



**ESTUDIO BÁSICO  
“ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PILOTO  
DE RECARGA ARTIFICIAL 3 SECCIÓN  
ACONCAGUA”**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**Santiago, agosto de 2015**



## COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO

### ESTUDIO BÁSICO “ANÁLISIS ALTERNATIVAS PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL 3 SECCIÓN ACONCAGUA”

N° 2015-027

### RESUMEN EJECUTIVO

Rev.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	Descripción
A	Nombre Firma	A. Palacios	N. Ramírez	C. Ortiz	Revisión y Aprobación Cliente
	Fecha	13.08.15	13.08.15	13.08.15	

# ESTUDIO BÁSICO “ANÁLISIS ALTERNATIVAS PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL 3 SECCIÓN ACONCAGUA”

## RESUMEN EJECUTIVO

### ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
1.1	OBJETIVOS.....	7
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.3	ÁREA DE ESTUDIO.....	8
<b>2</b>	<b>METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y FUENTES DE RECARGA A NIVEL DE CUENCA.....</b>	<b>11</b>
3.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA.....	11
3.2	METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA ARTIFICIAL.....	12
<b>3.2.1</b>	<b>Fase I.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Fase II.....</b>	<b>12</b>
3.3	APLICACIÓN DE METODOLOGÍA EN ÁREA DE ESTUDIO.....	13
<b>4</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA Y SELECCIÓN DE SITIO.....</b>	<b>15</b>
4.1	RESULTADOS.....	15
<b>4.1.1</b>	<b>Sector Pochay.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Sector La Palma.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Sector Los Nogales.....</b>	<b>16</b>
4.2	MEDICIÓN DE CALIDAD DE AGUAS.....	17
<b>4.2.1</b>	<b>Resultados de análisis de laboratorio.....</b>	<b>17</b>
4.3	SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL .....	20
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS LEGAL.....</b>	<b>22</b>
5.1	ANÁLISIS LEGAL Y AUTORIZACIONES.....	22
5.2	CONVENIO DE COLABORACIÓN.....	23
<b>6</b>	<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL.....</b>	<b>23</b>

---

6.1	PERFORACIÓN DE POZOS .....	26
6.2	MEDICIÓN DE VARIABLES .....	27
6.3	COSTOS.....	27
<b>7</b>	<b>DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO.....</b>	<b>30</b>
7.1	OPERACIÓN DEL SISTEMA PPRAA .....	31
7.1.1	<b>Calidad química .....</b>	<b>34</b>
7.2	ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA .....	34
7.2.1	<b>Modelo conceptual local.....</b>	<b>36</b>
7.3	EFFECTO PROYECTADO EN LOS NIVELES DEL ACUÍFERO DE LA TERCERA SECCIÓN DEL RÍO ACONCAGUA.....	40
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>41</b>
8.1	CONCLUSIONES .....	41
8.2	RECOMENDACIONES .....	43
<b>9</b>	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS.....</b>	<b>44</b>

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1: Evaluación de los sitios (Fase II).....	14
Tabla 4-1: Resumen de análisis de parámetros más relevantes para recarga artificial .....	18
Tabla 4-2: Resumen y análisis de sitios preseleccionados para desarrollo del PPRAA .....	21
Tabla 6-1: Cuadro resumen de medición de variables. ....	29
Tabla 7-1: Resumen parámetros elásticos definidos a través de distintas metodologías .....	30

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Ubicación área de estudio .....	8
Figura 2-1: Metodología general de trabajo .....	10
Figura 3-1: Propuesta sitios potenciales para un PPRAA en tercera sección Aconcagua ....	13
Figura 6-1: Vista en planta del diseño del sistema de infiltración .....	25
Figura 6-2: Diagrama de ubicación equipos de medición.....	28
Figura 7-1: Profundidad de Napa en ensayos y prueba de Infiltración en Pozo AC-02 (observación).....	32
Figura 7-2: Presión en tubería de carga en ensayos y prueba de Infiltración en Pozo AC-01 (infiltración).....	33
Figura 7-3: Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA .....	38
Figura 7-4: Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA .....	39

## 1 INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas hoy en día juegan un rol fundamental en el abastecimiento de nuevas demandas por recursos hídricos para el desarrollo agrícola, debido principalmente al problema de abastecimiento superficial y subterráneo. Este recurso tiene una recarga natural restringida, relacionada con la estacionalidad del agua superficial. Debido a lo anterior, es deseable analizar la recarga artificial de acuíferos en cuencas con potencial agroeconómico, y estudiarla como una alternativa factible a los embalses superficiales construidos para riego. La recarga artificial no es una técnica nueva a nivel mundial, aunque si es una tecnología de reciente aplicación en Chile. En efecto en países como Estados Unidos, Israel, España y Australia esta técnica es utilizada desde hace varios años como herramienta de gestión hídrica.

La provincia de Quillota se declaró como zona de escasez hídrica por la DGA con vigencia desde el 14 de octubre del 2013. Por este motivo la Comisión Nacional de Riego (CNR) considera relevante profundizar el conocimiento del sistema subterráneo, para la identificación de sitios potenciales de recarga y el desarrollo de pruebas técnicas.

En este contexto, la CNR encargó a GeoHidrología Consultores Ltda. (GeoH) desarrollar un estudio de recarga artificial del acuífero en la tercera sección del río Aconcagua, en la provincia de Quillota, región de Valparaíso. Este estudio de recarga artificial incluye la evaluación de posibles zonas y métodos de infiltración, junto a la implementación de un proyecto piloto y el análisis de resultados en la subcuenca Aconcagua Bajo.

El estudio contempló el levantamiento de información hidrogeológica relevante, tanto en terreno como en gabinete. A partir de los antecedentes recopilados en gabinete se desarrolló una metodología para evaluar la aptitud de sectores ubicados dentro de la cuenca, con miras a seleccionar el mejor sitio para realizar recarga artificial. La aplicación de la metodología junto con un análisis estratégico sostenido en conversaciones y reuniones con la CNR dio como resultado el sector de la Palma para el emplazamiento del proyecto.

Luego de la realización de trabajos preliminares en terreno preliminares, se perforó un pozo de infiltración y uno de observación, a partir de los cuales se obtuvo información estratigráfica local, con la cual se mejoró el pre-diseño del sistema. Además, se desarrollaron pruebas de bombeo e infiltración, con lo que se determinaron los parámetros elásticos del acuífero.

Con la información obtenida se implementó un Proyecto Piloto de Recarga Artificial de Acuífero (PPRAA) en base a un pozo de infiltración, el cual se compone en su globalidad de: 1) captación, 2) un canal de aducción, 3) un dispositivo de medición, compuesto por un cajón aforador y una cámara de carga, 4) tubería de conducción, 5) un pozo de infiltración y 6) un pozo de observación.

El plan de monitoreo del sistema contempló el seguimiento continuo de caudal de infiltración y turbiedad, a través de un sistema telemétrico. El seguimiento de los niveles del acuífero fue de manera continua, no obstante el rescate de datos se realizó de manera puntual. Adicionalmente se monitoreó la química del agua superficial y del acuífero, obteniendo datos

para determinar su línea base y evaluar el efecto de la recarga sobre la calidad química del acuífero durante la ejecución del proyecto.

Con respecto a la operación del PPRAA, los resultados de las pruebas en general fueron satisfactorios desde el punto de vista del desarrollo general del proyecto, ya que se cumplió con sus objetivos generales y específicos. No obstante, los caudales infiltrados en el sitio fueron bajos respecto a lo esperado y a los costos de implementación de un sistema de recarga artificial. En particular se realizaron una serie de experiencias de infiltración, con caudales variables entre 0,25 L/s y 1 L/s, los que permitieron definir la capacidad de infiltración y el impacto proyectado a los niveles estáticos del acuífero en estudio.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general es desarrollar un estudio para la recarga artificial del acuífero en la 3<sup>o</sup> Sección del Aconcagua, proponiendo una metodología para identificar las posibles zonas de recarga y realizar un Proyecto Piloto de Recarga Artificial de sus Acuíferos (PPRAA).

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, este estudio busca:

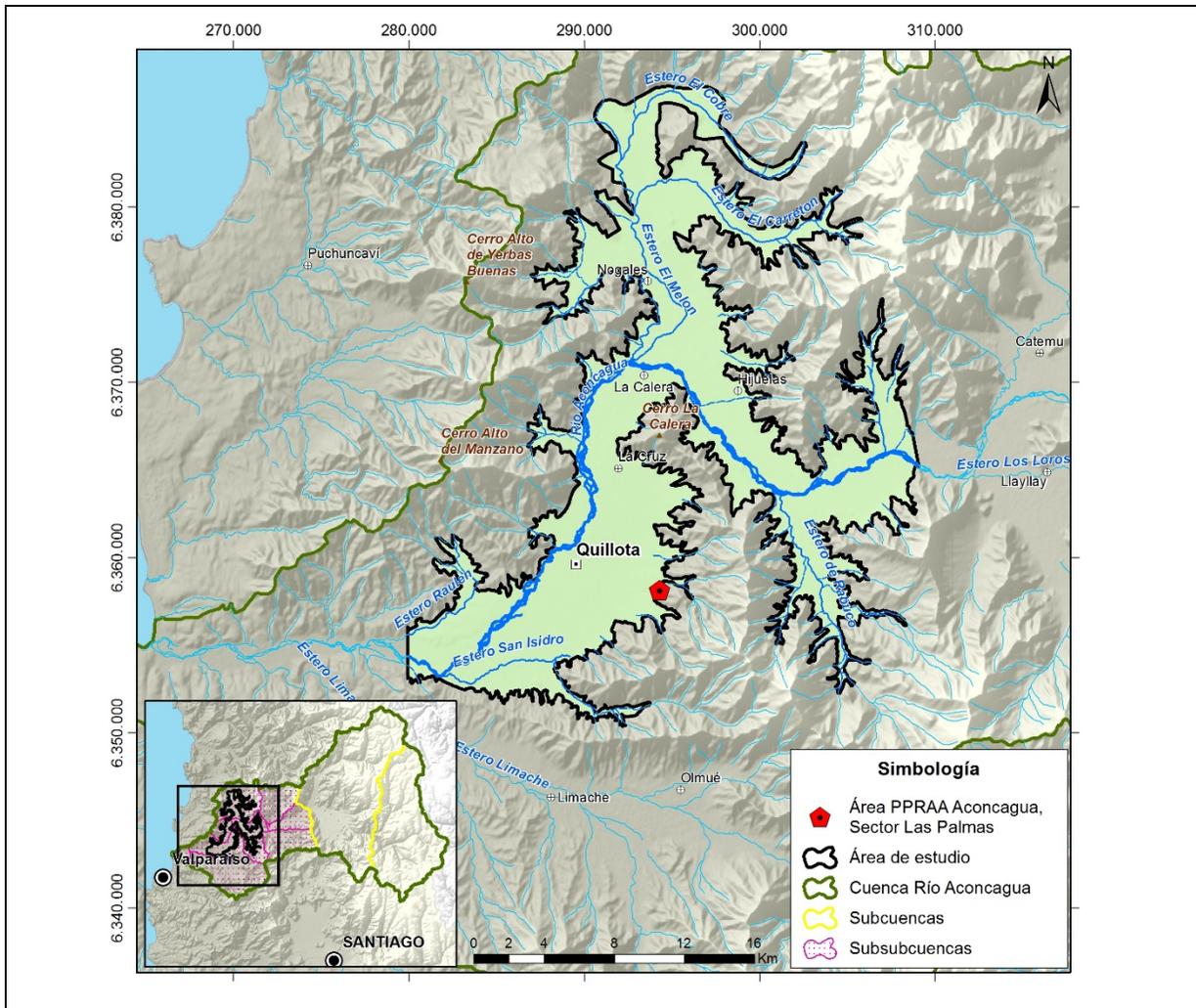
- a) Analizar la información topográfica, geomorfológica, edafológica, geológica, hidrológica e hidrogeológica existente para la identificación de sitios de emplazamiento para un PPRAA.
- b) Identificar la disponibilidad de aguas superficiales para las pruebas de recarga del piloto y estudiar la viabilidad legal de su utilización.
- c) Determinar la compatibilidad de la calidad del agua superficial a recargar con la del acuífero receptor.
- d) Identificar zonas potenciales de recarga y seleccionar el sitio para el PPRAA.
- e) Definir la metodología a utilizar en el PPRAA de acuerdo con las condiciones hidrogeológicas existentes.
- f) Determinar las constantes elásticas del acuífero a recargar.
- g) Diseñar las obras hidráulicas necesarias para el desarrollo del PPRAA.
- h) Registrar las fluctuaciones del nivel estático (N.E.) del acuífero en forma continua durante 1 mes previo al inicio de las experiencias de recarga artificial.
- i) Realizar las experiencias en el PPRAA.
- j) Determinar las tasas de infiltración en el PPRAA.
- k) Evaluar el impacto proyectado a los niveles estáticos del acuífero en estudio.
- l) Generar conclusiones y recomendaciones para un eventual Proyecto de Recarga Artificial de mayor escala en la zona.

### 1.3 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la Tercera Sección del río Aconcagua, que se ubica dentro de la cuenca del río Aconcagua, en la subcuenca Aconcagua Bajo, específicamente en las sub-subcuencas definidas por la Dirección General de Aguas (DGA): Estero El Cobre (norte), Río Aconcagua Entre Estero Los Loros y Estero El Cobre (este), Río Aconcagua Entre Estero El Cobre y Bajo Quebrada El Ajo (oeste) y Río Aconcagua Entre Quebrada El Ajo y Estero Limache (sur) (Figura 1-1), comprendiendo una superficie total de 351 km<sup>2</sup>. Algunas ciudades que se encuentran dentro del área de estudio son La Calera, Hijuelas, La Cruz y Quillota (Figura 1-1).

Desde el punto de vista administrativo el área de estudio se ubica en la Quinta Región, provincia de Quillota.

**Figura 1-1: Ubicación área de estudio**



Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA (Datum WGS84, H19S)

## 2 METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

El estudio Proyecto Piloto Recarga Artificial del acuífero de la Tercera Sección del río Aconcagua fue realizado en 4 etapas, según lo indicado en los términos de referencia de la CNR. Las etapas siguen un orden cronológico y son acordes a la metodología de trabajo desarrollados por GeoHidrología.

La metodología de trabajo se presenta a continuación, separado por etapas. En la Figura 2-1 se presenta un diagrama, el cual explica de manera gráfica las principales actividades desarrolladas y presenta las entradas y salidas de información correspondiente.

### 1. Etapa 1:

- Revisión y Análisis de Antecedentes: Recopilación y análisis de información de antecedentes hidrogeológicos del área de estudio.
- Metodología Identificación Zonas de Recarga: Desarrollo de una metodología que definió las zonas de mejor potencial para realizar recarga artificial de acuíferos.
- Sitios Potenciales: Identificación de potenciales sitios y fuentes de recarga para realizar el proyecto. Realización de trabajos en terreno para verificar *in situ* la idoneidad de los sitios preseleccionados.
- Análisis legal. Se generó convenio entre la CNR y los dueños de terreno y agua para entregar en comodato el terreno y derechos de agua respectivamente.

### 2. Etapa 2:

- Selección de Sitio:
  - Selección del mejor sitio, basado en los análisis, caracterizaciones y resultados obtenidos en la etapa 1 y datos adicionales relacionados a calidad química de las aguas superficiales y subterráneas del sitio seleccionado.
  - Firma de convenio entre la CNR y los dueños de terreno y agua para entregar en comodato el terreno y derechos de agua respectivamente.
- Pre-diseño PPRAA:
  - Desarrollo de metodologías de pruebas de bombeo e infiltración para determinación de constantes elásticas del acuífero.
  - Pre-diseño de obras de infiltración (balsas de infiltración o pozos de inyección y obras hidráulicas) en base a revisión de antecedentes y trabajos en terreno.
  - Metodología para la recarga artificial del sistema: contempla las pruebas a realizar durante la operación del proyecto.

### 3. Etapa 3:

- Perforación de pozos: La construcción comenzó con la perforación de los pozos y con el análisis estratigráfico local. Además se hicieron pruebas de bombeo y de infiltración para determinar las constantes elásticas del acuífero.
- Re-diseño PPRAA: Con la información obtenida se introdujeron cambios al pre-diseño de las obras del proyecto, buscando aumentar la capacidad de infiltración del sistema.
- Construcción de obras: Construcción de obras hidráulicas del sistema de infiltración, tales como: obra de captación, canal de aducción, sistema de medición (cajón aforador y cámara de carga), tubería de conducción, un pozo de

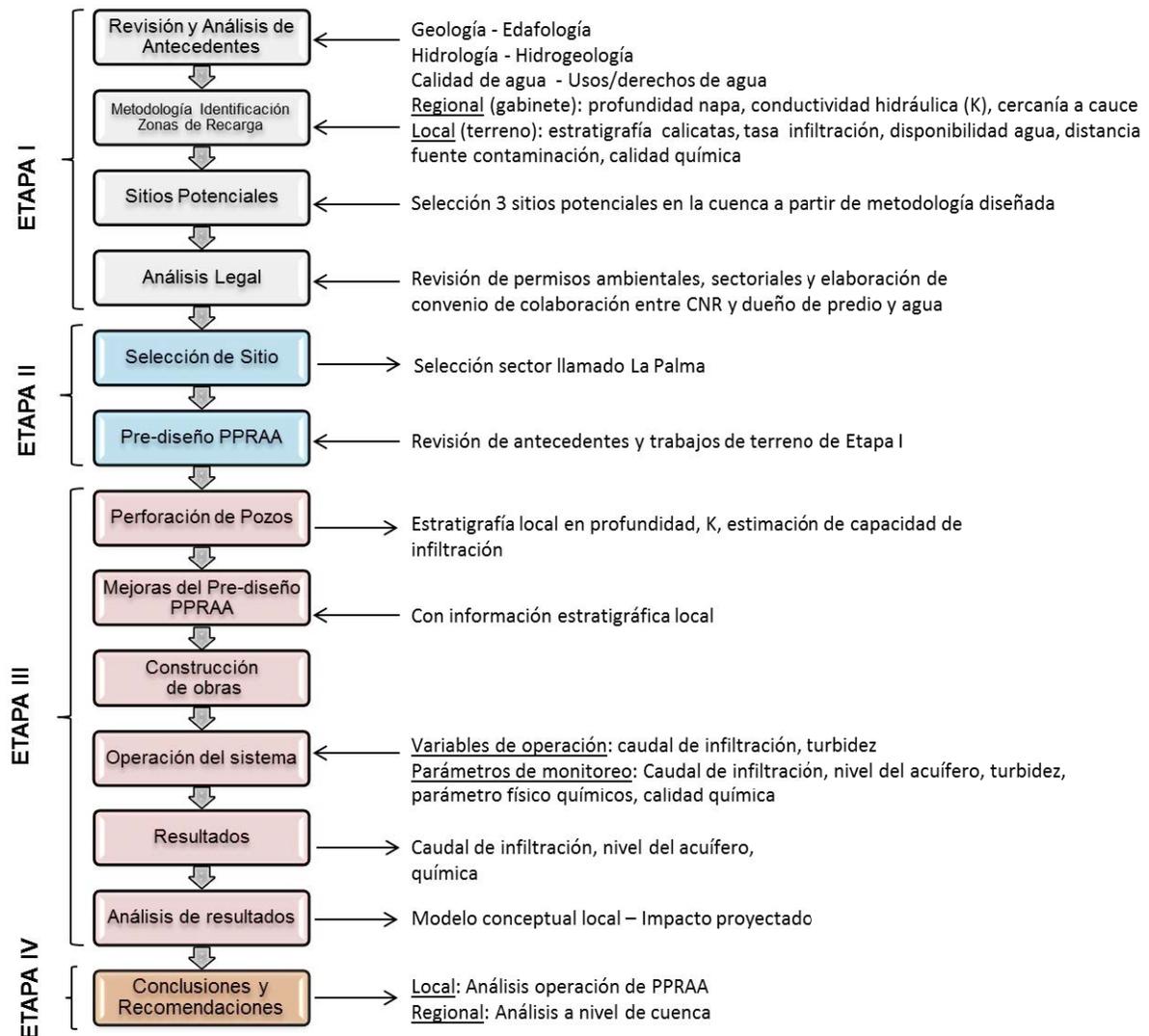
infiltración y un pozo de observación. Instalación de equipos de instrumentación del sistema (transductores de presión, turbidímetro).

- Operación del sistema: Realización de pruebas de infiltración.
- Resultados: Registro de datos de las pruebas realizadas.
- Análisis de resultados: Análisis integrado de caudal infiltrado e impacto en los niveles del acuífero en estudio. Determinación de las tasas de infiltración en el PPRAA.

4. Etapa 4:

- Conclusiones y Recomendaciones: Generación de conclusiones y recomendaciones generales del estudio, a nivel local y de cuenca. Configuración final del trabajo realizado.

**Figura 2-1: Metodología general de trabajo**



### **3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y FUENTES DE RECARGA A NIVEL DE CUENCA**

#### **3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA**

Se presenta en este capítulo un resumen de la recopilación y análisis de los antecedentes técnicos que fueron utilizados para la confección de este estudio. Se realizó una revisión de los antecedentes correspondientes a la caracterización de la cuenca, los que contienen antecedentes de unidades morfológicas (geomorfología) y geología regional, edafología, hidrología, hidrogeología, calidad de aguas superficiales y subterráneas y usos o derechos de aprovechamiento de aguas.

La información más relevante desde el punto de vista de un proyecto de recarga artificial corresponde a: a) la morfología y geología superficial, que permite identificar los límites del acuífero en el caso que correspondan a acuíferos compuesto de rellenos sedimentarios; b) la hidrogeología, especialmente la información de la profundidad del acuífero, que permite identificar la potencialidad de almacenamiento del acuífero, la piezometría que permite describir escurrimiento del agua subterránea en términos de su sentido y magnitud, los parámetros hidráulicos del acuífero, que permiten determinar el tiempo de residencia del agua infiltrada en el acuífero y también la capacidad de almacenamiento; y c) la calidad del agua, ya que permite estimar el potencial impacto de la calidad del agua sobre el acuífero y establecer una línea base para evaluar los efectos. Menos relevante resulta la información hidrológica, siendo la información de la ubicación y características de los cauces superficiales y su relación con el acuífero lo que más importancia tiene. La información edafológica no tiene relevancia práctica respecto de este tipo de proyectos.

Respecto de la información relevante se pudo verificar que los antecedentes recopilados entregan una buena aproximación a la estratigrafía regional del área de estudio. La geología subsuperficial está bien caracterizada por dos perfiles geológicos descritos en el estudio de Dictuc (2009). Adicionalmente se encuentra caracterizada la profundidad del basamento y el espesor del relleno. Respecto de información de profundidad y nivel de la napa, existe una adecuada representación, en la que se divide el área de estudio en 3 sectores. La caracterización se realizó en base a 22 pozos de monitoreo de la DGA que se encuentran bien distribuidos. Pese a lo anterior, cuando se requiere trabajar a una escala menor, como por ejemplo para diseñar sistemas de infiltración se debe recurrir a información de pozos locales, que en general no cuentan con información estratigráfica ni de construcción del pozo y además depende de la buena voluntad de los dueños y administradores de predios para facilitar el acceso para la toma de datos. La extensión temporal de los niveles es adecuada, se tienen registros desde la década de los 70. Respecto de la información de parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y coeficiente de rendimiento específico), el estudio de Dictuc 2009 presenta una descripción con buen nivel de detalle espacial. Esta descripción está basada en pruebas de bombeo. Considerando que durante el periodo invernal no existe riego, los predios cuya fuente es el río Aconcagua presentan disponibilidad de caudal constante para el desarrollo de pruebas de infiltración durante los meses de invierno.

## 3.2 METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA ARTIFICIAL

Para el desarrollo del proyecto de recarga artificial de acuíferos fue necesario evaluar una serie de variables hidrogeológicas para determinar la capacidad potencial de recarga de un sector. Para ello se generó una metodología dividida en dos fases, éstas son explicadas a continuación:

### 3.2.1 Fase I

La metodología desarrollada se basa en una ponderación simple de variables consideradas relevantes a la hora de evaluar la aptitud de una zona para la recarga artificial de acuíferos. Estas variables pueden ser incorporadas a un formato de Sistema de Información Geográfica (GIS) en las que se puede evaluar espacialmente la aptitud para la infiltración. Las variables consideradas en este estudio son las siguientes:

- i) Conductividad Hidráulica Horizontal ( $V_1$ ): esta variable se refiere a la capacidad del acuífero en la zona estudiada para transportar agua.
- ii) Cercanía y conexión a una fuente o sumidero de agua ( $V_2$ ): ya que los cursos de agua superficiales constituyen fuentes o sumideros de agua en el lugar donde se encuentran.
- iii) Profundidad del nivel freático ( $V_3$ ): esta variable indica la capacidad del acuífero en la zona a evaluar.

Para cada una de estas variables se estableció una escala de valores para cuantificar la aptitud que ella impone sobre la aptitud completa del lugar evaluado. De este modo un valor de 1 indica que la variable dificulta fuertemente el desarrollo de un proyecto de recarga artificial, mientras que un valor de 5 favorece fuertemente el desarrollo de un proyecto de recarga artificial.

### 3.2.2 Fase II

Una vez realizada la primera fase se procedió a la búsqueda de sitios dentro de las áreas de mayor aptitud para proceder a su evaluación, en base a las variables locales. Las variables locales son de tipo binario (positivo o negativo) y son las siguientes:

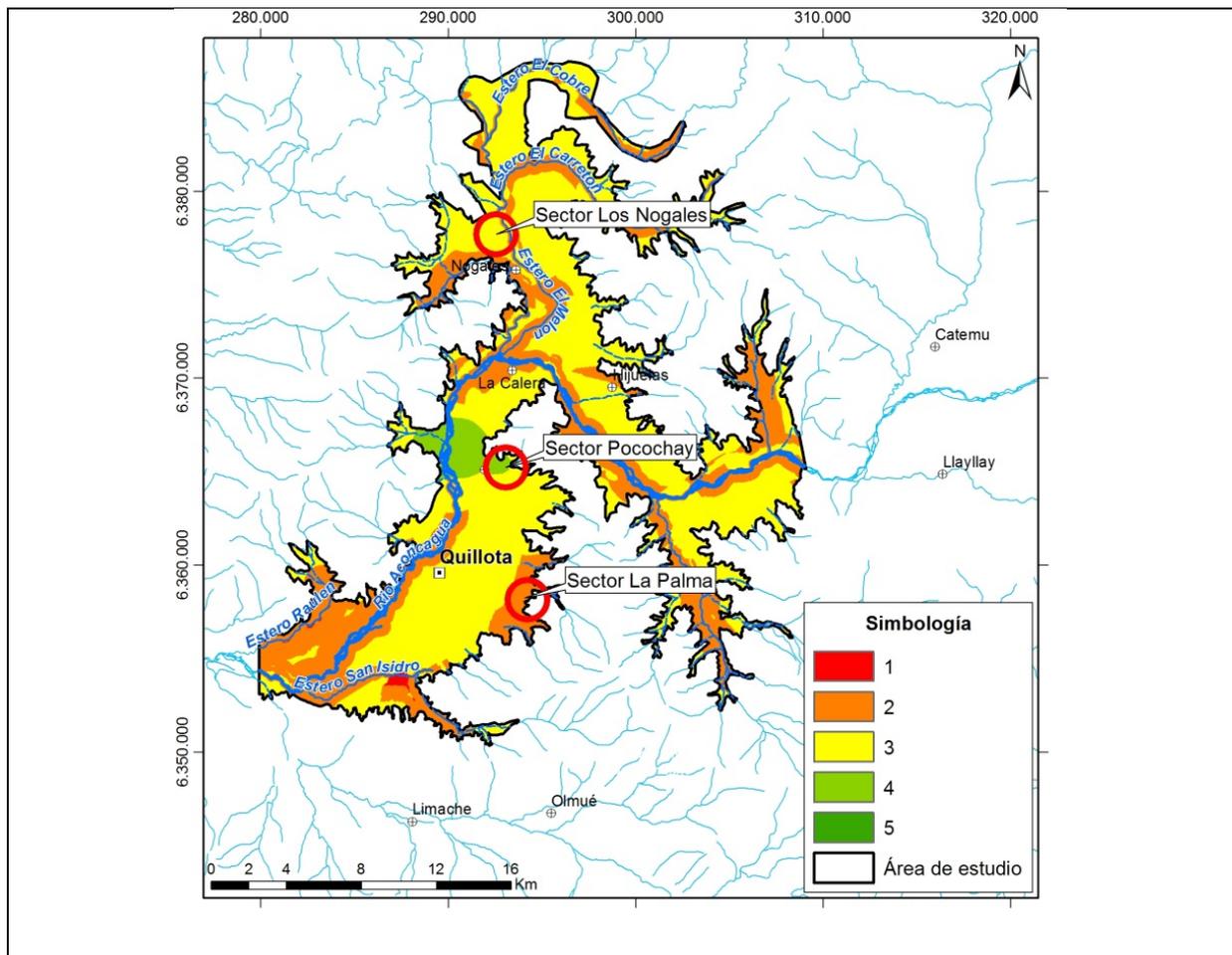
- i) Cercanía a la fuente de agua para realizar la recarga. Se consideró con valor positivo cuando la fuente se encuentre a una distancia menor a 100 m.
- ii) Disponibilidad de terreno para realizar el proyecto de recarga artificial.
- iii) Disponibilidad de derechos de agua sobre la fuente para realizar las pruebas.
- iv) Calidad de agua competente para realizar la recarga artificial.
- v) Lejanía a fuentes de contaminación.

Para que un sitio pueda ser considerado para realizar el proyecto de recarga artificial debe presentar un resultado positivo en la totalidad de las variables consideradas. Esta metodología consideró un análisis de sensibilidad para los ponderadores de cada variable.

### 3.3 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA EN ÁREA DE ESTUDIO

La aplicación de la metodología evaluó en primer lugar la Fase I, para obtener los valores de aptitud dentro del área estudiada según las variables hidrogeológicas. Esto permitió definir el valor de aptitud (VA) dentro del área de estudio. Los resultados se muestran en la Figura 3-1 donde se aprecia que la zona más idónea para un proyecto de recarga artificial corresponde a aquella que presenta un VA alto (4) y que recae en el sector ubicado entre la ciudad de Quillota y La Calera. También se aprecian amplias zonas con un VA medio (3) entre los márgenes del área de estudio y los cauces principales.

**Figura 3-1: Propuesta sitios potenciales para un PPRAA en tercera sección Aconcagua**



Fuente: Elaboración propia

Se realizaron indagaciones en terreno dentro de las zonas del área de estudio con un valor de aptitud mayor o igual a 3 (Verde y amarillo en la Figura 3-1). Estos sectores fueron visitados y se pre-seleccionaron 2 sitios específicos con potencialidad para desarrollar la PPRAA (sector Los Nogales y sector Pocochay). Adicionalmente se agregó el sector La Palma, que fue sugerido por la Junta de Vigilancia de la 3<sup>o</sup> sección del Río Aconcagua. Estos sitios fueron evaluados de acuerdo a la metodología descrita en la sección anterior para la Fase II y a la información recopilada en terreno. A continuación se presenta un cuadro resumen con la evaluación de los sitios Tabla 3-1.

**Tabla 3-1: Evaluación de los sitios (Fase II)**

Sitio (dueño)	Nombre predio	Evaluación				Resultado
		Cercanía a fuente de agua	Disponibilidad		Lejanía a fuente de contaminación	
			Terreno	Derechos		
Rodrigo Bascuñán	Pocochay	1	1	1	1	Apto
UCV	La Palma	1	1	1	1	Apto
Finonor Morales	Los Nogales	1	1	0	1	No apto

Es importante señalar, que la metodología regional permite identificar zonas potenciales de recarga artificial, y por tanto, sirve como un primer filtro sobre el cual se debe necesariamente, recabar más información para determinar si los sectores seleccionados efectivamente presentan buenas características para la aplicación de este tipo de tecnología. En efecto, se podría decir que el principal uso de esta metodología es para descartar sectores y de este modo ayudar en la búsqueda de sectores con buenas características.

Sin perjuicio de lo anterior y en términos generales la metodología regional desarrollada funcionó bien pudiendo identificar zonas donde existen mejores características para la recarga artificial por sobre otras, particularmente el sector de Pocochay muestra una aptitud alta. Esto se condice con los trabajos de terreno desarrollados de manera posterior, ya que la zona donde finalmente se realizó la PPRAA estaba calificada con una aptitud media a baja y resultó ser un sitio donde no se logró recargar caudales importantes. Cabe señalar que en el sector de Pocochay finalmente no se realizó el proyecto, porque la profundidad de la napa en el predio disponible fue menor a lo requerido para este tipo de estudio. Junto con lo anterior, UCV presentó una serie de ventajas como los derechos de agua, amplios terrenos disponibles para realizar las pruebas y la utilización de la universidad como una forma adicional de difusión. Adicionalmente la metodología ha sido probada en más de una cuenca (Lontue, Aconcagua, Chacabuco-Polpaico y Popeta).

El principal problema de la metodología es la calidad de la información hidrogeológica disponible. Sin embargo, en este caso la información de profundidad de la napa y de la conductividad hidráulica era adecuada.

La metodología en si misma tiene la virtud que es fácil de implementar teniendo un sistema de información geográfica simple. Una mejora a evaluar sería incorporar información de la geología superficial, lo que permitiría identificar aquellos sectores que son aptos para recargar a través de balsas o a través de pozos.

#### **4 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA Y SELECCIÓN DE SITIO**

Una vez definidos los sitios potenciales para realizar el PPRAA, se realizaron trabajos en terreno con el objetivo de caracterizar litológicamente el sector y estimar la capacidad de infiltración de cada sitio pre-seleccionado. Los resultados determinaron el sitio que posee la mayor capacidad de infiltración y por ende el que ofreció las mayores probabilidades de éxito para el proyecto, considerando las variables hidrogeológicas locales. Los trabajos en terreno consistieron en:

- Excavación de calicatas.
- Realización de ensayos de infiltración.
- Medición de niveles de pozos en los sectores visitados.

Adicionalmente se realizó un análisis de calidad de agua para verificar la compatibilidad química del agua a infiltrar con el agua del acuífero. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

##### **4.1 RESULTADOS**

###### **4.1.1 Sector Pocochay**

Los resultados obtenidos en las pruebas de infiltración se encuentran medianamente relacionados con las características hidráulicas típicas de los suelos descritos en las calicatas excavadas. A nivel superficial se encuentra una capa de suelo poco permeable, con una tasa baja de 0,09 m/d. Bajo esta capa, se encuentra un estrato no consolidado con contenido de limo. Sin embargo hidráulicamente presenta una conductividad mayor a la esperada para este tipo de estrato con un valor de 1,98 m/d. El estrato más profundo, que corresponde al más fino de la secuencia y presenta una conductividad más baja que la del estrato anterior, con un valor de 0,44 m/d.

Según el análisis de estratigrafía de pozos en el sector de Pocochay, el alto contenido de finos encontrado en la calicata se extendería hasta los 16 a 20 m de profundidad, pudiendo encontrar estratos de grava arenosa intercalados entre los finos, entre los 6 y 11 m de profundidad.

De acuerdo a la estratigrafía anteriormente descrita, el relleno rico en arcilla presente en las calicatas, se podría encontrar hasta los 20 m de profundidad.

#### 4.1.2 Sector La Palma

Los resultados obtenidos en las pruebas de infiltración se encuentran estrechamente relacionados con las características hidráulicas de los suelos descritos en la calicata. A nivel superficial se encuentra una capa de suelo poco permeable, con una tasa baja de 0,77 m/d. Bajo esta capa, a 80 cm de profundidad, se encuentra un estrato de grava con una matriz de arena gruesa con una alta permeabilidad de 11,88 m/d. Hacia el fondo de la calicata, a 2 m de profundidad, se encuentra una capa de limo arenoso con arcilla, poco permeable, cuya tasa de infiltración desciende a 0,07 m/d.

El análisis de estratigrafía de pozos en el sector de La Palma indica que los primeros 70 m desde la superficie están dominados por la presencia de finos (limo y arcilla), donde se observan limo gravoso, arena gravosa arcillosa y arcilla gravosa. Según se observa en la estratigrafía de los pozos cercanos, la capa de limo encontrada a partir de los 1,9 m de profundidad, podría extenderse hasta los 9 m de profundidad. Bajo los 9 m se observan capas con contenido de finos, por lo que tendría baja capacidad de infiltración. Entre los 17 y 28 m se presentan intervalos con mejores propiedades hidrogeológicas.

De acuerdo a la estratigrafía anteriormente descrita, el relleno de limo presente en las calicatas, se podría encontrar hasta 9 m de profundidad y bajo los 17 m de profundidad se encontrarían estratos con mayor permeabilidad.

#### 4.1.3 Sector Los Nogales

Los resultados obtenidos para este sitio dan cuenta de una pobre capacidad de infiltración con valores bajo 1 m/d. Esto se encuentra relacionado con los contenidos de material fino encontrados en las correspondientes calicatas. Se aprecia que el contenido más bajo es el que presenta la calicata de 1 m de profundidad con un valor de 0,06 m/d. Por su parte, la calicata más profunda presenta una conductividad 10 veces mayor, pero de todas maneras baja, con un valor de 0,61 m/d.

Según el análisis de estratigrafía de pozos en el sector de Los Nogales, el limo que predomina en la calicata 1 se podría extender hasta los 8 m de profundidad. Bajo los 8 m se encontraría relleno con mejores propiedades hidrogeológicas, compuesto predominantemente por grava arenosa.

## 4.2 MEDICIÓN DE CALIDAD DE AGUAS

La medición de la calidad de aguas tuvo como objetivo analizar la compatibilidad de la fuente de agua a recargar respecto a las aguas presentes en el acuífero. Los resultados asociados a la calidad del agua validaron que el agua a infiltrar no afectó negativamente al acuífero.

La metodología utilizada fue la medición de 2 conjuntos de datos en distintos momentos: 1) set A de comprobación y 2) set B de control. El set A, de comprobación se midió 1 vez, previo a las pruebas de infiltración, con el objetivo de analizar la compatibilidad de la fuente de agua a recargar, respecto de las aguas presentes en el acuífero. De este modo, se efectuaron mediciones de calidad tanto en la fuente escogida como en el acuífero, en cada uno de los 3 sitios preseleccionados. El set A comprende un total de 35 parámetros, dentro de los cuales se destaca iones mayores y menores, metales, DBO y coliformes fecales.

Por otra parte, el set B sólo se realizó en el sitio seleccionado y se muestreó 2 veces, durante el desarrollo de las pruebas de recarga del piloto. El set B midió un total de 20 parámetros diferentes, dentro de los que se destacan nitratos, sulfatos, sólidos suspendidos totales, DBO y coliformes fecales.

Dentro de los principales parámetros muestreados, con relevancia para la recarga artificial del acuífero y que se pueden contrastar con referencias o normas son: 1) sulfatos y coliformes fecales con la NCh N° 1.333 Norma Chilena sobre requisitos de calidad de agua para diferentes usos, 2) nitratos con la NCh N° 409 Norma calidad de agua potable y 3) DBO<sub>5</sub> y sólidos suspendidos totales con el Decreto Supremo N°90 Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

### 4.2.1 Resultados de análisis de laboratorio

En la tercera sección del río Aconcagua se analizaron 7 muestras, 2 en el sector de Pochay, 3 en el sector de La Palma y 2 en el sector de Los Nogales.

A continuación se presenta un análisis de los resultados para propósitos de la recarga artificial de acuífero. Este análisis incluye 2 criterios, siendo éstos: 1) comparación referencial de los valores de parámetros analizados respecto la NCh. 1333 y 2) diferencia entre el valor del parámetro del agua superficial del canal (fuente de agua) (VC) y el valor del parámetro del agua subterránea muestreado en el pozo (VP). Mientras que el primer criterio tiene como objetivo revisar que el agua que fue infiltrada se encuentre referencialmente bajo una norma, el segundo criterio apunta a verificar que el agua que fue infiltrada (agua superficial) posea una calidad similar al agua presente en el acuífero.

El segundo criterio se cumple siempre y cuando la diferencia entre valor del parámetro del canal y el valor del parámetro del pozo sea menor que 1 orden de magnitud (OM). Esto es  $VC-VP < 1$  OM, donde VC es el valor del parámetro del agua del canal (agua superficial), VP

es el valor del índice del pozo (agua subterránea) y OM, corresponde a 1 orden de magnitud.

El resumen del análisis de los parámetros más relevantes para propósitos de la recarga artificial de acuífero para cada sector se muestran en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1: Resumen de análisis de parámetros más relevantes para recarga artificial**

ID Nombre muestra		¿Valores bajo la norma?			¿VC-VP<1 OM?		
		AC-C2	AC-C-1	AC-C3	AC-C2	AC-C-1	AC-C3
Sector		Pocochay	La Palma	Los Nogales	Pocochay	La Palma	Los Nogales
Elementos mayores y parámetros de calidad	DBO5 (mg O <sub>2</sub> /L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Nitratos (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Sulfatos (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	SI	SI	SI	<b>NO</b>	SI	<b>NO</b>
	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>
Elementos menores	SI	SI	SI	N/A	N/A	N/A	

Fuente: Elaboración propia

Nota: VC: Valor parámetro en canal, VP: valor parámetro en pozo, OM: orden de magnitud

Las aguas superficiales en todos los sectores cumplen con el primer criterio (valores bajo la norma) en todos los parámetros evaluados, a excepción de los coliformes fecales. En el caso de las muestras AC-C2 y AC-C3, en los sectores de Pocochay y Los Nogales respectivamente, se observan valores mayores o iguales a 1600 NMP/100 ml. Por otra parte, en el sector de La Palma la muestra AC-C1 muestra un valor de 1600 NMP/100 ml, excediendo la norma en menos de un orden de magnitud. Por otra parte, al evaluar el segundo criterio, el único sector que cumple con todos los parámetros a excepción de coliformes fecales es La Palma.

Según estudios de transporte y sobrevivencia de coliformes fecales, gran parte de estas bacterias serían inactivadas al entrar en contacto con el acuífero (Foppen y Schijven, 2006; John y Rose, 2005). Considerando la temperatura media del área de estudio, una población inicial de 1600 NMP/100 ml en el canal de La Palma (AC-C1) decaería a 6 NMP/100 ml en 6 días, periodo en que esta agua no alcanzaría a llegar a los pozos de bombeo.

En consecuencia, se concluye que el agua del canal en el sector de la Palma sería la más apta para infiltración y no presenta riesgos de contaminación del acuífero.



#### 4.3 SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL

La selección del mejor sitio se basó en el resultado obtenido de la fase I y Fase II de la metodología para la identificación de zonas de recarga artificial. Según el análisis fase I, la mayor parte de la zona de estudio presentó una aptitud media para la recarga artificial. De acuerdo a esta información, y junto con las visitas a terreno, se propuso el sector de Los Nogales y Pochay. Por otra parte, tomando en cuenta las sugerencias recibidas de la Junta de Vigilancia de la 3<sup>o</sup> sección del Río Aconcagua, se propuso el sector de La Palma. Respecto a los resultados obtenidos del análisis fase II, éste indicó que dentro de estos 3 sectores propuestos, tanto el sector Pochay como el sector La Palma serían idóneos para propósitos del proyecto. En particular, el sector de Los Nogales lo clasificó como no apto, debido a la ausencia de derechos de agua por parte de los propietarios del predio.

La elección del mejor sitio para realizar la recarga artificial se realizó tomando en cuenta el análisis realizado antes mencionado, junto con la discusión llevada a cabo con la CNR. Como resultado se definió que la PPRAA se debe realizar en el Campus Experimental de UCV. Adicionalmente se realizó una validación del sitio escogido, basada en la comparación de los resultados del muestreo químico del agua a ser utilizada en las pruebas de infiltración y el agua del acuífero. Dicho análisis indicó que los valores de todos los parámetros muestreados poseen rangos similares para el agua superficial y subterránea, por lo que el agua disponible en el canal ubicado en el Campus Experimental de UCV era apta para la infiltración mediante pozo.

Con respecto a los trabajos en terreno, estuvieron enfocados en caracterizar el suelo superficial y su tasa de infiltración. Los valores medidos de tasas de infiltración a 2 m de profundidad, fueron de 0,44; 0,07 y 0,61 m/d; para los sitios de Pochay, UCV y Los Nogales, respectivamente. A pesar de que la UCV posee el mínimo valor, este factor es poco relevante, ya que todos los valores son bajos para realizar infiltración a través de balsas y por lo tanto lo recomendado fue utilizar pozos de infiltración.

El análisis de los datos de terreno, complementado con estratigrafía de pozos cercanos indica que el espesor no saturado superficial en los sectores de Pochay y La Palma estaría dominado por la presencia de arcilla. Nuevamente se concluyó que este relleno tenía malas propiedades hidrogeológicas para realizar recarga a través de balsas de infiltración, por lo que, independiente del sector escogido, el terreno era apto para infiltración mediante pozo.

En base a lo anteriormente expuesto y a un análisis estratégico sostenido en conversaciones con la CNR, se escogió el sector de La Palma, específicamente el Campus experimental de la Universidad Católica de Valparaíso. Dado que el dueño de este predio es una entidad educacional, el proyecto podría tener una mayor visibilidad y difusión. Adicionalmente, en el futuro la universidad podría utilizar la infraestructura para diferentes pruebas de investigación. En la Tabla 4-2 se presenta un resumen de las principales características de los 3 sitios evaluados en la etapa I del proyecto.

**Tabla 4-2: Resumen y análisis de sitios preseleccionados para desarrollo del PPRAA**

Sitios identificados y contactados	Campus experimental Universidad Católica de Valparaíso (La Palma)	Rodrigo Bascuñán (Pocochay)	Juana Valenzuela (Los Nogales)
Aptitud del sitio de acuerdo a metodología	Media	Media	Media
Observaciones	Este sitio fue sugerido por Santiago Matta, Gerente de la Junta de Vigilancia de la tercera sección del Aconcagua. Al ser una universidad, existen incentivos más allá de lo meramente técnico para desarrollar el proyecto en este lugar.	Este sitio fue aportado por CNR. Dueño está dispuesto a participar del proyecto. En su predio existen dos estanques que tienen una capacidad de almacenamiento de unos 1.000 m <sup>3</sup> cada uno.	Sitio se ubica a un costado del canal Pucalán, en una zona alejada de cauces superficiales. La zona es alimentada por el estero El Melón.
A favor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sitio corresponde a una universidad (visibilidad, posibilidad que la universidad se haga cargo de las obras en el futuro)</li> <li>- Sitio se ubica en los faldeos de los cerros, en la cabecera de la cuenca hidrogeológica</li> <li>- Buen espesor de la zona no saturada (capacidad de almacenamiento)</li> <li>- Disponibilidad de agua en invierno,</li> <li>- Canal Ovalle cuenta con agua en invierno, ya que se utiliza para portear agua hacia el embalse Los Aromos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sitio cuenta con estanques que pueden funcionar como decantadores</li> <li>- Existe amplios terrenos sin uso</li> <li>- Sitio se ubica en los faldeos de los cerros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sitio localizado lejos del río Aconcagua, principal sumidero del valle.</li> </ul>
En contra	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta bajos valores de conductividad hidráulica en los estratos superficiales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La napa es en general muy somera</li> <li>- Presenta bajos valores de conductividad hidráulica en los estratos superficiales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La napa es, en general, somera</li> <li>- Según lo indicado por lugareños, la calidad del agua del canal es baja</li> <li>- Presenta bajos valores de conductividad hidráulica en los estratos superficiales.</li> </ul>
Visión de largo plazo	El desarrollo de proyectos de recarga artificial a gran escala es limitado en esta zona por la falta de terrenos y por lo somero de la napa. La Junta de Vigilancia está interesada en este tipo de iniciativas. Existe potencial para el desarrollo de iniciativas locales y pequeñas en predios particulares donde existan características hidrogeológicas adecuadas, principalmente en el faldeo de los cerros, para regularización de pérdidas de agua por infiltración en canales. Se deberá estudiar con mayor profundidad la estratigrafía para obtener un modelo de detalle de las unidades acuíferas y su continuidad, con el fin de evaluar la factibilidad y los métodos para realizar proyectos de recarga artificial, utilizando los canales de riego existentes.		

Fuente: Elaboración propia

## 5 ANÁLISIS LEGAL

El análisis legal comprende dos etapas: la primera de ellas fue analizar la legislación vigente, determinar la aplicabilidad de ella y obtener las autorizaciones correspondientes para la implementación del proyecto de recarga. La segunda, fue generar un convenio de colaboración entre CNR y UCV (dueño del predio y de los derechos de agua), con las autorizaciones correspondientes para implementar y ejecutar el proyecto por un plazo determinado.

### 5.1 ANÁLISIS LEGAL Y AUTORIZACIONES

En materia de análisis legal y autorizaciones, se revisó la normativa chilena vigente asociada a la ejecución de un Proyecto de Recarga Artificial. En este contexto, se destaca la Ley N° 19.300 sobre Bases generales del medio ambiente, que especifica cuáles proyectos deben ingresar al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), el Artículo 171 Código de Aguas, que regula los permisos necesarios requeridos por proyectos asociados al recurso hídrico (Permisos Sectoriales) y el DS. N° 46/2002 Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.

Desde el punto de vista legal lo que aplica a proyectos de recarga artificial, son el Artículo N° 66 del código de aguas y lo indicado en la resolución N° 425, respecto de la información que se debe entregar a la DGA para solicitar autorización para este tipo de proyectos. Respecto a este artículo se debe indicar que al momento de comenzar el proyecto en la DGA no existía claridad del mecanismo mediante el cual se deben presentar los proyectos de recarga artificial, aun cuando la resolución N°425 indica el tipo de información requerida. Sin embargo, no existe claridad respecto de la profundidad de la información requerida, los formatos y si toda la información entregada es aplicable en cualquier tipo de proyecto de recarga artificial. Tampoco se tiene claridad de cuáles serán los criterios mediante los cuales la DGA realizará el otorgamiento o no del permiso para realizar un proyecto de recarga artificial.

Otro tema que debe ser revisado es el permiso sectorial (Artículo 171, Código de Aguas) correspondiente a modificación de cauce, que debe ser presentado y autorizado por la DGA. Este es relevante cuando se realizan modificaciones de cauce como por ejemplo la construcción de una bocatoma para acceder al agua que se utilizará para la infiltración.

Respecto del proyecto en particular no fue necesario solicitar permisos, por cuanto, no aplica como proyecto de recarga artificial como tal ya que no se solicitarán derechos sobre los volúmenes infiltrados, por lo que el proyecto puede definirse como una prueba de infiltración. Tampoco aplica la modificación de cauce, ya que, el canal que fue intervenido corresponde a un canal privado, ubicado al interior del predio.

## 5.2 CONVENIO DE COLABORACIÓN

El convenio de colaboración es un documento legal que compromete al dueño del predio y al dueño de los derechos de agua a entregar en comodato sus terrenos y derechos, por un periodo de tiempo acotado, para ser utilizado en la construcción, ejecución y operación del proyecto.

En la tercera sección del río Aconcagua se redactó un convenio, debido a que el dueño del predio donde se construyeron las obras, es el mismo dueño de los derechos de agua utilizados para la operación del sistema. En efecto, los convenios fueron firmados entre la CNR y la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV).

En términos generales los convenios indican: 1) los antecedentes de las partes, 2) el objeto del convenio, 3) obligaciones del colaborador, 4) obligaciones de la CNR y 5) vigencia y modificaciones.

## 6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL

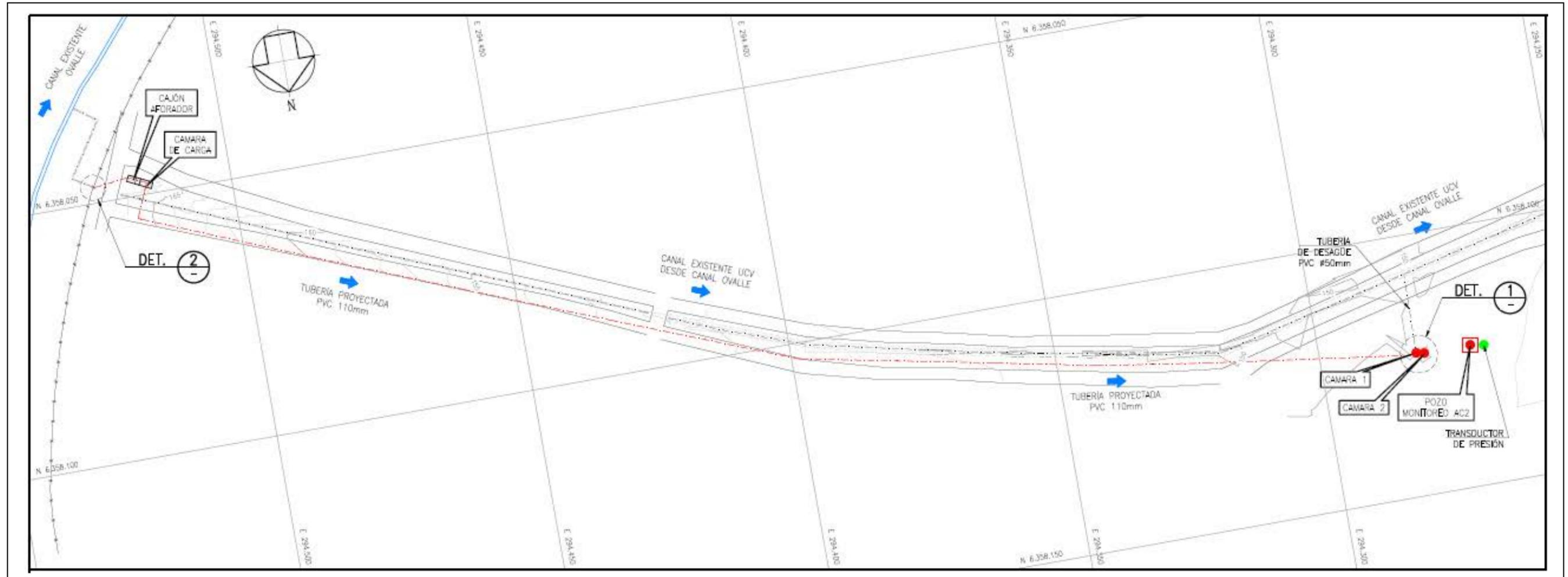
Dentro del contexto de este proyecto, el diseño de las obras se realizó en dos etapas: a) una primera etapa que se ha denominado pre-diseño del PPRAA, que se desarrolló en función de datos estratigráficos locales obtenidos de la revisión y análisis de antecedentes y de los datos de terreno descritos en el capítulo 4; y b) una etapa 2 llamada diseño final, que fue producto de la información que se fue recopilando en la medida que el proyecto fue avanzando, especialmente la estratigrafía obtenida desde los pozos perforados. A continuación se presenta, en orden cronológico, las actividades, resultados y decisiones que se fueron tomando en la medida que avanzaba el proyecto.

1. Pre-diseño 1: El diseño original, de acuerdo a las bases de licitación y a lo ofertado en la propuesta técnica, consideró la construcción de una balsa de infiltración y dos pozos de observación.
2. Trabajos de terreno. El resultado de estos trabajos mostró que el terreno no era apto para la realización de infiltración a través de balsas. Se decidió cambiar el diseño a pozos de infiltración.
3. Pre-diseño 2: En base a los trabajos de terreno y la información recopilada de la estratigrafía del pozo propiedad de UCV, cuyo código es 3250 7110 B32, se diseñó la construcción considerando un pozo de infiltración y 2 pozos de observación.
4. Perforación de pozo de infiltración: Durante la perforación del pozo de infiltración se fueron analizando las muestras estratigráficas por geólogos de GeoHidrología. Se encontró que gran parte de la formación presentó un contenido importante de arcilla, lo que llevó a realizar ensayos y pruebas de infiltración durante la perforación. Basados en la información disponible se esperaba encontrar una capa de mayor conductividad hidráulica bajo los 9 primeros metros, sin embargo, cuando se alcanzó la profundidad de diseño del pozo (30 m), esta capa aún no aparecía. En conjunto con la CNR se decidió profundizar el pozo hasta encontrar una capa de mayor conductividad, lo que llevó a perforar el pozo hasta los 54 m. En función de los

- antecedentes, estratigrafía de la perforación, análisis técnico en conjunto con la CNR, se decidió disminuir de 3 pozos a 2 pozos, dejando el pozo de inyección más profundo (54 m) y un único pozo de observación de 36 m de profundidad.
5. Pruebas hidráulicas: Se constató que el terreno tenía una baja capacidad de infiltración, con valores menores a 1 L/s,
  6. Análisis de alternativas: GeoHidrología junto con CNR buscaron alternativas para mejorar los resultados del proyecto, siendo estas: a) infiltrar directamente en el canal Ovalle, b) infiltrar en quebrada cercana, y c) inyectar a presión en el mismo pozo de infiltración, aprovechando la cota natural del terreno. El resultado del análisis permitió descartar las alternativas a) y b). Respecto de la inyección a presión, ésta se puede realizar utilizando la diferencia de cota entre el canal Ovalle y la zona donde se ubica el pozo de infiltración (15 m aproximadamente).
  7. Rediseño del sistema. Se realizaron modificaciones al sistema de recarga para infiltrar un caudal a presión en el pozo.
  8. Construcción y operación. Una vez construido el PPRAA, se observó que el pozo no fue capaz de soportar presiones mayores a 2 mca, generándose una salida de agua a través de la corona del pozo (superficie) al intentar infiltrar caudales mayores a 0,5 L/s. Lo anterior, debido a que el pozo no fue diseñado para funcionar a presión. Por lo anterior, se constató que sólo era posible operar el sistema con caudales menores que 0,5 L/s, asegurando de esta forma el correcto funcionamiento del sistema.

El esquema conceptual diseñado (*as built*) se presenta en la Figura 6-1 donde se incluye una vista en planta del diseño conceptual del sistema de infiltración elegido. En primer lugar se realizó una toma desde el canal interno UCV mediante una captación compuesto por una compuerta plana y un codo de PVC de 8", que actúa como sumidero, por lo que se mantuvo una altura de agua constante en la toma del sistema. Los caudales son conducidos hasta el dispositivo de medición compuesto por: 1) cajón aforador y 2) cámara de carga. Ambas secciones poseen vertederos donde fue posible medir el caudal. Cuando existe rebose, el agua vuelve al canal interno UCV. El caudal de infiltración se mide como la diferencia entre ambos vertederos. El agua es conducida entre la cámara de carga y el pozo de infiltración mediante una tubería de PVC de 110 mm enterrada de 250 m de longitud, este sistema de conducción además incluye: a) un flange en el cual se instaló el transductor de presión, b) una cámara sanitaria que contiene en su interior una T, que deriva el flujo hacia el pozo de infiltración o hacia una tubería de desagüe, la que se utilizará para vaciar la tubería en caso de que se requiera, y c) una segunda cámara sanitaria que contiene una válvula de control y la entrada al pozo de infiltración (AC- 01).

Figura 6-1: Vista en planta del diseño del sistema de infiltración



Fuente: Elaboración propia.

(WGS84 H19S)

## 6.1 PERFORACIÓN DE POZOS

Como parte del proyecto se construyó un pozo de infiltración AC-01 y un pozo de monitoreo AC-02, la perforación se llevó a cabo con una máquina *Prominas R-1H*, mediante sistema de rotopercusión con entubación simultánea en 6" de diámetro, llegando hasta los 54 y 36 m de profundidad respectivamente. Los pozos fueron habilitados con tuberías ciegas y ranuradas en acero al carbono de 6" de diámetro.

Tras realizar el desarrollo del pozo AC-01, la filmación mostró que el pozo mantenía una cantidad de sedimentos finos importantes y se recomendó realizar una limpieza del pozo para evitar la acumulación de material flotante en las ranuras. Se procedió a realizar un desarrollo del pozo más largo (6 hrs.), con la finalidad de mejorar la capacidad de infiltración. Posterior al segundo desarrollo se procedió a filmar el pozo nuevamente para evaluar su resultado. Se pudo observar que la habilitación del pozo se encontró en buen estado hasta los 50 m sin embargo, el agua se mantiene con un alto porcentaje de material flotante, que estuvo decantando y fijándose a las paredes de las tuberías, cubriendo en algunos casos los primeros metros de los espacios ranurados y las uniones entre tuberías. La alta presencia de finos se debe a la alta concentración de finos en el suelo. Sin importar cuantas limpiezas se realicen el pozo se mantendrá con altas concentraciones de finos.

Si bien es cierto gran parte de los trabajos de terreno antes señalados están considerados en los términos de referencia y fueron ejecutados como parte del proyecto, el orden de las actividades no permite realizar un diseño adecuado del PPRAA. En efecto, en la etapa 2 del proyecto se solicita entregar el diseño del PPRAA, antes de contar con información estratigráfica de los pozos.

La información previa es tan relevante, especialmente la obtenida desde la perforación del pozo, que en esta etapa se puede decidir si continuar o no con un proyecto de recarga artificial. En resumen es relevante realizar todos los trabajos de terreno, incluyendo la perforación de pozos exploratorios, ojalá utilizando un método de perforación que permita obtener muestras inalteradas del subsuelo, de manera previa al diseño del PPRAA, lo que asegura que el diseño y posterior operación sean exitosos. También se recomienda considerar para futuros proyectos pozos exploratorios aparte de los de observación e infiltración. En función del resultado de estos pozos exploratorios se puede determinar la profundidad y habilitación de los pozos de observación, el diseño óptimo del pozo de infiltración o la pertinencia de seguir adelante con las recarga en el sector. Un análisis de este tipo hubiese permitido detener la construcción de las obras de infiltración, con el fin de buscar un sitio con mejores condiciones para la recarga, o bien diseñar el pozo de infiltración especialmente para soportar presiones de mayor magnitud que permitiesen infiltrar caudales mayores.

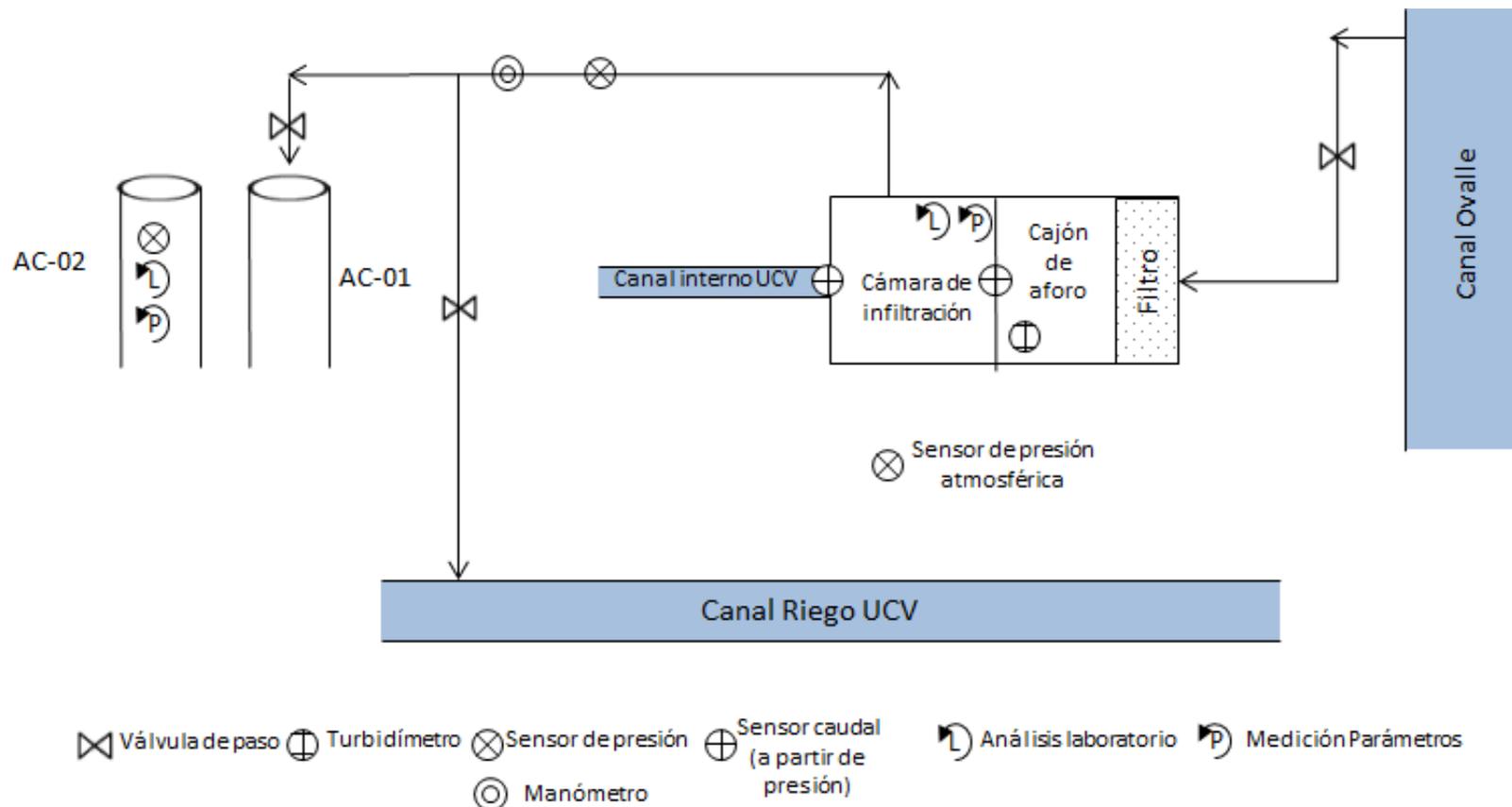
## 6.2 MEDICIÓN DE VARIABLES

Las variables monitoreadas fueron: a) caudal de ingreso (a través de la medición del nivel en el vertedero de entrada y el de salida de la cámara de infiltración), b) carga en el pozo de infiltración, c) turbiedad, d) nivel del acuífero en el pozo de observación, y e) la calidad química del agua de infiltración y del acuífero. El caudal fue medido de manera continua y fue transmitido a través de telemetría a un servidor que permitió ver su comportamiento en línea. El nivel del acuífero fue también medido de manera continua pero sin transmisión telemétrica, mientras que la calidad química fue medida de manera puntual a través de la medición de parámetros físico-químicos y toma de muestra para análisis de laboratorio. El detalle de las variables monitoreadas se presenta en la Tabla 6-1, considerando lugar de medición, equipo a utilizar, frecuencia de medición y si se contempló telemetría o no. La Figura 6-2 presenta un diagrama esquemático de su ubicación.

## 6.3 COSTOS

El costo total asociado a la construcción del proyecto, considerando inversión y equipos de medición es de \$49.233.896, de los cuales el 19% corresponde a costos de instrumentación y un 81% a inversión.

**Figura 6-2: Diagrama de ubicación equipos de medición.**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-1: Cuadro resumen de medición de variables.**

Objetivo asociado	Parámetro	Lugar de medición	Equipo	Marca/ modelo	N° Equipos instalados	Frecuencia	Telemetría	
Estimación de Balance Hídrico	Caudal	Vertedero triangular al ingreso del cajón de aforo	Transductor de presión	Leeg. Sensor de niveles hidrostático capacitivo Rango de medición de 0 a 5 m	1	Continuo	Si	
		Vertedero triangular de rebose del cajón de aforo			1			
		Tubería alimentación pozo infiltración.	Manómetro	-	1	Semanal	No	
Respuesta del acuífero	Niveles	Pozo de observación 1 (AC-02)	Transductor de presión	HOBO. U20L water level logger	1	Continuo	No	
		Tubería alimentación pozo infiltración.			1			
		Atmósfera (superficie)			1			
Control de variables críticas	Turbidez	Cajón de aforo	Turbidímetro	SOLITAX scSS Wiper with sc200 Controller	1	Continuo	Si	
Control de los efectos de la infiltración	Parámetros químicos (Set B)	Cajón de aforo	Análisis de laboratorio	-	-	Mensual	No	
		Pozo de observación 1		-	-	Mensual	No	
	Parámetros físico-químicos (pH, T°, DO, CE.)	Cajón de aforo	Medidor multiparámetros portátil	Hanna instrument HI9829	-	-	Semanal	No
		Tubería alimentación pozo infiltración						
Variables meteorológicas	Precipitación	Estación de la DGA: Río Aconcagua en Chacabuco	-	-	-	Continuo	Si de la página de la DGA	

Fuente: Elaboración propia

## 7 DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO

La estimación de los parámetros elásticos del acuífero fue determinada a través de pruebas de bombeo e infiltración, usando distintos métodos de análisis. El análisis de ambos tipos de pruebas considera el funcionamiento del sistema en régimen transiente.

La Tabla 7-1 presenta un resumen de los parámetros elásticos obtenidos mediante las diferentes pruebas y métodos de análisis. Se observa que los valores de conductividad hidráulica (K) se mueven dentro de un rango muy acotado (lo que da confiabilidad al análisis) y que en general los valores son bajos, propios de suelos con un alto contenido de arcillas (Fetter, 2001). Los valores de K se mueven entre 0,074 y 0,88 m/d.

Respecto a la representatividad de los valores obtenidos se debe indicar que el menos representativo corresponde al 0,21 m/d; ya que corresponde al valor obtenido en la prueba de bombeo, en el mismo pozo de infiltración y por lo tanto, este valor incluye las pérdidas de carga producidas en las cribas. Respecto del valor más representativo, se considera que es el estimado con la información de la prueba en régimen permanente (Thiem), ya que, este método considera los niveles del acuífero estabilizados, medidos en el pozo de infiltración y observación, y por lo tanto, es representativo del largo plazo. Cabe recordar que los otros métodos consideran información de corto plazo (pruebas de bombeo duran como máximo 24 horas y todas las pruebas de infiltración duraron menos de una hora).

Respecto del coeficiente de almacenamiento, éste sólo se puede obtener desde las pruebas de bombeo cuando se posee un pozo de observación. En este caso el valor obtenido es de  $1,45 \cdot 10^{-5}$  valor esperado para un acuífero confinado (Fetter, 2001).

**Tabla 7-1: Resumen parámetros elásticos definidos a través de distintas metodologías**

Tipo de prueba	Q (L/s)	Método	Pozo	K (m/d)	S (adim)
Bombeo	2,9	Jacob	infiltración	0,21	-
	2,9	Jacob	observación	0,88	$1,45 \cdot 10^{-5}$
Infiltración	0,5	Lefranc	infiltración	0,26	-
	1,3	Lefranc	infiltración	0,50	-
	0,6	Lefranc	infiltración	0,30	-
Régimen permanente	0,25	Thiem	infiltración/observación	0,074	-

La información obtenida es concordante con los resultados obtenidos posteriormente en la operación del sistema PPRAA, donde se determinó una permeabilidad entre 0,12 y 0,08 m/d. La conductividad hidráulica obtenida más representativa (0,074 m/d) también es comparable con la recopilada para el sector en el análisis de antecedentes disponibles (0,1 m/d). Claramente el caudal máximo obtenido en la PGV es menor al potencial, sin embargo éste está limitado por la profundidad del pozo ya que se alcanzó el nivel de seguridad del pozo, por lo que se procedió a detener la prueba.

## 7.1 OPERACIÓN DEL SISTEMA PPRAA

El objetivo principal de la realización de las pruebas de infiltración es evaluar el desempeño de la infraestructura de infiltración y la respuesta del acuífero producto de la realización de dichas pruebas. Para cumplir con el objetivo se ha diseñado un completo plan de monitoreo descrito en detalle en la sección 6.2.

Se realizaron 3 pruebas de infiltración donde se probaron distintos caudales. Previo a las pruebas, se realizó una marcha blanca durante 7 días, donde se comprobó la respuesta del sistema frente a rangos de operación entre 1 y 4 L/s. En esta etapa previa no fue posible recargar el caudal de infiltración ya que se produjeron derrames en el pozo. Posteriormente se realizó con éxito una prueba de infiltración con un caudal en torno a 0,25 L/s. Tras realizar esta prueba se intentó infiltrar un caudal de 0,45 L/s. Este no pudo ser infiltrado, ya que el agua subía por la formación del pozo, lo que provocó que se encontrara agua en los alrededores del pozo y también en una quebrada cercana. Finalmente se probó el funcionamiento del pozo con un caudal igual a 0,175 L/s. Al igual que con los 0,25 L/s, este caudal también pudo ser infiltrado sin problemas.

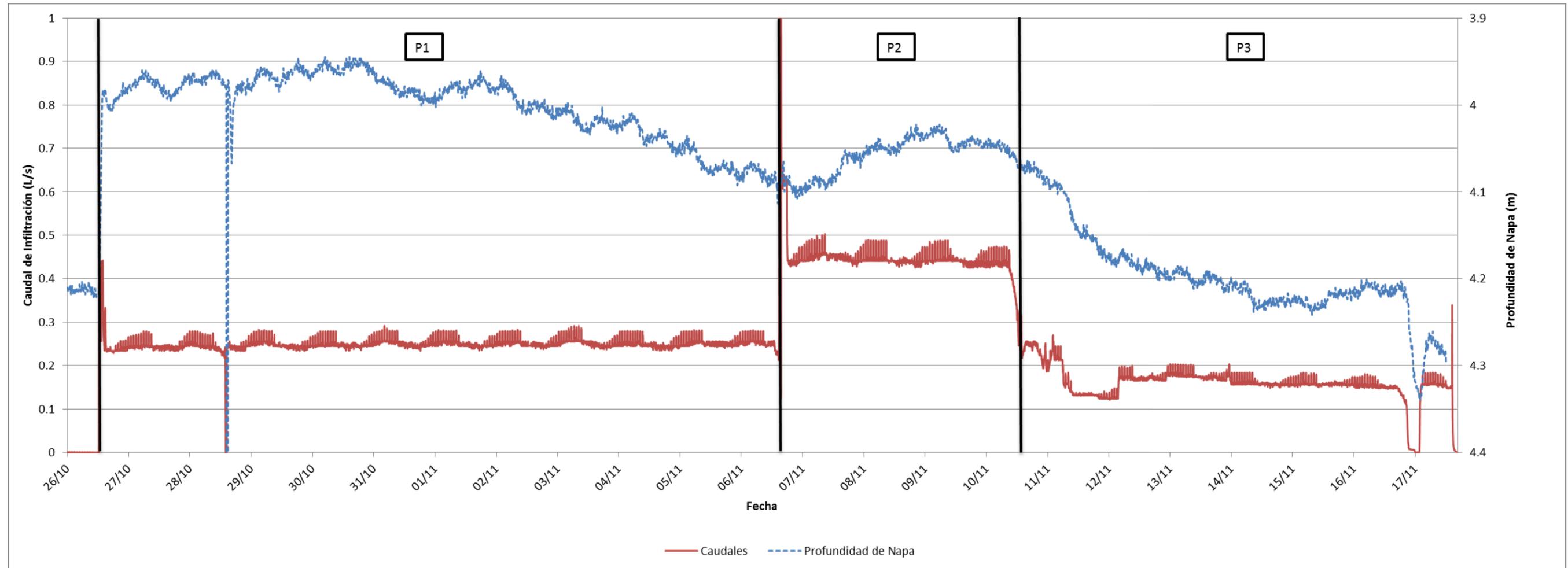
En la Figura 7-1 se presentan los niveles del pozo de observación (AC-02), que se encuentra ubicado a 9 m del pozo de infiltración, donde se aprecia una clara dependencia entre los niveles desarrollados y las variaciones en caudal en la prueba 1 y 3. También se observa esta dependencia en la prueba 2, pese a que no fue posible infiltrar todo el caudal medido en el vertedero, ya que el agua se filtraba entre la formación y la tubería del pozo.

Antes de comenzar las pruebas, la profundidad inicial se registró a los 4,22 m y al finalizar la tercera prueba llegó cerca de los 4,34 m de profundidad. Por lo tanto, el nivel del acuífero descendió alrededor de 0,12 m durante el transcurso de las pruebas. Este descenso responde a la tendencia natural del sitio y no es atribuible a las pruebas realizadas ya que éstas provocarían el efecto contrario. Es decir, el nivel de la napa sufrió una fluctuación que no dependió de los ensayos realizados y se debe atribuir a variables naturales que no pudieron ser controladas.

La Figura 7-2 muestra la presión del caudal en la tubería que transporta el agua al pozo de infiltración. En la marcha blanca, cuando se intentó infiltrar caudales mayores 1 L/s, se produce una presión en la tubería mayor que 2 mca. Para la prueba 1, se registró una presión que se estabilizó alrededor de los 1,75 mca, en la prueba 2 la presión fue de 2 mca y en la prueba 3 la presión se estabilizó en 1,5 mca.

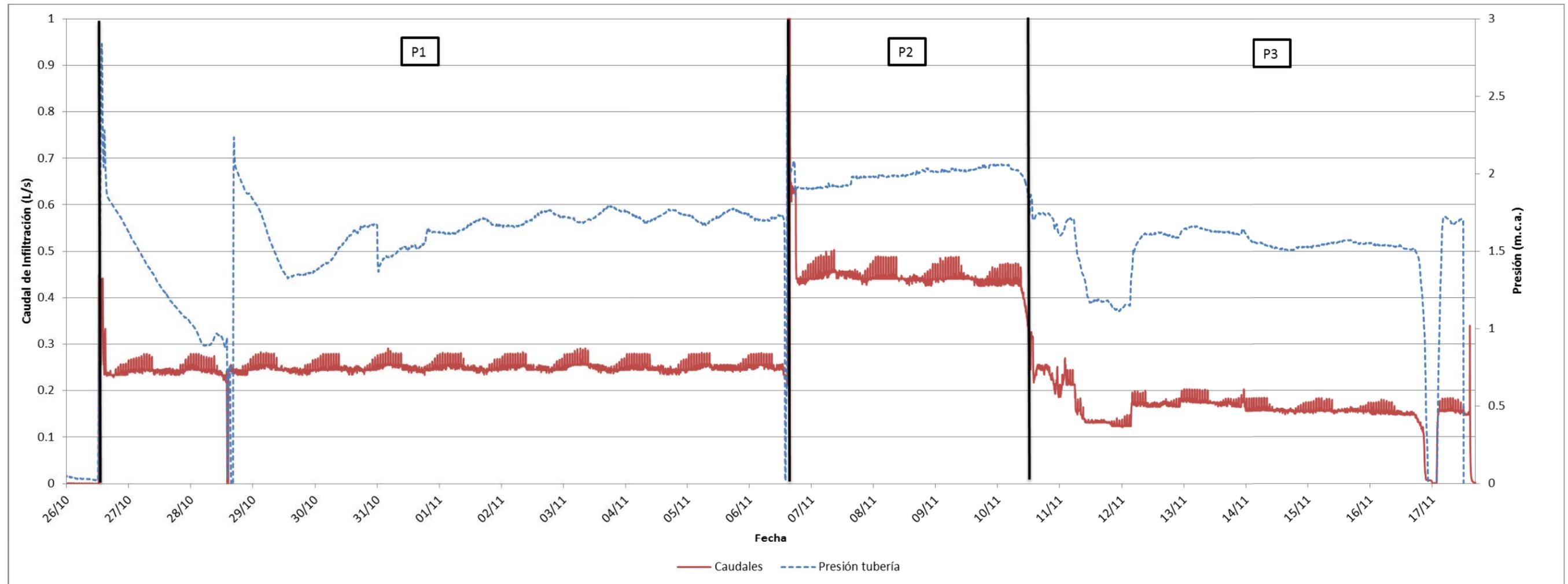
Se realizó el ejercicio de calcular el cociente entre el ascenso desarrollado y el caudal de infiltración para las pruebas 1 y 3. El ejercicio se realizó cuando se estabilizaron los niveles de carga en el pozo de infiltración (AC-01) y el nivel de la napa en el pozo de observación (AC-02). El cociente es igual a  $1,0 \frac{m}{L/s}$  y  $0,7 \frac{m}{L/s}$ .

Figura 7-1: Profundidad de Napa en ensayos y prueba de Infiltración en Pozo AC-02 (observación)



Las líneas verticales negras muestran la separación de cada Prueba, P1 Prueba de Infiltración 1, P2 Prueba de Infiltración 2, P3 Prueba de Infiltración 3.  
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-2: Presión en tubería de carga en ensayos y prueba de Infiltración en Pozo AC-01 (infiltración)



Las líneas verticales negras muestran la separación de cada Prueba, P1 Prueba de Infiltración 1, P2 Prueba de Infiltración 2, P3 Prueba de Infiltración 3.  
Fuente: Elaboración propia

### 7.1.1 Calidad química

Se realizó un análisis temporal de la evolución de la calidad química de las aguas subterráneas y de las aguas a infiltrar durante la operación del sistema, con el propósito de evaluar el impacto de las pruebas de infiltración en la calidad fisicoquímica del acuífero.

El análisis se realizó según 3 criterios: (1) parámetros físico-químicos a través de un multiparámetro, (2) algunos parámetros más relevantes y su comparación con la NCh 1333 Norma Chilena sobre requisitos de calidad de agua para diferentes usos y (3) composición química de las aguas (según el set B) y se puede concluir que:

- Los datos de pH, indicarían que las aguas del canal Ovalle y del pozo de observación provendrían de la misma fuente.
- Los valores de DQO muestran que las aguas subterráneas, las aguas del canal y las aguas en los pozos presentan un contenido bajo el límite de detección. Esto último, sugiere que las aguas de alimentación son bastante limpias.
- Los valores de nitratos indicaron una influencia agrícola en las aguas que provienen del canal Ovalle, lo que es esperable debido a que el lugar corresponde a un campus de investigación agrícola.
- En el tiempo se pudo observar un leve aumento de los sólidos suspendidos para las aguas subterráneas y una disminución para las agua del canal Ovalle.
- Los valores de coliformes fecales se presentan muy por debajo de la NCh 1333 Norma Chilena sobre requisitos de calidad de agua para diferentes usos y Decreto Supremo 90 Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
- De acuerdo a los patrones observados en los gráficos de parámetros fisicoquímicos y la estimación del tiempo en que demora el agua desde AC-01 a AC-02 es posible afirmar que no hubo mezcla de aguas desde AC-01 hacia AC-02 durante los 35 días de pruebas de infiltración.

## 7.2 ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA

A continuación se presenta un análisis de las obras y de la operación del sistema de infiltración.

En términos generales se puede decir que el diseño fue apropiado para los objetivos, plazos de ejecución y presupuesto. El sistema implementado permitió:

- Obtener el agua desde la fuente (Canal Ovalle).
- Conducir el agua manteniendo la calidad físico-química, hasta la toma específica del PPRAA.
- Mantener la calidad físico-química del agua.
- Medición de la calidad físico-química adecuada en términos de precisión, frecuencia y acceso a la información (telemetría).
- Regulación del caudal de manera precisa.

- Mantener el caudal constante a pesar de las variaciones en la altura del canal fuente,
- Medición de caudal de manera precisa.
- Permitted conocer la capacidad máxima de infiltración.
- Operar el sistema evitando la entrada de burbujas.
- Desaguar la tubería de aducción en caso de requerirse.
- Monitoreo de todas las variables requeridas para la interpretación de los resultados.

Otras características del sistema:

- Puede ser operado por una persona, de manera periódica.
- Permitted mantener el control de las variables de operación en línea.
- Permitted enviar alertas cuando las variables de operación fueron sobrepasadas de los valores recomendados.
- Mantenimiento sencilla, requiere básicamente la limpieza de los filtros de malla.
- La construcción fue sencilla y rápida.

La operación también tuvo inconvenientes como:

- El caudal de infiltración fue bajo, sin embargo, es importante indicar que esto se debe a las características propias del acuífero y no a problemas de diseño o de construcción de las obras.
- El sistema no permitió infiltrar agua a presiones mayores a 2 mca. Lo anterior, es un problema de diseño que se asocia a los términos de referencia de la licitación, ya que no permitían diseñar con información de terreno. En efecto, el diseño del PPRAA se entregó en la Etapa II y la perforación de pozos y desarrollo de pruebas de bombeo se realizó en la Etapa III.
- La construcción del pozo de inyección no permitió la instalación del transductor de presión en el mismo pozo.
- El registro de niveles se realizó mediante transductores de presión con dataloggers los cuales eran descargados periódicamente al visitar las instalaciones. Pese a que el registro cumple con lo necesario para el análisis de las pruebas desarrolladas y con lo solicitado en los términos de referencia, hubiese resultado más práctico controlar éstas variables con telemetría al igual que los caudales y la turbidez. Esto hubiese permitido tomar decisiones con mayor agilidad y dar cuenta en tiempo real de los resultados que se van obteniendo

Considerando las actividades desarrolladas en el marco del proyecto, es posible afirmar que la realización de recarga artificial en general no es una opción viable para el sector donde fueron emplazadas las obras. Esto debido a que sólo fue posible infiltrar en el acuífero un caudal máximo de 0,24 L/s, utilizando un pozo de infiltración de 54 m de profundidad. Sin embargo, no se descarta que exista otro sector dentro del mismo predio en las Palmas que pueda presentar una mejor aptitud para realizar este tipo de pruebas.

### 7.2.1 Modelo conceptual local

A continuación se explica el modelo conceptual del funcionamiento del sistema de infiltración implementado y su relación con el acuífero en el área de estudio. El modelo que acá se presenta incluye toda la información recopilada durante la ejecución del proyecto, tal como: 1) descripción estratigráfica de las perforaciones, 2) registro de niveles de pozos cercanos a las al sistema de infiltración, 3) resultados de las pruebas de bombeo y 4) resultados de las pruebas de infiltración u operación del sistema.

Para facilitar el análisis del funcionamiento hidráulico conceptual, éste fue separado en dos escenarios o diagramas: 1) Diagrama que describe el funcionamiento del sistema previo a realizar las Pruebas Piloto de Recarga Artificial de Acuífero (sin PPRAA) y 2) Diagrama que describe el comportamiento del sistema durante las pruebas pilotos de recarga artificial. Cada escenario se presenta en las Figura 7-3 y Figura 7-4 respectivamente.

La descripción estratigráfica de las muestras obtenidas en las perforaciones, dan cuenta de una secuencia de arcillas mezcladas con arenas y gravas que llega aproximadamente hasta los 30 m de profundidad. Subyacente a la secuencia de estratos arcillosos se presenta un estrato arenoso que continúa hasta el fondo de la perforación más profunda (54 m). De acuerdo a lo anterior, se reconocen dos unidades hidrogeológicas predominantes, la primera de ellas de una potencia de 30 m constituida por la secuencia arcillosa y con conductividades esperadas muy bajas (UH 1). La segunda unidad hidrogeológica está constituida por arena y con conductividades hidráulicas esperadas mayores (UH 2). Las pruebas de bombeo y de infiltración realizadas (capítulo 7) arrojaron valores entre 0,88 y 0,08 m/d y se obtienen considerando ambos estratos.

Cabe señalar que los resultados obtenidos en las pruebas de bombeo y de infiltración realizados no concuerdan con los resultados esperados, basados en la información disponible de dos pozos de bombeo de UCV (P1 y P2), que se encuentran aproximadamente a una distancia del sistema de infiltración de 890 m y 970 m, respectivamente. Dada las características hidrogeológicas de la zona de estudio, se considera que éstas ubicaciones no se encuentran lo suficientemente cerca y por lo tanto no son representativas del comportamiento del agua subterránea bajo las obras. Esto es debido a que el sistema se encuentra cercano a la ladera de un cerro, lo que produciría singularidades que podrían desaparecer al alejarse de esta ladera en dirección hacia el valle, que es donde se ubican los pozos de producción. Un ejemplo de las diferencias entre los pozos se observa en las discrepancias en las estratigrafías registradas en los pozos de UCV con las obtenidas en las perforaciones del sistema de infiltración. Junto a lo anterior, existe gran diferencia en los caudales logrados en las pruebas de bombeo efectuadas en los pozos con los caudales de extracción que logran estos pozos de producción. En capítulo 7 se presenta la Figura 7-2 que muestra la evolución de los pozos de producción UCV durante el periodo de estudio. Los pozos presentan un alza entre mayo y septiembre de 2014 con una variación de aproximadamente 3,5 m durante ese periodo. En la sección 8 se presenta una discusión respecto de las diferencias observadas en ambos sectores.

Los resultados de las pruebas de bombeo y la estratificación sugieren la existencia de un único acuífero que se encontraría confinado. El acuífero se ubica en el estrato de arenas

(UH 2) y estaría confinado por los estratos arcillosos (UH 2). La Figura 7-3 muestra una descripción conceptual de la situación.

Para facilitar el análisis del funcionamiento hidráulico, éste fue separado entre el periodo previo a realizar las pruebas de infiltración y durante las pruebas de infiltración. El comportamiento regional (acuífero Aconcagua) presenta un gradiente y dirección de flujo sur-oeste. Particularmente, en el sistema pozos existe una componente netamente hacia el este, coincidente con el gradiente del terreno.

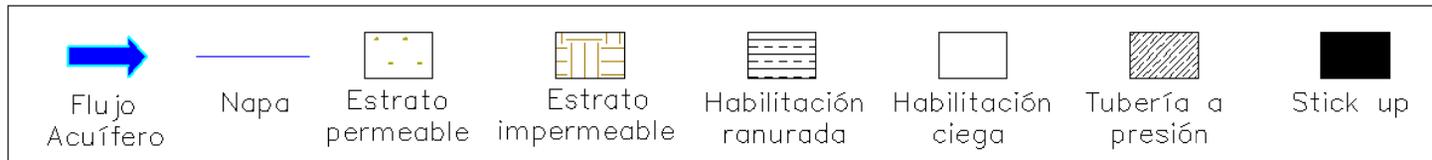
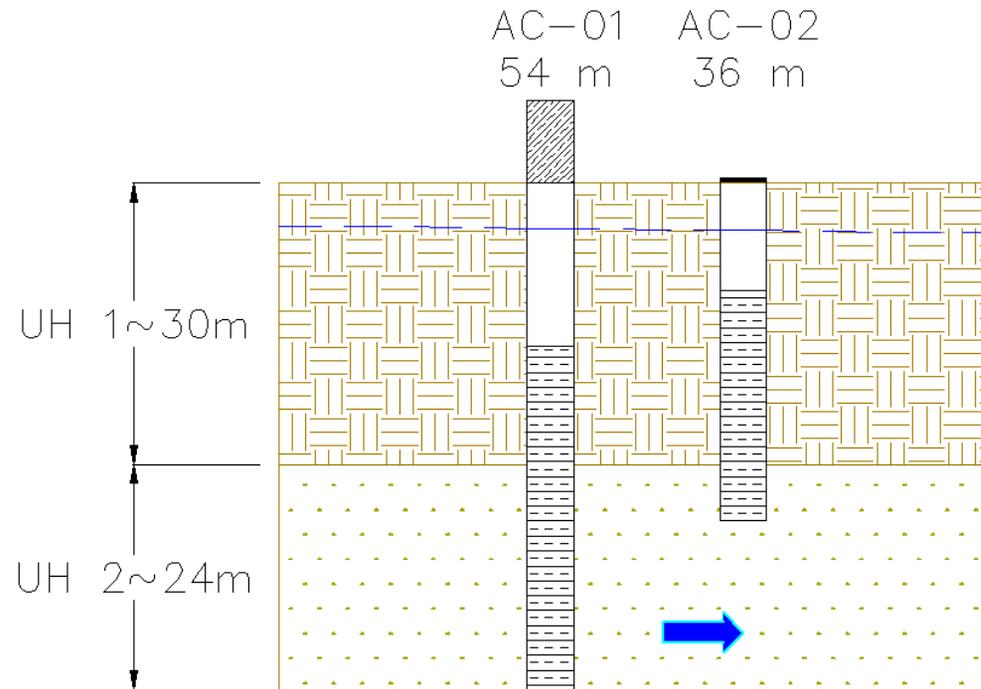
La infiltración se realiza subterráneamente a través del pozo de infiltración AC-01 el cual debería inyectar principalmente en la unidad acuífera inferior correspondiente a las arenas. Al desarrollar las pruebas se obtuvo que el caudal máximo que el sistema es capaz de infiltrar es de 0,25 L/s. En esta condición la tubería se inunda parcialmente desarrollando una presión máxima de 2,5 mca. Al desarrollar pruebas con caudales mayores se generaron presiones que produjeron inundaciones por sobre el terreno.

Las infiltraciones generan un cono de presión en torno al pozo induciendo un flujo radial (Ver Figura 7-4). Debido a la baja conductividad en el área, el cono se desarrolla de manera reducida lateralmente en que para un ascenso máximo en el pozo de infiltración AC-01 de 6 m, sólo se manifiesta un aumento de 0,3 m en el pozo de observación AC-02, que se encuentra a 9 metros de distancia.

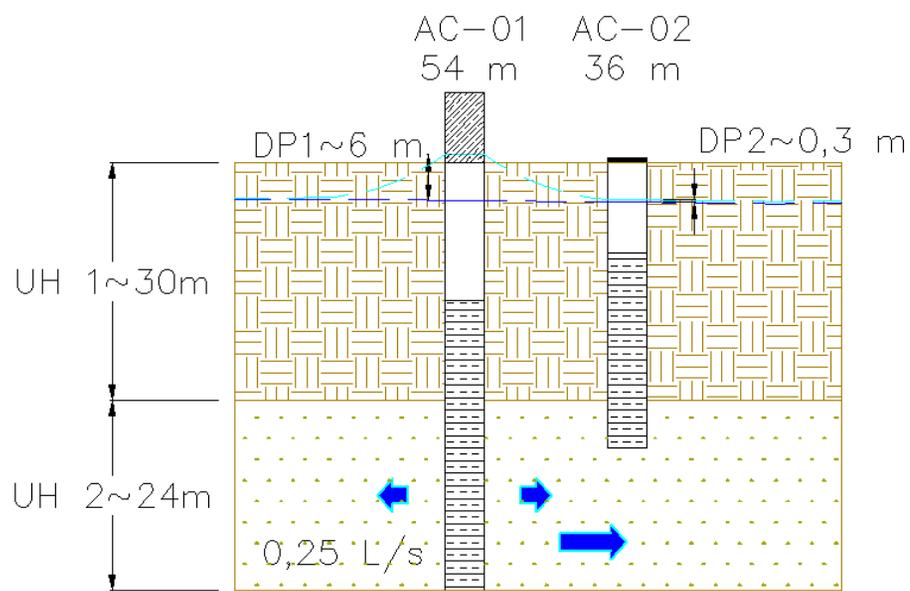
Las aguas en el sistema presentan una composición natural del tipo sulfatadas cálcicas y con conductividades eléctricas entre 0,5 y 2,0 mS/cm. Los análisis químicos realizados en distintas etapas del proyecto sugieren que tanto las aguas a infiltrar como las aguas subterráneas provienen de una misma fuente. Junto con lo anterior se infiere que las variaciones en calidad y concentraciones encontradas en el pozo de observación no son producidas por las pruebas de infiltración debido al reducido tiempo de las pruebas y la velocidad de transporte.

Las Figura 7-3 y Figura 7-4 resumen de forma gráfica el funcionamiento conceptual del sistema antes y durante las Pruebas de Infiltración. En ellas se muestra las unidades hidrogeológicas, los pozos con las cotas representativas, las variaciones en los niveles de las napas y los flujos de aguas subterráneas.

**Figura 7-3: Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA**



**Figura 7-4: Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA**



Nota: Acuífero confinado

DP1: Cambio en la cota piezométrica en el pozo AC-01

DP2: Cambio en la cota del pozo AC-02

### 7.3 EFECTO PROYECTADO EN LOS NIVELES DEL ACUÍFERO DE LA TERCERA SECCIÓN DEL RÍO ACONCAGUA

Para analizar los resultados de las pruebas se realizó un ejercicio de modelación que permite observar el efecto en los niveles del acuífero y en la red de drenaje para determinadas condiciones, para lo cual se desarrolló un modelo numérico a partir del modelo existente MODFLOW ACN 2013 (DICTUC, 2014). El nuevo modelo no fue calibrado es decir no se estimaron nuevamente los parámetros del acuífero en función de los niveles específicos de la zona de estudio. Sin embargo se debe recordar que este modelo corresponde a un subconjunto del modelo MODFLOW ACN 2013, y por lo tanto, mantiene su calibración original. Por lo anterior, este modelo puede ser utilizado sólo de manera referencial, es decir, es una estimación gruesa de los resultados esperados al realizar la recarga artificial a una escala mayor. Se debe recalcar que aun con estas limitaciones, el modelo es una herramienta que entrega resultados mucho más confiables que un típico análisis analítico, donde se deben realizar una gran cantidad de supuestos, que en muchos casos no se cumplen. Adicionalmente, un modelo numérico entrega el comportamiento en el tiempo esperado, a diferencia de los modelos analíticos, que generalmente entregan el resultado en régimen permanente.

Para la construcción del modelo, se adoptó una discretización espacial en vertical que considera tres capas. La discretización espacial en planta fue realizada con celdas cuadradas de 100 x 100 m. De esta forma el número total de celdas quedó en 854.400, de las cuales 161.176 están activas. Finalmente, la discretización temporal adoptada en el modelo fue mensual y se considera un periodo de simulación de 50 años.

Las propiedades de conductividad hidráulica, almacenamiento y la mayor parte de las condiciones de borde son las ya definidas en el modelo MODFLOW ACN 2013 (DICTUC, 2014), el cual corresponde a una extensión del modelo desarrollado para el estudio de DICTUC, 2009; que no contempla cambios en las propiedades hidráulicas del mismo.

El modelo también incorpora 3.686 pozos de extracción con caudales de extracción variables definidos por DICTUC (2014) según derechos de agua catastrados. El caudal de bombeo total varía entre 4.230 L/s y 17.456 L/s. Se agregaron condiciones de borde adicionales para definir el nivel del acuífero en la entrada del modelo (borde Este) y para aplicar la recarga artificial, en que se definió un área de 300 por 300 m donde se infiltra un total de 312 L/s durante 6 meses consecutivos al año. La zona de recarga se ubicó dentro del sector con mayor valor de aptitud definido en la metodología de evaluación (sector de Pochay a 700 m de distancia del río Aconcagua).

A partir los resultados de la modelación numérica (presentados en la sección 7.6 del Informe Final), es posible observar la variación del nivel del acuífero y de los flujos a través de las condiciones de borde por efecto de la aplicación de una recarga artificial estacional. Del análisis de los flujos a través de las condiciones de borde asignada para representar el río Aconcagua se observa que gran parte del caudal de recarga artificial se pierde a través del drenaje superficial desde el primer periodo de recarga, donde al primer mes de recarga el río capta 109 L/s de los 312 L/s recargados, pérdida que aumenta durante los siguientes meses. En el año 33 de la simulación se observa la mayor pérdida del caudal, donde al

sexto mes de recarga el río Aconcagua capta 267 L/s, es decir un 86% de la recarga artificial.

Estos resultados indican que en el sector seleccionado no es propicio para realizar recarga artificial de manera interanual, ya parte importante de los recursos infiltrados drenan hacia el río Aconcagua.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

En general se aprecia que el estudio cumple con los objetivos planteados en cuanto a la caracterización del acuífero estudiado, identificación de zonas de recarga y finalmente la realización de un Proyecto Piloto de Recarga Artificial de Acuíferos (PPRAA).

En un primer paso, los análisis realizados para caracterizar la cuenca, si bien permitió conocer de manera general el funcionamiento hidrogeológico del área de estudio, requiere de mayor detalle para realizar tanto un proyecto piloto de recarga artificial como un proyecto de recarga a nivel industrial. En este contexto es recomendable poseer antecedentes de detalle tales como: registro continuo de niveles por al menos 5 años, estratigrafía localizada en el área de estudio, entre otros.

Respecto a la metodología elaborada en este estudio para identificación de sitios, constituye una primera aproximación para la elección de lugares para realizar proyectos de recarga artificial. De acuerdo al estudio realizado, la metodología es adecuada para descartar áreas que no presentan condiciones apropiadas para desarrollar este tipo de proyectos. Se debe tener en cuenta que las variables con los rangos elegidos y su ponderación en el cálculo del valor de aptitud se obtienen de los antecedentes recopilados con ocasión de este estudio y debiesen ser revisados aplicándolos en una mayor cantidad de cuencas.

Al evaluar la metodología en la cuenca del área de estudio se obtiene que más de un 95% del área utilizable (relleno) presenta valores de aptitud medios a bajos. Por lo que se estima que en general, la cuenca no es apropiada para proyectos de recarga artificial. La aptitud del sector elegido para realizar el piloto (las Palmas) coincide con la aptitud que presenta la mayor parte de la cuenca. Este sitio fue seleccionado debido a que no se encontraron lugares disponibles con una mejor aptitud y con profundidad de la napa freática apropiada para realizar recarga artificial. Por otro lado, el sitio que pertenece a la UCV ofreció ventajas administrativas y estratégicas.

Dado el trabajo en conjunto realizado por diversas instituciones, se observó que resulta fundamental realizar este tipo de proyectos trabajando en conjunto con las asociaciones de regantes que son las que administran los recursos. Esto cobra mayor relevancia en los ámbitos de disponibilidad, ya que resulta difícil estimar los recursos efectivamente disponibles a nivel predial, debido a que en general no existe información de aforos a

través del tiempo en los canales matrices y menos aún en canales que son ramales de un canal más importante.

Respecto al diseño del piloto de recarga artificial, el cual fue en base a un pozo de infiltración, se consideró apropiado para la información con que se contaba al momento de su construcción y a los recursos disponibles. En caso de haber contado con mayores recursos o bien con un pozo de exploración en el sitio, se hubiese privilegiado una habilitación para realizar recarga a presión.

De la operación de las pruebas de infiltración del proyecto piloto se obtiene que la capacidad de infiltración del acuífero es reducida, ya que sólo se logra infiltrar un caudal medio de 0,25 L/s, utilizando un pozo de infiltración de 54 m de profundidad. Esto se debe principalmente a la baja conductividad hidráulica que presenta la formación en el lugar de emplazamiento de las obras.

De acuerdo al resultado del estudio se puede concluir que, en particular, en el predio de la UCV es posible realizar recarga artificial mediante pozos de infiltración, en la parte más baja del campo, cerca de los actuales pozos de producción. Sin embargo, se debe evaluar el costo beneficio y además se debe considerar que los pozos deben ser diseñados para funcionar bajo presión, ya que existe una capa de baja conductividad hidráulica en los primeros metros.

Adicionalmente, no se puede descartar a priori la utilización de los métodos de infiltración analizados en este proyecto (balsa, pozo libre, pozo a presión, infiltración en canal, infiltración en quebradas) en otros sectores de la cuenca en estudio. Sin embargo, para ello se debe realizar un estudio hidrogeológico de detalle que permita identificar los predios donde se puede realizar y tipo de método a utilizar.

Del modelo numérico desarrollado se obtiene que la infiltración simulada para las condiciones impuestas no se retiene en el acuífero por más de 1 mes a partir del inicio de la recarga. Esto pone en duda la factibilidad de realizar la extracción de los volúmenes infiltrados de manera interanual, y por tanto la efectividad de realizar recarga artificial en la cuenca debido a que la zona de recarga utilizada constituye el lugar con mayor aptitud de acuerdo al análisis realizado. Se debe considerar que los resultados obtenidos son una estimación gruesa de los efectos esperados. Para contar con resultados más precisos se requiere un modelo con información de detalle de las condiciones hidrogeológicas para evaluar el tiempo real en que el agua es retenida en el acuífero y la ubicación de las zonas de recarga y extracción. Sin perjuicio de lo anterior se debe señalar que la construcción de un modelo numérico es la mejor herramienta para realizar la evaluación del efecto, ya que es más precisa y entrega resultados en el tiempo, en comparación con los típicos modelos analíticos utilizados comúnmente.

## 8.2 RECOMENDACIONES

La factibilidad de la recarga dependerá en gran medida de localizar sitios con mejores tasas de infiltración, con una profundidad de la napa adecuada y con disponibilidad de recursos superficiales, considerando que de acuerdo a la metodología desarrollada en este estudio, esta cuenca posee poca aptitud para desarrollar proyectos de recarga a escala industrial, para ello se tiene en cuenta lo siguiente:

- Se recomienda privilegiar la elección de sitios que posean la más alta aptitud según la metodología desarrollada en el presente estudio, ya que esta se basó en información hidrogeológica recopilada en el área de estudio, con buen nivel de detalle.
- Se recomienda realizar un estudio que permita determinar de forma precisa la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales que no se estén aprovechando durante los meses con menor demanda hídrica de los cultivos (típicamente los meses de invierno donde ocurren las mayores precipitaciones). Esto permitirá mejorar la metodología para elegir el sitio, ya que se podrá estimar el volumen total disponible para la recarga artificial.
- Se espera que en el futuro los proyectos de recarga realicen el diseño del sistema de infiltración después de haber realizado todos los trabajos de terreno, incluyendo la perforación de pozos exploratorios que permitan obtener muestras inalteradas de suelo. Esto permitirá corroborar las aptitudes del sitio, preparar un diseño especial o bien buscar otro sitio con mejores cualidades para el proyecto de recarga.
- Se recomienda realizar pruebas exploratorias en otros sectores, los cuales podrían incluir el sector de Pochay o el sector donde confluyen el río Aconcagua con el estero Rabuco, para determinar si son alternativas apropiadas para realizar pruebas de infiltración con características similares a las del proyecto PPRAA.
- A nivel de cuenca se recomienda probar a escala predial la utilización de diferentes métodos, como infiltración en canales cuando estos se encuentran en desuso (invierno), diques transversales en quebradas, más los métodos analizados en el presente trabajo. Para la realización se requiere un análisis de la hidrogeología de detalle, de modo de poder definir el tipo de método a utilizar.

## 9 GLOSARIO DE TÉRMINOS

**As Built:** Terminología en inglés para referirse a una obra que ya está terminada. Se utiliza para identificar planos.

**Bailer:** Instrumento utilizado para tomar muestras de agua de un pozo, compuesto por un tubo con una bola en su interior, la cual permite el ingreso de agua y posteriormente impide su salida, haciendo posible de esta manera que se pueda extraer la muestra del pozo. Una vez que el muestreador llega al nivel de la capa freática, se levanta la bola del orificio de entrada, dejando entrar el agua en el muestreador. Cuando se retira el muestreador, la presión de la columna de agua desplaza la bola hacia abajo, cerrando la apertura de forma estanca, permitiendo de esta manera sacar la muestra del pozo.

**Casing:** Tubería de acero utilizada para revestir un pozo. Esta tiene múltiples usos durante la construcción de un pozo, las más comunes son instalarla en forma definitiva como parte de la habilitación o provisoriamente durante la perforación para afirmar las paredes del pozo. El casing puede ser ciego o ranurado dependiendo de para que se va a utilizar.

**In Situ:** Terminología del latín que se refiere a “en el lugar”.

**Sistema de rotopercusión con entubación simultánea:** Sistema de perforación en el cual se va instalando la tubería de habilitación definitiva del pozo a medida que se va perforando. Este método constructivo no considera la utilización de cribas ni engravillado del pozo.

**SIG:** Sistema de Información Geográfica (SIG en español/ GIS en Inglés)

**Stick up:** Tramo de la habilitación de un pozo que sobresale de la superficie del terreno. Generalmente mide entre 0,5 y 1m de largo.

**Swabbing:** Acción de utilizar un pistón (swab) para desarrollar un pozo.

**Symetrix:** Tubería ciega que sostiene la herramienta de perforación cuando se perfora con sistema de rotopercusión con entubación simultánea y que queda en el fondo del pozo construido una vez que se alcanza la profundidad objetivo y se da por finalizada la perforación del mismo.

**Set A y Set B:** Conjunto de analitos para ser medidos en el laboratorio. En el presente estudio se han considerado dos conjuntos o set, los cuales presentan distintos análisis (set A y set B). El detalle se presenta dentro del informe.

## GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

AC-01: Pozo de infiltración

AC-02: Pozo de monitoreo más cercano al de infiltración

CE: Conductividad Eléctrica

CNR: Comisión Nacional de Riego

CORFO: Corporación de Fomento de la Producción

Datalogger: Dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo por medio de instrumentos y sensores propios o conectados externamente.

Der: Derecha

DGA: Dirección General de Aguas

DICTUC: Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile

DO: Oxígeno Disuelto

DOH: Dirección de Obras Hidráulicas

DQO: Demanda Química de Oxígeno

DS N°90: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales

d: día

Flange: Elemento que une dos componentes de un sistema de tuberías gracias a una circunferencia de agujeros a través de los cuales se montan pernos de unión.

GeoH: GeoHidrología Consultores

Izq.: Izquierda

K: Conductividad hidráulica [m/d]

m: metros

mca: metros columna de agua

MOP: Ministerio de Obras Públicas

NCh. 1333: Norma Chilena sobre requisitos de calidad de agua para diferentes usos

NCh 409: Norma calidad de agua potable

ND: Nivel Dinámico

NE: Nivel Estático

NTU: Unidades Nefelométricas de turbidez (del inglés: Nephelometric Turbidity Unit)

OIRS: Oficina de informaciones, reclamos y sugerencias

OM: Orden de Magnitud

P1: Pozo de producción UCV que se encuentra a 890 m de AC-01

P2: Pozo de producción UCV que se encuentra a 970 m de AC-01

PFQ: Parámetro Físico Químicos

PGC: Prueba de Gasto Constante

PGV: Prueba de Gasto Variable

pH: Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa

PPRAA: Prueba Piloto Recarga Artificial de Acuíferos

S: Coeficiente de Almacenamiento

T: Transmisividad

T°: Temperatura

TDS: Sólidos Disueltos Totales (del inglés Total Dissolved Solids)

UCV: Universidad Católica de Valparaíso

UH1: Unidad Hidrogeológica 1

UH2: Unidad Hidrogeológica 2

VA: Valor de Aptitud

VC: Valor del Parámetro del Agua del Canal

VP: Valor del Parámetro del Agua en el Pozo

Wiseaces: Plataforma online de entrega de datos en línea

Wisebox: Marca de sistema de medición telemétrica compuesta por cable, módulo gabinete y resistencia