



ESTUDIO BÁSICO “ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL CHACABUCO-POLPAICO”

RESUMEN EJECUTIVO

Santiago, marzo de 2015



ESTUDIO BÁSICO “ANÁLISIS ALTERNATIVAS PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL CHACABUCO-POLPAICO”

RESUMEN EJECUTIVO:

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	OBJETIVOS.....	6
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.3	ÁREA DE ESTUDIO	7
2	METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO.....	8
3	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y FUENTES DE RECARGA A NIVEL DE CUENCA.....	10
3.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA.....	10
3.2	METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA ARTIFICIAL.....	11
3.2.1	Fase I.....	11
3.2.2	Fase II.....	11
3.3	APLICACIÓN DE METODOLOGÍA EN ÁREA DE ESTUDIO	12
4	IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA Y SELECCIÓN DE SITIO.....	14
4.1	RESULTADOS.....	14
4.1.1	Sector Casas de Chacabuco	14
4.1.2	Sector El Colorado.....	16
4.1.3	Sector Huechún	16
4.2	MEDICIÓN DE CALIDAD DE AGUAS.....	19
4.2.1.1	Resultados de análisis de laboratorio	19
4.3	SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL	20
5	ANÁLISIS LEGAL.....	22
5.1	ANÁLISIS LEGAL Y AUTORIZACIONES.....	22
5.2	CONVENIO DE COLABORACIÓN	23

6	DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL	23
6.1	PERFORACIÓN DE POZOS	25
6.2	MEDICIÓN DE VARIABLES	26
6.3	COSTOS.....	26
7	REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
7.1	DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO	28
7.2	OPERACIÓN DEL SISTEMA PPRAA	29
7.2.1	Calidad química	31
7.2.2	Análisis de la operación del sistema.....	33
7.3	EFFECTO PROYECTADO EN LOS NIVELES DEL ACUÍFERO.....	35
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
8.1	CONCLUSIONES	37
8.2	RECOMENDACIONES	38
9	GLOSARIO DE TÉRMINOS	40

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1: Evaluación de los sitios (Fase II).....	13
Tabla 4-1: Análisis crítico de sitios escogidos en la cuenca de Chacabuco-Polpaico.....	21
Tabla 6-1: Cuadro resumen de medición de variables.	27
Tabla 7-1: Resumen Pruebas de Infiltración	29

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Ubicación del área de estudio.....	7
Figura 2-1: Metodología general de trabajo	9
Figura 3-1: Propuesta de sitios potenciales para un PPRAA, Chacabuco-Polpaico	12
Figura 4-1: Estratigrafía y habilitación de pozo Corfo N° 18 Hacienda Chacabuco, sector Este Casas de Chacabuco	15
Figura 4-2: Estratigrafía del pozo Corfo N° 92 Hacienda Huechún-Polpaico, Huechún.....	17
Figura 4-3: Estratigrafía del pozo Corfo N° 643 Hacienda Huechún-Polpaico, Huechún.....	18
Figura 6-1. Vista en planta del diseño del sistema de infiltración	24
Figura 6-2. Diagrama de ubicación equipos de medición.....	26
Figura 7-1. Caudales y profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-01	30
Figura 7-2: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-02	30
Figura 7-3: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-03	31
Figura 7-4. Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA	34
Figura 7-5. Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA	35

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. 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 acuífero 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.

El sector acuífero de Chacabuco-Polpaico, en la región Metropolitana, fue declarado como área de restricción por la DGA para nuevas extracciones de aguas subterráneas mediante resolución N°286 del 1 de septiembre de 2005. Por este motivo la Comisión Nacional de Riego (CNR) considera relevante entender el sistema subterráneo, para la identificación de sitios potenciales de recargar artificial y el desarrollo de pruebas técnicas.

En este contexto, la CNR encargó a GeoHidrología Consultores Ltda. (GeoH) desarrollar un estudio de recarga artificial de acuífero de la subcuenca de Chacabuco-Polpaico. Este estudio de recarga artificial incluye la evaluación de posibles zonas y métodos de infiltración, junto a la implementación del proyecto piloto y análisis de resultados en la subcuenca de Chacabuco-Polpaico, provincia de Chacabuco, Región Metropolitana.

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 la recarga artificial. La aplicación de la metodología dio como resultado que el sector Casas de Chacabuco es el sitio más apto para el emplazamiento del proyecto.

Luego de la realización de trabajos en terreno preliminares, se perforaron pozos de observación, a partir de los cuales se obtuvo información estratigráfica local, con la cual se validó el pre-diseño del sistema. Además se desarrollaron pruebas de 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 de: 1) un canal de aducción, 2) un decantador, 3) un dispositivo de medición, compuesto por un cajón aforador y una cámara de infiltración, 4) un pozo de infiltración, 5) un canal de rebose y 6) dos pozos 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, durante la ejecución del proyecto, evaluar el efecto de la recarga sobre la calidad química del acuífero.

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. En particular se realizaron una serie de experiencias de infiltración, con caudales variables hasta 3,3 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 de este estudio es caracterizar de mejor forma el acuífero de Chacabuco-Polpaico, identificar posibles zonas de recarga artificial y finalmente realizar un Proyecto Piloto de Recarga Artificial de Acuíferos (PPRAA). Para llevar a cabo este proyecto piloto, se realizó la construcción de obras de infiltración, la realización de las pruebas de infiltración y se analizaron sus resultados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, este estudio busca:

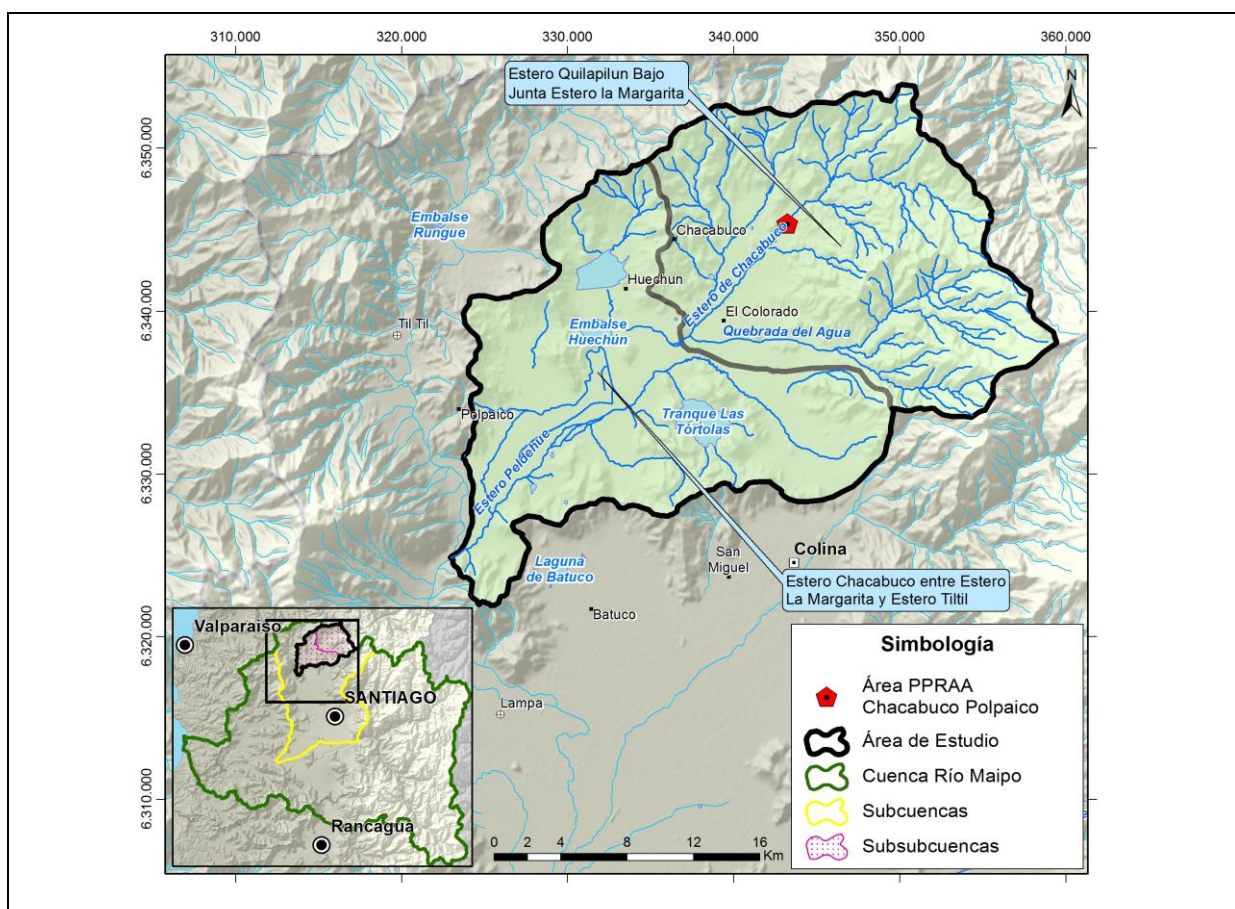
- Analizar la información topográfica, geomorfológica, edafológica, geológica, hidrológica e hidrogeológica existente para la identificación de sitios de emplazamiento para dos PPRAA,
- Identificar la disponibilidad de aguas superficiales para las pruebas de recarga del piloto y estudiar la viabilidad legal de su utilización,
- Determinar la compatibilidad de la calidad del agua superficial a recargar con la del acuífero receptor,
- Identificar zonas potenciales de recarga y seleccionar el sitio para el PPRAA,
- La confección de la metodología para la recarga artificial del sistema, incluyendo el diseño de obras necesarias para la construcción y buen funcionamiento del piloto, además del procedimiento de las pruebas a efectuar, considerando las condiciones hidrogeológicas existentes,
- Determinar las constantes elásticas del acuífero a recargar,
- Diseñar las obras hidráulicas necesarias para el desarrollo del PPRAA,
- 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,
- Realizar las experiencias en el PPRAA,
- Determinar las tasas de infiltración en el PPRAA,
- Evaluar el impacto proyectado a los niveles estáticos del acuífero en estudio,
- Generar conclusiones y recomendaciones para un eventual Proyecto de Recarga Artificial de mayor escala en la zona.

1.3 ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica en la cuenca del río Maipo, en la subcuenca Mapocho Bajo, específicamente en las sub-subcuencas definidas por la Dirección General de Aguas (DGA): Estero Quilapilún Bajo Junta Estero La Margarita, ubicada al noreste del área y Estero Chacabuco entre Estero La Margarita y Estero Til Til, ubicada al suroeste del área. (Figura 1-1).

Desde el punto de vista administrativo, el área de estudio se ubica en la Región Metropolitana, provincia de Chacabuco, a unos 35 km al norte de Santiago, comprendiendo una superficie total de 654 km². Se ubican algunos poblados importantes como Chacabuco, El Colorado y Huechún (Figura 1-1).

Figura 1-1: Ubicación del área de estudio



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

2 METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

El estudio Prueba Piloto Recarga Artificial del acuífero de Chacabuco-Polpaico 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. Etapas 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. Etapas 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 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,
 - Desarrollo de metodología para la recarga artificial del sistema: contempla las pruebas a realizar durante la operación del proyecto.

3. Etapas 3:

- Perforación de pozos: La construcción comenzó con la perforación de los pozos y con el análisis estratigráfico local. Además se hicieron pruebas de infiltración para determinar las constantes elásticas del acuífero,
- Re-diseño PPRAA: La información obtenida validó el pre-diseño de forma general y se aumentó ligeramente la profundidad de los pozos,
- Construcción de obras: Construcción de obras hidráulicas del sistema de infiltración, tales como: toma, canales de aducción, decantador, sistema de medición (cajón aforador y cámara de infiltración), canal de desagüe. Instalación

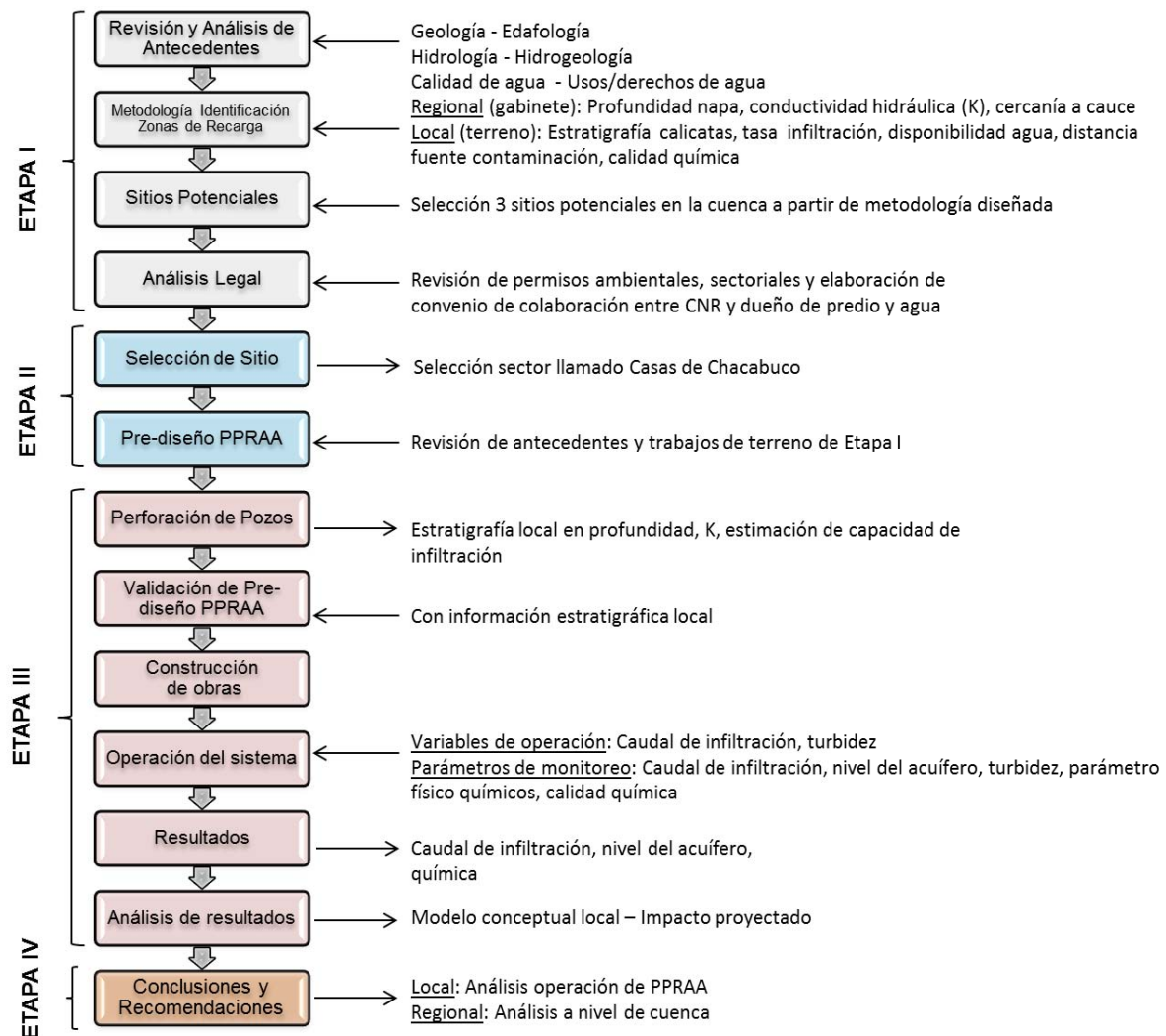
de equipos de instrumentación del sistema (transductores de presión, turbidímetro),

- 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

En este capítulo se recopilaron y analizaron los antecedentes técnicos que fueron utilizados en la confección de este estudio. También se presenta un resumen de la 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 de para evaluar los efectos. La información edafológica no tiene relevancia práctica respecto de este tipo de proyectos.

Respecto de la información relevante se debe indicar que en términos generales la información disponible es insuficiente para realizar una buena caracterización hidrogeológica, especialmente en términos de la geología subsuperficial, profundidad del acuífero y propiedades hidráulicas. Respecto de la geología subsuperficial, no existe un entendimiento de la geometría y composición de los distintos estratos del subsuelo. Respecto de la información de profundidad y nivel de la napa, existe poca representatividad espacial, ya que la DGA sólo cuenta con 16 pozos en todo el acuífero, dejando amplias e importantes zonas sin información, están todos ellos ubicados cercanos a la red de drenaje. Más aun cuando se requiere trabajar a una escala menor, como por ejemplo para diseñar sistemas de infiltración, prácticamente no existe información y 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 acceso para toma de datos. La extensión temporal de la serie de niveles es adecuado ya que en muchos de ellos cuentan con 20 años o más de registros. Respecto de la información de parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y coeficiente de rendimiento específico), prácticamente no existe información que esté sistematizada y analizada que permita caracterizar el acuíferos por sectores o capas. En efecto, se tiene sólo un valor referencial para todo el acuífero y no se hace diferencia de este valor en profundidad.

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, considerando adicionalmente algunas variables de carácter local y específico de los sitios. 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:

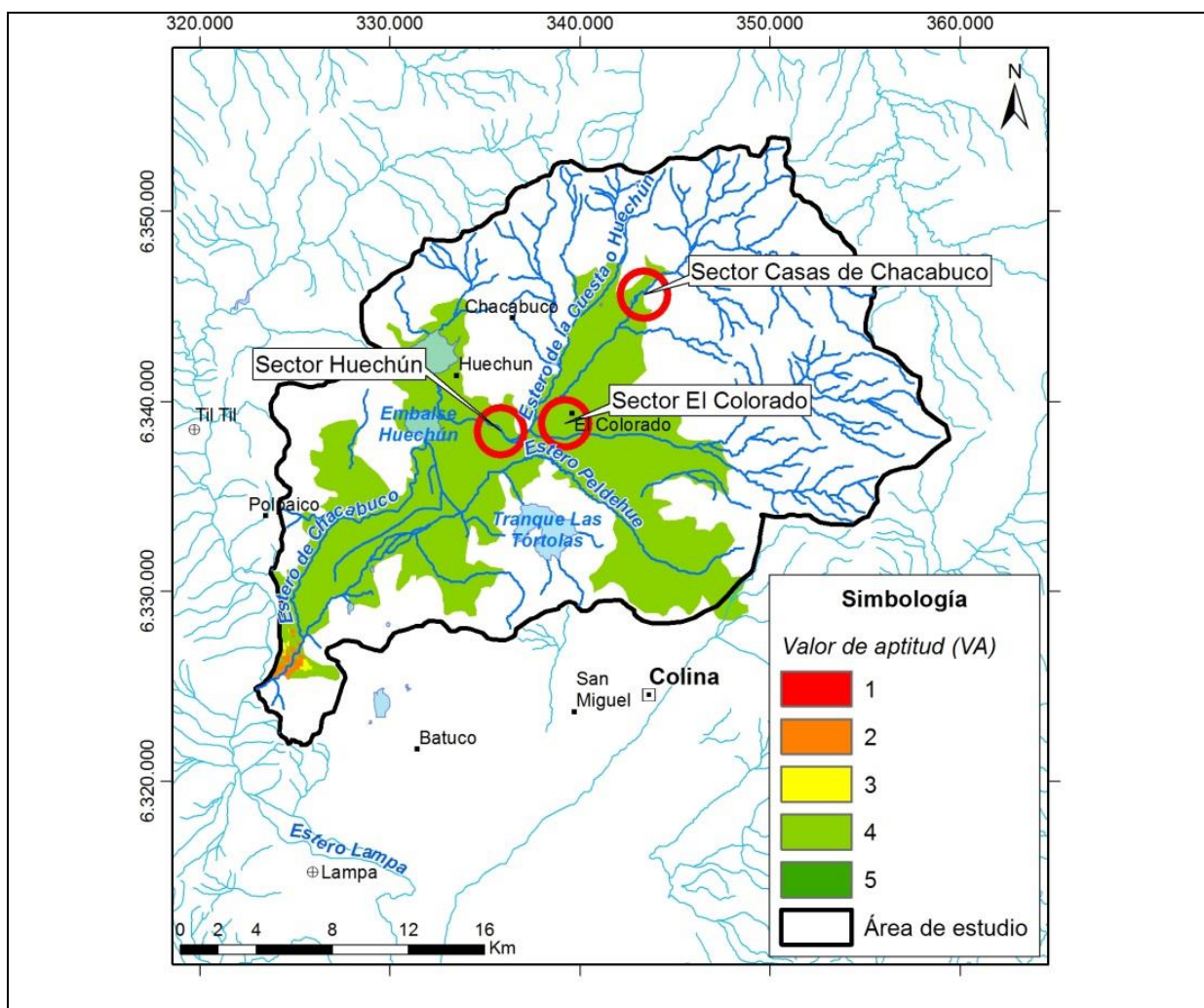
- i) Cercanía a la fuente de agua para realizar la recarga. Se consideró con valor positivo cuando la fuente se encuentre a una distancia menor a 100 m,
- ii) Disponibilidad de terreno para realizar el proyecto de recarga artificial,
- iii) Disponibilidad de derechos sobre la fuente para realizar las 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 mayor parte del área de estudio presenta un VA bueno (4) y sólo una fracción menor en la salida de la cuenca presenta VA medio (3) y bajo (2).

Figura 3-1: Propuesta de sitios potenciales para un PPRAA, Chacabuco-Polpaico



Fuente: Elaboración propia

Se realizaron indagaciones en terreno dentro de las zonas del área de estudio con un valor de aptitud mayor a 3 (Verde y amarillo en la Figura 3-1). Estos sectores fueron visitados y se pre-seleccionaron 3 sitios específicos con potencialidad para desarrollar la PPRAA. 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				
		Cercanía a fuente de agua	Disponibilidad		Lejanía a fuente de contaminación	Resultado
			Terreno	Derechos		
Juan Alessandrini	Huechún	1	1	1	1	Apto
Sebastián Lira	Casas de Chacabuco	1	1	1	1	Apto
Mario Basualto	Colorado	1	1	1	0	No apto

Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar, que la metodología regional permitió identificar zonas potenciales de recarga artificial, y actuó como un primer filtro sobre el cual se debe recabar más información para determinar si los sectores pre-seleccionados 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, que se condicen con los trabajos de terreno desarrollados de manera posterior. Adicionalmente ha sido probada en más de una cuenca (Lontué, Aconcagua, Chacabuco-Polpaico, Popeta y Puangue), con buenos resultados.

La metodología en si misma tiene la virtud que es fácil de implementar teniendo un sistema de información geográfica. 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 Casas de Chacabuco

Los resultados de los ensayos de infiltración en el sector de Casas de Chacabuco indican una permeabilidad baja en el suelo superficial y a 3,5 m de profundidad (aproximadamente 0,2 m/d), lo que muestra la baja capacidad de infiltración del suelo vegetal y de la capa de arena arcillosa respectivamente. A 0,5 m de profundidad (la parte alta de la capa de arenisca arcillosa) la tasa de infiltración mejora a 1,7 m/d, valor que se califica como buena permeabilidad.

Según el análisis estratigráfico realizado para el sector Casas de Chacabuco, este sector presenta un predominio de material arcilloso en los primeros 35-40 m bajo la superficie. Específicamente, el pozo Corfo N° 18 Hacienda Chacabuco (Figura 4-1), aproximadamente 1 km al sureste de las calicatas muestra 34 m de arcilla bajo los cuales se disponen arenas que albergarían el acuífero.

La información anterior indicaría que la capa de arenisca arcillosa a arcilla arenosa identificada en las calicatas se podría extender hasta los 34 m de profundidad. Según comunicación personal del dueño del predio, Rodrigo Andai, esta potente capa de arcilla disminuiría en espesor desde la zona del pozo hacia el sector de las calicatas (de sur a norte).

0.00 terreno gredoso con bolones

7.00 greda con ripio

12.00

N.E. 17 m (2009-2013)

greda con arena de 2mm

34.00 arena gruesa

35.00

arena fina gris de 0.5 mm.

45.00

47.50 greda arenosa con ripio

arena gruesa algo gredosa

54.00

56.00 arena fina

59.50 greda con arena y ripio

φ 10"

N.E. 11.80 (1951)

N.E. 30 m (2014)

P 84: 32.63

Z 1011: 33.08

replanteado en 8110

50.40

Z 80: 50.83

relleno con carbón

2014-216
RESUMEN EJECUTIVO

4.1.2 Sector El Colorado

Los resultados de los ensayos de infiltración en el sector de El Colorado indica una permeabilidad baja para todos los niveles medidos. Estos son 0,10 m/d para la capa vegetal superficial, 0,21 m/d para la arena gravosa y 0,11 m/d para la arcilla limosa en el fondo de la calicata.

El análisis estratigráfico realizado para el sector El Colorado indica que los primeros 42 m desde la superficie están dominados por arcilla con un par de intercalaciones de 2 m de arena y ripio. Bajo los 42 m se observa una capa de 13 m de arena gruesa que probablemente corresponde al acuífero.

Lo anterior indicaría que la capa de arcilla limosa identificada a partir de los 1,1 m en la calicata 1, se podría extender hasta los 42 m de profundidad.

4.1.3 Sector Huechún

Los resultados de los ensayos de infiltración en el sector de Huechún indican una permeabilidad media. El nivel superficial de suelo vegetal presenta un valor de 1,21 m/d, mientras que la grava arenosa a 1 m de profundidad presenta una permeabilidad mayor de 4,81 m/d. Por último, la misma capa a 2 m de profundidad disminuye su permeabilidad a 2,07 m/d.

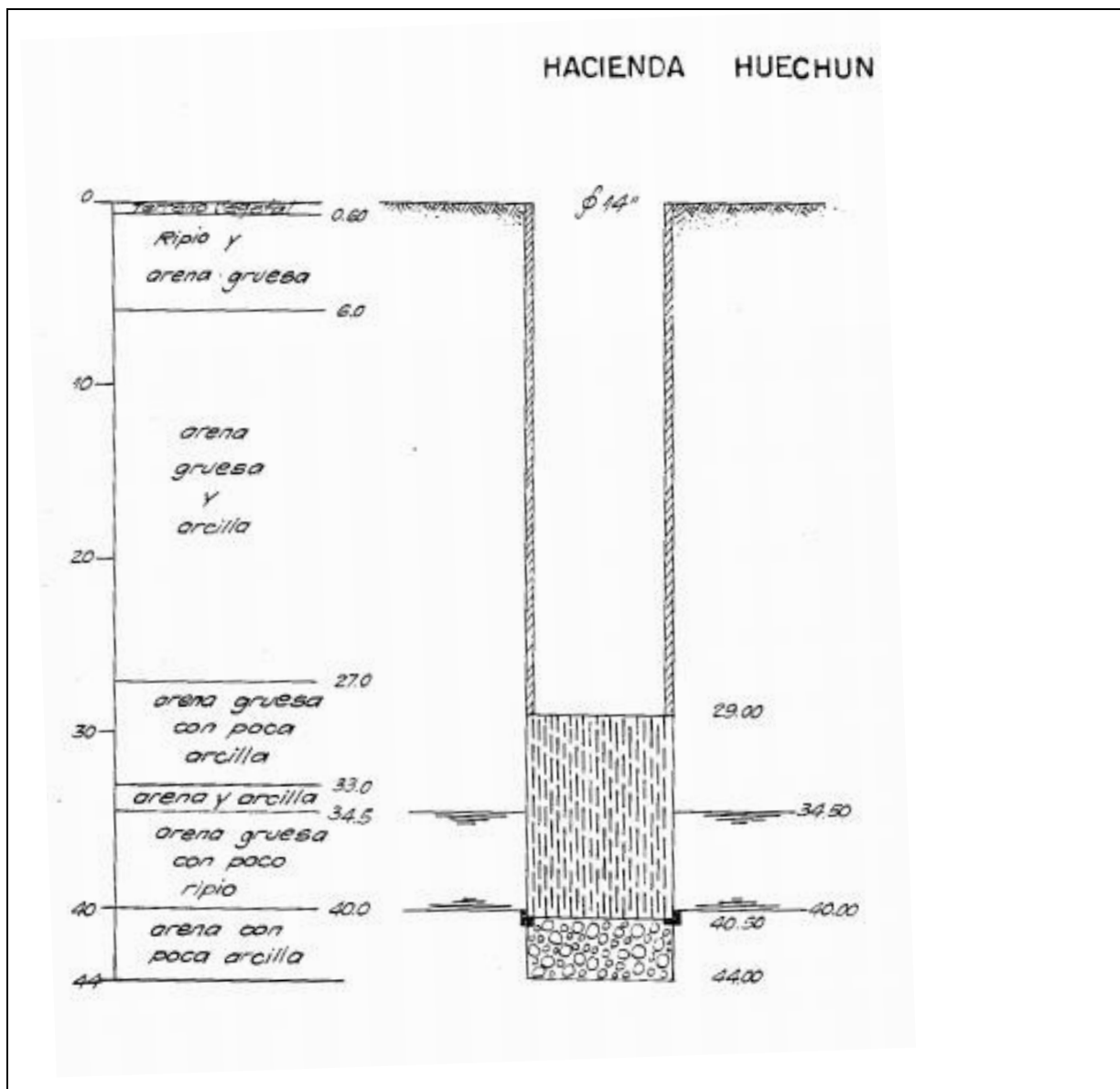
Las calicatas excavadas en el sector de Huechún están localizadas a pocos metros de un curso de agua esporádica que se activa durante el invierno. Por lo tanto, grava arenosa encontrada en gran parte de las calicatas correspondería a depósitos aluviales, depositados por un curso de agua esporádico, durante eventos estacionales, de gran precipitación.

Esta hipótesis es corroborada por la estratigrafía del pozo Corfo N° 92 Hacienda Huechún-Polpaico (Figura 4-2), ubicado a 700 m al este-sureste de las calicatas. Este pozo muestra en sus primeras capas superficiales 60 cm de suelo infrayacido por 5,4 m de ripio y arena gruesa, una estratigrafía muy similar a la encontrada en las calicatas. En consecuencia se deduce que la capa de grava arenosa presente en las calicatas podría alcanzar un espesor de al menos 5 m.

Por otra parte, a 1200 m al sureste del sector de las calicatas (500 m al sur de la quebrada), la estratigrafía del pozo Corfo N° 643 Hacienda Huechún-Polpaico (Figura 4-3) muestra que la capa superior de 5 m de ripio y arena ha desaparecido, siendo reemplazada por 4 m de suelo vegetal subyacente por una capa de ripio y arcilla de 13 m de espesor.

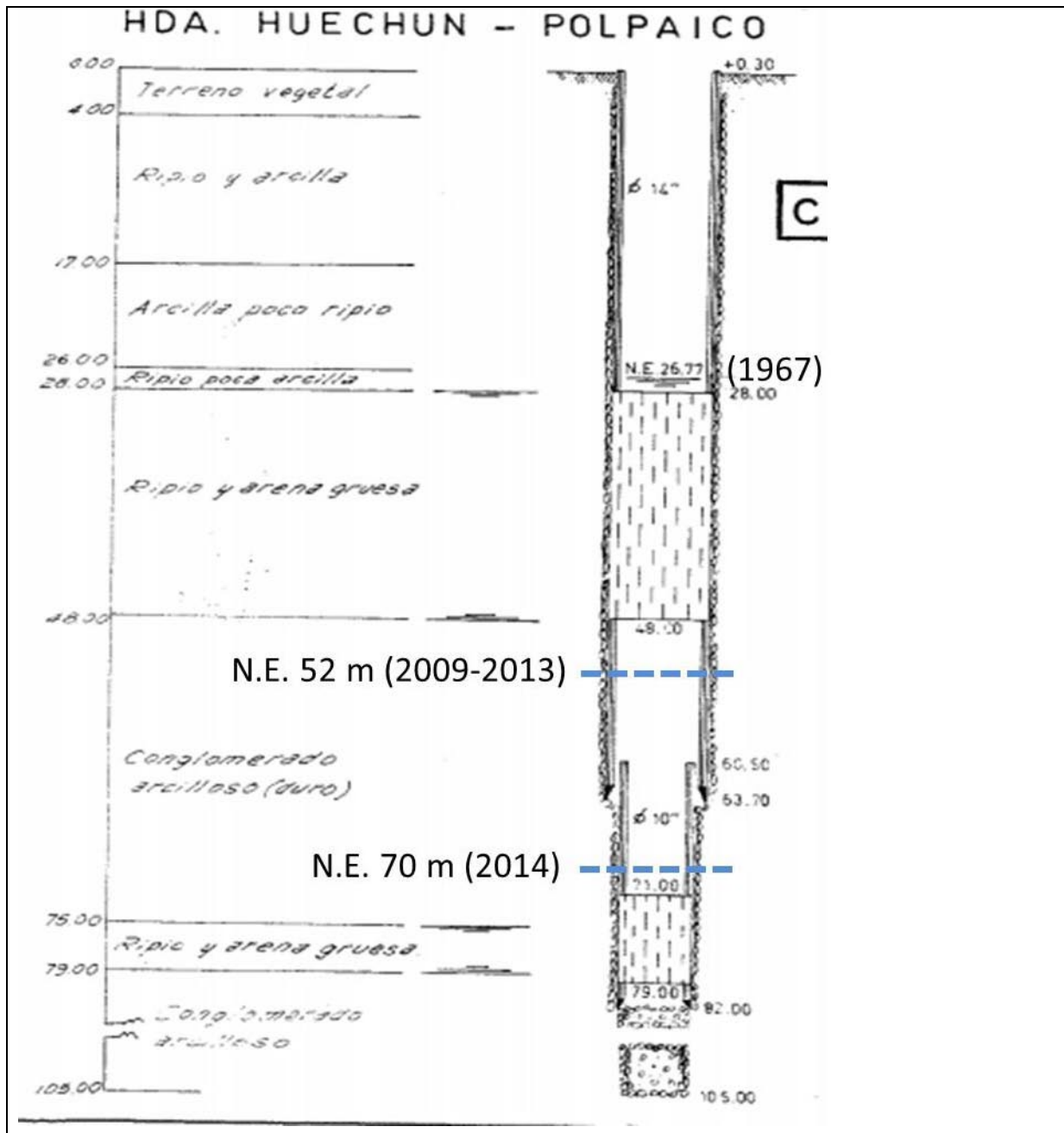
Lo anterior indicaría que la capa de ripio y arena gruesa identificada bajo el suelo vegetal tendría un espesor aproximado de 5 m en la zona de la calicata y desaparecería a 1200 m hacia el sureste, además la capa de ripio y arena gruesa tendría una capa subyacente menos permeable.

Figura 4-2: Estratigrafía del pozo Corfo N° 92 Hacienda Huechún-Polpaico, Huechún



Fuente: CIREN

Figura 4-3: Estratigrafía del pozo Corfo N° 643 Hacienda Huechún-Polpaico, Huechún



Fuente: CIREN

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 validan que el agua a infiltrar no afectará 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 dos 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, 2) nitratos con la NCh N° 409 y 3) DBO₅ y sólidos suspendidos totales con el DS N°90.

4.2.1.1 Resultados de análisis de laboratorio

En la cuenca de Chacabuco se analizaron 11 muestras, 3 en el sector de El Colorado, 5 en el sector de Casas de Chacabuco (incluyendo una laguna) y 3 en el sector de Huechún.

El análisis de los resultados para propósitos de la recarga artificial de acuífero incluye dos criterios:

- 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).

El primer criterio tiene como objetivo revisar que el agua que va a ser infiltrada se encuentre referencialmente bajo una Norma, mientras que el segundo criterio apunta a verificar que el agua que va a ser 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.

Según los resultados, las aguas superficiales más aptas para recarga artificial, en términos de calidad sería el canal en el sector de Chacabuco, ya que la muestra cumple con los 2 criterios evaluados, sólo con excepción de coliformes fecales.

Por otra parte las aguas superficiales en los sectores de Huechún, el Colorado y el agua de la laguna existente en el sector casas de Chacabuco, no cumplen con todos los parámetros evaluados, ya que superan los valores de DBO_5 , nitratos, sulfatos entre otros.

Para el caso de los coliformes fecales, se puede mencionar que según estudios de transporte y sobrevivencia de coliformes fecales, gran parte de estas bacterias serían inactivadas al entrar en contacto con el acuífero. El parámetro de 130 NMP/100 ml en el canal de Casas de Chacabuco (CH-C2) decaería a 1 NMP/100 ml en 5 días, llegando a valores aceptables por la norma chilena de agua potable (NCh. N° 409). Además de esta disminución por medio de su inactivación, es de esperar que una fracción de los coliformes sean filtrados por la parte no saturada del suelo.

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

4.3 SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL

En la Tabla 4-1 se presenta un resumen de las principales características de los 3 sitios evaluados durante la ejecución del proyecto, donde se aprecia que el sitio Casas de Chacabuco presentó las mejores aptitudes para realizar el PPRAA de entre los 3 sitios propuestos, ya que el dueño del predio presentó buena disposición, además el sector posee espacio libre, una fuente de agua cercana y se ubica en la cabecera de la cuenca. Adicionalmente, se observa que los otros dos sitios también son adecuados para la realización PPRAA.

Tabla 4-1: Análisis crítico de sitios escogidos en la cuenca de Chacabuco-Polpaico

Sitios identificados y contactados	Sebastián Lira (Casas de Chacabuco)	Juan Alessandrini (Huechún)	Mario Basualto (El Colorado)
Aptitud del sitio de acuerdo a metodología	Alta	Alta	Alta
Observaciones	Este sitio se ubica en una zona donde existe terrenos sin uso, con una fuente de agua en altura correspondiente a un ramal del canal Chacabuco, en una de las zonas más altas de la cuenca de Chacabuco	Este sitio se ubica en la zona intermedia del área de estudio, existe espacio para desarrollar las pruebas pero poca seguridad hídrica	Propietario posee 14 acciones del canal Chacabuco, sin embargo está en duda la disponibilidad del agua
Pros	- Sitio ubicado en la parte alta de la cuenca - Amplio terreno sin uso - Dueños de los derechos de agua se ubican aguas abajo del sitio, luego podrán aprovechar el agua almacenada en sus predios	- Sitio amplio y resguardado - Sitio ubicado a un costado del canal Chacabuco - Dueño del predio y del agua es presidente de la Asociación de Canallistas de Chacabuco - Nivel de la napa actual profundo	- Nivel de la napa actual profundo
Contras	- Alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua - Es necesario negociar la entrega de derechos con más de 1 persona	- Alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua - Dueño no está muy convencido de la utilidad del proyecto	- Predio pequeño - Dudas respecto de seguridad para las obras
Visión de largo plazo	Cuenca de Chacabuco posee buenas condiciones para el desarrollo de proyectos de recarga artificial de acuíferos. Posee permeabilidad adecuada, un acuífero altamente deprimido, una zona no saturada potente, un angostamiento del valle en la zona media que serviría para bombear el agua almacenada. Sin embargo existe alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua. Este proyecto sería mucho más atractivo si se trajera más agua desde otra cuenca para almacenarla en este valle.		

De acuerdo al análisis estratigráfico en los sectores propuestos, al análisis de pruebas de infiltración realizados in situ, a un análisis estratégico sostenido en conversaciones con la CNR, y a la validación química realizada conforme a los resultados del muestreo de agua superficial y subterránea, se escogió el sector Casas de Chacabuco.

5 ANALISIS 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 el 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 ANALISIS 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 Código de Aguas, que regula los permisos necesarios requeridos por proyectos asociados al recurso hídrico (Permisos Sectoriales) y el DS. 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 de 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. Así, para las pruebas piloto de la envergadura de las ejecutadas en este proyecto, no aplica la Ley Base del medio ambiente 19.300, sin embargo, se debe considerar en obras que sean de mayor tamaño y/o cuando se trasvasen aguas desde otra cuenca.

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 cuenca de Chacabuco se redactaron dos convenios, debido a que el dueño del predio donde se construyeron las obras es una sociedad diferente al dueño de los derechos de agua utilizados para la operación del sistema. En efecto, los convenios fueron firmados entre 1) CNR y Rodrigo Andai en representación de la Sociedad inmobiliaria y Comercial AC S.A, dueño del predio, y 2) CNR y Samuel Lira Salinas, representante legal de la Sociedad Agrícola el Olivar de Chacabuco Ltda., dueña de los derechos de agua.

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.

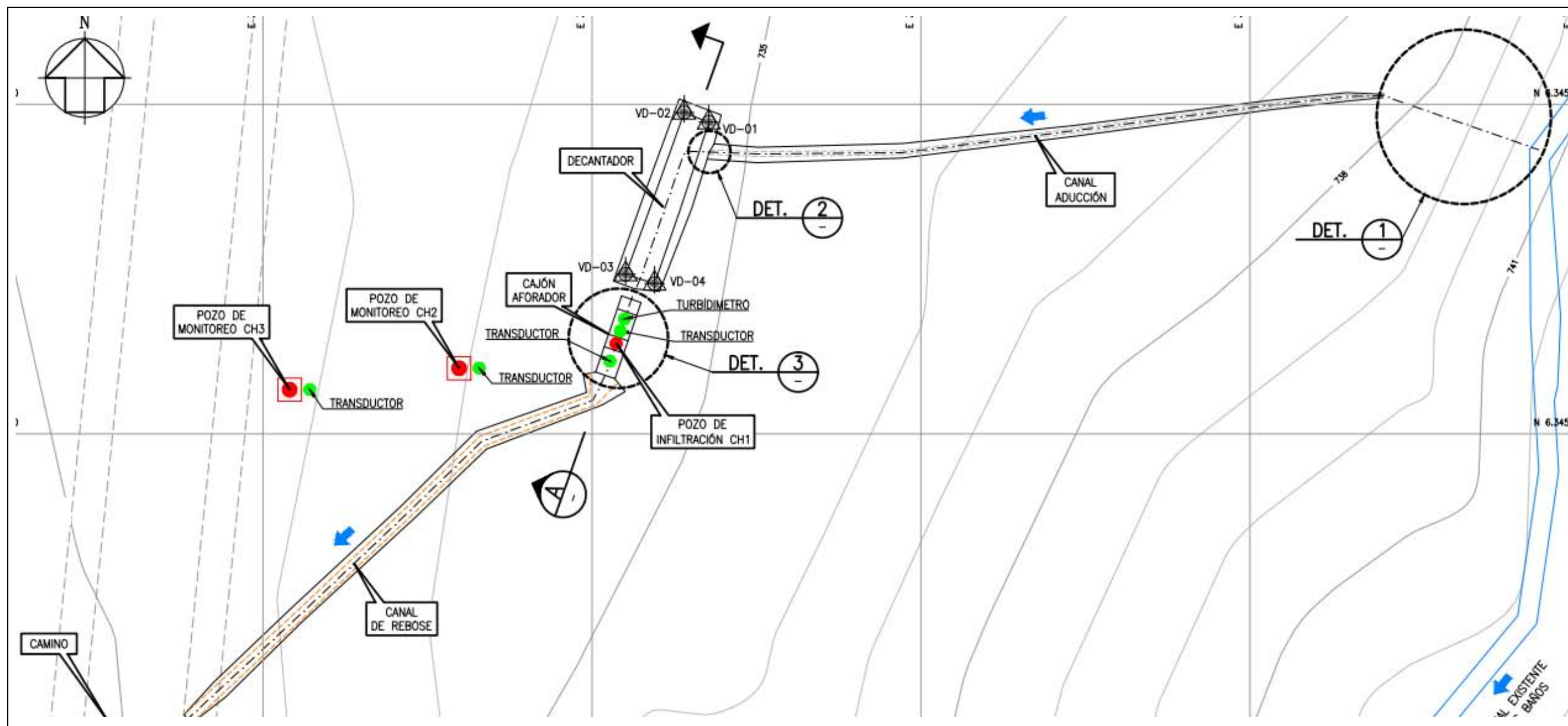
6 DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL

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. Trabajos de terreno,
2. Pre-diseño 1,
3. Perforación de pozo de infiltración,
4. Diseño final del sistema.

El diseño (as built) se presenta en la Figura 6-1. Se realizó la toma de agua desde el canal Los Baños mediante una tubería de PVC, la que fue introducida en la pared del canal, descargó en el canal de aducción del sistema y luego en un decantador revestido. El caudal fue regulado a través de una válvula volumétrica. El decantador se instaló como medida de seguridad, ya que no se espera que el canal transporte gran cantidad de material particulado. Luego del decantador, se construyó el dispositivo de medición compuesto por un cajón aforador y una cámara de infiltración, ambos forman parte del sistema de medición de caudales e infiltración, que utiliza vertederos triangulares para determinar el caudal. Finalmente se dispone de un canal para los excesos de agua. A partir de una correcta regulación del caudal, se evitó generar reboses importantes de manera de no perder agua. Por lo tanto no se utilizó de forma continua el canal para el caudal de rebose.

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 CH-1 y dos pozos de monitoreo CH-2 y CH-3, la perforación del pozo de infiltración se realizó con una máquina *Bucyrus Erie H5*, mediante sistema de percusión en 16" de diámetro hasta los 29 m de profundidad, luego se perforó con trepano de 12" hasta los 40 m. Los pozos de observación fueron perforados con una máquina *Boart Long Year DB 540*, mediante sistema de diamantina con *casing advance*. En la perforación del Pozo CH-2 también se usó el sistema de aire reverso. Primero se realizó perforación guía en 5" de diámetro, llegando hasta los 38 m de profundidad, para luego ser ensanchado a 6" hasta la misma profundidad. Los pozos fueron habilitados con tuberías de PVC ciegas y ranuradas de 6" (pozo de infiltración) y de 4" (pozos de observación) de diámetro.

Con el objetivo de diagnosticar el estado estructural de la habilitación y las condiciones de limpieza de las tuberías y del agua presente en los pozos, se filmó el pozo de observación CH-02. La filmación permitió determinar que el pozo se encuentra en excelente estado estructural y buen estado de limpieza. Las ranuras permiten el ingreso de agua al interior de la tubería sin problema, y por lo tanto cumple su objetivo de pozo de monitoreo.

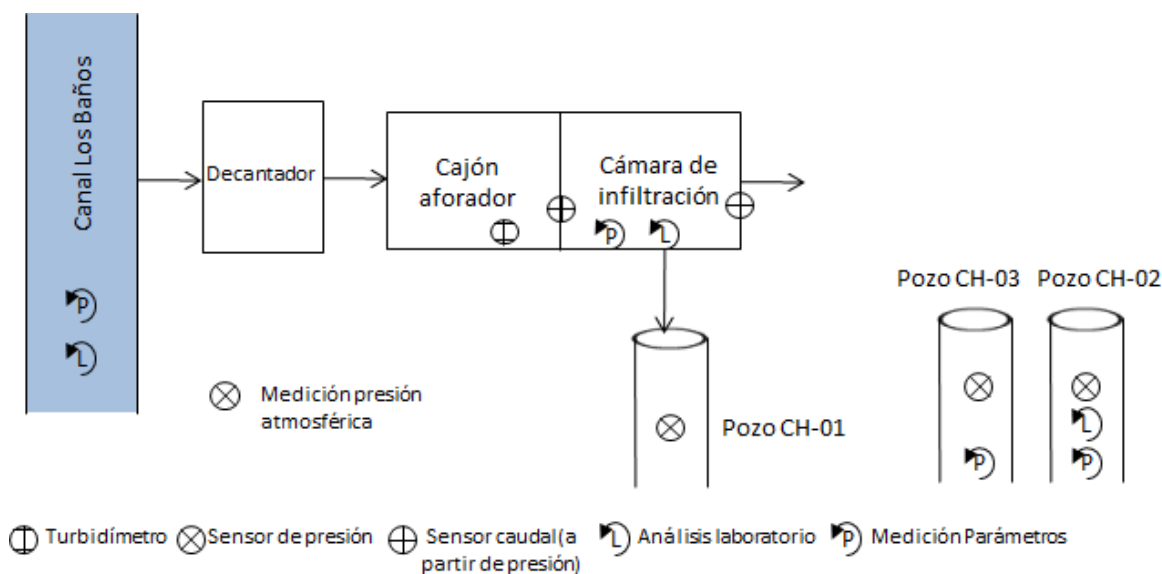
Si bien es cierto que los trabajos de terreno señalados en el capítulo 4 fueron ejecutados como parte del proyecto, el orden de las actividades no permiten realizar un pre-diseño adecuado del PPRAA. En efecto, en la etapa 2 del proyecto se solicitó entregar el pre-diseño del PPRAA, antes de contar con información estratigráfica de los pozos perforados durante la ejecución de este proyecto.

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 diamantina que permite 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 que uno de los pozos exploratorios presente una profundidad mayor, ya que, se requiere conocer con mayor detalle que es lo que pasa en profundidad lo que permite entre otras cosas la mejor toma de decisiones respecto del diseño y tipo de sistema de infiltración a utilizar. En función del resultado de este pozo exploratorio se puede determinar la profundidad de los pozos de observación, que por ejemplo en el caso de Chacabuco-Polpaico la situación no es crítica, sin embargo, de acuerdo a los términos de referencia (TDR) se debía perforar 5 m bajo la profundidad del acuífero, lo que no necesariamente se condice con las necesidades de información de un proyecto como éste. Por otro lado, existe una serie de capas impermeables, por lo que hubiese sido recomendable hacer un pozo exploratorio de al menos 50 m de profundidad previo al diseño del pozo de infiltración. De este modo el pozo se podría diseñar específicamente para las características del terreno, dejando las ranuras en aquellas capas donde se desea infiltrar.

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) turbiedad, c) altura de agua en el pozo de infiltración, d) nivel del acuífero en los pozos de observación, y e) la calidad química del agua de infiltración y del acuífero. Las dos primeras fueron medidas de manera continua y transmitidas 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 estimada de medición y si se contempla telemetría o no. La Figura 6-2 presenta un diagrama esquemático de su ubicación.

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



Fuente: Elaboración propia

6.3 COSTOS

El costo total asociado a la construcción del proyecto, considerando inversión y equipos de medición es de \$53.846.426, de los cuales el 18% corresponde a costos de instrumentación y un 82% a inversión.

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

Objetivo asociado	Parámetro	Lugar de medición	Equipo	Marca/ modelo	Frecuencia	Telemetría
Estimación de Balance Hídrico	Caudal	Vertedero triangular al ingreso de la cámara de infiltración	Transductor de presión	Leeg. Sensor de niveles hidroestático capacitivo 0-5m	Continuo	Si
		Vertedero triangular de rebose de la cámara de infiltración				
Respuesta del acuífero	Niveles	Pozos de observación 1 y 2	Transductor de presión	HOBO. U20L water level logger	Continuo	No
		Pozo de infiltración				
		Presión atmosférica (Ambiental)				
Control de variables críticas	Turbidez	Cámara de infiltración	Turbidímetro	SOLITAX scSS Wiper with sc200 Controller	Continuo	Si
Control de los efectos de la infiltración	Parámetros químicos (Set B)	Canal alimentador antes de la toma	Análisis de laboratorio	-	Mensual	No
		Pozos de observación 1 y 2				
		Cámara del pozo de infiltración				
		Antes del decantador	Análisis de laboratorio	-	Una vez	No
		Después del decantador				
	Parámetros físico- químicos (pH, T°, DO, Cond. Eléc.)	Canal alimentador antes de la toma	Medidor multiparámetros portátil	Hanna instrument HI9829	Semanal	No
		Pozos de observación 1 y 2				
		Cámara del pozo de infiltración				
Variables meteorológicas	Precipitación	Estación de la DGA: Río Aconcagua en Chacabquito	-	-	Continuo	Si (*)

(*) Estación con telemetría de la DGA.

Fuente: Elaboración propia

7 REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO

Originalmente la determinación de las constantes elásticas se iba a realizar mediante ensayos de bombeo, sin embargo, el análisis de la información local recopilada durante la perforación del pozo permitió definir que era mejor sustituir las pruebas de bombeo por ensayos de infiltración, ya que el estrato aportante de agua subterránea ha variado en el tiempo y probablemente los niveles estáticos actualmente se encuentren bajo la unidad acuífera con mayor conductividad. Esto produce que los niveles dinámicos durante el bombeo no reciban aportes de esta unidad más conductora y sólo induzcan flujo a través de unidades menos permeables ubicadas a mayores profundidades. Adicionalmente el espesor saturado presente en el pozo es pequeño, por lo que no es posible realizar una prueba de bombeo. Considerando lo anterior, se realizó la determinación de las propiedades hidráulicas del acuífero a través de pruebas de infiltración.

Se realizaron 3 pruebas válidas para estimar el valor de la conductividad hidráulica en el pozo de infiltración CH-1, a medida que se iba avanzando con la perforación. El procedimiento consiste en levantar la entubación a una altura determinada del pozo para realizar cada prueba de infiltración y posteriormente continuar con la perforación.

Durante las pruebas realizadas se recolectaron datos de caudal, tiempo de ensayo y niveles en el pozo, mediante transductor de presión. En total se realizaron 3 ensayos completos con distinta metodología, y a distintas profundidades. Todas las pruebas entregaron valores de conductividad hidráulica del mismo orden de magnitud con valores de 2, 4 y 8 m/d y razonables para este tipo de rellenos. Este rango de parámetros se encuentra dentro de lo considerado en la metodología de evaluación de sitios potenciales para realizar recarga artificial (1 a 5 m/d). Se considera que esta situación es propia de las condiciones locales del sitio y no es extrapolable a la totalidad del área en que se realizó esta evaluación.

Si bien las pruebas de infiltración resultan de mucha utilidad para describir la zona no saturada, para experiencias futuras se recomienda contar con un pozo de mayor profundidad donde poder realizar una prueba de bombeo.

7.2 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 diseñó un completo plan de monitoreo descrito en la sección 6.2.

Se realizaron 11 pruebas entre los días 28 de agosto de 2014 y 12 de octubre de 2014, donde se experimentaron distintos caudales de infiltración incluyendo caudales nulos. Previo a estas pruebas, se realizó una marcha blanca de 6 días para comprobar el funcionamiento del sistema, rangos de operación y tiempos de estabilización para los caudales de infiltración impuestos. En esta etapa previa se obtuvo que el caudal máximo de infiltración es de 5 l/s. Junto con lo anterior, se estimó que la estabilización de niveles para los caudales impuestos se obtiene aproximadamente 7 horas después de la variación de estos últimos.

En la Tabla 7-1 se presenta un resumen de cada una de las pruebas realizadas donde se incluye la fecha de inicio y término de cada prueba, el caudal de infiltración promedio utilizado y los caudales de infiltración máximos y mínimos alcanzados durante la prueba. El volumen total infiltrado durante las pruebas fue de 3.217 m³. En algunas de las pruebas (9 y 11) se imponen caudales nulos, los que sirven para determinar recuperación en el sistema y las respuestas del acuífero al volver a infiltrar.

Tabla 7-1: Resumen Pruebas de Infiltración

Prueba	Fecha Inicio	Fecha Término	Promedio de Caudal (L/s)	Máximo Caudal (L/s)	Mínimo Caudal (L/s)
P01	28/08/2014	30/08/2014	1,08	1,26	0,94
P02	30/08/2014	02/09/2014	1,01	1,38	0,84
P03	02/09/2014	04/09/2014	1,17	1,32	0,92
P04	04/09/2014	06/09/2014	1,64	2,09	1,34
P05	06/09/2014	08/09/2014	2,08	2,53	1,70
P06	08/09/2014	11/09/2014	1,26	1,50	1,02
P07	11/09/2014	14/09/2014	1,77	2,38	1,19
P08	14/09/2014	18/09/2014	2,27	3,26	1,92
P09	20/09/2014	23/09/2014	0,00	0,01	0,00
P10	23/09/2014	28/09/2014	0,82	2,31	0,54
P11	28/09/2014	09/10/2014	0,00	0,01	0,00

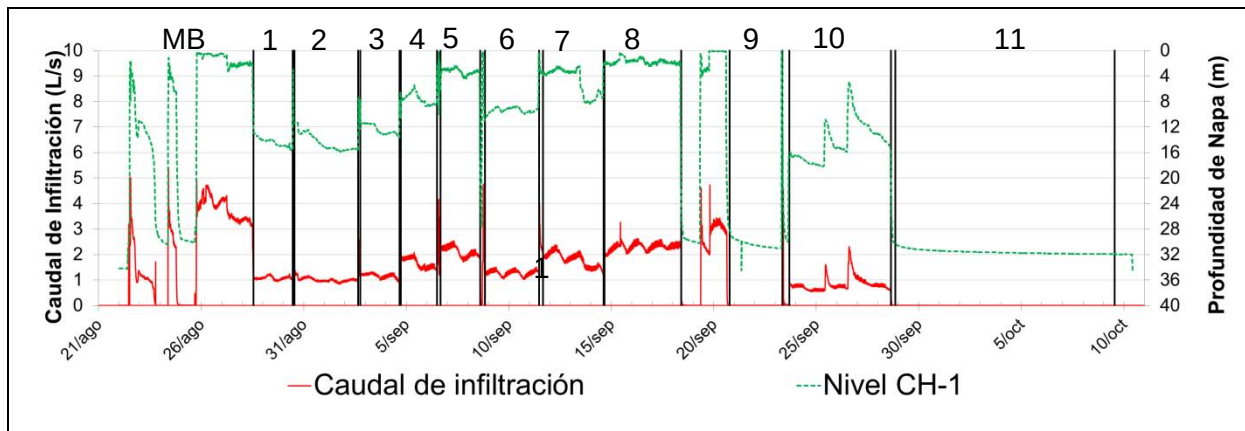
Fuente: Elaboración Propia

Los niveles se analizan para los pozos CH-01 (pozo de infiltración), CH-02 y CH-03 en donde se instalaron transductores de presión que registraron los niveles cada 10 minutos. Cada uno de los niveles presentados fue corregido de acuerdo a las variaciones regionales de la napa (medidas en pozos cercanos), con el objetivo de visualizar sólo los efectos de la infiltración.

En la Figura 7-1 se presenta un gráfico con los caudales infiltrados a través del tiempo y el nivel en el pozo de infiltración. Se puede apreciar que las variaciones de los caudales dentro de cada prueba son importantes y responden entre otros factores a las variaciones observadas en el canal que alimenta el sistema. A pesar de ello, se logra realizar experiencias dentro de todo el rango posible de caudales. En la Figura 7-1 también se presentan los niveles del pozo de infiltración (CH-01), donde se aprecia una clara dependencia entre los niveles desarrollados y las variaciones en caudal. En particular se aprecia la disminución de la capacidad de infiltración en el tiempo al comparar los valores alcanzados en la marcha blanca y en la prueba N°8. En esta última se alcanzan ascensos similares que en la marcha blanca, pero con un caudal menor.

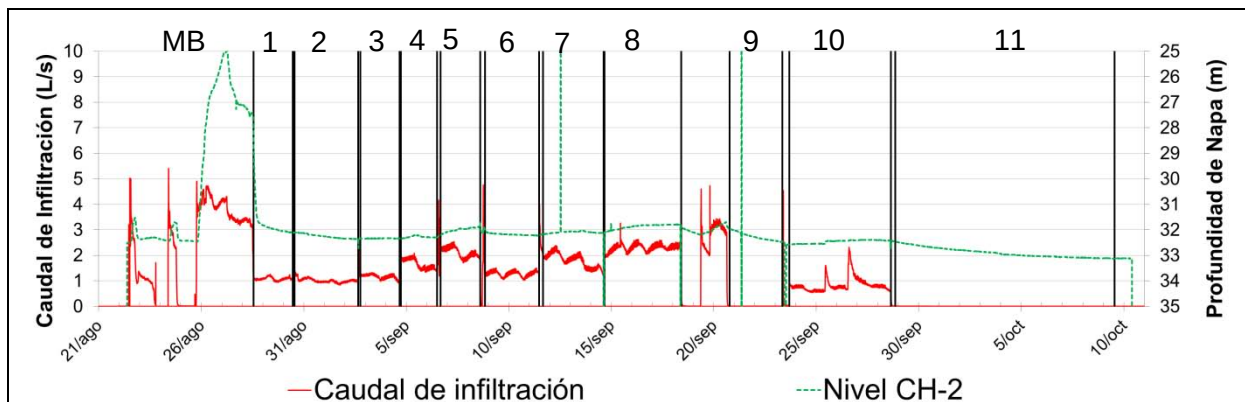
Para el caso del pozo CH-02, que se encuentra a 11 m del pozo de infiltración, se presentan los niveles en Figura 7-2. Este pozo presenta un ascenso de 8 m durante la marcha blanca del sistema cuando se establecen infiltraciones continuas de más de 3 L/s. Este tipo de ascenso no se vuelve a repetir y sólo se producen subidas de nivel por debajo de 1 m durante el resto de las pruebas.

Figura 7-1. Caudales y profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-01



Fuente. Elaboración propia

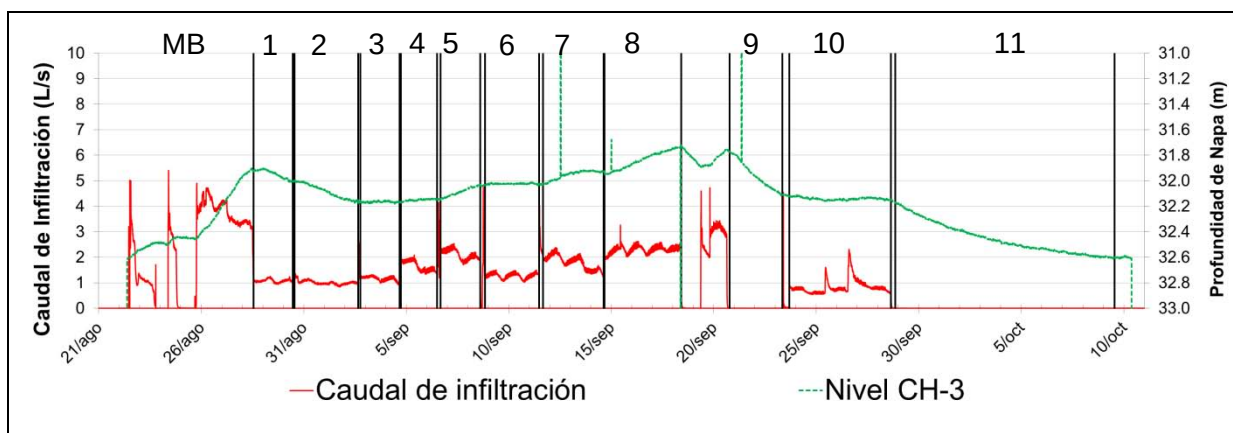
Figura 7-2: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-02



Fuente. Elaboración propia

Para el caso del pozo CH-03 (Figura 7-3) que se encuentra a 21 m del pozo de infiltración, se reducen aún más los ascensos provocados por las infiltraciones realizadas en el pozo CH-01. Junto con lo anterior se aumenta el retardo en la estabilización de los niveles. En general se aprecia un sólo gran pulso provocado por la totalidad de las pruebas de infiltración en que existen pequeños cambios de pendiente o descensos en cada una de las variaciones realizadas. La variación máxima con respecto al nivel inicial es de 1 m.

Figura 7-3: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-03



Fuente. Elaboración propia

Es importante mencionar que si bien los resultados obtenidos son buenos, el tiempo de las pruebas fue corto como para tener una evaluación más certera de los resultados. Faltó tiempo para determinar el efecto real sobre el acuífero, ya que los ascensos de nivel medidos fueron pequeños, situación que se explica porque parte importante del agua inyectada pasa a rellenar el espacio poroso de la zona no saturada, hasta saturarla. Este mismo fenómeno podría explicar la baja en la tasa de infiltración observada, junto con la colmatación producto de los sólidos suspendidos, aun cuando la calidad del agua infiltrada en general cumplió con los criterios de operación. También influye en la respuesta del acuífero el comportamiento natural de los niveles, que presentan una clara tendencia a la disminución.

7.2.1 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 y (3) composición química de las aguas (según el set B) y permitió concluir que:

- Respecto de la evolución del pH, se aprecia que las aguas a infiltrar son una unidad mayor que las aguas subterráneas. Esta diferencia prevalece en el tiempo durante la realización de las pruebas.
- En cuanto a la turbidez, se observa que la mayor parte del tiempo se encuentra bajo los 10 NTU, que es el umbral de operación de las pruebas de infiltración. Sólo existen algunos episodios en que se sobrepasa este valor durante las pruebas y de acuerdo a las asociaciones de regantes esto ocurre por un cambio en la fuente del canal, que pasa desde aguas lluvias recolectadas ha aguas de deshielos provenientes del río Aconcagua.
- Los valores de DQO dan cuenta del contenido de materia orgánica presente en las aguas. Para este parámetro las muestras de aguas subterráneas, las aguas del canal y de las aguas de infiltración presentan un contenido bajo el límite de detección para este parámetro. Esto último, sugiere que las aguas de alimentación son bastante limpias.
- El contenido de sulfato es el único parámetro que podría acusar cierta variación en la calidad química producto de las infiltraciones. Las concentraciones del canal y las del pozo de infiltración son relativamente bajas respecto de las aguas subterráneas. Estos valores menores pueden haber bajado la concentración del pozo de observación CH-02 durante las pruebas, producto de la mezcla o desplazamiento de las aguas. Esta hipótesis se contrapone con las mediciones en el pozo de observación CH-03 que da cuenta de concentraciones bajas en el acuífero, por lo que las variaciones podrían también deberse a variaciones estacionales o según la ubicación de los pozos en el área de estudio.
- Los valores medidos de sólidos suspendidos muestran concentraciones bajas en el acuífero tanto en las mediciones de marzo como en las más recientes. Todo esto se contrapone a las concentraciones encontradas en el pozo de observación CH-02 que se ubican por sobre los 400 mg/L, lo que puede estar dado por remanentes de la perforación que no pudieron ser evacuados durante el desarrollo del pozo y las pruebas posteriores.
- Por último, al observar los coliformes fecales, se aprecia que los únicos valores de consideración son los detectados en el pozo de infiltración, alcanzando 7.000 NMP/100ml. Este contenido de coliformes se atenúa al entrar al acuífero, encontrando solo 4 NMP/100ml en la muestra del pozo de observación CH-02.
- En resumen, no es posible asegurar que las variaciones en calidad y concentraciones encontradas en los análisis químicos sean producto de las pruebas de infiltración desarrolladas. Se debe considerar que el corto periodo de las pruebas no permitió identificar cambios en la calidad de agua del acuífero. En efecto, ninguno de los parámetros analizados mostró mezcla de aguas. Respecto de la calidad de agua de inyección se debe indicar que el único parámetro presentó valores altos fue los coliformes fecales, sin embargo, se considera poco riesgoso ya que de acuerdo a la literatura especializada su tiempo de vida media es de unos pocos días. Sería recomendable contar con pruebas de mayor duración que permitirán corroborar empíricamente el comportamiento de los coliformes en aguas subterráneas.

7.2.2 Análisis de la operación del sistema

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.

Las muestras obtenidas en las perforaciones y en particular la del pozo CH-03, que fue perforado con el método diamantina (lo que permite un detalle mayor en la descripción estratigráfica) sugieren la existencia de 5 unidades hidrogeológicas, 3 de ellas poco permeables (UH 1, UH 3 y UH 5), que corresponden a grava gruesa con 30% de arcilla intercaladas por dos unidades permeables (UH 2 y UH 4) compuestas por grava y grava arenosa. Las unidades permeables presentan una potencia de alrededor de 11 m y 18 m para UH 2 y UH 3 respectivamente, mientras que las unidades poco permeables poseen espesores de alrededor de 5 m y 3 m para las unidades UH 1 y UH 3 respectivamente. Finalmente la unidad UH 5 es de al menos 3 m de espesor (Ver Figura 7-4).

Al describir los niveles, en primer lugar se debe observar el comportamiento estacional del agua subterránea en el área de estudio. Para ello se analizó la evolución registrada en los pozos cercanos al emplazamiento de las obras de infiltración (menor que 600 m), durante el transcurso del presente estudio. Se apreció una disminución sostenida de los niveles del acuífero desde mediados de abril hasta comienzos de agosto, esta disminución es de una magnitud que varía entre 0,5 m y 1 m. A partir del inicio de las pruebas de infiltración se observa que los niveles tienden a mantenerse constantes. Por otro lado, no es posible establecer una relación clara entre los cambios en los niveles de los pozos y las precipitaciones en la zona, que de forma mayoritaria ocurrieron en la primera mitad de junio. Esto se puede explicar debido a que la primera unidad hidrogeológica del suelo corresponde a una capa poco permeables (UH-01), que no permitiría el ingreso directo a la napa de la precipitación que cae sobre el área de estudio.

Para facilitar el análisis del funcionamiento hidráulico, éste fue separado entre el periodo previo a realizar las PPRAA y durante las pruebas PPRAA. El comportamiento regional del sector sin infiltración posee un gradiente en el sentido sur. Particularmente, en el sistema de pozo de infiltración y pozos de observación se presenta el sentido hacia el suroeste, influenciado por el ramal del canal Chacabuco, que estaría recargando el sector. Estas direcciones de flujo se conservan durante el periodo en el que se desarrolló el estudio.

El comportamiento de los niveles sin recarga artificial (Figura 7-4) dan cuenta de la existencia de 1 acuífero libre cuya napa se encuentra dentro de la unidad hidrogeológica UH 4. Con la información recopilada hasta el momento, no es posible afirmar que frente a un escenario de recarga importante que permitiera elevar el nivel de acuífero por sobre el estrato poco permeables UH 3, se generaría un acuífero colgado y las características de confinamiento de la napa que normalmente se encuentra libre sin recarga artificial.

La infiltración se realizó a través del pozo de infiltración CH-01 y representa un flujo entrante hacia el acuífero, levantando los niveles en forma de cono de infiltración. Durante las pruebas de infiltración el sentido regional del flujo no varía. Como es de esperarse, el efecto se apreció en mayor medida en el pozo CH-02 (que aumenta 1,4 m aproximadamente), ya

que es el más cercano al pozo de infiltración. El pozo CH-03 presenta un efecto menor (1,2 m aproximadamente) ya que se encuentra más alejada del punto de inyección.

Las aguas en el sistema presentan una composición natural del tipo cálcica, sulfatada-bicarbonatada. y con conductividades eléctricas entre 0,3 y 1,3 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 no es posible asegurar que las variaciones en calidad y concentraciones encontradas en los análisis químicos sean producto de las pruebas de infiltración desarrolladas.

Las Figura 7-4 y Figura 7-5 resumen de forma gráfica el funcionamiento conceptual del sistema antes y durante la PPRAA. 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 7-4. Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA

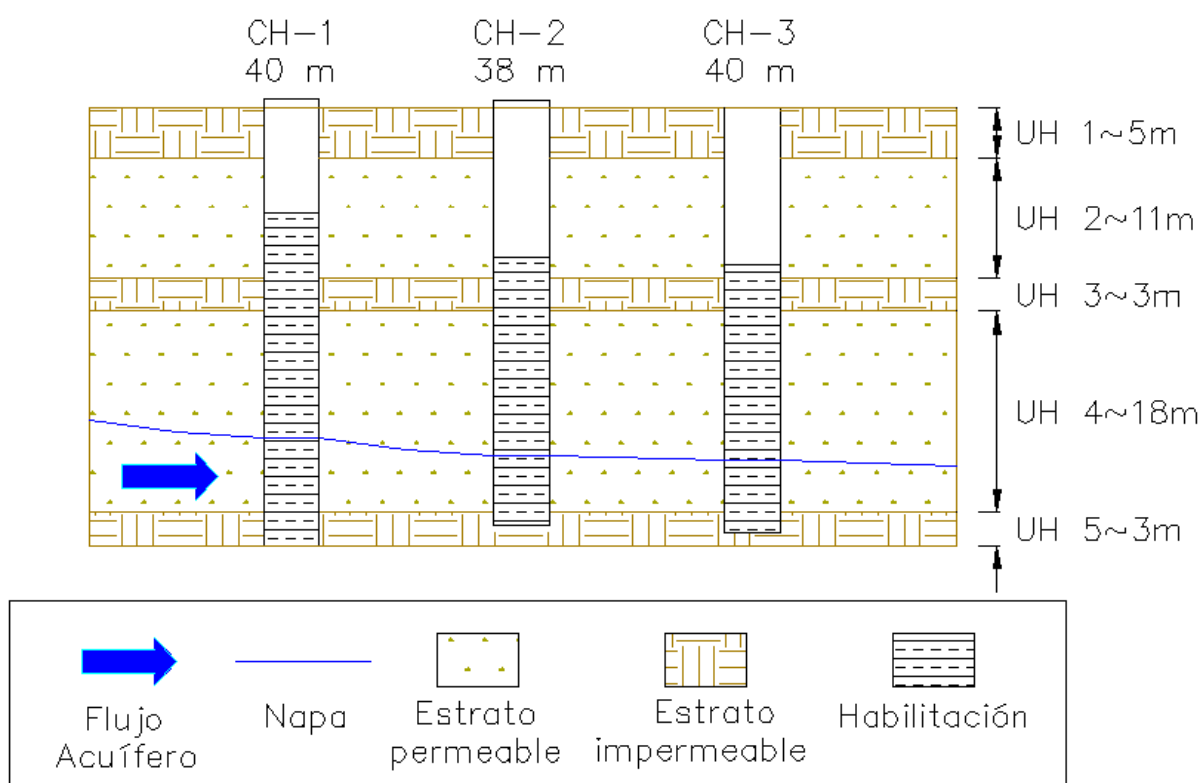
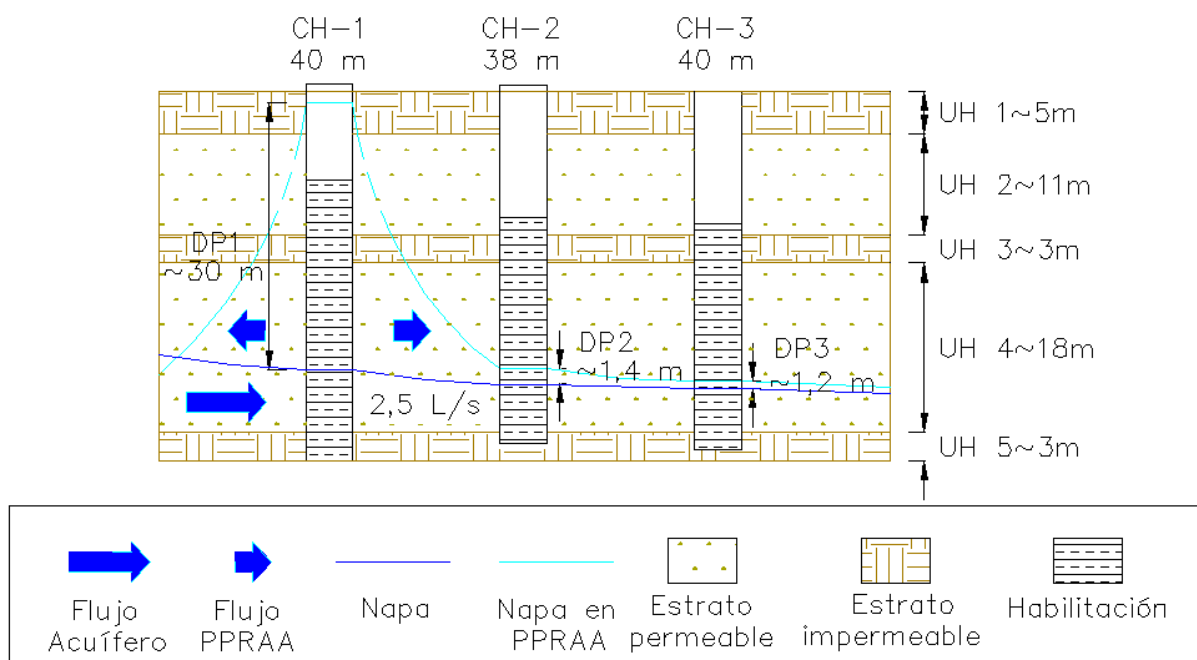


Figura 7-5. Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA



7.3 EFECTO PROYECTADO EN LOS NIVELES DEL ACUÍFERO

Para analizar los resultados de las PPRAA 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, a través de un modelo numérico simplificado. El modelo presentado no fue calibrado y sólo se verificó que el gradiente y balances obtenidos estuviesen dentro de lo esperado con la información disponible. Debido a lo anterior, este modelo puede ser utilizado sólo de manera referencial y no constituye una herramienta de predicción para estimación de recursos, así como tampoco, fenómenos de transporte. Sin embargo, para efectos del estudio, realizar un modelo numérico representa un ejercicio que permite un mayor entendimiento de los fenómenos involucrados, más que un cálculo analítico.

Para la construcción del modelo, se adoptó una discretización espacial en vertical que considera una sola capa, cuyo espesor fijo es de 150 m. La discretización espacial en planta fue realizada inicialmente con celdas cuadradas de 400 x 400 m. Posteriormente el modelo fue refinado localmente en torno a los cursos del drenaje superficial y a la zona donde se aplica la recarga artificial, con celdas cuadradas de 50 x 50 m. De esta forma el número total de celdas queda en 37.020, de las cuales 32.079 están activas, lo que constituye un 87% de las celdas. Finalmente, la discretización temporal adoptada en el modelo fue mensual y se considera un periodo de simulación de 50 años.

El modelo numérico considera dos zonas de conductividad hidráulica diferente: la primera representa la mayor parte de la zona de estudio, con una permeabilidad horizontal de 5 m/d,

que proviene de lo reportado en la evaluación de la metodología para identificar las posibles zonas de recarga artificial y la segunda zona, con una conductividad hidráulica horizontal de 0,2 m/d, que fue asignada a la parte alta de la cuenca para representar de mejor manera la variación del nivel freático.

Respecto de los parámetros de almacenamiento y porosidad no se tiene información, por lo que, de acuerdo a la experiencia del consultor se impuso un coeficiente de almacenamiento (Ss) de 0,001; un rendimiento específico (Sy) de 0,08 y una porosidad de 0,1.

Las condiciones de borde adoptadas se pueden separar en 3, a saber: a) condición de carga conocidas para las entradas y salidas subterráneas del modelo, b) de río para simular el drenaje superficial de la cuenca, y c) de flujo especificado para fijar la recarga artificial a considerar. Para la zona de recarga artificial se define un área de 200 x 200 m donde se infiltra un total de 500 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.

A partir los resultados de la modelación numérica 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 se observa que parte de caudal de recarga artificial se pierde a través de la red de drenaje superficial. El tiempo para el cual el drenaje capta el 10% de la recarga, es decir 50 L/s, es de 40 años.

Estos resultados indican que desde el punto de vista regional se puede realizar recarga artificial de manera interanual, ya que la residencia del agua en el acuífero es de varias decenas de años.

Se realizó también un análisis de sensibilidad observando la variación del tiempo en que los flujos hacia la red de drenaje superficial varían en 50 L/s (10% de la recarga impuesta). La sensibilidad se realizó variando el nivel de los drenes, la conductividad hidráulica del relleno, el almacenamiento y la conductancia de los drenes. En este análisis se observó que la variable más sensible es la conductancia del río.

Se reitera que la modelación numérica realizada permitió analizar a grandes rasgos el efecto de la aplicación de una recarga artificial estacional para las condiciones consideradas en este ejercicio, donde se realiza una serie de simplificaciones que permiten una evaluación numérica rápida. En ningún caso el modelo realizado corresponde a un modelo calibrado del acuífero de Chacabuco-Polpaico.

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).
- La información existente es insuficiente para desarrollar una correcta caracterización hidrogeológica de la cuenca a la escala requerida. Un ejemplo de esto es el bajo número de pozos de monitoreo de la DGA que se encuentran habilitados (sólo 16) en el área de estudio. Se requiere de mayor detalle (registro continuo de niveles por al menos 5 años, estratigrafía y mayor número de pozos a nivel regional, entre otros) para realizar tanto un proyecto piloto de recarga artificial, como un proyecto de recarga a nivel industrial.
- La elaboración de la metodología de identificación de sitios constituye una primera aproximación para la elección de lugares para realizar proyectos de recarga artificial. En este sentido los parámetros conductividad hidráulica, profundidad de la napa y cercanía a cuerpos de agua superficial, resultan adecuados para evaluar aptitud de zonas para la 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 aplicar la metodología en la cuenca del área de estudio se obtiene que prácticamente la totalidad del área utilizable (relleno) presenta valores de aptitud buena. Así, se estima que en general la cuenca es apropiada para proyectos de recarga artificial.
- En particular, mediante los trabajos desarrollados en terreno en 3 zonas de la cuenca, se corroboró la factibilidad de desarrollar proyectos de infiltración mediante pozos y se determinó que los sitios no son aptos para desarrollar recarga mediante balsas de infiltración. Los resultados de la prueba de infiltración realizados en el piloto coinciden con la aptitud calculada y tras realizar las pruebas se pudo corroborar que la metodología fue adecuada para esta cuenca y que el diseño propuesto (pozos de infiltración) fue el correcto.
- De la operación de las pruebas de infiltración del proyecto piloto se obtiene que la capacidad de infiltración del acuífero es adecuada, ya que se logra infiltrar un caudal medio de 2,5 L/s, utilizando un pozo de infiltración de 40 m de profundidad. Adicionalmente se debe considerar que el acuífero tiene un almacenamiento disponible de al menos 20 m, debido a que prácticamente se ha extinguido el acuífero superficial. No obstante, para aumentar la capacidad de infiltración del piloto, se recomienda analizar el comportamiento del sistema utilizando pozos a presión.

- Las pruebas del PPRAA requieren un mayor tiempo de operación para obtener conclusiones más representativas del funcionamiento del sistema en el tiempo y de este modo evaluar el efecto real de las pruebas en el acuífero, por ejemplo obtener datos precisos de los ascensos de niveles en la napa.
- Del modelo numérico desarrollado se obtiene que la infiltración simulada para las condiciones impuestas se conserva en el acuífero por un periodo mayor a 20 años. Esto indica la factibilidad de realizar la extracción de los volúmenes infiltrados de manera interanual. Se debe tomar en cuenta que la simulación realizada constituye sólo un ejercicio y se deberá contar con un modelo que incluya la totalidad 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. En particular, se infiere que las variaciones estacionales y una representación detallada de los cursos superficiales existentes podrían variar los resultados presentados.
- Se observa 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.

8.2 RECOMENDACIONES

La factibilidad de la recarga a escala industrial 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 para ello se tiene en cuenta lo siguiente:

- Se espera que a partir de la metodología propuesta para encontrar los sitios más aptos para realizar recarga, se exploren otros sitios que hayan obtenido sido catalogados con buena aptitud.
- Mejorar la red de monitoreo de niveles, especialmente en términos de profundidad del acuífero y conductividad hidráulica. Esto permitirá determinar el destino de los recursos recargados. Por otro lado una mejor red de monitoreo le dará mayor validez a la metodología para seleccionar los sitios donde realizará recarga artificial.
- 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 (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. De este modo es importante contar con una buena caracterización del medio, lo que permitirá corroborar las aptitudes del sitio, preparar un diseño especial o bien buscar otro sitio con mejores cualidades para el proyecto de recarga. En este caso se podría haber perforado un pozo exploratorio de al menos 50 m de profundidad previo al diseño del pozo de infiltración.

- Si bien las pruebas de infiltración resultan de mucha utilidad para describir la zona no saturada, es recomendable contar con un pozo de mayor profundidad donde poder realizar una prueba de bombeo, que permita corroborar los valores de los parámetros elásticos.
- Dado los resultados de la operación del PPRAA, se recomienda probar un sistema de infiltración en base a pozos a presión, con el objetivo de aumentar la capacidad de infiltración del sitio.
- Dado que el canal presenta una alta variabilidad del flujo pasante (alta variación de niveles), se recomienda diseñar una toma de agua que independice la operación del sistema de las fluctuaciones horarias y diarias en los caudales afluentes.
- Sería recomendable contar con pruebas de mayor duración en la zona, de al menos un año, que permitan evaluar en el mediano plazo los efectos de la recarga en los niveles del acuífero y calidad química del agua subterránea.

9 GLOSARIO DE TÉRMINOS

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.

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.

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.

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.

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.

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

GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

Comisión Nacional de Riego: CNR

GeoHidrología Consultores: GeoH

AC-01: Pozo de infiltración

AC-02: Pozo de monitoreo

m.c.a: metros columna de agua

m: metros

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

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

DQO: Demanda Química de Oxígeno

CE: Conductividad Eléctrica

PGV: Prueba de Gasto Variable

PGC: Prueba de Gasto Constante

ND: Nivel Dinámico

NE: Nivel Estático

PFQ: Parámetro Físico Químicos

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.