de 50 metro de profundidad 12” de diámetro (según la configuración indicada en la Figura 8-1). Dicha planta de recarga tendría un costo de instalación cercanos a los \$M400 CLP y los costos de operación podrían estar cercanos a los \$N440

Los potenciales efectos ambientales de recargar el acuífero artificialmente incluyen principalmente la recuperación de los niveles de agua subterránea y el posible afloramiento de vertientes que han desaparecido con el paso del tiempo. Por otro lado, se debe considerar los posibles impactos negativos que podrían generarse. Estos son el empeoramiento de la calidad del agua de no hacerlo con una fuente de calidad apropiada o de no implementar los sistemas de monitoreo pertinentes, o el del riesgo de sufrir daños por las crecidas del río San José, ya que las más destructivas han ocurrido en años donde los niveles de agua subterránea se han encontrado más superficiales.

Dentro de la evaluación realizada en este proyecto no se consideró la planta de tratamiento de aguas servidas, aspecto que se deberá incorporar en estudios posteriores.



Finalmente es importante mencionar que la solución al problema de sobreexplotación del acuífero del Valle de Azapa no pasa tan solo por implementar un sistema de recarga artificial, un proyecto de estas características debe ser considerado sólo como parte de un proyecto integral a nivel de cuenca en el que participen y se genere conciencia de lo limitado del recurso hídrico en todos los actores

## 10 ANEXOS

Se incluye con este informe 2 tomos, estos contienen todos los informes, certificados y archivos generados para el desarrollo del proyecto, a continuación se muestran los Anexos y su ubicación

### 10.1 TOMO I

Anexo 00 - Diagnostico y Caracterización Acuífero Receptor

Anexo 01 - Métodos y Dispositivos de Recarga Artificial

Anexo 02 - Programa de Monitoreo de Niveles y Calidad de Aguas

Anexo 03 - Estudio Geofísico

### 10.2 TOMO II

Anexo 04 - Campaña Reconocimiento Geológico

Anexo 05 - Mediciones de Permeabilidad Superficial

Anexo 06 - Análisis de Pruebas de Bombeo

Anexo 07 - Documento Legal

Anexo 08 - Estudio Hidrológico

Anexo 09 - Caracterización agua a infiltrar

Anexo 10 - Metodología e Identificación de Zonas de Recarga

Anexo 11 - Modelación Visual Modflow

Anexo 12 - Diseño de Planta de Recarga

### 10.3 ANEXO DIGITAL

DVD con Anexos e Informe en formato digital