

**"RECARGA DE POZOS
CON AGUA LLUVIA
PARA USO AGRÍCOLA"**
BIP: 40050637-0

1 LLUVIA

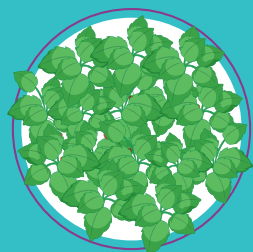


**2 SISTEMA DE
CAPTACIÓN
AGUA LLUVIA**



MANUAL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS CON POZOS NORIA

5 RIEGO



**4 RECARGA DE
ACUÍFERO**



3 POZOS



“MANUAL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS CON POZOS NORIA”

AUTORES

Roberto Pizarro Tapia

Claudia Sangüesa Pool

Alfredo Ibáñez Córdova

Cristóbal Toledo Acevedo

Daniel Páez Duarte

Carlos Flores Arenas

José Luis Arumí Ribera

Romina Mendoza Mendoza

Camila Uribe Sepúlveda

COLABORADORES

Robinson Sáez Lazo (UCSC)

Carlos Vallejos Carrera (UCSC)

Oscar Fernández Torres (UCSC)

Mauricio Acuña Zapata

2025

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Gobierno Regional de Ñuble
por el financiamiento otorgado a través del
Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC).
Asimismo, agradecen al Centro ANID BASAL
FB210015 (CENAMAD) por su contribución
al desarrollo del proyecto.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	ESTADO DEL ARTE	9
2.1.	Situación de la Región de Ñuble	9
2.2.	Disponibilidad hídrica y sequía	11
2.3.	Sistemas de captación de aguas lluvias, Scall	11
2.3.1.	Marco general	11
2.3.2.	Los sistemas de captación de aguas lluvias en Chile	12
2.3.3.	Utilización de los Scall	14
2.4.	La recarga de acuíferos	15
2.4.1.	Marco general	15
2.4.2.	La relevancia hidrogeológica	18
2.4.3.	Antecedentes hidrogeológicos regionales	19
3.	DESARROLLO DEL SISTEMA DE RECARGA DEL ACUÍFERO A TRAVÉS DE LA INYECCIÓN DE AGUAS LLUVIAS EN POZOS	20
3.1.	Sistemas de captación de aguas lluvias (Scall)	20
3.1.1.	Área de estudio	20
3.1.2.	Caracterización hidrogeológica del área de estudio	21
3.1.3.	Selección de las unidades	22
3.2.	Diseño hidrológico de los Scall	24
3.2.1.	Análisis de frecuencia	27
3.2.2.	Bondad de ajuste	29

3.3.	Precipitación de diseño	30
3.4.	Área de captura	31
3.5.	Implementación de las obras	33
3.5.1.	Replanteo en terreno	33
3.5.2.	Construcción de las obras	33
3.5.3.	Conexión entre áreas de captación, estanques, sistemas de recarga y riego, e instalación de bombas	37
3.5.4.	Sistema de riego	39
3.5.5.	Cerco perimetral	40
3.6.	Contexto geológico específico del área de estudio	41
3.6.1.	Unidades hidrogeológicas, parámetros hidráulicos y antecedentes piezométricos	43
3.6.2.	Evolución de niveles según datos regionales	44
3.7.	Recarga de acuíferos con pozos noria	47
3.7.1.	Selección de pozos y características constructivas de los pozos de inyección	47
3.7.2.	Hidrogeología de los sitios de inyección	48
3.7.3.	Pruebas de recarga y evaluación de los pozos de inyección	54
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES	56
4.1.	Conclusiones	56
4.2.	Recomendaciones	58
5.	REFLEXIÓN FINAL	59
6.	BIBLIOGRAFÍA	60

1. INTRODUCCIÓN

En conversaciones entre especialistas ligados al agua, desde hace años se discute la mejor forma de recargar los acuíferos, es decir cómo devolver su capacidad a las aguas subterráneas que cada vez más son utilizadas y sobreutilizadas en diversas partes del país, definiendo situaciones críticas que han determinado una merma significativa de las disponibilidades existentes. Se ha recargado infiltrando agua en el suelo en zonas altas montañosas, en zanjas acondicionadas para ello, en piscinas, etc., pero todas esas acciones determinaban que no siempre el agua infiltrada en zonas altas llegaba a quien había hecho el esfuerzo. Por eso se dice en la jerga de la hidrología, que las aguas subterráneas son veleidosas y no siempre siguen el camino lógico bajo el suelo. Entonces surgió una pregunta: ¿Y si se recarga directamente un volumen de agua al pozo desde el cual se explotan en el verano las aguas subterráneas? Y la respuesta fue, es posible. Pero surgió la segunda pregunta, ¿y de dónde se saca ese volumen de agua? Y la respuesta fue desde las aguas lluvias. En lugar que escurran directamente a los ríos, se capturan y se inyectan directamente a los pozos. Y entonces hubo una tercera pregunta: ¿Y dónde es posible acumular aguas lluvias? Y la respuesta fue en sistemas de captación de aguas lluvias.

Con estas ideas, científicos e investigadores de la Universidad de Talca, con el apoyo de investigadores de la Universidad de Concepción y de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, postularon al Fondo de Innovación para la Competitividad de la Región de Ñuble, adjudicando un proyecto por un total de \$ 260 000 000 en 2023, proyecto que está finalizando y entregando interesantes resultados.

En un contexto general, la zona central de Chile ha experimentado una disminución de las precipitaciones, lo que ha determinado una mayor presión sobre los recursos hídricos existentes y esto ha definido una mayor presión sobre los recursos hídricos subterráneos, lo que se ha verificado en todo el país, con particular énfasis en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas, territorios que detenta y posee la Región de Ñuble, especialmente en las dos últimas categorías. Esta situación ha determinado un descenso del nivel de las napas e inclusive en muchos sectores de la región las bombas extractoras han quedado “colgadas”, es decir los pozos se han secado y las bombas extractoras quedan fuera del nivel de agua subterránea, porque este ha bajado significativamente o bien ha desaparecido el agua de los pozos. En ese contexto, se planteó presentar un proyecto que utilizando la tecnología de la captación de aguas lluvias, diese la oportunidad de acumular volúmenes importantes de agua, que no estuviesen afectos a derechos de agua, por una parte, y que por otra denotaran una calidad a toda prueba, derivado que la recarga de acuíferos exige según la ley, que el agua inyectada sea de calidad igual o superior a la existente en la napa.

Por otra parte, surgió otro aspecto de relevancia, ligado a la necesidad de establecer contactos con entidades públicas que tuviesen actuación en el marco rural, que ayudasen a contactar potenciales beneficiarios que estuviesen dispuestos a realizar el ensayo y que a la vez dispusieran de pozos para probar la recarga de estos con aguas lluvias. Así, se estableció una conexión con

la Asociación de Municipios del Punilla, quienes aceptaron el desafío y apoyaron la postulación del proyecto al Fondo de Innovación para la Competitividad del Gobierno Regional de Ñuble, dada la innovación que el proyecto representaba.

Las líneas que siguen dan cuenta de la realización de un proyecto que debió superar muchos obstáculos para su realización, no solo técnicos sino también administrativos, pero que terminó por dar luces concretas sobre la posibilidad de inyectar aguas lluvias a pozos rurales, en una experiencia inédita en el país, pero que por sobre todo pretende generar herramientas técnicas validadas, que permitan restablecer los equilibrios hidrológicos de los territorios de Ñuble. Y esto es muy relevante, porque estas zonas del secano costero e interior de Ñuble se ubican en un territorio que manifiesta un déficit de caudal subterráneo de 300 litros por segundo, déficit que, si no se controla, puede llevar a situaciones críticas de no disponibilidad de agua para sectores rurales y para diversos usos.

Los resultados que a continuación se presentan, son una primera muestra en Chile de que la recarga de pozos con aguas lluvias es posible y es necesario fortalecer este camino, en el objetivo de recargar nuestros acuíferos, que son la base de la sostenibilidad hídrica del país, como lo demostró la megasequía de 2010–2022, donde las aguas subterráneas fueron las que soportaron la mayor demanda de agua cuando las aguas superficiales bajaron su disponibilidad.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Situación de la Región de Ñuble

Las principales actividades económicas de la región de Ñuble son la agricultura, el sector forestal y el turismo. Estas actividades dan trabajo a aproximadamente un 20% de la población (INE 2024). Al considerar que estas tres fuentes de trabajo y recursos económicos dependen plenamente del agua, se puede prever que serán las más afectadas por periodos de sequías prolongadas. Estas sequías ocurren en escenarios de alta incertidumbre climática, ligados a procesos de variabilidad y cambio climático, que muestran una tendencia a la disminución de precipitaciones. Por otra parte, el PIB nacional y regional se ha incrementado en un valor cercano a tres veces desde 1990 a la fecha y en la misma proporción se ha incrementado el consumo de agua. Esto habla de una mayor presión sobre los recursos hídricos, presión que se establece en primera instancia sobre los de tipo superficial, y cuando estos se agotan, se tienden a utilizar con mayor fuerza los de tipo subterráneo. En este escenario de menor oferta y mayor consumo de agua, la necesidad de mantener el crecimiento de la economía en los diversos sectores como son el agropecuario, el forestal y turismo, determina que a futuro será necesario establecer mecanismos de actuación eficientes en el uso y gestión de los recursos hídricos disponibles. Esto pasa por mantener los equilibrios hidroecológicos de las cuencas hidrográficas, para mantener su productividad por una parte y, por otra, para hacer un uso racional de las ofertas de aguas superficiales y subterráneas. La situación mencionada anteriormente determina un escenario que pondrá una mayor demanda en la extracción de aguas subterráneas, para suplir las necesidades básicas y productivas. En este marco, a modo de ejemplo puede señalarse que la Región cuenta con 104 sistemas de Agua Potable Rural (APR) los que abastecen a 96 236 usuarios, o dicho de otra forma en la Región de Ñuble en promedio cada APR cuenta con 926 usuarios. En este contexto, se debe considerar que la oferta mínima de agua que recomienda la ONU es de 60 litros por habitante y por día, es decir para satisfacer las necesidades básicas de las personas en el periodo estival (90 días), cada APR debe tener al menos 7.015 m³ en sus reservas, volumen que es suficiente para llenar aproximadamente tres piscinas olímpicas. Al considerar que la tasa de recarga natural de los acuíferos es lenta, se vislumbra un desbalance entre la oferta y demanda de agua, derivado que el tiempo de residencia del agua subterránea puede fluctuar entre 8 a 15 años.

Las extracciones de aguas subterráneas para suplir diversos usos productivos, incluido el doméstico, se han incrementado notablemente en los últimos años en un fenómeno a nivel país y del cual la Región de Ñuble no está exenta. Este fenómeno ha determinado un descenso notable del nivel piezométrico de los acuíferos, verificándose en muchos sectores que las bombas extractoras han quedado “colgadas”. Dicho de otra manera, el descenso de la napa es tan importante que los equipos extractores de agua quedan por sobre la línea piezométrica o nivel del agua, generándose una imposibilidad de extraer los recursos necesarios para satisfacer las demandas.

El problema de la disminución del nivel piezométrico se acentúa en el verano, cuando el consumo de agua se incrementa y la oferta disminuye, generando un estado de escasez hídrica. Para mitigar estos efectos se debe transportar agua hacia los lugares afectados. Pero, el transporte de agua es costoso por lo que este esfuerzo se dirige a suplir necesidades humanas básicas. Es decir, los fines productivos no son cubiertos por la oferta disponible. Si a esto se suman los efectos del cambio climático sobre las precipitaciones, donde se aprecia una disminución sostenida y significativa de las mismas (DMC 2025) y sus efectos sobre la isoterma 0°C, disminuyendo las reservas de nieve, se presenta un escenario complejo y de menor oferta hídrica.

En el contexto descrito, la recarga de acuíferos surge como una tecnología viable para propiciar el almacenamiento de agua en el periodo invernal. En este caso, se trata de guardar aguas de excedencia en los acuíferos, permitiendo tener volúmenes de reserva para las demandas en periodos estivales. La recarga de acuíferos normalmente se establece en zonas de mayor altitud en las cuales se construyen obras que favorecen la infiltración del agua en el suelo, tales como zanjas, terrazas o piscinas de infiltración. Sin embargo, estas técnicas tienen la desventaja de ser muy costosas y poseen el riesgo de que los procesos de infiltración terminen no aportando al acuífero que se desea recargar, sino que a uno vecino y que no es parte de los intereses de las personas e instituciones que realizan el esfuerzo. En este contexto, la metodología de los sistemas de captación de aguas lluvias, que permiten la acumulación de centenares o miles de metros cúbicos en función de la escala del proyecto de que se trate, es una alternativa interesante para recargar acuíferos. Si a esto se adiciona que la recarga se haga directamente al pozo desde el cual se extraen los recursos hídricos, se puede obtener una ecuación muy interesante para por un lado capturar agua de calidad en volúmenes importantes, y por otro inyectar directamente al acuífero de interés los volúmenes necesarios para mantener la sustentabilidad en la explotación de este y la seguridad hídrica en el abastecimiento actual y futuro.

En función de lo anterior, se justifica plenamente en una Región como la de Ñuble que presenta zonas importantes de secano, en donde la totalidad de la Región está mostrando carencias en la mantención de las ofertas de agua, bajo un escenario de cambio y variabilidad climática, el llevar a cabo una investigación aplicada que permita combinar las bondades de los sistemas de captación de aguas lluvias con la posibilidad de recarga directa a los acuíferos de interés. Esta combinación investigativa, que no ha sido desarrollada en el país, podría constituirse en una herramienta de alto valor económico y ambiental para la región y para otras regiones del país, constituyéndose en una innovación transformadora en bienes y servicios.

2.2 Disponibilidad hídrica y sequía

El IPCC (2023) en su Informe, señala a Chile como uno de los países con mayor estrés hídrico en la región de América del Sur y América Central; proyecta una disminución de la capa de nieve y el retroceso de los glaciares en la Cordillera de Los Andes, lo que amenaza la seguridad hídrica, especialmente para la zona central, donde reside la mayor parte de la población. Del mismo modo se ha observado un cambio en el comportamiento de la precipitación, la que a nivel diario presenta una tendencia a aumentar su concentración, mientras que a nivel mensual su concentración tiene tendencia a la disminución (Sangüesa et al. 2018). A nivel anual por su parte, la precipitación muestra una tendencia a la disminución. Estas sequías ocurren en escenarios de alta incertidumbre climática, ligados a procesos de variabilidad y cambio climático, que muestran una tendencia a la disminución de las precipitaciones. Estos cambios de la precipitación están afectando la producción agrícola porque afectan la oferta de agua.

2.3 Sistemas de captación de aguas lluvias, Scall

2.3.1 Marco general

Los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (Scall) son sistemas que permiten la captura y almacenamiento de las aguas lluvia para su uso posterior, ya sea para riego, para combatir incendios, para consumo doméstico e incluso como agua potable (García-Chevesich 2015; Sangüesa Pool y Vallejos Carrera 2021; Gebreslassie et al. 2025)

Los Scall están conformados por un primer componente que corresponde a la zona de captación del agua lluvia. Esta puede ser una ladera impermeabilizada o un techo de casa o bodega. En el primer caso se recomienda el uso de geomembranas para impermeabilizar la ladera de un cerro, mientras que, si la superficie de captación se hace en techo, este debe estar en buenas condiciones para no alterar la calidad del agua (Unesco 2015). Un segundo componente del Scall corresponde a la unidad de almacenamiento de agua o hidroacumulador, existiendo para ello diversas alternativas tales como el estanque australiano, de PVC, de fibra de vidrio y estanques flexibles (Unesco 2015; Pizarro et al. 2016; Fernández et al. 2017; Pizarro et al. 2019). Sin embargo, lo que se recomienda es que el hidroacumulador sea hermético de tal forma que no permita el ingreso de luz y aire para evitar la propagación de microorganismos que afecten la calidad del agua almacenada. En este sentido, los estanques flexibles cumplen con las exigencias y mantienen el agua almacenada de buena calidad (Unesco 2015; Sangüesa Pool y Vallejos Carrera 2021).

El diseño de los Scall se realiza bajo criterios hidrológicos, por lo cual las dimensiones del sistema dependerán de las características de la precipitación del lugar, del espacio disponible para su instalación y de las demandas hídricas (Unesco 2015; Sangüesa Pool y Vallejos Carrera 2021).

Las prácticas ancestrales de uso del agua lluvia han existido a lo largo de la historia de la humanidad. Desde sus comienzos, el ser humano ha aprovechado el agua superficial como primera fuente de abastecimiento, consumo y vía de transporte, poblando los valles y riberas de río; y a medida que las civilizaciones crecieron demográficamente, algunos pueblos debieron ocupar zonas áridas o

semiáridas del planeta, con lo que fue necesario buscar otras fuentes de agua, como la captación de aguas lluvias para el riego de cultivos y el consumo doméstico (Pizarro et al. 2016). Así, a través de la historia se ha encontrado evidencia de estructuras de captación de agua de lluvia que da cuenta de la importancia de estas técnicas en el mundo, especialmente en las regiones áridas o semiáridas del planeta (Ballén Suárez et al. 2006).

Ejemplos del manejo de aguas lluvias a través de la historia, como mencionan Pizarro et al. (2016) se han encontrado en el Desierto de Negev, en Israel y Jordania, donde se han descubierto sistemas de captación de agua de lluvia que datan de 4 000 años o más, los que dirigían la escorrentía superficial hacia los cultivos agrícolas en las zonas más bajas. En las zonas altas de Yemen (zona de escasas lluvias), se encuentran edificaciones que datan de antes del año 1 000 A.C., las cuales contemplaban patios y terrazas para captar y almacenar agua lluvia. En la ciudad de Roma de los siglos III y IV A.C., existían viviendas unifamiliares denominadas “la Domus” que contaban con un espacio principal a cielo abierto (“atrio”) y en él se instalaba un estanque central para recoger el agua lluvia llamado “impluvium”. En Irán se encuentran los “abarbans”, los cuales son los sistemas tradicionales locales para la captación y almacenamiento de aguas lluvias (Ballén et al, 2016). En Centroamérica, el Imperio Maya, usaba un área de 100 a 200 m² para capturar el agua lluvia y la almacenaban en cisternas llamadas “Chultuns”; estas cisternas tenían un diámetro aproximado de 5 metros y eran excavadas en el subsuelo e impermeabilizadas con yeso. Otro caso ocurre en el actual Belice, en que los habitantes cavaron canales y diques de drenaje para administrar el agua de lluvia mediante un sistema de depósitos, los que permitían que la gente permaneciera en la zona durante la estación seca, cuando escaseaba el agua potable (año 200 d.C.) (Ballén Suárez et al. 2006).

2.3.2. Los sistemas de captación de aguas lluvias en Chile

El Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, CTHA, de la Universidad de Talca llevó a cabo diversas pruebas para el desarrollo de los Scall en zonas rurales desde el año 2006; la primera experiencia de diseño e implementación de estos sistemas fue el sector Romeralsillo (Región de Coquimbo), en el que se impermeabilizó con geomembrana un área de 308 m² para capturar un volumen de 21 m³ (para una precipitación media anual de 179 mm anuales). Esta unidad fue pionera en el aprovechamiento de las aguas lluvias en el país.

Posteriormente, en el año 2012, el CTHA adjudicó un proyecto financiado por el Gobierno Regional del Maule, el que tuvo como objetivo definir los estándares de diseño y construcción de estos sistemas; para ello se implementaron 12 Scall en las comunas de Licantén, Curepto, Longaví, Chanco y Pelluhue. Se probaron distintas materialidades, tanto para el área de captación como para la acumulación de las aguas. Así, para la captación de las aguas se usó geomembrana y hormigón, mientras que para el almacenamiento del agua se usaron excavaciones cubiertas con geomembrana y hormigón (ambas con techo de internit o zinc), estanques de fibra de vidrio y de PVC, estanque australiano y tanques flexibles o flexitank. Se pudo concluir que, para el área de captura de la lluvia, la geomembrana es el material con mayor eficiencia hídrica y económica. Y

como hidroacumulador se recomienda un estanque hermético que impida el contacto del agua con la luz y oxígeno, teniendo buenos resultados con los estanques flexibles de pvc (Unesco 2015).

Un aspecto relevante de esta iniciativa es la evaluación económica de los Scall como una alternativa al uso de los camiones aljibes. Como lo mencionan Pizarro et al. (2016), se estimó que en promedio cada Scall genera un Valor actual neto (VAN) social esperado de \$13,7 millones de pesos, dado el diseño hidrológico propuesto para el sistema, fluctuando entre un mínimo de \$12 millones de pesos y un máximo de \$17 millones de pesos. Las diferencias observadas entre las distintas comunas analizadas se explican principalmente por el costo de transportar un metro cúbico de agua a través de camiones aljibes, mecanismo mediante el cual se soluciona actualmente el problema de agua en las comunas que fueron beneficiadas con el proyecto. El periodo de recuperación del capital se estima en 2,7 años. Así, se concluye que la implementación de un sistema de agua lluvia para zonas rurales de la Región del Maule, es una inversión segura, con VAN positivo y con un 99% de confianza, lo que la define como una alternativa económicamente viable (Pizarro et al. 2016).

Otro resultado importante fue dado por los análisis de la calidad del agua capturada y almacenada en las estructuras analizadas, determinándose que esta agua es idónea para el consumo doméstico en la mayoría de las zonas donde se realizaron las experiencias (Unesco 2015; Pizarro et al. 2016).

La ejecución de este proyecto y el desarrollo tecnológico de los Scall dieron un impulso para que fuesen incorporados en los programas del Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) y la Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos, a través de los cuales, a partir del año 2015, se fomentó la construcción de estas obras en diversas partes de la Región del Maule y de otras regiones del país. Por otra parte, a partir de esta experiencia, se han desarrollado e implementado Sall en otras regiones del país, tales como Coquimbo, Valparaíso, Ñuble, Biobío y Los Ríos, los que buscan evaluar su aplicabilidad en otros territorios y para uso agrícola (Fernández et al. 2017). Asimismo, los Scall fueron también incorporados en los instrumentos de apoyo a la agricultura por parte de la Comisión nacional de Riego, CNR.

En la Región de Valparaíso se probó la implementación de Scall para establecer plantaciones de maqui en suelos degradados, instalándose 5 unidades experimentales con capacidad de almacenamiento de 30 m³ asociadas a una plantación de 140 plantas de maqui, las cuales fueron regadas por goteo. Los resultados de este proyecto muestran que es posible utilizar esta tecnología en conjunto a biotecnias para la restauración de suelos. En la región del Maule se instalaron 8 unidades muestrales asociadas a plantaciones de maqui, obteniendo buenos resultados. En este marco, se mostró que es factible utilizar los Scall para riego de pequeñas superficies de maqui (*Aristotelia chilensis*) entregando mayor seguridad hídrica en los momentos claves de la planta para la producción del fruto (época de floración y fructificación); de igual forma, si las condiciones climáticas son extremas, se podrá evitar la deshidratación y muerte de las plantas (Fernández et al. 2017; Pizarro et al. 2019).

2.3.3. Utilización de los Scall

Las aguas que son almacenadas por los Scall pueden ser utilizadas para uso doméstico, productivo, humano y animal, entre otros, lo que permite aumentar la seguridad hídrica a escala doméstica y también productiva. Esto mejora la calidad de vida de las personas y a la vez puede favorecer el desarrollo económico y social de distintos sectores. Así, dentro de las actividades que más se han desarrollado mediante la implementación de los Scall, se encuentran los usos para el consumo humano, el uso doméstico y el productivo. Cabe señalar que estas distintas utilidades, requieren distintos niveles de calidad para el agua almacenada, siendo las aguas para consumo humano, las que requieren un mayor estándar de calidad, norma que se encuentra definida en Chile por la NCh 409/1. of 2005 (Pizarro et al. 2016).

Por otra parte, si se piensa en el uso doméstico de las aguas almacenadas —por ejemplo, en el llenado de estanques de baños y riego de jardines, entre otras actividades—, los niveles de calidad necesarios son menores respecto de los requeridos para el consumo humano. Asimismo, y si el volumen de agua almacenada así lo permite, puede ser viable el desarrollo de cultivos agrícolas, los cuales requieren una calidad de agua inferior a la de consumo humano, pero mayor a la de uso doméstico. En este sentido, la calidad del agua necesaria para los usos mencionados se encuentra definida por la NCh 1 333 Of. 78 Modif. 87, más otros parámetros adicionales de tipo biológico y contaminante. De todas maneras, sea cual sea la utilización que se le dé al agua almacenada, se deben cumplir los requisitos de calidad acorde a las normativas vigentes. Respecto de lo anteriormente expuesto, se puede agregar que claramente los Scall tienen diversas aplicaciones, con lo cual son una herramienta muy poderosa a la hora de potenciar el desarrollo social y económico de sus usuarios (Pizarro et al. 2016).

Por otra parte, la captura de aguas lluvias con fines de recarga es una técnica incipiente, pero se ha centrado principalmente en la utilización de tejados para la captura de esta. Este modelo no es recomendable de utilizar, derivado que los tejados son de zinc, pizarreño y tejas, materiales que se degradan con las precipitaciones y pueden ser fuente de contaminantes.

Por último, lo expuesto precedentemente demuestra que existe la capacidad para capturar aguas lluvias de forma eficiente y resta por responder la pregunta acerca de la potencial incorporación de estas aguas lluvias en los acuíferos, que es hacia donde apunta este proyecto.

2.4 La recarga de acuíferos.

2.4.1. Marco general

La recarga de acuíferos es un proceso natural y parte esencial del ciclo hidrológico al interior de las cuencas hidrográficas. No obstante, existen diversos factores que alteran el equilibrio hidrológico de las cuencas, entre ellos, el incremento de la demanda que conlleva el aumento de las extracciones. Muchas veces estas extracciones van por sobre la capacidad de recarga de los acuíferos lo que trae como consecuencia que estos se agoten (Pizarro et al. 2022).

En este marco, surge el concepto de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR, Managed Aquifer Recharge), que representa la intención de recarga utilizando agua superficial, proveniente de las lluvias y ríos, y también de aguas residuales tratadas. Estos sistemas se están implementando con éxito en todo el mundo con varios propósitos: aumentar el almacenamiento de agua subterránea, mejorar la calidad del agua, restaurar los niveles de agua subterránea, prevenir la intrusión de agua salada, administrar los sistemas de distribución de agua y mejorar los beneficios ecológicos (Stefan y Ansems 2018).

En función de lo anterior, algunas investigaciones realizadas a nivel nacional han intentado vislumbrar posibles soluciones que permitan resolver la problemática de la disponibilidad de agua, a través de la infiltración de las precipitaciones y la consiguiente recarga de acuíferos. Así, se ha mencionado a estas metodologías como una alternativa viable en Chile para reducir la diferencia que se produce, particularmente durante la temporada de riego, entre la oferta natural de agua y la demanda del recurso por parte de los diferentes sectores y actividades económicas. En el país, algunas empresas y organizaciones, sin apoyo estatal, están levantando estudios e incluso desarrollan proyectos piloto para analizar la factibilidad de recargar acuíferos, de modo de infiltrar agua a un “embalse subterráneo” en épocas de abundancia, para extraerla del acuífero en época de necesidad. En el ámbito del riego y de las organizaciones de regantes, la Sociedad del Canal de Maipo (SCM), la cual fue apoyada por especialistas de la Universidad de Chile, investigó la posibilidad de infiltrar agua en algunas zonas de su área geográfica de influencia.

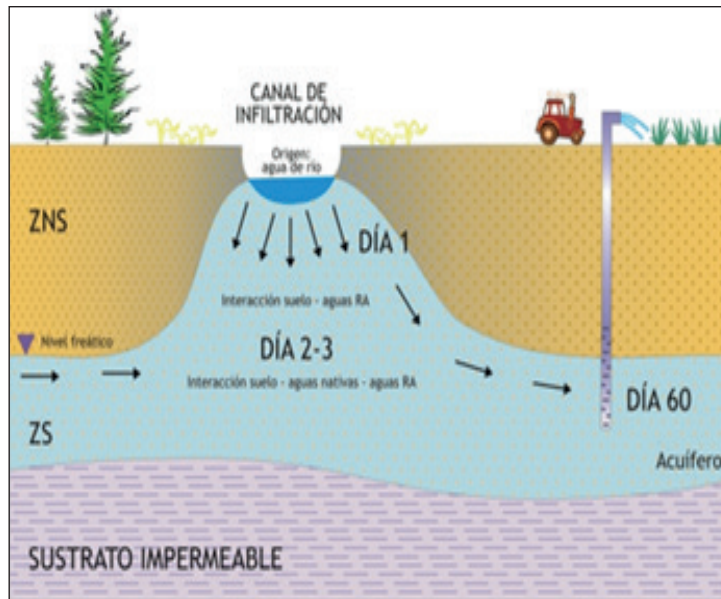


Figura 1. Perfil tipo de un dispositivo de recarga artificial (canal) en “control lateral” en una zona recargable.

Fuente: DINA-MAR-ESCALANTE

Experiencias a nivel internacional señalan la modelación del flujo de aguas subterráneas (acuíferos confinados) como una herramienta clave para la evaluación del estado de los flujos y el transporte de agua subterránea, y por tanto, para una gestión adecuada de los recursos hídricos (Leyva Suárez 2010). En este sentido, la utilización de instrumental de primera línea resulta fundamental para alcanzar estimaciones de alta calidad (errores menores al 10%). Así, existen dispositivos para la medición del nivel del agua, *dataloggers* y telemetría, muestreadores para aguas subterráneas, sistemas multiniveles y de remediación, entre otros, todos los cuales ayudan en el monitoreo constante del comportamiento del agua infiltrada y que permiten desarrollar un sistema de gestión y control de la recarga de acuíferos. Por otra parte, una de las iniciativas de mayor éxito a nivel mundial, lo constituye la realizada en el estado de Arizona, en donde en el año 1985 se completó el acueducto del Proyecto Central (CAP, *Central Arizona Project*). Esta obra, hizo posible que agua del Río Colorado llegara a zonas agrícolas y urbanas de esta zona del desierto del suroeste de Estados Unidos, donde hasta esa fecha el suministro de agua era proveniente sólo del bombeo de los acuíferos. Para el almacenamiento y utilización más efectiva de este nuevo recurso hídrico, el *Salt River Project*, la entidad más grande de aguas del Estado de Arizona, construyó y opera la gran planta de recarga artificial, a saber, el *Granite Reef Underground Storage Project*. Esta planta, ubicada en la zona metropolitana de Phoenix, suministra gran parte de la demanda de agua de cuatro millones de habitantes de esta ciudad, de la industria y de zonas agrícolas colindantes (Lluria 2009). Y en esa zona no era posible construir embalses por razones sociales, ya que las tierras pertenecían a reservaciones indígenas. Por tanto, este proyecto permitió almacenar grandes volúmenes de agua de forma subterránea, por una parte, y por otra impidió un impacto ambiental de proporciones sobre un territorio reservado por ley.

El proyecto *Water Campus* de la ciudad de Scottsdale, es un ejemplo de la utilización y gestión eficiente de recursos hídricos limitados. La aplicación del uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas no requiere planes elaborados ni grandes inversiones de capital. En países de escasos recursos económicos se pueden preparar y poner en práctica planes de bajo costo. Uno de los métodos simples de recarga se basa en la construcción de presas de tierra en cauces de ríos con alta permeabilidad (Bouwer 2002). De lo anterior, se desprende que, para ejecutar este método, se debe intervenir el río, que debe ser muy susceptible a las crecidas del cauce. Así mismo, el agua utilizada para la recarga de los acuíferos no necesariamente debe provenir de cursos de agua. Así, por ejemplo, en Israel, la recarga de acuíferos artificial se está empleando en conjunto con la desalinización de agua para almacenar los excedentes de agua dulce producidos por las plantas de desalinización (Guttman et al. 2017), encontrando que los pozos con doble propósito (recarga y descarga de agua), tienen un mejor rendimiento que los pozos diseñados sólo para la recarga de agua. Por otra parte, en Europa existen 224 sistemas de recarga de acuíferos activos, concentrándose en Alemania (64), Países bajos (41), Francia (21) y Finlandia (14), que en conjunto alcanzan aproximadamente un 63% de los sistemas activos de Europa y en casi todos estos países (excepto Francia), esta tecnología contribuye en más de un 10% a la oferta de agua potable. A su vez, Gupta (2010) e Islam y Talukdar (2016) señalan que en los últimos años la utilización de aguas lluvias para la recarga de acuíferos ha surgido como una alternativa viable para incrementar la oferta hídrica. Una forma de lograr este objetivo es redireccionando la escorrentía superficial desde los techos. Una ventaja de capturar agua en los tejados es el bajo coste de implementación de esta metodología. Sin embargo, tiene la limitante que los techos pueden contaminar el agua lluvia con metales y coliformes fecales, por lo que si se recargara el acuífero con esta agua se podría empeorar la calidad del agua de los pozos. Así, Gupta (2010) describe un sistema de captura de escorrentía superficial en la India, donde esta es acumulada en un reservorio, luego pasa por un proceso de filtrado y es depositada en el acuífero. En este ámbito, Khediya (2016) describió métodos para recarga de acuíferos abandonados en la India. La captación de agua de lluvia podría ser un medio eficaz para complementar la creciente demanda de agua potable en las zonas urbanas de la India, especialmente en áreas de alta pluviosidad como el noreste del país.

Si bien la captación de agua de lluvia se practica en la India desde hace mucho tiempo, nunca se ha considerado seriamente como un componente de la gestión integral de los recursos hídricos para el abastecimiento urbano. Entre las diversas técnicas de captación de agua de lluvia, la recarga artificial de acuíferos mediante la captación en azoteas es el método más eficaz para recolectar una cantidad considerable de agua de lluvia para su uso futuro. En este marco, Islam y Talukdar (2016) y de Naik et al. (2024) determinaron el diseño de captura de agua lluvia en techos con el objetivo de recargar acuíferos a través de pozos de inyección, incorporando cámaras de sedimentación y filtros para mantener la buena calidad del agua lluvia.

En general, los sistemas de recarga de acuíferos se pueden dividir en dos tipos; uno de recarga por medio de inyección de agua al acuífero o de infiltración potenciada por zanjas, piscinas y presas en el cauce, entre otras (Guttman et al. 2017). Así mismo, existen diversas fuentes de agua para realizar la recarga, tales como excedentes del proceso de desalinización, agua de cauces naturales, aguas residuales y aguas lluvias. Grau-Martínez et al. (2018) señalan que las aguas residuales son comúnmente utilizadas en conjunto con las piscinas de infiltración. Por otra parte, la captura de aguas lluvias con fines de recarga es una técnica incipiente, pero se ha centrado principalmente en la utilización de tejados para la captura de esta.

2.4.2. La relevancia hidrogeológica

Dentro del **ciclo hidrológico**, los acuíferos forman uno de los grandes compartimentos de almacenamiento y circulación del agua, con el cual interactúan de manera dinámica y continua el resto de los componentes del ciclo. El agua que precipita en forma de lluvia o nieve, escurre en gran parte sobre la superficie, parte se evapora y otra se infiltra. Del agua que infiltra, se llama agua subterránea a aquella que se almacena bajo el suelo, en los acuíferos.

El **acuífero** es el medio sólido saturado que, por sus propiedades de porosidad y permeabilidad, permite el almacenamiento y flujo del agua subterránea a través de él en cantidades significativas (Fetter 2001).

Las características y distribución de los materiales sólidos que conforman la corteza terrestre, tanto aquellos que se sitúan en las profundidades del planeta, como aquellos que conforman la corteza más superficial, quedan determinados por su **geología**, es decir, por aquellas condiciones que determinaron su génesis, así como por todos sus posibles procesos de transformación.

Los distintos tipos de rocas y sedimentos pueden variar en un amplio rango sus propiedades de dureza, cohesión y porosidad. Cuando se habla de un acuífero o de los acuíferos de un territorio, y de sus propiedades para almacenar y transmitir agua, así como de su capacidad volumétrica y extensión, se debe entender que estos están condicionados, en primer lugar, por las unidades geológicas que lo conforman (Domenico y Schwartz 1998).

Por tanto, la **hidrogeología** es la ciencia que estudia los medios geológicos permeables, el tránsito y las modificaciones que experimenta el agua contenida en ellos (López-Vera 1989).

En el contexto de una disminución de la oferta hídrica proyectada para las próximas décadas, como fuera mencionada en los capítulos anteriores, se ha hecho presente la necesidad de incorporar a los acuíferos como un elemento de gran relevancia dentro de un esquema de gestión integrada de recursos hídricos.

Existen distintos métodos para ejercer la recarga de acuíferos, los que se pueden diferenciar principalmente en si la recarga se hace a nivel superficial sobre la zona no saturada, o si se hace en la zona saturada, es decir, directamente en el acuífero (Dillon 2005). Para ambos tipos se necesita una infraestructura especialmente diseñada para cumplir con los resultados esperados, considerando múltiples factores, como el volumen y tasa de agua disponible, la calidad de agua fuente y el presupuesto de construcción y operación, entre muchos otros.

2.4.3. Antecedentes hidrogeológicos regionales

Los materiales que constituyen la superficie terrestre pueden presentar distintas condiciones para la existencia y calidad de los acuíferos. Las rocas consolidadas, ya sea de tipo ígneas, sedimentarias o metamórficas no poseen en su matriz una porosidad granular significativa, por lo que, en la generalidad de los casos, conforman unidades acuífugas (que no permiten el almacenamiento de aguas en ellas). En casos particulares, en las rocas consolidadas se puede generar porosidad de tipo secundaria, asociada a zonas de fracturas o a efectos de disolución, las cuales tendrán distinta relevancia según sus dimensiones y grado de interconectividad. Por otro lado, los materiales sedimentarios no consolidados, o escasamente consolidados, asociados con procesos de erosión, transporte y acumulación, suelen conformar los acuíferos más típicos y de mejor calidad. Es lo que ocurre de manera característica en la depresión intermedia de Chile Central, donde los depósitos sedimentarios, entrelazados con depósitos de origen volcánicos, acumulan varios centenares de metros, en cuyas capas se almacenan importantes reservas de agua subterránea (DGA y Subterránea SpA 2015).

En los subcapítulos siguientes se describen los principales elementos que permiten caracterizar la hidrogeología de cada sitio en los que se implementaron sistemas de recarga artificial por medio de la captación de agua lluvia y la posterior inyección directa al acuífero, utilizando pozos noria.

3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE RECARGA DEL ACUÍFERO A TRAVÉS DE LA INYECCIÓN DE AGUAS LLUVIAS EN POZOS

3.1. Sistemas de captación de aguas lluvias (Scall)

3.1.1 Área de estudio

La zona de estudio se definió al interior de la región de Ñuble, la cual abarca entre las latitudes 36°00'S y 37°12'S. Su delimitación comprende dos grandes cuencas: la del río Maule en el norte y la del río Itata en su parte central, siendo esta última la que cubre la mayor extensión regional (Figura 2).

Según Sarricolea et al. (2017), el clima predominante es mediterráneo con lluvia invernal (Csb) en el valle central, presentando variaciones de altura en la Cordillera de los Andes (Csb [h]) e influencia marina en el sector costero (Csb [i]). La precipitación media anual muestra una elevada variabilidad, tanto latitudinal como longitudinal, concentrándose las mayores precipitaciones en la Cordillera de los Andes (Figura 2).

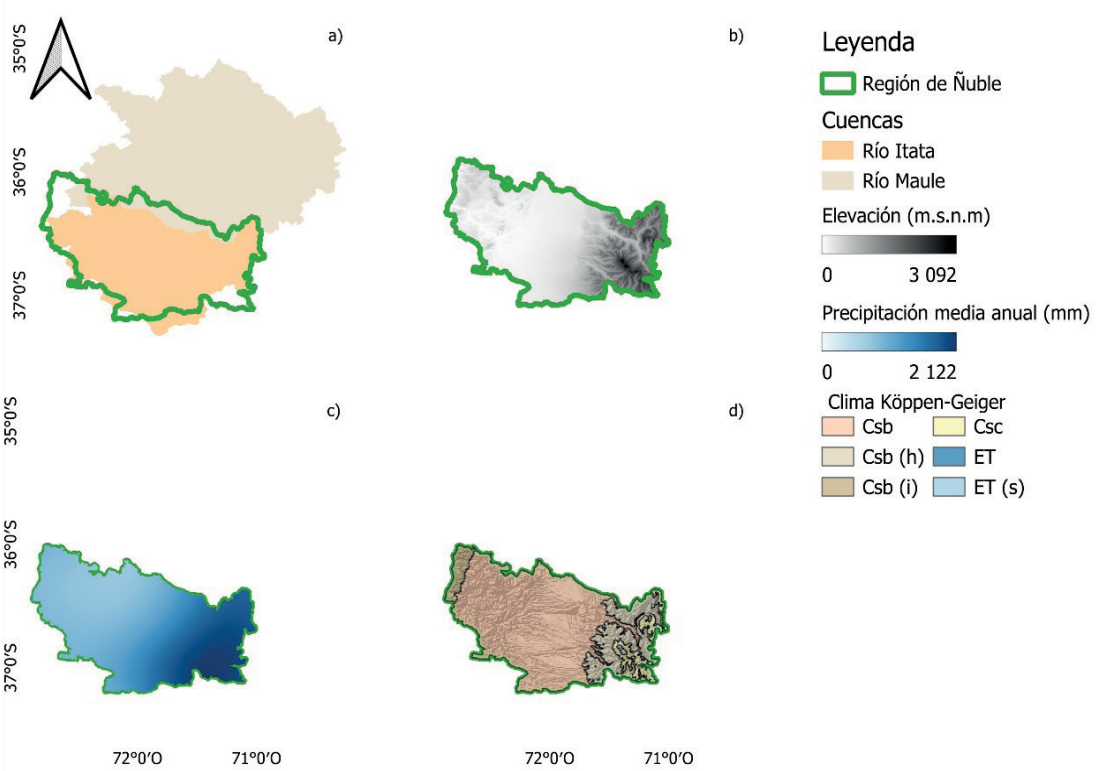


Figura 2. Zona de estudio.

3.1.2. Caracterización hidrogeológica del área de estudio

Durante el desarrollo del proyecto se realizó una conceptualización hidrogeológica del área de estudio, que comprende las comunas de San Fabián, Ñiquén, Coihueco y San Carlos, donde se desarrolla una unidad hidrogeológica principal correspondiente al acuífero sedimentario freático no confinado, originado por procesos aluviales, coluviales y fluviales, asentándose en las cajas de los ríos principales y sus alrededores en forma de abanico con orientación este-oeste. Esta formación se extiende más allá de los límites del área de estudio hacia el oeste, norte y sur, compartiendo los recursos subterráneos con otras comunas como Chillán, Pinto, Ninhue, Parral y Cauquenes. Los pozos existentes se ubican en el acuífero aluvio-fluvio-coluvial, perforados a distintas profundidades y bajo diversos tipos de captación: pozos profundos sobre 30 m, pozos zanja de 7 a 10 m con área entre 20 y 30 m², y pozos noria de 5 a 10 m, aprovechando todos la misma unidad hidrogeológica, lo que implica su dependencia del nivel freático local y regional y sus interdependencias con las tasas de bombeo, recarga, interacciones río-acuífero y afloramientos.

La caracterización determinó que el acuífero sedimentario corresponde a una formación de depósitos no consolidados de arenas y gravas, de carácter freático y no confinado, formada durante el periodo Cuaternario, presentando profundidades variables entre 5 y 120 m con promedio de 55 m, siendo menores hacia el oeste y San Fabián (5-30 m) y profundizándose hacia el centro (30-80 m), alcanzando en sectores puntuales hasta 120 m. La transmisividad varía entre 150 y 450 m²·día⁻¹, con mayores valores en la zona centro, mientras que la profundidad promedio del agua subterránea alcanza los 7 m, destacando en San Carlos un cono de depresión con 20 m mayor de profundidad que posiblemente está revirtiendo el flujo natural hacia centros de bombeo con alta interferencia hacia el río Ñuble. Los hidrogramas de pozos de monitoreo DGA mostraron tendencias a la baja de aproximadamente 5 m desde 2015. En el área existen 581 captaciones con derechos de agua subterránea y un caudal total otorgado de 18 886 L·s⁻¹, distribuidos principalmente en riego (11 893 L·s⁻¹) y consumo humano (1 343 L·s⁻¹), estimándose un bombeo promedio conservador de 1 889 L·s⁻¹ anuales. La recarga natural presenta rangos entre 54 y 871 L·s⁻¹ promedio para el periodo 2000-2020, siendo mayores en la zona de alta transmisividad (326-871 L·s⁻¹) y relativamente menores en el resto del área (54-109 L·s⁻¹), estimándose una tasa promedio de recarga de 1 578 L·s⁻¹ anuales. Esto implica un desbalance del estado del acuífero de -311 L·s⁻¹, indicando un estado no sustentable del recurso subterráneo que justifica ampliamente el proyecto de recarga de pozos con aguas lluvias. Se definió un área de interés con baja transmisividad para favorecer la recarga local, con espacio para recarga de 5 a 10 m de nivel y profundidad somera del acuífero.

3.1.3. Selección de las unidades

Para seleccionar los pozos beneficiarios se definieron criterios en base a una caracterización hidrogeológica que incluyó un análisis de la profundidad del acuífero, transmisividad, pozos existentes, tasas de bombeo, zonas de recarga natural y niveles de agua subterránea al año 2023. Así, se delimitaron dos zonas de análisis según transmisividad alta y baja, considerando esta última como área de interés que produciría mayores beneficios locales de recarga al concentrar las tasas infiltradas en los pozos seleccionados (Figura 3).

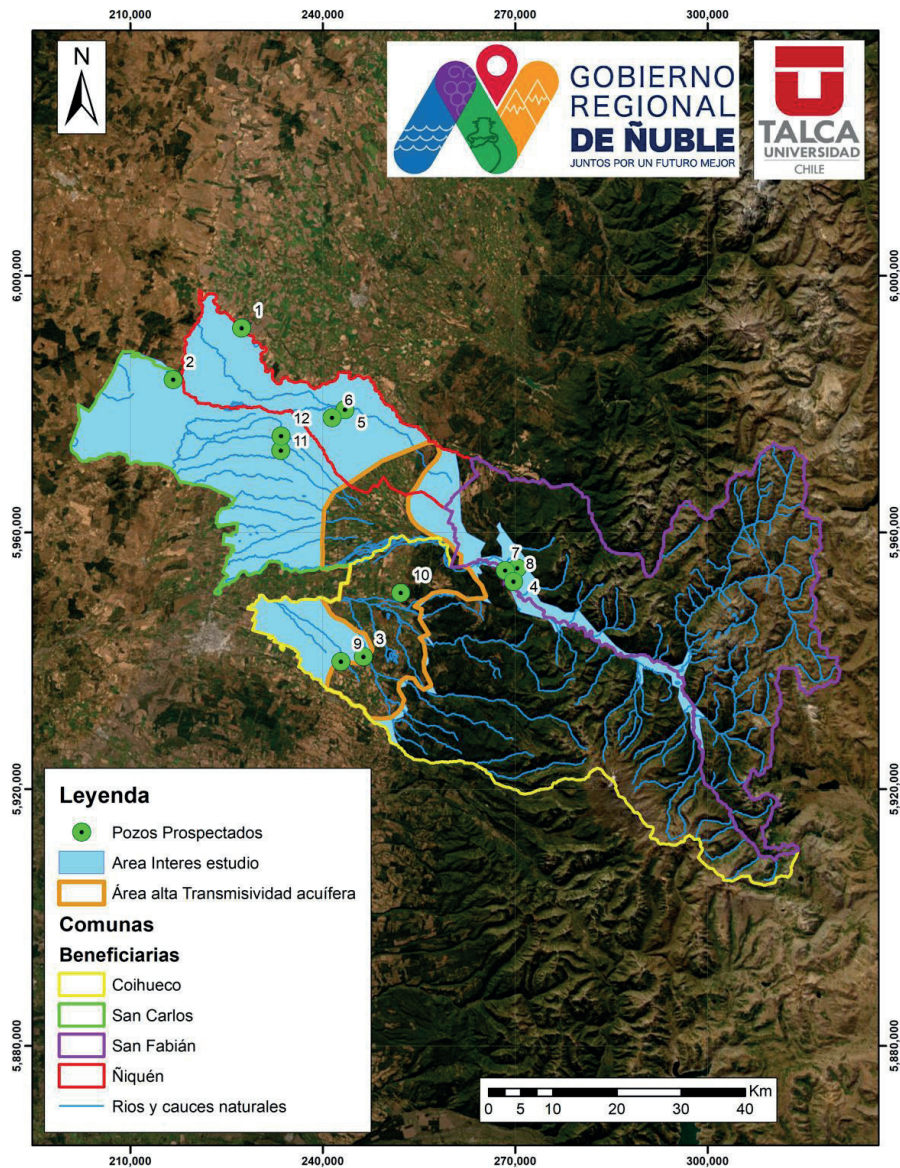


Figura 3. Pozos prospectados durante el proyecto para selección de beneficiarios. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, una vez definida el área de interés y con la ayuda de profesionales de PRODESAL de los municipios respectivos, se visitaron 12 pozos los que fueron georreferenciados y caracterizados en base a una rúbrica de selección (Figura 4); se levantaron características como nombre del propietario, propósito de uso, superficie disponible, comunicación efectiva, profundidad y tipo de pozo, ponderándose estas características para jerarquizar las captaciones.

Los 12 pozos prospectados fueron sometidos a la rúbrica de selección, resultando los pozos 1, 2, 3, 4 y 6 como los cinco potenciales, de los cuales finalmente los pozos 1, 2 y 3 fueron seleccionados como los más aptos para implementar el sistema de recarga (Figura 3), fundamentándose en características hidrogeológicas del área y factores operativos habilitantes para la construcción y operación de los sistemas, presentando el mayor potencial hidrogeológico y operativo para garantizar el éxito del proyecto.

Iteración Selección 1: Criterios de selección cinco pozos beneficiarios potenciales

Bloque I

Pozo	En zona baja T (Si, No)	Condición 1	Entonces	Pozo uso agrícola (Si, No)	Condición 2	Entonces
1	Si	Si esta en Zona de baja T	Considerado	Si	Debe ser uso agrícola	Considerado
2	Si			Si		
3	Si			Si		
4	Si			Si		
5	Si			Si		
6	Si			Si		
7	Si			Si		
8	Si			Si		
9	Si			Si		
10	No			-		
11	Si			Si		
12	Si			No		

Bloque II

Pozo	Comunicación efectiva con propietario/a (Si, No)	Condición 3	Superficie disponible para instalar sistema, mínimo 500 m ² (Si, No)	Condición 4	Entonces
1	Si	Debe ser efectiva	Si	Debe ser uso agrícola	Considerado
2	Si		Si		
3	Si		Si		
4	Si		Si		
5	No		-		
6	Si		Si		
7	Si		No		
8	Si		No		
9	Si		No		
11	Si		Si		

Bloque III

Pozo	Tipo de pozo (3=Noria; 2=Zanja; 1=Profundo) Ponderación 30%	Profundidad pozo (3=7-20 m; 2=20-35 m; 1=otro) Ponderación 70%	Puntaje Total
1	3	3	3,0
2	3	3	3,0
3	3	3	3,0
4	3	3	3,0
6	1	2	1,7
11	1	1	1,0

Iteración Selección 2: Criterios de selección tres pozos beneficiarios

Bloque IV

Pozo	Beneficiario/a apto para operar sistema de recarga (Si, No)	Condición 5	Entonces
1	Si	Beneficiario con interés, tiempo, y capacidad de operar sistema en el tiempo, con capacitación incluida.	Considerado
2	Si		
3	Si		
4	Si		
6	Si		

Bloque V

Pozo	Pozo en condiciones aptas de acoplarse al sistema de recarga (Si, No)	Condición 6	Entonces
1	Si	Pozo bien construido, sin riesgos de operación ni caídas, sin grandes escombros, en uso corriente, a más de 500 m de fosa séptica	Considerado
2	Si		
3	Si		
4	No		
6	No		

Figura 4. Pauta para la jerarquización de los pozos.

3.2. Diseño hidrológico de los Scall

El diseño hidrológico de las obras consideró la variabilidad de la precipitación en las zonas estudiadas (Figura 2), los efectos de la megasequía (Garreaud et al. 2017; González et al. 2018; Garreaud et al. 2020; Álamos et al. 2024) y el volumen potencial a capturar (Pizarro et al. 2016; Fernández et al. 2017; Sangüesa Pool y Vallejos Carrera 2021).

Para ello, se georreferenciaron los puntos de muestreo y se cruzó esta información con la capa de estaciones pluviométricas de la DGA. Este proceso permitió identificar aquellas con registros más cercanos a cada punto (Figura 5).

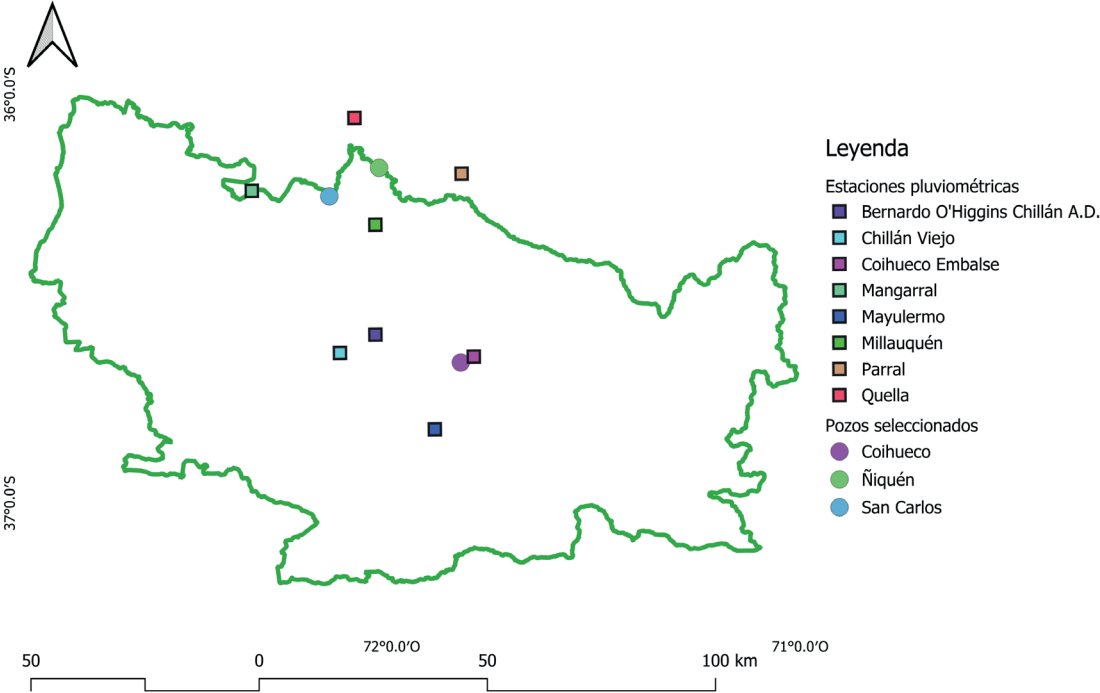


Figura 5. Pozos seleccionados y estaciones pluviométricas cercanas.

La selección consideró además el número de datos disponibles en el periodo normal (1991-2020), rechazando estaciones cuya longitud en este intervalo fuera inferior al 80%; es decir, ninguna con menos de 24 años de datos fue seleccionada. Asimismo, y con el fin de capturar de mejor forma la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un ajuste de Inverso Ponderado por la Distancia entre las estaciones seleccionadas y los sistemas a construir (Tabla 1), seleccionado las estaciones cuya distancia es menor a 30 km.

Tabla 1. Matriz de distancia.

Punto	Estación	Distancia (km)
Ñiquén	Quella	14,6
	Millauquén	15,5
	Parral	18,3
	Mangarral	28,7
	Bernardo O'Higgins Chillán A.D.	45,3
	Chillán Viejo	51,0
	Coihueco Embalse	55,3
	Mayulermo	72,0
San Carlos	Millauquén	12,7
	Mangarral	17,1
	Quella	22,0
	Parral	29,8
	Bernardo O'Higgins Chillán A.D.	38,9
	Chillán Viejo	42,6
	Coihueco Embalse	53,8
	Mayulermo	67,3
Coihueco	Coihueco Embalse	3,3
	Mayulermo	19,0
	Bernardo O'Higgins Chillán A.D.	20,2
	Chillán Viejo	26,6
	Millauquén	41,8
	Parral	51,3
	Mangarral	65,4
	Quella	70,4

Los procedimientos descritos permiten caracterizar la variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones y así asegurar que los valores estimados describan adecuadamente la zona de estudio. Esta metodología definió tres series de datos para cada punto seleccionado, con una longitud de 30 años, para realizar un análisis de frecuencia (Tabla 2).

Tabla 2. Precipitaciones estimadas para cada zona de estudio.

Precipitación IDW (mm)				Precipitación IDW (mm)			
Año	San Carlos	Ñiquén	Coihueco	Año	San Carlos	Ñiquén	Coihueco
1991	879,9	879,9	1332	2006	1054,2	1013,6	1725,7
1992	1202,8	1264,8	1971,8	2007	552,1	516,9	930
1993	820	844,5	1646,1	2008	927,7	913,7	1242,4
1994	681	661,4	1339,8	2009	788,7	758,5	1386,7
1995	798,7	780	1351,3	2010	586,4	539,3	928,2
1996	613,4	604,7	986,7	2011	648,8	642,5	1253,6
1997	1160,8	1108,8	1723,2	2012	767,7	687	1092,2
1998	390,9	361,5	662,2	2013	571,8	554	1061
1999	788,6	746,8	1293,8	2014	849,2	834,3	1609,6
2000	937,8	916,2	1709,7	2015	833,8	762,8	1425,5
2001	1071,9	996,7	1977,5	2016	415,6	411,3	707,6
2002	1296,4	1251,3	2118,3	2017	864,9	843,6	1605,9
2003	619	558,6	1156,4	2018	427,4	427,4	780,1
2004	850,4	805,1	1472,3	2019	473,9	473,9	632,8
2005	1042,6	991,6	1747,7	2020			572,5

3.2.1 Análisis de Frecuencia

Los datos de las series estimadas fueron sometidos a un análisis de frecuencia, buscando la Función Distribución Acumulada (FDA), que represente de mejor forma los datos estudiados (Riggs 1968). Entre las distribuciones probadas, se encuentran las siguientes (Tabla 3).

Tabla 3. Ejemplo de Funciones de Distribución Acumulada (FDA)

FDA	Fórmula
Dagum	$F(x) = \left(1 + \left(\frac{x}{b}\right)^{-a}\right)^{-p}$
Normal	$F(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right]$
Log-Normal	$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)$
Gompertz	$F(x) = 1 - e^{-\eta(e^{bx}-1)}$
GEV	$F(x) = e^{-\left[1 + \frac{\xi(x-\mu)}{\sigma}\right]^{\frac{1}{\xi}}}$
GEV Tipo I: Gumbel	$F(x) = e^{-e^{-\frac{(x-\beta)}{\alpha}}} \quad \xi = 0$
GEV Tipo II: Frechet	$F(x) = e^{-\left[1 + \frac{\xi(x-\mu)}{\sigma}\right]^{\frac{1}{\xi}}} \quad \xi > 0$
GEV Tipo III: Fisher-Tippett	$F(x) = e^{-\left[1 + \frac{\xi(x-\mu)}{\sigma}\right]^{\frac{1}{\xi}}} \quad \xi < 0$
Kumaraswamy	$F(x) = 1 - (1 - x^a)^b$
Log-Pearson III	$F(x) = \frac{(\lambda^\beta (\ln(x) - \varepsilon)^{\beta-1} e^{-(\ln(x)-\varepsilon)})}{x\Gamma(\beta)}$
Pareto	$F(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x}\right)^\alpha$
Weibull 2 parámetros	$F(x) = F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$

El análisis de frecuencia se realizó utilizando los softwares R (R Core Team 2024) y Cumfreq (Oosterbaan 2019), los cuales permiten la estimación de parámetros mediante máxima verosimilitud. Además, R posibilita realizar un Bootstrap de la muestra para estimar los intervalos de confianza, permitiendo así una mejor comprensión del comportamiento estadístico de los datos.

La elección del software depende de las habilidades del usuario. Aquellos experimentados en análisis de datos pueden preferir programar, dado que esta metodología es más flexible y permite procesar grandes volúmenes de datos. Cumfreq se recomienda para quienes no posean conocimientos de programación, pero sepan interpretar salidas estadísticas, ya que es un programa visual que entrega automáticamente los mejores resultados, aunque sin explicar su significado.

- Ejemplo de uso de los softwares

En R, se asume que se tiene un dataset con la precipitación (Pp anual) como variable.

Tabla 4. Ejemplo de uso de R para ajustar FDA.

I) Instalar Paquetes	<code>install.packages("fitdistrplus")</code> <code>install.packages("VGAM")</code> <code>install.packages("readxl")</code>
II) Cargar paquetes	<code>library(fitdistrplus)</code> <code>library(VGAM)</code> <code>library(readxl)</code>
III) Cargar datos	<code>ruta<-file.path(Sys.getenv("USERPROFILE"), "Desktop", nombre_archivo)</code> <code>dataset<-read_excel(ruta)</code> <code>Pp_anual <- dataset\$Pp_anual</code>
IV) Ajustar Gumbel	<code>ajuste_gumbel <- fitdist(Pp_anual, "gumbel", start= list(location = mean(Pp_anual),scale=sd(Pp_anual)))</code>
V) Gráfico P-P	<code>plot(ajuste_gumbel)</code>
VI) Bondad de ajuste	<code>gofstat(ajuste_gumbel)</code>
VII) Variable aleatoria	<code>cuantil_01 <- quantile (ajuste_gumbel, probs = 0.1)</code>

* en nombre de archivo colocar el nombre del Excel. La probabilidad 0,1 puede ser cambiada.

En Cumfreq, los datos deben pegarse en la pantalla de entrada (Input) y luego presionar el botón Save-Run (Figura 6). Posteriormente, el programa solicitará seleccionar un directorio para guardar los resultados y ajustará automáticamente los datos a la distribución más apropiada.

CumFreq cumulative frequency analysis to find fitting probability distributions

File Edit

Intro **Input** Output Graphics

Title1

Title2

Options

Nr. of Data

Nr. of Intervals for histogram

Threshold (cut-off for data values)

Serial Nr.	Data value
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	

Select a preferred probability distribution

Actual selection

An amplified version (CumFreqA) offering composite distributions can be made available on request

Nothing is 100% sure

That's for 100% sure

Clear data Paste help Save-Run Open input

Enter data or use "Open" to see examples under "Data" or to edit existing files. Thereafter use "Save-Run".

Figura 6. Entradas de datos en Cumfreq.

3.2.2. Bondad de Ajuste

Las pruebas tradicionales de bondad de ajuste en estadística, según mencionan Legates y McCabe (1999), incluyen la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error medio absoluto (MAE), los gráficos cuantil-cuantil (Q-Q) y los gráficos probabilidad-probabilidad (P-P), entre otras.

Para evaluar la calidad del análisis de frecuencia, se emplearon el NSE (ecuación 1) y el gráfico P-P. Estas herramientas permiten identificar si la variabilidad explicada por el modelo es adecuada ($NSE > 0,9$) y si las probabilidades observadas y estimadas presentan distribuciones similares.

A continuación, se explica cómo utilizar estas pruebas de bondad de ajuste:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (1)$$

Donde y , $\hat{y}$ e $\bar{y}$ representan las probabilidades observadas, estimadas por la FDA y la media observada, respectivamente.

El gráfico P-P se interpreta visualmente. Un ajuste adecuado presentará los valores estimados cercanos a la línea de ajuste perfecto, es decir, una relación 1:1 (Figura 7).

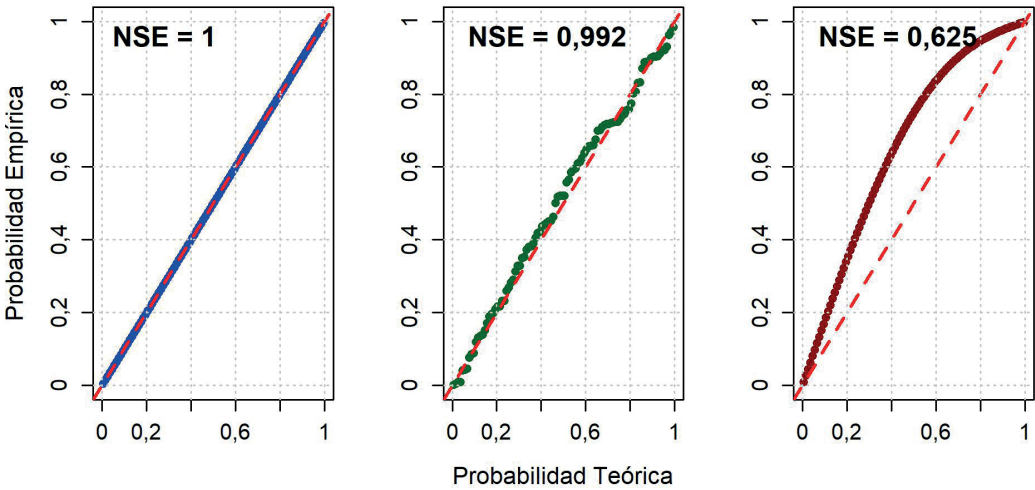


Figura 7. Ejemplo de gráficos P-P

3.3. Precipitación de diseño

Los pasos antes mencionados permiten seleccionar la mejor FDA, es decir, aquella que represente de mejor forma los datos observados mediante las pruebas de bondad de ajuste. Al tener la FDA seleccionada, se puede estimar el valor de la variable aleatoria para distintas probabilidades. Para el diseño de Scall, Sangüesa Pool y Vallejos Carrera (2021) señalan que una probabilidad de no excedencia de 0,1 equivale a un periodo de retorno de aproximadamente 1,1 años; es decir, la precipitación de diseño proyectada se igualará o superará 9 de cada 10 años.

Al ajustar los datos de las zonas de estudio, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5. Resultados del análisis de frecuencia.

Parámetro	Ñiquén	San Carlos	Coihueco
FDA	Fishe r-Tippett tipo III	Fisher-Tippett tipo III	Fisher-Tippett tipo III
NSE	0,98	0,98	0,98
P(0,1)	442,1	456,5	694,4

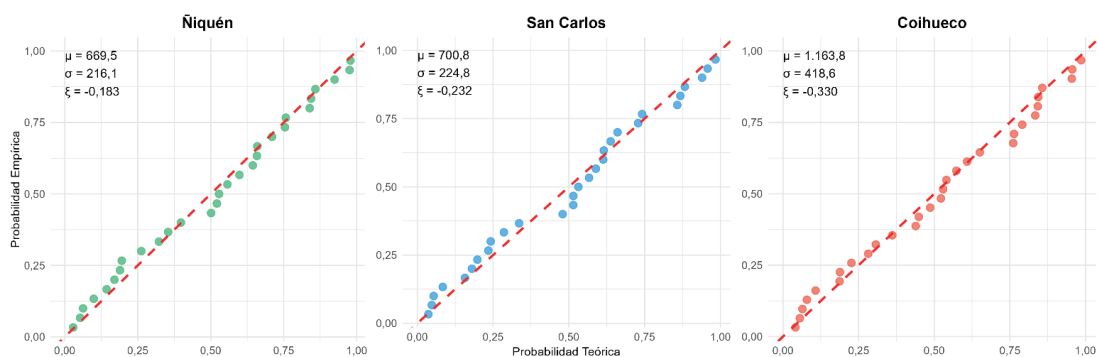


Figura 8. Gráficos P-P para la zona de estudio.

Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste demuestran que los datos se ajustan adecuadamente a la FDA Fisher-Tippett tipo III, evidenciado por valores de NSE superiores a 0,95 en las tres zonas analizadas (Tabla 5). Además, los gráficos P-P muestran una distribución cercana a la relación 1:1 (Figura 8).

En consecuencia, la FDA Fisher-Tippett tipo III resulta apropiada para modelar la precipitación anual en las zonas estudiadas.

Al calcular la variable aleatoria para una probabilidad de 0,1 (período de retorno de aproximadamente 1,1 años), se obtienen precipitaciones de diseño que corresponden a 442,1 mm para Ñiquén; 456,5 mm para San Carlos; y 694,4 mm anuales para Coihueco (Tabla 5).

3.4. Área de captura

El área de captura de los sistemas de captación de aguas lluvias se diseña a partir de la precipitación de diseño, utilizando la ecuación 2. Para ello, se ingresan el volumen en m^3 , la precipitación de diseño en metros y el coeficiente de escorrentía. Este último depende del material utilizado en la geomembrana, con valores que oscilan entre 0,8 y 0,9. (Pizarro et al. 2016, 2019; Sangüesa Pool y Vallejos Carrera 2021).

$$\text{Área de captura (m}^2\text{)} = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)}}{P(m) \times C} \quad (2)$$

Las dimensiones de cada Scall se determinaron a partir de los siguientes datos: Flexitanks de 80 m³, las precipitaciones de diseño de la Tabla 5 y un coeficiente de escorrentía de 0,8. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 6. Áreas de captura estimadas.

Parámetro	Ñiquén	San Carlos	Coihueco
Área de captura (m²)	226,2	219,1	144,0

Inicialmente, se determinó que las áreas de captación de los Scall variaron entre 144,0 y 226,2 m² (Tabla 6). Sin embargo, el valor final dependió de las características del terreno donde se instaló la obra.

Una vez determinado el tamaño del área de captura, se procedió a diseñar su forma. Para ello, se consideraron las condiciones y superficies disponibles en el sitio a instalar, así como las dimensiones de los materiales y herramientas a utilizar.

Para el presente proyecto, las áreas de captura se diseñaron considerando que la geomembrana se comercializa en rollos de 7 metros de ancho por 100 metros de largo. Se debió descontar parte del ancho para el anclaje en el suelo (2 metros, 1 por cada lado) y para la fusión de las dos mitades del material (0,5 metros). Por lo tanto, de los 14 metros disponibles (dos rollos unidos), se utilizaron efectivamente 11 metros.

Estas limitaciones determinaron un ancho de 11 metros para cada área de captura, calculándose el largo mediante la relación: $\text{largo} = \text{área} \cdot \text{ancho}^{-1}$ (Figura 9).

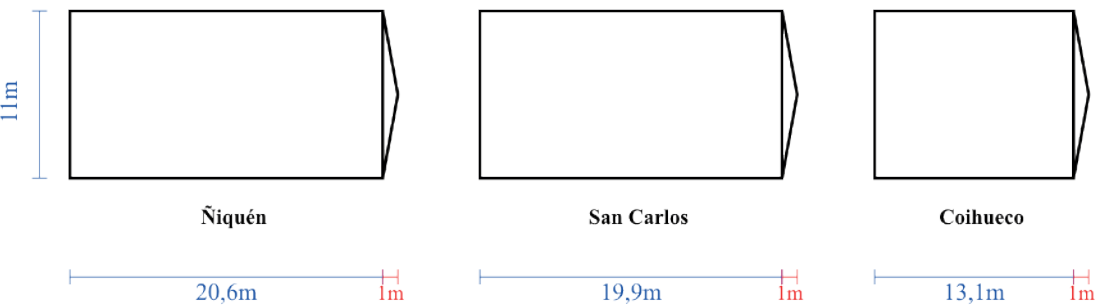


Figura 9. Dimensiones de las áreas de captura de las obras.

3.5. Implementación de las obras.

3.5.1. Replanteo en terreno.

A partir de los diseños de los sistemas previamente calculados, se realizó un replanteo topográfico en terreno previo al inicio de la construcción. Este procedimiento permitió verificar que las dimensiones, cotas y elementos constructivos especificados en los planos se ajustaran a las condiciones reales de cada sitio de emplazamiento, asegurando la precisión durante la ejecución. Dado que los tres predios seleccionados presentan pendientes mínimas, se ejecutó una excavación de mayor profundidad en el área de los estanques de acumulación. Esta medida permitió evitar el retorno del agua hacia la zona de captación y garantizar el llenado completo y controlado de los sistemas.

Adicionalmente, durante una visita técnica en terreno, se establecieron medidas complementarias para mitigar riesgos de anegamiento en las zonas de instalación ante eventos de precipitaciones intensas, resguardando la estabilidad y funcionalidad de las obras.

La etapa de construcción de los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias contempló actividades secuenciales orientadas a garantizar la correcta instalación y operatividad de las obras.

3.5.2. Construcción de las obras.

Una vez definido el emplazamiento óptimo de cada sistema, se procedió a la limpieza y despeje del área de trabajo, removiendo material superficial y obstáculos que pudieran interferir con la instalación. Durante esta labor se priorizó la minimización del impacto ambiental, evitando alteraciones innecesarias en el entorno. Afortunadamente, en los tres sitios seleccionados no se identificó vegetación relevante; el terreno mostró una composición pedregosa con escasa cobertura vegetal, lo que facilitó las labores de preparación inicial.

• Excavación, nivelación y conformación de taludes

Concluida la limpieza del terreno, se efectuaron las labores de demarcación, excavación y nivelación mediante maquinaria retroexcavadora, ajustándose al volumen de material a remover y a las condiciones topográficas particulares de cada predio (Figuras 10, 11 y 12). Para asegurar el funcionamiento hidráulico adecuado de los sistemas, se estableció que las superficies de captación debían mantener una pendiente entre 3% y 5%, rango que permite el escurrimiento eficiente del agua lluvia hacia el hidroacumulador. Dado que los tres sitios presentaban pendientes naturales inferiores a este valor, fue necesario realizar correcciones topográficas. Para ello, el equipo de obra reutilizó el material extraído durante las excavaciones, conformando dos elementos estructurales complementarios:

- **Talud superior de corrección:** se construyó en la parte alta del área de captación para regular la inclinación del terreno, garantizando un flujo uniforme del agua sobre la superficie de la geomembrana impermeabilizante.
- **Talud inferior de contención:** se construyó en la parte baja del área de captación para contener temporalmente el agua recolectada y dirigir el caudal hacia el sistema de desagüe, cumpliendo una función análoga a la de la cortina de una pequeña represa.

Ambos taludes fueron debidamente compactados para asegurar su estabilidad estructural y durabilidad ante eventos de lluvia intensa. Esta estrategia permitió optimizar la nivelación sin requerir material adicional.



Figura 10. Demarcación en terreno, unidad de Coihueco.



Figura 11. Nivelación y excavación en terreno unidad de Coihueco.



Figura 12. Conformación de talud unidad de Niquén.

- **Instalación de la geomembrana en el área de captación**

Para asegurar una correcta sujeción y estabilidad de la geomembrana al terreno, se realizó una excavación y conformación de canaletas perimetrales alrededor del área de captación. Estas canaletas, con una profundidad aproximada de 40 cm, permitieron enterrar y anclar parcialmente los bordes de la geomembrana, evitando desplazamientos por acción del viento, escorrentía o saturación del terreno. La geomembrana fue instalada con especial cuidado para evitar pliegues o tensiones excesivas, garantizando su ajuste adecuado a la superficie compactada y su funcionamiento óptimo como barrera impermeable durante la operación del sistema (Figura 13).



Figura 13. Compactación de terreno en unidad de San Carlos e instalación de la geomembrana en la unidad de Coihueco.

- **Excavación del espacio del hidroacumulador**

Paralelamente, se ejecutó la excavación del espacio destinado al hidroacumulador, considerando un diferencial de altura suficiente para generar la presión hidráulica necesaria que garantizara el llenado y vaciado eficiente durante las fases operativas del sistema. Las excavaciones de San Carlos y Coihueco alcanzaron una profundidad de 1,5 metros, equivalente a la altura total de los estanques flexibles en su capacidad máxima de llenado, permitiendo así un almacenamiento adecuado y seguro del recurso hídrico captado. Por su parte, la excavación de Ñiquén presentó una profundidad reducida de solo 1 metro (Figura 14).



Figura 14. Excavaciones del terreno, de izquierda a derecha: Ñiquén, San Carlos y Coihueco.

- **Especificaciones técnicas y ajustes constructivos**

Las especificaciones técnicas originales establecieron las siguientes superficies de captación:

- Ñiquén: 218,9 m² (19,9 m × 11,0 m)
- San Carlos: 226,6 m² (20,6 m × 11,0 m)
- Coihueco: 144,1 m² (13,1 m × 11,0 m)

No obstante, durante la ejecución de las obras fue necesario realizar ajustes en el diseño de dos de las tres instalaciones, derivados de condiciones específicas encontradas en terreno:

Ñiquén: Por petición del usuario del proyecto y dueño del terreno, la superficie i proyectada debió reducirse, toda vez que el propietario necesitaba dejar libre una zona cercana al área de captación. Así, se redujeron las dimensiones a 190 m² (19,0 m × 10,0 m), lo que representa una disminución de aproximadamente 13% respecto del diseño original.

San Carlos: No presentó modificaciones, conservando las dimensiones y condiciones especificadas de 226,6 m² (20,6 m × 11 m).

Coihueco: Se modificó la geometría de la superficie de captación para adaptarla al relieve existente, resultando en 145 m² (10 m × 15 m). Este cambio mantuvo un área prácticamente equivalente a la proyectada, con la ventaja adicional de mejorar la pendiente natural y el escurrimiento hacia el acumulador.

En síntesis, estas adecuaciones menores permitieron optimizar los recursos disponibles sin afectar de manera significativa la eficiencia de captación ni la capacidad hidráulica de los sistemas, garantizando así su operatividad y funcionalidad para cubrir las necesidades hídricas de los predios beneficiados.

3.5.3. Conexión entre áreas de captación, estanques, sistemas de recarga y riego, e instalación de bombas

La conexión hidráulica entre los distintos componentes del sistema constituyó una etapa fundamental para garantizar la funcionalidad integral de las obras. Las cañerías instaladas entre la geomembrana de captación y los estanques de acumulación fueron conectadas con precisión técnica, sin detectarse filtraciones durante las pruebas iniciales, lo que aseguró un flujo continuo y eficiente del agua captada desde las superficies impermeabilizadas hacia los hidroacumuladores (Figuras 15 y 16). A la fecha de elaboración del presente informe, la conexión entre las áreas de captación y los estanques ha demostrado un funcionamiento adecuado y estable. Posteriormente, una vez completadas las instalaciones de los sistemas de recarga de pozos y de los sistemas de riego, se efectuó una evaluación integral del conjunto hidráulico, con el propósito de verificar su comportamiento bajo condiciones operativas completas y confirmar la eficiencia del sistema en todas sus fases. En dichas pruebas no se evidenciaron filtraciones ni pérdidas de presión en ninguno de los tres sistemas implementados, validando así la calidad de las conexiones ejecutadas.

Para permitir la movilización del agua a través de las distintas etapas del proceso, fue necesario incorporar sistemas de bombeo que cumplieran dos funciones principales: trasladar el agua desde los estanques de acumulación hacia los pozos de recarga subterránea, y posteriormente impulsar el recurso hídrico desde estos pozos hacia los sistemas de riego para su aprovechamiento agrícola. En los sistemas implementados en Coihueco y San Carlos, se optó por la utilización de bombas impulsadas mediante paneles solares fotovoltaicos, decisión fundamentada en que los puntos con acceso a energía eléctrica convencional se encontraban a una distancia considerable de los sitios de instalación (Figura 17). Esta condición geográfica hacía técnica y económicamente inviable la extensión de una red eléctrica hasta los emplazamientos, ya que habría incrementado significativamente los costos de implementación de las obras, comprometiendo la viabilidad financiera de los proyectos. La energía solar, en cambio, representó una alternativa sustentable, autónoma y de menor costo de operación a largo plazo. En contraste, en el sistema implementado en Ñiquén (Figura 18) se instaló una bomba eléctrica convencional para el traslado de agua desde el estanque hacia el pozo de recarga, dado que el sitio contaba con suministro energético disponible en las proximidades, lo que hacía factible y eficiente el uso de este tipo de equipamiento.

En relación con los sistemas de riego, las obras ejecutadas en Ñiquén y Coihueco ya contaban previamente con bombas instaladas por los propios beneficiarios, por lo que se aprovechó el mismo equipamiento existente, garantizando así la compatibilidad técnica, la continuidad operativa y la eficiencia del sistema sin necesidad de inversiones adicionales. En el caso de San Carlos, la beneficiaria no disponía de una bomba para impulsar el agua hacia el sistema de riego, por lo que fue necesario instalar una bomba eléctrica convencional nueva. Esta decisión se fundamentó en que el lugar contaba con suministro eléctrico disponible, lo que permitió una implementación técnica y económicamente viable, asegurando el funcionamiento completo del ciclo de captación, almacenamiento, recarga y distribución del recurso hídrico. De esta forma, en la Tabla 7 a continuación se resume el tipo y uso de bombas instaladas en cada uno de los tres sistemas construidos.

Tabla 7. Bombas utilizadas en cada sistema.

Unidad	De estanque a pozo	De pozo a sistema de riego
Ñiquén	Eléctrica	Se usó la existente
San Carlos	Solar	Eléctrica
Coihueco	Solar	Se usó la existente



Figura 15. Sistema construido en San Carlos.



Figura 16. Estanque de acumulación unidad de Coihueco.

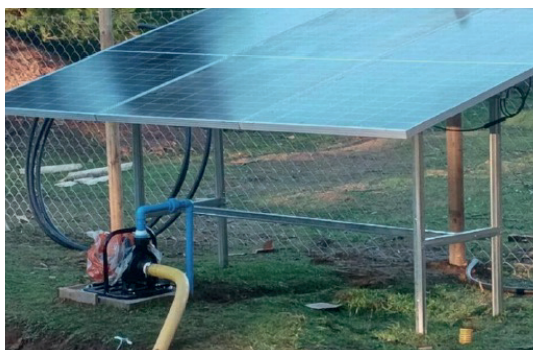


Figura 17. Bomba con energía solar unidad de San Carlos.



Figura 18. Bomba con energía eléctrica unidad de Ñiquén.

3.5.4. Sistema de Riego

Se instaló un sistema de tuberías y emisores para asegurar un riego eficiente en las áreas de prueba definidas en cada unidad (Figura 19). El sistema implementado corresponde a riego por microaspersión, tecnología que permite una distribución homogénea del agua con uso eficiente del recurso hídrico. Este método utiliza aspersores de baja presión que dispersan el agua en forma de finas gotas sobre una superficie reducida, cercana a la zona radicular de las plantas. Resulta especialmente adecuado para cultivos que requieren una cobertura de riego ligeramente más amplia que el goteo, manteniendo alta eficiencia en la aplicación del agua. Además, favorece la regulación de la humedad del suelo y contribuye al control de la temperatura y la humedad ambiental en el entorno del cultivo. Dentro de los sistemas de riego localizado, el goteo también constituye una alternativa de alta eficiencia, consistente en tuberías provistas de pequeños orificios o emisores situados cerca de las raíces, desde donde el agua se libera lentamente en forma de gotas, permitiendo una absorción uniforme y sostenida por el sistema radicular. Este método facilita el manejo agronómico del riego y puede integrarse con sistemas de fertirrigación, optimizando la productividad y el aprovechamiento de los recursos disponibles. Ambas tecnologías representan alternativas viables para el uso sustentable del agua en agricultura.



Figura 19. Ejemplo de sistema de riego instalado.

3.5.5. Cerco perimetral

Finalmente, se ejecutó la instalación del cierre perimetral utilizando malla galvanizada de 1,5 metros de altura y en su parte superior se agregó alambre de púas para aumentar la seguridad del recinto. Este cerco delimita el perímetro del sistema de captación y acumulación de aguas lluvias, permitiendo un tránsito seguro sin intervenir la obra, facilitando las labores de mantención y supervisión, y evitando el ingreso de animales que pudieran dañar las instalaciones. En cada sitio se instalaron polines de madera impregnada de 3" a 4" de diámetro, enterrados a una profundidad mínima de 40 cm y dispuestos a una distancia máxima de 2,5 metros entre sí, garantizando la estabilidad estructural del cerco. Cada cierre cuenta con una puerta de acceso construida con madera impregnada de 2" x 2", revestida con malla galvanizada e implementada con sistema de cierre mediante candado, asegurando el control de acceso y la protección del sistema instalado (Figura 20).



Figura 20. Cerco perimetral unidad de San Carlos.

3.6. Contexto geológico específico del área de estudio.

La Depresión Intermedia de la región del Ñuble está dominada por las siguientes unidades de depósitos sedimentarios y rocas de baja consolidación de los últimos períodos geológicos:

a) Formación Mininco (PPlm). Esta unidad corresponde a una secuencia de areniscas tobáceas, limolitas y conglomerados, con intercalaciones de arcillolitas y tobas (Gajardo 1981) depositadas en ambientes lagunares y fluviales. Tanto las areniscas como conglomerados presentan una consolidación baja a moderada y su edad estimada es Plioceno.

b) Formación La Montaña (PlHlm, Figura 21). Esta unidad ha sido descrita como depósitos de origen morrénico glacial (Gajardo 1981) y depósitos de tipo fluvioglacial y aluviales de alta energía (Muñoz y Niemeyer 1984) de edad Pleistoceno a Holoceno. Los depósitos, de baja compactación, estarían constituidos por altos contenidos de arcillas y arenas, que conformarían una matriz pardo-rojiza, la cual, a su vez, soportaría a gravas dispuestas en forma caótica y de tamaños variables de 7 a 40 cm de diámetro, en promedio, aunque con tamaños observados de hasta 5 m. Los clastos de gravas estarían compuestos por rocas volcánicas andesíticas, basálticas y graníticas, con distintos estados de meteorización.

Adicionalmente, algunas unidades de rocas consolidadas ubicadas en al oeste de la Depresión intermedia y que generalmente forman acuíferos de baja calidad o definitivamente constituyen limitantes al flujo del agua subterránea, son:

a) **Batolito costero: Rocas graníticas paleozoicas del Batolito Costero (CPg)**, distribuidas extensamente a lo largo del dominio geomorfológico de la Cordillera de la Costa. Son rocas compuestas mayoritariamente por minerales de cuarzo y feldespato, con una alta dureza y baja permeabilidad original característica. En la región, se ha observado que esta unidad presenta de manera común un manto meteorizado superficial con características que van desde la pérdida de consolidación paulatina, hasta la presencia de suelos residuales con abundantes arcillas y arenas de cuarzo y feldespato (Páez 2008).

b) **Estratos de Pocillas - Coronel de Maule (Tr1m)** de edad Triásico Superior, las cuales abarcan a un amplio registro litológico que incluye lutitas pizarrosas, areniscas y conglomerados cuarcíferos, lavas, brechas andesíticas y pedernal.

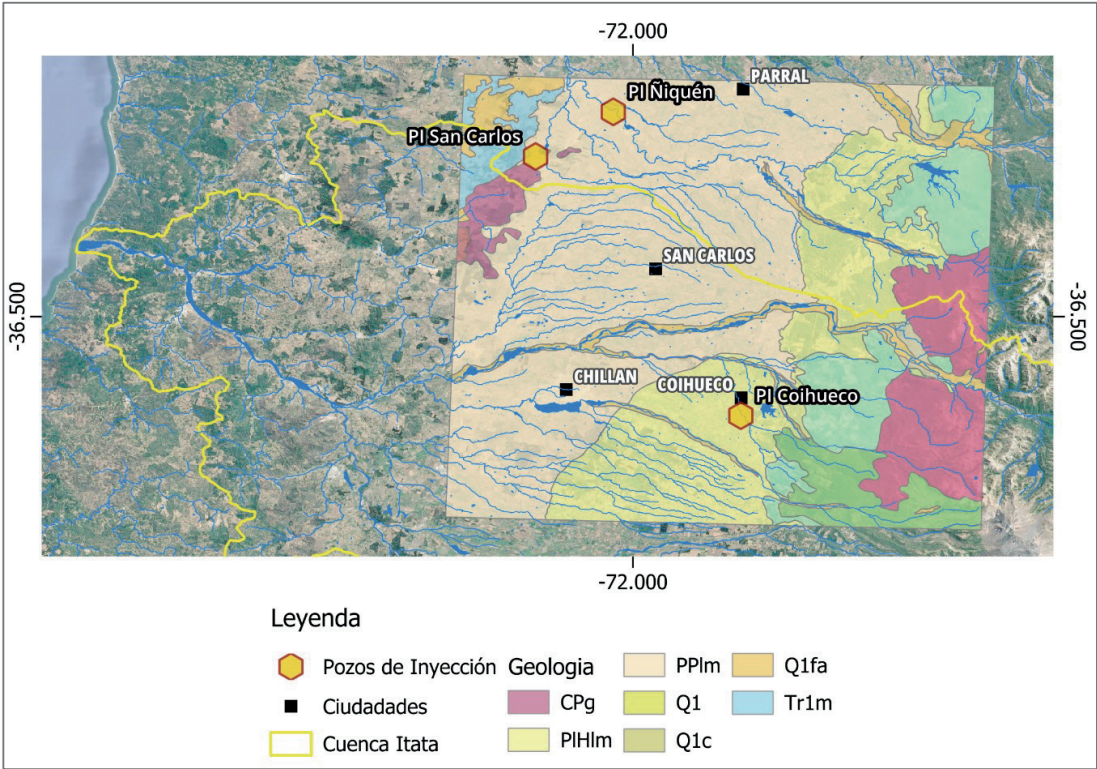


Figura 21. Mapa geológico y contexto geográfico regional de los puntos de inyección (PI) incluidos en el proyecto.

3.6.1. Unidades hidrogeológicas, parámetros hidráulicos y antecedentes piezométricos.

Según el estudio de Aquaterra y DGA (2011) realizado en la cuenca del río Itata, la Depresión Intermedia estaría constituida de un solo gran acuífero de tipo freático, el cual presentaría variaciones laterales y en profundidad de su permeabilidad. En el mismo estudio se definen dos subunidades: Unidad A, de permeabilidad media a baja B, de alta permeabilidad y unidad. Se describió que la Unidad B es la de mayor predominio en distribución, lo cual se debería a la gran cobertura que tienen las litologías de areniscas finas y limonitas de la Formación Mininco, que se disponen en el sector poniente de la Depresión Central, y depósitos morrénicos y glacio-lacustres de la Formación La Montaña, que se emplazan en el área oriental de dicha depresión.

Directamente al norte de la cuenca del río Itata, se ubica la cuenca del río Maule, dentro de la cual se ubican los sitios del proyecto ubicados en las comunas de Ñiquén y San Carlos. Aquí, las unidades geológicas que conforman la Depresión Intermedia poseen continuidad con las que fueron descritas para la cuenca del río Itata (Gajardo 1981). En el estudio realizado por GCF Ingenieros Ltda (2010) se denominó al acuífero de esta zona como Ñiquén-Perquilauquén.

Las características principales de los acuíferos según estos dos antecedentes (GCF Ingenieros Ltda 2010; Aquaterra y DGA 2011) se resumen en la tabla 8.

Tabla 8. Características hidrogeológicas regionales obtenidas de antecedentes bibliográficos.

Sitio de Proyecto	Ñiquén	San Carlos	Coihueco
Acuífero	Unidad A		Unidad B
Sector acuífero	Ñiquén-Perquilauquén (GCF Ingenieros, 2010) (Subacuífero 1 de Aquaterra y DGA, 2011)		Subacuífero 2 (Aquaterra y DGA, 2011)
Tipo de acuífero	Freático *	Freático	Freático
Espesor (*)	~200	~200	~200
Altura piezométrica (m.s.n.m.)	~125	~130	~270 (±5)
Profundidad del nivel (m)	0 - 5	0 - 5	05-oct
Transmisividad media (m ² ·día ⁻¹)	20	20	<450

* Parámetro inferido desde la información expuesta en antecedentes.

3.6.2. Evolución de niveles según datos regionales.

Para tener una aproximación al comportamiento y estado de los acuíferos de la Región, se analizaron los datos de nivel de aguas subterráneas de la red de monitoreo con que cuenta la Dirección General de Aguas en la Región, cuyos nombre, características y ubicación se muestran en la Tabla 9 y Figura 22. Todas las estaciones mantienen un período de registro mínimo de al menos 10 años.

Tabla 9. Pozos de monitoreo de Niveles de la Red Hidrométrica de la DGA en la Región de Ñuble.

Código BNA	Nombre de Estación DGA	Operativa	Código Fig. 12	Periodo con información	
				Desde	Hasta
08143000-4	Portezuelo en Sede Municipal	Sí	Po_SM	24-10-2014	09-09-2024
07335005-0	Estadio de Parral	Sí	Eparral	17-04-2012	25-06-2024
07333000-9	Ñiquén en Escuela F-160	Sí	Ni-E160	23-10-2014	04-09-2024
08110002-0	San Carlos en Escuela camino a Cachapoal	Sí	SC_Cach	06-02-2015	10-09-2024
08115003-6	San Carlos en sector Ninquihue	Sí	SC_Ninq	22-10-2014	01-12-2024
08117011-8	Chillán en Escuela camino a Pinto	Sí	Ch_Cpin	15-10-2014	15-12-2024
08114002-2	Coihueco en Internado Municipal	Sí	Coi_Imu	15-02-2015	15-12-2024

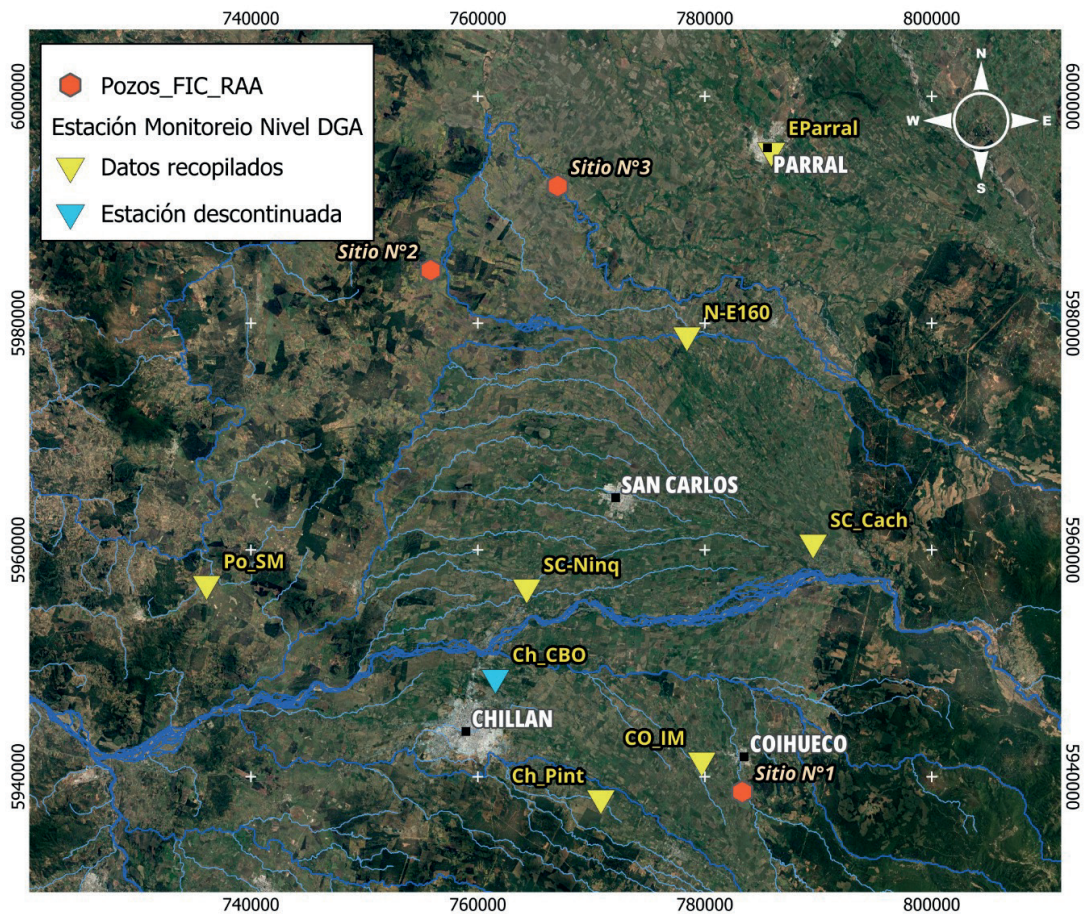


Figura 22. Estaciones de monitoreo de nivel de la DGA. En color celeste, se muestran las últimas estaciones recopiladas. En color rojo se muestran los sitios demostrativos: Sitio 1: Coihueco; Sitio 2: San Carlos; Sitio 3: Ñiquén

Los hidrogramas de nivel de las 7 estaciones recopiladas se muestran en la Figura 23. Para el análisis, se utilizó la prueba estadística de Mann Kendall para evaluar la existencia de tendencias en el comportamiento de niveles a través del tiempo. Los resultados mostraron que 3 de las 7 estaciones muestran una tendencia de descensos de niveles en el período de registro; CHILLÁN Camino a Pinto, ESTADIO DE PARRAL y SAN CARLOS en escuela camino a Cachapoal. El resto de los pozos no mostraron tendencia de ascensos o descensos significativos del nivel.

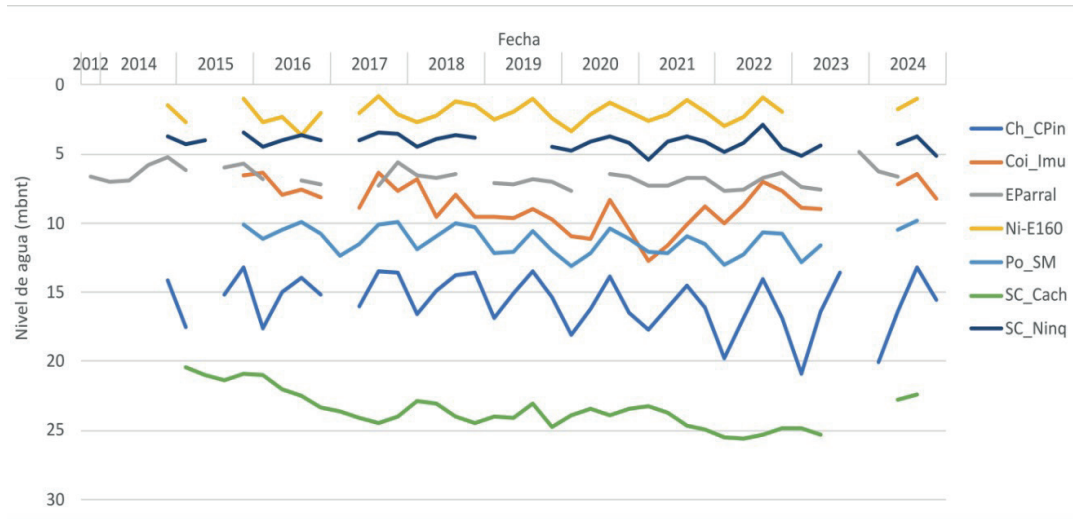


Figura 23. Hidrogramas de niveles piezométricos en pozos de monitoreo de la red hidrométrica de la Dirección General de Aguas. Se representa la media móvil trimestral. Fuente: Elaboración propia.

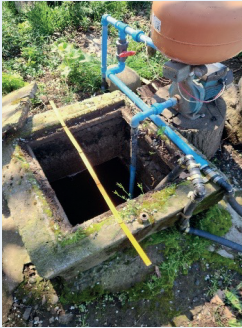
Si bien, la distancia entre los puntos del proyecto con los puntos más cercanos de la red de monitoreo es grande como para relacionarlos con su comportamiento piezométrico de forma directa (aproximadamente 5 km para el punto Coihueco y cerca de 20 km para los puntos de San Carlos y Ñiquén), las tendencias observadas permiten poner en contexto la situación actual de los acuíferos de la Región con la finalidad de situar y valorar las distintas estrategias de gestión de los recursos de aguas subterráneas.

3.7. Recarga de acuíferos con pozos noria

3.7.1. Selección de pozos y características constructivas de los pozos de inyección.

Las obras que se utilizaron para realizar la inyección en los tres sitios del proyecto consistieron en pozos norias ya existentes, los cuales varían en profundidad entre 5,8 y 11,0 m. En los sitios de las comunas de Ñiquén y Coihueco, estos pozos se utilizan para el abastecimiento doméstico, los cuales mantienen una columna de agua fluctuante en altura, pero permanente a lo largo del ciclo anual. En el sitio de la comuna de San Carlos, el pozo ya no se encuentra en uso; además, se seca en los veranos. Un resumen de las características constructivas de los pozos se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Características constructivas de los pozos noria utilizados para la inyección y recarga de acuíferos.

Comuna	Coihueco	San Carlos	Ñiquén
Tipo de obra	Noria	Noria	Noria
Cota (m.s.n.m.)	289	158	143
Diámetro (m)	1,4	0,9	1,5
Profundidad (m)	5,9	11,0	7,9
Revestimiento	Sin Revestimiento	Tubos de cemento 1 m de altura	Sin Revestimiento
Fotografía			

3.7.2. Hidrogeología de los sitios de Inyección

a) Sitio Coihueco

a.1. Geología

El sitio de estudio se encuentra dentro de la unidad denominada Formación La Montaña (PIHlm, Figura 21). Esta unidad ha sido descrita como depósitos de origen morrénico glacial (Gajardo 1981) y como depósitos de tipo fluvioglacial y aluviales de alta energía (Muñoz y Niemeyer 1984). Basado en las descripciones elaboradas en los trabajos de Varela y Moreno (1982) y Moreno y Varela (1985), el área de estudio se ubica en un área limítrofe entre depósitos no consolidados compuestos por gravas, arenas y ripios de origen fluvial y aluvial de una edad Pleistoceno superior – Holoceno, con depósitos formados por paquetes de arcillas pardas y anaranjadas, cuyo origen sería la alteración de depósitos de cenizas. Estos paquetes de arcilla estarían intercalados con depósitos laháricos y su edad correspondería a Pleistoceno inferior.

a.2. Piezometría

Se construyó con datos de nivel de 9 pozos, de diferentes fechas, obtenidos desde expedientes de derechos de aguas (Dirección General de Aguas), más los datos de 3 norias que se monitorearon por 1 año dentro del proyecto. La piezometría construida se muestra en la Figura 24. La dirección de flujo del agua subterránea en el punto de inyección sería aproximadamente N15W con un gradiente hidráulico de 0,9 %.

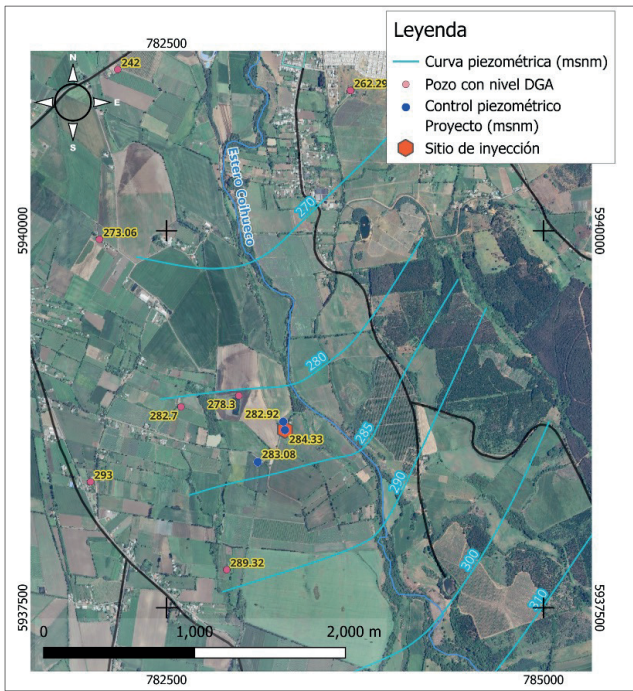


Figura 24. Piezometría local para el sector de estudio en la comuna de Coihueco.

a.3. Modelo conceptual

En el sitio se identifica una unidad hidrogeológica permeable continua, formada por sedimentos no consolidados de gravas y arenas, de permeabilidad media a alta, con presencia de un acuífero freático (Figura 25). La profundidad del nivel freático varía en un rango de 4,5 a 8 m de profundidad. Por medio de los resultados geofísicos, se infiere posiblemente un límite o transición hacia una unidad con mayor contenido de arcillas, bajo los 20 m de profundidad.

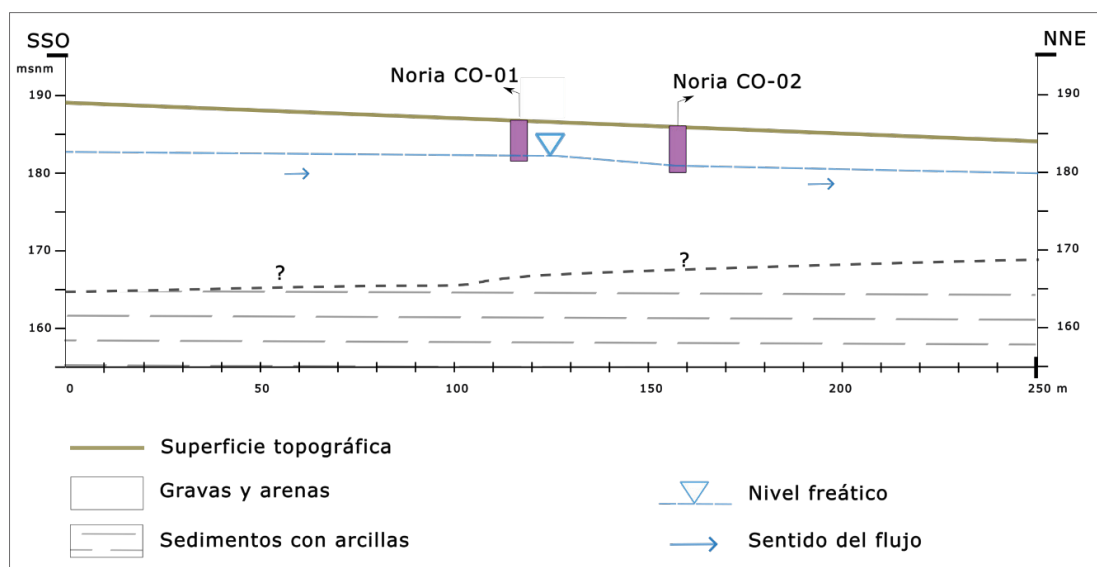


Figura 25. Perfil con esquema conceptual en el sitio de proyecto de la comuna de Coihueco.

B) Sitio San Carlos

b.1. Geología

Según la cartografía geológica regional, el sitio del proyecto se ubica en una zona donde confluye el contacto entre tres unidades (Figura 21). Formación Mininco (PPlm), rocas graníticas paleozoicas (CPg), y rocas de los Estratos de Pocillas - Coronel de Maule (Tr1m). Según las observaciones realizadas en terreno, se interpreta que el punto corresponde a Rocas areniscas de esta última unidad, las que fueron reconocidas en superficie a pocos metros del sitio del proyecto (Figura 26).



Figura 26. Fotografías de zanja (bebedero) excavado próximo al pozo de inyección del sitio de recarga en San Carlos.
Se observa una roca arenisca muy fina limosa muy meteorizada.

b.2. Piezometría

Se construyó la curva piezométrica a partir de 8 datos de nivel de diferentes fechas, obtenidos desde expedientes de derechos de aguas (Dirección General de Aguas), más los datos de 5 puntos que se monitorearon por el período de 1 año durante el transcurso del proyecto. La piezometría construida se muestra en la Figura 27. La dirección de flujo del agua subterránea en el punto de inyección es en sentido N70°E, con un gradiente hidráulico de 0,7 %.

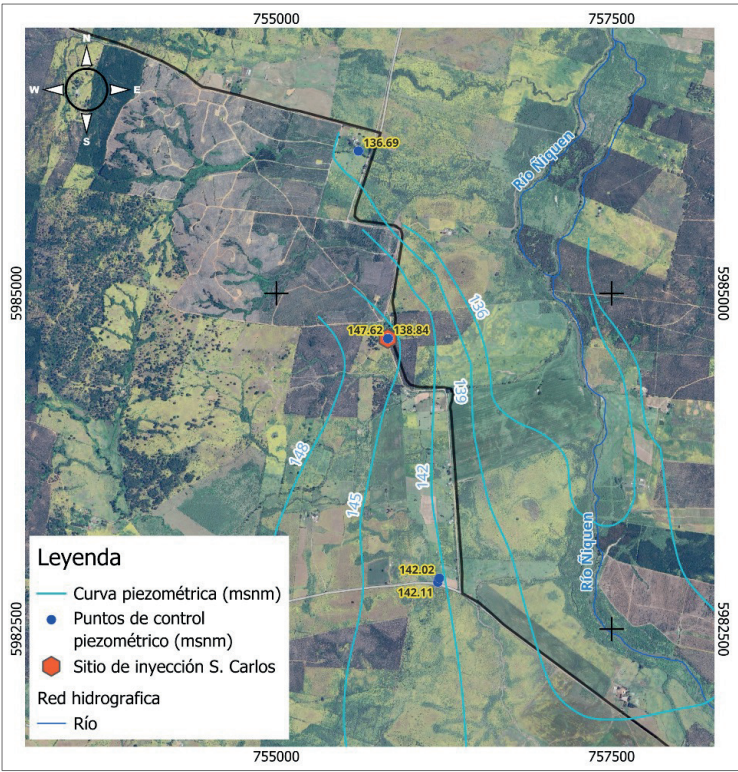


Figura 27. Piezometría local para el sector de estudio en la comuna de San Carlos.

b.3. Modelo conceptual

Con la información de resultados geofísicos y las observaciones de afloramientos en terreno (Figura 26) se interpretó que el punto corresponde a un subsuelo compuesto por distintas unidades hidrogeológicas (Figura 28). A nivel superficial, se observa un horizonte de sedimentos coluviales o meteorizados, el cual logra una saturación parcial en su base. El pozo noria habilitado en esta unidad mantiene un nivel durante los meses de invierno, el cual desciende hasta dejar el pozo seco en los meses de verano. El flujo subterráneo de este horizonte, determinado con niveles de pozos noria del sector, tendría un sentido hacia el noreste. Bajo esta unidad, se encontraría un acuífero más profundo, alojado en rocas sedimentarias, en el cual se encuentra habilitado un pozo de mayor profundidad, que muestra un nivel piezométrico que fluctuó entre 9 a 23 m de profundidad, a lo largo del año de monitoreo.

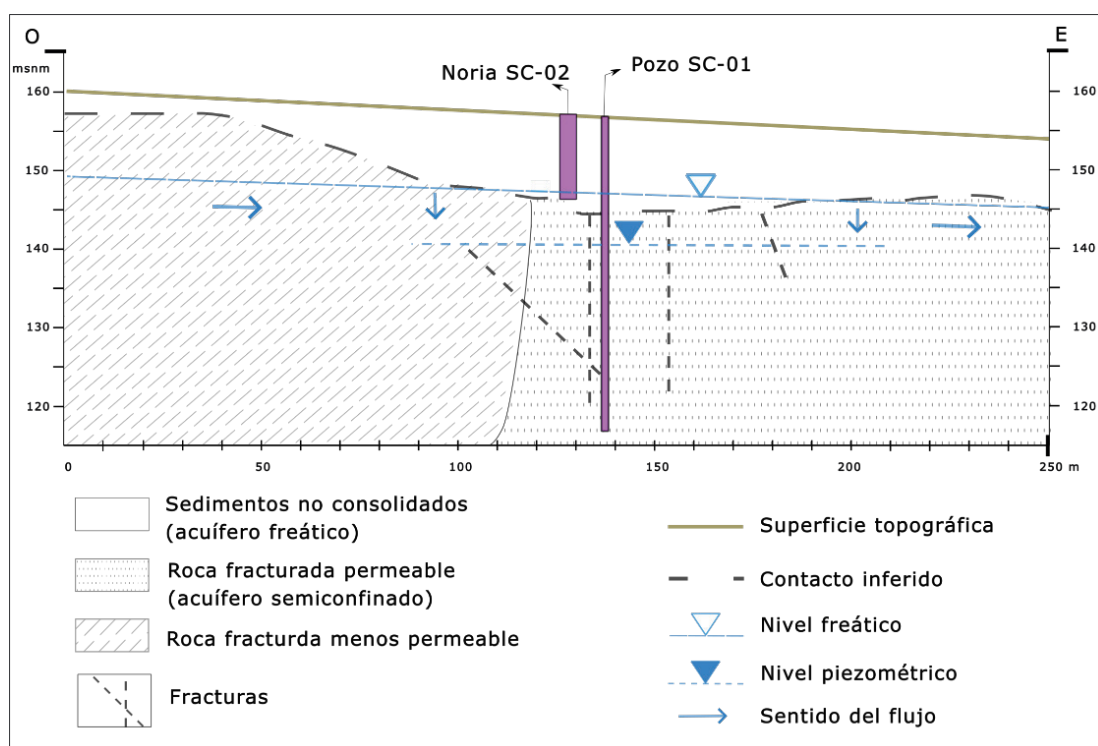


Figura 28. Perfil con esquema conceptual en el sitio de proyecto de la comuna de San Carlos.

C) Sitio Ñiquén

c.1. Geología

Según la cartografía geológica, en el sitio de estudio de la comuna de Ñiquén predomina sólo una sola unidad, correspondiente a la Formación Mininco (PPlm, Figura 21), ya descrita en el apartado dedicado al sitio del proyecto en la comuna de San Carlos.

En el reconocimiento realizado en los alrededores de la noria de inyección, se observaron conglomerados finos arenosos, semiconsolidados, aflorando en superficie a unos 500 m al sur del punto y también en la ribera del río Perquilauquén, aproximadamente a 400 m al noroeste. Estos materiales se atribuyen a la Formación Mininco.

c.2. Piezometría

Se elaboró con datos de nivel de 10 pozos, de diferentes fechas, obtenidos desde expedientes de derechos de aguas, más los datos de nivel de 3 pozos y 2 norias monitoreados durante el transcurso del proyecto. La dirección de flujo en el punto de inyección es aproximadamente N10°E, con un gradiente hidráulico de 0,5 % (Figura 29).

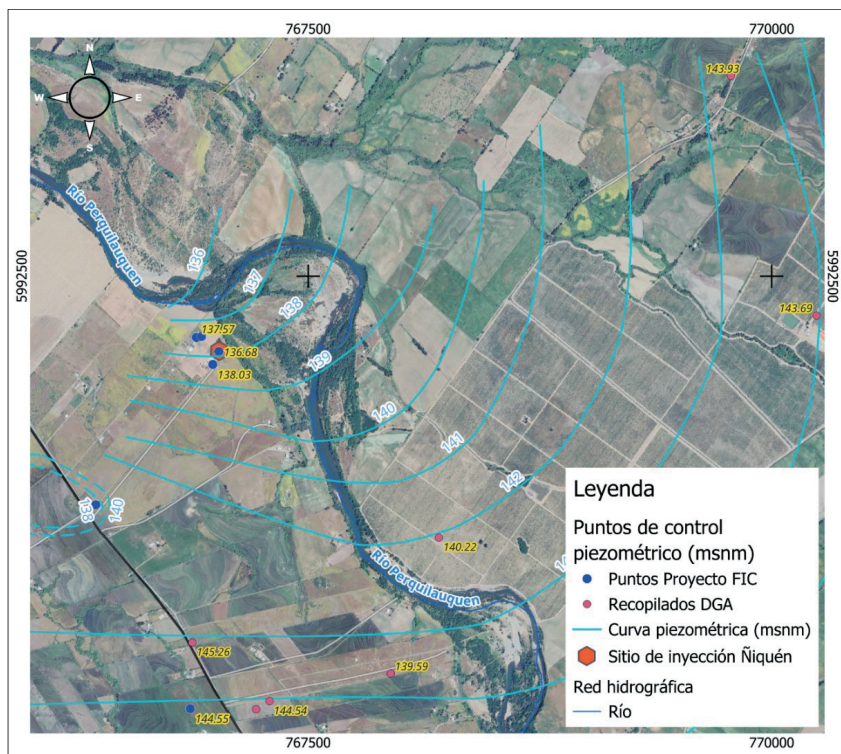


Figura 29. Piezometría local para el sector de estudio en la comuna de Ñiquén.

c.3. Modelo conceptual

Con la información de resultados geofísicos y las observaciones de afloramientos en terreno se interpretó que el punto corresponde a un subsuelo compuesto por una unidad hidrogeológica uniforme, compuesta por sedimentos fluviales y aluviales, que alberga un acuífero freático. El nivel freático en el acuífero varía entre 2,6m y 7,6 m bajo el nivel del terreno (Figura 30) y como muestra la piezometría, el acuífero fluye en dirección al río, con una relación tipo río efluente o ganador. Aproximadamente a 1,5 km al sureste del punto de inyección del proyecto, se observó un pozo profundo (Posta Belén) cuyo nivel piezométrico se encontró a 12,7 m bajo el nivel del terreno, lo cual se señala en la Figura 29 como una inflexión en las curvas piezométricas. Es posible que el pozo señalado corresponda a un acuífero semiconfinado ubicado bajo el acuífero freático superficial, sin embargo, no pudo ser recabada mayor información estratigráfica de su construcción.

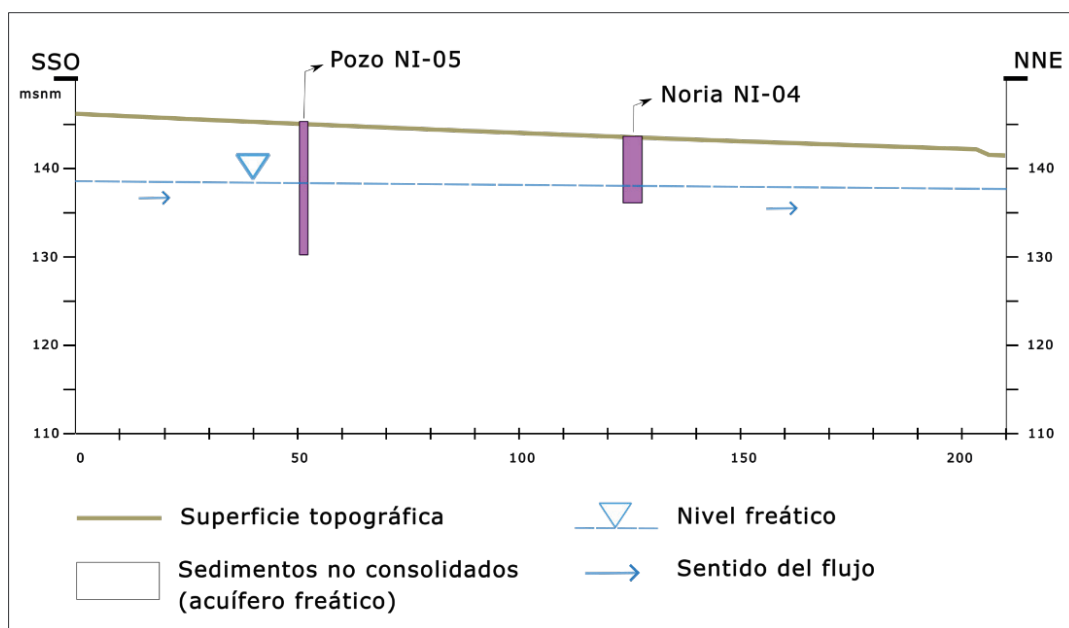


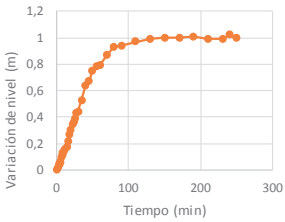
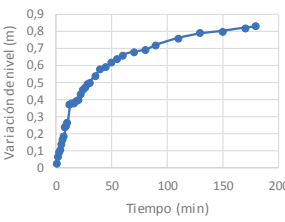
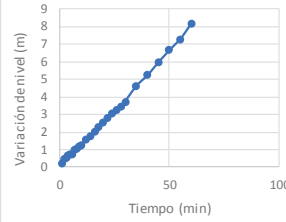
Figura 30. Perfil con esquema conceptual en el sitio de proyecto de la comuna de Niquén.

3.7.3. Pruebas de Recarga y Evaluación de los Pozos de Inyección.

La evaluación de los sistemas consistió en pruebas hidráulicas de inyección, utilizando como fuente el agua almacenada en los estanques de almacenamiento de agua lluvia. Durante las pruebas se mantuvo una tasa constante de inyección, se realizó el registro de nivel dentro del pozo y se realizaron aforos periódicos para el monitoreo del caudal.

De manera comparada, en los tres sitios, la tasa de inyección varió entre 0,9 y 1,4 L·s⁻¹, mientras que el tiempo de inyección varió entre 1 y 4 horas, siendo las más corta la del sitio de la comuna de San Carlos y la de mayor duración la efectuada en el sitio de la comuna de Coihueco. Además, en los tres días posteriores a las pruebas controladas, en los sitios de las comunas de Coihueco y San Carlos, se realizaron tres ciclos diarios, de tres horas cada uno, en los cuales se inyectó agua con la misma regulación de caudal realizada durante el primer día. Un resumen de las características y resultados de las pruebas de inyección se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Resumen de pruebas de inyección y resultados

Sitio del Proyecto	Coihueco	Ñiquén	San Carlos
Caudal de inyección L·s ⁻¹	0,92	0,97	1,42
Tiempo de inyección (min)	250	180	60
Volumen total inyectado (m ³)	13,8	10,5	5,1
Transmisividad calculada (m ² ·d ⁻¹)	12,7	20,5	1,2
Columna disponible al término de la prueba (m)	3,67	5,18	0,46
Gráfico			
Tiempo estimado para inyección de 80 m ³ . (6 hrs de inyección por día)	4 días	4 a 5 días	>15 días
Volumen inyectado en mes de septiembre de 2025 (m ³)	43,7	42,1	5,1

Con los datos de variación de nivel registrados en el pozo se estimó una transmisividad del acuífero (Tabla 11), aunque se debe considerar como una primera aproximación, valor que debiera ser ajustado con pruebas de mayor duración.

En los gráficos de ascenso de nivel se observa que tanto en la prueba del sitio de Coihueco como en el sitio de Ñiquén se genera una tendencia a la estabilización del nivel en torno a un ascenso de 1 m sobre el nivel freático inicial. Mientras que, en el sitio de ensayo de la comuna de San Carlos, el ascenso fue continuo durante toda la prueba sin cambio de tendencia hacia la estabilización.

La columna disponible al término de la prueba, entre el nivel del terreno y el nivel de agua en el pozo, fue de 3,67 m en el sitio de Coihueco y de 5,18 m en el sitio de Ñiquén, con lo que es posible interpretar que en estos pozos es posible mantener la misma tasa de inyección por un tiempo superior al ejecutado. Con la inyección efectuada en los días posteriores, se alcanzó a inyectar un total de 43,7 m³ en el sitio de Coihueco y 42,1 m³ en el sitio de Ñiquén.

En el sitio de San Carlos, la tasa de inyección utilizada, que fue superior a la de los otros pozos, superó la capacidad de admisión del 'pozo', provocando en tan sólo 1 hora de inyección, que el nivel se elevara hasta casi alcanzar la superficie del terreno, tras lo cual la prueba tuvo que ser detenida. Posterior al cese de la inyección, la recuperación registrada en el pozo fue extremadamente lenta, observándose un descenso de tan sólo 20 cm en las primeras 2 horas de recuperación.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

4.1 Conclusiones.

a) Los sistemas de captación de aguas lluvias han probado ser un buen sistema de captura de aguas que no poseen títulos de dominio según la legislación chilena y una fuente interesante de oferta de agua para la recarga de acuíferos. A eso se suma que las pruebas hechas en este proyecto han determinado que la calidad del agua es de buena calidad, cercana a los rangos de agua para consumo humano, lo que supera con creces la calidad del agua encontrada en los pozos, hecho que asegura que la inyección cumple con la norma legal de entregar agua de igual o superior calidad a la existente en el acuífero.

b) El proyecto probó la posibilidad de recarga de acuíferos con estanques de acumulación de aguas lluvias de 80 m³. Este volumen, si bien puede ser considerado pequeño en relación con la capacidad de un acuífero, fue determinado así en la propuesta, dado que lo primero que se pretendía era saber si un proceso de recarga directa a los pozos era posible de llevar a cabo, lo que fue probado con las inyecciones respectivas. De lo anterior se desprende que se podrían utilizar áreas de captación mayores a las implementadas en el proyecto, especialmente en zonas sin uso productivo, lo que podría llevar a ser capaz de inyectar volúmenes muy superiores a los inyectados, definiendo un rango muy amplio de operación con fines de recarga eficiente de acuíferos a través de pozos.

c) Las tendencias de evolución de niveles del agua subterránea en pozos de la región del Ñuble que cuentan con monitoreo durante la última década muestran que, en 3 de los 7 pozos de la red de monitoreo regional, presentan claras tendencias a la disminución de niveles y de los 4 pozos restantes con monitoreo, ninguno muestra una tendencia en el sentido contrario. Esta situación representa una alerta sobre el comportamiento que puede seguir esta variable en el contexto de las proyecciones de disminución de precipitaciones estivales y de aumento permanente de la demanda.

d) Se elaboró una caracterización hidrogeológica de los sitios de inyección que incluyó la recopilación de antecedentes de geología regional, perfiles de resistividad eléctrica (observaciones de afloramientos locales) y recopilación de datos desde expedientes de inscripción de derechos de aguas. Así y mediante un plan de monitoreo piezométrico de pozos auxiliares, hecho en las proximidades de los sitios de inyección, fue posible obtener en una primera aproximación una caracterización hidrogeológica que de otra forma habría sido muy costosa.

e) Los acuíferos en los sitios Coihueco y Ñiquén, corresponden a acuíferos freáticos cuya permeabilidad y configuración permiten la admisión de agua recargada en las tasas instaladas en los sistemas del proyecto. Bajo la configuración actual de los sistemas Scall y de inyección, se puede estimar que 1 estanque de 80 m³ podría ser recargado al acuífero, en 3 días, con regímenes de operación de 6 horas de inyección diaria y caudal de 0,9 L·s⁻¹. Considerando los parámetros hidráulicos obtenidos, se puede estimar que una recarga efectuada dentro de la temporada de

invierno, por ejemplo, el día 1 de agosto, se encontrará el día 1 de diciembre (90 días después, al inicio de la temporada de riego; Tabla 12), a una distancia no superior a 30 m de punto de inyección (los cálculos consideran sólo el gradiente natural, considerando que la inyección, por su bajo volumen no incidirá en una variación de niveles significativa para el período). De manera inversa, con los mismos parámetros y considerando que durante la extracción desde el pozo durante la temporada de riego, se genera un bombeo diario durante al menos 3 meses, se estima que el volumen embalsado directamente por la recarga podrá ser utilizado en su mayor parte por el propietario como un volumen adicional al que se almacena en el acuífero debido a la recarga anual.

Tabla 12. Cálculo de velocidad media y distancia recorrida en 90 días por el agua recargada desde el punto de inyección, en los sitios de Ñiquén y Coihueco.

Sitio del Proyecto	Ñiquén			Coihueco		
Transmisividad calculada ($m^2 \cdot d^{-1}$) (**)	Calculada	x 2	$\wedge 10$	Calculada	x 2	$\wedge 10$
	20,5	41	205	12,7	25,4	127
$DH \cdot DL^{-1}$ (**)	0,005			0,009		
Espesor del acuífero (m)	30			20		
Porosidad específica n_e	0,22			0,22		
Velocidad media v ($m \cdot d^{-1}$)	0,02	0,03	0,16	0,03	0,05	0,26
Distancia recorrida en metros, en 90 días.	1,9	3,7	18,6	3,1	6,2	31,2

(*) Los valores (x2) y ($\wedge 10$), corresponde a ejemplos de sensibilización de la Transmisividad.

(*) $DH \cdot DL^{-1}$: gradiente hidráulico. 'Local' corresponde al gradiente estimado a partir de la piezometría local.

f) Los resultados obtenidos en el sitio de San Carlos, por otro lado, no fueron satisfactorios, lo cual se ha interpretado como un efecto sumatorio de factores naturales con factores constructivos del pozo de inyección. La hidrogeología en este sector muestra la presencia de un acuífero freático de espesor limitado, el cual se drena en la temporada estival, mientras que a mayor profundidad existiría un acuífero alojado en rocas sedimentarias fracturadas, el cual es aprovechado mediante un pozo aledaño al pozo de inyección. Basado en la condición piezométrica observada se interpreta que el acuífero profundo recibe un aporte de recarga desde el acuífero superior. Sin embargo, la prueba hidráulica efectuada mostró que el pozo de inyección no es apto para ejercer una recarga ya sea al acuífero freático ni al acuífero más profundo. Se estima que parte importante de la limitación para transmitir el agua de inyección radica en que el pozo se encuentra revestido con tubería de cemento, lo cual reduce de manera significativa la superficie de contacto por la cual el agua puede penetrar la formación saturada y no saturada.

4.2 Recomendaciones

En función de todo lo anterior se recomienda lo siguiente:

- a) Continuar con este tipo de proyectos, para que en marcos de investigación aplicada se puedan obtener mayores y mejores resultados en el objetivo de recargar acuíferos de forma segura y confiable, procurando que quien hace el esfuerzo técnico y económico se vea beneficiado con estos procesos que tienden a asegurar la oferta de agua en periodos estivales.
- b) Para alcanzar lo anterior se recomienda y como ya se ha señalado, incorporar de forma experimental estas instancias tecnológicas en los instrumentos de fomento a la agricultura (Ministerio de Agricultura a través de INDAP o la Comisión Nacional de Riego), o como instancias de aseguramiento de la oferta de agua para sistemas de Agua Potable Rural (Ministerio de Obras Públicas a través del Servicio de Saneamiento Rural). Esto debería ser implementado en marcos de actuación amplios desde el punto de vista territorial, de tal manera que en un amplio espacio se estén realizando procesos similares que en su conjunto favorezcan la restauración de los equilibrios hidrológicos de las aguas subterráneas.
- c) En la medida de lo posible y con financiamiento regional de Ñuble u otra fuente de tipo ANID o Corfo, entre otras, se recomienda continuar con este mismo estudio y otros que se puedan desarrollar en la misma región o en otras partes del país. Es necesario tener aún mayores certezas, que permitan en conjunto propiciar políticas públicas y devolver la seguridad de abastecimiento a las aguas subterráneas.
- d) Finalmente este es un ejemplo de cooperación gobierno regional – academia, que entrega una posibilidad concreta de definición e implementación de una política pública amplia y con componentes visibles de aportes a la sostenibilidad territorial, productiva y ambiental. De ahí la relevancia de mantener fondos de investigación aplicada, que generen respuestas y orientaciones a los tomadores de decisión por una parte y, por otra, otorguen nuevas capacidades a los organismos e instrumentos que cada Región del país posee, con el fin de generar un amplio abanico de posibilidades al desarrollo de sus habitantes.

5. REFLEXIÓN FINAL

La Universidad de Talca ha promovido desde hace casi 20 años la implementación de sistemas de captación de aguas lluvias. En base a procesos de investigación aplicada se ha logrado incorporar estas tecnologías en políticas públicas que han sido desarrolladas por el INDAP, la Delegación Presidencial de Recursos Hídricos (2015) y la Comisión Nacional de Riego, y ello en base al trabajo desarrollado primero por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental y ahora por la Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie. En función de lo anterior y por los resultados alcanzados, se cree que una política pública podría desarrollarse en el marco de generar unidades territoriales que en conjunto tiendan a la captación de aguas lluvias y la consiguiente recarga de acuíferos mediante pozos, en una estrategia virtuosa de uso de las aguas lluvias, con vistas a generar embalses subterráneos provistos de agua para su utilización durante la estación seca.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Álamos, N., C. Alvarez-Garreton, A. Muñoz, and Á. González-Reyes. 2024. The influence of human activities on streamflow reductions during the megadrought in central Chile. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 28(11):2483–2503.
- Aquaterra and DGA. 2011. Estudio hidrogeológico cuencas Bío Bío e Itata. Available online at: <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/25823>.
- Ballén Suárez, J. A., M. Á. Galarza García, and R. O. Ortiz Mosquera. 2006. Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. in *VI SEREA*, João Pessoa, Brasil.
- Bouwer, H. 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeol. J.* 10(1):121–142.
- Dillon, P. 2005. Future management of aquifer recharge. *Hydrogeol. J.* 13(1):313–316.
- Dirección General de Aguas and Subterránea SpA. 2015. Análisis y aplicación metodológica para la delimitación y sectorización de acuíferos en la provincia del Ñuble: VIII Región. Available online at: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32746>.
- Dirección Meteorológica de Chile. 2025. Reporte anual de la evolución del clima en Chile. Available online at: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/publicaciones/reporteEvolucionClima/reporteEvolucionClima2024.pdf>.
- Domenico, P. A., and F. W. Schwartz. 1998. *Physical and chemical hydrogeology*. 2. ed., paperback. Wiley, New York Chichester Weinheim. 506 p.
- Fernández, M. P., C. Bonomelli, C. Guevara, M. Menéndez-Miguélez, V. Celis, C. Barrera, C. Preller, et al. 2017. *Sistema de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) y su aplicación en el establecimiento de maqui*. Santiago de Chile. 81 p.
- Fetter, C. W. 2001. *Applied hydrogeology*. 4th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 598 p.
- Gajardo, A. 1981. *Avance geológico Hoja Concepción-Chillán, Región del Bío-Bío*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago. 32 p.
- García-Chevesich, P. 2015. *Control de la erosión y recuperación de suelos degradados*. Outskirts Press, Colorado.
- Garreaud, R. D., C. Alvarez-Garreton, J. Barichivich, J. P. Boisier, D. Christie, M. Galleguillos, C. LeQuesne, J. McPhee, and M. Zambrano-Bigiarini. 2017. The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21(12):6307–6327.

- Garreaud, R. D., J. P. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H. H. Sepúlveda, and D. Veloso-Aguila. 2020. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40(1):421–439.
- GCF Ingenieros Ltda. 2010. Levantamiento de información hidrogeológica para modelación cuenca del río Maule. Available online at: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32792>.
- Gebreslassie, H., G. Berhane, T. Gebreyohannes, M. Hagos, A. Hussien, and K. Walraevens. 2025. Water Harvesting and Groundwater Recharge: A Comprehensive Review and Synthesis of Current Practices. *Water.* 17(7):976.
- González, M. E., S. Gómez-González, A. Lara, R. Garreaud, and I. Díaz-Hormazábal. 2018. The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere.* 9(8):e02300.
- Grau-Martínez, A., A. Folch, C. Torrentó, C. Valhondo, C. Barba, C. Domènech, A. Soler, and N. Otero. 2018. Monitoring induced denitrification during managed aquifer recharge in an infiltration pond. *J. Hydrol.* 561:123–135.
- Gupta, S. K. 2010. *Modern Hydrology and Sustainable Water Development*. 1st ed. Wiley. Available online at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781444323962>; last accessed December 1, 2025.
- Guttman, J., I. Negev, and G. Rubin. 2017. Design and Testing of Recharge Wells in a Coastal Aquifer: Summary of Field Scale Pilot Tests. *Water.* 9(1):53.
- Instituto Nacional de Estadísticas. 2024. Sistema de Información del Mercado Laboral (Simel). *Inst. Nac. Estad.* Available online at: <https://de.ine.gob.cl/>.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). 2023. *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1st ed. Cambridge University Press. Available online at: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009325844/type/book>; last accessed December 1, 2025.
- Islam, S., and B. Talukdar. 2016. Water Supply System Planning by Artificial Groundwater Recharge from Rooftop Rainwater Harvesting. P. 145–159 in *Urban Hydrology, Watershed Management and Socio-Economic Aspects*, Water Science and Technology Library. Sarma, A.K., V.P. Singh, S.A. Kartha, and R.K. Bhattacharjya (eds.). Springer International Publishing, Cham. Available online at: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-40195-9_12; last accessed December 1, 2025.
- Khediya, T. D. 2016. Study of Artificial Recharge Structure for Rain Water Harvesting. *Int. J. Innov. Res. Sci. Technol.* 3(3):151–154.

- Legates, D. R., and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35(1):233–241.
- Leyva Suárez, E. 2010. Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 220 p.
- Lluria, M. R. 2009. Successful application of Managed Aquifer Recharge in the improvement of the water resources management of semi-arid regions: Examples from Arizona and the Southwestern U.S.A. *Bol. Geológico Min.* 120(2):111–120.
- López-Vera, F. 1989. *Hidrogeología*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Moreno, H., and J. Varela. 1985. Geología, volcanismo y sedimentos piroclásticos cuaternarios de la región central y sur de Chile. P. 421–526 in *Suelos Volcánicos de Chile*, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.
- Muñoz, J., and H. Niemeyer. 1984. Carta Geológica de Chile, hoja Laguna del Maule, escala 1:250.000, Regiones del Maule y Bío-Bío.
- Naik, P. K., P. K. Naik, G. Prasad, and K. C. Mondal. 2024. A design plan for rooftop rainwater harvesting in a large defence establishment in central India. *Desalination Water Treat.* 317:100252.
- Oosterbaan, R. J. 2019. Software for generalized and composite probability distribution fitting. *Int. J. Math. Comput. Methods.* 4:1–9.
- Páez, D. 2008. Reconocimiento hidrogeológico mediante prospecciones eléctricas, sondeos y ensayos de bombeo en la comuna de Ninhue, Región Del Bío-Bío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 97 p.
- Pizarro, R., C. Estévez, C. Vallejos, A. Ibáñez, C. Sangüesa, M. P. Fernández, U. Doll, R. Mendoza, and D. Campos. 2019. *Plantaciones de Aristotelia chilensis (maqui) en base a sistemas de captación de aguas lluvias (SCALL): una respuesta a los escenarios de escasez hídrica de la gobernanza del agua en Chile*. Pizarro, M. (ed.) Talca, Chile.
- Pizarro, R., P. A. Garcia-Chevesich, J. E. McCray, J. O. Sharp, R. Valdés-Pineda, C. Sangüesa, D. Jaque-Becerra, et al. 2022. Climate Change and Overuse: Water Resource Challenges during Economic Growth in Coquimbo, Chile. *Sustainability.* 14(6):3440.
- Pizarro, R., F. Urbina, C. Vallejos, R. Mendoza, J. Guzmán, J. Tapia, C. Sangüesa, et al. 2016. *Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL): una experiencia de 3 años*. Pizarro, M. (ed.) Talca, Chile. 139 p.
- R Core Team. 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Available online at: <https://www.R-project.org/>.

- Riggs, H. 1968. *Frequency curves*. USGS Numbered Series. Available online at: <https://pubs.usgs.gov/publication/twri04A2>; last accessed November 3, 2025.
- Sangüesa, C., R. Pizarro, A. Ibañez, J. Pino, D. Rivera, P. García-Chevesich, and B. Ingram. 2018. Spatial and temporal analysis of rainfall concentration using the Gini Index and PCI. *Water Switz.* 10(2) Available online at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041318603&doi=10.3390%2fw10020112&partnerID=40&md5=71311f5afae9cd6460b9875aabe81da4>.
- Sangüesa Pool, C., and C. Vallejos Carrera. 2021. Diseño eficiente de Sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales para su aplicación en zonas con demandas crecientes. *Aqua-LAC.* 13(2):53–64.
- Sarricolea, P., M. Herrera-Ossandon, and Ó. Meseguer-Ruiz. 2017. Climatic regionalisation of continental Chile. *J. Maps.* 13(2):66–73.
- Stefan, C., and N. Ansems. 2018. Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. *Sustain. Water Resour. Manag.* 4(2):153–162.
- Unesco. 2015. *Manual de diseño y construcción de sistemas de capacitación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile*. Montevideo, Uruguay. 94 p.
- Varela, J., and H. Moreno. 1982. Los depósitos de Relleno de la Depresión Central de Chile entre los ríos Lontué y Biobío. P. 280–306 in *III Congreso Geológico Chileno*, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

FINANCIAMIENTO

FONDO DE INNOVACIÓN
PARA LA COMPETITIVIDAD
GOBIERNO REGIONAL DE ÑUBLE

MANDANTE DEL
PROYECTO

GOBIERNO REGIONAL ÑUBLE

EJECUTOR

UNIVERSIDAD DE TALCA

ASOCIADOS

ASOC MUNIC. DEL PUNILLA
I.M. DE COIHUECO
I.M. DE ÑIQUÉN
I.M. DE SAN CARLOS
I.M. DE SAN FABIÁN

CONTACTO

rpizarro@utalca.cl
cristobal.toledo@utalca.cl
+56 71 2200375 + 56 71 2200446

ISBN: 978-956-425-149-3

