



UNIVERSIDAD NACIONAL ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIENCIAS DE LA TIERRA

**Detección de sectores favorables para la gestión de recarga  
artificial en la cuenca del Río San José, Región de Arica y  
Parinacota.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

KARLA BELÉN ÁLVAREZ MARÍN

**PROFESOR GUÍA**

CARLOS PARRAGUEZ DECKER

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

MIGUEL ÁNGEL CARO

HERNE ETCHART

Santiago de Chile

2020

## *Agradecimientos*

Muchas personas han participado de manera directa o indirecta en todo mi proceso académico, empezando por mi familia, especialmente mi mamá, a quien le dedico todo el esfuerzo y trabajo que ha costado sacar adelante esta carrera. Quiero agradecer toda su paciencia y cariño en momentos difíciles pese a mi mal genio, algún día espero poder retribuir el tiempo que me ha dedicado.

También deseo agradecer a todos quienes han estado conmigo y me han apoyado durante este proceso:

A mi tía, mi prima y su familia, por su apoyo durante toda mi vida académica.

A mi papá, pese a que nuestra comunicación no sea de las mejores, agradezco su preocupación.

A toda la familia de Renca que han compartido con nosotras durante años sobre todo Mary, Vale, Juan y tía Nani. Soy feliz de saber que existe un lugar en el que nos reciben con tanta alegría y donde siempre he recibido palabras de motivación y ánimo.

A mis compañeros no humanos, que con sus colitas felices han aliviado mis momentos más estresantes.

A todos quienes conocí durante esta larga etapa de vida, compañeros, profesores, amistades, etc. Especialmente a Catalina Toloza y Gema Riveros, por ser el soporte que necesité en momentos complicados. Si no hubiésemos coincidido en el momento justo, hubiese sido mucho más difícil para mí terminar todo este ciclo, por eso les quiero dar infinitas gracias.

A Valentina Mauna por escuchar cada problema que he tenido y darme palabras de apoyo.

Finalmente, quiero agradecer a mi comisión: al profesor Parraguez por darme la oportunidad de ser su tesista y realizar este trabajo, al profesor Miguel Angel por su ayuda y orientación, y al profesor Herne Etchart por tener una gran disposición pese a incorporarse de manera tardía a mi comisión dados los problemas administrativos.

Gracias a todos y cada uno por ser un pilar fundamental en este tiempo.

# 1 Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	1
1.1 Problemática	1
1.2 Impactos de la escasez hídrica	3
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Generales	6
1.3.2 Específicos	6
1.4 Hipótesis	6
1.5 Metodología	6
<b>2 Recarga Artificial</b>	9
2.1 Definición	9
2.2 Objetivos de la Recarga	10
2.3 Beneficios	10
2.4 Limitaciones	11
2.5 Experiencias	12
2.5.1 Otros países	12
2.5.2 Chile	13
2.6 Métodos	17
2.6.1 Recarga de carácter superficial	17
2.6.2 Recarga de carácter profundo	21
2.7 Elección del método	26
2.8 Aspectos Legales	30
2.9 Consideraciones ambientales	32
2.10 Requerimientos de información	33
<b>3 Antecedentes Generales</b>	34
3.1 Ubicación	34
3.2 Marco Geomorfológico	35
3.3 Hidrografía	36
3.4 Clima	37
<b>4 Hidrología</b>	38
4.1 Caracterización Pluviométrica	38
4.1.1 Estaciones Meteorológicas	38
4.1.2 Análisis de datos	39
4.1.3 Isoyetas	41
4.2 Caracterización Fluviométrica	42
4.2.1 Estaciones Fluviométricas	42

4.2.2	Análisis de Datos Caudal Anual .....	43
4.2.3	Probabilidad de Excedencia y Período de Retorno .....	45
4.2.4	Análisis de Datos Caudal Mensual .....	45
4.2.5	Probabilidad de Excedencia y Período de Retorno .....	47
4.3	Evaporación y evapotranspiración.....	47
<b>5</b>	<b>Caracterización de la cuenca .....</b>	<b>50</b>
5.1	Marco Geológico .....	50
5.1.1	Depósitos no Consolidados .....	51
5.1.2	Rocas Estratificadas .....	54
5.1.3	Rocas Intrusivas .....	60
5.1.4	Rocas Metamórficas.....	61
5.2	Estructuras.....	61
<b>6</b>	<b>Marco Hidrogeológico .....</b>	<b>63</b>
6.1	Unidades Hidrogeológicas .....	63
6.2	Sistema Acuífero .....	64
6.2.1	Definición del acuífero .....	64
6.2.2	Geología Subsuperficial .....	65
6.2.3	Exploración Geofísica .....	73
6.3	Balance Hídrico.....	75
6.3.1	Azapa Alto .....	75
6.3.2	Río San José Bajo.....	76
6.4	Parámetros Hidráulicos .....	77
6.4.1	Transmisividad.....	77
6.4.2	Permeabilidad .....	80
6.4.3	Coefficiente de almacenamiento .....	82
6.5	Nivel Freático .....	83
<b>7</b>	<b>Calidad de aguas .....</b>	<b>88</b>
7.1	Hidrogeoquímica .....	88
7.2	Subterránea.....	89
7.2.1	Elementos Mayoritarios.....	89
7.2.2	Arsénico y Boro .....	91
7.2.3	pH y Conductividad Eléctrica.....	92
7.2.4	Estudio del INH para aguas subterráneas .....	94
7.3	Superficial .....	94
7.3.1	Elementos Mayoritarios.....	94
7.3.2	Arsénico y Boro .....	96



7.3.3	pH y Conductividad Eléctrica.....	97
7.3.4	Estudio del INH para aguas superficiales .....	99
7.4	Clasificación de aguas .....	99
<b>8</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>101</b>
8.1	Sectores favorables .....	101
8.2	Fuentes.....	102
8.3	Volumen de almacenamiento .....	103
8.4	Caudales de infiltración .....	103
8.5	Métodos .....	104
8.5.1	Propuesta N°1: Zanjas de infiltración .....	104
8.5.2	Propuesta N°2: Sondajes en zona saturada .....	107
8.5.3	Propuesta N° 3: Pozos de inyección de Aguas Residuales .....	111
8.6	Evaluación Económica .....	113
8.6.1	Proyecto N°1 .....	114
8.6.2	Proyecto N°2.....	115
8.6.3	Proyecto N°3.....	117
<b>9</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>119</b>
<b>10</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>122</b>
<b>11</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>127</b>
11.1	Anexo I: Meteorología .....	127
11.1.1	Información Estaciones Meteorológicas .....	127
11.1.2	Monitoreo Precipitaciones .....	127
11.2	Anexo II: Fluviometría .....	130
11.2.1	Información Estaciones Fluviométricas .....	130
11.2.2	Monitoreo caudales.....	131
11.3	Anexo III: Pozos en desuso con información estratigráfica.....	132
11.4	Anexo IV: Otros estudios geofísicos .....	136
11.4.1	Resistividades .....	136
11.4.2	Perfiles Interpretados .....	136
11.5	Anexo V: Expedientes.....	138
11.5.1	Catastro de expedientes .....	138
11.5.2	Pruebas de bombeo .....	139
11.6	Anexo VI: Nivel Freático.....	145
11.6.1	Monitoreo de nivel freático en la Cuenca del Río San José.....	145
11.6.2	Monitoreo de nivel freático en el Acuífero de Azapa.....	146
11.7	Anexo VII: Zanjas .....	149

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.1 Demandas (en litros por segundos) para distintos sectores en la cuenca del Río San José.	2
Tabla 2.5.1 Resumen de las iniciativas de Recarga Artificial en Chile.	14
Tabla 2.6.1 Ventajas y desventajas principales de los métodos de recarga estudiados por Steiner (2012) y DGA (2014a).	23
Tabla 4.2.1 Probabilidades de excedencia fluviométricas de 5%, 10%, 20%, 50% y 90% para las 2 estaciones de estudio con sus respectivos períodos de retorno.	45
Tabla 4.3.1 Evapotranspiración (mm) medida en distintos puntos de la cuenca	48
Tabla 4.3.2 Evaporación (mm) medida en la cuenca	49
Tabla 6.2.1 Resumen características principales de los sectores acuíferos	72
Tabla 6.3.1 Balance hídrico para la subcuenca Azapa Alto	75
Tabla 6.3.2 Balance hídrico para la subcuenca Río San José Bajo	76
Tabla 6.4.1 Resumen de calificaciones estimativas de distintos autores para transmisividad.	79
Tabla 6.4.2 Resumen de calificaciones estimativas de distintos autores para permeabilidades.	81
Tabla 6.4.3 Resumen de calificaciones estimativas de distintos autores para coeficientes de almacenamiento.	82
Tabla 7.2.1 Datos de muestras de agua subterránea del INH.	94
Tabla 7.3.1 Datos de muestras de agua superficial del INH.	99
Tabla 8.3.1 Datos necesarios para calcular el volumen de almacenamiento	103
Tabla 8.6.1 Costos aproximados de la construcción de una zanja.	114
Tabla 8.6.2 Costos e ingresos para el proyecto propuesto utilizando zanjas de infiltración y pozos.	114
Tabla 8.6.3 Costos aproximados de la construcción de un pozo.	115
Tabla 8.6.4 Costos e ingresos para el proyecto propuesto utilizando pozos en zona saturada.	116
Tabla 8.6.5 Costos e ingresos para el proyecto propuesto utilizando pozos en zona saturada	117
Tabla 11.1.1 Información estaciones meteorológicas.	127
Tabla 11.2.1 Información estaciones fluviométricas.	130
Tabla 11.3.1 Pozos en desuso utilizados para construir la estratigrafía subsuperficial	132
Tabla 11.4.1 Resistividades para cada unidad obtenidas con un loop de 200 m x 200 m.	136
Tabla 11.5.1 Expedientes utilizados en la determinación de transmisividad.	138
Tabla 11.6.1 Estaciones de monitoreo de nivel freático en la cuenca.	145
Tabla 11.6.2 Estaciones de monitoreo de nivel freático en el acuífero.	146

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.6.1 Esquema del funcionamiento de barreras o diques interviniendo un río.	19
Figura 2.6.2 Esquema del funcionamiento de la recarga inter-dunas	21
Figura 2.6.3 Sistema de dolinas, almacenamiento y modo de extracción por medio de un pozo o sondaje	23
Figura 2.7.1 Esquema resumen de cómo realizar la elección del método	29
Figura 3.1.1 Delimitación de la cuenca del Río San José, sus respectivas subcuencas y red hidrográfica.	34
Figura 3.2.1 Delimitación de las unidades geomorfológicas	36

Figura 4.1.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas de la DGA en la cuenca del Río San José. ...	38
Figura 4.1.2 Distribución de las isoyetas en la cuenca del Río San José .....	42
Figura 4.2.1 Ubicación de las estaciones fluviométricas de la DGA en la cuenca del Río San José. ...	43
Figura 4.3.1 Mapa con las estaciones de la INIA con datos de evapotranspiración y la variación de esta en la cuenca. ....	48
Figura 5.1.1 Mapa de la distribución de los distintos depósitos no consolidados presentes en la cuenca del Río San José. ....	51
Figura 5.1.2 Mapa de la geología del sector de estudio. ....	54
Figura 6.1.1 Delimitación de unidades según su potencial hidrogeológico.....	63
Figura 6.2.1 Acuífero definido en la zona y dirección de flujo subterráneo.....	64
Figura 6.2.2 Perfil hidrogeológico sector Cabuza .....	66
Figura 6.2.3 Perfil hidrogeológico sector Las Riveras.....	67
Figura 6.2.4 Perfil hidrogeológico sector San Miguel .....	68
Figura 6.2.5 Perfil hidrogeológico sector Las Maitas .....	69
Figura 6.2.6 Perfil hidrogeológico sector Pago de Gómez .....	70
Figura 6.2.7 Perfil hidrogeológico sector Ciudad – Saucache .....	71
Figura 6.2.8 Perfil hidrogeológico sector Arica Costa.....	72
Figura 6.2.9 Ubicación perfiles geofísicos de ambos estudios. Escala 1:200.000 .....	74
Figura 6.2.10 Perfil longitudinal geofísico del valle.....	74
Figura 6.4.1 Transmisividad en los distintos sectores del acuífero de Azapa. Escala 1:150.000. ....	79
Figura 6.4.2 Permeabilidad en los distintos sectores del acuífero de Azapa. Escala 1:150.000. ....	81
Figura 6.5.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo de niveles freáticos de la DGA y sus respectivas profundidades. Escala 1:150.000. ....	84
Figura 7.1.1 Ubicación de pozos y estaciones de monitoreo de calidad de aguas. Escalar 1:400.000..	89
Figura 7.4.1 Diagrama de Piper. ....	100
Figura 8.1.1 Ubicación de sectores favorables para el proceso de recarga artificial del acuífero de Azapa. Escala 1:250.000.....	102
Figura 8.5.1 Sector Cabuza con una posible ubicación del proyecto. Escala: 1:15.000. ....	106
Figura 8.5.2 Diseño de distribución de las zanjas filtrantes para el área disponible en Cabuza. ....	107
Figura 8.5.3 Diseño del proyecto propuesto de pozos en zona saturada con sus respectivas dimensiones. ....	109
Figura 8.5.4 Diseño en profundidad de cada pozo propuesto con sus respectivos elementos de funcionamiento.....	111
Figura 8.5.5 Sector Pago Gómez con posible ubicación del sistema de pozos. Escala: 1:5.000.....	112
Figura 8.5.6 Diseño del proyecto propuesto de pozos en el sector Pago Gómez. ....	113
Figura 11.4.1 Perfil TEM del sector AZ-1. ....	136
Figura 11.4.2 Perfil TEM del sector AZ-2.....	137
Figura 11.4.3 Perfil TEM del sector AZ-3.....	137
Figura 11.4.4 Perfil TEM del sector AZ-4.....	138
Figura 11.5.1 Prueba de Bombeo Expediente N°406.....	139
Figura 11.5.2 Prueba de Bombeo Expediente N°491.....	139
Figura 11.5.3 Prueba de Bombeo Expediente N°511.....	140

Figura 11.5.4 Prueba de Bombeo Expediente N°563.....	140
Figura 11.5.5 Prueba de Bombeo Expediente N°649.....	141
Figura 11.5.6 Prueba de Bombeo N°742. ....	141
Figura 11.5.7 Prueba de bombeo N°886. ....	142
Figura 11.5.8 Prueba de Bombeo N°919. ....	142
Figura 11.5.9 Prueba de Bombeo N°1420.....	143
Figura 11.5.10 Prueba de bombeo N°1595.....	143
Figura 11.5.11 Prueba de Bombeo N°1596.....	144
Figura 11.5.12 Prueba de Bombeo N°1599.....	144
Figura 11.5.13 Prueba de Bombeo N°1960. ....	145
Figura 11.6.1 Variación de los niveles estáticos en estación Cerro Moreno.....	147
Figura 11.6.2 Variación de los niveles estáticos en estación Hotel El Paso. ....	147
Figura 11.6.3 Variación de los niveles estáticos en estación Las Riveras de Madrid. ....	148
Figura 11.6.4 Variación de los niveles estáticos en estación Santa Irene Sur.....	148
Figura 11.7.1 Esquema elaborado por Azzout (1994) para determinar Cs.....	149

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1.1 Precipitación Anual en la estación Arica Oficina entre 1975 y 2018.....	39
Gráfico 4.1.2 Precipitación Anual en la estación Río San José en Ausipar entre 1979 y 2016. ....	40
Gráfico 4.1.3 Precipitación Anual en la estación Central Chapiquiña entre 1969 y 2018. ....	40
Gráfico 4.1.4 Precipitación Mensual en la estación Chapiquiña. ....	41
Gráfico 4.2.1 Caudales y precipitaciones anuales en la estación Río San José en Ausipar entre 1990 y 2016.....	44
Gráfico 4.2.2 Caudales y precipitaciones anuales en la estación Río Laco en Cosapilla entre 1996 y 2018.....	44
Gráfico 4.2.3 Caudal mensual en la estación Río san José en Ausipar.....	46
Gráfico 4.2.4 Caudal mensual en la estación Río Laco en Cosapilla. ....	46
Gráfico 4.2.5 Probabilidad de Excedencia Mensual.....	47
Gráfico 6.5.1 Variación de los niveles estáticos en estación Las Vargas.....	85
Gráfico 6.5.2 Variación de los niveles estáticos en Pago Gómez San Elías. ....	85
Gráfico 6.5.3 Variación de los niveles estáticos en Centella. ....	86
Gráfico 6.5.4 Variación de los niveles estáticos en Las Ánimas. ....	86
Gráfico 6.5.5 Variación de los niveles estáticos en Pascual Roco. ....	87
Gráfico 6.5.6 Variación de los niveles estáticos en Escuela Chitita N°28.....	87
Gráfico 7.2.1 Concentración de cationes mayores en aguas subterráneas.....	90
Gráfico 7.2.2 Concentración de Cloruro en aguas subterráneas. ....	90
Gráfico 7.2.3 Concentración de Sulfato en aguas subterráneas.....	91
Gráfico 7.2.4 Concentración de Arsénico en aguas subterráneas. ....	92
Gráfico 7.2.5 Concentración de Boro en aguas subterráneas. ....	92
Gráfico 7.2.6 Monitoreo de pH en aguas subterráneas. ....	93
Gráfico 7.2.7 Monitoreo de conductividad eléctrica en aguas subterráneas.....	93
Gráfico 7.3.1 Concentración de cationes principales en aguas superficiales.....	95

Gráfico 7.3.2 Concentración de Cloruro en aguas superficiales.....	95
Gráfico 7.3.3 Concentración de Sulfato en aguas superficiales.....	96
Gráfico 7.3.4 Concentración de Arsénico en aguas superficiales. ....	97
Gráfico 7.3.5 Concentración de Boro en aguas superficiales.....	97
Gráfico 7.3.6 Monitoreo de pH en aguas superficiales. ....	98
Gráfico 7.3.7 Monitoreo de conductividad eléctrica en aguas superficiales.....	98
Gráfico 11.1.1 Precipitación Anual en la estación Azapa entre 1969 y 2018.....	127
Gráfico 11.1.2 Precipitación Anual en la estación Belén entre 1975 y 2018.....	128
Gráfico 11.1.3 Precipitación Anual en la estación Belén entre 1969 y 2018.....	128
Gráfico 11.1.4 Precipitación Anual en la estación El Buitre Aeródromo entre 1986 y 2011.....	129
Gráfico 11.1.5 Precipitación Anual en la estación Murmuntane entre 1971 y 1987.....	129
Gráfico 11.1.6 Precipitación Anual en la estación Río Tignamar en Angostura entre 2006 y 2018...	130
Gráfico 11.2.1 Caudales anuales en la estación Río San José antes Bocatoma Azapa entre 1975 y 1984.....	131
Gráfico 11.2.2 Caudales anuales en la estación Río San José en Livilcar entre 1937 y 1945. ....	131
Gráfico 11.2.3 Caudales anuales en la estación Río Tignamar en Angostura entre 2006 y 2018. ....	132
Gráfico 11.2.4 Caudales anuales en la estación Río Tignamar en Tignamar entre 1995 y 2005. ....	132

# 1. Introducción

## 1.1 Problemática

La distribución del territorio chileno le atribuye una gran variedad de características climáticas, lo que conlleva a una disposición heterogénea de los recursos hídricos a lo largo del país afectando al desarrollo de la población.

La región subtropical, se ve afectada durante todo el año por el anticiclón del pacífico sur-oriental, el cual se caracteriza por sus altas presiones que bloquean el ingreso de los frentes meteorológicos acompañados de precipitaciones, por lo que la zona se rige por un clima predominantemente árido y temperaturas más cálidas que en el sector sur, lugar donde el anticiclón pierde su capacidad de bloqueo dejando precipitaciones más abundantes y un abastecimiento mayor de los cuerpos de agua existentes. Esto se evidencia en el carácter templado del clima en esta región cuyas temperaturas disminuyen hacia latitudes más altas.

Junto a la evolución climática propia del territorio, el fenómeno del calentamiento global provocado por la emisión de gases de efecto invernadero ha estado generando variaciones climáticas en los últimos años, las cuales han sido registradas y utilizadas en el estudio de variabilidad climática de CONAMA (2006) con el objetivo de elaborar una serie de modelos en distintos escenarios que proyecten las consecuencias en Chile para finales del siglo XXI. Considerando los escenarios más severos se estima una elevación del nivel del mar de aproximadamente 20 cms debido al aporte de agua producto del acelerado derretimiento de los glaciares causado por mayores temperaturas, lo que también provocaría que la isoterma 0 sufra un alza de altura acotando el área de reserva de nieve. En tanto, las precipitaciones se verán disminuidas en un 15% en relación a los valores actuales, excepto en la zona austral en invierno y la zona altiplánica en verano.

Debido a lo anteriormente expuesto, el manejo y conservación de los recursos hídricos es importante para evitar un déficit a largo plazo, puesto que sustenta las principales actividades económicas del país. Ante este escenario se han realizado diversos estudios sobre la heterogeneidad de la demanda del agua (ODEPA, 2016; CEPAL, 2012; Salazar, 2003), en donde se aprecia que el mayor consumo de aguas subterráneas se da en la agricultura con un 46%, luego sigue el abastecimiento de agua potable para la población con un 35% y un 16%

para la industria. Además, se debe considerar que los usuarios son distintos a lo largo del territorio, siendo la minería el mayor consumidor en el norte, la industria y el riego para la agricultura en el centro-sur, y las hidroeléctricas en el sur. Estos estudios plantean que los requerimientos de agua han ido en aumento causando una sobreexplotación de la mayoría de los acuíferos, lo cual se ve agravado por la contaminación producto de la actividad antrópica.

Este es el caso de la cuenca del Río San José, ubicada en la XV Región de Arica y Parinacota, cuyo cauce principal es el recurso que abastece tanto a la población del valle de Azapa como a las industrias que se desarrollan ahí. Este cuerpo de agua circula por superficie solo durante períodos húmedos, dado que en los meses estivales se produce un aumento de su caudal debido al invierno altiplánico, cuyas precipitaciones son de alta intensidad y corta duración, mientras que el resto del año el recurso fluye de manera subterránea. Pese a esto último, las crecidas que experimenta el río San José no son suficientes para proveer del recurso a la creciente población del valle ni a la agricultura de la zona debido a que gran parte de este caudal desemboca en el mar perdiéndose como fuente de agua apta para consumo.

La actividad agrícola es especialmente importante, ya que las condiciones de agua, suelo y clima son óptimas para la producción de hortalizas durante todo el año, permitiendo abastecer el mercado hortícola de la zona central en épocas de menor producción (INE, 2010). Es por esto que las principales hortalizas cultivadas en esta región poseen un alto valor comercial atribuido a su productividad, convirtiendo a la horticultura del valle de Azapa en una actividad altamente competitiva a nivel regional y nacional (González *et al.*, 2013), lo que ha traído como consecuencia un aumento de la superficie de cultivo y del rendimiento del agua, como se puede observar en la Tabla 1.1.1, donde además de la agricultura, otros sectores económicos también han aumentado sus demandas del recurso en los últimos años.

Tabla 1.1.1 Demandas (en litros por segundos) para distintos sectores en la cuenca del Río San José. Como se observa, existe un aumento de las demandas en todos los sectores: industria, minería, turismo entre otros

Fuente: extraído de DGA (2009)

<b>Año</b>	<b>Agropecuario</b>	<b>Potable</b>	<b>Industrial</b>	<b>Mínero</b>	<b>Energía</b>	<b>Turismo</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	1228	447	247	17	6	4	2039
<b>2015</b>	1395	546	475	21	6	7	2540
<b>2030</b>	1395	751	1270	29	6	11	3552

Este trabajo pretende dar una alternativa para solucionar el problema de abastecimiento hídrico que afecta a esta zona, buscando sectores que tengan parámetros hidrogeológicos aptos para una infiltración artificial. Si bien, existen estudios y proyectos de recarga propuestos como la memoria de título de Jiménez (2013)/ INH (2014), este documento busca dar otra opción las metodologías de recarga, considerando otras variables. Además, se intenta incorporar información de años posteriores a estos proyectos que pueda ayudar a corroborar la vigencia de la información propuesta en estos estudios.

Por último, se busca que la recarga se realice por medio de métodos que tengan el menor impacto social y ambiental posible, ya que el objetivo es otorgar un beneficio a la comunidad instaurada en esta región.

## 1.2 Impactos de la escasez hídrica

El agua es un motor vital para mantener la vida en los ecosistemas, así como también es el principal impulsor de diversas actividades económicas para la población global. Por esta razón, la disminución en su disponibilidad natural ha sido motivo de preocupación para los organismos entendidos en materias medioambientales. Entre ellos la corporación Fundación Chile, ha publicado en el año 2018 la “Radiografía del Agua”, documento en el que recopila una gran variedad de datos de distintos autores que sustentan la existencia de una crisis hídrica.

En dicho documento se establece, en primer lugar, que el agua dulce es un bien escaso ya que representa un 2,5% del agua total en el planeta, pero la mayor parte de esta agua dulce se encuentra en zonas inaccesibles como glaciares y polos, por lo tanto, el agua apta para consumo humano, agrícola e industrial, se reduce a un 0,62%. Esa cifra junto con el aumento exponencial de la población que actualmente sobrepasa los 7.600 millones de habitantes, resultan en un aumento de la demanda de alimentos y, por ende, de agua, ya que una persona en promedio bebe de 2 a 5 litros diarios pero la producción del alimento que consume requiere de 3000 a 5000 litros diarios. Esto posiciona a la agricultura como el sector económico que utiliza mayores cantidades de agua en su producción, ocupando un 70% de todos los recursos hídricos disponibles, en particular, la industria pecuaria consume grandes cantidades por animal siendo los tres más grandes consumidores; cerdos, vacas lecheras y bóvinos, los cuales requieren de 13,2, 132 y 45,4 l/día. Esta estimación corresponde a lo necesario para la vida del animal y para el proceso productivo.



Estas circunstancias se tornan aún más negativas por el cambio climático que provoca una merma en la frecuencia de las precipitaciones, las que se concentran en períodos de tiempo cortos, causando desastres como tormentas e inundaciones que constituyen el 55% de las muertes por eventos climáticos, mientras que la sequía es responsable de un 35% de pérdidas humanas.

La sequía se produce cuando la demanda supera a la oferta hídrica, la que es de 0,01 m<sup>3</sup>/s en algunas cuencas de la zona norte, mientras que en el sur alcanzan 3.480 m<sup>3</sup>/s en la región de Magallanes. Particularmente la cuenca del río San José presenta una oferta de 1,11 m<sup>3</sup>/s, lo que implica una brecha hídrica (diferencia entre oferta y demanda) del 87%, dado que su fuente de abastecimiento principal, que corresponde al acuífero de Azapa, se encuentra sobreexplotado a tal punto que fue declarado zona de prohibición por la DGA en 1996 (DGA, 1998), por lo tanto, no cuenta con el suficiente abastecimiento para cubrir la demanda.

Este déficit de los recursos es la causa de una serie de problemas (DGA, 1998):

*Déficit de agua para satisfacer la demanda de riego en la agricultura:* causando una alta criticidad de este sector económico, ya que a falta de agua para riego puede haber una pérdida significativa en la superficie de cultivo, la cual ha tenido un gran crecimiento en los últimos años, pasando de una superficie de 684 Ha en 1942 a 3213 Ha en 1996. Es por ello, que se ha optado por implementar el riego tecnificado (por goteo) en un 53% de las superficies de cultivo (INE, 2010) para aprovechar de mejor manera el uso del agua, puesto que la eficiencia de este tipo de riego es de un 90%, es decir, se ha reducido el excedente de agua de riego que pudiese ser infiltrada de manera natural al acuífero a un 10%.

*Deterioro en la calidad físico-química de las aguas subterráneas en el valle:* relacionado a un aumento en la salinidad de las aguas subterráneas, debido a la incorporación de agua transvasada desde el río Lauca. Es por ello que las aguas ocupadas en riego deben ser tratadas previamente.

*Déficit de recursos de agua para satisfacer las necesidades de las comunidades del sector precordillerano:* principalmente de las comunidades en Tignamar, Saxamar, Lupica, Belén, Chapiquiña y Murmuntane, que pertenecen al grupo étnico Aymara. Constituyendo limitaciones en su calidad de vida y en el desarrollo de la población.

Falta de una organización de usuarios de las aguas subterráneas del valle: dado que existen distintos usuarios del recurso (agrícola, agua potable, industrial, etc) no es posible optimizar el uso del agua subterránea. Además, se ha estimado que hay captaciones no regularizadas, ni constituidas formalmente e incluso no autorizadas.

Pérdidas por filtraciones en el canal Azapa: este consiste en un canal de riego que no ha recibido una adecuada mantención en los últimos años, por lo tanto genera pérdidas para los usuarios originalmente contemplados. Sin embargo, es una fuente de infiltración para el acuífero de Azapa, aumentando la cantidad de agua subterránea disponible para los usuarios de distintas captaciones, esto genera conflictos entre los actores involucrados.

De esta manera, la administración del agua se vincula directamente con el desarrollo sustentable de la región, impactando en los principales objetivos que busca esto último, siendo los más perjudicados:

Agua limpia y saneamiento. Ante un escenario de escasez hídrica no se puede asegurar la disponibilidad del recurso ni el saneamiento para toda la población que depende de ello.

Fin de la pobreza y hambre cero. Ambos objetivos se ven afectados por el déficit, porque sin la cantidad de agua suficiente para satisfacer las necesidades de consumo y producción de alimentos, entonces los precios experimentan un aumento desmedido en aquellos productos generados en la agricultura, causando pobreza en la población que se sustenta de esta actividad

Salud y bienestar. Es imposible garantizar una vida sana si no se cuenta con requerimientos básicos. Dado que la salinidad de las aguas subterráneas ha incrementado, es lógico que aumenten las enfermedades relacionadas a la ingesta de agua de baja calidad.

Producción y consumo responsable. A falta de recursos hídricos, no se puede garantizar una producción y consumo sostenible.

Acción por el clima. La crisis se ha acentuado producto de la falta de acciones y responsabilidades en el cambio climático, lo cual ha repercutido fuertemente en la recarga natural de los acuíferos, causando pérdidas importantes del recurso.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Generales

La finalidad de esta tesis es localizar las zonas con potencial para realizar una recarga artificial en la cuenca del Río San José. De esta manera se busca mermar el déficit hídrico al que se encuentra sometido el acuífero principal, producto de la disminución de la recarga natural (problema generado por el cambio climático) y de los elevados requerimientos de la agricultura.

### 1.3.2 Específicos

Objetivo N°1: Caracterizar la geología, hidrología, hidrogeología e hidrogeoquímica de la cuenca de estudio para tener conocimiento del comportamiento del recurso hídrico en la zona. Esto permite establecer sus variables elásticas, niveles estáticos, disponibilidad del recurso, dinámica hídrica, entre otras.

Objetivo N°2: Determinar los sectores apropiados para realizar la recarga artificial, teniendo en cuenta los parámetros analizados en el objetivo anterior.

Objetivo N°3: Definir métodos de recarga según las características de la zona de recarga.

## 1.4 Hipótesis

Mediante el respaldo de antecedentes que se encuentran disponibles, se espera encontrar las áreas con las características hidrogeológicas óptimas para realizar una infiltración artificial al acuífero principal de la cuenca, ya que es el que abastece de agua potable a la población del valle de Azapa y permite el desarrollo de la agricultura. Con ello se busca beneficiar a los sectores que se han visto afectados por la escasez del recurso hídrico.

## 1.5 Metodología

La metodología utilizada para elaborar el análisis y posteriores conclusiones de este trabajo, constará de una recopilación bibliográfica de diversas fuentes (DGA, INIA, DMC, etc) con el fin de establecer la información necesaria de la zona de estudio, que, para este trabajo, se trata de la cuenca del río San José.

Para cumplir con el objetivo principal, se han establecido objetivos específicos que desglosan el estudio en distintas áreas que deberán ser tratadas para lograr una completa caracterización del sector.

El objetivo N°1 se sustentará en la obtención de datos hidrológicos de la cuenca, como los montos de precipitaciones anuales que serán obtenidos desde la base de datos de la DGA para las distintas estaciones pluviométricas distribuidas en todo el territorio de estudio, es decir, desembocadura, sector central y cabecera. Las estaciones seleccionadas para la investigación, deberán cumplir con un mínimo de 20 años de información (lo más completa posible) para que el análisis sea representativo. Junto a lo anterior, se necesitarán los caudales anuales y mensuales de los afluentes más importantes, esto a partir de las estaciones fluviométricas disponibles. Por otro lado, los valores de evaporación serán extraídos de la memoria de Jiménez (2013), en tanto, los datos de evapotranspiración se obtendrán desde las estaciones de la INIA, los cuales se incorporarán en el análisis hidrológico para determinar qué cuerpo de agua será el más indicado para aportar suministro al proceso de recarga artificial del acuífero.

La información geológica se obtendrá de la Carta Geológica: Hoja de Arica (García *et al.*, 2004), la cual contiene la descripción correspondiente a depósitos no consolidados, formaciones estratigráficas e intrusivos. De este documento, también se extraerá la geología estructural de la zona, que aportará información concerniente a la porosidad secundaria de las unidades geológicas, de esta manera se establecerán las unidades con potencial hidrogeológico en base a la permeabilidad que presenten.

Por otro lado, el estudio de la hidrogeología se concretará por medio del catastro de expedientes de la DGA y de trabajos previos, los que deberán contener datos de niveles freáticos, columnas estratigráficas, pruebas de recuperación, pruebas de bombeo en pozos de producción y pozos de observación (en caso de existir éstos). Para trabajar correctamente esta información, se van a complementar los datos obtenidos en otros estudios con los calculados mediante las pruebas de bombeo, los que no poseen pozos de observación, por lo tanto la mejor manera para determinar la transmisividad en el pozo de producción (o de bombeo) será utilizando el método de recuperación de Theis cuando exista una prueba de recuperación, en caso de que no exista esta última, entonces se ocupará el método que entregue la mejor estimación. Una vez conseguido este valor se procederá a calcular la permeabilidad mediante la siguiente expresión:  $T/b = k$ , donde “T” es la transmisividad calculada, “k” es la permeabilidad y “b” es el espesor

saturado, el cual se obtendrá a partir de la estratigrafía y el nivel estático. A su vez, el coeficiente de almacenamiento será estimado según el tipo de acuífero, puesto que ninguna metodología que no considere un pozo de observación en la prueba de bombeo podría dar un valor certero.

Finalmente, para determinar la capacidad de almacenamiento, se utilizará la expresión:

$$Va(m^3) = sxA(m^2)xh(m)$$

Esta expresión obtenida a partir de IGME (1984), consiste en calcular el volumen que es capaz de almacenar el acuífero mediante s: coeficiente de almacenamiento, A: área de recarga y h: espesor no saturado.

Con el propósito de no generar contaminación en el acuífero se determinará la calidad de aguas superficiales y subterráneas. Para ello, se compararán los datos obtenidos de ciertos elementos en las estaciones y pozos de monitoreo de la DGA con las concentraciones permitidas por la norma 1330 para agua de riego y 409 para agua potable.

Una vez caracterizada la cuenca, se procederá a determinar cuál o cuáles serán las zonas más apropiadas para realizar la recarga, a partir del análisis realizado de toda la información recopilada. Se necesitará una zona con la suficiente capacidad de almacenar el recurso, con parámetros elásticos adecuados que faciliten el proceso y una fuente de extracción de agua superficial cercana a la zona de recarga, cuyas aguas sean de igual o mejor calidad que las aguas ya existentes en el acuífero.

Finalmente, se determinará el o los métodos más apropiados para realizar el proyecto. Para ello, se considerarán el tipo de acuífero, la red de drenaje, la pendiente, uso del suelo, entre otros, para lograr cumplir el objetivo N°3. Además, será necesario evaluar el costo que requiere llevar a cabo el proyecto propuesto.

## 2 Recarga Artificial

### 2.1 Definición

El término recarga artificial fue definido por Custodio y Llamas (1983) como “La intervención en los procesos de recarga de un acuífero, en los puntos y períodos más convenientes a su régimen de explotación”. En trabajos más recientes de la DGA (2013) el término se refiere a cualquier acción antrópica que aumente la tasa de infiltración natural sobre un acuífero con el fin de tomar ventaja de las propiedades de regulación natural de éste para su utilización posterior o bien para reducir la sobreexplotación en un tiempo prolongado. En el documento realizado por Fernández (2008) para el proyecto Dina-mar (el cual consiste en un proyecto de recarga artificial para los acuíferos de España) define el concepto como un método de gestión hídrica que permite introducir en los acuíferos aguas provenientes de ríos, depuradoras, escorrentía urbana y humedales durante invierno, época en la que el recurso superficial se encuentra en mayor abundancia. Esta inyección de agua se realiza mediante distintas técnicas como zanjas, balsas, pozos, entre otras, para lo cual se necesita comprender el comportamiento de la recarga natural para implementar el dispositivo que mejor se ajuste a las características de ésta, por consiguiente, el estudio de la infiltración natural se realiza considerando parámetros como (Schulz y García, 2015):

- Régimen e intensidad de las precipitaciones.
- Características del suelo: porosidad, tasa de infiltración, grado de humedad, usos, etc.
- Topografía del terreno.
- Los componentes climáticos como temperatura, radiación, etc que determinan la cantidad de agua que será evapotranspirada.
- Parámetros hidrogeológicos del acuífero y de la zona no saturada.
- Vegetación presente en la zona, ya que puede condicionar la evapotranspiración y la escorrentía.

Pese a que puede presentar ciertos inconvenientes resulta más eficiente utilizar este método, puesto que ciertos análisis económicos indican que el agua utilizada en la gestión de recarga es menos costosa que la desalinización de agua de mar y del agua almacenada en presas y balsas, porque las energías invertidas en los procesos de tratamientos de estas aguas son reducidas en comparación del tratamiento de las aguas saladas (Fernández, 2008).

## 2.2 Objetivos de la Recarga

La gestión y uso del agua subterránea contribuye a los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas, ya que cumple papeles fundamentales en la calidad y modo de vida de las personas o comunidades, particularmente de las que habitan en zonas áridas y semiáridas.

La implementación del método de recarga artificial permite el abastecimiento de los reservorios subterráneos con el fin de asegurar la estabilidad del sustento económico de las comunidades para reducir la pobreza, se busca disminuir los riesgos de la salud por contaminación de aguas, aumentar las cosechas agrícolas, elevar las retribuciones económicas, se intenta lograr la equidad en la distribución del agua sobre todo en zonas áridas donde el recurso es más escaso debido al clima predominante, y por último reducir la vulnerabilidad a eventos de escasez como sequías o variaciones de las precipitaciones (UNESCO, 2005).

## 2.3 Beneficios

Las principales utilidades que se destacan son (Fernández, 2006 y DGA, 2013):

- Poder almacenar agua en los acuíferos, lo cual trae importantes beneficios sobre todo en terrenos donde no existe disponibilidad para retener agua en embalses o represas, y permite mantener un volumen considerable de recursos especialmente en sectores aguas abajo donde es utilizada para riego, consumo, agricultura, etc.
- Reducción o eliminación de contaminación por sustancias nocivas tanto en el acuífero como durante el proceso de inyección a través del suelo, lo que es importante para evitar poner en riesgo la salud de las personas, animales y cultivos. Por esta razón la calidad de las aguas que serán introducidas debe ser óptima, es decir, la concentración de contaminantes no debe superar la capacidad de depuración del medio, ni su potencial de recepción de partículas nocivas, tampoco debe colmatar u obstruir los dispositivos de recarga.
- Utilizar el acuífero como medio de regulación, almacenamiento y distribución, para lo cual la infiltración se realiza en las zonas de cabecera de la cuenca, lo que permite aprovechar la dirección de flujo natural para distribuir el agua a los demás sectores.
- Acotar las pérdidas del recurso almacenado en superficie por evaporación.
- Evitar un descenso en el nivel freático y cubrir la demanda en sus periodos más críticos.

- Amortiguar la escasez de la recarga natural como consecuencia de la urbanización, que conlleva la ocupación de áreas para edificar junto con la construcción de canales que disminuye la infiltración en las ciudades.
- Suavizar las diferencias de calidad entre las aguas del acuífero y las que serán infiltradas, esto se cumple si se introduce un fluido más limpio para evitar que el de menor calidad en el acuífero se extienda formando una barrera hidráulica.
- Permite la regeneración hídrica de ríos, lagos, humedales, salares, por mencionar algunos cuerpos de agua que se han visto afectados por la escasez y sobreexplotación.
- Prevenir problemas relacionados a estructuras, las edificaciones construidas en la zona pueden sufrir daños debido a la presión que ejercen donde se ha profundizado el nivel freático.
- Reutilización de aguas residuales urbanas, las cuales pueden ser depuradas para utilizarlas como recarga.
- Mejora la economía manteniendo estables las demandas hídricas para los sectores económicos (entre ellas se encuentra la agricultura, la minería y las hidroeléctricas).
- Por último, se perfila como una forma de controlar la desertización, el cambio climático y ayuda a evitar la degradación del suelo.
- Evita las intrusiones salinas por contaminación con aguas costeras.

## 2.4 Limitaciones

Si bien el método trae muchos beneficios, tiene ciertas limitaciones que son importantes de considerar (Fernández, 2006):

- Escaso conocimiento sobre el tema, lo cual se evidencia en la ignorancia de la población con respecto a sus capacidades y posibilidades.
- Control durante el diseño y construcción, ya que en numerosas ocasiones se utilizan los caudales de ríos generando impactos ambientales.
- Escaso grado de conocimiento acerca de las limitaciones que pudiese afectar el correcto funcionamiento de los dispositivos, como por ejemplo, la colmatación de los artefactos utilizados o eventos de sequía. Por esto, es importante realizar un estudio de los impactos ambientales y de los riesgos, antes que nada.

Otras limitaciones propuestas por la DGA (2013) son:



- Dependencia de la permeabilidad del acuífero para que la infiltración sea eficiente.
- Dependencia de la permeabilidad del suelo que condiciona el método de recarga.
- A veces no se cuenta con aguas de la calidad física y química requerida para la recarga.

## 2.5 Experiencias

### 2.5.1 Otros países

A nivel internacional existen países industrializados que invierten en dispositivos de recarga artificial como USA, Reino Unido, Alemania, por mencionar algunos, sin embargo, en aquellos países en crecimiento cuentan con algunos programas en desarrollo como Nueva Zelanda, Taiwán, India, entre otros. La información presentada a continuación ha sido extraída de diversas fuentes, entre ellas los documentos elaborados por Fernández (2006 y 2013) para el proyecto Dina-mar, la tesis de doctorado de Ortiz (2012) y del informe de la DGA (2014a).

En dicha bibliografía se indica que en Europa existen alrededor de 70 experiencias relevantes, entre las que destacan las ciudades de Dusseldorf y Budapest que son totalmente dependientes de recarga artificial, mientras que en países como Hungría el abastecimiento proporcionado por la recarga artificial es de un 45%, en Alemania un 16% y en Eslovaquia representa un 50%. Cabe destacar que en el continente se han hecho ensayos desde 1870 aproximadamente donde se han practicado diferentes opciones, pero no se ha elaborado un protocolo común europeo.

Alemania cuenta con gran experiencia aprovechando la capacidad filtrante del terreno como mecanismo de recarga, siendo su primera experiencia en la ciudad de Chemnitz en 1875 por medio de un canal de infiltración relleno de arena, por lo que a partir de esta experiencia es común la utilización de balsas con fondo de arena, pozos de recarga y drenes enterrados. Otros países como Dinamarca, Finlandia, Suecia, Suiza y Francia utilizan principalmente balsas de infiltración, además algunos de ellos complementan este mecanismo con canales, zanjas, pozos de inyección o drenes. En tanto, el Reino Unido implementa pozos de inyección con agua proveniente de los ríos para infiltrar a través de acuíferos con calizas. España se sustenta de varios mecanismos como balsas de infiltración, pozos de inyección, barrera hidráulica de pozos de inyección, filtración a través del banco del río y canales de infiltración.

En América del Norte hay cerca de 56 instalaciones en USA, lugar que presenta una larga experiencia en recargas tanto por pozos de inyección como por balsas de infiltración, a su vez en el resto del continente los dispositivos más requeridos son pozos de inyección en México y Cuba, y balsas de infiltración en Paraguay y Argentina.

En África las experiencias más importantes están en Sudáfrica por medio de balsas de infiltración, Marruecos con pozos de inyección, Argelia con balsas y canales o zanjas de infiltración, Namibia que utiliza pozos de inyección y diques de retención, siendo éste último sistema también usado en Senegal.

Por otro lado, en Asia existen unos 1000 dispositivos, entre los que destacan proyectos como los de Japón y Turkmenistán donde manejan la infiltración por medio de balsas, canales o zanjas, en Tailandia emplean superficies de recarga, en tanto que países como India, Irán y Uzbekistán ocupan balsas de infiltración. Sin embargo, Israel es el país con mayor desarrollo al respecto con dispositivos más avanzados entre los que predominan los pozos de inyección y balsas de infiltración que utilizan aguas de inundaciones, escorrentía de tormentas y residuales para recargar.

Por último, Australia tiene al menos 5 programas en progreso liderados por CSIRO y CGS con más de 7 instalaciones como respuesta a la sequía y crecimiento poblacional. El sistema más importante que poseen se encuentra en el Delta de Burdekin, el que consiste de canales y zanjas naturales y artificiales que son alimentadas con los excedentes del río Burdekin.

### 2.5.2 Chile

En un estudio sobre la recarga artificial en Chile realizado por la DGA (2016) se manifiesta que en el país las experiencias comenzaron aproximadamente a inicios de los años 70 pero a partir del año 2000 se empiezan a desarrollar algunos proyectos piloto, los cuales fueron dirigidos por DGA, DOH y CNR, con apoyo de Sociedad de Canal del Maipo y Universidad Católica del Norte.

En este mismo informe se presenta un resumen de los proyectos que se encuentran en proceso, los que en su mayoría se encuentran en fase de estudio (Tabla 2.5.1).

Tabla 2.5.1 Resumen de las iniciativas de Recarga Artificial en Chile.

Fuente: extraído de “Estado de Estudios y Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos en Chile” elaborado por DEP-DGA (2016).

Nombre	Fecha	Institución	Tipo	Objetivo
Mejoramiento del Sistema de Aguas Subterráneas para su utilización en Riego en la cuenca del Río Copiapó.	2012	CNR	Estudio	Analizar alternativas a nivel de pre factibilidad, de obras de infiltración de agua subterránea para su uso en riego, proponiendo obras que permitan la utilización óptima de los recursos superficial y subterráneo a través de recarga y del embalsamiento natural o artificial en el Acuífero.
Estudio Recarga Artificial de Acuíferos en el Valle del Aconcagua Usando Derechos Eventuales del Fisco.	2012	DOH	Estudio	Relatar el avance del proyecto de recarga artificial (o recarga inducida) en la cuenca del río Aconcagua, a lo largo del segundo semestre del 2011, y entregar los resultados de los principales análisis hidrológicos realizados; concepciones de proyectos alternativos y complementarios que podrían desarrollarse; y concepción de las etapas iniciales necesarias para construir un buen proyecto.
Análisis de potencialidad de recarga artificial de acuíferos, primera y tercera sección valle del Aconcagua.	2012	DOH	Estudio	Análisis de la factibilidad hidrogeológica de realizar proyectos de recarga artificial en los acuíferos de la primera y tercera sección del río Aconcagua.

Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo.	2012	DGA	Estudio	Identificación de zonas de infiltración relevantes de los acuíferos de las cuencas del Choapa y Quilimarí para la implementación de obras de recarga artificial.
Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego en la Ligua y Petorca.	2013	CNR	Estudio	Analizar alternativas y desarrollar, a nivel de prefactibilidad, obras de recarga artificial, en las cuencas de la Ligua y Petorca, para su uso en riego.
Análisis de alternativas piloto de recarga artificial en la Ligua - Petorca, V Región.	2013	CNR	Piloto	Ejecutar un plan piloto de recarga artificial, de manera de rescatar indicadores y resultados que sirvan para extrapolar la experiencia conseguida, tanto en futuros proyectos pilotos en otras zonas de país, como en proyectos a mayor escala.
Estudio Diagnóstico de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos en las Regiones de Arica y Parinacota a la Región del Maule.	2013	CNR	Estudio	Determinación de zonas potenciales para aplicar recarga artificial de acuíferos, en las principales cuencas ubicadas entre las regiones de Arica y Parinacota al Maule.
Proyecto Piloto de recarga artificial en el acuífero de Santiago.	2013	Sociedad Canalista del Maipo	Piloto	Realizar un piloto de RAA en el acuífero de Santiago; establecer los requerimientos operacionales para el desarrollo de proyectos a mayor escala; y estudiar el

				impacto de la recarga sobre el acuífero.
Caracterización de la cuenca del Río San José para la implementación de un programa de recarga artificial de acuíferos.	2014	INH	Estudio	Estudio realizado para identificar zonas con potencial para implementar un sistema de recarga artificial en la cuenca y proponer metodologías acordes a las características de estas zonas.
Estudio e implementación de un plan piloto de recargas artificiales a los acuíferos del Valle del Aconcagua.	2015	DOH	Piloto (en desarrollo)	Realizar prueba físicas que permitan validar o mejorar los parámetros y variables teóricas, de modo de contar con el conocimiento necesario para diseñar, construir y operar sistemas de recarga artificial de acuíferos a escala industrial, en el valle del Aconcagua.
Evaluación técnica, económica, ambiental y jurídica, para la recarga artificial de acuíferos. Análisis específico para la provincia de Elqui, Región de Coquimbo	2015	UCN	Estudio (por finalizar)	Generación de una herramienta de apoyo, a través de una herramienta SIG, para la toma de decisiones desde el punto de vista, técnico, jurídico, económico y ambiental; sobre la recarga artificial de acuíferos en la provincia de Elqui, Región de Coquimbo
Estudio “Diagnóstico de Metodología para la Presentación y Análisis de Proyectos de Recarga	2015	DGA	Terminado	Desarrollar una guía metodología para la presentación, evaluación y análisis de proyectos de

Artificial de Acuíferos”				recarga artificial de acuíferos en Chile.
--------------------------	--	--	--	---

Según los factores climáticos y de disponibilidad hídrica los métodos más utilizados en los distintos proyectos o iniciativas de recarga artificial en Chile corresponden a (DGA, 2014a):

- Barreras o diques de retención para aguas de crecidas o aluviones.
- Escarificación de cauces.
- Canales, zanjas de infiltración de escorrentía aguas abajo.
- Balsas o lagunas de infiltración
- Pozos de inyección en acuíferos confinados o de porosidad secundaria (fracturas).
- Pozos con galerías.

Particularmente las lagunas de infiltración y los pozos de inyección son las alternativas mejor valoradas y la región donde se concentra la mayor cantidad de proyectos es Valparaíso (DGA, 2014a).

## 2.6 Métodos

Las obras de recarga son clasificadas por DGA (2013) y DGA (2014a) en 2 grupos principales y además son descritas por Fernández (2010) de la siguiente manera:

### 2.6.1 Recarga de carácter superficial

Este método busca el traspaso de agua desde la superficie, ya sea dentro del cauce o fuera de este. Además, por su carácter somero es aplicable en acuíferos libres debido a que éstos no cuentan con un recubrimiento impermeable que impida el ingreso de aguas como ocurre en los acuíferos confinados.

#### 2.6.1.1 Posicionados dentro del cauce

Se busca intervenir el cauce para lograr optimizar el proceso de infiltración a través de este. Para concretar este objetivo se realizan ciertas acciones sobre el lecho o se instalan obras que modifiquen el flujo natural del cuerpo de agua en cuestión.

### ***Serpenteos***

Es la intervención del cauce modificando su movimiento a uno meandriforme por medio de la construcción de diques transversales al cauce con el propósito de aumentar la superficie y tiempo de contacto entre el agua y el terreno, de esta manera se mejora la infiltración natural del cuerpo de agua. Este método solo funciona si el cauce es influente o perdedor, es decir, que el río no esté siendo recargado por el acuífero.

El principal problema que presenta es la acumulación de sedimentos en los diques colmatando el sistema.

### ***Escarificación del lecho del cauce***

Consiste en arar o rascar el lecho del cauce removiendo los materiales finos que se encuentren depositados para que queden en suspensión y así mejorar la infiltración. Es un mecanismo sencillo y económico de utilizar cuando el cauce infiltra.

### ***Zanjas filtrantes***

Corresponde a excavaciones poco profundas y perpendiculares al flujo del río, rellenas con sedimentos de tamaño gravas para favorecer el proceso cuando el cauce infiltra. Con el objetivo de mantener su estabilidad se debe considerar la variabilidad del flujo y la torrencialidad, los cuales condicionan la restauración de la obra cada año. Al igual que la escarificación del lecho, es sencillo y económico de implementar cuando el cauce infiltra al acuífero.

### ***Barreras, diques de retención y represas***

Se trata de diques de poca envergadura cuya función es retener el flujo de agua por un tiempo prolongado en cauces de menor orden en zonas áridas, semiáridas y de transición, con esto permiten atenuar los eventos de crecidas. Según la variabilidad y torrencialidad se elige el tipo de barrera: impermeable, permeable o barreras con orificios o ranuras.

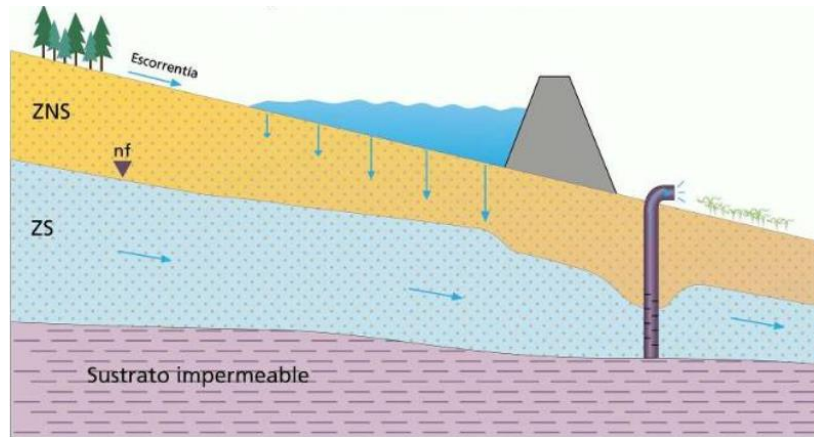


Figura 2.6.1 Esquema del funcionamiento de barreras o diques interviniendo un río  
Fuente: esquema extraído de La Gestión de la Recarga Artificial de Acuíferos en el marco del Desarrollo Sostenible: Desarrollo Tecnológico, Fernández (2010).

### ***Diques permeables y semipermeables***

En los ríos intermitentes se colocan presas con la finalidad de que se retenga el flujo de agua en períodos donde el caudal aumente, ya sea por las precipitaciones o por el deshielo de las zonas nivales cercanas. Esta agua retenida es liberada aguas abajo por medio de los mismos diques cuya permeabilidad permite el paso del agua gradualmente a través de ellos.

### ***Presas de arena***

Consta de pequeñas presas ubicadas en ríos intermitentes encajados en un lecho de baja permeabilidad. Estos afluentes normalmente contienen una carga sedimentaria considerable con materiales permeables (preferentemente arenas graníticas) de modo que formen un acuífero detrás de la presa.

Su costo tiende a ser bajo o moderado.

### ***Filtración en el lecho de los ríos***

El método consiste en inducir la infiltración en el lecho del río por medio de la profundización del nivel freático. El sistema más frecuente para lograrlo es por medio del bombeo de una serie de pozos instalados de forma paralela al cauce y a poca distancia de este para lograr la disminución del nivel dinámico del acuífero cercano al cuerpo de agua, lo que induce al flujo superficial a infiltrarse en el acuífero.



### ***Presas subterráneas***

Se aplica en ríos intermitentes y consiste en excavar zanjas en los materiales del lecho del río para rellenarlos con material fino o impermeable con el fin de aumentar la retención del flujo en los materiales aluviales o permeables del río.

#### 2.6.1.2 Posicionados fuera del cauce

Estos sistemas buscan aumentar el área de recarga en una zona con las características ideales para infiltrar.

### ***Zanjas, acequias o canales***

Son obras lineales de poca profundidad construidas sobre arenas o gravas generalmente, destinadas a almacenar la escorrentía producto de las precipitaciones para que esta sea infiltrada tanto por el fondo como por sus paredes. La principal diferencia entre una zanja y un canal, es que la zanja retiene el agua de escorrentía disminuyendo la erosión en sus paredes y se construyen en serie, en cambio el canal busca transportar el agua por zonas permeables y posee un trazado único.

Pueden ubicarse en zonas de pendiente ya que no necesitan demasiado espacio para ser instaladas.

### ***Balsas, lagunas o piscinas de infiltración***

Obras generalmente de forma rectangular, poco profundas y construidas en serie que buscan retener el recurso hídrico, cuyo volumen refuerza la infiltración debido a la carga hidráulica que ejerce sobre el fondo de la piscina. Tiene una vida útil de aproximadamente 10 a 20 años. Un gran inconveniente de este dispositivo es la necesidad de ocupar extensas áreas de terreno para lograr un volumen de infiltración importante, lo que puede encarecer el costo de la obra y también generar impactos medio ambientales mayores.

### ***Humedales***

En aquellos humedales secos se aprovecha el terreno para instalar lagunas de infiltración.

### ***Superficies de recarga***

Es una obra que se aplica solo cuando hay excedencia hídrica, ya que consiste en rociar agua por aspersión en una superficie del terreno. Es también una técnica de riego muy frecuente en

la actividad agrícola en donde se inundan los campos de cultivo ya que las precipitaciones son irregulares y no compensan los requerimientos mínimos.

Al igual que las balsas, necesita un área de grandes dimensiones y buena permeabilidad para que el proceso sea productivo, además las fluctuaciones hidrológicas limitan su funcionamiento en el tiempo.

### ***Filtración inter-dunar***

Se trata de inundar con aguas de ríos los valles entre dunas costeras, esto genera una mejora en la calidad de las aguas ya existentes en el cuerpo receptor puesto que disminuye la salinidad de estas últimas evitando intrusiones marinas, además de almacenar un volumen importante de agua para futuros usos.

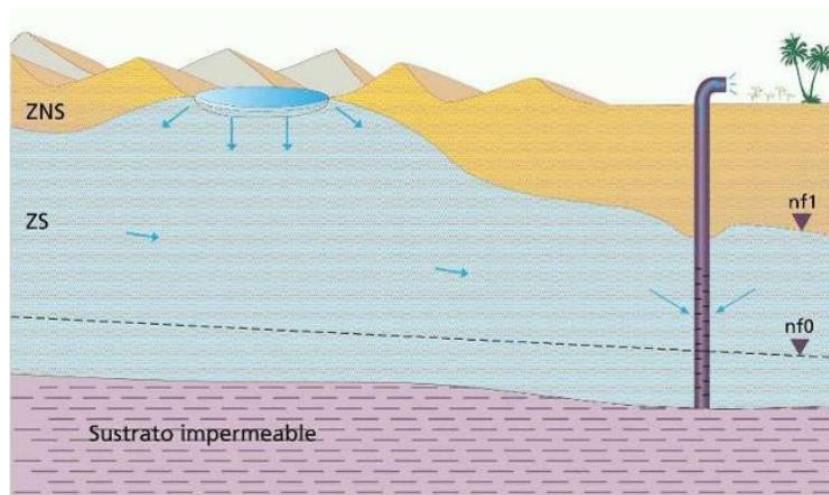


Figura 2.6.2 Esquema del funcionamiento de la recarga inter-dunas

Fuente: esquema extraído de La Gestión de la Recarga Artificial de Acuíferos en el marco del Desarrollo Sostenible: Desarrollo Tecnológico, Fernández (2010).

### 2.6.2 Recarga de carácter profundo

Estos dispositivos se encargan de introducir agua de recarga directamente en la zona saturada del acuífero, por lo tanto, es una metodología aplicable tanto a acuíferos libres como confinados.

### ***Pozos abiertos de infiltración***

Consiste en pozos normalmente utilizados en ciudades, los cuales son rellenados con arena o grava para que el agua conducida hacia ellos sea infiltrada con facilidad. Es una obra de costo

bajo a moderado y se implementa en acuíferos arenosos. Se sugiere evitar la infiltración de la primera escorrentía de precipitaciones por estar más cargada de contaminantes.

***Pozos de inyección y posterior recuperación en el mismo pozo (ASR: Aquifer Storage and Recovery)***

Consiste en sondajes o pozos donde el agua ingresa por gravedad o por presión a la zona saturada del acuífero para luego ser recuperada por medio del mismo pozo de inyección, para ello es mejor que el gradiente hidráulico sea bajo y así impedir que haya mezcla con el agua del acuífero y lograr que la recuperación sea mayor.

Es necesario realizar una adecuada mantención de las tuberías y cribas ya que puede generarse corrosión e incrustaciones en ellas. Tiene una vida útil de 5 a 10 años.

***Pozos de inyección y posterior recuperación en un pozo diferente (ASTR: Aquifer Storage Transfer and Recovery)***

Similar al caso anterior, pero se diferencia en que la recuperación posterior del recurso se realiza en otro pozo, por lo que hay cierto tiempo en que el agua circula por el acuífero para disminuir los potenciales contaminantes del suministro que ha ingresado. El gradiente hidráulico es poco influyente en este caso porque hay un control del agua de recarga desde el pozo de extracción.

***Barreras en pozos de inyección***

Se instala un sistema de pozos dispuestos en forma lineal para inyectar agua y detener la contaminación por intrusión salina en sectores costeros.

***Galerías filtrantes***

Consiste en túneles o excavaciones horizontales construidas en zonas donde la permeabilidad del terreno es baja, pero hay escorrentía suficiente para infiltrar, por lo que se apoya con zanjas que concentran y transportan el flujo hacia donde se realizará la infiltración hacia las galerías.

***Dolinas***

Se aprovechan las cavidades de acuíferos kársticos que tenga conexión con la superficie para usarlo de sumidero de agua.

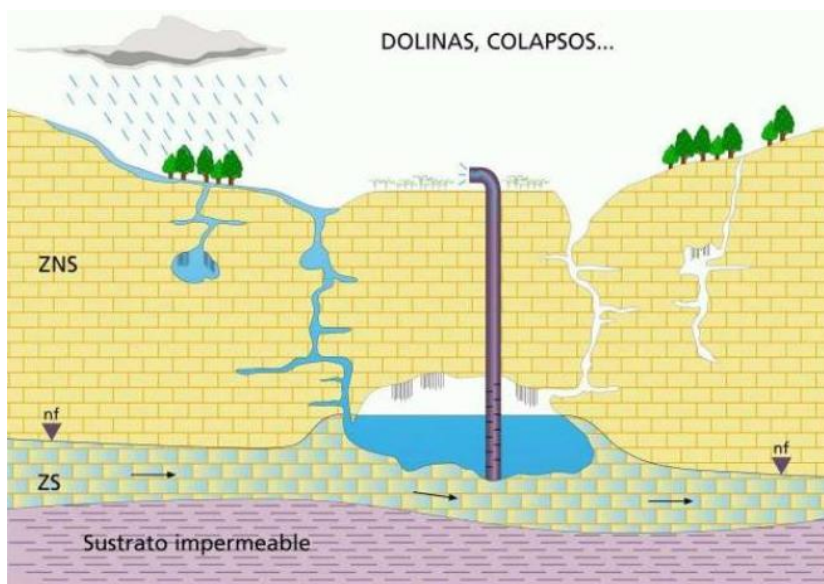


Figura 2.6.3 Sistema de dolinas, almacenamiento y modo de extracción por medio de un pozo o sondaje

Fuente: esquema extraído de La Gestión de la Recarga Artificial de Acuíferos en el marco del Desarrollo Sostenible: Desarrollo Tecnológico, Fernández (2010).

### ***Balsas o zanjas con pozos de infiltración***

Como indica su nombre consta de sistema mixto de balsas, zanjas y pozos de inyección.

### ***Pozos con galerías***

Es una combinación de pozos verticales y galerías, en donde los pozos permiten la inyección de agua desde la superficie hasta las galerías, las cuales filtran el agua hacia el acuífero.

Cada mecanismo tiene ventajas y desventajas que serán importantes de considerar al momento de elegir alguno de ellos. Steiner (2012) ha estudiado algunos aspectos de los métodos más utilizados, los que han sido resumidos en el siguiente cuadro confeccionado por DGA (2014a):

Tabla 2.6.1 Ventajas y desventajas principales de los métodos de recarga estudiados por Steiner (2012) y DGA (2014a).

Técnica	Escala	Coste	Mantenimiento	Requerimientos del suelo	Atenuación de contaminantes	Acuífero permeable no confinado
Barreras en cauce, diques y	Variable	B	M	B	Sí	Sí

represas						
Diques permeables y semi permeables	Variable	B	M	B	Sí	Sí
Presa de arena	Pequeña	B	B	B	Limitado	No
	Tamaños de grano gruesos pueden requerir un nivel impermeable					
Balsas de infiltración	Variable	B	M	A	Si	Si
	En zona con poca pendiente					
Zanjas, canales, galerías de infiltración	Pequeña	M	A	M	Si	Si
	Pueden ser subterráneas. Son viables aún si hay un nivel superior impermeable					
Pozos de infiltración (zona no saturada)	Media	M	A	B	Variable	Si
	Son viables aunque haya un nivel superior impermeable					
Pozos de inyección (zona saturada)	Grande	A	M	B	Limitado	No
	Son viables, aunque haya un nivel superior impermeable. Necesitan monitoreo más continuo.					
Lecho filtrante del río	Grande	A	M	B	Variable	Sí
	Sólo en ríos o masas de agua permanentes					

<b>Técnica</b>	<b>Potencial evaporación</b>	<b>Complejidad</b>	<b>Potencial contaminación acuífero</b>	<b>Requerimientos de calidad agua recargada</b>
Barreras en cauce, diques y represas	A	B	M	B
Diques permeables y semi permeables	B	M	M	B
Presa de arena	M	B	A	B
Balsas de infiltración	A	B	A	B
Zanjas, canales, galerías de infiltración	B	M	B	M
Pozos de infiltración (zona no saturada)	B	M	B	A
Pozos de inyección (zona saturada)	B	A	B	A
Lecho filtrante del río	B	A	A	B

A: Alta importancia, M: Media, B: Baja

## 2.7 Elección del método

Para seleccionar un dispositivo que permita un funcionamiento viable de la recarga, es necesario evaluar ciertos parámetros variables según la zona donde se pretende realizar el proyecto. Si bien en la bibliografía disponible se encuentran una gran cantidad de criterios al respecto, se considerarán los siguientes criterios descritos por la DGA (2014a):

### ***Tipo de Acuífero***

El tipo de acuífero es una característica importante para elegir el método. En caso de que sea libre, la mejor opción es un dispositivo superficial como las balsas de recarga, pozos someros, zanjas, etc., en cambio, si el acuífero es confinado entonces un método en profundidad como los pozos de inyección resultan una elección más adecuada.

### ***Características de la red de drenaje***

El conocimiento sobre el comportamiento de la red hídrica superficial es fundamental para decidir su rol en la recarga. Los excedentes de aquellos ríos que presenten un aumento estacional de su caudal, serán liberados en los cauces de manera controlada o servirán como fuente de recarga por inyección.

### ***Pendiente***

Si bien es un parámetro de poco valor para pozos de inyección, adquiere gran relevancia para la implementación de balsas o canales, esto es porque a pendientes mayores a 20% no es viable su construcción.

### ***Infiltración***

La capacidad de infiltración del suelo es un parámetro importante para los métodos superficiales como balsas, zanjas y canales, para definir sus dimensiones.

### ***Usos del suelo***

El uso del suelo limita los mecanismos de recarga, especialmente aquellos que requieren espacios amplios porque no son compatibles con zonas industriales, pobladas o urbanas.

### ***Profundidad de la zona no saturada***

Se recomiendan profundidades del nivel freático mayores a 5 m para disponer de un volumen de almacenamiento suficiente. También es necesario tener en consideración el tiempo de tránsito, ya que estos factores están estrechamente relacionados.

### ***Transmisividad***

Se sugieren valores sobre los 100 m<sup>2</sup>/d.

### ***Tiempo de tránsito***

El tiempo que demore la recarga en avanzar por el acuífero o por la zona de aireación debe ser lo suficientemente rápido para disminuir la concentración de contaminantes en las aguas ya presentes, puesto que mientras más prolongado sea el tiempo de contacto entre la litología presente y el agua inyectada, esta última captará mayor cantidad de contaminantes.

### ***Concentración de nitratos y cloruros en el acuífero***

La calidad del agua almacenada en el acuífero es un factor sustancial en la decisión de desarrollar un proyecto de recarga, debido a que si se encuentra con un alto grado de contaminación entonces no es recomendable realizar el proyecto, excepto si el objetivo es restablecer la calidad del agua contaminada.

### ***Marco legislativo***

La legislación en Chile regula las obras de recarga según lo estipulado en las normativas respectivas, entre las cuales se encuentran los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas, normativas ambientales y de calidad de aguas, decretos supremos, vulnerabilidad de acuíferos, etc.

En el Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de Recarga de Acuíferos, elaborado por DGA (2014b), se destacan otros criterios basados en experiencias internacionales, los cuales son:

### ***Objetivo de la recarga artificial***

En zonas donde existe abundancia de agua, pero con problemas de calidad, se prefieren métodos que permitan la infiltración a través de la zona aireada para lograr la depuración del recurso, por lo que un método adecuado en este caso se trataría de los pozos de extracción, pues estos



inducen la infiltración del cauce superficial cercano. En cambio, las zonas que presenten problemas de escasez hídrica son idóneas para la aplicación de técnicas de retención de aguas de tormenta, aguas de crecidas, escorrentía superficial, residuales, etc. por medio de balsas, presas e incluso pozos de inyección en caso de que exista experiencia en el tema. Otro caso importante concierne a la sobreexplotación en sectores costeros que puede generar intrusiones salinas en los acuíferos cercanos, por lo que las balsas de infiltración y pozos de inyección (este último sobretodo en acuíferos confinados) son frecuentemente utilizados en estos casos.

### ***Características Climáticas***

Las diferencias climáticas entre períodos lluviosos y secos marcan la disponibilidad del recurso, puesto que en estaciones invernales el excedente del recurso es almacenado para ser usado en épocas de sequía. Esto se logra mediante dispositivos como diques, zanjás y balsas, los que también funcionan como barrera ante eventos extremos.

### ***Tipo de demanda***

La demanda agrícola requiere menos exigencia en el control de calidad del suministro siendo común el uso de canales, zanjás y balsas de infiltración. Sin embargo, la demanda urbana tiene estándares de calidad más elevados, por lo cual el mecanismo de recarga debe asegurar estos requerimientos.

### ***Experiencia***

Este criterio es importante para decidir el sistema de recarga que mejor se ajuste a la zona, ya que es necesario considerar la complejidad en el manejo de los dispositivos, por ejemplo, los pozos de inyección son costosos debido a su construcción, funcionamiento y mantenimiento, especialmente en la descolmatación. Es por esto que los países con menos experiencia prefieren dispositivos más económicos como balsas, diques, canales, etc.

### ***Características geológicas y geomorfológicas***

En superficies de poca pendiente como llanuras aluviales, mesetas y terrazas se ocupan balsas de infiltración, por el contrario, las zonas de mayor pendiente suelen tener pozos de inyección. El perfil de un río también juega un rol en el tipo de instalación, ya que en zonas cercanas a la desembocadura se utilizan balsas de recarga y en los sectores de cabecera del río se instalan embalses de regulación-recarga.

Para el caso en que el nivel freático sea somero se aplican estructuras en el cauce del río.

Para resumir lo anterior se presenta el siguiente esquema recuperado de DGA (2014a):

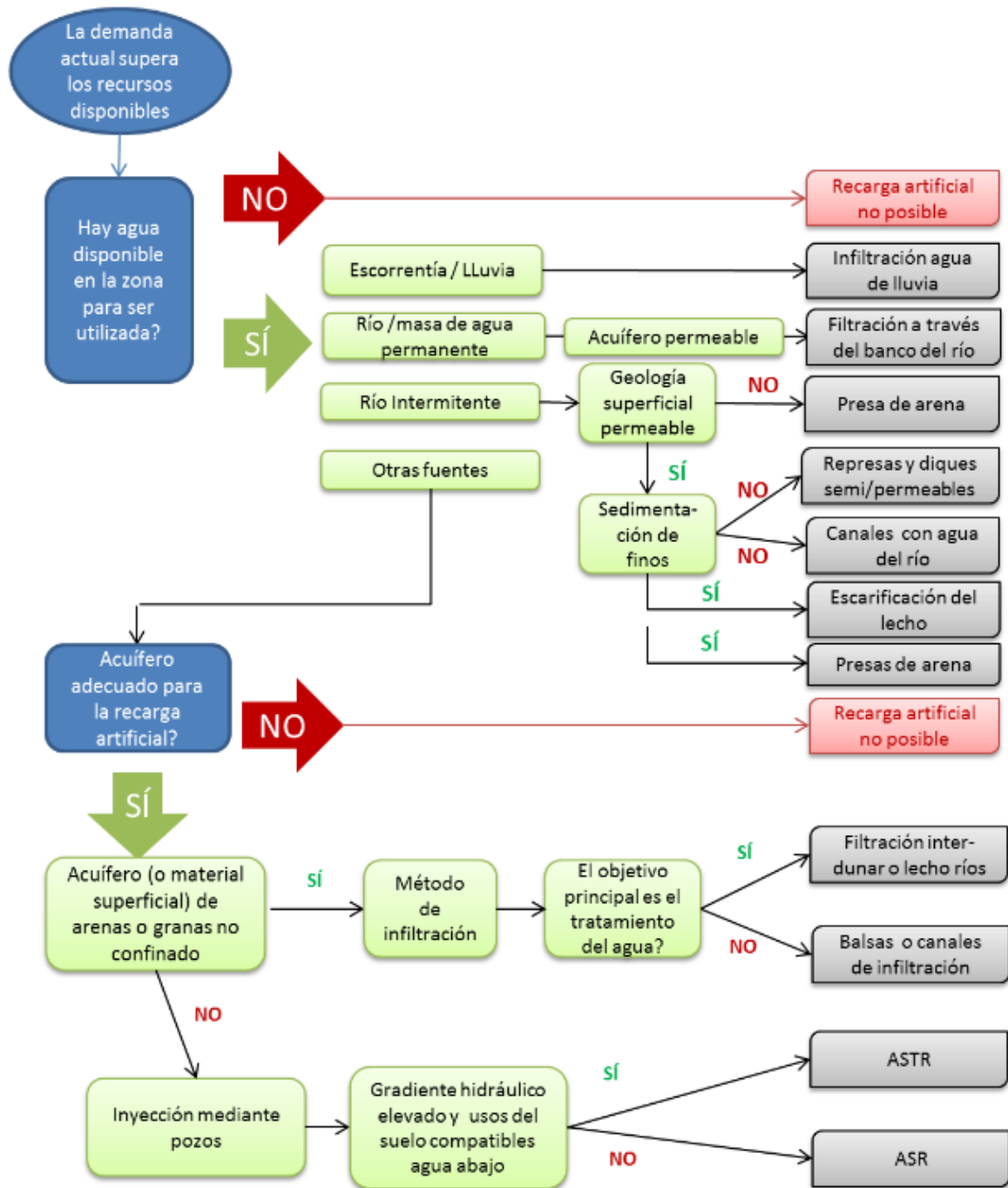


Figura 2.7.1 Esquema resumen de cómo realizar la elección del método

Fuente: extraído de “Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos. Informe Final”. DGA (2014a).

## 2.8 Aspectos Legales

Según lo establecido por la legislación chilena en su decreto con fuerza de ley 1122 del código de aguas, la DGA podrá otorgar derechos de aprovechamiento provisionales para las personas que ejecuten obras de recarga en cualquier zona (incluso aquellas declaradas restringidas), siempre y cuando esta no constituya un daño en los derechos ya otorgados (art 66 de dicha ley). Junto con esto, los titulares de los proyectos establecidos en sectores declarados de restricción o prohibición deberán implementar instrumentos de medición de caudales, volúmenes extraídos, niveles freáticos y comunicar esta información cuando la dirección general de aguas lo solicite (art 67 de la ley antes mencionada).

Adicionalmente, se señala en DGA (2013) que según el artículo N°296 del código de aguas, la DGA deberá supervisar la construcción de las obras, aplicando medidas pertinentes para garantizar una correcta adaptación del proyecto autorizado. Mientras el artículo N°297 determina que en caso de modificaciones o demolición de la obra, quienes la construyan deben otorgar las garantías suficientes para el financiamiento de los costos, las cuales serán devueltas una vez recibida la obra por la DGA.

En caso de quienes deseen ejecutar obras de recarga de aguas deberán realizar la solicitud entregando los siguientes antecedentes, lo cuales se especifican en el artículo 48 de la resolución DGA N°203 del año 2014:

- Descripción de la naturaleza física y situación jurídica del agua a utilizar en la recarga artificial, la que debe ser respaldada con los documentos necesarios que verifiquen el dominio vigente del derecho de aprovechamiento de agua.
- Una memoria técnica que contenga:
  - 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 la 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 infiltración 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 la finalidad 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) Supervisión de la calidad de las aguas en el sector influenciado directamente por la recarga.
  - iii) Control del caudal y volumen de la recarga.
- e) Plan de acción ante un eventual evento de contaminación relacionado con la recarga.

En cuanto a la normativa ambiental, la ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente modificada por la ley 20.173 en el año 2007 en su artículo 10 establece los proyectos susceptibles de causar impactos ambientales, es decir, los proyectos que deben ingresar al SEIA dentro de los cuales no se encuentra la ejecución de obras de recarga, a menos que la obra se efectúe en áreas protegidas como lo establece la letra “p” de dicho artículo o por la letra “a” que tiene relación con los embalses con capacidad superior a 50.000 m<sup>3</sup> o con aquellos que tengan muros con alturas superiores a 5 m (art. 294 del código de aguas).

Asimismo, existe una regulación en la concentración de ciertos elementos, pH, requisitos bacteriológicos, sólidos totales disueltos y conductividad específica que se encuentran en la norma N°1333 para riego modificada en 1987, en la que se establecen los valores máximos para estos parámetros los cuales no pueden ser sobrepasados a excepción de los elementos químicos, los cuales pueden superar la norma en determinados casos autorizados por el Ministerio de Obras Públicas por medio de una resolución fundada.

A la par de esta norma se encuentra la norma N°409 para agua potable, la que cumple la misma función que la anterior, pero con valores y exigencias ajustadas a las necesidades correspondientes. Esto es necesario tenerlo en cuenta al momento de la elección de la fuente de recarga puesto que las aguas infiltradas deben ser de calidad igual o superior a la que existe en el acuífero.

## 2.9 Consideraciones ambientales

La recarga artificial puede impactar de manera negativa en el entorno de instalación de la obra, en los ecosistemas y en los terrenos relacionados a la cuenca en cuestión. En DGA (2014a) se citan los potenciales impactos descritos por DWA (2009) los cuales son:

### ***Aumento de los niveles piezométricos***

Puede generar una saturación del suelo causando la muerte de ciertos tipos de planta, lo cual causaría la invasión de otras especies. Además, afecta en la desestabilización de las edificaciones, aumenta el grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero por estar próximo a la superficie, disminuye la capacidad de filtrar por lo que en épocas de lluvia habría mayor riesgo de inundación, provocando impactos en ciertos ecosistemas sensibles a los cambios en el entorno donde se desarrollan y puede haber mayor concentración de sales debido a la evaporación.

### ***Descenso de los niveles piezométricos***

Esto afecta a los ecosistemas que se nutren de los eventos de crecida de un río, a los árboles que se abastecen de los recursos subterráneos a través de sus raíces ya que pueden perecer, afecta a los terrenos circundantes aumentando el riesgo de subsidencia y los pozos cercanos se secan por falta de agua.

### ***Cambios en la calidad del agua***

Esto es la causa principal de la colmatación en los dispositivos, ya que al cambiar la calidad del agua pueden precipitar elementos que disminuyan la permeabilidad. Puede ocurrir que los elementos As, Fe o Mn circulen por el acuífero al cambiar las condiciones normales de éste, provocando problemas en la salud de la población consumidora de estas aguas.

## 2.10 Requerimientos de información

Lo primero que se necesita para ejecutar un procedimiento de recarga artificial es tener un conocimiento detallado de la cuenca en donde se requiere instalar el proyecto para determinar potenciales zonas de recarga. La información más relevante para poder caracterizar el sector es la caracterización del agua de recarga y del acuífero, determinación de las condiciones tanto meteorológicas como ambientales, etc (DGA, 2013).

### *Características del agua de recarga*

Esta puede provenir del deshielo, crecidas, lluvias, escorrentía, e incluso pueden ser residuales, entre otros orígenes. Es por ello que se hace necesario conocer aspectos básicos de estas fuentes por medio de información disponible de sus caudales medios, máximos y mínimos, su concentración de macroatmentos, sólidos totales disueltos, metales como arsénico, mercurio, compuestos nitrogenados, fósforo, y contenido de gases disueltos.

### *Características del acuífero*

Se necesitan los datos de geología como formaciones, estructuras y litologías. La hidrogeología es fundamental para definir el comportamiento del acuífero, por lo que se debe conocer el espesor, los parámetros hidráulicos, direcciones de flujo, niveles piezométricos, extensión, naturaleza, relleno, etc), también la calidad del agua almacenada será un parámetro relevante para el estudio.

### *Características hidroclimatológicas*

Las variables climáticas participan en la disponibilidad de agua, puesto que pueden intervenir en el balance hídrico provocando pérdidas o ganancias del recurso en el sistema. Para analizar este alcance se necesita la información de la pluviometría, evaporación, evapotranspiración y temperatura.

### *Características ambientales del entorno*

El tipo de instalación de recarga se verá condicionado por la topografía, pendiente, abundancia de vegetación y red de drenaje, esto último permite definir una fuente para obtener recarga.

### 3 Antecedentes Generales

#### 3.1 Ubicación

La zona de estudio se ubica en la XV Región de Arica y Parinacota, entre los 17°30' y 19°15' de latitud sur y los 68°55' y 70°30' de longitud oeste, abarcando una superficie de 3194 km<sup>2</sup>.

Limita con la cuenca del Río Lluta por el norte y con la cuenca costera Río San José - Quebrada Camarones por el sur, las que, al igual que la cuenca tratada en este trabajo, son preandinas exorreicas, es decir, tienen salida fluvial en el océano pacífico. Por otro lado, su límite oeste corresponde a cuencas altiplánicas andinas y pre andinas, endorreicas, es decir, sin salida hacia el océano, dentro de las que destacan Caquena-Cosapilla, Chungará, Lauca y Surire.

Se encuentra dividida en dos subcuencas, Azapa Alto que ocupa un área de 907 km<sup>2</sup> y Río San José, cuya superficie es de 2287 km<sup>2</sup>, ambas se aprecian en el mapa adjunto, donde además se observan los afluentes principales de la cuenca que constituyen (Figura 3.1.1)

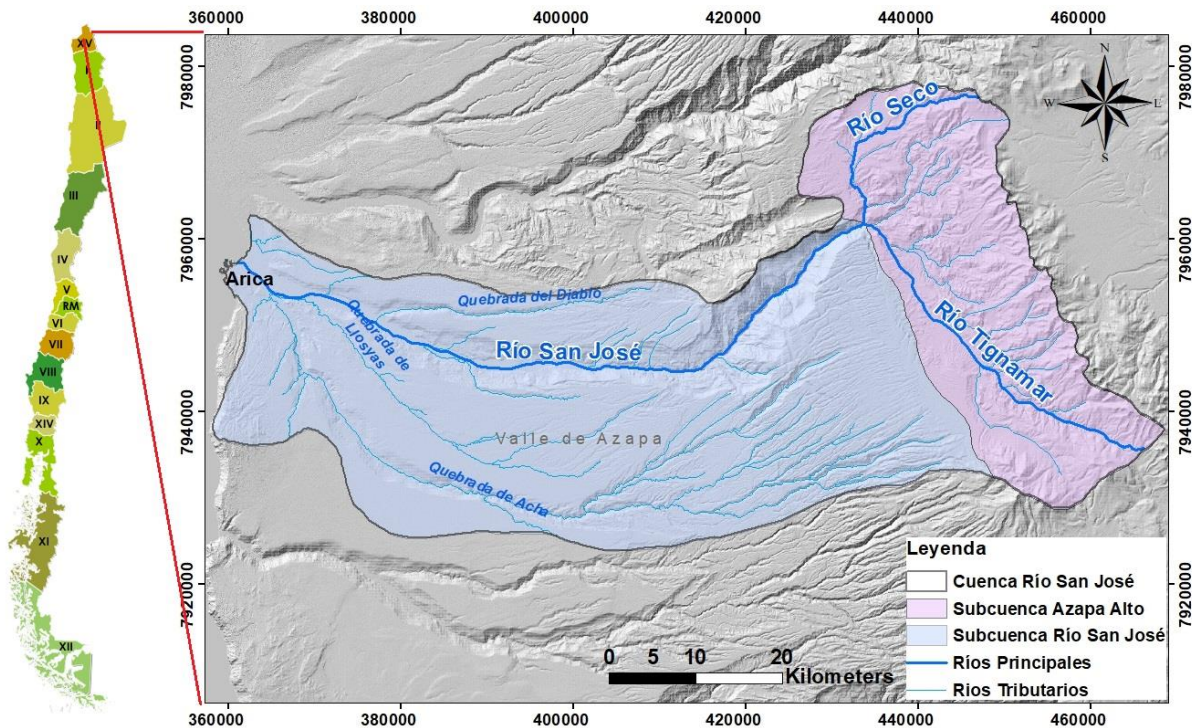


Figura 3.1.1 Delimitación de la cuenca del Río San José, sus respectivas subcuencas y red hidrográfica.

Fuente: Elaboración propia con shape de cuencas y subcuencas de la DGA y shape de red hídrica de la Mapoteca de BCN ([https://www.bcn.cl/siit/mapas\\_vectoriales/index\\_html](https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales/index_html))

## 3.2 Marco Geomorfológico

En la zona se reconocen 4 geomorfologías importantes, cuya orientación predominante es N-S a NNW-SSE, las cuales son, de oeste a este:

**Cordillera de la costa:** es un cordón montañoso de 15 km de ancho y baja altura, aproximadamente 1200 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar), la que disminuye progresivamente hacia el norte y hacia el este. Su topografía es más bien suave, poco accidentada con valles anchos y colinas redondeadas. En su límite occidental con el océano Pacífico, existe un escarpe costero que consiste de una serie de acantilados con una pronunciada pendiente entre 50° y 80° W, mientras que su vertiente oriental es menos abrupta y con menor altitud (García *et al.*, 2004. Niemeyer, 1980).

**Depresión intermedia:** es un área longitudinal (también llamada “la pampa”) ubicada en la región central del sector de estudio, cubierta por depósitos volcano sedimentarios y volcánicos distales miocenos. Corresponde a una zona de topografía plana con una pendiente de 1° a 2° al oeste y un ancho de 44 a 50 km, en tanto, su altura aumenta hacia el oriente desde los 500 - 1000 m hasta 1900 - 2300 m, donde limita con una morfología regional de origen tectónico (García *et al.*, 2004. Niemeyer, 1980).

**Precordillera:** localizada en la región centro-este de la zona de estudio, consiste en una meseta alargada con un ancho entre 20 y 35 km, con una latitud que varía de 1900 - 2300 m a 3200 - 3800 m. Es un área regular y continua, que se encuentra disectada por la quebrada de Azapa o Río San José (García *et al.*, 2004).

**Cordillera occidental (o Alta cordillera):** cordón montañoso de alturas que varían abruptamente de 3200 - 3800 m hasta 5000 - 6350 m, cuyas cumbres mayores corresponden a los volcanes Parinacota (6350 m.s.n.m) y cordón Belén (5100 m.s.n.m), los cuales se ubican fuera de la cuenca de estudio (García *et al.*, 2004).

El siguiente mapa muestra la distribución y límite de las unidades morfoestructurales presentes en la zona de estudio (Figura 3.2.1)



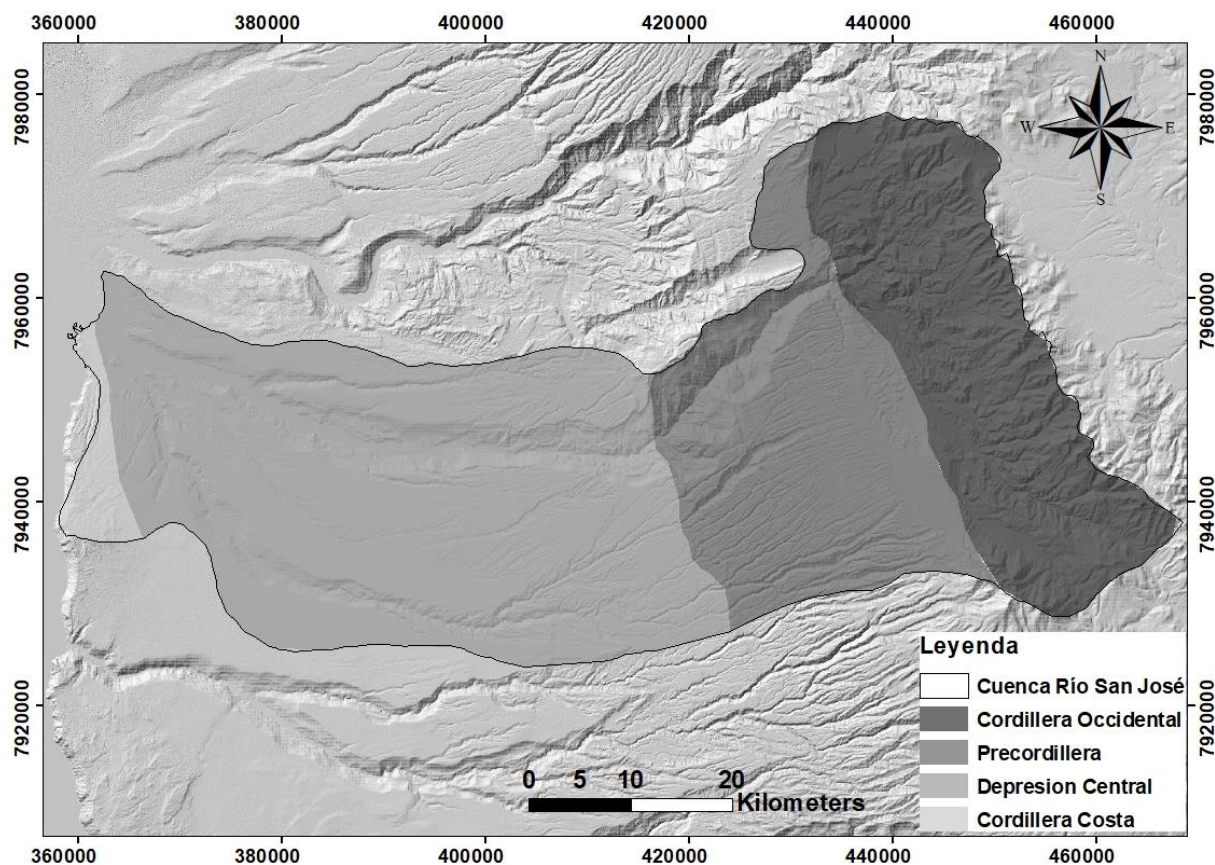


Figura 3.2.1 Delimitación de las unidades geomorfológicas  
 Fuente: Elaboración propia con información extraída de García *et al.*, (2004)

### 3.3 Hidrografía

La hoya hidrográfica tiene como afluente principal al Río San José, el cual tiene una longitud de 80.882 m y nace en la alta cordillera por la confluencia de los ríos Seco de longitud 27.513 m, y río Tignamar de 45.590 m de extensión (DGA) (Figura 3.1.1). Cabe destacar que el valle de Azapa recibe aportes provenientes desde el Río Lauca a través del canal del mismo nombre, que desvía un 20% del caudal del cuerpo de agua y lo transporta hasta el sector de Las Rejas donde se encuentra la central hidroeléctrica de Chapiquiña (central de paso), luego es direccionado hacia el valle de Azapa donde es utilizado para la agricultura (Martínez, 2018).

En cuanto a las características de la red hídrica, estas son más densas y dendríticas en la cabecera correspondiente al sector de alta cordillera, desde la cual descienden hasta la precordillera, donde su incisión es de aproximadamente 1700 m, la cual varía a 1000 m en la depresión central - cordillera de la costa. Es en este sector donde existen 3 afluentes

intermitentes del Río San José, los cuales son las Quebradas del Diablo, Llosyas y La Higuera (García *et al.*, 2004).

### 3.4 Clima

El clima en la costa de la región es predominantemente desértico costero, con alta nubosidad y humedad producto de su cercanía con el océano Pacífico. Entre los 800 y 2200 m.s.n.m el clima es árido a hiperárido, es decir, escasas precipitaciones, baja humedad relativa y altas fluctuaciones térmicas diarias y anuales. Estas variaciones se reflejan en la temperatura promedio del mes de Febrero de 23°C y la del mes de Julio de -3°C, lo cual influye directamente en la vegetación del lugar, puesto que antes de la cota 1800 la presencia vegetal es escasa (excepto en el valle de Azapa). A partir de este punto se desarrolla vegetación cactácea y herbácea hasta los 2200 m, desde donde crece la presencia vegetal arbustiva. En tanto, en la zona de la alta cordillera el clima es húmedo de estepa con altitud con temperaturas que oscilan entre 0° y 9° y precipitaciones nivales durante el invierno y pluviales en verano, esto último se debe al fenómeno del invierno altiplánico que afecta a la región. Lo anterior es causante directo de la población de arbustos altos y plantas pulvinadas observadas a partir de los 4000 m.s.n.m. (García *et al.*, 2004; DGA, 1998)

## 4 Hidrología

### 4.1 Caracterización Pluviométrica

Las precipitaciones son el principal medio de abastecimiento en la cuenca, pueden darse en estado líquido o sólido (nieve), siendo estas últimas frecuentemente acumuladas sobre la isoterma 0, donde se fusionan por acción de altas temperaturas para luego ser transportadas al resto del valle e incorporadas al sistema.

#### 4.1.1 Estaciones Meteorológicas

Dado que el rol de las precipitaciones en el sistema de recarga natural es importante, se necesita establecer su comportamiento, distribución y tendencias en un período de tiempo razonable (>20 años). Para ello se han considerado las estaciones meteorológicas de la DGA: Arica Oficina, El Buitre Aeródromo, Azapa, Río San José en Ausipar, Murmuntane, Central Chapiquiña, Belén, Río Tignamar en Angostura y Tignamar, las cuales se muestran distribuidas en el mapa de la Figura 4.1.1.

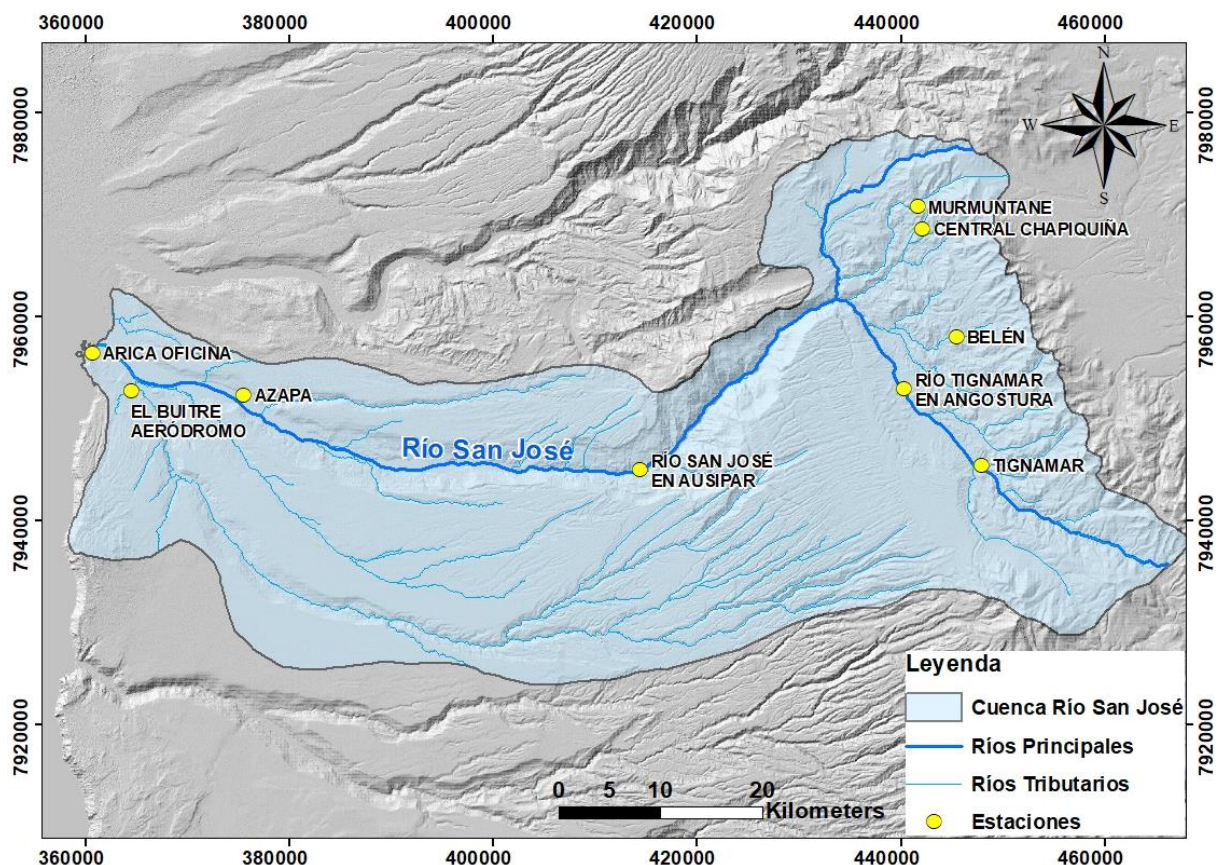


Figura 4.1.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas de la DGA en la cuenca del Río San José.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

Para el análisis de datos se han considerado las estaciones Arica Oficina, Río San José en Ausipar y Tignamar, para representar la caracterización de la cuenca en sus tres sectores principales: cabecera, sector central y desembocadura. La información de las estaciones restantes se encuentra en el Anexo I.

#### 4.1.2 Análisis de datos

Los datos recopilados de la estación Arica Oficina, muestran una disminución de las precipitaciones y una escasa presencia de estas en el sector de la desembocadura, las cuales no superan los 4,5 mm anuales como se observa en el Gráfico 4.1.1. Por otro lado, las estaciones Río San José en Ausipar y Central Chapiquiña (Gráfico 4.1.2 y 4.1.3), registran una mayor cantidad de precipitaciones superando los 100 mm anuales, esto se debe a que las lluvias son poco frecuentes y muy concentradas, por lo que los eventos pluviales son intensos y de corta duración causando aluviones, inundaciones y desbordes del río San José en los años más lluviosos: 1981, 1997, 1999, 2001, 2011 y 2012. Durante estos eventos se han generado anegamientos, aislamiento de la población, corte de caminos, destrucción de puentes, corte de los medios de comunicación, inundación de los campos de cultivo, damnificados, entre otros (Desinventar 1970-2014).

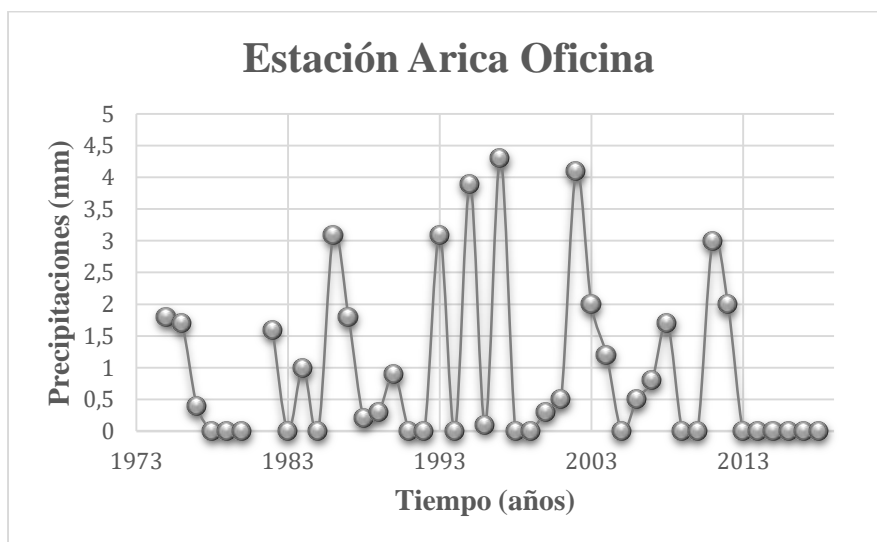


Gráfico 4.1.1 Precipitación Anual en la estación Arica Oficina entre 1975 y 2018.

Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA

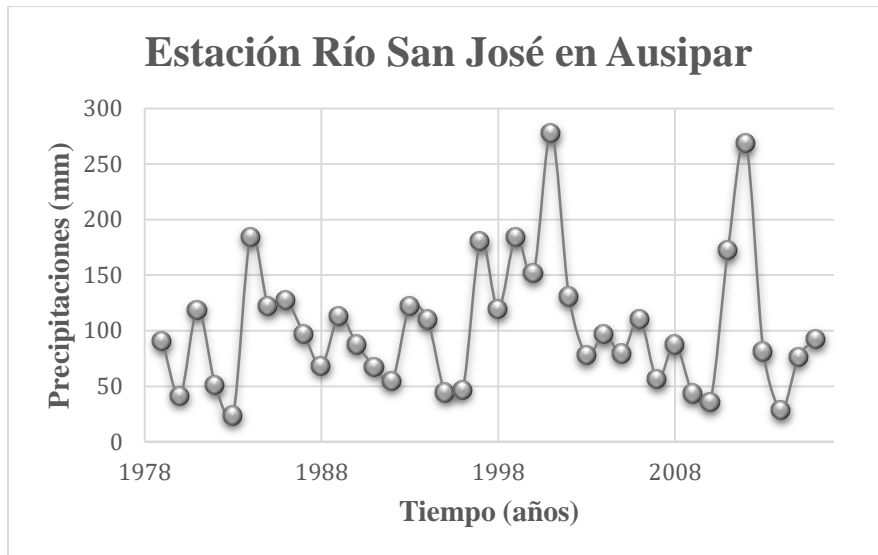


Gráfico 4.1.2 Precipitación Anual en la estación Río San José en Ausipar entre 1979 y 2016.  
Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA

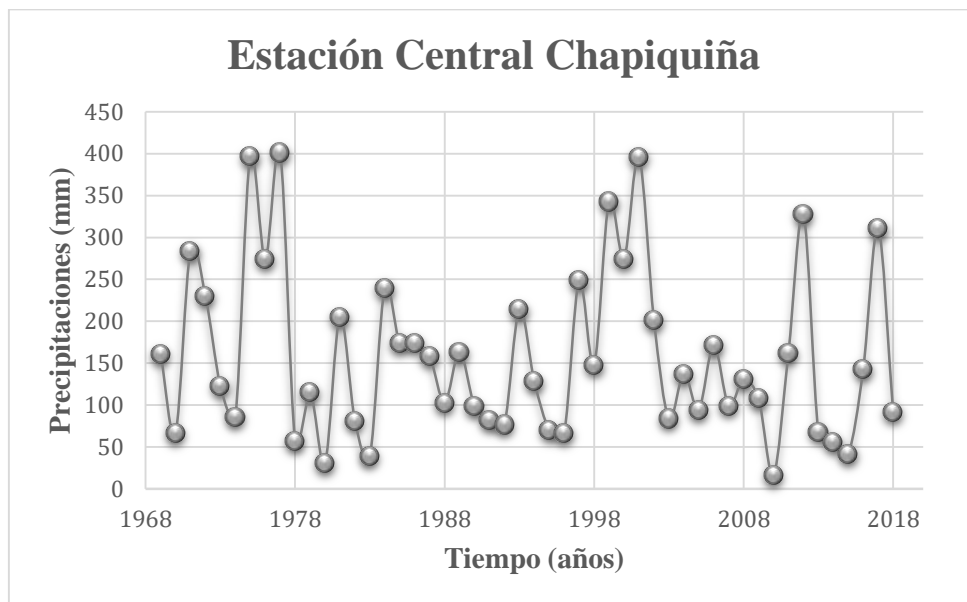
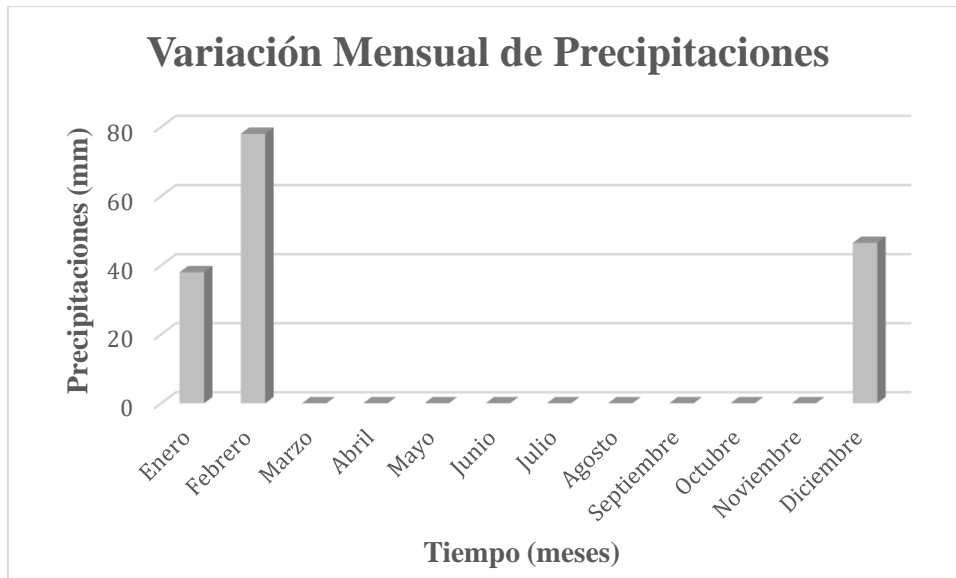


Gráfico 4.1.3 Precipitación Anual en la estación Central Chapiquiña entre 1969 y 2018.  
Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA

Cabe mencionar que los meses que registran mayor cantidad de precipitaciones son diciembre - febrero, puesto que en este período es cuando sucede el invierno altiplánico (o invierno Boliviano) que trae fuertes lluvias que afectan a la región. Esto se observa en el Gráfico 4.1.4



**Gráfico 4.1.4 Precipitación Mensual en la estación Chapiquiña**  
Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA

### 4.1.3 Isoyetas

Con la información anteriormente tratada se puede establecer en qué zonas llueve aproximadamente la misma cantidad en un año, para unir las en un trazo continuo denominado isoyeta, lo que permite analizar de mejor manera dónde se concentran la mayor o menor cantidad de precipitaciones.

En la Figura 4.1.2 se aprecia que las isoyetas representan valores mayores hacia la zona de la alta cordillera, por lo que se concluye que a mayor altura las precipitaciones son mayores.

Además, es posible establecer que los valores en el sector de la cabecera son considerablemente más elevados, lo cual corrobora el efecto del invierno altiplánico sobre esta área, mientras que el resto de la cuenca permanece con valores visiblemente inferiores producto de la escasez de lluvias durante todo el año.



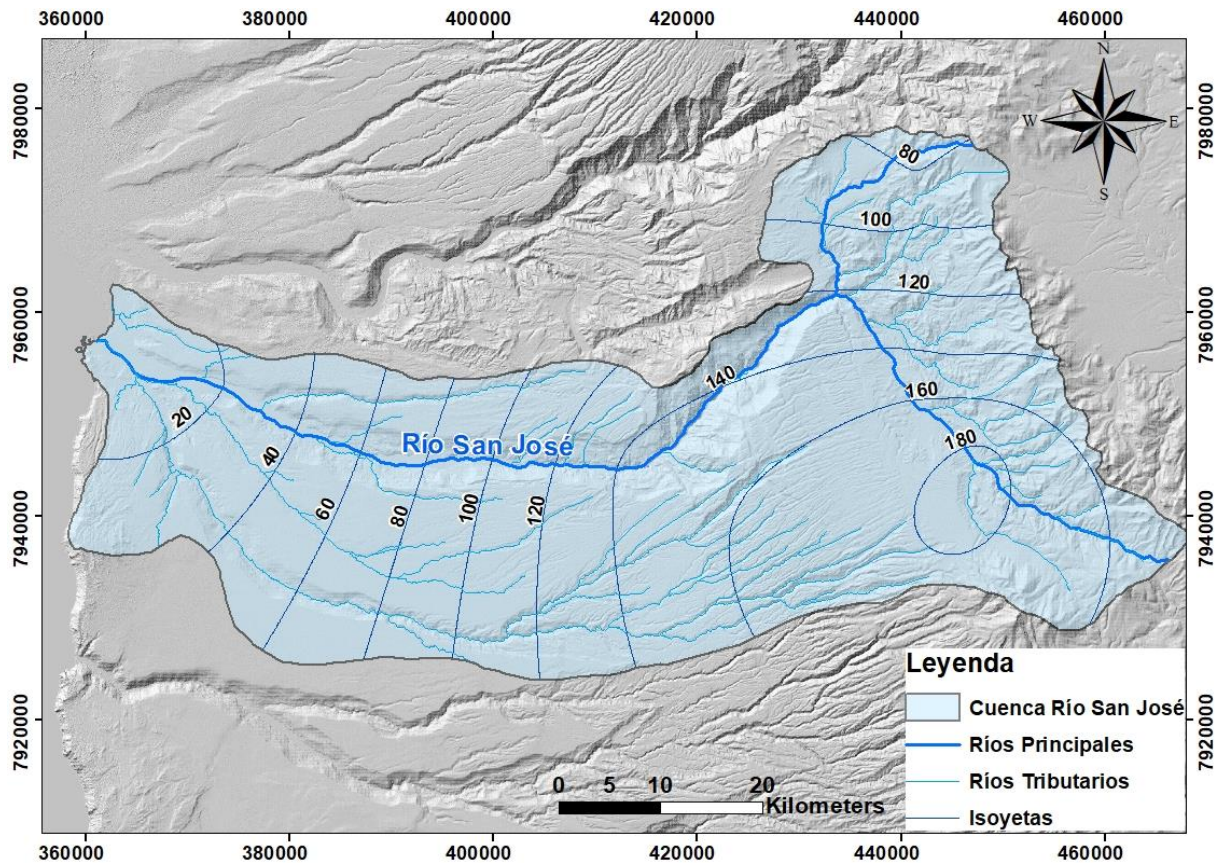


Figura 4.1.2 Distribución de las isoyetas en la cuenca del Río San José  
 Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA.

## 4.2 Caracterización Fluviométrica

La determinación del caudal de los afluentes principales de la cuenca es importante, puesto que a partir de esta información se decidirá la fuente de recarga.

### 4.2.1 Estaciones Fluviométricas

Se han tomado las estaciones fluviométricas tanto vigentes como suspendidas de la DGA para poder obtener la mayor cantidad de información con respecto al comportamientos y disponibilidad de caudales a través del tiempo. Estas corresponden a Río San José antes Bocatoma Azapa, Acueducto Azapa en Bocatoma, Río San José en Livilcar, Río Tignamar en Angostura, Río Tignamar en Tignamar, Río San José en Ausipar y Río Laco en Cosapilla, (Figura 4.2.1), siendo estas dos últimas las que aún se encuentran vigentes y registran una base de datos más completa y extensa, por lo que serán usadas para determinar las fuentes de recarga para el proyecto. Un mayor detalle de las estaciones restantes se podrá encontrar en el Anexo II.

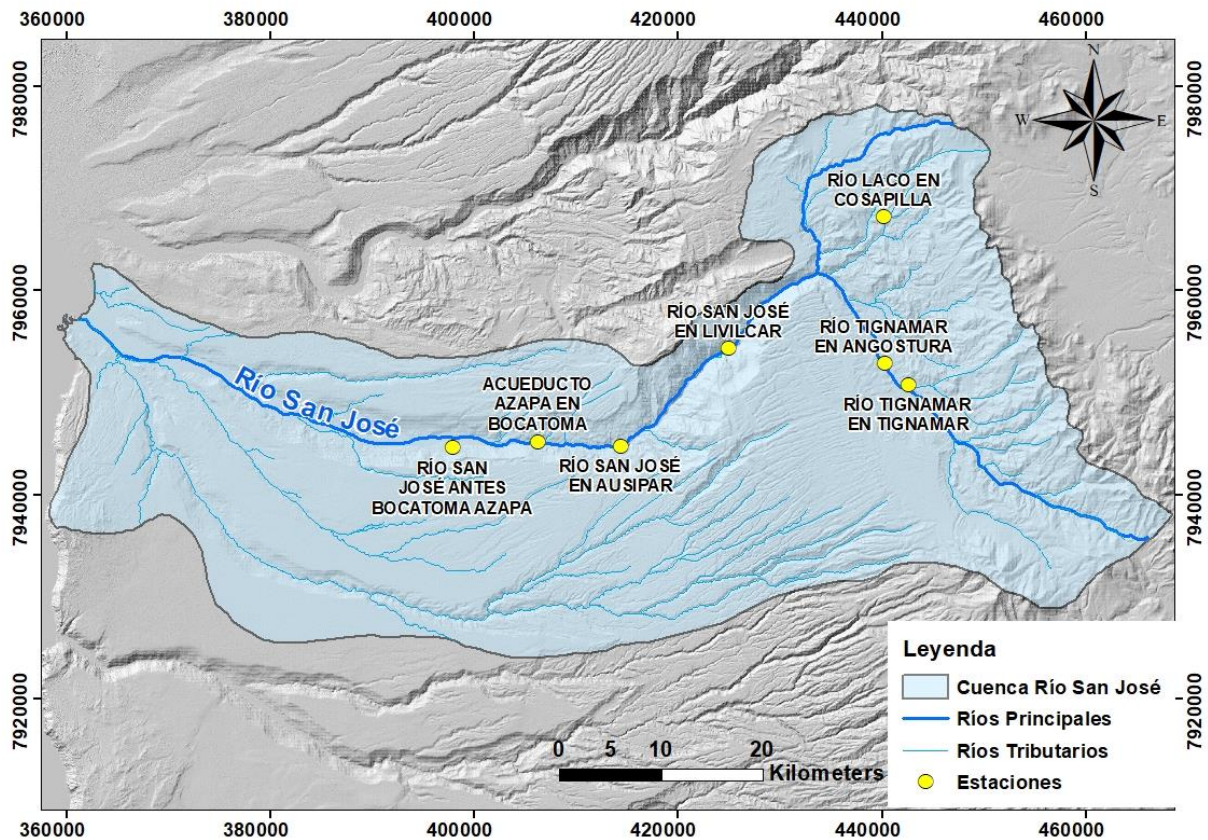


Figura 4.2.1 Ubicación de las estaciones fluviométricas de la DGA en la cuenca del Río San José.  
 Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

#### 4.2.2 Análisis de Datos Caudal Anual

Los caudales analizados han sido comparados con las precipitaciones anuales obtenidas en dichos sectores para determinar el régimen del río estudiado en sus diferentes tramos.

La primera estación estudiada corresponde a Río San José en Ausipar, cuyos resultados se encuentran expresados en el Gráfico 4.2.1, donde se aprecia una correlación directa con las precipitaciones medidas, puesto que en años lluviosos también se registran caudales importantes producto del escurrimiento, indicando un régimen netamente pluvial. Es importante resaltar que en los períodos donde se han producido mayores crecidas del río, la comunidad se ha visto gravemente afectada por ello debido a las pérdidas económicas, infraestructurales y humanas, pero también es necesario considerar la pérdida de un recurso importante que desemboca en el océano pacífico, es por ello que es necesario aprovechar este aumento de caudal, de modo que pueda ser almacenado, transportado e infiltrado hacia el acuífero en los sectores indicados.



La siguiente estación Río Laco en Cosapilla representada en el Gráfico 4.2.2, muestra resultados diferentes, puesto que los máximos de ambas variables no coinciden. Esto es atribuible a un cambio en el régimen del río puesto que el tramo en cuestión se ubica en las altas cumbres, donde la acumulación de nieve y su consiguiente fusión incorporan un mayor caudal al río, por tanto el segmento se rige por precipitaciones nivales y pluviales.

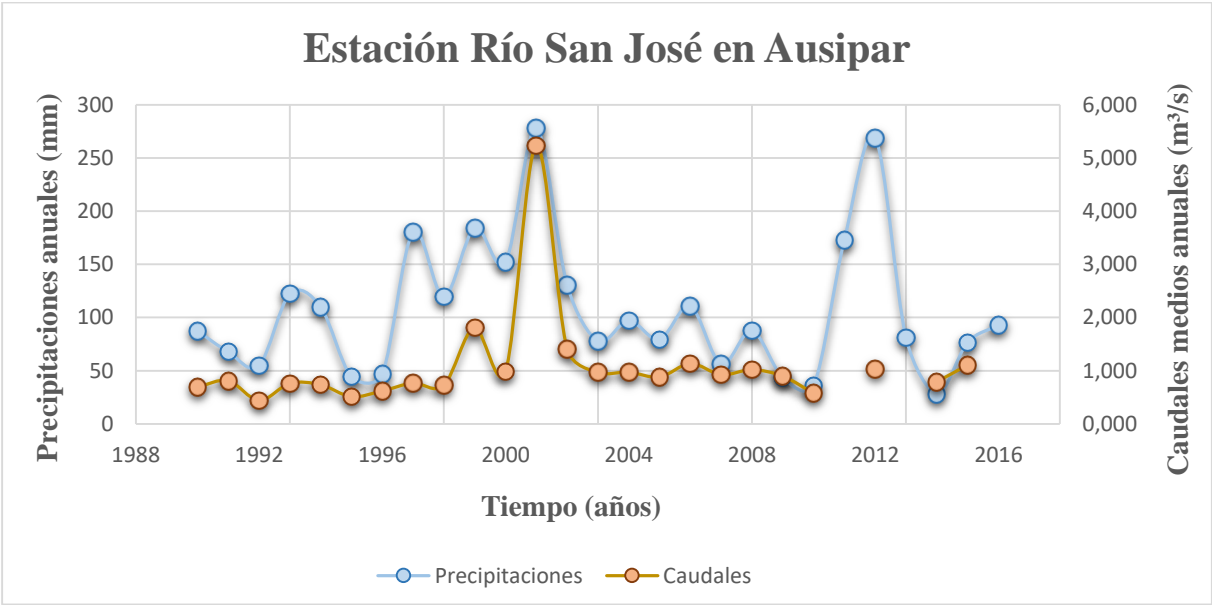


Gráfico 4.2.1 Caudales y precipitaciones anuales en la estación Río San José en Ausipar entre 1990 y 2016.

Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA.

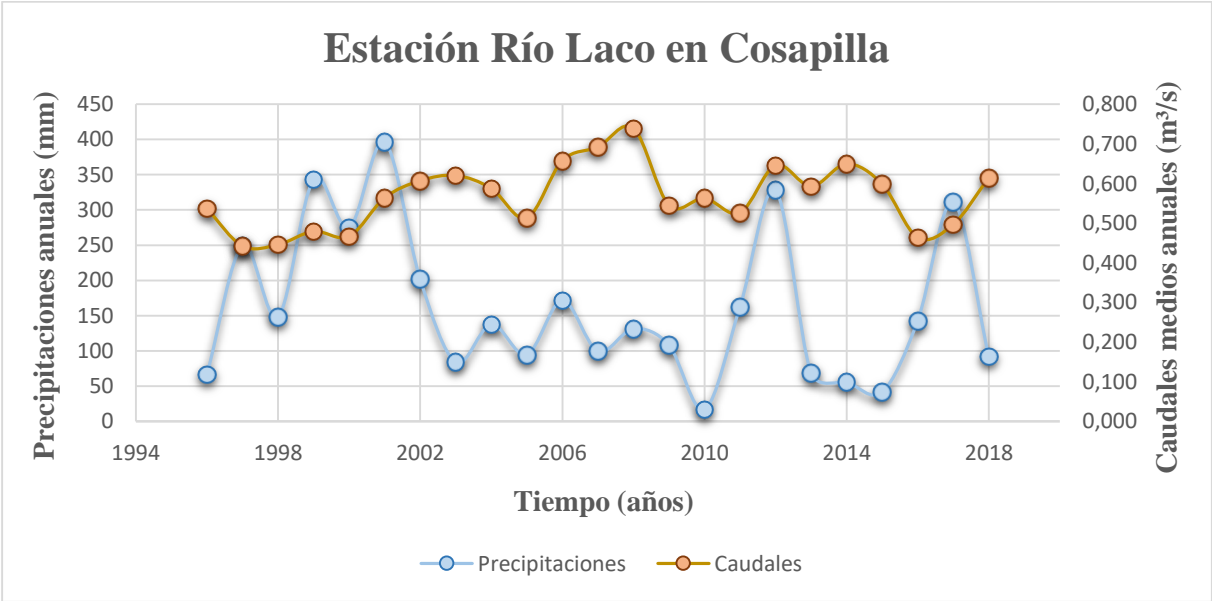


Gráfico 4.2.2 Caudales y precipitaciones anuales en la estación Río Laco en Cosapilla entre 1996 y 2018.

Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA.

### 4.2.3 Probabilidad de Excedencia y Período de Retorno

A continuación (Tabla 4.2.1) se presenta un resumen de las probabilidades de excedencia para 5%, 25%, 50% y 90%, esto hace referencia a la probabilidad de que ocurra un evento de cierta magnitud (o superior a esta) en un tiempo determinado. Como se observa, la probabilidad es mayor para caudales menores, mientras que los caudales de mayor envergadura tienen menos probabilidad de ocurrencia. Esta información permite estimar la cantidad y frecuencia de agua en el río San José para inyectarla en el acuífero. Para este caso, una probabilidad de excedencia de 10% cuyo caudal es 1,615 m<sup>3</sup>/s es una buena estimación, considerando que es un flujo razonable para el promedio de la cuenca y su ocurrencia es cada 10 años, sin embargo, la heterogeneidad de las precipitaciones durante el año plantea la necesidad de un estudio sobre la variación mensual de los caudales para ajustar los cálculos a los meses de mayor crecida del río.

Tabla 4.2.1 Probabilidades de excedencia fluviométricas de 5%, 10%, 20%, 50% y 90% para las 2 estaciones de estudio con sus respectivos períodos de retorno.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

<b>PBex (%)</b>	<b>T (años)</b>	<b>Río San José en Ausipar</b>	<b>Río Laco en Cosapilla</b>
5	25	5,235	0,739
10	10	1,615	0,675
20	5	1,108	0,646
50	2	0,883	0,564
90	1	0,544	0,454

### 4.2.4 Análisis de Datos Caudal Mensual

Para desarrollar un historial detallado de cómo se distribuyen temporalmente los caudales, se ha desglosado la información para los 12 meses del año con el fin de percibir de mejor manera la continuidad de los flujos superficiales.

En los siguientes Gráficos (4.2.3 y 4.2.4) se justifica el régimen pluvial en Ausipar, donde se concentran valores más elevados en los meses estivales que coinciden con el período de

mayores precipitaciones, en tanto, el sector de Cosapilla no presenta diferencias significativas entre meses estivales e invernales dado que predomina el régimen pluvio nival en la zona.

Considerando lo anterior, Ausipar se perfila como el área con las características propicias para establecerse como la fuente principal de agua de recarga a ser utilizada en el proyecto.

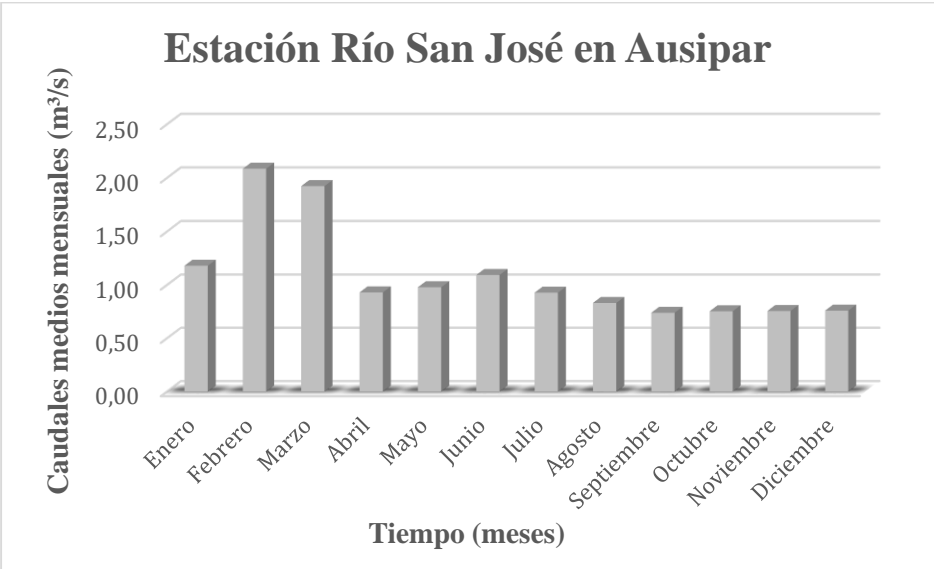


Gráfico 4.2.3 Caudal mensual en la estación Río san José en Ausipar  
Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA

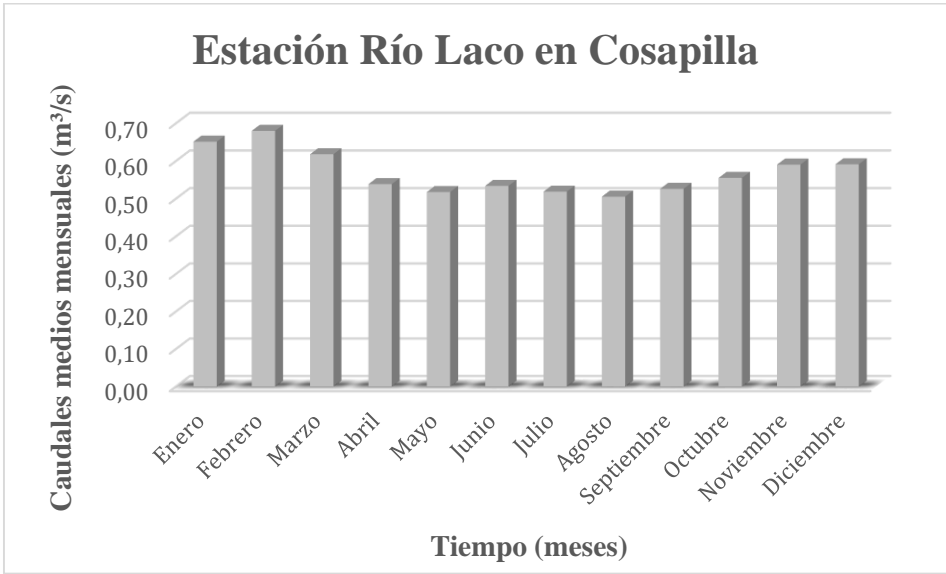


Gráfico 4.2.4 Caudal mensual en la estación Río Laco en Cosapilla  
Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA

#### 4.2.5 Probabilidad de Excedencia y Período de Retorno

Con el siguiente Gráfico 4.2.5 se determina que la probabilidad de excedencia adecuada es de un 20% pues es el que posee mejor relación entre caudales y período de retorno, el cual es de 5 años. Los caudales son importantes sobre todo en los meses de enero, febrero y marzo, por lo que se considerarán los excedentes de estos 3 meses para calcular un caudal óptimo de inyección según los métodos que se van a proponer más adelante en este trabajo.

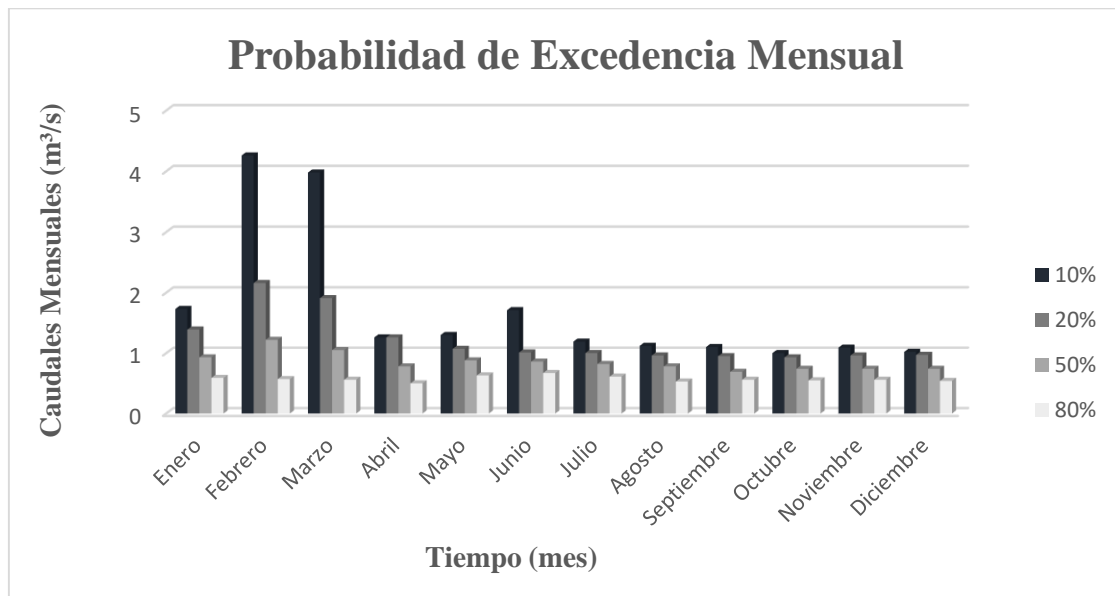


Gráfico 4.2.5 Probabilidad de Excedencia Mensual

Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos de la DGA

#### 4.3 Evaporación y evapotranspiración

Tener noción de la cantidad de agua evaporada es un factor que debe ser considerado, ya que implica una pérdida de recurso que no puede ser recuperada. Esto se genera por medio de 2 mecanismos; el primero consiste en el proceso de evaporación causado por una elevación de la temperatura, y el segundo por medio de la evapotranspiración, el cual consiste en un sistema de liberación de agua (transpiración) por parte de las plantas.

La evapotranspiración ha sido obtenida con datos de estaciones de la red agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Las estaciones trabajadas corresponden a Azapa Medio, Cerro Blanco y Belén (Figura 4.3.1) cuya información muestra que la mayor cantidad de evapotranspiración se concentra en el sector alto de la cuenca donde alcanza un

valor promedio de 200 mm/año, lo cual se corrobora con los datos presentados en la Tabla 4.3.1 donde se observa que en la estación Belén se registran los valores más elevados en la mayoría de los meses.

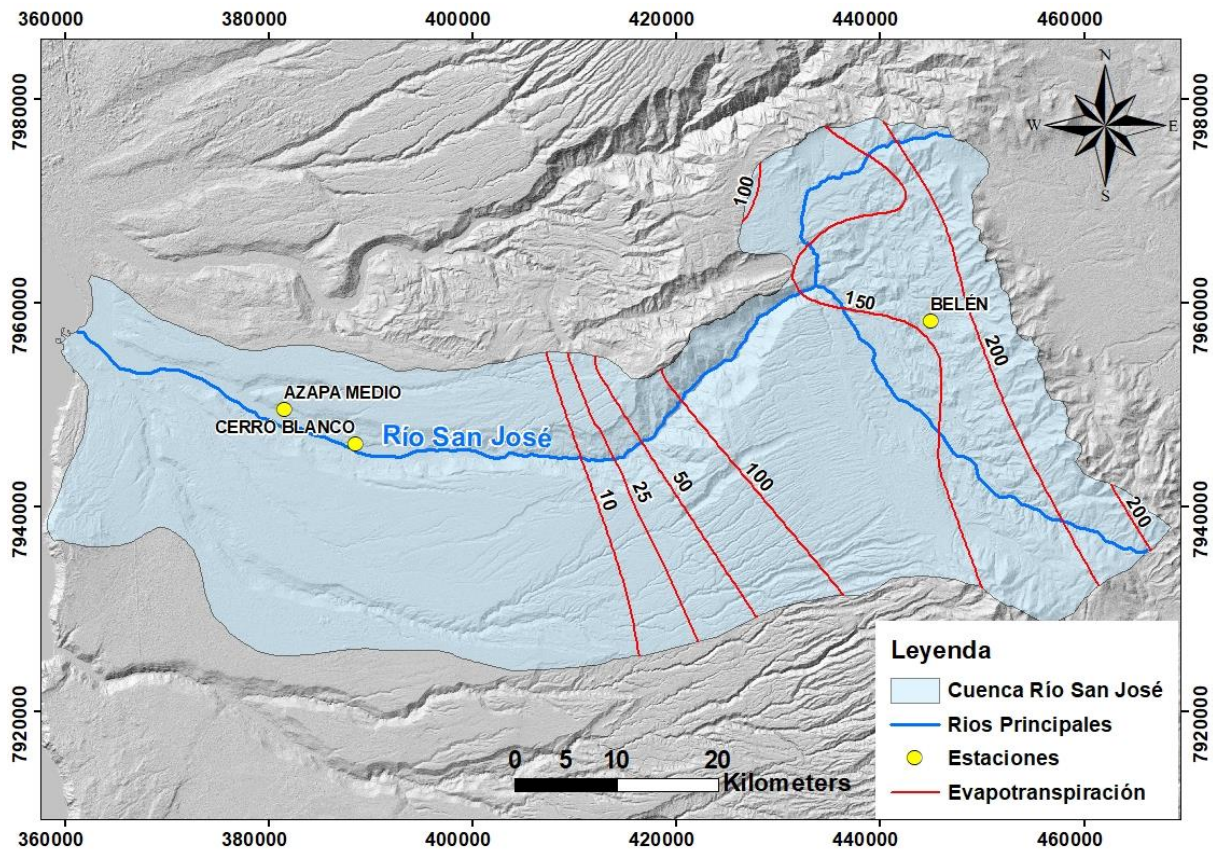


Figura 4.3.1 Mapa con las estaciones de la INIA con datos de evapotranspiración y la variación de esta en la cuenca.

Fuente: Elaboración propia con shape extraído de la base de datos de la DGA y estaciones de la INIA

Tabla 4.3.1 Evapotranspiración (mm) medida en distintos puntos de la cuenca

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la INIA.

Evapotranspiración (mm)	Azapa Medio	Cerro Blanco	Belén
Enero	143,1	151	164,13
Febrero	128,15	135,8	107,17
Marzo	127,4	137,2	124,75
Abril	90,9	96,9	125,6

Mayo	71,7	76,05	125,65
Junio	59,15	61,3	117,55
Julio	54,7	62	119,15
Agosto	76,8	79,05	137,35
Septiembre	97,2	98,8	155,1
Octubre	117,65	118,5	168,55
Noviembre	130	131,9	174,8
Diciembre	141,95	148,15	174

Por otro lado, la evaporación se ha obtenido de la memoria de título de Jiménez (2013), quién obtuvo los datos a partir de CIREN (1997) mostrados en la siguiente Tabla 4.3.2

Tabla 4.3.2 Evaporación (mm) medida en la cuenca  
Fuente: Extraído de Jiménez (2013)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Ev (mm)	325	283	286	228	181	134	121	133	159	214	251	285

Tanto la evaporación como la evapotranspiración disminuyen desde Enero hasta Julio, esto es debido a la baja de temperaturas producto de la estación invernal, luego se presenta un alza hasta diciembre, dada la elevación de la temperatura por la llegada de la estación estival.

## **5 Caracterización de la cuenca**

### **5.1 Marco Geológico**

La información para caracterizar las unidades se ha obtenido de la Hoja de Arica elaborada por García, Gardeweg, Clavero y Hérall (2004), la cual ha sido trabajada a escala 1:250.000. Las rocas más antiguas, pertenecientes al Proterozoico Superior-Paleozoico, están representadas por el basamento metamórficos que aflora en el occidente de la alta cordillera, sobre el cual se dispone una cubierta de rocas sedimentarias y volcánicas estratificadas de edades que abarcan desde el Jurásico Medio hasta el Cretácico Inferior, y desde el Oligoceno hasta el Mioceno Superior. Estas formaciones proveen sedimentos para formar los depósitos que rellenan las depresiones de la cordillera de la costa, cubren las planicies de la depresión central y las quebradas de la alta cordillera y precordillera. Las rocas antes descritas se encuentran intruidas por cuerpos hipabisales y plutónicos de monzodioritas, dioritas y granodioritas principalmente.



### 5.1.1 Depósitos no Consolidados

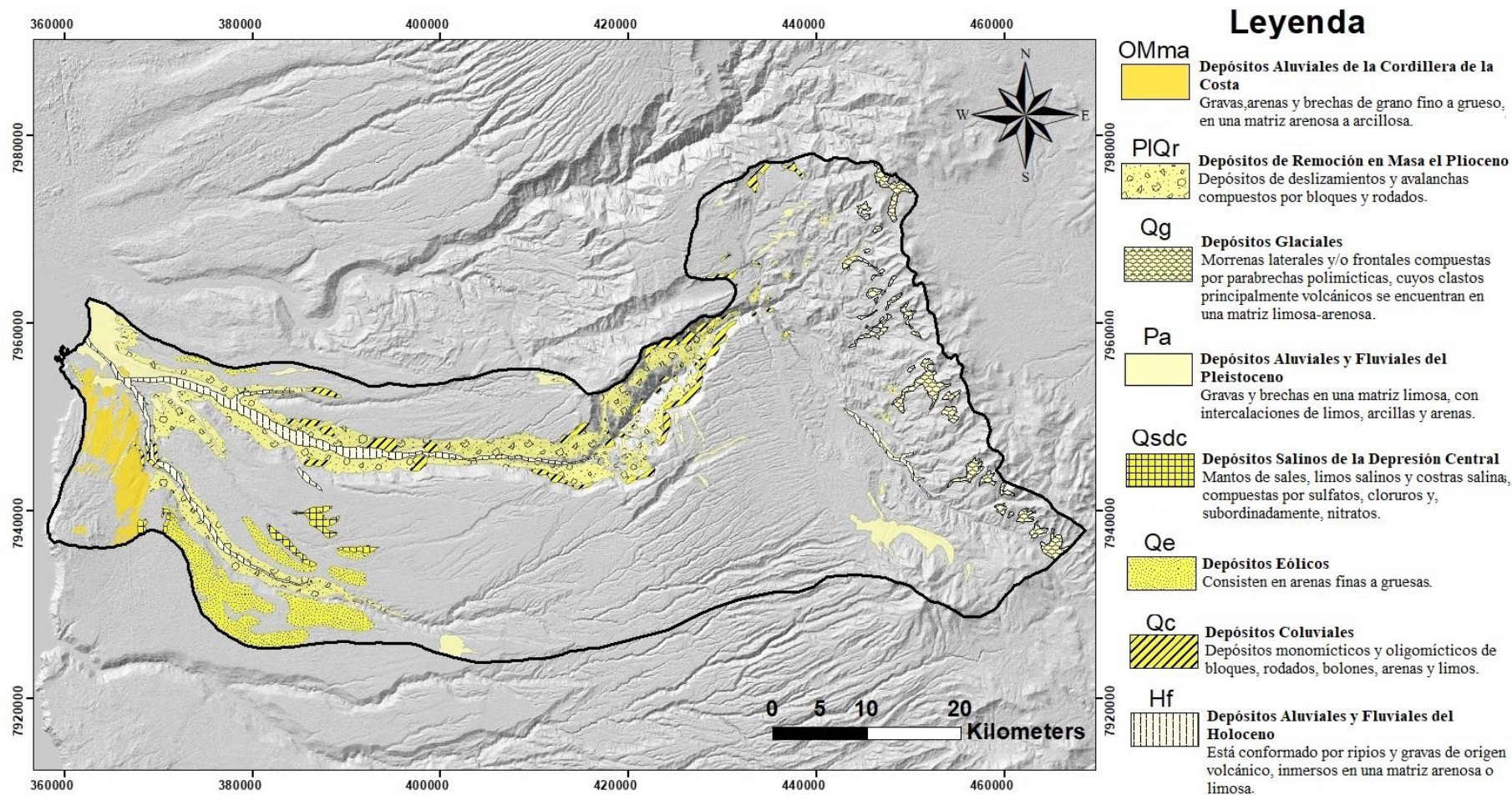


Figura 5.1.1 Mapa de la distribución de los distintos depósitos no consolidados presentes en la cuenca del Río San José.  
Fuente: Elaboración propia con información de la Hoja de Arica (García *et al.*, 2004).



## **DEPÓSITOS ALUVIALES DE LA CORDILLERA DE LA COSTA OMma (Oligoceno-Mioceno Medio)**

García *et al.* (2004) define esta unidad como depósitos principalmente detríticos que rellenan las depresiones de la cordillera de la costa. Alcanza espesores de 200 m y se constituye de limos, arenas, gravas y brechas de grano fino a grueso semiconsolidado, mal seleccionado, mayormente clastosoportado, con clastos menores a 10 cm de diámetro provenientes de rocas sedimentarias, plutónicas y volcánicas, en una matriz arenosa a arcillosa. Estos depósitos contienen intercalaciones con niveles salinos y tobas con cristales, cenizas y pómez.

Esta formación sobreyace a la Fm. Camaraca (Jmc), Los Tarros (Jst) y Atajaña (JsKia), además se interdigitan con la Fm. El diablo (Mimd), Azapa (Oa) y Oxaya (OMo).

## **DEPÓSITOS DE REMOCIÓN EN MASA DEL PLIOCENO-CUATERNARIO PIQr**

Depósitos de deslizamientos y avalanchas gravitacionales con superficie de hasta 30 km<sup>2</sup> según García *et al.* (2004), están conformados por bloques y rodados de tamaños que van desde metros a hectómetros, distribuidos en zonas de elevada pendiente en sectores de la depresión central y precordillera. Dado que algunas remociones cubren a los depósitos Plf, Pf y Pa se le asigna una edad cuaternaria tardía.

## **DEPÓSITOS GLACIALES Qg (Plioceno-Holoceno)**

García *et al.* (2004) los define como morrenas laterales y/o frontales elongadas expuestas en la alta cordillera, son de longitudes máximas de 10 km, 500 m de ancho y espesor cercano a los 100 m conformado por parabrechas polimícticas consolidadas y semiconsolidadas, de mala selección, con clastos subredondeados principalmente volcánicos con tamaños hasta 2 m, inmersos en una matriz limosa-arenosa, también se presentan como mantos en los sectores del río Lauca, debido a que no poseen morfología de morrenas.

## **DEPÓSITOS ALUVIALES Y FLUVIALES DEL PLEISTOCENO Pa, Pf**

En el trabajo de García *et al.* (2004) los depósitos aluviales del Pleistoceno (Pa) están constituidos por gravas y brechas con intercalaciones de limos, arcillas y arenas, distribuidos en planicies de la depresión central y en quebradas de la alta cordillera y precordillera.

Estos depósitos son matriz soportados, semiconsolidados, poseen mala selección, y sus clastos predominantemente volcánicos (andesitas y riolitas) son angulosos y se encuentran dispuestos en una matriz limosa o arcillosa. Incluye, además, depósitos fluviales proximales y coluviales distales. Por otra parte, los depósitos fluviales del Pleistoceno (Pf) se constituyen de rípios y

gravas con intercalaciones de arenas y limos, distribuidos en los cauces activos o intermitentes, o rellenando depresiones en la alta cordillera. Estos depósitos son clastosoportados, semiconsolidados, mal a moderadamente seleccionados, sus clastos son de origen predominantemente volcánico, redondeados a subangulosos inmersos en una matriz arenosa o limosa. Incluye también depósitos aluviales intermedios a distales.

En cuanto a sus relaciones de contacto, se encuentran cortados por los depósitos fluviales del Holoceno (Hf), y cortan a los depósitos fluviales del Plioceno (Plf).

### **DEPÓSITOS SALINOS DE LA DEPRESIÓN CENTRAL Q<sub>sd</sub>c** (Cuaternario)

García *et al.* (2004) los define como mantos subhorizontales de sales, limos salinos y costras salinas en la parte occidental de la depresión central. Se componen de sulfatos como yeso y anhidrita, cloruros (halita) y de manera subordinada nitratos. Sus relaciones estratigráficas indican una edad cuaternaria.

### **DEPÓSITOS EÓLICOS Q<sub>e</sub>** (Cuaternario)

Son definidos en la hoja de Arica por García *et al.* (2004), consisten en arenas finas a gruesas con espesor de 5 m bien seleccionadas y no consolidadas, sus clastos son subangulosos a redondeados de variada composición, predominando los líticos andesíticos y fragmentos de cuarzo y biotita. Se encuentran sobreyaciendo y subyaciendo los depósitos salinos (Q<sub>sd</sub>c) en la depresión central.

### **DEPÓSITOS COLUVIALES Q<sub>c</sub>** (Cuaternario)

Son descritos por García *et al.* (2004) como depósitos de espesores variables cuyo máximo alcanza los 50 m, compuestos por bloques, rodados, bolones, limos y arenas, no consolidados, monomícticos y oligomícticos, los cuales se encuentran mal seleccionados.

### **DEPÓSITOS ALUVIALES Y FLUVIALES DEL HOLOCENO H<sub>f</sub>**

García *et al.* (2004) los describe como ripios y gravas con arenas y limos distribuidos en los cauces activos de las quebradas mayores de la cuenca de estudio. Estos depósitos con material de origen volcánico son mayormente clastosoportados, semiconsolidados, pobre a medianamente seleccionados, con clastos redondeados a subangulosos en una matriz arenosa o limosa. Debido a que los procesos que dieron origen a estos depósitos aún siguen activos, se asigna una edad Holocena.

## 5.1.2 Rocas Estratificadas

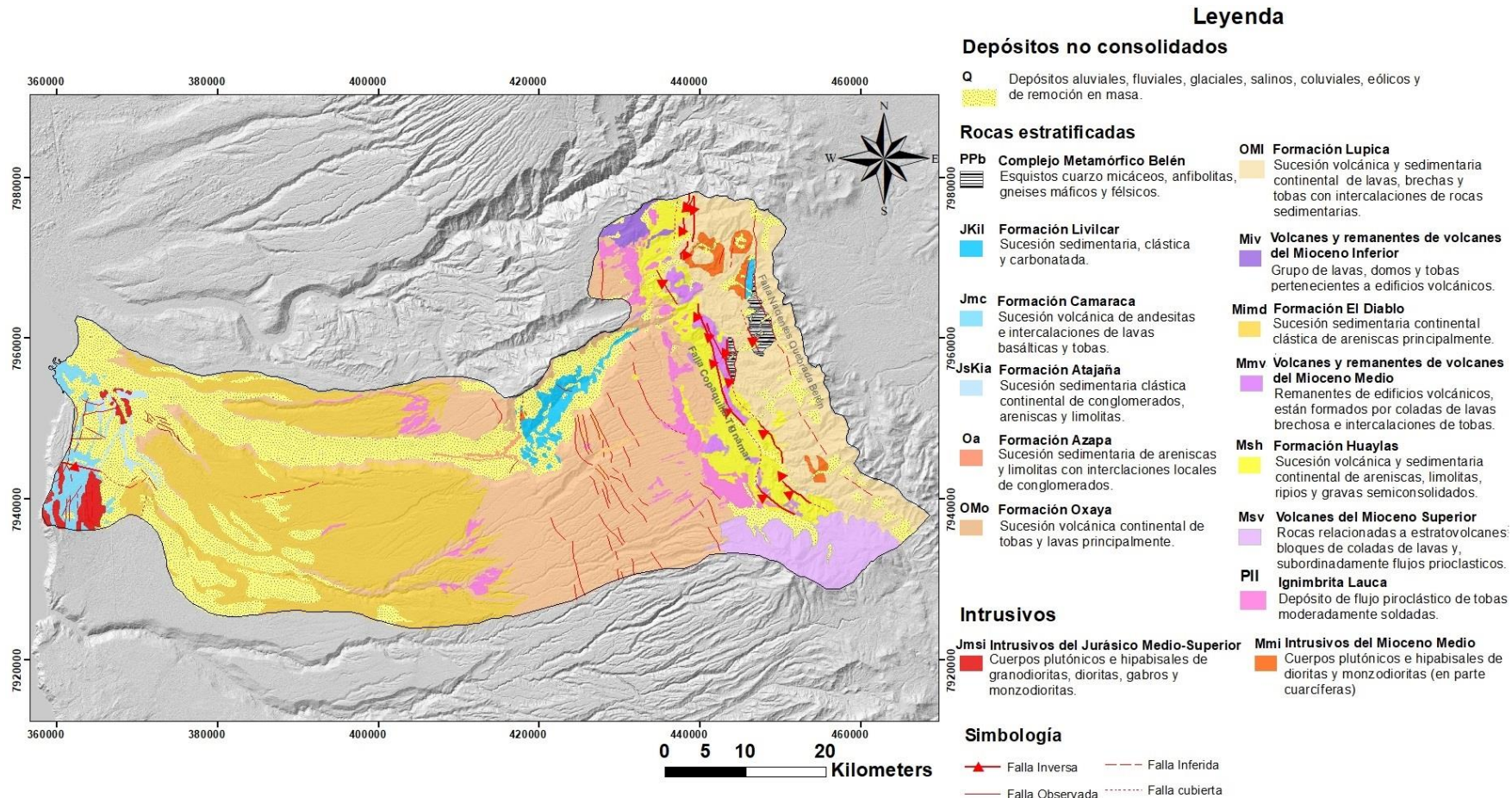


Figura 5.1.2 Mapa de la geología del sector de estudio.

Esta consta de un complejo metamórfico (Belén) cubierto por rocas volcánicas-sedimentarias de edad mesozoicas y cenozoicas. Junto a estas, se presentan los depósitos, rocas intrusivas y estructuras (Falla Copaquilla-Tignamar y hacia el Este de ella, se encuentra la Falla Nacientes Quebrada Belén).

Fuente: Elaboración propia con información de la Hoja de Arica (García *et al.*, 2004).

### **FORMACIÓN LIVILCAR JKil** (Jurásico Inferior-Cretácico Inferior Temprano)

Originalmente definida por Muñoz *et al.* (1988) y posteriormente redefinida por García *et al.* como una sucesión sedimentaria, clástica y carbonatada de ambiente marino y transicional. Está dividida en 2 miembros: el inferior JKil1 y el superior JKil2.

El primero fue definido como un espesor de 1000 m de areniscas y paraconglomerados con intercalaciones de tobas finas andesíticas a riolíticas, calizas y lutitas. Las areniscas son de grano fino a grueso, pobremente seleccionadas, cuyos componentes son volcánicos (lavas, pómez, fiammes), posee una matriz cinerítica (ceniza eyectada de un volcán) y cemento silíceo y calcáreo. Los paraconglomerados son de grano medio a fino, medianamente seleccionados, matriz soportado, de clastos redondeados a subangulosos compuestos por rocas volcánicas andesítica. Por otro lado, el miembro superior JKil2 presenta una potencia de 950 m constituida por una alternancia de calizas, lutitas, limolitas y areniscas cuarcíferas de grano fino a grueso. En cuanto a sus relaciones de contacto, subyace en discordancia angular a las formaciones Azapa y Oxaya.

### **FORMACIÓN CAMARACA Jmc** (Bajociano Superior-Caloviano)

Definida primero por Salas *et al.* (1966) y posteriormente por García *et al.* (2004) como una sucesión volcánica que aflora la sur de Arica en la cordillera de la costa, consiste en un espesor de 4000 m de lavas andesíticas, intercalaciones de lavas basálticas y daciandesíticas, tobas de grano fino y rocas sedimentarias como areniscas de grano medio a fino bien seleccionadas con clastos redondeados de rocas volcánicas y de cuarzo, conglomerados de grano medio a fino, brechas, escasas calizas, y lutitas. Cabe destacar que las rocas se encuentran afectadas por un grado moderado a avanzado de alteración hidrotermal propilítica. Finalmente, la formación subyace en contacto concordante a la Fm. Los Tarros (Jst) y en discordancia angular a la Fm. Atajaña (JsKia), además se encuentra cubierta por depósitos aluviales (OMma y MsPla) e intruida por intrusivos jurásicos (Jmsi).

### **FORMACIÓN ATAJAÑA JsKia** (Kimmeridgiano-Neocomiano)

Inicialmente definida por Cecioni y García (1960) en el sector del cerro Atajaña en la cordillera de la costa como una sucesión sedimentaria clástica continental. En García *et al.* (2004) se presenta como un espesor aproximado de 1200 m de conglomerados de grano fino a muy grueso (algunos clastos son >2 m), mal seleccionados y predominantemente matriz soportado, se presentan areniscas y limolitas con intercalaciones de brechas sedimentarias y de lavas

andesíticas porfíricas. En la quebrada de Azapa subyace en discordancia angular a la Fm Azapa (Oa) y a los depósitos aluviales de la cordillera de la costa (Omma), y sobreyace a las Fm. Camaraca (Jmc) y Tarros (Jst) en discordancia angular.

### **FORMACIÓN AZAPA Oa** (Oligoceno-Mioceno bajo)

Fue definida por Salas *et al.* (1966) corresponde a una sucesión sedimentaria expuesta en las quebradas mayores de la depresión central del área que abarca la hoja. Esta formación está dividida en dos fases pero solo una aflora en la cuenca, la cual se trata de la fase Oa (b) formada por areniscas mal seleccionadas con clastos de rocas volcánicas y metamórficas, también presenta intercalaciones de limolitas (predominante) con arcillolitas retrabajadas y conglomerados de grano fino clasto soportadas y volcanodetríticas. La formación sobreyace en discordancia angular a los intrusivos de Esquina (KPi (b)) y Fm Suca (Kis) en quebrada camarones, y en su sector occidental a las Fm. Camaraca (Jmc) y Atajaña (JsKia).

### **FORMACIÓN OXAYA OMo** (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior)

Montecinos (1963) definió la unidad como un espesor de 0 a 1000 m de una sucesión volcánica continental de tobas y lavas principalmente, distribuida en la precordillera y depresión central de la zona de estudio. García *et al* (2004) reconoce 6 asociaciones de facies, de las cuales 4 están presentes en este estudio:

**Ignimbritas y rocas sedimentarias de la parte inferior-media OMo (1).** Consiste en aproximadamente 600 m de tobas vítreas y algunas líticas débiles a moderadamente soldadas, conglomerados brechosos mal seleccionados y predominantemente clasto soportados con clastos volcánicos andesíticos a riolíticos de hasta 2 m inmersos en una matriz arenosa y limosa, y areniscas con niveles de limolitas y calizas lacustres.

**Ignimbrita Oxaya OMo (2b).** Corresponde a la ignimbrita Oxaya, la cual es un depósito piroclástico de un flujo de composición vítrea y cristalina, moderada a altamente soldada, cuya potencia en promedio es de 100 m.

**Ignimbrita Sucuna OMo (3a).** Se compone de 120 m de toba moderadamente soldada de cristales, vidrios, pómez y escasos líticos.

**Dacita Río Tignámar OMo (3b).** Espesor de 100 m de lava dacítica porfídica de hornblenda. La Fm. Oxaya se dispone en discordancia angular sobre la Fm. Livilcar (JKil) y subyace en discordancia angular y erosiva a Miv, Mmv, Msv y a los depósitos de la Fm. Huaytas en el sector precordillerano, mientras que en el sector de la depresión central sobreyace concordantemente a la Fm. Azapa (Oa) y subyace a la Fm. El Diablo (Mimd).

## **FORMACIÓN LUPICA OMI (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior)**

Definida informalmente por Montecinos (1963) como una sucesión volcánica y sedimentaria continental distribuida en la alta cordillera. Su espesor promedio es de 1500 m y está dividida en tres asociaciones de facies y un estrato volcánico individual según García *et al.* (2004):

**Lavas y brechas de la parte inferior OMI (a)**, sucesión de 300 a 600 m de espesor compuesta de lavas dacíticas y andesíticas, tobas, brechas volcánicas y sedimentaria, con intercalaciones de tobas riolíticas, areniscas y conglomerados, estos últimos son de grano medio a fino, matriz soportados, pobremente seleccionados, los clastos son subangulosos de origen volcánico (lavas andesíticas y dacíticas).

**Ignimbritas y rocas sedimentarias de la parte media OMI (b)**, sucesión de 400 a 1000 m de tobas vítreas y cristalinas con cantidad variable de pómez y líticos menores a 30 cm de tamaño, se encuentra en intercalación con lavas (dacítas porfídicas de anfíbola y biotita) y rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados y brechas volcanodetríticas de grano fino a medio y clastos volcánicos).

**Ignimbrita del Cordón Belén OMI (c)**, posee una potencia de 1100 m de tobas líticas brechosas altamente soldada. Su zona inferior consiste en una megabrecha piroclástica, ya que sus bloques de andesitas y areniscas son decamétricos a hectométricos y están inmersos en una matriz riolítica, en tanto su parte superior se ubica un depósito piroclástico de grano medio a fino, formado por pómez, cristales y líticos (10 cm) de andesita de anfíbola, inmersos en una matriz vítrea.

**Rocas sedimentarias de la parte superior OMI (d)**, sucesión de 400 a 600 m compuesta de areniscas, fangolitas y calizas con intercalaciones de conglomerados de granulometría fina, parabrechas y rocas volcánicas. Tanto las areniscas como los conglomerados tienen pobre selección y están formados por clastos de andesitas y tobas riolíticas medianamente redondeados. Por otro lado, las rocas volcánicas presentes corresponden a lavas andesíticas y dacíticas porfídicas, y tobas riolíticas y dacíticas.

La Fm. Lupica (OMI) sobreyace al complejo metamórfico (PPb) en contacto discordante angular y subyace con el mismo tipo de contacto a la Fm. Chucal (Mimc), Macusa (Mmsm) y Lauca (PIPI) y a rocas de Mmv, Msv, Plv y Pv.

## **VOLCANES Y REMANENTES DE VOLCANES DEL MIOCENO INFERIOR Mi<sub>v</sub> (23-16 Ma)**

Unidad informal definida en la alta cordillera y en el nororiente de la precordillera por García *et al.* (2004) como una potencia de 500 m de rocas pertenecientes a edificios volcánicos,

constituidos por coladas de lavas porfídicas de composición andesítica a andesítica-basáltica de piroxeno y 400 m de espesor de lavas dacíticas, andesíticas, riódacíticas y tobas riódacíticas moderadamente soldadas. Sobreyace a la Fm. Lupica (OMI (a)) en discordancia angular y subyace con el mismo tipo de contacto a la Fm. Lauca (PIPI) en la zona de la alta cordillera, en cambio, en el sector de la precordillera sobreyace a las Fm. Oxaya (OMo) en discordancia de erosión, y subyace a la Ignimbrita Lauca (PII) en discordancia angular.

### **FORMACIÓN EL DIABLO Mimd (Mioceno Inferior-Mioceno Superior Bajo)**

Tobar *et al.* (1968) la definió como una sucesión sedimentaria continental clásica principalmente distribuida en la depresión central, cuya potencia máxima es de 300 m.

En el trabajo de García *et al.* (2004) se menciona que se divide en dos miembros. El miembro inferior se conforma por areniscas rojas (en parte conglomerádicas) en su zona inferior-media, y por areniscas amarillas en la parte superior. Sus clastos son de tobas riolíticas de la Fm. Oxaya (OMo) en una matriz cinerítica, además hay presencia de limolitas y calizas lacustres semiconsolidadas.

El miembro superior contiene estratos de ripio (>64 mm) y gravas (>2 mm) semiconsolidadas con intercalaciones de areniscas. Los depósitos son clastosoportados con clastos de lavas andesíticas y andesiticobasálticas provenientes de las formaciones Miv y Mmv, y tobas riolíticas de la Fm. Oxaya (OMo), los cuales se encuentran medianamente seleccionados, bien redondeados y su granulometría varía de 2 m a 0,5 m disminuyendo hacia el oeste. En cuanto a la matriz de las gravas, es predominantemente arenosa, limosa y localmente cinerítica.

Yace sobre las ignimbritas Oxaya (OMo (2b)) y Sucuna (OMo (3b)) de la Fm. Oxaya (OMo) en un contacto discordante erosivo al oeste y angular al este, y subyace a la ignimbrita Lacua (PII) en contacto discordante erosivo.

### **VOLCANES Y REMANENTES DE VOLCANES DEL MIOCENO MEDIO Mmv (16-11 Ma)**

En García *et al.* (2004) se define informalmente la unidad como un conjunto de rocas correspondientes a edificios volcánicos localizados en el sur de la precordillera, y remanentes de estratovolcanes formados por lavas andesíticas a dacíticas situados en la alta cordillera. Las principales litologías que presenta son coladas de lava potentes y brechosas, y lavas-domo subordinadamente con intercalaciones de tobas y rocas sedimentarias epiclásticas.

Sobreyace a la Fm. Oxaya (OMo) en la precordillera en contacto erosivo, y en discordancia angular a la Fm. Lupica (OMI) en la alta cordillera, por otro lado, subyace a la Fm. Lauca (PIPI) en contacto discordante angular y erosivo.

### **FORMACIÓN HUAYLAS Msh (Mioceno Superior)**

Esta formación está definida por Salas *et al.* (1966) como una sucesión volcánica y sedimentaria continental ubicada en depresiones en la precordillera y alta cordillera, pero García *et al.* (2004) la redefinió como una sucesión sedimentaria detrítica distribuida en una franja elongada norte-sur de 70 km de largo por 10 km de ancho, la cual se describe en 2 cuencas: Huaylas al norte (Mshh) y Copaquilla al sur (Mshc), esta última se encuentra en el área de estudio de este trabajo y se compone de 300 m de ripios de grano fino a muy grueso, gravas y arenas semiconsolidadas con intercalaciones de limo y tobas dacíticas. García (1996) reconoce dos miembros:

**Mshc1**, miembro inferior occidental compuesto por una parte basal de 20 m de areniscas, limolitas y gravas semiconsolidadas, clastosoportadas, cuyos clastos de tobas riolíticas provienen de la erosión de la Fm. Oxaya (OMo), mientras que la parte media-superior de 200 m se compone de ripio de grano fino a grueso, y gravas semiconsolidadas con intercalaciones de limolitas y areniscas moderadamente seleccionadas, clastosoportadas compuesta por clastos de rocas volcánicas y sedimentarias de la Fm. Lupica (OMI), moderadamente redondeados de diámetro menor a 30 cm.

**Msch2**, miembro superior oriental compuesto por 100 m de espesor de ripios de grano fino a muy grueso, y gravas, clastosoportados, de mala selección, con clastos angulosos de tamaño menor a 1,5 m, volcánicos (andesitas y riolitas), sedimentarios y metamórficos.

La Fm. Huaylas sobreyace en discordancia erosiva y angular a la Fm Oxaya (OMo), a rocas de la Fm. Miv y Mmv, y subyace a la ignimbrita Lauca (PII) en discordancia erosiva.

### **VOLCANES DEL MIOCENO SUPERIOR Msv (11-5 Ma)**

Ha sido definida por García *et al.* (2004) como un conjunto de rocas relacionadas a estratovolcanes que ocupan una superficie de 70 a 150 km<sup>2</sup> cada uno distribuidos en la zona norte de la alta cordillera. Presenta una potencia de 800 m constituida por bloques de coladas de lavas porfídicas de andesitas de piroxeno y dacitas de hornblenda. Subordinadamente afloran depósitos de flujo piroclástico medianamente a no consolidados, conformados por pómez dacíticas, y brechas laháricas fuertemente consolidadas, con clastos de lava redondeados a subangulosos en una matriz arenosa.



Sobreyace a la Fm. Oxaya (OMo) y a los volcanes del Mioceno (Mmv) en discordancia erosiva en el sector de la precordillera, en cambio, en la alta cordillera sobreyace a la Fm. Lupica (OMI) en discordancia angular y subyace también en discordancia angular a la Fm. Lauca (PIPI).

### **IGNIMBRITA LAUCA PII (Plioceno Superior)**

Definido por García *et al.* (2004) como un depósito de flujo piroclástico cuya superficie es de 2000 km<sup>2</sup>, debido a su gran extensión abarca la zona de la alta cordillera, precordillera y depresión central. Tiene un espesor de 40 a 150 m, consiste en una toba moderadamente soldada formada por vidrio, pómez, cristales y líticas. En su base se compone de depósitos piroclásticos de caída bien seleccionados.

### 5.1.3 Rocas Intrusivas

#### **INTRUSIVOS DEL JURÁSICO MEDIO-SUPERIOR Jmsi (165-164 Ma)**

En el trabajo de García *et al.* (2004) son descritos como cuerpos predominantemente elongados en dirección N-S plutónicos e hipabisales que en la cordillera de la costa intruyen a la Fm. Camaraca (Jmc). En la cuenca de estudio se encuentran el intrusivo Mal Paso (Jmsi (a)) e intrusivos indiferenciados (Jmsi (c)).

El intrusivo Mal Paso (a) posee una superficie de exposición de 25 km<sup>2</sup> conformado por monzodioritas cuarcíferas a monzodioritas faneríticas de grano medio y presenta un grado avanzado de hematización. Por otro lado, los intrusivos indiferenciados (c) son cuerpos plutónicos e hipabisales que afloran en el occidente de la cordillera de la costa y se compone de granodioritas de grano medio, dioritas, gabros, monzodioritas y monzodioritas cuarcíferas de grano medio a grueso faneríticas y porfíricas con masa fundamental microfanerítica, presentando un grado moderado a avanzado de alteración propilítica.

#### **INTRUSIVOS DEL MIOCENO MEDIO Mmi (16-12 Ma)**

Definido por García *et al.* (2004) como un conjunto de cuerpo plutónicos e hipabisales con una superficie de exposición de 15 km<sup>2</sup> distribuida en la alta cordillera. Su composición varía de diorita a monzodiorita, en parte cuarcíferas, con textura fanerítica de grano medio a fino a textura porfídica e intruyen a rocas de las facies de la Fm. Lupica (OMI (a) y OMI (b)) las cuales presentan un grado alto de alteración hidrotermal, silicificación y mineralización polimetálica debido a estos intrusivos.

#### 5.1.4 Rocas Metamórficas

**COMPLEJO METAMÓRFICO DE BELÉN PPb** (Proterozoico Superior-Paleozoico inferior)

Fue primero definido por Montecinos (1963) y luego por García *et.al* (2004) en la hoja de Arica. Según estos autores consiste en 2 unidades principales siendo (a) conformada por esquistos cuarzo micáceos de biotita, anfibolitas de hornblenda y plagioclasa, gneises máficos anfibolíticos y gneises félsicos subordinados, y en menor proporción por filitas, serpentinitas, cuarcitas, migmatitas, filones-manto máficos y félsicos, en tanto la unidad (b) que no se encuentra en la zona de estudio corresponde al ortogneis de Saitoco cuya composición es granodiorítica.

Estas litologías se distribuyen en 3 zonas de afloramientos, de los cuales el mayor se ubica al noreste de Belén cubriendo una superficie de 15 km<sup>2</sup> y se encuentra cubierto en discordancia angular por la Fm. Estratos Quichoco y por rocas de la Fm. Livilcar, mientras que por el oriente subyace a la Fm. Lupica en discordancia angular.

## 5.2 Estructuras

Las rocas con baja porosidad son propensas a sufrir diversos procesos que permiten la formación de una porosidad secundaria. Estos procesos pueden ocurrir durante la diagénesis, como es el caso de la disolución, recristalización y dolomitización, o bien, después de ella por acción de fluidos o fuerzas tectónicas que fracturen las rocas frágiles, por esta razón la presencia de fallas es importante de analizar ya que una zona lo suficientemente fracturada puede tener un potencial hidrogeológico importante.

La cuenca de estudio presenta una serie de fallas con una vergencia noroeste-sureste (Figura 5.1.2) que afectan a las formaciones Mesozoicas y Cenozoicas.

García *et al.* (2004) propone 3 etapas de evolución tectónica, siendo la primera de ellas la evolución del Jurásico Superior-Cretácico Inferior que afectó a la cordillera de la costa y al margen occidental de la depresión central. Las unidades que corresponden a este período (Fm. Atajaña y Fm. Camaraca) se encuentran cortadas por fallas regionales subverticales de rumbos norte-sur a este-oeste, estas pliegan y cortan los depósitos aluviales del Oligoceno-Mioceno

Medio. Los eventos deformativos que generaron estas estructuras podrían estar relacionados a la transurrencia regional norte-sur del Sistema de Fallas de Atacama.

La etapa del Cretácico Superior-Eoceno no se evidencia en el área de estudio, esto podría haber sido provocado por la erosión o por eventos de alzamiento y/o deformación, como consecuencia de los eventos compresivos que afectaron a la zona.

La evolución tectónica del Oligoceno-Holoceno deformó la cobertura por medio de eventos contraccionales en la alta cordillera y en la región oriental de la depresión central, lo que originó los cabalgamientos y fallas menores respectivamente.

La estructura principal que caracteriza este período en la región central es la Falla de Ausipar, la cual se trata de una estructura de extensión longitudinal y de alto ángulo de manteo ( $60^{\circ}\text{E}$ ) cuya proyección en superficie se ubica entre la depresión central y la precordillera. Esta estructura de rumbo NW-SE, corta las formaciones Azapar y Oxaya, y pone en contacto la Fm. Livilcar (Jurásico) con la Fm. Azapa (Oligoceno).

En la parte occidental de la alta cordillera se expone la Falla Nacientes Quebrada Belén de rumbo N-S a NNW-SSE y manteo de aproximadamente  $80^{\circ}\text{E}$  que pone en contacto al complejo metamórfico Belén con la Fm. Lupica. En esta última existen evidencias que sugieren que en el período Oligoceno, la falla tenía un movimiento normal y/o dextral con un reactivación inversa en el Mioceno, pero este movimiento no fue suficiente para invertir la estructura.

Por otro lado, la deformación del Mioceno-Holoceno en la depresión central está representada por fallas subverticales en la Fm. El Diablo, las cuales son escasas en la zona de estudio. Este evento contraccional generó dos cabalgamientos importantes de vergencia oeste en la alta cordillera; Belén-Tignamar y Copaquilla-Tignamar, siendo este último más evidente en la zona de estudio. Copaquilla-Tignamar corresponde a la falla frontal y de menor ángulo del sistema, con un manteo de  $20^{\circ}$  a  $35^{\circ}\text{E}$  y rumbo  $\text{N}20^{\circ}\text{W}$ . Permite el cabalgamiento de los depósitos del Mioceno Inferior-Medio sobre los del Mioceno Superior.

## 6 Marco Hidrogeológico

### 6.1 Unidades Hidrogeológicas

Se han definido unidades hidrogeológicas en relación a su potencial para constituir un acuífero (Figura 6.1.1), para ello se han delimitado los elementos geológicos en base a su composición:

Unidad I: Se compone de unidades con alto potencial hidrogeológico, estos son depósitos fluviales, aluviales, eólicos, salinos, glaciales, coluviales. Estos depósitos consisten mayormente en bolones, gravas, arenas finas a gruesas, en una matriz limosa-arcillosa.

Unidad II: Corresponde a las formaciones geológicas sedimentarias constituidas por areniscas y conglomerados con intercalaciones volcánicas. Además, se incluyen aquellas que presentan algún grado de fracturamiento (fallas), es decir, tiene una porosidad secundaria, la cual le otorga a la unidad un potencial hidrogeológico medio.

Unidad III: Conformada por intrusivos y remanentes volcánicos como domos o lavas que no presentan porosidad primaria ni secundaria, por lo que su potencial hidrogeológico es bajo o nulo.

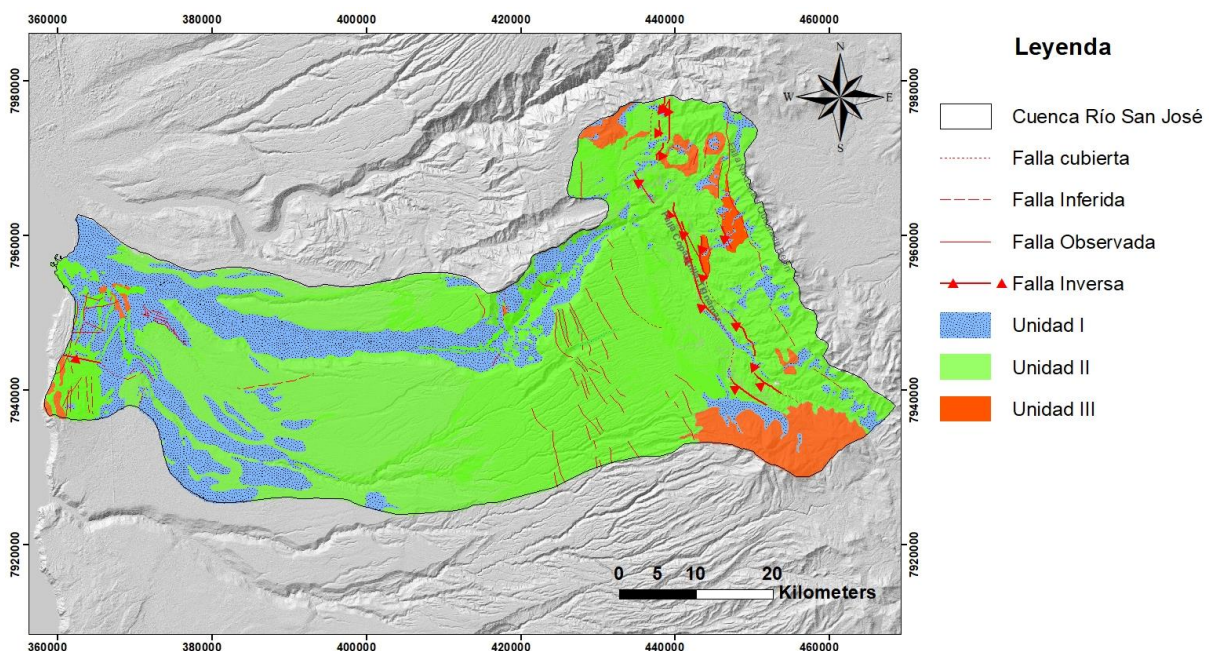


Figura 6.1.1 Delimitación de unidades según su potencial hidrogeológico.

Fuente: Elaboración propia en base a información de Hoja de Arica (García *et al.*, 2004)

## 6.2 Sistema Acuífero

### 6.2.1 Definición del acuífero

El reservorio de agua subterránea presente en la zona corresponde al Acuífero de Azapa como se muestra en la Figura 6.2.1, el cual se extiende por 22 km desde el sector de Cabuza hasta la costa (Jica, 1995). Está relacionado a los depósitos no consolidados descritos en el capítulo de Geología del presente trabajo, particularmente a fluviales, aluviales y terrazas marinas en el sector costero, por lo que está ligado a la Unidad Hidrogeológica I. Estos depósitos no presentan continuidad lateral ni longitudinal, puesto que reciben aportes discontinuos de material mal seleccionado por corrientes de barro y material fino desde las quebradas tributarias al río principal, por lo tanto es un relleno altamente heterogéneo que ha sido objeto de estudios, entre ello, el trabajo de AC Consultores (2009) y el de Jica (1995) en donde se detalla la geometría y composición del acuífero en diferentes tramos.

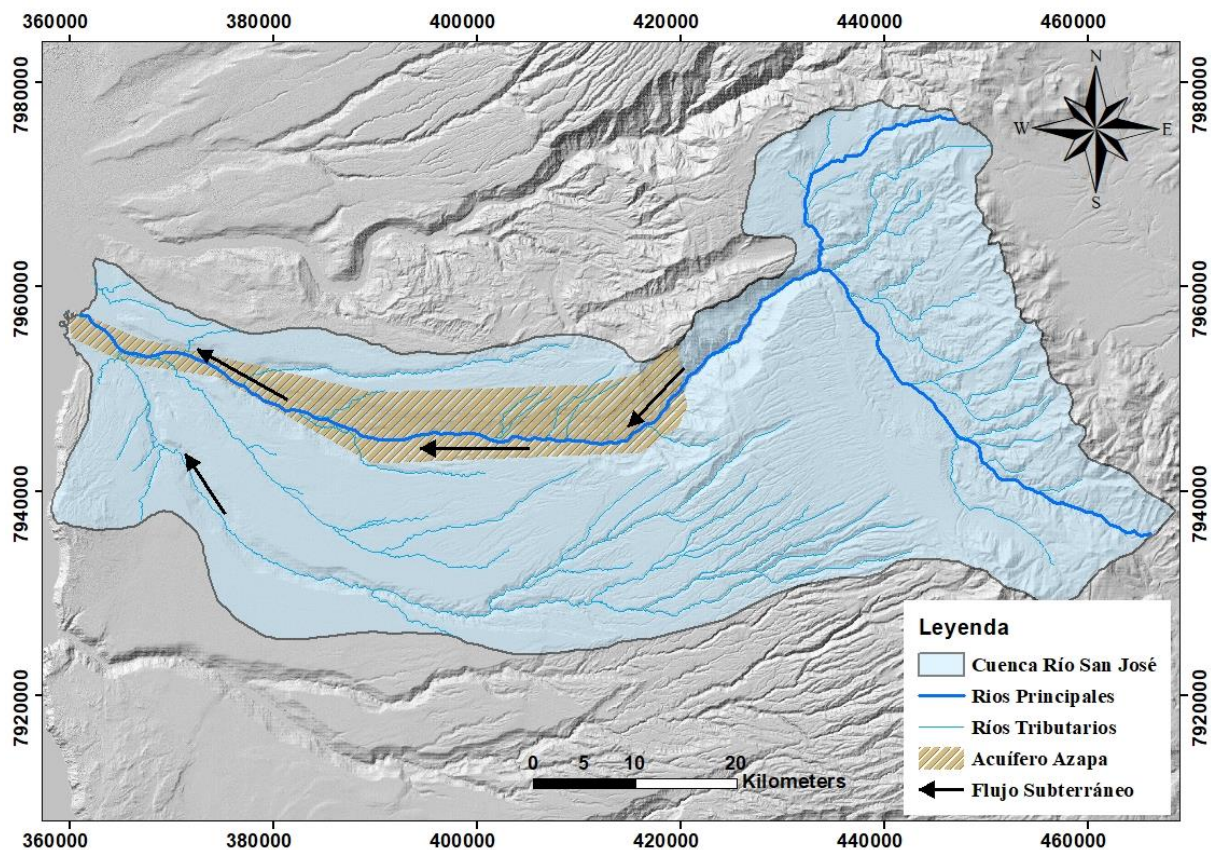


Figura 6.2.1 Acuífero definido en la zona y dirección de flujo subterráneo.  
Fuente: elaboración propia en base a catastro de expedientes de la DGA.

## 6.2.2 Geología Subsuperficial

Para definir el acuífero en sus distintos tramos, en el trabajo mencionado anteriormente se exponen perfiles hidrogeológicos realizados originalmente por Jica (1995) a partir de información geofísica y estratigrafía de pozos en desuso, los que se encuentran detallados en el Anexo III.

### Sector Cabuza - Albarracines

El sector de Cabuza consta de depósitos fluviales recientes, los cuales conforman la unidad acuífera cuyo espesor de 60 m se constituye de bolones, gravas y arenas, estos sobreyacen a los materiales terciarios compuestos por arenas verdosas y amarillas detectadas en el pozo de mayor longitud N°117, el cual alcanza 137 m de profundidad, por lo que ha permitido estimar una potencia de 30 m de las arenas antes mencionadas. En cambio, la posición del basamento ha sido aproximada gracias a los estudios geofísicos disponibles en la zona (Figura 6.2.2).

Avanzando hacia el este del valle, en el tramo de Las Riveras, la estratigrafía obtenida de los pozos 115 y 216 muestra que los materiales son bastante heterogéneos, encontrando alternancias de partículas gruesas, medias y finas, con una gran cantidad de estas últimas (arcillas) que forman lentes impermeables, por otro lado, las unidades permeables principales se ubican entre 10 y 50 m de profundidad. (Figura 6.2.3).

Entre San Miguel y Albarracines es posible observar que los primeros 15 m desde la superficie corresponden a bolones, gravas y arenas no saturadas, bajo las que se presentan gravas, arenas finas saturadas y limos. A mayor profundidad, existen estratos de espesores pequeños e inconexos de conglomerados arenosos y arcillosos, es decir, de bajo potencial hidrogeológico, similar a los depósitos localizados a 35 y 47 m por los pozos 206 y 208 respectivamente, los cuales se componen de arcillas o conglomerados arcillosos. La gravimetría permite inferir una profundidad de 80 m del basamento en la región de estudio (Figura 6.2.4)



## Perfil Sector Cabuza

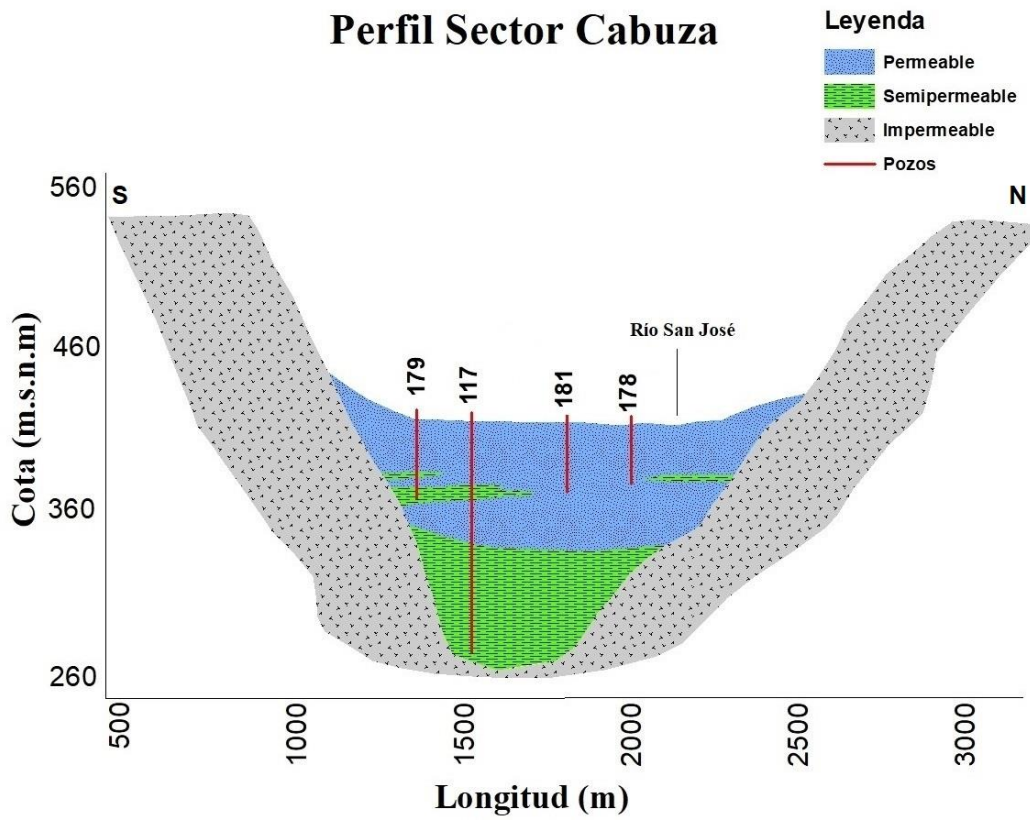


Figura 6.2.2 Perfil hidrogeológico sector Cabuza

Fuente: extraído de Ac Ingenieros (2009), el cual fue modificado de Jica (1995).

## Perfil Sector Las Riveras

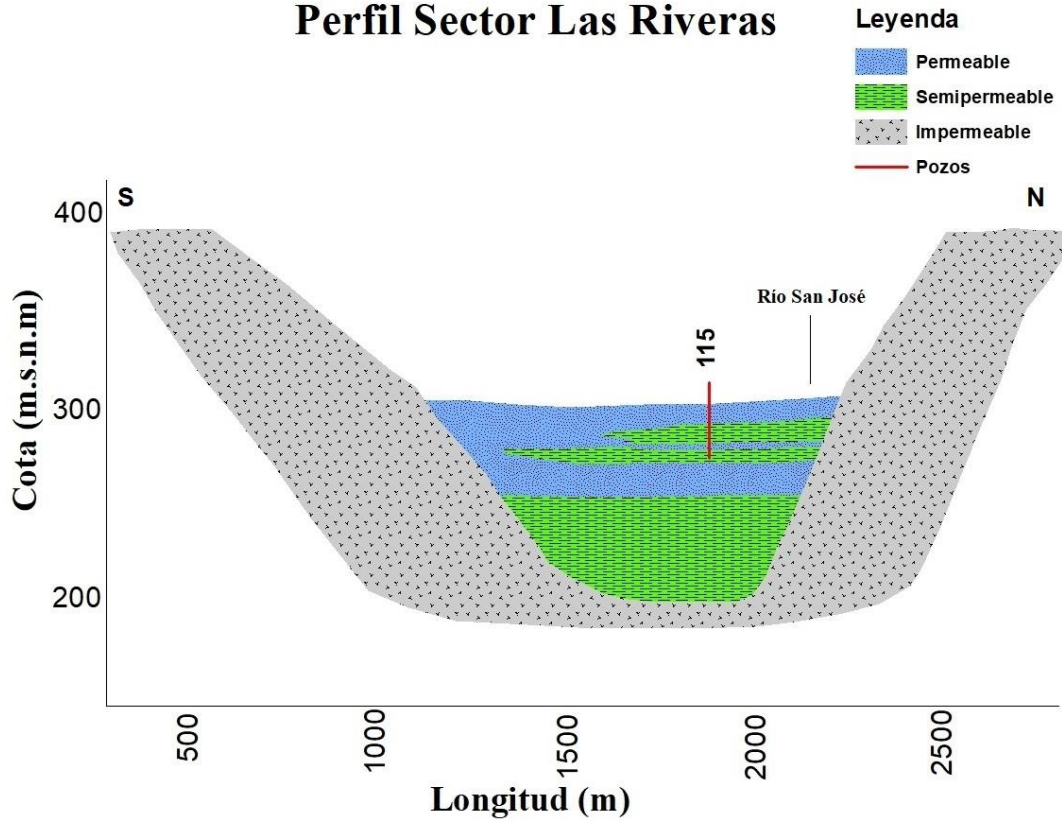


Figura 6.2.3 Perfil hidrogeológico sector Las Riveras

Fuente: extraído de Ac Ingenieros (2009), el cual fue modificado de Jica (1995).



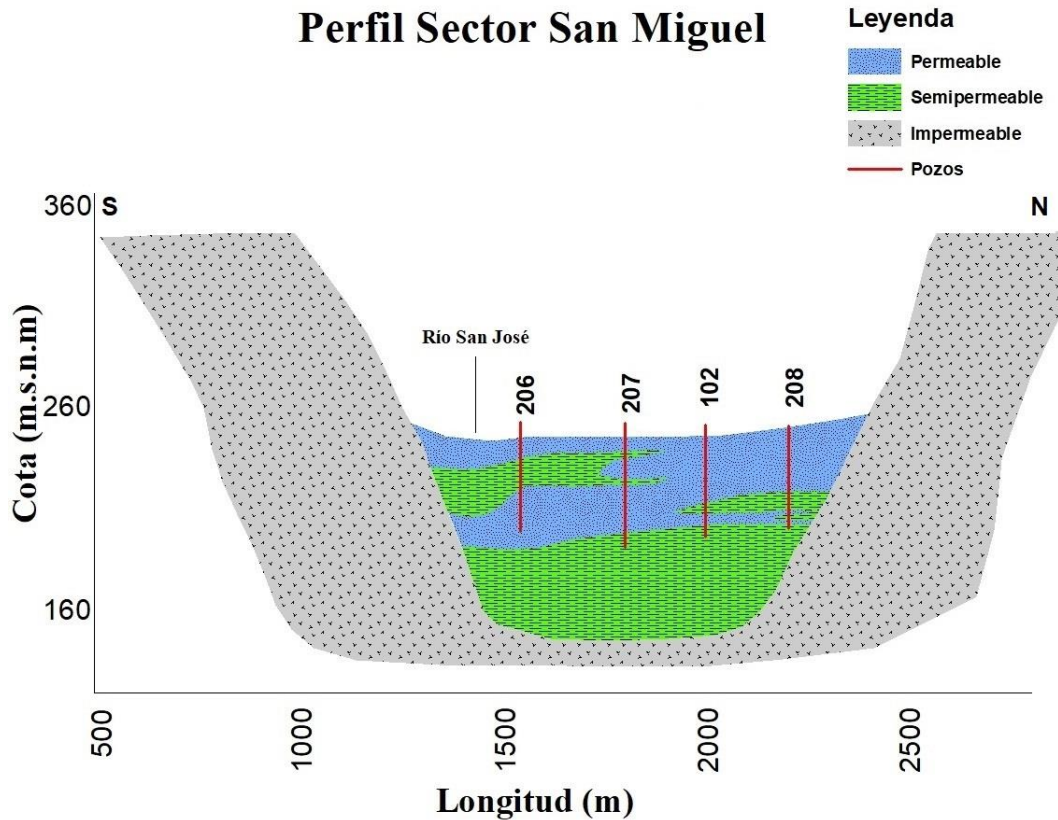


Figura 6.2.4 Perfil hidrogeológico sector San Miguel  
Fuente: extraído de Ac Ingenieros (2009), el cual fue modificado de Jica (1995).

#### Sector Albarracines – Alto Ramirez

Entre San Miguel y Pago de Gómez las unidades acuíferas próximas a las laderas son de espesores reducidos con intercalaciones mayores de finos o materiales cementados. Sin embargo, esta situación cambia en las zonas circundantes al lecho del río donde las potencias aumentan hasta alcanzar los 15 m.

Los depósitos presentan gran heterogeneidad en sus características granulométricas, puesto que en los niveles superiores predominan bolones y gravas, en contraste, los niveles más profundos (35 a 45 m) poseen granulometría media a fina conformada por gravas, arenas y arcillas en cantidades variables. Resaltan espesores considerables en la zona no saturada del acuífero, de esta manera facilitan la infiltración natural de la escorrentía superficial.

A partir del perfil obtenido de Ac Ingenieros (2009), en la localidad de Las Maitas se estima una potencia de 90 m en el acuífero y una posición de la roca basal a los 170 m de profundidad (Figura 6.2.5)

Continuando hacia el poniente del valle, en Pago de Gómez la información estratigráfica proveniente de la alta densidad de pozos permite inferir una gran variabilidad en el tamaño de partículas y espesores del relleno, lo que conlleva a una evidente discontinuidad lateral de estos materiales. Lo anterior, se justifica mediante los depósitos de barro transportados por la quebrada Llosyas hacia el valle del río principal (Figura 6.2.6)

En este tramo, algunos pozos revelan la existencia de unidades permeables de 20 a 50 m de profundidad, e incluso de algunos sectores con 70 m de material grueso sin presencia de finos.

En general los acuíferos detectados presentan una capa superior gruesa con predominancia de bolones, a su vez que los niveles más profundos se componen de gravas y arenas. A mayor profundidad los estratos impermeables se constituyen de arcilla con limos o arena y conglomerados arcillosos.

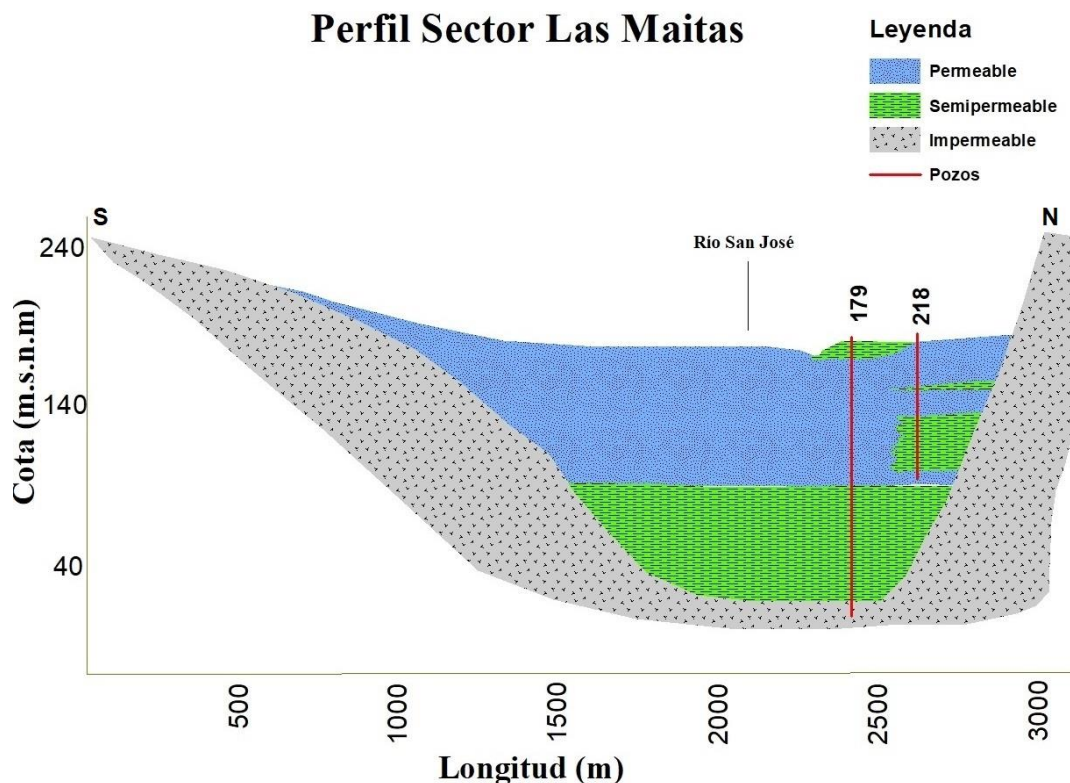


Figura 6.2.5 Perfil hidrogeológico sector Las Maitas  
Fuente: extraído de Ac Ingenieros (2009), el cual fue modificado de Jica (1995).

## Perfil Sector Pago de Gómez

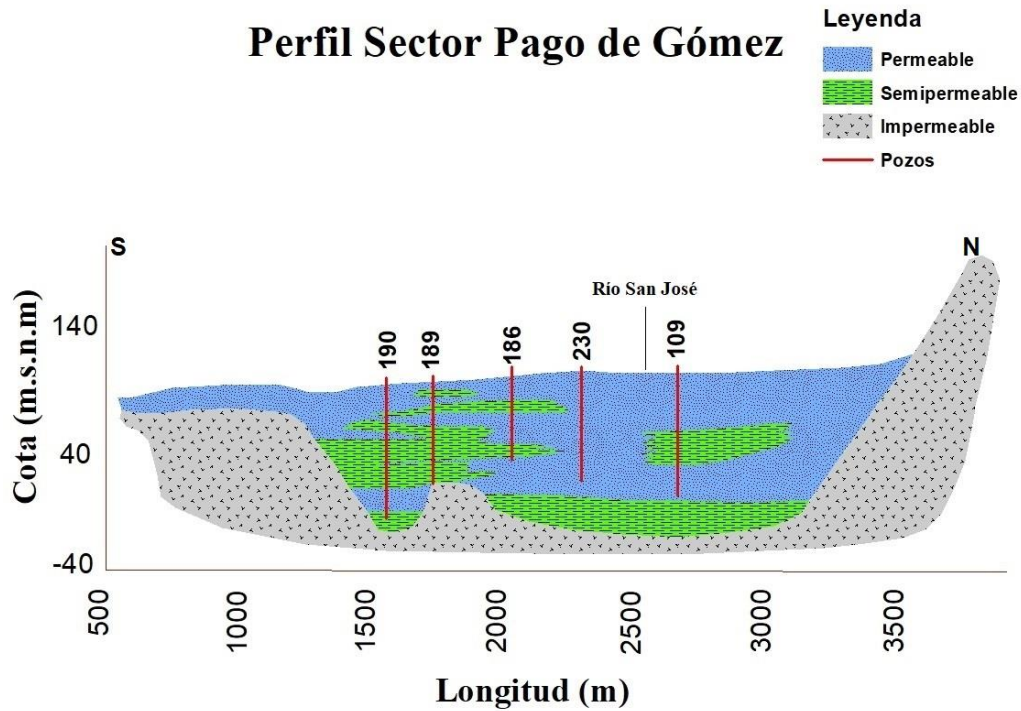


Figura 6.2.6 Perfil hidrogeológico sector Pago de Gómez

Fuente: extraído de Ac Ingenieros (2009), el cual fue modificado de Jica (1995).

### Sector Alto Ramírez – Arica Costa

La zona abarca desde el extremo este de la ciudad de Arica hasta la costa, de esta manera el perfil (Figura 6.2.7) ha sido trazado de norte a sur en la ciudad.

Las unidades acuíferas detectadas tienen un nivel superior no saturado a una profundidad de 10 m formado por gravas y bolones. El resto del estrato permeable corresponde a intercalaciones de gravas y arenas de pequeño espesor. Así mismo, en las proximidades al lecho del río se encuentran materiales gruesos pero con matriz fina.

Además, se ha detectado estratos de 15 m de potencia a una profundidad mayor a 25 m, compuesto por materiales gruesos con matriz limosa, mientras que bajo los 35 - 40 m existen importantes niveles de arcillas y cenizas volcánicas (pozos 118 y 119).

Resumidamente, el tramo presenta un acuífero libre entre los 40 y 60 m y un acuífero confinado a más de 100 m de profundidad.

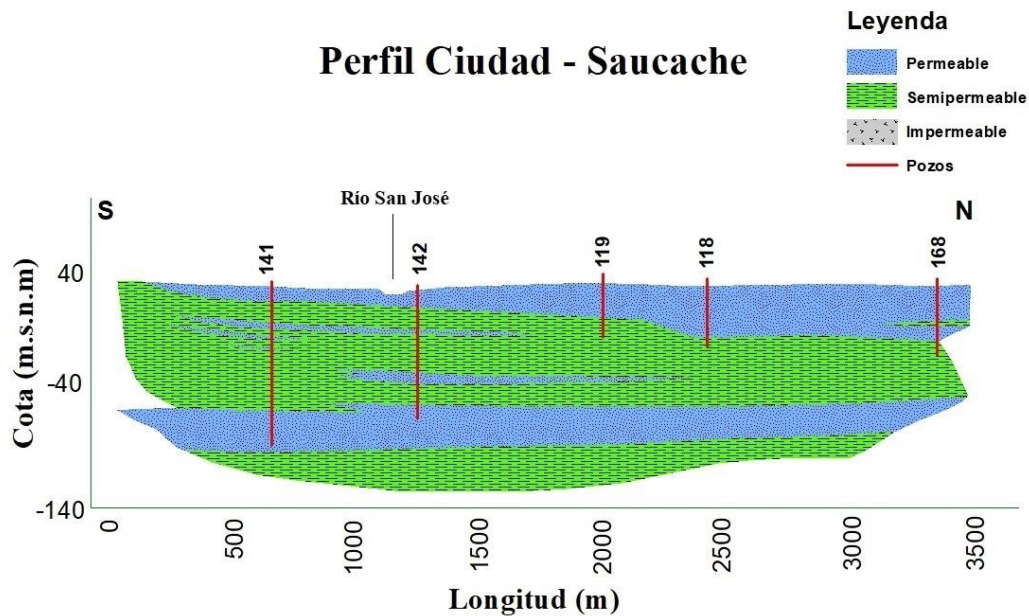


Figura 6.2.7 Perfil hidrogeológico sector Ciudad – Saucache  
Fuente: extraído de Ac Ingenieros (2009), el cual fue modificado de Jica (1995).

### Costa

La estratigrafía presenta similitudes al tramo anterior como se observa en la Figura 6.2.8, con una profundidad de 260 m del basamento.

El acuífero no es un medio continuo puesto que se alberga localmente en ciertos sectores de la formación marina sedimentaria La Concordia, por lo tanto se encuentra protegido de la intrusión marina gracias a la unidad antes mencionada que actúa como barrera en el tramo.

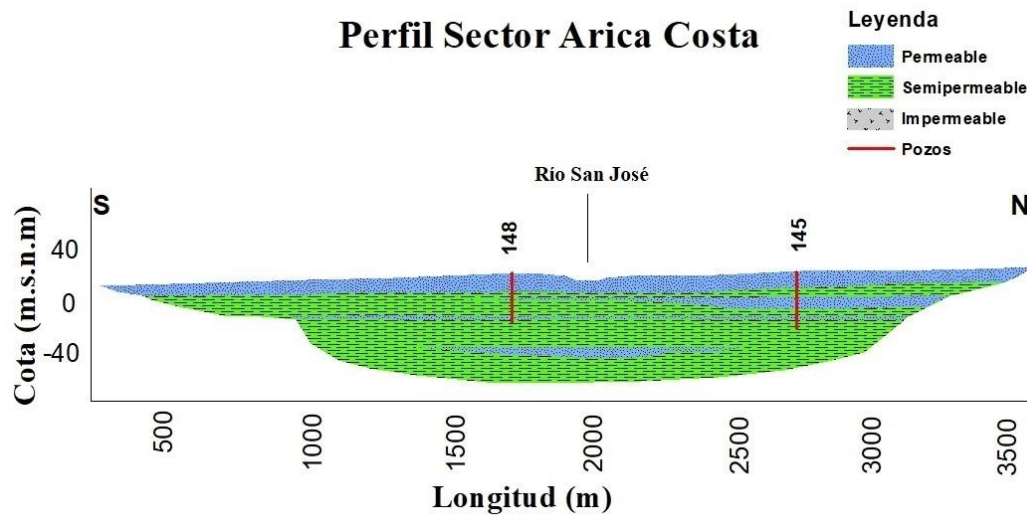


Figura 6.2.8 Perfil hidrogeológico sector Arica Costa

Fuente: extraído de Ac Ingenieros (2009), el cual fue modificado de Jica (1995).

Con los acuíferos descritos se puede proceder a determinar los espesores de estos, información necesaria para obtener el parámetro de permeabilidad. La siguiente tabla 6.2.1, representa resumidamente las características más importantes de cada tramo del acuífero:

Tabla 6.2.1 Resumen características principales de los sectores acuíferos

Fuente: modificado de Jica (1995)

Acuífero	Espesor (m)	Características
Cabuza	50-60	Escasa presencia de limos y arcillas
Las Riveras	10-50	Presencia importante de lentes de arcilla
San Miguel	50 total (incluyendo capa impermeable)	Se divide en 2, una capa superior y una interior con una capa impermeable entre ellas.
Las Maitas	90	Nivel superior con granulometría gruesa (bolones y gravas) y un nivel inferior con gravas, arenas y arcillas
Pago Gómez	45	Contiene capas impermeables discontinuas en algunos sectores
Ciudad - Saucache	55	Escasas capas impermeables
Arica Costa	Variable	Predominio de materiales finos (arcillas y limos)

### 6.2.3 Exploración Geofísica

Para determinar la profundidad del basamento e identificar unidades saturadas y no saturadas, frecuentemente se recurre a métodos geofísicos que permitan una aproximación de la geología de subsuperficie, siendo la gravimetría y el transiente electromagnético (TEM) los más usados en la construcción de perfiles, los que deben ser calibrados con estratigrafía observada en pozos ubicados en la zona de interés.

En la cuenca del Río San José se han realizado algunos trabajos con método TEM; siendo el primer estudio solicitado por AC Ingenieros Consultores (2009) a la empresa Geodatos Ltda, obteniendo 4 perfiles en las regiones indicadas en el mapa adjunto (Figura 6.2.9). Estos perfiles corresponden a una interpretación hecha en base a la resistividad de los materiales que componen la zona en profundidad, el detalle de estos se muestra en el Anexo IV.

Un segundo estudio fue elaborado por INH (2014) en donde se programaron estudios en 7 sectores para obtener como resultado un perfil longitudinal que abarca la zona mostrada en la imagen ya mencionada. Este perfil (Figura 6.2.10) muestra una zona de altas resistividades en profundidad, representando el basamento de andesitas o riolitas, sobre las que se posiciona una unidad con valores menores a 30 Ohm-m indicando una muy baja resistividad, por lo que se ha establecido como una zona de gravas y arenas saturadas de agua, siendo este el sector que delimita el acuífero de Azapa. Cabe resaltar que dentro de esta unidad existe un área en específico que registra mayor resistividad, interpretada como un lente de materiales impermeables debido a un predominio de arcillas húmedas. Finalmente, la cubierta sedimentaria que abarca los valles presenta valores de resistividad mayores a 40 ohm-m compuesta por gravas y arenas gruesas secas.



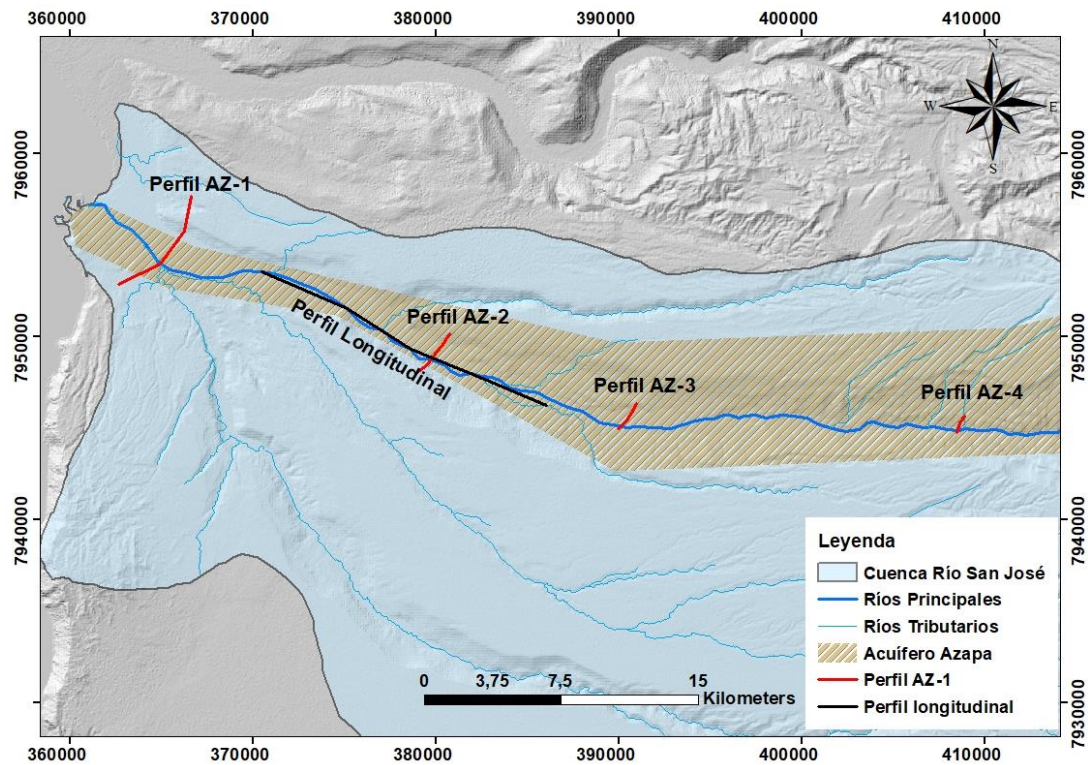


Figura 6.2.9 Ubicación perfiles geofísicos de ambos estudios. Escala 1:200.000  
 Fuente: Elaboración propia con información de Ac Ingenieros Consultores (2009) e INH (2014).

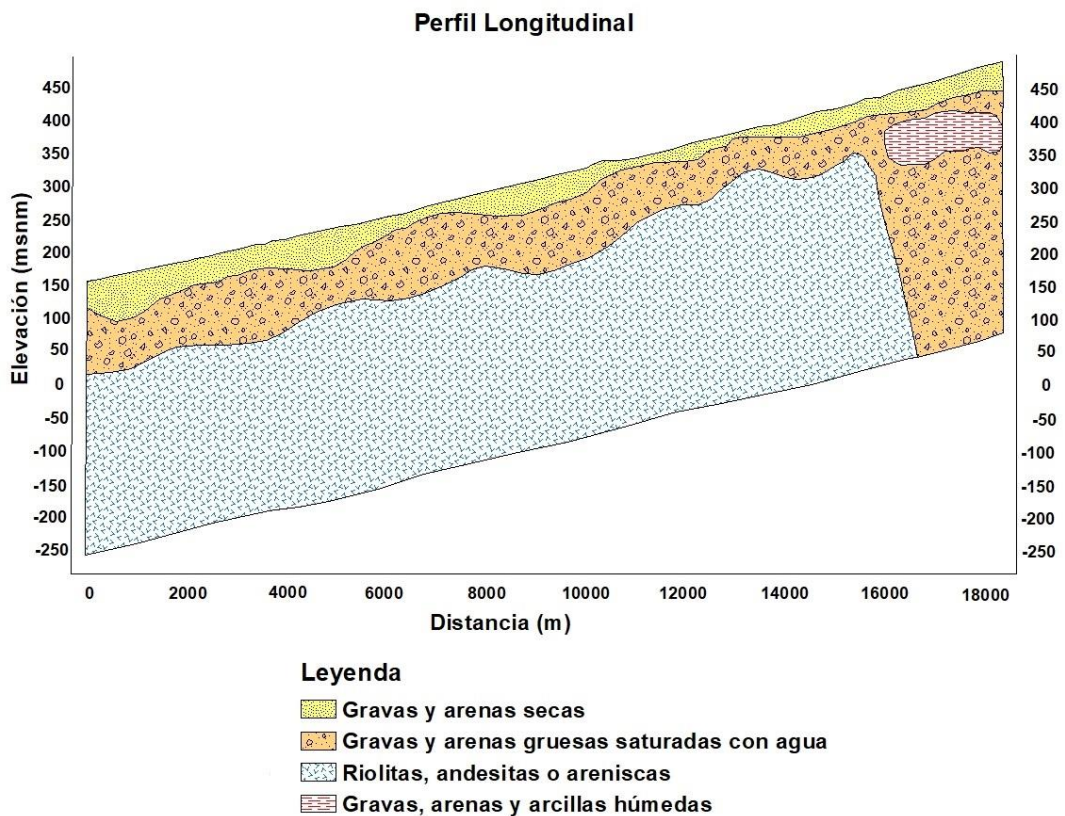


Figura 6.2.10 Perfil longitudinal geofísico del valle.  
 Fuente: Modificado de INH (2014)

## 6.3 Balance Hídrico

En el estudio “Análisis integral de soluciones a la escasez hídrica, (segunda parte), Región de Arica y Parinacota” desarrollado por ICASS SpA en el año 2017, se presentan los mecanismos de recarga y descarga para la cuenca, cuyos cálculos han permitido conocer el déficit hídrico al que está sometida la cuenca producto de la sobreexplotación y mal manejo de los recursos. El balance está hecho para cada subcuenca por separado; Azapa Alto, que considera desde la cabecera hasta Ausipar, y Río San José Bajo, que abarca desde Ausipar hasta la costa de Arica.

Este análisis considera como mecanismos de recarga a las precipitaciones, infiltración del agua de riego, el transvase desde el canal Lauca y los flujos entrantes superficiales y subterráneos. En cambio, los mecanismos de descarga considerados son evaporación, evapotranspiración, flujo superficial y subterráneo, y por último las extracciones desde las distintas captaciones existentes en el valle.

### 6.3.1 Azapa Alto

La Tabla 6.3.1 presenta los datos estimados para cada parámetro presente en el sistema mediante distintas metodologías. Las precipitaciones han sido extraídas a partir de isoyetas regionales, el transvase del canal Lauca se ha calculado con los registros disponibles en la estación Canal Lauca en Sifón N°1, además, la evapotranspiración del sector se ha obtenido aplicando el método de Turc, mientras que las extracciones corresponden a la demanda real por usos, finalmente el caudal (tanto superficial como subterráneo) saliente se ha estimado a través de los caudales medios medidos en la estación Río San José en Ausipar.

Tabla 6.3.1 Balance hídrico para la subcuenca Azapa Alto  
Fuente: Extraído de “Análisis integral de soluciones a la escasez hídrica”, ICASS (2017)

<b>Componente del balance</b>	<b>Balance del sistema</b>
<b>Entradas (l/s)</b>	
Precipitaciones	6101
Transvase desde el canal Lauca	767
<b>Total Entradas (l/s)</b>	<b>6868</b>
<b>Salidas (l/s)</b>	
Evapotranspiración	5650
Evaporación desde cuerpos de agua	48



Extracciones	18
Caudal (superficial y subterráneo) saliente	1124
<b>Total Salidas (l/s)</b>	6840
<b>Balance (l/s)</b>	+28

El balance presenta un valor positivo, por lo que el sistema se encuentra en equilibrio y no existe déficit que deba ser regulado.

### 6.3.2 Río San José Bajo

De manera similar al cálculo realizado anteriormente, se estiman los componentes del balance que existen en el valle, dado que es un sector con actividad antrópica, lo cual influencia especialmente en las salidas del sistema, se deben considerar adicionalmente componentes como el riego, el cual ha sido estimado como el 30% del consumo agrícola. Además, se ha considerado el caudal superficial de crecida, puesto que el sector es afectado por los aumentos en el caudal del río principal, para ello se ha estimado un valor con el volumen de crecida medio anual, en tanto, el caudal subterráneo se considera nulo ya que el bombeo existente es elevado como se observa en la Tabla 6.3.2, donde se demuestra un balance negativo de la subcuenca.

Tabla 6.3.2 Balance hídrico para la subcuenca Río San José Bajo  
Fuente: Extraído de “Análisis integral de soluciones a la escasez hídrica”, ICASS (2017)

Componente del balance	Balance del sistema
<b>Entradas (l/s)</b>	
Precipitaciones	954
Retorno por riego	503
Caudal superficial estimado entrante	1124
<b>Total Entradas (l/s)</b>	2581
<b>Salidas (l/s)</b>	
Evapotranspiración	954
Extracciones	2700
Caudal superficial de crecida estimado saliente	149
Caudal subterráneo estimado saliente	0
<b>Total Salidas (l/s)</b>	3803
<b>Balance (l/s)</b>	-1222

Como se aprecia, el balance representa un importante déficit de 1000 l/s en el sector del valle, debido al aumento de la superficie de cultivo, cuyos requerimientos conllevan a una extracción mayor. Esta pérdida en el sistema se debe en gran parte a que los derechos otorgados y solicitados exceden la capacidad del acuífero, ya que incluso si las captaciones no se encuentran en funcionamiento el 100% del tiempo, superarían la oferta. De esta manera, si el riesgo opera un 30% del tiempo, el agua potable un 70% y las de uso industrial un 90%, se obtiene un caudal total en derechos otorgados de 1195 l/s y 293 l/s en caudales totales de derechos solicitados. (Ac Ingenieros Consultores LTDA., 2009)

## 6.4 Parámetros Hidráulicos

### 6.4.1 Transmisividad

Según IGME (1984) el término hace referencia al volumen de agua por unidad de tiempo que fluye por una sección unitaria y saturada del acuífero, con un determinado gradiente hidráulico, en otras palabras, es la facilidad del agua para circular horizontalmente por un espesor saturado, por lo que refleja la capacidad que tiene el acuífero de ceder agua.

Es un parámetro que puede ser obtenido mediante distintas metodologías de análisis de las pruebas de bombeo existentes en los expedientes de la DGA (Anexo V) o también puede ser calculada directamente conociendo la permeabilidad del acuífero mediante la expresión:

$$T = K \cdot b$$

Donde:

T es la transmisividad o transmisibilidad medida en m<sup>2</sup>/día

K es la permeabilidad en unidades de m/día

b corresponde al espesor saturado del acuífero medido en m

Según esto, es un parámetro constante en acuíferos confinados dado que el espesor saturado en ellos permanece estable, sin embargo, en aquellos que son libres se presentan fluctuaciones del nivel freático gracias a variaciones estacionales o extracciones antrópicas, por lo tanto la transmisividad también es variable.

Para elaborar el mapa de T se han obtenido algunos datos mediante el análisis de pruebas de bombeo trabajadas en el software Aquifer test 2016.1, utilizando solo aquellas captaciones de

longitud profunda, por lo que se han excluido norias por ser pozos de poca profundidad. Lo anterior en conjunto con información recopilada por Ac Ingenieros Consultores (2009), han permitido determinar los sectores de mayor transmisividad como se observa en el mapa de la Figura 6.4.1, donde se demuestra que los números más altos se registran en Cabuza alcanzando hasta los 3000 m<sup>2</sup>/día, valor visiblemente superior a los obtenidos en el sector de La Rivera cuyo registro de transmisividades oscila entre 1500 y 2000 m<sup>2</sup>/día. Por otra parte, el tramo de San Miguel experimenta una mayor heterogeneidad de datos (150 a 300 m<sup>2</sup>/día en ciertos pozos), por lo que se ha estimado un promedio de 37 m<sup>2</sup>/día dada la presencia de capas impermeables. Esta situación difiere notablemente del sector de Las Maitas, la que posee un predominio entre los 1500 a 2000 m<sup>2</sup>/día.

El segundo tramo con mayores transmisividades corresponde a Pago de Gómez, donde se observan dispersión de datos puesto que es una zona heterogénea (menos importante que en San Miguel) cuyo valor promedio es de 1900 m<sup>2</sup>/día.

Finalmente, los resultados obtenidos para Saucache dan un rango entre 150 y 700 m<sup>2</sup>/día, en tanto, para la costa de Arica se han obtenido valores menores a 150 m<sup>2</sup>/día, por tratarse de sectores con amplias zonas impermeables.

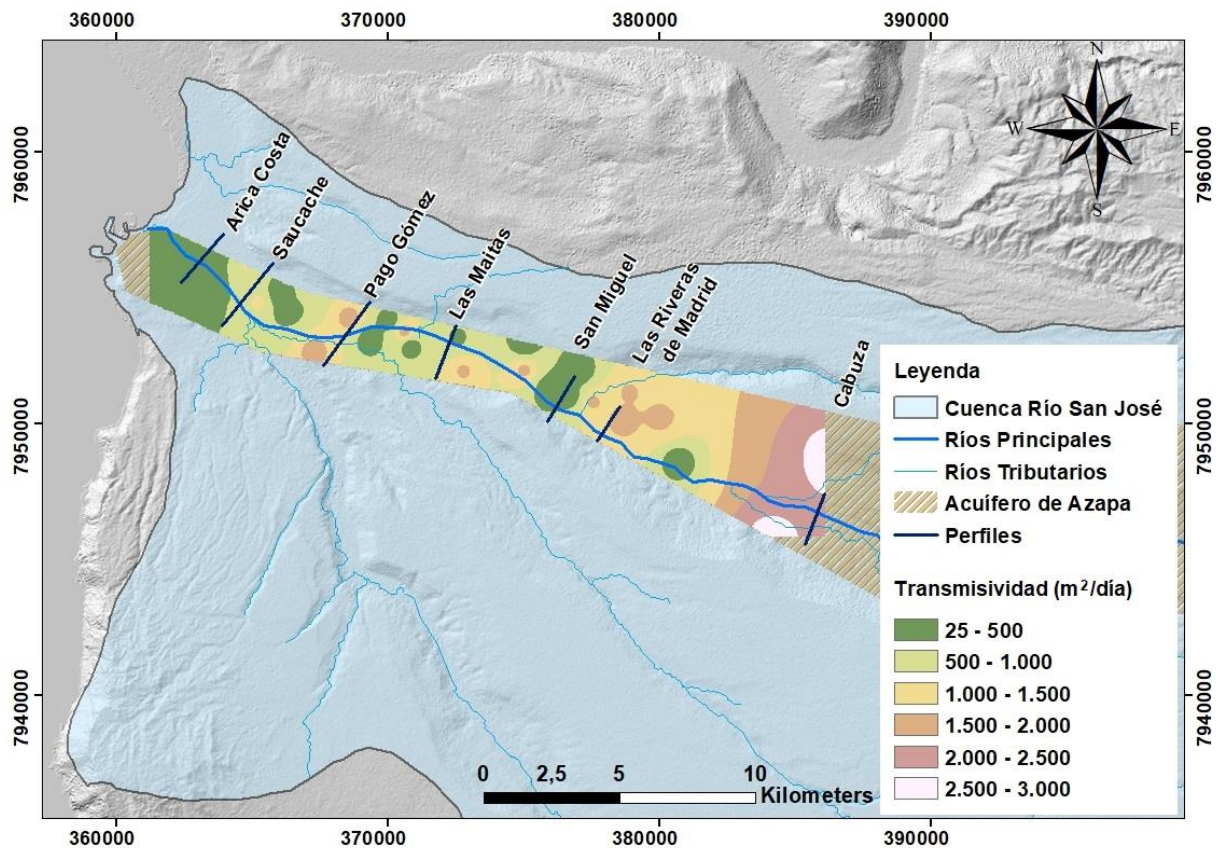


Figura 6.4.1 Transmisividad en los distintos sectores del acuífero de Azapa. Escala 1:150.000.

Fuente: elaboración propia con información de las pruebas de bombeo de las captaciones de la zona y de los estudios de Ac Ingenieros (2009), escala 1:150.000

Para tener una mejor apreciación y criterio para la determinación de las zonas con mejores características para implementar un sistema de recarga, se han recopilado calificaciones estimativas de distintos autores, los cuales se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 6.4.1 Resumen de calificaciones estimativas de distintos autores para transmisividad.

Fuente: extraído de Pozos y captaciones, IGME (1984).

T (m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica

T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica
----------	----------	--

Según esto, los sectores de San Miguel y la costa de Arica son los menos apropiados, por el contrario, el sector Cabuza es el que presenta mejores cualidades para proponer un proyecto de infiltración artificial. Esto será analizado en detalle más adelante, junto con las demás variables que condicionan el proyecto.

#### 6.4.2 Permeabilidad

Es una medida de la textura del acuífero ya que representa la facilidad con que se moviliza el agua en el medio geológico. Este parámetro es importante para determinar la zona de recarga artificial, ya que facilita la incorporación del recurso que va a ser almacenado.

Los valores utilizados para este estudio se han obtenido de 2 fuentes; la primera fue mediante la expresión que relaciona la transmisividad y el espesor saturado con la permeabilidad a partir de los datos estimados, en tanto, la segunda fuente corresponde al mapa elaborado por INH (2014), el cual fue utilizado para calibrar los resultados obtenidos, con ello se ha generado el siguiente mapa 6.4.2.

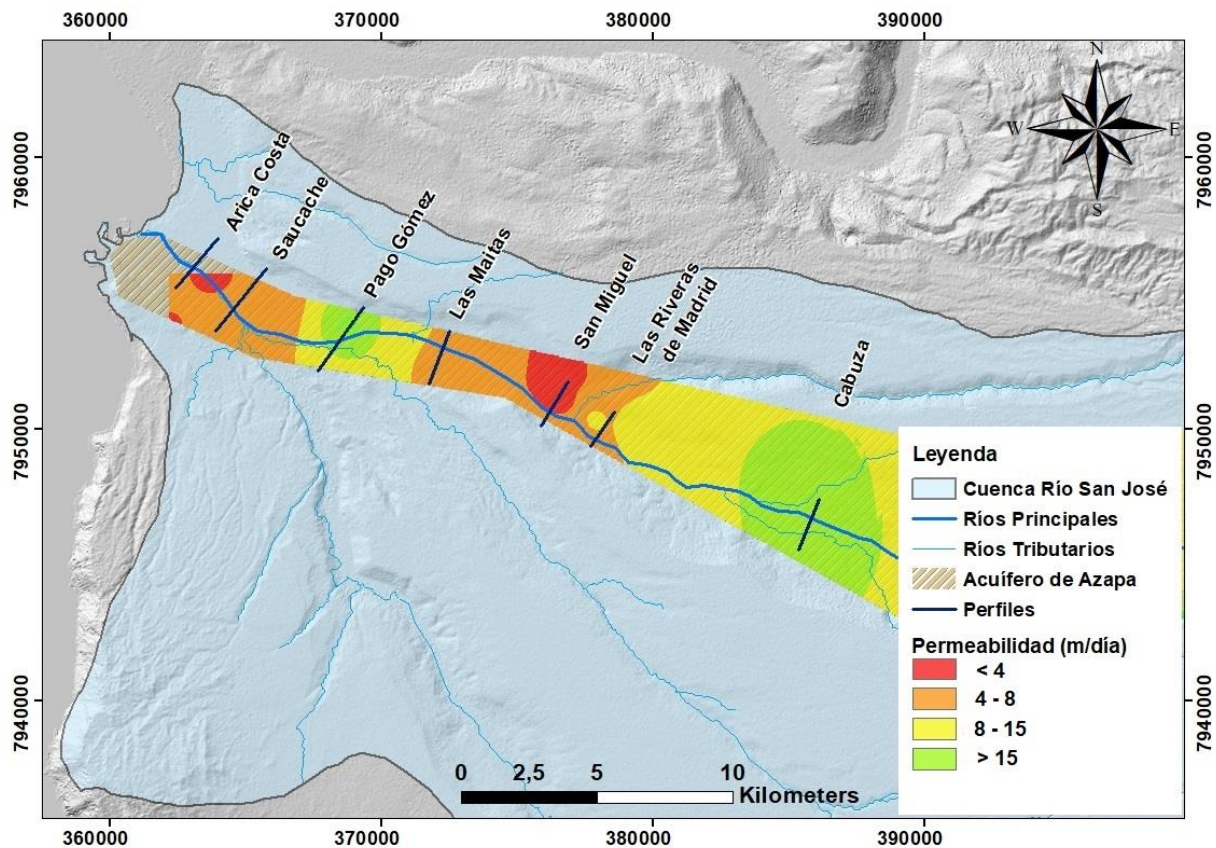


Figura 6.4.2 Permeabilidad en los distintos sectores del acuífero de Azapa. Escala 1:150.000.

Fuente: elaboración propia a partir del mapa elaborado por INH (2014) y con datos obtenidos de T y S para este trabajo, este último obtenido a partir de los niveles freáticos y espesores del acuífero en sus distintos segmentos.

Algunos valores referenciales recopilados a partir de varios autores (Tabla 6.4.2), permiten dar cuenta que los lugares con permeabilidades mayores a 15 m/día son los más aptos para los procesos de infiltración. De esta manera, se debe corroborar el nivel freático en los sectores de Cabuza y Pago Gómez así como las variaciones que este presente históricamente para determinar un volumen de almacenamiento.

Tabla 6.4.2 Resumen de calificaciones estimativas de distintos autores para permeabilidades  
Fuente: extraído de Pozos y captaciones, IGME (1984)

K (m/día)	Calificación estimativa
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

### 6.4.3 Coeficiente de almacenamiento

Consiste en la cantidad de agua que es capaz de ceder un prisma de acuífero por unidad de área y cambio de altura (IGME, 1984), expresándose como:

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen de descenso del nivel freático (NF)}}$$

Este concepto es importante para determinar el volumen de almacenamiento en el acuífero, y se obtiene a partir de las pruebas de bombeo que cuenten con un pozo de observación. Dado que este último no se encuentra presente en ninguno de los expedientes analizados, es posible asumir valores según el tipo de acuífero, como se resumen en el siguiente cuadro:

Tabla 6.4.3 Resumen de calificaciones estimativas de distintos autores para coeficientes de almacenamiento.

Fuente: extraído de Pozos y captaciones, IGME (1984).

Tipo de material permeable	Forma del funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
<b><i>Kárstico:</i></b>		
Calizas y dolomía jurásicas	Libre	$2 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$5 \times 10^{-5}$
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2}$ ó $6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3}$ ó $5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4}$ ó $5 \times 10^{-5}$
<b><i>Poroso intergranular:</i></b>		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2}$ ó $15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3}$
	Confinado	$10^{-4}$
<b><i>Kársticos y porosos:</i></b>		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2}$ ó $18 \times 10^{-2}$

Para efectos de esta memoria de título, se han tomado los datos del estudio de la Dirección de riego (1989) que da un 13% en Pago de Gómez, 4% en San Miguel, 5% en Las Maitas y finalmente como promedio general un 7% por tratarse de un acuífero libre.

## 6.5 Nivel Freático

La profundidad a la que se encuentra el nivel freático (NF) es un parámetro fundamental de considerar para la elección de los sectores apropiados para la recarga, puesto que se requiere un volumen de almacenamiento suficiente. Dado que el clima predominantemente árido es desfavorable para la recarga natural del acuífero y la descarga antrópica es la principal causa de la sobreexplotación en él, es lógico que los niveles presenten descensos importantes en un largo plazo.

Es por ello, que se necesitan datos de la posición del nivel freático para un mismo período con el fin de visualizar en qué sectores existe un espesor importante de zona no saturada y las fluctuaciones que pueda presentar, puesto que se debe asegurar la permanencia del volumen infiltrado en el acuífero evitando el afloramiento de este a causa de una disminución natural de la profundidad del nivel estático. Si bien existen numerosas estaciones de monitoreo en la cuenca son pocas las que se encuentran localizadas dentro del acuífero y que cuentan con suficiente información, siendo las más representativas: Hotel El Paso, Las Vargas, Las Ánimas, Pago Gómez San Elías, Santa Irene Sur, Las Riveras de Madrid, Pascual Roco, Centella, Escuela Chitita N°28 y Cerro Moreno, todas ellas cuentan con datos suficientes para construir el mapa de niveles (Figura 6.5.1), donde se observa que los pozos Las Vargas, Pago Gómez San Elías y Centella presentan una profundidad mayor a 30 m. Por otra parte, el pozo Hotel El Paso, es el que registra los niveles más superficiales (~5 m), siendo así, la opción menos viable para realizar el proyecto.



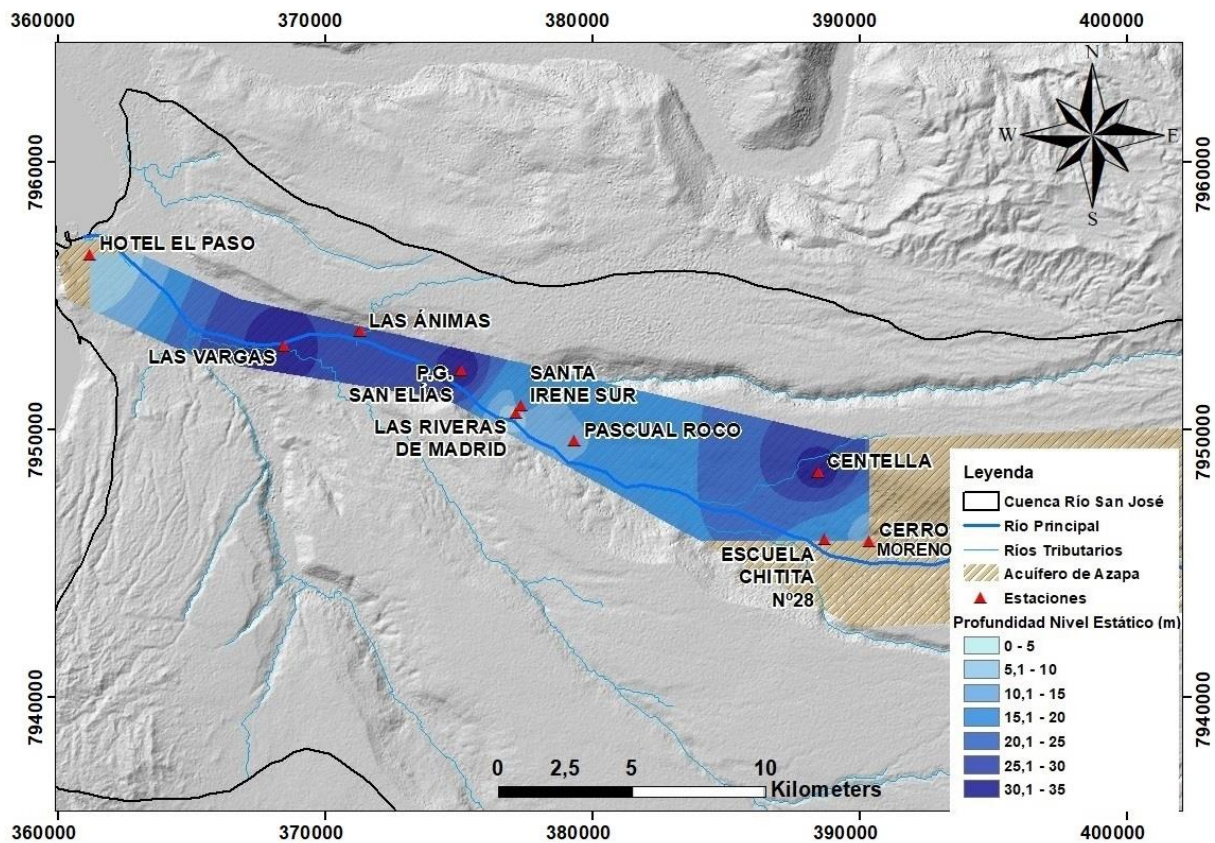


Figura 6.5.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo de niveles freáticos de la DGA y sus respectivas profundidades. Escala 1:150.000.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

La variación en el pozo Las Vargas (Gráfico 6.5.1) refleja una profundización de los niveles a través de los años, dado que la zona se encuentra cercana a la costa del pacífico donde desemboca el recurso. Además, el área se ve afectada por las extracciones de agua subterránea cada vez más intensas como consecuencia del aumento en la superficie de cultivos, sin embargo, cabe destacar que también se registran algunos pic de recuperación producto de mayores caudales en épocas de altas precipitaciones. Tomando en cuenta estas características es un sector que podría considerarse con alto potencial de almacenamiento ya que en los últimos años sus fluctuaciones han sido mínimas y se ha mantenido a profundidades mayores a 40 m, pero esto debe ser tratado con cuidado puesto que al inyectar agua al acuífero en esta zona podría causar la pérdida de este al estar tan cerca del sector costero como ya se ha mencionado anteriormente.

En cuanto a los pozos Pago Gómez San Elías, Centella y Las Ánimas (Gráficos 6.5.2, 6.5.3 y 6.5.4), si bien presentan valores interesantes, no presentan suficiente información debido a que

su monitoreo ha sido suspendido, por lo que no se tiene conocimiento reciente de los efectos que han experimentado por la sobreexplotación del acuífero.

Los pozos Pascual Roco y Escuela Chitita N°28 no presentan grandes fluctuaciones por lo que tiene mayor estabilidad (Gráfico 6.5.5 y 6.5.6), probablemente atribuida a que se encuentran en sectores con menor demanda del recurso, por lo que su extracción ha sido constante. Para estudiar las variaciones de los demás pozos ver Anexo VI.

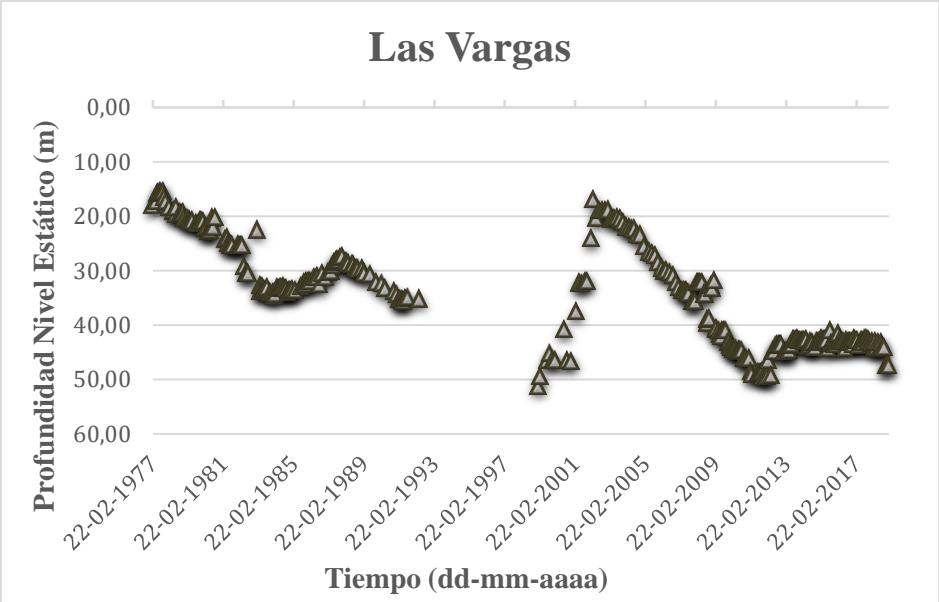


Gráfico 6.5.1 Variación de los niveles estáticos en estación Las Vargas.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

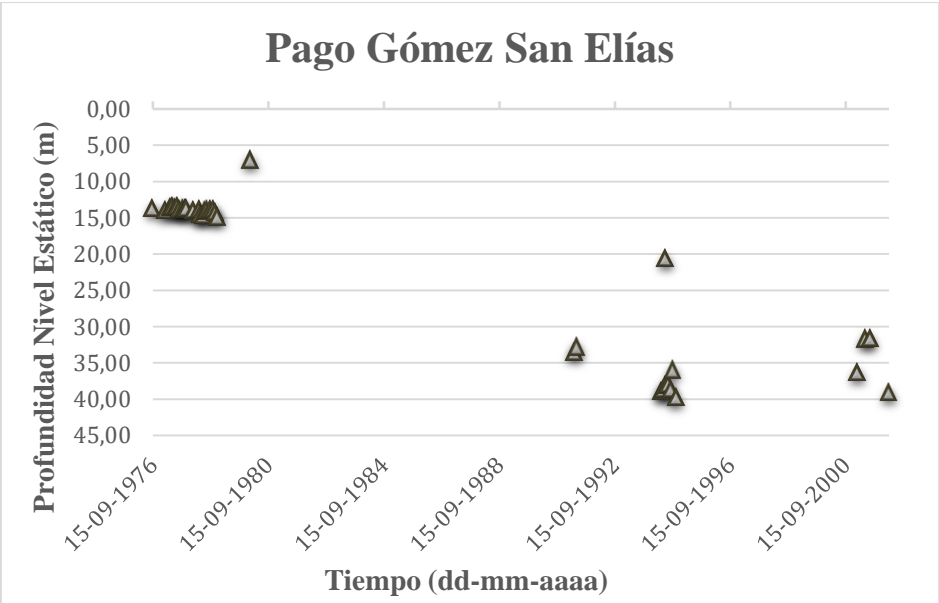


Gráfico 6.5.2 Variación de los niveles estáticos en Pago Gómez San Elías.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

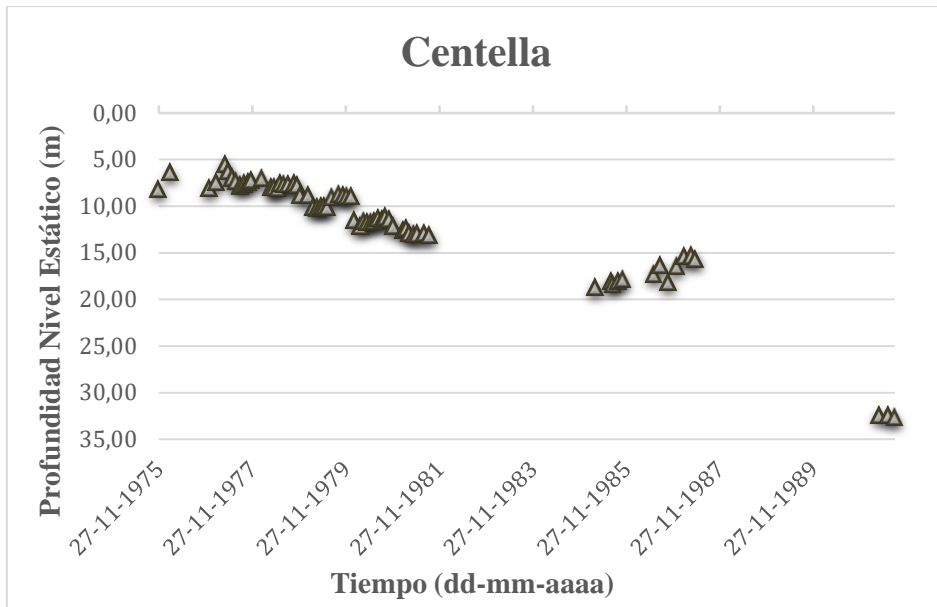


Gráfico 6.5.3 Variación de los niveles estáticos en Centella.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

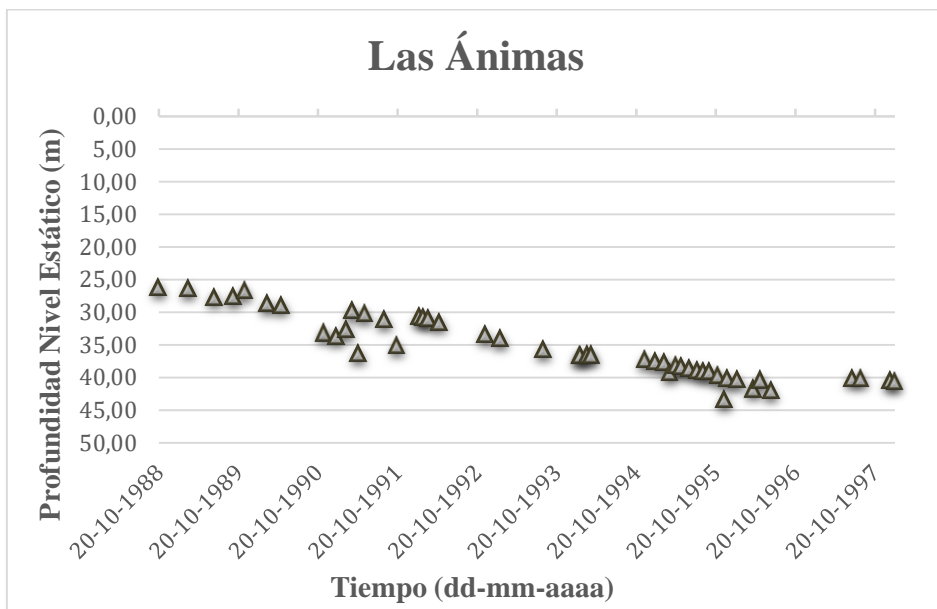


Gráfico 6.5.4 Variación de los niveles estáticos en Las Ánimas.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

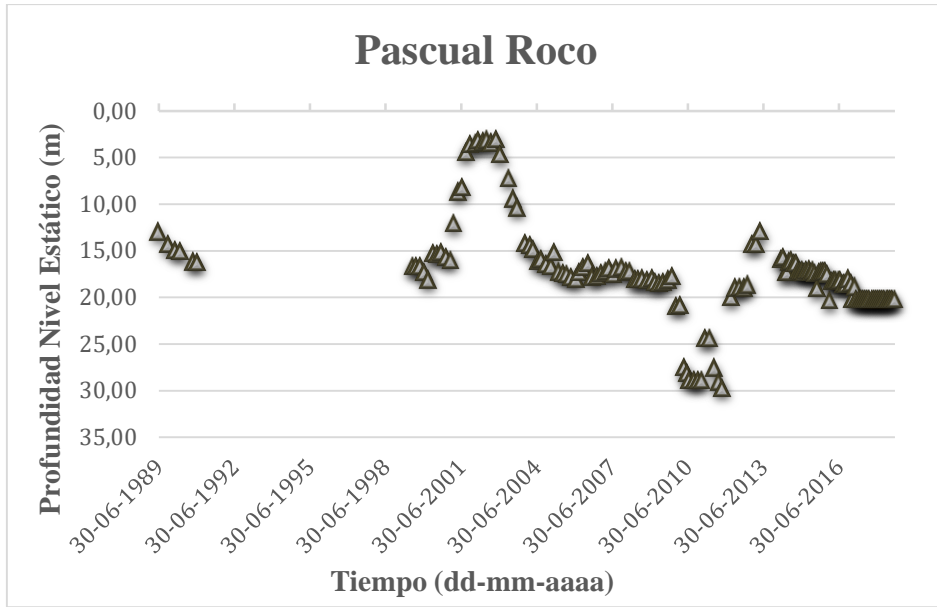


Gráfico 6.5.5 Variación de los niveles estáticos en Pascual Roco.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

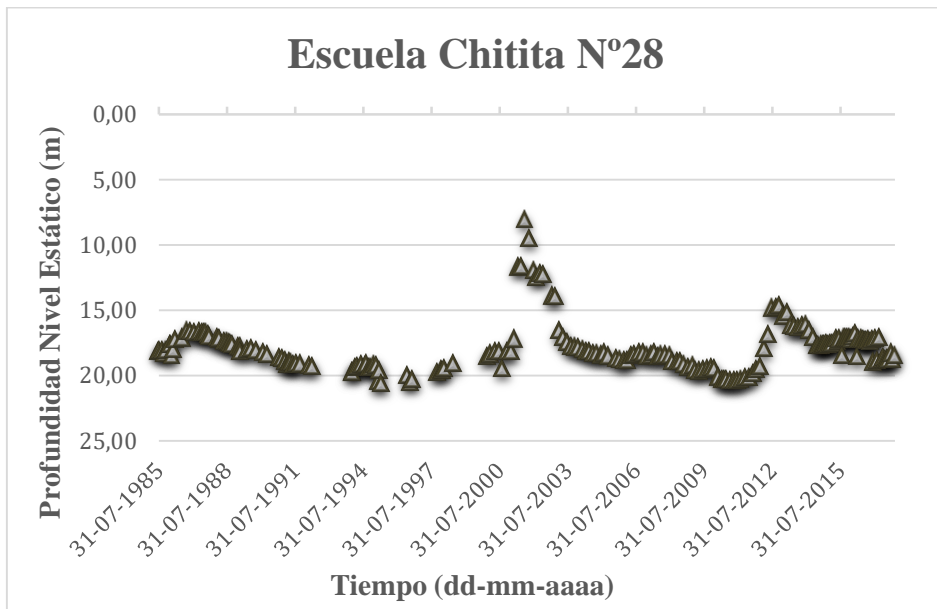


Gráfico 6.5.6 Variación de los niveles estáticos en Escuela Chitita N°28.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

## 7 Calidad de aguas

### 7.1 Hidrogeoquímica

En el análisis de calidad de aguas presentado a continuación se ha considerado la información de parámetros como pH, Conductividad Eléctrica (Ce), cationes mayores  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ , aniones mayores  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y otros componentes como arsénico, hierro, cadmio, boro, etc, provenientes del pozo Albarracines perteneciente a la DGA para obtener el comportamiento de los elementos antes mencionados en el acuífero. Lo mismo se aplica para el escurrimiento superficial, en donde la estación de monitoreo de calidad corresponde a Río San José antes Bocatoma Azapa.

Este estudio permite conocer el comportamiento de las condiciones hidrogeoquímicas a través del tiempo, tanto en aguas superficiales como en aguas subterráneas, con la finalidad de reconocer el recurso superficial con mejor calidad para utilizarlo en la recarga de acuífero de Azapa, cuyas aguas también requieren de un monitoreo. Cabe destacar que el análisis elaborado en este trabajo, ha sido comparado con el estudio de recarga formulado por la INH (2014), dando como resultado conclusiones similares de calidad de aguas superficiales y subterráneas en relación a los parámetros considerados, por lo que también se ha añadido información de los pozos ocupados en dicho documento.

A continuación se presenta un mapa con la ubicación de los pozos de la DGA e INH, y de la estación Río San José antes Bocatoma Azapa.



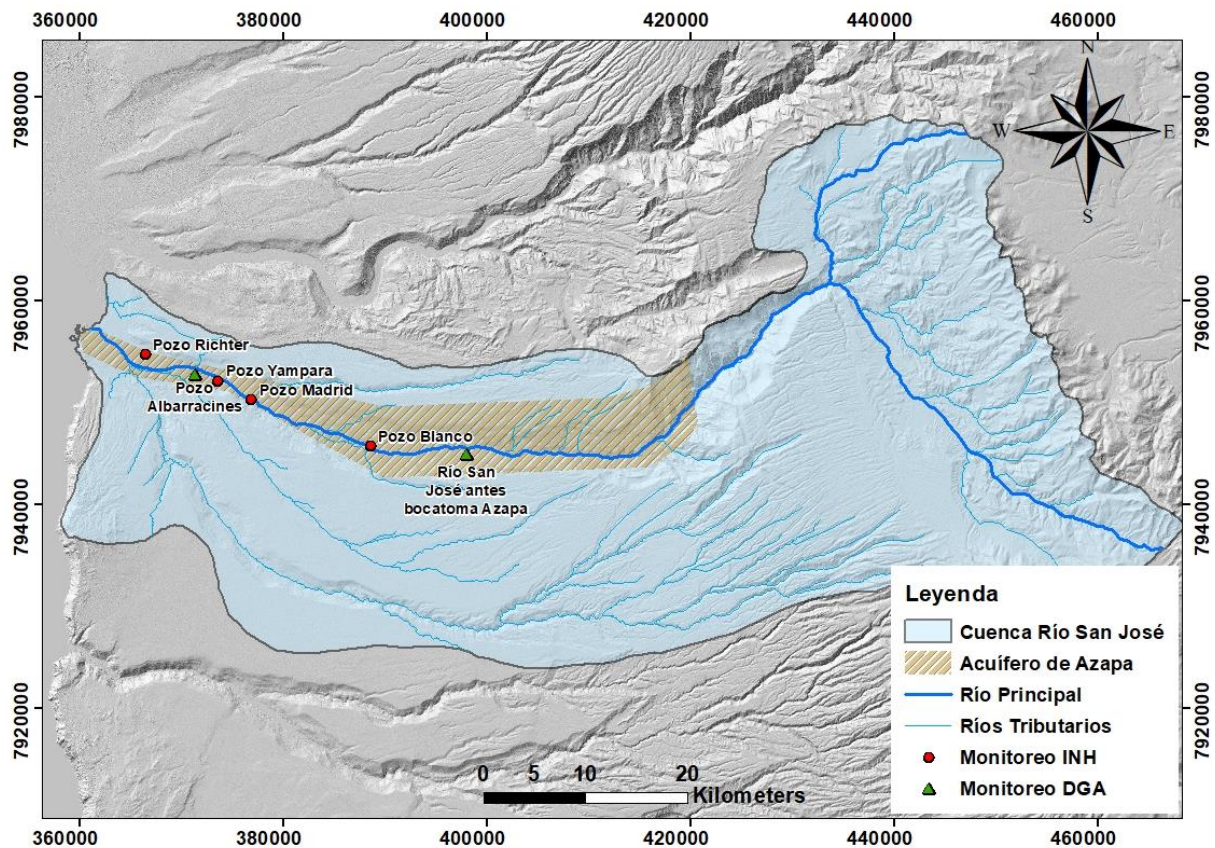


Figura 7.1.1 Ubicación de pozos y estaciones de monitoreo de calidad de aguas. Escalar 1:400.000  
 Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

## 7.2 Subterránea

### 7.2.1 Elementos Mayoritarios

Dentro de los cationes mayores, el sodio ( $\text{Na}^+$ ) y el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) son los que se encuentran en concentraciones más altas como se observa en el Gráfico 7.2.1. Si bien estos no están limitados por la norma de agua potable ni por la norma de riego, si presentan valores evidentemente mayores que los demás elementos. Por otro lado, los aniones mayores que sobrepasan los límites permitidos corresponden al ión cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), los que están representados en los gráficos 7.2.2 y 7.2.3 a continuación.

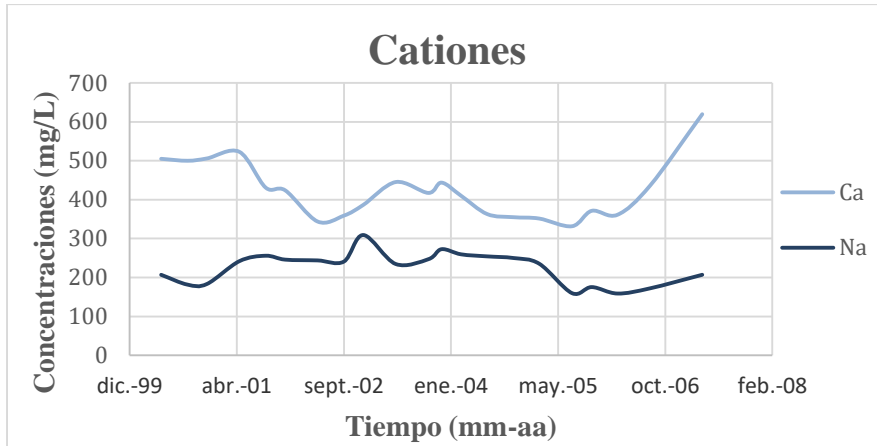


Gráfico 7.2.1 Concentración de cationes mayores en aguas subterráneas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA.

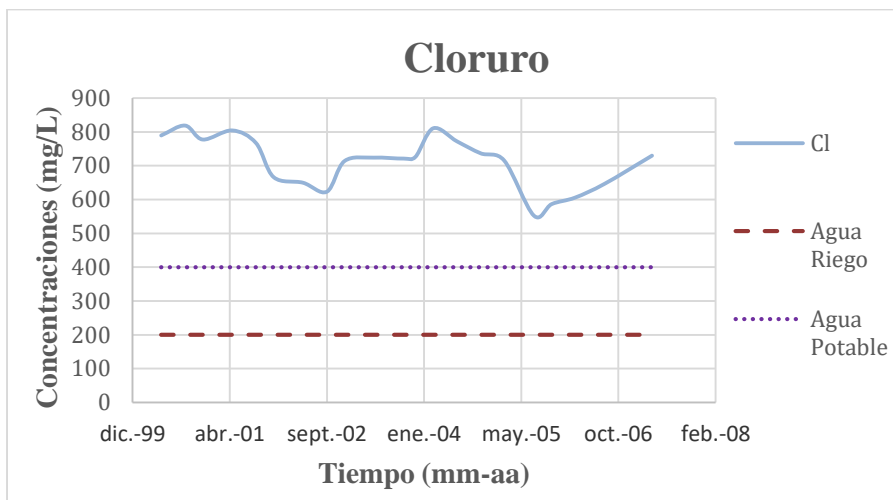


Gráfico 7.2.2 Concentración de Cloruro en aguas subterráneas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA.

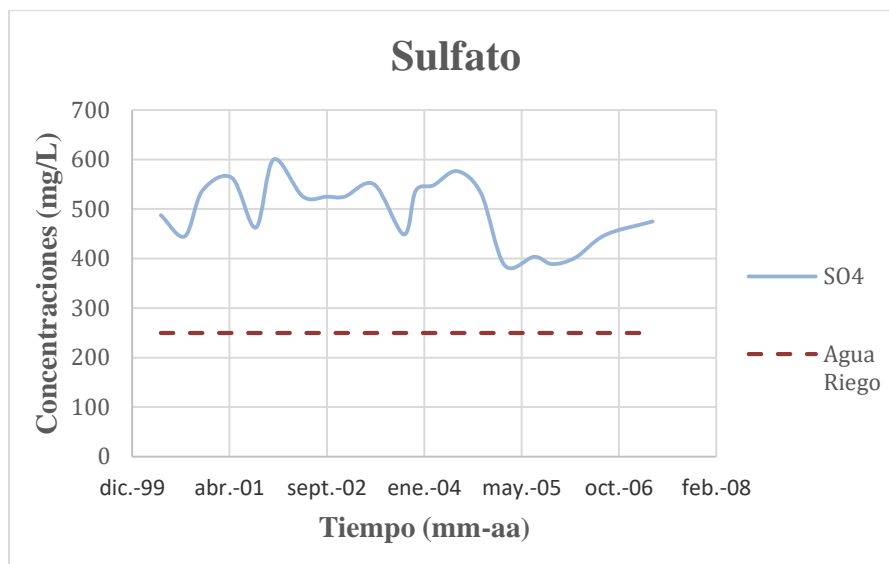


Gráfico 7.2.3 Concentración de Sulfato en aguas subterráneas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA.

El análisis presentado concuerda con el trabajo realizado por Torres y Acevedo (2008) donde se expone que la salinidad de la zona está netamente asociada a la presencia de estos 4 iones. Estas concentraciones de sales en el sector de la desembocadura se explican debido al lavado de estos componentes desde el sector alto de la cuenca, los cuales son transportados por el agua, aumentando la concentración de estos durante la trayectoria del fluido. Otro factor considerable que eleva las concentraciones de sales es el transvase de aguas del Río Lauca, el cual se encuentra en un sector donde existen depósitos salinos compuestos de sulfatos como yeso y anhidrita, cloruros (halita) y de manera subordinada nitratos. A esto se suma, que la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^+$  se debe, en parte, al uso de sulfato de calcio como fertilizante en la agricultura, actividad considerada importante en el valle.

## 7.2.2 Arsénico y Boro

En los Gráficos 7.2.4 y 7.2.5 se demuestra que el arsénico sobrepasa la norma de calidad de agua potable, mientras que el boro supera la norma de riego. Esta situación delata la condición natural de las cuencas del norte de Chile a mantener concentraciones importantes de estos elementos. Entre los factores que potencian esta condición, se encuentran los factores naturales, como la presencia de rocas volcánicas y aguas termales, así como por factores antropogénicos como la explotación y tratamiento de minerales como Enargita, Tenantita y Arsenopirita principalmente.



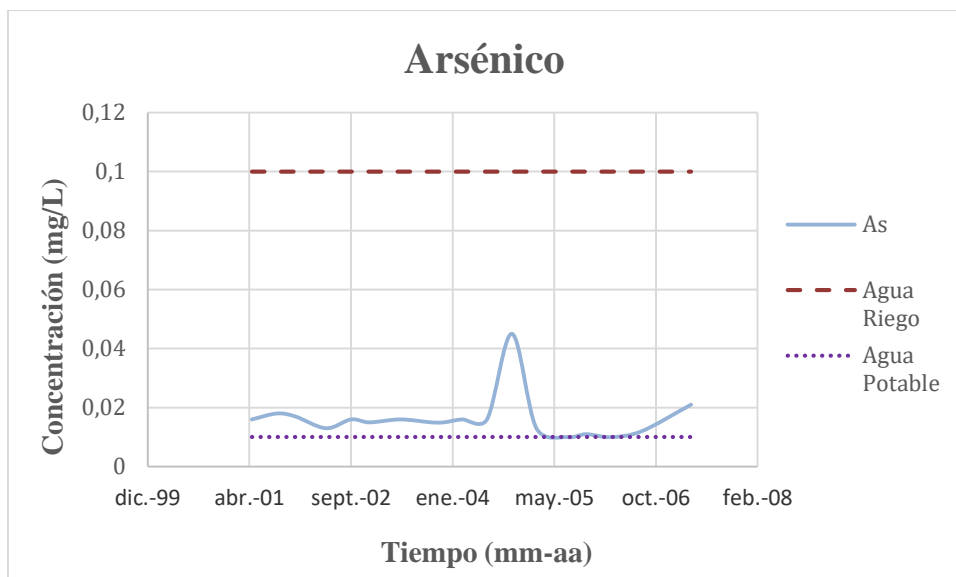


Gráfico 7.2.4 Concentración de Arsénico en aguas subterráneas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA.

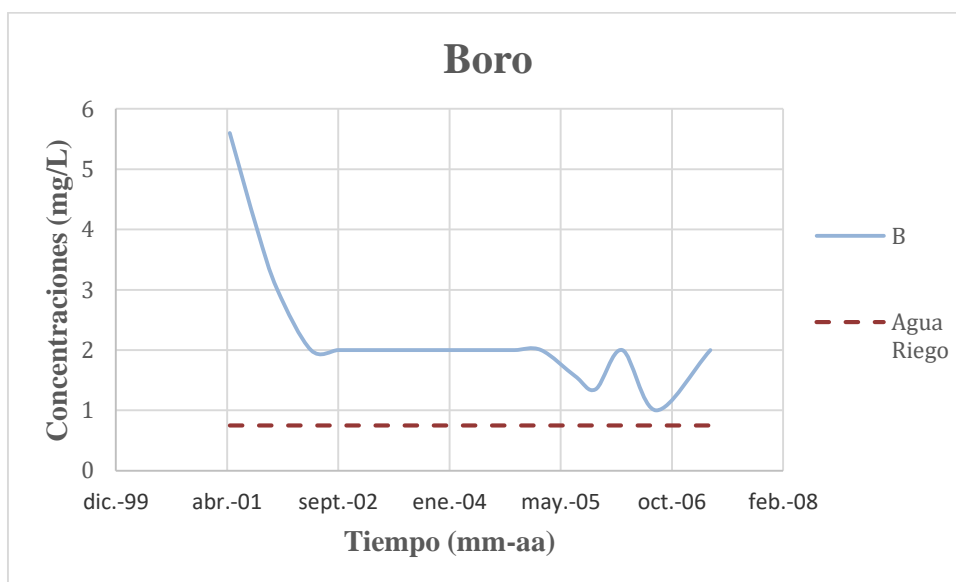


Gráfico 7.2.5 Concentración de Boro en aguas subterráneas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA.

### 7.2.3 pH y Conductividad Eléctrica

El acuífero tiene pH mayormente alcalinos que varían entre 6,66 y 7,95 (Gráfico 7.2.6), esto significa que cumple con valores aceptados por ambas normas de calidad.

El carácter alcalino se debe a la presencia de bicarbonato en concentraciones entre 46 y 292 mg/L según los datos del pozo Albarracines de la DGA.

Otro parámetro importante es la conductividad eléctrica, la cual está directamente relacionada con la cantidad de sólidos totales disueltos, es decir, mientras mayor sea la cantidad de sales, mayor será la conductividad. Esta última se encuentra entre 3000 y 7500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Gráfico 7.2.7), lo que significa que estas aguas pueden utilizarse para riego pero bajo ciertas condiciones de manejo y cuidado en plantas tolerantes.

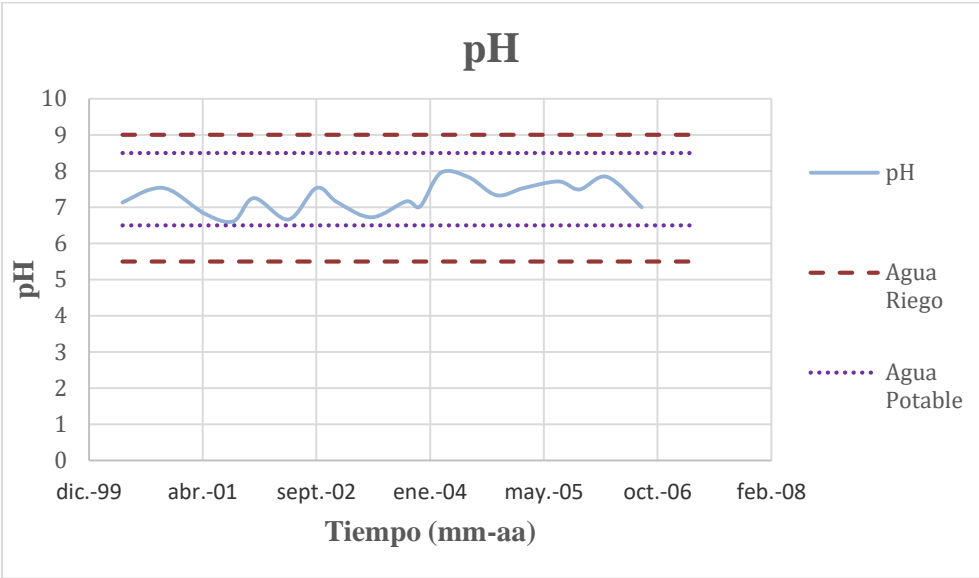


Gráfico 7.2.6 Monitoreo de pH en aguas subterráneas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA.

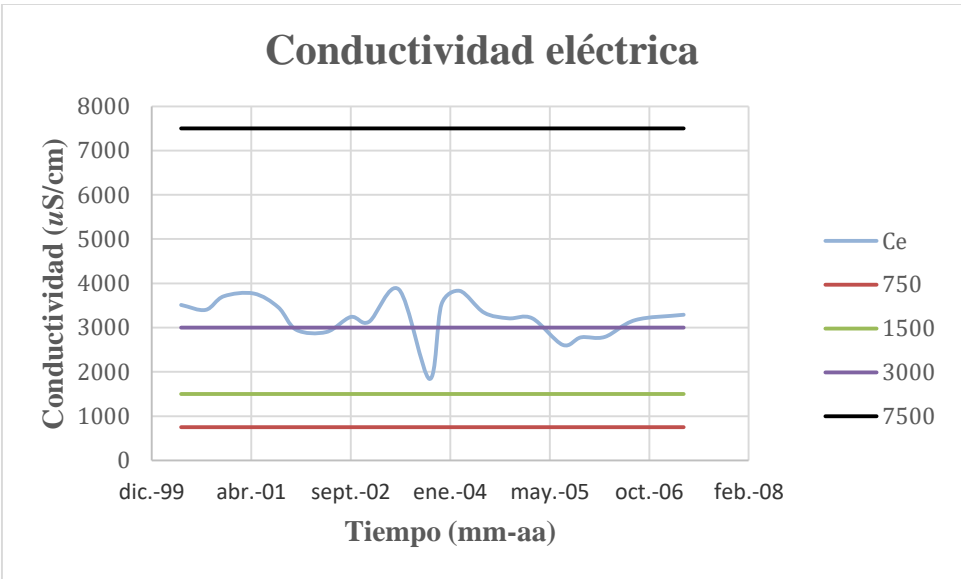


Gráfico 7.2.7 Monitoreo de conductividad eléctrica en aguas subterráneas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA.

## 7.2.4 Estudio del INH para aguas subterráneas

El Instituto Nacional de Hidráulica (INH) desarrolló 5 campañas de terreno en la zona, donde se tomaron 22 muestras de agua subterránea. Los resultados de laboratorio, resumidos en la Tabla 7.2.1, muestran que la mayoría de los parámetros cumplen con las normas de agua de riego y agua potable, a excepción de algunos elementos como el arsénico, boro, cloruro y sulfato, lo cual es congruente con la información obtenida del pozo Albarracines.

Tabla 7.2.1 Datos de muestras de agua subterránea del INH.

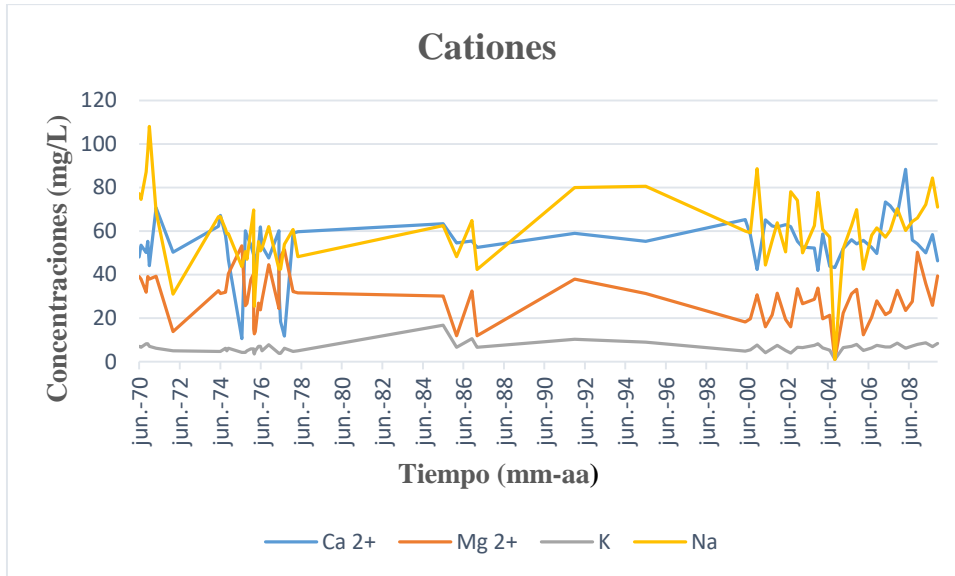
Fuente: Datos obtenidos del INH (2014).

Parámetro	Norma agua de riego [mg/l]	Cumplimiento	Norma agua potable [mg/l]	Cumplimiento
pH	5,5 – 9,0	Cumple	6,5 – 8,5	Cumple
Arsénico (As)	0,100	Cumple	0.01	Sobrepasa la norma en un 177%
Boro (B)	0,750	Sobrepasa la norma en un 253%	No data	No data
Cloruro (Cl)	200,000	Sobrepasa la norma en un 156%	400	Sobrepasa la norma en un 59%
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	250,000	Sobrepasa la norma en un 71%	500	Sobrepasa la norma en un 11%

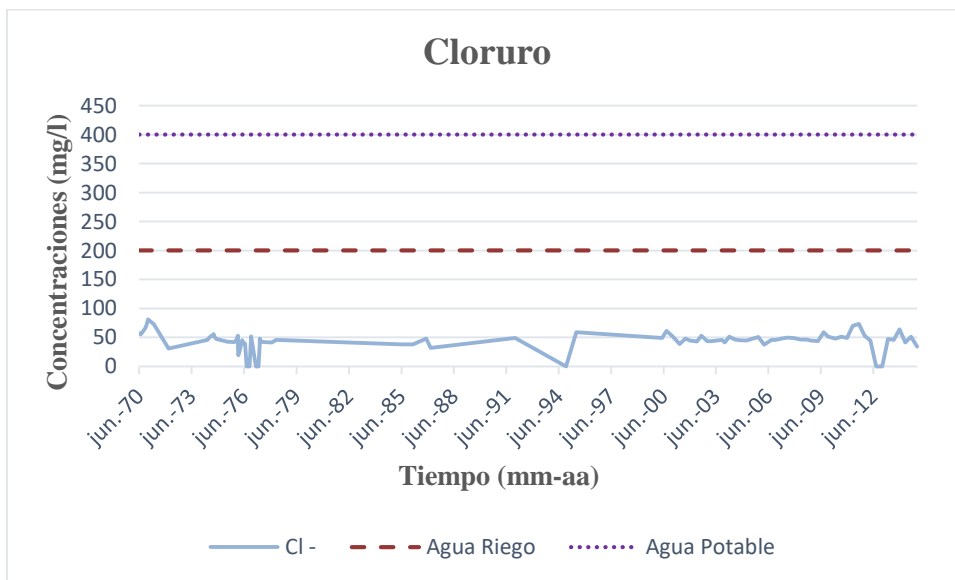
## 7.3 Superficial

### 7.3.1 Elementos Mayoritarios

Tanto cationes (Gráfico 7.3.1) como aniones principales (Gráfico 7.3.2 y 7.3.3) presentan variaciones considerables a lo largo del período analizado, dado que la zona se ve afectada por años más secos que otros en términos pluviométricos, por lo que en años lluviosos, los elementos se encuentran más diluidos al aumentar la cantidad de agua disponible en la escorrentía. Pese a ello, las concentraciones se mantienen en valores no son tan elevados (<100 mg/L) a diferencia de las aguas subterráneas, por lo que el recurso superficial tiene mejor calidad en cuanto a concentración de sales. Esto último, permite asegurar que la calidad del agua a inyectar en el acuífero no contamine la que se encuentra preservada en este.



**Gráfico 7.3.1 Concentración de cationes principales en aguas superficiales**  
 Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la estación de monitoreo Río San José antes bocatoma Azapa de la DGA.



**Gráfico 7.3.2 Concentración de Cloruro en aguas superficiales.**  
 Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la estación de monitoreo Río San José antes bocatoma Azapa de la DGA.

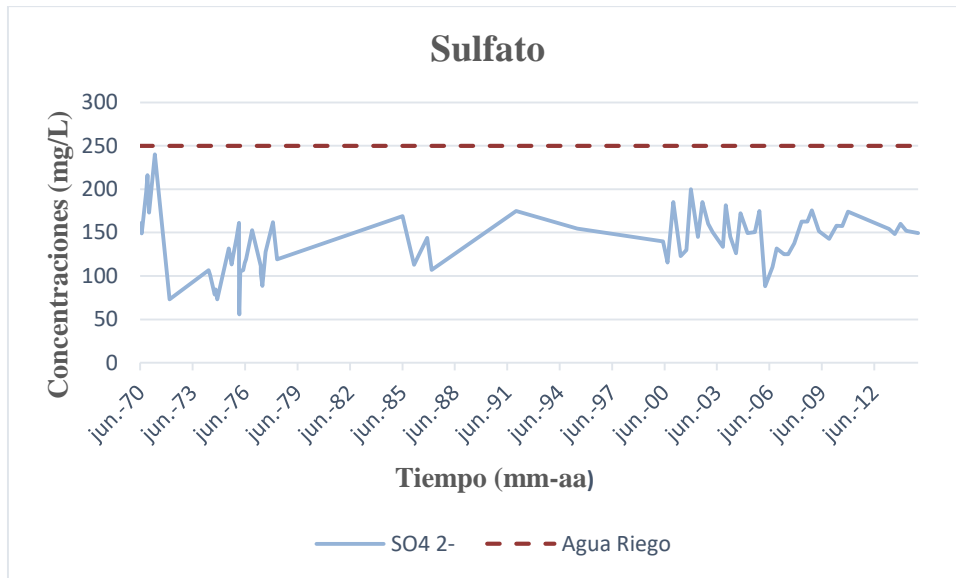


Gráfico 7.3.3 Concentración de Sulfato en aguas superficiales.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la estación de monitoreo Río San José antes bocatoma Azapa de la DGA.

### 7.3.2 Arsénico y Boro

La condición del arsénico (Gráfico 7.3.4) y el boro (Gráfico 7.3.5) es más bien similar a la de aguas subterráneas, puesto que el primer elemento sobrepasa la norma de agua potable y el segundo la norma de agua de riego, por lo tanto, son aguas que pueden representar un problema de contaminación a futuro, ya que son de calidad similar a la que se encuentra presente en el acuífero. Por eso, es importante que estas aguas sean tratadas antes de infiltrarlas en el acuífero para mejorar la calidad de las que ya se encuentran en él.

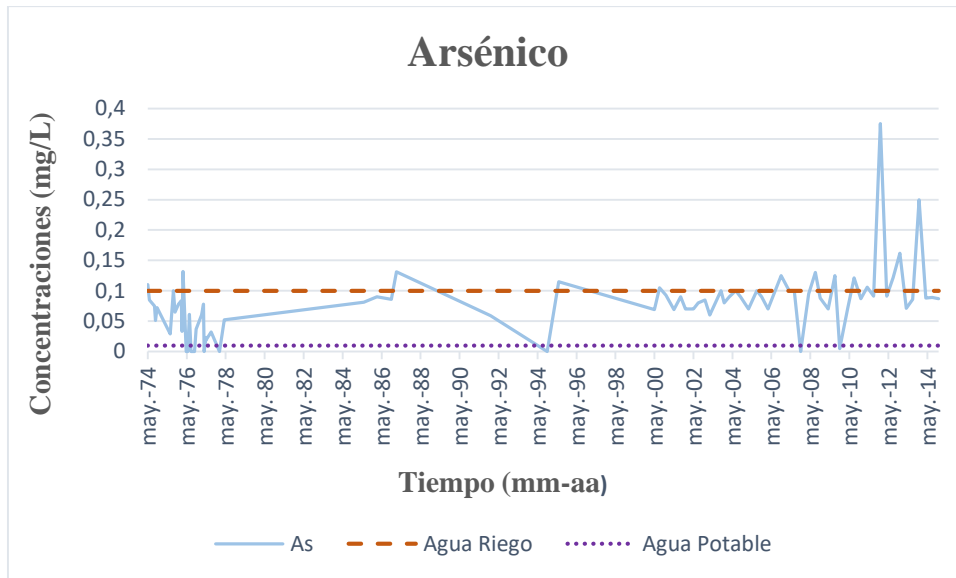


Gráfico 7.3.4 Concentración de Arsénico en aguas superficiales.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la estación de monitoreo Río San José antes bocatoma Azapa de la DGA.

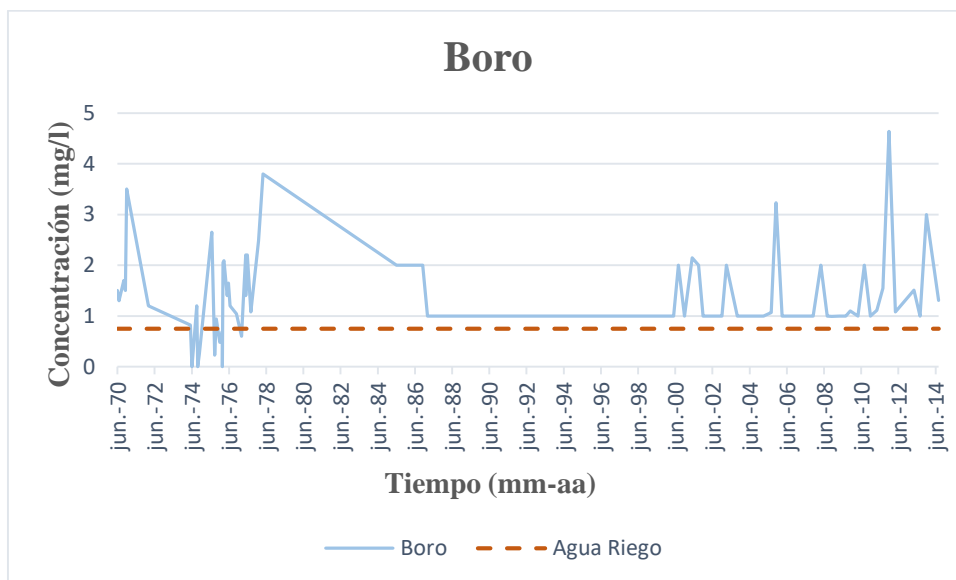


Gráfico 7.3.5 Concentración de Boro en aguas superficiales.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la estación de monitoreo Río San José antes bocatoma Azapa de la DGA.

### 7.3.3 pH y Conductividad Eléctrica

El pH de las aguas superficiales es alcalino y se mantiene dentro de los valores permitidos por ambas normas de calidad de aguas (Gráfico 7.3.6), lo que concuerda con los datos obtenidos en aguas subterráneas.

En cuanto a la conductividad eléctrica, los datos demuestran que el agua no genera efectos perjudiciales, excepto en cultivos sensibles (Gráfico 7.3.7).

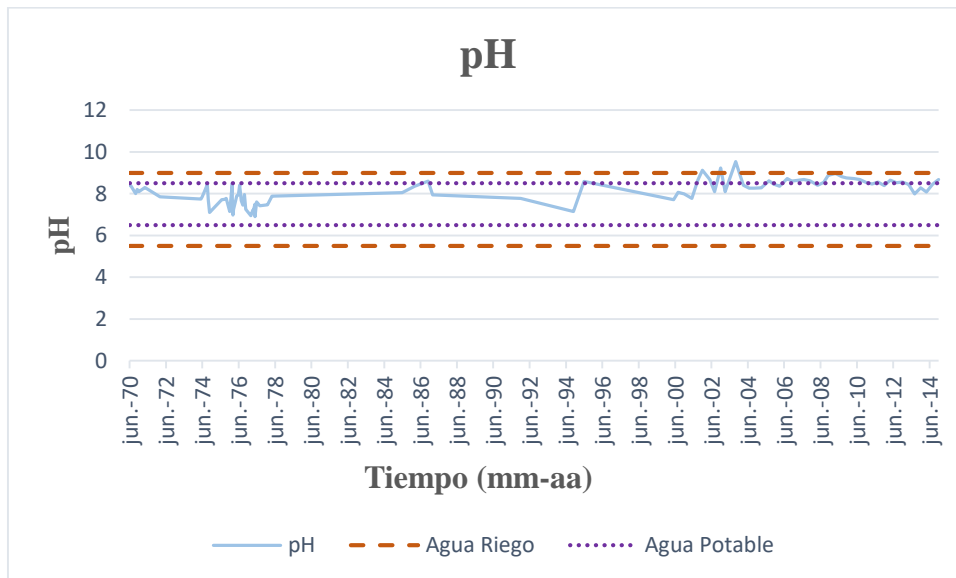


Gráfico 7.3.6 Monitoreo de pH en aguas superficiales.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la estación de monitoreo Río San José antes bocatoma Azapa de la DGA.

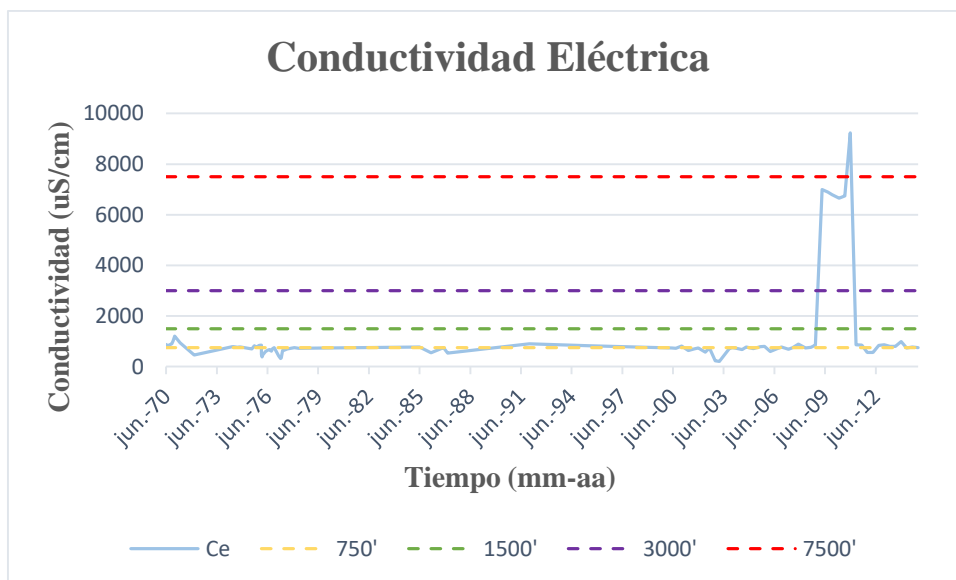


Gráfico 7.3.7 Monitoreo de conductividad eléctrica en aguas superficiales.

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la estación de monitoreo Río San José antes bocatoma Azapa de la DGA.

### 7.3.4 Estudio del INH para aguas superficiales

En las campañas de terreno realizadas para dicho estudio, se tomaron 5 muestras de agua superficial, cuyos valores se encuentran en la Tabla 7.3.1. En base a esto se puede concluir que los valores de pH, cloruro y sulfato se encuentran dentro de las normas o las sobrepasan levemente, en cambio, el arsénico y el boro se encuentran en concentraciones mucho más altas de las que permiten ambas normas. Esta evaluación respalda el análisis elaborado en este trabajo según los datos de la estación de monitoreo de la DGA.

Tabla 7.3.1 Datos de muestras de agua superficial del INH.

Fuente: Datos obtenidos del INH (2014).

Parámetro	Norma agua de riego [mg/l]	Cumplimiento	Norma agua potable [mg/l]	Cumplimiento
pH	5,5 – 9,0	Cumple	6,5 – 8,5	Cumple
Arsénico (As)	0,100	Sobrepasa la norma en un 37%	0.01	Sobrepasa la norma en un 505%
Boro (B)	0,750	Sobrepasa la norma en un 162%	No data	No data
Cloruro (Cl)	200,000	Sobrepasa levemente la norma	400	Cumple
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	250,000	Sobrepasa levemente la norma	500	Cumple

## 7.4 Clasificación de aguas

En base a la información recopilada se ha construido un diagrama Piper con la finalidad de obtener el tipo de agua predominante en la cuenca de estudio. Para ello se han utilizado las concentraciones de calcio, sodio, potasio, magnesio, cloruro, sulfato y bicarbonatos, extraídas desde los respectivos pozos y estaciones de monitoreo de calidad de aguas, las que han sido ploteadas en la siguiente Figura 7.4.1, donde se demuestra que el recurso superficial corresponde a aguas bicarbonatadas cálcicas, mientras que las aguas subterráneas son de tipo cloruradas cálcicas.



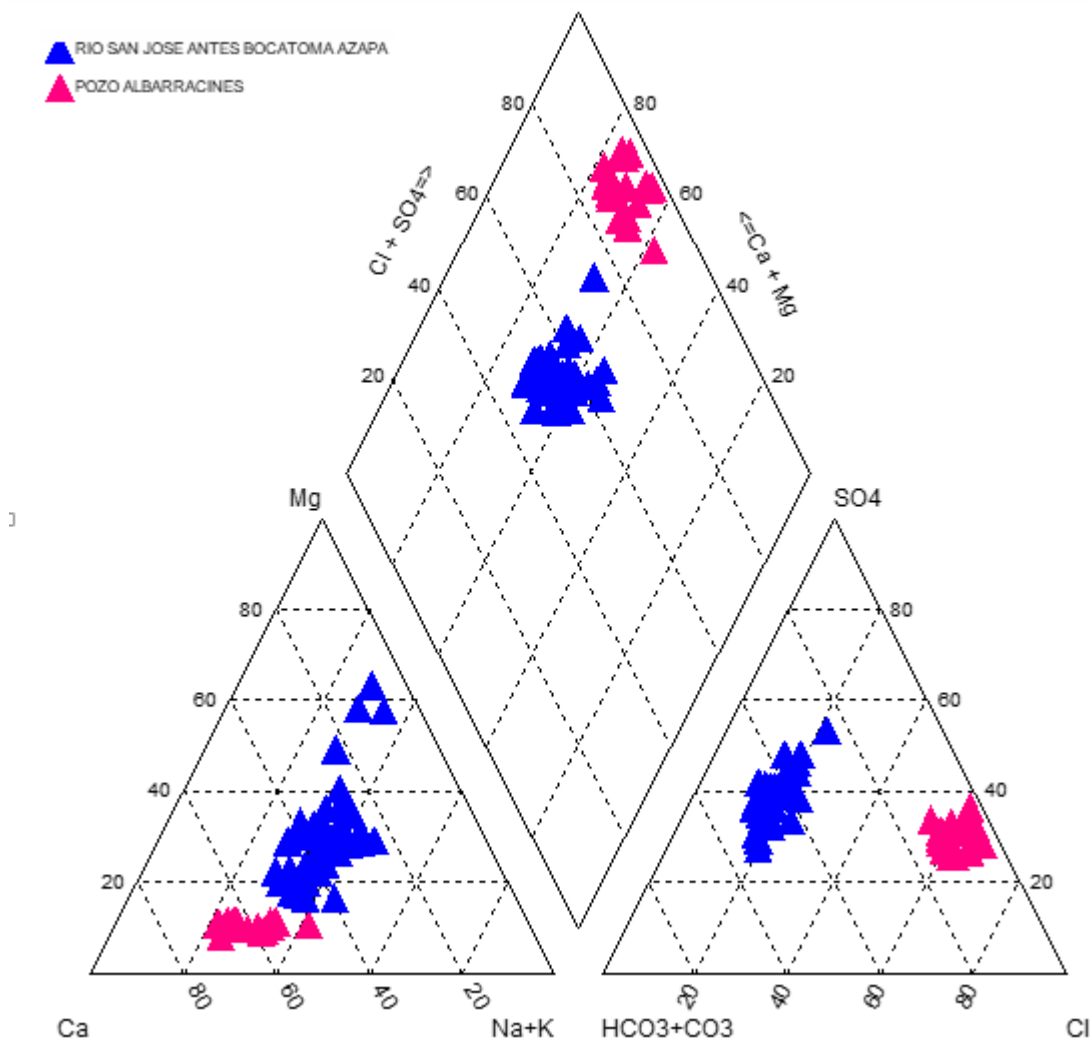


Figura 7.4.1 Diagrama de Piper.  
 Fuente: Extraído de INH (2014).

## 8 Resultados

### 8.1 Sectores favorables

En base a los antecedentes presentados, existen 2 zonas propicias para la recarga artificial del acuífero de Azapa; la primera, denominada Sector A, se encuentra en Cabuza donde los niveles freáticos medidos hasta la fecha alcanzan valores superiores a 15 m de profundidad por lo que existe un espesor no saturado suficiente para el almacenamiento del recurso, además presenta valores elevados de permeabilidad que optimizan el proceso.

La segunda área adecuada para el proyecto consiste en el Sector B ubicado en Pago Gómez, el cual cumple con características similares de permeabilidad y posición del nivel freático en el acuífero, aunque esta última se encuentra a una profundidad mayor superando incluso los 40 m desde el año 2013 hasta la fecha. Si bien, es un sector apto para la recarga, posee mayor cantidad de niveles impermeables por lo que es más complejo implementar un dispositivo de recarga superficial. Además, como se ha mencionado anteriormente, es una zona donde difícilmente el recurso permanecería almacenado por un tiempo suficiente y terminaría desembocando en el mar.

Ambos sectores se encuentran delimitados en la imagen a continuación.

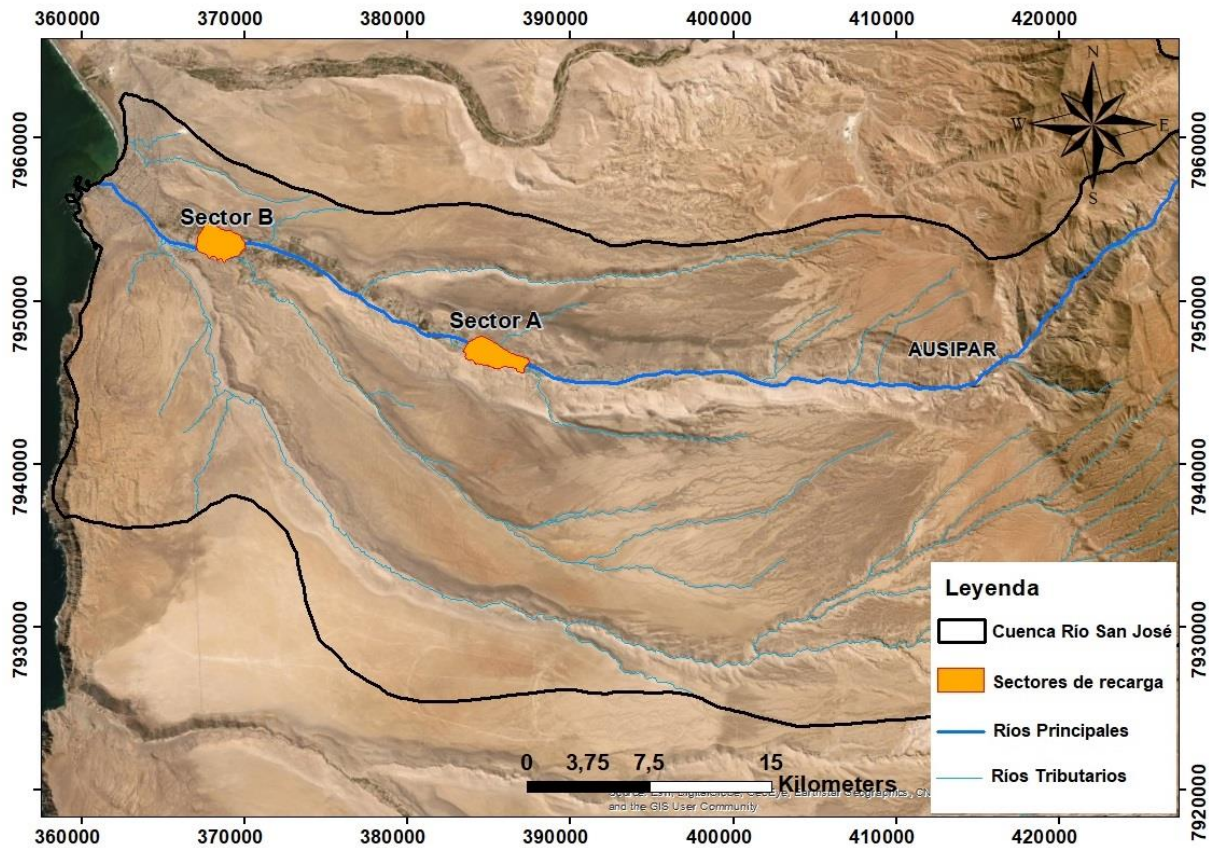


Figura 8.1.1 Ubicación de sectores favorables para el proceso de recarga artificial del acuífero de Azapa. Escala 1:250.000.

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de los antecedentes y trabajos previos de la zona.

## 8.2 Fuentes

Dado que la cuenca del río San José carece de procesos de recarga importantes durante gran parte del año, se ha decidido utilizar las crecidas del río generadas en períodos intensos de precipitación en los meses estivales, es decir, desde enero hasta marzo, ya que es el período donde existe mayor disponibilidad de caudal en el sector de Ausipar (ver Figura 8.1.1), el cual ha sido elegido como la fuente de recarga más cercana que cuenta con una estación de monitoreo que entrega información del comportamiento del recurso disponible en superficie. En la memoria de Jimenez (2013) se plantea el uso de los canales ya existentes para transportar el agua desde la fuente hasta los sectores de recarga, pero dado que se desconocen las épocas y frecuencias de uso de estos, es una opción que no será considerada en este trabajo. Por ello se propone la construcción de un canal paralelo que permita únicamente el tránsito del recurso que será almacenado, de esta manera se evita la influencia de las aguas utilizadas para el riego que circulan por los canales ya existentes.

### 8.3 Volumen de almacenamiento

Para estimar el volumen de agua que es capaz de almacenar el acuífero en su zona no saturada se utilizan las expresiones:

$$V (m^3) = S \times \text{Volumen no saturado} (m^3)$$

$$\text{Volumen no saturado} (m^3) = \text{Área de recarga} (m^2) \times \text{espesor no saturado} (m)$$

Con el objetivo de esclarecer el cálculo realizado se presenta la siguiente Tabla 8.1.1 con los datos utilizados y sus resultados:

Tabla 8.3.1 Datos necesarios para calcular el volumen de almacenamiento  
Fuente: elaboración propia

Sector	S	Área (m <sup>3</sup> )	Espesor no saturado (m)	V (m <sup>3</sup> )
Cabuza	0,07	4.745.093	15	4.982.348
Pago Gómez	0,07	4.737.302	15 - 40	4.974.167 – 13.264.446

Si bien los niveles freáticos se encuentran actualmente a más de 40 m en Pago Gómez y mayor a 15 m en Cabuza, existen períodos en los cuales se han registrado ascensos abruptos de los niveles (ver apartado 6.5), esto genera un problema para el proyecto a largo plazo debido a que implica un eventual afloramiento de agua, es por ello que se ha acotado un espesor no saturado para el sector de Cabuza que nunca ha sido sobrepasado desde 1985 hasta 2017, que corresponde al lapso de tiempo del que se tiene registro, en tanto, Pago Gomez presenta mayor variación a lo largo del tiempo por lo que se ha tomado un valor mínimo y un máximo.

### 8.4 Caudales de infiltración

Para obtener un caudal de infiltración, se deben tener en cuenta algunos factores importantes, ya que no es posible utilizar toda el agua de las crecidas del río. En primer lugar, la obtención del caudal óptimo se hará en base a los meses estivales con mayores caudales registrados para una probabilidad de excedencia de 20%, como se ha explicado anteriormente, que corresponden a los meses de enero hasta marzo, cuyo valor promedio es de 1.820 l/s.

De este valor solo es posible utilizar un 80% que corresponde a 1.456 l/s, puesto que el restante 20% es el caudal ecológico necesario para conservar el hábitat, funciones, climatología y paisajes naturales, según el reglamento del Ministerio del Medio Ambiente (2012). Además, para no causar conflicto con los derechos (consuntivos) superficiales otorgados equivalentes a 1.183 l/s (DGA), estos serán excluidos del cálculo, quedando finalmente un caudal disponible real de 273 l/s, el cual si se infiltra por el período de 3 meses seleccionado entonces resulta en un volumen infiltrado de 2.122.848 m<sup>3</sup>

## 8.5 Métodos

### 8.5.1 Propuesta N°1: Zanjas de infiltración

Cabuza se perfila como el sector idóneo para la aplicación de un método de recarga superficial puesto que su contenido de material impermeable (finos) es escaso, sus pendientes menores a 20% y permeabilidades elevadas, lo que permite la implementación de métodos superficiales. Pese a ello, no se cuenta con disponibilidad de terreno para una configuración de zanjas de dimensiones suficientes que permitan infiltrar el caudal estimado, por lo que se tendría que complementar el método con pozos, puesto que ocupan menos espacio e infiltran mayor cantidad de agua.

Antes de comenzar con los cálculos respectivos al proyecto propiamente tal, primero se debe evaluar el comportamiento del nivel freático frente a la adición del volumen que se pretende infiltrar, ya que si el ascenso del agua en el acuífero es suficiente para provocar un afloramiento entonces el proyecto no sería válido de realizar porque no se cumpliría el objetivo de almacenar el recurso.

La siguiente ecuación (modificada de la expresión que define a S) permite evaluar esta situación:

$$\text{Volumen de ascenso del NF} = \frac{\text{Volumen de agua infiltrado}}{S} = \frac{2.122.848 \text{ m}^3}{0,07} = 30.326.400 \text{ m}^3$$

Donde Volumen de ascenso del NF se expresa como:

$$\text{Volumen de ascenso del NF} = \text{Área de recarga} \times \text{Ascenso nivel freático}$$

Despejando esta ecuación se obtiene que para el volumen de infiltración estimado, el nivel de agua ascendería 6,4 m (recordar que el espesor no saturado disponible es de 15 m), por lo tanto no alcanza a aflorar en superficie, de esta manera el proyecto de recarga artificial se podrá trabajar en el sector.

Para establecer la cantidad, dimensiones y caudal adecuados según el espacio disponible, se va a estimar un área de percolación total, la que posteriormente será distribuida en las zanjas resultantes. Esto se trabajará con la ecuación propuesta por MINVU (1996) que expresa el caudal en función del área de percolación de la siguiente manera:

$$Q = Ae \times Cs \times f \times 0,001$$

Q: como el caudal de infiltración por zanja expresado en  $\frac{m^3}{h}$

Ae: área de percolación de la zanja en  $m^2$

Cs: coeficiente de seguridad para la infiltración, obtenido según criterios de Azzout y otros (1994).

f: tasa de infiltración en  $\frac{mm}{h}$

Con esto se tiene un área de percolación total de 32.760  $m^2$ , considerando un Cs de 0,5 (Anexo VII) dada la mala calidad de agua, la existencia de dispositivos de tratamiento que tendrán mantención regular puesto que las aguas cuentan con gran cantidad de arsénico, boro (como se ha visto en el análisis de calidad) y material sedimentario. Por otra parte, el valor de Q corresponde al caudal de infiltración ya estimado en el apartado 8.4 de este trabajo, mientras que el valor de f de 20 mm/h ha sido obtenido a través de mediciones en terreno por INH (2014).

Lo anterior junto con el tamaño del terreno donde se propone instaurar el proyecto (2,64 Ha), permiten estimar las dimensiones de una zanja por medio de la fórmula:

*Sin elemento decantador*

$$Ae = 2H \times (L + A)$$



H: altura (m)

L: largo (m)

A: ancho (m)

*Con elemento decantador*

$$Ae = 2H \times (L + A) + 0,5 \times L \times A$$

Según MINVU (1996) se pueden usar estrategias para estimar las dimensiones de una zanja, una de ellas consiste en determinarlas arbitrariamente e ir ajustándolas según los cálculos y espacio disponible. Para el caso que se está trabajando se propondrá un largo de 50 m, un ancho de 2 m y una profundidad de 5 m, ya que son medidas frecuentes en este tipo de métodos y han sido observadas en trabajos similares. Así se necesitan aproximadamente 63 zanjas para cumplir con el área de percolación calculada, las que deberán funcionar de manera paralela con 10 pozos de inyección a la zona saturada

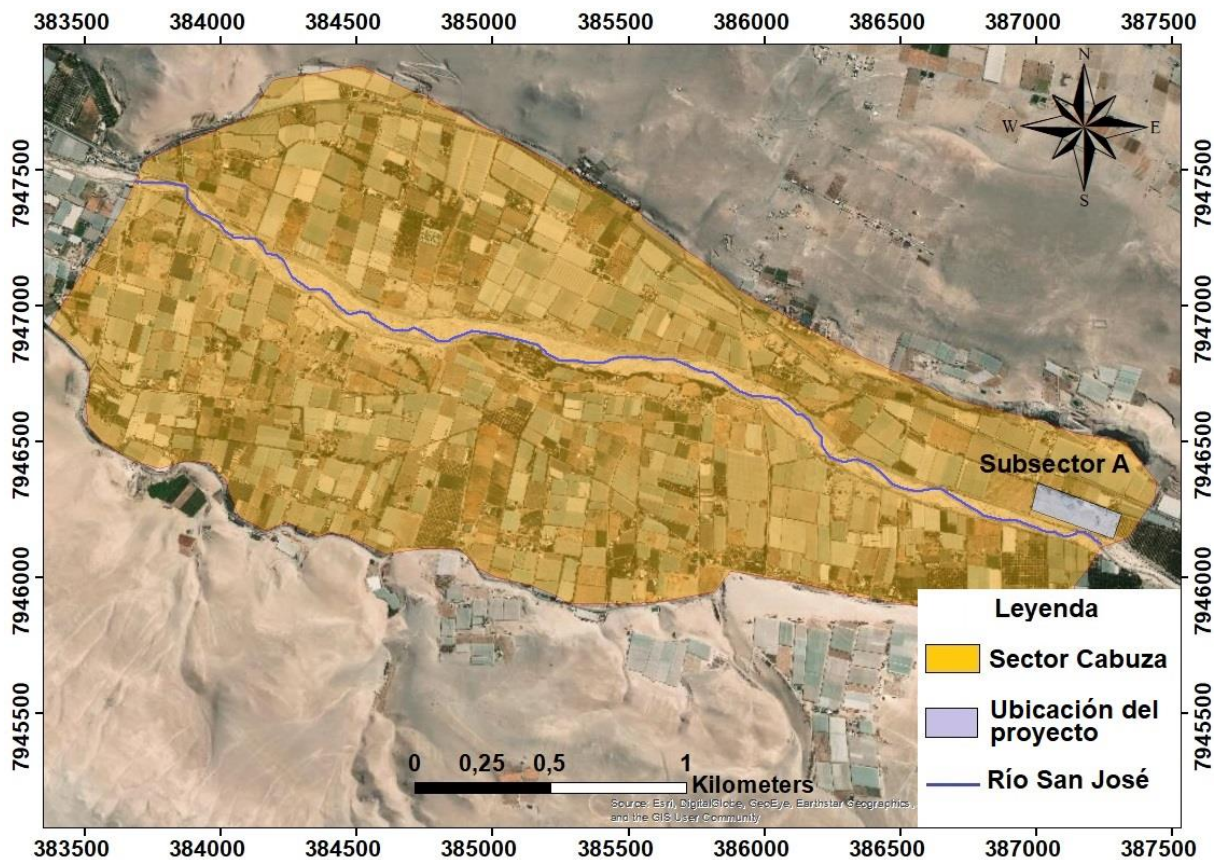


Figura 8.5.1 Sector Cabuza con una posible ubicación del proyecto. Escala: 1:15.000.

Fuente: Elaboración propia, según la disponibilidad espacial en el terreno.

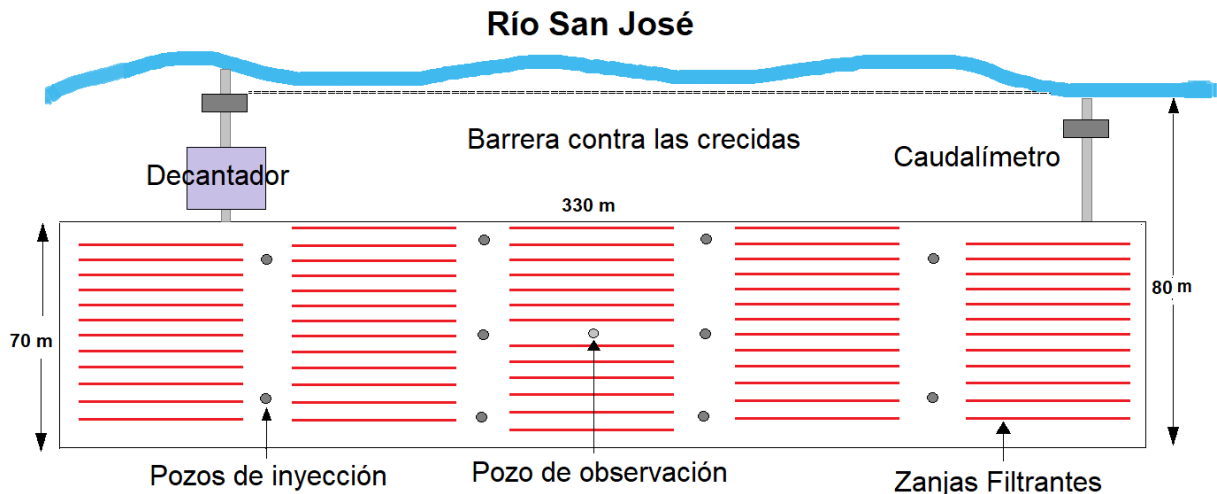


Figura 8.5.2 Diseño de distribución de las zanjas filtrantes para el área disponible en Cabuza.  
Fuente: elaboración propia en base a otros trabajos similares.

### 8.5.2 Propuesta N°2: Sondajes en zona saturada

Si bien el método anteriormente descrito podría ser suficiente por sí mismo, la cantidad de agua infiltrada por las zanjas es menor a la que pueden infiltrar los pozos, por ello se plantea una propuesta más económica y eficiente que considera netamente el uso de pozos de inyección directa a la zona saturada para asegurar que la calidad de las aguas (previamente tratadas) sea la mejor posible con el objetivo de aumentar la calidad de las que ya se encuentran en el reservorio subterráneo, por el contrario, si fuese puesta en la zona aireada la permanencia del recurso en este sector causaría una contaminación por lixiviación de componentes deteriorando la calidad de estas.

Para diseñar la cantidad de pozos necesarios y el caudal que debería tener cada uno, se aplicará la fórmula de LeFranc:

$$Q = K \times H \times C$$

Q: caudal que será infiltrado por pozo, expresado en  $\frac{m^3}{d}$

K: permeabilidad en  $\frac{m}{d}$

H: altura sobre el nivel estático medido en m

C: factor de forma en m



Este último parámetro se calcula con las dimensiones de la tubería:

$$C = \frac{2 \pi L}{\ln\left(\frac{2L}{d}\right)} \times f$$

L: largo del pozo (m)

d: diámetro del pozo (m)

f: factor de cribas

El factor de cribas frecuentemente utilizado en este tipo de proyectos es 25% (0,25). Además, se han estimado las dimensiones de pozos según otros trabajos de recarga artificial en Chile (Maturana, 2016; Puig, 2017; Quidel, 2017; Guerrero, 2018, entre otros), así el largo de la superficie filtrante será de 20 m y el diámetro del pozo de 12” o 0,3048 m. Esto da como resultado un factor de forma de 6,4476 m. Finalmente este valor, junto con el nivel estático a 15 m y la permeabilidad de 15 m/d, dan un caudal de 1.450,71 m<sup>3</sup>/día, lo que equivale a 16,79 l/s, por tanto, para infiltrar la totalidad del caudal de infiltración (273 l/s), se necesitan 16 pozos (Figura 8.5.3).

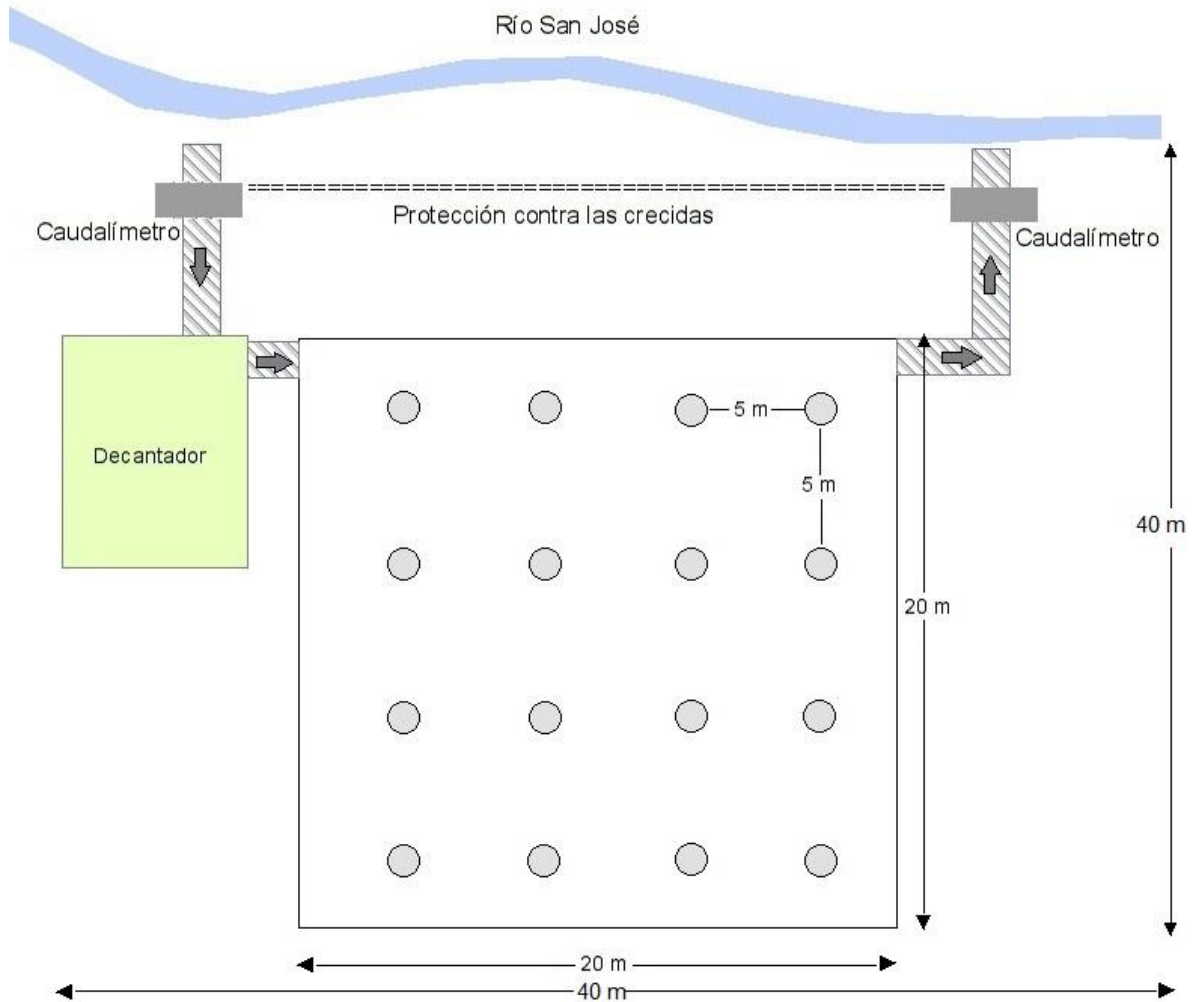


Figura 8.5.3 Diseño del proyecto propuesto de pozos en zona saturada con sus respectivas dimensiones.

Fuente: elaboración propia, en base a experiencias propuestas en otros trabajos.

Como se observa en el esquema de diseño los pozos han sido colocados a una distancia de 5 m para que exista suficiente espacio entre ellos al momento de su construcción y funcionamiento ocupando una superficie de 4.000 m<sup>2</sup> permitiendo un ahorro económico en la compra de terreno y evitando ocupar zonas de cultivo. También, se destaca la incorporación de artefactos que permitan un control de los pozos, por eso se instalan caudalímetros en la entrada y salida del flujo con la finalidad de verificar si los caudales son los que corresponden al diseño. En caso de que exista alguna variación significativa se debe proceder a la limpieza y mantención de las tuberías puesto que las cribas pueden colmatarse de partículas finas, lo que disminuye la eficiencia del pozo. Por esta misma razón, la presencia de un decantador en el ingreso del caudal al sistema es de gran importancia para extraer el material fino y prever el problema antes mencionado (MINVU, 1996).

Otro elemento importante para el caso analizado del río San José, es la construcción de una barrera que impida un daño al sistema de pozos debido a una crecida importante, ya sea un muro de contención o una zanja que impida que el drenaje afecte los pozos.

En cuanto al diseño en profundidad del pozo, se tiene un largo total de 50 m que consiste en un primer tramo de tubería ciega que permita dirigir el afluente hacia abajo con la menor pérdida de carga hacia la zona no saturada a través de las paredes del pozo, le siguen 20 m de cribas que permitan la infiltración hacia la zona saturada, entre ellas se ubica la bomba que impulsa el movimiento del agua, finalmente se rellena el fondo del pozo y los costados de este con un material permeable, generalmente gravas o arenas gruesas. Adicionalmente se coloca un sello sanitario para evitar que el escurrimiento superficial se introduzca en el pozo contaminando el acuífero.

Sobre el pozo se ubica la tubería que conecta con el decantador, el que a su vez, se compone de 2 tuberías adicionales; la primera es la que alimenta el sistema con el caudal a infiltrar y la segunda consiste en un rebase o vertedor, cuya función es evacuar el agua excedente en caso de que el volumen que es capaz de almacenar el pozo sea sobrepasado y haya un refluo de agua.

La siguiente imagen permite visualizar el sistema completo del pozo diseñado

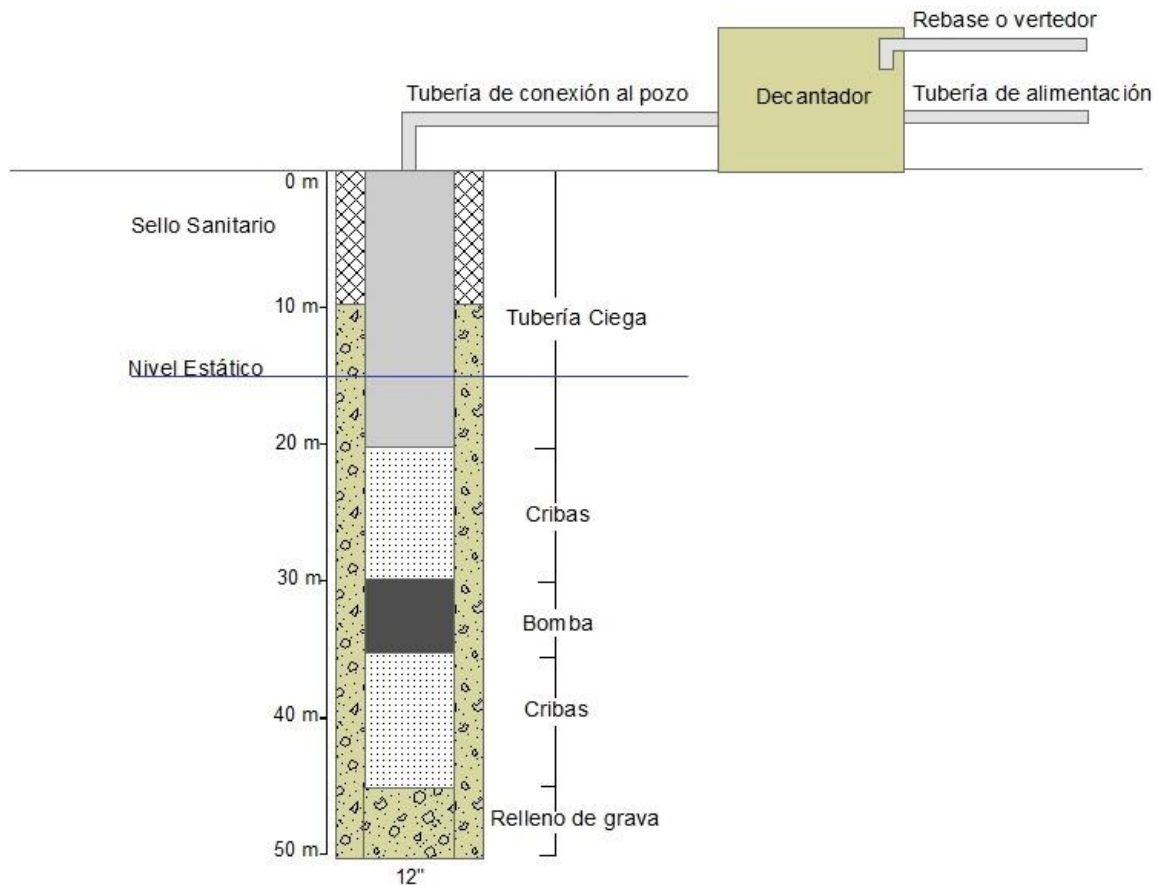


Figura 8.5.4 Diseño en profundidad de cada pozo propuesto con sus respectivos elementos de funcionamiento.

Fuente: elaboración propia en base a otros trabajos similares.

### 8.5.3 Propuesta N° 3: Pozos de inyección de Aguas Residuales

Según el trabajo realizado por Jiménez (2013) el caudal disponible de aguas residuales de Arica equivale a 864 l/s aproximadamente, dada su calidad solo necesitan tratamiento terciario.

Este volumen es posible almacenarlo completamente mediante pozos en el sector de Pago Gómez, ya que pese a ser un sector con mayor cantidad de estratos impermeables y menor permeabilidad, posee un volumen de almacenamiento suficiente en años no lluviosos (Ver Tabla 8.3.1).

Considerando la información dispuesta se estima un ascenso de nivel estático de 27 m al infiltrar el caudal mencionado durante 4 meses, que finalmente equivale a un volumen de 8.957.952 m<sup>3</sup>, por lo que no existen problemas con un posible afloramiento del recurso.

Para este proyecto se han tomado las mismas dimensiones que la propuesta N°2 a excepción del nivel estático aproximado de 40 m y la permeabilidad promedio de 10 m/d en esta zona, lo cual permite obtener un caudal de 29,85 l/s en cada pozo. Por esta razón, se necesitan 29 pozos para cubrir el total de aguas residuales disponible, los que se podrían ser ubicados en el subsector B mostrado en el mapa a continuación. Además, se adjunta un diseño de distribución de pozos similar al propuesto anteriormente pero ajustado al área disponible y con una separación entre pozos de 10 m debido a que el caudal individual es mayor, por ende necesitan mayor separación para no intervenir con los pozos adyacentes.

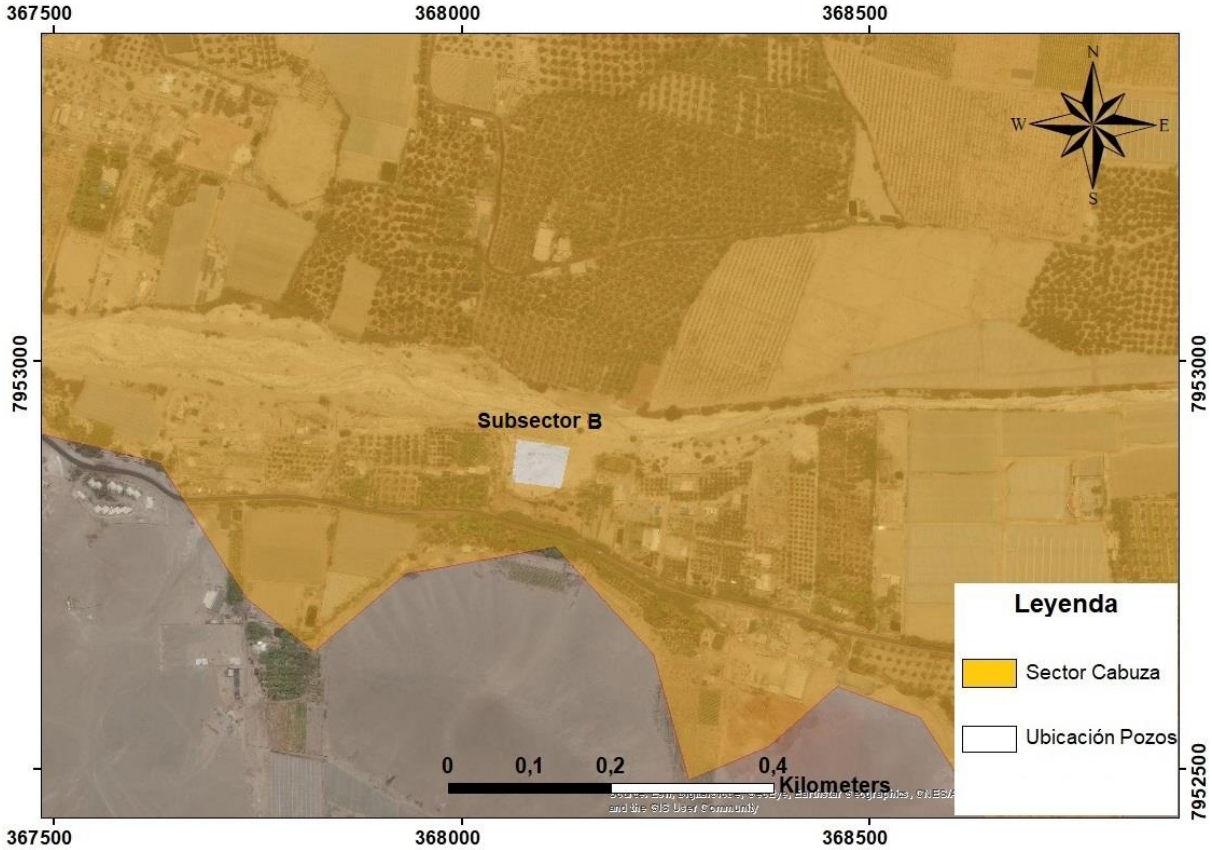


Figura 8.5.5 Sector Pago Gómez con posible ubicación del sistema de pozos. Escala: 1:5.000.  
Fuente: Elaboración propia, según la disponibilidad espacial en el terreno.

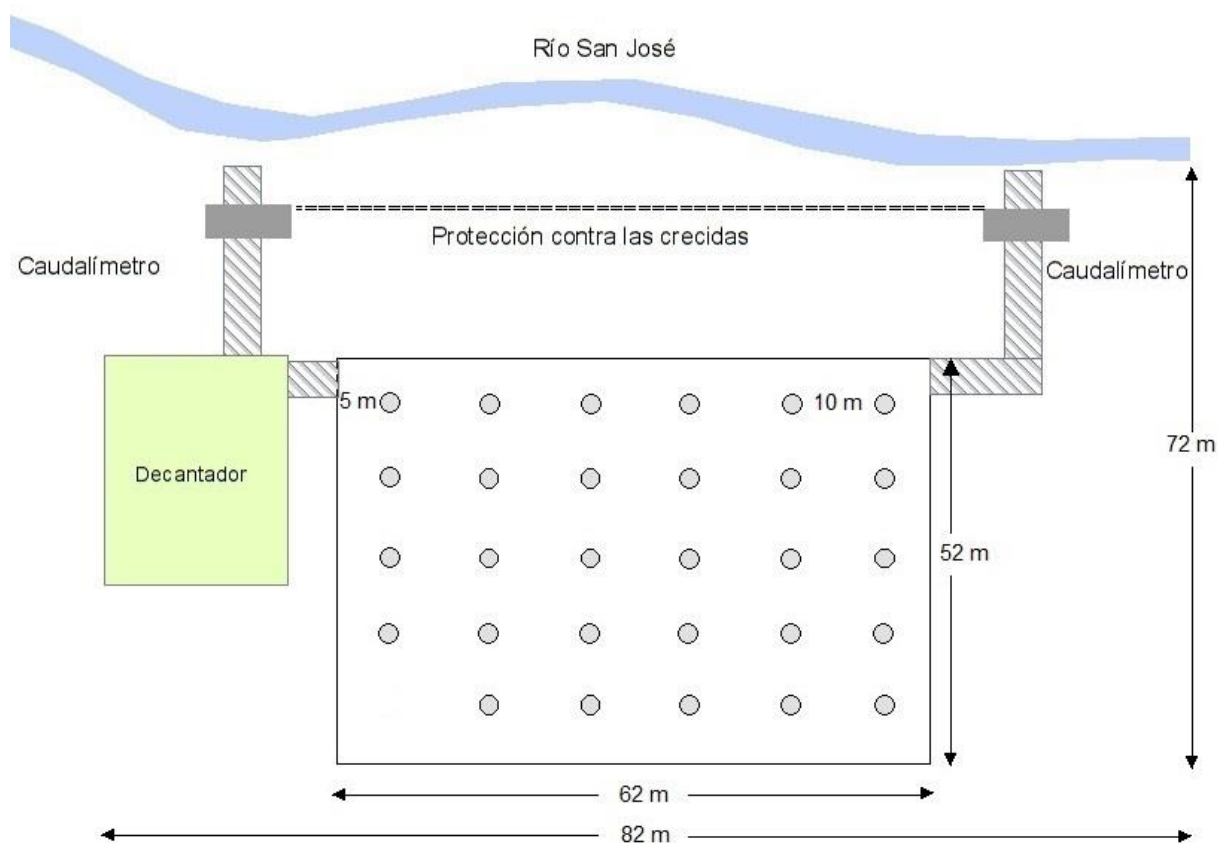


Figura 8.5.6 Diseño del proyecto propuesto de pozos en el sector Pago Gómez.  
Fuente: elaboración propia, en base a experiencias propuestas en otros trabajos.

Si bien la propuesta considera la infiltración de un gran volumen de aguas residuales, estas pueden llegar al océano pacífico antes de ser utilizadas para consumo al no tener un tiempo de almacenamiento suficiente, puesto que el sector de Pago Gomez se encuentra cercano al borde costero propiciando una temprana salida al mar de las aguas a infiltrarse, perdiendo una importante fuente de agua.

## 8.6 Evaluación Económica

Los precios han sido determinados en función de valores referenciales propuestos en trabajos de similares características como el de Moreno (2016), MINVU (1996), etc. Otros valores importantes son: 1 Ha de terreno en la zona cuesta alrededor de \$10.500.000 (Portalterreno.com), el precio del agua en Arica es de \$937/m<sup>3</sup> tarifa obtenida de Aguas del Altiplano y el valor de UF al 01/03/2020 se ha fijado en \$28.493,04.

## 8.6.1 Proyecto N°1

Tabla 8.6.1 Costos aproximados de la construcción de una zanja.

Fuente: elaboración propia según valores referenciales y datos de este trabajo.

Servicio	Unidad	Precio unitario (UF)	Cantidad	Precio total (\$)
Excavación del terreno	m <sup>3</sup>	0,252	500	3.590.123
Retiro de excedentes	m <sup>3</sup>	0,063	500	897.530
Suministro y colocación de geotextil	m <sup>2</sup>	0,096	620	1.695.905
Filtro granular de grava de 10 cm sobre el geotextil	m <sup>3</sup>	0,118	10	33.621
<b>Total</b>	\$			6.217.179

Tabla 8.6.2 Costos e ingresos para el proyecto propuesto utilizando zanjas de infiltración y pozos.

Fuente: elaboración propia según valores referenciales y datos de este trabajo.

Costos de infraestructura y obra				
Elementos	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)	Fuente
Terreno	2,64 Ha	10.500.000	27.720.000	Portalterreno.com
Zanja	63	6.217.179	391.682.277	Moreno (2016), MINVU (1996)
Pozos	10	30.870.000	308.700.000	Moreno (2016), MINVU (1996)
Caudalímetro	2	1.500.000	3.000.000	Cotización
Decantador	1	15.000.000	15.000.000	Guerrero (2018)
Filtro	1	10.000.000	10.000.000	Guerrero (2018)
Pozo de observación	1	93.000.000	93.000.000	Guerrero (2018)
Piezómetro	1	11.500.000	11.500.000	Quidel (2017)
Muro de contención	840	25.000	21.000.000	Quidel (2017)
<b>Subtotal</b>			881.602.277	
Otros costos				
Mantenimiento y Operación (10% de la Inversión)			88.160.228	Moreno (2016)

IVA (19%)	167.504.433	Servicio de impuestos internos
<b>Subtotal</b>	419.884.354	
<b>Total</b>	1.137.266.938	
<b>Ingreso</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Precio</b>
Caudal infiltrado	273 l/s	\$1.993.354.272
Tiempo	3 meses	
Volumen	2.122.848 m <sup>3</sup>	
Valor del Agua en Arica	\$939/m <sup>3</sup>	
		Este trabajo

## 8.6.2 Proyecto N°2

Tabla 8.6.3 Costos aproximados de la construcción de un pozo.

Fuente: elaboración propia según valores referenciales y datos de este trabajo.

Servicio	Unidad	Precio unitario (\$)	Cantidad	Precio total (\$)
<b>Instalación y levante de faenas</b>				
Instalación y levante de faenas	gl	1.200.000	1	1.200.000
<b>Construcción del sondaje</b>				
Perforación Dmin=16"	m	280.000	50	14.000.000
Entubación cañería acero D=12", e=6.3 mm	m	80.000	30	2.400.000
Cribas acero al carbono, Slot 40, D=12"	m	220.000	20	4.400.000
Suministro y colocación de filtro granular	m	46.700	50	2.335.000
Sello y brocal de hormigón	gl	225.000	1	225.000



Tapa del pozo según plano del proyecto	gl	50.000	1	50.000
<b>Obra de captación y filtro, y caseta</b>				
Obra de captación, bomba y obra de arte para tratamiento	gl	2.000.000	1	2.000.000
Recinto sólido y seguro de 3x6 m, metálico	gl	3.000.000	1	3.000.000
<b>Interrupción de faenas</b>				
Interrupción de faenas	hr	40.000	24	960.000
<b>Plano de construcción e informe final</b>				
Plano de construcción e informe final	gl	300.000	1	300.000
<b>Total por pozo</b>				30.870.000

Tabla 8.6.4 Costos e ingresos para el proyecto propuesto utilizando pozos en zona saturada.  
Fuente: elaboración propia según valores referenciales y datos de este trabajo.

<b>Costos de infraestructura y obra</b>				
Elementos	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)	Fuente
Terreno	0,16 Ha	10.500.000	1.680.000	Portalterreno.com
Pozo	16	30.870.000	493.920.000	Moreno (2016), MINVU (1996)
Caudalímetro	2	1.500.000	3.000.000	Cotización
Decantador	1	15.000.000	15.000.000	Guerrero (2018)
Filtro	1	10.000.000	10.000.000	Guerrero (2018)
Pozo de observación	1	93.000.000	93.000.000	Guerrero (2018)
Piezómetro	1	11.500.000	11.500.000	Quidel (2017)
Muro de contención	80	25.000	2.000.000	Quidel (2017)
<b>Subtotal</b>			630.100.000	
<b>Otros costos</b>				

Gastos generales, imprevistos y utilidades (45%)	283.545.000	Moreno (2016)
IVA (19%)	119.719.000	Servicio de impuestos internos
<b>Subtotal</b>	403.264.000	
<b>Total</b>	1.033.364.000	
<b>Ingreso</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Precio</b>
Caudal infiltrado	273 l/s	\$1.993.354.272
Tiempo	3 meses	
Volumen	2.122.848 m <sup>3</sup>	
Valor del Agua en Arica	\$939/m <sup>3</sup>	
		Este trabajo

### 8.6.3 Proyecto N°3

El valor por pozo es el mismo porque se han tomado las mismas medidas que en la propuesta N°2, por lo tanto, se procede a analizar el costo e ingreso del proyecto.

Tabla 8.6.5 Costos e ingresos para el proyecto propuesto utilizando pozos en zona saturada  
Fuente: elaboración propia según valores referenciales y datos de este trabajo.

<b>Costos de infraestructura y obra</b>				
<b>Elementos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (\$)</b>	<b>Precio total (\$)</b>	<b>Fuente</b>
Terreno	0,59 Ha	10.500.000	6.195.000	Portalterreno.com
Pozo	29	30.870.000	895.230.000	Moreno (2016), MINVU (1996)
Caudalímetro	2	1.500.000	3.000.000	Cotización
Decantador	1	15.000.000	15.000.000	Guerrero (2018)
Filtro	1	10.000.000	10.000.000	Guerrero (2018)

Pozo de observación	1	93.000.000	93.000.000	Guerrero (2018)
Piezómetro	1	11.500.000	11.500.000	Quidel (2017)
Muro de contención	164	25.000	4.100.000	Quidel (2017)
<b>Subtotal</b>			1.038.025.000	
<b>Otros costos</b>				
Gastos generales, imprevistos y utilidades (45%)		467.111.250		Moreno (2016)
IVA (19%)		197.224.750		Servicio de impuestos internos
<b>Subtotal</b>		664.336.000		
<b>Total</b>		1.702.361.000		
<b>Ingreso</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Precio</b>		
Caudal infiltrado	864 l/s	\$8.411.516.928	Este trabajo	
Tiempo	4 meses			
Volumen	8.957.952 m <sup>3</sup>			
Valor del Agua en Arica	\$939/m <sup>3</sup>			

## 9 Conclusiones

Los antecedentes disponibles han permitido comprender la dinámica hídrica presente en la cuenca del Río San José, cuyo clima árido permite lluvias solamente en los sectores altos de la cuenca durante los meses estivales producto del invierno altiplánico, por lo que el río permanece en superficie solo en este lapso de tiempo, el resto del año el cauce permanece seco. Esto ha generado una necesidad de explotar el acuífero de Azapa para el riego de cultivos, lo que ha traído como consecuencia que fuese declarado “zona de prohibición de explotación” por la DGA en 1996.

Es por esto que el valle dependiente de este recurso, requiere un programa de recarga para solucionar los problemas hídricos que afectan su principal actividad económica: Agricultura. Para ello se ha establecido como fuente del agua de recarga la zona de Ausipar, puesto que es la única localidad en la parte central de la cuenca con estación de monitoreo que permite tener información de la disponibilidad de caudales para los meses de mayor precipitaciones. Estas estadísticas dieron como resultado un caudal de 273 l/s durante 3 meses, lo que equivale a 2.122.848 m<sup>3</sup> de aguas, cuya calidad resulta ser deficiente puesto que se encuentra con altas concentraciones de arsénico y boro dada la contaminación natural que sufren por la actividad volcánica, por ello es necesario tratarlas antes de inyectarlas al acuífero

Una vez identificada la fuente de recarga y la calidad de sus aguas, se han encontrado 2 zonas óptimas para implementar el proyecto: Pago Gómez y Cabuza. Esta última se encuentra ubicada en el kilómetro 20 del camino Azapa, con permeabilidades de 15 m/día y un nivel estático promedio de 15 m, siendo características suficientes para establecer alguna metodología de recarga. La estratigrafía y geofísica han permitido detectar la existencia de escasos niveles impermeables por lo que no hay problema en establecer un método de recarga superficial, que en este caso se trata de zanjas de infiltración ubicadas en un terreno con pendiente menor a 20°.

Se estimó un número de 63 zanjas y 10 pozos para poder infiltrar el caudal estimado durante 3 meses, por lo que se necesitan aproximadamente 2,64 Ha para construir esta propuesta, lo que permite utilizar una menor superficie sin necesidad de ocupar sectores agrícolas, ya que esto implicaría una evaluación de las pérdidas económicas para los agricultores afectados.

La segunda propuesta se trata del uso de 16 pozos de inyección, lo que ocupa un área considerablemente menor equivalente a 0,16 Ha. Es conveniente que la inyección de agua se realice en la zona saturada para evitar que esta sea contaminada durante su permanencia en la zona aireada, de esta manera se asegura una mejor calidad del fluido al momento de llegar al acuífero.

Esta metodología se perfila como la mejor alternativa para asegurar calidad y ahorros económicos en el desarrollo del proyecto, considerando la mantención necesaria para evitar la colmatación producto del material fino.

Por otra parte, existe una tercera propuesta similar a la anteriormente descrita, que consiste en la construcción de 29 pozos en un espacio de 0,59 Ha para infiltrar un caudal de 864 l/s de aguas residuales de Arica, las que solo necesitan un tratamiento terciario y constituyen un volumen importante de 8.957.952 m<sup>3</sup>. Esta opción sería una buena alternativa para implementar en el segundo sector apto para recarga que corresponde a Pago Gómez, cuyas permeabilidades son de 10 m/día y sus niveles estáticos en los últimos 7 se han mantenido sobre los 40 m, por lo tanto posee un volumen de almacenamiento suficiente para albergar este recurso. Lamentablemente la temprana salida al océano pacífico del recurso inyectado sería poco conveniente para el proyecto, por lo que sería conveniente utilizar esta propuesta en otro sector con características similares con la finalidad de poder almacenar el recurso por un período prolongado, para esto se propone realizar estudios detallados aguas arriba del sector de Cabuza de modo que se pueda aprovechar el gradiente hidráulico de la cuenca para la distribución de las aguas infiltradas hacia las zonas con mayores requerimientos hídricos.

Como recomendación, se sugiere mantener un control constante de la calidad de aguas puesto que es altamente vulnerable a la contaminación natural que presenta y a los agroquímicos, esto podría traer problemas de salud para la población que consume los productos regados por estas aguas. Así mismo, mantener en vigilancia las variaciones de los niveles freáticos al desarrollarse el proyecto, con la finalidad de prevenir problemas de afloramiento de aguas o pérdidas de este producto de un sistema de estructuras que no sean distinguibles a la escala del mapa geológico de García *et al.* (2004).

Además, se recomienda verificar las estaciones de monitoreo regularmente puesto que se pierde gran parte de información que sería útil para estimar con mayor exactitud precipitaciones,

caudales y niveles estáticos. Esto es de gran importancia para la cuenca, dado que se encuentra con un grave déficit y se necesita un mayor control de las variables que permitan identificar fuentes de recarga o volúmenes de almacenamiento disponible.

## 10 Referencias

AC Ingenieros Consultores LTDA. (2009). *Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región. Resumen Ejecutivo*. AC Ingeniero Consultores LTDS – DGA. Santiago, Chile. 99-106 p.

Cecioni, G.; García, F. (1960). *Observaciones geológicas en la Cordillera de la Costa de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 6, 28 p.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2012). *La Economía del Cambio Climático en Chile. Documento de proyecto*. Santiago, Chile. 41-45 p.

CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente). (2006). *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica. Santiago, Chile. 51, 52 p.

Custodio, E. & Llamas, M.R. (1983a). “Hidrología subterránea”.(Tomo I) Omega. Barcelona, España.

Decreto con fuerza de Ley 1122. Código de Aguas, Santiago, Chile, 13 de Agosto de 1981. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/N?i=5605&f=2018-01-27&p=>

DWA (Department of Water Affairs). (2009). *Strategy and Guideline Development for National Groundwater Planning Requirements. A check-list for implementing successful artificial recharge projects*. PRSA 000/00/11609/2 -Activity 12 (AR02).

DGA (Dirección General de Aguas). *Información Hídrica de las Cuencas Priorizadas. Ficha temática: Cuenca del Río San José*. Recuperado de: [https://www.mop.cl/Prensa/Documents/01\\_Rio\\_San\\_Jose.pdf](https://www.mop.cl/Prensa/Documents/01_Rio_San_Jose.pdf)

DGA (Dirección General de Aguas). (1998). *Plan director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Río San José*. DGA - AC Ingenieros Consultores Ltda - Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. Santiago, Chile. 15, 175 p.

DGA (Dirección General de Aguas). (2007). *Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Informe Final*. DGA - Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. - Ingenieros Consultores. Santiago, Chile. 157 p.

DGA (Dirección General de Aguas). (2013). *Análisis y Síntesis Preliminar de Iniciativas Sobre Recarga Artificial en Chile*. Santiago, Chile. 6-9, 16, 17, 135, 136 p.

DGA (Dirección General de Aguas). (2014a). *Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos. Informe Final*. DGA - Amphos 21 Consulting Chile Ltda. Santiago, Chile. 18, 24-51, 69, 71-73, 98-103, 131 p.

DGA (Dirección General de Aguas). (2014b). *Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos. Resumen Ejecutivo*. DGA - Amphos 21 Consulting Chile Ltda. Santiago, Chile. 9-11 p.

DGA (Dirección General de Aguas). (2016). *Estado de Estudios y Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos en Chile*, DEP - DGA. Santiago, Chile. 10-13 p.

Dirección de Riego. (1989). *Estudio de Simulación Operacional Cuenca del Río Lauca, Aguas arriba de bocatoma canal Lauca*. Consultor – Dirección de Riego, Santiago, Chile.

Fernández. E. (2006). *Gestión de la recarga de acuíferos como práctica alternativa de gestión hídrica* (en línea). El proyecto DINA-MAR, Grupo Tragsa, Madrid, España. 5-8, 9-12 p.

Fernández. E. (2008). *Gestión de la Recarga de Acuíferos* (en línea). El proyecto DINA-MAR, Grupo Tragsa, Madrid, España. 1, 2 p.

Fernández. E. (2010). *La Gestión de la Recarga Artificial de Acuíferos en el marco del desarrollo sostenible: Desarrollo Tecnológico*. El proyecto DINA-MAR, Grupo Tragsa, Madrid, España. 137, 138, 145, 146, 160, 220-224 p.

Fernández. E. (2013). *Técnicas de Recarga Artificial de Acuíferos: Aplicación en entornos Mediterráneos* (en línea). El proyecto DINA-MAR, Grupo Tragsa. Universidad de Málaga, Madrid, España. 21 p.

García, M., Gardeweg, M., Clavero, J., Hérial G. (2004). *Hoja Arica, Región Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería carta geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 84, 2004., 1 mapa escala 1:250.000*. 9-12, 14-128 p.



Guerrero, P. (2018). *Proyecto de Recarga Artificial en la cuenca del Río Choapa; propuesta de zonas óptimas para su implementación y evaluación económica. Memoria para optar al Título de Geólogo*. Santiago. Universidad Nacional Andrés Bello. Facultad de Ingeniería. 74 p.

González, F., Riquelme, A., Contreras, P., Mazuela, P. (2013). *Antecedentes generales para la sustentabilidad de la producción hortícola en el valle de Azapa, Arica, Chile*. 123 p.

ICASS SpA. (2017). *Análisis Integral de soluciones a la Escasez Hídrica, (Segunda Parte), Región de Arica y Parinacota. Informe Final*. ICASS SpA – DGA. Santiago, Chile. 162, 163 p

IGME (Instituto Geológico y Minero de España). (1984) *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. IGME - Villanueva, M. & Iglesias, A. Edit. Madrid, 20-26 p.

Instituto Nacional de Hidráulica (INH). (2014). *Caracterización de la cuenca del Río San José para la implementación de un programa de recarga artificial de acuíferos*. 23, 25 p.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2010). *Información Hortícola. Publicación Especial 2008-2009*. INE Ediciones. Santiago, Chile. 9, 30 p.

JICA. (1995). *Estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile*. Japan International Cooperating Agency.

Jiménez, G. (2013). *Caracterización de la cuenca del Río San José en Arica para la evaluación a nivel del perfil de un sistema de recarga artificial de acuíferos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil*. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 27, 42 p.

Ley 20.173. Bases Generales del Medio Ambiente, Santiago, Chile, 27 de marzo de 2007. Recuperado de: [http://www.conaf.cl/wp-content/files\\_mf/1370463346Ley19300.pdf](http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1370463346Ley19300.pdf)

Martínez, L. (2018). *La cuestión del Río Lauca, una controversia artificial*. *Revista de Marina*, N° 963 pp. 28-3. Recuperado desde: <https://revistamarina.cl/escenarios-de-actualidad/la-cuestion-del-rio-lauca-una-controversia-artificial/>

Maturana, I. (2016). *Potencial Recarga Gestionada en la Cuenca de los Ríos Teno y Lontué, VII Región, Chile: Determinación de sectores favorables y propuesta de alternativas. Memoria para optar al título de geólogo*. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 90 p

Ministerio del Medio Ambiente. (2012). Reglamento para la determinación del Caudal ecológico mínimo. Chile

Ministerio de Salud Pública. (2004). Norma Chilena 409/1.Of2005: Agua Potable. Chile.

Ministerio de Salud Pública. (1987). Norma Chilena 1333.Of.78: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Chile.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (1996). Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Chile. 146, 147 p.

Montecinos, F. 1963. *Observaciones de Geología en el Cuadrángulo de Campanani, Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Memoria de Título (Inédito)*, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 109 p.

Moreno, D. (2015). Recarga Artificial de Acuíferos en la Cuenca del Río Maule: Determinación de sectores favorables y evaluación económica. *Memoria para optar al título de geóloga*. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 66, 69, 72 p.

Muñoz, N. 1988. *Geología y estratigrafía de los sectores de Chapiquiña-Livilcar-Tignamar, Surire-Quiburcanca y Río Putani, Provincias de Arica y Parinacota, I Región*. Empresa Nacional del Petróleo, Proyectos de exploración fuera de Magallanes, Informe final (Inédito), Santiago. 29 p.

Niemeyer, H. (1980). Hoyas Hidrográficas de Chile: Primera Región. DGA - Centro de información de recursos hídricos. Área de documentación. Santiago, Chile. 1,2 p

ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2016). *El cambio climático y los recursos hídricos en Chile*, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de ingeniería y Suelos. Santiago, Chile. 30 p.

Ortiz, G. (2012). *Investigación y cuantificación de los procesos de Colmatación en las operaciones de recarga artificial de acuíferos mediante balsas de Infiltración y pozos de inyección* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid). 44-49, 58, 62-66, 71, 85, 86 p.

Puig, G. (2017). *Localización de Áreas Propicias para la gestión de recarga del acuífero en la Cuenca del Río Copiapó, Región de Atacama. Memoria para optar al Título de Geólogo*. Santiago. Universidad Nacional Andrés Bello. Facultad de Ingeniería. 135 p.

Quidel, C. (2017). *Recarga Artificial de acuífero en la Cuenca del Río Itata, Región del Biobío, Chile: Identificación de sectores favorables y propuesta de alternativas. Memoria para optar al Título de Geólogo*. Santiago. Universidad Nacional Andrés Bello. Facultad de Ingeniería. 78 p.

Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. (1970-2014). Desinventar (sistema de inventario de efectos de desastre). Recuperado de: [https://online.desinventar.org/desinventar/#CHL-1257983285-chile\\_inventario\\_historico\\_de\\_desastres](https://online.desinventar.org/desinventar/#CHL-1257983285-chile_inventario_historico_de_desastres).

Resolución DGA N°425. Reglamento de Aguas Subterráneas, Santiago, Chile, 31 de diciembre de 2007. Recuperado de: <http://www.leychile.cl/Navegar/?idNorma=270521&idVersion=2008-04-16&idParte>

Salas, R., Kast, R., Montecinos, F., Salas, I. (1966). *Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 21, 130 p.

Salazar, C. (2003). *Situación de los recursos hídricos en Chile*. Con el apoyo de la Fundación Nippon. Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A. C., México. 18, 19 p.

Schulz, C., García, R. (2015). *Balance Hídrico y Recarga de Acuíferos*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, grupo chileno. Argentina. 67 p.

Tobar, A., Salas, I., Kast, R. (1968). *Cuadrángulos Camaraca y Azapa. Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile*, Nos. 19-20, escala 1:50.000, 13 p.

Torres, A. y Acevedo, E. (2008). *El Problema de salinidad en los recursos de suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile*. IDESIA. Volumen 26, N°3, 31-44 p.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). (2005). *Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas semiáridas*, Asociación Internacional de Hidrogeólogos y Programa Hidrogeológico Internacional de la UNESCO. Ian Gale Ediciones. Paris. 2 p.

# 11 Anexos

## 11.1 Anexo I: Meteorología

### 11.1.1 Información Estaciones Meteorológicas

Tabla 11.1.1 Información estaciones meteorológicas.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

Estación	UTM X	UTM Y	Código BNA	Estado
Arica Oficina	360557	7956456	01310018-7	Vigente
Azapa	375451	7952288	01310019-5	Vigente
Belén	445416	7957986	01300007-7	Vigente
Central Chapiquiña	442121	7968569	01300006-9	Vigente
El Buitre Aeródromo	364437	7952665	01310022-5	Suspendida
Murmuntane	441683	7970762	01300004-2	Suspendida
Río San José en Ausipar	414388	7944964	01310002-0	Vigente
Río Tignamar en Angostura	440319	7952869	01300009-3	Vigente
Tignamar	447864	7945454	01300008-5	Vigente

### 11.1.2 Monitoreo Precipitaciones

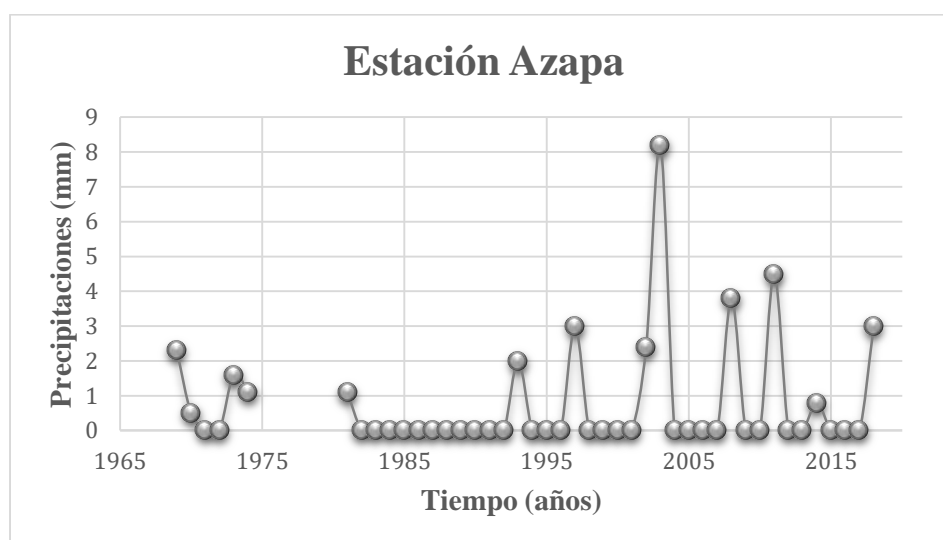


Gráfico 11.1.1 Precipitación Anual en la estación Azapa entre 1969 y 2018.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

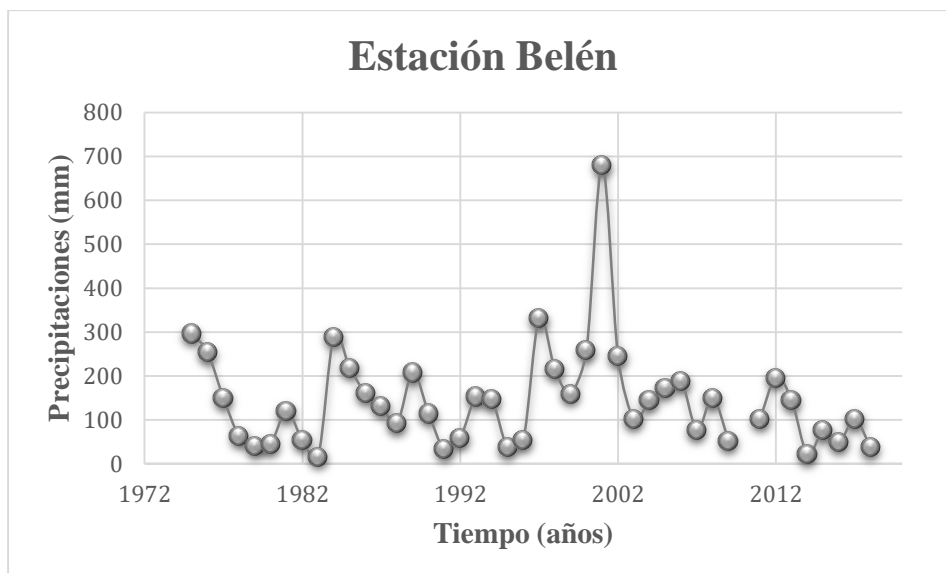


Gráfico 11.1.2 Precipitación Anual en la estación Belén entre 1975 y 2018  
 Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

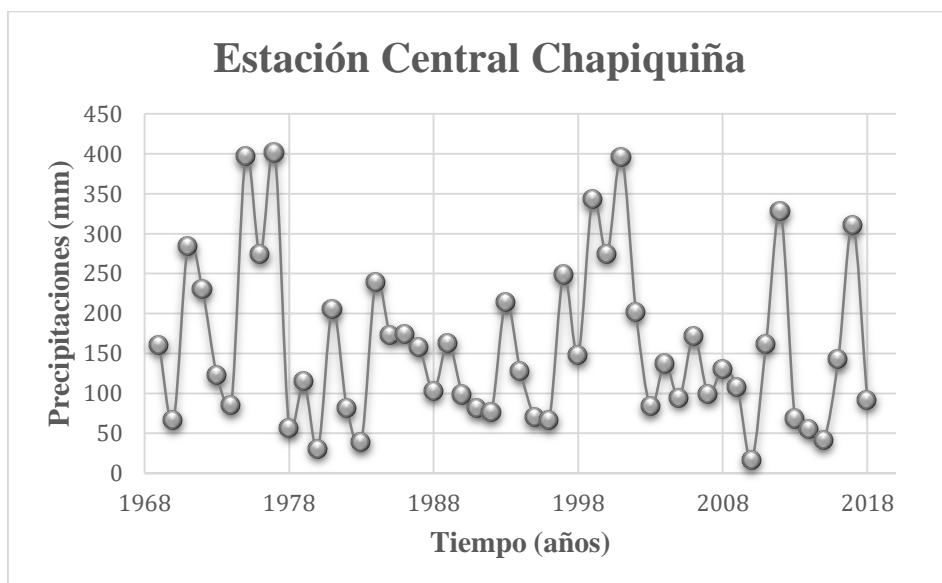


Gráfico 11.1.3 Precipitación Anual en la estación Belén entre 1969 y 2018.  
 Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

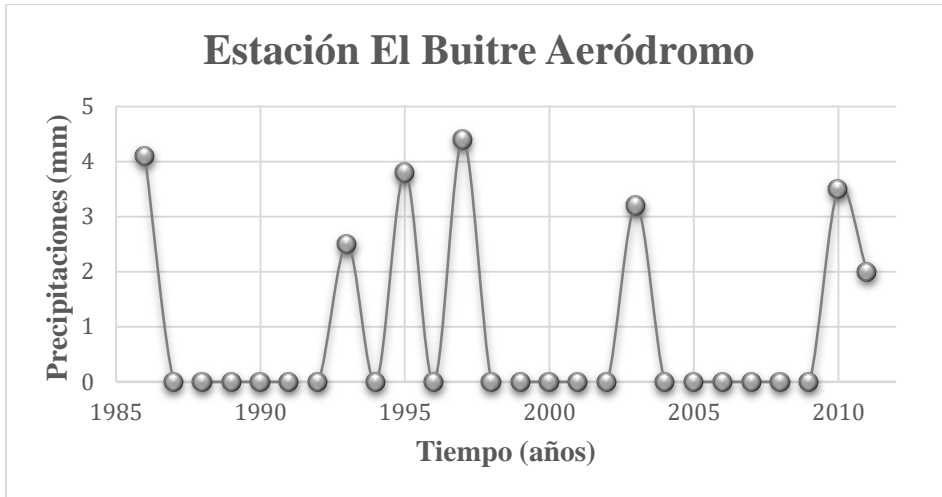


Gráfico 11.1.4 Precipitación Anual en la estación El Buitre Aeródromo entre 1986 y 2011.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

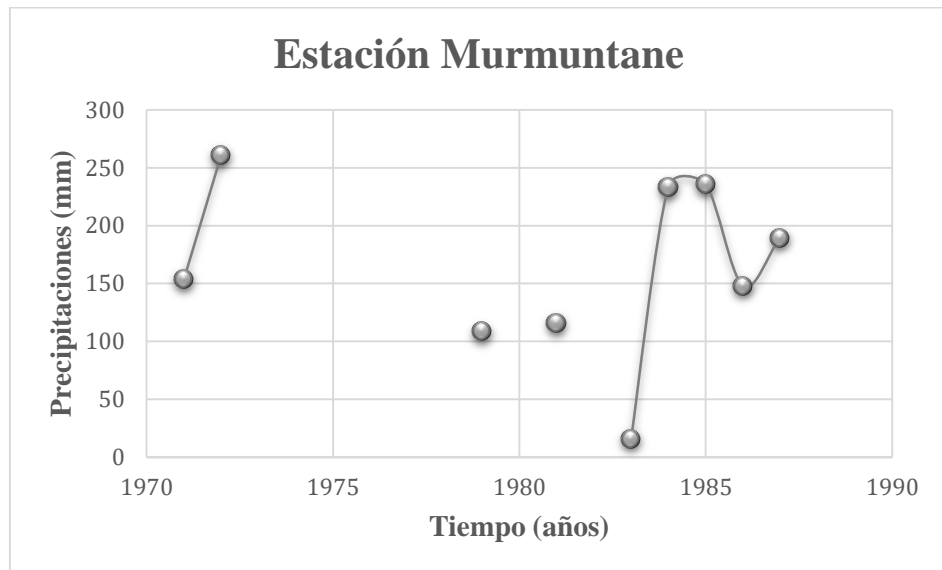


Gráfico 11.1.5 Precipitación Anual en la estación Murmuntane entre 1971 y 1987.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

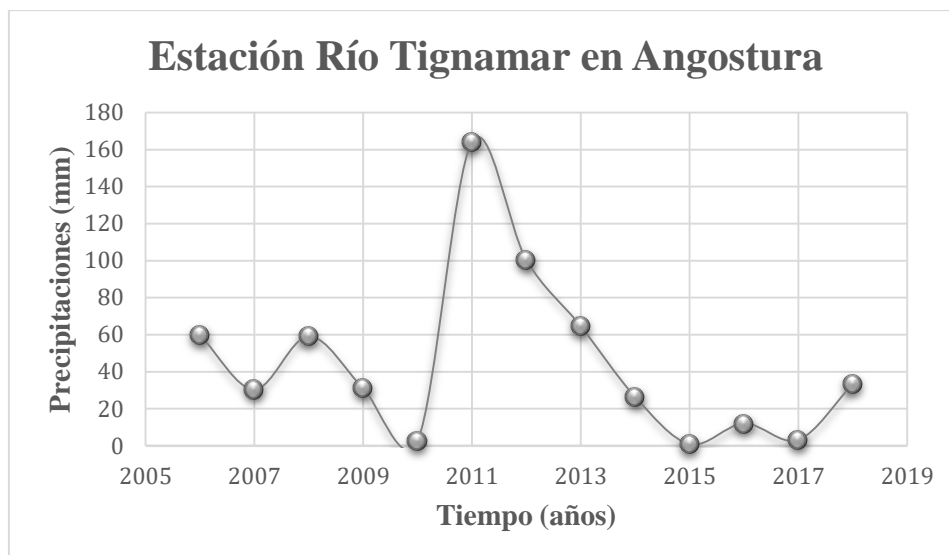


Gráfico 11.1.6 Precipitación Anual en la estación Río Tignamar en Angostura entre 2006 y 2018.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

## 11.2 Anexo II: Fluviometría

### 11.2.1 Información Estaciones Fluviométricas

Tabla 11.2.1 Información estaciones fluviométricas.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

Estación	UTM X	UTM Y	Código BNA	Estado
Acueducto Azapa en Bocatoma	406241	7945166	01310004-7	Vigente
Río Laco en Cosapilla	440200	7967279	01300002-6	Vigente
Río San José antes Bocatoma Azapa	397815	7944599	01310003-9	Vigente
Río San José en Ausipar	414361	7944681	01310002-0	Vigente
Río San José en Livilcar	424901	7954291	01310001-2	Suspendida
Río Tignamar en Angostura	440319	7952869	01300009-3	Vigente
Río Tignamar en Tignamar	442653	7950787	01300001-8	Suspendida

## 11.2.2 Monitoreo caudales

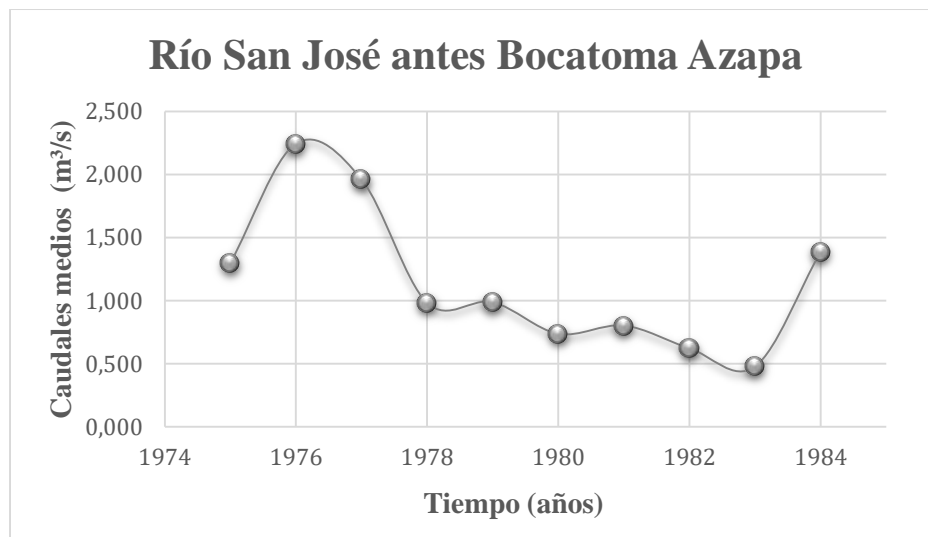


Gráfico 11.2.1 Caudales anuales en la estación Río San José antes Bocatoma Azapa entre 1975 y 1984.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

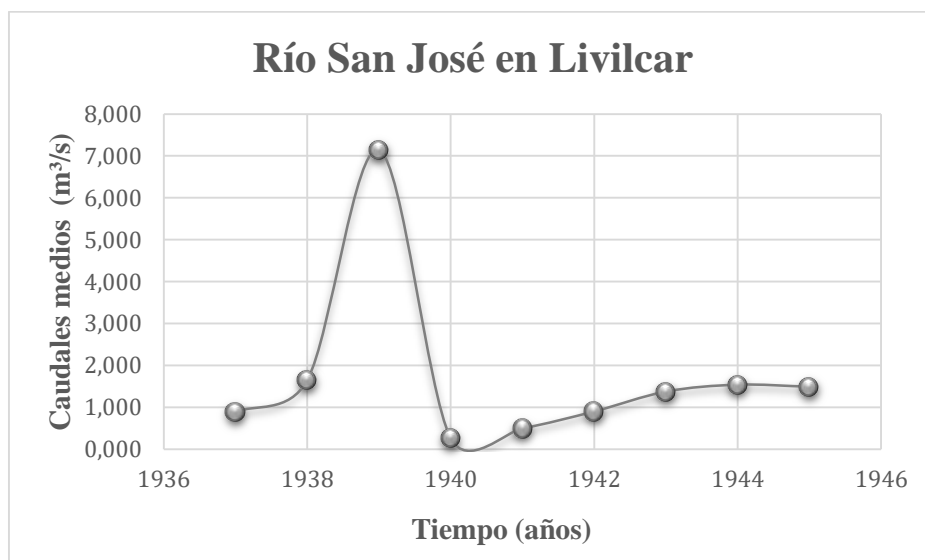


Gráfico 11.2.2 Caudales anuales en la estación Río San José en Livilcar entre 1937 y 1945.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.



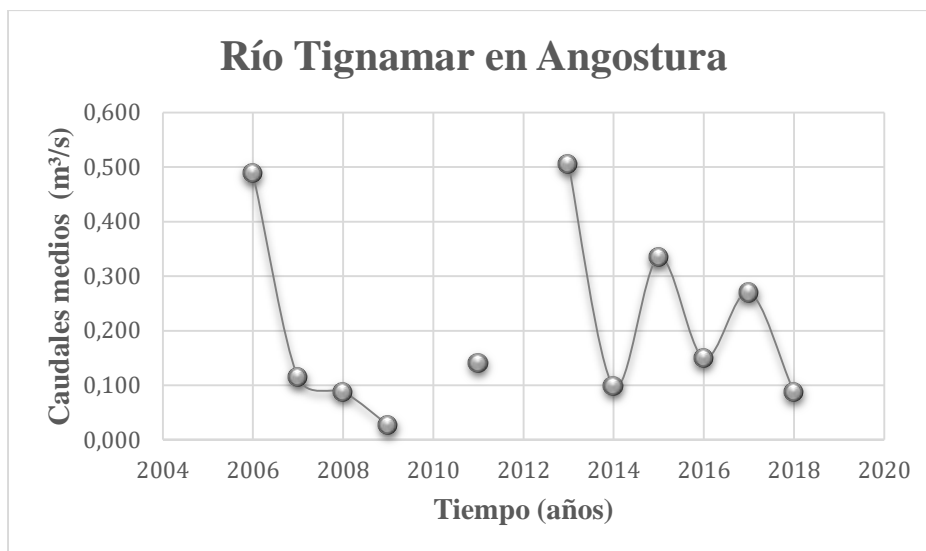


Gráfico 11.2.3 Caudales anuales en la estación Río Tignamar en Angostura entre 2006 y 2018.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

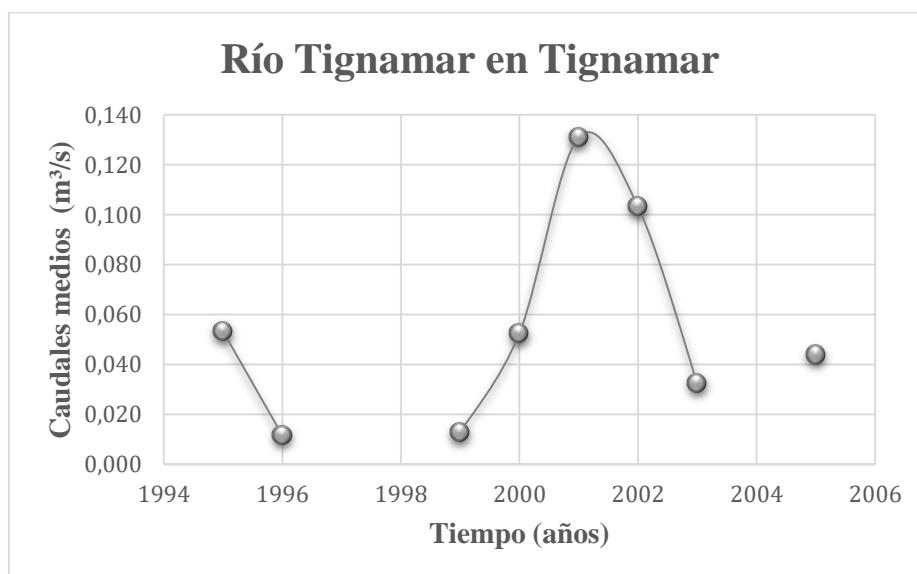


Gráfico 11.2.4 Caudales anuales en la estación Río Tignamar en Tignamar entre 1995 y 2005.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

### 11.3 Anexo III: Pozos en desuso con información estratigráfica

Tabla 11.3.1 Pozos en desuso utilizados para construir la estratigrafía subsuperficial  
Fuente: Extraído de “Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región. Resumen Ejecutivo”, AC Ingenieros Consultores LTDA (2009).

Pozo N°	Rol Irén	Predio	Profundidad perforación (m)	Nivel Dinámico (m)	Nivel Estático (m)	Fecha termino de construcción
102	1830-7010-BB06	Colonia Juan Noé	49	21	16,4	03/52

106	1820-7010-CD-12	Parcela 1 Algodonal	96	33	31,7	09/70
106	1820-7010-CD-12	Parcela 1 Algodonal	96	33	31,7	09/70
109	1820-7010-CD-32	Algodonal	102	55	23	04/74
110	1820-7010-CD-24	Saucache	111		31,5	06/73
114	1830-7010-BB-08	Parcela 16	50	22	12,5	07/52
115	1830-7000-AA-02	Cerro Moreno	45		26	05/56
117	1830-7010-AD-05	Cabuza 2B	137	48,5	30	10/53
118	1820-7010-CD-26	Av. Loa	50		31,7	07/73
119	1820-7010-CD-27	Av. Gonzalo Cerca	50		37,1	07/73
121	1820-7010-DC-04	Cinco Olivos	100	36	15	04/74
124	1830-7010-BB-10	Las Maitas	47		31,1	10/56
126	1820-7010-CC-16	Av. Azola	50		39,6	05/73
130	1820-7010-CD-19	Olivarera Azapa	78	39	18	/52
133	1820-7010-CC-15	Av. Tarapacá	50		22,4	05/73
134	1830-7010-BB-02	Colonia Juan Noé	80	48	18,9	07/61
136	1820-7010-CA-01	Chinchorro Norte	390			08/63

141	1820-7010-CC-03	AP Retén Estadio	136	47,9	27,9	07/65
142	1820-7010-CC-04	AP Cancha Tucapel	110	53,2	34,8	11/65
145	1820-7010-CC-08	Planta Diesel	45	26,9	16,6	05/61
148	1820-7010-CC-11	Regimiento Rancagua	36	25,7	12,8	12/60
149	1820-7010-CC-12	Universidad de Chile	30			01/64
161	1820-7010-CD-09	AP Azapa	62	35,7	21	04/60
168	1820-7010-CD-21	Refinadora de Azufre	58			/71
170	1820-7010-CD-23	La Verbena	70		38,3	06/73
178	1830-7010-AD-02	Cabuza 5e	52		19	
179	1830-7010-AD-06	Cabuza 6	55		31	05/57
181	1830-7010-AD-08	Cabuza 4d	39		31	01/54
186	1830-7010-AB-01	AP Azapa	67	30,4	21	11/59
189	1830-7010-AB-04					
190	1830-7010-AB-05	Hacienda Buena Vista	110	59,8	21,8	01/66
193	1830-7010-AB-08	Hacienda Buena Vista	105	64	47,7	01/73
197	1830-7010-BA-04	Fundo Las Ánimas	175	69	32	03/73

198	1830-7010-BA-08	Pago Gómez Ol. Weguel	51		23,5	10/53
205	1830-7010-BB-03	Colonia Juan Noé	50	18,3	17	05/47
206	1830-7010-BB-04	Colonia Juan Noé	48	24,8	19,7	10/51
207	1830-7010-BB-05	Colonia Juan Noé	51	37	18,3	11/51
208	1830-7010-BB-07	Colonia Juan Noé	55	29	22	06/52
216	1830-7000-AA-06	Las Riveras	25	14,8	6,4	03/80
218	1830-7010-BA-18	Las Ánimas	90			11/76
221	1830-7010-BA-21	Planta P. Gómez	90	36	17,5	
227	1820-7010-CC-17	Av. P. Aguirre Cerda	60		28,4	06/73
230	1820-7010-CD-34	Ap Azapa	90	54,8	26,5	/87
231	1820-7010-CD-35	Ap Azapa	90	39	24,5	/87
232	1820-7010-CD-36	Ap Azapa	90	32,7	23,9	/87
267	1830-7010-AB-11	Ap Azapa	90		47,8	/87

## 11.4 Anexo IV: Otros estudios geofísicos

### 11.4.1 Resistividades

Tabla 11.4.1 Resistividades para cada unidad obtenidas con un loop de 200 m x 200 m.

Fuente: extraído de Ac Ingenieros Consultores (2009).

Unidad	Resistividad (Ohm-m)	Descripción
1	>50	Sedimentos superficiales secos
2	1 – 8	Arcillas
3	8 – 15	Gravas arcillosas
4	15 – 25	Gravas arenosas
5	25 – 50	Sedimentos compactos
6	50 – 100	Roca basal alterada
7	>100	Roca basal

### 11.4.2 Perfiles Interpretados

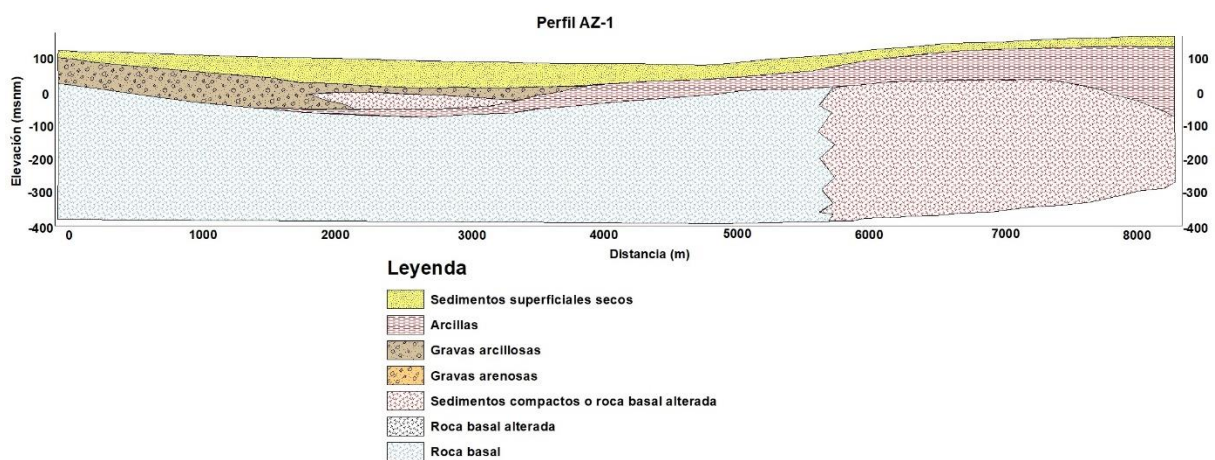


Figura 11.4.1 Perfil TEM del sector AZ-1.

Extraído de “Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región. Resumen Ejecutivo”, AC Ingenieros Consultores LTDA (2009).

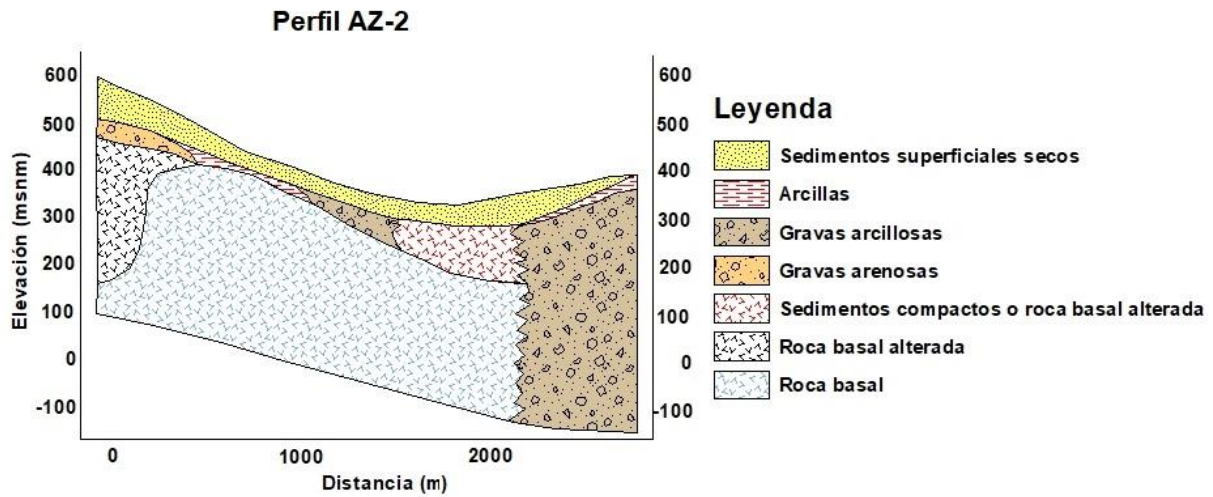


Figura 11.4.2 Perfil TEM del sector AZ-2.

Extraído de “Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región. Resumen Ejecutivo”, AC Ingenieros Consultores LTDA (2009).

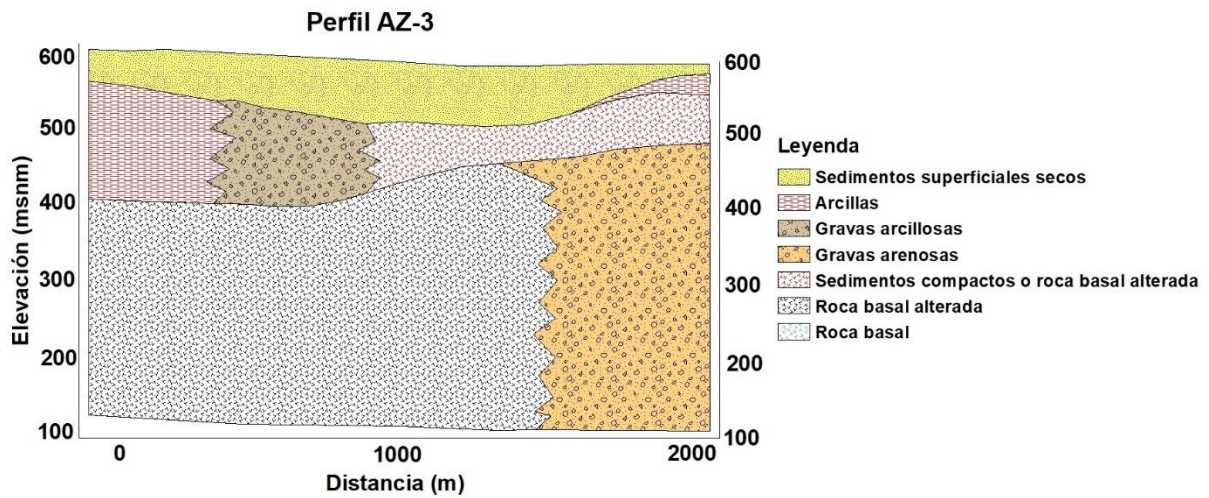


Figura 11.4.3 Perfil TEM del sector AZ-3.

Extraído de “Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región. Resumen Ejecutivo”, AC Ingenieros Consultores LTDA (2009).

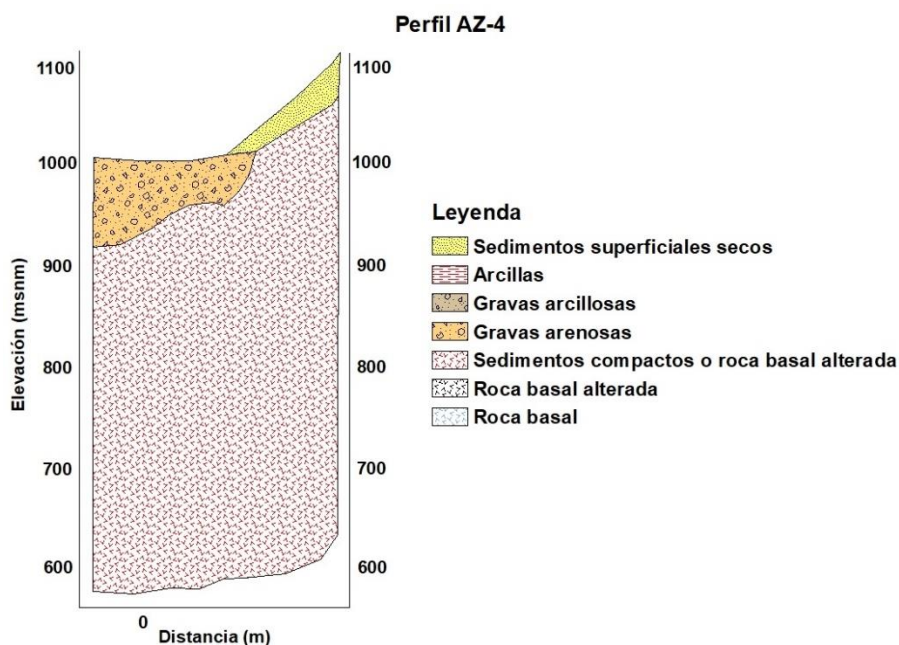


Figura 11.4.4 Perfil TEM del sector AZ-4.

Fuente: Extraído de “Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región. Resumen Ejecutivo”, AC Ingenieros Consultores LTDA (2009).

## 11.5 Anexo V: Expedientes

### 11.5.1 Catastro de expedientes

Tabla 11.5.1 Expedientes utilizados en la determinación de transmisividad.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

Nº	Expediente	UTM Y	UTM X	T (m <sup>2</sup> /d)
406	NR-0101-654	7955090	366180	133
491	NR-1501-201	7958251	363192	121
511	VPC-1501-176	7958329	363301	19
563	NR-1501-52	7948967	380876	119
649	VPC-1501-94	7955833	363417	213
742	VPC-1501-86	7953484	372755	400
886	VPC-0101-1427	7957130	363541	228
919	VPC-1501-1	7953240	371029	143
1420	VPC-0101-296	7956700	363440	117
1595	NR-0101-104	7954147	370264	86
1596	NR-0101-124	7954579	366543	61
1599	NR-0101-105	7959144	363574	32
1960	ND-0101-65	7953768	370812	1840

### 11.5.2 Pruebas de bombeo

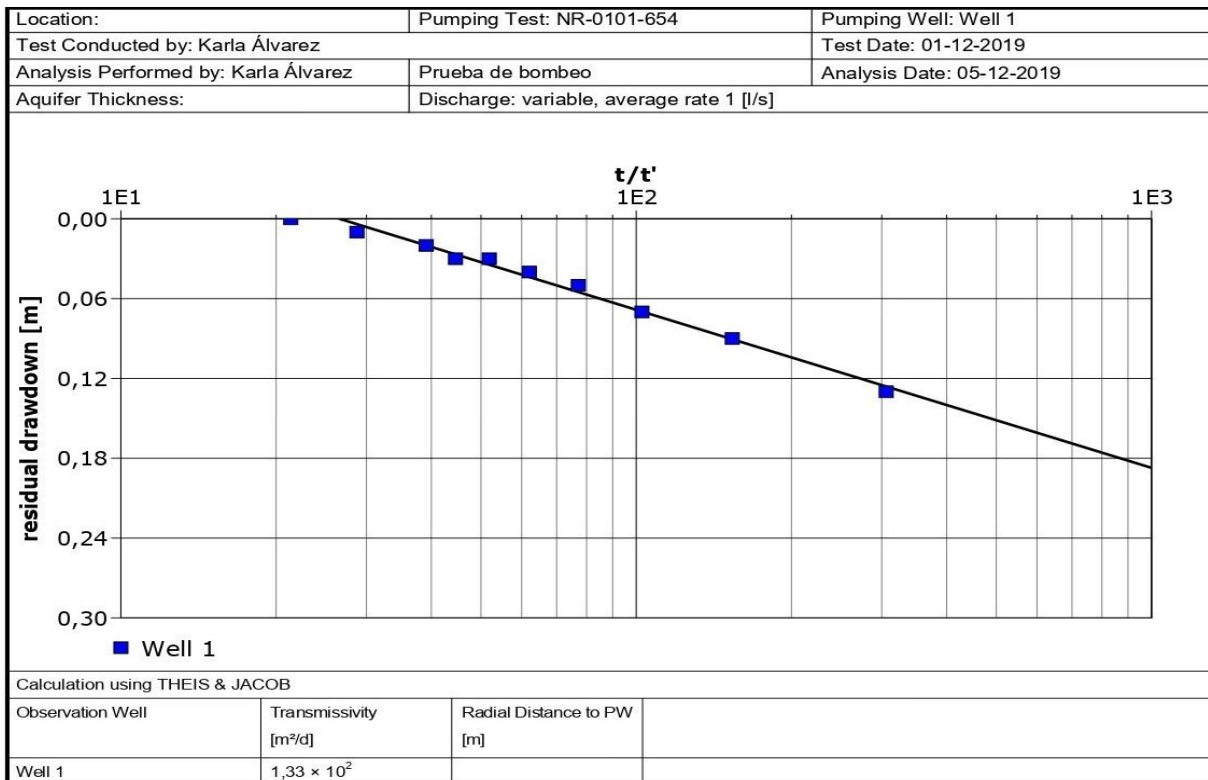


Figura 11.5.1 Prueba de Bombeo Expediente N°406.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

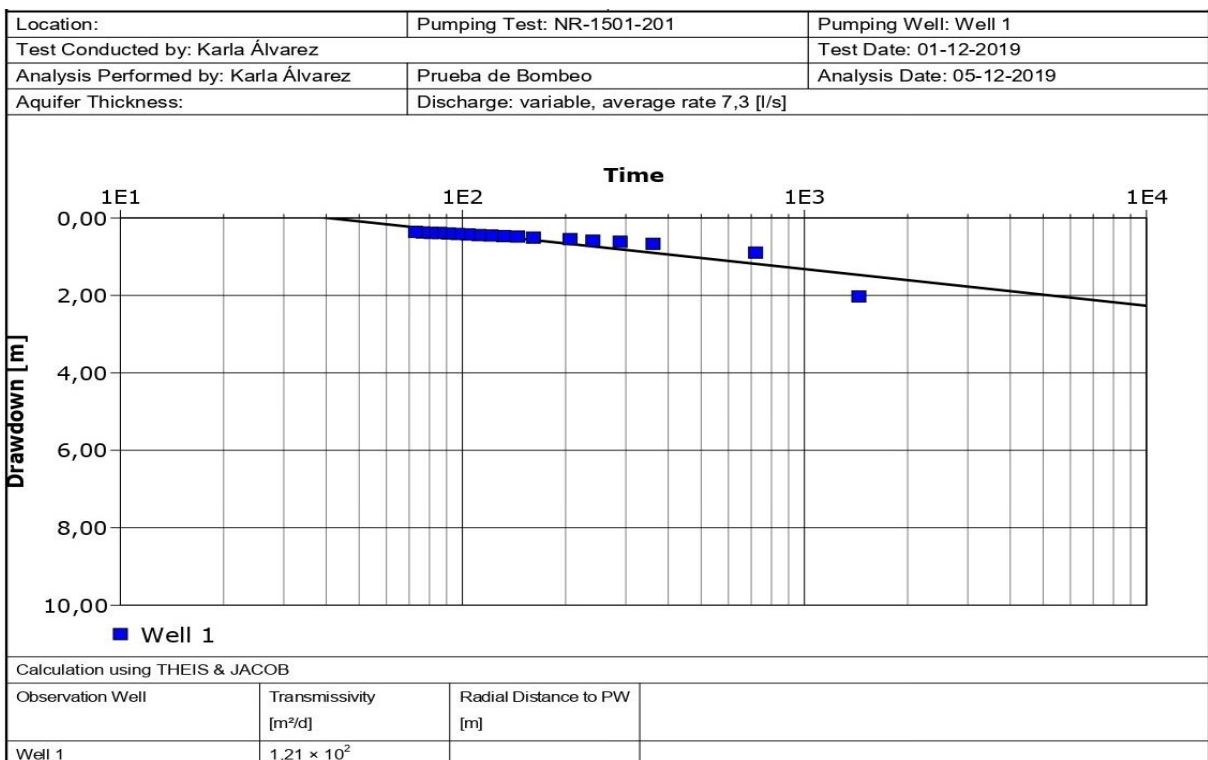


Figura 11.5.2 Prueba de Bombeo Expediente N°491.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.



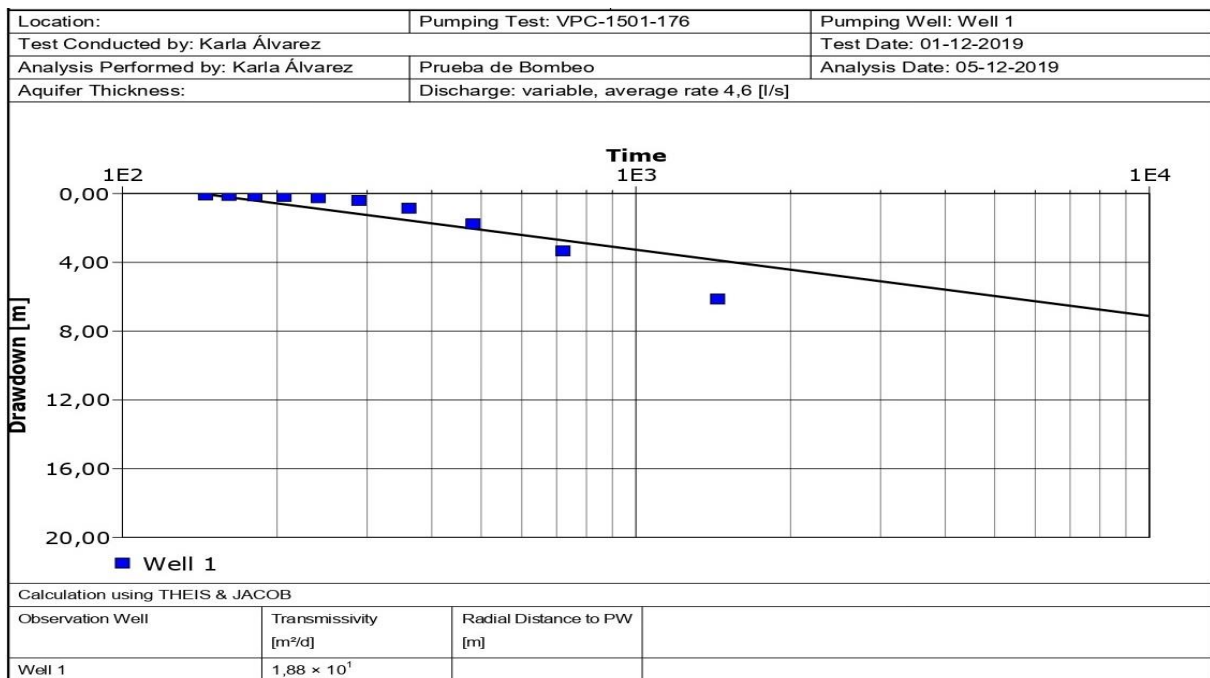


Figura 11.5.3 Prueba de Bombeo Expediente N°511.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

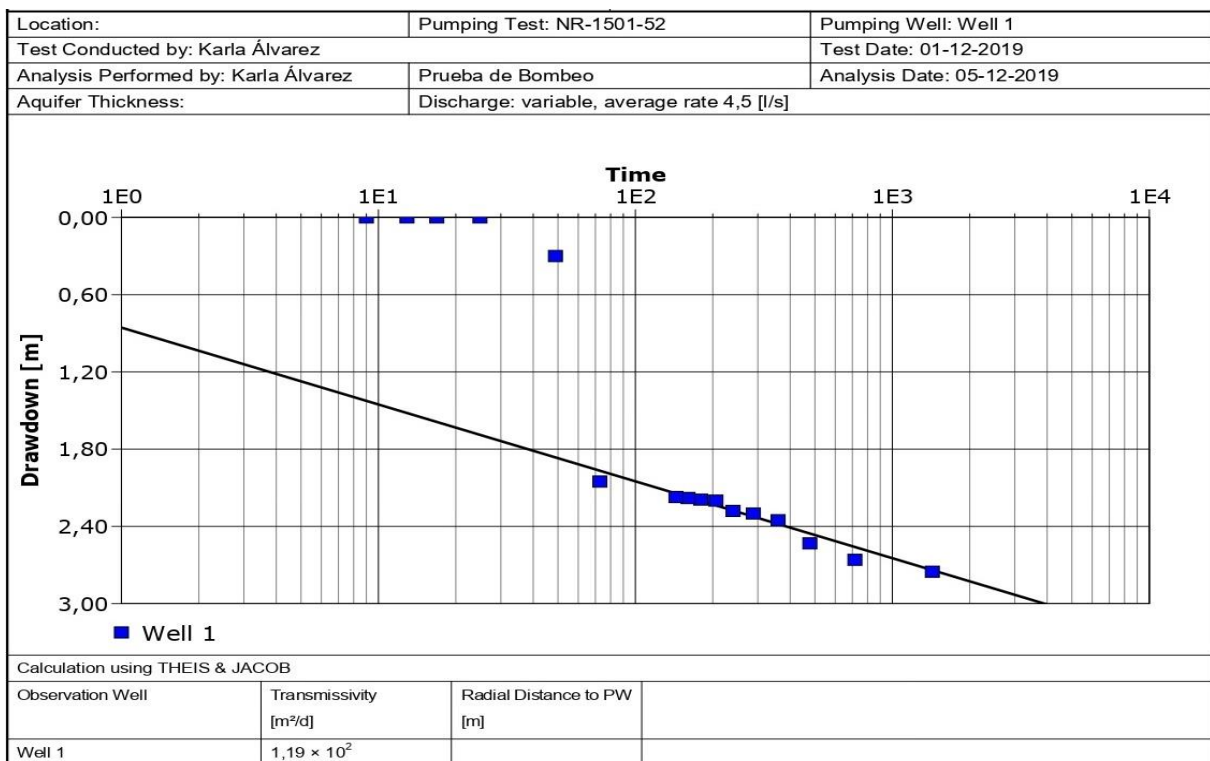


Figura 11.5.4 Prueba de Bombeo Expediente N°563.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

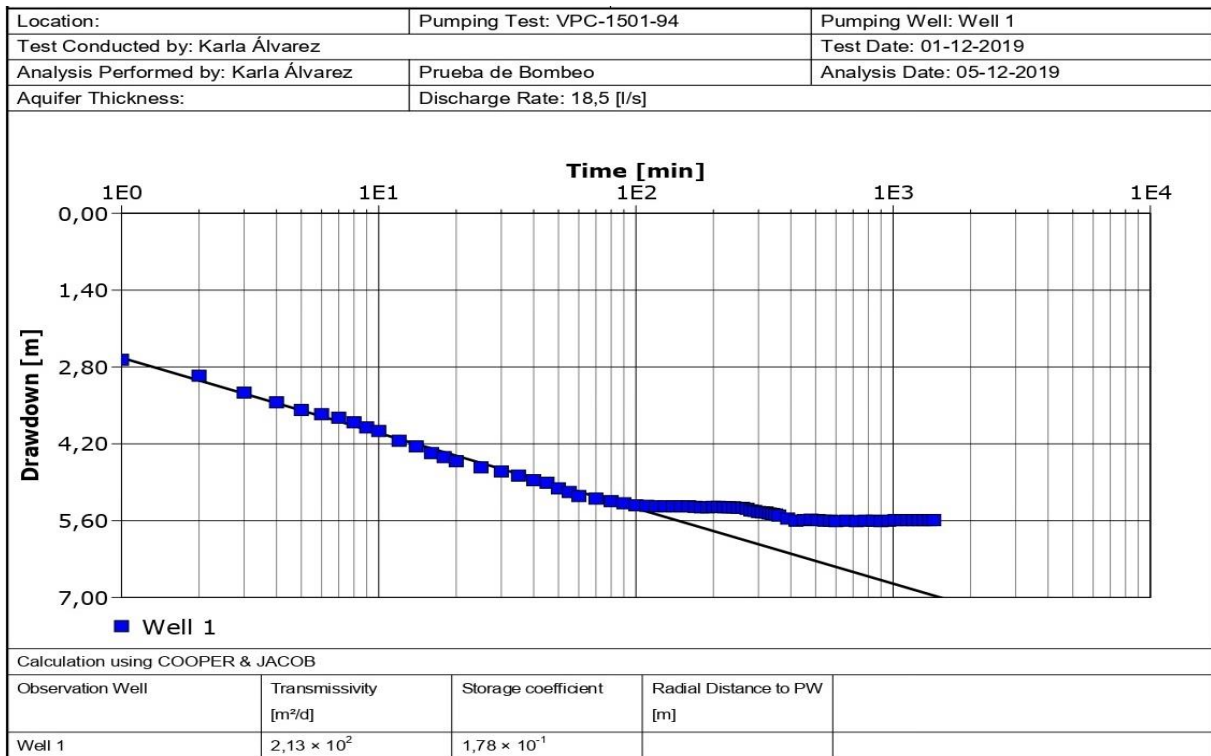


Figura 11.5.5 Prueba de Bombeo Expediente N°649.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

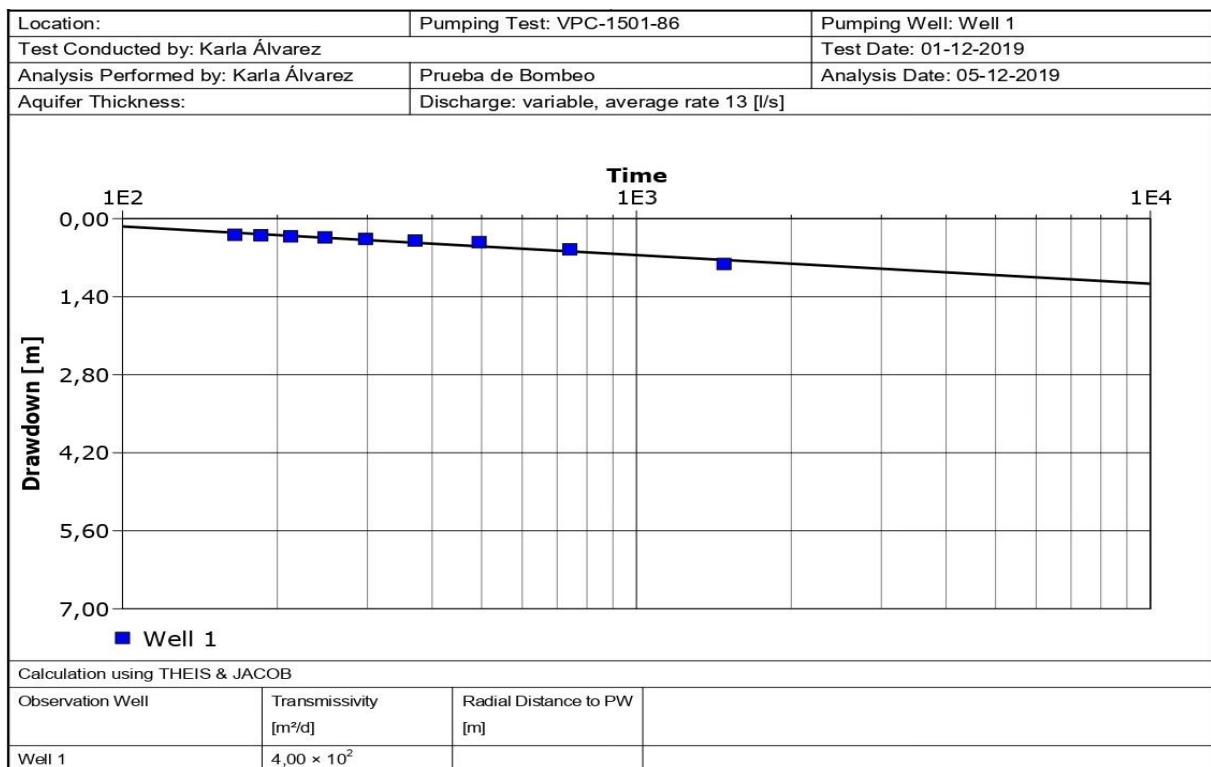


Figura 11.5.6 Prueba de Bombeo N°742.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

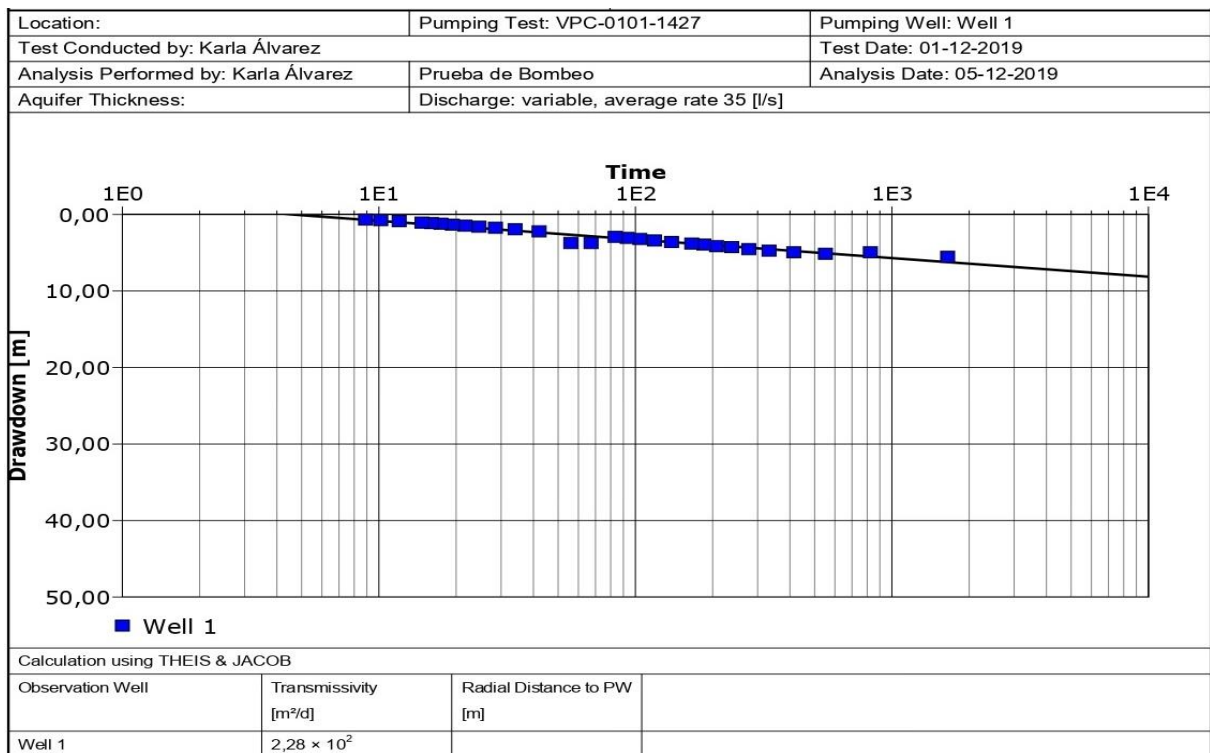


Figura 11.5.7 Prueba de bombeo N°886.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

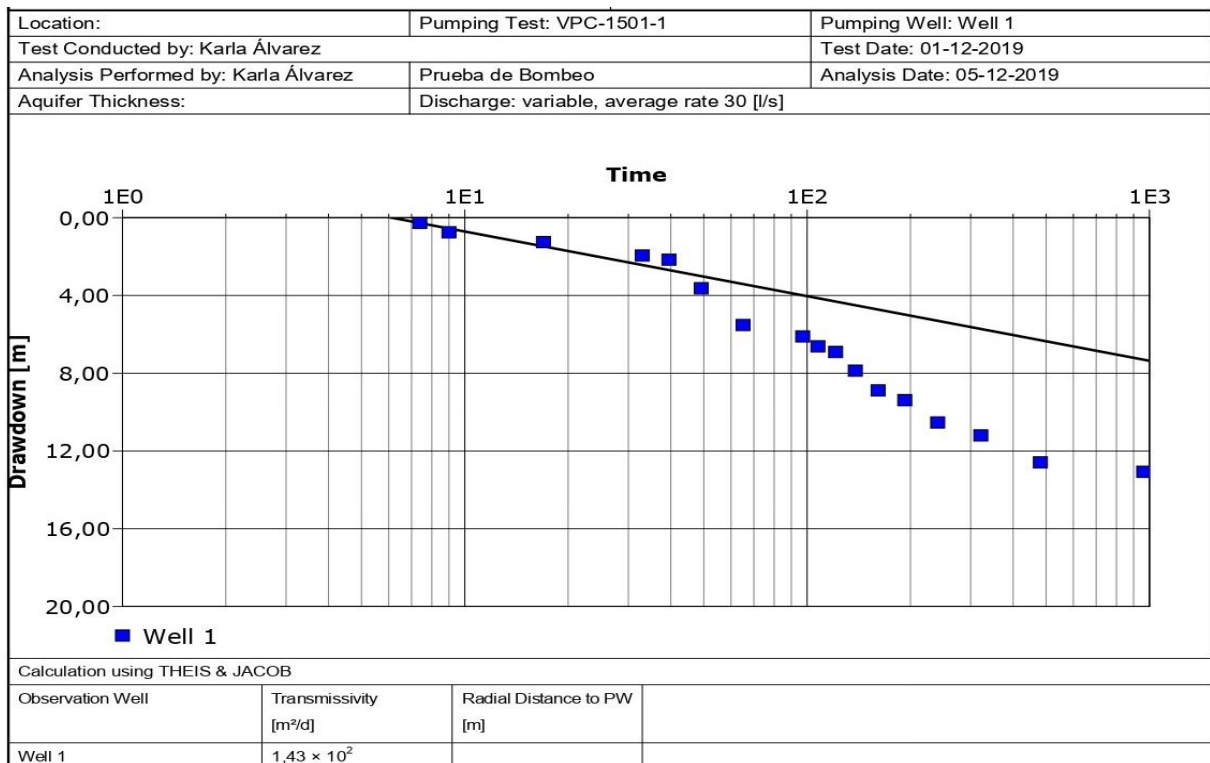


Figura 11.5.8 Prueba de Bombeo N°919.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

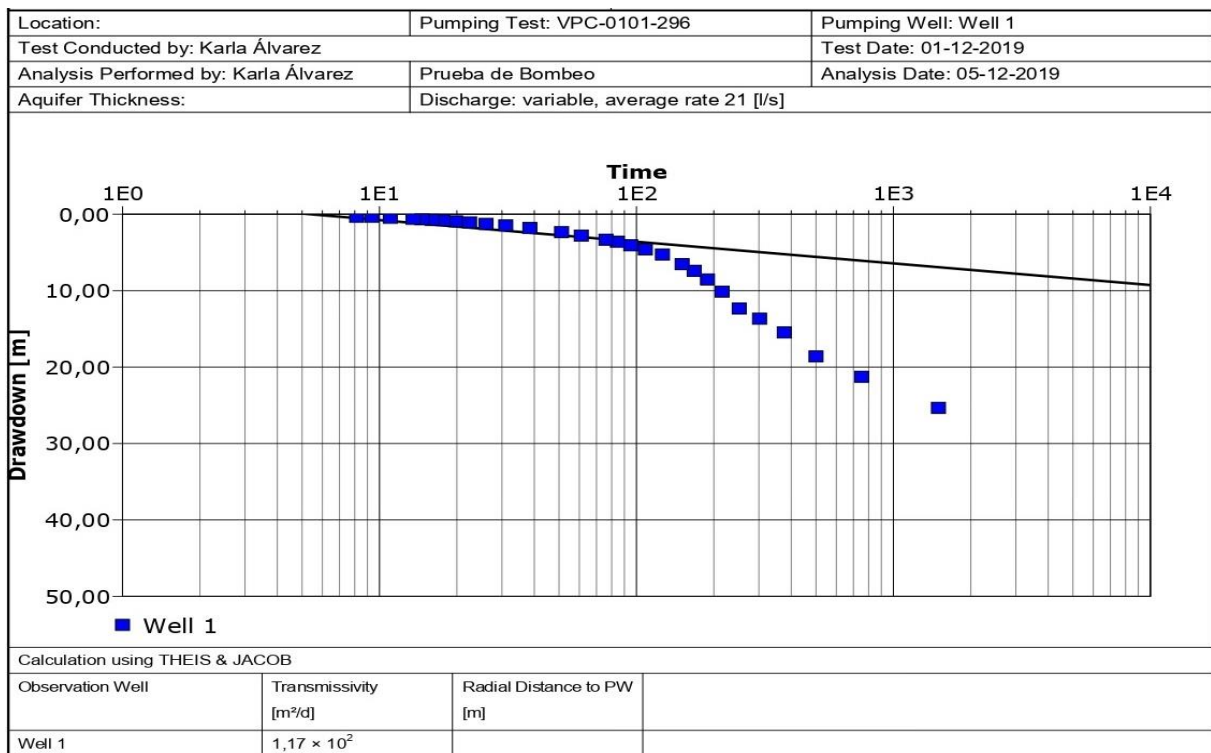


Figura 11.5.9 Prueba de Bombeo N°1420.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

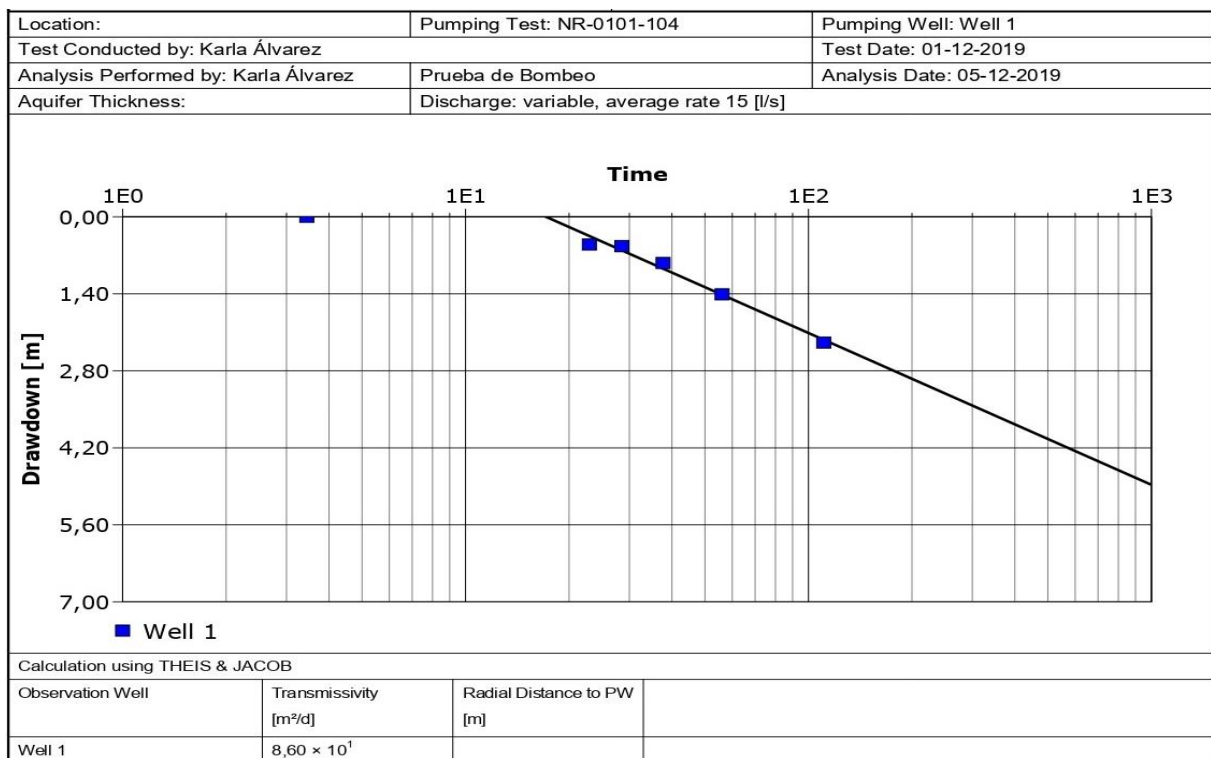


Figura 11.5.10 Prueba de bombeo N°1595.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

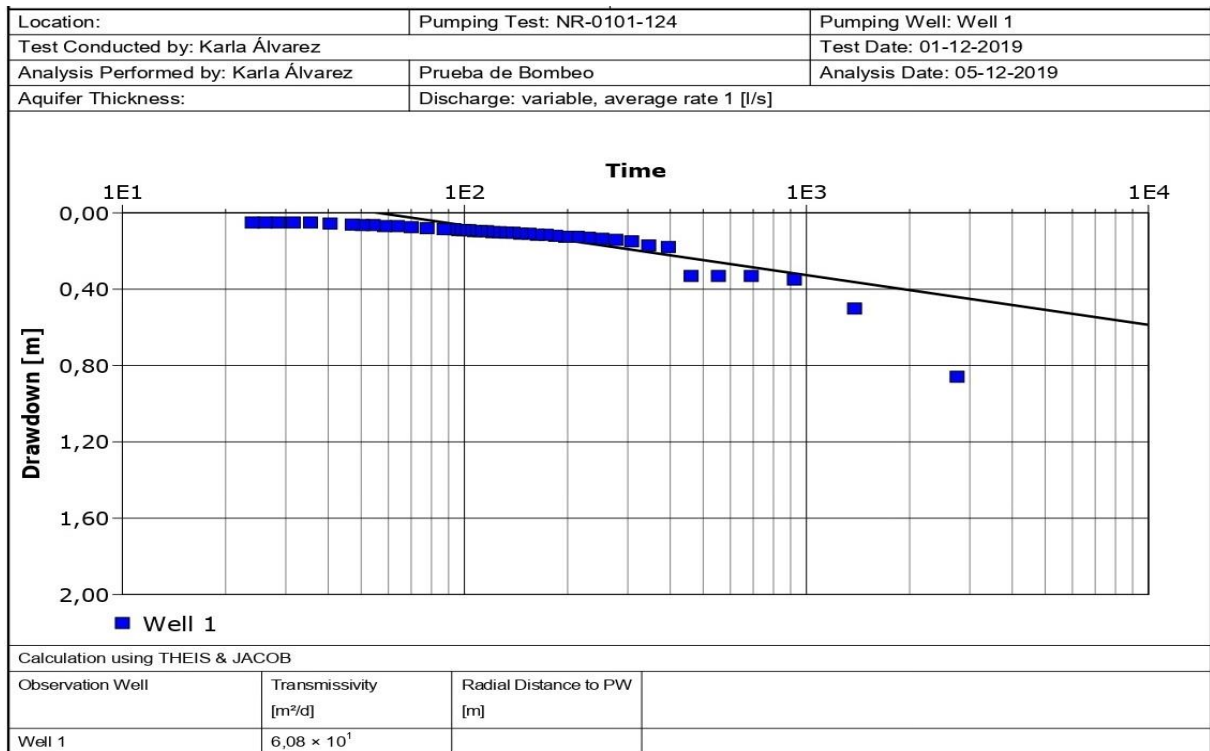


Figura 11.5.11 Prueba de Bombeo N°1596.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

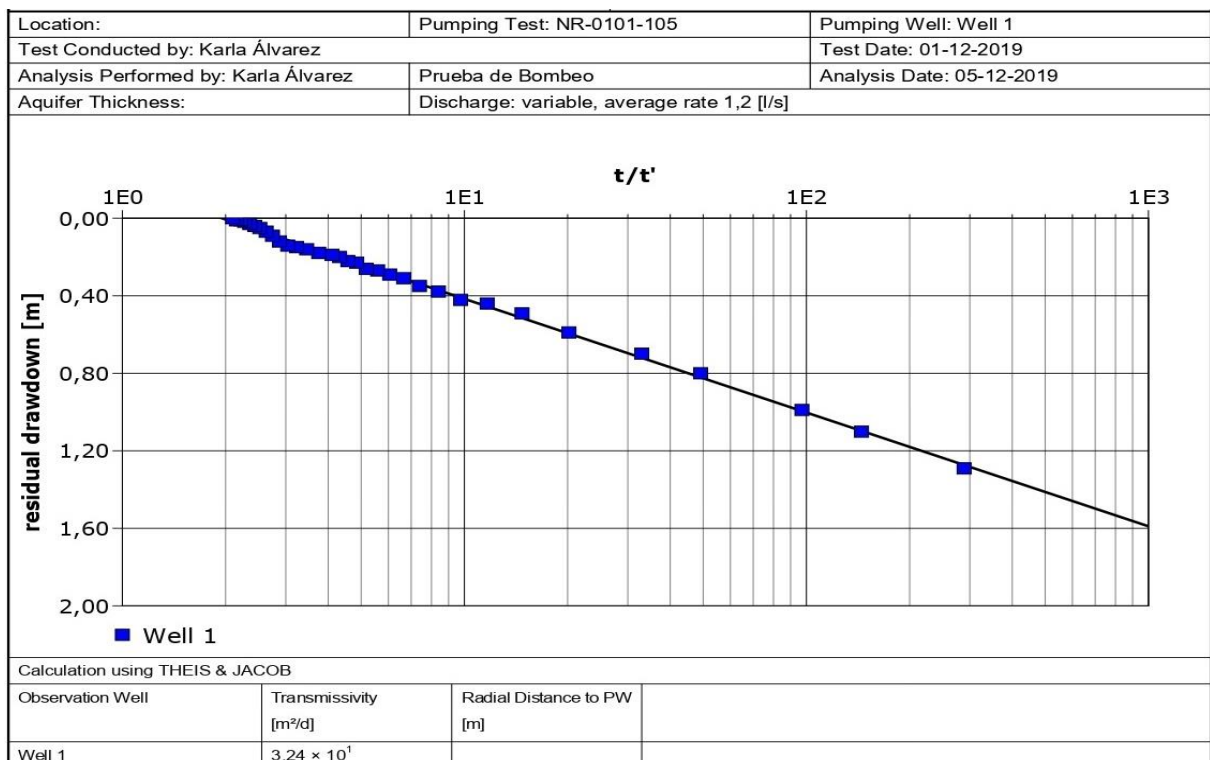


Figura 11.5.12 Prueba de Bombeo N°1599.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

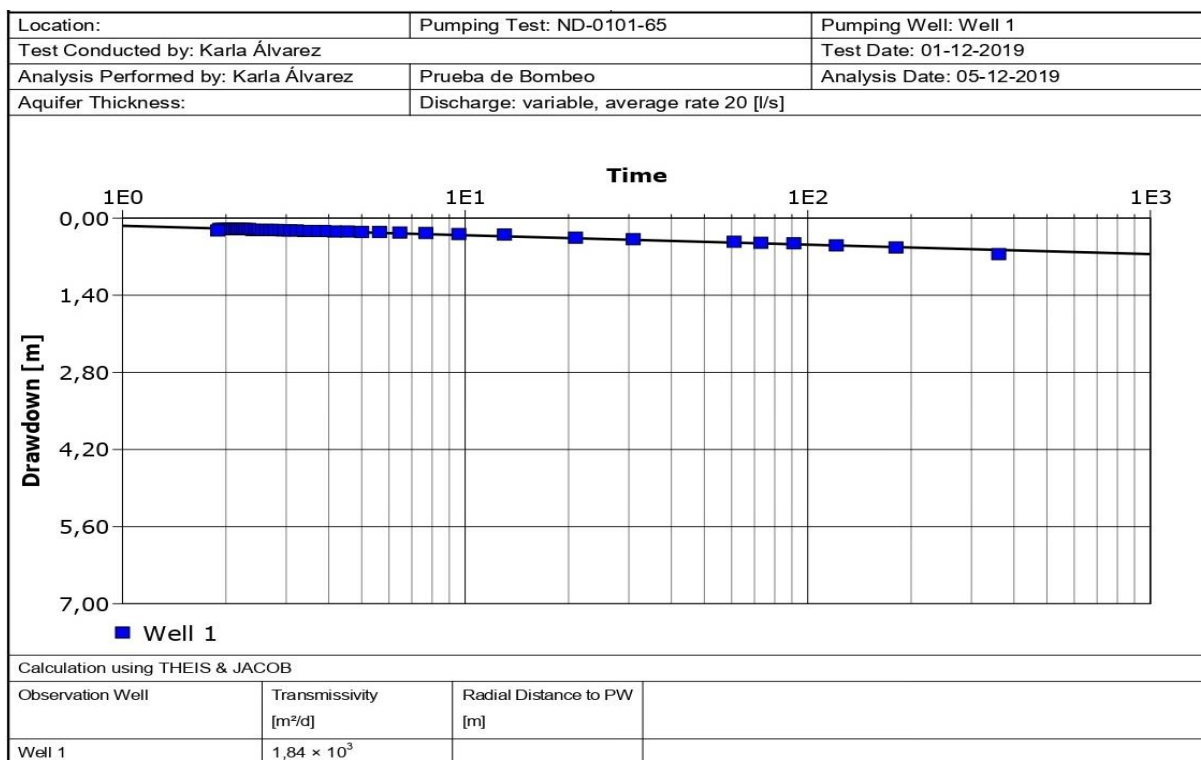


Figura 11.5.13 Prueba de Bombeo N<sup>a</sup>1960.

Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de expedientes de la DGA.

## 11.6 Anexo VI: Nivel Freático

### 11.6.1 Monitoreo de nivel freático en la Cuenca del Río San José

Tabla 11.6.1 Estaciones de monitoreo de nivel freático en la cuenca.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

Estación	UTM X	UTM Y
Algodonal	366537	7958613
Avenida Gonzalo Cerda	362294	7957108
Avenida Loa	362441	7957047
Avenida Tarapacá	365363	7958605
Avícola Donoso	372403	7954442
Barrio Industrial	371513	7955911
Cabuza 1A	385400	7943981
Cabuza 2B	392382	7953397
Cabuza 3F	381915	7938733
Casino Arica	363594	7959822
Cementerio Arica	364199	7957367
Chungal Santa Pabla	387387	7955059
Cinco Olivos	371846	7954346
Cinco Olivos 2	372431	7954657

Colonia Juan Noe (Museo)	375954	7954066
Colonia Juan Nof	376636	7948383
Escuela G-9	375666	7953234
Facundo Gutierrez	393560	7952451
La Verbena	362288	7957815
Las Ánimas 2	371887	7948229
Las Dunas	371190	7955879
Las Maitas	374821	7947910
Las Maitas L Violetas	375111	7948527
Los Duendes	367731	7955547
Loteo Algodonal	372960	7954415
Pago Gomez	368891	7953342
Pago Gomez San Elías 2	374217	7950673
Parcela 1 Algodonal	374183	7955745
Pozo Gomez Las Vargas	374197	7953685
Quebrada Acha	367825	7958930
Quebrada Acha 2	361994	7957966
Quebrada Acha 3	361560	7957102
San Juan Ocurica	367835	7953335
Saucache	362570	7959507
Vidriería Argentina	362430	7958584

### 11.6.2 Monitoreo de nivel freático en el Acuífero de Azapa

Tabla 11.6.2 Estaciones de monitoreo de nivel freático en el acuífero.

Fuente: Elaboración propia con información extraída de la base de datos de la DGA.

<b>Estación</b>	<b>UTM X</b>	<b>UTM Y</b>
Centella (San Miguel de Azapa)	388452	7948425
Cerro Moreno	390373	7945854
Escuela Chitita N°28	388683	7945925
Hotel El Paso	361195	7956569
Las Ánimas	371293	7953697
Las Riveras de Madrid	377139	7950644
Las Vargas	368453	7953168
Pago Gomez San Elías	375086	7952216
Pascual Roco	379333	7949600
Santa Irene Sur	377336	7950918

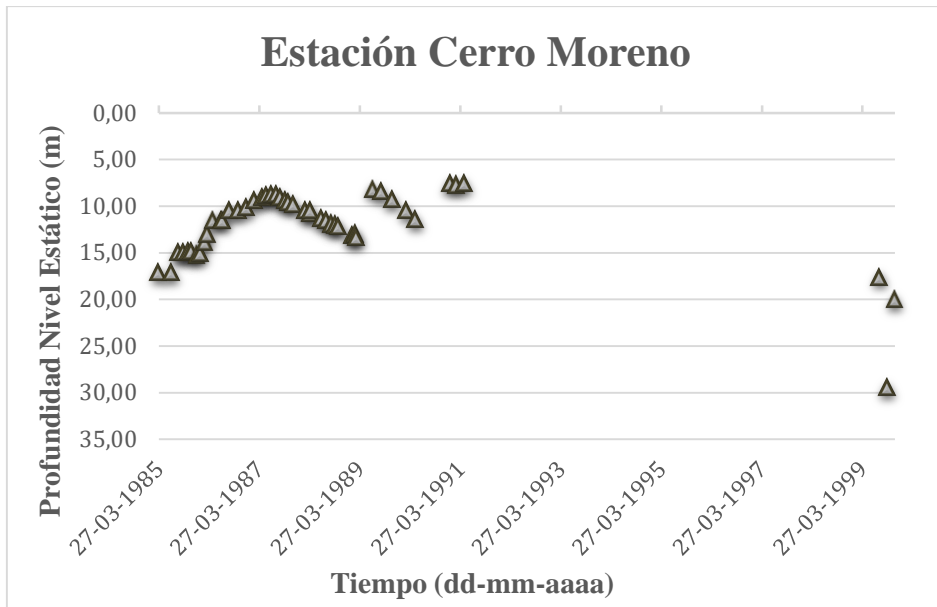


Figura 11.6.1 Variación de los niveles estáticos en estación Cerro Moreno.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

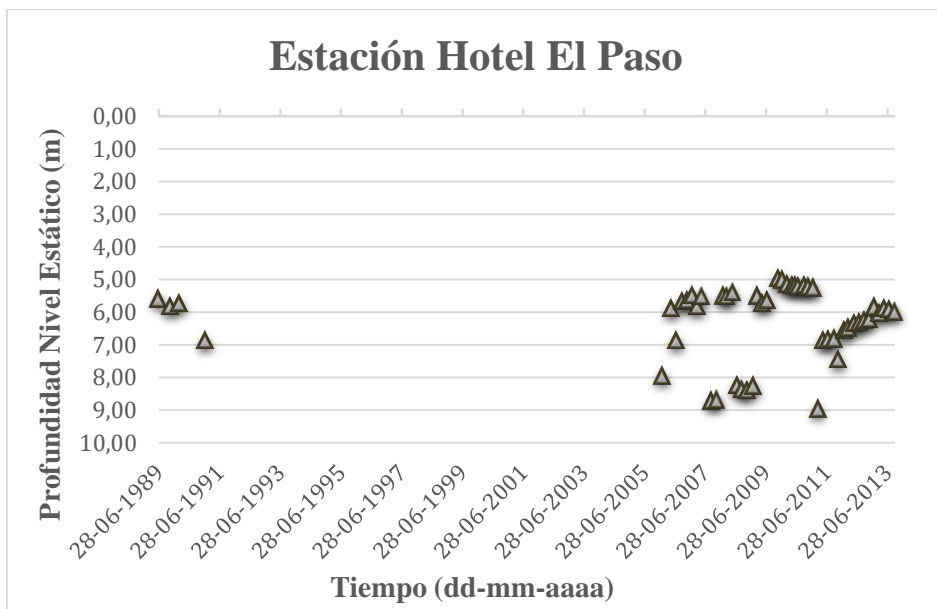


Figura 11.6.2 Variación de los niveles estáticos en estación Hotel El Paso.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.



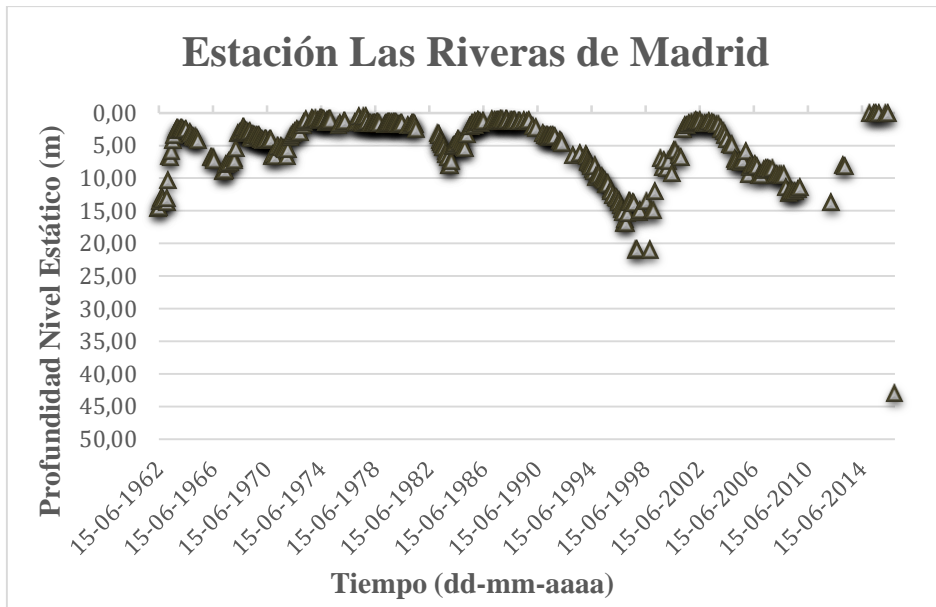


Figura 11.6.3 Variación de los niveles estáticos en estación Las Riveras de Madrid.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

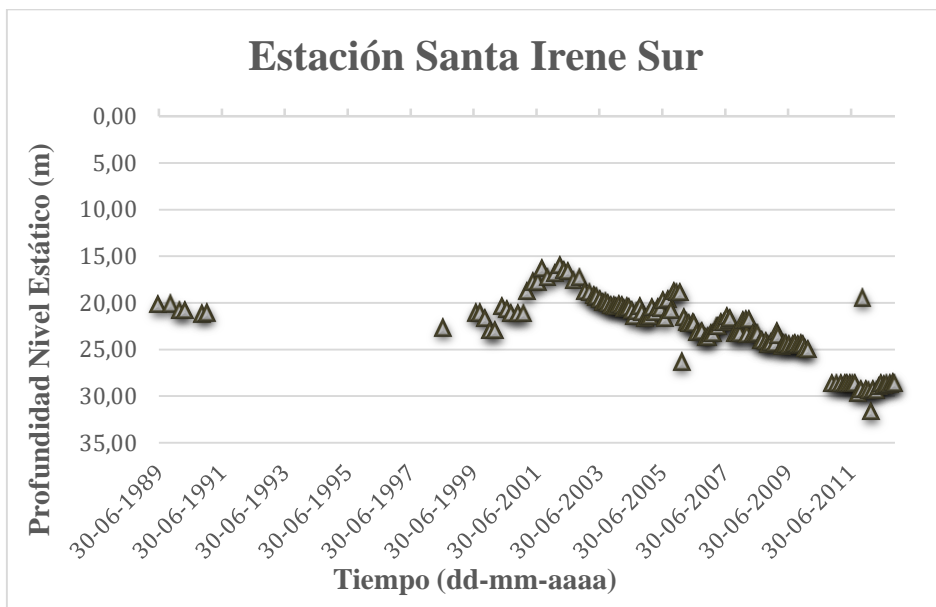


Figura 11.6.4 Variación de los niveles estáticos en estación Santa Irene Sur.  
Fuente: Elaboración propia con información extraída de las base de datos de la DGA.

