



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE OBRAS DE RECARGA DE ACUÍFERO EN
EL TERRITORIO DE LA COMUNA DE COMBARBALÁ, IV REGIÓN DE
COQUIMBO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MACKARENA ALICIA GRANDÓN QUEZADA

PROFESOR GUÍA:
ADOLFO OCHOA LLANGATO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
TANIA FERNÁNDEZ RUBILAR
ÁLVARO ISLA FIGUEROA

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: MACKARENA ALICIA GRANDÓN QUEZADA
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: ADOLFO OCHOA LLANGATO

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE OBRAS DE RECARGA DE ACUÍFERO EN EL TERRITORIO DE LA COMUNA DE COMBARBALÁ, IV REGIÓN DE COQUIMBO

En esta memoria se presenta un estudio de factibilidad a nivel de ingeniería conceptual que evalúa la viabilidad de llevar a cabo una Obra de Recarga Gestionada de Acuífero (RAG) en la comuna de Combarbalá, en la IV Región de Coquimbo, con el propósito de mejorar el suministro de agua potable para sus habitantes. A lo largo del estudio, se aborda la crisis ambiental generada por el cambio climático, la escasez hídrica y la necesidad de asegurar el acceso al agua potable en entornos rurales abastecidos por Servicios Sanitarios Rurales (SSR).

En Combarbalá se evidencia escasez de agua potable, sobreotorgamiento de derechos de aprovechamiento de agua, explotación del acuífero y SSRs en estado crítico. Debido a la necesidad de acotar la zona de trabajo para realizar un estudio local, se elige un solo SSR crítico correspondiente a Quilitapia. El SSR beneficia a 1.132 habitantes, la permeabilidad del suelo en la zona es baja, la calidad del agua está dentro de la norma chilena, las posibles fuentes de recarga incluyen agua de los cauces, precipitaciones, sistemas colectivos de abastecimiento y canales, además su caudal máximo diario demandado por los habitantes es de $3.53(l/s)$.

Luego, se exploran métodos de RAG y se seleccionan dos de ellos, Galerías de Infiltración y Pozo Seco, con base en criterios de permeabilidad, calidad del agua, superficie requerida y costo de inversión. La evaluación de factibilidad se basa en varios factores: la demanda de agua, la evaluación hidrogeológica, la disponibilidad de agua, la capacidad de tratamiento, y la sostenibilidad económica y de gobernanza, bajo esta línea se concluye que la recarga gestionada de acuífero es viable en la localidad Quilitapia. Comparando los métodos seleccionados, se determina que Galerías de Infiltración pueden proporcionar la eficiencia necesaria para alcanzar el caudal objetivo de recarga (superior al caudal máximo diario), minimiza el impacto ambiental y además es una opción más económica por lo que se elige esta opción como método de RAG. Se realiza una estimación económica aproximada que sugiere una inversión necesaria de alrededor de \$50, 500, 000, con un costo operativo mensual aproximado de \$4, 000, 000.

Si bien el resultado del estudio es satisfactorio, se destaca que para llevarlo a cabo se realizaron una serie de supuestos justificados debido a la falta de información disponible. Es por ello que es de suma importancia realizar estudios en terreno antes de ejecutar el proyecto para garantizar su éxito. Además, se enfatiza la urgencia de abordar la crisis hídrica en Chile y se sugiere la creación de una guía integral que contemple los distintos tipos de suelos, la diversidad de acuíferos a nivel nacional y todos los usos posibles para beneficiar a diversas comunidades y sectores, especialmente a aquellos que carecen de acceso al agua potable, un derecho básico e indispensable para la vida.

Para mi amada madre,

Gracias por todo

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa en la culminación de este importante logro en mi vida académica.

En primer lugar, agradezco a mi amada mamá y a mi abuela, quienes desde mis primeros años de estudio han sido mi fuente inagotable de apoyo, aliento y amor incondicional. Su presencia constante en cada etapa de mi formación ha sido fundamental para mi crecimiento y desarrollo como estudiante y como persona.

También quiero extender mi gratitud a mi primo Sergio y mi querida prima postiza Florencia, quienes han sido pilares fundamentales desde mi enseñanza media y durante toda mi carrera universitaria. Su constante apoyo, comprensión y cariño me han impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes de estrés y dedicación intensa.

Agradezco también a mis queridas amigas Tamara, Magdalena, Daniela, Belén, Débora y Ximena. Su amistad sincera y compañía en las buenas y las malas ha sido importantísimo, no solo en cuestiones académicas sino en todas las facetas de la vida.

Un agradecimiento especial a la profesora Carolina Santander, quien me acompañó en la difícil misión de aprobar inglés. Su alegría, apoyo y calidad humana han dejado una huella perdurable en mi formación académica y personal.

Asimismo, quiero expresar mi reconocimiento al profesor guía Adolfo Ochoa, cuya dedicación, conocimientos y orientación han sido cruciales en la realización de esta tesis y mi crecimiento profesional.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a la profesora Tania y al profesor Álvaro por aceptar unirse a mi comisión evaluadora a medio camino y brindarme su incondicional apoyo con gran disposición. Su contribución ha enriquecido enormemente este trabajo y mi formación.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por ser parte esencial en esta etapa trascendental de mi vida académica. Sin su apoyo, comprensión y aliento, esta tesis no habría sido posible. Gracias por creer en mí y acompañarme en este camino de titulación y crecimiento.

¡Con cariño!

Mackarena Grandón Quezada

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
2. Conceptos claves y antecedentes	4
2.1. Cambio climático y escasez hídrica	4
2.2. Ruralidad y agua potable	6
2.3. Programa de Servicios Sanitarios Rurales	6
2.3.1. Contexto nacional, principales aspectos y cobertura del programa	7
2.3.2. Estructura, desarrollo y marco institucional del programa	8
2.4. Agua Superficial y Subterránea	9
2.4.1. Heterogeneidad Hídrica	9
2.4.2. Disponibilidad, restricción y prohibición del recurso superficial y subterráneo	10
2.5. Desafíos en el ámbito de gestión de recursos hídricos y agua potable	11
2.6. Recarga de acuífero gestionada (RAG)	12
2.6.1. Definición	12
2.6.2. Aspectos técnicos	12
2.6.3. Aspectos Legales en Chile	12
2.6.4. Experiencias internacionales en recarga de acuífero gestionada	13
2.6.5. Experiencias en Chile de recarga de acuífero gestionada	14
3. Caso de estudio, comuna de Combarbalá	17
3.1. Características de la comuna	17
3.1.1. Área de Estudio y Aspectos administrativos	17
3.1.2. Cuencas y Red hidrográfica	19
3.1.3. Clima	20
3.1.4. Geomorfología e hidrogeología	21
3.2. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común, Áreas de Restricción y DAA	22
3.2.1. Cuantificación y caracterización de DAA superficiales y subterráneas concedidos	24
3.3. Red Hidrométrica	28
3.3.1. Meteorología	29
3.3.2. Fluviometría	29

3.3.3.	Monitoreo de pozos de observación DGA	29
3.3.4.	Geolocalización de estaciones de la red	30
3.4.	Servicio Sanitario Rural en Combarbalá	30
3.4.1.	Desarrollo provincial y comunal del Programa de APR	31
3.4.2.	Infraestructura y sistemas de la comuna	32
3.4.3.	Situación DAA Subterráneas en los SSR	35
3.4.3.1.	Derechos otorgados y con dominio de Empresa Sanitaria	35
3.5.	Análisis de recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Red Hidrométrica Nacional	36
3.5.1.	Componente Hidrológica	37
3.5.1.1.	Análisis de precipitaciones	38
3.5.1.2.	Análisis de escorrentía superficial	44
3.5.2.	Análisis de niveles de agua subterránea en pozos de observación DGA	53
3.6.	Estudio de disponibilidad de Recurso Subterráneo	58
3.6.1.	Antecedentes	58
3.6.2.	Recarga y demanda subterránea	59
3.6.2.1.	Recarga	59
3.6.2.2.	Balance hídrico	60
4.	SSR beneficiado, estudio local y zona de recarga	62
4.1.	SSR beneficiado	62
4.2.	Estudio local de las zonas aledañas al SSR Quilitapia	66
4.2.1.	Ubicación	66
4.2.2.	Características y propiedades del suelo	68
4.2.2.1.	Columna litológica	68
4.2.2.2.	Parámetros hidrogeológicos	70
4.2.2.3.	Análisis físico químico y bacteriológico	72
4.2.3.	Recurso hídrico superficial como fuentes de agua	73
4.2.3.1.	Caudal mínimo demandado	73
4.2.3.2.	Fuente del agua que será recargada	74
4.3.	Zona de recarga	76
5.	Métodos de Recarga de Acuíferos Gestionada (RAG)	77
5.1.	Componentes de recarga	77
5.2.	Métodos de RAG	78
5.3.	Criterios de selección del método de recarga	79
5.3.1.	Galerías de infiltración	80
5.3.1.1.	Descripción, fuentes de agua, plazos y costos.	80
5.3.1.2.	Diseño y construcción	81
5.3.1.3.	Condiciones relevantes	82
5.3.1.4.	Monitoreo	83
5.3.2.	Pozos secos	83
5.3.2.1.	Descripción, fuentes de agua, plazos y costos.	83
5.3.2.2.	Diseño y construcción	84
5.3.2.3.	Condiciones relevantes	85
5.3.2.4.	Monitoreo	85
6.	Evaluación de Factibilidad de los diseños de RAG	87

6.1.	Evaluación de Factibilidad	87
6.1.1.	Demanda de Agua	89
6.1.2.	Evaluación hidrogeológica	89
6.1.3.	Fuente de agua disponible y derecho de acceso	90
6.1.4.	Volumen de agua de recarga suficiente	91
6.1.5.	Espacio para captura y tratar el agua	91
6.1.6.	Capacidad y experiencia	92
6.1.7.	Gobernanza y sostenibilidad económica	93
6.2.	Elección del método	94
6.3.	Evaluación económica	95
6.3.1.	Caso 1: Situación actual	96
6.3.2.	Caso 2: Galerías de Infiltración	97
7.	Conclusiones	98
	Bibliografía	101

Índice de Tablas

3.1.	SHAC de las Subcuencas Río Guatulame y Río Grande Alto, con característica de limitación. Fuente: Pino, 2022.[66]	23
3.2.	Cuantificación de los DAA subterráneas de la Comuna de Combarbalá. Fuente: Elaboracion Propia	26
3.3.	SHAC de la Comuna de Combarbalá. Fuente: DGA (2020)[25]. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA	27
3.4.	Distribución de Estaciones Meteorológicas en la comuna de Combarbalá de la Provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA [27].	29
3.5.	Distribución de Estaciones Fluviométricas en la comuna de Combarbalá de la Provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA	29
3.6.	Distribución de Estaciones de Niveles de Pozos en la Comuna de Combarbalá. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA [27]	30
3.7.	Sistemas APR de la Comuna de Combarbalá. Elaboración propia a partir de información recopilada en Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA.	34
3.8.	Caudal medio anual otorgado a SSR con DAA. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.[27]	36
3.9.	Caudal medio anual otorgado a SSR con título de dominio de ex SENDOS. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA y DGA[27]	36
3.10.	ID de Estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA para analizar el régimen de subcuencas de la Comuna de Combarbalá, con su respectivo número de datos. Fuente: Elaboración propia.	37
3.11.	Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Grande en Puntilla San Juan (F8). Fuente: Pino, 2022 [66].	45
3.12.	Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Rapel en Junta (F9) Fuente: Pino, 2022 [66].	46
3.13.	Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Grande en Cuyano (F15) Fuente: Pino, 2022 [66].	46
3.14.	Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Cogotí Embalse Cogotí (F15).	50
3.15.	Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Guatulame en El Tomé (F12).	50

3.16.	Resumen de Componente Hidrológico en las Subcuencas Río Grande y Río Gualame. Fuente: Elaboración propia.	53
3.17.	ID de pozo de monitoreo DGA con cantidad de muestra en periodo 1992-2021. Elaboración propia a partir del Servicio Hidrométrico de la DGA	53
3.18.	Nivel de descenso de los pozos de Combarbalá, entre los años 1992-2021. Fuente: Elaboración propia.	57
3.19.	Recarga subterránea en $m^3/año$ de las subcuencas de estudio, de acuerdo a resultados de informes de la DGA. Elaborado a partir de DGA (2008)[16] y DGA (2020)[28].	59
3.20.	Balance Hídrico por SHAC en Periodo 1992-2019, modelo integrado. Fuente: Elaboración propia.	60
4.1.	Ranking de Riesgo por SSR. Fuente: Elaboración propia a partir de DGA, 2020 [25].	64
4.2.	Coordenadas Pozo de Producción Quilitapia (Combarbalá). Fuente: Hidro-Drilling (2020) [41]	66
4.3.	Descripción litológica de las muestras obtenidas. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	69
4.4.	Resumen del Gasto Variable y Gasto Constante. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	70
4.5.	Resumen del estudio local de la zona de recarga. Fuente: Elaboración propia. .	76
5.1.	Componentes de un sistema de recarga de acuíferos gestionada, modificada de NRMCC-EPHCNHMRC, 2019. Fuente: CSIRO, 2020 [10].	78
5.2.	Método de recarga basados en infiltración para recargar acuíferos no confinados. Fuente: Elaboración propia a partir de CSIRO, 2020 [10].	78
5.3.	Criterios de selección del método de recarga para una RAG. Fuente CSIRO, 2020 [10].	79
6.1.	Comparación de Métodos de Recarga Gestionada de Acuífero para Quilitapia: Galerías de Infiltración versus Pozos Secos. Fuente: Elaboración propia	95
6.2.	Evaluación Costo - Eficiencia Caso 1. Fuente: Elaboración Propia.	96
6.3.	Evaluación Costo - Eficiencia Caso 2. Fuente: Elaboración Propia	97

Índice de Ilustraciones

2.1.	Incidencia de decretos de escasez hídrica por región durante los años 2008-2020. Fuente: Morales (2021) [70].	5
2.2.	Experiencias internacionales en recarga de acuífero gestionada. Fuente: Elaboración propia.	14
2.3.	Experiencias nacionales de recarga de acuífero gestionada. Fuente: CNR, 2020.[11]	15
3.1.	Delimitación de la Provincia de Limarí con sus respectivas comunas. Fuente: Pino, 2022 [66]	18
3.2.	Censo de Población y Vivienda 2017, Proyecciones de población 2023. Fuente INE, 2018 [42]	18
3.3.	Delimitación de cuencas situadas en la Provincia de Limarí. Fuente: Pino, 2022 [66].	19
3.4.	Caracterización climática de la Provincia de Limari, usando clasificación de Köppen-Geisger. Fuente: Pino, 2022[66]	21
3.5.	Unidades Geomorfológicas en la Provincia de Limarí. Fuente: Pino, 2022[66] .	22
3.6.	SHAC de la Cuenca del Río Limarí con los DAA Subterráneas concedidos. Fuente: Pino, 2022[66]	23
3.7.	SHAC de la Cuenca del Río Limarí con los DAA concedidos. Fuente: Elaboración Propia	28
3.8.	Distribución de Estaciones DGA Meteorológicas, Fluviométricas y de Niveles Estáticos de Pozos en la Provincia de Limarí. Fuente: Pino, 2022[66]	30
3.9.	Layout del Sistema de Agua Potable Rural San Marcos. Fuente: Pino, 2022[66]	33
3.10.	Distribución de Sistemas de APR en la Provincia de Limarí. Fuente: Pino, 2022[66]	35
3.11.	Distribución de SSR en la Provincia de Limarí. Fuente: Pino, 2022[66]	38
3.12.	Curva estacional de la Estación Rapel en la Subcuenca del Río Grande. Fuente: Pino, 2022 [66]	40
3.13.	Curva estacional de la Estación Tulahuen en la Subcuenca del Río Grande. Fuente: Pino, 2022[66]	40
3.14.	Curvas de duración para las Estaciones Rapel y Tulahuen de la Subcuenca del Río Grande. Fuente: Pino, 2022[66]	41
3.15.	Curva estacional de la Estación Combarbalá en la Subcuenca del Río Guatulame. Fuente: Pino, 2022[66]	42
3.16.	Curva estacional de la Estación El Tome en la Subcuenca del Río Guatulame. Fuente: Pino, 2022[66]	42
3.17.	Curvas de duración para las Estaciones Combarbalá y El Tome de la Subcuenca del Río Guatulame. Fuente: Pino, 2022[66]	43
3.18.	Precipitación media mensual histórica en estación meteorológica Combarbalá de subcuenca Guatulame. Fuente: Pino, 2022[66]	43

3.19.	Serie de precipitaciones anuales históricas en estaciones meteorológicas de monitoreo en subcuencas de la Comuna de Combarbalá. Fuente: Pino, 2022[66]	44
3.20.	Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Grande para la estación Río Grande en Puntilla San Juan. Fuente: Pino, 2022 [66].	47
3.21.	Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Grande para la estación Río Rapel en Junta. Fuente: Pino, 2022 [66].	48
3.22.	Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Grande para la estación Río Grande en Cuyano. Fuente: Pino, 2022 [66].	49
3.23.	Curvas de Variación Estaciones Fluviométricas de la Subcuenca del Río Guatulame para la estación Río Cogotí. Fuente: Pino, 2022	51
3.24.	Curvas de Variación Estaciones Fluviométricas de la Subcuenca del Río Guatulame para la estación Río Guatulame en El Tomé. Fuente: Pino, 2022	52
3.25.	Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA para el pozo P23. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. Fuente: Pino, 2022 [66].	54
3.26.	Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA para el pozo P24. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. Fuente: Pino, 2022 [66].	55
3.27.	Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA para el pozo P25. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. Fuente: Pino, 2022 [66].	56
3.28.	Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA para el pozo P25. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	57
3.29.	Representación gráfica de valores de recarga subterránea de SHAC en la comuna de Combarbalá. Elaborado a partir de DGA (2008)[16] y DGA (2020)[28].	60
4.1.	Distribución espacial de APRs según Ranking de Riesgo sobre complejidad de soluciones a problemáticas. Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2020)[29].	65
4.2.	Ubicación general del Pozo Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	66
4.3.	Detalle de la localización del Pozo Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	67
4.4.	Croquis no escala de Pozo 2 Producción Quilitapia (Combarbalá). Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	68
4.5.	Detalle de las Monzodioritas junto al Pozo de Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	69
4.6.	Detalle de las muestras litológicas obtenidas en la perforación del Pozo de Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	70
4.7.	Ajuste del Descenso durante la Recuperación Gasto Variable (Tramo 1) $T = 0,16m^2/día$ del Pozo de Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	71
4.8.	Ajuste del Descenso durante la Recuperación Gasto Variable (Tramo 2) $T = 19,4m^2/día$ del Pozo de Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]	71
4.9.	Grado de permeabilidad del suelo. Fuente: Whitlow (1994)[82].	72

4.10.	Dotación máxima de consumo familiar. Fuente: Manual de Proyecto Agua Potable Rural, (2023) ([53].	73
4.11.	Solicitud de DAA subterráneos para el SSR QUILITAPIA. Fuente: Portal de Transparencia del Ministerio de Obras Públicas, (2023).	74
5.1.	Ejemplo de la recarga de acuíferos gestionada con piscinas de infiltración para el sector agrícola. Fuente: CSIRO, 2020 [10]	77
5.2.	Esquema de galerías de infiltración. Fuente: Bekele et al., 2013 [55].	81
5.3.	Esquema de galerías de infiltración. Fuente: Bekele et al., 2013 [55].	82
5.4.	Pozos secos. Fuente: CSIRO, 2020 [10].	84
6.1.	Ubicación de canalistas, solicitudes de DAA y Pozo de Producción en Google Earth. Fuente: Elaboración Propia.	91

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El estudio de los recursos hídricos cobra cada vez más importancia a nivel global debido al contexto de cambio climático que se ha registrado desde la década de los 80. El último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) en el 2021, revela que los cambios pronosticados en la década pasada se han visto acelerados debido a la actividad antrópica. Por tanto, es de vital importancia cuantificar el volumen de agua que existe dentro de una cuenca, así como el volumen histórico que se ha registrado en ésta, ya que con esta información se puede comparar con el escenario actual, así como las tendencias históricas que ha registrado la cuenca. Además, es posible realizar predicciones para los próximos años en los distintos escenarios de emisión de carbono (RCP).

Para nadie es sorpresa que la crisis mencionada ha afectado a todo el planeta y sus seres vivos. Esta memoria se centrará en Combarbalá, una comuna ubicada en la Provincia de Limarí en la IV Región de Coquimbo, quienes están dentro de los múltiples afectados por el cambio climático y la crisis hídrica que afecta en la actualidad. Al igual que en otras comunidades rurales, en Combarbalá se vive día a día con la incertidumbre de la disponibilidad de agua potable y por tanto han manifestado la necesidad de tener soluciones definitivas a su problema hídrico. Pero esta no es la única razón del suministro discontinuo que reciben algunos usuarios, también lo es la falta de infraestructura adecuada que permita almacenar, abastecer y asegurar este recurso, sobre todo en los períodos de sequía, a aquellas personas que viven alejadas de la urbe.

La realización de una recarga de acuífero gestionada (RAG) en la actualidad se presenta como una alternativa viable en un mundo afectado por sequías recurrentes y cambios climáticos significativos, además puede ser una opción factible para comunidades que dependen de Servicios Sanitarios Rurales (SSR) y que experimentan dificultades para satisfacer sus necesidades hídricas como lo es la zona de estudio.

La principal motivación para llevar a cabo este trabajo radica en garantizar la seguridad y la continuidad del suministro de agua potable a la comunidad en cuestión. El cambio climático ha provocado una disminución en las precipitaciones y un aumento en las irregularidades de los patrones climáticos, lo que afecta directamente la disponibilidad de agua dulce. En este escenario, los acuíferos subterráneos desempeñan un papel crucial como fuentes de agua

estratégicas.

La RAG proporciona una solución efectiva y sostenible para aumentar la capacidad de almacenamiento y la disponibilidad de agua subterránea. Al infiltrar agua tratada o de otras fuentes confiables (como agua lluvia, de ríos, canales, entre otras) en los acuíferos, se recupera y repone la reserva de agua subterránea agotada durante los periodos de sequía. Esto no solo fortalece la seguridad hídrica a corto plazo, sino que también contribuye a la conservación y gestión sostenible de los recursos hídricos a largo plazo.

Además de asegurar el abastecimiento de agua potable, la recarga artificial de acuíferos tiene otros beneficios significativos. Estos incluyen la mejora de la calidad del agua subterránea, la reducción de la intrusión de agua salina en las zonas costeras, la protección de los ecosistemas asociados a los acuíferos y la promoción de la resiliencia frente a los desafíos climáticos.

En esta memoria se realizará un estudio de factibilidad que permitirá evaluar la viabilidad técnica de implementar una recarga de acuífero gestionada en Combarbalá. Este estudio implica analizar la disponibilidad y calidad del agua, evaluar la infraestructura necesaria, y considerar los costos estimados de la intervención.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es realizar un estudio de factibilidad o estudio preliminar de la viabilidad de llevar a cabo un proyecto de recarga de acuífero gestionada en la comuna de Combarbalá, basada en el estudio y caracterización a nivel de subcuenca y a nivel local, considerando aspectos técnicos y económicos con el propósito de contribuir a resolver la escasez de agua potable en la comuna de estudio.

1.2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos se tienen los siguientes:

1. Caracterización del acuífero de la comuna de Combarbalá: realizar una caracterización detallada del acuífero en términos de su geometría, propiedades hidrogeológico y capacidad de almacenamiento. Esto permitirá comprender su dinámica y determinar la viabilidad de la recarga artificial.
2. Evaluación de la disponibilidad y calidad del agua en Combarbalá: evaluar la disponibilidad y calidad del agua tanto en el acuífero como en las fuentes potenciales de recarga, como ríos, lagos, aguas residuales tratadas, entre otras. Analizar los caudales, los niveles de agua y la calidad del recurso para determinar la factibilidad de la recarga artificial.
3. Identificación de fuentes de recarga en Combarbalá: Identificar y evaluar las diferentes fuentes de recarga disponibles en la zona de estudio. Esto puede incluir la captación y conducción de aguas superficiales, el uso de aguas residuales tratadas o la infiltración controlada de precipitaciones.

4. Selección de la técnica de recarga: Evaluar y comparar las diferentes técnicas de recarga gestionada disponibles, como la infiltración directa, pozos de infiltración, recarga mediante canales, entre otras. Se deben considerar factores como la geología local, las características hidrogeológicas del acuífero y la eficiencia de cada técnica.
5. Estudio económico: Realizar un análisis económico básico que considere los costos de construcción, operación y mantenimiento de las obras de recarga de acuífero.
6. Plan de monitoreo y seguimiento: Establecer un plan de monitoreo y seguimiento a largo plazo para evaluar la efectividad de las obras de recarga de acuífero y su impacto en el sistema hídrico. Esto implica medir y analizar regularmente los niveles de agua, la calidad del agua, los caudales de recarga y otros parámetros relevantes.

Capítulo 2

Conceptos claves y antecedentes

Previo al avance en el contenido de este trabajo de título, resulta esencial proporcionar al lector un contexto adecuado sobre los temas a abordar. A continuación, se presentan conceptos claves que se encuentran en el desarrollo de este proyecto, los cuales se han estudiado y analizado a través de la revisión bibliográfica correspondiente.

2.1. Cambio climático y escasez hídrica

Hoy en día, uno de los principales desafíos en la agenda ambiental internacional es el cambio climático y sus efectos negativos en el planeta. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) lo define como un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad climática natural observada en períodos comparables. Esto implica que el cambio climático se debe a las acciones humanas que afectan procesos atmosféricos y la variabilidad climática natural. Entre las consecuencias del cambio climático, se encuentra la variación en las precipitaciones, que influye directamente en la recarga natural de las aguas subterráneas [76].

En Chile, desde 2010, se ha registrado un déficit de precipitaciones de aproximadamente el 30 %, lo que representa un registro histórico extraordinario debido a su persistencia temporal y extensión geográfica [60]. Este fenómeno, llamado megasequía, ha disminuido la cantidad de agua en los ríos de Chile, afectando también lagos, embalses, criósfera y aguas subterráneas. En la figura ?? se presenta la condición hídrica en la que se encuentra la Región de Coquimbo y las cuencas que lo componen (Cuenca Elqui, Cuenca Limarí y Cuenca Choapa). Allí, se refleja una situación deficitaria y compleja en términos de las precipitaciones sólidas (nieve), líquidas, y caudales, respecto a cifras normales a la fecha en esos ámbitos.

Además de comprender el cambio climático y la sequía prolongada en Chile, es importante introducir la noción de escasez hídrica, que afecta críticamente las condiciones actuales de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, generando consecuencias negativas en áreas rurales. La escasez hídrica ocurre cuando la demanda humana de agua supera la oferta disponible [35]. Schulte afirma que este fenómeno es una realidad física objetiva que puede medirse de manera consistente en todas las regiones y a lo largo del tiempo [69]. Schmidt y Benítez-Sanz identifican las principales causas de la escasez hídrica como patrones irregulares de precipitación, mala gestión de recursos hídricos, nuevos usos o demandas de agua y deficiencias en análisis de planes estratégicos hidrológicos [70]. Principalmente, los efectos

de la escasez de agua y sequía son la degradación de la calidad de aguas superficiales y subterráneas, extracción desmedida de aguas subterráneas y falta de recurso hídrico en áreas urbanas.

En Chile, la escasez hídrica se ha manifestado recientemente debido a la disminución de precipitaciones y al aumento de la sequedad del aire por el incremento de temperatura, lo que afecta acuíferos y almacenamiento de agua subterránea, mostrando una tendencia negativa significativa en relación con el descenso en los niveles de pozos [35]. No obstante, no solo la disminución de precipitaciones define la escasez, sino también la falta de redes de distribución de agua potable e infraestructuras que permitan aprovechar mejor la lluvia como fuente de agua, aún cuando este sea limitado, en este contexto la infraestructura de embalses, pozos, recargas, sistemas de conducción por tuberías, canales, etc. resultan esenciales [35].

Desde finales de 2010, se han observado signos de sobreexplotación del agua, con descensos en los niveles freáticos y afectación de humedales asociados [65]. Para enfrentar estas condiciones, el Presidente de Chile puede aprobar decretos de escasez hídrica en zonas donde, según variables y criterios hidrometeorológicos, se registre algún evento de sequía. La combinación de megasequía y escasez hídrica ha llevado a la emisión de casi 170 decretos relacionados con esta situación entre 2008 y 2020, con mayor impacto en las regiones de Valparaíso (35%), Región Metropolitana (26%) y Coquimbo (18%) (Ver Figura 2.1). La tendencia de escasez se concentra en la zona central y norte chico del país, donde también se encuentran áreas densamente pobladas y algunas de las principales actividades económicas[64].

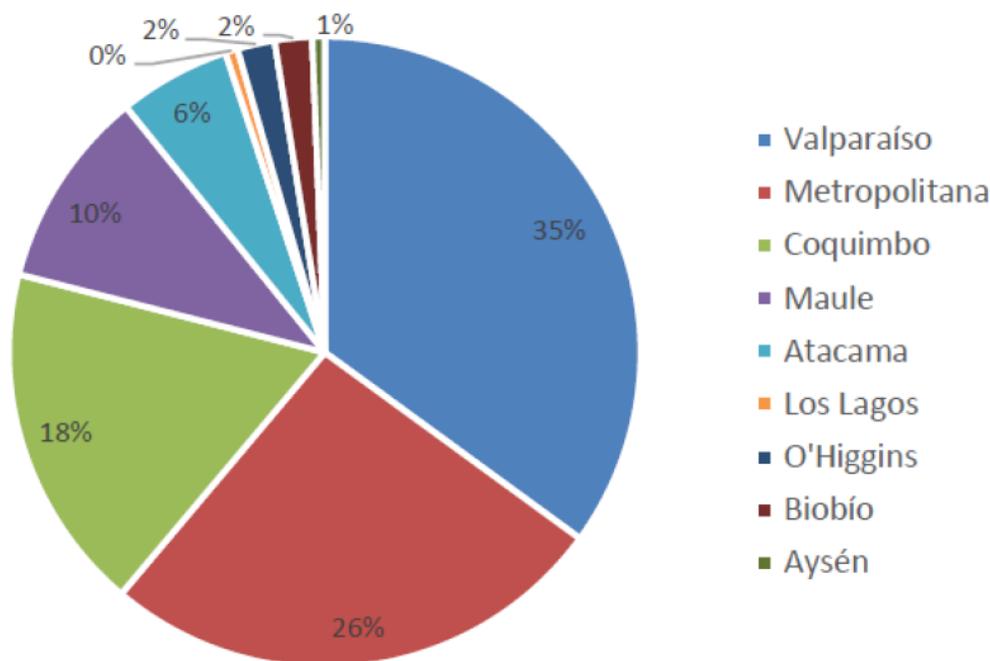


Figura 2.1: Incidencia de decretos de escasez hídrica por región durante los años 2008-2020. Fuente: Morales (2021) [70].

Aunque los decretos de escasez hídrica ofrecen soluciones temporales, como la contratación de camiones aljibe que complementan o reemplazan a las empresas sanitarias o los sistemas

de suministro rural de agua en zonas de emergencia, muchas localidades rurales enfrentan esta situación de manera recurrente, ya que dependen de esta modalidad para abastecerse de agua a diario. Esto revela errores en la interpretación, organización y gestión de recursos hídricos a nivel nacional [36]. McPhee y otros autores señalan que los Sistemas de Agua Potable Rural son vulnerables a situaciones de sequía y escasez, ya que carecen de recursos para invertir en mejorar la producción, operación y distribución del servicio de agua potable [46].

2.2. Ruralidad y agua potable

La ruralidad y el acceso a agua potable son dos temas interrelacionados que presentan desafíos particulares en diversas regiones del mundo. La provisión de agua potable en zonas rurales implica la garantía de un suministro seguro, en cantidad adecuada, constante y de calidad para las comunidades rurales, que a menudo se encuentran alejadas de las redes de servicios básicos. En este marco teórico, exploraremos la situación de la ruralidad y el acceso a agua potable en Chile, basándonos en estudios previos.

La ruralidad se refiere a las áreas geográficas que se caracterizan por una baja densidad de población y una menor infraestructura de servicios en comparación con las zonas urbanas. El acceso a agua potable en las áreas rurales puede ser un desafío debido a factores como la dispersión geográfica, la falta de recursos económicos y técnicos, y la falta de capacidad institucional [6].

En el contexto de Chile, se ha reconocido la importancia de garantizar el acceso a agua potable en las áreas rurales. Según estudios realizados por la Comisión Nacional de Riego (CNR), a pesar de los avances en la cobertura de agua potable rural, todavía existen comunidades rurales en el país que no tienen acceso adecuado a agua potable y dependen de fuentes no seguras o de baja calidad [10].

El acceso a agua potable en zonas rurales de Chile se enfrenta a desafíos específicos, como la limitada disponibilidad de fuentes de agua adecuadas, la escasez hídrica, la contaminación de fuentes naturales y la falta de infraestructura de suministro [6]. Además, se han identificado barreras institucionales y regulatorias que dificultan la implementación de soluciones sostenibles y efectivas [31].

Para abordar estos desafíos, se han implementado políticas y programas en Chile para mejorar el acceso a agua potable en zonas rurales. Entre ellos se incluyen iniciativas como la construcción de sistemas de abastecimiento de agua, la implementación de tecnologías apropiadas y el fortalecimiento de capacidades locales [10]. Sin embargo, aún persisten brechas en el acceso a agua potable en algunas áreas rurales, y se requiere un enfoque integral y sostenible para garantizar un suministro adecuado y seguro para todas las comunidades rurales de Chile.

2.3. Programa de Servicios Sanitarios Rurales

2.3.1. Contexto nacional, principales aspectos y cobertura del programa

El Programa de Servicios Sanitarios Rurales (SSR) en Chile es un programa desarrollado por la Dirección de Obras Hidráulicas la que depende del Ministerio de Obras Públicas. Este programa fue implementado con el objetivo de suministrar agua potable a las comunidades rurales de Chile, contribuyendo así al desarrollo económico y a la integración social del país. Las metas del programa se centran en proporcionar agua potable a la población rural, asegurando su calidad, cantidad y continuidad según la Norma Chilena NCh 409 Of. 84 [55].

El programa SSR, conocido en sus inicios como Programa de Agua Potable Rural (APR), fue establecido en 1964 como parte del Plan Básico de Saneamiento Rural. Entre 1964 y 1970, se construyeron cerca de 150 sistemas de APR, principalmente en la zona central de Chile. A noviembre del 2022, el número de SSR en todo el país había aumentado a 2.240, los cuales abastecían al 99 % de la población de zonas rurales concentradas, alcanzando a 2.723.960 beneficiarios [56].

En cada localidad donde se proyecta un sistema de servicio sanitario rural, se establece una organización comunitaria no remunerada, entidad que tienen su propia personalidad jurídica y está compuesta por una directiva elegida por sus propios miembros, lo que significa que cada usuario tiene derecho a votar y a participar en la toma de decisiones.

Los servicios rurales de agua potable en Chile están definidos como aquellos que se prestan en zonas no urbanas y no se consideran servicios públicos sanitarios. Por lo tanto, se rigen por las normas del Código Sanitario y deben cumplir con las normas del D.F.L. N° 382, relativas a la prestación de los servicios sanitarios, en cuanto a garantizar la cantidad, calidad y la continuidad del servicio de agua potable [57].

En términos de financiamiento, el SSR se financia principalmente a través de los Fondos denominados Iniciativas de Inversión, asignados anualmente al Ministerio de Obras Públicas. Además, también recibe fondos de la Provisión de Infraestructura Rural de la Subsecretaría de Desarrollo Regional (SUBDERE) [58].

Los Servicios Sanitarios Rurales (SSR) en Chile son parte de la nueva Ley N° 20.998, la que entró en vigencia el 20 de noviembre de 2020. Esta ley busca garantizar el abastecimiento de agua potable y saneamiento en las zonas rurales del país. Reconoce a las organizaciones sociales como operadores y administradores de los servicios sanitarios en sus respectivos territorios, mientras que el Estado se encarga de proveer la infraestructura y ejecutar obras para los servicios existentes y nuevos [72].

El Ministerio de Obras Públicas (MOP) es responsable de entregar licencias a los comités y cooperativas de agua potable rural existentes, autorizándolos para proveer los servicios de agua potable y saneamiento en áreas geográficas delimitadas, estableciendo sus derechos y obligaciones. El MOP también mantiene un registro público de los operadores de servicios sanitarios rurales, con la información relevante de cada servicio. Todos los comités y cooperativas existentes deben inscribirse en este registro en un plazo de 2 años, con la posibilidad de una prórroga de 12 meses en casos justificados [72].

A modo de comparación se presenta la ley que regía al Programa Potable Rural y la ley que rige al actual Servicios Sanitarios Rurales. Ley del Programa Potable Rural: Antes de la entrada en vigencia de la Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales, en Chile existía el Programa Potable Rural, el cual era gestionado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) a través de la Dirección de Obras Hidráulicas y la Superintendencia de Servicios Sanitarios. Este programa se implementó desde la década de los 90 y tenía como objetivo construir y mantener sistemas de Agua Potable Rural (APR) para abastecer a aproximadamente 1,9 millones de personas en zonas rurales. El MOP brindaba apoyo técnico y asesoría a los más de 1.900 comités y cooperativas de APR encargados de administrar dichos sistemas. El Programa Potable Rural se enfocaba principalmente en el abastecimiento de agua potable en zonas rurales, sin abordar necesariamente el saneamiento de aguas servidas en estas áreas [62].

Ley de Servicios Sanitarios Rurales: La Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales entró en vigencia el 20 de noviembre de 2020, y supuso una modificación radical en la forma de administración y gestión de los sistemas de Agua Potable Rural (APR) existentes. Esta ley reconoce a las organizaciones sociales (cooperativas y comités de agua potable rural) que prestan servicios sin fines de lucro y han recibido aportes del Estado, como los encargados de la administración y operación de los servicios sanitarios rurales. Estas organizaciones se convierten en Licenciatarios por plazo indefinido y deben inscribirse en un registro administrado por el MOP, cumpliendo con requisitos y obligaciones en áreas contables, operacionales y administrativas. La ley establece que el MOP, a través de la Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales (SSR) creada en la Dirección de Obras Hidráulicas, tiene el rol de proveer la infraestructura y ejecutar obras para servicios existentes y nuevos, además de brindar asesoría y asistencia a las organizaciones sociales antes mencionadas. La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) se encarga de fiscalizar y fijar tarifas para todos los sistemas de servicios sanitarios rurales, incluyendo el abastecimiento de agua potable y el saneamiento de aguas servidas [72].

Es importante destacar que esta nueva ley no ha sido bien recibida por los dirigentes de los APRs (nuevos SSRs), esto se debe a diversas razones. Una de ellas es que, con la nueva ley, cada SSR debe encargarse de aprobar las factibilidades a través de informes técnicos realizados, evaluados y firmados por un profesional como un ingeniero civil. Contratar a un entendido en el tema como un ingeniero tiene un costo que dichas organizaciones no pueden asumir, y que antes se hacía cargo la DOH. Otra razón menos específica es que los dirigentes ven un cambio en la naturaleza de los APRs, señalan que este siempre ha sido un servicio de índole social y que se busca cambiarlo a una empresa de tipo concesionaria la que puede eventualmente privatizarse, esto se señala a raíz de que la nueva ley establece la posibilidad que ante reclamos de usuarios sobre la continuidad, calidad y cantidad de agua, puede caer en falta dando el derecho a las autoridades de intervenir en la administración, como sacar a la directiva, situar a un interventor y eventualmente licitar ese servicio a terceros.

2.3.2. Estructura, desarrollo y marco institucional del programa

El programa de Servicio Sanitario Rural (SSR) en Chile está estructurado en torno a la cooperación entre la comunidad y el gobierno. Los comités o cooperativas de agua potable rural, formados por miembros de la comunidad, son responsables de la operación, mantenimiento y administración del sistema de agua, incluyendo la recaudación de tarifas de los

usuarios. Estos comités son, en esencia, organizaciones autónomas de base comunitaria.

Desde su creación en la década de 1960, el programa SSR ha evolucionado considerablemente. Originalmente, se centraba en proporcionar soluciones de agua potable a pequeñas comunidades rurales [62]. Con el tiempo, el enfoque se ha ampliado para incluir el saneamiento y la gestión sostenible de los recursos hídricos. El programa ha logrado un gran progreso en la mejora del acceso a agua potable y saneamiento en las zonas rurales de Chile, aunque aún existen desafíos en términos de cobertura y calidad del servicio.

El programa SSR está supervisado a nivel nacional por la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas. Esta entidad proporciona financiamiento para la construcción y mejora de los sistemas SSR, además de brindar asesoramiento técnico y legal a los comités de SSR. De igual manera, existen otras entidades que aportan financiamiento a los SSR, como los gobiernos regionales, el ministerio de desarrollo social, las municipalidades, y también privados.

A nivel regional y local, las Secretarías Regionales Ministeriales (SEREMI) de Obras Públicas y los gobiernos municipales juegan un papel importante en la implementación del programa SSR. Las SEREMI coordinan la planificación y ejecución de los proyectos SSR en su región, mientras que los municipios a menudo proporcionan apoyo a los comités, por ejemplo, en la gestión del sistema y en la formación y capacitación de los miembros del comité.

Además, otras entidades públicas como el Servicio de Salud y la Superintendencia de Servicios Sanitarios también están involucradas en el programa SSR, supervisando aspectos relacionados con la calidad del agua y la regulación del servicio de agua potable y saneamiento, respectivamente.

2.4. Agua Superficial y Subterránea

2.4.1. Heterogeneidad Hídrica

El agua tanto superficial como subterránea son recursos esenciales que muestran una heterogeneidad hídrica significativa, y su comprensión resulta fundamental para una gestión adecuada de los recursos hídricos. La heterogeneidad hídrica del agua superficial y subterránea en Chile se refiere a la variabilidad espacial y temporal en la distribución, disponibilidad y calidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Esta heterogeneidad es el resultado de la interacción compleja entre una serie de factores naturales y antropogénicos que moldean el ciclo hidrológico y la gestión del agua en la región chilena [2].

La diversidad climática de Chile, que abarca desde el extremadamente árido Desierto de Atacama hasta las regiones más húmedas del sur, genera una amplia variedad de patrones de disponibilidad de agua. La interacción entre sistemas climáticos como la Corriente de Humboldt, la Zona de Convergencia Intertropical y los vientos dominantes del oeste tiene un impacto significativo en los patrones de precipitación. Esta variabilidad climática contribuye a la formación de diferentes tipos de cuerpos de agua, como ríos, lagos, humedales y glaciares, cada uno con su propia dinámica hídrica.

La topografía, influenciada por la Cordillera de los Andes y la geografía costera, también juega un papel vital en la heterogeneidad. La disposición de las cuencas hidrográficas, los gradientes altitudinales y la orientación de las laderas afectan la escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos subterráneos.

La diversidad geológica de Chile contribuye a la heterogeneidad del agua subterránea. La presencia de distintos tipos de rocas y suelos, junto con la permeabilidad y porosidad variable de las formaciones geológicas, impacta la capacidad de almacenamiento y flujo de agua en el subsuelo. La existencia de acuíferos confinados y no confinados, así como la presencia de zonas de recarga, afecta la disponibilidad de agua subterránea en diferentes áreas [1].

La intervención humana introduce una dimensión adicional de heterogeneidad en la distribución y gestión del agua. La agricultura, la minería, la urbanización y otros usos de la tierra pueden alterar los patrones naturales de infiltración y escorrentía, afectando tanto la recarga de los acuíferos como la calidad del agua superficial. La extracción excesiva de agua subterránea en ciertas regiones puede resultar en la intrusión de agua salina en los acuíferos, deteriorando su calidad y limitando su utilidad.

La gestión del agua juega un papel crucial en la heterogeneidad hídrica. La construcción de infraestructuras como embalses, canales y sistemas de distribución de agua impacta en la disponibilidad y distribución de recursos hídricos. Las políticas hídricas también pueden influir en la asignación y uso del agua, lo que puede llevar a desigualdades en el acceso y la gestión de este recurso vital.

2.4.2. Disponibilidad, restricción y prohibición del recurso superficial y subterráneo

Chile enfrenta grandes desafíos en cuanto a la disponibilidad, restricción y prohibición del uso del recurso hídrico subterráneo y superficial.

La disponibilidad del agua subterránea en Chile varía considerablemente dependiendo de la región. En las zonas áridas del norte, el agua subterránea es un recurso crítico, a menudo siendo la única fuente de agua disponible. En las zonas centrales y del sur, donde hay más precipitaciones, el agua subterránea a menudo complementa el suministro de agua superficial, especialmente durante los periodos secos o en áreas donde la infraestructura para la distribución de agua superficial es insuficiente.

Con respecto a la disponibilidad de agua superficial en Chile, esta también varía dependiendo de la región y esta muy relacionada con lo ya mencionado. En la zona norte, existe una baja precipitación sólida y líquida, y las fuentes de agua son escasas. En las zonas centrales y del sur, si bien existen mayores precipitaciones, la cantidad es menor a sus índices normales producto de la sequía y cambio climático.

La extracción de agua superficial y subterránea en Chile está regulada por la Dirección General de Aguas (DGA), que es responsable de la gestión y protección de los recursos hídricos del país. Sin embargo, la DGA se enfrenta a desafíos significativos para mantener

el equilibrio entre la demanda y la disponibilidad del recurso. La sobreexplotación de los acuíferos, especialmente en las zonas áridas del norte (producto de la baja en el recurso superficial) y en las regiones agrícolas intensivas, ha llevado a la disminución de los niveles de agua subterránea y a la intrusión de agua salada en los acuíferos costeros.

En respuesta a estos desafíos, la DGA ha impuesto prohibiciones o restricciones en ciertas áreas para proteger los recursos hídricos. Estas restricciones pueden tomar la forma de una prohibición total de la extracción de agua o pueden limitar la cantidad de agua que se puede extraer. Sin embargo, hacer cumplir estas restricciones puede ser un desafío dada la extensión geográfica de Chile y la dependencia de muchas comunidades y actividades económicas del agua .

Es importante mencionar que Chile está trabajando en la reforma de su marco normativo en torno al agua para mejorar la gestión y protección de los recursos hídricos. La gestión integrada y sostenible del agua es un objetivo clave en esta reforma.

2.5. Desafíos en el ámbito de gestión de recursos hídricos y agua potable

Chile enfrenta una serie de desafíos en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos y del agua potable. Estos desafíos son de naturaleza diversa y abarcan desde aspectos técnicos hasta asuntos de gestión y políticas públicas.

Uno de los principales desafíos es la implementación efectiva de una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), que tenga en cuenta todos los aspectos del ciclo del agua y sus interacciones con el medio ambiente y la sociedad. Esto implica una consideración cuidadosa de los usos y necesidades de agua tanto superficiales como subterráneas en todas las escalas, desde la local hasta la nacional. En el caso del agua subterránea, la principal dificultad radica en la imposibilidad de ser analizada de forma visual, lo que tiene un impacto en la importancia y su vulnerabilidad a la sobreexplotación y la contaminación que tiene el agua subterránea. Se requiere un monitoreo y manejo cuidadoso de estas aguas para garantizar su disponibilidad a largo plazo.

La provisión segura y confiable de agua potable es un desafío continuo en muchas áreas de Chile, especialmente en las zonas rurales y en las comunidades más pobres. Las políticas y estrategias deben enfocarse en mejorar la infraestructura de agua potable, aumentar la eficiencia y la equidad en la distribución del agua y promover el uso sostenible y la conservación del agua. Es importante que estas estrategias y políticas estén alineadas con los objetivos de la GIRH y consideren todos los recursos de agua disponibles, tanto superficiales como subterráneos.

Además, se necesita una mayor coordinación entre los diferentes actores involucrados en la gestión del agua, desde los organismos gubernamentales y las empresas de agua hasta las comunidades locales y los usuarios del agua. También es esencial fortalecer la capacidad de estos actores para participar de manera efectiva en la gestión del agua.

Finalmente, la adaptación al cambio climático es un desafío creciente en la gestión del agua. Las estrategias y políticas de agua potable deben tener en cuenta los posibles impactos que sobre ella pueden tener el cambio climático, así como los cambios en la disponibilidad y la calidad del agua, y deben buscar soluciones resilientes y sostenibles para asegurar el suministro de agua en el futuro.

2.6. Recarga de acuífero gestionada (RAG)

2.6.1. Definición

Existen distintas definiciones de recarga de acuífero gestionada. Custidio y Llamas definieron este concepto como una técnica que implica introducir agua de forma no natural en un acuífero para aumentar la disponibilidad y/o mejorar la calidad del agua subterránea [12]. Por otro lado, Bouwer, describe esta técnica como la disposición de agua superficial en estanques, surcos, zanjas u otros dispositivos, donde se infiltra y llega al acuífero [5].

2.6.2. Aspectos técnicos

La CNR afirma que las condiciones para realizar proyectos exitosos de recarga gestionada dependen de las condiciones hidrogeológicas del área y la disponibilidad de agua. También dependen del nivel de explotación del agua subterránea del acuífero. Un proyecto exitoso requiere un acuífero libre con un nivel estático profundo, desconectado de cauces superficiales cercanos [8]. Además, el medio de recarga debe tener alta capacidad para conducir agua (permeabilidad), ya sea por gravedad o inyección a presión. Los proyectos de RAG tienen un mayor impacto económico positivo en áreas donde el acuífero está sobreexplotado [10].

Con respecto al medio físico, en este se incluyen la cubierta vegetal, el suelo y el agua subterránea [59]. La cubierta vegetal actúa como filtro, reduciendo la obstrucción de los poros abiertos y facilitando el crecimiento de humus orgánico, lo que aumenta la capacidad de infiltración del suelo. La cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo depende de su porosidad efectiva, que es la fracción de la porosidad total con poros interconectados que permiten el desplazamiento del agua [59]. Además, es crucial conocer la distancia entre la superficie del suelo y el nivel freático, la dirección del flujo subterráneo y las fluctuaciones del nivel del agua en cada estación para conocer el estado actual de la situación [59].

2.6.3. Aspectos Legales en Chile

El Artículo 66 del Código de Aguas permite a cualquier persona ejecutar obras para la recarga de acuífero gestionada, priorizando la construcción de un derecho de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de tales obras[32].

Por otro lado, en términos medioambientales, se deben considerar el Decreto Supremo N° 46 de 2003 (D.S.N°46) y las Normas Chilenas 1333 Of.78 (NCh1333) y 409/1 Of.2005 (NCh409), que establecen concentraciones máximas de contaminantes en el agua según diferentes usos[32].

2.6.4. Experiencias internacionales en recarga de acuífero gestionada

La recarga de acuífero gestionada ha sido una técnica muy utilizada a nivel mundial, la cual, debido a su gran efectividad, ha adquirido gran importancia hídrica.

Una de las primeras recargas gestionadas realizadas tuvo cabida en Europa, donde se experimentaron distintos esquemas de recarga artificial desde 1870 en Alemania. Por otro lado, en Países Bajos se hicieron las primeras recargas gestionadas en el año 1879, específicamente en Holanda. En algunos países de Europa Central, las aguas de recarga gestionada representan un porcentaje significativo del abastecimiento: 45 % en Hungría, 16 % en Alemania, 50 % en Eslovaquia, etc. Por ejemplo, Dusseldorf y Budapest dependen en un 100 % de aguas de recarga gestionada y Berlín en un 75 %.

En España, los primeros registros de recarga gestionada se remontan a la época árabe con los careos alpujarreños y el sistema de diques y boqueras levantinos [66]. Las primeras instalaciones modernas de recarga gestionada se construyeron en 1969 en Cornellá y los alrededores de Barcelona: aluvial del río Besós y del río Llobregat [66].

En América, según el inventario del Instituto Acacia de Holanda, hay al menos 56 instalaciones operativas de recarga de acuífero gestionada en Estados Unidos [66]. También se han encontrado referencias de actuaciones de recarga gestionada en México y Argentina [66].

En el Medio Oriente, las experiencias más extendidas han sido en Israel, donde existen dos proyectos que aprovechan aguas de inundaciones para recargar los acuíferos de Shiquima, al norte de la franja de Gaza, y de Nahalei Menashe, cerca de Cesarea [66].



Figura 2.2: Experiencias internacionales en recarga de acuífero gestionada.
Fuente: Elaboración propia.

2.6.5. Experiencias en Chile de recarga de acuífero gestionada

En la actualidad, en Chile, no existen obras de recarga de acuífero gestionada que estén operando. Sin embargo, debido a la escasez del agua como recurso esencial, es que entidades como la Comisión Nacional de Riego (CNR), Dirección General de Aguas (DGA), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y algunos privados están comenzando a investigar el tema apuntando a una futura implementación [10].

LA CNR, en el año 2013, lideró un estudio de diagnóstico de zonas potenciales de recarga gestionada, la cual abarca una gran cantidad de regiones de Chile, específicamente entre Arica y Parinacota y la región del Maule. Este estudio ha identificado áreas favorables para la recarga gestionada en 11 regiones de Chile, y ha generado una propuesta de metodología de identificación de áreas potenciales para futuros estudios de RAG.

La Universidad de Chile ha desarrollado proyectos piloto de recarga gestionada en la cuenca del río Maipo y en la cuenca del río Copiapó. Ambos proyectos han demostrado la factibilidad técnica de la recarga gestionada en el país y han contribuido al conocimiento de los procesos involucrados en la recarga de acuíferos en las cercanías de los puntos de recarga.

En la Región de Atacama, se ha desarrollado un proyecto de recarga en la cuenca del río Copiapó, que ha permitido aumentar la disponibilidad de agua subterránea en la zona, y ha servido como modelo para futuros proyectos en otras cuencas del país.

En la siguiente figura, se presentan las experiencias de recarga de acuíferos en Chile.

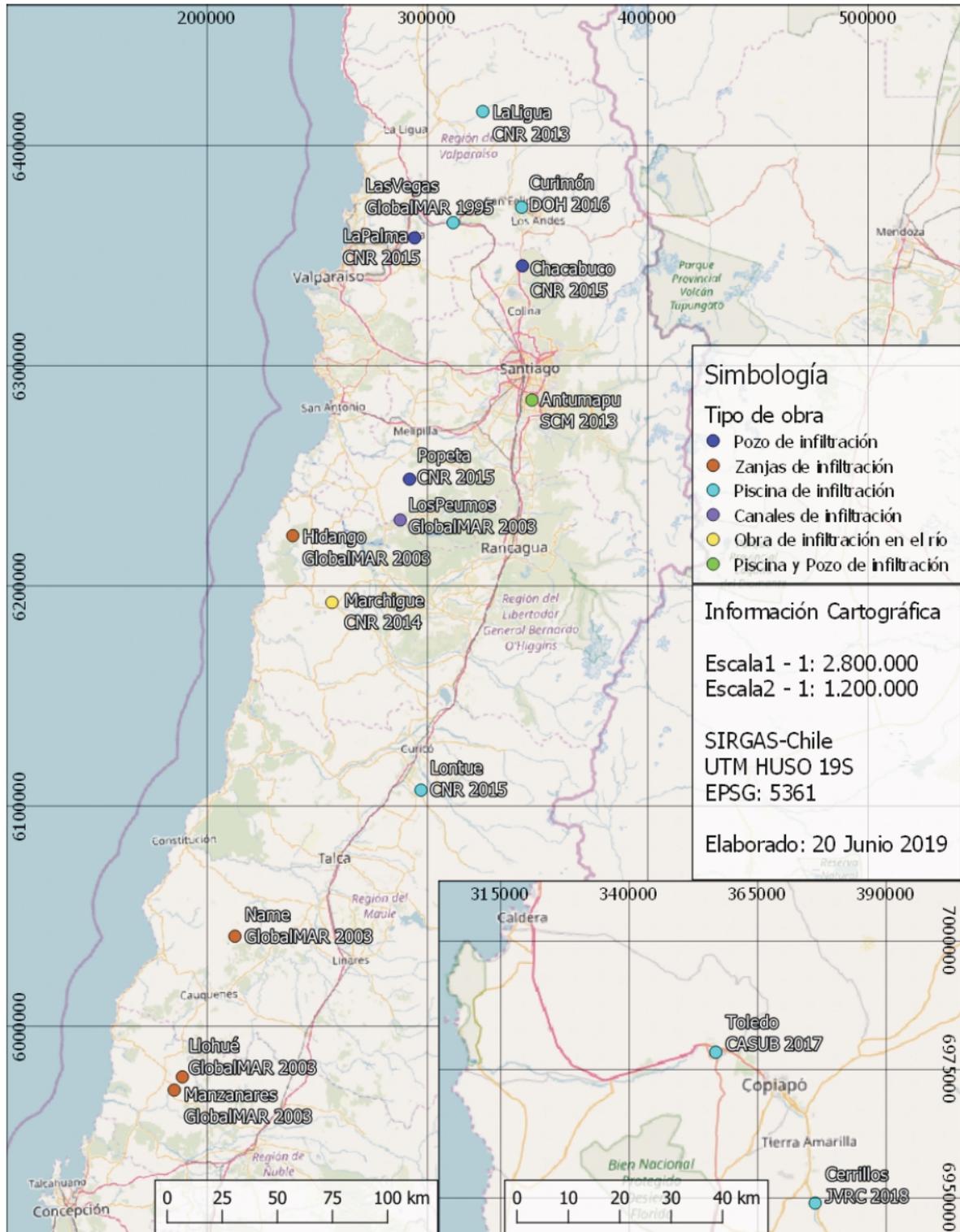


Figura 2.3: Experiencias nacionales de recarga de acuífero gestionada. Fuente: CNR, 2020.[11]

A pesar de estos avances, la implementación de proyectos de recarga gestionada en Chile

sigue siendo incipiente y se requiere de mayores esfuerzos para generar y difundir conocimiento sobre la técnica y su aplicabilidad en cada uno de los diferentes contextos locales. Además, es necesario establecer una política pública que promueva y facilite la implementación de proyectos de recarga gestionada, en función de las características y necesidades de cada cuenca.

Capítulo 3

Caso de estudio, comuna de Combarbalá

En la siguiente sección se presentarán las principales características de la zona de estudio, correspondiente a la comuna de Combarbalá, las que ayudarán a entender mejor el escenario actual del mismo.

3.1. Características de la comuna

3.1.1. Área de Estudio y Aspectos administrativos

Combarbalá es una de las cinco comunas de la Provincia de Limarí y se encuentra ubicada en la macrozona norte de Chile, específicamente en la IV Región de Coquimbo. La superficie que abarca esta comuna es de $2.257km^2$ aproximadamente. En la Figura 3.1 se presenta una cartografía de la Provincia de Limarí con sus respectivas comunas, donde Combarbalá se encuentra en color celeste. Además, se aprecia la presencia de dos embalses, el embalse Cogoti y el embalse Valle hermoso, por otro lado se tienen dos ríos a lo largo del territorio correspondientes al Río Combarbalá y el Río Cogoti, .

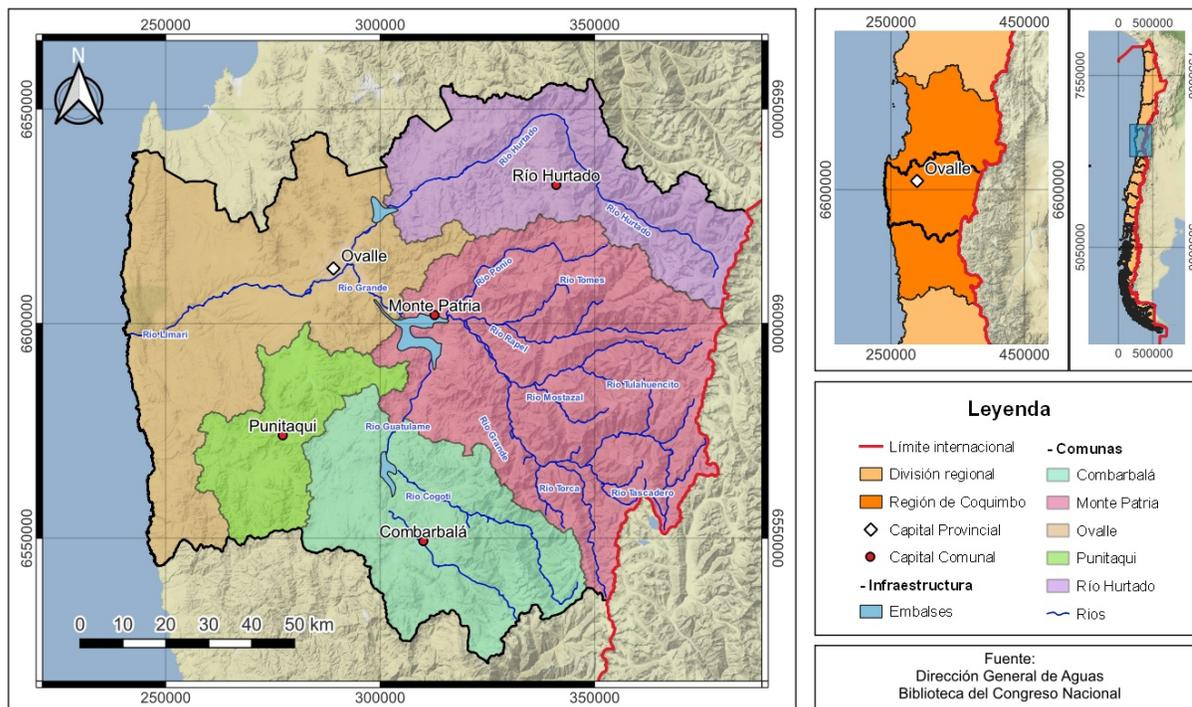


Figura 3.1: Delimitación de la Provincia de Limarí con sus respectivas comunas. Fuente: Pino, 2022 [66]

La población de la comuna de Combarbalá es de 13.322 habitantes, que se estima como el 2% de los habitantes de la Región de Coquimbo, la cual tiene una población total de 757.586 habitantes según el Censo del año 2017. Otra variable a considerar es la ligada al área urbana-rural, donde la IV Región tiene un porcentaje de población urbana del 81,2% y una población rural del 18,8% [42], sin embargo en el caso de Combarbalá los porcentajes cambian, ya que la población rural representa un 55% del total y el sector urbano un 45%, logrando así ser una de las dos comunas de la provincia con más de un 50% de ruralidad [43]. En la siguiente figura se presenta una tabla que muestra la información detallada con anterioridad, además de una proyección para el presente año 2023.

Unidad Territorial	Censo 2017		Proyección 2023		% Ruralidad	
	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Censo 2017	Proyeccion 2023
Comuna de Combarbalá	5.998	7.324	6.469	7.401	55,0	53,4
Región de Coquimbo	615.116	142.470	714.700	154.403	18,8	17,8
Pais	15.424.263	2.149.740	17.703.812	2.257.077	12,2	11,3

Figura 3.2: Censo de Población y Vivienda 2017, Proyecciones de población 2023. Fuente INE, 2018 [42]

3.1.2. Cuencas y Red hidrográfica

Para poder realizar un estudio completo de lo que ocurre en la zona, es indispensable conocer la caracterización de la cuenca que la contiene. Combarbalá se encuentra dentro de la cuenca Río Limarí (Código Banco Nacional de Aguas [BNA] 045), la cual es una cuenca de tipo exorreica, es decir, el escurrimiento de las aguas que circulan en ella es continuo hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, además esta posee una superficie de $11.696km^2$, lo que la sitúa dentro de las 15 cuencas de mayor tamaño en Chile [20].

Sin embargo como esta cuenca abarca otras 4 comunas, se decidió acotar la zona de estudio a nivel subcuenca. Utilizando el Software QGis, se procedió a delimitar la zona por subcuencas, tal como se aprecia en la Figura 3.3.

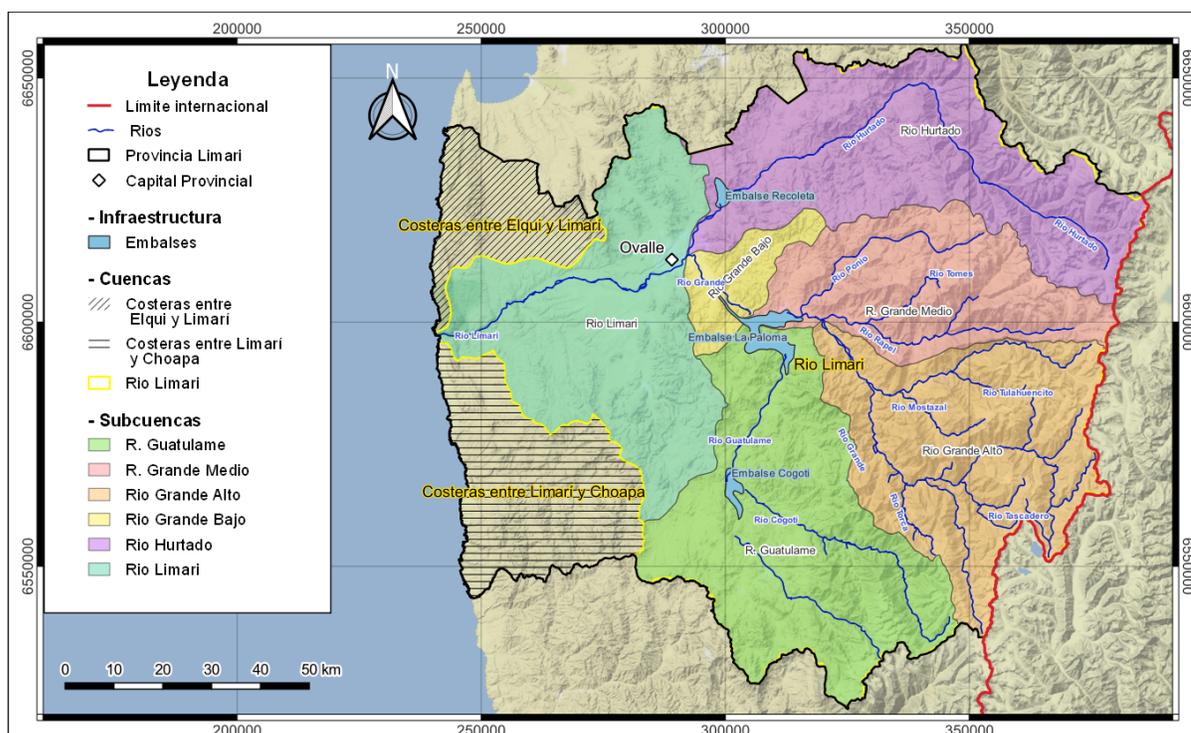


Figura 3.3: Delimitación de cuencas situadas en la Provincia de Limarí.
Fuente: Pino, 2022 [66].

En la figura anterior se aprecia que las dos subcuencas que contienen a Combarbalá son la del Río Grande Alto, de unos $2.189km^2$, y la del Río Guatulame de unos $2.619km^2$. Es importante destacar que ambas subcuencas no se encuentran de manera completa en la comuna, pero parte de Combarbalá se encuentra en cada una de ellas.

La Provincia de Limarí cuenta con 4 cauces principales permanentes, siendo solo dos de ellos los que pasan por el territorio de interés que son el Río Guatulame y el Río Grande. Por otro lado, existen otros ríos no permanentes en la zona y corresponden al Río Cogoti, Río Torca, Río Mostazal, Río Tulahuencito y Río Tascadero.

El Río Guatulame, es el encargado de drenar parte de la hoya hidrográfica sur de la cuenca

Limarí, justamente donde se ubica Combarbalá, además, junto al Río Hurtado, son los cauces que dan origen al Río Limarí [15].

El Río Grande por su parte recibe una serie de afluentes entre los cuales se destacan los ríos Rapel, Mostazal y Guatulame, donde éste último es regulado por el Embalse Cogoti, ubicado en Combarbalá, cuya capacidad de almacenamiento es de 150 millones de m^3 .

3.1.3. Clima

A lo largo de todo el territorio que comprende Combarbalá, se puede percibir un clima seco y mayormente árido, lo que supone periodos prolongados de sequía [26]. La temperatura media anual es cercana a los 18°C , con mínimas de 10°C y máximas de 25°C .

Para la caracterización climática de la zona se elaboró un mapa utilizando los datos descargados de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) sobre las zonas climáticas de Chile. En la Figura 3.4 se logra apreciar que Combarbalá posee 3 tipos de climas característicos, siendo el semiárido de lluvia invernal el predominante y que se encuentran en color rojo. Este clima se presenta en valles centrales y es básicamente un clima seco, donde la evaporación es superior a los eventos de precipitación y hay presencia de excedentes hídricos.

En menor medida se presentan otros dos tipos de clima. Hacia las zonas elevadas de la provincia, es decir, la zona sur-este de la comuna de Combarbalá, se presenta un clima de tundra con lluvias invernales, el cual está en color celeste, allí la vegetación tiene un escaso crecimiento debido a condiciones de semiaridez, se presenta abundante precipitación, altos niveles de escorrentía y existe una gran acumulación de nieve, lo que genera aportes significativos en la Cuenca en periodos estivales [26].

Por último, en la zona sur de la comuna de Combarbalá se tiene un clima mediterráneo de lluvia invernal, el que se aprecia de color amarillo, este no representa una gran extensión del territorio de interés.

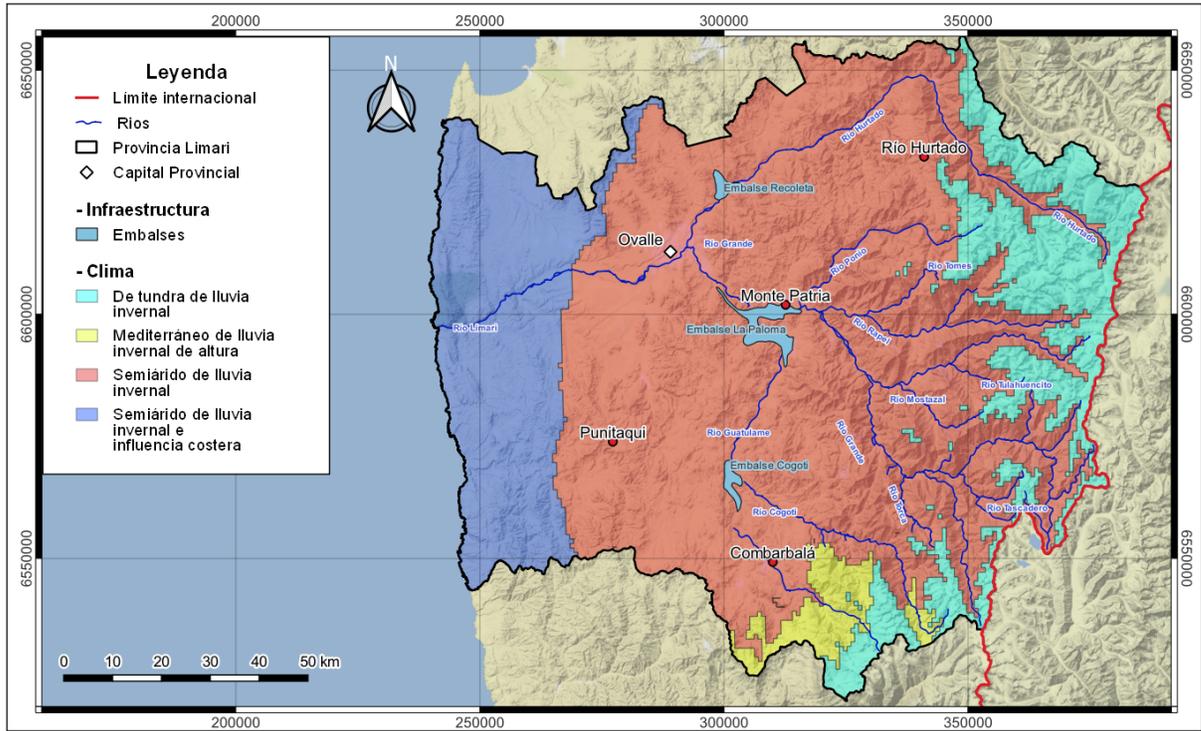


Figura 3.4: Caracterización climática de la Provincia de Limari, usando clasificación de Köppen-Geisger. Fuente: Pino, 2022[66]

3.1.4. Geomorfología e hidrogeología

Para conocer la geomorfología de la zona, se confeccionó un mapa utilizando datos descargados desde el observatorio de la Red del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CE-DEUS). Así, en la Figura 3.5 se aprecia que Combarbalá posee dos tipos de unidades geomorfológicas, las cuales fueron determinadas mediante informes comunales sobre Recursos Naturales del Sistema de Información Territorial Rural (2022) del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).

La primera, se encuentra en color celeste en la cartografía (Figura 3.5), y corresponde a una geomorfología de Cordillera andina de retención crionival, esta abarca desde la franja límite con Argentina que va desde los Andes hasta unos 50 kilómetros en dirección a los valles transversales. Allí se localizan elevadas montañas con alta tasa de retención nival.

La segunda geomorfología corresponde a Cordones transversales, los que están representados en color amarillo (Figura 3.5), estos son relieves ondulados con alturas entre los 600 y 1000 m.s.n.m. Su formación es producto del escurrimiento en disecciones fluviales, las cuales forman una red de drenaje.

para hacer frente a la escasez hídrica que afecta a la comuna en estudio [36]. Además, una vez declarada el Área de Protección, se establece una Comunidad de Aguas Subterráneas conformada por los usuarios de aguas subterráneas incluidos en ella, lo que otorga un papel relevante a la población rural de los Sistemas de Explotación de Aguas Subterráneas en la administración y gestión de los acuíferos (*Art.66, D.F.L.Nº1.122*). Sin embargo, es importante señalar que en la cuenca del Río Limarí no existen comunidades de aguas que permitan una gestión efectiva de los recursos subterráneos frente a los efectos del cambio climático [24].

3.2.1. Cuantificación y caracterización de DAA superficiales y subterráneas concedidos

Para poder cuantificar y caracterizar los DAA en Combarbalá, se procede a procesar la información de la base de datos de la DGA sobre Derechos Concedidos para la IV Región de Coquimbo, la cual es descargada de la mapoteca digital de la Dirección General de Aguas(DGA), que entrega mediante un archivo de tipo Excel toda la información que se procederá a detallar.

Luego de filtrar los datos por comuna, se logró identificar que en la comuna de Combarbalá existen 1.859 DAA los cuales se pueden clasificar según distintos criterios.

- Naturaleza del agua: superficial, superficial corriente, superficial detenida y subterránea.
- Tipo de derecho: consuntivo y no consuntivo.
- Clasificación fuente: embalse, acuífero, río/estero, lago/laguna, chorillo, quebrada y vertiente.
- Uso del Agua: riego, uso minero, bebida/uso doméstico/saneamiento, energía hidroeléctrica, piscicultura y otros usos.
- Ejercicio del Derecho: permanente-continuo, eventual-continuo, permanente-discontinuo, eventual-discontinuo y permanente-alterado.

Ahora bien, fijando la mira en el estudio que se está realizando, la fuente para una recarga artificial puede ser de naturaleza superficial o subterráneo, es por esto que se proceden a analizar y cuantificar los DAA tanto superficiales como subterráneos.

Al ver nuevamente el registro de la DGA es posible notar también que en su mayoría estos derechos son todos de tipo consuntivos, es decir, los acreedores tienen la facultad de hacer uso de este recurso para cualquier actividad (*Art.13, D.F.L.Nº1.122 CITAR*) y su ejercicio agota o consume los recursos involucrados, lo que significa que su uso por parte de una persona reduce la disponibilidad de ese recurso para otros. Por otro lado, existe 5 derechos no consuntivos en la comuna, cuyo ejercicio no implica el agotamiento o consumo de los recursos, en otras palabras, el ejercicio de este tipo de derecho no afecta la disponibilidad futura del recurso para otras personas.

Si miramos el último criterio, es posible notar que la mayor parte de los DAA son permanentes, con un total de 1.822 DAA, lo que implica que el acreedor tiene la facultad de utilizar el agua en la dotación que corresponda, salvo que la fuente de abastecimiento no contenga la

cantidad suficiente, en dicho caso el caudal se distribuirá de manera proporcional (Art. 17, D.F.L.No 1.122). Con respecto a los eventuales, se tiene un total de 34 DAA.

Sin embargo, la clasificación por ejercicio del derecho también tiene asociado un período de tiempo en que puede ser usada el agua, según ese criterio se tiene lo siguiente:

- Uso Continuo: Permiten usar el agua en forma interrumpida durante las 24 horas del día. De estos derechos existen 1780 en la comuna.
- Uso Discontinuo: El uso del agua está restringida a períodos determinados de tiempo. De estos derechos existen 15 en la comuna.
- Uso Alternado: El agua se distribuye entre más de una persona, los cuales se turnan sucesivamente para usarla. De estos derechos existen 61 en la comuna.

Otra clasificación importante que se debe tener en cuenta para el análisis es el uso que se le da a estos derechos de agua. Revisando nuevamente la información disponible en la mapoteca digital se tiene que para el uso de riego se han concedido 452 DAA, para el uso minero se tiene 3 DAA, para Bebida/Usos Domésticos/Saneamiento se tienen 16 DAA, para energía hidroeléctrica hay 4 DAA, para piscicultura hay 2 DAA y además hay 1381 derechos que no informan el uso para el cual fueron concedidos.

De lo anterior, queda evidenciado el vacío informativo que hay en el catastro público disponible sobre el uso del agua, pues existen un 75% aproximadamente de derechos de los cuales no se sabe para que fueron concedidos.

A continuación se presenta una tabla resumen con todo lo mencionado con anterioridad.

Tabla 3.2: Cuantificación de los DAA subterráneas de la Comuna de Combarbalá. Fuente: Elaboracion Propia

		N° DAA
Comuna	Combarbalá	1.858
Tipo Derecho	Consuntivo	1.853
	No consuntivo	5
Naturaleza del Agua	Superficial	296
	Superficial y corriente	573
	Superficial y detenida	83
	Subterránea	906
Clasificación Fuente	Acuífero	906
	Chorillo	3
	Embalse	116
	Vertiente	49
	Lago/laguna	1
	Quebrada	1
	Río/estero	782
Uso del Agua	Riego	452
	Uso minero	3
	Bebida/uso doméstico/saneamiento	16
	Energía hidroeléctrica	4
	Piscicultura	2
	No informado	1381
Ejercicio del Derecho	Permanente continuo	1760
	Permanente discontinuo	1
	Permanente Alternado	61
	Eventual y continuo	20
	Eventual y discontinuo	14
	Sin ejercicio	2

Un aspecto importante a considerar para el análisis de los DAA es la distribución administrativa a nivel de SHAC de cada uno de ellos, esto se refiere a cómo se asignan y administran los derechos de agua dentro de la DGA, de acuerdo con los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC).

Las SHAC son divisiones geográficas de la DGA utilizadas para la administración de los derechos de agua. En cada SHAC, la DGA administra los derechos de agua para distintos tipos de usos como los mencionados con anterioridad.

La asignación de derechos de agua en cada SHAC se basa en una serie de criterios, incluyendo la disponibilidad de agua, la demanda de agua, y las prioridades establecidas por la política de aguas del país. Los derechos de agua son otorgados a través de un proceso

administrativo que incluye la solicitud de derechos, la evaluación de la solicitud por parte de la DGA, y la concesión de los derechos si se cumplen todos los requisitos.

Según la base de datos de la DGA, en Combarbalá existen 6 SHAC correspondientes a los mencionados en la tabla 3.1, entre todos se obtiene un total de 2443 derechos concedidos los cuales se encuentra georeferenciados con sus respectivas coordenadas UTM. Es importante recordar que los SHAC Punitaqui y Guatulame no se encuentra completamente en la comuna de Combarbalá, lo que explica la diferencia numérica con los derechos de la comuna obtenido por el registro de los derechos concedidos a la IV Región de Coquimbo en el archivo Excel mencionado. En la siguiente tabla se detalla la cantidad de derechos por SHAC, con el valor de caudal medio anual y volumen total anual otorgado en cada uno de ellos.

Tabla 3.3: SHAC de la Comuna de Combarbalá. Fuente: DGA (2020)[25].
Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA

SHAC	Nº de DAA	Caudal(lt/s)	Volumen (m ³ /años)
Combarbalá	48	84,8	2.249.462,9
Cogoti	35	71,3	2.674.252,8
Río Pama	173	193,5	6.102.111,9
Quebrada Grande	318	149,7	4.721.569,9
Guatulame	211	892,2	28.137.888,8
Punitaqui	1.658	2.121,5	66.904.358,8
Total	2443	3513	110789645,1

Aportando aún más al análisis se presenta un mapa que muestra la distribución de los derechos a nivel subcuena, con la ubicación exacta de los derechos distribuidos en los SHAC.

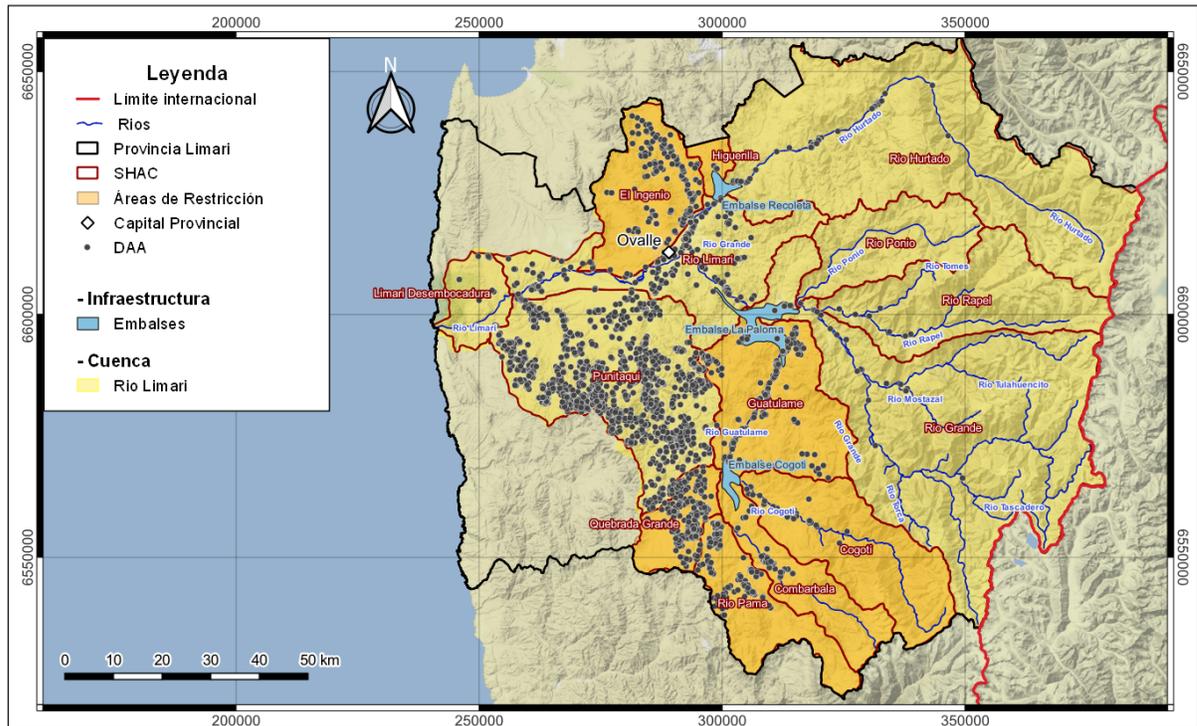


Figura 3.7: SHAC de la Cuenca del Río Limarí con los DAA concedidos.
Fuente: Elaboración Propia

De la Figura 3.7 se logra apreciar que existe una densidad de DAA al Noroeste de la comuna. El SHAC de Quebrada Grande, concentra un 13 % de los derechos concedidos en las subcuencas de estudio, esto se debe a la gran concentración de derechos otorgados a compañías, sociedades y comunidades agrícolas, junto con sociedades vinícolas. Cabe destacar que si bien el SHAC de Punitaqui posee un 68 % de los DAA, se presume que dentro de las subcuencas es menor (aproximadamente la mitad) puesto que parte del SHAC también pertenece a otra subcuenca.

Las consecuencias de la alta cantidad de derechos otorgados a actividades agrícolas y vinícolas son los problemas generados en torno a las condiciones de abastecimiento de las fuentes subterráneas de agua potable rural, debido a que se evidencian deterioros en calidad de agua en los acuíferos por contaminación difusa debido al uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, situación que se presenta mayoritariamente en los SHAC El Ingenio, Guatulame, Punitaqui, Quebrada Grande, Rio Grande y Río Limarí [24], sectores en los cuales se aglomera gran cantidad de DAA.

3.3. Red Hidrométrica

A continuación se procede a detallar la Red Hidrométrica que presenta la comuna de Combarbalá, la cuál sirve para tener un conocimiento adecuado de las subcuencas de estudio en función a diversas variables de interés. El Servicio Hidrométrico Nacional es desarrollado por la DGA, y entrega datos históricos en tiempo real para poder realizar análisis de comportamientos y/o pronósticos. De esta manera, gracias a la Información Oficial Hidrometeorológica

y de Calidad de Aguas en Línea de la DGA, se procede a detallar a continuación las estaciones vigentes de meteorología, fluviometría y niveles estáticos de pozos de monitoreo para el caso de estudio.

3.3.1. Meteorología

Para poder realizar el análisis de precipitaciones en Combarbalá, se cuenta con 3 estaciones de monitoreo que están distribuidas de la siguiente manera.

Tabla 3.4: Distribución de Estaciones Meteorológicas en la comuna de Combarbalá de la Provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA [27].

Comuna	ID	Nombre de Estación	Altitud (m.s.n.m.)
Combarbalá	M6	Cogotí Embalse	740
	M7	Cogotí 18	840
	M8	Combarbalá	870

3.3.2. Fluviometría

Las estaciones fluviométricas son las encargadas de medir la cantidad de agua fluyendo en ríos, para así saber la disponibilidad del recurso en un periodo específico. Para ello, se dispone de 4 estaciones de monitoreo que se distribuyen de la siguiente manera.

Tabla 3.5: Distribución de Estaciones Fluviométricas en la comuna de Combarbalá de la Provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA

Comuna	ID	Nombre de Estación	Altitud (m.s.n.m.)
Combarbalá	F4	Río Cogotí en Franguita	1.065
	F5	Río Cogotí entrada Embalse Cogotí	670
	F6	Río Combarbalá en Ramadillas	1.43
	F7	Río Pama en Valle Hermoso	850

3.3.3. Monitoreo de pozos de observación DGA

Las estaciones de monitoreo de los pozos desempeñan una función crucial al medir la diferencia entre el nivel freático y la superficie del terreno (boca del pozo). Esta medida se convierte en un indicador esencial para calcular la cantidad de agua almacenada en los acuíferos, que luego puede suministrarse como agua subterránea a través de derechos de uso a aquellos usuarios y comunidades que lo requieran [20]. Es de suma importancia contar con un conjunto sólido de datos sobre los niveles estáticos en los pozos de seguimiento a lo largo del tiempo (años o incluso décadas), ya que proporciona un registro hidrológico que cubre las variaciones en los niveles de agua subterránea en los acuíferos, permitiendo de este modo comprender las variables externas que afectan las tendencias observadas [75].

de la comunidad.

Los SSR incluyen infraestructuras para la captación, tratamiento, almacenamiento y distribución de agua potable a las viviendas de las comunidades rurales. El agua puede provenir de diversas fuentes, como ríos, lagos, pozos subterráneos o manantiales.

El gobierno, a través de la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, proporciona apoyo técnico y financiamiento para la construcción, mejora y ampliación de los SSR. Sin embargo, la operación y el mantenimiento de los sistemas son responsabilidad de las OAPR, que cobran tarifas a los usuarios para cubrir estos costos.

El SSR es vital para garantizar el acceso al agua potable en las zonas rurales de Chile, y su gestión comunitaria permite adaptar los sistemas a las necesidades locales y promover la participación y la responsabilidad de los usuarios[79].

En Combarbalá, así como en la totalidad de la Provincia de Limarí, los comités de Servicio Sanitario Rural para poder acceder a financiación o discutir temas relacionados con los recursos hídricos, mantienen una relación directa con la Dirección de Obras Hidráulicas a través de la subdirección de SSR.

3.4.1. Desarrollo provincial y comunal del Programa de APR

Utilizando información recopilada en el Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del Ministerio de Obras Públicas donde existen datos sobre los SSR de la Dirección de Obras Hidráulicas, se logró determinar que en la actualidad existen 18 SSR en la comuna de Combarbalá, que cumplen los objetivos de proporcionar agua potable en cantidad, calidad y continuidad a sus habitantes.

La creación de los Servicios Sanitarios Rurales en Chile fue impulsada por el gobierno en la década de 1960, llamados en ese entonces Sistema de Agua Potable Rural (APR), como una solución a la falta de acceso a agua potable en zonas rurales. A lo largo de los años, estos sistemas se han expandido y mejorado, con una mayor participación de las comunidades locales en su administración y operación. Pero fue en 1971 cuando se estableció el primer SSR en la Provincia de Limarí, conocido como APR Huatulame, sistema que sigue operativo en la comuna de Monte Patria en la actualidad. A partir de entonces, hubo un crecimiento significativo en las décadas de 1980 y 1990, impulsado por un aumento en los recursos financieros destinados al programa. Esto permitió mejorar la infraestructura en la Región de Coquimbo, donde los sistemas de SSR en Limarí representan el 44.7% del total de sistemas en la región.

En la Región de Coquimbo, dada su aridez y la irregularidad de las precipitaciones, el acceso a agua potable ha sido un desafío importante. La implementación de los SSR ha sido crucial para proporcionar agua potable a las comunidades rurales.

En la actualidad, el suministro de agua potable en las áreas rurales enfrenta desafíos que limitan su disponibilidad y calidad, lo cual afecta a las comunidades locales. Estos desafíos incluyen:

- Escasez de recursos hídricos: Existe una disminución en la disponibilidad de agua superficial y subterránea para abastecer a la población rural.
- Desigualdad técnico-financiera: Algunos comités encargados del suministro de agua potable rural enfrentan limitaciones técnicas y financieras, lo que dificulta la entrega de un servicio óptimo.
- Aumento de la demanda sin planificación hídrica: En algunas zonas rurales, la creciente demanda de agua no ha sido acompañada por una adecuada planificación de los recursos hídricos disponibles, lo que genera dificultades en el abastecimiento.

Estas limitaciones representan desafíos actuales que requieren atención y soluciones para garantizar un suministro de agua potable adecuado en las comunidades rurales.

3.4.2. Infraestructura y sistemas de la comuna

Además de comprender el desarrollo de los SSR en la comuna, es importante entender cómo operan y suministran el agua en las localidades rurales. En el marco del SSR, la infraestructura de agua potable es el componente principal que se asigna a los comités o cooperativas para su adecuada administración, operación y mantenimiento. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo, se han identificado problemas relacionados con el suministro de agua, lo que afecta el objetivo general del programa de proporcionar un suministro de agua potable.

Los Servicios Sanitarios Rurales utilizan diferentes componentes para captar, tratar, almacenar, regular y distribuir el agua en las localidades rurales. A continuación, se describen de manera resumida los principales elementos que conforman estos sistemas:

- Captación: Los sistemas de captación suelen utilizar pozos o norias para obtener el agua de fuentes subterráneas.
- Tratamiento: El agua es tratada y desinfectada en casetas específicas. Los tratamientos más comunes incluyen el uso de hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio, y en ocasiones se emplea permanganato de potasio para desinfectar el agua extraída de la fuente.
- Almacenamiento y regulación: Los sistemas cuentan con estanques de almacenamiento y/o regulación, los cuales permiten distribuir el agua por gravedad. Estos estanques pueden ser elevados o semi-enterrados, y su capacidad varía desde 15 m³ hasta 200 m³. Pueden estar contruidos con materiales como hormigón armado, acero inoxidable o fibra de vidrio.
- Filtrado: Los SSR utilizan diversas tecnologías de filtrado, como ósmosis inversa, filtros para eliminar hierro y manganeso (Fe-Mn) y filtros de carbón activado.
- Distribución: Se diseñan redes de conducciones e impulsiones utilizando materiales como acero galvanizado, acero al carbono, polietileno de alta densidad (HDPE) o PVC. Algunos sistemas incluyen plantas reelevadoras. Las conexiones domiciliarias se realizan con tuberías de cobre, HDPE o PVC.
- Impulsión: Para la extracción del agua, se utilizan bombas sumergibles en las obras de captación.

- Tableros de control: Se implementan sistemas eléctricos con tableros de control para monitorear y diagnosticar el funcionamiento del sistema de impulsión.

Estos componentes constituyen la infraestructura necesaria para asegurar el suministro de agua potable en las localidades rurales a través de los SSR. De acuerdo con el Manual de Proyectos de Agua Potable Rural [61], cada uno de los componentes mencionados anteriormente debe cumplir con las normativas, regulaciones y estándares correspondientes, como las normas de diseño, normas técnicas, normas de fabricación, normas chilenas y reglamentos aplicables

Para visualizar de manera esquemática la infraestructura de los SSR en la Provincia del Limarí, se presenta la Figura 3.9 como ejemplo del layout del SSR de San Marcos, ubicado en la comuna de Combarbalá. Este esquema fue elaborado en febrero de 2022 por el Comité de SSR del mismo nombre, en el contexto del cumplimiento de la Práctica Profesional III para ingenieros e ingenieras civiles de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

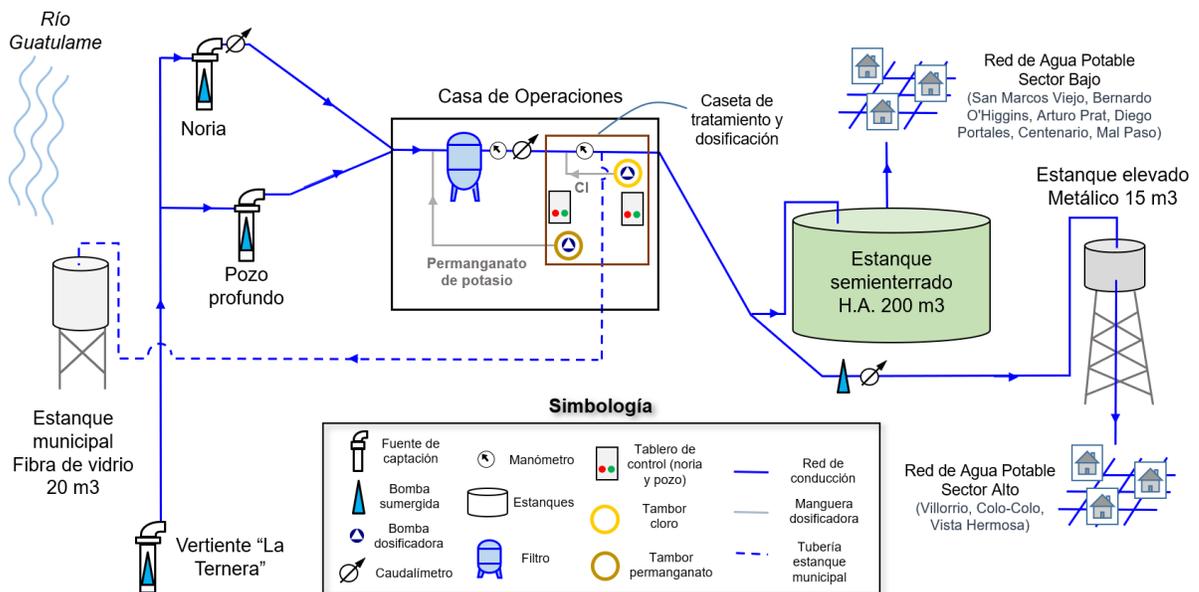


Figura 3.9: Layout del Sistema de Agua Potable Rural San Marcos. Fuente: Pino, 2022[66]

Es importante también considerar la caracterización de los SSR en función del ámbito administrativo (subdivisión por SHAC), niveles de dotación y la cantidad de captaciones de tipo pozo presentes en cada uno de ellos. Para ello, se procede a realizar el catastro de SSR en la comuna de interés mediante datos recopilados de la Subdirección de SSR, que se complementa con información proveniente de la DOH y DGA. De esta manera, a la fecha se localizan en Combarbalá 18 SSR, los cuales se sitúan cada uno de ellos en diferentes SHAC. La información se detalla en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Sistemas APR de la Comuna de Combarbalá. Elaboración propia a partir de información recopilada en Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA.

ID	SSR	SHAC	Arranques	Beneficiados	Nº Pozos
37	COGOTI 18	Cogotí	530	1.643	3
38	EL HUACHO	Quebrada Grande	110	341	4
39	EL SAUCE	Quebrada Grande	144	447	4
40	LA CANTERA	Combarbalá	53	465	0
41	LA CAPILLA	Combarbalá	36	112	0
42	LA ISLA	Cogotí	171	531	3
43	LA LIGUA DE COGOTI	Cogotí	353	1.095	3
44	LAS BARRANCAS EL CHINEO	Cogotí	276	856	3
45	MANQUEHUEA	Punitaqui	185	574	2
46	MEDIA LUNA	Punitaqui	45	140	2
47	QUILITAPIA	Quebrada Grande	365	1.132	4
48	RAMADILLA	Combarbalá	119	369	0
49	SAN MARCOS	Guatulame	450	1.385	2
50	SORUCO	Río Pama	103	320	2
51	VALLE HERMOSO	Río Pama	115	357	3
52	EL DURAZNO	Cogotí	73	227	1
53	LA COLORADA	Combarbalá	75	233	2
54	SUEÑO CUMPLIDO	Río Pama	60	186	2
Total:			3263	15294	

Con el objetivo de visualizar mejor la distribución de los SSR, se presenta a continuación un mapa con su ubicación a nivel comunal de la Provincia.

consuntivo. Además, todos ejercen el derecho de manera permanente y de manera continua.

Para poder cuantificar cada uno de los derechos, la Tabla 3.8 detalla el ID del SSR con su respectivo caudal otorgado.

Tabla 3.8: Caudal medio anual otorgado a SSR con DAA. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.[27]

ID	SSR	Caudal (lt/s)
37	COGOTI 18	8,74
42	LA ISLA	7,0
43	LA LIGUA DE COGOTI	18,0
44	LAS BARRANCAS EL CHINEO	2,8
45	MANQUEHUEA	5,36
51	VALLE HERMOSO	12,0

También en función a la información recopiladas, se identificó que en la comuna existen 2 Sistemas de SSR que tienen derechos asociados a favor de la Empresa de Obras Sanitarias de Coquimbo (ex SENDOS). El detalle de caudal medio anual otorgado a cada uno de ellos con su respectivo ID se muestra en le Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Caudal medio anual otorgado a SSR con título de dominio de ex SENDOS. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA y DGA[27]

ID	SSR	Caudal (lt/s)
39	EL SAUCE	0,7
43	LA LIGUA DE COGOTI	1,5

3.5. Análisis de recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Red Hidrométrica Nacional

Con el objetivo de tener un panorama claro respecto a la situación en que se encuentran los recursos hídricos en la comuna de Combarbalá, se realiza un análisis detallado de la base de datos de la Dirección General de Aguas (DGA), específicamente la Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas disponible en línea a través del Servicio Hidrométrico Nacional. Este análisis abarca diversas variables y componentes hidrológicas, incluyendo estaciones meteorológicas y fluviométricas para evaluar la cantidad de precipitaciones y los caudales de los ríos. También se examinan las variaciones de los niveles freáticos en la provincia mediante el monitoreo de los niveles estáticos en pozos de observación de la DGA. Cada una de estas variables se estudia de manera interconectada, ya que se busca comprender cómo influyen entre sí. Este enfoque integral permite comprender la situación actual de los recursos hídricos, considerando tanto las condiciones superficiales como subterráneas en la zona de estudio.

3.5.1. Componente Hidrológica

Con el objetivo de estudiar la componente hidrológica de la comuna en su totalidad, se realiza un análisis estadístico utilizando datos de estaciones meteorológicas y fluviométricas proporcionados por la DGA. Estas estaciones son fundamentales dentro del modelo conceptual y permiten comprender los procesos predominantes en el ciclo hidrológico de las subcuencas Río Grande y Río Guatulame.

Para llevar a cabo este análisis, se descarga información del Servicio Hidrométrico Nacional, abarcando un período de tiempo que va desde principios de 1982 hasta finales de 2021, lo que corresponde a una ventana temporal de 40 años. Este intervalo de tiempo es adecuado para analizar ciclos hidrológicos y determinar los tipos de regímenes hidrológicos presentes en la zona.

Si bien, existen estaciones que cuentan con todos los datos tanto fluviométricos como meteorológicos, la estadística no es completa en todas ellas. Es por esto que se realizó una solicitud a la DGA vía transparencia para obtener la información faltante, sin embargo, la respuesta no fue satisfactoria en todas las solicitudes. Pese a esto se decidió no realizar un relleno de datos para complementar la estadística, ya que se estima que el comportamiento esperado no tendrá una variación significativa debido a la ausencia de información de muestreo.

A continuación, se detallan las dos subcuencas con las que se está trabajando.

1. Subcuenca Río Grande: Esta subcuenca posee zonas bajas (entre embalse Paloma y Río Hurtado), medias (arriba de junta río Rapel y río Guatulame o muro Embalse La Paloma) y altas (desde el nacimiento del río Tascadero hasta arriba junta Rapel), las cuales a través de numerosos cauces permiten el desarrollo del río Grande. La Cordillera de los Andes es su principal unidad, siendo esta responsable de una gran cantidad del contenido crionival del Limarí.
2. Subcuenca Río Guatulame: Se ubica en la zona de escurrimientos sur de la comuna de Combarbalá, donde fluyen importantes cauces como el río Guatulame, río Combarbalá y Cogotí. Posee unidades geomorfológicas de cordones transversales, y hacia los montes en dirección este se ven formaciones de la cordillera andina. En esta zona se emplaza el Embalse la Paloma y el Embalse Cogotí. En esta subcuenca se encuentra gran cantidad de DAA.

Las estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas para cada una de las subcuencas con la cantidad de datos a estudiar se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.10: ID de Estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA para analizar el régimen de subcuencas de la Comuna de Combarbalá, con su respectivo número de datos. Fuente: Elaboración propia.

	Subcuenca Río Grande	Nº de datos	Subcuenca Río Guatulame	Nº de datos
Estaciones Meteorológicas	M9: Estación Rapel	456	M8: Estación Combarbalá	454
	M11: Estación Tulahuen	449	M10: Estación El Tomé	456
Estaciones Fluviométricas	F8: Estación Río Grande en Puntilla	462	F5: Estación Río Cogoti entrada Embalse Cogoti	412
	F9: Estación Río Grande en Junta	441	F12: Estación Río Guatulame en El Tomé	441
	F15: Estación Río Grande en Cuyano	463	-	-

Con el fin de poder visualizar la ubicación de estas estaciones se presenta el siguiente mapa que cuenta con dicha información por subcuenca.

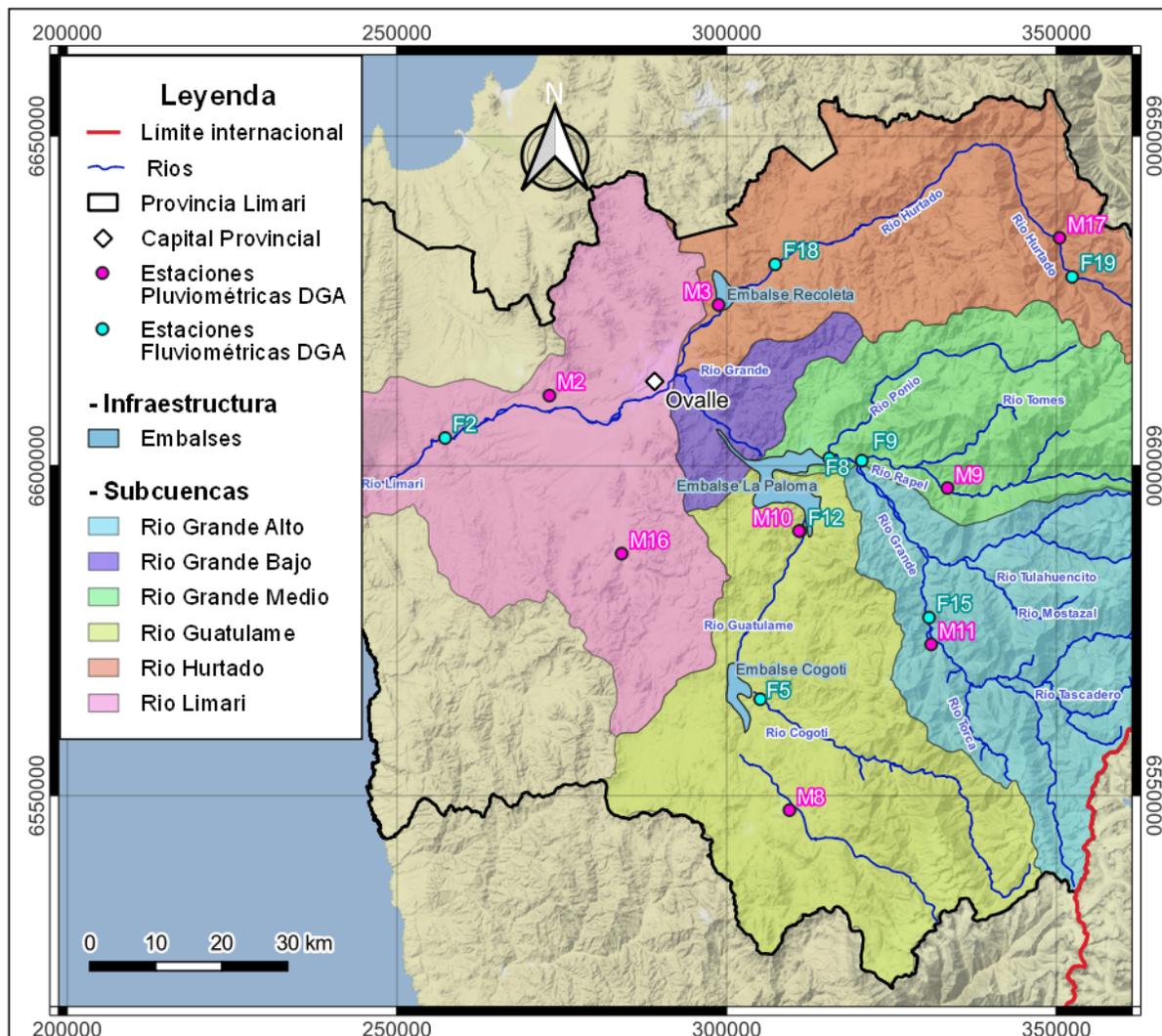


Figura 3.11: Distribución de SSR en la Provincia de Limarí. Fuente: Pino, 2022[66]

3.5.1.1. Análisis de precipitaciones

Para el análisis de las precipitaciones se procede a realizar las siguientes curvas:

- Curvas estacionales: Permiten obtener la caracterización de la estacionalidad utilizando una estadística de precipitaciones medias mensuales. Para el análisis se consideran dos periodos de tiempo, correspondientes al período histórico (1982-2009), el cual su estadística tiene un comportamiento normal, y el período de megasequía (2010-2020) el que se encuentra influenciado por el fenómeno del mismo nombre.

Es importante destacar que el período de megasequía se manifestó en Chile hasta el 2015 y no tiene precedentes en el último milenio [64].

- Curvas de duración: Permite conocer mediante la representación gráfica la probabilidad para la cual se puede igualar o se puede exceder un valor específico de precipitación

media mensual. En otras palabras, para interpretar la ocurrencia y magnitud de eventos hidrometeorológicos de precipitación desde un enfoque probabilístico se utilizan distribuciones empíricas que entregan la Probabilidad de Excedencia que se asigna y asocia a cada uno de los datos de la serie.

Para el análisis de precipitaciones se utiliza la distribución de Weibull [81], que tiene la siguiente expresión:

$$p(x_i) = \frac{i}{N + 1} \quad (3.1)$$

Donde:

N : tamaño de la muestra, es decir, cantidad total de datos de precipitación mensual en la estación.

i : número de orden asociado a cada valor en la serie de precipitación (va de 1 a N). $i = 1$ se asocia al valor máximo de precipitación registrada y $i = N$ se asocia al menor valor de la serie.

x_i : valor de precipitación en la posición i -ésima.

$p(x)$ = probabilidad de que x_i iguale o exceda otro valor.

De este modo, para las dos subcuencas se detallarán las curvas estacionales y curva de duración para analizar la estacionalidad y comportamientos históricos de precipitación en Combarbalá.

- Subcuenca del Río Grande

En el caso del Río Grande, se observa en los períodos analizados una tendencia de reducción significativa de precipitaciones en el mes de julio, y una ligera disminución de eventos en el mes de agosto. Además, se nota un desplazamiento estacional de las lluvias hacia el mes de mayo, esto se puede apreciar en detalle en la Figura 3.12 y Figura 3.13.

Si se observa la Figura 3.13, en el mes de mayo se registra un promedio mensual histórico de precipitaciones de 31,1mm, mientras que durante el periodo de megasequía se observa un aumento en el promedio mensual de precipitaciones a 53,0mm, lo que representa un incremento del 158.68% entre los periodos estudiados.

Al analizar la curva de duración en la Figura 3.14, se puede observar que aproximadamente el 82% de las precipitaciones no supera los 50mm. Además, las estaciones muestran un comportamiento similar para probabilidades menores a ese valor de excedencia.

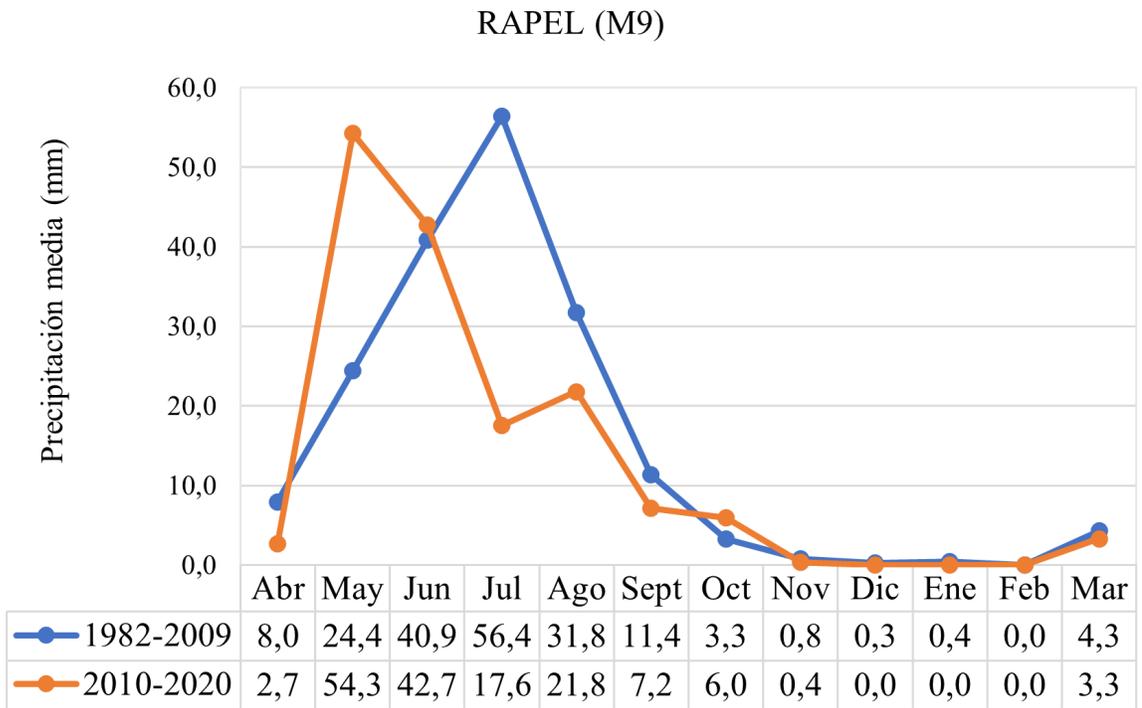


Figura 3.12: Curva estacional de la Estación Rapel en la Subcuenca del Río Grande. Fuente: Pino, 2022 [66]

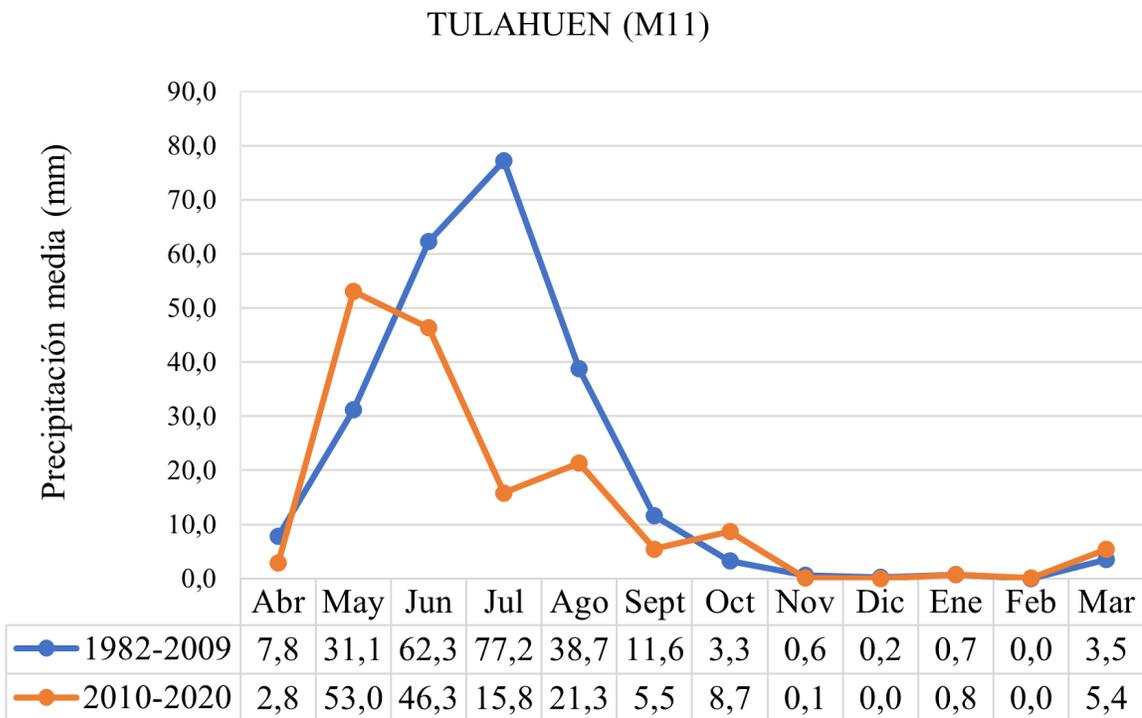


Figura 3.13: Curva estacional de la Estación Tulahuen en la Subcuenca del Río Grande. Fuente: Pino, 2022[66]

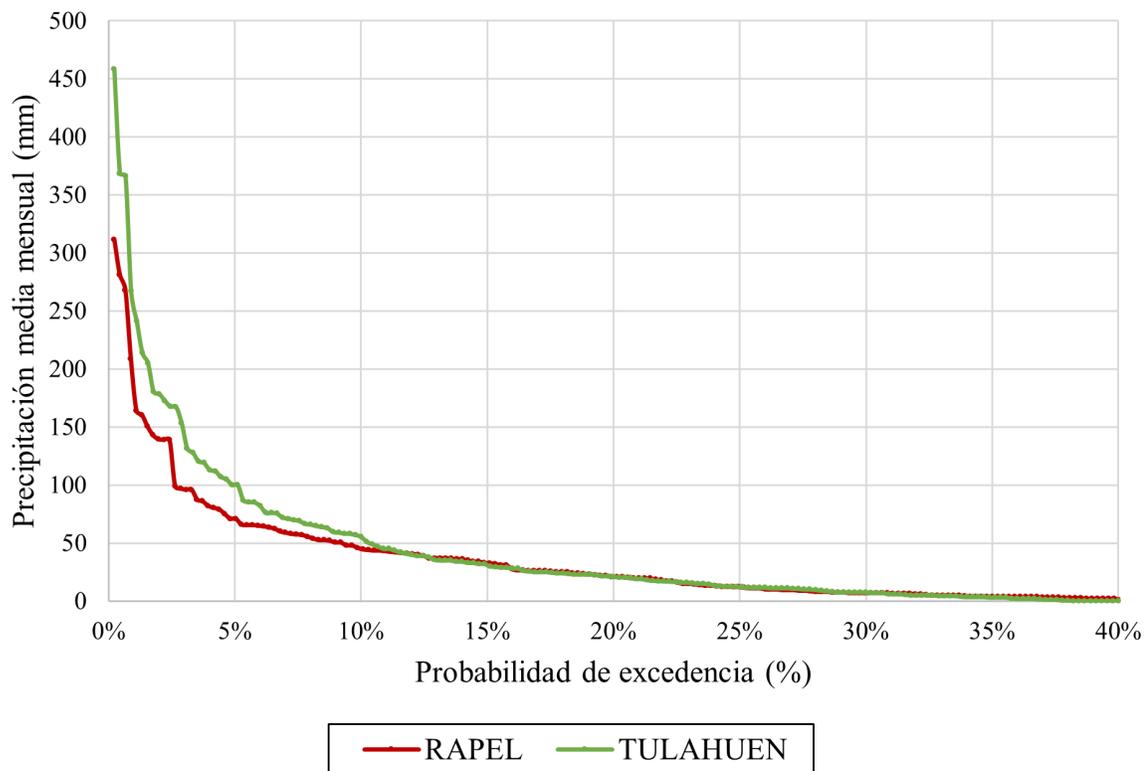


Figura 3.14: Curvas de duración para las Estaciones Rapel y Tulahuen de la Subcuenca del Río Grande. Fuente: Pino, 2022[66]

- Subcuenca del Río Guatulame

La Figura 3.15 y 3.16 proporciona detalles sobre las precipitaciones medias mensuales en la Subcuenca del Río Guatulame. En ella se observa una tendencia de disminución en las precipitaciones registradas en los meses de julio y agosto, al igual que en las otras estaciones analizadas. Sin embargo, no se aprecia un cambio significativo en la estacionalidad de las lluvias durante los meses de invierno. Por otro lado, en la temporada estival, el comportamiento de las precipitaciones se mantiene sin variaciones importantes, con curvas similares en todas las estaciones, a pesar de las diferencias en los periodos de tiempo estudiados.

En cuanto a las curvas de duración, se observa un comportamiento casi idéntico en las estaciones monitoreadas. La máxima precipitación registrada se sitúa alrededor de los 350mm por mes para probabilidades de excedencia prácticamente nulas, como se muestra en la Figura 3.17.

COMBARBALA (M8)

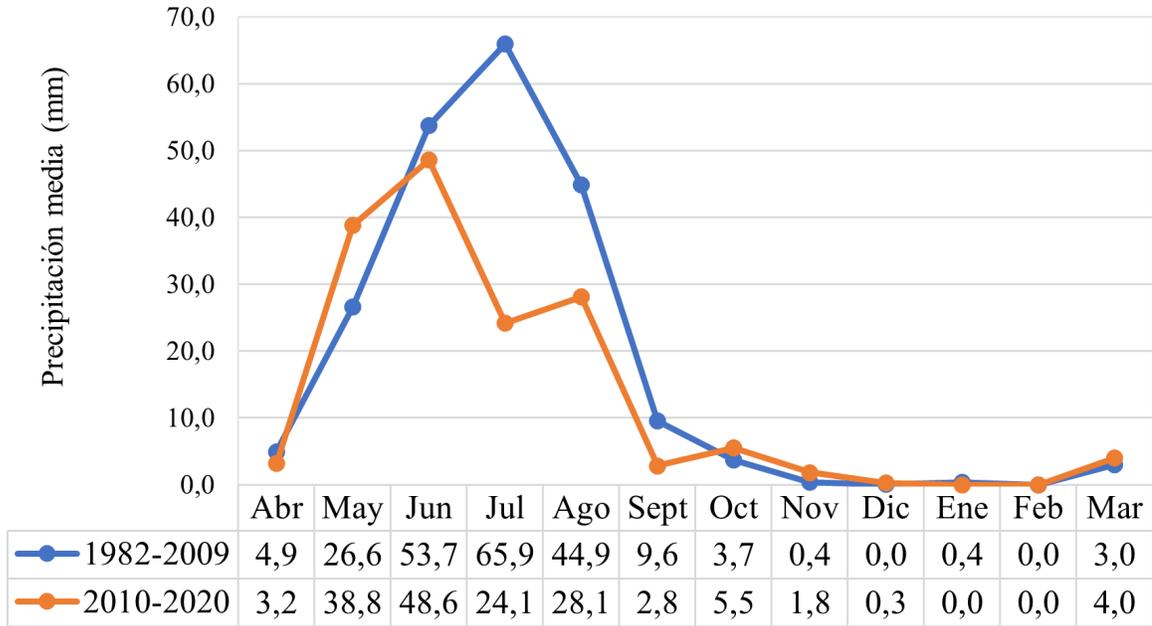


Figura 3.15: Curva estacional de la Estación Combarbalá en la Subcuenca del Río Guatulame. Fuente: Pino, 2022[66]

EL TOME (M10)

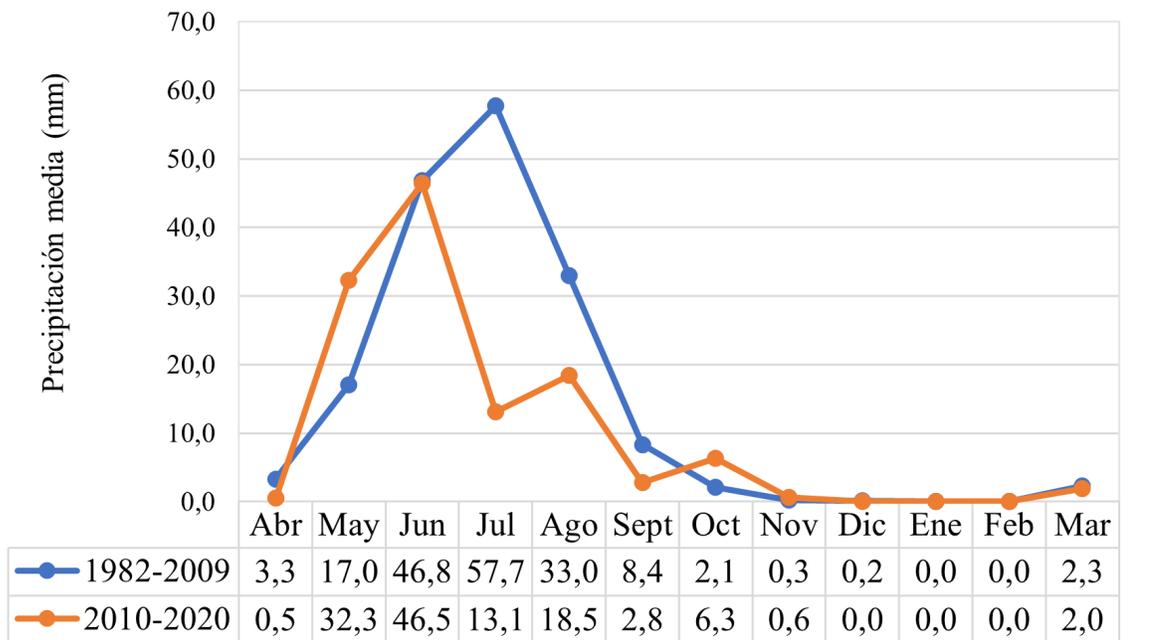


Figura 3.16: Curva estacional de la Estación El Tome en la Subcuenca del Río Guatulame. Fuente: Pino, 2022[66]

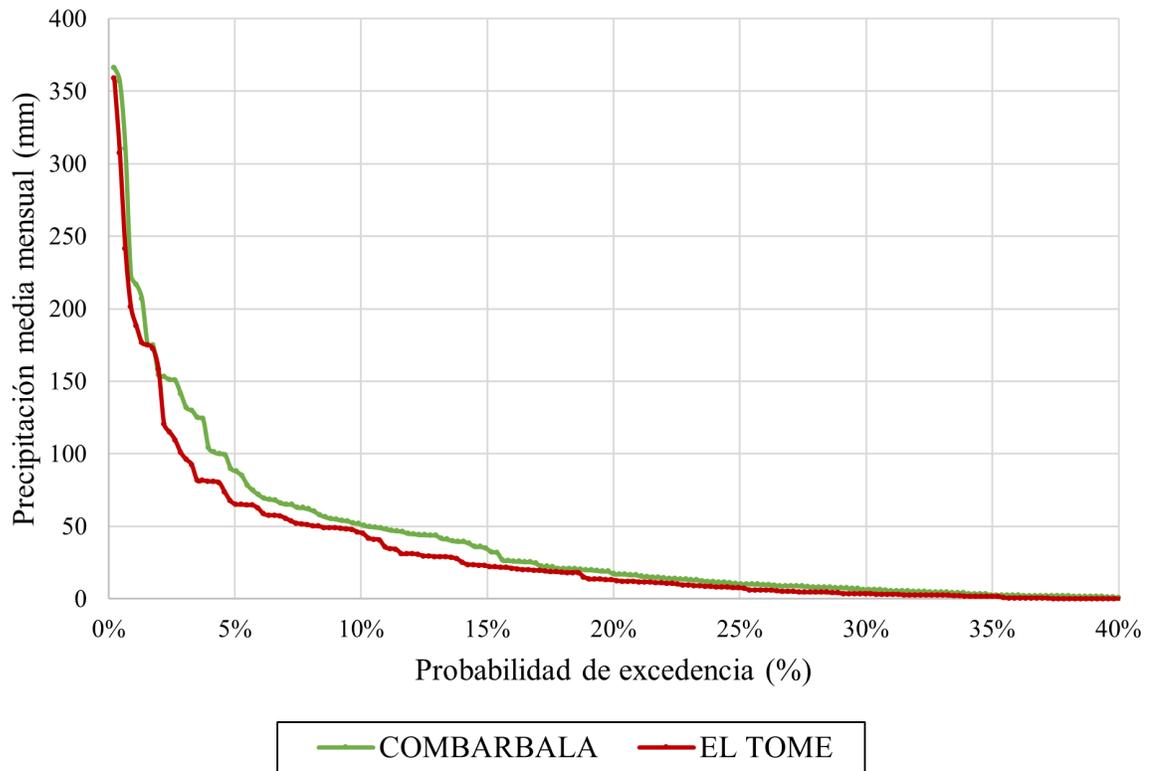


Figura 3.17: Curvas de duración para las Estaciones Combarbalá y El Tome de la Subcuenca del Río Guatulame. Fuente: Pino, 2022[66]

Finalmente, se realizan una serie histórica de precipitaciones medias mensuales para la estación Combarbalá, con el objetivo de mostrar la variación de las precipitaciones a lo largo del periodo estudiado, como se muestra en la Figura 3.18. Allí se puede observar una ligera tendencia a la disminución de los eventos de precipitación máxima en los últimos años, especialmente durante el periodo comprendido entre el año 2000 y fines del año 2011, cuando comenzó a difundirse ampliamente el término de sequía. Además, se destaca que en los últimos 5 años, solo hacia fines del año 2017 se registró una media mensual de precipitación superior a los 100(*mm*).

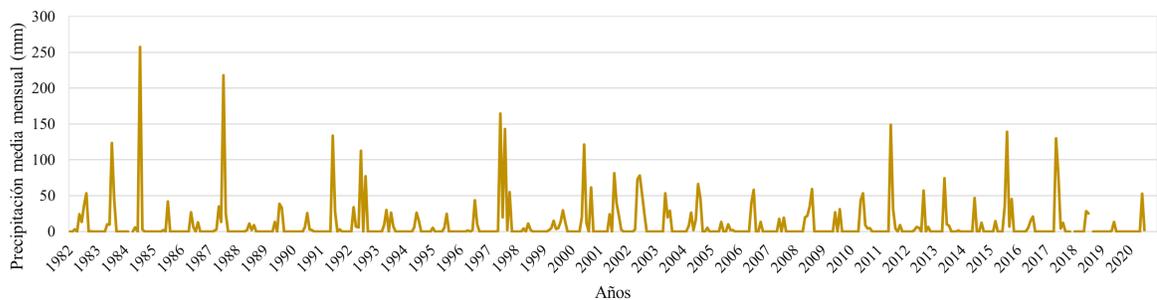


Figura 3.18: Precipitación media mensual histórica en estación meteorológica Combarbalá de subcuenca Guatulame. Fuente: Pino, 2022[66]

En la Figura 3.19 muestra la serie histórica de precipitación anual de las estaciones selec-

cionadas. En esta figura se puede apreciar una línea de tendencia negativa que indica una disminución de las precipitaciones en la subcuenca a lo largo del tiempo.

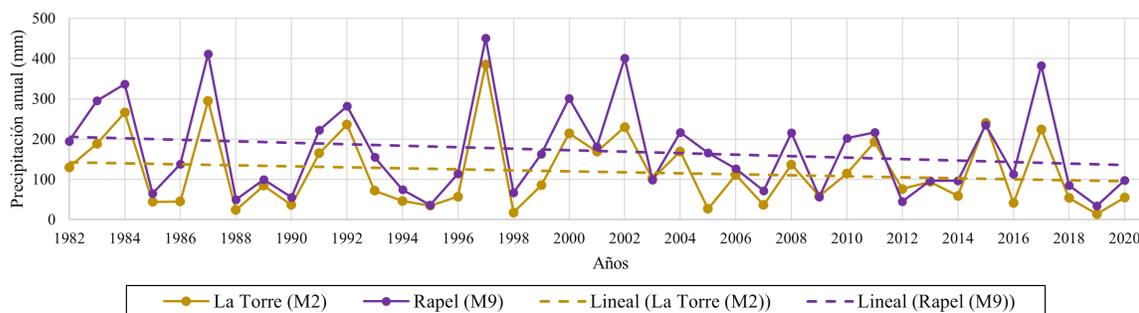


Figura 3.19: Serie de precipitaciones anuales históricas en estaciones meteorológicas de monitoreo en subcuencas de la Comuna de Combarbalá. Fuente: Pino, 2022[66]

3.5.1.2. Análisis de escorrentía superficial

Es importante destacar que los eventos relacionados con las condiciones climáticas y meteorológicas son inherentemente aleatorios. Por lo tanto, el estudio de la escorrentía superficial, que se genera a partir de la precipitación directa sobre los cauces y afluentes, está vinculado a muestras y poblaciones con distribuciones de probabilidad. En este ítem se describe el proceso de construcción de curvas de variación estacional, las cuales son representaciones de las distribuciones de probabilidad del caudal medio mensual para cada mes. Estas curvas permiten identificar los regímenes hidrológicos y comprender las variaciones en el flujo de agua a lo largo del año.

Para lo mencionado con anterioridad, se utiliza la Distribución de Weibull la que corresponde a una distribución que nos permite calcular las probabilidades de excedencia en las muestras examinadas y describir diferentes años dentro del intervalo de tiempo analizado (1982-2021). A continuación, se proporciona información detallada sobre cada uno de los años considerados en el estudio.

- Años secos: Asociados a temporadas con caudales que no superan los $5m^3/s$, producto de periodos de sequías prolongadas. Este tipo de características se asocia con $Pe_x = 85\%$.
- Años promedio: Asociados a un comportamiento normal de la zona de estudio, producto de una situación promedio normal registrada. Este tipo de características se asocia con $Pe_x = 50\%$.
- Años húmedos: Asociados a temporadas con caudales superiores a los vistos en condiciones normales, los que están influenciados por eventos de precipitación excepcionales, lluvias invernales prolongadas, alta tasa de derretimiento nival y/o deshielos (DGA, 2004). Este tipo de características se asocia con $Pe_x = [5\%, 10\%]$.

A continuación se procede a determinar mediante el análisis de curvas de variación estacional los regímenes hidrológicos imperantes en las subcuencas Río Grande y Río Guatulame.

- Subcuenca Río Grande

Debido a la gran extensión de la subcuenca del Río Grande, se consideran tres estaciones para el análisis de curvas estacionales que son las estaciones Río Grande en Puntilla San Juan, Río Rapel en Junta y Río Grande en Cuyano. A continuación, utilizando los datos recopilados se obtiene los siguientes valores de caudales medios mensuales para cada una de las estaciones mencionadas.

Tabla 3.11: Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Grande en Puntilla San Juan (F8). Fuente: Pino, 2022 [66].

Mes	Pex			
	5 %	10 %	50 %	85 %
Abril	13,71	12,01	2,09	0,60
Mayo	17,20	13,62	3,63	1,44
Junio	32,00	13,97	6,01	2,74
Julio	39,80	21,20	6,56	2,65
Agosto	56,99	35,02	7,53	2,32
Septiembre	46,23	35,58	6,01	2,34
Octubre	55,22	52,85	6,99	0,95
Noviembre	96,86	70,53	5,62	0,56
Diciembre	114,29	61,14	1,88	0,24
Enero	48,75	25,05	0,54	0,08
Febrero	24,07	11,99	0,43	0,08
Marzo	15,70	8,86	0,80	0,21

Tabla 3.12: Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Rapel en Junta (F9) Fuente: Pino, 2022 [66].

Mes	Pex			
	5 %	10 %	50 %	85 %
Abril	4,80	3,46	0,22	0,03
Mayo	3,93	3,58	0,83	0,07
Junio	4,68	3,71	1,32	0,24
Julio	5,55	3,80	1,56	0,26
Agosto	6,64	3,14	1,19	0,20
Septiembre	5,70	3,43	1,00	0,13
Octubre	9,76	8,53	0,48	0,05
Noviembre	17,17	14,72	0,21	0,01
Diciembre	22,92	16,72	0,26	0,02
Enero	15,82	6,68	0,095	0,01
Febrero	6,25	3,6	0,095	0,01
Marzo	4,81	2,89	0,11	0,01

Tabla 3.13: Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Grande en Cuyano (F15) Fuente: Pino, 2022 [66].

Mes	Pex			
	5 %	10 %	50 %	85 %
Abril	8,72	6,30	2,40	1,14
Mayo	10,09	7,51	3,07	1,71
Junio	16,09	8,29	3,84	2,24
Julio	20,56	13,45	4,05	1,87
Agosto	24,26	13,49	4,71	1,94
Septiembre	23,74	20,06	5,24	1,63
Octubre	35,03	33,81	8,4	1,83
Noviembre	66,09	45,88	7,17	1,49
Diciembre	72,78	41,37	3,82	0,98
Enero	36,75	15,62	2,77	1,13
Febrero	14,72	9,47	2,41	0,9
Marzo	8,88	7,63	2,22	1,23

Utilizando los datos de las tres estaciones, mostradas con anterioridad, se procede a elaborar 3 gráficas para cada una de ellas (Figuras 3.20, 3.21 y 3.22).

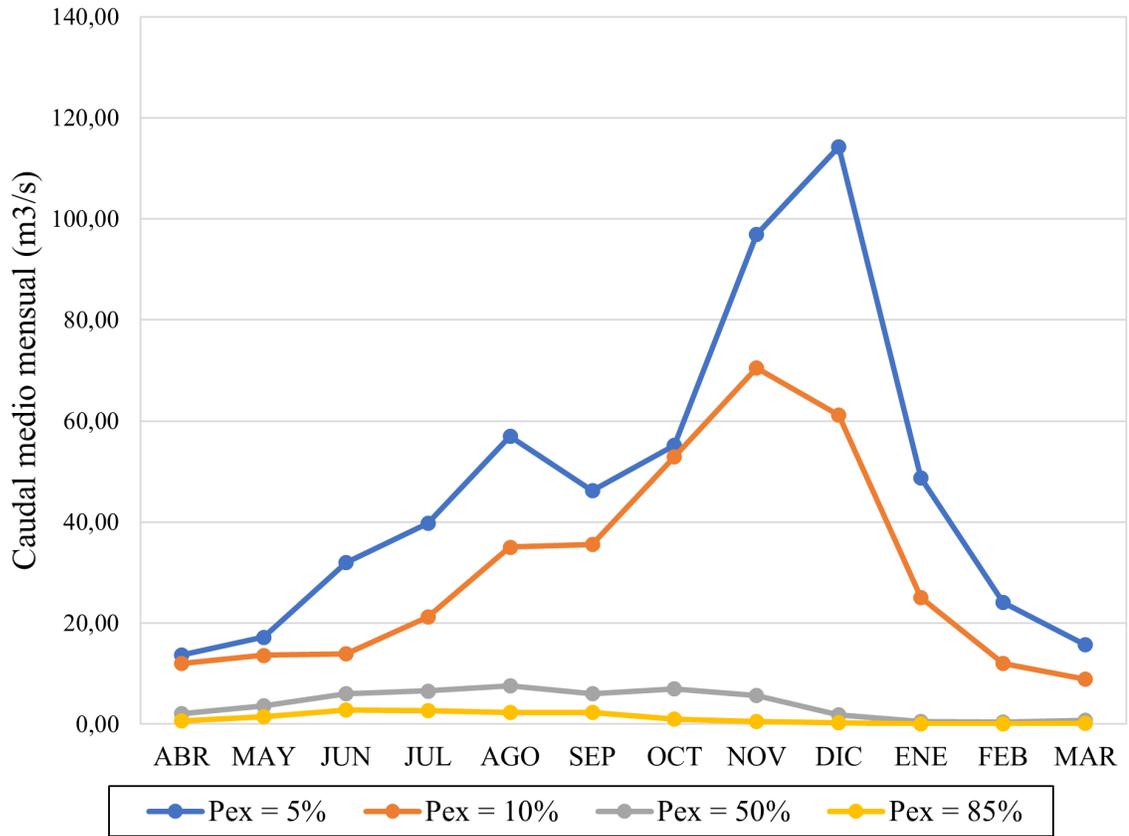


Figura 3.20: Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Grande para la estación Río Grande en Puntilla San Juan. Fuente: Pino, 2022 [66].

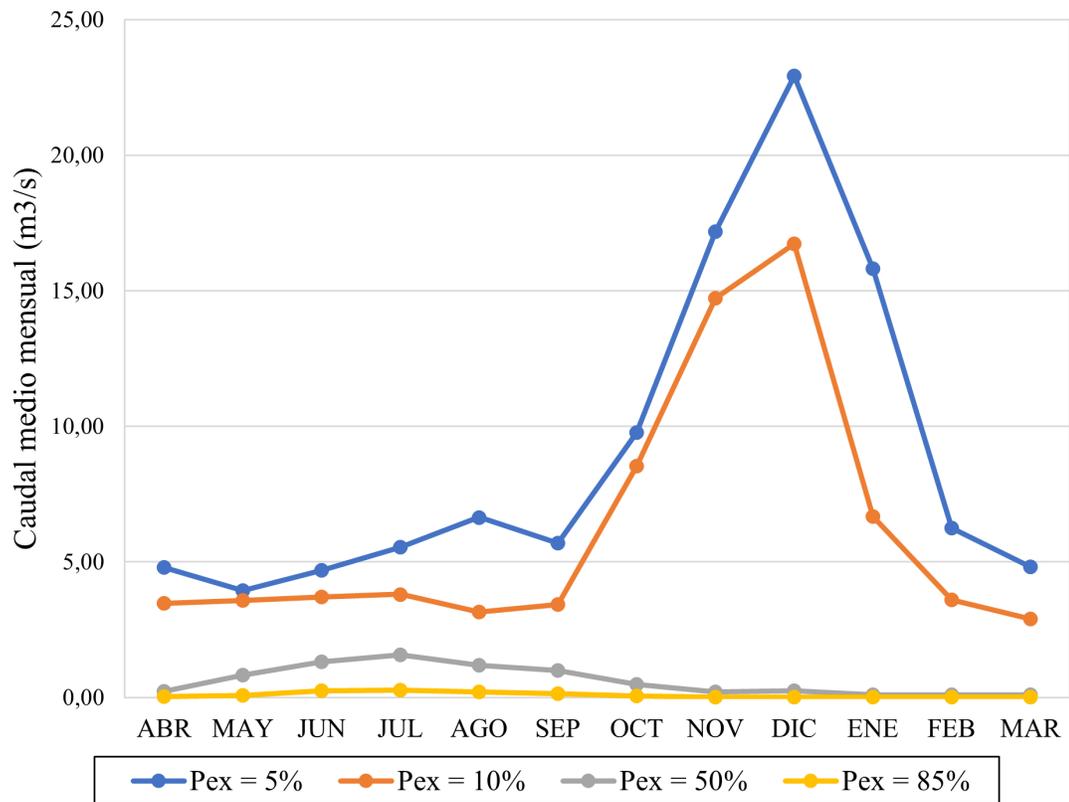


Figura 3.21: Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Grande para la estación Río Rapel en Junta. Fuente: Pino, 2022 [66].

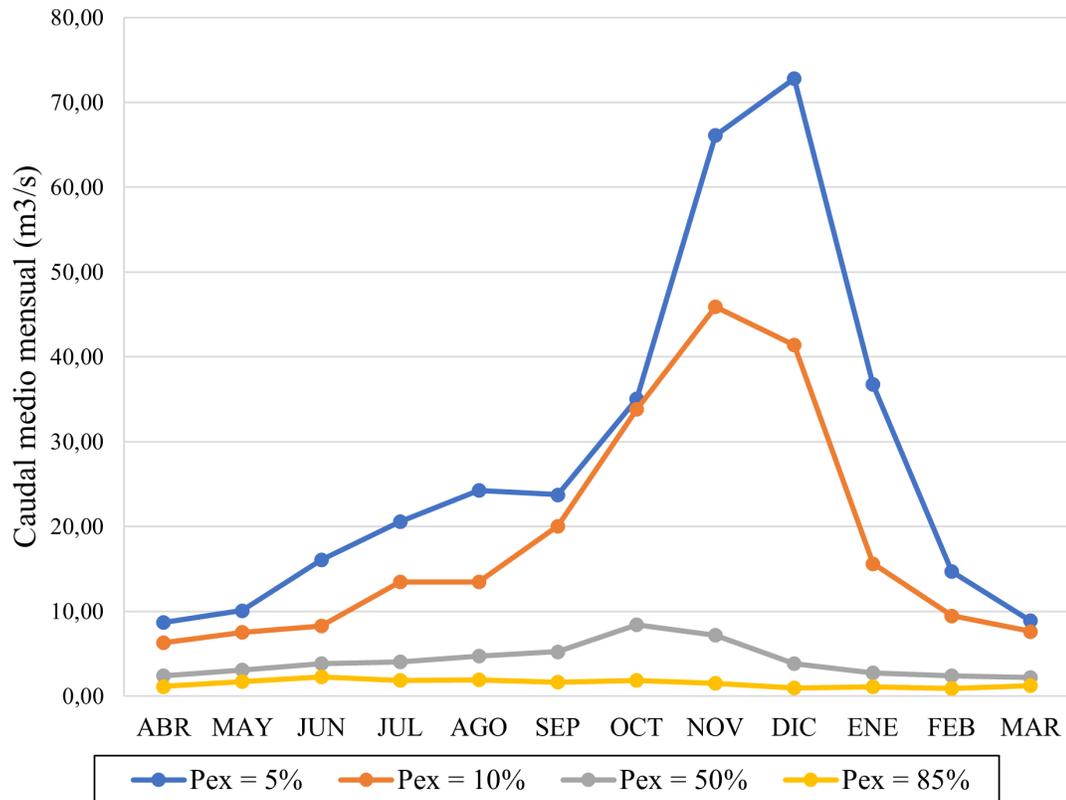


Figura 3.22: Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Grande para la estación Río Grande en Cuyano. Fuente: Pino, 2022 [66].

De las gráficas anteriores se observa que en años húmedos, las precipitaciones medias mensuales máximas tienden a ocurrir en diciembre, cuando la nieve almacenada en las unidades glaciológicas se derrite. Por otro lado, se observa que los valores de precipitación varían considerablemente entre estaciones. Además, durante condiciones húmedas, en la estación F8 se destaca la influencia pluvial en agosto debido a las lluvias invernales, mientras que esta influencia no es tan significativa en las estaciones F9 y F15. Por otro lado, en años secos, el escurrimiento superficial se ve afectado y no se observan contribuciones significativas de lluvias o nieve. En años normales, se observa un aumento en el caudal en comparación con los años secos. En las estaciones F8 y F15, este aumento ocurre en octubre, posiblemente debido a deshielos anticipados, mientras que en la estación F9, el aumento de caudal se presenta en julio debido a las lluvias invernales. Dicho lo anterior, se puede destacar que en la subcuenca Río Grande predomina el régimen hidrológico nivo-pluvial.

- Subcuenca Río Guatulame

Para esta subcuenca, se consideran dos estaciones para el análisis de curvas estacionales que son las estaciones Río Cogotí Embalse Cogotí y Río Guatulame en El Tomé. A continuación, utilizando los datos recopilados se obtiene los siguientes valores de caudales medios mensuales para cada una de las estaciones mencionadas.

Tabla 3.14: Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Cogotí Embalse Cogotí (F15).

Mes	Pex			
	5 %	10 %	50 %	85 %
Abril	2,08	1,62	0,09	0,00
Mayo	5,25	3,56	0,2	0,01
Junio	7,95	6,48	1,13	0,09
Julio	8,55	5,82	0,91	0,017
Agosto	17,95	10,07	1,32	0,11
Septiembre	13,76	8,31	1,57	0,13
Octubre	19,04	9,7	2,23	0,13
Noviembre	35,33	12,58	1,45	0,07
Diciembre	30,23	11,11	0,29	0,03
Enero	14,75	5,12	0,1	0,01
Febrero	3,89	1,15	0,05	0,00
Marzo	1,77	0,83	0,06	0,00

Tabla 3.15: Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Guatulame en El Tomé (F12).

Mes	Pex			
	5 %	10 %	50 %	85 %
Abril	1,00	0,47	0,09	0,01
Mayo	17,31	1,43	0,13	0,01
Junio	25,82	15,18	0,47	0,02
Julio	42,10	8,50	0,54	0,05
Agosto	46,84	12,59	0,30	0,03
Septiembre	22,45	11,87	0,10	0,01
Octubre	21,7	10,79	0,05	0,01
Noviembre	28,85	15,46	0,04	0,00
Diciembre	33,76	10,91	0,05	0,00
Enero	13,98	1,36	0,04	0,00
Febrero	2,30	0,44	0,04	0,00
Marzo	1,02	0,59	0,04	0,00

Utilizando los datos de las dos estaciones, mostradas con anterioridad, se procede a elaborar 2 gráficas para cada una de ellas.

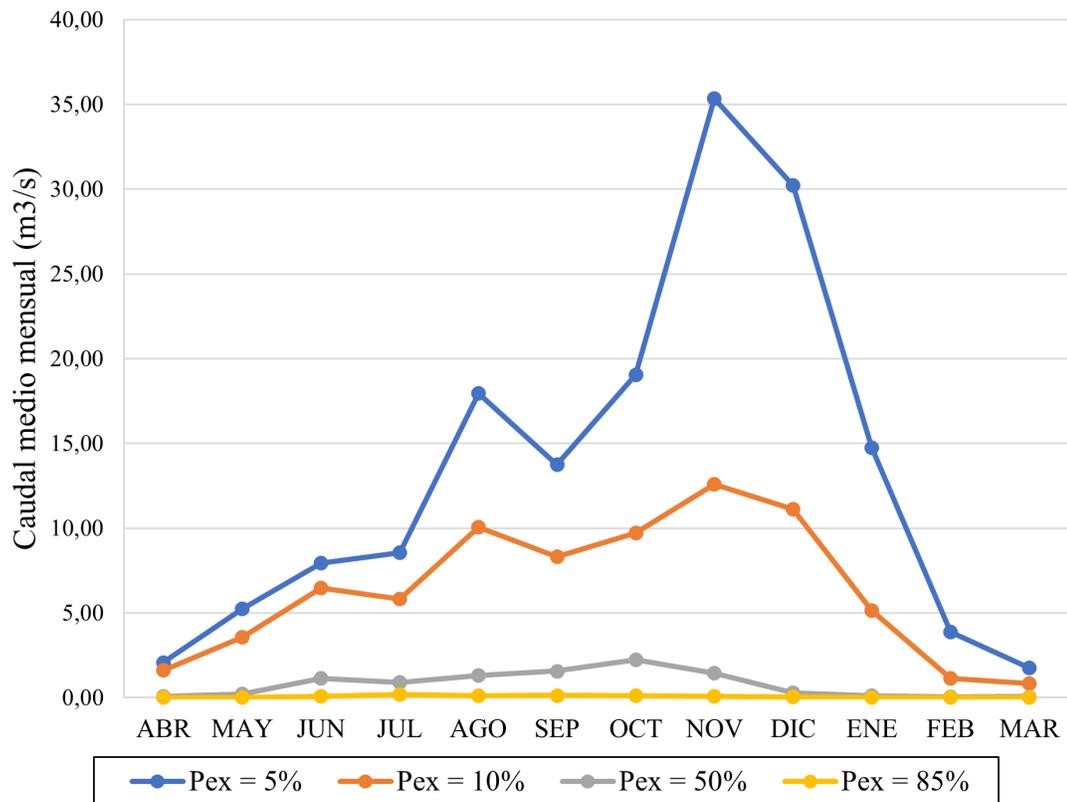


Figura 3.23: Curvas de Variación Estaciones Fluviométricas de la Subcuenca del Río Guatulame para la estación Río Cogotí. Fuente: Pino, 2022

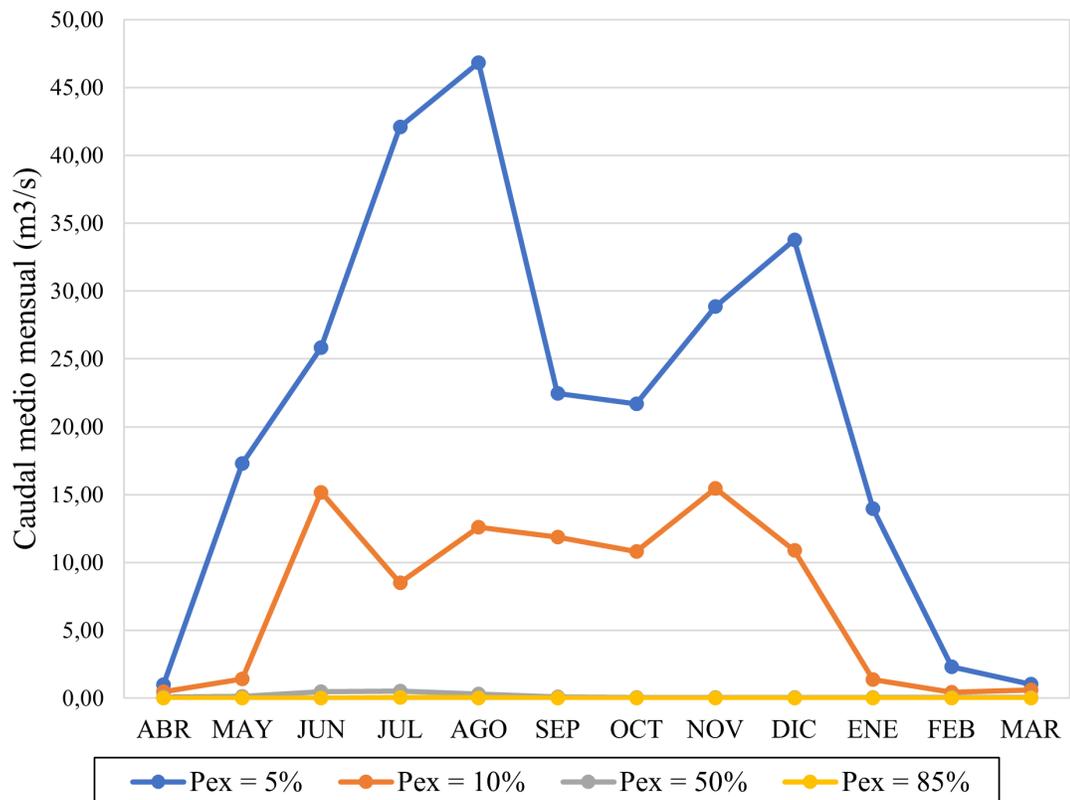


Figura 3.24: Curvas de Variación Estaciones Fluviométricas de la Subcuenca del Río Guatulame para la estación Río Guatulame en El Tomé. Fuente: Pino, 2022

La Figura 3.23 se revela que el régimen hidrológico predominante es nivo-pluvial, con años húmedos en los cuales los valores máximos se encuentran entre octubre y enero debido al deshielo, y se observan aumentos de precipitaciones significativos en agosto. Ahora bien, si se observa la Figura 3.24, se muestra una variación en los meses de máximo caudal durante años húmedos. Se identifican dos tendencias distintas: en julio y agosto, los caudales alcanzan su punto máximo debido a eventos intensos de precipitación, mientras que en noviembre y diciembre los caudales superan el promedio debido al derretimiento de la nieve. Por lo tanto, se puede clasificar el régimen de esta estación como una combinación de regímenes pluviales y nivales.

A modo de resumen del análisis hidrológico en las subcuencas de Combarbalá, se presenta a continuación una tabla con las principales conclusiones.

Tabla 3.16: Resumen de Componente Hidrológico en las Subcuencas Río Grande y Río Guatulame. Fuente: Elaboración propia.

	Subcuencas	
	Río Grande	Río Guatulame
Variación estacional de precipitaciones	Si	No
Efecto de Megasequía	Si	Si
Regímenes Hidrológicos	Nivo-pluvial y nival	Superposición pluvial y nival

3.5.2. Análisis de niveles de agua subterránea en pozos de observación DGA

Con el fin de comprender la situación local de los acuíferos en la Comuna de Combarbalá, se realiza un análisis de los pozos de observación de la DGA. Se recopila información de 3 puntos de monitoreo en la comuna, abarcando un periodo de tiempo desde el 1 de enero de 1992 hasta el 31 de diciembre de 2021, lo que equivale a 30 años. Esta ventana temporal es considerada adecuada para analizar las tendencias en las variaciones de los niveles estáticos de los pozos y comprender los descensos en las aguas subterráneas.

El análisis se enfoca en identificar los factores que contribuyen a la disminución de los niveles estáticos de agua subterránea, como la sobreexplotación o sobreotorgamiento de derechos, así como los fenómenos de escasez y estrés hídrico en la macrozona norte de Chile.

Este análisis permitirá obtener una visión más clara de la evolución de los niveles estáticos de agua subterránea en la comuna y comprender mejor la situación de los recursos hídricos en la zona de estudio. Así, en la siguiente tabla, se detallan los pozos de observación con su respectivo periodo de tiempo disponible en línea, la cantidad de datos recopilados en dicho intervalo de tiempo, su estado y su ubicación en coordenadas UTM.

Tabla 3.17: ID de pozo de monitoreo DGA con cantidad de muestra en periodo 1992-2021. Elaboración propia a partir del Servicio Hidrométrico de la DGA

Pozo	Nombre	Años de Muestra	Datos	Estado	Coord. Este	Coord. Norte
P23	Fundo Cogoti	1992-2021	199	Descenso	309216	6561652
P24	Llanos de Chingaray	1992-2021	174	Descenso	303926	6544890
P25	Pueblo la Ligua	1992-2021	228	estacionado	305830	6564109

Considerando los datos expuestos, se procede a elaborar gráficas para cada uno de los 3 pozos que muestran el comportamiento de los niveles estáticos de los pozos de la DGA (con marcador de diamante calipso) junto con una recta de tendencia lineal (línea roja) que fue generada a partir de los datos recopilados durante el intervalo de tiempo disponible en cada caso.

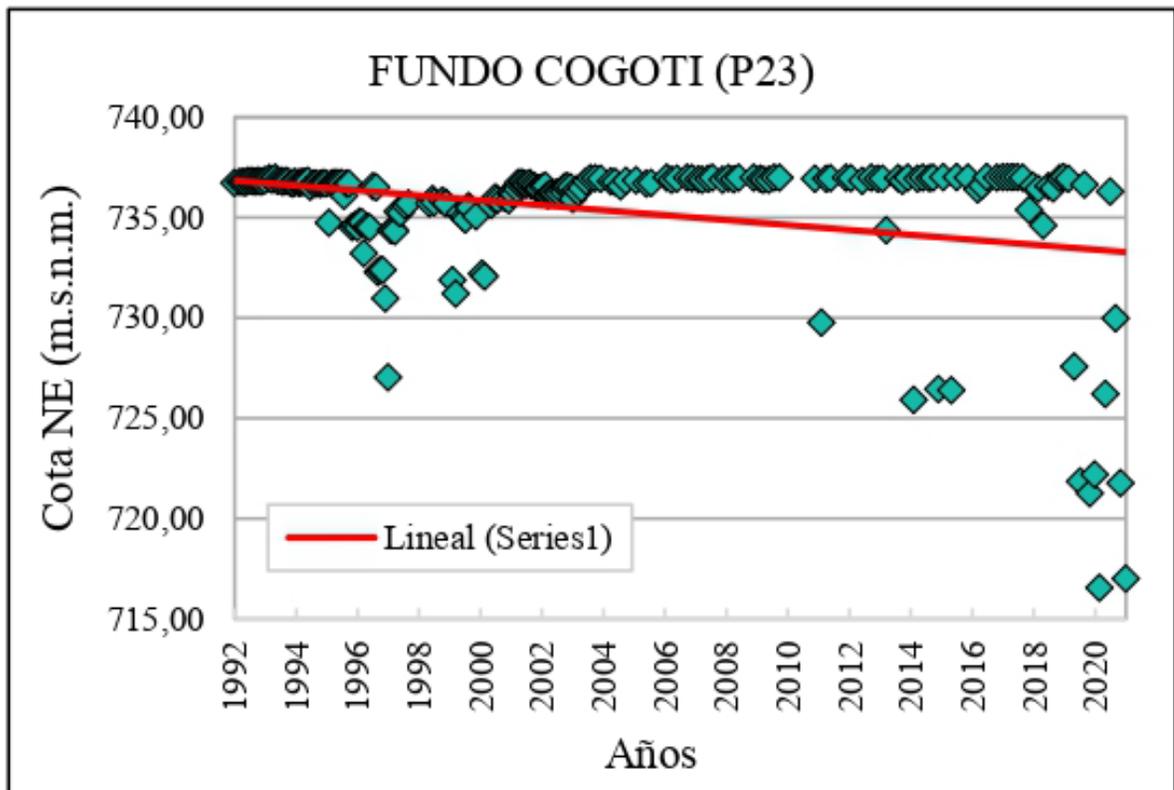


Figura 3.25: Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA para el pozo P23. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. Fuente: Pino, 2022 [66].

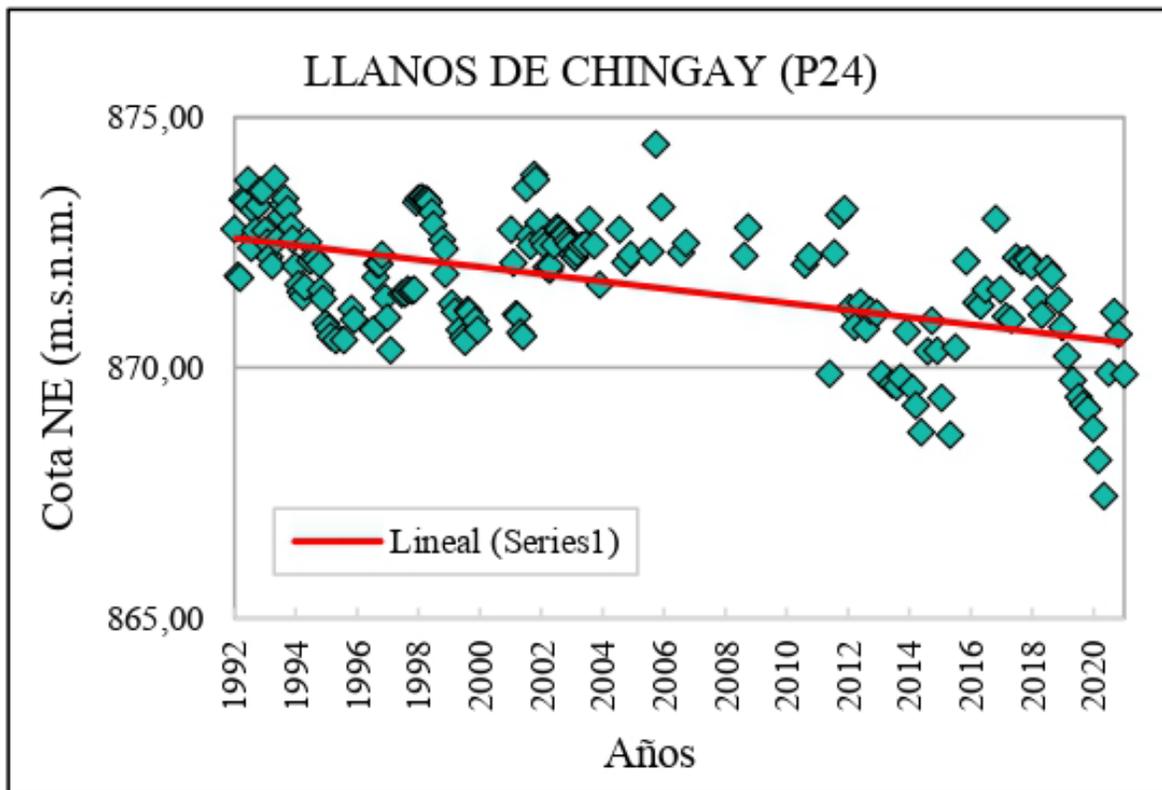


Figura 3.26: Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA para el pozo P24. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. Fuente: Pino, 2022 [66].

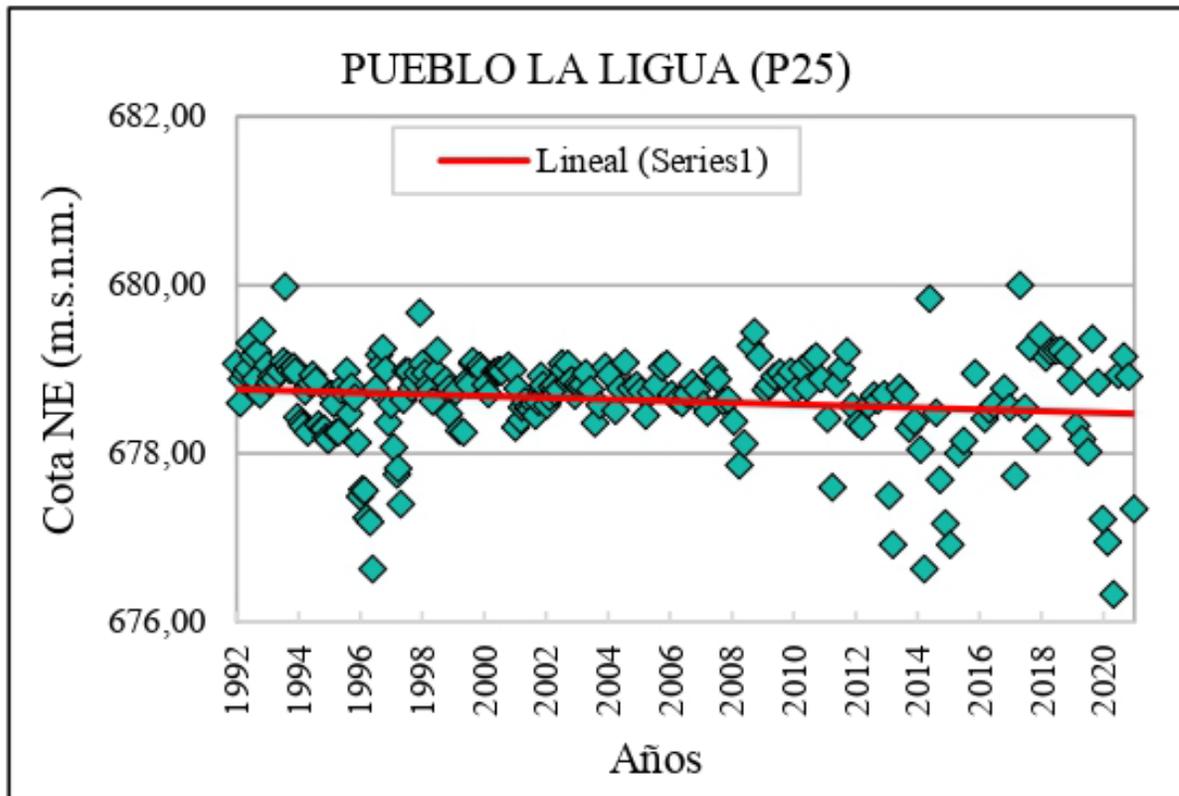


Figura 3.27: Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA para el pozo P25. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. Fuente: Pino, 2022 [66].

De las gráficas anteriores (Figura 3.25, 3.26 y 3.27), se pueden observar que existen diversos comportamientos en los niveles estáticos de observación durante el periodo de tiempo analizado. Dentro de estos comportamientos, se pueden definir las siguientes categorías:

- Ascenso: Comportamiento del nivel estático del pozo que presenta una tendencia lineal histórica de ascenso progresivo.
- Descenso: Comportamiento del nivel estático del pozo que presenta una tendencia lineal histórica de descenso progresivo, el cual se puede traducir en una alteración negativa del acuífero.
- Estacionario: Comportamiento en el cual el nivel estático del pozo se mantiene constante o sin variaciones en el periodo histórico estudiado.

Cabe destacar que de los 3 pozos de estudio hay dos que corresponden a la categoría de descenso y uno es estacionario. En la siguiente tabla, se muestra cada pozo con su descenso aproximado, desde primer registro de 1992 hasta últimas mediciones del año 2021.

gestión y conservación de los recursos hídricos subterráneos.

Es esencial establecer y mantener una red de monitoreo confiable y actualizada que proporcione datos precisos y oportunos sobre los recursos hídricos subterráneos. Esto permitirá tomar decisiones informadas y adoptar medidas adecuadas para garantizar la sostenibilidad y el uso responsable de estos recursos valiosos.

3.6. Estudio de disponibilidad de Recurso Subterráneo

3.6.1. Antecedentes

Con el objetivo de tener una visión general y entender la situación hídrica en la que se encuentra el área de estudio y su disponibilidad de agua subterránea, es que se utilizan tres estudios realizados por la DGA donde se evidencian las variaciones en el volumen del acuífero y el estado del balance hídrico en las subcuencas.

A continuación se enlistan los informes con sus respectivos objetivos los cuales fueron utilizados como antecedentes en esta sección. Estos informes son fundamentales para comprender la dinámica de almacenamiento y disponibilidad de agua en Combarbalá.

- Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Río Limarí (ERH): este informe tiene el objetivo de estudiar a escala regional el acuífero del Río Limarí, para determinar los volúmenes totales anuales posibles de otorgar como derechos de agua subterránea [16].
- Diagnostico del Estado Hidrogeológico de la Cuenca del Río Limarí (DEHg): este informe tiene el objetivo de diagnosticar el estado del agua subterránea a través de la modelación hidrogeológica, con el fin de apoyar la toma de decisiones que fortalezcan el desarrollo hídrico [26].
- Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Río Limarí (PGH): este informe tiene el objetivo de proponer plan estratégico con la finalidad de conocer oferta y demanda actual de agua, establecer balance hídrico a los años 2030 y 2050, diagnosticar estado de información y proponer carta de acciones de la DGA, que aseguren abastecimiento en cantidad y calidad adaptándose al cambio climático [24].

Cada uno de los informes mencionados en la lista anterior utilizan como área de estudio la Cuenca del Río Limarí, y por ende, entregan información valiosa para evaluar la situación de la provincia y cada una de las comunas que la componen. En relación a los resultados de los informes ERH y PGH, estos se encuentran orientados en la determinación de cantidades de agua presente en unidades SHAC, por lo que permiten hacer un análisis administrativo y específico del agua subterránea, a través de valores de recarga (superficial, desde ríos, desde el mar, flujo hacia el almacenamiento) los cuales se contrastan con la demanda del recurso en términos de DAA, para así poder determinar una disponibilidad potencial por SHAC.

Además, los estudios DEHg y PGH dan a conocer resultados con respecto a variaciones del balance hídrico en el transcurso de los años, dando paso al análisis del impacto que ha tenido la variable del cambio climático sobre el almacenamiento hídrico en la cuenca.

3.6.2. Recarga y demanda subterránea

3.6.2.1. Recarga

La recarga subterránea de los acuíferos es una componente esencial a considerar cuando se piensa en realizar un proyecto de recarga artificial de acuíferos pues con esa información se puede saber la disponibilidad del recurso en términos cuantitativos, estabilización del flujo de agua, sostenibilidad hídrica, entre otros aspectos.

En la Tabla 3.19 y con la ayuda de la información proporcionada por los estudios ERH y PGH se presentan resultados estimados de los valores de recarga subterránea en $m^3/año$ de los seis SHAC de la comuna de Combarbalá.

Tabla 3.19: Recarga subterránea en $m^3/año$ de las subcuencas de estudio, de acuerdo a resultados de informes de la DGA. Elaborado a partir de DGA (2008)[16] y DGA (2020)[28].

Informe Año o Período	ERH 2008	PGH 1992-2019	PGH 2023-2050
Cogotí (Cog)	2.825.626	2.131.834	2.138.141
Combarbalá (Com)	1.296.130	1.892.160	1.942.618
Guatulame (G)	7.505.568	9.514.411	7.921.843
Punitaqui (P)	23.421.787	22.147.733	25.985.664
Quebrada Grande (QG)	747.403	2.680.560	2.551.262
Río Pama (Rpa)	1.419.120	2.942.309	1.154.218

De acuerdo a la información recopilada, se puede inferir que existen sectores en los que la recarga subterránea tiene una mayor relevancia para el acuífero beneficiado, en Combarbalá específicamente los SHAC con mayor recarga son Guatulame y Punitaqui, lo que se visualiza claramente en la Figura 3.29. Justamente en estos SHAC es en donde se concentra la mayor cantidad de DAA concedidos a particulares, lo que habla de la importancia que tienen éstas zonas para satisfacer la demanda de las comunidades de la comuna.

Sin embargo, debido a la constante extracción de agua subterránea, existe la posibilidad de que estas zonas estén en riesgo de sobreexplotación. Por tanto, es imperativo determinar adecuadamente los volúmenes sostenibles de agua asociados a factores como la precipitación, embalsamientos y escurrimientos superficiales y subterráneos. También es crucial comparar los DAA según el uso previsto, dado que existen derechos para usos industriales, agua potable, minería y riego, cada uno con distintas demandas del recurso hídrico. Esto proporcionaría un mejor entendimiento de la oferta y demanda de agua almacenada en los acuíferos.

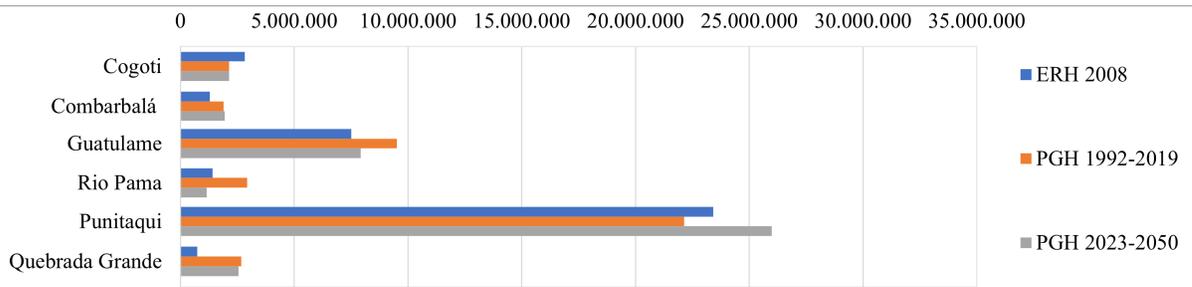


Figura 3.29: Representación gráfica de valores de recarga subterránea de SHAC en la comuna de Combarbalá. Elaborado a partir de DGA (2008)[16] y DGA (2020)[28].

3.6.2.2. Balance hídrico

Otro aspecto importante en la evaluación de recursos es el balance hídrico subterráneo en la cuenca. Para ello, se recopilan los resultados del informe PGH donde se evidencia el balance para un periodo de tiempo del 1992 al 2019, tal como se detalla en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20: Balance Hídrico por SHAC en Periodo 1992-2019, modelo integrado. Fuente: Elaboración propia.

Entradas (l/s) / SHAC	PGH 1992-2019					
	Cog	Com	Rpa	G	QG	P
Flujo interacuífero	1,4	5,6	3,4	1,1	1,1	4,7
Entradas extras	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	0,0
Recarga desde río	39,6	27,3	47,9	85,4	45,3	295,3
Recarga superficial	28,1	32,7	45,3	209,0	39,8	407,1
Total Entrada	69,0	65,6	96,7	302,8	86,1	707,0
Salidas (l/s) / SHAC	Cog	Com	Rpa	G	QG	P
Flujo interacuífero	2,5	4,8	3,0	2,4	0,8	12,2
Afloramiento río	57,8	83,7	101,3	129,5	48,8	553,7
Pozos de bombeo	1,6	9,6	13,8	72,1	14,0	234,0
Descarga mar/otros	0,0	22,6	0,0	14,3	0,0	0,0
Total Salida	62,0	120,7	118,1	218,3	63,5	799,9
Variación Almacenamiento	7,1	55,1	21,5	84,5	22,6	92,9

Los datos fueron determinados mediante modelación y de ellos se desprende que para los escenarios evaluados existe un desbalance negativo de agua subterránea. Este fenómeno se puede entender debido a que la recarga de los sectores acuíferos ha ido en descenso, donde el cambio climático y periodos prolongados de sequía han generado las consecuencias mostradas en la gráfica. Otro aspecto importante es el relacionado a las extracciones, las cuales han aumentado, produciendo así la sobreexplotación de acuíferos en la cuenca ante la falta del recurso subterráneo.

Es importante destacar que toda la información de este capítulo nos permite entender y respaldar el difícil escenario hídrico en el que se encuentran los habitantes de la comuna de Combarbalá. Sin embargo, todos los datos entregados corresponden a un promedio de las condiciones reales, por ejemplo, que exista una media-alta permeabilidad de suelo en las subcuencas que se estudiaron no significa que necesariamente cada metro cuadrado de su territorio cumpla esta condición, es por esto que es sumamente necesario realizar un estudio de suelo a nivel local el cual permita optimizar la elección del método de recarga gestionada.

Capítulo 4

SSR beneficiado, estudio local y zona de recarga

4.1. SSR beneficiado

Existen problemáticas en el suministro de agua potable a lo largo de toda la comuna de Combarbalá, sin embargo, no todos los SSR que se ubican ahí se encuentran en las mismas condiciones de escasez y tampoco tienen la misma complejidad de sus problemas.

Aún cuando se tiene noción de cuáles son los SSR que se encuentran en una situación crítica, se necesita respaldar la decisión de elegir un solo SSR para beneficiar. Para ello, se plantean 10 variables relacionadas con factores antrópicos asociados a la vulnerabilidad, y factores físicos asociados a amenazas, lo que en su conjunto permiten definir un ranking de riesgo para los Comités o Cooperativas de SSR según la complejidad en la solución de sus problemáticas estimadas para los años 2020, 2030 y 2040 [25]. A continuación, se procede a enumerar las distintas variables para el análisis de riesgo sobre los SSR.

- Vulnerabilidad
 1. Balance de agua a nivel de SSR en base a proyecciones demográficas para el año 2020, 2030 y 2040
 2. SSR sin Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA)
 3. Pozos sin DAA
 4. Afectación de terceros en los puntos de captación
 5. Cantidad de población al año 2020
 6. Gasto medido en l/s
 7. SSRs que tienen considerados derechos de Empresa Sanitaria de Obras Sanitarias de Coquimbo (ex SENDOS)
 8. Utilización de camiones aljibe para el abastecimiento de agua potable
 9. Interferencia de captaciones subterráneas con cauces superficiales
- Amenazas
 1. Disponibilidad SHAC o Fuente Superficial

Para las variables 1, 2, 3 y 8 de vulnerabilidad y la variable de amenaza se categoriza con 0 y 1, considerando el escenario más negativo con valor 1. Para la variable 7 de vulnerabilidad, que corresponde a los SSR que tienen considerados derechos Sendos dentro de su balance se les asignó 0,5 y a las variables 5 y 6 de vulnerabilidad se calcula los percentiles entre 0,33, 0,66 y 1, señalando rangos con los cuales se pondera de distinta manera dependiendo de la cantidad de gente y del gasto requerido por SSR para satisfacer el balance negativo. Finalmente para la variable 9 de vulnerabilidad, bajo el contexto de una posible tramitación anexa al momento de gestionar solicitudes, se realiza un cruce de los pozos identificados en terreno con la red hídrica en SHP de la DGA, con un buffer de 200 m desde el punto de captación subterránea, identificando entre ríos con un valor de 0,3 y estero/quebradas con un valor de 0,15. De esta manera se obtiene una suma de estos valores distinto por SSR, por lo cual se logra realizar un ranking de riesgo. Al ranking se le calcula percentiles de entre 0,33, 0,66 y 1.

Así, las variables utilizadas permiten generar una categorización de los distintos SSRs, mediante la manipulación de la Ecuación 4.1, donde se obtienen resultados que se representan en un ranking de riesgo leve, moderado y crítico.

$$Riesgo = Vulnerabilidad + Amenazas \quad (4.1)$$

Los principales factores que permiten definir a los SSR según un estado de mayor complejidad son: balances negativos de agua, pozos sin DAA, mayor cantidad de población en su localidad rural, SHAC sin disponibilidad para nuevas obras con DAA, precio de l/s del recurso elevado, abastecimiento por camiones aljibe y utilización de pozos de ex empresa sanitaria [29]. Con ello se obtiene que de los 18 SSR de la comuna, 6 de ellos presentan una categoría de riesgo crítico, otros 8 tienen un riesgo moderado, 4 sistemas tienen un riesgo leve.

En la siguiente tabla se presentan los SSR con su respectiva clasificación de riesgo. El orden de la tabla determina que en los primeros lugares se encuentran los SSR con mayor puntaje es decir esta se ordena desde el más crítico al más leve.

Tabla 4.1: Ranking de Riesgo por SSR. Fuente: Elaboración propia a partir de DGA, 2020 [25].

Nº	ID	APR	Riesgo
1	49	SAN MARCOS	Crítico
2	47	QUILITAPIA	Crítico
3	39	EL SAUCE	Crítico
4	38	EL HUACHO	Crítico
5	46	MEDIA LUNA	Crítico
6	54	SUEÑO CUMPLIDO	Crítico
7	52	EL DURAZNO	Moderado
8	53	LA COLORADA	Moderado
9	50	SORUCO	Moderado
10	40	LA CANTERA	Moderado
11	41	LA CAPILLA	Moderado
12	48	RAMADILLA	Moderado
13	43	LA LIGUA DE COGOTI	Moderado
14	45	MANQUEHUEA	Moderado
15	51	VALLE HERMOSO	Leve
16	37	COGOTI 18	Leve
17	44	LAS BARRANCAS EL CHINEO	Leve
18	42	LA ISLA	Leve

Para poder comprender como se distribuyen los SSRs en la comuna de Combarbalá según la complejidad de sus problemáticas, se muestra la distribución espacial del ranking de riesgo para la totalidad de SSR en la comuna los que fueron ilustrados con tres colores diferentes, el color rojo representa a todos los SSR en estado crítico, el amarillo a los de estado moderado y en verde se muestran los de estado leve.

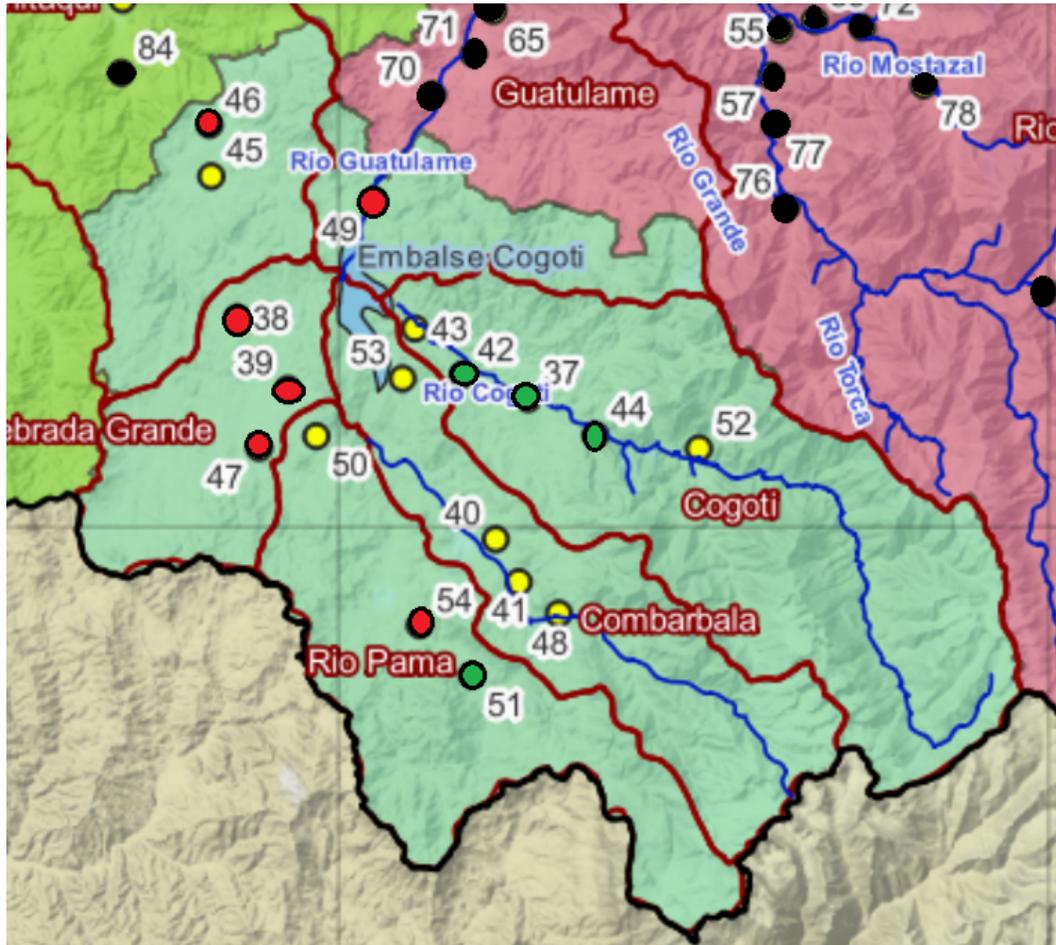


Figura 4.1: Distribución espacial de APRs según Ranking de Riesgo sobre complejidad de soluciones a problemáticas. Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2020)[29].

Al observar la figura anterior, se puede mencionar que existe una tendencia consolidada de una zona (SHAC Quebrada Grande) que poseen una mayor concentración de SSR en estado crítico, estos son:

- El Huacho (ID 38)
- El Sauce (ID 39)
- El Quilitapia (ID 47)

Debido a la necesidad de acotar la zona a beneficiar puesto que para una obra de recarga gestionada de acuífero es necesario contar cierta información local y no a nivel cuenca, sub-cuenca o comunal, y considerando todos los antecedentes expuestos es que se decide trabajar en el SHAC Quebrada Grande eligiendo un solo SSR correspondiente a Quilitapia.

4.2. Estudio local de las zonas aledañas al SSR Quilitapia

Para tener la información a nivel local necesaria para este estudio, se realizó una solicitud vía transparencia en la Mapoteca Digital de la DGA. A partir de eso, se obtuvo un informe técnico de los trabajos realizados durante la construcción de un pozo de producción en Quilitapia en el año 2020. Este informe proporciona datos relevantes que abarcan desde la ubicación precisa del pozo hasta detalles sobre su litología. Además, se incluyen parámetros hidrogeológicos, características físico-químicas y evaluaciones bacteriológicas.

4.2.1. Ubicación

Para llegar a la ubicación exacta del pozo de producción se debe tomar la carretera D-605 que une la localidad de Punitaqui con Combarbalá. En dicha carretera y a unos 20 km antes de llegar a Combarbalá se toma la ruta D667 dirección El Sauce. Pasada dicha localidad y a unos 4 km antes de llegar a Quilitapia, se toma un camino a la izquierda que conduce a la Quebrada Grande. Siguiendo dicha quebrada y junto al pozo actual del APR se encuentra el pozo de interés.

Las coordenadas UTM del pozo son las siguientes:

Tabla 4.2: Coordenadas Pozo de Producción Quilitapia (Combarbalá). Fuente: Hidro-Drilling (2020) [41]

Quilitapia	Coordenadas (UTM-WGS84)			
	Este	Norte	Altitud	Huso
Pozo Producción	293.653	6.559.939	760	19 J

En las siguientes imágenes se puede apreciar la ubicación general del pozo de producción (Figura 4.2) y el detalle de la localización del mismo (Figura 4.3).



Figura 4.2: Ubicación general del Pozo Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]



Figura 4.3: Detalle de la localización del Pozo Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]

Es importante destacar que el punto donde se realizará la recarga será cercano a la ubicación del pozo de producción.

En la siguiente figura se muestra un croquis del Pozo 2 Producción SSR Quilitapia.

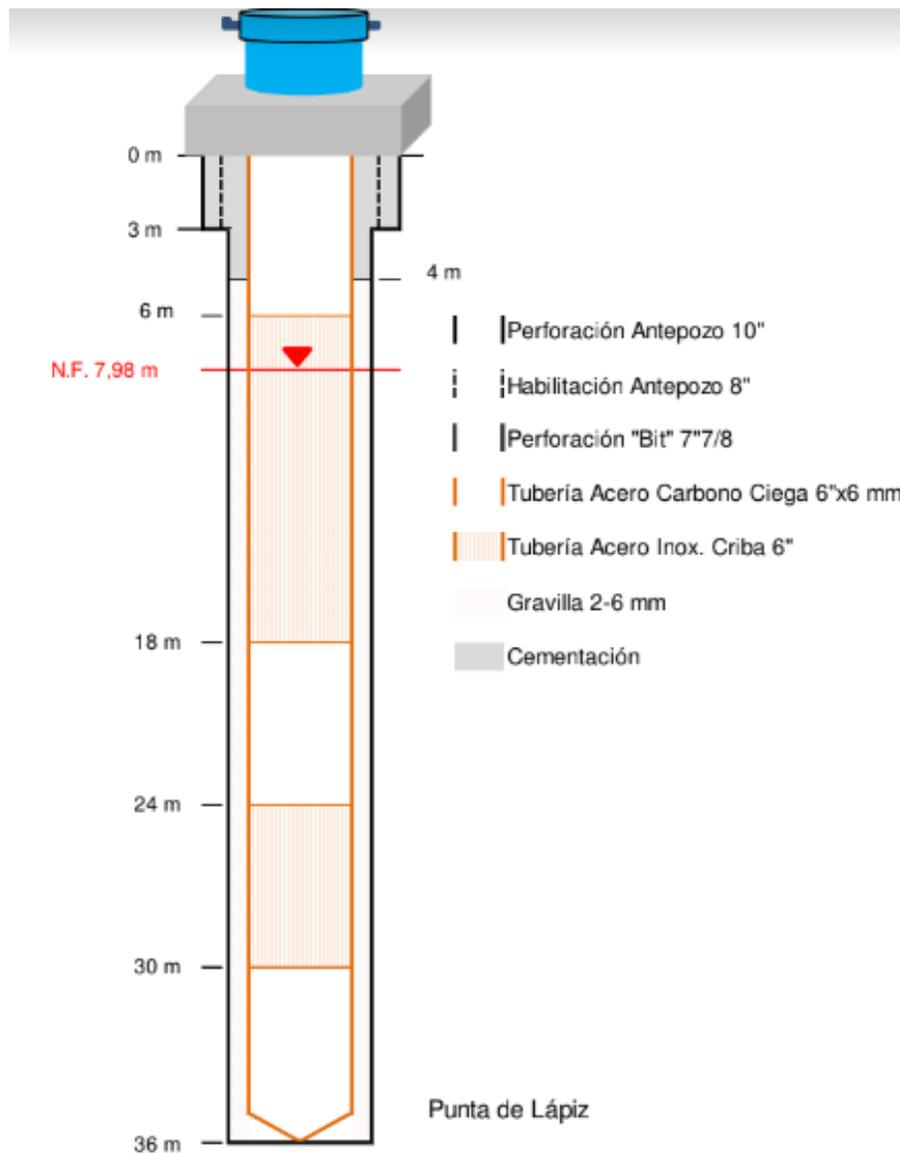


Figura 4.4: Croquis no escala de Pozo 2 Producción Quilitapia (Combarbalá). Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]

4.2.2. Características y propiedades del suelo

4.2.2.1. Columna litológica

Durante el desarrollo de los trabajos de construcción del pozo, específicamente en la perforación, se extrajeron muestras de terreno perforado cada 2 metros. Una vez acabada la perforación y con las muestras de la misma, un geólogo-hidrogeólogo de la empresa Hidro-Drilling procedió a levantar la columna litológica y hacer el diseño de la habilitación del pozo.

Previo a los trabajos de habilitación, Hidro-Drilling facilitó a la Inspección Técnica de la Obra la propuesta de habilitación en base a los antecedentes litológicos. Esta fue aceptada por la Inspección de Obra y se procedió a comenzar los trabajos de habilitación.

La litología perforada corresponde a unos materiales Intrusivos Granitoides a Dioríticos del Cretácico Inferior. En conjunto corresponde a unas monzodioritas de color gris oscuro y en general poco alteradas-fracturadas (Figura 4.5), salvo los primeros metros que se encuentran altamente meteorizadas y es de donde proviene el aporte principal del agua.



Figura 4.5: Detalle de las Monzodioritas junto al Pozo de Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]

Cabe destacar que desde el metro 8 se comenzó a tener presencia de agua, sin que a partir de los 18-20 m fuese en aumento con la profundidad.

En la Tabla 4.3 se describe detalladamente la litología por tramos y en la Figura 4.6 se muestra el detalle de las muestras litológicas extraídas en terreno.

Tabla 4.3: Descripción litológica de las muestras obtenidas. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]

Desde (m)	Hasta (m)	Descripción Litológica	
0	10	Monzodiorita muy meteorizada	Kigd (Intrusivos Graníticos a Dioríticos)
10	18	Monzodiorita muy alterada y fracturada	
18	36	Monzodiorita sana (Roca Fresca)	



Figura 4.6: Detalle de las muestras litológicas obtenidas en la perforación del Pozo de Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hydro-Drilling (2020)[41]

4.2.2.2. Parámetros hidrogeológicos

Luego de la limpieza, habilitación y construcción del pozo de producción se realizó una Prueba de Bombeo que incluye gasto variable y gasto constante. A continuación, se muestra una tabla resumen con los datos numéricos de la prueba completa.

Tabla 4.4: Resumen del Gasto Variable y Gasto Constante. Fuente: Hydro-Drilling (2020)[41]

Etapa Gasto Variable	Duración (min)	Caudal (l/s)	Prof. Nivel (m)	Descanso Escalón (m)	Descanso Total (m)
1	240	0,5	10,64	2,34	2,34
2	240	1	13,18	2,54	4,88
3	240	2-1,9	21,53	8,35	13,23
Recuperación	180	0	8,30	13,23	0,00
Etapa Gasto Constante	Duración (min)	Caudal (l/s)	Prof. Nivel (m)	Descanso Escalón (m)	Descanso Total (m)
1	1.44	1,8-1,5	15,81	7,51	7,51
Recuperación	180	0	8,41	-7,40	0,11

*Nivel Estático 8,30 m (Ref. 0,32 m Cota Terreno)

La interpretación de los datos obtenidos en la prueba efectuada fueron realizados por la empresa Hydro-Drilling mediante el empleo de aplicaciones informáticas. Debe tenerse en cuenta, que el fundamento teórico en el que se basa la herramienta informática y sobre todo la formulación para Hidráulica de Captaciones es aplicable, sobre todo, a medios detríticos porosos, y no específicamente a medios fracturados, como el que nos ocupa. Sin embargo, es norma habitual su empleo en bombes en medios fracturados asumiendo que éstos se comportan de forma similar.

De la interpretación de los resultados obtenidos del Ensayo de Bombeo se ha podido obtener los valores de Transmisividad (T) y Conductividad Hidráulica (K). Cabe reseñar que la Conductividad Hidráulica (K) corresponde a lo que comúnmente se llama permeabilidad.

La obtención de la Transmisividad (T) se ha obtenido a través del ajuste de los valores de

la Recuperación del Gasto Variable en dos tramos. Los valores de Transmisividad están en torno a los $1,6-19,4 \text{ m}^2/\text{día}$ y los de Conductividad Hidráulica (K) en torno a los $0,16-1,94 \text{ m}/\text{día}$ si tomamos un espesor medio saturado el acuífero de 10 m .

A continuación, se muestra dicho ajuste con los valores obtenidos:

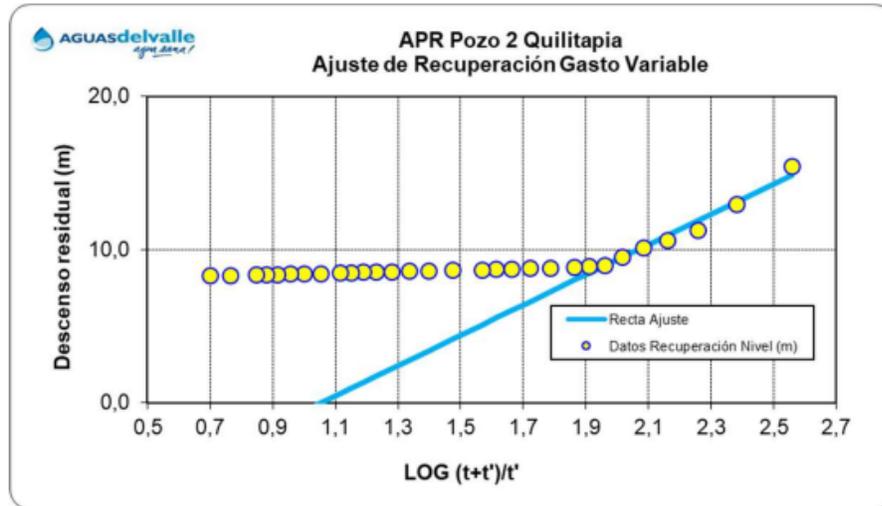


Figura 4.7: Ajuste del Descenso durante la Recuperación Gasto Variable (Tramo 1) $T = 0,16 \text{ m}^2/\text{día}$ del Pozo de Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]

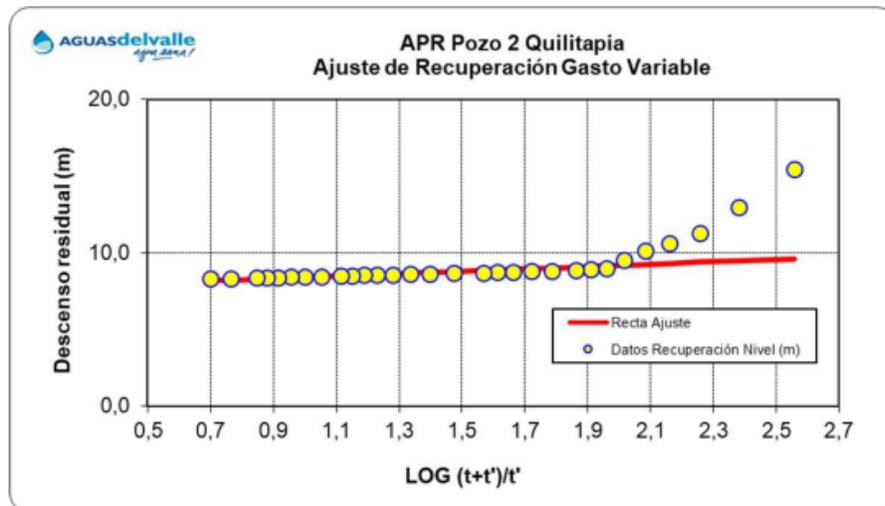


Figura 4.8: Ajuste del Descenso durante la Recuperación Gasto Variable (Tramo 2) $T = 19,4 \text{ m}^2/\text{día}$ del Pozo de Producción del SSR Quilitapia, Combarbalá. Fuente: Hidro-Drilling (2020)[41]

Utilizando la clasificación de Whitlow (Figura 4.9), la que relaciona la conductividad hidráulica con el grado de permeabilidad del suelo, se deduce que el grado de permeabilidad es bajo a muy bajo.

Grado de permeabilidad	Conductividad hidráulica cm/s
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Practicamente impermeable	menor de 10^{-7}

Figura 4.9: Grado de permeabilidad del suelo. Fuente: Whitlow (1994)[82].

Con los datos entregados por el informe, no se logra determinar la capacidad de almacenamiento específica (S) del acuífero pues no se pudieron registrar las alturas del nivel de agua en el pozo durante el ensayo de bombeo y los tiempos correspondientes a esas alturas porque durante el ensayo no se disponía de un piezómetro de control para obtener estos datos. Con los valores de transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K) proporcionados en el informe se puede dar una idea general de la capacidad del acuífero para transmitir y almacenar agua subterránea. En general, valores más altos de T y K indican que el acuífero tiene una mayor capacidad para transmitir y almacenar agua subterránea, lo que puede ser beneficioso para la recarga artificial, en este caso se infiere que existe capacidad para transmitir y almacenar agua pero es un tanto limitada.

Se solicitaron nuevos informes técnicos adicionales con el objetivo de tener la información faltante obteniendo otro informe de un pozo cercano más antiguo que entregaba el valor del coeficiente de almacenamiento $S = 0,15$, lo que representa un acuífero con una capacidad de almacenamiento moderada, puede retener cierta cantidad de agua, pero no es excepcionalmente eficiente.

4.2.2.3. Análisis físico químico y bacteriológico

De la prueba de gasto constante, la empresa a cargo, tomó una muestra de agua para realizar un análisis físico-químico y bacteriológico según la Norma NCh 409 Calidad y Muestreo del Agua Potable, mediante un laboratorio autorizado.

La muestra se tomó en un envase de plástico de 2 litros y permaneció a menos de 4°C hasta su entrega en el laboratorio. Se dispuso del siguiente material:

- Envase de plástico de 1 litro con 3 ml de ácido nítrico para metales.
- Envase de plástico de $\frac{1}{2}$ litro con granallas de hidróxido de sodio para análisis de cianuro.
- Envase de vidrio de 300 ml esterilizado para análisis microbiológico de aguas sin cloro residual.

El llenado de las muestras se hizo hasta el borde sin rebase. El envase para análisis microbiológico contó con protección para evitar el contacto de la tapa con el medio ambiente.

Luego de finalizado el trabajo con las muestras tomadas y considerando la norma de calidad de agua, se infiere que los valores se muestran dentro de los parámetros normales.

Los Coliformes Totales están sobre valores de 5, que corresponde al Límite NCh 409. Esto no supone ningún riesgo dado que se eliminan con la cloración, tal y como se realiza para todas las aguas de consumo humano. Igualmente, el Cloro Residual está por debajo del rango permitido, aunque no supone ningún problema dado que las aguas para consumo humano deben ser cloradas, como rige la normativa.

4.2.3. Recurso hídrico superficial como fuentes de agua

Uno de los puntos importantes cuando se piensa en recarga gestionada de acuífero es la fuente de recarga, pues se debe obtener el recurso faltante de alguna forma para abastecer al acuífero.

El SSR Quilitapia, presenta problemas de escasez hídrica siendo incapaz de producir agua potable de su propia fuente debido al descenso de nivel de sus pozos, es por esto que actualmente es apoyado por camiones aljibes para suplir la demanda de agua potable en la zona. Si bien los camiones aljibes son una solución para combatir la escasez en los Sistemas, no es una solución definitiva para las personas, ya que en muchos lugares se entrega un servicios discontinuo producto de los cortes de suministro por emergencias en la zona.

4.2.3.1. Caudal mínimo demandado

Antes de analizar qué tipo de recurso hídrico hay en la comuna que sean suficiente para ser utilizado como fuente del método de RAG a elegir, primero se debe analizar cual es el caudal que necesitan los beneficiados del SSR. Al observar la Tabla 3.7 se logra apreciar que en Quilitapia hay 365 arranques y 1.132 habitantes beneficiados.

Para el valor de la dotación de producción anual se utiliza la dotación máxima de consumo familiar (Figura 4.10), obtenida del Manual de Proyectos Agua Potable Rural.

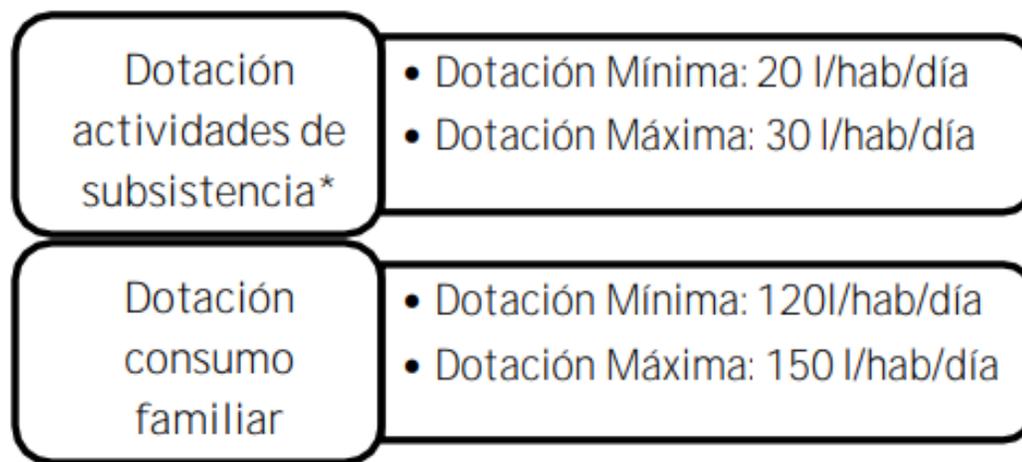


Figura 4.10: Dotación máxima de consumo familiar. Fuente: Manual de Proyecto Agua Potable Rural, (2023) ([53]).

Con el valor obtenido de la dotación se procede a calcular el consumo medio de agua potable durante un día, expresado en litros por segundo (Q_{md}), utilizando la fórmula de

caudal medio diario del Manual de Proyectos Agua Potable Rural 4.2, se tiene que el Qmd para los habitantes beneficiados por el SSR Quilitapia son 2.35(l/s)

$$Qmd = \frac{Pob * Dp * Cob}{86.400 * 100} \quad (4.2)$$

Donde:

Pob. = Población total (hab);

D.p = Dotación de producción anual (L/hab/día);

Cob. = cobertura anual (en porcentaje).

Sin embargo, esto es solo un promedio del consumo por lo que se infiere que habrán momentos en que el consumo puede ser mayor al valor obtenido del Qmd, por esto se procede a calcular el volumen de agua potable que se consume en el día de máximo consumo del mes de máximo consumo (Qmáxd), medido a la salida del estanque de regulación. Para determinarlo se utiliza la fórmula 4.3 obteniendo que Qmáxd es 3.53(l/s).

$$Qmáxd = F.D.M.C. * Qmd(l/s) \quad (4.3)$$

Donde:

F.D.M.C. = Factor del día de máximo consumo (se asume 1.5, según Manual de Proyectos Agua Potable Rural);

Qmd = Caudal medio diario de agua potable (l/s)

Cabe destacar que los valores de caudal obtenidos sirven de referencia para determinar los DAA subterránea que debiese tener el SSR para extraer el recurso del acuífero. Por otro lado, es importante dejar en claro que el caudal que aspira a ser recargado debe ser mayor al valor de Qmáxd pues se entiende que la recarga puede variar en los meses de verano e invierno debido al uso que se le da al recurso en dichos períodos de tiempo y al ciclo hidrológico, por lo que se espera poder tener cierta reserva para los meses en que la recarga no pueda cumplir con el mínimo necesario para agua potable.

Si bien el SSR Quilitapia no cuenta actualmente con DAA subterráneos, actualmente se encuentran pendientes dos solicitudes del año 2005 a la DGA (Figura 4.11). Para este trabajo se asumirá que dichas solicitudes serán aprobadas por la DGA y que de hacerse una eventual recarga, el SSR tendrá derechos para extraer agua subterránea.

PROVINCIA	COMUNA	COMITÉ O COOPERATIVA APR	Nº EXPEDIENTE	ESTADO DE SOLICITUD	Nº DE RESOLUCIÓN	FECHA DE RESOLUCIÓN	CAUDAL	NORTE	ESTE	DATUM
LIMARÍ	COMBARBALÁ	QUILITAPIA	ND-0402-2695	PENDIENTE	NO APLICA	NO APLICA	5 l/s	6560255	293840	1956
LIMARÍ	COMBARBALÁ	QUILITAPIA	ND-0402-2699	PENDIENTE	NO APLICA	NO APLICA	4,8 l/s	6557501	293319	1956

Figura 4.11: Solicitud de DAA subterráneos para el SSR Quilitapia. Fuente: Portal de Transparencia del Ministerio de Obras Públicas, (2023).

4.2.3.2. Fuente del agua que será recargada

Teniendo claro la zona elegida para realizar la recarga gestionada y la cantidad de agua que necesita la zona, es importante analizar las potenciales recursos hídricos que podrían ser

utilizadas como fuente de agua.

Dependiendo de la fuente y su ubicación (qué tan lejos se encuentra de la zona de recarga) se deben considerar obras de captación y/o distribución para luego ser recargadas al acuífero mediante algún método de recarga.

A continuación se presenta una lista de las potenciales fuentes de recarga:

- Agua de los cauces:

En ese caso se podría considerar un sistema de captación que permita extraer agua de un cauce de manera controlada. Esto podría involucrar la construcción de estructuras como tomas de agua, bombas y tuberías para dirigir el flujo de agua hacia el sistema de recarga que será ubicado en las cercanías del actual SSR Quilitapia. Esto aplicaría para un cauce natural, que puede ser un río, un estero, un arroyo, etc. de forma que el agua captada provendrá directamente de estos cauces. En el caso de Quilitapia, se podrían considerar el Estero Valle hermoso, Río Combarbalá, Río Cogotí, Quebrada Media Luna, Estero Punitaqui.

Como el SSR Quilitapia no posee DAA superficiales, para utilizar este tipo de fuente debiese solicitar dichos derechos a la DGA para poder captar el agua, se considera para este proyecto que son derechos que se podrían obtener por lo que es una fuente viable para recargar el acuífero

- Precipitaciones:

En esta fuente se consideran los recursos pluviales y nivales que produzcan las escorrentías en las cuencas y subcuencas, para ello se debe contar con una obra de captación para almacenar el agua que se va a recargar. Si bien, el agua provenientes de este tipo de fuente en la zona no es abundante, no hay que perder de vista que el objetivo de la recarga es para abastecer a la comunidad de agua potable, por lo que la cantidad a captar podría ser suficientes para dicho propósito. Además como el recurso varía según la estación del año, se debe considerar esa variable en la elección de la fuente.

- Canales:

Otra fuente de agua son los canales de riego que existen en Combarbalá, ahí se podría llegar a un acuerdo con los canalistas donde se les puede ofrecer mejorar la eficiencia en el agua que disponen para riego y lo que quede disponible pedir recargarlo al acuífero considerando el traspaso dicha agua, desde los canales a los SSR.

En el caso de Quilitapia, según el Excel de "Derechos concedidos en la IV Región."obtenido en la página de la DGA existen canalistas en comuna de Combarbalaá.

Cabe mencionar que no necesariamente existen plantas de tratamiento de aguas en todos los SSR, pues dependiendo de la calidad del agua de sus fuentes, el abastecimiento puede ser directo a las viviendas. En ese caso se debe estudiar la calidad del agua que proviene de cada una de las fuentes mencionadas para poder determinar qué se debe hacer para potabilizar el agua (como filtración, cloración, etc), pues el recurso a recargar debe tener, por norma, una calidad igual o mayor a la del acuífero.

4.3. Zona de recarga

La zona de recarga se hará cercano al pozo de producción estudiado pues así se garantiza que se cumplan las condiciones del suelo como permeabilidad, litología, nivel freático, entre otras, las cuales fueron consideradas como antecedentes del estudio local realizado para evaluar una posible recarga gestionada a esa zona que presenta escasez del recurso.

Con respecto a la superficie necesaria para llevar a cabo una obra de recarga gestionada y sus obras complementarias como una obra de captación, se aprecia en la Figura 4.3 que existen terreno disponible para ellos cercano al SSR Qulitapia.

A continuación se presenta una tabla resumen de los antecedentes presentados en este capítulo, los que servirán para elegir el o los métodos de recarga que podrían realizarse para solucionar el problema de escasez del SSR Qulitapia.

Tabla 4.5: Resumen del estudio local de la zona de recarga. Fuente: Elaboración propia.

ID	47
SSR Beneficiado	Qulitapia
SHAC	Quebrada Grande
Beneficiados	1.132
Fuentes de Agua	Agua de los cauces, Precipitaciones y Canales.
Permeabilidad de suelo	Baja a muy baja
Estado del SSR	Crítico
Calidad del Agua	Dentro de la norma NCh409
Qmáxd	3.53 (l/s)
Qmáxh	5.3 (l/s)

Capítulo 5

Métodos de Recarga de Acuíferos Gestionada (RAG)

5.1. Componentes de recarga

Comúnmente existen seis elementos que están presentes en los proyectos de RAG, los que corresponden a la zona de captura, pretratamiento (de ser necesario), recarga, almacenamiento subterráneo, recuperación y uso final[10]. En la Figura 5.1 se presenta un esquema que muestra dichos elementos y el orden en que deben ser ejecutados, además en la Tabla 5.1 se ejemplifican cada uno de ellos.



Figura 5.1: Ejemplo de la recarga de acuíferos gestionada con piscinas de infiltración para el sector agrícola. Fuente: CSIRO, 2020 [10]

Tabla 5.1: Componentes de un sistema de recarga de acuíferos gestionada, modificada de NRMCC-EPHCNHMRC, 2019. Fuente: CSIRO, 2020 [10].

Nº en esquema	Componente	Ejemplos
1	Zona de captura	Presa, piscina de detención, humedal, canal
2	Pretratamiento	Sistemas de ingeniería ej. filtro de arena
		Sistemas pasivos ej. humedales, biofiltro, balsas de decantación
3	Recarga	Pozo de inyección
		Infiltración ej. piscina, canal, zanja, pozo seco, lecho del río
4	Almacenamiento subterráneo	El acuífero donde se almacena el agua
5	Recuperación	Pozo de recuperación
		Descarga intencional a un ecosistema dependiente del agua subterránea
6	Uso Final	Riego agrícola, agua de proceso industrial*, suministro de agua potable*, beneficio ambiental ej. sostener ecosistemas acuáticos, restaurar acuíferos agotados (un postratamiento, ej. microfiltración o cloración, puede ser necesario según el uso final del agua)

5.2. Métodos de RAG

Para elegir un método de RAG se deben considerar tanto las características del territorio a nivel comunal como aquellas que son específicas del sitio donde se encontrará el punto de recarga, cabe destacar que no hay reglas definidas o soluciones únicas para cualquier escenario dado. En definitiva, la decisión sobre qué método aplicar dependerá de una serie de factores que incluyen el costo, la particularidad del suelo y las condiciones hidrogeológicas locales, la calidad de la fuente de agua y el área de terreno disponible, entre otros factores potenciales [10].

Hay tres grupos de métodos basados en infiltración para recargar acuíferos no confinados. En la siguiente tabla se presentan los tres grupos con sus principales métodos.

Tabla 5.2: Método de recarga basados en infiltración para recargar acuíferos no confinados. Fuente: Elboración propia a partir de CSIRO, 2020 [10].

Grupo	Métodos
Fuera del cauce	Piscinas de infiltración
	Tratamiento suelo-acuífero
	Galerías de infiltración
	Zanjas de infiltración
	Canales de infiltración
Dentro del cauce	Estanques de percolación
	Represas subterráneas
	Descargas de aguas de represas
Pozos secos	Pozos secos

5.3. Criterios de selección del método de recarga

Los criterios de selección utilizados para determinar cuál de los métodos expuestos con anterioridad es el mejor para ser presentado como proyecto de recarga de acuífero gestionada en este trabajo son: el costo asociado a la construcción, la permeabilidad del suelo de la zona de estudio, el requerimiento de la calidad de agua y la superficie requerida. En la siguiente tabla se presentan los criterios aplicados a cada uno de los métodos ya presentados.

Tabla 5.3: Criterios de selección del método de recarga para una RAG.
Fuente CSIRO, 2020 [10].

Métodos de recarga	Costo de inversión	Baja permeabilidad del suelo	Requerimiento de calidad de agua	Superficie requerida
Piscinas de infiltración	Bajo	No adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad	Mediano	Alto
Galerías de infiltración	Alto	Adecuado para penetrar capas poco profundas de baja permeabilidad	Alto	Mediano
Tratamiento suelo-acuífero	Mediano	No adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad	Bajo	Alto
Canales de infiltración	Bajo	No adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad	Bajo	Bajo
Zanjas de infiltración	Bajo	No adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad	Bajo	Mediano
Estanques de percolación	Mediano	No adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad	Mediano	Mediano
Represas subterráneas	Alto	No adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad	Bajo	Mediano
Descargas de aguas de represas	Bajo	No adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad	Bajo	Bajo
Pozos secos	Alto	Adecuado para penetrar capas profundas de baja permeabilidad	Alto	Bajo

Tomando en cuenta las condiciones locales de la zona de estudio, la que, como ya fue mencionado en el capítulo anterior, se caracteriza por no tener problemas en su calidad de agua, es que se decide obviar este criterio pues se podría elegir un método que requiera tener una alta, media o baja calidad de agua. Caso similar al criterio de superficie requerida, pues en los alrededores del SSR Quilitapia, hay superficie disponible para hacer cualquiera de las obras necesarias para emplear los métodos de recarga de la tabla anterior.

Considerando el criterio de permeabilidad del suelo y teniendo en cuenta que la zona posee una baja permeabilidad es que se decide considerar y analizar solo los métodos que cumplan con la condición de baja permeabilidad, es decir, galerías de infiltración y pozos secos.

A continuación, se presentarán los métodos seleccionados aplicando el primer filtro de permeabilidad. Es importante destacar que la información sobre descripción, fuentes de agua, plazos, costos, diseño, construcción, condiciones relevantes y monitoreo fueron extraídas directamente del Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos elaborado por la CNR y CSIRO [10].

5.3.1. Galerías de infiltración

5.3.1.1. Descripción, fuentes de agua, plazos y costos.

Las galerías de infiltración suelen tener una profundidad de hasta 2 ó 3 metros y corresponden a zanjas de percolación cubiertas que contienen un medio o una estructura de soporte con espacios vacíos internos para facilitar la infiltración [10].

Este método ocupa menos espacio que las piscinas de infiltración y puede hacer uso del espacio subterráneo. Además, evitan algunos peligros tales como crecimiento de algas, problemas de olor, plagas de insectos, entre otros, al no haber agua descubierta.

Con respecto a la fuente de agua, este incluye agua lluvia, escorrentía y desviación de ríos, al igual que el método anterior.

El tiempo de ejecución (antes de construcción a escala operacional) es de 3-12 meses incluyendo la investigación previa y la fase de prueba o fase piloto. El costo que tiene asociado el poder llevar a cabo una obra como esta es un costo nivelado de $\$0.19USD/m^3$ [10] lo que es relativamente menor en comparación con el costo de realizar pozos (por volumen recargado). Es importante tener en cuenta que los costos pueden variar dependiendo de si se usa de infraestructura existente o una nueva construcción, la topografía, el subsuelo y el grado y extensión del paisaje [10]. Si se piensa en los costos de operación, mantención y renovación estos incluyen el consumo de energía y materiales, mano de obra, renovación periódica de infraestructura, entre otros.

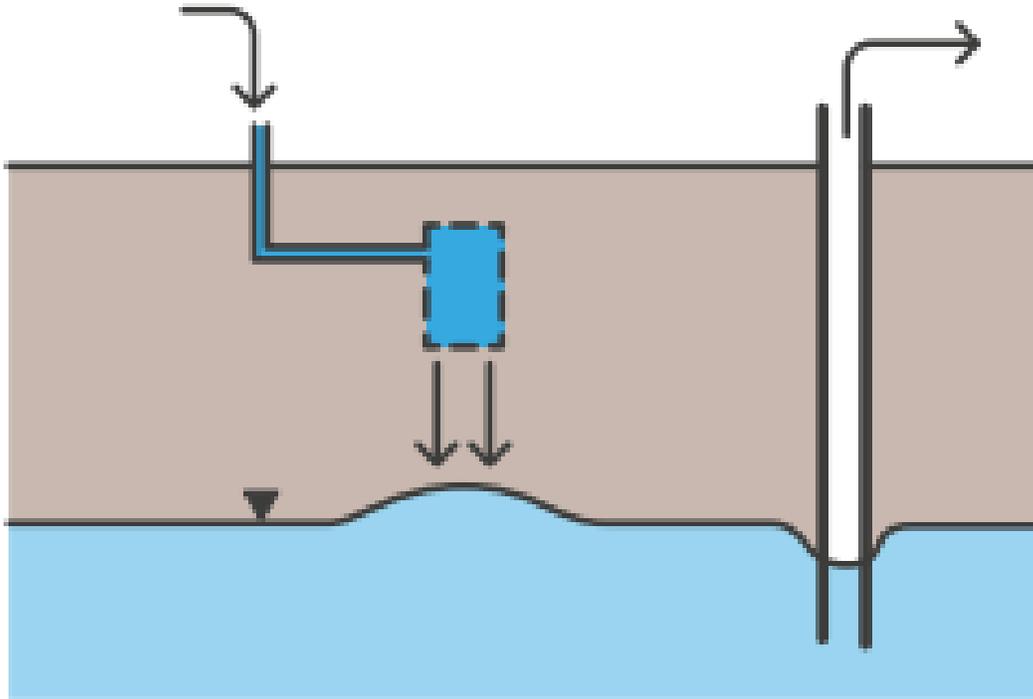


Figura 5.2: Esquema de galerías de infiltración. Fuente: Bekele et al., 2013 [55].

5.3.1.2. Diseño y construcción

Las galerías comúnmente se forran con un material llamado geotextil el cual cumple una función permeable en la parte superior y en los laterales de la cámara (ver esquemática de la Figura 5.3), luego se rellenan con grava u otros materiales áridos y finalmente se cubren con tierra vegetal. Para asegurar la distribución del agua a través del sistema de manera efectiva y sin inconvenientes una tubería perforada corre a través de la estructura de soporte. Pensando en el funcionamiento a futuro, puede ser necesario instalar barreras alrededor de las secciones de las galerías para evitar que las raíces crezcan en el sistema y causen bloqueos. Una variación del medio o estructura de soporte utiliza un sistema de cajas plásticas modulares con celdas abiertas que pueden ser colocadas en una zanja o tanque rectangular, típicamente alrededor de 0,5 a 1,5 metros de profundidad [10].

Durante la fase de diseño del esquema, se requieren mediciones en terreno para determinar las tasas de infiltración. Cuando las galerías se disponen en una zona de recarga superficial, generalmente se utiliza infiltrómetro de doble anillo [10], para zonas de recarga más profundas puede ser necesario realizar pruebas de medidas puntuales de permeabilidad o pruebas de bombeo en perforaciones existentes en acuíferos similares en el área.

En base a los resultados medidos, se puede calcular la tasa de infiltración utilizando la ley de Darcy.

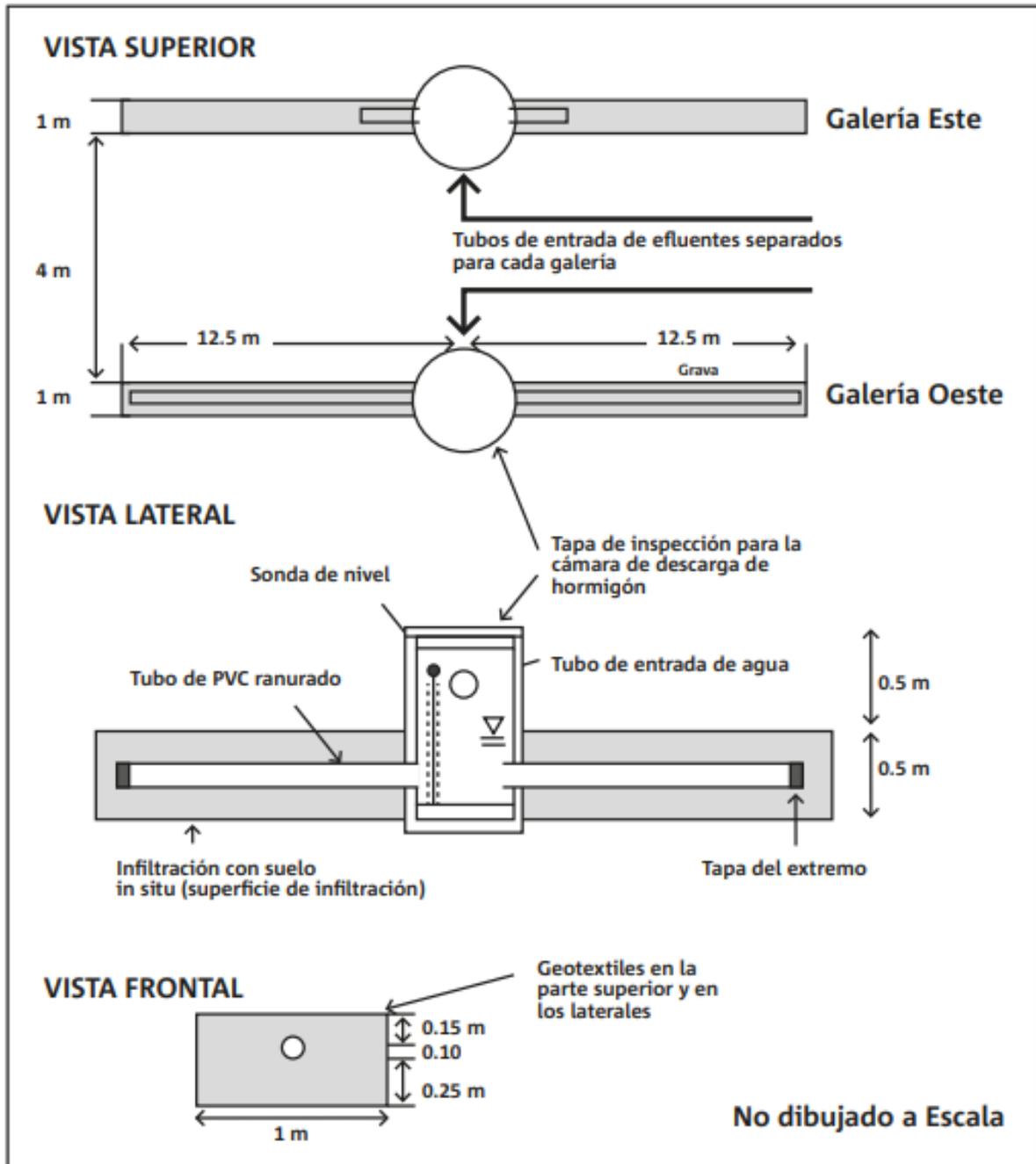


Figura 5.3: Esquema de galerías de infiltración. Fuente: Bekele et al., 2013 [55].

5.3.1.3. Condiciones relevantes

Con respecto a la calidad del agua, se requiere una fuente de agua de calidad adecuada para reducir la obstrucción. Se prefiere el agua de baja turbidez ya que el mantenimiento (limpieza) de las galerías es más costoso que para estructuras abiertas (ejemplos: piscinas o canales).

Para realizar este proyecto el acuífero debe cumplir con ciertas características, ser capaz

de recibir y almacenar agua adicional; si no hay espacio disponible en el momento de la recarga, entonces ésta no es viable. Las tasas de recarga deben ser adecuadas para infiltrar el volumen de agua objetivo. Para este método, la presencia de capas de baja permeabilidad debajo de la estructura puede afectar las tasas de infiltración. Este método se aplica comúnmente en suelos arenosos que cubren un acuífero transmisivo (sedimentos no consolidados, arena, grava). Es necesario evaluar si otros usuarios de aguas subterráneas o ecosistemas conectados podrían verse afectados negativamente por las operaciones de recarga, a fin de reducir los potenciales impactos y riesgos asociados.

5.3.1.4. Monitoreo

El parámetro más crítico a monitorear es la tasa de infiltración, ya que permite determinar si el sistema está logrando objetivos de rendimiento y cuantificar el beneficio de su operación. Esto implica saber cuánta agua se captura y recarga, y cuánta se recupera. Una reducción marcada en las tasas de infiltración indicará la necesidad de remediación del suelo para remover la obstrucción. También es posible que se requiera un mayor nivel de pretratamiento del agua antes de la infiltración, pues es importante tener en cuenta que el agua a recargar debe tener una calidad de agua igual o mayor a la del acuífero.

De llegar a realizar una obra como esta, se necesita al menos un pozo de monitoreo dentro de la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el nivel freático. Idealmente, debe haber más de un pozo de monitoreo disponible para la medición. Los medidores de presión in situ se pueden usar para recopilar de manera eficiente datos útiles en series de tiempo sobre los niveles de agua. Es importante recopilar datos de línea base para separar las fluctuaciones naturales del nivel freático de las señales de las operaciones de recarga.

5.3.2. Pozos secos

5.3.2.1. Descripción, fuentes de agua, plazos y costos.

Los pozos secos o pozos de gravedad corresponden a una técnica de infiltración que utiliza pozos poco profundos y de gran diámetro para recargar un acuífero no confinado por gravedad. Los pozos secos se pueden usar para recargar directamente a través de una zona profunda no saturada, de modo que el agua llegue a la zona saturada (acuífero) más rápidamente [10].

Es importante destacar que esta técnica no es igual a la de pozos profundos. En términos económicos requieren una menor inversión y presentan riesgos menores debido principalmente a que no se infiltra agua directamente a la zona saturada. Al comparar los pozos secos con el método de galerías de infiltración, el primero es más útil cuando se cuenta con poca disponibilidad de terreno y/o hay capas de suelos de baja permeabilidad en los primeros metros de superficie.

Con respecto a la fuente de agua, este incluye aguas lluvias, escorrentía y desviación de ríos.

El tiempo de ejecución es de 3-12 meses incluyendo la etapa previa de investigación y estudios, además este tiempo contempla también la fase de prueba o piloto. El costo total nivelado durante la vida útil es de $\$124CLP/m^3$, valor tomado de piscinas de infiltración ya que se espera que estos métodos impliquen costos similares o más baratos que el de pozos profundos, cuyo costo asociado es de $\$293CLP/m^3$ [10]. Los costos de operación, mantención y renovación incluyen el consumo de energía y materiales, mano de obra, renovación periódica de infraestructura, entre otros.

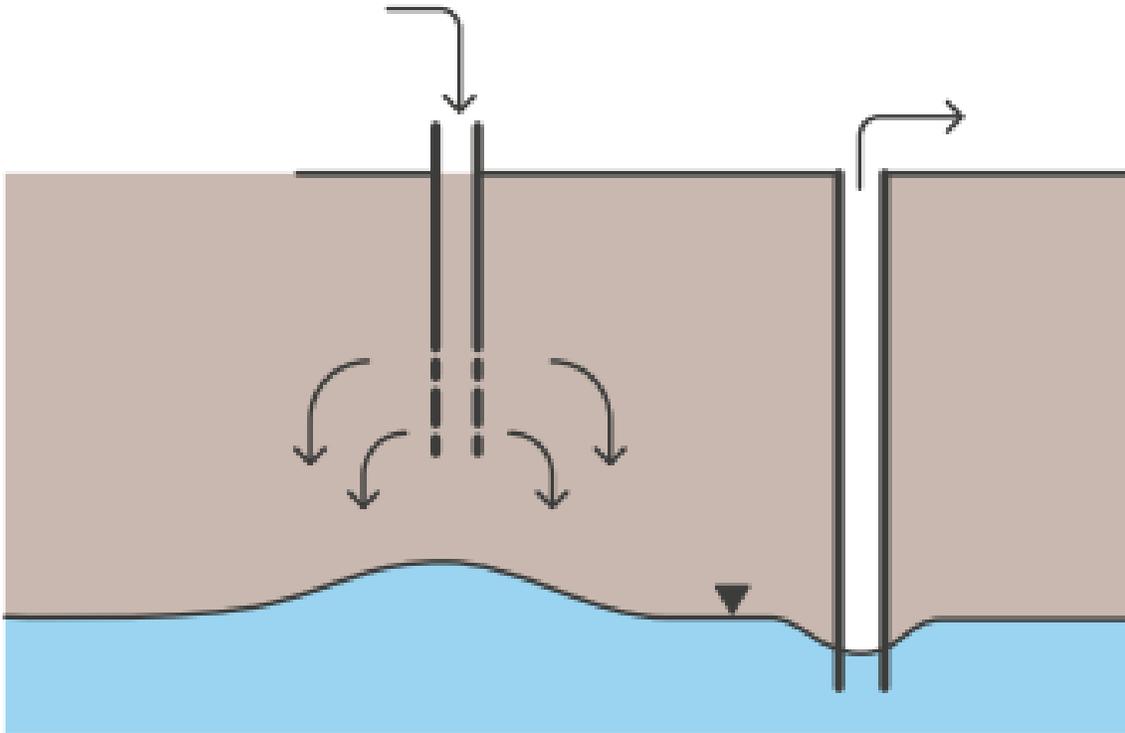


Figura 5.4: Pozos secos. Fuente: CSIRO, 2020 [10].

5.3.2.2. Diseño y construcción

Los pozos secos de infiltración son estructuras que constan de uno o más pozos de gran diámetro, que se extienden a poca profundidad, generalmente de 5 a 15 metros. Se sugiere que estos pozos se llenen con grava y una capa de filtro de arena gruesa, con el propósito de promover la infiltración del agua y minimizar los costos de mantenimiento en caso de que se produzcan obstrucciones. Sin embargo, es importante destacar que los filtros deben ser retirados y limpiados regularmente.

El agua destinada a la recarga del acuífero se dirige desde la superficie o a través de redes de conductos, evitando cualquier tipo de cascada que pudiera introducir burbujas de aire en el acuífero, ya que esto podría ocasionar obstrucciones en los medios porosos. Para prevenir la entrada de luz solar y reducir el crecimiento de algas, se recomienda proteger

la parte superior del pozo. Esta medida también contribuye a evitar incidentes con animales o personas. Se puede requerir una obra de captura de agua, como una piscina, para balancear la tasa de infiltración con la disponibilidad de agua o para mejorar la calidad de agua.

5.3.2.3. Condiciones relevantes

Con respecto a la calidad del agua, se requiere una fuente de agua de calidad adecuada para reducir la incidencia de las obstrucciones, lo que generalmente significa un proceso para reducir la turbidez, esto también resulta conveniente pensando en que se busca recargar agua para el consumo humano, por lo que la calidad del agua es una variable de suma importancia.

Para realizar este proyecto el acuífero debe cumplir con ciertas características como ser capaz de recibir y almacenar agua adicional. Las tasas de recarga deben ser adecuadas para infiltrar el volumen de agua objetivo. Es necesario evaluar si otros usuarios de aguas subterráneas o ecosistemas conectados podrían verse afectados negativamente por las operaciones de recarga, a fin de reducir los potenciales impactos y riesgos asociados.

Los pozos secos también deben cumplir con ciertas características del suelo, estos son apropiados cuando los suelos de baja permeabilidad se presentan a una mayor profundidad que la requerida por una piscina de infiltración u otros métodos superficiales de infiltración, pero hay que tener en cuenta que cuanto más profundas son las capas de suelo de baja permeabilidad, más profundo debe excavarse el pozo, aumentando el costo del proyecto.

5.3.2.4. Monitoreo

Es indispensable supervisar el funcionamiento de la obra para garantizar el objetivo de la misma. El parámetro más crítico a monitorear es la tasa de infiltración para determinar si el sistema está logrando sus objetivos de desempeño y cuantificar el beneficio de la operación. Esto implica saber cuánta agua se captura y recarga, y cuánta se recupera de ser el caso. Una reducción marcada en las tasas de infiltración indicará la necesidad de remediación del suelo para remover la obstrucción. También es posible que se requiera un mayor nivel de pretratamiento del agua antes de la infiltración.

Es fundamental examinar la calidad de la fuente de agua, especialmente en lo que respecta a la turbidez y los Sólidos Suspendidos Totales (SST), con el fin de desarrollar el plan de recarga de manera adecuada. La aceptabilidad de la calidad del agua varía de un lugar a otro y, en gran medida, depende de las condiciones específicas del acuífero local. En Australia, se establece un valor guía máximo de 10 *mg/l* para los sólidos suspendidos totales, el carbono orgánico total y el nitrógeno total en la fuente de agua que se va a recargar. Esto se hace para evaluar los posibles riesgos de obstrucción.

Es esencial contar con al menos un pozo de monitoreo ubicado dentro de la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el nivel freático. Idealmente, se requiere

la disponibilidad de varios pozos de monitoreo para realizar estas mediciones de manera más completa. Los medidores de presión in situ pueden ser utilizados para recopilar datos de manera eficiente y obtener series de tiempo que registren los niveles de agua. La recopilación de datos de línea base es un paso importante, ya que permite discernir las variaciones naturales en el nivel freático de las que pueden deberse a las actividades de recarga.

En el siguiente capítulo se analizarán las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos. En el caso en que ambos métodos sean una buena alternativa para la RAG, se utilizará el criterio de costo de inversión como último filtro.

Capítulo 6

Evaluación de Factibilidad de los diseños de RAG

6.1. Evaluación de Factibilidad

Evaluar la factibilidad de llevar a cabo una obra de recarga de acuífero gestionada consiste en analizar diversos factores técnicos, ambientales, sociales y económicos para determinar si el proyecto es viable y beneficioso en términos generales. A continuación, se presentan los puntos a considerar para evaluar si es factible realizar este tipo de obra:

1. Demanda de Agua: Se debe demostrar que existe una demanda local continua por agua recuperada y/o beneficios ambientales definidos (ej. un determinado aumento en la capa freática), para determinar el tamaño del esquema RAG para que sea viable.

La demanda continua para un volumen de agua recuperada debería ser suficiente para garantizar la inversión en el proyecto propuesto, de no ser así, debe haber un beneficio medioambiental claramente definido, por ejemplo, recuperar los niveles de agua subterránea. Cualquiera de estos criterios es esencial para la RAG.

2. Evaluación hidrogeológica: Se debe demostrar que hay al menos un acuífero en el sitio de la RAG propuesto capaz de recibir y almacenar agua adicional y que no hay restricciones (ej. ambientales) en dicho acuífero. Si no hay espacio disponible en el acuífero en el momento de la recarga, el proyecto no es viable.

La presencia de un acuífero adecuado con la capacidad de almacenar el agua es crítica para la RAG. Ese acuífero debe tener una tasa adecuada de recarga y una capacidad de almacenamiento suficiente, también debe ser capaz de retener el agua para su recuperación. Esta evaluación se puede apoyar con mapas regionales hidrogeológicos que muestran el potencial de los acuíferos como almacenamientos para la RAG. En los acuíferos sobre asignados, los administradores del agua, por ejemplo, las juntas de vigilancia o la DGA, pueden tener limitaciones adicionales sobre la proporción de recarga que puede recuperarse.

3. Fuente de agua disponible y derecho de acceso: Demostrar que hay disponible una fuente de agua adecuada para la recarga. Para ser compatible con la asignación local

de agua y sus derechos de aprovechamiento de agua (DAA) existentes. Si no hay suficiente agua para recargar, el proyecto no es viable. Debe estar garantizado el derecho al agua que se utilizará para la recarga. En una cuenca ya sobre asignada, es posible que no existan nuevos derechos de agua superficial, por lo tanto, debe contar con ellos con anterioridad.

4. Volumen de agua de recarga suficiente: El volumen medio anual de recarga debe exceder el volumen anual promedio requerido a ser recuperado (en el caso que el agua recargada quiera ser recuperada para diversos usos), con un excedente suficiente para construir un almacenamiento intermedio que cumpla con los requisitos de confiabilidad y calidad.
5. Espacio para captura y tratar el agua: Demuestrar que hay suficiente tierra disponible para captar la escorrentía del río y tratar el agua antes de recargarla (ej. decantación de sólidos). Dependiendo del método de recarga seleccionado, la permeabilidad del esquema y los volúmenes deseados puede afectar el espacio requerido. Para los métodos de recarga fuera del cauce y de pozo se necesitará una presa, humedal, piscina, canal o estanque fuera del cauce para retener suficiente agua para alcanzar el volumen de recarga objetivo. Del mismo modo, es necesario disponer de espacio si se requiere un pretratamiento antes de la recarga. Las estructuras de almacenamiento y tratamiento pueden ser las mismas, por ejemplo, estanques de retención para la captación de agua que permiten la retención de sedimentos antes de la recarga. El almacenamiento también puede incorporarse a la estructura de infiltración, si la capacidad de diseño lo permite, por ejemplo, una piscina de infiltración. Otros sistemas, como la modificación del lecho del río, no requieren este almacenamiento adicional.
6. Capacidad y experiencia: Demuestrar que hay capacidad disponible para diseñar, construir, operar y mantener el proyecto RAG. Los esquemas RAG fallan con frecuencia cuando los operadores no tienen suficiente experiencia y respaldo financiero para ser sostenibles en el tiempo. La experiencia técnica y financiera continua es esencial para las operaciones sostenibles del esquema RAG. El desarrollo de un plan de gestión operacional de RAG (y potencialmente un plan de seguridad hídrica donde la calidad está comprometida) es clave para la viabilidad continua del esquema.
7. Gobernanza y sostenibilidad económica: Se debe identificar el modelo de gobernanza del esquema para su construcción, operación y mantención para asegurar su sostenibilidad en el tiempo. Los modelos de gobernanza y de finanzas del esquema RAG (para la construcción, operación y mantenimiento) deben ser identificados desde el principio para garantizar su sostenibilidad. Existen mecanismos gubernamentales que entregan apoyo financiero para la inversión inicial de proyectos RAG en el sector agrícola, pero se deben considerar todos los costos de vida del esquema. Por otra parte, el usuario final del esquema RAG debe estar claramente definido (por ejemplo, Organizaciones de Usuarios de Aguas, empresas agrícolas, u otros).

Es importante recordar que según los objetivos de este trabajo solo se analizará de manera conceptual hasta el estudio económico, y no se considerarán otros puntos que también forman parte de la evaluación de factibilidad como la evaluación ambiental, estudio de impacto social y planificación y permisos (aspecto legal).

Los siete puntos de la Evaluación de Factibilidad, ya fueron abordados a lo largo de la memoria considerando la zona de estudio, a continuación se procederá a mencionar los aspectos más importante de cada uno a modo de resumen.

6.1.1. Demanda de Agua

A lo largo de la memoria se realizó un estudio de la comuna de Combarbalá, donde queda evidenciado el problema de escasez hídrica que hay en la zona. El sistema de abastecimiento del agua potable se ha visto muy afectado debido a la baja que se ha tenido en los niveles freáticos de los pozos de SSR. Se realizó un ranking de riesgo de los SSR presentes en la comuna arrojando que un 33 % se encuentra en estado crítico (Figura ??), entre ellos se encuentra el SSR Quilitapia, elegido como el servicio de abastecimiento a beneficiar con la recarga.

Además, en un informe técnico de los trabajos realizados durante la construcción de un pozo de producción en Quilitapia en el año 2020, se tiene que el pozo se puede bombear con un caudal de explotación máximo en torno a 1 y 1,3 l/s en ciclos de 12 horas continuas de bombeo y recuperaciones de 5 a 6 horas, lo que comparado con el caudal máximo diario ($Q_{\text{máxd}} = 3.53 \text{ l/s}$), evidencia el déficit de agua potable respecto a su demanda.

6.1.2. Evaluación hidrogeológica

En el mismo informe técnico de los trabajos realizados durante la construcción de un pozo de producción en Quilitapia en el año 2020, se realizó diversas pruebas obteniendo antecedentes del acuífero y características del agua y suelo. A continuación se enlistan los antecedentes recopilados:

- Según sus características litológicas o tipo de poros, se tiene un acuífero fisurado, pues al perforar se encuentran materiales intrusivos monzodioríticos con alteración-fracturación, asociada a los primeros 18 m, mientras que el resto de la prospección perforó los mismos materiales, pero muy sanos y sin ningún aporte importante de agua. Esto podría ser consistente con un acuífero semi-confinado en el que las fracturas o grietas permiten que el agua fluya, pero aún existe una capa impermeable que limita parcialmente la recarga y la descarga del acuífero, sin embargo, en el informe técnico se presenta como acuífero no confinado justificando que la roca es muy alterada.
- En el informe se destaca, que los medios fracturados no se comportan igual que los medios porosos detríticos y que los fundamentos de la Hidráulica de Captaciones, en líneas generales, están relacionados con estos últimos. Por tanto, es complicado extrapolar y comparar el comportamiento de este tipo de acuíferos fracturados alterados de muy baja permeabilidad con el comportamiento que podría esperarse en medios detríticos porosos. Sin embargo, es norma habitual que para pruebas de bombeo en medios fracturados se asuma que éstos se comportan de forma similar (lo que puede no ser cierto en algunos casos).

- Se tiene una baja a muy baja permeabilidad con valores de Transmisividad (T) en torno a los 1,6-19,4 m²/día, lo que es indicativo de pozos de menos de 1 l/s, con depresiones teóricas de 10 m.
- Cuando se realizaba la excavación del pozo desde el metro 8 se comenzó a tener presencia de agua, sin que a partir de los 18-20 m fuese en aumento con la profundidad.
- se tomó una muestra de agua para realizar un análisis físico-químico y bacteriológico según la Norma. NCh 409 mediante un laboratorio autorizado. Todos los valores se muestran dentro de los parámetros normales que marca la NCh 409.
- Los Coliformes Totales están sobre valores de 5, que corresponde al Límite NCH 409. Esto no supone ningún riesgo dado que se eliminan con la cloración, tal y como se realiza para todas las aguas de consumo humano.
- El Cloro Residual está por debajo del rango permitido, aunque no supone ningún problema dado que las aguas para consumo humano deben ser cloradas, como rige la normativa.

Luego de otra solicitud vía transparencia se logra obtener otro informe con la capacidad de almacenamiento específica (S) igual a 0,15, cayendo en la clasificación de un acuífero con una capacidad de almacenamiento moderada. Puede retener cierta cantidad de agua, pero no es excepcionalmente eficiente.

6.1.3. Fuente de agua disponible y derecho de acceso

Como el SSR Quilitapia no tienen derechos de aprovechamiento de agua superficiales ni subterráneos, se asume que se obtendrán de alguna forma, pues la zona del SHAC Quebrada Grande se encuentra como área restringida y no cerrada. Actualmente existe una solicitud a la DGA por parte del SSR Quilitapia para tener DAA subterráneos (Figura4.11), considerando que dichos derechos serán aprobados y que no se cuenta con una actual solicitud de DAA superficiales, se presenta como fuente elegida para la recarga en la localidad el agua de canalistas.

Para que esta elección sea viable, se debe demostrar la existencia de canalistas en las cercanías del punto de recarga. Utilizado el sistema de información geográfica Google Earth, se distribuyeron en el mapa los canalistas de la comuna según su ubicación, además se agregaron las solicitudes de DAA realizadas por el SSR y al Pozo de Producción que se ubica en las cercanías del mismo y por tanto al Punto de Recarga, como se aprecia en la siguiente figura.



Figura 6.1: Ubicación de canalistas, solicitudes de DAA y Pozo de Producción en Google Earth. Fuente: Elaboración Propia.

Al observar la imagen anterior, se puede ver que existe un solo canalista en la zona correspondiente a la Comunidad Agrícola Jimenez y Tapia, por tanto se plantea realizar un acuerdo con dicha comunidad para utilizar parte del agua de riego para la recarga. Esto bajo el supuesto que existen épocas del año en que los regantes no hacen uso de la totalidad de sus derechos y a cambio se ofrece mejorar su eficiencia de riego.

En definitiva existen fuentes de agua disponibles para la recarga y se asume el supuesto que se obtendrán los permisos y acuerdos necesario para acceder a ella.

6.1.4. Volumen de agua de recarga suficiente

Como el volumen de recarga debe exceder el volumen requerido a ser recuperado, se tiene que el caudal de recarga debe mayor al $Q_{\text{máxd}}$ calculado, pues se apunta a tener un excedente suficiente para construir un almacenamiento que permita tener una recarga que cumpla la demanda en todos los meses del año, incluyendo esos meses en que la recarga pueda ser interrumpida o disminuir por la disponibilidad de la fuente utilizada (como el caso de agua lluvia que baja su intensidad en verano). Para determinar cuánto mayor al $Q_{\text{máxd}}$ deber ser el caudal a recarga, se deben hacer pruebas en terreno para apreciar el comportamiento de la recarga en forma concreta y numérica.

6.1.5. Espacio para captura y tratar el agua

Como ya fue mencionado con anterioridad en el capítulo 4, existe terreno disponible donde esta ubicado el SSR Quilitapia (Figura 4.3) para poder construir obra de captación

y plantas de tratamiento de ser necesario.

Para capturar el agua de la fuente elegida se pueden considerar obras como embalses, piscinas, estanques, canales entre otros, de un tamaño tal que permita retener suficiente agua para alcanzar el volumen de recarga objetivo.

Como los Servicios Sanitario Rurales tiene el objetivo de abastecer de agua potable a las comunidades, es que consideran en su proceso de producción la cloración del agua para cumplir con la normativa chilena y que su consumo sea seguro para los habitantes. Otros SSRs consideran plantas de tratamiento específicas como osmosis inversa, sistemas de filtrado, entre otros, pero este no es el caso de Quilitapia donde solo se considera la cloración.

Cuando se habla de considerar la construcción de plantas de tratamiento, estas serían para el agua que vendrá de otras fuentes (distintas al pozo de SSR), en las que se tendrá que hacer estudios de calidad del recurso, y así determinar si es necesario hacer algún tratamiento previo al agua antes de recargar el acuífero, pues no hay que olvidar que el agua a recargar debe tener una calidad igual o mejor a la del acuífero, con el objetivo de proteger el mismo.

6.1.6. Capacidad y experiencia

Para garantizar la viabilidad y el éxito de este proyecto de recarga de acuífero gestionada en la localidad de Quilitapia, es esencial contar con un equipo de profesionales y trabajadores capacitados en todas las etapas del proyecto. Dado que en Chile la experiencia en recarga gestionada de acuíferos es limitada, se deben tomar medidas adicionales para asegurar el cumplimiento de los objetivos del proyecto. A continuación, se destacan algunas consideraciones importantes:

- Profesionales Especializados: Se requerirá un equipo multidisciplinario que incluya ingenieros hidrogeólogos, geólogos, ingenieros civiles hidráulicos y profesionales con experiencia en gestión de recursos hídricos. Estos especialistas serán fundamentales para el diseño, la planificación y la ejecución de la recarga artificial de manera eficiente y segura.
- Visitas a Terreno y Ensayos In Situ: Antes de iniciar la obra final, es crucial realizar visitas a terreno para comprender mejor las condiciones locales y realizar ensayos in situ. Esto proporcionará información actualizada sobre la hidrogeología local, la calidad del agua y otros factores clave que afectarán la implementación del proyecto.
- Proyecto Piloto: Se recomienda desarrollar un proyecto piloto a escala reducida antes de la implementación completa. Esto permitirá evaluar la efectividad de las técnicas de recarga utilizadas y ajustar el diseño en función de los resultados obtenidos.
- Estudio Económico Detallado: Antes de proceder con la obra final, es esencial llevar a cabo un estudio económico exhaustivo. Esto incluirá una evaluación detallada de los costos de inversión, operación y mantenimiento a lo largo del tiempo. También se debe considerar la recuperación de costos y la sostenibilidad financiera del proyecto.

- Personal Capacitado: Para la construcción y operación de las instalaciones de recarga, se debe contratar a un equipo de maestros, operadores y técnicos con experiencia en obras de captación, tratamiento y recarga de acuíferos. La capacitación y la experiencia de este personal son cruciales para garantizar la eficiencia y la calidad en todas las etapas del proyecto.

La viabilidad de este proyecto dependerá en gran medida de la preparación y el compromiso de un equipo de profesionales especializados, la realización de estudios preliminares y la implementación de un proyecto piloto. Estas medidas contribuirán a garantizar que la recarga gestionada en Quilitapia sea exitosa y sostenible a largo plazo. La revisión bibliográfica disponible contribuye al proceso descrito y podría ser el primer acercamiento para mostrar, a nivel de ingeniería conceptual, cuán factible es un proyecto como este en la zona mencionada. Conocer la existencia de un personal capacitado, multidisciplinario y eficiente para todas las etapas del proyecto y la realización de estudios en terreno escapa del objetivo de este trabajo por lo que se asumirá que es posible contar con los requerimientos para cualquiera de los dos métodos en discusión.

6.1.7. Gobernanza y sostenibilidad económica

Para indentificar el modelo de gobernanza del esquema para su construcción, operación y mantención y velar por que este sea sostenibilidad en el tiempo se debe tener en cuenta que este proyecto busca beneficiar a usuarios de sistemas sanitarios rurales, los que son regidos por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (MOP).

En Chile, los proyectos para Servicios Sanitarios Rurales (SSR) pueden recibir financiamiento de diversas entidades, que buscan aportar en la construcción de nuevos sistemas, mejora y ampliación de sistemas existentes, operación y mantenimiento y proyectos de mejora de eficiencia, entre ellas están:

- Ministerio de Obras Públicas (MOP): El MOP a través de su Programa de Agua Potable Rural (APR) proporciona financiamiento para la construcción y mejora de sistemas de agua potable rural en comunidades rurales y localidades alejadas.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia: Este ministerio puede brindar apoyo financiero y técnico para proyectos de desarrollo social y comunitario, lo que incluye proyectos de SSR que contribuyan al bienestar de las comunidades rurales.
- Gobierno Regional (GORE): Los Gobiernos Regionales pueden asignar fondos para proyectos de SSR en sus respectivas regiones. Los proyectos a menudo compiten por financiamiento a través de convocatorias y programas regionales.
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE): La SUBDERE apoya proyectos de desarrollo local y regional, incluidos los proyectos de SSR, a través de programas y fondos específicos.
- Programas de Cooperación Internacional: Organizaciones internacionales y agencias de cooperación, como la Agencia de Cooperación Internacional de Chile (AGCID), pueden respaldar proyectos de SSR en el país, a menudo en colaboración con el Gobierno de Chile.

- Fondos Regionales y Municipales: Los municipios y gobiernos locales también pueden asignar fondos para proyectos de SSR en sus áreas, especialmente en el caso de pequeñas intervenciones.
- Organizaciones No Gubernamentales (ONG): Algunas ONG y fundaciones trabajan en colaboración con comunidades rurales y pueden brindar apoyo financiero y técnico para proyectos de SSR.
- Recursos Propios de las Comunidades: En algunos casos, las comunidades rurales contribuyen con recursos propios para financiar proyectos de SSR a través de tarifas de usuario y aportaciones locales.

Para un futuro proyecto de RAG se debe buscar asesoría y apoyo de las autoridades locales y regionales pertinentes para identificar las fuentes de financiamiento disponibles y los requisitos específicos para acceder a estos fondos.

Cabe destacar que antes de llevar a cabo el proyecto, en primera instancia se deben realizar estudios y ensayos en terreno, y un posible proyecto piloto antes de tomar la decisión de materializar el proyecto, para ello se puede pensar en las mismas fuentes de financiamiento.

Luego de realizado el estudio en la comuna de Combarbalá, más un estudio local en Quilitapia, junto a la evaluación de factibilidad realizada y considerando los supuestos expuestos se tiene que, a nivel de ingeniería conceptual, es factible realizar una obra recarga de acuífero gestionada en el sector del SSR Quilitapia.

6.2. Elección del método

Considerando la evaluación de factibilidad y los antecedentes locales se procede a discriminar cuál de los dos métodos seleccionados será el propuesto para la recarga gestionada.

Tabla 6.1: Comparación de Métodos de Recarga Gestionada de Acuífero para Quilitapia: Galerías de Infiltración versus Pozos Secos. Fuente: Elaboración propia

	Método de Recarga	
	Galerías de Infiltración	Pozos Secos
Demanda de agua	Dada la demanda de agua, ambas opciones, ya sea galerías de infiltración o un pozo seco, podrían ser consideradas para abordar la recarga artificial del acuífero en Quilitapia.	
Evaluación hidrogeológica	Permiten una distribución más efectiva del agua, ayudando a superar la baja permeabilidad y recargar el acuífero de manera más eficiente .	Pueden ser diseñados para extraer y recargar agua en puntos específicos del acuífero donde la permeabilidad sea algo mayor.
	Pueden aprovechar al máximo esta capacidad de almacenamiento moderado que existe al permitir una recarga controlada y uniforme a lo largo del tiempo.	Podrían aprovechar la capacidad moderada de almacenamiento, pero la recarga sería más localizada , lo que podría limitar su eficiencia .
	Son una técnica probada y ampliamente utilizada para la recarga de acuíferos en diversas condiciones hidrogeológicas . Pueden adaptarse para cumplir con las características específicas del acuífero de Quilitapia.	Son una técnica viable para la recarga gestionada de acuíferos en ciertas condiciones hidrogeológicas . Deben necesariamente adaptarse a las características específicas del acuífero de Quilitapia, considerando la ubicación estratégica de los pozos secos para aprovechar las áreas con mayor permeabilidad.
Fuente de agua disponible	Para fuentes superficiales, las galerías de infiltración podrían ser una opción eficiente.	Por otro lado, si se obtienen derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas , los pozos secos podrían ser preferibles para recargar directamente el mismo acuífero subterráneo.
Derecho al acceso	Dado el derecho al acceso de agua, ambas opciones, ya sea galerías de infiltración o un pozo seco, podrían ser consideradas para abordar la recarga artificial del acuífero en Quilitapia.	
Volumen de agua de recarga suficiente	Pueden tener una capacidad de almacenamiento más limitada , por lo que es importante considerar si se satisfacen las necesidades de almacenamiento. En este caso sí, pues la finalidad es abastecer a un SSR.	Pueden proporcionar una capacidad de almacenamiento relativamente mayor , lo que puede ser beneficioso si se busca almacenar grandes volúmenes de agua para un uso posterior.
Espacio para captura	Dado el espacio para captura, ambas opciones, ya sea galerías de infiltración o un pozo seco, podrían ser consideradas para abordar la recarga artificial del acuífero en Quilitapia.	
Calidad de agua	Pueden incluir sistemas de tratamiento antes de la recarga , lo que contribuiría a mejorar la calidad del agua antes de que ingrese al acuífero.	También pueden incorporar sistemas de tratamiento antes de la recarga. Sin embargo, la efectividad del tratamiento puede depender de la ubicación y el diseño específico de los pozos secos.
	Debido a la distribución más amplia, las galerías de infiltración pueden ser menos vulnerables a la contaminación , ya que el agua se filtra a través de una mayor cantidad de suelo antes de llegar al acuífero.	Permite un mayor control sobre la calidad del agua inyectada , ya que se puede tratar el agua antes de su introducción en el acuífero.
Capacidad y experiencia	Dada la capacidad y la experiencia, ambas opciones, ya sea galerías de infiltración o un pozo seco, podrían ser consideradas para abordar la recarga artificial del acuífero en Quilitapia.	
Gobernanza y sostenibilidad económica	Generalmente no requieren excavaciones profundas y pueden ser más económicas de construir y mantener debido a su diseño más simple.	Pueden requerir una inversión inicial significativa para su construcción y puesta en marcha. Sin embargo, la sostenibilidad económica a largo plazo dependerá de varios factores, incluida la eficiencia de la recarga, los costos de mantenimiento y la disponibilidad de financiamiento continuo para su operación y supervisión.

Por tanto, considerando la tabla anterior, se elige como método de recarga Galerías de Infiltración, pues es el método que mejor se adecuaba a las condiciones de la zona.

6.3. Evaluación económica

Como se está frente a un proyecto social, el método utilizado para terminar si es conveniente en términos económicos construir una obra de galerías de infiltración o bien aumentar la cantidad de camiones aljibe para suplir la demanda de agua de la comunidad de Quilitapia, es el análisis Costo - Eficiencia [47].

Un análisis como este permite identificar aquella alternativa de solución que presente el mínimo costo para los mismos beneficios. Esta se puede aplicar cuando las alternativas entreguen beneficios comparables (como suministro de agua potable que cumpla la

demanda de los habitantes de Quilitapia), de tal forma de poder evaluar cuál de ellas es más conveniente desde el punto de vista técnico-económico. Este enfoque se aplica cuando existe dificultad para cuantificar y/o valorar los beneficios del proyecto, especialmente cuando esto conlleva la aplicación de juicios de valor. En estos casos, se reconoce que los beneficios son deseados por la sociedad y por lo tanto, el criterio a aplicar será el de mínimo costo.

El indicador utilizado bajo un enfoque costo eficiencia resume todos los costos del proyecto, tanto de inversión, como de operación, mantenimiento y conservación. Este indicador es el Valor Actual de Costos (VAC), el cual permite compara alternativas de igual vida útil, y se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$VAC = I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (6.1)$$

donde:

I_0 : inversión inicial

C_t : costos incurridos durante el periodo t

n : horizonte de evaluación

r : tasa social de descuento

Dicho esto, se presenta el análisis para los dos casos mencionados. Es importante destacar que cada caso tiene un horizonte de evaluación n de 10 años y una tasa social de descuento del 6%. Además, se le agregó una tasa de inflación anual del 6.5% a partir del años 2.

6.3.1. Caso 1: Situación actual

Para este caso se utilizaron datos de costos obtenidos de un SSR que posee características similares al SSR de estudio. Allí se consideran gastos de operación, administración, mantenimiento, mejoramiento, depósitos bancarios y el uso de camiones aljibe.

Tabla 6.2: Evaluación Costo - Eficiencia Caso 1. Fuente: Elaboración Propia.

Situación Actual	
Año	Costos (\$) + Tasa inflación anual
1	238,408,617
2	253,905,177
3	270,409,014
4	287,985,600
5	306,704,663
6	326,640,467
7	347,872,097
8	370,483,783
9	394,565,229
10	420,211,969
VAC	\$2,297,484,533.50

6.3.2. Caso 2: Galerías de Infiltración

Para este segundo caso se utilizaron datos de una construcción de galería de infiltración ya realizada la que incluía el costos de inversión y costos anuales de operación y mantención [77]. Además se agregaron los costos de administración del análisis anterior.

Tabla 6.3: Evaluación Costo - Eficiencia Caso 2. Fuente: Elaboración Propia

Situación Galerías de Infiltración	
Año	Costos (\$) + Tasa inflación anual
0 (Inversión)	1,910,510,380
1	37,609,053
2	40,053,641.4
3	42,657,128.1
4	45,429,841.5
5	48,382,781.2
6	51,527,661.9
7	54,876,960
8	58,443,962.4
9	62,242,819.9
10	66,288,603.2
VAC	\$2,272,939,468.21

Al ver los dos valores de VAC obtenidos, se tiene que para el caso 2 hay un menor VAC, por tanto es la solución más conveniente en términos económicos.

Capítulo 7

Conclusiones

En el estudio de factibilidad sobre obras de recarga gestionada de acuíferos (RAG) para mejorar el suministro de agua potable en Quilitapia, perteneciente a los sectores rurales de Chile, se han identificado conclusiones esenciales que destacan la complejidad y la relevancia de abordar la escasez de agua desde una perspectiva integral.

La escasez de agua en Chile ha dado lugar a una serie de problemas que impactan tanto a las personas como a las actividades productivas dependientes de este recurso. Este fenómeno es especialmente evidente en áreas rurales, como la localidad de Quilitapia en la comuna de Combarbalá, IV Región de Coquimbo.

La carencia de infraestructura adecuada se erige como una barrera fundamental para asegurar el acceso ininterrumpido al agua potable en las zonas rurales. La demanda de agua potable en estos lugares es notablemente baja en comparación con otros usos, como en la agricultura, hidroeléctricas o la minería, lo que subraya la necesidad de priorizar un manejo integral de las cuencas hidrográficas y garantizar un uso sostenible de los recursos naturales.

Una proporción significativa de la población chilena reside en áreas rurales, donde no todos cuentan con acceso a redes de agua potable y alcantarillado. Esta falta de acceso adecuado a servicios básicos contribuye a la migración hacia áreas urbanas, el envejecimiento de las comunidades rurales y la falta de desarrollo local.

Los Servicios Sanitarios Rurales (SSR) enfrentan desafíos relacionados con la escasez hídrica, debido al cambio climático, y la falta de infraestructura. Muchos sistemas dependen de camiones aljibes para abastecer a la comunidad, lo que no asegura un suministro constante y representa costos significativos. Además, la falta de mantenimiento y actualización de la infraestructura resulta en pérdida de agua potable.

La infraestructura de los SSR requiere soluciones de ingeniería que perduren en el tiempo y permitan la mantención, reparación y renovación necesarias. La falta de mantenimiento de sistemas envejecidos contribuye a la pérdida de agua potable, lo que no se puede

permitir en estos tiempos en que el agua que reciben actualmente muchos habitantes de la zona no es suficiente para suplir sus necesidades básicas.

Chile actualmente no cuenta con gran experiencia en recarga gestionada de acuíferos, sin embargo, se ha avanzado en ello dejando en evidencia la necesidad de realizar estudios locales del sector elegido como zona de recarga para garantizar el éxito de la misma. La Comisión Nacional de Riego actualmente posee una guía metodológica para obras de RAG, pero esta guía posee ciertas limitaciones en el tipo de acuífero, fuentes de agua y el uso que se le dará al agua recargada, lo que la encasilla como insuficiente para beneficiar a otros sectores que no son la agricultura, es por esto que se cree necesario realizar una guía integral que contemple los distintos tipos de suelos, la diversidad de acuíferos a nivel nacional y todos los usos posibles para beneficiar a diversas comunidades y sectores, especialmente a aquellos que carecen de acceso al agua potable.

A nivel de ingeniería conceptual, en esta memoria, quedó evidenciada la falta de información y estudios disponibles en la web, como la mapoteca digital de la DGA, la que cuenta con datos no actualizados y registros deficientes de la información en la localidad. Esta falta de información plantea desafíos para realizar estudio preliminares que apunten a visualizar la factibilidad de realizar un proyecto de recarga, a raíz de esto se plantea lo esencial realizar estudios de ingeniería más detallados, insitu y actualizaciones de información sobre acuíferos para evaluar la viabilidad de proyectos de RAG.

Pese a lo mencionado, utilizando la información obtenida mediante estudios previos, revisando bibliografía pertinente, solicitudes por ley de transparencia, caracterización a nivel subcuenca y a nivel local, considerando aspectos técnicos y económico, se concluye que si es viable realizar una obra de recarga gestionada de acuífero utilizando el método de Galerías de Infiltración en la localidad de Quilitapia.

A lo largo de la memoria se logró realizar una caracterización del acuífero de la comuna de Combarbalá, se evaluó la disponibilidad y calidad del agua, se identificaron las fuentes de recarga existentes en la zona y se evaluaron eligiendo una para la recarga, se seleccionó una técnica de recarga (Galerías de Infiltración), se realizó un análisis económico que permitió respaldar a la solución propuesta en términos económicos y se planteó un plan de monitoreo y seguimiento para que la obra de recarga.

A nivel ingenieril existen diversas acciones, proyectos y soluciones para combatir la crisis hídrica de Quilitapia, sin embargo, esta no es una problemática aislada, la escasez de agua y baja en la reserva subterránea afecta hoy en día a millones de habitantes en Chile y en el planeta entero.

Construir pozos y explotar el acuífero son alternativas que solo funcionan para un tiempo, quedando evidenciado en áreas rurales como Combarbalá donde los pozos presentan filtraciones y la reserva de agua subterránea ha dejado de ser suficiente para suplir la demanda actual de agua potable de los habitantes. Es por esto que se debiese apuntar a una mejora estructural, encontrar alternativas que perduren, sean sostenibles en el tiem-

po y que permitan entregar la cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda de la gente en su día día.

Bibliografía

- [1] Arumí, J. y Oyarzún L. (2007). Las Aguas Subterráneas en Chile. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 37-45.
- [2] Baeza, E. (2020). Importancia de las aguas subterráneas y experiencias chilena y extranjera sobre su gestión, Casos de Chile, México, Europa, Asia, Estados Unidos de América, Reino Unido, Nueva Zelanda y Etiopía. Asesoría Técnica Parlamentaria. Obtenido de: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/28611/1/Informe_Gestion_Aguas_Subterranas.pdf
- [3] Bear, J. (2007). Hydraulics of Groundwater. Dover Publications.
- [4] Bekele, E., Toze, S., Patterson, B., Fegg, W., Shackleton, M., & Higginson, S. (2013). Evaluating two infiltration gallery designs for managed aquifer recharge using secondary treated wastewater. Journal of environmental management, 117, 115-120
- [5] Bouwer, H. (2002) Artificial Recharge of Groundwater: Hydrogeology and Engineering. Hydrogeology Journal, 10, 121-142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>
- [6] Bustos, B., Contreras, Y., e Insunza, X. (2021). La política Nacional Rural 2020: aportes al proceso constituyente. Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Chile, Santiago.
- [7] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR^2). (2015). La mega-sequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Obtenido de www.cr2.cl/megasequia
- [8] Comisión Nacional de Riego (CNR). (2003). Diagnostico actual del riego y drenaje en Chile y su proyección.
- [9] CR^2 (2015). Informe a la Nación La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR^2).
- [10] CSIRO. (2020). Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos. Obtenido de: <https://www.cnr.gob.cl/wpcontent/uploads/2021/01/Informe-final.pdf>
- [11] CSIRO. (2020). Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial en Acuíferos informe final, Anexos, 2020.
- [12] Custodio, E., Llamas, M. (1996). Hidrología Subterránea. Segundo Edición
- [13] Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH). (2017). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Coquimbo. Dirección General de Aguas.
- [14] De Requesens, K. (2022). Experiencia de recarga gestionada de acuíferos en la cuenca de Santiago (Chile). Lecciones aprendidas después de dos años de operación.

- [15] DGA (2004). Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad en la Cuenca del Río Limarí. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Realizado por: Cadepe-Idepe Consultores en Ingeniería.
- [16] DGA (2008). Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Río Limarí. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- [17] DGA (2009). Informe Técnico No 215: Declaración de Áreas de Restricción: SHAC de la Cuenca del río Limarí. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- [18] DGA (2012a). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General de Aguas, Servicio de Evaluación Ambiental.
- [19] DGA (2012b). Investigación Recarga Artificial de Acuíferos Cuencas del Río Choapa y QuiLimarí, Región de Coquimbo. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Realizado por: AC Ingenieros Consultores LTDA.
- [20] DGA (2016). Atlas del agua en Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- [21] DGA (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. SIT No 417. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Realizado por: Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [22] DGA (2017). Inventario Nacional de Acuíferos. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación.
- [23] DGA (2017). Investigación de acuíferos de gran volumen y bajo nivel de recarga en la zona norte. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Realizado por: Hídrica Consultores SPA.
- [24] DGA (2020). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Limarí. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Realizado por: Hídrica Consultores SPA y Rubio Cartes y Meza Ingenieros Consultores LTDA (UTP Hídrica - ERIDANUS).
- [25] DGA (2020). Sustentabilidad de asentamientos humanos rurales en Chile. Análisis desde los Sistemas Sanitarios Rurales - Cuenca del Limarí. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Dirección de Obras Hidráulicas.
- [26] DGA (2020). Diagnóstico del Estado Hidrogeológicos de la Cuenca del Limarí. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Realizado por: Carlos Flores y Marcelo Aliaga.
- [27] DGA (2023). Mapoteca DGA.
- [28] Dirección General de Aguas (DGA). (2017). Inventario nacional de acuíferos.
- [29] Dirección General de Aguas (DGA). (2017). Actualización del balance hídrico nacional.
- [30] Dirección General de Aeronáutica Civil (2021). Reporte Anual de la Evolución del clima en Chile. Oficina de Cambio Climático de la Sección de Climatología de la

- Dirección Meteorológica de Chile.
- [31] Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). (2022). Criterios de construcción de infraestructura de sistemas de agua potable rural.
- [32] Echeverría, E.(2008) NCH 409/1 Norma Calidad del Agua Potable.
- [33] Echeverría, E.(2008) NCH 409/2 Norma Muestreo del Agua Potable.
- [34] Fundación Amulen (2019). Radiografía del agua rural en Chile: visualización de un problema oculto. Santiago, Chile.
- [35] Fundación Chile. (2019). Escenarios Hídricos 2030. Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile.
- [36] Fundación Newenko (2019). Escasez hídrica en Chile: Desafíos para el consumo humano y perspectivas en modelos comparados. Santiago, Chile.
- [37] Fundación para la Innovación Agraria. (2019). Desarrollo de un modelo 3D de reservas de agua subterránea en una plataforma web para mejorar toma de decisión durante sequías en el río Limarí. Obtenido de: <https://opia.fia.cl/601/w3-article-118075.html>
- [38] Gobierno Regional (GORE). (2019). Plan emergencia hídrica 2019-2021. Gobierno Regional de Coquimbo.
- [39] Gobierno Regional Metropolitano. (2014) Diagnóstico regional de los comités y cooperativas de agua potable rural de la región metropolitana de santiago.
- [40] Hidrogestión S.A. (2022). Plan estratégico de gestión hídrica en cuencas costeras entre Elqui y Limarí. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación.
- [41] Hidro-Drilling. (2020). INFORME TÉCNICO DE LOS TRABAJOS REALIZADOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO 2 DE PRODUCCIÓN EN QUILITAPIA (COMBARBALÁ) Y SU ENSAYO DE BOMBEO” REGIÓN DE COQUIMBO . Aguas del Valle.
- [42] INE (2018). Síntesis de resultados Censo 2017.
- [43] INE (2019). Análisis Censo de Población y Vivienda 2017: Región de Coquimbo.
- [44] INGEOREC Ltda. (2011). Diagnóstico de la red de Aguas Subterráneas Región del Libertador Bernardo O’higgins.
- [45] Llera, J., Fontaine, J., Luksic, P., Moreno, L., Vidal, G. (2020). Mesa 1: Personas que residen en una vivienda sin servicios sanitarios básicos (agua potable y/o baño). Compromiso País, Programa de la Presidencia del Gobierno de Chile.
- [46] McPhee, J., de la Fuente, A., Herrera, P., Niño, Y., Olivares, M., Sancha, M. A., et al. (2012). Diagnóstico del Agua en las Américas. México Distrito Federal: Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. Obtenido de: https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2012/03/Libro_Diagnostico_del_Agua_en_las_Americas.pdf
- [47] Ministerio de Desarrollo Social. (2013). METODOLOGÍA GENERAL DE PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS. División de Evaluación Social de Inversiones
- [48] Ministerio de Obras Públicas (MOP). (1986). Estudio del mapa hidrogeológico nacional.

- [49] Ministerio de Obras Publicas (MOP). (2008). Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la cuenca del río Limarí. Dirección General de Aguas
- [50] Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2019). Manual de proyectos de agua potable rural.
- [51] Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020). Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Limarí.
- [52] Ministerio de Obras Publicas (MOP). (2021). Informe técnico N°251
- [53] Ministerio de Obras Publicas (MOP). (2023). Manual de proyectos agua potable rural criterios de diseño de agua potable rural.
- [54] Ministerio de Obras Publicas (MOP). (2023). Informe técnico darh n° 183.
- [55] Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Obras Hidráulicas. (s. f.). (2023). Acerca del Programa APR. Obtenido de: <https://doh.mop.gob.cl/APR/AcercadeAPR/Paginas/acercaAPR.aspx>
- [56] Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Obras Hidráulicas. (s. f.). (2023). Historia del Programa de Agua Potable Rural. Obtenido de: <https://doh.mop.gob.cl/APR/AcercadeAPR/Paginas/Historia.aspx>
- [57] Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Obras Hidráulicas. (s. f.). (2023). Marco Jurídico. Obtenido de: <https://doh.mop.gob.cl/APR/AcercadeAPR/Paginas/MarcoJuridico.aspx>
- [58] Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Obras Hidráulicas. (s. f.). (2023). Inversión. Obtenido de: <https://doh.mop.gob.cl/APR/AcercadeAPR/Paginas/inversion.aspx>
- [59] Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (1996). Tecnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos.
- [60] MMA (2017). Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022. División de Cambio Climático, Ministerio del Medio Ambiente.
- [61] MOP (2019). Manual de proyectos de agua potable rural. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas, Chile.
- [62] MOP (2019). Tríptico historia de APR. Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas.
- [63] MOP (2020). Mesa Nacional del Agua: Primer Informe. Obtenido de Ministerio de Obras Públicas: <https://www.mop.cl/MesaAgua/index.html>
- [64] Morales, P. (2021). Escasez hídrica en Chile y las proyecciones del recurso. OCDE (2016). Estudios de Política Rural de la OCDE - Chile. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. Chile
- [65] Peña, H. (2019). Gestión Sustentable del Agua Subterránea en Chile: Tensión entre normativa y práctica.
- [66] Pino, S. (2022). Diseño a Nivel de Ingeniería Conceptual de Pozos profundos para disponibilidad de agua subterránea y abastecimiento de Agua Potable en localidades rurales. Caso Sistemas de Agua Potable Rural APRs), Provincia de Limarí.
- [67] Rojas M., P. Aldunce, L. Farías, H. González, P.A. Marquet, J. C. Muñoz, R.

- Palma-Behnke, A. Stehr y S. Vicuña (2019). Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- [68] Saravia, S., Matus, M., Blanco, G., Llavona, A., Naranjo, L. (2020). Desafíos hídricos en Chile y recomendaciones para el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe, serie Recursos Naturales y Desarrollo, No 198 (LC/TS.2020/134). Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- [69] Schulte, P. (2014): Defining Water Scarcity, Water Stress, and Water Risk: It's Not Just Semantics. Pacific Institute. Disponible en: <http://bcn.cl/246kq>.
- [70] Schmidt, G. y Benítez-Sanz. C. (2012). Assessment of Water Scarcity and Drought aspects in a selection of European Union River Basin Management Plans. Study by Intecsa-Inarsa for the European Commission
- [71] Secretaría Regional Ministerial de Agricultura Región de O'Higgins. (2020) Plan regional de recursos hídricos.
- [72] Servicio Sanitarios Rurales . (s/fb). (2023) LEY N° 20.998 DE SERVICIOS SANITARIOS RURALES. Gob.cl.Obtenido de: <https://doh.mop.gob.cl/SSR/index.html>
- [73] Swierc, J., Page, D., Van Leeuwen, J. y Dillon, P. (2005). Preliminary hazard analysis and critical control points plan (haccp)-salisbury stormwater to drinking water aquifer storage transfer and recovery (astr) project. Obtenido de: www.terraserver.com
- [74] Tarbuck, E.J. y Lutgens, F.K. (2005). Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física. 8ª Ed. Pearson Prentice Hall.
- [75] Taylor, C.J. y Alley, W.M. (2001). Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data . Geological Survey (USGS), (Vol. 1217). Bustos, B., Contreras, Y., e Insunza, X. (2021). La política Nacional Rural 2020: aportes al proceso constituyente. Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Chile, Santiago.
- [76] UNESCO (2022). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas Subterráneas: Hacer visible el recurso invisible; Resumen Ejecutivo.
- [77] Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) (2016). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS SISTEMAS DE GALERIAS FILTRANTES Y POZOS PROFUNDOS EN LA ETAPA DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN EL DISTRITO DE ICA, SECTOR N°4: SANTA MARIA.
- [78] Undurraga, A., Estévez, C., Lillo, A., Salgado, J., y Salvador, J.(2014). Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional.
- [79] Villaroel, C. (2012). Asociaciones Comunitarias de Agua Potable Rural en Chile: Diagnosticos y Desafíos. Santiago, Chile.
- [80] Villalón, G., y Vera, S. (2012). Panorama demográfico en Chile contemporáneo: desafíos para lasociedad del siglo XXI. Revista Anales, 7(3), 35-63.
- [81] Wilks, D. (2011). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition.
- [82] Whitlow, R. (1994). Fundamentos de Mecánica de Suelos. Segunda Edición.

[83] World Health Organization. (2017). Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water. World Health Organization. Obtenido de: <https://iris.who.int/handle/10665/258715>.Licencia:CCBY-NC-SA3.0IGO