



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

**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.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN ALEJANDRO DEL PINO BADILLA

PROFESOR GUÍA:
ADOLFO OCHOA LLANGATO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO FUSTER GOMEZ
EZEQUIEL CAMUS HAYDEN

SANTIAGO DE CHILE
2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**
POR: SEBASTIÁN ALEJANDRO DEL PINO BADILLA
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: ADOLFO OCHOA LLANGATO

**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.**

En Chile, a lo largo y ancho de su extensión, no tan solo existe heterogeneidad territorial o geográfica, sino que también se tienen diferencias relacionadas con la disponibilidad hídrica, donde por un lado, en la macrozona sur del país domina la abundancia del recurso, y términos como *escasez* o *megasequía* no se discuten de manera recurrente. Pero, en la macrozona norte es una problemática constante que genera incertidumbre en las localidades. La población rural ha sido golpeada por la escasez de precipitaciones y los fenómenos de sequía, experimentado contratiempos relacionados al abastecimiento de agua potable, que se han intensificados en la última década. Es por ello, que la finalidad del siguiente trabajo de título, pretende generar soluciones a través del diseño a nivel de ingeniería conceptual de pozos profundos en la Provincia de Limarí, Coquimbo; que mejoren la disponibilidad de agua para el abastecimiento en Sistemas de Agua Potable Rural (APR).

Para ahondar la situación actual de la provincia, se analizan y evalúan las características principales de la Cuenca del Río Limarí, que se establece como la unidad principal de análisis en el trabajo. Además, se analizan antecedentes sobre infraestructura de APR, que considera 96 sistemas distribuidos mayoritariamente en las cercanías de los cauces principales de la cuenca; se estudia la componente hidrológica a través del análisis de comportamientos en precipitaciones medias mensuales que reflejan variaciones estacionales e impactos de déficit sobre el recurso hídrico generados por la megasequía entre el periodo 2010-2020; se analizan las variaciones en niveles estáticos en pozos de observación de la Dirección General de Aguas donde se aprecia una marcada tendencia de descensos en los niveles freáticos desde el año 1992 al año 2021 en la mayoría de pozos.

Con lo anterior como precedente, se realizó el diseño a nivel conceptual de pozos profundos con antecedentes bibliográficos y estudios técnicos, los que permitieron definir tres zonas de interés dentro de la provincia que en función a la información recopilada, representan Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común con una tasa de extracción de agua subterránea superior al promedio de otros sectores, y que por ende, podrían aumentar dichas extracciones para alimentar a Sistemas de APR. Así, a través de metodologías ligadas al estudio de rellenos sedimentarios con la utilización de perfiles transversales, y criterios de crecimiento demográfico; de dotación de agua potable y de diseño hidráulico de las obras, se efectuó el diseño de tres pozos en los sectores, que beneficiarían a cerca de 8.700 personas proyectando los resultados al año 2040.

Del estudio se comprende que si bien el diseño conceptual acerca la ingeniería en el mundo rural desde una perspectiva global, la ejecución de obras debe ser tratada de forma estricta con el apoyo de las autoridades, atendiendo múltiples factores involucrados en la vulnerabilidad y amenaza de los asentamientos rurales, para así avanzar hacia el desarrollo sustentable de los sistemas.

“Todos somos arroyo de una sola agua”
Raúl Zurita

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Ruralidad y agua potable	5
2.2. Programa de Agua Potable Rural	7
2.2.1. Contexto nacional, principales aspectos y cobertura del programa	7
2.2.2. Estructura, desarrollo y marco institucional del programa	12
2.3. Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales	14
2.4. Agua Subterránea	15
2.4.1. Heterogeneidad hídrica	15
2.4.2. Disponibilidad, restricción y prohibición del recurso subterráneo	17
2.5. Desafíos en el ámbito de gestión de recursos hídricos y agua potable	21
2.5.1. Gestión Integrada de Recursos y Aguas Subterráneas	21
2.5.2. Estrategias y políticas en torno al agua potable	23
2.6. Cambio climático y Megasequía en Chile	25
2.7. Escasez hídrica	26
2.8. Pozos profundos	28
3. Caso Provincia de Limarí	31
3.1. Características de la provincia	31
3.1.1. Área de Estudio y Aspectos administrativos	31
3.1.2. Cuencas y Red hidrográfica	32
3.1.3. Clima	34
3.1.4. Geomorfología	35
3.1.5. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), Áreas de Restricción y DAA	36
3.1.5.1. Cuantificación y caracterización de DAA subterráneas concedidos	37
3.1.6. Red Hidrométrica	41
3.1.6.1. Pluviometría (Meteorología)	41
3.1.6.2. Fluviometría	42
3.1.6.3. Monitoreo de pozos de observación DGA	42
3.1.6.4. Geolocalización de estaciones de la red	44
3.2. Sistemas de Agua Potable Rural	45

3.2.1.	Desarrollo provincial y comunal del Programa de APR	45
3.2.2.	Infraestructura y sistemas de la provincia	46
3.2.3.	Situación DAA Subterráneas en los APR	53
3.2.3.1.	Derechos otorgados y con dominio de Empresas Sanitaria	53
3.3.	Análisis de recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Red Hidrométrica Nacional	55
3.3.1.	Componente Hidrológica	55
3.3.1.1.	Análisis de precipitaciones	58
3.3.1.2.	Análisis de escorrentía superficial	64
3.3.2.	Análisis de niveles de agua subterránea en pozos de observación DGA	71
3.4.	Estudio de disponibilidad del Recurso Subterráneo	79
3.4.1.	Antecedentes	79
3.4.2.	Recarga y Demanda Subterránea	80
3.4.2.1.	Recarga	80
3.4.2.2.	Balance hídrico subterráneo	82
4.	Zonas de captación y APRs beneficiados	84
4.1.	Antecedentes	84
4.1.1.	Sectores para realizar nuevas captaciones	84
4.1.2.	APRs objetivo para abastecimiento de agua subterránea	87
4.2.	Resultados para la conceptualización del diseño de captaciones	90
5.	Diseño conceptual de pozos	93
5.1.	Metodología	93
5.2.	Criterios	95
5.3.	Resultados	106
5.3.1.	Sector Quebrada Ingenio	106
5.3.2.	Sector Río Grande	110
5.3.3.	Sector Río Guatulame	114
6.	Metodología, maquinaria y plazos de construcción	118
6.1.	Método de perforación de sondaje	118
6.2.	Maquinaria y materiales que se utilizan en la perforación	118
6.3.	Plazos de construcción	120
6.4.	Ejemplo de costos estimados de construcción de pozo profundo	122
7.	Conclusiones	123
	Bibliografía	126

Índice de Tablas

2.1.1.	Comparación de viviendas y población rural sin acceso a red de agua potable, según criterios del Censo 2017 y OCDE. Elaborado a partir de Censo 2017 (INE, 2018) y Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2019).	6
2.2.1.	Definiciones de categorías de población rural según su densidad. Elaborado a partir de Informe de Infraestructura Hidráulica de APR (2015)	8
2.2.2.	Catastro de Sistemas de APR de Chile, de acuerdo al tipo de población rural. Elaborado a partir de información recopilada en Subdirección de SSR.	9
2.2.3.	Catastro de arranques domiciliarios y población beneficiada en los Sistemas de APR. Elaborado a partir de información recopilada en Subdirección de SSR.	10
2.2.4.	Componentes del desarrollo del Programa de Agua Potable Rural. Fuente: Donoso et al. (2015).	13
2.2.5.	Marco institucional del Programa de Agua Potable Rural, con los organismos públicos y locales involucrados.	14
2.4.1.	Distribución de acuíferos en Chile. Fuente: DGA (2017b).	17
2.4.2.	Número de áreas de restricción y zonas de prohibición a nivel regional. Elaborado a partir de la Mapoteca Digital de la DGA, 2022.	20
2.5.1.	Desafíos de la GIRH sobre aspectos legales, de gestión e institucionales. Elaborado a partir de información disponible en Banco Mundial (2011)	22
2.5.2.	Resumen de los principales contenidos presentes en estrategias y políticas de Chile con respecto al agua. Elaborado a partir de Mesa Nacional del Agua (2020).	24
3.1.1.	Población total de las comunas de la provincia de Limarí, junto con el porcentaje de población urbana y rural. Elaborado a partir de INE (2019).	32
3.1.2.	SHAC de la Cuenca de Limarí, con característica de limitación. Fuente: DGA (2020).	36
3.1.3.	Caracterización y caudal de DAA de tipo consuntivo y permanente, concedidos en la Cuenca del Río Limarí según su ejercicio. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.	38
3.1.4.	Uso de las aguas de los DAA concedidos en la Cuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.	38
3.1.5.	SHAC de la Cuenca de Limarí, con característica de limitación. Fuente: DGA (2020). Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.	39
3.1.6.	Distribución de Estaciones Pluviométricas (Meteorológicas) en las distintas comunas de los provincia de Limarí.	41
3.1.7.	Distribución de Estaciones Fluviométricas en las distintas comunas de los provincia de Limarí.	42
3.1.8.	Distribución de Estaciones de Niveles de Pozos en la comuna de Ovalle. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA	43

3.1.9.	Distribución de Estaciones de Niveles de Pozos en las comunas de Combarbalá, Monte Patria, Punitaqui y Río Hurtado. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA	43
3.2.1.	Distribución comunal de Sistemas APR en la provincia de Limarí. Elaborado a partir de Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP.	45
3.2.2.	Sistemas APR de la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de información recopilada en Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).	49
3.2.3.	Sistemas APR de la provincia de Limarí (continuación 1). Elaboración propia a partir de información recopilada en Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).	50
3.2.4.	Sistemas APR de la provincia de Limarí (continuación 2). Elaboración propia a partir de información recopilada en Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).	51
3.2.5.	Caudal medio anual otorgado a Sistemas de APR con DAA. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA. . . .	53
3.2.6.	Caudal medio anual otorgado a Sistemas de APR con título de dominio de ex SEN-DOS. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA y DGA (2020c).	54
3.2.7.	Resumen de caudal y volumen total, para derechos otorgados y con título de dominio en Sistemas de APR.	54
3.3.1.	ID de Estaciones Pluviométricas y Fluviométricas de la DGA para analizar el régimen de subcuencas de la Cuenca del Río Limarí, con su respectivo número de datos. Elaboración propia a partir de Base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	57
3.3.2.	Descripción de los periodos de tiempo utilizados para la confección de las Curvas Estacionales. Elaboración propia.	58
3.3.3.	Valores de Caudal Medio Mensual en m ³ /s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Limarí en Panamericana (F2). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. .	65
3.3.4.	Valores de Caudal Medio Mensual en m ³ /s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Hurtado en Angostura (F18). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. .	66
3.3.5.	Valores de Caudal Medio Mensual en m ³ /s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Hurtado en San Agustín (F19). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. .	66
3.3.6.	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). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	67
3.3.7.	Valores de Caudal Medio Mensual en m ³ /s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Rapel en Junta (F9). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	67
3.3.8.	Valores de Caudal Medio Mensual en m ³ /s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Grande en Cuyano (F15). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA. .	68

3.3.9.	Valores de Caudal Medio Mensual en m ³ /s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Cogotí Embalse Cogotí (F5). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	69
3.3.10.	Valores de Caudal Medio Mensual en m ³ /s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Guatulame en El Tomé (F12). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	69
3.3.11.	Resumen de Componente Hidrológico en las Subcuencas del Limarí. Elaboración propia.	70
3.3.12.	ID de pozo de monitoreo DGA con cantidad de muestra en periodo 1992-2021. Elaboración propia a partir del Servicio Hidrométrico de la DGA.	71
3.3.13.	Definición de comportamientos de pozos de observación de la DGA. Elaboración propia.	76
3.4.1.	Estudios utilizados para analizar y evaluar disponibilidad de agua subterránea en la Cuenca del Río Limarí. Elaboración propia.	79
3.4.2.	Recarga subterránea de SHAC en la Cuenca del Río Limarí en m ³ /año, de acuerdo a resultados de informes de la DGA. Elaborado a partir de DGA (2008) y DGA (2020b).	80
3.4.3.	Balance Hídrico Subterráneo de la Cuenca del Río Limarí en m ³ /s, de acuerdo a diversos informes de respaldo. Elaborado a partir de DGA (2020a) y DGA (2020b)	82
4.1.1.	Caudal de extracción para interpretar índice de potencial de extracción en los sectores de continuidad hidrogeológica del Limarí. Elaboración propia a partir de Parra (2022).	85
4.1.2.	Variables que definen Vulnerabilidad y Amenazas para determinar el Ranking de Riesgo de Sistemas de APR en el Limarí. Fuente: DGA (2020c).	88
4.2.1.	Sistemas de APR seleccionados para el diseño conceptual de pozo profundo en el Sector de Quebrada Ingenio. Elaboración propia a partir de Observatorio de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).	91
4.2.2.	Sistemas de APR seleccionados para el diseño conceptual de pozo profundo en el Sector del Río Grande. Elaboración propia a partir de Observatorio de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).	91
4.2.3.	Sistemas de APR seleccionados para el diseño conceptual de pozo profundo en el Sector del Río Guatulame. Elaboración propia a partir de Observatorio de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).	92
5.2.1.	Dotación de agua potable en empresas sanitarias de la macrozona norte de Chile. Elaborado a partir de datos de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (2019).	95
5.2.2.	Tamaños de cribas. Fuente: Espinoza (2010).	100
5.3.1.	Determinación de las dimensiones y pérdidas de carga energética en las líneas de conducción en el Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia	108
5.3.2.	Cálculo del volumen de almacenamiento de estanque en sistema de captación y Sistemas de APR, Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia	108
5.3.3.	Pruebas de bombeo ejecutadas próximas al Sector Quebrada Ingenio. Fuente: APR Villaseca y CEAZA-FONDEF (2022).	108
5.3.4.	Valores promedio de Niveles Estáticos en pozos de observación DGA próximos al Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	108

5.3.5.	Cálculos del descenso en el nivel freático y de la profundidad del pozo profundo en el Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia	109
5.3.6.	Cálculos de la potencia de la bomba instalada en el pozo profundo el Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia	109
5.3.7.	Determinación de las dimensiones y pérdidas de carga energética en las líneas de conducción en el Sector Río Grande. Elaboración propia	112
5.3.8.	Cálculo del volumen de almacenamiento de estanque en sistema de captación y Sistemas de APR, Sector Río Grande. Elaboración propia	112
5.3.9.	Pruebas de bombeo ejecutadas próximas al Sector Río Grande. Fuente: CEAZA-FONDEF (2022).	112
5.3.10.	Valores promedio de Niveles Estáticos en pozos de observación DGA próximos al Sector Río Grande. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	112
5.3.11.	Cálculos del descenso en el nivel freático y de la profundidad del pozo profundo en el Sector Río Grande. Elaboración propia	112
5.3.12.	Cálculos de la potencia de la bomba instalada en el pozo profundo el Sector Río Grande. Elaboración propia	112
5.3.13.	Determinación de las dimensiones y pérdidas de carga energética en las líneas de conducción en el Sector Río Guatulme. Elaboración propia	116
5.3.14.	Cálculo del volumen de almacenamiento de estanque en sistema de captación y Sistemas de APR, Sector Río Guatulame. Elaboración propia	116
5.3.15.	Pruebas de bombeo ejecutadas próximas al Sector Río Guatulame. Fuente: CEAZA-FONDEF (2022).	116
5.3.16.	Valores promedio de Niveles Estáticos en pozos de observación DGA próximos al Sector Río Guatulame. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	116
5.3.17.	Cálculos del descenso en el nivel freático y de la profundidad del pozo profundo en el Sector Río Guatulame. Elaboración propia	116
5.3.18.	Cálculos de la potencia de la bomba instalada en el pozo profundo el Sector Río Guatulame. Elaboración propia	116

Índice de Ilustraciones

2.1.1.	Total de viviendas particulares ocupadas en área urbana y rural según origen del agua. Fuente: INE (2018)	6
2.2.1.	Distribución gráfica del Catastro de Sistemas de APR de acuerdo al tipo de población rural. Elaboración propia a partir de información recopilada en Subdirección de SSR.	9
2.2.2.	Distribución porcentual a nivel regional de las fuentes de agua para población con abastecimiento informal. Fuente: Fundación Amulén (2019).	11
2.4.1.	Distribución del agua subterránea y principales conceptos de interés sobre zonas del subsuelo. Fuente: Tarbuck y Lutgens (2005).	16
2.4.2.	Disponibilidad de agua en Chile por habitante al año 2016, dado la esorrentía total por región. Fuente: Llera et al. (2020).	18
2.4.3.	Distribución de los distintos volúmenes anuales a nivel de macrozonas en Chile. Elaborado a partir de Atlas de Agua (DGA, 2016).	19
2.4.4.	Recursos hídricos subterráneos calculados como descarga anual promedio. Fuente: McPhee et al. (2012).	19
2.6.1.	Evolución temporal embalse La Paloma, nivel freático pozo Alfalfares, altura de nieve cordillera de Santiago y caudal en estación Río Maipo. Fuente: CR2 (2015)	25
2.6.2.	Anomalía porcentual de precipitación total anual en Chile continental con respecto al promedio 1961-1990. Fuente: Dirección General de Aeronáutica Civil (2021).	26
2.7.1.	Incidencia de decretos de escasez hídrica por región durante los años 2008-2020. Fuente: Morales (2021).	27
3.1.1.	Delimitación de la provincia de Limarí con sus respectivas comunas. Elaboración propia a partir de información de la Mapoteca de la DGA y la BCN.	31
3.1.2.	Delimitación de cuencas situadas en la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de información de la Mapoteca de la DGA y del BCN.	33
3.1.3.	Caracterización climática de la provincia de Limarí, usando clasificación de Köppen-Geisger. Elaboración propia a partir de información de la IDE.	34
3.1.4.	Unidades Geomorfológicas en la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de datos de la Red CEDEUS.	35
3.1.5.	Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) y Áreas de Restricción en la Cuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de información de la Mapoteca de la DGA y del BCN.	37
3.1.6.	SHAC de la Cuenca del Río Limarí con los DAA Subterráneas concedidos. Elaboración propia a partir de Mapoteca y Base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.	40
3.1.7.	Distribución de Estaciones DGA Pluviométricas, Fluviométricas y de Niveles Estáticos de Pozos en la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA.	44

3.2.1.	Desarrollo de Sistemas de APR en la provincia de Limarí desde 1970 hasta el año 2018. Elaboración propia a partir de datos recopilados vía Portal de Transparencia a la Subdirección de SSR.	46
3.2.2.	Layout del Sistema de Agua Potable Rural San Marcos. Elaboración propia.	48
3.2.3.	Distribución de Sistemas de APR en la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, y Plataforma del Comité Técnico Hídrico de Coquimbo.	52
3.3.1.	Distribución de estaciones de monitoreo para el estudio de la Componente Hidrológica de la cuenca. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA.	57
3.3.2.	Curvas estacionales para Estaciones Pluviométricas en la Subcuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	59
3.3.3.	Curvas de duración para las Estaciones Pluviométricas M2 y M16 de la Subcuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	59
3.3.4.	Curvas estacionales para Estaciones Pluviométricas en la Subcuenca del Río Hurtado. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	60
3.3.5.	Curvas de duración para las Estaciones Pluviométricas M3 y M17 de la Subcuenca del Río Hurtado. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	60
3.3.6.	Curvas estacionales para Estaciones Pluviométricas en la Subcuenca del Río Grande. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	61
3.3.7.	Curvas de duración para las Estaciones Pluviométricas M9 y M11 de la Subcuenca del Río Grande. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	61
3.3.8.	Curvas de precipitación media anual histórica. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	62
3.3.9.	Curvas de duración para las Estaciones Pluviométricas M8 y M10 de la Subcuenca del Río Guatulame. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	62
3.3.10.	Precipitación media mensual histórica en estaciones pluviométricas de subcuencas del Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	63
3.3.11.	Serie de precipitaciones anuales históricas en estaciones pluviométricas de monitoreo en subcuencas del Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA	63
3.3.12.	Curva de Variación Estacional para Estación Fluviométrica Río Limarí en Panamericana (F2), Subcuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	65
3.3.13.	Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Hurtado. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	66
3.3.14.	Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Grande. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	68

3.3.15.	Curvas de Variación Estaciones Fluviométricas de la Subcuenca del Río Guatulame. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	70
3.3.16.	Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación DGA (P1-P12). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	72
3.3.17.	Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA (P12-P19). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	73
3.3.18.	Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA (P20-P28). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	74
3.3.19.	Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA (P29-P36). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	75
3.3.20.	Caracterización según comportamientos de nivel estático en pozos de observación de la DGA. Elaboración propia.	76
3.3.21.	Distribución espacial según comportamientos de nivel estático en pozos de observación de la DGA. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.	78
3.4.1.	Representación gráfica de valores de recarga subterránea de SHAC en la Cuenca del Río Limarí. Elaborado a partir de DGA (2008) y DGA (2020b).	81
3.4.2.	Representación gráfica del Balance Hídrico Subterráneo de la Cuenca del Río Limarí. Elaborado a partir de DGA (2020a) y DGA (2020b).	82
4.1.1.	Sectores de continuidad hidrogeológica definidos en la zona de estudio del proyecto para la Cuenca del Limarí, junto con las mediciones TEM. Fuente: CEAZA (2022).	85
4.1.2.	Mapa total de los Sectores de continuidad hidrogeológica seleccionados para el diseño conceptual de pozos profundos. Elaboración propia a partir de shapes obtenidos en la Sección de Descargas del Proyecto CEAZA-FONDEF.	86
4.1.3.	Sectores de continuidad hidrogeológica seleccionados con la clasificación del Índice de Potencial de Extracción. Fuente: Visualizador WEB Proyecto CEAZA-FONDEF www.aguasubterraneaLimarí.cl (2022).	87
4.1.4.	Categorización de Sistemas de APR en el Limarí de acuerdo al Ranking de Riesgo sobre complejidad de soluciones a problemáticas. Elaboración propia a partir de DGA (2020c).	88
4.1.5.	Distribución espacial de APRs según Ranking de Riesgo sobre complejidad de soluciones a problemáticas. Elaboración propia a partir de DGA (2020c).	89
4.2.1.	Sectores seleccionados con la zona de alto potencial de extracción para la construcción de pozos (recuadro rosa). Elaboración propia a partir de shapes obtenidos en la Sección de Descargas del Proyecto CEAZA FONDEF.	91
5.2.1.	Sistema captante a través de cribas. Fuente: Rickmann (2001)	101
5.2.2.	Modelo conceptual de profundidad de pozo. Elaboración propia.	102
5.2.3.	Caracterización geométrica del cono de abatimiento de pozo, con niveles y descensos en puntos de observación. Fuente: Sanchez (2022).	104
5.2.4.	Selección pruebas de bombeo utilizando el producto web del CEAZA, para determinar transmisividad. Fuente: Visualizador WEB Proyecto CEAZA-FONDEF www.aguasubterraneaLimarí.cl (2022).	104
5.2.5.	Esquema con especificaciones tipo de un pozo profundo. Fuente: Espinoza (2010).	105

5.3.1.	Perfil transversal visto aguas abajo en el Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia.	106
5.3.2.	Corte perfil transversal Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia.	106
5.3.3.	Ubicación de captación y estanque de almacenamiento, junto con línea de distribución para abastecimiento en APRs en el Sector Quebrada Ingenio.	107
5.3.4.	Layout del sistema de captación, conducción y almacenamiento del Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia.	107
5.3.5.	Diseño conceptual de pozo profundo en Sector Quebrada Ingenio, con dimensiones características. Elaboración propia.	109
5.3.6.	Perfil transversal visto aguas abajo en el Sector Río Grande. Elaboración propia. .	110
5.3.7.	Corte perfil transversal Sector Río Grande. Elaboración propia.	110
5.3.8.	Ubicación de captación y estanque de almacenamiento, junto con línea de distribución para abastecimiento en APRs en el Sector Río Grande. Elaboración propia.	111
5.3.9.	Layout del sistema de captación, distribución y almacenamiento del Sector Río Grande. Elaboración propia.	111
5.3.10.	Diseño conceptual de pozos profundo en Sector Río Grande, con dimensiones características. Elaboración propia.	113
5.3.11.	Perfil transversal visto aguas arriba en el Sector Río Guatulame. Elaboración propia.	114
5.3.12.	Corte perfil transversal Sector Río Guatulame. Elaboración propia.	114
5.3.13.	Ubicación de captación y estanque de almacenamiento, junto con línea de distribución para abastecimiento en APRs en el Sector Río Guatulame. Elaboración propia.	115
5.3.14.	Layout del sistema de captación, distribución y almacenamiento del Sector Río Guatulame. Elaboración propia.	115
5.3.15.	Diseño conceptual de pozos profundo en sector Río Guatulame, con dimensiones características. Elaboración propia.	117
6.2.1.	Perforadora Drilltech D40K.	119
6.2.2.	Tubería de perforación.	119
6.2.3.	Barrena utilizada para la perforación de pozos profundos de agua.	120
6.3.1.	Etapas de construcción de pozos profundos. Elaboración propia.	120
6.4.1.	Ejemplos de costos en obra de construcción de pozo profundo en comuna de Lampa, Región Metropolitana. Fuente: Departamento de riego Región Metropolitana.	122

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad el cambio climático es uno de los principales agentes que interviene en los contextos de crisis hídrica, que se han agudizado debido a largas temporadas de sequía, las cuales resultan ser unas de las problemáticas más latentes en todo el mundo, de las que Chile no ha estado exento. Sin ir más lejos, el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)² apunta que desde el año 2010 se evidencia una clara tendencia de déficit de precipitaciones, donde los territorios comprendidos entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía han sufrido una disminución cercana al 30 % de precipitación (CR2, 2015).

Ante dicho escenario de variabilidad climática, uno de los principales afectados dentro de la sociedad resultan ser las organizaciones rurales de agua potable, denominadas actualmente Sistemas Sanitarios Rurales (SSR), según la Ley N° 20.998, o como comúnmente se conocen, Sistemas de Agua Potable Rural (APR). Lo anterior ocurre ya que el factor climático es una componente relevante dentro de la recarga efectiva que se tiene en las aguas subterráneas confinadas en acuíferos o almacenadas en capas subsuperficiales del suelo (DGA, 2017), ya que una reducción de las precipitaciones logra desencadenar un efecto negativo en las aguas superficiales, produciendo una menor recarga al sistema subterráneo y generando así condiciones de baja disponibilidad del recurso, que se entiende vital para el abastecimiento de agua potable en localidades rurales de la macrozona norte de Chile.

Junto con ello, con el paso de los años las demandas por el recurso hídrico han aumentado en las localidades rurales debido a factores demográficos. Sobre el desarrollo de la población rural y su crecimiento en la Región de Coquimbo, si bien la tendencia en los últimos años ha estado marcada por una reducción porcentual a nivel regional, que ha pasado de un 21,9% de población rural en el año 2002 a un 18,8% en el año 2017, la cantidad absoluta de gente que habita territorios rurales ha tenido un crecimiento cercano al 7,8%, ya que al año 2002 se registraba un total de 132.103 personas en esa situación, cantidad que aumentó para el año 2017 donde se registraron 142.470 personas en contextos rurales (INE, 2018).

De esta manera, la presente tesis tiene su foco de interés en los Sistemas de APR localizados en la provincia de Limarí, Región de Coquimbo, en la cual se ubica la Cuenca del Río Limarí que se entiende como el principal sistema hidrográfico de la zona, y que se encuentra situada entre el valle del Río Elqui en su límite norte y el Río Choapa al sur.

Para abordar el siguiente trabajo, se entiende que la principal unidad de estudio es la cuenca hidrográfica del Río Limarí (Código Banco Nacional de Aguas [BNA] 045), por ende, se recopila la información bibliográfica de los principales servicios nacionales disponibles y en línea, como por ejemplo: bibliotecas digitales (CIREN, BCN, Catálogo Documental de la Dirección General de Aguas [DGA], etc), Portal de Transparencia, Observatorio Georeferenciado DGA, Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas de la DGA), entre otros. Con dicha información se procede a estudiar las componentes hidrológicas e hidrogeológicas de la provincia de Limarí, para así analizar la disponibilidad de agua subterránea para el abastecimiento de las localidades rurales desde una perspectiva sustentable, entendiendo el rol de la ingeniería en la sociedad, ecosistemas y el medio ambiente, dotando así a las poblaciones locales, muchas veces invisibilizadas, de herramientas robustas para poder suplir necesidades y dar soluciones a problemáticas de recursos hídricos mediante el diseño de sistemas de pozos profundos.

1.1. Motivación

Chile a lo largo de toda su extensión presenta distintos tipos de climas, dentro de los cuales se observan cuatro macrozonas en las que se presentan diferentes condiciones sobre recursos hídricos, climas áridos a semiáridos, mediterráneos, templado lluvioso a marítimo lluvioso y regímenes pluviales oceánicos, respectivamente (DGA, 2016); lo que denota una clara heterogeneidad hídrica. Esto se traduce en que las zonas del norte del país tienen una menor oferta de aguas para el abastecimiento de actividades en comparación a la abundancia de oferta que tiene la zona sur, lo que genera un problema que repercute de manera directa a las comunidades rurales que se benefician del recurso hídrico, las cuales se han visto perjudicadas por no tener fuentes y abastecimientos formales de agua potable.

El problema se complica cuando las localidades rurales agotan sus recursos (humanos, financieros, tecnológicos) para el abastecimiento de agua, y debe activarse la acción de suministro de agua por parte de gobernaciones regionales o municipalidades, las que muchas veces también presentan carencias relacionadas a la gestión y administración hídrica, generando así un aumento en la brecha y la desigualdad en la distribución de agua en el país (Fundación Newenko, 2019).

Otra problemática ligada al agua y a sus usos es el de la propiedad sobre el agua, la cual se ha favorecido gracias al modelo económico de competencia imperante en la sociedad chilena, donde los principales sectores económicos del país, como los son el sector eléctrico, el sector minero y el sector agroexportador son los que poseen una concentración mayoritaria de la propiedad sobre el recurso (Villaroel, 2012), dejando en una posición desfavorable a las personas que han visto como la disponibilidad del agua para uso doméstico, ganadero o agrícola ha mermado con respecto a otras épocas. Sin embargo, nuevas reformas al Código de Aguas han dispuesto la priorización de los usos de consumo humano y saneamiento respecto de otros usos productivos, por lo que la situación que se mencionaba anteriormente, y que ha sido tema de discusión en diversas mesas de diálogo, debería tener cambios considerables en el corto y mediano plazo.

Dentro de esta situación, el Programa de APR desde su nacimiento y a lo largo de su operación ha servido como sostén no tan sólo para el desarrollo económico de las comunidades rurales, sino que también para fomentar la integración social de aquella población, gracias a la generación de condiciones óptimas relacionadas al abastecimiento de agua potable, a través de sistemas autogestionados por los mismos habitantes del territorio rural (Villaroel, 2012).

Sin perjuicio de lo anterior, estos sistemas autogestionados que operan como Comités o Cooperativas, no se encuentran ajenos a problemáticas de operación y gestión. Sobre el primer componente se evidencian falencias en los sistemas de distribución y abastecimiento del recurso, ya que existen muchos APRs con presencia de altas tasas de pérdidas de aguas producidas en ocasiones por una infraestructura ineficiente, trabajos de pavimentación en calles, arranques ilegales, entre otras, lo que a la larga provoca una sobreestimación de los requerimientos del recurso en las comunidades (DGA, 2020c). Para complementar lo anterior, Villaroel (2012) afirma que:

“Para una adecuada continuidad en los sistemas comunitarios de APR se requiere abordar las múltiples deficiencias, tanto en los ámbitos de operación y gestión, como en la entrega y asignación de recursos para inversión, asistencia técnica, capacitación, entre otros. Para ello, es necesario contar con un marco legal integral para el Agua Potable Rural en Chile, que permita resguardar el territorio de operación de los servicios rurales, considerar el crecimiento urbano futuro y regular un conjunto de materias que a la fecha se encuentran desatendidas en el sector rural y en la normativa vigente.” (Villaroel, 2012, p. 11).

Sobre conceptos de sobreotorgamiento y sobreexplotación de acuíferos en el país, el Banco Mundial en su documento denominado *Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos* (2011), sostiene que dentro de las causas de estas situaciones se tiene la mala gestión por parte de la DGA en el uso previsible de las aguas subterráneas, sin la correcta implementación de medidas sostenibles y sin un conocimiento adecuado sobre el comportamiento de flujos y almacenamientos en el subsuelo, lo que a la larga ha provocado un deterioro de la sustentabilidad del recurso subterráneo y un daño en los ecosistemas y localidades. Esto da cuenta de que no tan sólo la administración rural tiene fallas, sino que también organismos públicos pueden realizar malas gestiones que repercuten en la mantención de la seguridad hídrica.

A pesar de todo, dentro de estos escenarios las zonas rurales deben seguir subsistiendo mediante la operación de los Sistemas de APR, de los cuales en el Limarí existe una tendencia marcada de uso de fuentes subterráneas mediante la utilización de pozos para su aprovechamiento. Por ende, es relevante conocer la situación actual de los acuíferos, sobre todo en aquellas zonas donde exista una aguda competencia por el recurso frente a fenómenos de sequía y escasez hídrica, como ocurre precisamente en la provincia de Limarí y la macrozona norte de Chile. Entendiendo que los sistemas de agua subterránea son propensos a experimentar cambios ante agentes externos actuando sobre él, la relevancia que toma la realización de mediciones del nivel de agua en pozos de observación es muy útil como fuente de información para la componente hidrológica e hidrogeológica, en la que se puede evaluar la afectación sobre procesos de recarga, almacenamiento y descarga de aguas subterráneas. De esta manera, la sistematización a largo plazo de niveles de pozos proporcionan datos esenciales para evaluar las variaciones durante el paso de los años, para posteriormente desarrollar modelos y pronósticos de tendencias para diseñar, implementar y monitorear la efectividad de protección y manejo integrado de los acuíferos (Taylor y Alley, 2001).

En consecuencia, uno de los fuertes motivos para desarrollar el tema de tesis es poder servir como una representación del mundo rural en la provincia de Limarí, mediante los aprendizajes y conocimientos adquiridos, para así contribuir de manera positiva en las localidades mediante la entrega de herramientas que vayan en línea con el robustecimiento de los Sistemas de APR, generando así un vínculo directo entre la ingeniería civil y las comunidades rurales. También, para que a futuro las brechas existentes en relación al recurso hídrico disminuyan.

1.2. Objetivos

Para el desarrollo y ejecución del presente informe de título se plantean los siguientes objetivos:

1.2.1. Objetivo general

Estudiar la suficiencia y capacidad de pozos profundos construidos para abastecimiento de agua potable en Sistemas de Agua Potable Rural (APR), y determinar déficits del recurso hídrico existente en Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento común (SHAC), para así proponer la construcción de nuevos pozos que permitan asegurar el abastecimiento del recurso hídrico.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo se detallan a continuación:

1. Abordar bibliografía pertinente para determinar la situación hídrica de la provincia de Limarí, disponibilidad de recursos destinados para abastecimiento de agua potable en comunidades rurales, junto con la ubicación y potencia de fuentes de agua.
2. Analizar antecedentes disponibles de la Cuenca de Limarí y Sistemas de APR, ya sea mediante análisis de informes técnicos, estudios hidrogeológicos, planes de gestión hídrica y/o reportes de pozos de observación de la Dirección General de Aguas (DGA); para así determinar zonas aptas o nuevos puntos de captación de agua subterránea para Sistemas de APR.
3. Determinar y diseñar a nivel de ingeniería conceptual un número razonable de pozos necesarios a construir.
4. Estimar las capacidades de los pozos, estimación de caudales posibles a extraer, definiendo además las líneas de distribución del agua.
5. Determinar la metodología de construcción, equipamiento, maquinaria y plazos de construcción.

Capítulo 2

Marco Teórico

Antes de iniciar con el desarrollo del trabajo de título, es necesario generar la contextualización y conceptualización de ideas y definiciones que ayuden a entregar un mayor entendimiento acerca del desarrollo del estudio. Es por esto que a continuación se procede a detallar en subcapítulos las principales temáticas que serán tratadas, las cuales fueron abordadas mediante la lectura y análisis de bibliografía disponible pertinente.

2.1. Ruralidad y agua potable

Chile es un país que presenta una amplia heterogeneidad no tan solo en el ámbito de paisajes, climas o de la cultura intrínseca de las comunidades que habitan el territorio, sino que también lo es por la particularidad geográfica de los asentamientos humanos que influye en la demografía de la población. Todo lo anterior genera una diversidad de ciudades y pueblos que se traducen en áreas de tipo urbanas y áreas de tipo rural, distribuidas a lo largo y ancho de la nación.

El INE (2018) define un “área urbana” como una entidad con continuidad y concentración de construcciones en un amanzamiento regular con población mayor a 2.000 habitantes; o por otro lado entre 1.001 y 2.000 habitantes donde menos del 50% de los trabajadores pertenezca a actividades primarias (ganadería, agricultura, minería, entre otras). Por otro lado, un “área rural” corresponde a un asentamiento que posee 1.000 o menos habitantes; o entre 1.001 o 2.000 habitantes, con menos del 50% de su población económicamente activa dedicada a actividades secundarias (industria, construcción, servicios de energías, entre otras) y/o terciarias (comercio, financieras, profesionales, entre otras).

El Censo del año 2017 establece que la población rural representa un 12,2% de la población total (17.574.003 de personas), distribuida en 962.894 hogares particulares que tienen procedencia rural, de los cuales 324.276 viviendas particulares ocupadas no tienen acceso a la red pública de agua potable (47,2%) y se tienen que abastecer de otras fuentes de agua potable, como: pozos o norias (58,8%); río, vertiente, estero, canal, lago, etc (25,8%) y camión aljibe (15,4%). Caso contrario ocurre con las viviendas particulares, donde 4.723.108 viviendas tienen acceso a la red pública (INE, 2018), tal como se detalla en la Figura 2.1.1. En base a los datos recopilados en el Censo 2017 con respecto a la población rural del país (2.149.469 de personas) y la cantidad de hogares particulares en zonas rurales (962.894), se puede estimar la cantidad de habitantes por vivienda rural, mediante el cociente entre ambos números, donde se obtiene que habitan 2,23 personas por hogar rural, sin embargo, este número es inferior al promedio que estipula el censo sobre personas

encuestadas, donde la cantidad de personas por hogar se establece como 3,1. A pesar de aquello, para el caso del presente estudio, se considera el tamaño medio de 3,1 por hogar rural determinado por el Censo 2017 (INE, 2018).

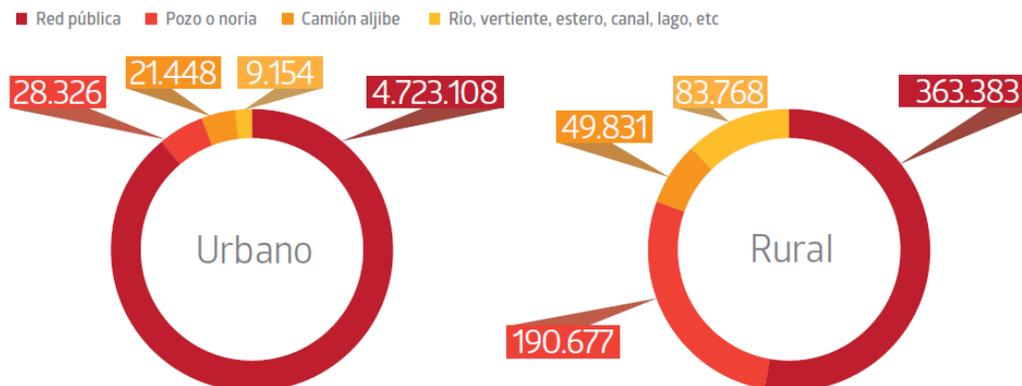


Figura 2.1.1: Total de viviendas particulares ocupadas en área urbana y rural según origen del agua. Fuente: INE (2018)

Con respecto a la ruralidad del territorio nacional, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) a lo largo de los años ha desarrollado criterios que permiten ajustar la interconexión poblacional de las comunidades debido al desplazamiento de estas últimas a centros urbanos junto con factores de densidad territorial, teniendo así distintas definiciones de las poblaciones anteriormente señaladas. En base a dicho criterio, la OCDE estima que un 25,5 % de la población total del país habita en áreas rurales (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2019), valor muy superior al criterio adoptado en el Censo del año 2017.

Ahora bien, sabiendo que el Censo del 2017 arrojó que Chile tiene una población total de 17.574.003 habitantes, que las viviendas rurales son habitadas en promedio por 3,1 personas y que además un 47,2 % de los hogares rurales no tienen acceso a la red pública, se procede a realizar un cuadro comparativo de los dos organismos mencionados anteriormente, para así estimar la cantidad de personas que no cuentan con el recurso asegurado mediante redes de agua potable y constatar las diferencias entre ambos (Ver Tabla 2.1.1).

Tabla 2.1.1: Comparación de viviendas y población rural sin acceso a red de agua potable, según criterios del Censo 2017 y OCDE. Elaborado a partir de Censo 2017 (INE, 2018) y Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2019).

	Censo 2017	OCDE
% de población rural	12,2%	25,5%
Número de población rural	2.149.469	4.478.092
Número de viviendas rurales	962.894	1.444.545 ⁽¹⁾
Número de viviendas sin acceso a red	324.276 ⁽²⁾	947.829 ⁽³⁾
Número de población sin acceso a red	1.005.255	2.938.269

⁽¹⁾ Se utiliza el valor medio de 3,1 personas por hogar para determinar las viviendas rurales.

⁽²⁾ Valor del total de viviendas rurales particulares ocupadas, sin acceso a la red pública. Fuente: INE (2018).

⁽³⁾ Valor obtenido según el porcentaje de viviendas rurales sin acceso a la red pública, correspondiente al 47,2 % del total. Fuente: INE (2018).

De lo anterior se puede constatar que existen marcadas diferencias en los parámetros establecidos por organismos nacionales e internacionales con respecto al suministro de agua potable de la población, por lo que da a entender que Chile presenta falencias relacionadas a las políticas rurales de índole formal y que sean robustas para así generar un mejor entendimiento de ellas. Según la OCDE (2016), Chile no presenta una política con enfoque territorial que a su vez sea integral para el desarrollo y fomento de las zonas rurales, muy por el contrario, posee políticas sectoriales para actividades relacionadas a la extracción de recursos naturales y agricultura, y algunas medidas para prestación de servicios públicos, que están muy lejos de las definiciones de estándares internacionales.

En línea con lo anterior, si bien a nivel local los medios rurales han presentado avances debido a la mejora en la conectividad y cobertura de servicios básicos, estos han sido mínimos y no se ha generado un gran cambio a nivel de políticas públicas que le den mayor institucionalidad al medio en cuestión, ni tampoco se ha otorgado un mayor protagonismo a la ciudadanía que habita dichas tierras, donde muy por el contrario este segmento de la población se ha visto excluido del problema central, generando así una marcada condición de desigualdad y bajo nivel de descentralización en las zonas rurales (Bustos et al, 2021). Por ello, es relevante establecer vínculos con pueblos rurales los cuales muchas veces carecen de los medios necesarios para tener crecimientos adecuados a los tiempos actuales, en la que avances tecnológicos e innovaciones permiten lograr resultados óptimos en plazos deseados.

2.2. Programa de Agua Potable Rural

2.2.1. Contexto nacional, principales aspectos y cobertura del programa

Durante las décadas del 30 al 60 la población chilena experimentaba grandes cambios en el ámbito socioeconómico y territorial, que se vieron influenciados en gran medida por políticas y reformas que buscaban fortalecer el sustento de la nación, en lo que se llamó la transición socioeconómica (Villalón y Vera, 2012). Una de las aristas que se vio influenciada por esta ola de cambios fue la ligada al mundo rural, debido a la Reforma Agraria de 1962 que implantó lineamientos en institucionalidad, explotación de tierras, desarrollo y producción.

Sin embargo, existían problemas en las zonas rurales relacionados a las condiciones insalubres en la que vivía la población rural, lo que se tradujo en una alta tasa de mortalidad, especialmente infantil, asociada a la ingesta de agua no potable. Debido a ello, en el año 1964 se origina en Chile el Programa de Agua Potable Rural, como una respuesta pública a las condiciones precarias de las comunidades rurales. El Programa de APR comienza con la adopción del Plan Básico de Saneamiento Rural, que fue establecido con compromisos vigentes en la “Resolución de la XII Asamblea Mundial de la Salud”, del año 1959, que estableció como eje principal del Estado las tareas sobre abastecimiento público de agua; junto con ello, el plan también se configuró por el acuerdo “Carta de Punta del Este” del año 1961, que fue firmada por Ministros de Salud latinoamericanos y que estableció como objetivo principal el abastecimiento de agua potable al 50% de la población rural para las décadas del 60-70.

Actualmente, el Programa de APR de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) pertenece al Ministerio de Obras Públicas, y tiene como misión abastecer de agua potable a los asentamientos rurales, contribuyendo así al desarrollo económico y a la integración de las comunidades en el

ámbito social. Los objetivos que se establecen (MOP, 2019a) son:

1. Dotar de agua potable al mundo rural, según calidad, cantidad y continuidad de acuerdo con la normativa chilena.
2. Generar una participación responsable y permanente de los pobladores rurales, quienes son los encargados de efectuar la administración del servicio una vez que se construye

En sus inicios el programa buscaba suplir las necesidades de saneamiento, salud y bienestar en la población rural residente en localidades con un mínimo de 100 habitantes y un máximo de 1.000, con una concentración de 40 viviendas por kilómetro de red de agua potable; esta categoría fue denominada población rural concentrada. Sin embargo, con el paso de las décadas, se alcanzó cobertura total de la población rural concentrada, lo que sumado a los cambios estructurales del mundo rural, hizo necesario introducir nuevas categorías y definiciones para fortalecer el programa de agua potable (Donoso et al., 2015). De esta manera, hoy el MOP en conjunto con la DOH diferencian a la población rural en tres categorías, las cuales se estructuran en función a la densidad poblacional como: población rural concentrada, población rural semiconcentrada y población rural dispersa. En la Tabla 2.2.1 se presentan las definiciones de las categorías mencionadas.

Tabla 2.2.1: Definiciones de categorías de población rural según su densidad. Elaborado a partir de Informe de Infraestructura Hidráulica de APR (2015)

Población rural	Definición ⁽¹⁾
Concentrada	Asentamiento en el cual residen entre 150 a 3.000 habitantes y se tiene una concentración mínima de 15 viviendas por km de red de agua potable.
Semi-concentrada	Asentamiento en el cual reside un mínimo de 80 habitantes y se tiene una densidad de a lo menos 8 viviendas por km de red de agua potable.
Dispersa	Asentamiento en el cual residen menos de 80 habitantes y se tiene una densidad menor a 8 viviendas por km de red de agua potable.

⁽¹⁾ Las definiciones son adoptadas según lo expuesto en el informe de Donoso et al., 2015.

A raíz de las nuevas definiciones introducidas, el programa plantea el objetivo de contribuir a mejorar las condiciones de salud y bienestar de la población rural, cuyo propósito es que aquellas personas que habitan en localidades rurales concentradas y semi-concentradas accedan a un sistema de agua potable que provea un servicio en cantidad, calidad y continuidad; que vaya en los lineamientos de la normativa vigente. Para lo anterior el programa proporciona a las comunidades la infraestructura necesaria para la administración, operación y mantención del servicio de agua potable rural, cumpliendo con los requisitos establecidos en la metodología y evaluación del Ministerio de Desarrollo Social y de Familia. La infraestructura es proporcionada a la comunidad mediante la constitución por parte del Ministerio de Obras Públicas de organizaciones comunitarias, las cuales pueden operar como Comités o Cooperativas de agua potable.

De acuerdo a información oficial vigente de sistemas de APR que dispone la Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales (SSR), con fecha de levantamiento diciembre del año 2021, existen 2.306 Sistemas de APR repartidos a lo largo del país, que se distribuyen en 1.582 (69 %) en población rural concentrada, 425 (18 %) en población rural semiconcentrada y 299 (13 %) en población rural dispersa. Lo anterior se detalla en la Tabla 2.2.2 y se puede apreciar gráficamente en la Figura 2.2.1.

Tabla 2.2.2: Catastro de Sistemas de APR de Chile, de acuerdo al tipo de población rural.
Elaborado a partir de información recopilada en Subdirección de SSR.

Región	Concentrado	Semiconcentrado	Dispersos	Sistemas APRs	% del total
XV Arica y Parinacota	16	11	0	27	1,2
I Tarapacá	15	8	0	23	1,0
II Antofagasta	8	5	2	15	0,7
III Atacama	34	8	7	49	2,1
IV Coquimbo	173	30	12	215	9,3
V Valparaíso	156	10	27	193	8,4
RM Metropolitana	103	10	0	113	4,9
VI O'higgins	212	9	0	221	9,6
VII Maule	269	26	7	302	13,1
XVI Ñuble	100	23	68	191	8,3
VIII Biobio	77	39	65	181	7,8
IX La Araucanía	184	75	23	282	12,2
XIV Los Rios	71	62	53	186	8,1
X Los Lagos	124	95	35	254	11,0
XI Aysén	30	13	0	43	1,9
XII Magallanes	10	1	0	11	0,5
Total	1.582	425	299	2.306	100

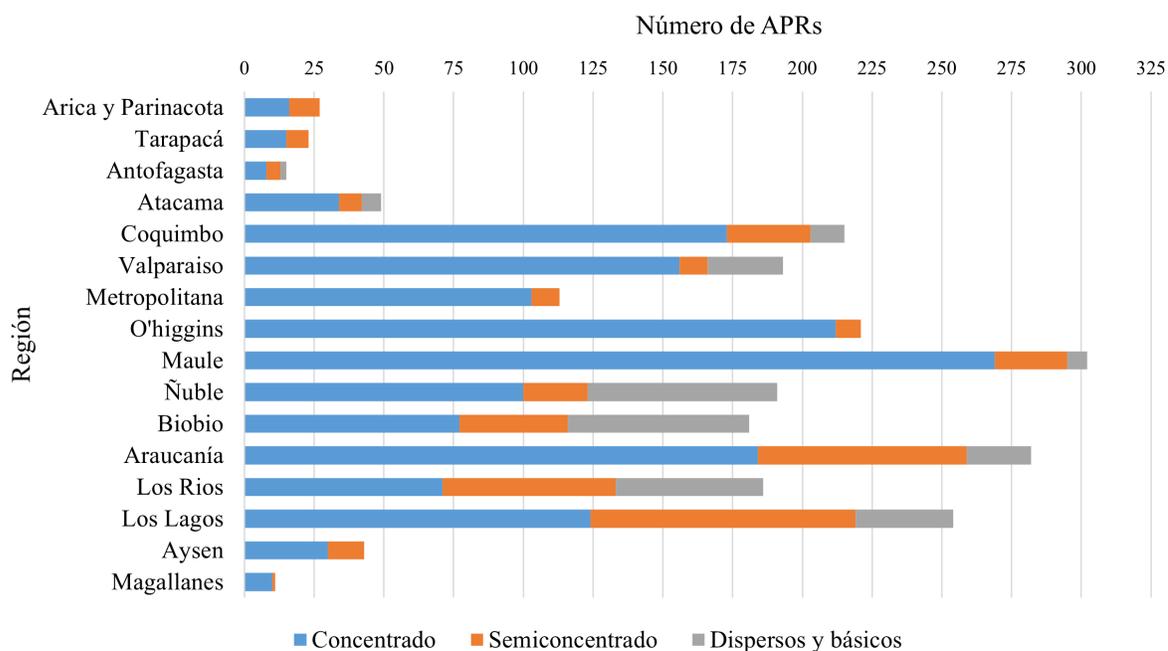


Figura 2.2.1: Distribución gráfica del Catastro de Sistemas de APR de acuerdo al tipo de población rural. Elaboración propia a partir de información recopilada en Subdirección de SSR.

Con respecto a la cantidad de arranques domiciliarios, que corresponden a la instalación domiciliaria de agua potable que está situada entre la cañería matriz y la llave de paso posterior al medidor de caudal, en la Tabla 2.2.3 se observa la distribución por región junto a la respectiva cantidad de población beneficiada con los sistemas de APR. Además, se aprecia que la mayor cantidad de población favorecida se concentra en la macrozona central (Regiones V, RM, VI, VII y XVI), y que en la macrozona norte la IV Región de Coquimbo representa una porción relevante tomando en cuenta la población total.

Tabla 2.2.3: Catastro de arranques domiciliarios y población beneficiada en los Sistemas de APR.
Elaborado a partir de información recopilada en Subdirección de SSR.

Región	Número de arranques	Población beneficiada ⁽¹⁾	% de población total
XV Arica y Parinacota	4.820	14.930	0,7
I Tarapacá	3.601	11.154	0,5
II Antofagasta	4.531	14.040	0,7
III Atacama	6.503	20.139	1,0
IV Coquimbo	52.732	163.380	7,8
V Valparaíso	61.483	190.524	9,1
RM Metropolitana	65.692	205.013	9,8
VI O'higgins	107.717	333.825	15,9
VII Maule	112.180	347.625	16,5
XVI Ñuble	45.278	140.367	6,7
VIII Biobio	42.333	131.160	6,2
IX La Araucanía	56.510	175.690	8,4
XIV Los Rios	46.000	146.038	7,0
X Los Lagos	56.722	178.197	8,5
XI Aysén	8.348	25.860	1,2
XII Magallanes	1.030	3.194	0,2
Total	675.480	2.101.136	100

⁽¹⁾ La población beneficiada se determina con la razón de 3,1 habitantes por vivienda, según el Censo 2017 (INE, 2018).

La relevancia del agua subterránea y de cómo el agua potable ha beneficiado a comunidades rurales es recogida, estudiada y analizada por la Fundación Amulén, la cual tiene como misión desarrollar e implementar sistemas de acceso a agua potable de forma segura y sostenida para mejorar la calidad de vida de comunidades catalogadas como vulnerables en Chile. La fundación publicó un informe con carácter de estudio denominado *Radiografía del agua potable rural de Chile: visualización de un problema oculto* (2019), donde se menciona que la cobertura de la población rural que tiene agua potable alcanzó la cifra del 53% al año 2018, lo que es un impacto positivo en la vida de aquellas familias. Si bien la cobertura resulta total para la población rural concentrada y parcial para la población rural semiconcentrada, no se tienen avances positivos para las localidades dispersas, donde se presenta una gran cantidad de viviendas sin abastecimiento formal, el cual debe ser complementado con soluciones costosas e innovadoras que quedan fuera de los límites tradicionales de soluciones aplicadas para los APR en localidades concentradas o semiconcentradas (Fundación Amulén, 2019).

Además, se recalca que la situación que se presenta no es estática, si no que más bien posee un comportamiento dinámico, debido al crecimiento demográfico nacional, allegados o la expansión

considerable de inmigrantes en áreas urbanas o comunidades rurales, lo que implica una agilización de gestiones por parte de los comités para expandir o ampliar los APR, lo que conlleva una importante inversión que no siempre es abundante ya que las fuentes de abastecimiento necesarias para poder satisfacer las necesidades no se encuentran. Estas limitaciones económicas impiden poder fortalecer los sistemas cooperativos de APR (McPhee et al., 2012), ya que la responsabilidad no siempre recae en la Gobernación Regional o Municipios, sino que, el peso de responsabilidades lo tienen las mismas comunidades que son administradas por dirigentes locales.

En relación a las fuentes de abastecimiento de agua en las comunidades, la macrozona norte del país la mayor participación de fuentes de agua para la población con abastecimiento informal (donde se tienen localidades semiconcentradas y dispersas) corresponde a camiones aljibe, lo que se entiende por los constantes periodos de escasez; por otro lado en la macrozona central se presenta una clara tendencia al abastecimiento a través de pozos o norias; por último, para la macrozona sur la fuente de abastecimiento informal mayoritaria por región es la correspondiente a ríos, vertientes o esteros, los cuales la mayoría del año disponen de un gran caudal circulando en su lecho fluvial (Fundación Amulen, 2019). Lo anterior se detalla particularmente por región en la Figura 2.2.2.

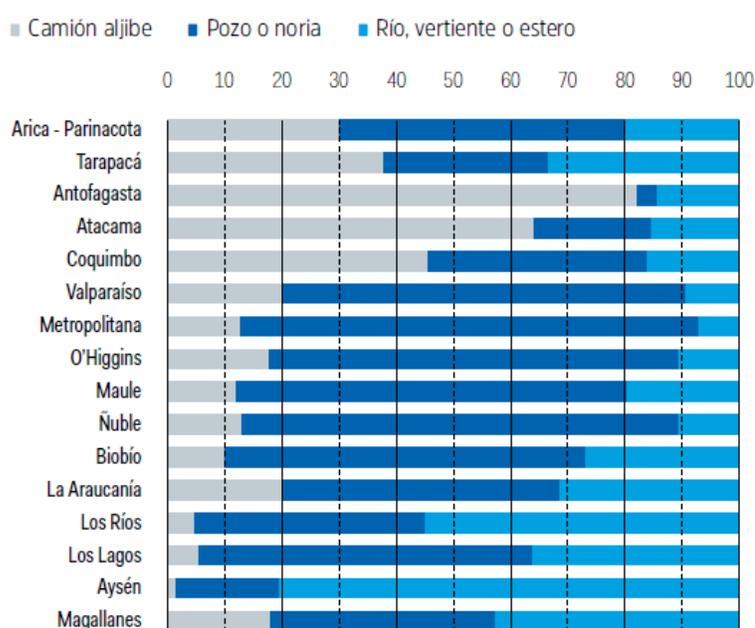


Figura 2.2.2: Distribución porcentual a nivel regional de las fuentes de agua para población con abastecimiento informal. Fuente: Fundación Amulén (2019).

Ahora, a nivel nacional la principal fuente de abastecimiento esta ligada a los pozos o norias, la cual representa más de la mitad de las fuentes de agua para población con abastecimiento informal (Fundación Amulén, 2019). De esta manera se puede entender la importancia que otorga el recurso subterráneo para las comunidades rurales que no tienen acceso directo al agua, sobre todo las que están localizadas en zonas del norte de Chile donde la escasez es una realidad que se vive todos los días.

A pesar de lo valioso que resulta el recurso hídrico subterráneo, se tiene poca claridad sobre la percepción de este debido a que su ambiente resulta muchas veces confuso ya que esta oculto a simple vista, lo que genera poco entendimiento, subestimación en las dotaciones, malas gestiones administrativas y sobreexplotación por parte de usuarios particulares. Todo lo anterior, da a entender que no se puede pasar por alto el gran potencial que posee el almacenamiento de aguas subterráneas y que la gestión de ellas debe ser aplicada de manera responsable. Para ello, la gobernanza de las aguas subterráneas debe contemplar la protección de las zonas de donde se extrae y recarga el recurso, junto con incluir normas sobre el desarrollo sostenible, control de extracciones y el uso; comprendiendo que para muchas poblaciones rurales del mundo el agua subterránea es la única forma viable que permite extender el acceso básico de agua potable sin problemas (UNESCO, 2022).

Uniendo todo lo detallado anteriormente, se evidencia que hasta hoy el Programa de Agua Potable Rural ha sido efectivo en gran parte de las localidades rurales con respecto a su justificación inicial relacionada al ámbito de la sanidad pública. Sin perjuicio de lo anterior, aún existen localidades (semiconcentradas y dispersas) que tienen fuentes de abastecimiento informales, por ende, se requieren soluciones que abarquen dimensiones políticas, técnicas, económicas, legales y sociales; que busquen el propósito común de otorgar bienestar a la población rural que carece de manera óptima o estable del recurso básico de agua potable (MOP, 2019b).

2.2.2. Estructura, desarrollo y marco institucional del programa

Ahora, sobre la estructura y desarrollo del programa, éste se organiza en torno a tres componentes principales para poder lograr la producción de bienes, servicios y productos, los cuales son:

1. Infraestructura de agua potable entregada a localidades rurales que no cuenta con un servicio de APR
2. Mejoramiento, ampliación y conservación de Infraestructura de APR
3. Supervisión y asesorías técnicas a Comités y Cooperativas de APR

La Tabla 2.2.4 describe de manera sintetizada cada uno de los componentes mencionados, los cuales forman parte de la estructura del programa.

Tabla 2.2.4: Componentes del desarrollo del Programa de Agua Potable Rural. Fuente: Donoso et al. (2015).

Componente	Descripción
Infraestructura de agua potable entregada a localidades rurales que no cuenta con un servicio de APR	Proveer un sistema de abastecimiento de agua potable de carácter colectivo, que comprende obras de captación, conducción, almacenamiento, desinfección y distribución, con respectivas conexiones domiciliarias y medidores.
Mejoramiento, ampliación y conservación de Infraestructura de APR	La infraestructura de ampliación incrementa la oferta del sistema de abastecimiento, el mejoramiento consiste en el aumento en la calidad del servicio (presión, calidad del agua y cantidad) y/o la disminución de las pérdidas. Por otro lado, la conservación comprende la ejecución de obras y/o reposición de equipos que permitan mantener operativo el sistema.
Supervisión y asesorías técnicas a Comités y Cooperativas de APR.	Los Comités y Cooperativas son supervisados y asesorados en aspectos técnicos, administrativos, financieros y comunitarios. Lo anterior enmarcado en otorgar a los APR una mayor autonomía futura y eficiencia en la gestión.

Con respecto al marco institucional del programa, en él actúan diversas instituciones y/o organismos públicos y locales, los cuales están encargados de coordinar, fiscalizar, deliberar, administrar; entre otras acciones, cuestiones ligadas al sistema global de agua potable rural. Dentro de las instituciones públicas se puede hacer la distinción de aquellas que están ligadas al Estado, como lo son el Ministerio de Salud (MINSAL), el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), el Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDSF), Ministerio de Hacienda, Subdirección de Desarrollo Regional (SUBDERE); y aquellos que son dependientes del MOP, como son la Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales y la DGA. En el terreno local actúan los Gobiernos Regionales (GO-RE), las Unidades Técnicas (UTs), Municipalidades y los Comités y/o Cooperativas de APR. A continuación, en la Tabla 2.2.5 se presenta un listado con las principales funciones de cada uno de los actores involucrados en el Programa de APR.

Tabla 2.2.5: Marco institucional del Programa de Agua Potable Rural, con los organismos públicos y locales involucrados.

Organismo	Actor	Principales funciones
Público o estatal	MINSAL	Fiscalizar la adecuada calidad microbiológica del agua potable (Villaroel, 2012).
	MINVU	Establece normas, políticas y programas en materia de vivienda tanto urbana como rural, en cuya estructura se inserta la infraestructura de agua potable y alcantarillado (Villaroel, 2012).
	MDSF	Participar en la evaluación de proyectos y en la aprobación de la inversión pública por medio de otorgamiento de la Recomendación sin Condiciones (RS) ⁽¹⁾ , lo que permite la ejecución del proyecto.
	Ministerio de Hacienda	Participar en la provisión presupuestaria.
	SUBDERE	Participar en la distribución, asignación y provisiones para inversiones complementarias, como electrificación rural, saneamiento, entre otros (Donoso et al., 2015)
	Subdirección de APR	Coordinar y gestionar la administración y control de los recursos financieros del programa, junto con llevar registros contables y financieros. (Donoso et al., 2015)
Locales	DGA	Participar en lo relativo a los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) (Donoso et al., 2015).
	GORE	Aprobar o rechazar las propuestas de los intendentes, de priorización de cartera de proyectos presentados por el programa para su financiamiento (Donoso et al., 2015).
	UTs	Supervisar y asesorar a los comités y cooperativas de APR (Donoso et al., 2015).
	Municipalidades	Desarrollar programa de construcción de viviendas e infraestructura sanitaria, para resolver problemas de marginalidad habitacional (Villaroel, 2012).
	Comités y Cooperativas de APR	Administrar, mantener y operar el sistema de APR, aplicando una tarifa de consumo que garantice sustentabilidad. Además Adquirir y/o producir agua potable, en condiciones técnicas y sanitarias establecidas en la normativa vigente (Ministerio de Obras Públicas, 2019).

⁽¹⁾ Una Recomendación sin Condiciones o “RS” es una condición administrativa, que significa que el proyecto cumple con todos los requisitos técnicos y económicos para poder financiarlo y ejecutarlo.

2.3. Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales

A mediados del mes de febrero del año 2017 fue publicada en el Diario Oficial la Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales (SSR), la cual tiene por objeto establecer un marco legal propio para el sector sanitario rural, que regule la prestación de servicios sanitarios donde se engloba por una parte la provisión de agua potable, y por otro lado, se tratan temas relacionados a la recolección y tratamiento de aguas servidas. La promulgación de esta Ley responde a la necesidad de generar un crecimiento de las organizaciones comunitarias que administran, mantienen, regulan y operan los Sistemas de APR, comprendiendo también el papel del Estado en el mundo sanitario rural.

Con la entrada en vigencia de esta Ley se avanza en las necesidades que tienen las comunidades de agua potable situadas en zonas rurales de Chile, debido a que los lineamientos de la normativa pretenden garantizar el abastecimiento de agua potable y el saneamiento en la totalidad de sistemas. Lo anterior marca un importante precedente con respecto a los antiguos objetivos del Programa de

APR, debido a que ahora se aborda el saneamiento rural, lo que permite terminar con los contratos con empresas sanitarias (Llera et al., 2020), cambiando el rol de ellas como unidad técnica de apoyo en las comunidades rurales de agua potable. De esta manera, según la Ley N° 20.998 (2018), los servicios sanitarios rurales se dividen en las siguientes etapas:

1. Producción de agua potable.
2. Distribución de agua potable.
3. Recolección de aguas servidas.
4. Tratamiento y disposición final de aguas servidas.

Para efectos de asesorías técnicas, administrativas o de operación de los SSR, el Ministerio de Obras Públicas creó la Subdirección de SSR, dependiente de la Dirección de Obras Hidráulicas, quien asume las tareas mencionadas y además es la encargada de realizar la gestión de proyectos de inversión de forma directa o mediante la contratación de terceros. Junto con ello, también es la encargada de promover la participación de las organizaciones sociales realizando capacitaciones, redes de apoyo y asistencia; en todo el proceso de implementación de la Ley.

2.4. Agua Subterránea

2.4.1. Heterogeneidad hídrica

Entender el mundo de los sistemas de producción, operación y abastecimiento de agua potable rural conlleva la comprensión de múltiples variables involucradas en el desarrollo de dichas organizaciones para lograr los objetivos que se plantean y que van en busca del beneficio en conjunto de la comunidad. Una de las principales variables en cuestión es la ligada al recurso hídrico con el cual se abastecen las comunidades, donde toma principal relevancia el agua subterránea.

El agua subterránea es un recurso valioso presente en la Tierra, que se define cómo todas aquellas aguas que se encuentren bajo la superficie del suelo (Bear, 2007), y que constituye la fuente más abundante de agua dulce en la superficie terrestre, donde alcanza el 97% del agua dulce no congelada (Baeza, 2020). En su totalidad, el agua dulce presente en la hidrosfera corresponde a: casquetes polares y glaciares (agua dulce congelada), aguas subterráneas, lagos y embalses, humedad del suelo y vegetación, vapor de agua en la atmósfera y el agua en los ríos.

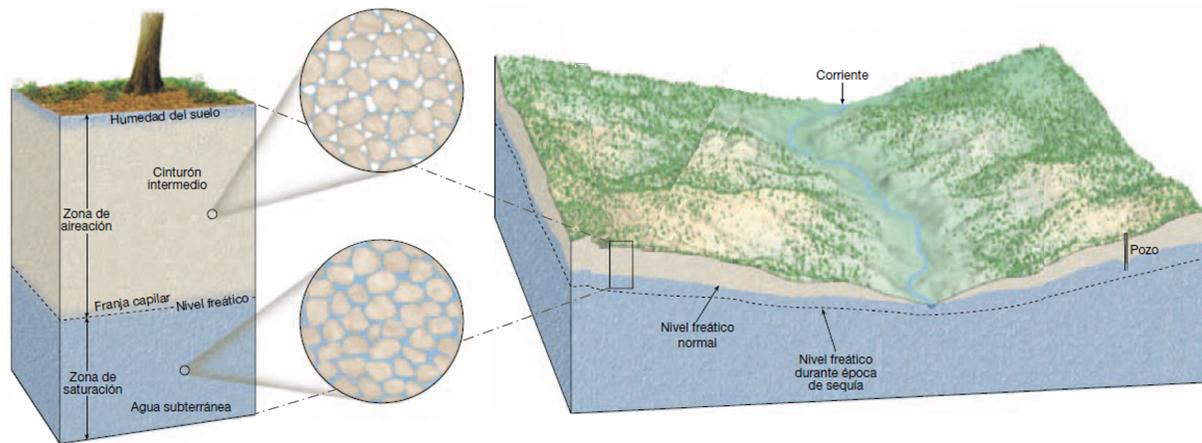


Figura 2.4.1: Distribución del agua subterránea y principales conceptos de interés sobre zonas del subsuelo. Fuente: Tarbuck y Lutgens (2005).

En Chile existe una marcada heterogeneidad de la disponibilidad del recurso hídrico superficial y subterráneo, donde desde la Región Metropolitana hacia el norte se presentan mayormente condiciones de escasez y déficit, mientras que desde la Región de O’ Higgins al sur se presentan condiciones de abundancia considerable (DGA, 2016). En el caso de las aguas subterráneas, ésta condición se ve influenciada por diversos factores, entre los cuales se pueden mencionar: las características geológicas-geomorfológicas, la baja presencia de precipitaciones y altas tasas de evaporación (Arumí y Oyarzún, 2007). Lo anterior da paso a comprender a aquellas unidades que están bajo el suelo y que son denominadas acuíferos, los cuales corresponden a estratos de roca o sedimento de naturaleza permeable que transportan libremente el agua subterránea (Tarbuck y Lutgens, 2005) como si se trataran de embalses subterráneos.

En el caso de Chile, las unidades permeables mencionadas en el párrafo anterior se dividen en Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), que corresponden a acuíferos o partes de un acuífero donde las características hidrológicas temporales y espaciales en ellos permiten ser sectorizadas para efectos de una posterior evaluación hidrogeológica o realizar gestión de manera particular y específica (DGA, 2016). En el año 2017 la división de Estudios y Planificación de la DGA realizó el Inventario Nacional de Acuíferos, en el cual se resume y muestra la totalidad de acuíferos del territorio nacional, estableciendo así un total de 207 acuíferos y 375 SHAC distribuidos en las regiones del país. Las regiones que concentran la mayor superficie acuífera son las de Antofagasta con un 14,7% de la superficie total, Atacama con un 16%, Los Lagos con el 12,2% del total nacional y la del Bio-bio con un 11% (Ver Tabla 2.4.1).

Tabla 2.4.1: Distribución de acuíferos en Chile. Fuente: DGA (2017b).

Región	Número de acuíferos	Número de SHAC	Superficie total Acuíferos [km ²]	%
XV Arica y Parinacota	3	4	4.495,8	1,2
I Tarapacá	4	5	17.121,6	4,6
II Antofagasta	8	21	54.154,1	14,7
III Atacama	35	50	58.966,2	16
IV Coquimbo	6	44	27.145,1	7,4
V Valparaíso	41	70	15.084,6	4,1
RM Metropolitana	3	44	9.360,4	2,5
VI Ohiggins	20	47	11.659,0	3,2
VII Maule	14	16	31.452,9	8,5
XVI Ñuble ⁽¹⁾	-	-	-	-
VIII Bio-bio	19	20	40.666,1	11
IX La Araucanía	12	12	31.411,7	8,5
XIV Los Ríos	11	11	21.995,6	6
X Los Lagos	31	31	44.752,1	12,2
XI Aysén ⁽²⁾	-	-	-	-
XII Magallanes ⁽²⁾	-	-	-	-
Total	207	375	368.265,2	100

⁽¹⁾ A la fecha la región no había entrado en vigor por decreto.

⁽²⁾ A la fecha no se habían definido acuíferos.

Los acuíferos representan una de las principales fuentes de agua para localidades no urbanas, donde su importancia radica en que de acuerdo a la realidad chilena estos depósitos presentan una variabilidad hidrológica menor que los recursos superficiales, por ello, los esfuerzos de análisis están centrados en la obtención y facilidad de acceso de información básica sobre las aguas subterráneas, ya sea la caracterización de acuíferos, fuentes de recarga, estadística histórica de niveles freáticos, entre otras (Arumí y Oyarzún, 2007). Sin embargo, según Baeza (2020), el monitoreo actual del estado global del agua subterránea está lejos de ser el adecuado en comparación a las aguas superficiales, debido a que el estudio de acuíferos se ha beneficiado de manera limitada ante el uso de nuevas tecnologías de teledetección.

Ahora bien, la gestión actual de aguas subterráneas está centrada en los cuerpos de agua confinados en acuíferos y no contempla la interacción conjunta de los acuíferos con los ecosistemas y las comunidades, lo que resulta necesario para garantizar la prestación continua de no tan sólo los servicios básicos, sino que también para otorgar el bienestar común de las aguas subterráneas, ecosistemas y los seres humanos (UNESCO, 2022).

2.4.2. Disponibilidad, restricción y prohibición del recurso subterráneo

Chile se encuentra situado territorialmente en distintas latitudes, y por otro lado, tiene un rango variado de altitudes que progresa desde la costa del Océano Pacífico hasta la grandes montañas de la Cordillera de Los Andes. El territorio se divide en macrozonas, las cuales se detallan a continuación en función a las regiones que están contenidas en ellas:

- Macrozona Norte: Regiones XV, I, II, III y IV
- Macrozona Centro: Regiones V, RM, VI, VII, XVI

- Macrozona Sur: Regiones VIII, IX, XIV, X
- Macrozona Austral: Regiones XI y XII

Lo anterior da paso a una diversidad climática marcada de norte a sur, en la que coexisten distintos ambientes, tales como: el Desierto de Atacama, que es catalogada como la zona más árida del mundo, en la que las precipitaciones son escasas e irregulares; cuenta además con una vasta Patagonia, donde los eventos de precipitaciones abundan; y por último se tiene una extensa costa donde se evidencian variaciones en los ecosistemas y en las condiciones climáticas locales.

Por ello, mundialmente se considera a Chile como un país privilegiado en lo que a recursos hídricos respecta debido a su condición favorable de disponibilidad hídrica en su total extensión (Llera et al., 2020). Si bien la escorrentía media total, que se define como el volumen de agua precipitada que escurre a nivel de la superficie y a nivel subterráneo, tiene un valor de 51.218 m³/persona/año lo que es un valor superior a la media mundial de 6.600 m³/persona/año, es una magnitud condicionada directamente por la escorrentía que se presenta en la macrozona Austral del territorio nacional, donde se llega a valores de 2.950.165 m³/persona/año en la Región de Aysén y 1.938.956 m³/persona/año (DGA, 2016).

La Figura 2.4.2 detalla la escorrentía al año 2015, expresada en cantidad de recurso hídrico o la disponibilidad de agua por habitante en las distintas regiones del país. De la gráfica se aprecia la gran diferencia entre las distintas macrozonas del país, notando así la baja disponibilidad presente desde la Región Metropolitana hacia el norte, donde la cantidad de recurso no logra superar los 1.000 m³/persona/año.

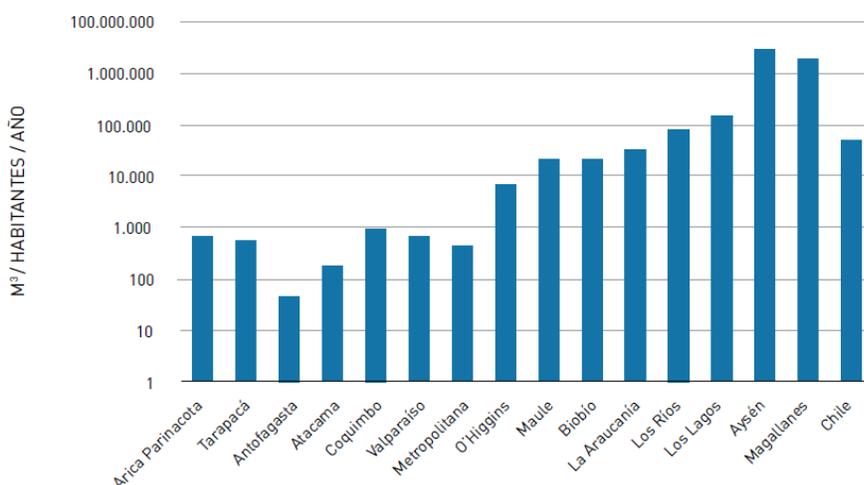


Figura 2.4.2: Disponibilidad de agua en Chile por habitante al año 2016, dado la escorrentía total por región. Fuente: Llera et al. (2020).

Con respecto a la disponibilidad hídrica subterránea, la DGA en el Atlas del Agua (2016) determina la cantidad de recursos que permanecen almacenados hasta agosto del año 2015 en los distintos acuíferos y SHAC, que se expresa en unidades de volumen anual de índole sustentable (agua asociada a la recarga del acuífero por precipitaciones, embalsamientos, escurrimientos superficiales y subterráneos), provisional (agua asociada a derechos de aprovechamiento subterráneo), total comprometido (agua que corresponde a todos los derechos constituidos y reconocidos, y a solicitudes tramitadas) y total solicitado (agua que corresponde a todas las solicitudes tanto resueltas

como en trámite). Esta información se encuentra descrita a nivel país diferenciada para las distintas macrozonas que presenta el territorio nacional en la Figura 2.4.3.

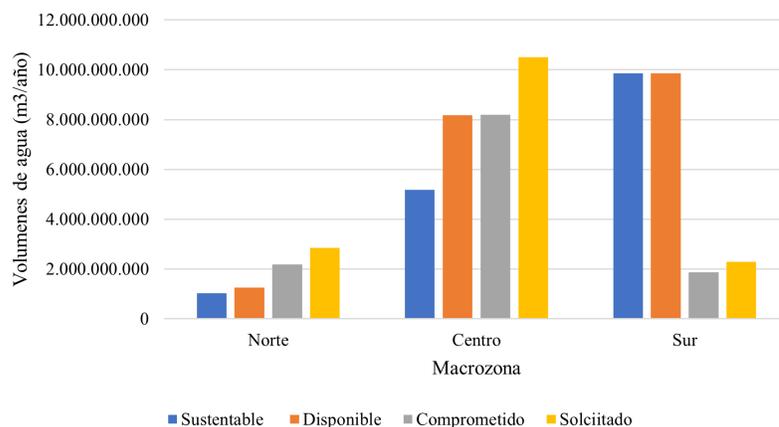


Figura 2.4.3: Distribución de los distintos volúmenes anuales a nivel de macrozonas en Chile. Elaborado a partir de Atlas de Agua (DGA, 2016).

La anterior gráfica muestra que los volúmenes en la macrozona norte y macrozona centro difieren en grandes cantidades si se analiza el volumen disponible y el volumen solicitado. Por otra parte, en el caso de la macrozona sur se nota la abundancia notoria del recurso subterráneo donde el recurso disponible es casi cinco veces mayor a lo solicitado.

Como se puede apreciar en la Figura 2.4.4, hay condiciones que varían con respecto a la descarga anual promedio en los acuíferos que están distribuidos en Chile, circunstancia que está directamente influenciada por la recarga que posee el acuífero, la cual puede tener orígenes que cambian entre las regiones.

Por una parte, las regiones del norte como lo son Tarapacá y Antofagasta se recargan por tormentas que están vinculadas al fenómeno de Invierno Antiplánico (McPhee et al., 2012). Otra manifestación de recarga importante es la que se da en la Pampa del Tamarugal, la cual se origina debido a los afluentes que escurren por quebradas, flujos subsuperficial y/o subterráneos, o a través de infiltración en zonas de abanicos fluviales (DGA, 2017c).

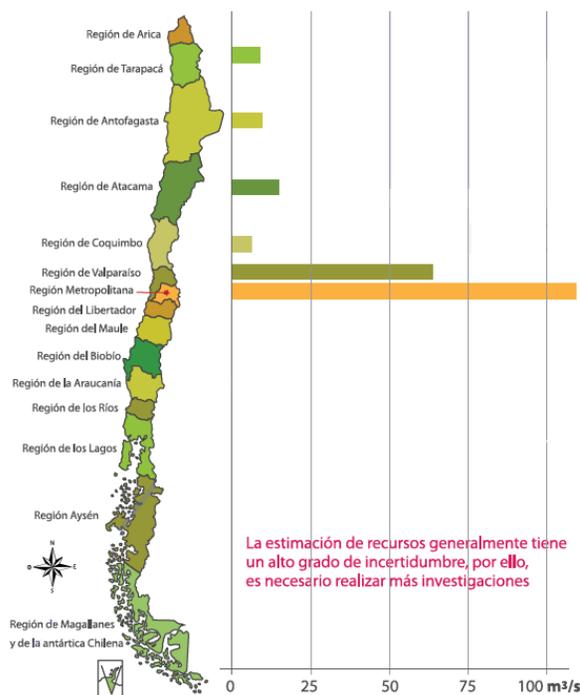


Figura 2.4.4: Recursos hídricos subterráneos calculados como descarga anual promedio. Fuente: MCPhee et al. (2012).

En el caso de Atacama, la recarga se genera en parte debido a la inundación o crecidas en ríos locales (McPhee et al., 2012); caso distinto a lo que ocurre en la Región de Coquimbo, donde los sectores acuíferos se pueden recargar naturalmente por excedentes de riego, por aguas que escurren en ríos e infiltran o por el flujo propio de las napas subterráneas que se ubican bajo el cauce de los ríos (DGA, 2012b). Por último, en regiones de la macrozona centro como Valparaíso o la Región Metropolitana, los recursos hídricos subterráneos se recargan por efecto de la precipitación que posteriormente se infiltra en el suelo, y también por infiltraciones en lechos de ríos durante flujos altos de deshielo (McPhee et al., 2012).

Ahora, junto con el estudio de la disponibilidad es necesario comprender que uno de los aspectos críticos que tiene la gestión hídrica subterránea, en busca de tener un enfoque sostenible, es poder controlar la ubicación y la cantidad de extracciones del recurso en los diversos acuíferos (UNESCO, 2022). Según MCPhee et al. (2012), en algunas áreas del territorio nacional los niveles de extracción desde los acuíferos chilenos pueden no ser sostenibles, por ello, la DGA y DOH han llevado a cabo estudios para fortalecer las herramientas de estudio y así disminuir las brechas de información existente sobre investigación de SHAC, acuíferos y agua subterránea.

De esta manera, uno de los instrumentos que la DGA utiliza para proteger los SHAC es la declaración de área de restricción de aguas subterráneas, que se define como aquellos SHAC en los que existe riesgo de grave disminución de un determinado acuífero, con el consiguiente perjuicio de derechos de terceros ya establecidos en él (Art. 65, D.F.L. N° 1.122), o bien cuando informes técnicos emitidos demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero (DGA, 2016). Siguiendo en la línea de lo expuesto anteriormente, la DGA podrá también declarar zonas de prohibición que según el Atlas de Agua (2016), a diferencia del área de restricción, se producen cuando la disponibilidad del agua subterránea se encuentra comprometido de manera total, por lo que no es factible otorgar nuevos derechos de aprovechamiento. La Tabla 2.4.2 detalla el número de áreas de restricción y zonas de prohibición en las regiones donde existen las medidas expuestas, en la que se evidencia que la mayor concentración de ambas declaraciones ocurre en las regiones de Coquimbo y Valparaíso.

Tabla 2.4.2: Número de áreas de restricción y zonas de prohibición a nivel regional. Elaborado a partir de la Mapoteca Digital de la DGA, 2022.

Región	Área de Restricción	Zona de Prohibición	Total	% AR + ZP con respecto al total
XV Arica y Parinacota	2	1	3	2
I Tarapacá	4	2	6	3
II Antofagasta	3	8	11	6
III Atacama	5	10	15	8
IV Coquimbo	17	28	45	23
V Valparaíso	26	29	55	28
RM Metropolitana	17	13	30	15
VI Ohiggins	21	8	29	15
VII Maule	2	-	2	1
VIII Bio-bio	-	2	2	1
XIV Los Ríos	1	-	1	1
Total	98	101	199	100

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

2.5.1. Gestión Integrada de Recursos y Aguas Subterráneas

Desde hace un tiempo hasta ahora se ha intensificado la preocupación por el medio ambiente y recursos naturales, y también se ha profundizado el estudio de problemas ocasionados por los humanos, que afectan a la diversidad de los sistemas complejos de la Tierra, debido a los cambios que se han manifestado en zonas de nuestro planeta producto del acelerado cambio climático (Dirección General de Aeronáutica Civil, 2021) . Ello trae consigo problemas que se pueden ver desde diversas aristas, entendiendo el desarrollo integral de las sociedades con su entorno ecológico, social y económico. Lo mencionado anteriormente plantea desafíos de cara a poder cumplir con los objetivos de la *Agenda 2030 sobre Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*, la cual fue aprobada por la Organización de Naciones Unidas (ONU) en el año 2015, para mejorar las condiciones de la población en el mediano y largo plazo.

Uno de los objetivos que se plantea es el ODS 6 que habla sobre *Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos en América Latina y el Caribe*, el cual recomienda avanzar en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en todo nivel a analizar, incluida la cooperación transfronteriza de carácter técnico, social y de Gobierno. El objetivo también plantea recomendaciones que tienen relación con: la generación y acceso a la información e investigaciones; la eficiencia y sostenibilidad en la gestión del agua en busca de desvincular la economía con la degradación de la naturaleza; establecer acuerdos regionales para frenar la inequidad recordando que el acceso al agua potable y al saneamiento son derechos humanos fundamentales; entre otros (Saravia et al., 2020).

Mucho antes de la Agenda 2030, el Gobierno de Chile atendiendo las políticas internacionales y la preocupación por la situación de los recursos hídricos en el país, en conjunto con la DGA solicitan en el año 2011 la colaboración técnica del Banco Mundial; entidad que según la ONU se define como: “una organización internacional que presta asistencia financiera y técnica a países clientes”; de la cual se esperaba poder realizar una formulación de políticas y estrategias nacionales ligadas a la GIRH. Así, en el estudio técnico realizado por el Banco Mundial se establecen ocho desafíos vinculados a aspectos legales e instrumentales de gestión, además se lograron identificar seis desafíos en relación al desempeño de organizaciones de índole público y privado, que están involucradas en la gestión del agua en el país a nivel institucional. En la Tabla 2.5.1 se detalla un resumen de los desafíos mencionados con sus principales características.

Tabla 2.5.1: Desafíos de la GIRH sobre aspectos legales, de gestión e institucionales. Elaborado a partir de información disponible en Banco Mundial (2011)

Desafío vinculados a la GIRH sobre aspectos legales y de gestión

1. Proteger los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) de los grupos vulnerables.
2. Mejorar la protección de los requerimientos hídricos para los ecosistemas y servicios asociados, fortaleciendo el control, sistema de información y publicando reglamento de caudales ecológicos.
3. Mejorar los mercados de aguas, eliminando la asimetría de información entre compradores o vendedores.
4. Mantener la seguridad hidráulica de los derechos de aguas.
5. Avanzar en el uso efectivo de los derechos de aguas, donde la propiedad de DAA deje de ser un elemento de distorsión monopólica y que DAA sin uso no sean obstáculo en el desarrollo de cuencas.
6. Hacer la gestión del agua subterránea más sostenible, donde el sistema acuífero tome relevancia.
7. Profundizar medidas tomadas para asegurar la calidad del agua, donde se requiere implementar instrumentos para el control de la contaminación en base a Ley de Bases Generales del Medio Ambiente.
8. Mejora del registro público de los DAA, para proporcionar a la autoridad la información necesaria para cumplir eficientemente funciones de planificación y administración de los recursos hídricos.

Desafío vinculados a la GIRH sobre aspectos institucionales

1. Fortalecer la DGA.
2. Fortalecer las organizaciones de usuarios.
3. Mejorar los sistemas de información y comunicación.
4. Coordinar intra e inter sectorialmente a las diversas entidades del sector, junto con entidades de sectores usuarios de agua y sus respectivas leyes, actividades, y planes.
5. Integrar la gestión de cuencas y fomentar la participación de los grupos interesados.
6. Mejorar la resolución de conflictos entre particulares o usuarios de agua, y entre estos y la DGA.

De acuerdo a Jakeman et al. (2016) citado en Baeza (2020), los principios de la Gestión Integrada de Aguas Subterráneas deberían englobar los siguientes puntos:

1. Una visión general de las dimensiones hidrológicas, sociales, económicas, entre otras.
2. La escala de las aguas subterráneas y sus vínculos con otros sectores, principalmente la energía y el cambio climático.
3. La gobernanza del agua subterránea con respecto a los principios, instrumentos e instituciones disponibles para la gestión integrada.
4. Las limitaciones biofísicas, y la capacidad y el papel de la ciencia hidroecológica e hidrogeológica, incluidas las preocupaciones sobre la calidad del agua
5. Herramientas necesarias, como: modelos computacionales, infraestructura de base de datos, sistemas de apoyo a la toma de decisiones y gestión de la incertidumbre.

Según Baeza (2020), el enfoque sobre el manejo del agua subterránea se debe tener en el estado que tiene actualmente la disponibilidad hídrica y restablecer el equilibrio en los acuíferos, debido a que el manejo de las aguas subterráneas es una de las principales prioridades de las sociedades y se ha convertido en un recurso sobreexplotado en gran parte del mundo. Por estas razones la gestión debe ser ejecutada teniendo una visión conjunta de todos los factores que intervienen en el proceso: acuíferos, aguas superficiales, usos del agua, calidad del agua, ecohidrología y las comunidades.

2.5.2. Estrategias y políticas en torno al agua potable

Considerando que hay una gran cantidad de población rural que al día de hoy persiste con problemas ligados al abastecimiento seguro de agua potable, el Estado y los gobiernos locales han establecido agendas y/o objetivos al corto y largo plazo para poder generar una mejor cobertura del recurso hídrico y también darle una mayor relevancia al desarrollo rural. Una de esas iniciativas fue la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (ENRH) 2012 - 2025, desarrollada en el año 2012 por el Gobierno de Chile, la cual fijaba ejes sobre los cuales debía actuar el Ministerio de Obras Públicas (MOP) en conjunto con la Dirección General de Aguas (DGA). Uno de ellos era el eje de *Equidad Social* que trata sobre la cobertura de agua potable rural para las comunidades rurales semiconcentradas, disminuyendo la brecha que existía con respecto a las comunidades concentradas; y también mencionaba aspectos sobre la asignación de derechos de aprovechamiento a sistemas de agua potable rural (ENRH, 2013). Por otro lado, en el año 2015 se desarrolla la Política Nacional para los Recursos Hídricos (PNRH), la cual dentro de sus ejes centrales menciona medidas para enfrentar el déficit hídrico, donde se plantea la línea de acción que busca impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar la disponibilidad, captación y ahorro del agua, para así abastecer a familias que no cuenten con una conexión directa a la red de agua potable y saneamiento (PNRH, 2015).

Por otra parte, en el año 2020 se publicó la Política Nacional de Desarrollo Rural (PNDR), que corresponde a una política territorial vinculada con políticas urbanas y regionales, las cuales permiten avanzar hacia un desarrollo integrado del país, promoviendo el bienestar de la población de manera transversal, que no se configure en función al lugar en el que se habite. Esta política toma la definición de zona rural que menciona la OCDE, la cual es de carácter político-territorial, y la utiliza como conceptualización central para su análisis, dejando de lado los criterios del INE y la acción estatal, en donde se considera al medio rural encajado en una definición de carácter más bien estadístico (Bustos et al., 2021).

La PNDR se articuló en cinco ámbitos, entre los cuales se destaca el *Bienestar Social de la Población en el Medio Rural* que se organiza en ejes estratégicos y objetivos específicos, donde en lo que respecta a servicios básicos de los hogares se menciona lo siguiente: “Mejorar la calidad, cobertura y administración de servicios básicos en el medio rural, en cuanto al acceso a energía, agua para consumo humano, saneamiento y residuos domiciliarios, definiendo los sistemas, sus características y estándares mínimos para los territorios rurales, previniendo la necesidad de sostener su operación en el tiempo” (PNDR, 2020).

Además, la contribución de la Mesa Nacional del Agua del año 2019, fue una instancia de carácter público-privado que buscó soluciones para hacer frente a las actuales vicisitudes que enfrenta el país con respecto al recurso hídrico. En ella se planteó como desafío principal el concepto de *Seguridad Hídrica*, que según la *Ley N° 21.455 - Marco de Cambio Climático* se define como:

“Seguridad Hídrica: posibilidad de acceso al agua en cantidad y calidad adecuadas, considerando las particularidades naturales de cada cuenca, para su sustento y aprovechamiento en el tiempo para consumo humano, la salud, subsistencia, desarrollo socioeconómico, conservación y preservación de los ecosistemas, promoviendo la resiliencia frente a amenazas asociadas a sequías y crecidas y la prevención de la contaminación.”

Así, uno de los ejes temáticos corresponde al acceso universal de agua potable y al saneamiento, donde para poder tener la seguridad hídrica mencionada se debe avanzar por lograr el 100% de cobertura de los factores mencionados, tanto para zonas rurales concentradas como para zonas rurales semi-concentradas (MOP, 2020).

De esta manera, a modo de resumen la Tabla 2.5.2 detalla los principales contenidos de las políticas o estrategias desarrolladas en Chile entre 2013 a 2020, donde se observa que la gestión de aguas subterráneas y la gestión de cauces y crecidas no se encuentra mencionada en ninguna de las políticas analizadas.

Tabla 2.5.2: Resumen de los principales contenidos presentes en estrategias y políticas de Chile con respecto al agua. Elaborado a partir de Mesa Nacional del Agua (2020).

Contenido	ENRH, 2013	PNRH, 2015	PNDR, 2020
Consumo humano	✓	✓	✓
Sustentabilidad	✓	✓	✓
Participación ciudadana	✓	✓	✓
Fortalecimiento de Organizaciones de Usuarios del Agua (OUA)	✓	✓	✓
Desarrollo de cultura del agua	✓	✓	
Mejorar institucionalidad	✓	✓	✓
Cambios en normas	✓	✓	✓
Mejorar canales de información	✓	✓	✓
GIRH	✓	✓	
Gestión a nivel de cuencas	✓	✓	✓
Gestión de aguas subterráneas			
Gestión de cauces y crecidas			
Desarrollo de capital humano/innovación/tecnologías			✓
Calidad del agua/ caudales ecológicos	✓	✓	
Nuevas fuentes de agua	✓	✓	
Infraestructura	✓	✓	✓
Ahorro aguas	✓	✓	
Agua y desarrollo energía		✓	✓

2.6. Cambio climático y Megasequía en Chile

Una de las problemáticas que hoy en día se sitúa en la agenda medioambiental internacional es la ligada al cambio climático y a las consecuencias negativas que afectan al planeta Tierra. El concepto se define según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como: “un cambio de clima que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparable”. Es decir, lo anterior atribuye el cambio climático a los efectos que produce la población humana en procesos a nivel de atmósfera, sumado a la variabilidad climática observada en regímenes naturales. Entre las consecuencias del cambio climático, se tiene la ligada a la variación en las precipitaciones, que influye de manera directa en la recarga natural de las aguas subterráneas (UNESCO, 2022).

En Chile, desde el año 2010 entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía se ha experimentado un déficit de precipitaciones cercano al 30%, que resulta un registro histórico extraordinario, debido a la condición permanente en el tiempo y la extensión a nivel espacial. El evento descrito anteriormente se ha denominado *megasequía*, el cual a través del déficit de precipitaciones ha reducido también la cantidad de agua que escurre en los ríos de Chile central, y junto con ello, se ven también efectos en lagos, niveles de los embalses, en la criósfera y aguas subterráneas; tal como se aprecia en la Figura 2.6.1. Otros efectos que tendría el cambio climático en el territorio chileno en relación a proyecciones futuras son: elevación de la isoterma cero y posterior reducción de reservas de agua en cabeceras de las cuencas entre Coquimbo y Los Lagos; retroceso de glaciares; mayor ocurrencia de periodos de escasez hídrica (MMA, 2017).

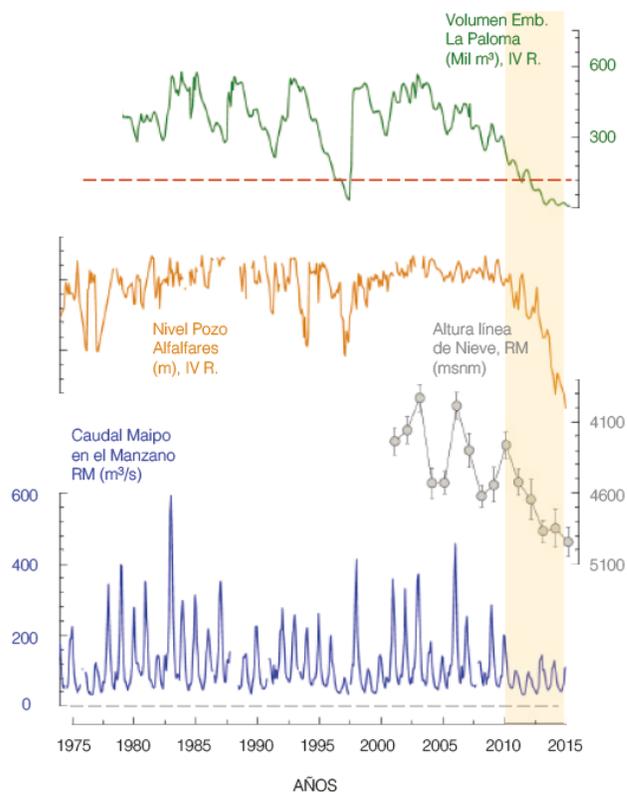


Figura 2.6.1: Evolución temporal embalse La Paloma, nivel freático pozo Alfalfares, altura de nieve cordillera de Santiago y caudal en estación Río Maipo. Fuente: CR2 (2015)

La anomalía de precipitaciones anuales a nivel nacional se puede ver en la Figura 2.6.2, la cual detalla la variación porcentual con respecto al promedio de 1961-1990, donde las barras verdes representan valores positivos o superavit y las barras naranjas representan valores negativos o déficit. De ella además se puede desprender que la precipitación anual del país disminuye a razón de 3% por década si se consideran los últimos 60 años (Dirección General de Aeronáutica Civil, 2021).

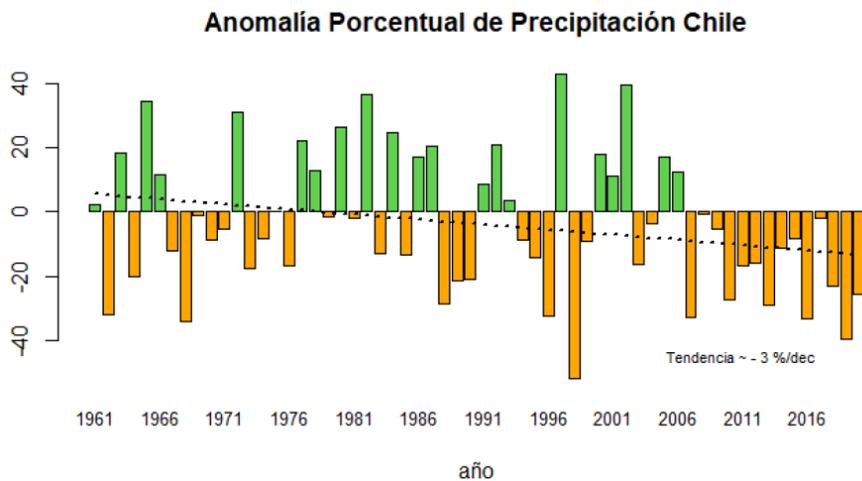


Figura 2.6.2: Anomalía porcentual de precipitación total anual en Chile continental con respecto al promedio 1961-1990. Fuente: Dirección General de Aeronáutica Civil (2021).

Así, los efectos que el cambio climático y la sequía pueden inducir en aguas subterráneas de Chile son relevantes debido a la importancia de la recarga de acuíferos producto de la precipitación, sin embargo, Rojas et al. (2019) menciona que una de las principales brechas que se identifican en relación a antecedentes existentes de estudio es la falta de datos históricos de índole hidrometeorológico y de aguas subterráneas, lo que lleva a que la estimación de balance hídrico en diversas cuencas del país presente altos grados de incertidumbre.

2.7. Escasez hídrica

Junto con entender los conceptos de cambio climático y de sequía prolongada en el territorio nacional, es importante introducir la definición de escasez hídrica, el cual es uno de los principales responsables de que se modifiquen de manera crítica las condiciones actuales de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, lo que se traduce en consecuencias negativas en diversas zonas rurales.

La *escasez hídrica* se manifiesta cuando el consumo humano o demanda de agua supera el volumen oferente del recurso (Escenarios Hídricos 2030, 2018). Según Schulte (2014), este evento o concepto corresponde a una realidad física de carácter objetivo, que puede ser medida de igual manera en todas las regiones y en el transcurso del tiempo. Schmidt y Benítez-Sanz (2012) en un estudio realizado a nivel de cuenca, mencionan que las principales causas de la escasez se deben a: patrones irregulares de precipitación; mala gestión en asignación de recursos hídricos; nuevos usos o demandas de agua y falencias en el análisis de planes estratégicos de carácter hidrológico. Por otro lado, los autores indican que dentro de los principales efectos que puede generar la escasez de agua y los periodos de sequía son:

1. Degradación de la calidad de aguas superficiales y aguas subterráneas.
2. Falta del recurso hídrico en áreas urbanas.
3. Extracción excesiva de agua subterránea, generando sobreexplotación.

En el caso de Chile, la escasez se ha manifestado en el último tiempo debido a la disminución de las precipitaciones y al aumento en la sequedad del aire por el incremento considerado en la temperatura, lo que en su conjunto genera efectos en los acuíferos y almacenamiento de agua subterránea, donde se evidencia una tendencia negativa significativa en relación al descenso en los niveles de pozos (Escenarios Hídricos 2030, 2018). Sin embargo, no tan sólo la disminución de precipitaciones es la que define mayormente la escasez, sino que también la falta de redes de distribución de agua potable es relevante, sobre todo en localidades rurales (Fundación Amulén, 2019).

En los últimos años se han evidenciado modificaciones en la legislación de aguas (desde 2005 a la fecha el Código de Aguas ha sido reformado en siete ocasiones) y también actores políticos en conjunto con la población han tomado conciencia acerca de la fragilidad de los acuíferos del territorio nacional, debido a que desde fines del año 2010 se han presentado signos notorios de sobreexplotación, donde el nivel efectivo de extracciones ha generado tendencias progresivas al descenso de niveles freáticos y también ha originado una afectación de humedales asociados al entorno (Peña, 2019).

Para poder sobrellevar las condiciones generadas por los eventos descritos, en nuestro país el Presidente de la República puede aprobar decretos de escasez hídrica en zonas donde según variables y criterios hidrometeorológicos, exista una sequía sobresaliente. La situación combinada de megasequía y escasez hídrica ha llevado a que desde el año 2008 al 2020 se hayan emitido un poco menos de 170 decretos ligados a esta situación, donde el mayor impacto se encuentra en la V Región de Valparaíso (35%), RM (26%) y la IV Región de Coquimbo (18%) (Ver Figura 2.7.1). Así, la tendencia de escasez se da en la zona central y norte chico del país, donde también se concentra una robusta densidad demográfica y también algunas de las principales actividades económicas del país (Morales, 2021).

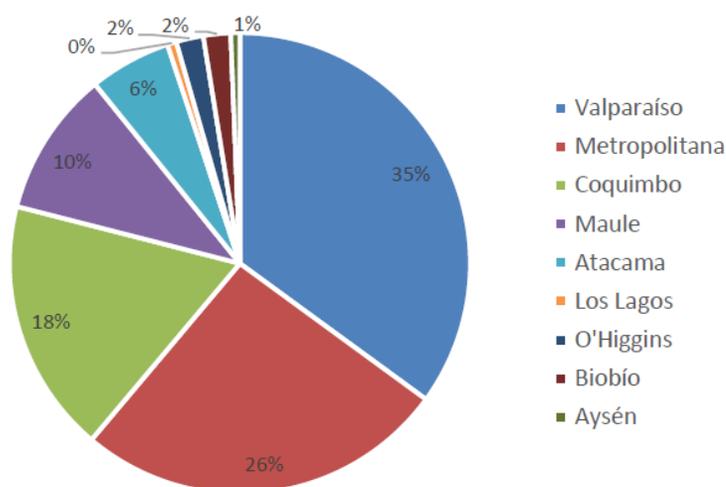


Figura 2.7.1: Incidencia de decretos de escasez hídrica por región durante los años 2008-2020. Fuente: Morales (2021).

Si bien los impactos y soluciones que entregan los decretos de escasez cumplen como una medida enfocada en la emergencia del recurso hídrico, la cual muchas veces se complementa con la contratación de camiones aljibe que intercambian el rol con las empresas sanitarias o los SSR para así abastecer de agua a las zonas en emergencia; notando que para muchas localidades rurales esta condición es recurrente, ya que una gran cantidad de ellas se abastecen día a día a través de la modalidad mencionada, lo que se entiende como un error en la interpretación, organización y posterior gestión de los recursos hídricos a nivel nacional (Fundación Newenko, 2019). Según McPhee et al. (2012), los Sistemas de Agua Potable Rural son vulnerables a situaciones de sequía y escasez, por lo que resulta un reto relevante incluirlos de manera directa en la gestión de las aguas, ya que carecen de recursos para poder invertir en mejorar sus condiciones de producción, operación y distribución del servicio de agua potable.

2.8. Pozos profundos

Otra arista a analizar es la que tiene relación con la obtención del agua para las diversas necesidades que se presenten en ciudades, comunidades y en general en toda la sociedad.

El recurso que es vital para los diversos usos del agua es el recurso hídrico subterráneo, el cual ha sido aprovechado desde la antigüedad para dar solución a problemas de abastecimiento para las poblaciones y como fuente de riego para terrenos de cultivo, y además su uso a lo largo de la historia se ha visto intensificado debido a la mejora en técnicas de perforación de pozos e introducción de bombas de impulsión sumergidas (Sahuquillo, 2009). Otro aspecto que menciona Sahuquillo (2009) sobre el agua subterránea es la fácil accesibilidad y el bajo costo que tiene, esto último comparado con el desarrollo de obras de almacenamiento como embalses u obras de transporte de agua como son los canales. Así, uno de los beneficios que destaca el autor es que una fuente de captación se puede emplear en las proximidades de la extracción y además representa una obra que actúa de manera óptima en periodos de sequía, siempre y cuando el almacenamiento y recarga anual del acuífero pueda suplir las demandas de agua en una zona particular.

Un concepto que se menciona en el párrafo precedente y que es relevante para el entendimiento de las extracciones de agua subterránea es el de *captación*, que corresponde a toda instalación que permite poner a disposición de usuarios el agua contenida en los acuíferos, y que además está destinada a facilitar la obtención de un cierto volumen para satisfacer una determinada demanda (Custodio y Llamas, 1983). La cuantificación de la demanda de agua en Chile puede ser caracterizada en función a los sectores que tienen un mayor porcentaje de participación en el uso de recursos hídricos en el territorio, los cuales son el sector agrícola, minero, sector de agua potable y saneamiento, industrial, forestal, generación eléctrica y pecuario. El conjunto de actividades se caracteriza según los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA), captación de aguas y consumo de aguas (Escenarios Hídricos 2030, 2018).

Sobre las obras de captación, Custodio y Llamas (1983) en el Tomo I de su libro *Hidrología Subterránea* señalan que los diferentes tipos de captaciones de agua, en función a las características de funcionamiento hidráulico, se pueden clasificar como:

- Pozos: Corresponde a una perforación vertical de forma cilíndrica y de diámetro mucho menor a su profundidad, donde el agua penetra las paredes creando un flujo radial.
- Drenes y galerías: Instalaciones horizontales de sección más o menos circular y con una longi-

tud mayor a su diámetro, donde el agua penetra a lo largo de la obra creando un flujo paralelo y horizontal. Los drenes acaban en un pozo colector o afloran en la superficie.

- Zanjas: Son excavaciones rectilíneas en trincheras de poca profundidad. Tienen un funcionamiento similar a los drenes y galerías.
- Socavones: Excavaciones de forma variada de poca profundidad y cuyo funcionamiento puede asimilarse al de un pozo de gran diámetro.
- Pozos de drenes radiales: Obra que consiste en un pozo revestido del que salen drenes horizontales en varias direcciones, y que en un conjunto pueden actuar como un socavón.

Según la normativa aplicada en Chile en relación al agua potable, el Instituto Nacional de Normalización INN, que corresponde al organismo reconocido en materia de normalización en el país, considera en la norma vigente de agua potable *Norma Chilena N° 777* además de pozos, drenes y galerías; otras obras de captación de aguas subterráneas que se emplean (INN, 2000):

- Pozos profundos: Perforaciones verticales, construidas con máquinas especiales, con una tubería de entubación, provista de aberturas en determinados sectores para permitir el paso del agua al interior y hacer posible la extracción del agua por medios mecánicos.
- Punteras: Pozos de pequeños diámetros, cuyos extremos superiores están unidos a un colector, por donde se extrae el agua subterránea.
- Norias: Obras de captación de poca profundidad excavada a mano, verticales con respecto a la superficie del terreno, con entubación o no y que permiten alojar en su interior elementos mecánicos para extracción de aguas.

Sobre los pozos se puede mencionar que son sustanciales para la sociedad, debido a que proporcionan un suministro extenso y confiable de agua no tan sólo para uso doméstico, sino que también para usos aplicados en el riego y las industrias; donde muchas veces se construyen captaciones para dar solución a la problemática de escasez de agua superficial, posicionando así al agua subterránea como un recurso crucial para la sobrevivencia y prosperidad de las necesidades correspondientes (Water Science School, 2018).

En el caso de nuestro país, a fines del Siglo XX los pozos y norias representaban las captaciones de aguas subterráneas más numerosas y significativas para tener abastecimiento de agua potable en los territorios y también para efectos de riego en predios (Alegría, 1998). De acuerdo con información del Censo 2017, la distribución en el país de pozos o norias como fuente de acceso al agua potable en viviendas urbanas y rurales está marcada por un fuerte contraste, ya que por una parte en zonas urbanas tan sólo un 0,44 % del total de viviendas se abastece mediante éstas obras de captación, y por otro lado, en zonas rurales el porcentaje de viviendas que se abastece mediante pozos o norias se eleva hasta un 27 % (INE, 2018).

La Fundación Amulen en un esfuerzo por interiorizar cualitativamente el saber con respecto a las fuentes de agua de la población rural realizó una encuesta a Comités de APR, entendiendo que es aquella población la que se reconoce vulnerable y a la cual se le debe dar una mayor urgencia en la gestión del recursos. Los resultados arrojaron que la fuente prioritaria de los APRs corresponde a los pozos (agua subterránea), que representa un 61 % del total, y el otro 39 % representa la fuente

de agua de tipo superficial (Fundación Amulén, 2019). De esta manera se entiende el papel fundamental que tienen los pozos para el abastecimiento de agua potable en localidades rurales, donde resultan ser la principal obra de captación que se utiliza.

Dentro de las herramientas públicas que se dispone sobre agua, en la DGA opera el Servicio Hidrométrico Nacional en el cual se tienen estaciones y puntos de monitoreo en los que se recopila información en series de datos históricos sobre diversas variables de interés, entre las cuales destaca la variable de *nivel estático*, la cual es estudiada mediante las *Estaciones de Nivel Estático de Pozos*. Al año 2016 se contaba con 691 estaciones de monitoreo sobre niveles de pozos, las cuales se encuentran mayormente concentradas en la macrozona centro-norte (DGA, 2016), donde carece el recurso hídrico superficial, el cual no logra cubrir demandas de índole industrial y de consumo (DGA, 2017a).

El monitoreo sobre los niveles de los pozos es una de las herramientas principales para poder comprender el comportamiento de las aguas subterráneas, ya que se obtiene información de los factores internos y externos que actúan sobre los acuíferos en procesos de recarga, almacenamiento y descarga (Taylor y Alley, 2001). Una observación que es fundamental es la que también mencionan Taylor y Alley (2001) sobre la frecuencia de medición, la cual es una de las consideraciones cruciales en el diseño de un programa de monitoreo del nivel freático del agua, que además se puede complementar mediante información recopilada sobre extracciones de agua subterránea para así obtener una mejor interpretación de los datos.

En relación a la frecuencia de medición, el estudio Radiografía del Agua: Brecha y riesgo Hídrico en Chile (2019) menciona que para cumplir con el objetivo de desarrollar un análisis de tendencia robusto sobre aguas subterráneas es necesario incrementar la frecuencia de las mediciones en estaciones de monitoreo, ya que existen estaciones que presentan una escasez de datos y que también tienen una baja frecuencia de medición, según estudio elaborado por especialistas del Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC) y la UNESCO.

De esta manera, todo lo anterior da a entender que el recurso subterráneo es una variable importante en los diversos programas o estrategias que se quieren idear para mejorar el abastecimiento y uso del agua, pero que el conocimiento que hoy en día existe sobre disponibilidad, almacenamiento y calidad de la fuente bajo suelo resulta ser precaria (MOP, 2020) para poder atender el universo de problemáticas y necesidades que aquejan a la población, las cuales recaen en mayor medida en comunidades rurales.

Capítulo 3

Caso Provincia de Limarí

3.1. Características de la provincia

En la presente sección se detallan las principales características de la zona de estudio del trabajo, abarcando dimensiones relevantes para el análisis y desarrollo posterior.

3.1.1. Área de Estudio y Aspectos administrativos

La provincia de Limarí se ubica en la macrozona norte de Chile, específicamente en la IV Región de Coquimbo. Se extiende entre los límites de longitud sur que va desde el 30° 15' S (N 6.657.000 m) y los 31° 20' S (N 6.520.000 m), y abarca alrededor de 13.300 km² de superficie. La provincia administrativamente se divide en cinco comunas: Río Hurtado, Monte Patria, Punitaqui, Combarbalá y Ovalle; donde ésta última corresponde además a la capital provincial. La Figura 3.1.1 detalla los límites de la provincia con las ubicaciones de la capital provincial, comunas y capitales comunales.

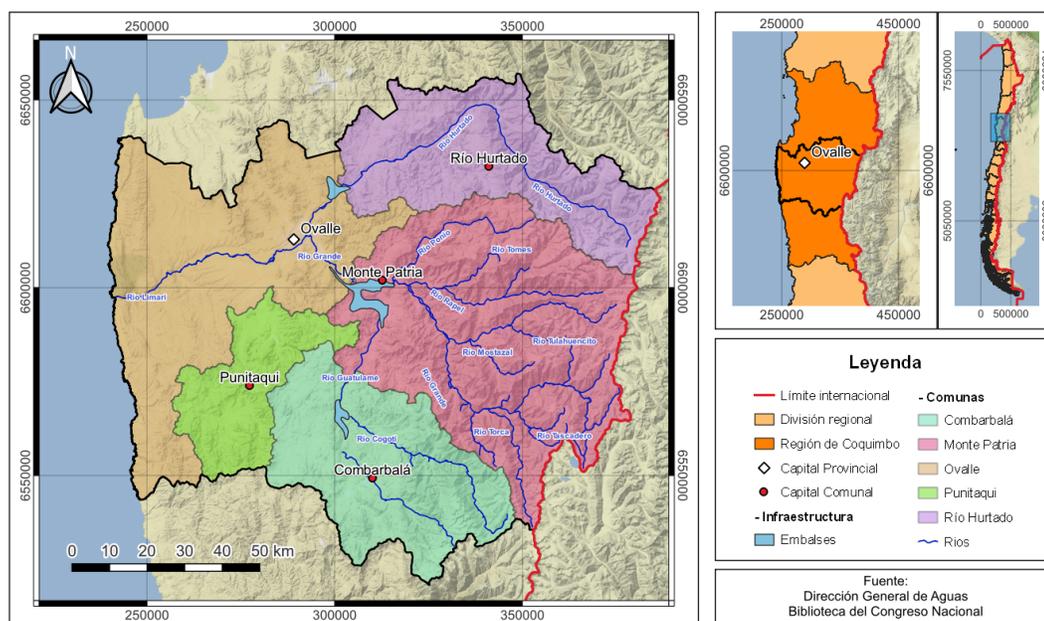


Figura 3.1.1: Delimitación de la provincia de Limarí con sus respectivas comunas. Elaboración propia a partir de información de la Mapoteca de la DGA y la BCN.

La población de la provincia de Limarí es de 170.579 habitantes, que se estima como el 23 % 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 para considerar es la relacionada al área urbana-rural, donde la IV Región tiene un porcentaje de población urbana del 81,2 % y una población rural del 18,8 % (INE, 2018), sin embargo, en el caso de la provincia de Limarí los porcentajes cambian, ya que la población urbana representa un 67,2 % del total y el sector rural un 32,8 %. Incluso, se tienen comunas en las que más del 50 % de la población se considera rural (Combarbalá y Monte Patria), y además la comuna de Río Hurtado se considera totalmente rural (INE, 2019). La información anterior se detalla en la Tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1: Población total de las comunas de la provincia de Limarí, junto con el porcentaje de población urbana y rural. Elaborado a partir de INE (2019).

Provincia	Población	Urbana	Rural
Ovalle	111.272	87.571	23.701
Combarbalá	13.322	5.994	7.328
Monte Patria	30.751	15.068	15.683
Punitaqui	10.956	5.851	5.105
Río Hurtado	4.278	0	4.278
Total	170.579	114.484	56.095

3.1.2. Cuencas y Red hidrográfica

En la zona de estudio se tiene la presencia de 3 cuencas, que corresponden a la Cuenca del Río Limarí, Costera entre Elqui y Limarí y Costera entre Limarí y Choapa (Ver Figura 3.1.2); sin embargo, sólo la cuenca del Río Limarí (Código BNA 045) se encuentra de manera completa en la provincia, ya que las superficies de las otras dos se sitúan también en la provincia de Elqui y la provincia de Choapa respectivamente. La cuenca del Río Limarí 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 (DGA, 2010). Por otro lado, su superficie calculada es de unos 11.696 km², lo que la sitúa dentro de las 15 cuencas de mayor tamaño en Chile (DGA, 2016).

Según la Mesa Nacional del Agua (2020) dentro del desafío de Seguridad Hídrica que plantean, existe el eje temático asociado a la idea de generar la *Planificación Estratégica de Cuencas*, donde los expertos entienden que la unidad que debe ser gestionada en estudios es precisamente la cuenca completa, en la que se debe respetar la diversidad geográfica e hidrológica para así poder simular y pronosticar el comportamiento de ella en los complejos escenarios del cambio climático. De esta manera, en lo que sigue de trabajo se realizan referencias asociadas específicamente a informes, diagnósticos e investigaciones sobre la Cuenca del Río Limarí, que se entiende como la unidad principal de la provincia de Limarí.

Así, dentro de la cuenca se tienen 4 cauces permanentes principales: Río Limarí, Río Grande, Río Hurtado y Río Guatulame. El río que lleva el mismo nombre de la cuenca principal se forma gracias a los afluentes proveniente de dos ríos: Río Grande y Río Hurtado. El primero de ellos es el encargado de drenar parte importante de la hoya hidrográfica sur de la cuenca (DGA, 2004), y el segundo es el encargado de drenar la cuenca en el norte, sin embargo, no tiene gran relevancia ya que dicha hoya tiene menor porcentaje de pluviosidad (DGA, 2008). Sobre los afluentes de cada una de las unidades mencionadas, el Río Grande recibe una serie importante de aportes, entre los cuales se destacan los ríos Rapel, Mostazal y Guatulame, donde éste último es regulado por el Embalse Cogotí, que tiene una capacidad de almacenamiento de 150 millones de m³, y también en su confluencia con el Río Grande se sitúa el Embalse La Paloma, que tiene una capacidad máxima de 750 millones de m³. Por su parte, el Río Hurtado no tiene afluentes de gran importancia y constituye el único río con características relevantes en la zona norte de la cuenca; además en su curso se emplaza el Embalse Recoleta, que tiene un volumen de regulación de 100 millones de m³.

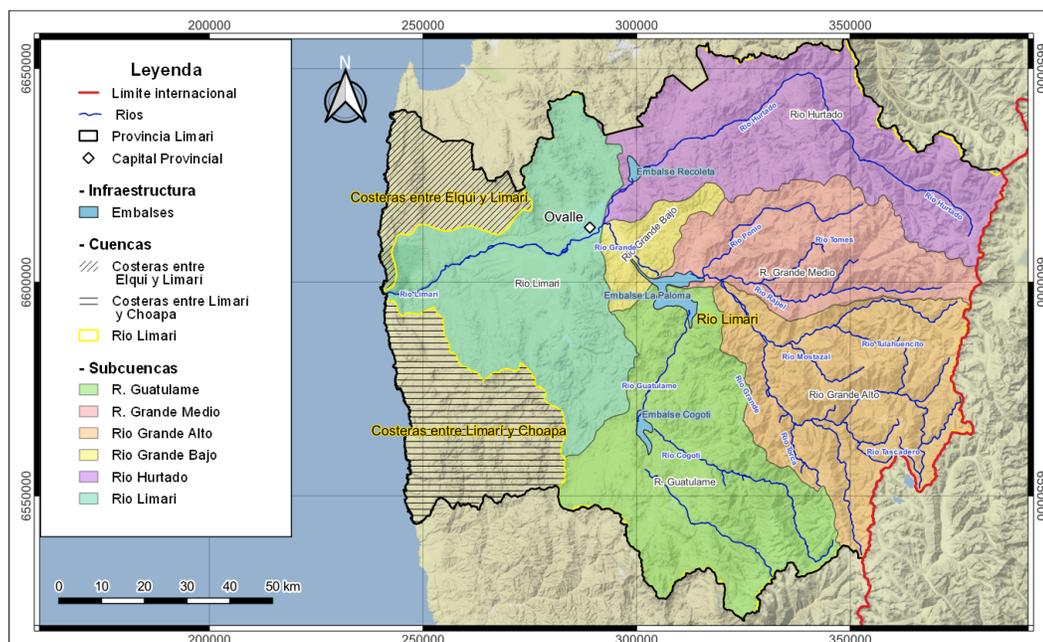


Figura 3.1.2: Delimitación de cuencas situadas en la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de información de la Mapoteca de la DGA y del BCN.

3.1.3. Clima

En toda su extensión, la provincia y cuenca del Limarí tiene una influencia marcada por un clima seco y mayormente árido, que tiene como consecuencias periodos prolongados de sequía (DGA, 2020a). La temperatura media anual es cercana a los 17°C, con mínimas de 10°C y máximas de 24°C.

Ahora, para la caracterización climática de la provincia de Limarí, se realiza la clasificación de Köppen-Geisger mediante la confección de un mapa con datos descargados de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) sobre las zonas climáticas de Chile, donde se logran distinguir tres tipos de climas predominantes en la provincia, tal como se muestra en la Figura 3.1.3. Partiendo desde el Océano Pacífico, en toda la franja de la costa se tiene un clima semiárido de lluvia invernal e influencia costera, que se caracteriza por un clima frío y seco, con precipitaciones escasas y una débil oscilación térmica anual (DGA, 2010). En los valles centrales de la provincia se presenta un clima semiárido de lluvia invernal, que genera un clima seco, donde la evaporación es superior a los eventos de precipitación y hay presencia de excedentes hídricos. Hacia las zonas elevadas de la provincia se presenta un clima de tundra con lluvias invernales, donde la vegetación tiene un escaso crecimiento debido a condiciones de semiaridez, se tienen eventos significativos de precipitación, altos niveles de escorrentía y existe una gran acumulación de nieve, lo que genera aportes significativos en la Cuenca del Río Limarí en periodos estivales (DGA, 2020a). Por último, en la zona sur de la comuna de Combarbalá se tiene un clima mediterráneo de lluvia invernal, pero no representa una gran extensión de territorio y tampoco compromete una zona de interés mayor, debido a que en materia de población no se tiene presencia relevante de asentamientos urbanos ni rurales.

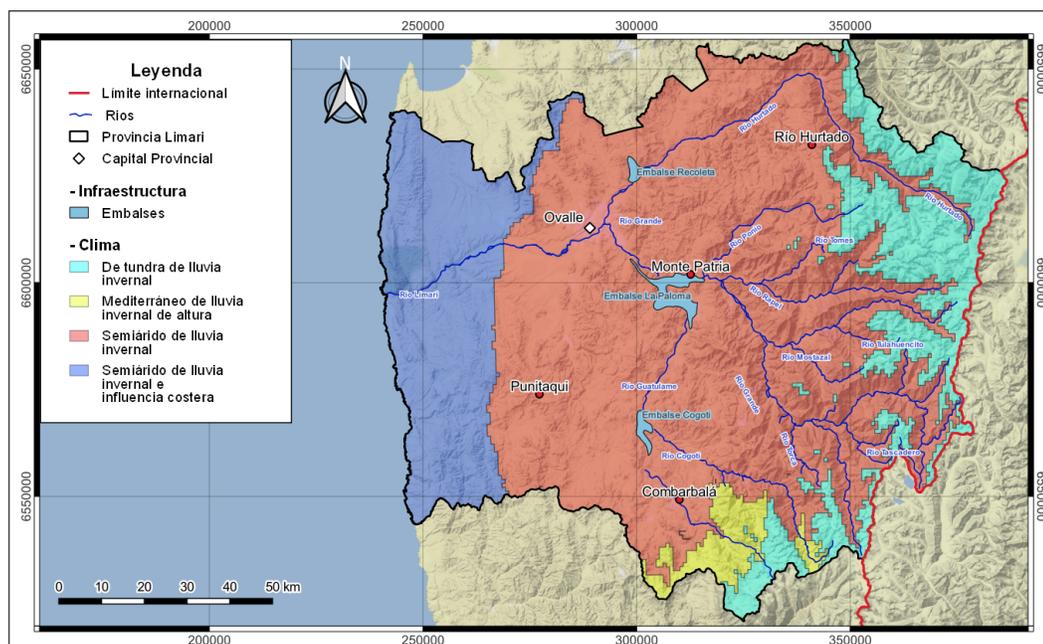


Figura 3.1.3: Caracterización climática de la provincia de Limarí, usando clasificación de Köppen-Geisger. Elaboración propia a partir de información de la IDE.

3.1.5. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), Áreas de Restricción y DAA

La provincia de Limarí cuenta con una división administrativa en función a las fuentes de agua subterránea mediante la delimitación de 14 SHAC, para así poder hacer gestiones técnicas de interés. Dentro de ese total 7 se encuentran con medidas vigentes de restricción al uso del recurso subterráneo en la cuenca, la cual fue una medida tomada por la DGA mediante la Resolución N° 215 dictada en el año 2009. Los criterios utilizados en la toma de la decisión se deben a la evidencia de que la recarga de sectores acuíferos no alcanza a ser superior a la demanda por derechos de aguas subterráneas (DGA, 2009), es decir, se puede entender un sobreotorgamiento del recurso hídrico (DGA, 2020b). Con ello, se limita el otorgamiento de más derechos en dichas zonas, aunque la DGA eventualmente puede otorgar derechos de manera prudencial visto sólo desde un criterio provisional (Art. 66, D.F.L. N° 1.122). De esta manera, la Tabla 3.1.2 detalla los nombres de todos los SHAC junto con las características particulares con respecto a la restricción.

Tabla 3.1.2: SHAC de la Cuenca de Limarí, con característica de limitación. Fuente: DGA (2020).

SHAC	Tipo de Área	Derecho Provisional	Sobreotorgamiento
Higuerilla	Área de Restricción	Si	No
Cogotí	Área de Restricción	Si	No
Combarbalá	Área de Restricción	No	Si
Río Pama	Área de Restricción	No	Si
El Ingenio	Área de Restricción	No	Si
Quebrada Grande	Área de Restricción	Si	Si
Guatulame	Área de Restricción	No	Si
Río Hurtado	Abierta a otorgamiento de DAA	-	-
Río Rapel	Abierta a otorgamiento de DAA	-	-
Río Ponio	Abierta a otorgamiento de DAA	-	-
Río Grande	Abierta a otorgamiento de DAA	-	-
Río Limarí	Abierta a otorgamiento de DAA	-	-
Punitaqui	Abierta a otorgamiento de DAA	-	-
Limarí Desembocadura	Abierta a otorgamiento de DAA	-	-

La delimitación de SHAC en la Cuenca del río Limarí se detalla en la Figura 3.1.5, donde se además se localizan aquellos sectores con declaración de Área de Restricción para otorgamiento de derechos de aprovechamiento de agua subterránea.

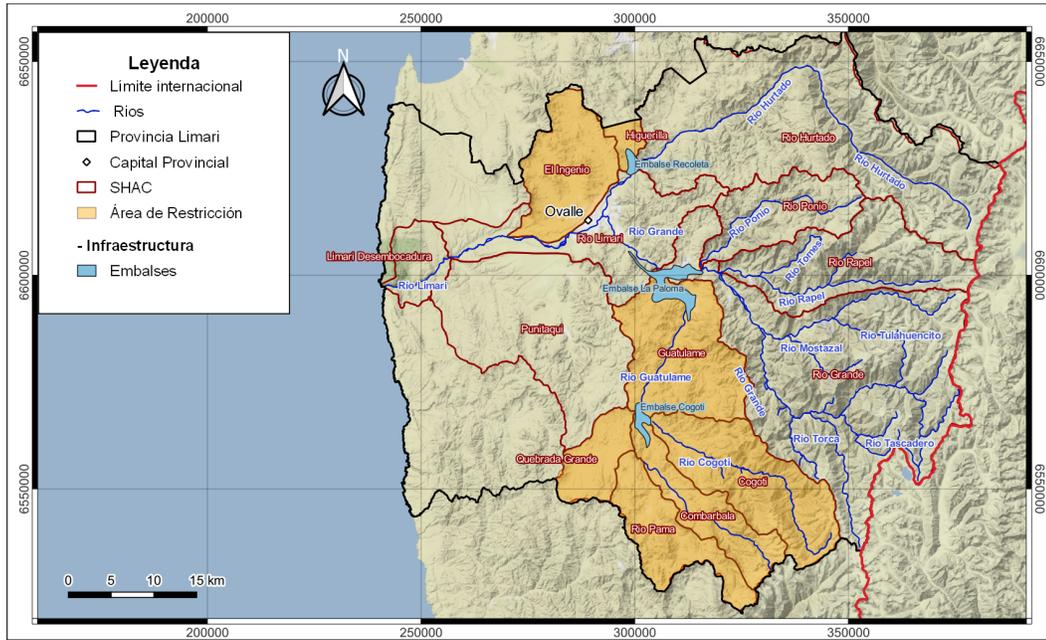


Figura 3.1.5: Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) y Áreas de Restricción en la Cuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de información de la Mapoteca de la DGA y del BCN.

Es relevante añadir que la declaración de Áreas de Protección y Zonas de Prohinción son el único instrumento que maneja la DGA para proteger de manera preventiva las aguas subterráneas, lo que resulta una facultad poderosa para enfrentar la escasez hídrica que aqueja a la provincia en estudio (Fundación Newenko, 2019). Sumado a lo anterior, posterior a la declaración se da origen a una Comunidad de Aguas Subterráneas formada por todos los usuarios de aguas subterráneas comprendidas en ella (Art. 66, D.F.L. N° 1.122) otorgando así un rol preponderante a la población rural que posee título de dominio de DAA en los SHAC, velando así por la buena administración y gestión de los acuíferos; a pesar de ello, la cuenca no posee comunidades de aguas que permitan la gestión de los recursos subterráneos ante los efectos del cambio climático (DGA, 2020b).

3.1.5.1. Cuantificación y caracterización de DAA subterráneas concedidos

Para poder cuantificar y caracterizar los DAA en la cuenca, se obtiene la información disponible en la base de datos del Catastro Público de Aguas de la Dirección General de Aguas sobre Derechos Concedidos para la IV Región de Coquimbo, la cual se descarga desde el sitio online de la DGA, y entrega un archivo de tipo Excel con toda la información que se detalla a continuación.

Según el manejo de los datos, se logró identificar que en la Cuenca del Río Limarí existen 2.979 DAA de naturaleza subterránea proveniente de una fuente acuífera, que se distribuyen a lo largo y ancho de la cuenca en cada uno de los SHAC donde se otorga un caudal total de 6.030,4 lt/s .

Todos los derechos analizados son de tipo consuntivo, es decir, que faculta a su titular para consumir totalmente las aguas en cualquier actividad (Art. 13, D.F.L. N° 1.122), y además todos son de ejercicio permanente, que según el Código de Aguas se refiere a que el titular tiene la facultad de utilizar el agua en la dotación que corresponda, salvo que la fuente de abastecimiento no contenga la cantidad suficiente, en cuyo caso el caudal se distribuirá de manera proporcional (Art. 17, D.F.L. N° 1.122).

Además, los derechos en la cuenca se clasifican según el periodo de tiempo de uso del agua (Art. 19, D.F.L. N° 1.122), de acuerdo a las siguientes definiciones:

- Uso Continuo: Permiten usar el agua en forma ininterrumpida durante las 24 horas del día.
- Uso Discontinuo: Sólo permiten usar el agua durante determinados períodos.
- Uso Alternado: Uso del agua distribuido entre dos o más personas que se turnan sucesivamente.

Así, la Tabla 3.1.3 muestra el detalle del tipo y ejercicio de los derechos, con su respectiva cantidad de caudal asociado.

Tabla 3.1.3: Caracterización y caudal de DAA de tipo consuntivo y permanente, concedidos en la Cuenca del Río Limarí según su ejercicio. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.

Ejercicio	Nº	Caudal (lt/s)	Volumen ⁽¹⁾ (m ³ /año)
Continuo	2.968	5.990,5	188.916.408
Continuo y Provisional	4	15,0	473.040
Discontuo	3	20,3	640.180,8
Alternado	4	4,6	145.065,6
Total	2.979	6.030,4	190.174.694,4

⁽¹⁾ Para el cálculo del volumen se considera que 1,0 lt/s equivale a 31.536 m³/año.

Una arista que es importante conocer, es la relacionada al uso del agua en la zona de estudio. Para ello, la Tabla 3.1.4 detalla el análisis realizado sobre esta variable en los datos de la DGA.

Tabla 3.1.4: Uso de las aguas de los DAA concedidos en la Cuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.

Uso	Nº	%
Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	67	2,2
Riego	85	2,9
Uso Minero	7	0,2
No se indica	2.820	94,7
Total	2.979	100

De lo anterior se observa que existe una alta incertidumbre relacionada al uso del agua según el conocimiento de los derechos, donde cerca de un 95 % de la totalidad de DAA no poseen una categoría con respecto a su uso, lo que representa una proporción importante de derechos inscritos en el catastro público, y por ende un vacío informativo sobre el uso productivo respectivo. Esta falencia es también recogida por la Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile (2019), que menciona dentro de su sección *Limitaciones en la Información*, que dicha carencia de información sobre usos del agua en los DAA limitó el análisis desarrollado al no poder vincular las unidades productivas.

Otro aspecto relevante para el análisis de los DAA es conocer la distribución administrativa a nivel de SHAC de cada uno de los derechos. Según los datos en la base de la DGA, de los 2.979 derechos concedidos en la cuenca, 2.952 se encuentran georeferenciados con su respectivas coordenadas UTM Este (m) y UTM Norte (m); sin embargo, los 27 derechos restantes no se encuentran georeferenciados. Con esto en cuenta, la Tabla 3.1.5 detalla la cantidad de derechos distribuidos en cada uno de los sectores de hidrogeológicos, con el valor de caudal medio anual y volumen total anual otorgado en cada uno de ellos.

Tabla 3.1.5: SHAC de la Cuenca de Limarí, con característica de limitación. Fuente: DGA (2020). Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.

SHAC	Nº de DAA	Porcentaje	Caudal (lt/s)	Volumen (m ³ /año)
Cogotí	35	1,2	71,3	2.249.462,9
Combarbalá	48	1,6	84,8	2.674.252,8
El Ingenio	224	7,6	959,4	30.254.692,3
Guatulame	211	7,1	892,2	28.137.888,8
Higuerilla	3	0,1	14,0	441.504,0
Limarí Desembocadura	9	0,3	15,8	498.268,8
Punitaqui	1.658	56,2	2.121,5	66.904.358,8
Quebrada Grande	318	10,8	149,7	4.721.569,9
Río Grande	27	0,9	210,1	6.624.452,2
Río Hurtado	47	1,6	65,8	2.075.699,5
Río Limarí	190	6,4	648,8	20.459.610,7
Río Pama	173	5,9	193,5	6.102.111,9
Río Rapel	9	0,3	71,9	2.268.699,8
DAA No Georef.	27	0,9	531,5	16.761.384,0
Total	2.979	100 %	6.030,4	190.173.956,5

⁽¹⁾ Para el cálculo del volumen se considera que 1,0 lt/s equivale a 31.536 m³/año.

Para poder hacer visible y mejorar el análisis la distribución de los derechos en la cuenca, la Figura 3.1.6 muestra la ubicación espacial de los derechos en cada uno de los SHAC.

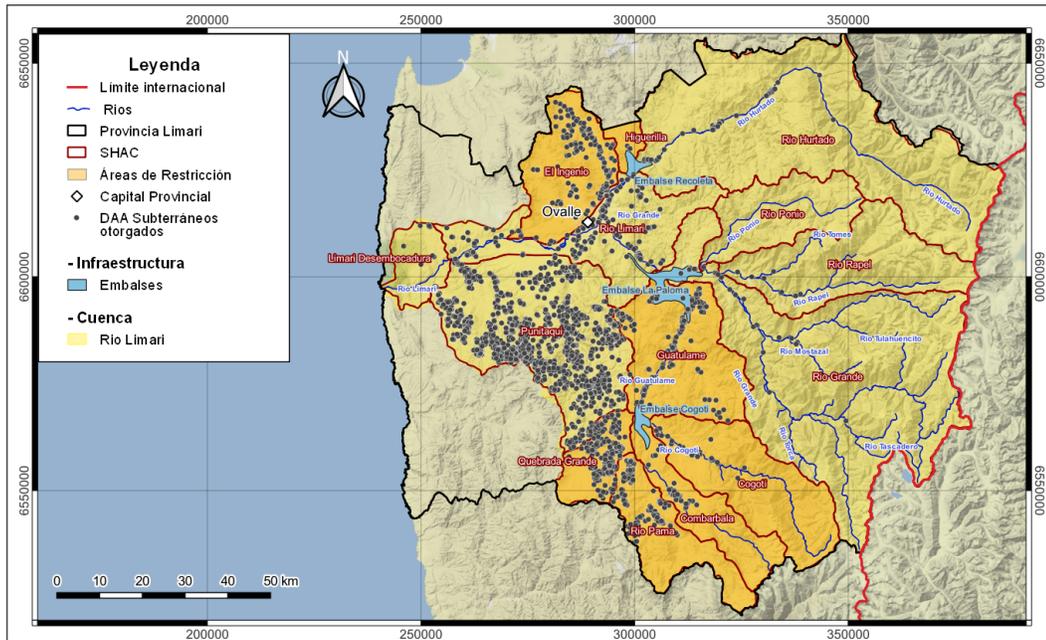


Figura 3.1.6: SHAC de la Cuenca del Río Limarí con los DAA Subterráneas concedidos. Elaboración propia a partir de Mapoteca y Base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.

De ella se puede concluir que existe una marcada densidad de DAA en el SHAC de Punitaqui, el cual concentra un 56,2% de derechos sobre aguas subterráneas en la Cuenca del Río Limarí. Esto se debe a la gran concentración de derechos otorgados a compañías, sociedades y comunidades agrícolas, junto con sociedades vinícolas. La totalidad de derechos otorgados a dichos solicitantes llega a la suma de 1.221 DAA, que representa un 73,6% de DAA en el SHAC Punitaqui, un 41% del total de DAA otorgados en toda la Cuenca del Río Limarí, y además tienen a su haber un caudal medio anual adquirido de 1035,94 lt/s, siendo este un 17,2% del caudal total otorgado en la cuenca.

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, Río Grande y Río Limarí (DGA, 2020b), sectores en los cuales se aglomera gran cantidad de DAA.

3.1.6. Red Hidrométrica

A continuación, se procede a detallar la Red Hidrométrica que presenta la provincia de Limarí, la cual sirve para tener un conocimiento detallado de la cuenca de estudio en función a diversas variables de interés. El Servicio Hidrométrico Nacional es desarrollado por la DGA, y entrega datos históricos para 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 pluviometría, fluviometría y niveles estáticos de pozos de monitoreo para el caso de la Cuenca del Río Limarí.

3.1.6.1. Pluviometría (Meteorología)

Para poder realizar el análisis de precipitaciones en la cuenca, se cuenta con 20 estaciones de monitoreo que están distribuidas en las comunas de la provincia de la siguiente manera.

Tabla 3.1.6: Distribución de Estaciones Pluviométricas (Meteorológicas) en las distintas comunas de los provincia de Limarí.

Comuna	ID	Nombre de estación	Altitud (m.s.n.m)
Ovalle	M1	Ovalle DGA	220
	M2	La Torre	120
	M3	Recoleta Embalse	350
	M4	Sotaqui	280
	M5	Paloma Embalse	320
Combarbalá	M6	Cogotí Embalse	740
	M7	Cogotí 18	840
	M8	Combarbalá	870
Monte Grande	M9	Rapel	870
	M10	El Tomé	420
	M11	Tulahuen	1.020
	M12	Caren	740
	M13	Las Ramadas	1.380
	M14	Tascadero	1.230
Punitaqui	M15	La Placilla	600
	M16	Punitaqui	280
Río Hurtado	M17	Pabellón	1.920
	M18	Hurtado	1.100
	M19	Pichasca	725

3.1.6.2. Fluviometría

Las estaciones fluviométricas son las encargadas de medir la cantidad de agua fluyendo en ríos, para así conocer la disponibilidad del recurso en un periodo específico. Para ello, la cuenca dispone de 19 estaciones de monitoreo que se distribuyen comunalmente de la siguiente manera.

Tabla 3.1.7: Distribución de Estaciones Fluviométricas en las distintas comunas de los provincia de Limarí.

Comuna	ID	Nombre de estación	Altitud (m.s.n.m)
Ovalle	F1	Canal Tuqui	380
	F2	Río Limarí en Panamericana	165
	F3	Estero Punitaqui	170
Combarbalá	F4	Río Cogotí en Fragueta	1.065
	F5	Río Cogotí entrada Embalse Cogotí	670
	F6	Río Combarbalá en Ramadillas	1.430
	F7	Río Pama en Valle Hermoso	850
Monte Patria	F8	Río Grande en Puntilla	420
	F9	Río Rapel en Junta	485
	F10	Río Los Molles en Ojos de Agua	2.355
	F11	Canal Central Los Molles	2.465
	F12	Río Guatulame en El Tomé	410
	F13	Río Mostazal en Cuestecita	1.250
	F14	Río Mostazal en Carén	700
	F15	Río Grande en Cuyano	870
	F16	Río Grande en Las Ramadas	1.380
Río Hurtado	F17	Río Tascadero en Desembocadura	1.370
	F18	Río Hurtado en Angostura Pangué	485
	F19	Río Hurtado en San Agustín	2.035

3.1.6.3. Monitoreo de pozos de observación DGA

Las estaciones de monitoreo de pozos son las responsables de medir la distancia entre el espejo de agua del nivel freático y la boca del pozo o superficie del terreno. De esta manera, resulta un indicador relevante al momento de estimar la cantidad de agua que se almacena en los acuíferos para posteriormente realizar el abastecimiento de agua subterránea como derecho de aprovechamiento a los usuarios y comunidades que así lo necesiten (DGA, 2016). Es de gran importancia y utilidad manejar un conjunto robusto de mediciones sobre niveles estáticos en pozos de monitoreo a lo largo del tiempo (años o décadas), ya que permite hacer un registro hidrológico abarcando fluctuaciones sobre los niveles de agua subterránea en acuíferos, para así poder entender las variables externas que influyen en las tendencias marcadas (Taylor y Alley, 2001).

En la cuenca se tienen 36 pozos de observación, los cuales se detallan en la Tabla 3.1.8 y 3.1.9.

Tabla 3.1.8: Distribución de Estaciones de Niveles de Pozos en la comuna de Ovalle. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA

Comuna	ID	Nombre de estación	Altitud (m.s.n.m)
Ovalle	P1	A.P. Sotaqui	259
	P2	Asentamiento Santa Catalina	351
	P3	Asentamiento Campo	190
	P4	Asentamiento Las Vegas	150
	P5	Asentamiento Nogales	230
	P6	Asentamiento Nueva Aurora	245
	P7	Asentamiento Unión Campesina	236
	P8	Barraza	78
	P9	Canal Tabali	81
	P10	Caracilla	289
	P11	Embalse La Paloma	317
	P12	Fundo El Mirador	196
	P13	Fundo San Felix	325
	P14	La Paloma	325
	P15	Mina Panulcillo	264
	P16	Parcela 13 Limarí	158
	P17	Parcela 24 Limarí	143
	P18	Pueblo Lagunilla	303
	P19	Pueblo Recoleta	313
	P20	Pueblo San Julian	124
	P21	Pueblo San Julian II	127
	P22	Pueblo Tabali	99

Tabla 3.1.9: Distribución de Estaciones de Niveles de Pozos en las comunas de Combarbalá, Monte Patria, Punitaqui y Río Hurtado. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA

Comuna	ID	Nombre de estación	Altitud (m.s.n.m)
Combarbalá	P23	Fundo Cogotí	737
	P24	LLanos de Chingay	876
	P25	Pueblo La Ligua	680
Monte Patria	P26	A.P. Chañaral	475
	P27	Asentamiento Alborada Juntas	500
	P28	Asentamiento Cerrillos	633
	P29	Asentamiento Sol de Pradera	981
	P30	Chilecito	408
	P31	Fundo Las Represas Vitivinivolas	404
Punitaqui	P32	La Higuera	398
	P33	Monte Patria	400
	P34	La Placilla	222
	P35	Asentamiento Graneros	204
Río Hurtado	P36	Pueblo Samo Alto	601

3.1.6.4. Geolocalización de estaciones de la red

La Figura 3.1.7 detalla la ubicación de todas las estaciones descritas anteriormente, la cual muestra el mapa confeccionado utilizando la información recopilada en el sitio de Información de Estaciones de la DGA.

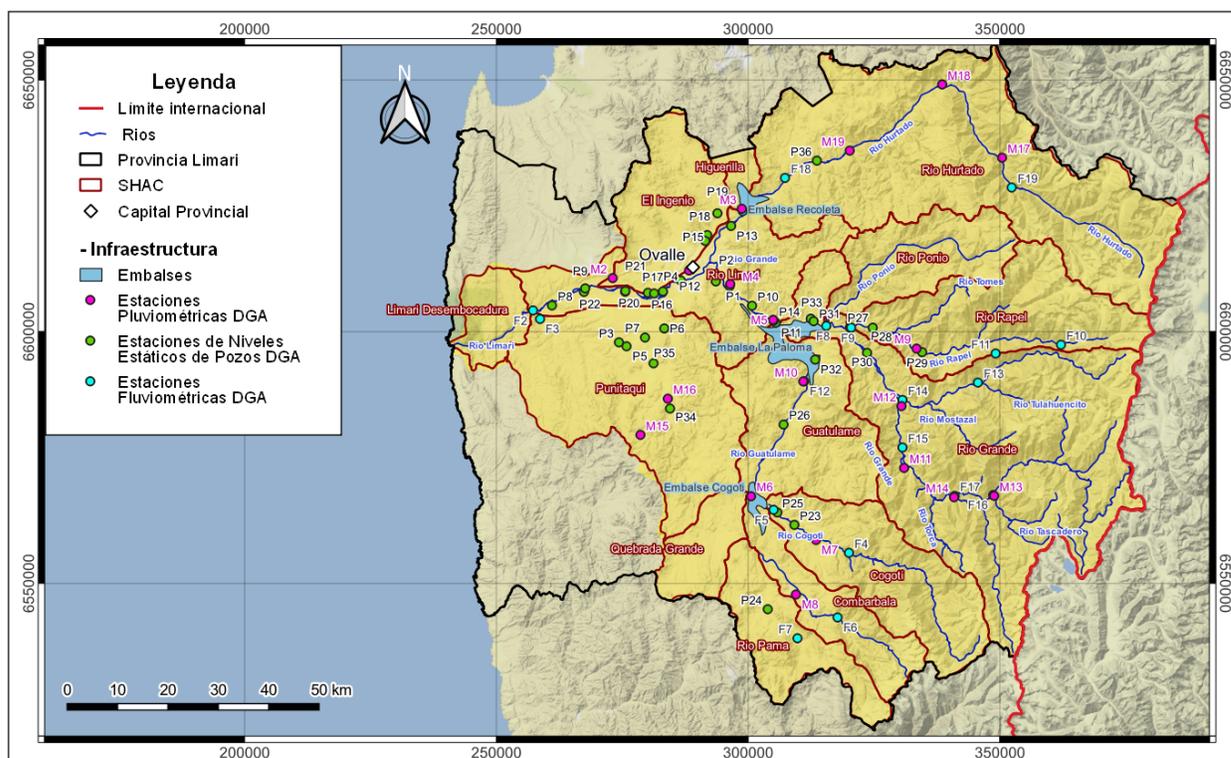


Figura 3.1.7: Distribución de Estaciones DGA Pluviométricas, Fluviométricas y de Niveles Estáticos de Pozos en la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA.

3.2. Sistemas de Agua Potable Rural

Los Sistema de Agua Potable Rural, de aquí en adelante APR, se constituyen principalmente por habitantes de las poblaciones rurales, que se organizan mediante la conformación de Comités o Cooperativas, las cuales reciben asesorías y asistencia por parte del Estado y de la Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales para que su desempeño sea óptimo en su comunidad. Los comités contribuyen a generar un modelo público-comunitario para la gestión de agua potable, el cual tiene un gran enfoque social y que se administra con un sentido solidario, generando así grandes beneficios para los habitantes de localidades no urbanas (Villaroel, 2012).

En la provincia de Limarí los comités de APR tienen una estrecha relación con la DOH. También, para tratar temas sobre el recurso hídrico y abastecimiento de agua se relacionan directamente Juntas de Vigilancia y Aguas del Valle, que es la empresa concesionaria de servicios sanitarios que realiza tratamiento y distribución de agua potable en la Región de Coquimbo. En el caso del financiamiento para infraestructura, los APR se vinculan con el Gobierno Regional (GORE) de Coquimbo, Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) de Coquimbo y con las Municipalidades. En general los APR tienen un bajo nivel de influencia con respecto a la toma de decisiones en los territorios en temas relacionados al recurso hídrico, pero sí es un actor que tiene un alto grado de interés y disposición en participar en estudios vinculados al agua y su desarrollo (DGA, 2020b).

3.2.1. Desarrollo provincial y comunal del Programa de APR

Actualmente en la provincia existen 96 Sistemas de APR, que cumplen los objetivos de proporcionar agua potable en cantidad, calidad y continuidad en las cinco comunas del Limarí. La Tabla 3.2.1 que se muestra a continuación detalla la distribución comunal de los APR de acuerdo al tipo de localidad rural, la cual fue elaborada con información recopilada en el Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP donde existen datos y mapas descargables con información de Sistemas APR de la DOH.

Tabla 3.2.1: Distribución comunal de Sistemas APR en la provincia de Limarí. Elaborado a partir de Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP.

Comuna	Nº APRs	Concentrado	Semiconcentrado
Ovalle	36	29	7
Combarbalá	18	15	3
Monte Patria	27	24	3
Punitaqui	6	5	1
Río Hurtado	9	9	0
Total	96	82	12

Sobre los orígenes de APRs en la provincia, si bien el programa inicia en Chile en los años 60, recién en 1971 se crea el primer sistema de agua potable rural en la provincia de Limarí, que se llamó *APR Huatulame*, el cual se localiza actualmente en la comuna de Monte Patria y lleva el mismo nombre. De ese entonces en adelante hubo un crecimiento que tuvo su auge en las décadas de 1980 y 1990 debido al incremento de los recursos financieros involucrados en las inversiones del programa, lo que llevó a mejorar la infraestructura a nivel provincial en la Región de Coquimbo (Villaroel, 2012), en la cual los Sistemas de APR del Limarí representan el 44,7% del total de sistemas presentes en la región, según información recopilada de la Subdirección de

Servicios Sanitarios Rurales (SSR) a diciembre del 2021. Otro aspecto que toma relevancia en la década de 1990 es la implementación de una nueva institucionalidad en el sector del agua potable y saneamiento que dio paso a la creación de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) que pasó a tomar las atribuciones que hasta entonces tenía el Servicio Nacional de Obras Sanitarias (SENDOS), logrando así con este nuevo agente de servicio público el aumento en la cobertura del programa para los años posteriores (Donoso et al., 2015). Así, en la Figura 3.2.1 se puede apreciar el desarrollo en el transcurso de los años de APRs en Limarí, donde se ve la marcada ejecución de sistemas de agua potable desde 1980 hasta fines del decenio de los años 90.

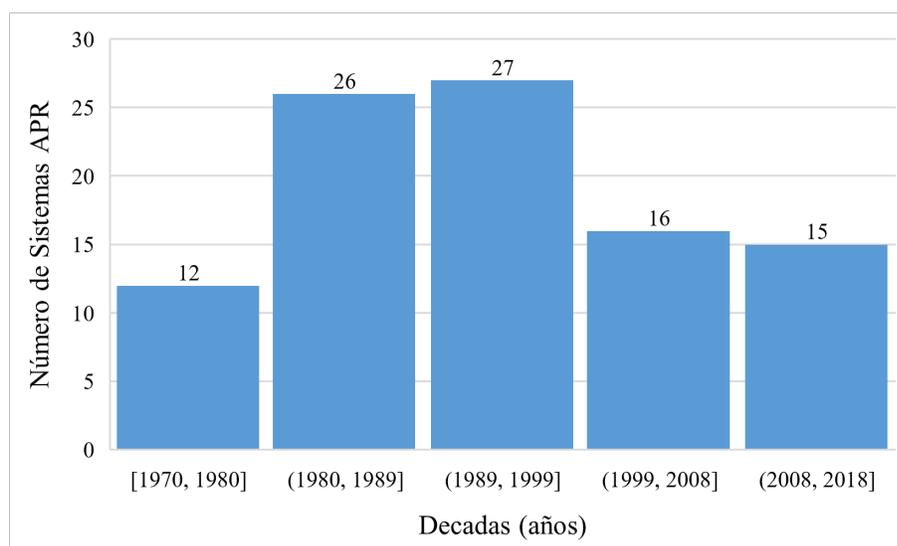


Figura 3.2.1: Desarrollo de Sistemas de APR en la provincia de Limarí desde 1970 hasta el año 2018. Elaboración propia a partir de datos recopilados vía Portal de Transparencia a la Subdirección de SSR.

La ejecución de las obras de agua potable en el medio rural favorece a la población local, que hasta el día de hoy se beneficia con las gestiones que las comunidades emprenden para entregar un buen servicio, sin embargo, en la actualidad existen limitaciones a nivel de abastecimiento y calidad debido a que diversas comunidades presentan déficit originado por:

1. La disminución de la disponibilidad de aguas superficiales y/o subterráneas para abastecer a la población rural
2. La inequidad técnica-financiera de los comités
3. El aumento considerable de la demanda en zonas sin planificación de disponibilidad hídrica (DGA, 2020b)

3.2.2. Infraestructura y sistemas de la provincia

Junto con entender el desarrollo de los APR en la provincia, es también necesario comprender cómo estos sistemas operan y producen el recurso hídrico para el abastecimiento en las localidades rurales. Así, se entiende que dentro del marco de diseño del Programa de APR se tiene como componente principal la asignación de infraestructura de agua potable, la cual es entregada a los comités o cooperativas para la adecuada administración, operación y mantención, sin embargo, Donoso et al. (2015) dan cuenta de que con el paso del tiempo los sistemas presentan problemas

relacionados con la dotación de agua, interfiriendo así con el objetivo general establecido en el programa ligado al suministro de agua potable en cantidad, calidad y continuidad. De esta manera, a continuación se da a conocer la infraestructura estándar de agua potable que es entregada a la mayoría de los comités no tan sólo a nivel provincial, sino que también se replica en la mayoría de APRs de la región (CAZALAC, 2016).

- **Sistemas de captación:** Los sistemas de captación son principalmente pozos o norias.
- **Sistema de tratamiento:** El agua es tratada y desinfectada en casetas, donde se tienen tratamientos basados en hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio (MOP, 2019a), y en otras ocasiones se introducen inyecciones de permanganato de potasio para la acción desinfectante del agua extraída de la fuente.
- **Sistema de almacenamiento y regulación:** Para esta componente los sistemas cuentan con estanques de almacenamiento y/o regulación, los cuales permiten distribuir el agua por efecto de la gravedad. Los estanques pueden estar elevados o semi-enterrados (MOP, 2019a), y la capacidad de los estanques más comunes varía entre los 15 m³ hasta los 200 m³. La materialidad de ellos varía ya que se pueden tener de tipo hormigón armado, acero inoxidable o de fibra de vidrio (CAZALAC, 2016).
- **Sistema de filtrado:** Los sistemas presentan tecnologías de filtrado variada, donde se tiene ósmosis inversa, filtro eliminador de hierro y manganeso (Fe-Mn), filtro de carbón activado (CAZALAC, 2016).
- **Sistemas de distribución:** Se diseñan redes para las conducciones e impulsiones, que pueden ser de acero galvanizado, acero al carbono, polietileno de alta densidad (HDPE) o PVC; también existen diseños de distribuciones que poseen plantas reelevadoras. Por otra parte, las conexiones domiciliarias se proyectan en cañería de cobre, HDPE o PVC (MOP, 2019a).
- **Sistema de impulsión:** Se utilizan bombas sumergibles en las obras de captación.
- **Tableros de control:** Se presentan sistemas eléctricos para realizar diagnósticos en el sistema de impulsión, los cuales son manipulado mediante tableros de control.

Según el Manual de Proyectos de Agua Potable Rural (2019a), cada uno de los componentes mencionados anteriormente debe ajustarse a las respectivas normativas de diseño, normas técnicas, normas de fabricación, normas chilenas, reglamentos, entre otros, según sea necesario.

Para poder comprender esquemáticamente la infraestructura de los Sistemas APR en la provincia de Limarí, la Figura 3.2.2 muestra a modo de ejemplo el *layout* del Sistema de Agua Potable Rural San Marcos (ubicado en la comuna de Combarbalá), el cual fue confeccionado durante el mes de febrero del año 2022 en el Comité de APR 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. La confección del esquema contó con el apoyo de: la Directiva del Comité comandada por el tesorero Don Manuel Rojas, el profesor guía Adolfo Ochoa Llangato, la ingeniera María José Arellano y la supervisión directa del operador del sistema René Rojas Díaz.

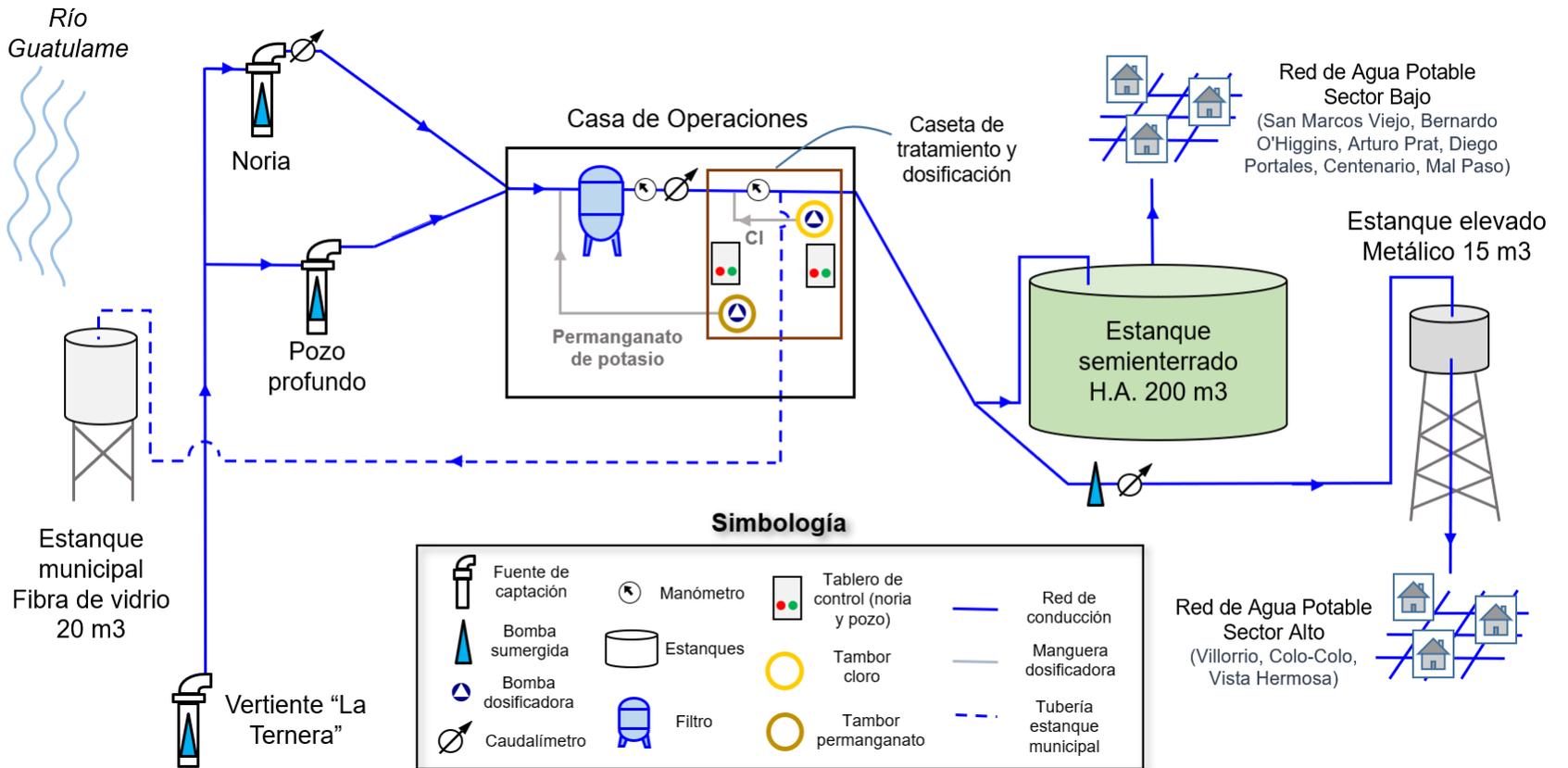


Figura 3.2.2: Layout del Sistema de Agua Potable Rural San Marcos. Elaboración propia.

Como el motivo de estudio del presente trabajo de título guarda relación directa con los sistemas de captación, es necesario realizar la caracterización de los APR en función de: el ámbito administrativo (subdivisión por SHAC), niveles de dotación y la cantidad de captaciones de tipo pozo presentes en cada uno de ellos. Para cumplir con eso se procede a realizar el catastro de APR en la provincia mediante datos recopilados de la Subdirección de SSR, que se complementa con información proveniente de la DOH y DGA (2020c). De esta manera, a la fecha se localizan en la provincia de Limarí 96 Sistemas de APR, los cuales se dividen administrativamente por comuna y además se sitúan cada uno de ellos en diferentes SHAC. La información se detalla en la Tabla 3.2.2, 3.2.3 y 3.2.4

Tabla 3.2.2: Sistemas APR de la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de información recopilada en Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).

ID	APR	SHAC	Arranques	Beneficiados ⁽¹⁾	Pozos
1	ALGARROBOS DE RECOLETA	Río Limarí	62	193	2
2	BARRAZA	Río Limarí	522	1.619	4
3	CAMARICO	Punitaqui	149	462	2
4	CARACHILLA	Río Limarí	150	465	4
5	CERRILLOS DE TAMAYA	Río Limarí	971	3.011	2
6	CHALINGA	Punitaqui	205	636	2
7	EL GUINDO	Río Limarí	454	1.408	3
8	EL TRAPICHE	El Ingenio	129	400	2
9	RECOLETA	El Ingenio	218	676	2
10	LA PALOMA (UNION PALOMA)	Río Limarí	115	357	2
11	LA SILLETA	El Ingenio	66	205	0
12	LA TORRE-LAS SOSSAS	Río Limarí	425	1.318	2
13	LAGUNILLAS	El Ingenio	254	788	3
14	Limarí	Río Limarí	636	1.972	3
15	LOS NOGALES-CAMPO LINDO	Punitaqui	286	887	4
16	NUEVA AURORA	Punitaqui	287	890	2
17	NUEVO FUTURO	Punitaqui	314	974	4
18	ORURO ALTO	Río Limarí	171	531	4
19	LA UNION - YACONI	Río Limarí	201	624	0
20	PORVENIR	Punitaqui	282	875	3
21	SAMO BAJO	Río Limarí	75	233	2
22	SAN JULIÁN	Río Limarí	218	676	3
23	SANTA CATALINA	Río Limarí	152	472	3
24	SOCOS- BARRAZA ALTO	Punitaqui	182	565	4
25	SOL DEL PACÍFICO	El Ingenio	203	630	0
26	SONORA-LOS ACACIOS	Punitaqui	277	859	0
27	TABALÍ	Río Limarí	164	509	2
28	VILLASECA	Río Limarí	496	1.538	2
29	VILLORRIO EL TALHUÉN	El Ingenio	120	372	1
30	LA PORTADA DE SOTAQUÍ	Río Limarí	102	317	1
31	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	Punitaqui	139	431	2
32	NUEVA ESPERANZA	Río Limarí	144	447	Sin Info.

⁽¹⁾ Se utiliza el valor medio de 3,1 personas por hogar para determinar los beneficiados por sistema, multiplicando dicho valor por el número de arranques.

Tabla 3.2.3: Sistemas APR de la provincia de Limarí (continuación 1). Elaboración propia a partir de información recopilada en Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).

ID	APR	SHAC	Arranques	Beneficiados	Pozos
33	POTRERILLOS BAJOS	Río Limarí	211	655	0
34	VIDA NUEVA	Río Limarí	122	379	1
35	PERAL OJO DE AGUA	Río Limarí	31	97	S.I.
36	HIGUERITAS UNIDAS	El Ingenio	105	326	1
37	Cogotí 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	165	0
41	LA CAPILLA	Combarbalá	36	112	0
42	LA ISLA	Cogotí	171	531	3
43	LA LIGUA DE Cogotí	Cogotí	353	1.095	3
44	LAS BARRANCAS-EL CHINEO	Cogotí	276	856	3
45	MANQUEHUA	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	1.395	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
55	CARÉN	Río Grande	278	862	2
56	CERRILLOS DE RAPEL	Río Rapel	272	844	2
57	CHAÑARAL DE CARÉN	Río Grande	302	937	1
58	CHILECITO-MIALQUI	Río Grande	526	1.631	2
59	COLLIGUAY	Río Grande	291	903	1
60	EL COIPO	Río Grande	149	462	2
61	EL MAITÉN	Río Grande	82	255	Superficial
62	EL MAQUI-PAMPA GRANDE	Río Grande	254	788	2
63	EL TOME ALTO	Guatulame	242	751	3
64	FLOR DEL VALLE	Río Grande	401	1.244	2
65	HUATULAME	Guatulame	542	1.681	3
66	JUNTAS-DOS RÍOS	Río Rapel	195	605	2
67	LAS MOLLACAS	Río Rapel	169	524	2
68	LAS RAMADAS DE PEJERREYES	Río Grande	182	565	1
69	LOS CLONQUIS	Río Rapel	159	493	2
70	LOS MORALES	Guatulame	167	518	3
71	LOS TAPIA	Guatulame	129	400	3
72	PEDREGAL	Río Grande	179	555	1
73	RAPEL	Río Rapel	481	1.492	1
74	SEMITA	Río Grande	111	345	1
75	SOL DE LAS PRADERAS	Río Rapel	149	462	1

⁽¹⁾ Se utiliza el valor medio de 3,1 personas por hogar para determinar los beneficiados por sistema, multiplicando dicho valor por el número de arranques.

Tabla 3.2.4: Sistemas APR de la provincia de Limarí (continuación 2). Elaboración propia a partir de información recopilada en Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).

ID	APR	SHAC	Arranques	Beneficiados	Pozos
76	TULAHUÉN	Río Grande	861	2.670	2
77	VADO HONDO	Río Grande	77	239	1
78	LA TRANQUITA	Río Grande	32	100	Sin Info.
79	TOMÉ BAJO	Guatulame	97	301	1
80	BELLAVISTA DE CARÉN	Río Grande	34	106	1
81	PANGUESILLO	Río Grande	50	155	1
82	GRANEROS	Punitaqui	99	307	4
83	LA GRANJITA-MORRO ALEGRE	Punitaqui	133	413	2
84	LA HIGUERA DE PUNITAQUI	Punitaqui	207	642	4
85	LA SILLETA-LAS TURQUEZAS	Punitaqui	161	500	0
86	LAS RAMADAS DE PUNITAQUI	Punitaqui	410	1.271	2
87	EL HINOJO	Punitaqui	111	345	3
88	FUNDINA	Río Hurtado	260	806	2
89	HUAMPULLA	Río Hurtado	109	338	1
90	HURTADO-EL CHAÑAR	Río Hurtado	406	1.259	2
91	LAS BREAS	Río Hurtado	165	512	2
92	PICHASCA	Río Hurtado	580	1.798	2
93	QUEBRADA SANTANDER	Río Hurtado	44	137	2
94	SAMO ALTO	Río Limarí	235	729	3
95	SERÓN	Río Hurtado	330	1.023	2
96	TABAQUEROS	Río Hurtado	200	620	2

⁽¹⁾ Se utiliza el valor medio de 3,1 personas por hogar para determinar los beneficiados por sistema, multiplicando dicho valor por el número de arranques.

Según la información recopilada a través del informe de la DGA *Sustentabilidad de Asentamientos Humano Rurales en Chile - Análisis desde los Sistemas Sanitarios Rurales - Cuenca del Limarí* (2020c), la cantidad total de captaciones presentes en la provincia corresponde a 189, sin embargo, 188 de ellas son pozos de extracción de aguas subterráneas (sondajes profundos y norias), y sólo el APR El Maiten (ID 61) capta sus aguas de manera superficial, mediante la acumulación de agua proveniente de una vertiente. Por otro lado, 9 sistemas APR (ID 11, 19, 25, 26, 33, 40, 41, 48 y 85) no presentan captación para el abastecimiento de agua potable, el cual se suple mediante la compra de agua realizada a la empresa de concesión sanitaria que entrega cobertura a las localidades de la provincia, la cual corresponde a Aguas del Valle S.A. (DGA, 2020c). Por último, no se pudo recopilar información sobre captaciones de los APR Peral Ojo de Agua, La Tranquita y Nueva Esperanza.

La distribución de APRs en la provincia de Limarí se muestra en la Figura 3.3.1, de ella se puede deducir que los sistemas de agua potable se distribuyen en su mayoría en sectores cercanos a los principales cauces o ríos de la red hidrográfica de la Cuenca del Río Limarí. Otro aspecto que es posible inferir, es que también los APR se emplazan en sectores donde existen un potencial de agua subterránea ante la presencia de acuíferos.

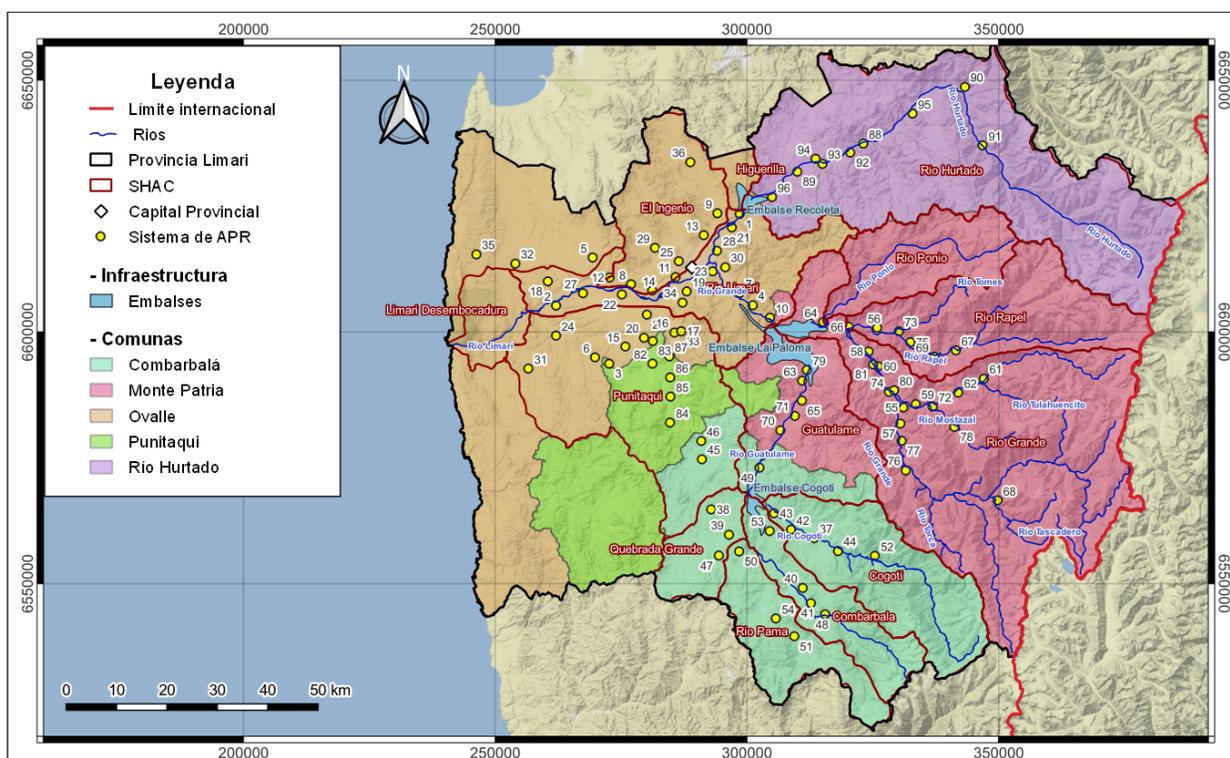


Figura 3.2.3: Distribución de Sistemas de APR en la provincia de Limarí. Elaboración propia a partir de Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, y Plataforma del Comité Técnico Hídrico de Coquimbo.

3.2.3. Situación DAA Subterráneas en los APR

Para poder cuantificar y caracterizar los DAA de los Sistemas de APR, se procede a recopilar información desde el Catastro Público de Aguas en línea de la DGA, la que entrega datos sobre derechos originales constituidos, solicitudes aprobadas, entre otras, tanto para aguas que poseen naturaleza superficial como también para el caso de fuentes subterráneas. También, se estudia el informe sobre *Sustentabilidad de Asentamientos Humano Rurales* (DGA, 2020c) que complementa los datos que se utilizan.

De esta manera, para el caso del análisis posterior se procede a analizar la situación sobre la naturaleza de los derechos de agua subterránea de los 96 Sistemas de APR localizados en la provincia de Limarí, en los cuales la fuente proviene de un acuífero.

3.2.3.1. Derechos otorgados y con dominio de Empresas Sanitaria

Dentro de la totalidad de sistemas de la provincia, se constata que 43 de ellos poseen derechos de aprovechamiento otorgados o adquiridos mediante resolución oficial. Todos ellos son de tipo consuntivo. Además, todos ejercen el derecho de manera permanente y de manera continua.

Para poder cuantificar cada uno de los derechos, la Tabla 3.2.5 detalla el ID del APR con su respectivo caudal otorgado.

Tabla 3.2.5: Caudal medio anual otorgado a Sistemas de APR con DAA. Elaboración propia a partir de base de datos de Derechos Concedidos para la IV Región de la DGA.

ID	Caudal (lt/s)	ID	Caudal (lt/s)	ID	Caudal (lt/s)
2	5,7	30	4,0	72	9,0
3	18,0	37	8,74	73	10,0
4	5,0	42	7,0	74	3,7
5	7,8	43	18,0	75	3,44
6	1,0	44	2,8	76	11,0
7	9,9	45	5,36	82	2,85
8	3,8	51	12,0	84	2,8
9	3,24	57	20,0	86	3,0
12	10,0	58	7,3	87	2,0
16	3,44	59	4,71	90	3,0
17	4,0	65	7,2	91	8,0
20	6,8	68	4,76	94	6,0
24	11,52	69	3,0	95	7,0
27	1,5	70	7,2		
28	15,0	71	7,0		

También en función a la información recopilada, se identificó que en la provincia existen 10 Sistemas de APR que poseen derechos asociados a favor de la Empresa de Obras Sanitarias de Coquimbo (ex SENDOS) (DGA, 2020c). El detalle de caudal medio anual otorgado a cada uno de ellos con su respectivo ID se muestra en la Tabla 3.2.6.

Tabla 3.2.6: Caudal medio anual otorgado a Sistemas de APR 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 (2020c).

ID	Caudal (lt/s)	ID	Caudal (lt/s)
6	2,4	43	1,5
13	1,0	57	6,5
14	1,8	60	0,5
22	1,9	61	0,8
39	0,7	63	1,9

La Tabla 3.2.7, detalla la cantidad de caudal y volumen otorgado para los sistemas anualmente, de acuerdo a los derechos otorgados y los derechos con título de dominio de empresa sanitaria.

Tabla 3.2.7: Resumen de caudal y volumen total, para derechos otorgados y con título de dominio en Sistemas de APR.

Derecho	Cantidad	Caudal total (lt/s)	Volumen ⁽¹⁾ (m³/año)
Otorgado	43	297,55	9.383.852,2
Título de dominio ex SENDOS	10	18,7	586.569,6

⁽¹⁾ Para el cálculo del volumen se considera que 1,0 lt/s equivale a 31.536 m³/año.

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

Para comprender la situación de los recursos hídricos, desde el punto de vista subterráneo y superficial, se procede a analizar la base de datos de la DGA, en particular la Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en línea del Servicio Hidrométrico Nacional de la entidad en cuestión. Para ello, a continuación se procede a detallar cada una de las variables, evaluando la componente hidrológica a través del análisis de estaciones pluviométricas y fluviométricas, y también se realiza un análisis desde el punto de vista de las variaciones de niveles freáticos en la provincia a través del monitoreo de los niveles estáticos en pozos de observación de la DGA. Las variables en su conjunto se interconectan, por lo que también se examinará cómo cada una de ellas puede influir sobre las otras.

3.3.1. Componente Hidrológica

Para estudiar la componente hidrológica de la totalidad de la cuenca, se realiza un análisis estadístico de estaciones pluviométricas y fluviométricas de la DGA, las cuales son relevantes dentro del modelo conceptual y permiten comprender los procesos dominantes del ciclo hidrológico de la Cuenca del Limarí. Para ello, se descarga información del Servicio Hidrométrico Nacional para un rango de tiempo que va desde inicios del año 1982 hasta finales del año 2021, teniendo así una ventana temporal de 40 años, que resulta un periodo conveniente para analizar ciclos en hidrología y así concluir tipos de regímenes hidrológicos imperantes en las zonas en cuestión. Sin embargo, en todas las estaciones la estadística no es completa, ya que por un lado para la variable de precipitaciones se tienen registros hasta el año 2020, y en el caso del análisis de caudales se tiene registro hasta el año 2021, con los últimos meses del año sin datos. Una estación con registro completo es aquella que tiene una cantidad de 480 datos monitoreados, es decir 40 datos (periodo de tiempo de 40 años) por cada uno de los 12 meses del año. Sin perjuicio de lo anterior, no se considera el relleno de datos para complementar la estadística, ya que se estima que el comportamiento esperado no tendrá una variación significativa ante la falta de información de muestreo.

Así, el trabajo se divide en el estudio de las subcuencas de la Cuenca del Río Limarí, las cuales se detallan a continuación.

1. Subcuenca Río Limarí: Se origina en las cercanías de la ciudad de Ovalle, donde ocurre el nacimiento del Río Limarí, originado por la confluencia de los ríos Grande y Hurtado; y llega hasta la desembocadura de las aguas en el Océano Pacífico. En esta zona se ubican valles transversales y además se tiene llanos de sedimentación fluvial y aluvional; además, concentra gran parte de los DAA Subterráneos. Las estaciones pluviométricas y fluviométricas que se utilizan son:
 - M2: Estación Pluviométrica La Torre
 - M16: Estación Pluviométrica Punitaqui
 - F2: Estación Fluviométrica Río Limarí en Desembocadura

2. Subcuenca Río Hurtado: Tiene su nacimiento en los cordones montañosos de los Andes, fluye el Río Hurtado hasta el Embalse Recoleta, el cual aguas abajo regula el curso inferior del Río Hurtado, que representa el dren más importante en el área norte de la cuenca del Río Limarí (DGA, 2020a). Las estaciones pluviométricas y fluviométricas que se utilizan son:
 - M3: Estación Pluviométrica Recoleta Embalse
 - M17: Estación Pluviométrica Pabellón
 - F18: Estación Fluviométrica Río Hurtado en Angostura Pangué
 - F19: Estación Fluviométrica Río Hurtado en San Agustín
3. 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. Las estaciones pluviométricas y fluviométricas que se utilizan son:
 - M9: Estación Pluviométrica Rapel
 - M11: Estación Pluviométrica Tulahuen
 - F8: Estación Fluviométrica Río Grande en Puntilla
 - F9: Estación Fluviométrica Río Grande en Junta
 - F15: Estación Fluviométrica Río Grande en Cuyano
4. Subcuenca Río Guatulame: Se ubica en la zona de escurrimientos sur de la cuenca del Limarí, donde fluyen valiosos cauces como el Río Guatulame, Río Combarbalá y Río 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. Al igual que la subcuenca del Río Limarí, en esta subcuenca se encuentra gran cantidad de DAA. Las estaciones pluviométricas y fluviométricas que se utilizan son:
 - M8: Estación Pluviométrica Combarbalá
 - M10: Estación Pluviométrica El Tomé
 - F5: Estación Fluviométrica Río Cogotí entrada Embalse Cogotí
 - F12: Estación Fluviométrica Río Guatulame en El Tomé

La Tabla 3.3.1 muestra los ID de cada una de las estaciones a analizar, con la cantidad de datos a estudiar para cada una de ellas.

Tabla 3.3.1: ID de Estaciones Pluviométricas y Fluviométricas de la DGA para analizar el régimen de subcuencas de la Cuenca del Río Limarí, con su respectivo número de datos. Elaboración propia a partir de Base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

Subcuenca	ID Pluviométrica	Nº de datos	ID Fluviométrica	Nº de datos
Río Limarí	M2	460	F2	442
	M16	452	- (1)	-
Río Hurtado	M3	459	F18	466
	M17	454	F19	466
Río Grande	M9	456	F8	462
	M11	449	F9	441
	-	-	F15 (2)	463
Río Guatulame	M8	454	F5	412
	M10	456	F12	441

(1) Se analiza sólo la estación F2, debido a que la estación F3 se encuentra en las cercanías.

(2) Se analizan 3 estaciones fluviométricas por la gran extensión de la Subcuenca del Río Grande.

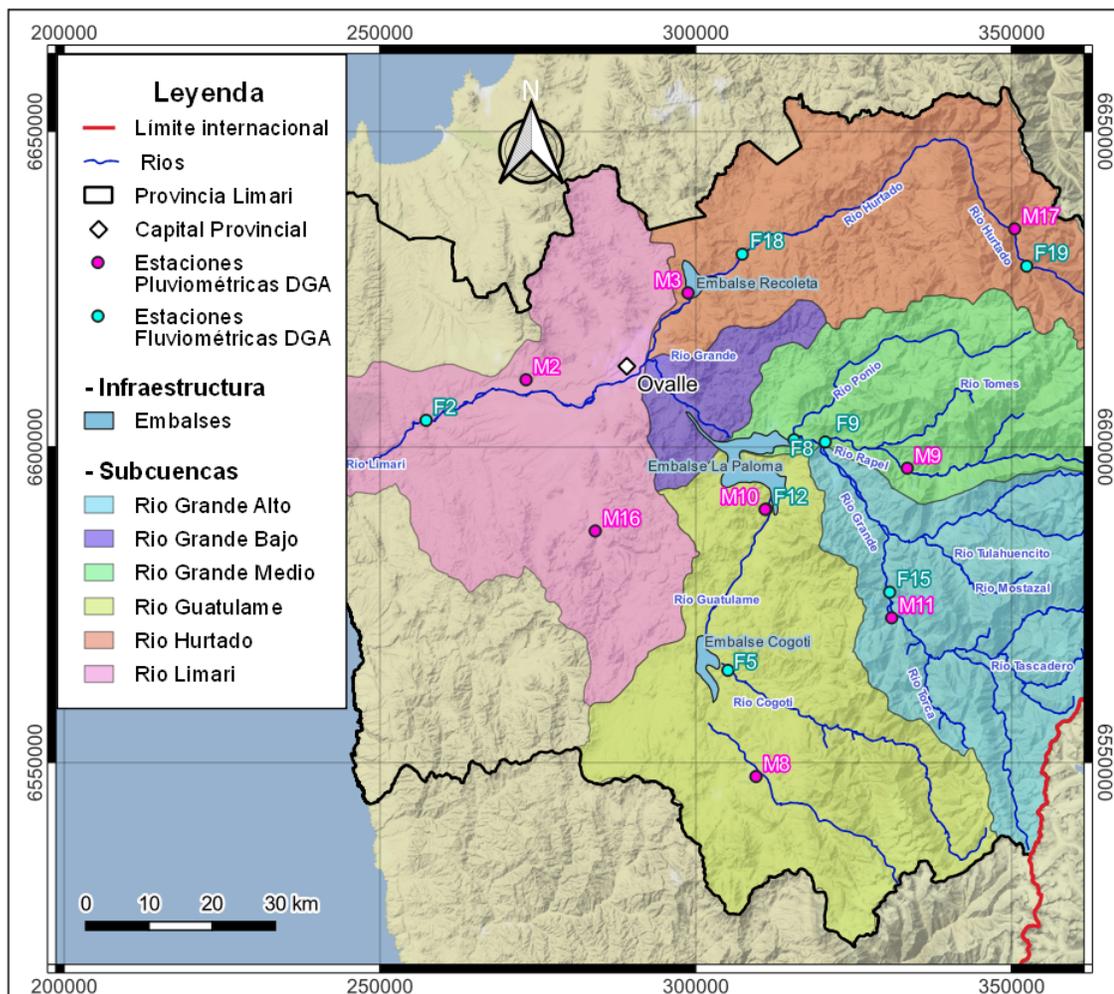


Figura 3.3.1: Distribución de estaciones de monitoreo para el estudio de la Componente Hidrológica de la cuenca. Elaboración propia a partir de Mapoteca DGA.

3.3.1.1. Análisis de precipitaciones

Para el análisis de las precipitaciones se opta por 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, que se detallan en la Tabla 3.3.2

Tabla 3.3.2: Descripción de los periodos de tiempo utilizados para la confección de las Curvas Estacionales. Elaboración propia.

Años	Nombre del periodo	Descripción
1982-2009	Histórico	Periodo histórico en el cual la estadística de la estación posee un comportamiento normal.
2010-2020	Megasequía	Periodo de tiempo que se encuentra influenciado por la persistencia temporal y la extensión espacial del fenómeno de megasequía, que se manifestó desde el año 2010 hasta el año 2015 en Chile, y que no tiene precedentes en el último milenio (CR2, 2015).

- **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, es decir, se puede saber que tan seca puede ser la subcuenca debido a la que la probabilidad de excedencia permite saber cuantos meses en el año existe precipitación casi nula, lo que además tiene consecuencias en los flujos superficiales. 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 (Wilks, 2011), que tiene la siguiente expresión:

$$p(x_i) = \frac{i}{N+1} \quad (3.3.1)$$

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.

Es conveniente mencionar que la curva de duración no compara los meses lluviosos con los meses secos, sino que permite representar aquella fracción del tiempo durante la cual se iguala o supera un valor determinado de precipitación.

De este modo, para cada una de las subcuencas se detallarán las curvas estacionales y curva de duración para analizar la estacionalidad y comportamientos históricos de precipitación en las zonas de la cuenca del Río Limarí.

1. Subcuenca del Río Limarí

Según las curvas estacionales confeccionadas para las estaciones de la subcuenca (Ver Figura 3.3.2), se observa una clara disminución de las precipitaciones medias mensuales en el mes de julio para el periodo de megasequía comparado con el periodo histórico, que llega a una disminución del 69% aproximadamente; además, se observa un leve desplazamiento de las precipitaciones hacia los meses de mayo y junio, donde para mayo se presenta un aumento de la precipitación media mensual de un 48%. El comportamiento durante los meses de octubre a abril permanece igual comparando ambos periodos.

Sobre la curva de duración mostrada en la Figura 3.3.3, se desprende que sólo un 15% de precipitaciones iguala o excede valores de precipitación superiores a 25 mm. Además, se ve la clara tendencia de precipitaciones nulas, las cuales ocurren casi el 75% del tiempo.

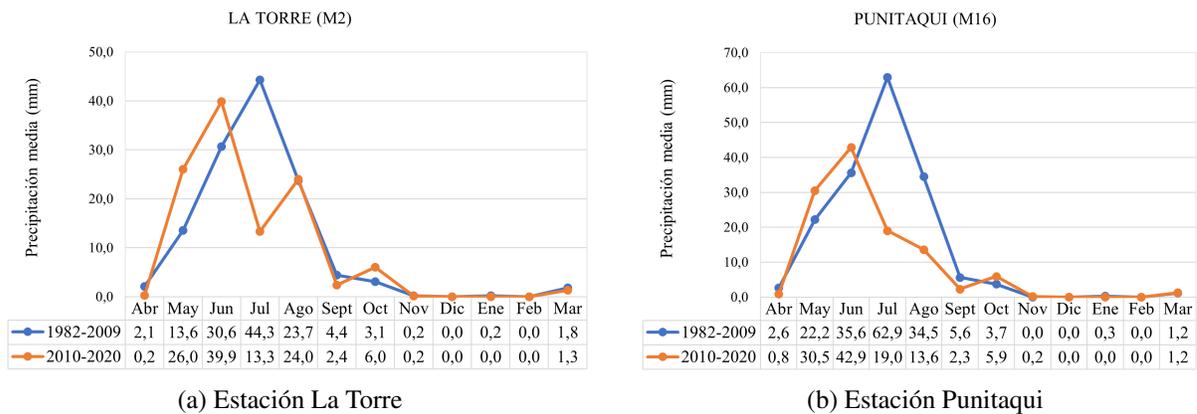


Figura 3.3.2: Curvas estacionales para Estaciones Pluviométricas en la Subcuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

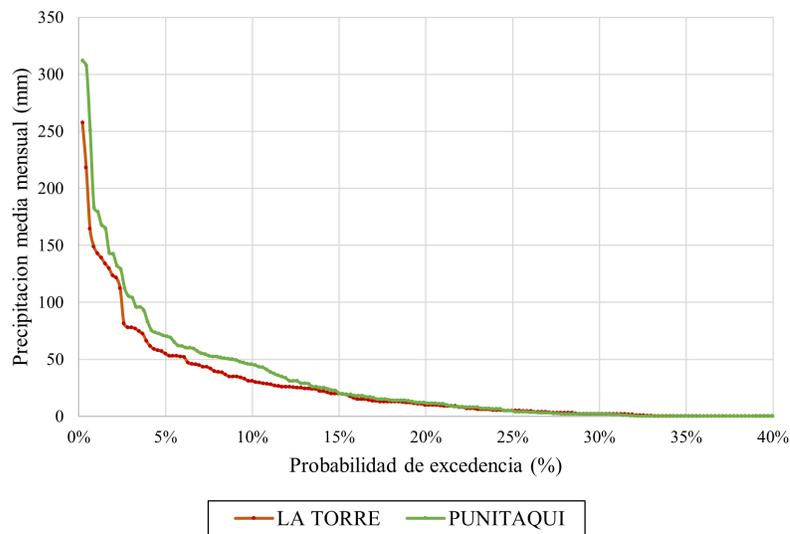


Figura 3.3.3: Curvas de duración para las Estaciones Pluviométricas M2 y M16 de la Subcuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

2. Subcuenca del Río Hurtado

Al igual que en la Subcuenca del Río Limarí, la Figura 3.3.4 muestra que existe un leve desplazamiento de las precipitaciones, esta vez marcada hacia el mes de mayo, en el que se observa un aumento de las precipitaciones medias mensuales de un 126% (promediando ambas estaciones). Por otro lado, se repite la disminución de precipitaciones en el mes de julio para el periodo de megasequía, que también se observa en el mes de agosto. Sobre la curva de duración (Ver Figura 3.3.5), se ve que el comportamiento de las estaciones es similar, ya que ambas presentan valores máximos cercanos. Resulta importante mencionar que si bien los comportamientos son similares, no ocurre lo mismo con la elevación de las estaciones, ya que M3 se sitúa a 350 m.s.n.m. y la estación M17 monitorea a 1.920 m.s.n.m., lo que permite concluir que no existe un efecto orográfico relevante de las lluvias en la subcuenca.

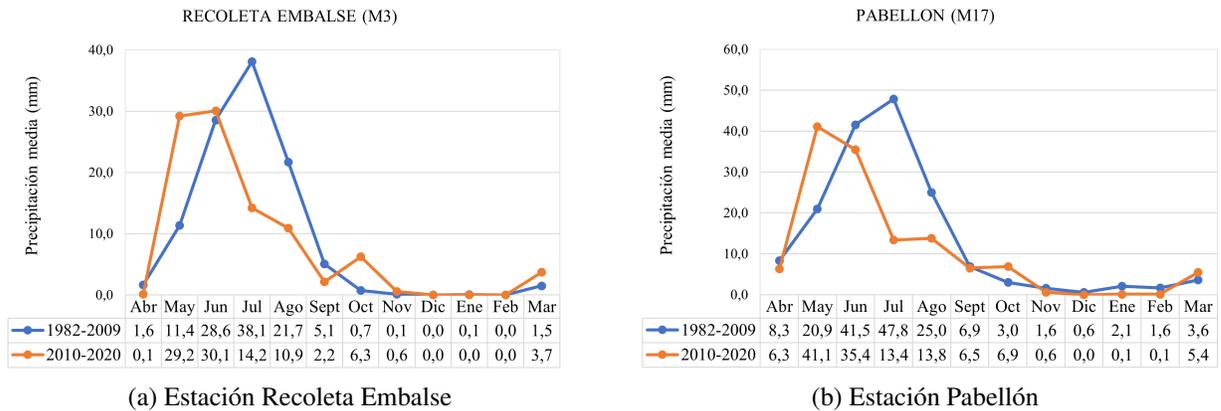


Figura 3.3.4: Curvas estacionales para Estaciones Pluviométricas en la Subcuenca del Río Hurtado. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

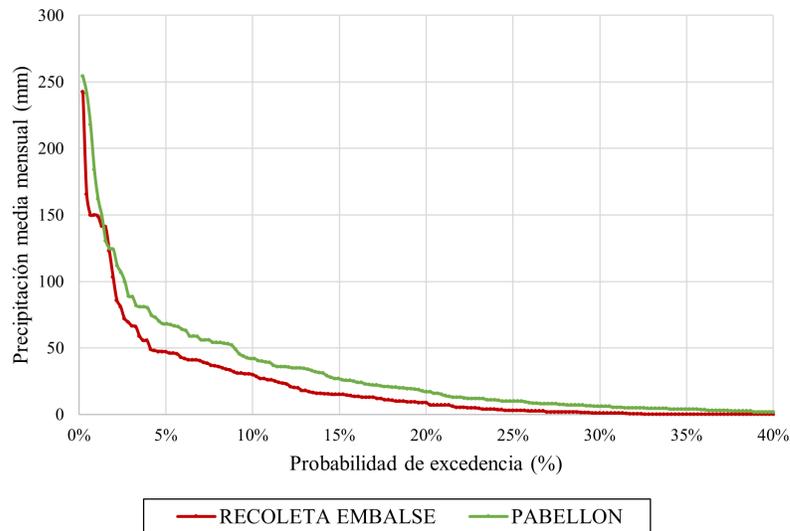


Figura 3.3.5: Curvas de duración para las Estaciones Pluviométricas M3 y M17 de la Subcuenca del Río Hurtado. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

3. Subcuenca del Río Grande

En el caso del Río Grande se presenta la misma tendencia de reducción de precipitaciones en el mes de julio, y una leve disminución de eventos en el mes de agosto comparando los periodos en cuestión, tal como se detalla en la Figura 3.3.6. Además, se nota el desplazamiento estacional de lluvias al mes de mayo, donde para el caso de la Estación Rapel (M9) en el periodo histórico se registra una media mensual de 24,4 mm y para el periodo de megasequía se tienen precipitaciones medias mensuales de 54,3 mm, lo que se expresa en un aumento de precipitaciones de un 122 %, entre los periodos estudiados. Sobre la curva de duración (Figura 3.3.7), se observa que 82 % de precipitaciones no supera los 50 mm y además las estaciones experimentan un comportamiento similar para probabilidades menores a dicho valor de excedencia.

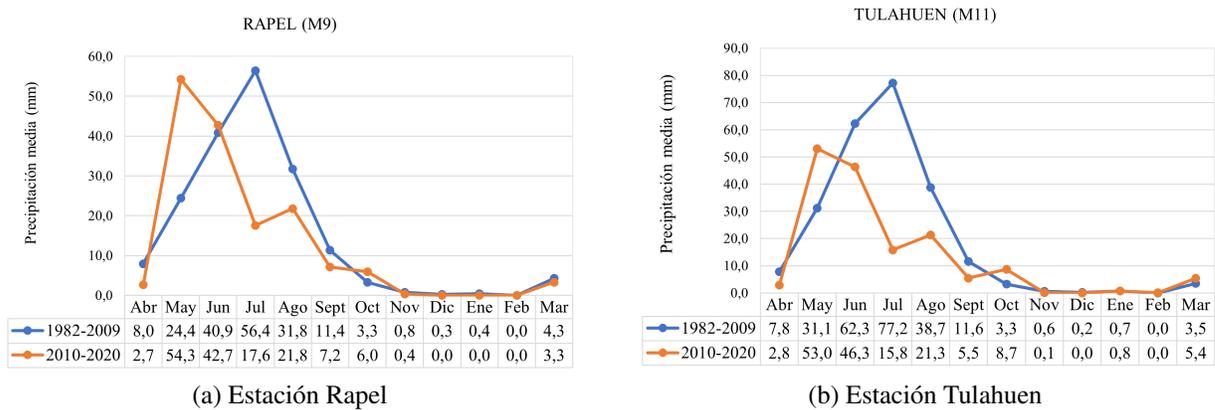


Figura 3.3.6: Curvas estacionales para Estaciones Pluviométricas en la Subcuenca del Río Grande. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

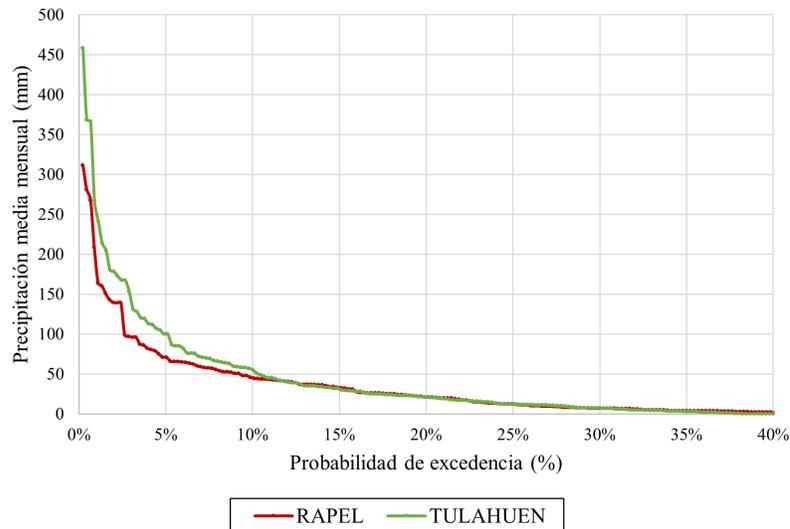


Figura 3.3.7: Curvas de duración para las Estaciones Pluviométricas M9 y M11 de la Subcuenca del Río Grande. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

4. Subcuenca del Río Guatulame

La Figura 3.3.8 detalla las precipitaciones medias mensuales para la Subcuenca del Río Guatulame, donde se evidencia la tendencia de disminución de precipitaciones medias mensuales registradas en los meses de julio y agosto al igual que en las otras estaciones estudiadas, sin embargo, no se observa un cambio primordial en la estacionalidad de lluvias en los meses invernales. Por otro lado, para la temporada estival el comportamiento de precipitaciones no tiene variaciones, teniendo así curvas similares en las estaciones a pesar de la diferenciación en los periodos de tiempo.

En el caso de las curvas de duración, se presenta un comportamiento casi idéntico de las estaciones monitoreadas, donde la máxima precipitación registrada bordea los 350 mm al mes para probabilidades de excedencia prácticamente nulas (Figura 3.3.9).

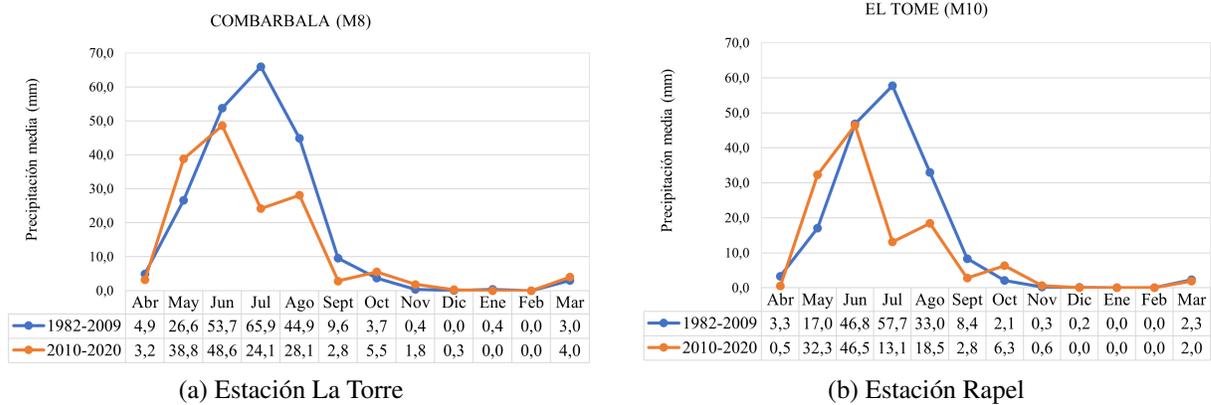


Figura 3.3.8: Curvas de precipitación media anual histórica. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

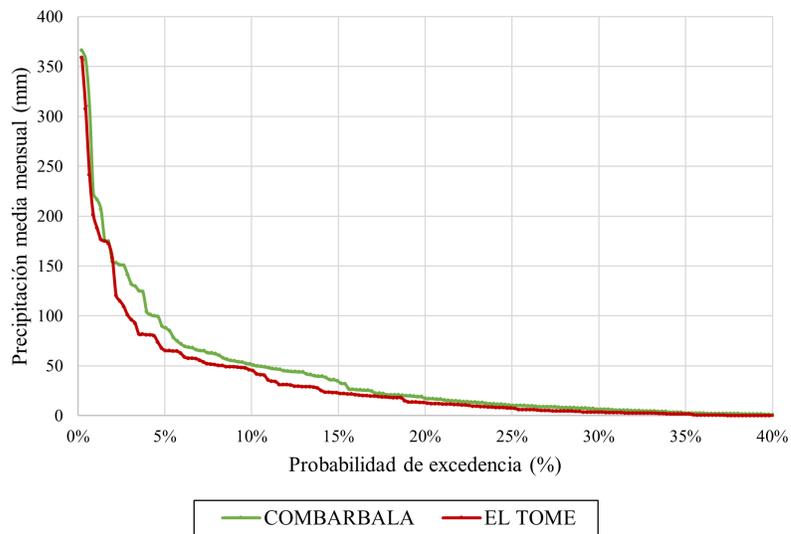
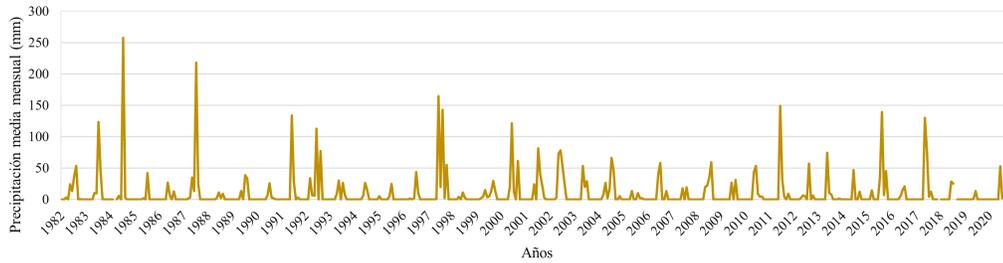
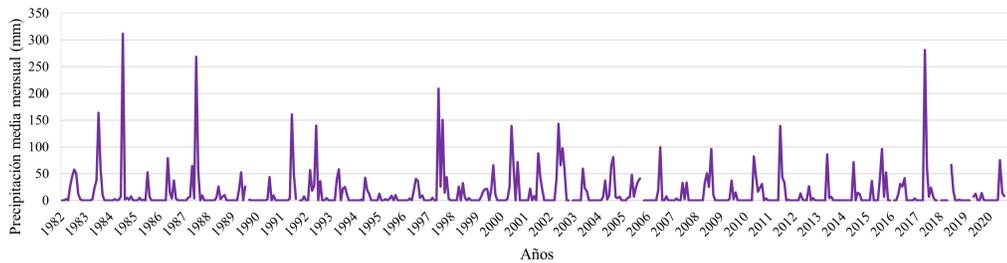


Figura 3.3.9: Curvas de duración para las Estaciones Pluviométricas M8 y M10 de la Subcuenca del Río Guatulame. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

Por último, para evidenciar la variación de las precipitaciones en todo el periodo de tiempo estudiado, se procede a realizar series históricas de precipitaciones medias mensuales para las estaciones El Tomé y Combarbalá, tal como se detalla en la Figura 3.3.10. En ella se puede observar que existe una leve tendencia a la disminución de eventos peaks de precipitación en los últimos años, que se agudizó en el periodo comprendido entre el año 2000 hasta fines del año 2011, tiempo en cual se comenzó a acuñar comúnmente el término de sequía. Además, se puede ver que de las estaciones estudiadas en los últimos 5 años sólo hacia fines del año 2017 se presentó una media mensual de precipitación superior a los 100 mm. Para complementar lo anterior, la Figura 3.3.11 muestra la serie de precipitación anual histórica de las estaciones seleccionadas, donde se observa la línea de tendencia negativa que se traduce en la disminución de precipitaciones en la subcuenca.



(a) Estación Combarbalá



(b) Estación El Tomé

Figura 3.3.10: Precipitación media mensual histórica en estaciones pluviométricas de subcuencas del Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

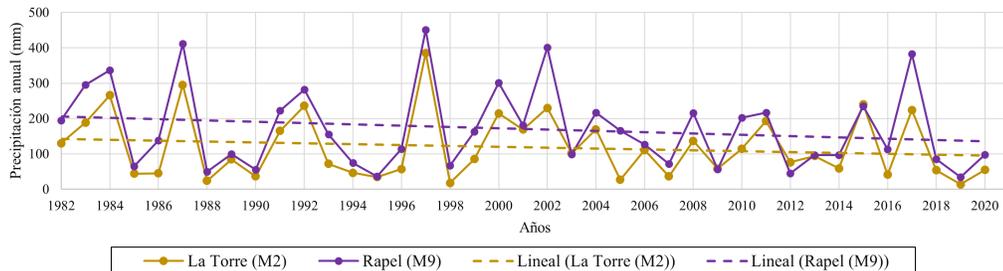


Figura 3.3.11: Serie de precipitaciones anuales históricas en estaciones pluviométricas de monitoreo en subcuencas del Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA

3.3.1.2. Análisis de escorrentía superficial

Se entiende que los eventos asociados a las dimensiones climático-meteorológicas son aleatorios, por ende, el estudio de escorrentía superficial que es producida por precipitación directa sobre cauces y afluentes, está asociado a muestras y poblaciones de distribución de probabilidades. De esta manera, en este subcapítulo se detalla la confección de curvas de variación estacional, las cuales son representaciones de distribuciones de probabilidad del caudal medio mensual para cada mes, que permiten determinar regímenes hidrológicos.

Para el desarrollo del análisis, la distribución de probabilidad que se utiliza es la Distribución de Weibull, sobre la cual se trabaja para determinar las probabilidades de excedencia en las muestras analizadas. Con esta distribución es posible describir distintos años durante el intervalo de tiempo a analizar (1982-2021), los cuales se detallan a continuación:

- Años secos: Asociados a temporadas con caudales que no superan los $5 \text{ m}^3/\text{s}$, producto de periodos de sequías prolongadas. Este tipo de características se asocia con $P_{ex} = 85 \%$.
- Años promedio: Asociados a un comportamiento normal de la zona de estudio, producto de una situación normal registrada. Este tipo de características se asocia con $P_{ex} = 50 \%$.
- 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 $P_{ex} = [5 \%, 10 \%]$.

A continuación, se procede a determinar mediante el análisis de curvas de variación estacional los regímenes hidrológicos imperantes en las subcuencas del Río Limarí.

1. Subcuenca Río Limarí

Los datos de la Tabla 3.3.3 permiten confeccionar la curva estacional para F2 (Ver Figura 3.3.12), la cual muestra que no existe gran diferencia entre años secos y normales, infiriendo que la condición promedio de la subcuenca es seca y está marcada por prolongadas sequías, situación que se ha intensificado en la última década. Por otro lado, se observa que en años húmedos el comportamiento de los caudales en los meses de noviembre a enero tiende a tener un alza considerable, que se relaciona con deshielos producidos en la criósfera; junto con lo anterior, se observa también que durante la temporada invernal se tiene un alza en los caudales registrados, que se entiende por la componente pluvial dominante.

Con esto, se demuestra que la estación y la subcuenca presentan un régimen de carácter mixto, con característica nivo-pluvial.

Tabla 3.3.3: Valores de Caudal Medio Mensual en m³/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluiométrica Río Limarí en Panamericana (F2). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

Pexc	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5%	19,97	41,85	33,16	87,75	75,57	89,73
10%	10,00	21,70	28,00	30,86	29,64	54,10
50%	1,51	1,93	3,39	3,91	2,79	2,46
85%	0,24	0,36	0,97	0,73	0,61	0,53
Pexc	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5%	88,65	138,47	160	102,91	38,87	23,78
10%	40,24	103,88	87,65	34,81	18,28	10,01
50%	1,635	1,495	1,285	1,075	1,13	1,14
85%	0,6	0,45	0,35	0,35	0,26	0,24

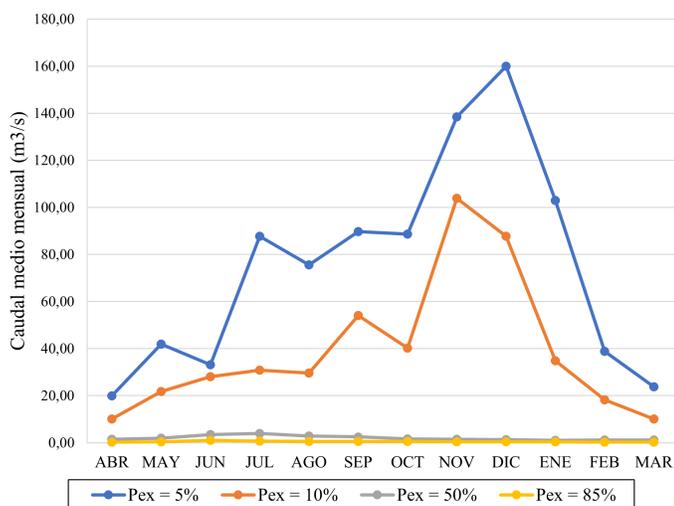


Figura 3.3.12: Curva de Variación Estacional para Estación Fluiométrica Río Limarí en Panamericana (F2), Subcuenca del Río Limarí. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

2. Subcuenca Río Hurtado

En este caso las Tablas 3.3.4 y 3.3.5 muestran el detalle de datos para las dos estaciones de estudio. Producto de ello, en la Figura 3.3.13 se observa a la izquierda la curva de variación estacional para la estación F18, la cual muestra un comportamiento similar a lo visto en la Subcuenca del Río Limarí, por lo que se define su régimen hidrológico como nivo-pluvial.

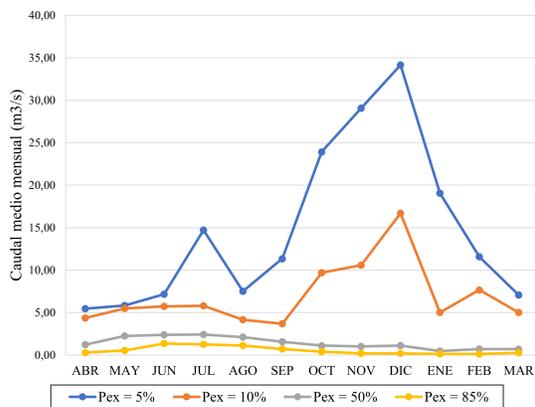
Por otra parte, a la derecha se puede apreciar una variación en el comportamiento de la curva para la estación F19, en la cual se repite la condición homogénea para años secos y años promedio, situación que también se arrastra para años húmedos, donde para la temporada invernal no se tiene una gran influencia pluvial. Para años húmedos se experimenta un aumento de caudales durante la temporada de verano por fenómenos de deshielo debido al alza de temperaturas. Junto con que la estación se encuentra en la cordillera andina y está localizada a una altitud de 2.305 ms.n.m., se desprende que su régimen hidrológico se asocia a un comportamiento puramente nival.

Tabla 3.3.4: Valores de Caudal Medio Mensual en m³/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluiométrica Río Hurtado en Angostura (F18). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

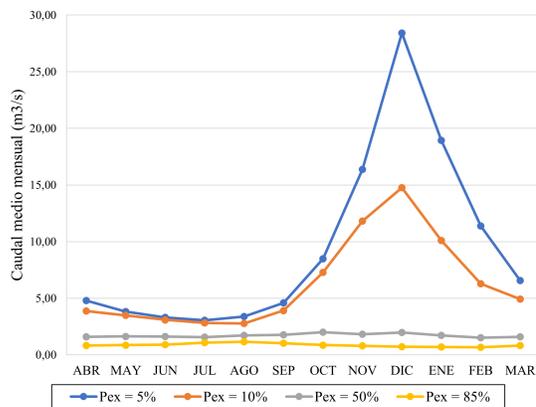
Pexc	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5 %	5,47	5,83	7,17	14,70	7,52	11,35
10 %	4,37	5,49	5,72	5,80	4,15	3,68
50 %	1,21	2,25	2,38	2,43	2,11	1,55
85 %	0,28	0,55	1,36	1,25	1,13	0,70
Pexc	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5 %	23,92	29,06	34,15	19,06	11,56	7,06
10 %	9,69	10,58	16,69	5,02	7,66	5
50 %	1,10	1,00	1,11	0,46	0,72	0,69
85 %	0,39	0,18	0,195	0,14	0,13	0,26

Tabla 3.3.5: Valores de Caudal Medio Mensual en m³/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluiométrica Río Hurtado en San Agustín (F19). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

Pexc	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5 %	4,80	3,83	3,31	3,04	3,39	4,59
10 %	3,86	3,48	3,09	2,81	2,77	3,91
50 %	1,59	1,63	1,62	1,56	1,72	1,78
85 %	0,82	0,86	0,89	1,08	1,15	1,03
Pexc	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5 %	8,49	16,38	28,41	18,94	11,37	6,56
10 %	7,29	11,82	14,765	10,1	6,29	4,92
50 %	2,005	1,83	1,98	1,725	1,51	1,59
85 %	0,86	0,79	0,71	0,69	0,67	0,83



(a) Estación Río Hurtado en Angostura (F18)



(b) Estación Río Hurtado en San Agustín (F19)

Figura 3.3.13: Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluiométricas en la Subcuenca del Río Hurtado. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

3. Subcuenca Río Grande

Debido a la gran extensión de la subcuenca del Río Grande, se consideran tres estaciones para el análisis de curvas estacionales (Ver figura 3.3.14), las cuales se construyen según los datos recopilados que se muestran en las Tablas 3.3.6, 3.3.7 y 3.3.8.

De las gráficas se puede mencionar que en años húmedos las precipitaciones medias mensuales máximas se registran en el mes de diciembre donde la nieve contenida en unidades glaciológicas se derrite, sin embargo, los valores entre estaciones varían entre sí en grandes magnitudes; además, para la condición húmeda, en la estación F8 se aprecia que la componente dominante en el mes de agosto es la pluvial debido a las lluvias invernales, situación que no se presenta en gran medida en las estaciones F9 y F15. Por otro lado, el comportamiento en años secos sigue siendo crítico en el escurrimiento superficial, en donde no se observan influencias significativas por aportes pluviales o nivales. Por último, en el caso de los años normales se tiene un aumento de caudal con respecto a años secos, que en el caso de las estaciones F8 y F15 está marcado en el mes de octubre, que puede ser producto de deshielos anticipados; y junto con lo anterior, en la estación F9 se presenta un aumento de caudal comparado con años secos, producto de las lluvias en invierno que predominan en el mes de julio.

De esta manera, la subcuenca puede presentar predominancia de régimen hidrológico nival, con tendencias al régimen nivo-pluvial.

Tabla 3.3.6: 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). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

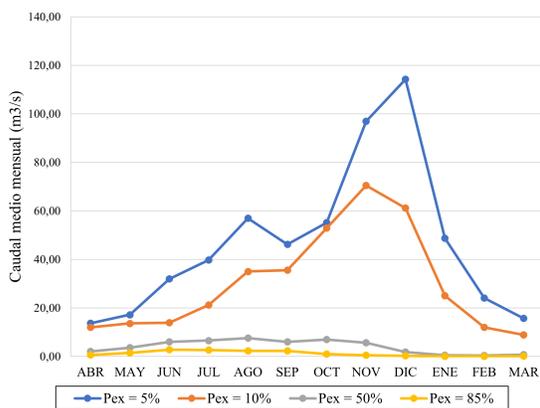
Pexc	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5%	13,71	17,20	32,00	39,80	56,99	46,23
10%	12,01	13,62	13,97	21,20	35,02	35,58
50%	2,09	3,63	6,01	6,56	7,53	6,01
85%	0,60	1,44	2,74	2,65	2,32	2,34
Pexc	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5%	55,22	96,86	114,29	48,75	24,07	15,7
10%	52,85	70,53	61,14	25,05	11,99	8,86
50%	6,99	5,62	1,88	0,54	0,43	0,8
85%	0,95	0,56	0,24	0,08	0,08	0,21

Tabla 3.3.7: Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Rapel en Junta (F9). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

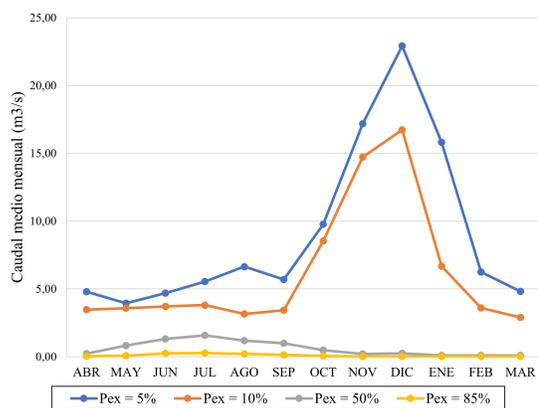
Pexc	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5%	4,80	3,93	4,68	5,55	6,64	5,70
10%	3,46	3,58	3,71	3,80	3,14	3,43
50%	0,22	0,83	1,32	1,56	1,19	1,00
85%	0,03	0,07	0,24	0,26	0,20	0,13
Pexc	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5%	9,76	17,17	22,92	15,82	6,25	4,81
10%	8,53	14,72	16,72	6,68	3,6	2,89
50%	0,48	0,21	0,255	0,095	0,095	0,105
85%	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01

Tabla 3.3.8: Valores de Caudal Medio Mensual en m³/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Grande en Cuyano (F15). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

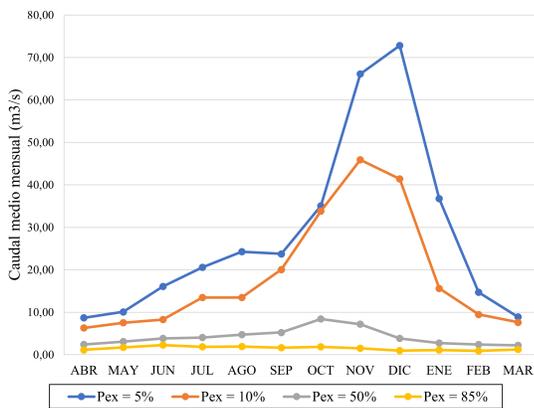
Pexc	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5%	8,72	10,09	16,09	20,56	24,26	23,74
10%	6,30	7,51	8,29	13,45	13,49	20,06
50%	2,40	3,07	3,84	4,05	4,71	5,24
85%	1,14	1,71	2,24	1,87	1,94	1,63
Pexc	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5%	35,03	66,09	72,78	36,75	14,72	8,88
10%	33,81	45,88	41,37	15,62	9,47	7,63
50%	8,4	7,17	3,82	2,77	2,41	2,22
85%	1,83	1,49	0,98	1,13	0,9	1,23



(a) Estación Río Grande en Punta San Juan (F8)



(b) Estación Río Rapel en Junta (F9)



(c) Estación Río Grande en Cuyano (F15)

Figura 3.3.14: Curvas de Variación Estacional para Estaciones Fluviométricas en la Subcuenca del Río Grande. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

4. Subcuenca Río Guatulame

Para la estación F5, los datos en estudio (Ver Tabla 3.3.9) permiten elaborar la curva de variación estacional que se detalla a la izquierda de la Figura 3.3.15. De ella se observa que el régimen hidrológico que predomina es el nivo-pluvial, con años húmedos donde los valores máximos se ubican entre octubre y enero por efectos de deshielo, con presencia también de alzas pluviales en el mes de agosto.

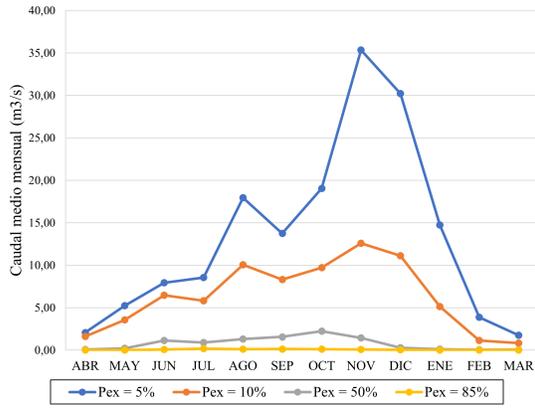
En el caso de la estación F12, según los datos recopilados y evaluados de la Tabla 3.3.10 se construye la curva de variación estacional (derecha de la Figura 3.3.15), la que muestra un cambio con respecto a las curvas de las otras subcuencas, debido a que en años húmedos el comportamiento presenta una variación en relación a los meses de máximo caudal. Así, se observan dos tendencias marcadas en relación a los máximos caudales: en primer lugar, en los meses de julio y agosto los caudales son máximos producto de eventos relevantes de intensa precipitación, y en segundo lugar, en noviembre y diciembre los caudales exceden el promedio producto de fenómenos de derretimiento nival. Con esto en consideración, la estación presenta un régimen mixto que se puede catalogar como una superposición de regímenes pluviales y nivales. (DGA, 2004).

Tabla 3.3.9: Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Cogotí Embalse Cogotí (F5). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

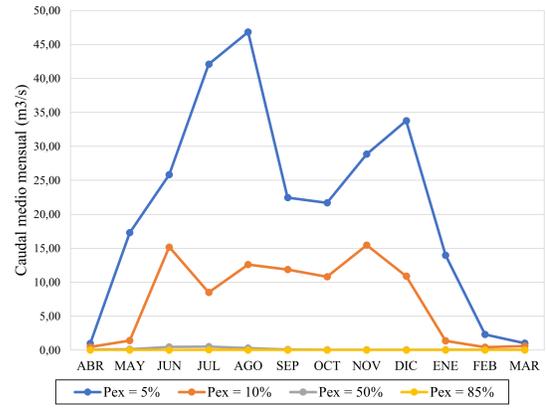
Pexc	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5%	2,08	5,25	7,95	8,55	17,95	13,76
10%	1,62	3,56	6,48	5,82	10,07	8,31
50%	0,09	0,20	1,13	0,91	1,32	1,57
85%	0,00	0,01	0,09	0,17	0,11	0,13
Pexc	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5%	19,04	35,33	30,23	14,75	3,885	1,765
10%	9,7	12,575	11,105	5,12	1,145	0,83
50%	2,225	1,45	0,285	0,1	0,05	0,06
85%	0,125	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00

Tabla 3.3.10: Valores de Caudal Medio Mensual en m^3/s para distintas probabilidades de excedencia en la Estación Fluviométrica Río Guatulame en El Tomé (F12). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

Pexc	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5%	1,00	17,31	25,82	42,10	46,84	22,45
10%	0,47	1,43	15,18	8,50	12,59	11,87
50%	0,09	0,13	0,47	0,54	0,30	0,10
85%	0,01	0,01	0,02	0,05	0,03	0,01
Pexc	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5%	21,7	28,85	33,76	13,98	2,30	1,02
10%	10,79	15,46	10,91	1,36	0,44	0,59
50%	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
85%	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



(a) Estación Río Cogotí Embalse Cogotí (F5)



(b) Estación Río Guatulame en El Tomé (F12)

Figura 3.3.15: Curvas de Variación Estaciones Fluviométricas de la Subcuenca del Río Guatulame. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

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

Tabla 3.3.11: Resumen de Componente Hidrológico en las Subcuencas del Limarí. Elaboración propia.

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

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

Para comprender la situación local de los acuíferos, como primera medida se analizan los pozos de observación de la DGA de la provincia de Limarí, para ello se descarga información contenida en la base de datos de la DGA para 36 puntos de monitoreo vigentes en la provincia. El periodo de tiempo a analizar va desde el 1 de enero de 1992 hasta el año 31 de diciembre del año 2021, teniendo así una ventana temporal de 30 años, que resulta una cantidad prudente de tiempo para efectuar el análisis de tendencias en las variaciones de los niveles estáticos de los pozos (Taylor y Alley, 2001), y por consiguiente poder entender el comportamiento en descensos de aguas subterráneas producto de: sobreexplotación o sobreotorgamiento de derechos (variables antropogénicas), fenómenos de escasez y estrés hídrico en la macrozona norte de Chile. Para el caso de estudio se descartan aquellas estaciones que tienen una cantidad no representativa de datos, es decir, las estaciones P2, P4, P11 y P22 no se consideran para evaluar el comportamiento del nivel estático del agua subterránea.

Así, la Tabla 3.3.12, detalla los pozos de observación con su respectivo periodo de tiempo con información disponible y la cantidad de datos recopilados en dicho intervalo de tiempo.

Tabla 3.3.12: 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	Años de muestra	Datos	Pozo	Años de muestra	Datos
P1	1992-2021	210	P19	1992-2021	225
P2	1994-1997	3	P20	1992-2021	230
P3	1992-2021	232	P21	1992-2021	221
P4	1992-1997	69	P22	1992-2021	84
P5	1992-2021	226	P23	1992-2021	199
P6	1992-2021	225	P24	1992-2021	174
P7	1992-2017	205	P25	1992-2021	228
P8	1992-2021	265	P26	1992-2009	154
P9	1992-2021	229	P27	1992-2011	226
P10	1992-2021	233	P28	1992-2021	227
P11	1992-2021	35	P29	1992-2013	187
P12	1992-2021	218	P30	1992-2021	177
P13	1992-2021	229	P31	1992-2021	220
P14	1992-2021	224	P32	1992-2021	207
P15	1992-2021	230	P33	1992-2021	158
P16	1992-2021	232	P34	1992-2021	252
P17	1992-2021	229	P35	1992-2021	231
P18	1992-2021	227	P36	1992-2021	229

Con esto en consideración, las Figuras 3.3.16, 3.3.17, 3.3.18 y 3.3.19 muestran el comportamiento de los niveles estáticos de los pozos de la DGA (con marcador de diamante verde) 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.

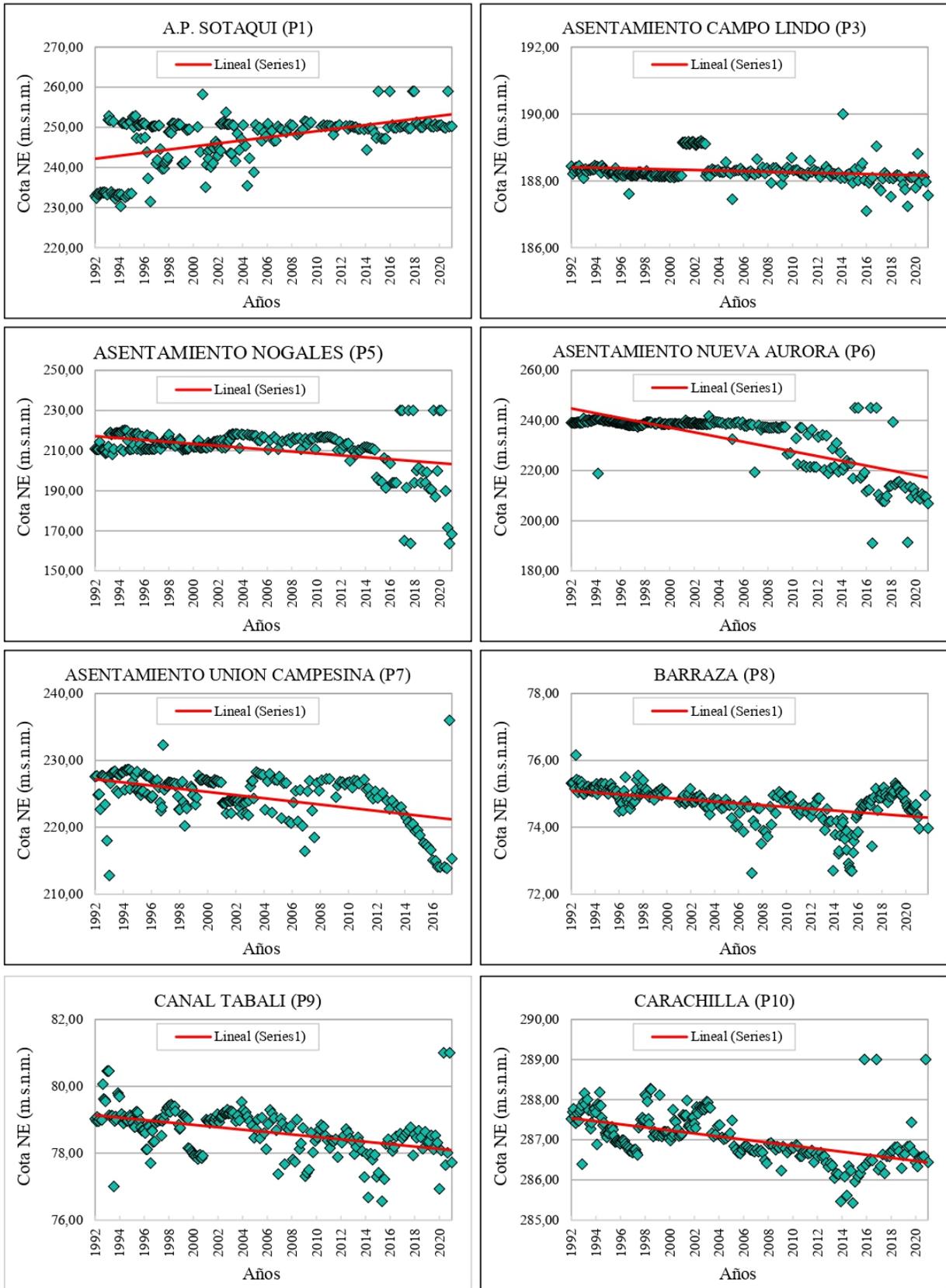


Figura 3.3.16: Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación DGA (P1-P12). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

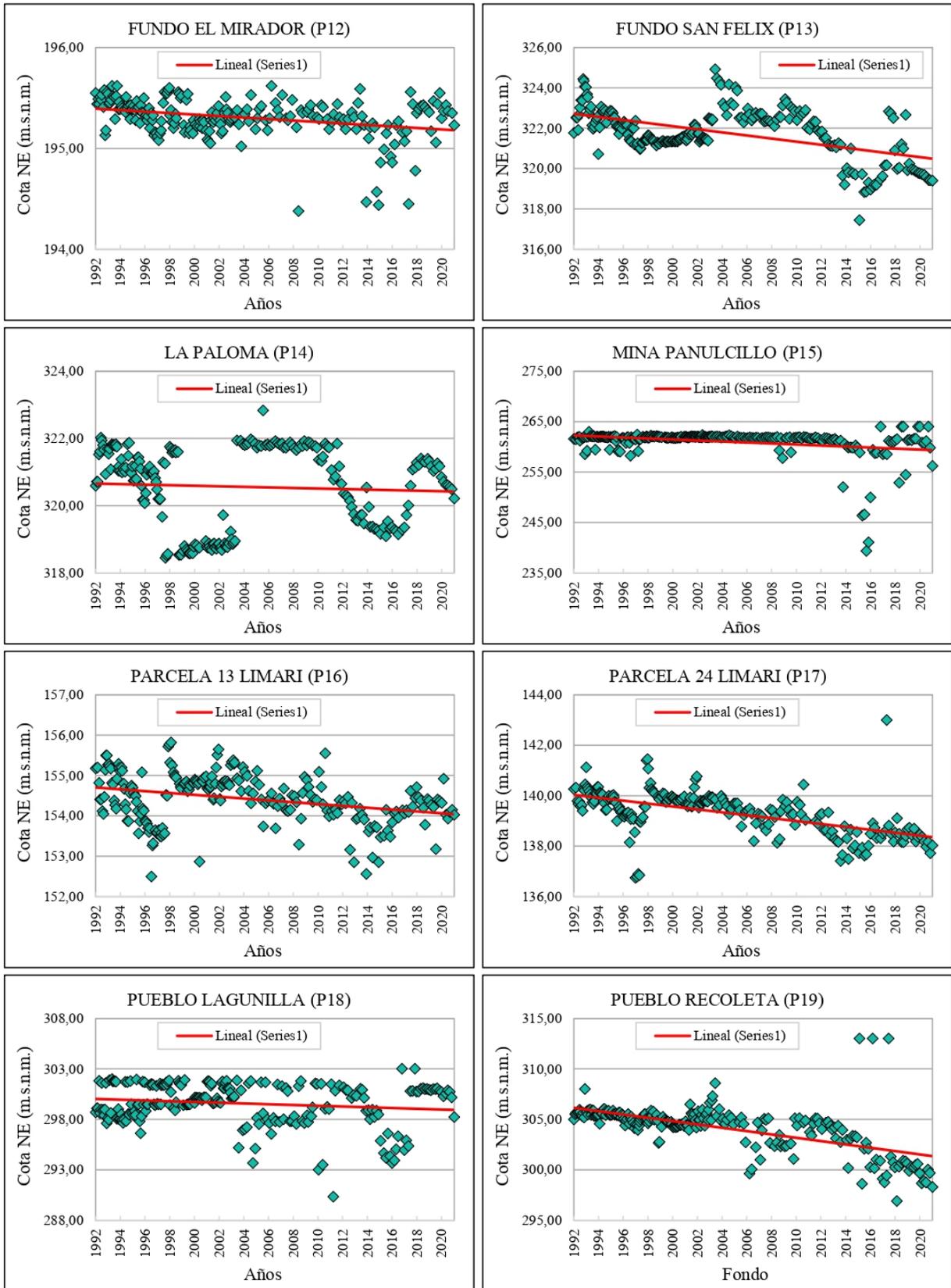


Figura 3.3.17: Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA (P12-P19). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

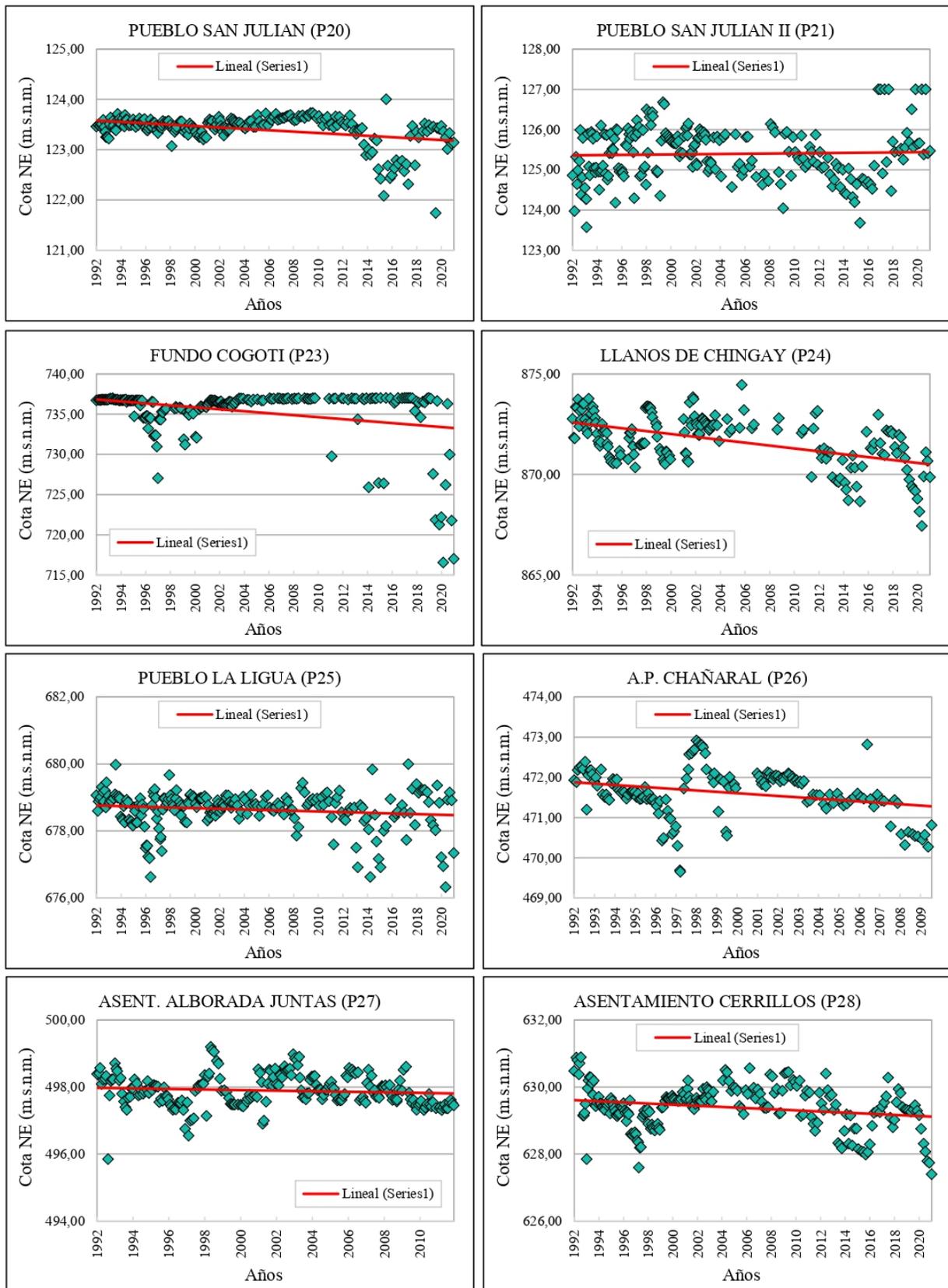


Figura 3.3.18: Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA (P20-P28). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

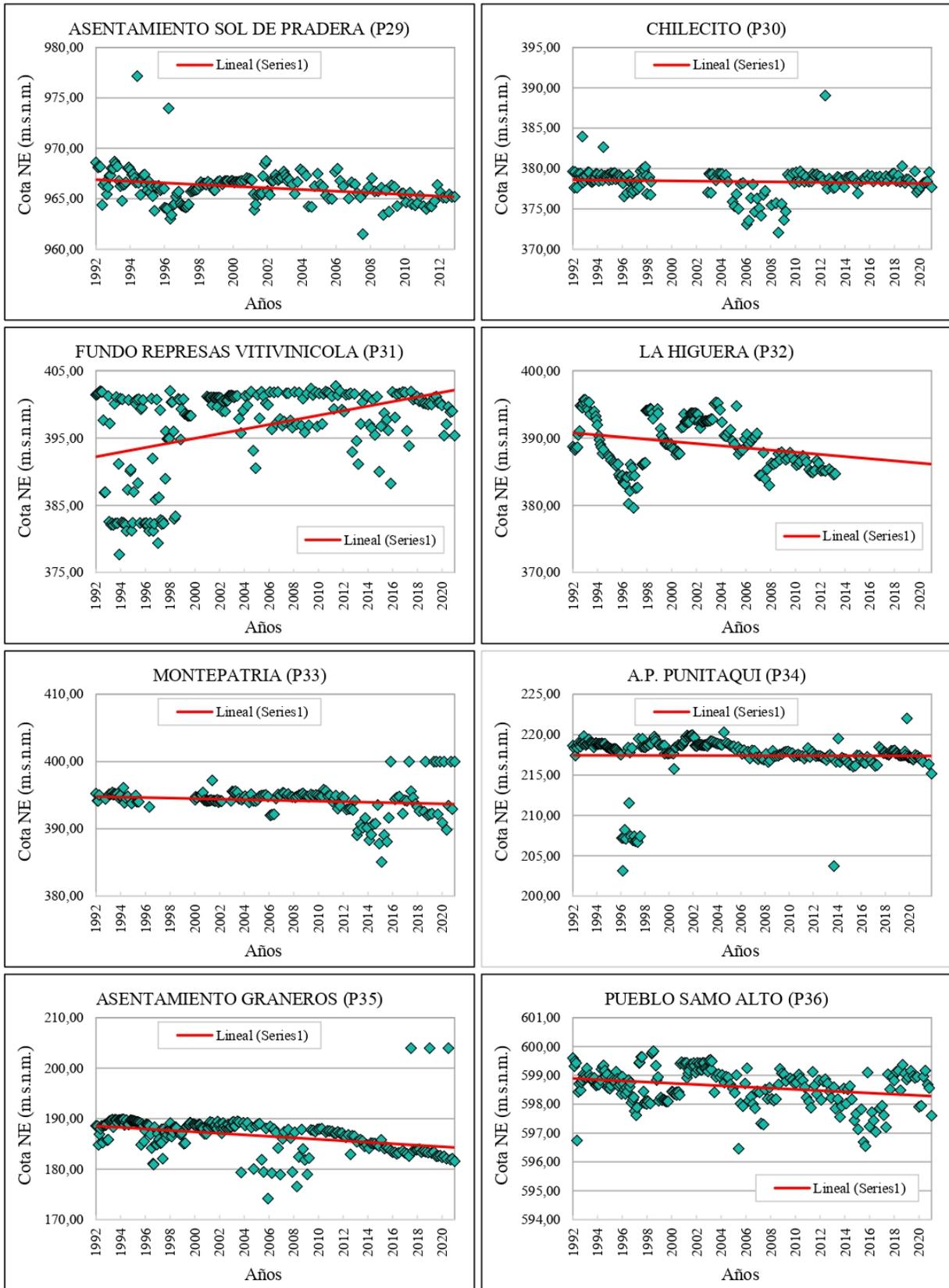


Figura 3.3.19: Cotas de Nivel Estático (NE) en pozos de observación de la DGA (P29-P36). Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

Se puede observar de las gráficas anteriores, 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:

Tabla 3.3.13: Definición de comportamientos de pozos de observación de la DGA. Elaboración propia.

Categoría	Descripción
Ascenso	Comportamiento del nivel estático del pozo que presenta una tendencia lineal histórica de ascenso.
Estacionario	Comportamiento en el cual el nivel estático del pozo se mantiene constante o sin variaciones en el periodo histórico estudiado.
Descenso	Comportamiento del nivel estático del pozo que presenta una tendencia lineal histórica de descenso.

Así, la Figura 3.3.20 entrega la cantidad de pozos en cada una de las categorías mencionadas, donde se evidencia una clara tendencia de los pozos de observación a presentar comportamientos de descenso. Los comportamientos de descensos se manifiestan en 22 de los 32 pozos muestreados, lo que corresponde a un 69% de la totalidad de pozos en estudio.

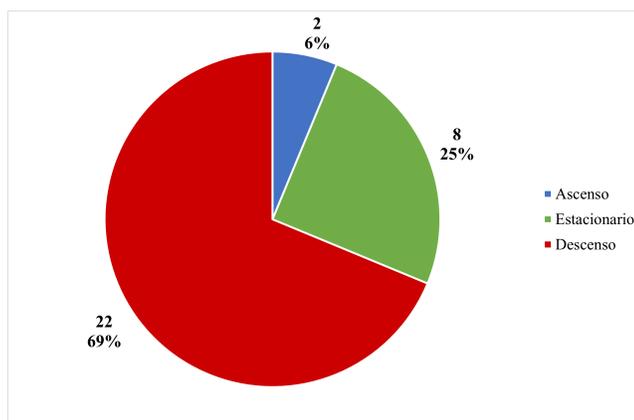


Figura 3.3.20: Caracterización según comportamientos de nivel estático en pozos de observación de la DGA. Elaboración propia.

Los pozos que han experimentado un descenso considerable con respecto a otros son:

- ASENTAMIENTO NUEVA AURORA (P6): Pozo ubicado en la comuna de Ovalle (SHAC Punitaqui), tiene un descenso aproximado de 25 metros, desde primer registro de 1992 hasta el año 2021 (Figura 3.3.16).
- ASENTAMIENTO UNION CAMPESINA (P7): Pozo ubicado en la comuna de Ovalle (SHAC Punitaqui) a unos 4 kilómetros de P6, tiene un descenso aproximado de 8 metros, desde primer registro de 1992 hasta el año 2017 (Figura 3.3.16).
- PUEBLO RECOLETA (P19): Pozo ubicado en la comuna de Ovalle (SHAC El Ingenio), presenta un descenso aproximado de 5 metros, desde primer registro de 1992 hasta el año 2021 (Figura 3.3.17).
- FUNDO Cogotí (P23): Pozo ubicado en la comuna de Combarbalá (SHAC Cogotí), tiene un descenso aproximado de 10 metros, desde primer registro de 1992 hasta últimas diez mediciones del año 2021 (Figura 3.3.18).

- LLANOS DE CHINGAY (P24): Pozo ubicado en la comuna de Combarbalá (SHAC Río Pama), presenta un descenso aproximado de 5 metros, desde primer registro de 1992 hasta últimas diez mediciones del año 2021 (Figura 3.3.18).

Por otro lado, existen 8 pozos que tienen un comportamiento estacionario (25% del total), que puede ser producto de una baja intervención de extracciones por parte de dueños de DAA colindantes, o también se puede deber a que se producen procesos de recarga de agua subterránea debido a la interacción río-acuífero. Por último, 2 pozos (6% del total) poseen una tendencia lineal de ascenso en el nivel estático: A.P. SOTAQUI (P1) y FUNDO REPRESAS VITIVINIVOLA (P31).

Por último, la Figura 3.3.21 detalla la localización de los pozos de observación de la DGA en función al comportamiento del nivel estático medido. En el mapa se puede apreciar que la mayor cantidad de pozos de observación se encuentra en los principales cauces de la cuenca (ríos Grande, Hurtado y Limarí), donde se ve que la comuna de Ovalle es representativa en cuanto a cantidad de pozos localizados en dicha zona. Sobre los SHAC, se ve que los sectores de Quebrada Grande, Combarbalá, Río Ponio e Higuierilla carecen de pozos con carácter de estudio y monitoreo en la Red Hidrométrica de la DGA, lo que habla de una falencia con respecto a la distribución, entendiéndose que esta última sumada a la cantidad de pozos de observación son fundamentales para generar una buena interpretación sobre las causas que afectan a los sistemas acuíferos (DGA, 2017). Sumado a ello, de acuerdo a lo mencionado en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (2017), otra importancia que tienen los pozos bien distribuidos es que en función al estudio de las variaciones de niveles estáticos se pueden determinar influencias de condicionantes positivas o negativas sobre fenómenos como la recarga, el almacenamiento y la descarga de aguas subterráneas.

De aquí entonces radica la relevancia de una red de monitoreo que no tan sólo esté actualizada, sino que también esté diseñada de una manera estratégica, debido a que una falta de esta condición se transforma en un obstáculo no menor para el control de los mecanismos, procesos y tasas de recarga de los recursos hídricos en el subsuelo (DGA, 2017), lo que se traduce finalmente en un mal desempeño sobre la base de una gestión integrada y sustentable de los recursos subterráneos.

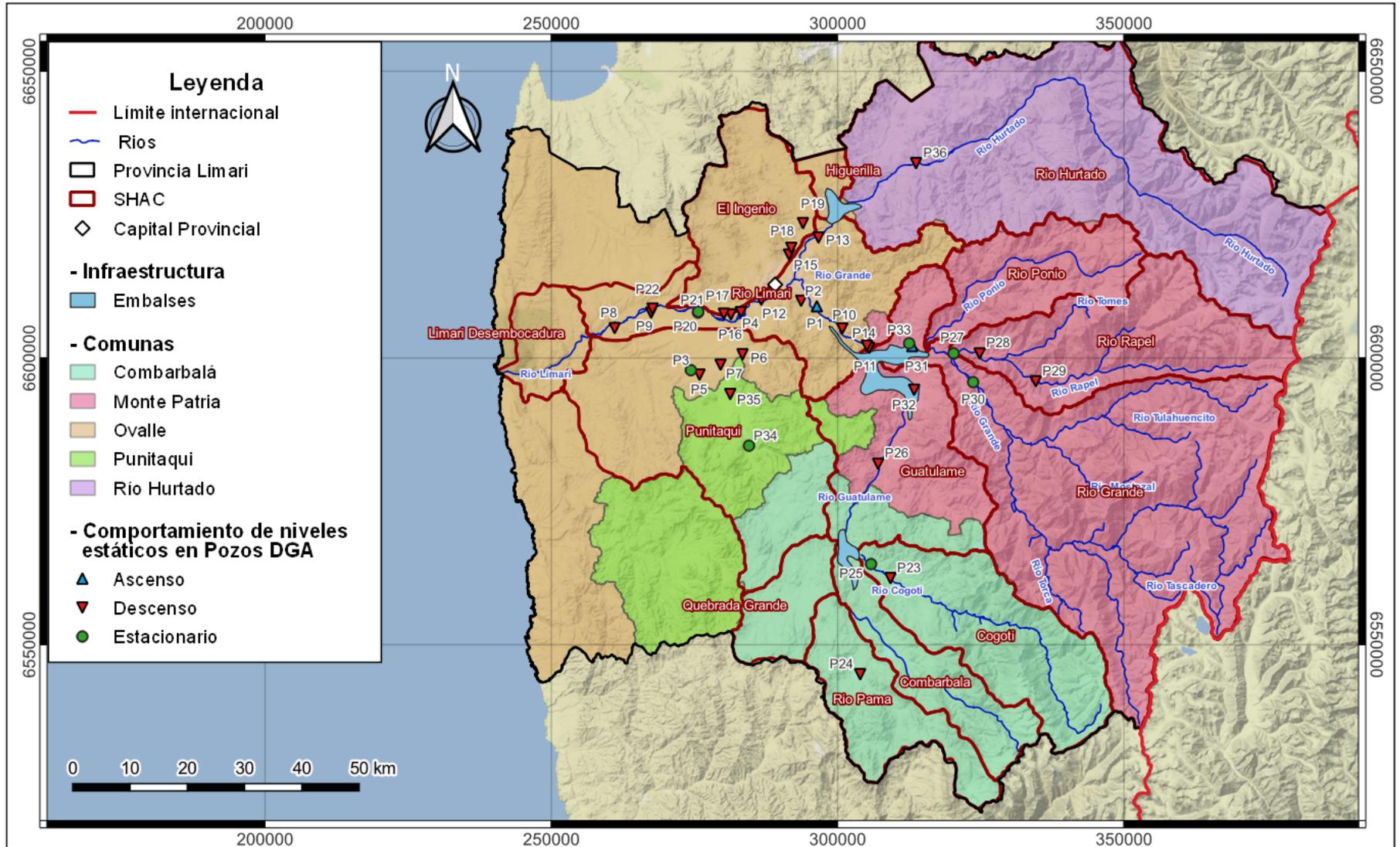


Figura 3.3.21: Distribución espacial según comportamientos de nivel estático en pozos de observación de la DGA. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

3.4. Estudio de disponibilidad del Recurso Subterráneo

3.4.1. Antecedentes

Para poder vislumbrar y dar entendimiento de la disponibilidad de agua subterránea, las variaciones de volumen en el sistema acuífero y el estado del balance hídrico visto desde la escala subterránea en la Cuenca del Río Limarí; se procede a realizar un análisis de la bibliografía que permita abordar la situación hídrica del recurso hídrico en cuestión.

Para conocer los antecedentes que se utilizan en el desarrollo de esta subsección, a continuación se presenta una lista con tres informes (Ver Tabla 3.4.1) los cuales permiten entender la dinámica de almacenamiento y disponibilidad de agua en acuíferos del Limarí.

Tabla 3.4.1: Estudios utilizados para analizar y evaluar disponibilidad de agua subterránea en la Cuenca del Río Limarí.
Elaboración propia.

Informe	Año	Sigla	Objetivo
<i>Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Río Limarí</i>	2008	ERH	Estudiar a escala regional el acuífero del Río Limarí, para determinar los cr totales anuales posibles de otorgar como derechos de agua subterránea
<i>Diagnóstico del Estado Hidrogeológico de la Cuenca del Río Limarí</i>	2020	DEHg	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
<i>Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Río Limarí</i>	2020	PGH	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.

Los reportes fueron desarrollados por dos organizaciones dependientes de la DGA:

- División de Estudios y Planificación: Tiene como función general investigar los recursos y establecer los lineamientos de planificación sobre su aprovechamiento.
- Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH): Dirime técnicamente las materias de administración de recursos hídricos sometidos en la DGA, atendiendo temas sobre otorgamiento de DAA y su uso efectivo del recurso.

Cada uno de los informes mencionados en la Tabla 3.4.1 utilizan como área de estudio la Cuenca del Río Limarí, y por ende, entregan información valiosa para evaluar la situación de la provincia. En relación a los resultados de los informes ERH y PGH, estos se encuentran orientados en la determinación de volúmenes de agua disponible en los SHAC, por lo que permiten hacer un análisis administrativo a nivel de cada sector, y además, se pueden comprender las brechas de agua subterránea en la cuenca, 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 cada 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.

3.4.2. Recarga y Demanda Subterránea

3.4.2.1. Recarga

La recarga subterránea de los acuíferos es una componente que se puede estudiar para realizar estimaciones para la toma de decisiones con respecto a la construcción de obras de captación en zonas donde exista una potencial disponibilidad del recurso. Para ello, los informes ERH y PGH en sus resultados estiman valores de recarga que se detallan a continuación en la Tabla 3.4.2.

Tabla 3.4.2: Recarga subterránea de SHAC en la Cuenca del Río Limarí en m³/año, de acuerdo a resultados de informes de la DGA. Elaborado a partir de DGA (2008) y DGA (2020b).

Informe Año o Periodo	ERH 2008	PGH 1992-2019	PGH 2023-2050
Cogotí	2.825.626	2.131.834	2.138.141
Combarbalá	1.296.130	1.892.160	1.942.618
El Ingenio	4.023.994	7.590.715	8.038.526
Guatulame	7.505.568	9.514.411	7.921.843
Higuerilla	665.410	987.077	983.923
Limarí Desembocadura	532.958	700.099	678.024
Punitaqui	23.421.787	22.147.733	25.985.664
Quebrada Grande	747.403	2.680.560	2.551.262
Río Grande	4.856.544	11.122.747	9.328.349
Río Hurtado	1.718.712	4.698.864	4.159.598
Río Limarí	18.464.328	34.459.387	27.669.686
Río Pama	1.419.120	2.942.309	1.154.218
Río Rapel	630.720	3.916.771	3.768.552
Río Ponio	1.305.590	1.160.525	1.154.218

De acuerdo a la información recopilada, se puede inferir que hay sectores en los que existe una mayor cantidad de agua recargada, donde en SHAC como El Ingenio, Guatulame, Punitaqui, Río Grande y Río Limarí se tienen importantes cantidades en comparación con los demás SHAC; lo anterior se observa gráficamente en la Figura 3.4.1.

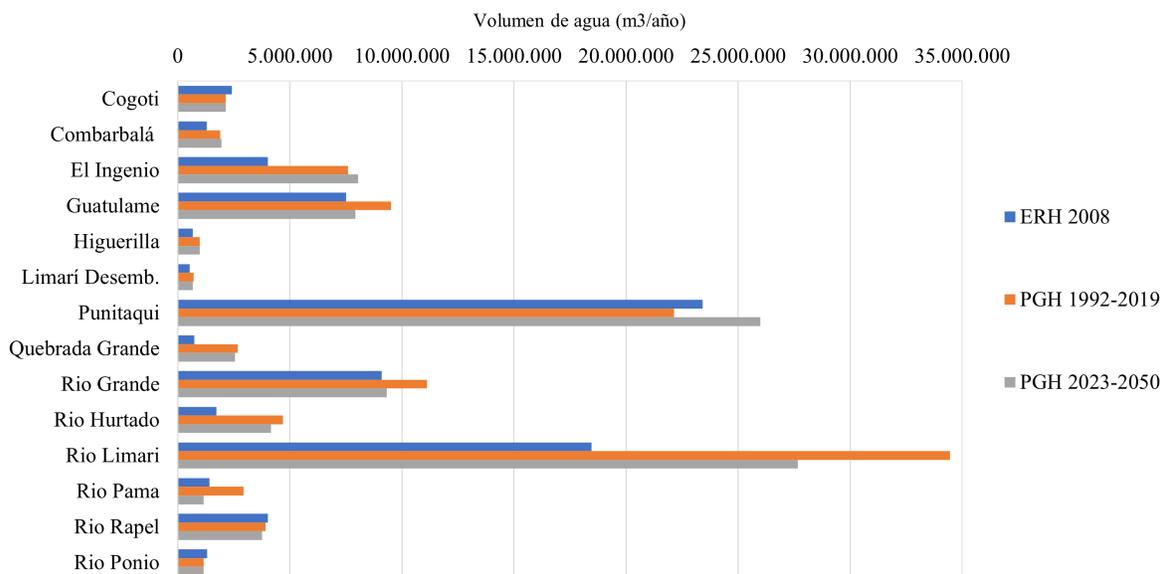


Figura 3.4.1: Representación gráfica de valores de recarga subterránea de SHAC en la Cuenca del Río Limarí. Elaborado a partir de DGA (2008) y DGA (2020b).

Justamente en los SHAC El Ingenio, Guatulame, Punitaqui y Río Limarí, se concentra la mayor cantidad de DAA concedidos a particulares, lo que habla de la importancia que tienen estas zonas para satisfacer la demanda de las comunidades de la provincia. Con esto, es relevante mencionar que un análisis de los volúmenes de extracción versus los volúmenes de recarga sería una buena herramienta de estudio para determinar si existe una eventual sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo en las zonas. Además de lo anterior, puede ser imperante la correcta determinación de volúmenes sustentables ligados al flujo de agua aportante de precipitación, embalsamientos y escurrimientos superficiales y subterráneos. Junto con ello, realizar una comparación con los DAA en función al factor de uso previsible de ellos serviría para una buena interpretación de los datos, entendiendo que existen derechos de carácter industrial, uso de agua potable, uso minero, uso para riego; donde cada uno de ellos representa una distinta demanda del recurso. Con esto, se permite tener un mejor entendimiento acerca de la oferta y demanda del agua contenida en los acuíferos.

Por otro lado, según la normativa vigente que se aplica en la exploración y posterior explotación de aguas subterráneas en Chile, se han ideado criterios oficiales de sustentabilidad de intervención en acuíferos que están establecidos para la modelación de las aguas subterráneas. Según la DGA (2015) y de acuerdo a resolución de normativa sobre acuíferos, los criterios oficiales para estimar el caudal de explotación sustentable de un acuífero son:

- *Criterio 1: Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero.*
- *Criterio 2: Interferencia río acuífero.*
- *Criterio 3: Satisfacción de la demanda.*
- *Criterio 4: Pozos secos.*
- *Criterio 5: Afeción a sectores abiertos.*

Estos criterios permiten evaluar la demanda máxima sustentable en el sector, es decir, se puede maximizar la explotación posible.

Debido a que el enfoque de este trabajo de título no está en la determinación cuantitativa de disponibilidad de agua subterránea, no se aborda este ítem en profundidad, sin embargo, se entiende que lo mencionado en los párrafos anteriores es sustancial al momento del estudio de cuencas y sus recursos, para así tener una correcta evaluación relacionada a las aguas disponibles.

3.4.2.2. Balance hídrico subterráneo

Otro aspecto que toma relevancia en la evaluación de recursos es el balance hídrico subterráneo en la cuenca. Para ello, se recopilan los resultados de los informes DEHg y PGH donde se evidencian escenarios para distintos periodos de tiempo, tal como se detalla en la Tabla 3.4.3, junto con la representación gráfica en la Figura 3.4.2.

Tabla 3.4.3: Balance Hídrico Subterráneo de la Cuenca del Río Limarí en m³/s, de acuerdo a diversos informes de respaldo. Elaborado a partir de DGA (2020a) y DGA (2020b)

Informe Periodo	PGH 1992-2019	PGH 2023-2050	DEHg 1964-2018	DEHg 2008-2018
Entradas extras	0,05	0,02	0,63	0,65
Recarga desde río	1,84	1,73	1,86	2,00
Recarga superficial	1,47	1,26	1,61	1,30
Total Entrada	3,36	3,02	4,10	3,95
Afloramiento río	3,25	2,05	3,41	3,42
Pozos de bombeo	0,73	1,40	0,40	0,61
Descarga mar/otros	0,04	0,04	0,32	0,27
Total Salida	4,02	3,50	4,13	4,30
Variación Almacenamiento	-0,66	-0,48	-0,03	-0,35

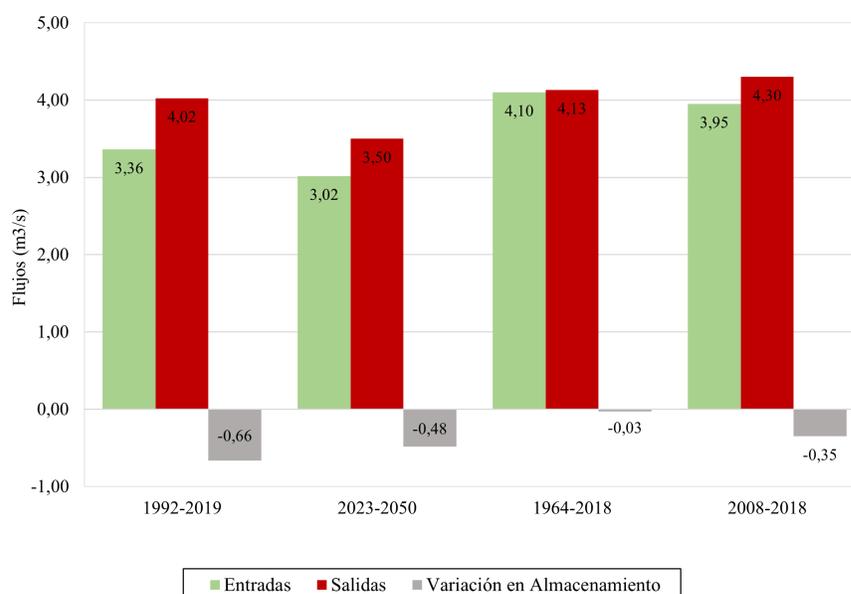


Figura 3.4.2: Representación gráfica del Balance Hídrico Subterráneo de la Cuenca del Río Limarí. Elaborado a partir de DGA (2020a) y DGA (2020b).

Los datos fueron determinados mediante modelación y de ellos se desprende que para todos los escenarios evaluados existe un balance 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 significativo es el relacionado a las extracciones, las cuales han aumentado (DGA, 2020a), produciendo así una sobreexplotación y déficits en los acuíferos de la cuenca, frente a temporadas de sequías y falta del recurso hídrico subterráneo.

Capítulo 4

Zonas de captación y APRs beneficiados

4.1. Antecedentes

4.1.1. Sectores para realizar nuevas captaciones

Para poder realizar la propuesta de construcción de pozos profundos en la provincia de Limarí es necesario conocer aquellas zonas en las que existan reservas de agua subterránea, las que finalmente serán distribuidas a las comunidades de agua potable rural para el respectivo almacenamiento y suministro. De esta manera, para cumplir con el objetivo anterior, se procede a utilizar la información y datos del proyecto del CEAZA denominado: “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”, el cual fue financiado por el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) y que tiene como propósito mejorar el conocimiento de los organismos públicos, comunidades y actores privados sobre los recursos hídricos subterráneos en la Cuenca del Río Limarí. El objetivo específico se plasmó mediante la elaboración de una plataforma web en la que se detalla en un modelo 3D la ubicación y cantidad de agua en sectores acuíferos.

La caracterización hidroestratigráfica de los sectores acuíferos se realiza mediante las siguientes herramientas geofísicas:

- Sondeo de transiente electromagnéticos (TEM), que entrega información sobre distribución de resistividad eléctrica en función de la profundidad que se interpreta como diferencias litológicas, las cuales pueden definir rangos de propiedades hidrogeológicas como porosidad y permeabilidad, y además, los registros pueden definir los medios porosos con un contenido de agua relevante para determinar los potenciales de zonas acuíferas.
- Sondeo de resonancia magnética (RSM), que permite medir directamente el contenido de agua subterránea como un porcentaje volumétrico y obtiene información sobre el tamaño de poros donde se almacena el agua en función a la profundidad.

Junto con el trabajo en terreno realizado por el equipo de sondaje, el proyecto recopiló información sobre: geología, topografía, geomorfología, caudales concedidos en DAA, demanda, agua potable rural, hidrogeología y campañas geofísicas previas en la cuenca. La mayoría de datos se obtiene de organismos públicos como la DGA, Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNA-GEOMIN), DOH, entre otros.

En base a todo lo anterior, sumado al trabajo realizado por el equipo de expertos, en el estudio se logran definir 10 zonas denominadas *sectores de continuidad hidrogeológica*, que se definen en función a las formaciones geomorfológicas observadas en superficie, la diferencia de hidrografía ligadas al transporte de sedimentos en el curso de los cauces principales o secundarios de la cuenca y a los resultados obtenidos por el sondeo de TEM. Así, la Figura 4.1.1 muestra cada una de las zonas presentes en la cuenca, que coinciden en su mayoría con los SHAC del Limarí.

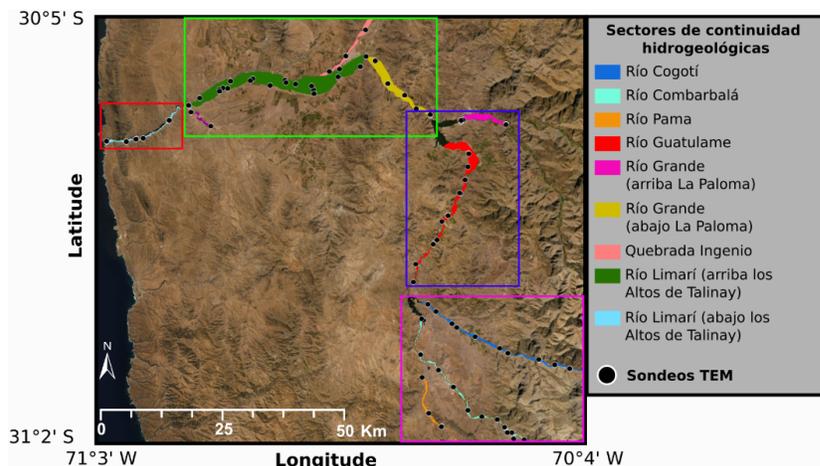


Figura 4.1.1: Sectores de continuidad hidrogeológica definidos en la zona de estudio del proyecto para la Cuenca del Limarí, junto con las mediciones TEM. Fuente: CEAZA (2022).

Ahora, la determinación de zonas donde es propicio realizar nuevas captaciones del recurso subterráneo para ejecutar obras de perforación del suelo y posterior construcción de pozos se desarrolla mediante la evaluación del *Índice de Potencial de Extracción*, que el CEAZA (2022) lo atribuye a aquellos sectores en los cuales existe una condición favorable para extraer agua, índice que se obtiene gracias al manejo de datos sobre el caudal máximo de extracción posible que permite obtener una caracterización de los mejores lugares para extraer agua. Para cuantificar la cantidad de caudal que se puede extraer de cada una de las zonas, y así tener una visión general acerca del índice de potencial de extracción, se detalla en la Tabla 4.1.1 los rangos de caudal mínimo, promedio y máximo; que son un reflejo de la incertidumbre de la transmisividad en el proyecto, ya que este parámetro también se detalla en rangos debido a la estratigrafía del suelo (Parra, 2022).

Tabla 4.1.1: Caudal de extracción para interpretar índice de potencial de extracción en los sectores de continuidad hidrogeológica del Limarí. Elaboración propia a partir de Parra (2022).

Sector	Q_{\min} (m ³ /día)	Q_{prom} (m ³ /día)	Q_{\max} (m ³ /día)
Punitaqui	5	$4 \cdot 10^5$	$1,45 \cdot 10^8$
Quebrada Ingenio	$1,14 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^6$	$3,46 \cdot 10^9$
Río Cogotí	1,78	$7,48 \cdot 10^5$	$8,98 \cdot 10^7$
Río Combarbalá	2,71	$2,11 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^8$
Río Guatulame	$1,54 \cdot 10^5$	$8,01 \cdot 10^6$	$7,27 \cdot 10^8$
Río Grande arriba Embalse La Paloma	$5,67 \cdot 10^3$	$1,09 \cdot 10^6$	$3,10 \cdot 10^8$
Río Grande abajo Embalse La Paloma	0,17	$4,34 \cdot 10^3$	$7,25 \cdot 10^6$
Río Limarí arriba Altos Talinay	0	$1 \cdot 10^5$	$6,69 \cdot 10^8$
Río Limarí abajo Altos Talinay	0,3	$9,6 \cdot 10^3$	$1,62 \cdot 10^7$
Río Pama	35,52	$3,16 \cdot 10^4$	$6,76 \cdot 10^7$

Para efectos del diseño conceptual de los pozos, se realizó la elección de tres zonas que tienen un alto potencial de extracción, es decir, sectores en donde la condición de las captaciones es propicia en busca de la mayor extracción de agua subterránea. Para ello, de la Tabla 4.1.1 se seleccionan tres sectores que tienen los mayores valores de caudal promedio (el nombre del sector y el valor de caudal se marcan en negrita en la Tabla 4.1.1), siendo estos los sectores de:

- Quebrada Ingenio
- Río Guatulame
- Río Grande arriba Embalse La Paloma

Las zonas seleccionadas se muestran en la Figura 4.1.2.

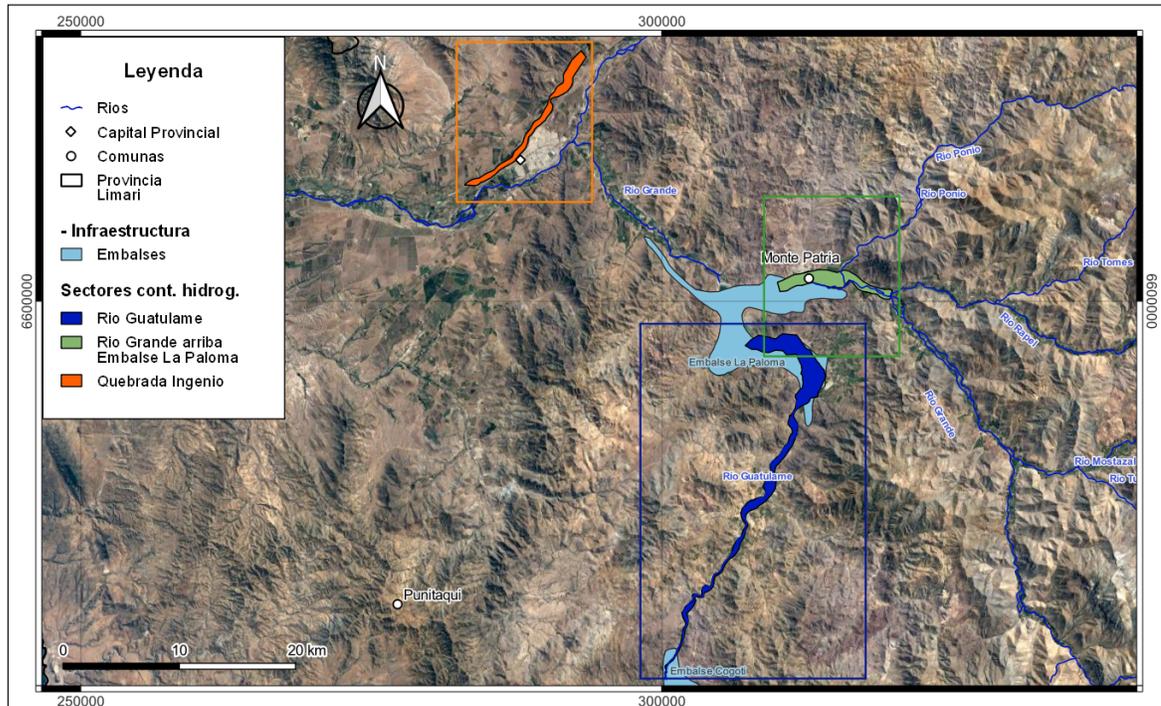


Figura 4.1.2: Mapa total de los Sectores de continuidad hidrogeológica seleccionados para el diseño conceptual de pozos profundos. Elaboración propia a partir de shapes obtenidos en la Sección de Descargas del Proyecto CEAZA-FONDEF.

Por último, para la correcta elección de los puntos objetivos donde se realizó el diseño conceptual de las obras de captación, se utilizó información proveniente de la visualización web de la plataforma del proyecto del CEAZA, en donde el índice de potencial de extracción se muestra detallado en el mapa de la cuenca mediante una escala normalizada que representa cualitativamente los sectores de interés, en los cuales se pueden evaluar las mejores zonas para el tipo de obras a diseñar. La escala se representa en 5 bandas de colores que van desde el rojo oscuro que está asociado a un índice de extracción muy alto, hasta la banda de color amarillo que se asocia con un índice muy bajo.

De esta manera, la Figura 4.1.3 muestra cada uno de los sectores seleccionados para el posterior diseño de pozos en la provincia de Limarí, donde además se detalla la escala normalizada del potencial de extracción.

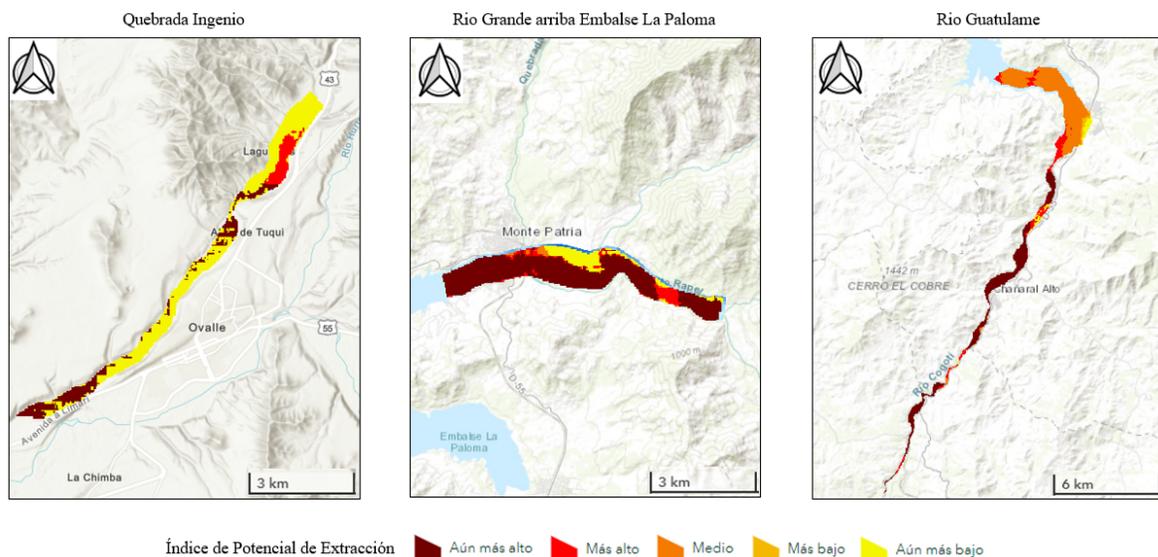


Figura 4.1.3: Sectores de continuidad hidrogeológica seleccionados con la clasificación del Índice de Potencial de Extracción. Fuente: Visualizador WEB Proyecto CEAZA-FONDEF www.aguasubterraneaLimarí.cl (2022).

4.1.2. APRs objetivo para abastecimiento de agua subterránea

Entendiendo que este trabajo se enmarca dentro de una visión que posiciona a las comunidades rurales del Limarí como el principal foco para acciones de ingeniería en busca de soluciones relacionadas al abastecimiento de agua potable que brinden una mejor calidad de vida para este grupo, se definió a las poblaciones objetivo dentro de la zona de estudio mediante la evaluación del informe *Sustentabilidad de Asentamientos Rurales en Chile. Análisis desde los Sistemas Sanitarios Rurales - Cuenca del Limarí* (DGA, 2020c), el cual dentro de sus objetivos plantea la caracterización de los APRs respecto a la complejidad en las soluciones de sus problemáticas estimadas para los años 2020, 2030 y 2040, y también, proponer un plan de acción por APR respecto a la situación particular diagnosticada. La metodología empleada en el informe está fundada en análisis cuantitativos de fuentes secundarias de información sobre la cuenca del Río Limarí.

Para poder lograr el objetivo de categorizar APRs respecto a la complejidad en soluciones de sus problemas; el autor del informe plantea el manejo de 10 variables, las cuales se relacionan 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 APR. La Tabla 4.1.2 detalla las distintas variables que emplea para el análisis de riesgo sobre los APR.

Así, las variables utilizadas permiten generar una categorización de los distintos APRs, mediante la manipulación de la Ecuación 4.1.1, donde se obtienen resultados que se representan en un ranking de riesgo leve, moderado y crítico.

$$\text{Riesgo} = \text{Vulnerabilidad} + \text{Amenazas} \quad (4.1.1)$$

Tabla 4.1.2: Variables que definen Vulnerabilidad y Amenazas para determinar el Ranking de Riesgo de Sistemas de APR en el Limarí. Fuente: DGA (2020c).

Vulnerabilidad
· Balance de agua a nivel de APR en base a proyecciones demográficas para el año 2020, 2030 y 2040
· APR sin Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA)
· Pozos sin DAA
· Afectación de terceros en los puntos de captación
· Cantidad de población al año 2020
· Gasto medido en l/s
· APRs que tienen considerados derechos de Empresa Sanitaria de Obras Sanitarias de Coquimbo (ex SEN-DOS)
· Utilización de camiones aljibe para el abastecimiento de agua potable
· Interferencia de captaciones subterráneas con cauces superficiales
Amenazas
· Disponibilidad SHAC o Fuente Superficial

Los resultados que se plantean al respecto están basados en el análisis de las variables mencionadas, donde los principales factores que permiten definir a los APR 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 (DGA, 2020c). Con ello se obtiene que de los 96 Sistemas de APR de la provincia, 29 de ellos presentan una categoría de riesgo crítico, otros 33 tienen un riesgo moderado, 31 sistemas tienen un riesgo leve y de 3 restantes no se tiene información.

Para poder entender gráficamente el universo de APRs en la provincia de Limarí categorizados respecto a la complejidad de sus problemáticas, la Figura 4.1.4 detalla cada categoría de riesgo, donde se observa que un 30 % del total de Sistemas de APR se encuentra en una condición crítica.

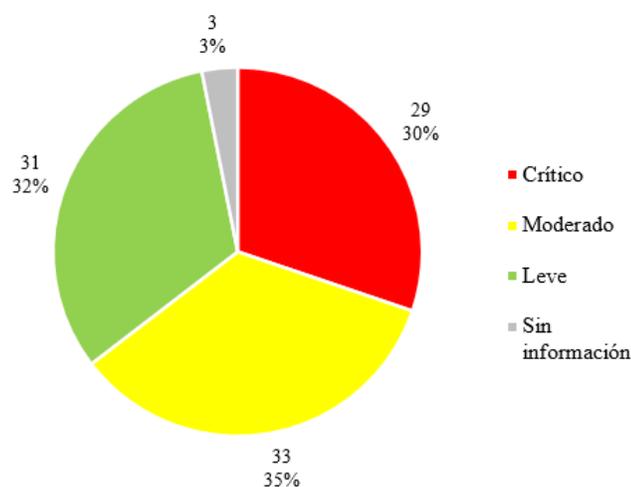


Figura 4.1.4: Categorización de Sistemas de APR en el Limarí de acuerdo al Ranking de Riesgo sobre complejidad de soluciones a problemáticas. Elaboración propia a partir de DGA (2020c).

Por otro lado, la Figura 4.1.5 muestra la distribución espacial del ranking de riesgo para la totalidad de sistemas en el Limarí, de la cual se puede mencionar que no existe una tendencia consolidada para concluir cuales son las zonas que poseen una mayor concentración de APR en estado crítico, ya que se distribuyen de manera heterogénea por sectores. Sin embargo, esta heterogeneidad local permite inferir que existen diferencias entre los APRs a pesar de situarse en comunidades vecinas, ya que por un lado se tienen comunidades sin grandes riesgos pero por otra parte se tienen comités con falencias relacionadas a las variables mencionadas anteriormente. De esta manera, el factor espacial donde se emplazan las instalaciones de los sistemas (en relación a los superavit o déficits del recurso hídrico) quizás no sea únicamente relevante, sino que la predominancia de aspectos de gestión administrativa, ineficiencias en sistemas de distribución y almacenamiento del agua, dinámicas dirigenciales deficientes a nivel de Comités o Cooperativas (DGA, 2020c), entre otras, son factores que también son importantes para el análisis de problemas y carencias en los APRs.

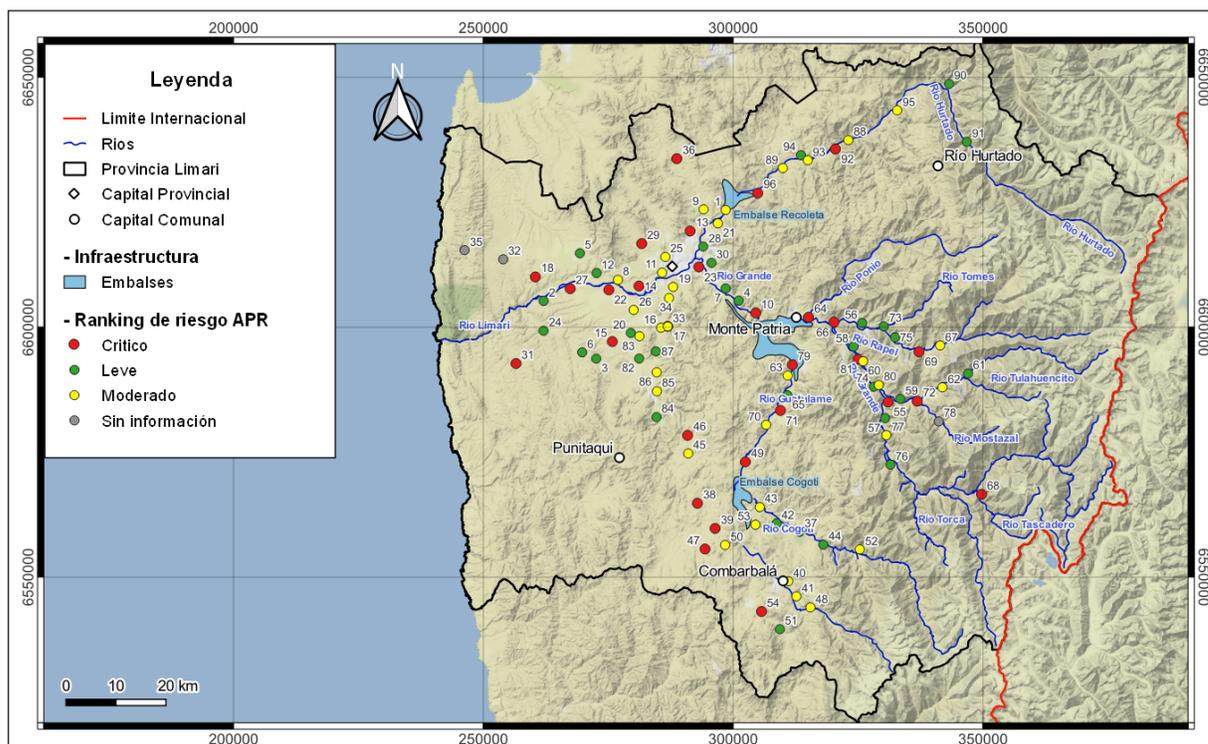


Figura 4.1.5: Distribución espacial de APRs según Ranking de Riesgo sobre complejidad de soluciones a problemáticas. Elaboración propia a partir de DGA (2020c).

Con todo lo anterior como precedente, el diseño que se realizó en el presente trabajo está orientado a aquellos Sistemas de APR que tienen un ranking crítico y moderado según la DGA (2020c), es decir, la población objetivo del diseño de captaciones estará basado en la selección de aquellos APRs que posean una situación particularmente compleja, los cuales mediante la construcción de dichas obras permitan mermar su condición desfavorable. Todo ello, se consideró en conjunto con la elección de aquellas zonas donde hay una disponibilidad mayor de agua subterránea.

4.2. Resultados para la conceptualización del diseño de captaciones

Luego de analizar los antecedentes sobre los sectores para realizar las nuevas captaciones y los datos de APRs que presentan condiciones desfavorables con respecto al recurso hídrico de agua subterránea en su localidad, se determinan los elementos previos al diseño de los pozos, para ello, se define en primer lugar el punto o lugar donde sea productivo (principalmente de nivel de recurso hídrico) efectuar la ejecución de las obras de captación en función de los siguientes criterios de entrada:

- La zona o lugar donde se debe realizar la captación se define en un área que tenga un alto índice de potencial de extracción, de acuerdo a lo visto en la Figura 4.1.2, y se denomina área de influencia de la captación.
- La elección de la zona se elegirá de manera tal que existan Sistemas de APR en las cercanías del área delimitada.
- El punto de captación se elegirá de manera tal que exista un sus cercanías rutas o caminos establecidos, por ejemplo carretera o línea férrea, para así poder una mejor condición para líneas de distribución.
- La captación debe estar situada en llanos o zonas de planicies para permitir un tránsito no dificultoso para personas, maquinarias o vehículos.
- Los Sistemas de APR que tienen prioridad para las conexiones con las líneas de distribución son aquellos que tengan una condición crítica o moderada de acuerdo al Ranking de Riesgo de la DGA (2020).

De esta manera, se efectúa el cruce de información con respecto a las zonas seleccionadas y a los APRs objetivos para ejecutar las captaciones en localidades de agua potable rural de la provincia. Tal como se detalla en la Figura 4.2.1, se observa que en los sectores seleccionados (recuadro rosado) se tienen entre 4 a 5 APRs que pueden ser beneficiados potencialmente con la distribución y abastecimiento de agua subterránea mediante pozos profundos para el posterior suministro de agua potable.

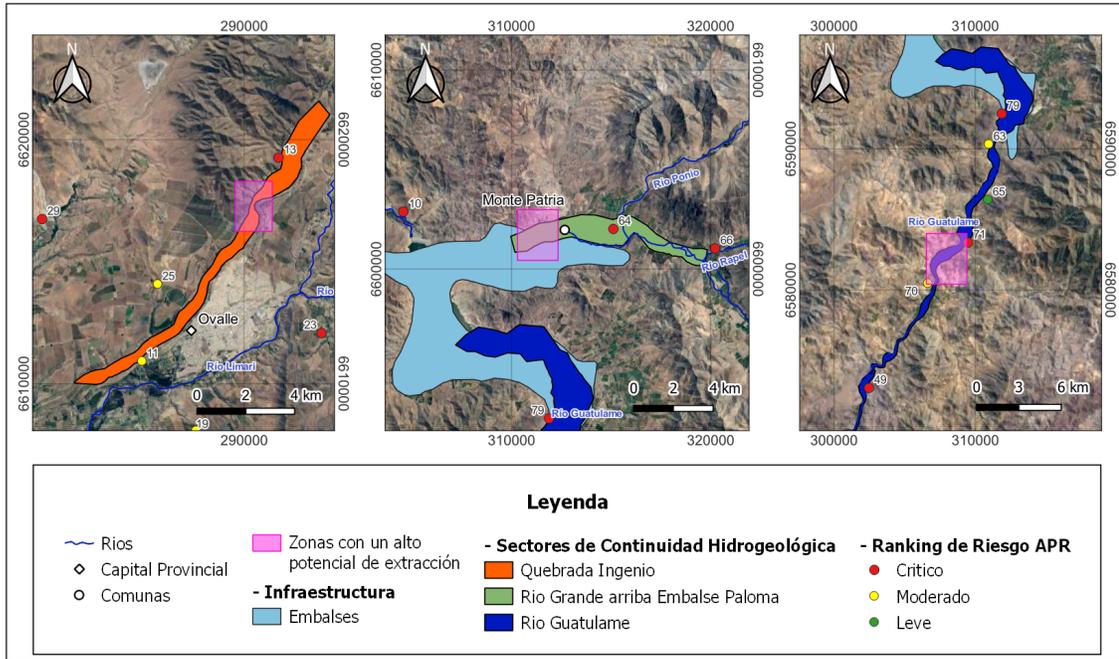


Figura 4.2.1: Sectores seleccionados con la zona de alto potencial de extracción para la construcción de pozos (recuadro rosa). Elaboración propia a partir de shapes obtenidos en la Sección de Descargas del Proyecto CEAZA FONDEF.

Para cada uno de los sectores de continuidad hidrogeológica se seleccionaron 3 Sistemas de APR que se encuentren dentro del área de influencia de la captación, los cuales se tomaron como referencia para realizar el diseño de los pozos en función a la población potencial que puede ser beneficiada con la obra en cuestión. El detalle por sector de cada uno de los APRs seleccionados se detalla en las Tablas 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, que caracterizan a los sistemas con su respectivo ID, SHAC donde se encuentra ubicado, Ranking de Riesgo según DGA (2020c), número de arranques en la red y cantidad de población beneficiada al día de hoy.

Tabla 4.2.1: Sistemas de APR seleccionados para el diseño conceptual de pozo profundo en el Sector de Quebrada Ingenio. Elaboración propia a partir de Observatorio de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).

QUEBRADA INGENIO					
ID	SHAC	Nombre	Ranking de Riesgo	Arranques	Beneficiados
13	El Ingenio	VILLORIO DE TALHUEN	Crítico	120	372
25	El Ingenio	LAGUNILLA	Crítico	254	788
29	El Ingenio	SOL DEL PACIFICO	Moderado	203	603

Tabla 4.2.2: Sistemas de APR seleccionados para el diseño conceptual de pozo profundo en el Sector del Río Grande. Elaboración propia a partir de Observatorio de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).

RIO GRANDE					
ID	SHAC	Nombre	Ranking de Riesgo	Arranques	Beneficiados
10	Río Limarí	LA PALOMA	Crítico	115	357
64	Río Grande	FLOR DE VALLE	Crítico	401	1244
66	Río Rapel	JUNTAS DOS RIOS	Crítico	195	605

Tabla 4.2.3: Sistemas de APR seleccionados para el diseño conceptual de pozo profundo en el Sector del Río Guatulame. Elaboración propia a partir de Observatorio de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico del MOP, Subdirección de SSR y DGA (2020).

RIO GUATULAME					
ID	SHAC	Nombre	Ranking de Riesgo	Arranques	Beneficiados
49	Guatulame	SAN MARCOS	Crítico	450	1395
70	Guatulame	LOS MORALES	Moderado	167	518
71	Guatulame	LOS TAPIA	Crítico	129	400

Con esto, se completa el objetivo de reconocer las zonas donde sea provechoso realizar las obras de captación, las que tendrán como finalidad beneficiar a los sistemas rurales de agua potable seleccionados para cada caso.

Capítulo 5

Diseño conceptual de pozos

Antes de comenzar con el diseño, es preciso consignar que el presente trabajo se enfoca en la realización de un diseño conceptual de obras de captación, es decir, se considera como la fase inicial del desarrollo del proyecto, la cual también se denomina anteproyecto o prefactibilidad. Esta fase comúnmente inicia con la etapa de preparación, que es la encargada de recopilar información proveniente desde fuentes secundarias, experiencias anteriores y también informes ejecutados que tengan estrecha relación con el proyecto; luego, se pasa a la etapa de evaluación, donde se realiza el estudio de factibilidad previa mediante el análisis de variables económicas, técnicas y ambientales.

De esta manera, se entiende que el diseño a nivel de ingeniería conceptual de pozos profundos que se realizará en las secciones venideras no considera estudios directos provenientes de fuentes de información primaria, como la realización de estudios de topografía, mecánica de suelos, hidrología en terreno, pruebas de bombeo, entre otros; que en su conjunto representan la fase del proyecto denominada ingeniería básica, en la cual se realizan las bases generales del diseño y se estudia la lógica de funcionamiento del mismo para así conseguir financiamiento y permisos a nivel ambiental.

5.1. Metodología

En esta sección se comienzan a definir los lineamientos globales que se emplearan en el diseño a nivel de ingeniería conceptual de los pozos profundos, mediante la definición de los pasos detallados que permiten obtener el producto final. Para cumplir con lo anterior, en primer lugar se menciona que gran parte del desarrollo se encuentra basado en información recopilada de carácter público disponible en: plataformas abiertas a usuarios, bibliotecas digitales, repositorios, portales de transparencia, etc; además, se añade al grupo de datos informes recopilados en comunidades de agua potable rural. Por otra lado, la gran parte de esquemas deben ser vistos como aproximaciones de la realidad, asumiendo que no son una representaciones real de lo que se pueda ver en terreno, pero sí pueden acercar al lector a generar un entendimiento general sobre lo que se quiere mostrar.

Así, la metodología y algunas condiciones que se utilizan en el estudio y diseño se definen en el siguiente listado:

1. Se considera la construcción de una obra de captación para los sectores de continuidad hidrogeológica, que se materializa con un pozo profundo ubicado en la zona de mayor potencial de extracción.
2. Con el estudio de los sectores elegidos en el capítulo previo, se selecciona el lugar específico donde se pueda construir esquemáticamente un perfil transversal de la superficie de suelo mediante la utilización de Google Earth Pro. La elaboración del perfil permite entender el comportamiento sedimentario en el llano de inundación a través de la proyección de pendientes en las laderas del sector, las cuales se utilizan para interpretar la forma del material de relleno y así ubicar el pozo en una ubicación ideal con buen espesor o potencia acuífera.
3. Posteriormente, se traza el perfil en Google Earth con la herramienta de *regla*, el cual debe tener diferencias de elevación. Luego, se dibuja un esquema que distinga los puntos de la superficie para así proyectar las pendientes laterales y conformar el relleno sedimentario transversal. El perfil debe contener el nivel freático o nivel estático que se obtiene con datos de pozos de observación monitoreados por la DGA, y además en el caso de existir, debe contener proyecciones de obras de captación que se encuentren próximas al perfil.
4. La ubicación del pozo profundo debe estar dentro del relleno sedimentario, de tal manera que se pueda aprovechar el espesor de la capa saturada del acuífero.
5. Según la ubicación del pozo, se realiza el trazado de las líneas de tuberías, las cuales deben ir a un costado de caminos o rutas establecidas para así favorecer la etapa de construcción, instalación, operación y mantenimiento del sistema. Dichos trazados deben tener su origen en la captación y se deben dirigir a la localidad correspondiente a cada Sistema de APR.
6. En cada punto de captación se tendrá en las proximidades un estanque de acumulación que contendrá el suministro de agua de las comunidades rurales que serán beneficiadas con la extracción del recurso.
7. De acuerdo a la topografía del terreno, es necesario incluir líneas de impulsión en la red para llevar el agua desde el estanque de acumulación situado en las cercanías del pozo hasta el estanque de acumulación del Sistema de APR, el cual es el encargado de abastecer a la población local. Para cumplir con ello, se utilizan equipos de bombeos en el comienzo de cada línea de conducción.
8. Entendiendo que el diseño de un pozo profundo debe cumplir exigencias en un periodo de tiempo prolongado, se debe trabajar con caudales de diseño proyectados al 2040, mediante la evaluación de tasas de crecimiento poblacional local.
9. El desarrollo de las líneas de conducción, equipos de bombeo y estanques de acumulación con su respectivo volumen de regulación, se efectúa con ecuaciones de hidráulica, estudio de normativa vigente chilena, información disponible online. Para el diseño del pozo profundo se utilizan ecuaciones de hidráulica de aguas subterránea, y se asumen criterios de diseño conservadores debido a que el modelo conceptual no sustenta sus hipótesis en información levantada en terreno, por lo que no se tienen datos concretos (DGA, 2012a); y además, resulta ser una buena práctica para no subestimar externalidades en las obras.

5.2. Criterios

Ahora, se procede a detallar los diversos criterios y ecuaciones que se emplean para el desarrollo de los resultados del diseño de los pozos profundos, vistos desde la etapa inicial hasta la etapa final.

- **Crecimiento demográfico:** Para estudiar la componente poblacional de las localidades se utilizan tasas de crecimiento para los APRs que fueron seleccionados para el abastecimiento de agua subterránea. Los datos se obtienen del informe de *Sustentabilidad de Asentamientos Rurales* de la DGA (2020c), el cual ya fue utilizado para la evaluación del riesgo en cada uno de los sistemas. Así, el cálculo de la población proyectada para un periodo futuro se determina con la fórmula del modelo de crecimiento geométrico poblacional que se muestra a continuación:

$$P = P_i \cdot (1 + r)^t \quad (5.2.1)$$

Donde:

P (hab): Población proyectada al periodo final de estudio

P_i (hab): Población base en el periodo inicial de estudio

r (%): Tasa de crecimiento geométrica estandarizada según DGA (2020c)

t : Años desde el periodo inicial al final proyectado.

- **Dotación de agua potable:** La dotación de agua potable es una variable determinante para la estimación de los caudales medios y de diseño de conducciones y captaciones de la obra. Para ello, se utilizan datos de dotación de agua potable (litro por habitante al día) de las empresas sanitarias del norte de Chile, que se detallan en la Tabla 5.2.1.

Tabla 5.2.1: Dotación de agua potable en empresas sanitarias de la macrozona norte de Chile.
Elaborado a partir de datos de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (2019).

Empresa	Dotación año 2017 (l/hab/día)
Aguas del Altiplano	150,9
Aguas de Antofagasta	150,3
Aguas Chañar	160,9
Aguas del Valle	164,7
Promedio	156,7

Se constata que el valor promedio de dotación de agua potable en las empresas sanitarias del norte de Chile es de 156,7 l/hab/día, por ende, para el estudio de las demandas y caudales se opta en primera instancia por designar un valor de 160 l/hab/día para los cálculos posteriores. Sin embargo, asumiendo que las empresas sanitarias tienen un margen de pérdidas de agua menor a lo que se puede presentar en comunidades rurales debido a que estas últimas presentan ineficiencias desde el punto de vista de infraestructura o fallas técnicas locales, se decide aumentar la dotación de agua potable a 180 l/hab/día, para así realizar un diseño que se adecue a las condiciones de las condiciones rurales.

- **Caudal de diseño conducciones:** Para estimar el caudal de diseño del sistema se utilizan las expresiones de la base de cálculo de la *Norma Chilena NCh691.Of98 Agua potable - Conducción, Regulación y Distribución*, las cuales se detallan a continuación:

$$Q_{md} = \frac{P \cdot D_{ap}}{86.400} \quad (5.2.2)$$

Donde:

Q_{md} (l/s): Caudal medio diario de agua potable

P (hab): Población proyectada total

D_{ap} (l/hab/día): Dotación de agua potable

Para el caso del caudal medio diario se considera una cobertura del 100% de la población abastecida con respecto a la población total.

$$Q_d = FDMC \cdot Q_{md} \quad (5.2.3)$$

Donde:

Q_d (l/s): Caudal máximo diario de agua potable

$FDMC$: Factor del día de máximo consumo, que según DGA (2020) se estima igual a 1,5

Las expresiones anteriores se utilizan para el desarrollo y estudio de las captaciones.

- **Caudal de diseño pozos:** Para efectos del diseño de las obras de captación se considera que el equipo de bombeo en el pozo trabaja sólo 12 horas al día, por lo que la Ecuación 5.2.3 se verá como:

$$Q_p = 1,5 \cdot Q_{md} \cdot \frac{24 \text{ hrs}}{12 \text{ hrs}} \implies Q_p = 3 \cdot Q_{md} \quad (5.2.4)$$

Donde:

Q_p (l/s): Caudal de diseño pozo

- **Líneas de distribución o conducción:** El material que se considera para la línea de distribución es polietileno de alta densidad (HDPE) debido a que son tuberías livianas, de fácil instalación, poseen resistencia a la corrosión y abrasión. En conformidad con lo estipulado en *NCh 691*, la clase mínima de tubería según la presión nominal (PN) es la tubería clasificada como PN 8, que tiene una presión de trabajo de 0,8 MPa, según la *NCh 398 - Tuberías y accesorios de polietileno (PE) para agua potable - Requisitos - Parte 1: Tuberías*; con ello, se eligen para el sistema global de conducción tuberías de polietileno PE 100 de clase PN 12,5.

Las redes que conforman todo el sistema de tuberías se consideran para efectos del presente informe situadas bajo la superficie del terreno, donde el trazado debe estar a una profundidad mínima de 1,0 m sobre la clave de la tubería, de acuerdo a lo estipulado en la norma *NCh 691* (INN, 1998).

- **Diámetro y velocidades de conducciones:** En primer lugar, para definir los diámetros de la red de conducción se considera el criterio adoptado en el *Manual de Proyectos de Agua Potable Rural* (2019), en el cual se menciona que el diámetro de las tuberías se diseña para velocidades mínimas de 0,6 m/s y máximas de 3,0 m/s; es decir, se entiende que existe una relación directa de estas variables. Así, la velocidad se determina en función al diámetro de la tubería como:

$$\begin{cases} v_t = \frac{Q_d}{\pi \frac{d_i^2}{4}} \\ 0,6 \leq v_t \leq 3,0 \end{cases} \quad (5.2.5)$$

Donde:

v_t (m/s): Velocidad de flujo en tubería

Q_d (m³/s): Caudal de diseño

d_i (m): Diámetro interior de la tubería

El estudio de los diámetros se efectúa con los datos de conducciones de polietileno PE 100 detallados en la norma *NCh 398* (INN, 2004), en la que se muestran los diámetros nominales y espesores para distintas configuraciones de clases de tuberías.

- **Pérdidas friccionales en tuberías:** El flujo que recorre las tuberías de la línea de conducción presenta una disminución energética en su trayecto, que se denomina pérdida de carga y es atribuido al esfuerzo de corte entre las paredes del conducto con el fluido. La expresión que domina este fenómeno es la siguiente:

$$\Lambda_f = J \cdot L \quad (5.2.6)$$

Donde:

Λ_f (m): Pérdida de energía friccional

J (-): Pendiente del plano de energía o pérdida por unidad de largo

L (m): Largo de la tubería o distancia entre dos puntos

Para la obtención de la variable J se puede trabajar con la expresión de Darcy-Weisbach $J = \frac{f U^2}{d \cdot 2g}$, donde f es el coeficiente de fricción, d es el diámetro de la tubería, U es la velocidad media en la tubería y g es la aceleración de gravedad. La ecuación anterior posee una gran precisión, sin embargo, su cálculo resulta complejo ya que el coeficiente de fricción es una función del número adimensional de Reynolds (Re) en la tubería y de la aspereza relativa ($\frac{\epsilon}{d}$). Debido a esto, se procede utilizar el método de Hazen-Williams (Ecuación 5.2.7) para el cálculo de J , que resulta un procedimiento más fácil de resolver.

$$J = \frac{10,67 \cdot Q_d^{1,85}}{C^{1,85} \cdot d_i^{4,87}} \quad (5.2.7)$$

Donde:

J (-): Pendiente del plano de energía o pérdida por unidad de largo

Q_d (m³/s): Caudal de diseño conducción

C (-): Coeficiente de Hazen-Williams (en el caso de tuberías de HDPE tiene un valor de 140)

d_i (m): Diámetro interior de la tubería

- **Pérdidas singulares en tuberías:** Además de las pérdidas friccionales en las conducciones, existen las pérdidas asociadas a los distintos elementos como uniones, codos, válvulas, entre otros; dando origen a pérdidas de energía localizadas en estos elementos, las que se denominan como pérdidas singulares y se asocian a la desaceleración del escurrimiento. La expresión que permite determinar estas pérdidas se define en términos de la altura de velocidad como:

$$\Lambda_s = k_s \frac{v_t^2}{2g} \quad (5.2.8)$$

Donde:

Λ_s (m): Pérdida de energía singular

k_s (-): Coeficiente de pérdida singular

v_t (m/s): Velocidad media en la tubería

g (m/s²): Aceleración de gravedad

Sin embargo, para efectos de cálculo se considera que en la práctica las pérdidas de carga singulares se representan como un porcentaje de las pérdidas por fricción, donde para velocidades de diseño cercanas a 2 m/s se considera que las pérdidas singulares son un 10% de las pérdidas originadas por fricción, y para velocidades menores a 1 m/s el porcentaje disminuye a un 5% (IMTA, 2002).

- **Pérdidas totales de energía en tuberías y carga de elevación equipo de bombeo:** Las pérdidas totales de energía en las conducciones se determinan con la siguiente formula:

$$H_T = H_g + \Lambda_f + \Lambda_s \quad (5.2.9)$$

Donde:

H_T (m): Pérdida total de energía o altura, o altura

H_g (m): Altura geométrica, que medida desde el nivel de superficie del eje de la bomba hasta el nivel máximo de elevación

Λ_f (m): Pérdida de energía friccional

Λ_s (m): Pérdida de energía singular

- **Regulación y almacenamiento:** Para poder efectuar el almacenamiento del agua potable en las comunidades rurales con APR se contemplan estanques de acumulación, desde los cuales se dota a la localidad el suministro hídrico para el consumo diario de agua, y además, atiende las demandas de consumo máximo diario hasta episodios de emergencia como incendios, fallas técnicas o cortes de energía. Así, según la *NCh 691*, para cada uno de los Sistemas de

APR se determina el volumen de regulación de acuerdo al valor diario de máximo consumo con un mínimo de un 15% de dicho volumen. Para el volumen de emergencias, se asume un valor mínimo de 115 m³. Por otro lado, también se incluye en el análisis el volumen de reserva o seguridad, que se considera equivalente a 2 horas de consumo en el día de máximo consumo.

Finalmente, la determinación del volumen del estanque de acumulación queda definido de acuerdo a la expresión 5.2.10, donde se observa que para el diseño se debe seleccionar el mayor valor entre sumas de los volúmenes definidos anteriormente:

$$V_{est} = \max\{V_{reg} + V_{em}, V_{reg} + V_{res}\} \quad (5.2.10)$$

Donde:

V_{est} (m³): Volumen del estanque

V_{reg} (m³): Volumen de regulación

V_{em} (m³): Volumen de emergencia

V_{res} (m³): Volumen de reserva

- **Método de perforación pozo profundo:** Dentro de las diversas obras de captación que se ejecutan en terrenos de explotación se reconocen diversos métodos constructivos para la perforación del sondaje, cómo lo son el método de percusión, rotación con circulación directa, rotación con circulación inversa, rotación con aire reverso, rotopercusión (INN, 2000). Para el diseño de los pozos se consideró el método de rotopercusión por sobre los otros, el cual combina los métodos de percusión y rotación simultáneamente, logrando así un mejor rendimiento comparado en comparación a los demás métodos (Reckmann, 2001). Además, es propicio agregar que según Espinoza (2010) el sistema de rotopercusión es muy efectivo ya que logra irrumpir en materiales consolidados o roca debido a la gran velocidad de perforación que puede alcanzar.

Este método emplea maquinaria o equipos de martinete hidráulico/neumático para realizar la perforación en profundidad que se efectúa gracias a la acción conjunta de: un pistón que posee una corona de dientes de aleación carbono-tungsteno la cual fractura el material del terreno y un compresor de aire que agrega el movimiento de percusión (Espinoza, 2010).

- **Material de entubación:** Las tuberías que se emplean en el diseño de las captaciones son tubos sin uso de acero al carbono tipo YODER, que se ajustan a las normas *ASTM-53*, *ASTM-120* y *API* (Reckmann, 2001). Las tuberías que se utilizarán tendrán un diámetro de 10”.

- **Diámetro de perforación y entubación:** Espinoza (2010) señala que el diámetro de perforación debe exceder en más de 4 pulgadas al diámetro de la entubación definitiva, para así generar un margen ante posibles eventos de desviación vertical al momento de insertar la tubería definitiva. Lo anterior queda detallado en la siguiente expresión:

$$\phi_{\text{perforación}} = \phi_{\text{entubación}} + 4'' \quad (5.2.11)$$

Donde:

$\phi_{\text{perforación}}$ (pulgadas): Diámetro de perforación

$\phi_{\text{entubación}}$ (pulgadas): Diámetro de entubación

De esta manera, el diámetro de entubación es de 10", por ende, el diámetro de perforación será de 14".

- **Engravillado:** Consiste en el relleno de gravilla que se dispone entre las paredes de perforación y la tubería del pozo, que forma una especie de filtro que impide el paso de partículas finas durante el proceso bombeo de agua subterránea. También tiene un efecto estabilizador de la pared de perforación evitando derrumbes (Reckmann, 2001). Si bien la selección de la gravilla es un elemento importante dentro del diseño del pozo, este proceso necesita un estudio detallado de granulometría que pueden satisfacer los requisitos necesarios para el filtro de grava, sin embargo, debido a que sólo se diseña a nivel conceptual, se opta por utilizar un valor estándar de gravilla con cantos bien redondeados y uniformes de 5 a 10 milímetros de diámetro aproximado.
- **Sistema captante a través de cribas:** Las cribas son elementos ranurados que se disponen en el entubado del pozo profundo para poder realizar la captación del agua subterránea a través de rejillas horizontales que la componen. La Tabla 5.2.2 detalla las medidas de abertura de las ranuras de la criba, que depende de la granulometría de la pared de gravilla.

Tabla 5.2.2: Tamaños de cribas. Fuente: Espinoza (2010).

Clase	Abertura (pulgada)	Abertura (mm)	Rango diámetro medio gravilla (mm)
Slot 10	10/1000	0,254	2 - 5
Slot 20	20/1000	0,508	3 - 6
Slot 40	40/1000	1,016	5 - 12

Así, el diseño contempla el uso de cribas de acero al carbono de clase Slot 40 tipo Johnson , que a su vez se relacionan con la elección del engravillado del pozo. Las cribas a su vez se deben considerar en posiciones estratégicas en la que los estratos o capas del perfil estratigráfico aporten la mayor cantidad de agua subterránea al pozo.

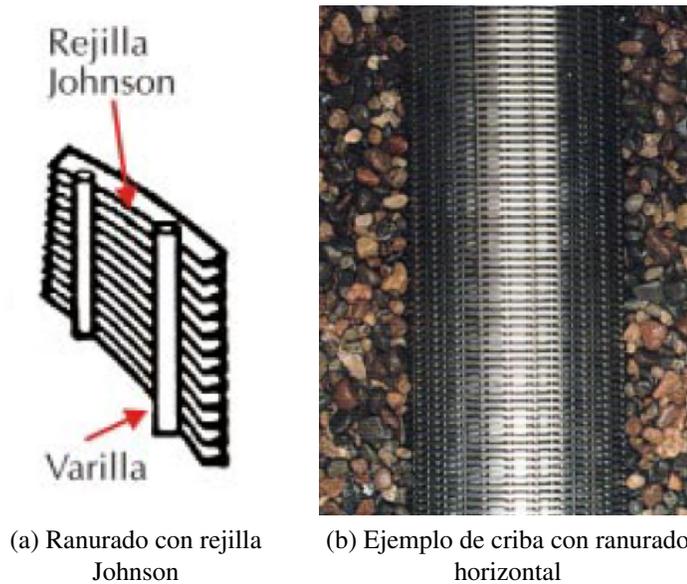


Figura 5.2.1: Sistema captante a través de cribas. Fuente: Rickmann (2001)

- **Elección equipo de bombeo en pozo profundo:** Para las obras de captación se consideró la utilización de bombas sumergibles, que se seleccionan según la siguiente fórmula de potencia:

$$P_b = \frac{H_d \cdot Q_p \cdot \gamma}{\eta} \quad (5.2.12)$$

Donde:

P_b (kW): Potencia de la bomba (energía por unidad de tiempo)

H_d (m): Altura dinámica de elevación de la bomba, que en este caso se utiliza la profundidad del pozo

Q_p (m³/s): Caudal de diseño del pozo

γ ($\frac{N}{m^3}$): Peso específico del agua

η (-): Rendimiento de la bomba, que para efectos de diseño se considera 0,75

- **Profundidad del pozo:** Uno de los parámetros de diseño más importantes es el de profundidad del pozo, que se relaciona con los espesores, profundidades y rendimientos específicos de los acuíferos (Reckmann, 2001). Para poder determinar este parámetro, se considera el siguiente modelo conceptual, que detalla esquemáticamente variables de interés para determinar lo requerido.

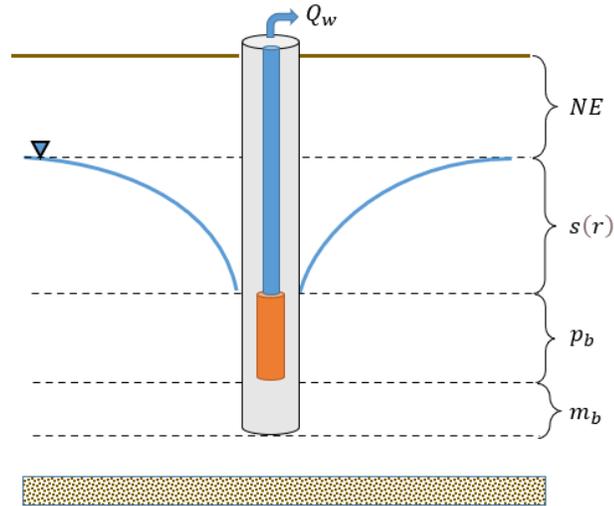


Figura 5.2.2: Modelo conceptual de profundidad de pozo. Elaboración propia.

$$P_p = NE + s(r_w) + p_b + m_b \quad (5.2.13)$$

Donde:

P_p (m): Profundidad del pozo

NE (m): Nivel estático de agua subterránea medido desde la superficie del terreno

$s(r_w)$ (m): Abatimiento o descenso en el pozo producto del bombeo

p_b (m): Profundidad de la bomba con respecto al nivel dinámico

m_b (m): Margen de profundidad de la bomba para evitar acumulación de sedimento

Los criterios que permiten definir la Ecuación 5.2.13 se detallan a continuación:

- El nivel estático se estima según valores de pozos de observación DGA cercanos a la zona de captación.
- El descenso del pozo se estima para acuíferos confinados o libres según corresponda, usando la Formula de Thiem o Descarga de Dupuit-Forchheimer para cada caso respectivo.
- Se asume que la profundidad de la bomba (p_b) con respecto al nivel dinámico (NE) es de 15 metros.
- Se asume que el margen de la bomba (m_b) con respecto a la profundidad de la bomba (p_b) es de 5 metros, lo que permite evitar la acumulación en el tiempo de sedimentos o partículas finas que puedan ingresar en las cribas del pozo e impidan un buen funcionamiento de la bomba. Además, se toma este criterio de profundidad para alargar la vida útil de la bomba y disminuir la probabilidad de mantenciones por fallas técnicas.
- Se trabaja con flujos en régimen permanente, que son horizontales al pozo.

Sobre el descenso del nivel estático en el acuífero, en primer lugar, se analizó el caso cuando el acuífero es confinado. Para ello, se asumió un flujo en régimen permanente hacia el pozo y mediante la Formula de Thiem, que determina el abatimiento generado por la impulsión. La expresión mencionada se muestra a continuación.

$$s(r_w) = \frac{Q_w}{2\pi T} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) \quad (5.2.14)$$

Donde:

$s(r_w)$ (m): Abatimiento o descenso en el pozo producto del bombeo

Q_w (m³/dia): Tasa de bombeo o caudal de extracción del pozo

T (m²/dia): Transmisividad del acuífero

R (m): Radio de influencia del pozo, que para efectos de diseño se considera de 200 metros

r_w (m): Radio del pozo

Para el caso de acuíferos libres en régimen permanente se usó la expresión de Descarga de Dupuit-Forchheimer, que tiene la siguiente forma:

$$H_0^2 - h_w^2 = \frac{Q_w}{\pi K} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) \quad (5.2.15)$$

Donde:

H_0 (m): Altura hidráulica inicial, donde $r = R$

h_w (m): Altura hidráulica en el pozo, donde $r = r_w$

K (m/dia): Conductividad hidráulica del acuífero

Sin embargo, en el caso de los acuíferos libres si se consideran de gran espesor y que la reducción del nivel freático es pequeña, se tendrá que: $H_0 + h_w \sim 2H_0$ y $H_0 + h_w \sim s(r_w)$. Por ende, trabajando la Ecuación 5.2.15 con lo anterior se tiene:

$$\begin{aligned} H_0^2 - h_w^2 &= \frac{Q_w}{\pi K} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) \\ \implies H_0 - h_w &= \frac{Q_w}{\pi K \cdot (H_0 + h_w)} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) = \frac{Q_w}{\pi K \cdot (2H_0)} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) \\ \implies s(r_w) &= \frac{Q_w}{2\pi \bar{T}} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) \end{aligned}$$

Donde:

\bar{T} (m²/dia): Transmisividad promedio del acuífero ($\bar{T} = K \cdot H_0$)

Con ello, asumiendo que las reducciones del nivel freático son pequeñas, un acuífero libre (Ecuación 5.2.15) puede ser tratado como un acuífero confinado (Ecuación 5.2.14), lo que para efectos de la determinación de la profundidad del pozo se consideró válido.

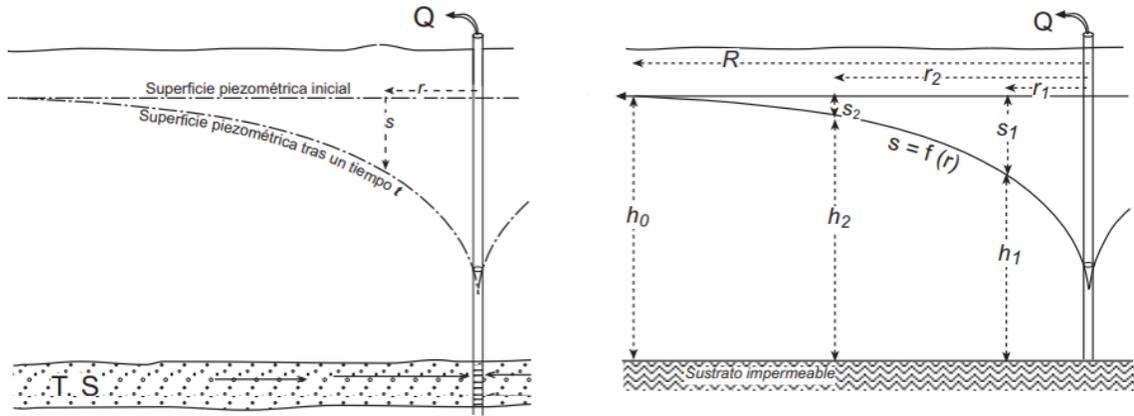


Figura 5.2.3: Caracterización geométrica del cono de abatimiento de pozo, con niveles y descensos en puntos de observación. Fuente: Sanchez (2022).

- **Transmisividad en sectores acuíferos:** Para determinar la transmisividad de los sectores de continuidad hidrogeológica lo más recomendado es realizar pruebas de bombeo a caudal variable y constante en pozos de observación o sondajes realizados en terreno para a través de ecuaciones de hidráulica de aguas subterráneas analizar el descenso y tiempos de recuperación del acuífero, ante variaciones en el caudal de bombeo. Pero, debido a que el diseño que se realiza es a nivel de ingeniería conceptual, el método para estimar la transmisividad consiste en obtener datos de pruebas de bombeos realizadas en APRs o en pozos con DAA. Para esto último, se obtuvo información de la plataforma web del Proyecto CEAZA-FONDEF, a través del visualizador de mapa en el que se detallan las características de pruebas de bombeo (Ver Figura 5.2.4).

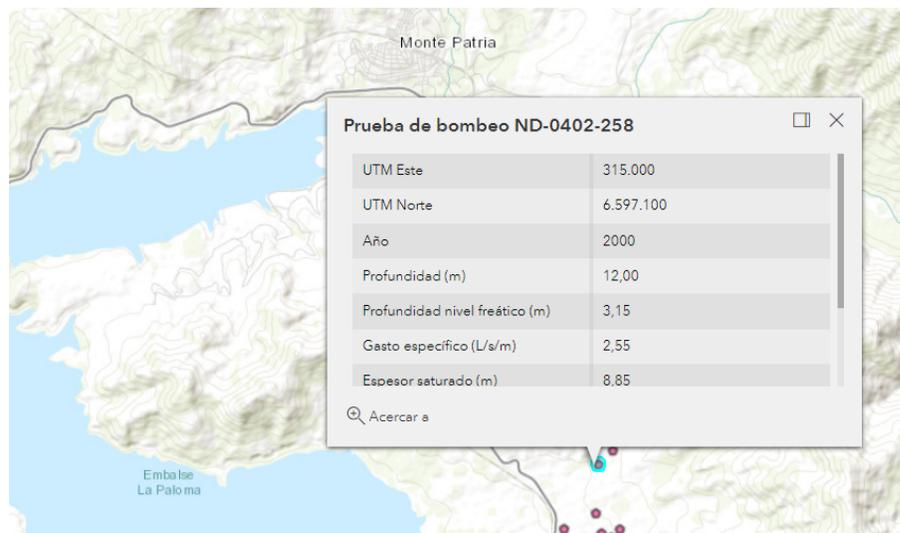


Figura 5.2.4: Selección pruebas de bombeo utilizando el producto web del CEAZA, para determinar transmisividad. Fuente: Visualizador WEB Proyecto CEAZA-FONDEF www.aguasubterraneaLimari.cl (2022).

Para cada sector se utilizan 3 pruebas de bombeo para determinar a través de un promedio simple la transmisividad a utilizar en la ecuación de descenso.

Para dar un mejor entendimiento sobre los criterios descritos anteriormente con respecto a los pozos profundos, la Figura 5.2.5 muestra un esquema de las características típicas que posee un pozo, con las especificaciones más comunes.

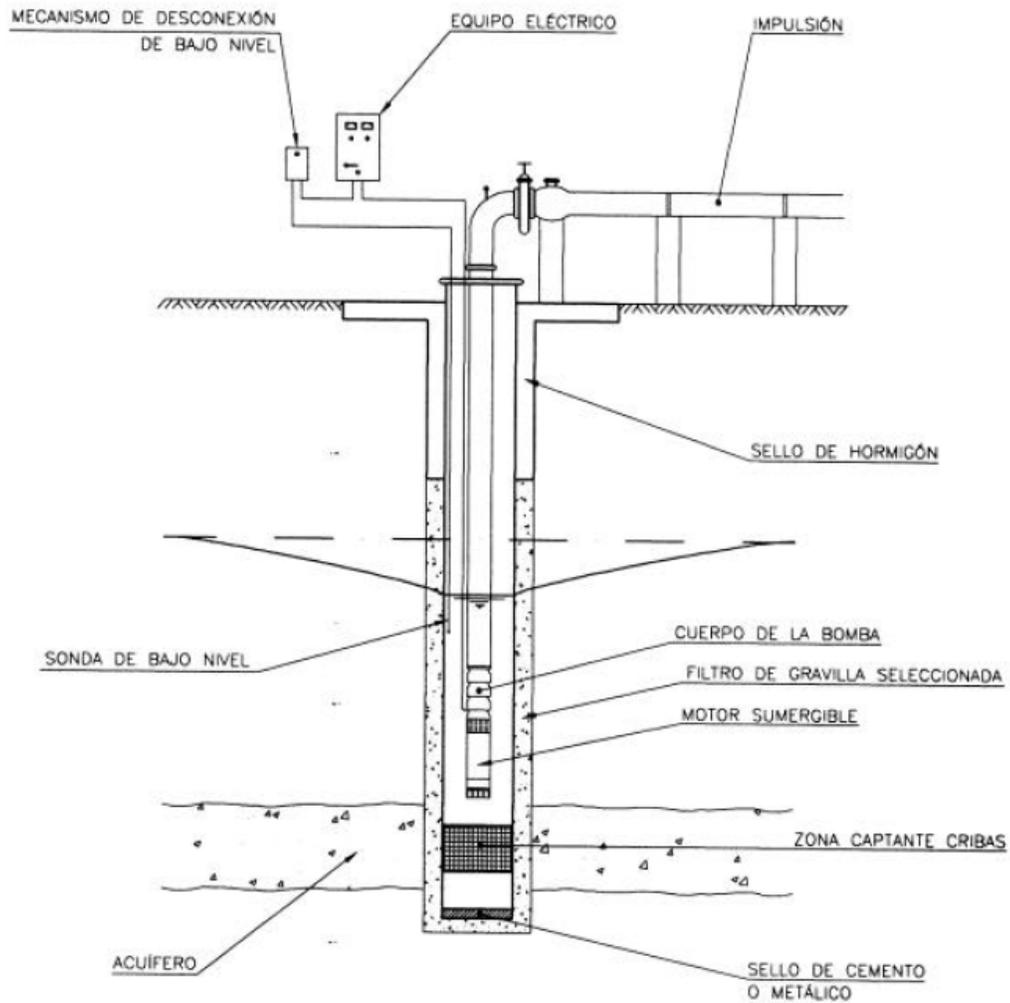


Figura 5.2.5: Esquema con especificaciones tipo de un pozo profundo. Fuente: Espinoza (2010).

5.3. Resultados

5.3.1. Sector Quebrada Ingenio

El perfil transversal que se traza con Google Earth en el sector de continuidad hidrogeológica Quebrada Ingenio, de acuerdo a las zona estudiada y establecida en el Capítulo 4 del informe, se detalla en la Figura 5.3.1. El perfil se ubica desde el noroeste de la ladera en la quebrada hasta la ladera sureste, notando así la depresión existente en la zona.



Figura 5.3.1: Perfil transversal visto aguas abajo en el Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia.

Luego, se analiza el perfil transversal de acuerdo a la proyección de pendientes en la quebrada, dando paso a un corte transversal tal como se detalla en la Figura 5.3.2. En el perfil se aprecia la zona de relleno, la cual será de utilidad para determinar el mejor punto donde realizar la captación, la que se construye y define como el área que queda por encima de las proyecciones de pendientes laterales. Además, se observa una unidad de roca que se asume con baja permeabilidad, la cual para el diseño se considera como el área que queda bajo el cruce de pendientes de las laderas en el perfil.

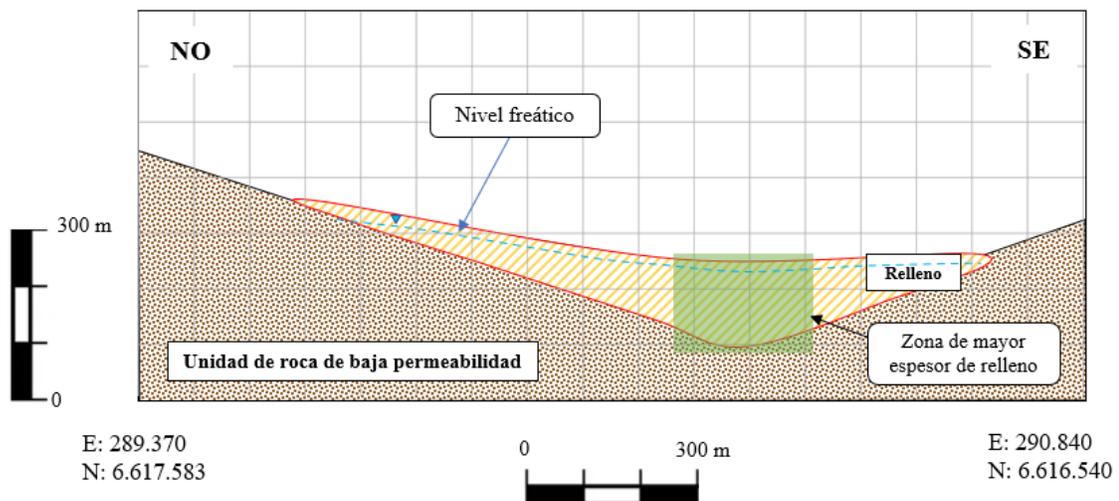


Figura 5.3.2: Corte perfil transversal Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia.

La Figura 5.3.3 muestra el punto de captación con el estanque de acumulación en conjunto con las líneas de distribución para los Sistemas APR. Las líneas de conducción están dispuestas de tal manera que su trayecto vaya en directa relación con caminos establecidos o rutas legales.



Figura 5.3.3: Ubicación de captación y estanque de almacenamiento, junto con línea de distribución para abastecimiento en APRs en el Sector Quebrada Ingenio.

Así, la Figura 5.3.4 detalla un esquema simple de las principales instalaciones del sistema de captación, distribución y almacenamiento.

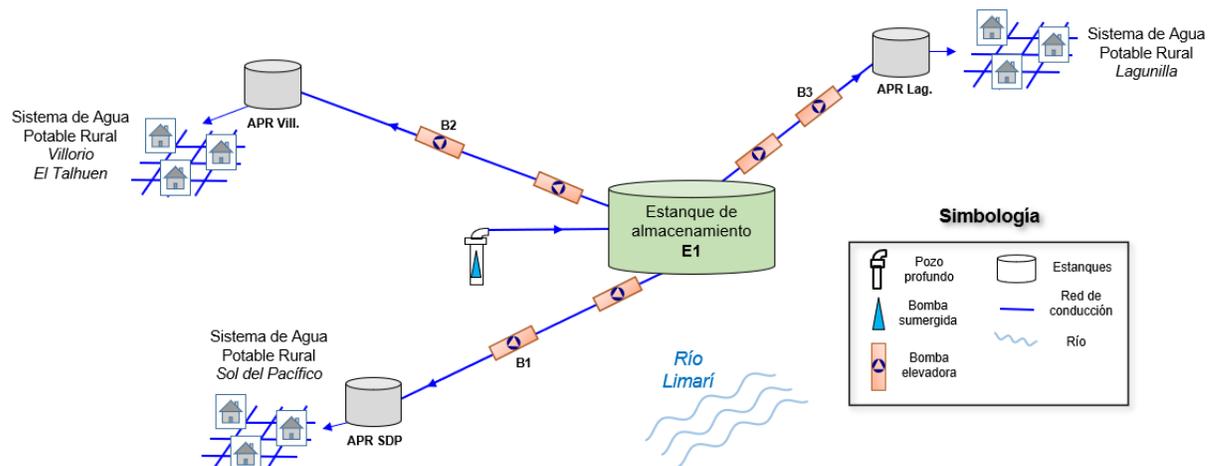


Figura 5.3.4: Layout del sistema de captación, conducción y almacenamiento del Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia.

A continuación, se muestran las tablas con los resultados obtenidos para la determinación de los parámetros y variables del diseño.

En primer lugar, se determinaron las dimensiones y pérdidas de carga de las líneas de conducción, tal como se detalla en la Tabla 5.3.1.

Tabla 5.3.1: Determinación de las dimensiones y pérdidas de carga energética en las líneas de conducción en el Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia

Tramo	Q l/s	dn mm	ϵ mm	di m	v_t m/s	L m	Λ_f m	Λ_s m	H_g m	H_T m
E1 - B1	2,35	75	5,6	0,06	0,74	3.100	32,08	2,25	72	106,32
B1 - APR SDP	2,35	75	5,6	0,06	0,74	3.995	41,34	2,89	45	89,23
E1 - B2	1,4	63	4,7	0,05	0,62	3.100	28,74	2,01	72	102,75
B2 - APR Vill.	1,4	63	4,7	0,05	0,62	7.604	70,50	4,93	-75	0,43
E1 - B3	2,95	90	6,7	0,08	0,64	3.230	20,89	1,46	33	55,36
B3 - APR Lag.	2,95	90	6,7	0,08	0,64	668	4,32	0,30	55	59,62

La Tabla 5.3.2 muestra el resultado del volumen del estanque de almacenamiento para el estanque de acumulación en el Sector Quebrada Ingenio.

Tabla 5.3.2: Cálculo del volumen de almacenamiento de estanque en sistema de captación y Sistemas de APR, Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia

Estanque	V_{reg} (m ³)	V_{em} (m ³)	V_{inc} (m ³)	V_{res} (m ³)	V_{est} (m ³)
APR Sol del Pacifico	2,35	30,5	115	16,92	145,5
APR Villorio	1,4	18,1	115	10,08	133,1
APR Lagunilla	2,95	38,2	115	21,24	153,2
Volumen total de estanque de almacenamiento en captación					432 (m³)

Ahora, se muestra en la Tabla 5.3.3 las pruebas de bombeo que se utilizaron para la determinación de la transmisividad promedio en el sector.

Tabla 5.3.3: Pruebas de bombeo ejecutadas próximas al Sector Quebrada Ingenio. Fuente: APR Villaseca y CEAZA-FONDEF (2022).

Nombre o código	Coordenada Este	Coordenada Norte	P_p (m)	NE (m)	T (m ² /día)
ND-0402-272	292.809	6.621.640	69	3,47	54,92
ND-0402-276	293.476	6.621.354	86	2,10	48,13
Prueba APR Villaseca	293.483	6.616.376	70	3,33	23,3

Para determinar el valor del nivel estático del pozo profundo a diseñar, se utilizaron los valores de niveles estáticos en pozos de observación de la DGA. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 5.3.4.

Tabla 5.3.4: Valores promedio de Niveles Estáticos en pozos de observación DGA próximos al Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

ID	Nombre	NE promedio (m)
P15	Mina Panulcillo	3,42
P18	Pueblo Lagunilla	2,96

Luego, la determinación de la profundidad del pozo se obtuvo mediante el cálculo del descenso del nivel estático para pozos profundos según la Formula de Thiem, en función al valor promedio de transmisividad determinado gracias a los valores señalados en la Tabla 5.3.3. Así, la Tabla 5.3.5 detalla los parámetros de caudal de diseño, descenso, nivel estático y profundidad del pozo profundo para el Sector Quebrada Ingenio.

Tabla 5.3.5: Cálculos del descenso en el nivel freático y de la profundidad del pozo profundo en el Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia

T (m ² /día)	Q_d (m ³ /día)	Q_p (m ³ /día)	s (m)	NE (m)	P_p (m)
42,12	578,02	1.156,03	29,13	3,19	53

Por último, se procedió a determinar la potencia de la bomba a instalar en el pozo según las variables que se muestran en la Tabla 5.3.6.

Tabla 5.3.6: Cálculos de la potencia de la bomba instalada en el pozo profundo el Sector Quebrada Ingenio. Elaboración propia

H_d (m)	Q_p (m ³ /s)	γ ($\frac{kg}{m^3 \cdot s^2}$)	η (-)	P_b (kW)
53	0,013	9.800	0,75	9,3

La Figura 5.3.5 muestra las principales alturas determinadas en el diseño de la obra de captación del Sector Quebrada Ingenio.

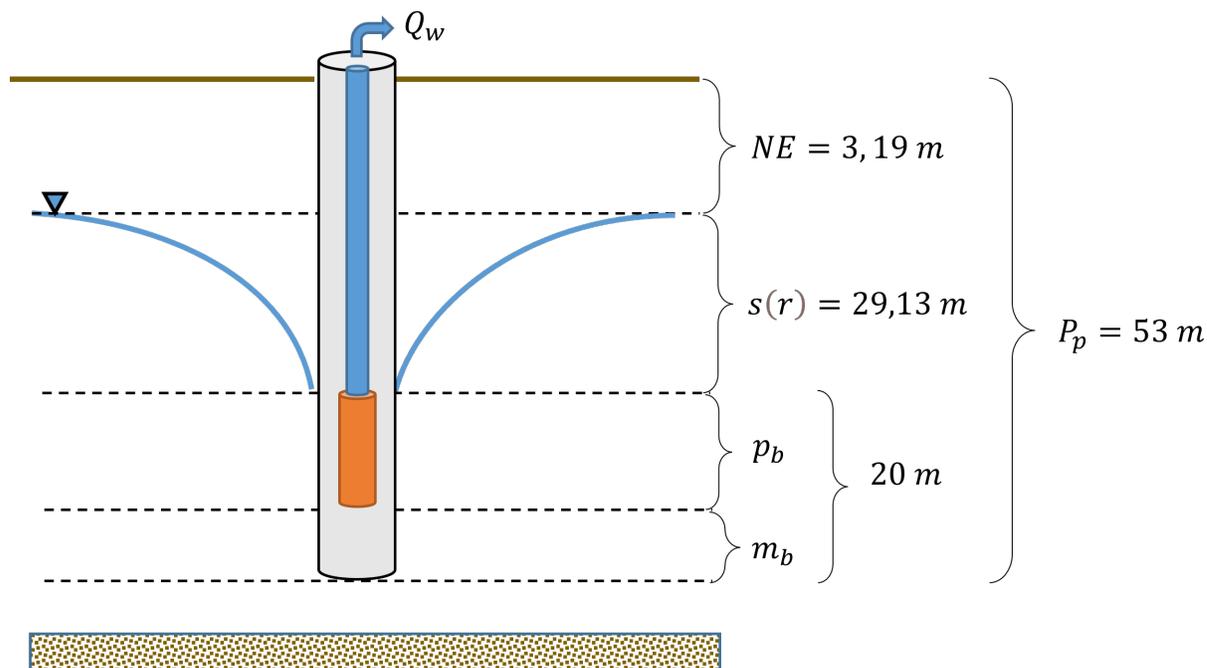


Figura 5.3.5: Diseño conceptual de pozo profundo en Sector Quebrada Ingenio, con dimensiones características. Elaboración propia.

5.3.2. Sector Río Grande

El perfil transversal que se traza con Google Earth en el sector de continuidad hidrogeológica Río Grande, de acuerdo a las zona estudiada y establecida en el Capítulo 4 del informe, se detalla en la Figura 5.3.6. Como se aprecia, el perfil cruza la comuna de Monte Patria desde la ladera nor-noroeste hasta la ladera sur-sureste, donde en su trayecto se intersecta con el cauce del Río Grande.



Figura 5.3.6: Perfil transversal visto aguas abajo en el Sector Río Grande. Elaboración propia.

Luego, se analiza el perfil transversal de acuerdo a la proyección de pendientes, dando paso a un corte transversal tal como se detalla en la Figura 5.3.7. En el perfil se aprecia la zona de relleno, la cual será de utilidad para determinar el mejor punto donde realizar la captación, la que se construye y define como el área que queda por encima de las proyecciones de pendientes laterales. Además, se observa una unidad de roca que se asume con baja permeabilidad, la cual para el diseño se considera como el área que queda bajo el cruce de pendientes de las laderas en el perfil.

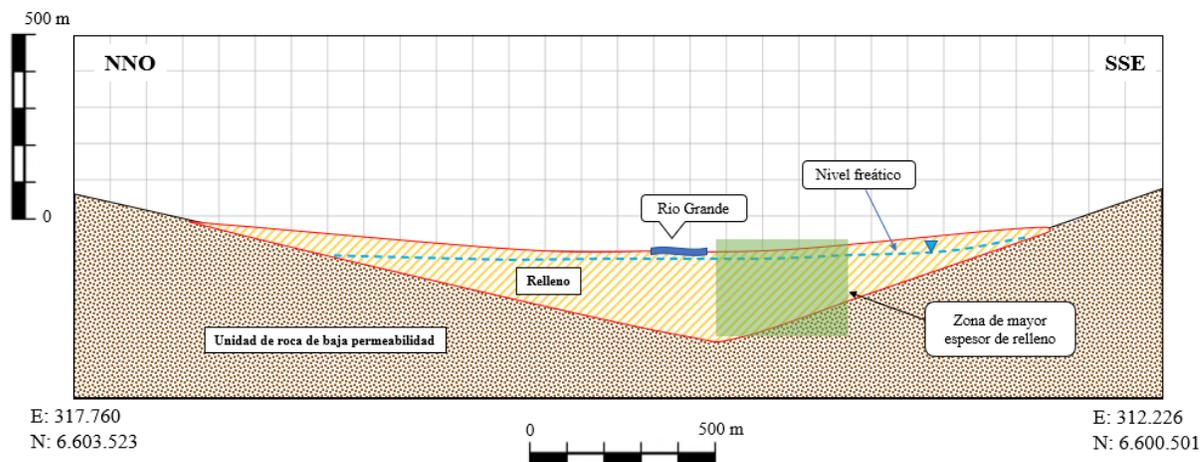


Figura 5.3.7: Corte perfil transversal Sector Río Grande. Elaboración propia.

La Figura 5.3.8 muestra la captación, el estanque de acumulación y las líneas de distribución que se dirigen a los Sistemas de APR.



Figura 5.3.8: Ubicación de captación y estanque de almacenamiento, junto con línea de distribución para abastecimiento en APRs en el Sector Río Grande. Elaboración propia.

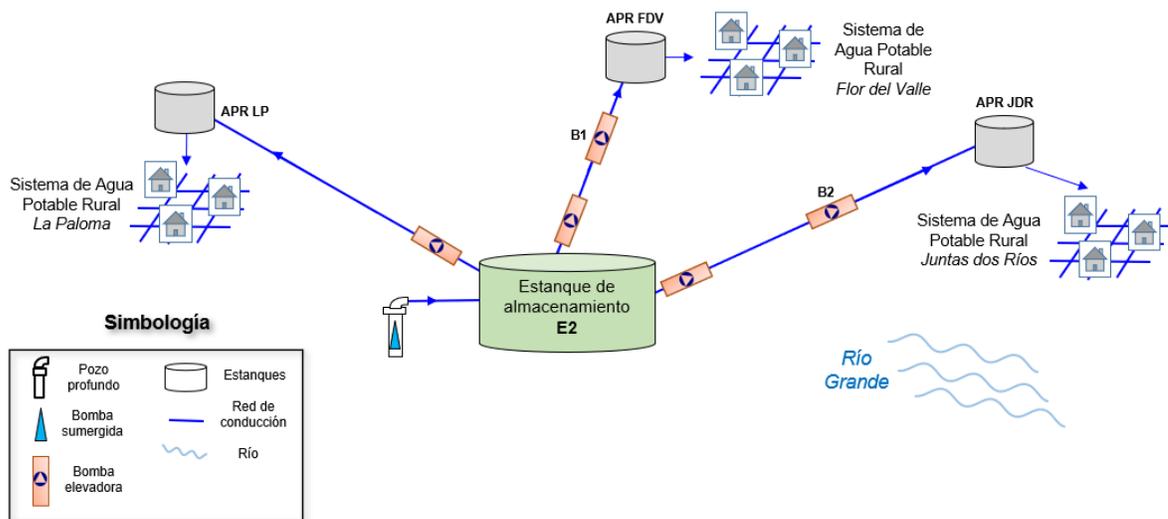


Figura 5.3.9: Layout del sistema de captación, distribución y almacenamiento del Sector Río Grande. Elaboración propia.

En adelante, los pasos y procedimientos son los mismos señalados en el Sector Quebrada Ingenio.

Tabla 5.3.7: Determinación de las dimensiones y pérdidas de carga energética en las líneas de conducción en el Sector Río Grande. Elaboración propia

Tramo	Q l/s	dn mm	ϵ mm	di m	v_t m/s	L m	Λ_f m	Λ_s m	H _g m	H _T m
E2 - B1	6,9	110	8,1	0,09	1,00	2.000	23,2	1,6	36	60,9
B1 - APR FDV	6,9	110	8,1	0,09	1,00	1.947	22,6	1,6	45	51,2
E2 - B2	2,05	75	5,6	0,06	0,64	5.260	42,3	3,00	62	107,2
B2 - APR JDR	2,05	75	5,6	0,06	0,64	3.859	31,0	2,2	88	121,2
E1 - APR LP	2,25	75	5,6	0,06	0,70	12.618	120,5	8,4	-45	83,9

Tabla 5.3.8: Cálculo del volumen de almacenamiento de estanque en sistema de captación y Sistemas de APR, Sector Río Grande. Elaboración propia

Estanque	V _{reg} (m ³)	V _{em} (m ³)	V _{inc} (m ³)	V _{res} (m ³)	V _{est} (m ³)
APR Flor del Valle	6,9	89,4	115	49,69	204,4
APR Juntas dos Ríos	2,05	26,6	115	14,76	141,6
APR La Paloma	2,25	29,2	115	16,2	144,2
Volumen total de estanque de almacenamiento en captación					490 (m³)

Tabla 5.3.9: Pruebas de bombeo ejecutadas próximas al Sector Río Grande. Fuente: CEAZA-FONDEF (2022).

Nombre o código	Coordenada Este	Coordenada Norte	P _p (m)	NE (m)	T (m ² /día)
ND-0402-52	296.550	6.609.400	25	6	113,64
ND-0402-132	315.200	6.597.400	65	17,49	49,53
ND-0402-258	315.000	6.597.100	12	3,15	254,78

Tabla 5.3.10: Valores promedio de Niveles Estáticos en pozos de observación DGA próximos al Sector Río Grande. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

ID	Nombre	NE promedio (m)
P31	Fundo Las Represas Vitivinícolas	4,53
P33	Monte Patria	6,10

Tabla 5.3.11: Cálculos del descenso en el nivel freático y de la profundidad del pozo profundo en el Sector Río Grande. Elaboración propia

T (m ² /día)	Q _d (m ³ /día)	Q _p (m ³ /día)	s (m)	NE (m)	P _p (m)
139,32	967,68	1.935,36	14,74	5,32	41

Tabla 5.3.12: Cálculos de la potencia de la bomba instalada en el pozo profundo el Sector Río Grande. Elaboración propia

H _d (m)	Q _p (m ³ /s)	γ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}^2}$)	η (-)	P _b (kW)
41	0,022	9.800	0,75	12

La Figura 5.3.10 muestra las principales alturas determinadas en el diseño de la obra de captación del Sector Río Grande.

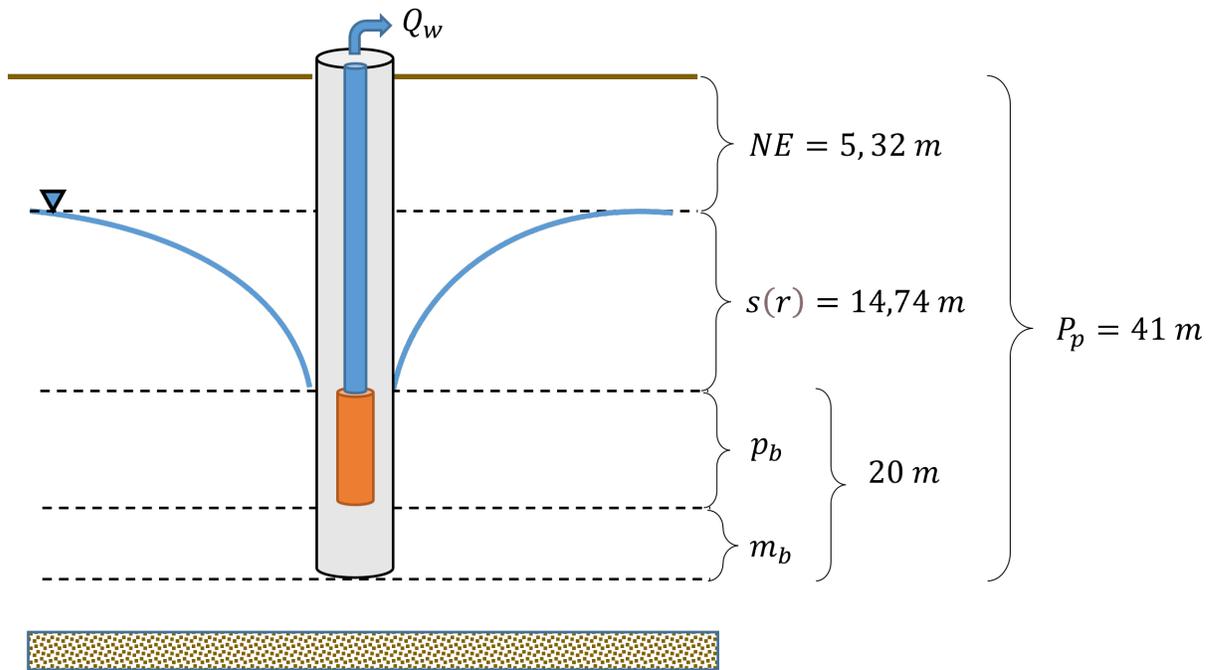


Figura 5.3.10: Diseño conceptual de pozos profundo en Sector Río Grande, con dimensiones características. Elaboración propia.

5.3.3. Sector Río Guatulame

El perfil transversal que se traza con Google Earth en el sector de continuidad hidrogeológica Río Grande, de acuerdo a las zona estudiada y establecida en el Capítulo 4 del informe, se detalla en la Figura 5.3.11. Como se aprecia, el perfil cruza terrenos particulares cercanos a la zona de Chañaral Alto, desde la ladera noroeste hasta la ladera sureste, donde en su trayecto se encuentra el cauce del Río Guatulame.



Figura 5.3.11: Perfil transversal visto aguas arriba en el Sector Río Guatulame. Elaboración propia.

La Figura 5.3.12 muestra la zona de mayor espesor del relleno, donde se ubica la zona de captación.

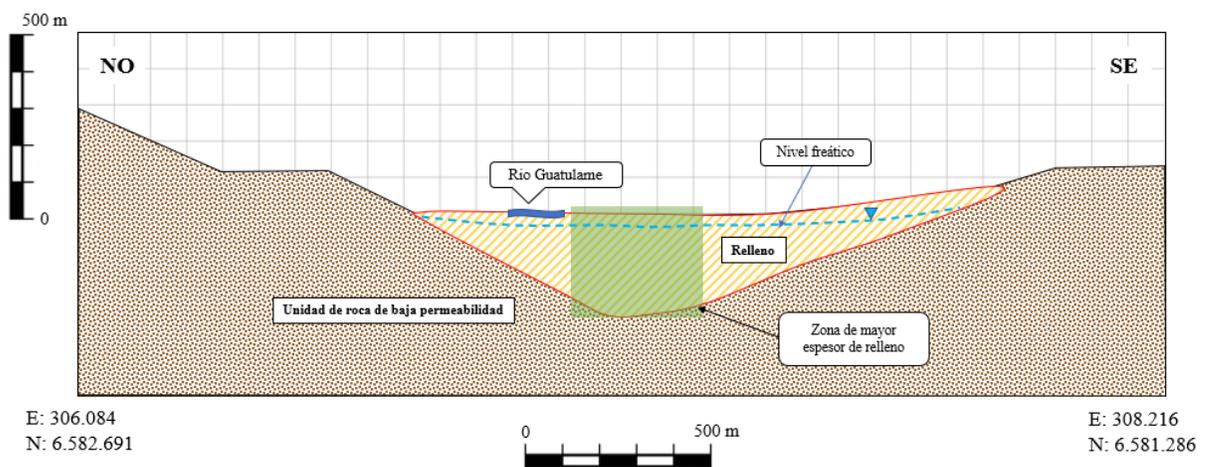


Figura 5.3.12: Corte perfil transversal Sector Río Guatulame. Elaboración propia.

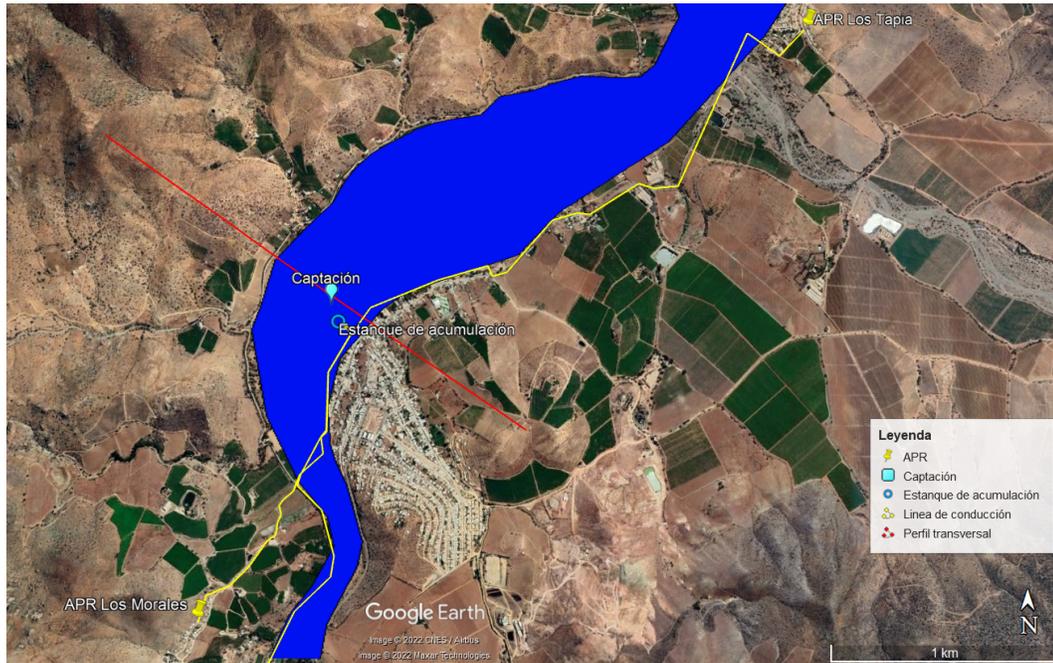


Figura 5.3.13: Ubicación de captación y estanque de almacenamiento, junto con línea de distribución para abastecimiento en APRs en el Sector Río Guatulame. Elaboración propia.

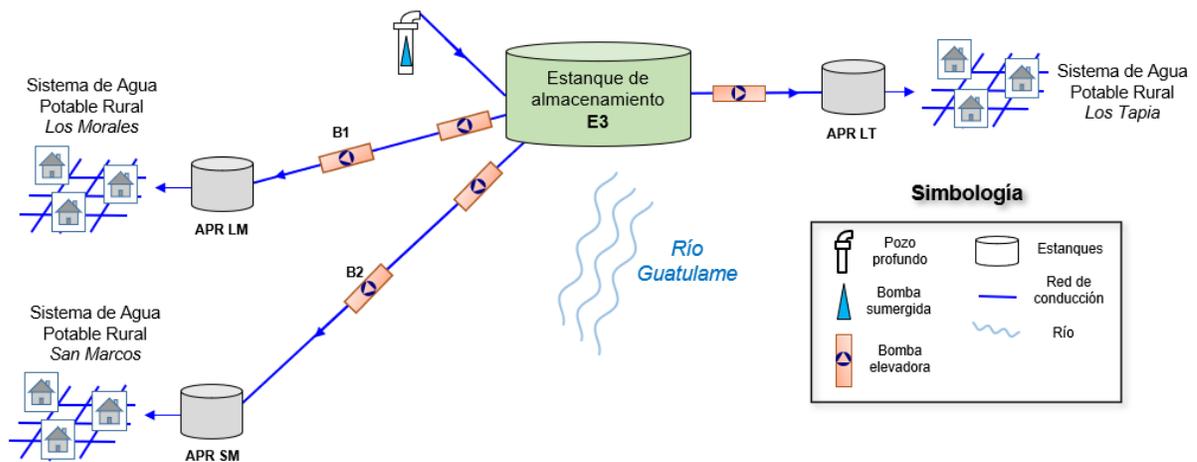


Figura 5.3.14: Layout del sistema de captación, distribución y almacenamiento del Sector Río Guatulame. Elaboración propia.

Tabla 5.3.13: Determinación de las dimensiones y pérdidas de carga energética en las líneas de conducción en el Sector Río Guatulme. Elaboración propia

Tramo	Q l/s	dn mm	ϵ mm	di m	v_t m/s	L m	Λ_f m	Λ_s m	H _g m	H _T m
E3 - B1	2,2	75	5,6	0,06	0,69	1.070	9,8	0,7	19	29,5
B1 - APR LM	2,2	75	5,6	0,06	0,69	716	6,6	0,5	50	57,0
E3 - APR LT	1,5	63	4,7	0,05	0,66	3.365	35,4	2,5	12	49,9
E3 - B2	5,2	110	8,1	0,09	0,75	5.400	37,2	2,6	40	79,8
B3 - APR SM	5,2	110	8,1	0,09	0,75	6.358	43,8	3,1	61	107,8

Tabla 5.3.14: Cálculo del volumen de almacenamiento de estanque en sistema de captación y Sistemas de APR, Sector Río Guatulame. Elaboración propia

Estanque	V _{reg} (m ³)	V _{em} (m ³)	V _{inc} (m ³)	V _{res} (m ³)	V _{est} (m ³)
APR Los Morales	2,2	28,5	115	15,84	143,5
APR Los Tapia	1,5	19,4	115	10,8	134,4
APR San Marcos	5,2	67,4	115	37,4	182
Volumen total de estanque de almacenamiento en captación					460 (m³)

Tabla 5.3.15: Pruebas de bombeo ejecutadas próximas al Sector Río Guatulame. Fuente: CEAZA-FONDEF (2022).

Nombre o código	Coordenada Este	Coordenada Norte	P _p (m)	NE (m)	T (m ² /día)
ND-0402-374	309.190	6.582.300	120	81,19	54,99
ND-0402-238	311.267	6.581.973	65	8,15	253,88
ND-0402-374	308.635.00	6.581.756	73	10,71	123,99

Tabla 5.3.16: Valores promedio de Niveles Estáticos en pozos de observación DGA próximos al Sector Río Guatulame. Elaboración propia a partir de la base de datos del Servicio Hidrométrico Nacional de la DGA.

ID	Nombre	NE promedio (m)
P26	AP Chañaral	3,38

Tabla 5.3.17: Cálculos del descenso en el nivel freático y de la profundidad del pozo profundo en el Sector Río Guatulame. Elaboración propia

T (m ² /día)	Q _d (m ³ /día)	Q _p (m ³ /día)	s (m)	NE (m)	P _p (m)
138,29	768,10	1.536,19	11,79	3,38	36

Tabla 5.3.18: Cálculos de la potencia de la bomba instalada en el pozo profundo el Sector Río Guatulame. Elaboración propia

H _d (m)	Q _p (m ³ /s)	γ ($\frac{kg}{m^3 \cdot s^2}$)	η (-)	P _b (kW)
36	0,018	9.800	0,75	8,4

La Figura 5.3.15 muestra las principales alturas determinadas en el diseño de la obra de captación del Sector Río Guatulame.

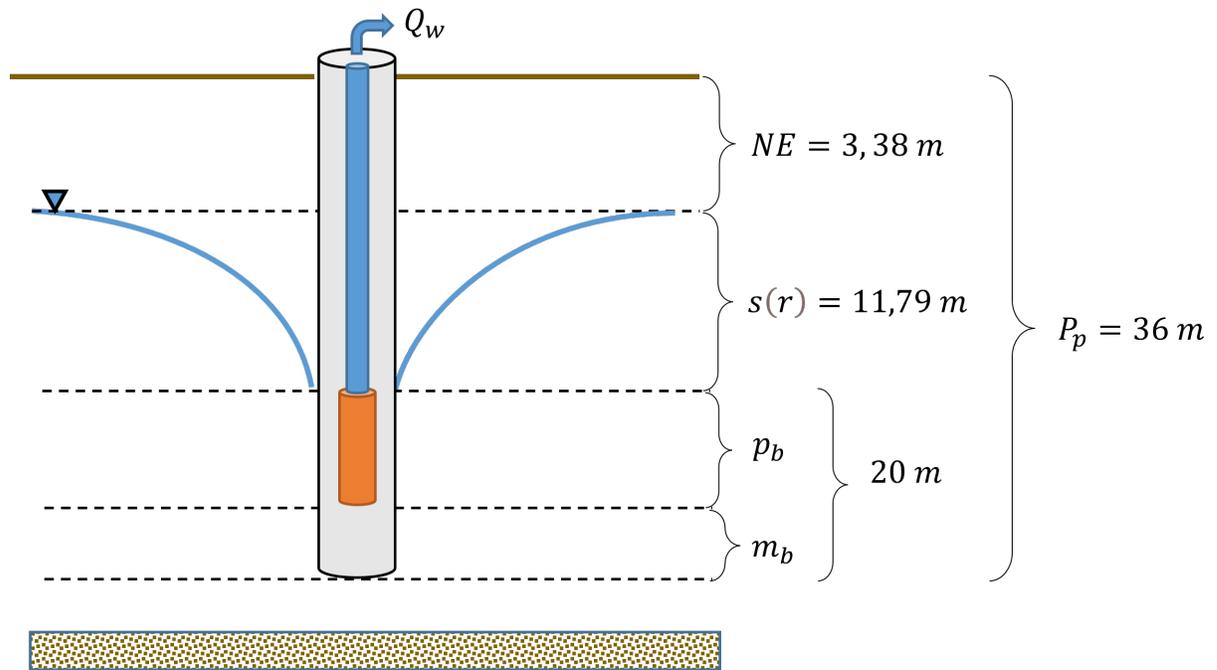


Figura 5.3.15: Diseño conceptual de pozos profundo en sector Río Guatulame, con dimensiones características. Elaboración propia.

Capítulo 6

Metodología, maquinaria y plazos de construcción

6.1. Método de perforación de sondaje

El método de perforación utilizado para la realización de los pozos profundos corresponde al método de rotoperusión, el cual se puede entender como una combinación entre los métodos de perforación de rotación y método de percusión. El método consiste en la generación de impactos en el suelo debido a la acción de un equipo de martillo hidráulico rotatorio en la zona donde se realizará el sondaje, al cual se le transmite energía debido al uso de compresores de aire, generando así la rotura por impacto de tipo directo en la superficie.

Este método se puede emplear en ambientes geológicos diversos que va desde roca dura como granito, hasta sedimentos no consolidados, como pueden ser arenas y gravas, lo que permite perforar grandes diámetros que van desde las 12” hasta los 23” de diámetro. Para efectos de los pozos profundos diseñados, se utiliza un diámetro de perforación de 14”, en función al diámetro de la entubación de acero tipo YODER 10”.

6.2. Maquinaria y materiales que se utilizan en la perforación

Entendiendo que el presente trabajo corresponde a diseños a nivel de ingeniería conceptual, se procede a estimar los componentes del presente capítulo a través de información referencial. Así, la maquinaria y materiales que se consideran en el proceso de perforación se detallan en el siguiente listado:

- Máquina de perforación: Se emplea una perforadora de superficie de marca Drilltech, modelo D40K; la cual además de realizar perforaciones para pozos de agua, se utiliza en minería para realizar exploración de minerales y además se emplea en perforación geotérmica. Posee integrado un equipo de perforación hidráulico que actúa en conjunto a un compresor de aire que se encuentra montado en la estructura de la máquina.



(a) Perforadora realizando entubación.
Fuente: Comité de APR Huatulame



(b) Vista trasera de la máquina de perforación.

Figura 6.2.1: Perforadora Drilltech D40K.

- Tuberías de perforación: Las tuberías para la rotoperCUSión con martillo de fondo (también llamado *Down the Hole*, DTH) están confeccionadas de aleación superior y en ambos extremos se encuentran con rosca, la cual esta soldada por fricción a la tubería de acero sin costura. El aire comprimido se entrega al martillo por la perforación en la tubería, que simultáneamente transfiere la rotación y presiona la fuerza al martillo rotoperCutor. Para alcanzar la profundidad deseada, a medida que se perfora el suelo, se van enroscando las tuberías unas sobre otras hasta alcanzar la profundidad de diseño del pozo profundo.



Figura 6.2.2: Tubería de perforación.

- Broca o barrena de perforación: Este elemento se sitúa en la punta del martillo percutor, y es utilizado para triturar o cortar la roca del sondaje. La cabeza de la barrena está confeccionada de acero y se posee una corona de dientes de aleación carbono-tungsteno, las cuales pueden afilarse o reemplazarse cuando su vida útil haya acabado (Espinoza, 2010).



Figura 6.2.3: Barrena utilizada para la perforación de pozos profundos de agua.

6.3. Plazos de construcción

Se entiende que la construcción de pozos profundos se divide en diversas etapas que se detallan de manera simplificada a continuación:

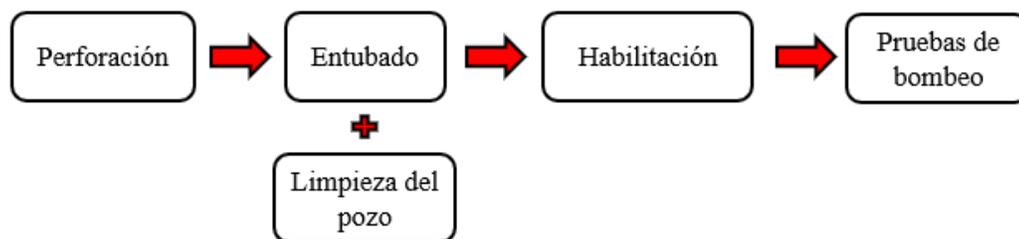


Figura 6.3.1: Etapas de construcción de pozos profundos. Elaboración propia.

En términos conceptuales, se procede a determinar un tiempo referencial para cada una de estas etapas, junto con otros aspectos que se consideran en la construcción, de acuerdo a información recopilada por proveedores de servicios de pozos profundos de agua. Los detalles se evidencian en el siguiente listado.

1. Transporte e instalación del equipo de perforación: Se estima que el transporte de la maquinaria puede tomar un tiempo de entre 1 a 2 días. Junto con ello, la respectiva instalación del equipo y maquinaria empleada se considera en un rango de 1 a 2 días.

2. Perforación: El tiempo de perforación se estima de acuerdo a la profundidad que tenga la obra, donde se proyecta que para efectos del trabajo en terreno y de acuerdo a los requisitos sobre la visión de la jornada laboral la perforación tiene una tasa de avance temporal de 20 a 30 metros perforados por día.
3. Instalación de faenas: Como la perforación produce la extracción de una cantidad considerable de material particulado que posee características finas y gruesas, se debe realizar una faena de elaboración de piscinas que son las encargadas de lubricar las herramientas y permiten la recuperación del agua para realizar la perforación.
4. Entubado: El entubado se estima que se realiza en 2 días.
5. Habilitación: Para la habilitación del pozo se deben realizar muestras del material extraído para efectuar un análisis granulométrico y así se defina el tipo de cribas y filtro de gravilla a utilizar. Luego, se debe realizar un proceso denominado desarrollo, que consiste en un conjunto de operaciones destinadas a extraer el sedimento depositado por la perforación, como pueden ser lodos o roca triturada, para así lograr una productividad óptima del pozo. Por último, se debe efectuar la limpieza del pozo mediante la utilización de hipoclorito de sodio o calcio, que se debe realizar asegurando que los elementos del sistema pozo-bomba se desinfecten a través del contacto directo con el compuesto químico (Espinoza, 2010). Todo este proceso se estima entre 2 a 3 días
6. Prueba de bombeo: Según Espinoza (2010), se debe efectuar un mínimo de 2 pruebas de bombeo. Uno de ellos se denomina prueba de bombeo a caudal o gasto variable, que permite a través de el análisis de curvas de agotamiento comprender el comportamiento futuro del pozo y estimar las capacidades máximas de captación del pozo. Rickmann (2001) menciona que los resultados de esta prueba permiten diseñar las condiciones de explotación de la obra de captación, proyectando en el tiempo la tendencia de los niveles estáticos para los distintos caudales empleados. Con la ayuda de un gráfico en escala semilogarítmica se puede realizar una estimación del comportamiento del pozo en un horizonte de tiempo considerable. Esta prueba tiene una duración entre 12 y 24 horas.

Por otro lado, la prueba de caudal constante permite calcular la transmisividad del acuífero mediante el análisis de diversas ecuaciones de hidráulica de aguas subterránea. De acuerdo a lo señalado por Espinoza (2010), la prueba debiera prolongarse en plazos que van desde un mínimo de 24 horas y hasta un máximo 72 horas.

6.4. Ejemplo de costos estimados de construcción de pozo profundo

Para efectos del diseño no se determinan directamente los costos de las obras y labores ejecutadas en los pozos diseñados en el capítulo de diseño, sin embargo, a modo de ejemplo se detalla en la Figura 6.4.1 el presupuesto de una obra de captación con la respectiva descripción de la instalación de faena, construcción del sondaje, instalación del sistema captante y las pruebas y análisis efectuados en el agua.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio \$	Total \$
Instalación de faena Instalación de faena	gl	1		
Construcción del sondaje Perforación	ml	80		
Sistema captante Proposición del sistema captante	gl	1		
Entubación definitiva ac. D:14", e: 6,35 mm	ml	60		
Cribas acero galvanizado ACP D:14", slot 40	ml	21		
Pared de gravilla seleccionada	ml	75		
Desarrollo	hr	48		
Sello sanitario de hormigón	ml	5		
Pruebas y análisis de agua Grupo de Prueba Q: 120 l/s	Nº	1		
Prueba de Gasto Variable	hr	12		
Prueba de Gasto Constante	hr	24		
Análisis Físico-Químico y Bacteriológico	gl	1		
Plano de Construcción e Informe Final	gl	1		
Paralización en espera de instrucciones	hr	8		

Figura 6.4.1: Ejemplos de costos en obra de construcción de pozo profundo en comuna de Lampa, Región Metropolitana. Fuente: Departamento de riego Región Metropolitana.

Capítulo 7

Conclusiones

En primer lugar, de acuerdo a lo detallado en el informe, y en base al análisis de antecedentes bibliográficos y técnicos, se pudo entender y determinar a grandes rasgos la situación hídrica en la provincia de Limarí, la cual se encuentra afectada por la escasez hídrica producto de eventos prolongados de sequías, lo que se ha traducido en problemáticas para las diversas comunidades rurales, la que según datos del Instituto de Estadísticas, al año 2019 representaba un total de 56.095 habitantes, y representaba un porcentaje cercano al 33 % de personas en la provincia. A través del tiempo, esta población ha visto como los eventos de precipitación han disminuido y en el último periodo esta situación se ha agudizado por efecto de la gran megasequía que afecta a la macrozona norte de Chile.

Lo anterior se ve reflejado en la componente hidrológica de la Cuenca del Limarí y sus respectivas subcuencas, en las que se evidenciaron variaciones en las precipitaciones medias mensuales al comparar el periodo de tiempo 1992-2009 con el periodo 2010-2020, en donde se logró determinar que existen disminuciones cercanas al 70 %, que se encuentran marcadas en los meses de invierno. Además, se determinó que en las subcuencas del Río Limarí, Río Hurtado y Río Grande se han desarrollado variaciones en la estacionalidad de precipitaciones, lo que puede ser un efecto ligado al cambio climático y al aumento de la temperatura durante las estaciones del año.

Sobre la componente de agua subterránea, se estudió el estado actual en pozos de observación de la DGA, los cuales también han tenido variaciones negativas producto de los fenómenos climáticos, donde se observan comportamientos que tienen tendencias de descenso en los niveles estáticos. Así, de los 36 pozos de observación estudiados en la cuenca del Río Limarí, 26 de ellos, es decir un 72 % del total, presentaron una condición de descenso que fluctúa entre los 2 a 5 metros en promedio, llegando incluso en algunos casos a disminuciones de 10 y 25 metros (Asentamiento Nueva Aurora y Fundo Cogotí), comparando el año 1992 con el año 2021.

La tendencia de descenso en los niveles estáticos de los pozos representa una evidente consecuencia de la disminución de precipitaciones en la cuenca, que es una de las principales responsables de generar la recarga efectiva del acuífero. Otra justificación del fenómeno descrito en los pozos es la menor recarga por interferencia río-acuífero, junto con aspectos relacionados a la sobredemanda o sobreotorgamiento de Derechos de Aprovechamiento de Agua, que se producen por una gestión ineficiente por parte de los organismos responsables como la DGA, la cual a través de usos previsibles de agua ha generado falencias desde el punto de vista de las aguas subterráneas, produciendo un deterioro en la sustentabilidad del recurso hídrico, que no beneficia a las comuni-

dades rurales. Sobre los DAA, se debiesen generar instancias de recopilación de información sobre usuarios o catastros de usos para evitar la concentración de derechos en zonas donde los acuíferos se encuentren sobredimensionados o sobreexplotados, entendiendo que el comportamiento de los embalses subterráneos presentan distintas características, asumiendo la heterogeneidad del territorio.

Para poder contrarrestar los embates de sequía, surge dentro del análisis la gestión realizada por las Cooperativas o Comités de Agua Potable Rural, las cuales se entienden como organizaciones fundamentales dentro de la comunidad rural, ya que han sido las encargadas de cumplir con los objetivos planteados en el Programa de APR y parte de los objetivos de la vigente Ley N° 20.998 de SSR, de los cuales se contempla la dotación de agua potable según calidad, cantidad y continuidad. Por otra parte, se comprendió que el desarrollo de las comunidades rurales debe ir en perspectiva con un fuerte compromiso no tan sólo de la gente que habita el territorio rural, sino que también de municipalidades y gobiernos regionales, ya que los Sistemas de APR necesitan el apoyo y compromiso de las autoridades, las cuales a través de asistencias o programas de financiamiento puedan fortalecer de manera transversal la operación y administración de los servicios sanitarios en su territorio.

Ahora, si bien lo detallado hasta ahora da a entender que las variables que más impacto generan en la situación del recurso hídrico son las vinculadas al cambio climático y escasez, se pudo constatar mediante el análisis de información y datos sobre sustentabilidad de asentamientos rurales, que existen otras variables que se pueden ponderar dentro de las condiciones de los sistemas, de las cuales se puede destacar: existencia de APRs sin DAA, aumentos de demanda por crecimiento demográfico, la utilización de camiones aljibe para el abastecimiento, interferencia de captaciones con cauces superficiales. En base a los antecedentes estudiados, se logró comprender que la situación de los APRs en la provincia es compleja, ya que en muchos casos la presencia de estas variables, gatilladas además con la situación hídrica, generan condiciones críticas en la sustentabilidad local.

La toma de decisiones por parte de las autoridades, que en este caso están representadas por la DOH y la Subdirección de Servicios Sanitarios, debe estar enfocada en buscar el beneficio de las comunidades de agua potable mediante el repaso exhaustivo de los múltiples factores involucrados en la vulnerabilidad y amenaza de los asentamientos rurales, para así asegurar un correcto ordenamiento a nivel de gestión y de carácter administrativo, que logre avanzar hacia un desarrollo sustentable de los Sistemas de APR.

De esta manera, el diseño a nivel de ingeniería conceptual se fundamentó en la generación del abastecimiento del recurso hídrico subterráneo para aquellas comunidades que presentaron condiciones desfavorables con respecto a otras, las que se catalogaron en función al estudio de *Sustentabilidad de Asentamientos Rurales* de la DGA, en el cual se definen los sistemas de acuerdo a índices de riesgo leve, moderado y crítico. Sin embargo, esto se establece sólo como un criterio simple para acotar las soluciones desde la visión conceptual, lo que no quiere decir que las condiciones en la mayoría de sistemas no sea adversa, debido al problema de sequía que se vive en la provincia de Limarí.

La determinación de las zonas aptas para la ubicación de nuevos puntos de captación se realizó mediante la utilización de resultados obtenidos en el proyecto CEAZA-FONDEF sobre aguas

subterráneas en la provincia de Limarí, el cual a través de la modelación hidrogeológica sumado a otros métodos de análisis y cálculo, permitió establecer las zonas donde la realización de captaciones sea favorable considerando el índice de potencial de extracción, que se asumió como la variable fundamental para la definición de las zonas. Así, en base al estudio del proyecto se determinaron las siguientes zonas para realizar los diseños, con sus respectivas características:

- Sector Quebrada del Ingenio:
 - Se localizó el punto de captación a aproximadamente 4 kilómetros de la ciudad de Ovalle.
 - Los sistemas de APR Lagunilla, Sol del Pacifico y Villorio El Talhuen, son los que se beneficiarían con la construcción del pozo profundo.
 - El pozo tendría un caudal de extracción $Q_p = 13,4$ l/s.
 - Alrededor de 2.200 habitantes podrían ser beneficiados con la captación, mediante la incorporación de 710 arranques.
- Sector Río Grande:
 - Se localizó el punto de captación a aproximadamente 1 kilómetro del centro de la comuna de Monte Patria.
 - Los sistemas de APR Flor del Valle, La Paloma y Juntas Dos Ríos, son los que se beneficiarían con la construcción del pozo profundo.
 - El pozo tendría un caudal de extracción $Q_p = 22,4$ l/s.
 - Alrededor de 3.600 habitantes podrían ser beneficiados con la captación, mediante la incorporación de 1.162 arranques.
- Sector Río Guatulame:
 - Se localizó el punto de captación a aproximadamente 800 metros la localidad de Chañaral Alto.
 - Los sistemas de APR San Marcos, Los Tapia y Los Morales, son los que se beneficiarían con la construcción del pozo profundo.
 - El pozo tendría un caudal de extracción $Q_p = 17,8$ l/s.
 - Alrededor de 2.900 habitantes podrían ser beneficiados con la captación, mediante la incorporación de 936 arranques.

En cada uno de los sectores mencionados se logró realizar el diseño a nivel de ingeniería conceptual de los pozos profundos con la respectiva red de conducción, mediante el desarrollo de metodología y criterios que se adecuaron a lo establecido en la normativa nacional y antecedentes recopilados. No se descarta la incorporación de nuevas redes en los puntos de almacenamiento, las que pueden brindar de recurso hídrico a otras localidades que así lo necesiten, para poder aumentar la red de habitantes beneficiados y también asegurar el abastecimiento de agua a la amplia cantidad de sistemas en la provincia.

Se comprende con esto la relevancia que tienen las aguas subterráneas en el Limarí, la cual representa una fuente primordial para prácticamente la mayoría de Sistemas de APR, entendiendo con esto que las obras de captación se han visto como una de las soluciones mas viables para el abastecimiento de la población rural. Ahora, si bien este estudio permite evaluar la solución de la

problemática de situación hídrica desfavorable en la provincia de Limarí a través de la construcción de pozos profundos, se entiende que es una dentro de la variedad de opciones que se pueden ejecutar, dentro de las cuales también destacan: la desalinización de agua marina; la profundización de pozos existentes que se encuentren colgados o con capas freáticas disminuidas; entre otras.

Por último, si bien el objetivo de análisis del trabajo fue el diseño conceptual de pozos profundos, se pone énfasis en mencionar que sólo es una representación simplificada del mundo real, el cual, para efectos de una obra de esta envergadura debe ser mayormente tratada a través de la ingeniería básica y de detalle en el proyecto, donde se efectúen análisis de suelo, granulometría, topografía, evaluaciones ambientales, modelamiento hidrogeológico, perfiles estratigráficos, estudio de naturaleza de rellenos, prospección, etc. Lo anterior se considera ya que se comprende que una obra de este tipo debe ser tratada de manera robusta y rigurosa en donde la mayor cantidad de antecedentes o estudios preliminares pueden ser cruciales para que las localidades rurales y su comunidad, que muchas veces es invisible en la sociedad, tengan una condición que sea beneficiosa para su cotidianidad en los tiempos de sequía que tienen que enfrentar día a día.

Bibliografía

Alegría, M.A. (1998). *Guía para construir y mantener pozos profundos*. Revista Vertientes, N° 3, pp. 9.

Arumí, J.L. y Oyarzún L. (2007). *Las Aguas Subterráneas en Chile*. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 37-45.

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 BCN: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/28611/1/Informe_Gestion_Aguas_Subterranas.pdf

Banco Mundial (2011). *Diagnóstico de la gestión del agua en Chile*. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Región para América Latina y el Caribe.

Bear, J. (2007). *Hydraulics of Groundwater*. Dover Publications.

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.

CAZALAC (2016). *Investigación de Soluciones Innovadoras para el Abastecimiento de Agua. Capítulo N° 2: Diagnóstico de los Comités y Cooperativas de Agua Potable Rural de la Región de Coquimbo*. Elaborado por: Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC).

CEAZA (2022). *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*. Proyecto Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF), desarrollado por el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA).

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega.

CR2 (2015). *Informe a la Nación La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2.

D.F.L. N° 1.122 (1981). *Código de Aguas (Ley N° 1.122, Ministerio de Justicia), Decreto*

Nº 1.220 Ministerio de Obras Públicas.

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.

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.

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.

DGA (2010). *Propuesta de Utilización de Biocriterios para la Implementación y Monitoreo de la norma secundaria de Calidad Ambiental, Resultados Cuencas de los Ríos Limarí y Mataquito*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Realizado por: Centro Nacional del Medio Ambiente.

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.

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.

DGA (2015). *Determinación de la disponibilidad de aguas subterráneas en el valle del Río Aconcagua*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

DGA (2016). *Atlas del agua en Chile*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

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.

DGA (2017). *Inventario Nacional de Acuíferos*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación.

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.

DGA (2020a). *Diagnostico 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.

DGA (2020b). *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).

DGA (2020c). *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.

DGA (2022). *Mapoteca DGA*.

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.

Donoso, G., Calderón, C. y Silva, M. (2015). *Informe Final de Evaluación: Infraestructura Hidráulica de Agua Potable Rural (APR)*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas.

ENRH (2013). *Chile cuida su Agua. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025*. Gobierno de Chile, Santiago.

Escenarios Hídricos 2030. (2019). *Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile*. Fundación Chile, Chile.

Espinoza, C. (2010). *Apuntes de curso: Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento*. Departamento de Ingeniería Civil, U. Chile.

Fundación Amulen (2019). *Radiografía del agua rural en Chile: visualización de un problema oculto*. Santiago, Chile.

Fundación Newenko (2019). *Escasez hídrica en Chile: Desafíos para el consumo humano y perspectivas en modelos comparados*. Santiago, Chile.

IMTA (2002). *Manual para la elaboración y revisión de proyectos ejecutivos de sistemas de riego parcelario*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje, México.

INE (2018). *Síntesis de resultados Censo 2017*.

INE (2019). *Análisis Censo de Población y Vivienda 2017: Región de Coquimbo*.

INN (1998). *Norma chilena 691 Of. 1998 Agua potable - Conducción, regulación y distribución*.

INN (2000). *Norma chilena 777/2 Of. 2000 Agua potable - Fuentes de abastecimiento y obras de captación - Parte 2: Captación de aguas subterráneas*.

INN (2004). *Norma chilena 398/1 Of. 2004 Tuberías y accesorios de polietileno (PE) para agua potable - Requisitos - Parte 1: Tuberías.*

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.

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

MMA (2017). *Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022.* División de Cambio Climático, Ministerio del Medio Ambiente.

MOP (2018). *Ley N° 20.988: Regulación de Servicios Sanitarios Rurales.*

MOP (2019a). *Manual de proyectos de agua potable rural.* Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas, Chile.

MOP (2019b). *Tríptico historia de APR.* Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas.

MOP (2020). *Mesa Nacional del Agua: Primer Informe.* Obtenido de Ministerio de Obras Públicas: <https://www.mop.cl/MesaAgua/index.html>

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

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2019). *Panorama de la Agricultura Chilena.* Obtenido de Biblioteca Digital ODEPA: <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/70246>.

Parra, B. (2022). *Procesamiento y visualización web de datos hidrogeológicos en la Cuenca del Río Limarí, Región de Coquimbo, Chile.* Memoria para optar al Título de Geóloga, Universidad de Concepción.

Peña, H. (2019). *Gestión Sustentable del Agua Subterránea en Chile: Tensión entre normativa y práctica.*

PNDR (2020). *Política Nacional de Desarrollo Rural.* Obtenido de Comisión Interministerial de Ciudad, Vivienda y Territorio COMICIVYT: <https://www.masvidarural.gob.cl/politica-nacional-de-desarrollo-rural-3/>

PNRH (2015). *Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015.* Delegación Presiden-

cial para los Recursos Hídricos. Obtenido de Ministerio del Interior y Seguridad Pública: https://www.interior.gob.cl/media/2015/04/recursos_hidricos.pdf.

Reckmann, O. (2001). *Pozos Profundos*. Comisión Nacional de Riego, Ministerio de Agricultura.

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.

Sahuquillo, A. (2009). *La Importancia de las Aguas Subterráneas*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.

Sanchez, F. (2022). *Hidráulica de captaciones: Fundamentos*. Disponible en: <https://hidrologia.usal.es/practicassubt.htm>

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, N° 198 (LC/TS.2020/134)*. Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Schmidt, G. y C. Benítez-Sanz (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

Schulte, P. (2014): *Defining Water Scarcity, Water Stress, and Water Risk: It's Not Just Semantics*. Pacific Institute. Disponible en: <http://bcn.cl/246kq>.

SIT Rural (julio 2022). *Informes comunales sobre Recursos Naturales de: Combarbalá, Monte Patria, Ovalle, Punitaqui y Río Hurtado*. Obtenido de Sistema de Información Territorial del Centro de Información de Recursos Naturales: <https://www.sitrural.cl/>

Tarbut, E.J. y Lutgens, F.K. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*. 8ª Ed. Pearson Prentice Hall.

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).

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*.

Villalón, G., y Vera, S. (2012). *Panorama demográfico en Chile contemporáneo: desafíos para lasociedad del siglo XXI*. Revista Anales, 7(3), 35-63.

Villaroel, C. (2012). *Asociaciones Comunitarias de Agua Potable Rural en Chile: Diag-*

nosticos y Desafíos. Santiago, Chile.

Water Science School (2018). *Groundwater Wells*. Obtenido de United States Geological Survey (USGS): <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/groundwater-wells#overview> (Agosto 2022)

Wilks, D. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Second Edition.