



**ESTUDIO BÁSICO
“ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PILOTO
DE RECARGA ARTIFICIAL POPETA”**

RESUMEN EJECUTIVO

Santiago, marzo de 2015





ESTUDIO BÁSICO “ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL POPETA”

RESUMEN EJECUTIVO

Santiago, marzo de 2015



ESTUDIO BÁSICO “ANÁLISIS ALTERNATIVAS PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL POPETA”

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	San Manuel.....	14
4.1.2	Popeta.....	15
4.1.3	San Miguel de Popeta	15
4.2	MEDICIÓN DE CALIDAD DE AGUAS.....	16
4.2.1	Resultados de análisis de laboratorio	16
4.3	SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL	17
5	ANÁLISIS LEGAL.....	19
5.1	ANÁLISIS LEGAL Y AUTORIZACIONES.....	19
5.2	CONVENIO DE COLABORACIÓN	20
6	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL	20

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1: Evaluación de los sitios (Fase II).....	12
Tabla 4-1: Resumen de análisis de parámetros más relevantes para recarga artificial	17
Tabla 4-2: Resumen y análisis de sitios preseleccionados para desarrollo del PPRAA	18
Tabla 6-1: Cuadro resumen de medición de variables.	24
Tabla 7-1: Resumen Pruebas de Infiltración	26

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Área de estudio, cuenca estero Popeta	7
Figura 2-1: Metodología general de trabajo	9
Figura 3-1: Propuesta de sitios potenciales para un PPRAA en la cuenca de Popeta.....	13
Figura 6-1. Vista en planta del diseño del sistema de infiltración	21
Figura 6-2: Diagrama de ubicación equipos de medición.....	23
Figura 7-1: Caudales de las pruebas de infiltración	27
Figura 7-2: Nivel de agua en los pozos de observación durante las pruebas de infiltración .	27
Figura 7-3: Descenso en PO-02 y PO-03 sin considerar efecto del bombeo.....	28
Figura 7-4: Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA	31
Figura 7-5: Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA	32

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 sí 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 acuífero de Puangue-Melipilla localizado en la provincia de Melipilla se declaró como área de restricción (resolución DGA N°241, del 31 de julio de 2008) para nuevas extracciones de aguas subterráneas. Esta restricción incluye el sector hidrogeológico de Popeta. Por este motivo la Comisión Nacional de Riego (CNR) considera relevante entender el sistema subterráneo de esta zona, para la identificación de sitios potenciales de recargar 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 cuenca del estero Popeta, provincia de Melipilla, 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 San Miguel de Popeta 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 bombeo, 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 y 5) dos pozos de observación.

El plan de monitoreo del sistema contempló el seguimiento continuo del caudal de infiltración, 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 y se cumplió con los objetivos del proyecto. En particular se realizaron una serie de experiencias de infiltración, con caudales medios variables entre 1,3 L/s y 8,8 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 del estero Popeta, identificar posibles zonas de recarga artificial y finalmente realizar un 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:

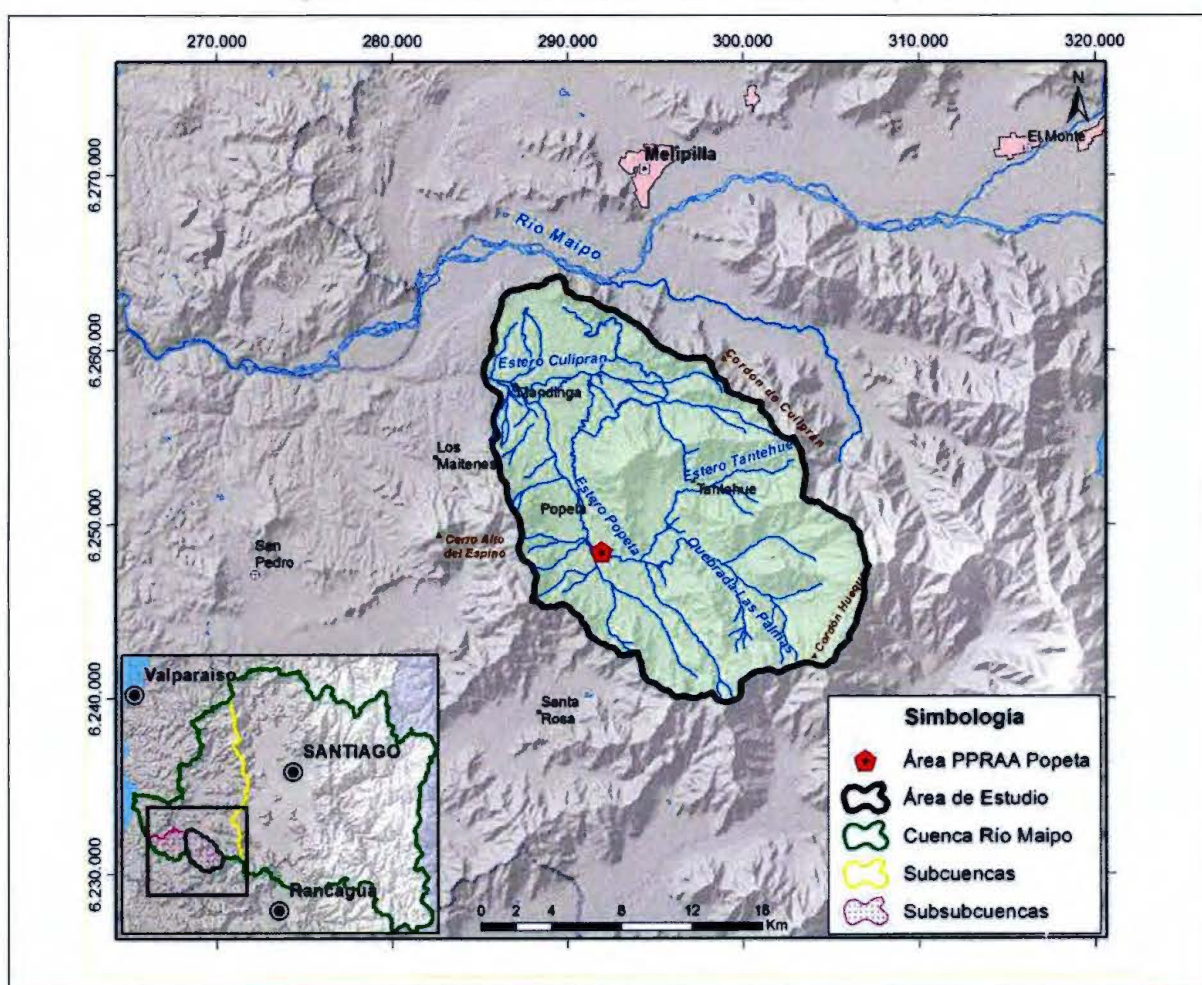
- Analizar la información topográfica, geomorfológica, edafológica, geológica, hidrológica e hidrogeológica existente para la identificación de sitios de emplazamiento para dos PPRAA,
- Identificar la disponibilidad de aguas superficiales para las pruebas de recarga del piloto y estudiar la viabilidad 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

El área de estudio se ubica en la cuenca del río Maipo, en la subcuenca Maipo Bajo específicamente en las sub-subcuencas definidas por la Dirección General de Aguas (DGA): río Maipo entre estero Puangue y bajo junta estero Popeta (Figura 1-1), a unos 15 km al sur de Melipilla, comprendiendo una superficie total de 331,2 km². Otros poblados importantes que están en torno al área de estudio son San Pedro, Santa Rosa y Los Maitenes (Figura 1-1).

Desde el punto de vista administrativo el área de estudio se ubica en la Región Metropolitana, provincia de Melipilla y se sitúa al sur de la ciudad de Melipilla.

Figura 1-1: Área de estudio, cuenca estero Popeta



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

2 METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

El estudio Prueba Piloto Recarga Artificial del acuífero de Popeta 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 desarrollada por GeoHidrología.

La metodología de trabajo se presenta a continuación, separada 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 bombeo 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:

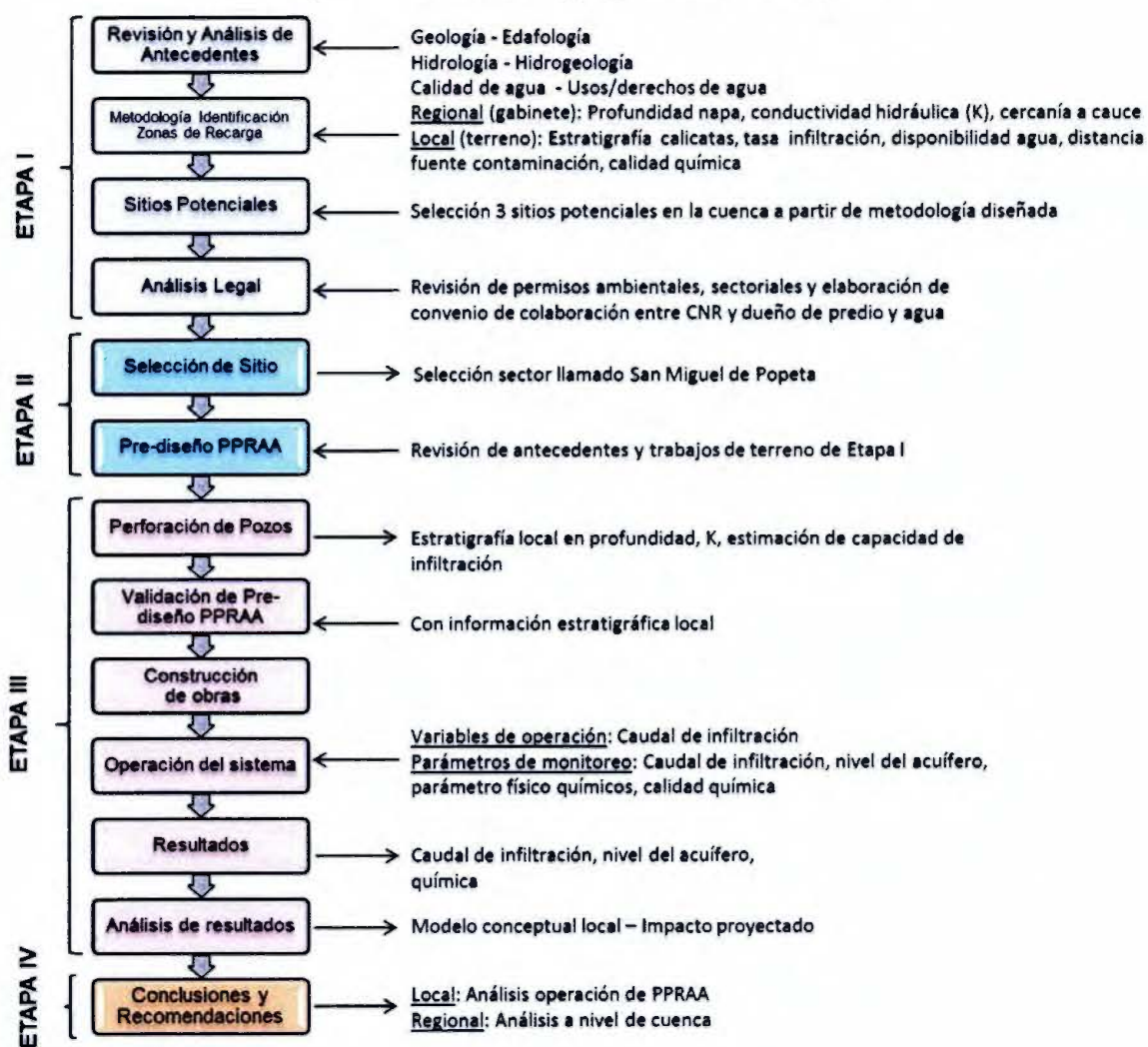
- Perforación de pozos: La construcción comenzó con la perforación de los pozos y con el análisis estratigráfico local. Además se hicieron pruebas de bombeo para determinar las constantes elásticas del acuífero,
- Re-diseño PPRAA: La información obtenida validó el pre-diseño de forma general y se modificó la profundidad de los pozos de observación a 30 m.
- 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)

- 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. 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 la recopilación y análisis de los antecedentes técnicos que fueron utilizados para la confección de este estudio. Se presenta en 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.

En términos generales la información disponible es insuficiente para realizar una buena caracterización hidrogeológica, especialmente en términos profundidad del acuífero y propiedades hidráulicas. Respecto de información de profundidad y nivel de la napa, existe poca representatividad espacial, ya que la DGA sólo cuenta con 5 pozos en todo el acuífero, dejando amplias e importantes zonas sin información. Cuando se requiere trabajar a una escala local, como por ejemplo para diseñar sistemas de infiltración, prácticamente no existe información y se debe recurrir a datos de pozos locales, que en general no cuentan con información estratigráfica ni de construcción del pozo, dependiendo de la buena voluntad de los dueños y administradores de predios que faciliten el acceso para toma de datos. Respecto de la información de parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y coeficiente de rendimiento específico), sólo existe información en que se le asigna un valor único de conductividad hidráulica para toda la cuenca, sin embargo, la escala de trabajo es poco apropiada para el desarrollo de pruebas piloto.

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 que permite cuantificar la aptitud que ella impone sobre la aptitud completa del lugar evaluado. De este modo un valor 1 indica que la variable dificulta fuertemente el desarrollo de un proyecto de recarga artificial, mientras que un valor 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 zona más idónea para un proyecto piloto de recarga artificial corresponde a aquella que presenta un VA alto (4) y que recae en dos sectores, por un lado, en el sector norte del cruce Las Arañas del camino Melipilla-Central Rapel, y por otro lado, en el sector ubicado al sur del área de estudio, aproximadamente entre las localidades de Popeta y Los Guindos.

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 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.

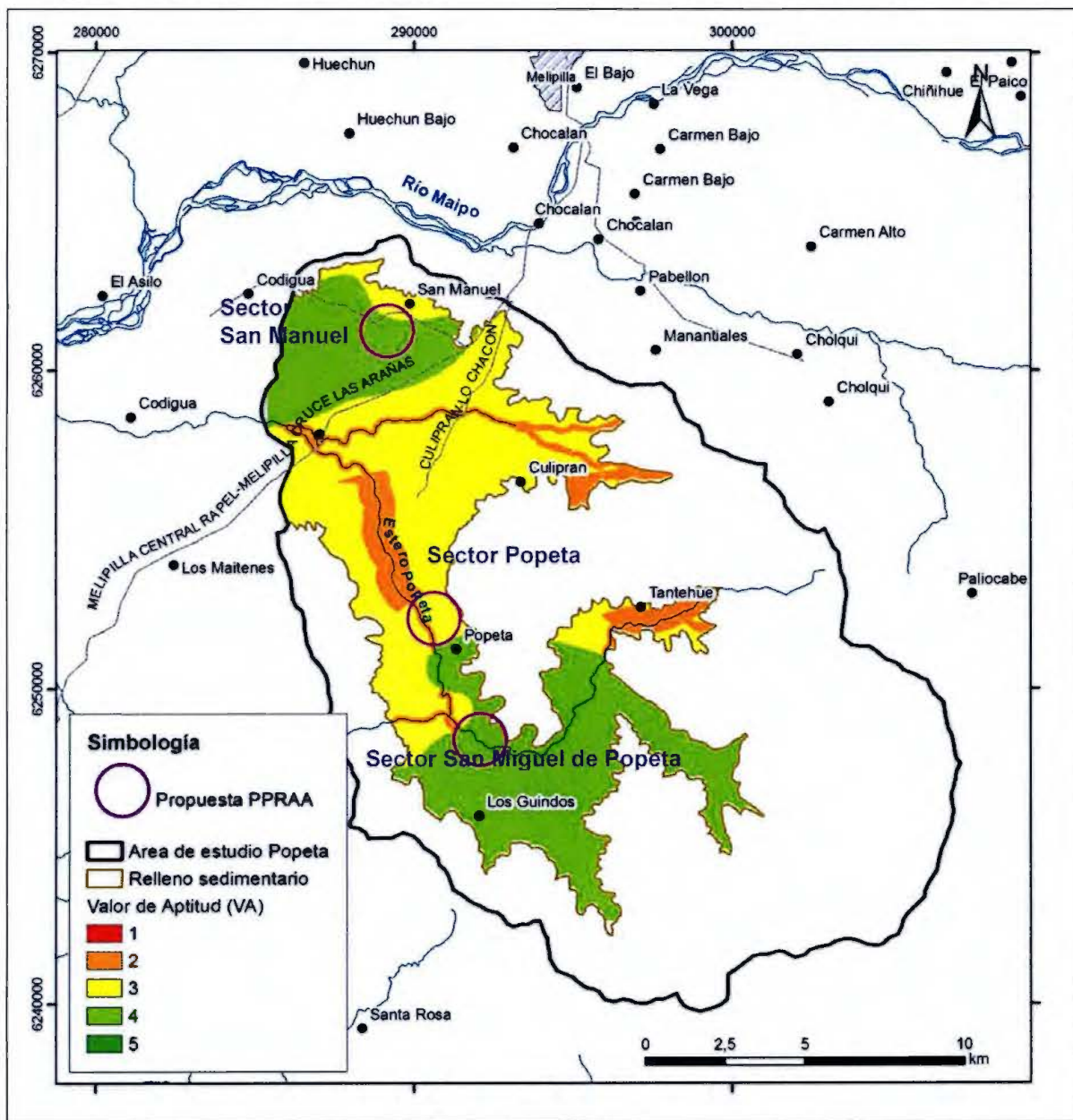
Tabla 3-1: Evaluación de los sitios (Fase II)

Sitio (dueño)	Nombre predio	Evaluación				
		Cercanía a fuente de agua	Disponibilidad		Lejanía a fuente de contaminación	Resultado
			Terreno	Derechos		
Marcelo Armijo	San Manuel	1	1	0	1	No apto
Soc. Agrícola Popeta	Popeta	1	1	1	1	Apto
Angélica Barrera	San Miguel de Popeta	1	1	0	1	No apto

Fuente: Elaboración propia

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.

Figura 3-1: Propuesta de sitios potenciales para un PPRAA en la cuenca de Popeta



Fuente: Elaboración propia

Sin perjuicio de lo anterior y en términos generales la metodología regional desarrollada funcionó satisfactoriamente 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 (Lontue, Aconcagua, Chacabuco-Polpaico, Popeta y Puangue), con buenos resultados.

El principal problema de la metodología es la calidad de la información hidrogeológica disponible, siendo este caso especialmente sensible la información de profundidad de la napa y de la conductividad hidráulica. Para este caso, existe baja representatividad espacial de la información de la profundidad y cota del agua subterránea, así como registros cortos para evaluar el comportamiento temporal del acuífero. Respecto de la calidad de la información de conductividad hidráulica la evaluación es similar, siendo escasa o bien existe a una escala no adecuada para este tipo de proyectos.

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 San Manuel

En el sector de San Manuel se excavó una calicata de sólo 0,8 m de profundidad. Lo anterior, debido a la naturaleza del estrato encontrado a 60 cm correspondiente a Toba Soldada, lo que hizo imposible continuar con la excavación a una profundidad mayor. Debido a lo anterior, sólo se realizó el ensayo de infiltración a nivel de superficie.

El resultado del ensayo de infiltración en el sector San Manuel indica una baja permeabilidad, que no supera los 0,09 m/d para el suelo superficial, que está compuesto por arcilla limosa. Se desconoce la permeabilidad del estrato de toba que la subyace, pero por sus características es posible suponer que tiene una baja permeabilidad.

La estratigrafía de un pozo ubicado a 5 km al sureste de las calicatas muestra un predominio de arcilla entre los 0 y 13,4 m de profundidad. Entre los 13,4 m y 17,5 se presenta un nivel de ripio. En este sector el espesor de relleno saturado sería de 8 m. Según lo anteriormente expuesto, las malas propiedades del relleno detectadas en los 80 cm de calicata, se extenderían hasta al menos los 13 m de profundidad.

4.1.2 Popeta

Los resultados de los ensayos de infiltración en el sector de Popeta indican una permeabilidad baja y muy baja, con valores de 0,53 m/d para el suelo superficial y 0,01 m/d a 90 cm de profundidad. Estos valores concuerdan con la estratigrafía descrita en las calicatas, en las cuales se observan estratos compuestos por suelos poco permeables (arcilla y limos), que le otorgan una baja permeabilidad al terreno.

Según el análisis estratigráfico realizado en un pozo ubicado a 1,5 km al sur de las calicatas, el relleno se compone de arcilla hasta los 10 m de profundidad, bajo la cual se registran 0,4 m de arena. En este sector el nivel estático es de 10 m, de acuerdo a interpolación de niveles estáticos promedio de los últimos 5 años. Actualmente, según los niveles medidos en terreno, se observa un nivel estático de aproximadamente 4 m.

De acuerdo a la estratigrafía anteriormente descrita, el relleno rico en arcilla descrito en las calicatas, se podría encontrar hasta los 13 m de profundidad.

4.1.3 San Miguel de Popeta

Los resultados de los ensayos de permeabilidad en Camino Al Toro sector Sur indica una permeabilidad baja, para todos los niveles medidos, con una tasa de infiltración máxima de 0,86 m/d. Lo anterior ratifica la naturaleza poco permeable del relleno superficial, con contenido de arcilla y limos.

La estratigrafías de los pozos ND1305-65 y ND1305-622, ubicados al 1,5 km al noroeste y 990 m al sureste de las calicatas, respectivamente, muestran un nivel estático aproximado de 15 m (de acuerdo a las líneas piezométricas trazadas con información de los últimos 5 años) y un relleno superficial consistente principalmente en arcilla, subyacente por un relleno de ripio y arena gruesa que tendría buenas propiedades para la recarga y se encuentra intercalado con rellenos menos permeables de arcilla.

De acuerdo a las estratigrafías anteriormente descrita, el relleno rico en arcilla detectado es coincidente con lo encontrado en la mayoría de los estratos de las calicatas y tendría una profundidad estimada en 13 m, por lo que el suelo se presenta desfavorable para la infiltración de agua mediante balsas de infiltración.

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 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 múltiples 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 Resultados de análisis de laboratorio

En la cuenca de Popeta se analizaron 6 muestras, 2 en el sector de San Manuel, 3 en el sector de Popeta y 1 en el sector de San Miguel de Popeta.

A continuación se presentan 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 va a ser infiltrada se encuentre referencialmente bajo una norma, 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 el 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

		¿Valores bajo la norma?			¿VC-VP<1 OM.?		
ID Nombre muestra		PO-P4	PO-C1	PO-C2	PO-P4	PO-C1	PO-C2
Sector		San Miguel de Popeta	San Manuel	Popeta	San Miguel de Popeta	San Manuel	Popeta
Elementos mayores y parámetros de calidad	DBO5 (mg O ₂ /L)	SI	SI	SI	N/A	SI	SI
	Nitratos (mg/L)	SI	SI	SI	N/A	SI	SI
	Sulfatos (mg/L)	SI	NO	NO	N/A	SI	NO
	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	SI	SI	SI	N/A	NO	SI
	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	SI	NO	NO	N/A	NO	NO
Elementos menores	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

Según se observa en la Tabla 4-1, las aguas superficiales no cumplen con los criterios de calidad en los sectores de Popeta y San Manuel. Por otra parte, el agua subterránea disponible para infiltrar en el sector de San Miguel de Popeta cumple con todos los criterios de calidad y es apta para infiltración.

4.3 SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL

La elección del mejor sitio para realizar la recarga artificial se realizó tomando en cuenta el análisis realizado en la fase I y fase II, junto con la discusión llevada a cabo con la CNR. Como resultado se definió que la PPRAA se realizaría en San Miguel de Popeta.

El análisis de los datos de terreno, complementado con estratigrafía de pozos cercanos indica que el espesor no saturado en la zona de estudio estaría dominado por la presencia de arcilla. Este relleno poseería malas propiedades hidrogeológicas para realizar recarga artificial por balsas (tasa de infiltración que varía entre 0,01-0,86 m/d), por lo que, independiente del sector escogido, el terreno es apto para infiltración mediante pozo.

En la Tabla 4-2 se presenta un resumen de las principales características de los 3 sitios evaluados.

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

Sitios identificados y contactados	Marcelo Armijo (San Manuel de Popeta)	Soc. Agrícola Popeta (Popeta)	Angélica Barrera (San Miguel de Popeta)
Aptitud del sitio de acuerdo a metodología	Alta.	Media.	Alta.
Observaciones	GeoHidrología encontró este predio y la comunicación se ha realizado siempre con administradores. Existe disposición a realizar las pruebas	CNR genera el contacto con el gerente de la Agrícola. Él es presidente de la junta de regantes del canal Wodehouse y tiene muy buena disposición para desarrollar el proyecto en su predio.	GeoHidrología encontró este predio y la comunicación se ha realizado siempre con administradores. Existe disposición a realizar las pruebas
A favor	Existen terreno disponibles para desarrollar las pruebas.	Cuenta con terrenos para desarrollar el proyecto de recarga. Cuenta con derechos disponibles sobre el canal Wodehouse	Existen terreno disponibles para desarrollar las pruebas y derechos de aguas subterráneas disponibles.
En contra	No hay derechos de agua regularizados Presenta bajos valores de conductividad hidráulica en los estratos superficiales	Nivel freático somero Presenta bajos valores de conductividad hidráulica en los estratos superficiales	No hay derechos de agua superficial regularizados Presenta bajos valores de conductividad hidráulica en los estratos superficiales
Visión de largo plazo	La zona sur de la cuenca cuenta con una adecuada capacidad, sin embargo existe un número reducido de canales en esta zona. Se pueden realizar obras de encauzamiento de aguas lluvias y realizar obras pequeñas de infiltración. La estratigrafía obtenida de la perforación de pozos sugiere que no es posible utilizar balsas de infiltración en la zona debido a la presencia de una unidad hidrogeológica impermeable en la superficie. Bajo esta se encontraría un unidad con buena capacidad de transporte.		

Fuente: Elaboración propia

Los trabajos realizados indican que el sector de Popeta, no sería apto para las pruebas de recarga artificial. Esta conclusión se fundamenta en que el sector de Popeta presenta espesor no saturado con muy baja capacidad de infiltración, además de un nivel freático muy superficial, situado a los 1,4 m de profundidad. Por otro lado el sector de San Manuel también resulta inadecuado, ya que contiene un estrato duro e impermeable de toba a partir de los 60 cm de profundidad. De los tres sectores preseleccionados el sector de San Miguel de Popeta, es el único donde se pueden realizar las pruebas, ya que, a pesar de presentar un espesor no saturado dominado por arcillas, este espesor alcanzaría valores de entre 11 y 19 m (15 m promedio). Este sector no cuenta con agua superficial, sin embargo, existe agua de pozo y disponibilidad del dueño del terreno para realizar las pruebas.

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 cuales 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 dicha información, 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.

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 Popeta 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 Angélica Barrera, en representación de la sucesión que quedó al fallecimiento de Don Luis Barrera, dueño del predio, y 2) CNR y Don Luis Orozco y Luis Díaz, ambos en representación de la Sociedad Agrícola Ignacio Serrano 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.

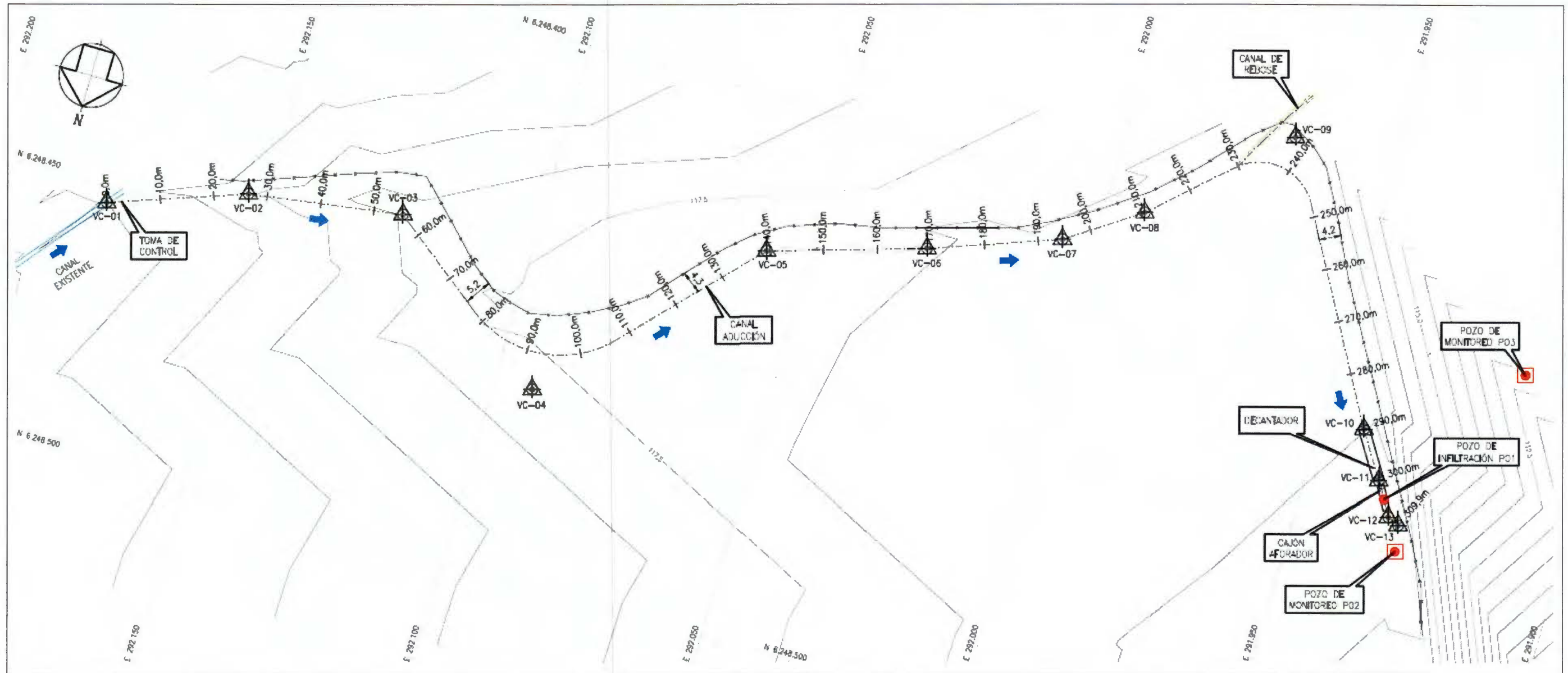
6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL

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

El esquema conceptual diseñado (*as built*) se presenta en la Figura 6-1. Se realizó una toma mediante un manifold que regula el caudal de entrada al sistema y descarga a un canal de aducción y para luego llegar a un decantador revestido. El decantador se instaló como medida de seguridad, ya que no se espera que el canal transporte gran cantidad de material particulado porque el agua viene del mismo acuífero. 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 PO-01 y dos pozos de monitoreo PO-02 y PO-03, perforados con una máquina *Prominas R-1H*, mediante sistema de rotopercusión con entubación simultánea en 6" de diámetro, llegando hasta los 36 m de profundidad y 30 m respectivamente. Los pozos fueron habilitados con tuberías ciegas y ranuradas en acero al carbono de 6" 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 PO-02. La filmación permitió determinar que el pozo se encuentra en un buen estado estructural, sin embargo, ésta fue difícil de observar en algunos tramos debido a la turbiedad del agua ocasionada por la presencia de material en suspensión, el cual además se encontró adherido a las paredes y ranuras de las tuberías. Sobre el nivel del agua, las tuberías ciegas y las uniones entre éstas, se observaron en buen estado y limpias. Bajo esta profundidad, la turbiedad del agua no permitió observar con precisión el estado estructural de todas las uniones y ranuras. Por otra parte, bajo los 15 m las tuberías se encuentran con material adherido a sus paredes, sin embargo, el material era fácilmente removido con el movimiento de la cámara a medida que esta descendía dentro del pozo. Finalmente, el fondo de pozo se alcanzó a los 30,3 m, acorde a la habilitación reportada, presentando muy poca acumulación de sedimento.

Es necesario destacar que la condición actual del pozo permite el ingreso de agua a su interior y por lo tanto cumple su objetivo de pozo de monitoreo. Lo anterior se evidenció en la prueba de bombeo, durante la cual los pozos PO-02 y PO-03 fueron utilizados como pozos de observación y ambos registraron a cabalidad las variaciones de nivel ocasionadas por efectos del bombeo.

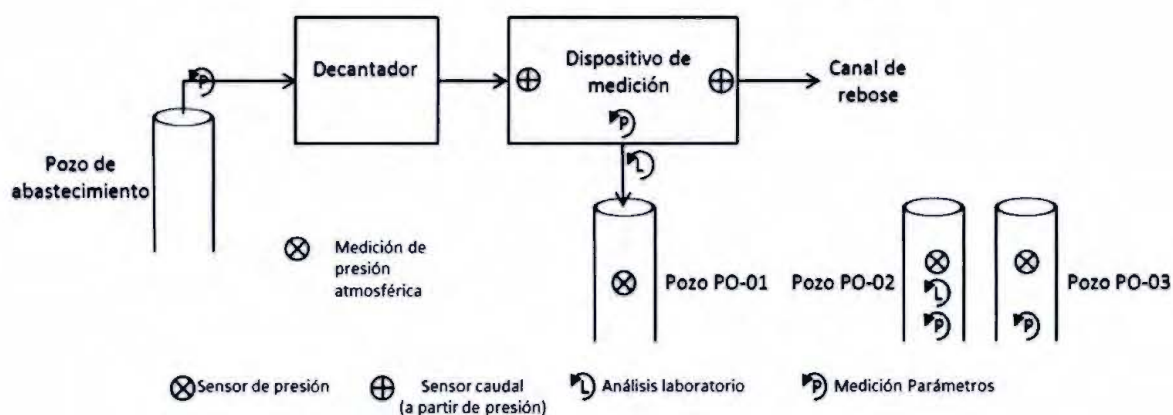
Si bien es cierto gran parte de los trabajos de terreno señalados en el capítulo 4 están considerados en los términos de referencia y fueron ejecutados como parte del proyecto, el orden de las actividades no permiten realizar un diseño adecuado del PPRAA. En efecto, en una primera etapa del proyecto 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 diamantina o algún método 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 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. Particularmente en el caso de Popeta, contar con información estratigráfica antes del diseño, podría haber modificado el diseño del pozo de infiltración a un sistema en presión.

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) altura de agua en el pozo de infiltración, c) nivel del acuífero en los pozos de observación, y d) 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.

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 \$56.999.446, de los cuales el 8% corresponde a costos de instrumentación y un 91% a inversión.

El valor referencial del litro de agua a infiltrar, se calculó utilizando el caudal máximo sostenible infiltrado durante la operación del proyecto, siendo éste 4,5 L/s. De este modo se obtuvo un valor de \$12.666.543 L/s infiltrado.

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

Objetivo asociado	Parámetro	Lugar de medición	Equipo	Marca/ modelo	Frecuencia	Telemetría
Evaluación de efectividad	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				
		Ambiental: presión atmosférica				
Control de los efectos de la infiltración	Parámetros químicos (Set B)	Pozo alimentador antes de la toma	Análisis de laboratorio	-	Mensual	No
		Pozos de observación 1 y 2				
		Cámara del pozo de infiltración	Análisis de laboratorio	-	Una vez	No
		Antes del decantador				
	Parámetros físico- químicos (pH, T°, DO, Cond. Eléc.)	Después del decantador	Medidor multiparámetros portátil	Hannainstrument HI9829	Semanal	No
		Decantador antes de la toma				
		Pozos de observación 1 y 2				
		Cámara del pozo de infiltración				

Fuente: Elaboración propia

7 REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO

Una vez contruidos el pozo de infiltración y los pozos de monitoreo, se realizó una prueba de bombeo de gasto variable y otra de gasto constante en el pozo de infiltración PO-01, con la finalidad de determinar las constantes elásticas del acuífero: Permeabilidad (K) y rendimiento específico (S_y).

La prueba de gasto variable se realizó en 3 etapas, con caudales entre 5 y 11 L/s, los que alcanzaron depresiones entre 1,8 y 10,8 m respectivamente. A partir de los niveles registrados se esbozó la curva de agotamiento, de la que se interpretó que el acuífero durante las pruebas se comportó como un acuífero libre. La prueba de bombeo de gasto constante se realizó para un caudal de 10 L/s con una duración de 24 horas, estabilizando sus niveles con una depresión de 11 m. La rápida estabilización de niveles da cuenta de un almacenamiento muy bajo correspondiente a acuíferos confinados, lo cual se contrapone a lo obtenido en la prueba de gasto variable. Utilizando la fórmula de Thiem para acuífero libre se obtuvo una conductividad hidráulica de 26,6 m/d y una transmisividad= 548 m²/d.

La utilidad principal de las pruebas de bombeo en el caso de la utilización de pozos de infiltración es para determinar posteriormente el tiempo de residencia del agua en el acuífero. En este sentido resulta fundamental reconocer el grado de confinamiento del acuífero, que para el caso de Popeta no resultó ser evidente. La estratigrafía de los pozos perforados indicó que el terreno superficial presenta una capa de arcillas poco permeables de 12 m de espesor sobre un estrato de gravas y grava arenosa de al menos 24 m de espesor. Así, el acuífero tendría un comportamiento dual dependiendo del efecto que produzcan las infiltraciones y bombeos desarrollados. La recarga artificial produce un incremento en los niveles de la napa, que se eleva hasta el estrato superior poco permeable. Esto provoca que el sistema entre en presión y se comporte como un acuífero confinado. Un mayor detalle del comportamiento conceptual del sistema se presenta en la sección 7.2.2.

El agua para las pruebas de infiltración se obtenía del bombeo de un pozo de extracción ubicado en el mismo predio donde se desarrollaron las PPRAA. El pozo extrae caudales importantes (alrededor de 50 l/s) destinándose sólo una fracción para las pruebas. A través de una comunicación personal con los trabajadores del predio, se supo que el bombeo de este pozo generaba una depresión importante y casi instantánea en el estero Popeta (cuando presentaba agua) ubicado en las cercanías de la zona de infiltración, esto último sugiere la existencia de una conexión preferente entre el pozo de extracción y el estero, lo que afecta el sitio de realización del PPRAA.

Se determinaron las constantes elásticas a partir de la operación del pozo de extracción, encontrándose que los valores de transmisividad calculados para este último son un orden mayor a los estimados durante las pruebas de bombeo. Esta discrepancia se explica porque el pozo de extracción presenta una profundidad mayor (70 m) que el pozo de infiltración (36 m) y sugiere la existencia de una unidad más conductora a mayor profundidad que las perforaciones realizadas, o bien conductos preferenciales como fracturamientos.

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 ha diseñado un completo plan de monitoreo descrito en detalle en la sección 6.2.

Se realizaron nueve pruebas de infiltración con caudales diferentes, incluyendo una prueba con caudal nulo, entre los días 14 de agosto y 18 de septiembre de 2014. Durante las primeras pruebas se observó que el pozo PO-01 tiene una respuesta progresiva a la infiltración, en donde el ascenso de nivel demora alrededor de 2 días en llegar un nivel estable. Esta respuesta podría estar influenciada principalmente por la saturación de la zona no saturada en torno al pozo. En los pozos de observación PO-02 y PO-03 la respuesta del sistema resulta inmediata, donde al menos a los 20 minutos de iniciada la prueba se perciben ascensos de niveles en los pozos.

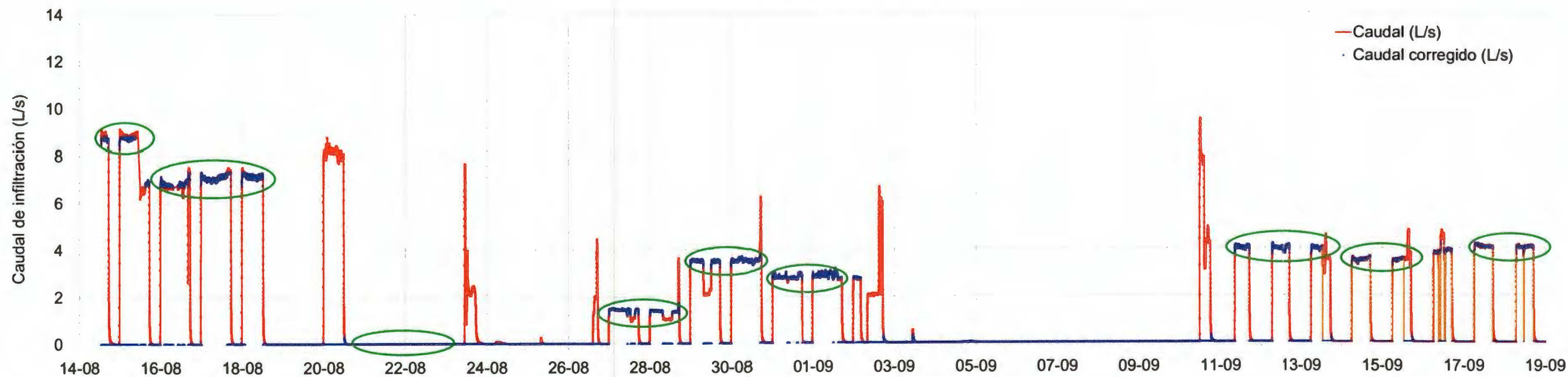
En la Tabla 7-1 se presenta un resumen de cada prueba, con la fecha de inicio y término, el caudal promedio de infiltración y los caudales máximos y mínimo durante la prueba. Además en la Figura 7-1 se presenta la inyección de caudal durante el tiempo que duraron las pruebas (óvalos verdes). La variación de caudal registrada durante cada prueba, se debe a la dificultad en la regulación de la válvula que determina el flujo que ingresa al pozo. Aquellos períodos con oscilación de caudales importantes, no se consideraron para el análisis de las pruebas de infiltración. En la Figura 7-2 se presentan los niveles del acuífero registrados en cada uno de los pozos.

Tabla 7-1: Resumen Pruebas de Infiltración

Prueba	Inicio	Término	Caudal medio L/s	Caudal máximo L/s	Caudal mínimo L/s
P01	14/08 13:00	15/08 10:00	8,8	9,1	8,5
P02	16/08 0:00	18/08 12:00	7,0	7,5	2,6
P03*	20/08 23:00	23/08 9:00	0,0	0,0	0,0
P04	27/08 0:00	28/08 16:00	1,3	1,5	0,9
P05	29/08 0:00	30/08 16:00	3,3	3,7	2,1
P06	31/08 0:00	01/09 17:00	2,8	3,2	2,6
P07	11/09 9:00	13/09 17:00	3,9	4,4	2,9
P08	14/09 6:30	15/09 15:00	3,5	3,6	3,3
P09	17/09 6:30	18/09 17:00	3,8	4,1	3,5

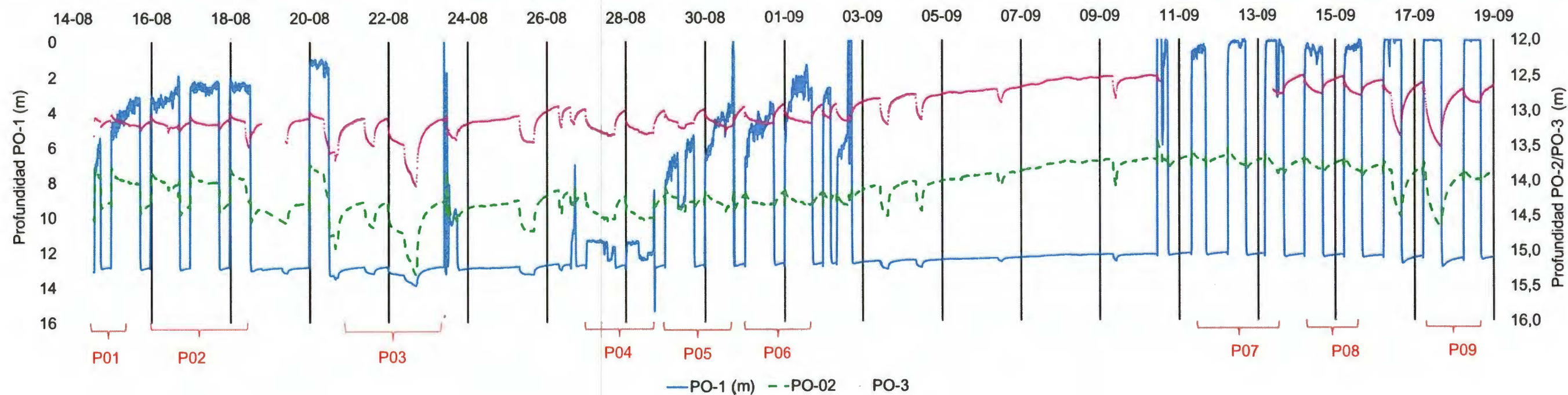
* Aunque no existe infiltración, el pozo de extracción continua bombeando

Figura 7-1: Caudales de las pruebas de infiltración



Nota. Los óvalos verdes indican los periodos para cada una de las pruebas

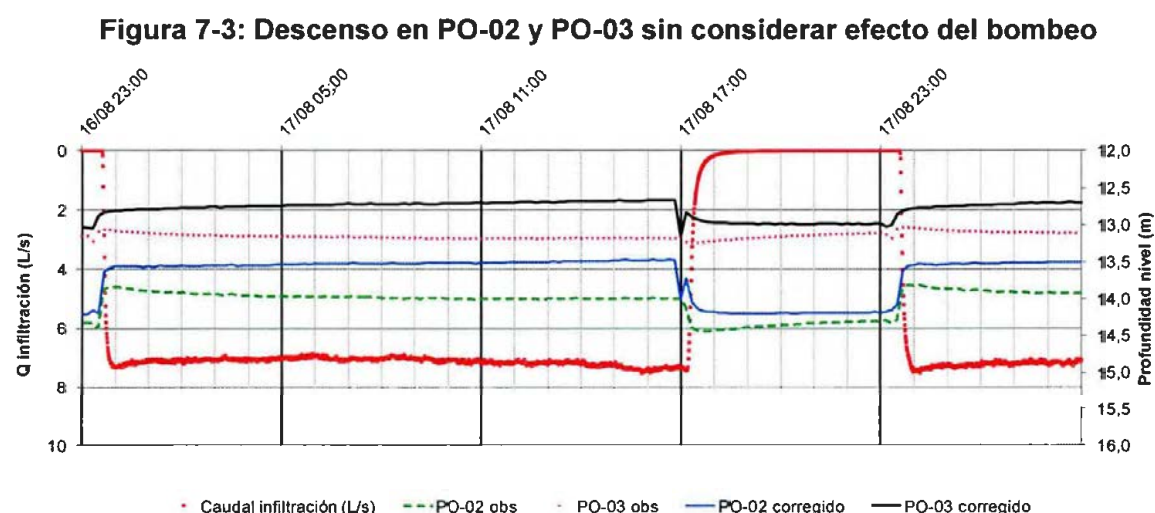
Figura 7-2: Nivel de agua en los pozos de observación durante las pruebas de infiltración



Se realizó el ejercicio de calcular los cociente entre el ascenso desarrollado y el caudal de infiltración a lo largo del tiempo. Un aumento en esta razón implica que para un mismo caudal de inyección se requiere una mayor carga hidráulica (diferencia de nivel entre el pozo de inyección y el acuífero), lo que implica que la capacidad de infiltración del pozo está disminuyendo. Para los tres pozos se aprecia un aumento en la razón, es decir, se aprecia una disminución de la capacidad de infiltración en el tiempo.

Considerando el comportamiento dual del acuífero, donde puede actuar como un acuífero libre y bajo cierto nivel de recarga actuar como un acuífero confinado, es posible explicar la pérdida en la capacidad de infiltración que ocurre durante las PPRAA, donde se reduce la capacidad de infiltración (de 8 L/s a 4 L/s) mientras que la altura en el pozo de infiltración aumentó.

A partir de la prueba P03 (Tabla 7-1), en la cual no se infiltró caudal, se determinó la influencia del bombeo en el pozo de extracción ubicado en el predio (ver sección 7.1) sobre los niveles registrados en los pozos de observación. La Figura 7-3 presenta el nivel medido en los pozos de observación PO-02 y PO-03 y el nivel descontando el efecto del bombeo del pozo de extracción. Este descuento se realizó restando la depresión teórica estimada al nivel medido.



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). Debido a que las aguas infiltradas

proviene del pozo de extracción y por tanto del mismo acuífero, se esperaba que la calidad química de las aguas fuese similar. Como era de esperarse, después de analizar la calidad de las aguas subterráneas a lo largo del tiempo, antes, durante y después de las pruebas de infiltración, no se observó una afectación del acuífero, producto de estas actividades. Cabe mencionar que los resultados fueron contrastados con la norma chilena de riego NCh 1333/DS 90, a partir de esta comparación se puede señalar que todos los resultados del análisis se encuentran bajo la norma.

7.2.2 Análisis de la operación el 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. Se debe tener en cuenta que los modelos conceptuales se van perfeccionando a medida que se cuenta con mayor información. El modelo que acá se presenta incluye toda la información recopilada durante la ejecución del proyecto.

Las muestras obtenidas en la perforación de los pozos sugieren la existencia de una unidad hidrogeológica impermeable, con un espesor de 12 m (UH 1), que está compuesta por arena limosa, arena arcillo-gravosa y arena arcillosa. Baja esta capa se identifica una unidad hidrogeológica permeable, compuesta por grava y grava arenosa de al menos 24 m de espesor.

Al describir los niveles, en primer lugar se observó 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 (distancia menor que 1 Km), durante el transcurso del presente estudio. Se apreció un aumento sostenido de los niveles del acuífero desde finales de julio hasta mediados de septiembre, este aumento es de una magnitud que varía entre 1,5 m y 3 m. El aumento es consistente en todos los pozos considerados. A partir del inicio de las pruebas de infiltración se observa que los niveles suben alrededor de 0,8 m. No se aprecia una correlación directa entre las variaciones en los niveles del acuífero medidos en los pozos y las precipitaciones en la zona. Esto se puede explicar en parte por la estratigrafía del área de estudio, ya que el estrato superior del suelo está compuesta por suelos más bien impermeables (UH 1).

Para facilitar el análisis del funcionamiento hidráulico, este 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 Noroeste. Particularmente, en el sistema de pozo de infiltración y pozos de observación presenta el mismo sentido que el comportamiento regional. Estas direcciones de flujo se conservan durante el periodo en el que se desarrolló el estudio.

El acuífero presentó un comportamiento dual respecto de su confinamiento. La curva de agotamiento obtenida en la prueba de gasto variable da cuenta de la existencia de un acuífero libre, mientras que la estabilización tras la prueba de gasto continua y la rápida respuesta a las infiltraciones y bombeos realizados sugieren lo contrario. Esto se puede explicar porque la napa coincide con la interfaz entre la unidad hidrogeológica superior

impermeable y la unidad inferior más permeable. Como consecuencia de la recarga artificial se incrementan los niveles del acuífero hasta llegar al estrato superior impermeable y el agua entra en presión, esto produce que el acuífero se comporte como un acuífero confinado.

La infiltración se realizó a través del pozo de infiltración PO-1 y representa un flujo entrante hacia el acuífero, levantando los niveles en forma de cono de infiltración, que por la cercanía a la capa impermeable se traduce en un aumento de la presión del agua alrededor del pozo. Esto explica la pérdida en la capacidad de infiltración del sistema registrada en las pruebas, que cae de 8 L/s a 7 L/s y luego a 4 L/s (ver Figura 7-1 y Figura 7-2).

Las aguas en el sistema presentan una composición natural del tipo bicarbonatadas cálcico-sódicas y con conductividades eléctricas entre 0,1 y 1,5 mS/cm. Dada la forma que opera el sistema de infiltración en que se toma agua subterránea para la infiltración, casi no se detectan diferencias entre las muestras obtenidas en distintas etapas del sistema de infiltración, ya que prácticamente son las mismas aguas. Los cambios puntuales observados no son atribuibles a impactos provocados por las pruebas de infiltración.

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

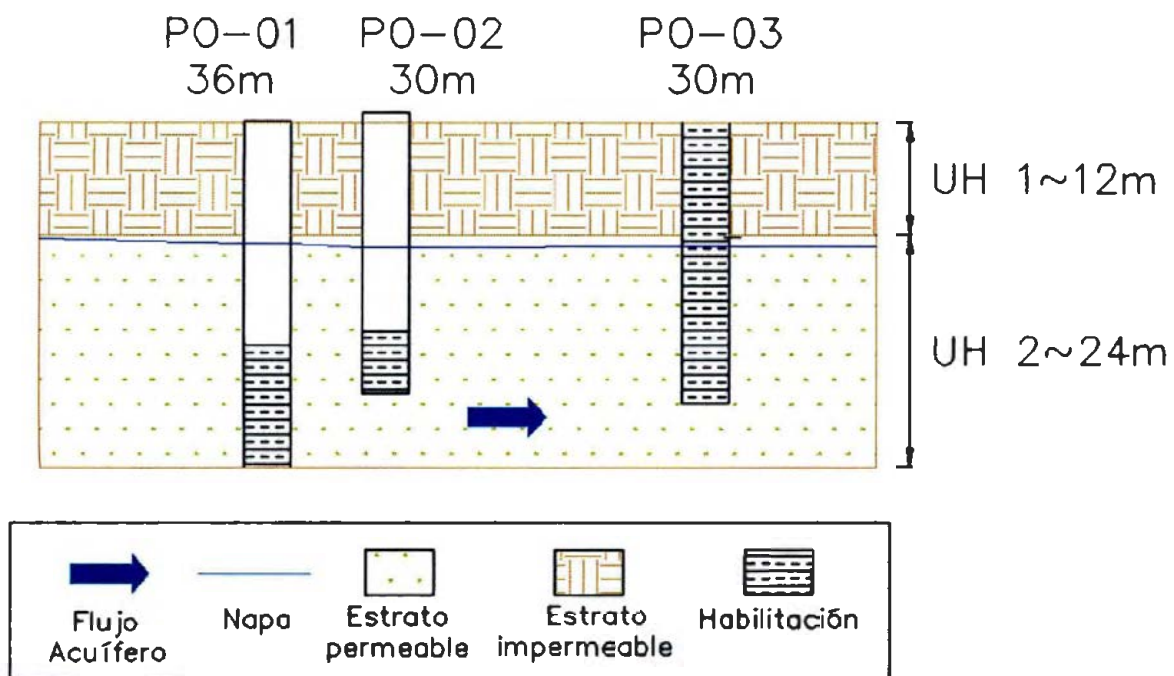
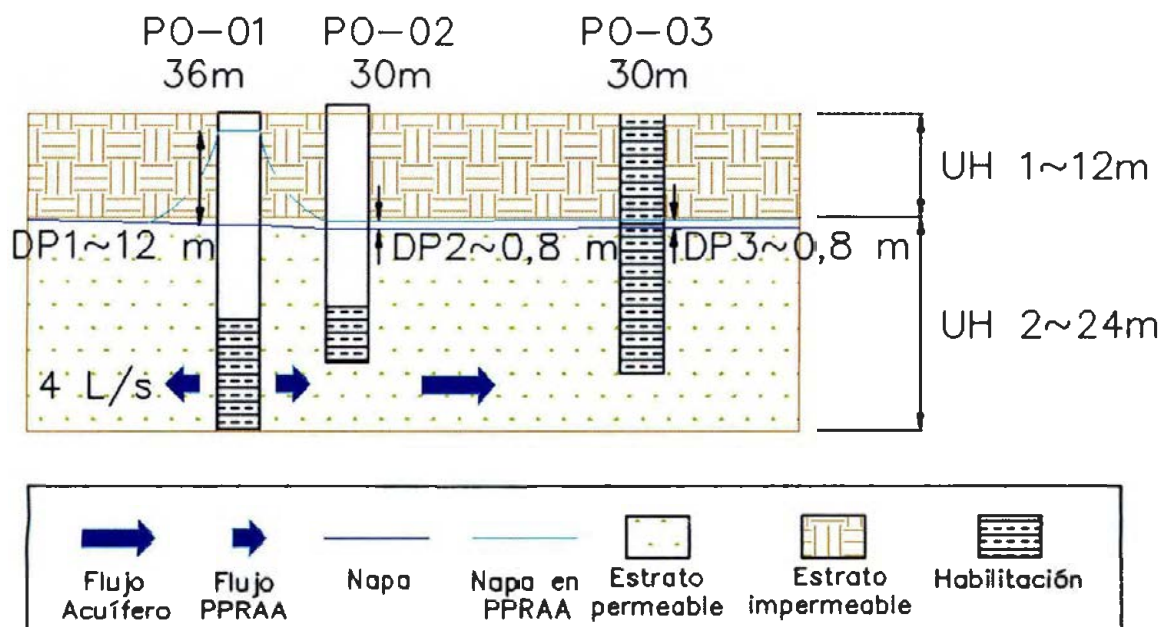


Figura 7-5: Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA



7.3 EFECTO PROYECTADO EN LOS NIVELES DEL ACUÍFERO DE POPETA

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, para lo cual se desarrolló 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, 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 mínimo es de 61 m en la salida de la cuenca, donde la cota de fondo se mantiene en 0 m.s.n.m. Esta cota de fondo se definió considerando los perfiles transversales geológicos. 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 quedó en 13.717, de las cuales 9.860 están activas, lo que constituye un 72% 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: la primera representa la mayor parte de la zona de estudio, con una permeabilidad horizontal de 25 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 0,5 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 (S_s) de 0,001; un rendimiento específico (S_y) 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 los principales cauces de drenaje superficial de la cuenca, los esteros Popeta, Tantehue y Culipran, y c) de flujo especificado para fijar la recarga artificial a considerar y zonas donde no ingresa flujo al modelo. 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 11 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 mayor a una década.

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 las variables más sensibles son el almacenamiento y 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 Popeta.

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 caracterización de cuenca realizada, se vio dificultada por el bajo número de pozos de monitoreo de la DGA que se encuentran habilitados (sólo 5) en el área de estudio. Se requiere de mayor detalle (registro continuo de niveles por al menos 5 años, estratigrafía localizada en el área de estudio, 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. 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 85% del área utilizable (relleno) presenta valores de aptitud media o mayor, mientras que el resto de la cuenca posee una aptitud baja. Sin embargo los resultados de las pruebas

de terreno dan cuenta de una napa muy somera en el sector de Popeta y la presencia de Toba Soldada en San Manuel, por lo que el único sitio apropiado para realizar proyectos de recarga artificial es el sector de San Miguel de Popeta (parte alta de la cuenca).

- El diseño del piloto de recarga artificial 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. Tras realizar las pruebas se pudo corroborar que el diseño propuesto fue el correcto.
- Del modelo numérico desarrollado se obtiene que la infiltración simulada para las condiciones impuestas se conserva en el acuífero por un periodo mayor a 6 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.
- De la operación de las pruebas de infiltración del proyecto piloto se obtiene que la capacidad de infiltración del acuífero es satisfactoria, ya que se logra infiltrar un caudal medio de 4 L/s, utilizando un pozo de infiltración de 36 m de profundidad. Adicionalmente se debe considerar que los niveles estáticos de la napa son menores en invierno, esto permitiría realizar recarga a un acuífero libre y coincide con el periodo cuando se dispondría de mayores recursos hídricos superficiales para realizar recarga artificial.

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:

- Mejorar la red de monitoreo de niveles, especialmente en termino de profundidad del acuífero y conductividad hidráulica. Esto permitirá determinar la variabilidad natural de sitio y con ello la condición dual del acuífero (si funcionara como acuífero libre o confinado). Por otro lado se podría estimar el destino de los recursos recargados. Finalmente 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 a nivel de superficie. El estudio debería determinar la escorrentía superficial provocada por las aguas lluvias. 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. En este caso se podría haber sugerido la construcción de un pozo de infiltración a presión, para aumentar la capacidad del sistema de recarga artificial o bien uno más profundo, para aprovechar las mejores aptitudes de la unidad hidrogeológica inferior.

- Se deberá tener especial atención en la evaluación de la continuidad y consistencia de los recursos superficiales disponibles, ya que estos pueden verse afectados por decisiones operativas de los usuarios de los derechos, lo que provoca una alta variabilidad en la entrada del sistema. En esta línea se deben buscar alternativas para mantener un caudal constante a la entrada de los sistemas de recarga, ya que la variabilidad en los caudales afecta la realización de pruebas piloto. Pese a lo anterior, para un proyecto de recarga la variabilidad es menos importante, ya que interesa medir el volumen total infiltrado al acuífero.

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.

GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

Comisión Nacional de Riego: CNR

GeoHidrología Consultores: GeoH

PO-01: Pozo de infiltración

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

PO-03: Pozo de monitoreo más lejano al pozo de infiltración

mca: 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.