

**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO
DEL VALLE DE PAN DE AZÚCAR,
REGIÓN DE COQUIMBO**

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

CON POTENCIAL CONSULTORES SPA

S.I.T. N° 462

Santiago, Diciembre 2020

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Industrial Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas

Ingeniero Comercial Sr. Oscar Cristi Marfil

Jefe de División Estudios y Planificación

Ingeniero Civil Sr. Mauricio Lorca Miranda

Inspector Fiscal

Geólogo Sr. Marcelo Aliaga Alvarado

Inspector Fiscal Subrogante

Ingeniero Civil Sr. Patricio Luengo Ávalos

Ingeniero Agrónomo Sr. Iván Pizarro Barraza

CON POTENCIAL CONSULTORES SPA

Jefe y coordinador de Estudio

Ingeniero Civil Sr. Alejandro Arenas Herrera

Profesionales

Ingeniero Civil Sr. Juan Torres Cubillos

Ingeniero Civil Sr. Marco Matamala Castro

Equipo de Apoyo

Ingeniero Civil Sr. Gustavo Romero Sepúlveda

Geógrafa Sra. Soledad Huerta Miranda

Supervisor en Terreno Sr. Roberto Sánchez

Topógrafo Sr. Rodrigo Arenas

INDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	OBJETIVO GENERAL	3
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
3	CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO	6
3.1	CONTEXTO REGIONAL.....	6
3.1.1	<i>Clima</i>	6
3.1.2	<i>Relieve</i>	6
3.1.3	<i>Hidrografía</i>	9
3.1.4	<i>Geomorfología</i>	9
3.2	CONTEXTO LOCAL (ACUÍFERO EL CULEBRÓN).....	12
4	METODOLOGÍA DE TRABAJO	15
4.1	REVISIÓN DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.....	15
4.2	CONSTRUCCIÓN DE PIEZÓMETRO	17
4.2.1	<i>Perforación diamantina</i>	17
4.2.2	<i>Ensayos de permeabilidad Lefranc en régimen variable</i>	20
4.3	CATASTRO DE POZOS	21
4.4	GEORREFERENCIACIÓN DEL SONDAJE DGA-INIA.....	22
5	RESULTADOS	24
5.1	CONSTRUCCIÓN PIEZÓMETRO DGA-INIA	24
5.1.1	<i>Aspectos generales</i>	24
5.1.2	<i>Descripción estratigráfica</i>	27
5.1.3	<i>Análisis de Calidad Química de aguas</i>	29
5.1.4	<i>Ensayos hidráulicos</i>	33
5.1.5	<i>Instalación de letrero</i>	35
5.2	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	36
5.2.1	<i>Análisis de Información Estadística Disponible</i>	38
5.2.2	<i>Precipitación Anual</i>	43
5.2.3	<i>Caudal Canal Bellavista</i>	44
5.2.4	<i>Recargas al sistema subterráneo</i>	47
5.3	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	48

5.3.1	<i>Caracterización geológica</i>	48
5.3.2	<i>Antecedentes Geofísicos</i>	51
5.3.3	<i>Unidades Hidrogeológicas</i>	57
5.3.4	<i>Delimitación de Unidades Acuíferas</i>	58
5.3.5	<i>Derechos de aguas</i>	60
5.3.6	<i>Parámetros hidráulicos</i>	63
5.3.7	<i>Calidad de aguas</i>	70
5.3.8	<i>Piezometría</i>	76
5.3.9	<i>Balace hídrico</i>	84
6	BRECHAS DE LA INFORMACIÓN	86
6.1	RED DE MONITOREO E INFRAESTRUCTURA.....	86
6.2	ESTADO DE LA CALIDAD DE AGUA.....	88
6.3	EXTRACCIONES DE AGUA (CAUDALES EFECTIVOS DE EXTRACCIÓN).....	88
6.4	VALIDACIÓN DE LOS ANTECEDENTES GEOFÍSICOS.....	89
7	CAPACITACIÓN A FUNCIONARIOS DGA	91
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
8.1	CONCLUSIONES.....	92
8.2	RECOMENDACIONES.....	92
9	BIBLIOGRAFÍA	94

ANEXOS

Anexo A: Fichas de Resumen

Anexo B: Antecedentes y Resultados

1. Hidrología
2. Georreferenciación Pozo DGA-INIA
3. Estratigrafía
4. Hidroquímica
5. Ensayos hidráulicos
6. Letrero
7. Derechos de Agua
8. Monitoreo de Pozos DGA

Anexo C: Propuesta de monitoreo

Anexo D: Capacitación funcionarios DGA

Anexo E: Proyecto SIG

Anexo F: Presentación Final

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3-1: CUENCAS VECINAS AL ÁREA DE ESTUDIO.....	8
FIGURA 3-2: MAPA GEOMORFOLÓGICO	11
FIGURA 3-3: SECTOR HIDROGEOLOGICO DE APROVECHAMIENTO COMÚN ACUÍFERO CULEBRÓN	13
FIGURA 3-4: UBICACIÓN CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN RIEGO Y AGRICULTURA SUSTENTABLE INIA	14
FIGURA 4-1: MONITOREO DE PARÁMETROS EN LÍNEA DE ESTACIÓN PAN DE AZÚCAR.....	16
FIGURA 4-2: RECUPERACIÓN DE TESTIGOS INALTERADOS MEDIANTE PERFORACIÓN DIAMANTINA, SONDAJE DGA-INIA-2020	18
FIGURA 4-3: TUBERÍA INSTALADA RANURADA CON LÁSER DE FÁBRICA SLOT 40	19
FIGURA 4-4: POSICIONAMIENTO DE MÁQUINA DE SONDAJE	19
FIGURA 4-5: ESQUEMA ENSAYO LEFRANC ENSAYO CARGA VARIABLE.....	20
FIGURA 4-6: POZÓMETRO.....	21
FIGURA 4-7: PROCESO EN TERRENO GEORREFERENCIACIÓN DE SONDAJE DGA-INIA	23
FIGURA 5-1: UBICACIÓN DEL SONDAJE DGA-INIA	25
FIGURA 5-2: SONDAJE DGA-INIA 2020 FINALIZADO	26
FIGURA 5-3: DIAGRAMA HABILITACIÓN DEL SONDAJE DGA-INIA	26
FIGURA 5-4: PERFIL ESTRATIGRÁFICO SONDAJE DGA-INIA.....	28
FIGURA 5-5: DIAGRAMA DE PIPER	33
FIGURA 5-6: RESULTADOS ENSAYO LEFRANC	34
FIGURA 5-7: LETRERO DEL POZO DE OBSERVACIÓN DGA-INIA CONSTRUIDO EN PREDIO INIA.....	35
FIGURA 5-8: ACUÍFERO RELLENO – CULEBRÓN Y CUENCA APORTANTE.....	37
FIGURA 5-9: UBICACIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	39
FIGURA 5-10: PRECIPITACIONES ANUALES ESTACIONES LA SERENA Y PAN DE AZÚCAR.....	40
FIGURA 5-11: VARIABLES CLIMÁTICAS MEDIAS MENSUALES HISTÓRICAS POR ESTACIÓN	41
FIGURA 5-12: CURVA HIPSOMÉTRICA	42
FIGURA 5-13: CAUDAL MEDIO ANUAL REGISTRADO POR LA ESTACIÓN “ESTERO EL CULEBRÓN EN EL SIFÓN”	42
FIGURA 5-14: CAUDALES MEDIOS MENSUALES CANAL BELLAVISTA	45
FIGURA 5-15: CANAL BELLAVISTA Y SU EXTENSIÓN DENTRO DEL ACUÍFERO “RELLENO-CULEBRÓN”	46
FIGURA 5-16: MAPA GEOLÓGICO	50
FIGURA 5-17: PERFILES E73 TEM A 1 KM AL NORTE DEL SONDAJE DGA-INIA	51
FIGURA 5-18: PERFILES GEOFÍSICOS REALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	53
FIGURA 5-19: UBICACIÓN PERFILES TEM	54
FIGURA 5-20: PERFIL TEM L2.....	55
FIGURA 5-21: PERFIL TEM L2 INTERPRETADO.....	56
FIGURA 5-22: FLUJOS ENTRE SUB-SECTORES ACUÍFEROS	59
FIGURA 5-23: COMPARACIÓN Y UBICACIÓN DERECHOS SUBTERRÁNEOS.....	62

FIGURA 5-24: TRANSMISIVIDADES ACUÍFERO PAN DE AZÚCAR	64
FIGURA 5-25: UBICACIÓN DE POZOS CERCANOS A SONDAJE DGA-INIA CON INFORMACIÓN LITOLÓGICA.....	65
FIGURA 5-26: PERFILES ESTRATIGRÁFICOS CERCANOS AL PUNTO DE PERFORACIÓN SONDAJE DGA-INIA (PERFIL 1).....	66
FIGURA 5-27: PERFILES ESTRATIGRÁFICOS CERCANOS AL PUNTO DE PERFORACIÓN SONDAJE DGA-INIA (PERFIL 2).....	67
FIGURA 5-28: RELACIÓN PARA ESTIMAR SALINIDAD CON LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y EL RAS.....	72
FIGURA 5-29: UBICACIÓN ESTACIONES DE MONITOREO CALIDAD QUÍMICA	73
FIGURA 5-30: DIAGRAMA DE PIPER DE MUESTREOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	75
FIGURA 5-31: PANORÁMICA P6 (UBICADO EN TERRENO DE INIA)	76
FIGURA 5-32: MEDICIÓN DE NIVEL FREÁTICO P6 (UBICADO EN TERRENO DE INIA)	77
FIGURA 5-33: UBICACIÓN DE LOS POZOS CATASTRADOS.....	79
FIGURA 5-34: MAPA VECTORES DE FLUJO SUBTERRÁNEO 2020	81
FIGURA 5-35: MAPA VECTORES DE FLUJO SUBTERRÁNEO 2004	82
FIGURA 5-36: EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES FREÁTICOS EN LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS	83
FIGURA 6-1: RED DE MONITOREO PROPUESTA	87

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4-1: ESTACIONES METEOROLÓGICAS CERCANAS AL ÁREA DE ESTUDIO.....	15
TABLA 4-2: ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA CERCANAS AL ÁREA DE ESTUDIO	16
TABLA 5-1: UBICACIÓN DE SONDAJE DGA-INIA 2020	24
TABLA 5-2: RESULTADO DE CALIDAD QUÍMICA EN POZO CERCANO A SONDAJE DGA-INIA	29
TABLA 5-3: ANALITOS UTILIZADO EN EL CÁLCULO DEL BALANCE IÓNICO Y RESULTADOS EN MEQ/L.....	32
TABLA 5-4: DATOS PARA DIAGRAMA DE PIPER.....	33
TABLA 5-5: RESULTADOS ENSAYOS LEFRANC.....	34
TABLA 5-6: ESTACIONES DE MEDICIÓN METEOROLÓGICAS EN EL SECTOR DE ESTUDIO	38
TABLA 5-7: CAUDALES DE AFORO CANAL BELLAVISTA	44
TABLA 5-8: CAUDALES MEDIOS ANUALES PASANTES POR EL CANAL BELLAVISTA PARA EL CAUDAL MEDIO ANUAL CALCULADO AL INICIO DEL CANAL.....	47
TABLA 5-9: DERECHOS SUBTERRÁNEOS CUENCA COSTERA ENTRE ELQUI Y LIMARÍ.....	60
TABLA 5-10: RESUMEN PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS EN POCOS CERCANOS	69
TABLA 5-11: CALIDADES QUÍMICAS EN POZOS CERCANOS AL SONDAJE DGA-INIA	70
TABLA 5-12: RESULTADO DE ANÁLISIS QUÍMICO DE AGUA SUBTERRÁNEA	74
TABLA 5-13: NIVELES PIEZOMÉTRICOS MEDIDOS EN TERRENO	77
TABLA 5-14: RESUMEN POZOS DE MONITOREO DE NIVELES DGA	80
TABLA 5-15: EVOLUCIÓN BALANCE HÍDRICO ÁREA DE ESTUDIO	84

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Actualmente Chile, en específico la zona central y norte del país se ha visto seriamente golpeadas por la extensa sequía que ha provocado un preocupante déficit hídrico. El impacto del cambio climático en Chile ha presentado un *"déficit promedio de precipitaciones de 20 a 30% durante los últimos 10 años, repercutiendo principalmente en 138 comunas entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos. Este fenómeno se debe a la prolongada extensión temporal y espacial producto del descenso de lluvias y la disminución de los caudales en los ríos"*¹. Lo anteriormente indicado también queda ratificado en el reporte de Garreaud et al. (2019). Además, los factores antrópicos, como la sobre explotación de los recursos, y la mala gestión hídrica han favorecido a una pérdida paulatina de los caudales de los ríos y a un descenso sostenido de los niveles freáticos de los acuíferos.

Por lo anteriormente indicado, este Estudio está enfocado como un insumo para el proyecto "GIRagua" que como un proyecto de colaboración internacional pactado entre el Ministerio de Obras Públicas chileno y el Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente Neerlandés mediante una carta de intenciones, firmada en el 2016, como forma de promover el uso racional del agua y los conceptos de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y de Gobernanza del Agua; paradigmas claves para enfrentar el actual contexto de sobrecarga de acuíferos, uso intensivo del agua y suscitar la participación de la ciudadanía en el diseño de políticas públicas hídricas (Carrasco, 2019). Uno de los objetivos del proyecto GIRagua es la materialización de un piloto de recarga artificial de acuíferos en el Valle de Pan de Azúcar para lo cual, uno de los principales suministros de información para el buen desarrollo de proyectos de recarga, es contar la caracterización detallada del perfil estratigráfico de la zona a recargar.

En términos territoriales, este Estudio se enmarca en la localidad del Valle de Pan de azúcar, el cual se ubica en la comuna de Coquimbo, perteneciente a la región de Coquimbo, su principal actividad es la industria agrícola. En la zona se reconoce una importante explotación a los recursos hídricos subterráneos, lo que llevó el año 2003 a la DGA, declarar área restringida para la inscripción de nuevos derechos subterráneos en el

¹ Fuente: <https://www.uchile.cl/noticias/167355/academicas-uch-alertan-sobre-los-problemas-de-escasez-hidrica-y-sequia>

Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) El Culebrón-Lagunillas. Por lo anterior nace la necesidad de seguir ampliando el conocimiento del sector, tanto sus áreas de recarga y descarga, el estado de su red de monitoreo hidrométrico, caracterización del acuífero, etc.

Si bien el Estado hace esfuerzos importantes para mejorar la infraestructura hidrometeorológica en las cuencas principales, se estima que aún queda bastante por hacer, por ejemplo, en la caracterización adecuada de los acuíferos, para la determinación real del volumen almacenado y con ello disponer de la información que permita generar los instrumentos técnicos-legales adecuados para su mejor gestión. Esto facilitaría una explotación sustentable de los acuíferos, mejoramiento en las técnicas de riego, y con ello propiciar alternativas de recarga artificial de acuíferos.

Una buena manera de reconocer y caracterizar la estratigrafía del acuífero, son los ensayos geofísicos calibrados mediante descripción litológica proveniente de sondajes realizados en diamantina, puesto que permite una recuperación inalterada de testigos hasta el contacto con el basamento rocoso, lo que implica un reconocimiento detallado de todo el perfil litológico atravesado.

Adicionalmente la instrumentación con registro continuo del monitoreo de variaciones en el nivel freático, y de las variables hidrogeoquímicas, son de relevancia para determinar la calidad del agua en el del Valle de Pan de Azúcar, que podría tener aportes con intrusión salina en determinados períodos.

Este análisis es fundamental, dado que se han presentado descensos sostenidos en el tiempo de los niveles freáticos, y por otra parte según antecedentes disponibles una fracción del agua almacenada es salina (Cárdenas et al., 2018) debido a la ubicación geográfica del acuífero y la explotación sostenida en el tiempo deprimiendo los niveles freáticos, lo que hace más complejo el escenario hídrico en el mediano a largo plazo. Cabe mencionar que una parte importante de los derechos asignados en la cuenca son para consumo de agua potable, por lo que eventualmente pondría en riesgo el uso prioritario de las aguas; consumo humano de las poblaciones en el área de estudio.

El presente Estudio, viene a complementar el levantamiento de información que se ha realizado en estudios anteriores, presentando los resultados de la construcción del nuevo sondaje DGA-INIA, el cual se realizó mediante el método de perforación en diamantina con recuperación inalterada de las muestras de materiales, lo que permitió, por una parte, realizar una descripción litológica detallada de la columna estratigráfica, y por otra parte recalibrar puntualmente la interpretación geofísica precedente en el sector de estudio.

1.2 Objetivo general

Generar nueva información sobre las características hidrogeológicas del acuífero de Pan de Azúcar, especialmente en cuanto a la estratigrafía, la litología, nivel estático, y las características químicas de los sedimentos y el agua subterránea por medio de la perforación y habilitación de un piezómetro, a fin de que la DGA pueda estudiar estrategias de gestión del recurso hídrico como lo es la recarga artificial.

1.3 Objetivos específicos

Como objetivos específicos del Estudio se identifican los siguientes:

- a) Recopilación y análisis de antecedentes.
- b) Construir un piezómetro habilitado para la instalación de sensores de monitoreo.
- c) Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
- d) Descripción litológica, de niveles e identificación del nivel estático.
- e) Detectar brechas de información que impliquen realizar actividades en terreno (geofísica, monitoreo, etc.).
- f) Análisis de la calidad de aguas.
- g) Capacitación a funcionarios DGA.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La recopilación de antecedentes incluyó documentos provenientes tanto de organismos públicos como privados, tales como DGA, SERNAGEOMIN y la CNR, entre otras instituciones vinculadas al ámbito hídrico. Esta recopilación se enfocó en diagnosticar las propiedades hidrogeológicas de la zona de estudio incluyendo de esta manera, aspectos estratigráficos, geofísicos, geológicos, pruebas de bombeo, entre otros.

Contempla la recopilación, investigación, análisis y comprensión de toda la información a la fecha disponible referida al sistema hidrogeológico del sector en estudio, reflejada, fundamentalmente, en los siguientes parámetros:

- ✓ Información geofísica / geológica / geotécnica.
- ✓ Información hidrológica / hidrogeológica.
- ✓ Información geomorfológica.
- ✓ Situación de derechos de agua.
- ✓ Revisión y análisis de Registros niveles de Pozos (Niveles estáticos reportados).
- ✓ Revisión informes sondajes y estratigrafías anteriores disponibles.

La documentación estudiada corresponde a los estudios, mapas, expedientes, datos y estadísticas existentes que puedan ser de utilidad para la caracterización de los parámetros mencionados de la zona de estudio y planificación y desarrollo del estudio. Para dichos efectos, se considerarán todos los antecedentes emitidos por los servicios gubernamentales relacionados y universidades u otras entidades competentes.

El siguiente listado muestra las fuentes de documentación que fueron estudiados, cuyos resúmenes pueden consultarse en el **Anexo A - Fichas Resumen**:

- [1] Dirección General de Aguas (DGA), 2019. Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Elqui (SIT N° 463). Realizado por UTP Hídrica-Eridanus.
- [2] Dirección General de Aguas (DGA), 2019. Levantamiento y Análisis de Información Geofísica en el Valle de Pan de Azúcar, Región de Coquimbo (SIT N° 443). Realizado por GEODATOS SAIC.
- [3] René Garraeud, Juan P. Boissier, Roberto Rondanelli, Aldo Montecinos, Héctor H. Sepúlveda, y Daniel Veloso-Águila, 2019. International Journal of Climatology. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective
- [4] Pablo Carrasco, 2019. Latin Americas Journal of Trade Policy. Proyecto "GIRAgua": síntesis de la cooperación internacional

-
- [5] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 2019. Seguimiento del perfil salino del acuífero El Culebrón en tiempo real. Boletín INIA N° 394. Ministerio de Agricultura, INIA, La Serena, Chile. Realizado por Gustavo Cárdenas-Castillero, Francisco Meza Álvarez y Viviana Andaur Pavez.
- [6] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 2017. Implementación de la sonda de salinidad en aguas subterráneas en el acuífero El Culebrón, Pan de Azúcar. Ministerio de Agricultura, INIA, La Serena, Chile. Realizado por Viviana Andaur Pavez.
- [7] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), 2015. Estudio geofísico e hidrogeológico en la zona baja de la cuenca del río Elqui y en la zona de Pan de Azúcar. Realizado por GCF Ingenieros Ltda.
- [8] Comisión Nacional de Riego (CNR), 2015. Mejoramiento Canales Bellavista, Villalón y Buzeta: Canal Bellavista. Realizado por Arcadis.
- [9] Corporación Regional de Desarrollo Productivo de Coquimbo (CRDP), 2015. Estudio de modelos de gestión de recursos hídricos superficiales y subterráneos, para las cuencas de las provincias de Elqui, Limarí y Choapa. Realizado por RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda.
- [10] Dirección General de Aguas (DGA), 2014. Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional, SIT N° 341. Realizado por GCF Ingenieros Ltda.
- [11] Universidad de Chile, 2009. Análisis de embalse subterráneo: aplicación en acuífero subyacente al Río Elqui, IV Región de Coquimbo. Universidad de Chile, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Christian Romero.
- [12] Dirección General de Aguas (DGA), 2004a. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivo de Calidad: Cuenca del Río Elqui y Limarí.
- [13] Dirección General de Aguas (DGA), 2004b. Aplicación de la modelación hidrogeológico valle Pan de Azúcar S.D.T. N° 176. Realizado por División de Estudios y Planificación, DGA-MOP.
- [14] Dirección General de Aguas (DGA), 2003. Minuta Técnica DARH N°42. Declaración Área de Restricción Culebrón-Lagunillas Provincia de Elqui, IV Región.
- [15] Dirección General de Aguas (DGA), 2003. Resolución DGA N° 672. Declara Área de Restricción Culebrón-Lagunillas Provincia de Elqui, IV Región.
- [16] Dirección General de Aguas (DGA), 1984. Balance Hidrológico Nacional. Regiones III y IV. Realizado por IPLA Ltda.

3 CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO

3.1 Contexto regional

La región de Coquimbo tiene una superficie de 40.579 km², equivalentes al 5,37 % del territorio nacional. Según el Censo 2017 la población alcanzaba los 757.586 habitantes con una densidad de 46,23 hab/km². Cuenta con tres provincias y 15 comunas, cuya capital regional es la ciudad de La Serena².

3.1.1 Clima

La región de Coquimbo presenta diversos climas como el estepárico costero o nuboso, de estepa cálido y templado frío de altura. Es una región de transición ya que se encuentra entre la zona desértica y templada mediterránea. A lo largo de toda la costa se presenta el clima de tipo estepárico costero o nuboso, el cual su influencia llega hasta el interior hasta 40 km, por medio de los valles transversales y quebradas. Se caracteriza por presentar abundante nubosidad; humedad, temperaturas moderadas, con un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales con un período seco de ocho a nueve meses (Cepeda et al., 2008).

Al interior de la región, por sobre los 800 m s.n.m., predomina el clima de estepa templado-marginal que se caracteriza por ausencia de nubosidad y una atmósfera seca. Sus temperaturas son mayores que en la costa así también su oscilación térmica. En la Cordillera de Los Andes, sobre los 3.000 m s.n.m., predomina el clima de estepa fría de montaña, que se caracteriza por de altas precipitaciones, temperaturas bajas, fuertes vientos, alta radiación solar y nieves permanentes que constituyen un aporte significativo de agua en el período estival (Cepeda et al., 2008).

3.1.2 Relieve

Los principales rasgos de esta región son la existencia de tres importantes valles transversales, que de norte a sur se conocen como los valles de Elqui, Limarí y Choapa, cuya morfología permite el desarrollo de la actividad agrícola.

En la región de Coquimbo, la Cordillera de los Andes presenta con alturas máximas aproximadamente de 6.252 m s.n.m. (cerro Olivares) y las Tórtolas con 6.332 m s.n.m. Mientras que al sur de esta unidad las alturas comienzan a decrecer, predominando las cimas entre 3.000 y 4.000 m s.n.m. En este sector la Cordillera de los Andes se acerca a

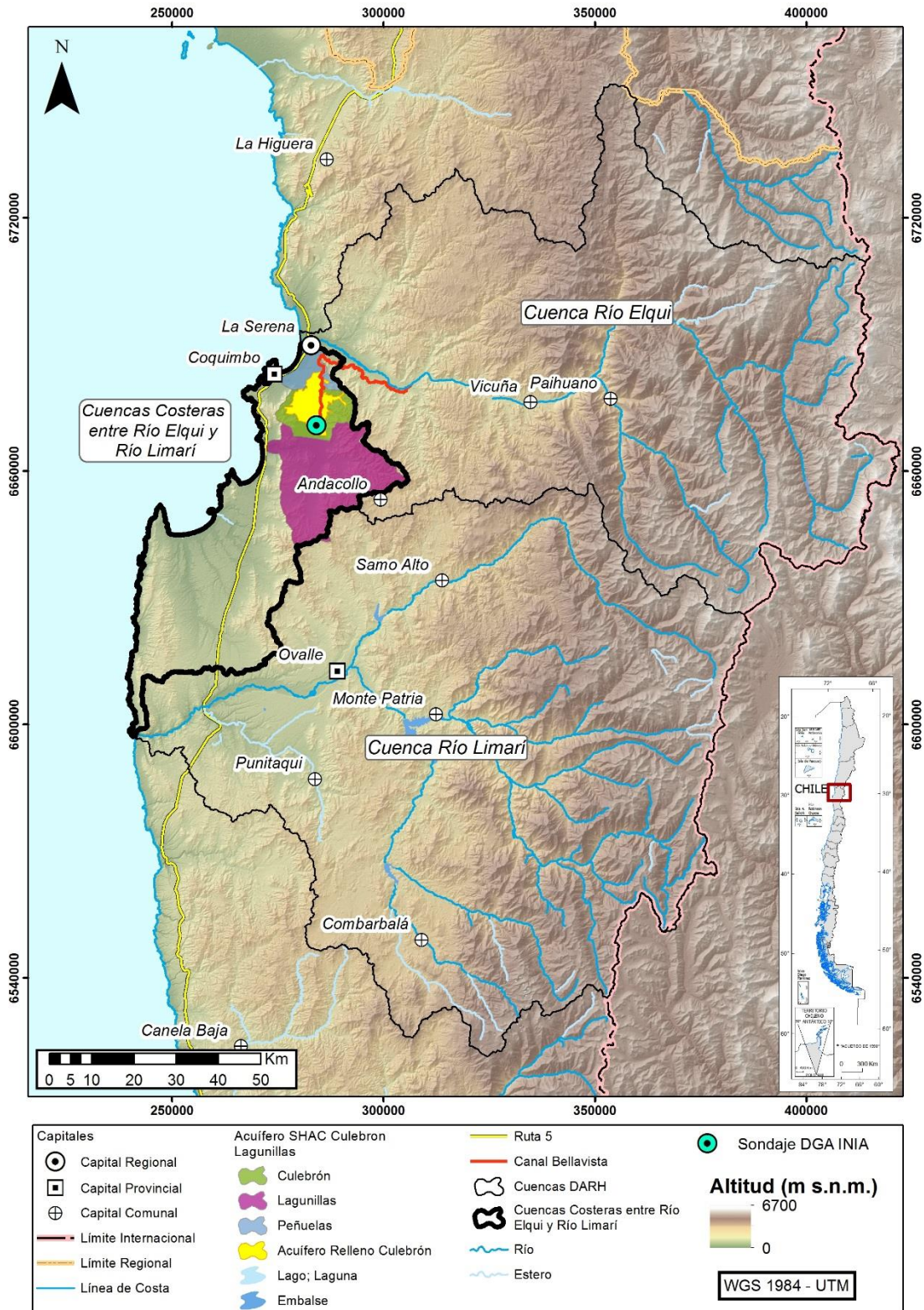
² <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region4>

la costa, siendo su sección más angosta del territorio nacional con 95 km de ancho entre el litoral y la frontera con Argentina en la localidad de Illapel. (Cepeda et al., 2008)

Además, la región de Coquimbo presenta cordones transversales que nacen de la Cordillera de los Andes hasta entrar en contacto con las planicies litorales. Las alturas promedio de estos cordones varían entre 600 y 1.200 m s.n.m. Su orientación es de oeste a este, y estructuran las cuencas del Elqui, Limarí y Choapa. Por el norte de la región se emplaza el valle del Elqui es uno de los más anchos y largos, en la costa se observan las planicies costeras que penetran hacia el interior donde se emplaza la ciudad de La Serena. En el centro de la región se ubica el valle del río Limarí, que se caracteriza por un encajonamiento en su curso superior, con laderas de pendientes abruptas. Al sur de la región se ubica el valle del río Choapa, siendo el más estrecho de las principales cuencas. Su sección media se encuentra encajonada para luego seguir con un amplio sector de terrazas fluviales en la desembocadura³.

La Región de Coquimbo presenta tres importantes ríos: Elqui, Limarí y Choapa, todos ellos nacen en la Cordillera de Los Andes y desembocan en el mar. En la Figura 3-1, se presenta una vista general de las cuencas Elqui, Limarí y la cuenca Costera entre Elqui y Limarí en la cual se inserta el área de estudio.

³ <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region4/relieve.htm>



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1: Cuencas vecinas al área de Estudio

3.1.3 Hidrografía

3.1.3.1 Cuenca del Río Elqui

A los 815 m s.n.m. en la Cordillera de Los Andes nace el río Elqui, con una cuenca de 9.826 km², un caudal medio de 15 m³/s y un régimen principalmente nival, con deshielos en verano (DGA, 2004a). Sus principales tributarios, en época de deshielo, son los ríos Turbio y Claro. Sus aguas se utilizan principalmente en el regadío del valle del Elqui y para consumo humano de las principales ciudades de la región, La Serena, Coquimbo y Vicuña (DGA, 2004a).

3.1.3.2 Cuenca del Río Limarí

El río Limarí nace en la Cordillera de los Andes y se encuentra en el centro de la región, los aportes más importantes son los ríos Hurtado, Grande y Guatulame. Tiene un área aportante de 11.800 km² aproximadamente con un caudal medio de 25 m³/s (DGA, 2004a). Destacan en su estructura la regulación de sus aguas por el sistema de embalses Recoleta, La Paloma y Cogotí. Estas son utilizadas principalmente para el riego de los cultivos que se desarrollan en los valles y también para la producción de hidroenergía en la central de paso Los Molles (DGA, 2004a).

3.1.3.3 Cuencas Costeras entre Elqui y Limarí

Las cuencas Costeras entre Elqui y Limarí⁴ corresponden a cuencas exorreicas que tienen una superficie de 2.300 km², que se encuentra en las provincias de Elqui y Limarí, Región de Coquimbo. La principal característica es que no nacen en la cordillera y dado que las precipitaciones son escasas, los ríos que la integran rara vez llevan agua. Como ocurre en todas las cuencas costeras, están afectadas por el fenómeno de la camanchaca hasta los 800 o 1.000 m s.n.m., siendo su clima de estepa con nubosidad abundante y alta humedad (DGA, 1984).

3.1.4 Geomorfología

La geomorfología de las Cuencas Costera entre Río Elquí y Río Limarí se enmarca en el contexto regional. Esta zona del país se vio determinada por los movimientos tectónicos del Cenozoico, que, a su vez, condicionaron los movimientos glaciares provenientes de la zona andina, debido a las series de cordones montañosos transversales y semitransversales formados. De esta forma, existe material de origen glacial y aluvial que ha sido arrastrado

⁴ Inventario Público de Cuencas, DGA

y sedimentado fluvialmente en los valles transversales, terrazas marinas y hasta planicies litorales (Karl et al., 1974).

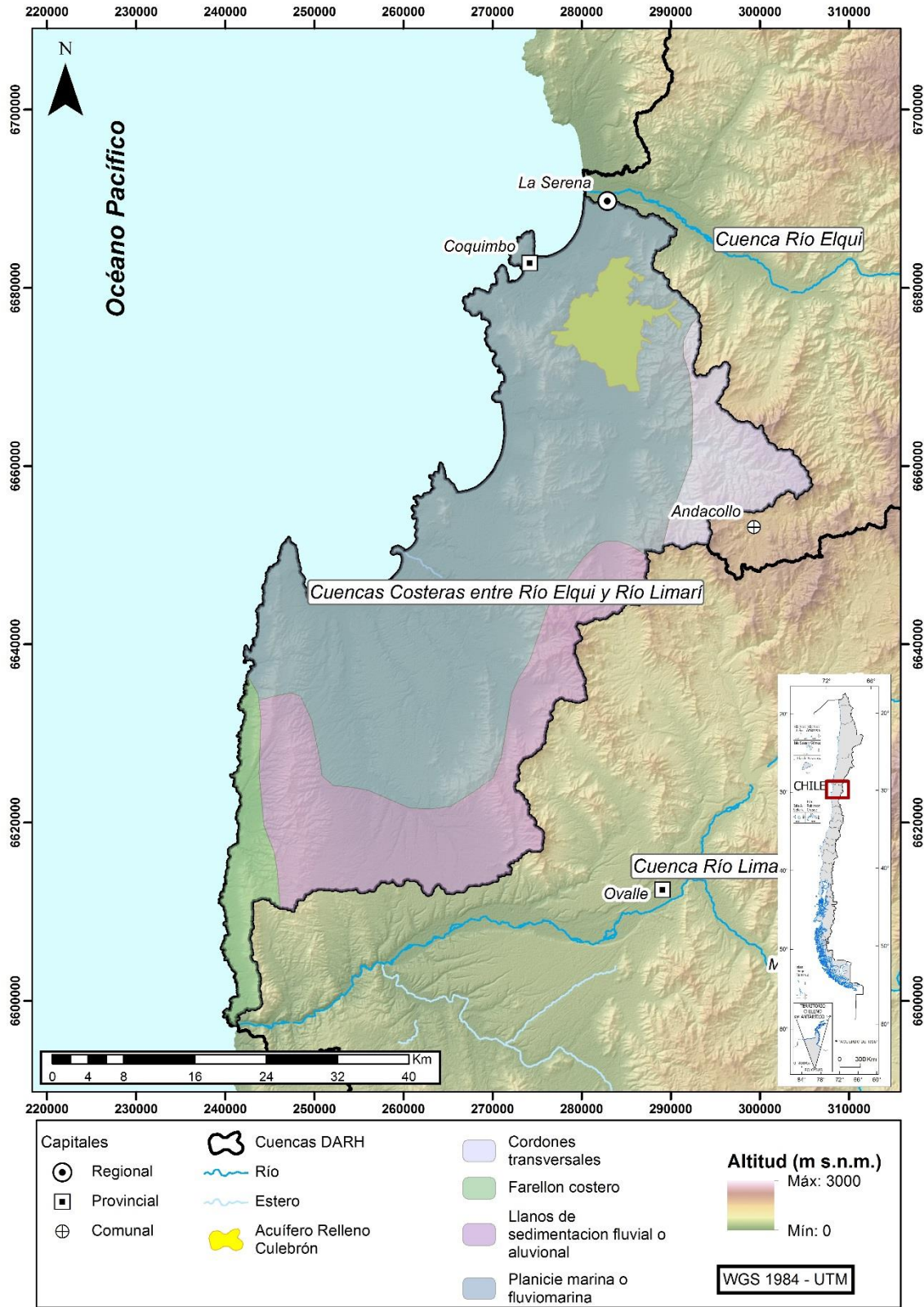
En la Figura 3-2, donde se muestra el mapa geomorfológico de la zona, se pueden identificar 4 Unidades Geomorfológicas Homogéneas (UGH), las cuales son explicadas a continuación:

Cordones transversales: esta UGH se ubica al este de las Cuencas y tiene poca significancia en cuanto a superficie. Esta caracterizado por ser cordones montañosos menores que no superan los 2.000 m de altitud en el área que involucra a la cuenca y se encuentran disectados por los cursos fluviales.

Farellón costero: es una UGH ubicada en el sur poniente de las Cuencas Costeras, caracterizándose por ser un cordón montañoso que limita de forma inmediata con la costa. El macizo más significativo de este cordón montañoso son los Altos de Talinay, ubicado a más de 80 km al sur del límite de la cuenca, sin embargo, toda corresponde a una misma UGH hasta la Región de Valparaíso. El origen de dicha UGH es producto de la acreción de la placa Sudamericana debido a la subducción de la placa de Nazca. Además, se logra identificar terrazas de abrasión producto de la acción marina, teniendo en promedio una diferencia de altura de 80 m con la línea de costa, evidenciando acción eustática o tectónica.

Llanos de sedimentación fluvial o aluvional: es una zona de valle, siendo la misma UGH donde se ubica la ciudad de Ovalle (fuera del área de estudio). Su origen radica en los cordones montañosos que lo rodean y las quebradas que lo atraviesan, aportando material a través de conos coluviales, deyecciones y acción fluvial principalmente. Si bien no existe una diferenciación significativa en cuanto a relieve con respecto a las Planicies marinas colindantes, su principal diferenciación es la incidencia marina en cada UGH, ya que en los Llanos de sedimentación es prácticamente nula.

Planicie marina o fluviomarina: el relieve en esta zona no supera los 600 m de altitud, siendo dominado por terrazas marinas, contando con conos aluviales en el sector oriente de la UGH, asociada a las laderas limítrofes. La formación de esta Unidad Geomorfológica Homogénea se encuentra en el último período de la Edad Terciaria, ya que a través de depósitos sedimentarios marinos y continentales, se dio origen a las planicies litorales.



Fuente: Börgel (1983)

Figura 3-2: Mapa Geomorfológico

Estos depósitos fueron moldeados de forma constante, lenta, persistente y evolutiva durante el Cuaternario, a través de grandes precipitaciones sólidas y líquidas, seguidas de periodos de sequía, además de la acción marina de retroceso. De esta forma, se fueron moldeando terrazas marinas con diferencias de niveles fácilmente identificables.

Nivel local

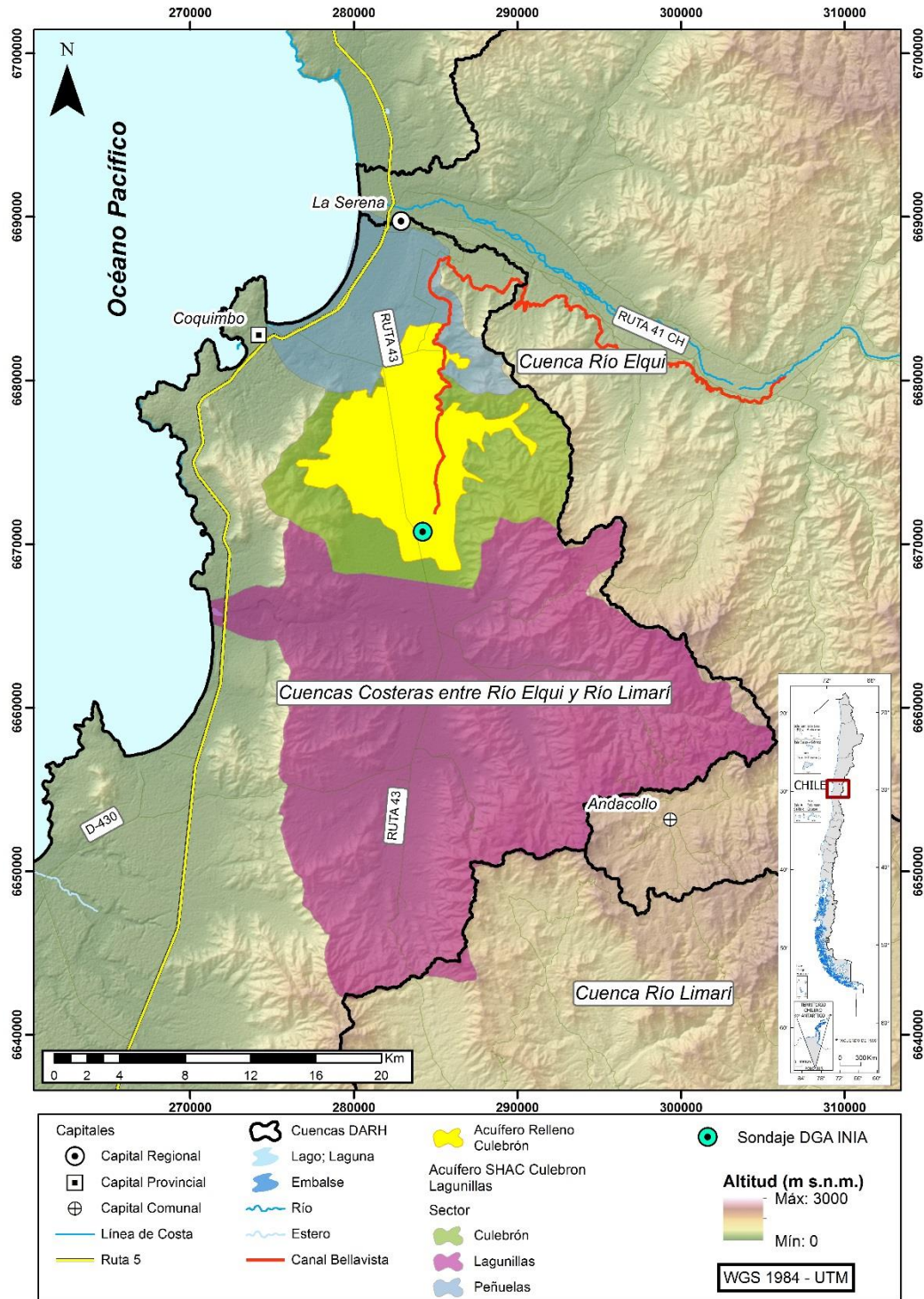
El área del Acuífero Relleno Culebrón se ubica en las Planicies marinas o fluviomarinas. En mayor detalle, el acuífero se encuentra sobre un llano delimitado por el este y el oeste por sierras. Es probable que la sierra occidental al acuífero haya sido una isla y los procesos tectónicos de alzamiento terrestre y retroceso marino conectarán dicha zona con el continente, formando de esta manera el paisaje actual. La zona del acuífero es una de las planicies marinas (o fluviomarinas) más orientales, evidenciando que las sierras orientales son el límite con la siguiente UGH, los cordones transversales.

3.2 Contexto Local (Acuífero el Culebrón)

El área de estudio se enmarca en la subunidad hidrogeológica el Culebrón, perteneciente al Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Culebrón-Lagunillas, perteneciente a la cuenca hidrográfica anteriormente indicada, ubicado específicamente en la zona del Valle de Pan de Azúcar, Región de Coquimbo, en la provincia del Elqui, entre las comunas de La Serena y Coquimbo, próximo a los poblados de Cerrillos y Huachalalume, tal como se muestra en la Figura 3-3.

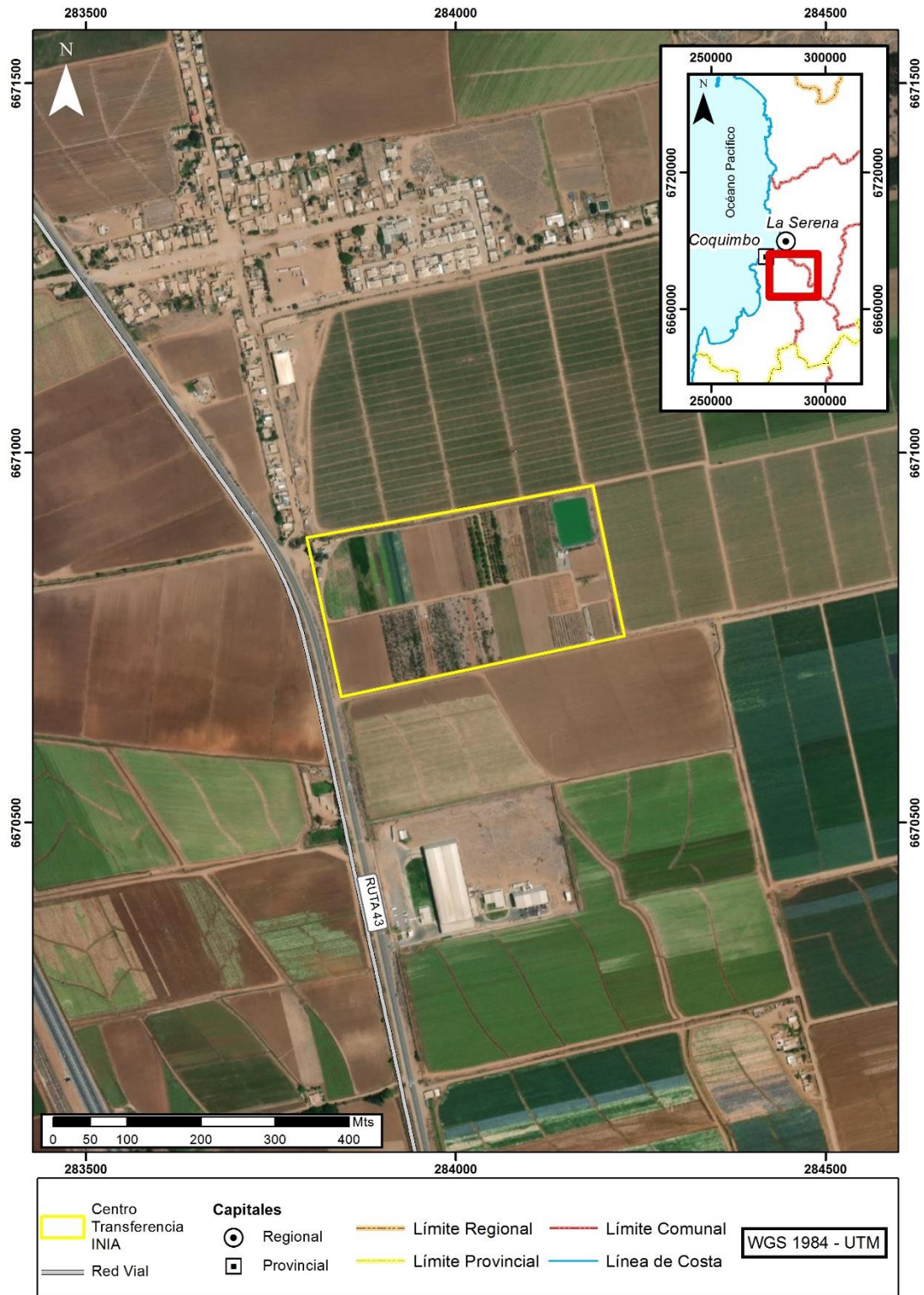
El sondaje que se construyó como parte de este estudio, está ubicado en el Centro de Transferencia Tecnológica en Riego y Agricultura Sustentable del INIA, fundado en el año 1993 el INIA ubicada en Ruta 43 camino a Ovalle, Higuera N°2 Cerrillos, Coquimbo (ver Figura 3-4). La parcela cuenta con 8 ha para investigar y transferir tecnologías en hortalizas y frutales. Sus lineamientos tienen relación con la eficiencia hídrica, sanidad vegetal e inocuidad y, la búsqueda de alternativas productivas que se adapten a la realidad agroclimática y al escenario climático futuro⁵.

⁵ Fuente: <https://www.inia.cl/inia-intihuasi/oficinas/parcela-experimental-pan-de-azucar/>



Fuente: Elaboración propia a partir de estudio CORFO (2015)

Figura 3-3: Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común Acuífero Culebrón



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-4: Ubicación Centro de Transferencia Tecnológica en Riego y Agricultura Sustentable INIA

4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 Revisión de información Hidrometeorológica

Para desarrollar las estimaciones hidrológicas y meteorológicas correspondientes a la zona de estudio se consultó la información registrada por parte de dos bases de información, la primera corresponde a la DGA⁶, con dos estaciones de medición cercanas a la zona de estudio, las que se presentan en la Tabla 4-1 y el resultado del análisis se presenta en el acápite 5.2.

Tabla 4-1: Estaciones meteorológicas cercanas al área de Estudio

Código BNA	Nombre Estación	Coordenadas UTM WGS84 H19S		Vigencia	Fecha Inicio
		UTM Este	UTM Norte		
04335002-1	La Serena (Escuela Agrícola)	282.122	6.689.159	Vigente	01-01-1971
04335014-5	Prueba GPRS10	282.770	6.689.843	Vigente	01-01-2013

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes BNA-DGA

Las estaciones DGA miden principalmente 2 variables: la precipitación registrada por la estación meteorológica (en formato de precipitaciones máximas anuales, precipitaciones diarias y precipitaciones mensuales) y la temperatura superficial.

Para estimar los aspectos de recarga del acuífero se utilizaron los datos de precipitaciones totales mensuales registradas por ambas estaciones. Respecto a la densidad de información, la estación La Serena cuenta con casi 40 años de información continua, por otra parte, la estación Prueba GPRS10 cuenta con información solo desde el año 2013, esta data de información de 7 años, no permite concluir respecto al comportamiento hidrológico de la zona de estudio.

Por otra parte, se consultó la información disponible por la red agrometeorológica de INIA⁷. De esta red de información, se destaca la estación de medición Pan de Azúcar, la cual se encuentra ubicada precisamente en las proximidades del acuífero estudiado y es de propiedad del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA).

Las estaciones de la red agrometeorológica miden una gran cantidad de información (ver Figura 4-1), entre ellas se destacan las siguientes variables:

- Precipitación

⁶ Fuente: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

⁷ Fuente: <https://agrometeorologia.cl/>

- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Presión atmosférica
- Radiación solar
- Velocidad del viento
- Dirección del viento



Fuente: <https://agrometeorologia.cl/#>

Figura 4-1: Monitoreo de parámetros en línea de Estación Pan de Azúcar

En lo que respecta a información fluviométrica, se tiene la estación estero Culebrón en el Sifón, cuya información se presenta en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Estación fluviométrica cercanas al área de Estudio

Código BNA	Nombre Estación	Coordenadas UTM WGS84 H19S		Vigencia	Fecha Inicio
		UTM Este	UTM Norte		
04400001-6	Estero Culebrón en El Sifón	279224	6681167	Vigente	01-03-1986

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes BNA-DGA

Las estadísticas seleccionadas, tanto de pluviométricas como fluviométricas, se presentan en el **Anexo B**.

4.2 Construcción de Piezómetro

El método utilizado por Con Potencial Consultores SpA para la construcción del piezómetro DGA-INIA, fue a través de una perforación mediante diamantina con recuperación integral de testigos para su posterior caracterización litológica. Dicha información es de suma importancia para la caracterización del acuífero, considerando que en el área de estudio las descripciones estratigráficas solo se habían realizado en base a una estimación de los materiales recuperados durante el proceso de perforación mediante rotoperCUSión (material triturado, con probable pérdida de finos), lo que implica un fundamental avance en el conocimiento para la caracterización del acuífero y la posterior puesta en marcha de inversiones de recarga artificial del mismo.

4.2.1 Perforación diamantina

Esta técnica de perforación utiliza un cabezal o broca diamantada, que rota en el extremo de las barras de perforación. El extremo de la broca diamantada posee una abertura que permite cortar el testigo sólido de material que se desplaza hacia el interior de la tubería de perforación el que se recupera en la superficie. El cabezal diamantado gira lentamente manteniendo una suave presión mientras es lubricada con agua para evitar el sobrecalentamiento. La profundidad de perforación se estima contando el número de barras de perforación que se vayan añadiendo⁸.

El perforador debe prestar mucha atención a la revolución del motor de la máquina de sondaje para evaluar la condición de la perforación permanentemente. Ajustando la velocidad de rotación, la presión y la circulación de agua para diferentes tipos de materiales atravesados y las condiciones de perforación con el fin de evitar problemas, tales como que quede la broca atascada o recalentamiento del cabezal diamantado o pérdida del porcentaje de recuperación de material en el testigo.

Dentro de la tubería de perforación hay otro tubo interno, que tiene un mecanismo de cierre conectado a un cable de acero. El cable se utiliza para izar el tubo que contiene el testigo de roca a la superficie donde se puede recuperar. El testigo se almacena en cajas especialmente diseñadas que contienen compartimentos para mantener secciones del testigo (ver Figura 4-2).

Una vez finalizado el sondaje, el espacio anular del sondaje se rellenó con gravilla de 3 a 6 mm de canto redondeado, su objetivo es retener Arenas y finos además de rellenar el

⁸ https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/2/GL61F/1/material_docente/bajar?id_material=310522

espacio anular y darle mayor soporte y resistencia a la tubería. Adicionalmente se colocó un geotextil en la zona filtrante para retener los finos que pudiesen ingresar por ranurado Slot 40 (la tubería tiene ranurado con láser de fábrica slot 40) (ver Figura 4-3).

En la Figura 4-4 se presentan las fotografías del posicionamiento de la máquina de perforación en el punto definido por DGA-INIA.

Finalmente, la limpieza de sondaje se realiza con hipoclorito de Sodio durante 8 hrs.

Cabe destacar que la metodología de perforación seleccionada (perforación con diamantina con recuperación inalterada de testigos), permitió reconocer en detalle todo el perfil estratigráfico atravesado, lo que será de gran utilidad para el desarrollo de futuros modelos subterráneos o para la calibración de geofísica en el área de Estudio.



Fuente: Equipo Consultor

Figura 4-2: Recuperación de testigos inalterados mediante perforación diamantina, Sondaje DGA-INIA-2020



Fuente: Equipo Consultor

Figura 4-3: Tubería instalada ranurada con láser de fábrica slot 40



Fuente: Equipo Consultor

Figura 4-4: Posicionamiento de máquina de sondaje

Cálculos ensayo Lefranc a carga variable

El cálculo de la permeabilidad se realiza mediante la siguiente fórmula (Jiménez Salas, 1981):

$$K = \frac{d_e^2 \ln(2L/d)}{8Lt} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

donde: K = conductividad hidráulica

- h1, h2 = altura del agua al principio y al final del ensayo
- t = tiempo transcurrido entre la observación de los niveles h1 y h2
- L = longitud de la zona filtrante
- d = diámetro de la zona filtrante. Con respecto al diámetro de entubación, de = diámetro de la entubación (puede ser igual a d)

4.3 Catastro de pozos

Se realizó un catastro de captaciones subterráneas en la zona de estudio, lo que permitirá conocer, entre otras cosas: ubicación (coordenadas UTM), cota, características (profundidad, diámetro), tipos de captaciones existentes (norias, sondajes, drenes), y niveles de napa (estáticos o dinámicos).

Se midieron los niveles de agua de las norias y pozos mediante el uso de un pozómetro, el cual consiste en un sistema de medición de distancia longitudinal, el cual suena al contacto con el agua. Un ejemplo de este instrumento se muestra en la Figura 4-6.



Fuente: <https://www.pasisrl.it/es/ct/ensayos-pozos-profundos/0/inspeccion-en-agua-subterranea>)

Figura 4-6: Pozómetro

Metodología de medición:

1. Al comienzo de cada jornada se hace un chequeo general del funcionamiento de los instrumentos, tanto las condiciones del sensor (en el caso del pozómetro) como las fuentes de poder. Para cada jornada se considera llevar un repuesto de baterías para cámara fotográfica, GPS Garmin eTrex 30 de mano (navegador) y pozómetro marca PASI modelos 100m y 200m.
2. Al comienzo de cada medición del nivel de pozo se deja en el terreno el GPS para calibrar el mismo luego al término de la medición, se hace registro fotográfico y se guarda el punto en el GPS de mano (navegador).
3. Se debe descontar la altura de la tubería u obra de captación, a la medición del nivel freático, si esta no está a nivel de piso.
4. Por último, al terminar la jornada se traspasa la información a digital y se realiza planificación para el día siguiente.

4.4 Georreferenciación del sondaje DGA-INIA

La medición se efectúa con GPS Geodésico de doble frecuencia marca CHCNAV, modelo i80. En la medición se usó el método GPS Diferencial Estático Post-Proceso en modo estático. El geoide de referencia utilizado fue EGM96 vinculados a un vértice base perteneciente a la Red Geodésica Nacional, pudiendo utilizar los vértices geodésicos activos del MBN (Ministerio de Bienes Nacionales) BN17 ubicado en la ciudad de Ovalle, referido al Sistema SIRGAS-CHILE, Elipsoide Internacional WGS84, Huso Zona 19 Sur, zona J, según requerimientos solicitados.

La determinación de coordenadas mediante el uso del Sistema GNSS en modalidad estático, requiere de medición simultánea y en diferentes sesiones. En mediciones GOS, el tiempo de medición común entre receptores depende de varios factores como son la longitud de los vectores a medir, el número de satélites disponibles, la geometría de los satélites, el tipo de observación y la precisión requerida, los cuales se relacionan entre si y son condicionantes entre ellos.

Se presenta en la Figura 4-7 el GPS estático georreferenciando punto de sondaje DGA-INIA.



Fuente: Equipo Consultor

Figura 4-7: Proceso en Terreno Georreferenciación de sondaje DGA-INIA

5 RESULTADOS

5.1 Construcción piezómetro DGA-INIA

5.1.1 Aspectos generales

Se utilizó el método de perforación en diamantina con un diámetro HQ para los 100 m de extensión del sondaje. El sondaje se habilitó en tubería de PVC la cual está ranurada desde el 30 hasta los 100 m en profundidad, mientras que los primeros 30 m son ciegos. El espacio anular del sondaje se rellenó con gravilla de 3 a 6 mm de canto redondeado, su objetivo es retener las fracciones finas que pueden ingresar a la tubería ranurada, además de rellenar el espacio anular y darle mayor soporte y resistencia a la tubería. Complementariamente se recubrió la tubería con un geotextil en la zona filtrante para retener los finos que pudiesen ingresar (considerar que la tubería tiene ranurado con láser de fábrica slot 40).

Las labores de perforación y habilitación comenzaron en día 11 de noviembre de 2020 y finalizaron el día 26 de noviembre del 2020. Se presenta en la Tabla 5-1 la ubicación geográfica del sondaje desarrollado, mientras que en la Tabla 5-1 muestra la ubicación georreferenciada del sondaje dentro de la parcela experimental del INIA. La georreferenciación del pozo se presenta en el **Anexo B**.

Tabla 5-1: Ubicación de sondaje DGA-INIA 2020

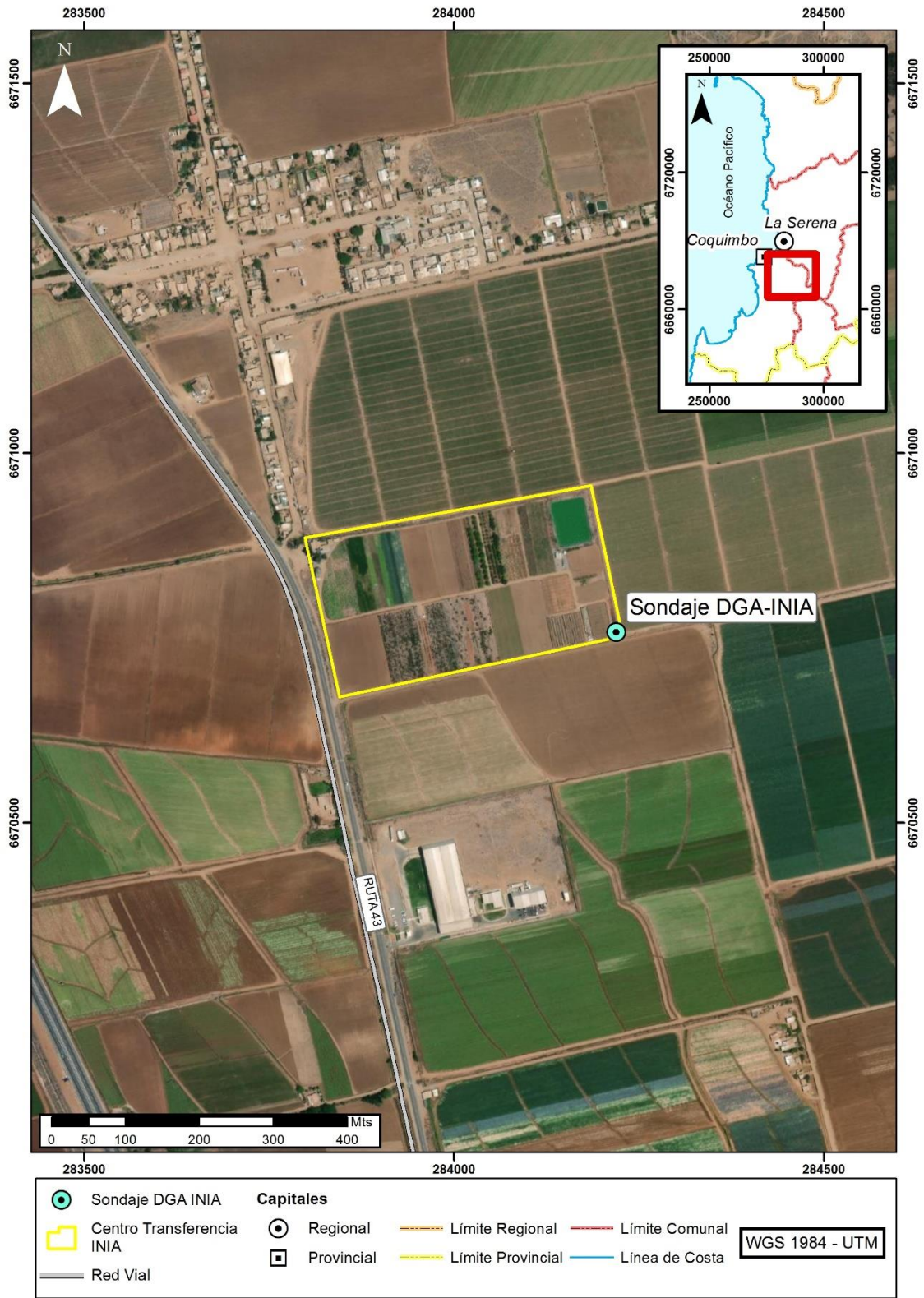
ID	Coordenada UTM WGS 84 H19S		Cota* (m s.n.m.)
	Norte (m)	Este (m)	
Sondaje DGA-INIA	6.670.755,96	284.220,09	126,31

*Geoide de referencia EGM96

Fuente: Elaboración propia

Se finalizó con los trabajos de perforación el día 18 de noviembre del año 2020. Se presenta en la Figura 5-2 fotografías del sondaje DGA-INIA terminado.

La Figura 5-3 presenta el diagrama de la habilitación del sondaje DGA-INIA.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-1: Ubicación del Sondaje DGA-INIA

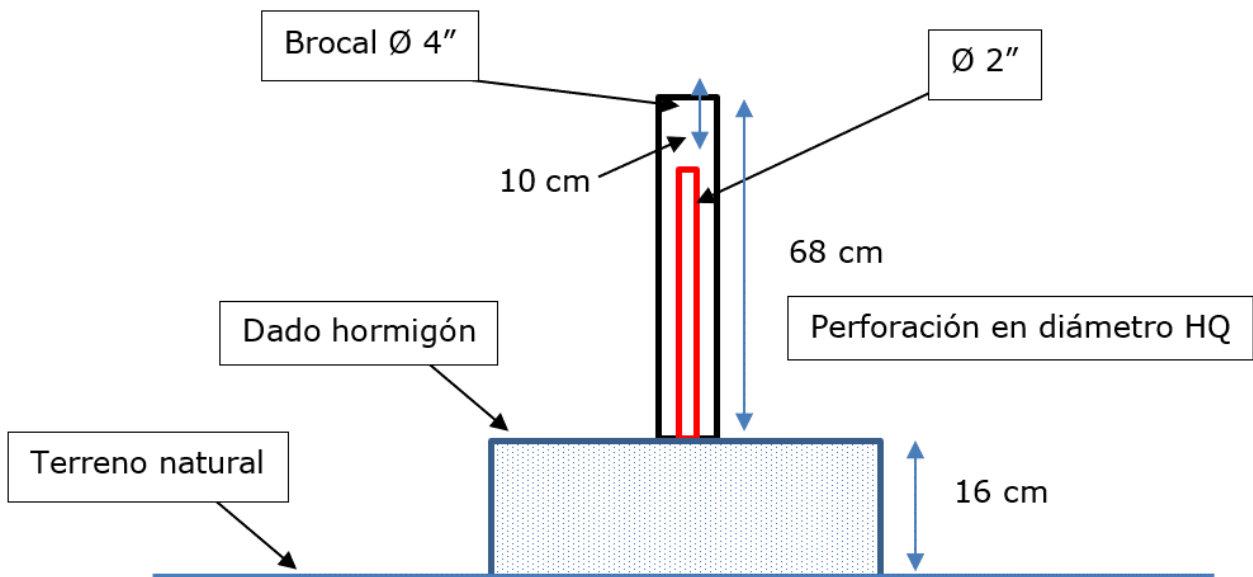


Sondaje finalizado

Interior sondaje con soporte para instalación de instrumental

Fuente: Equipo Consultor

Figura 5-2: Sondaje DGA-INIA 2020 finalizado



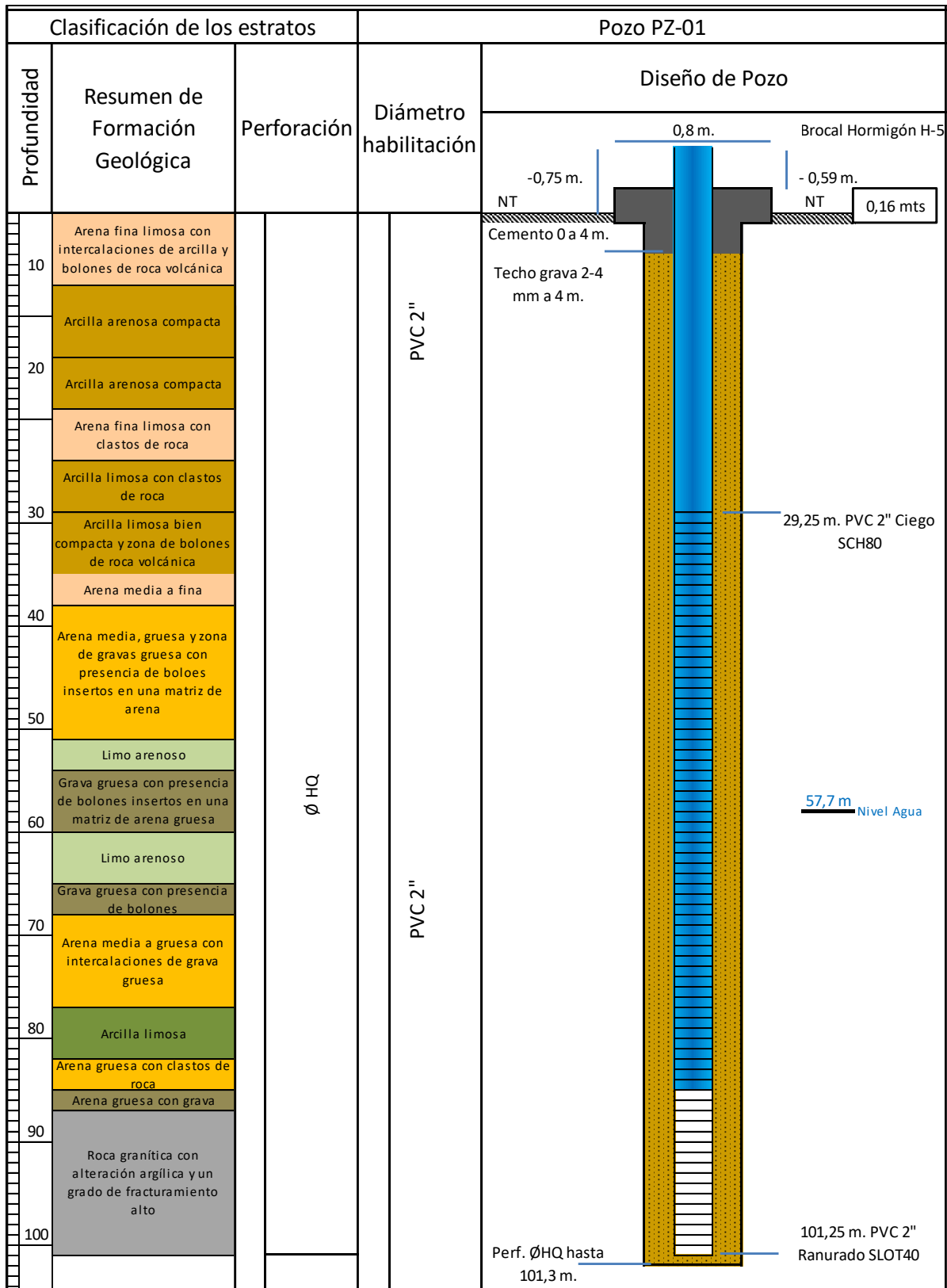
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-3: Diagrama habilitación del sondaje DGA-INIA

5.1.2 Descripción estratigráfica

Se realiza una descripción estratigráfica por cada metro, a través de recuperación integra del material mediante perforación en diamantina HQ, la cual es presentada en la Figura 5-4. Para más detalle de los testigos obtenidos de la perforación ver el **Anexo B**. Cabe destacar que en los primeros 35 m se identifica un estrato principalmente impermeable con matriz de arcillas plásticas. Por otra parte, durante la perforación el nivel de agua se interceptó a los 57,7 m de profundidad desde nivel de terreno, resultando una potencia disponible para la recarga de 22,7 m.

El estrato conductor se compone principalmente de gravas gruesas insertos en una matriz, hasta los 87 m de profundidad, donde comienza roca (granitoides) con alteración argílica moderada y un grado de fracturamiento fuerte en la parte superior y moderado a medida que se profundiza (para efectos prácticos se considera como basamento rocoso).



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-4: Perfil Estratigráfico Sondaje DGA-INIA

5.1.3 Análisis de Calidad Química de aguas

Se realizó el día 26 de noviembre del año 2020 un muestreo de la calidad química de agua del sondaje DGA-INIA, el que se analizó bajo la norma NCh 1333 para agua de riego incluyendo análisis de compuestos nitrogenados (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , NT, NTK), además de los compuestos SO_4^{2-} , HCO_3^- , incluyendo un análisis de metales y metaloides (Ver **Anexo B** para consultar informe de laboratorio).

Dichos parámetros se compararon con los límites admisibles de la NCh 409 para agua potable, dada la existencia de APR en el sector que usan estas aguas para abastecimiento en el sector.

En la Tabla 5-2 se presentan los resultados del análisis químico realizado al finalizar la construcción del sondaje DGA-INIA, la muestra fue extraída de en un pozo cercano, ubicado a una distancia de 580 m específicamente en las coordenadas (N: 6.670.905, E: 283.938), se escogió este punto dado que al momento en que se realizó la muestra, el sondaje aún no estaba totalmente finalizado ni limpiado, y para no alterar la muestra se decidió muestrear en un pozo cercano que no tuviera sus aguas estancadas, y que fuera representativo del mismo acuífero del sondaje DGA-INIA. Se observan resultados similares a los obtenidos en el Estudio "Seguimiento del perfil salino del acuífero El Culebrón en tiempo real" (INIA, 2019) donde se observa una alta conductividad eléctrica (sobre el límite de la NC 1333 para uso de agua de riego en los $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C) o que podría indicar presencia de agua salina en la muestra. Por otra parte, se observan un sobrepaso de la NCh 1333 en concentraciones de nitratos y sulfatos, lo que se puede deber a la producción agrícola en el sector, lo que significaría una conexión por infiltración directa al acuífero. El exceso de nitrógeno en los cultivos puede resultar en pobre sistema radicular, tejido blando, plantas débiles, retraso en la producción, rendimiento de baja calidad y mayor susceptibilidad a enfermedades y plagas¹⁰.

Tabla 5-2: Resultado de Calidad Química en pozo cercano a Sondaje DGA-INIA

Parámetro	Resultado	Unidad	Límite NCh 1333 (agua de riego)	Límite NCh 409 (agua potable)	Observación
Nitrógeno Kjeldahl (Nitrógeno Orgánico)	1,6	mg/L			

¹⁰ <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/nitrogen/>

Parámetro	Resultado	Unidad	Límite NCh 1333 (agua de riego)	Límite NCh 409 (agua potable)	Observación
Físico-Químicos					
Conductividad eléctrica	1.510	µS/cm a 25°C	750		Sobrepasa norma riego
pH	7,77	±0,4%	6 - 8,5	6,5 - 8,5	
Sólidos Totales Disueltos	1.004	mg/L		1.500	
Formas Nitrogenadas/ Fosforadas					
Nitrógeno Total	53,3	mg/L			
Cationes +					
Amonio	<50	µg/L			
Calcio Disuelto	116	mg/L			
Calcio Total	125	mg/L			
Magnesio Disuelto	41,2	mg/L			
Magnesio Total	44,4	mg/L	0,1	125	Sobrepasa norma riego
Potasio Disuelto	2,47	mg/L			
Sodio Disuelto	142	mg/L			
Sodio Total	145	mg/L			
Aniones -					
Bicarbonatos	403	mg/L			
Cianuros	0,04	mg/L		0,2	
Cloruros	98,4	mg/L	200	400	
Fluoruros	0,12	mg/L			
Nitratos	52,6	mg/L	10	50	Sobrepasa ambas normas
Nitritos	0,65	mg/L	1	3	
Sulfatos	333	mg/L	250	500	Sobrepasa norma riego
Relaciones Interés					
* RAS	2,8	-			
Sodio Porcentual	39,8	%	35		Sobrepasa norma riego
Metales Totales					
Aluminio Total	<0,005	mg/L	5		
Arsénico Total	0,00301	mg/L	0,1	0,01	
Bario Total	0,05318	mg/L	4		
Berilio Total	<0,00025	mg/L	0,1		
Boro Total	0,452	mg/L	0,75		
Cadmio Total	0,00007	mg/L	0,01	0,01	
Cobalto Total	0,00018	mg/L	0,05		
Cobre Total	0,00188	mg/L	1	2	
Cromo Total	0,01036	mg/L	0,05	0,05	
Hierro Total	1,03	mg/L	5	0,3	Sobrepasa norma AP
Litio Total	0,00608	mg/L	2,5		
Manganeso Total	0,0019	mg/L	0,2	0,1	
Mercurio Total	<0,0001	mg/L	0,001	0,001	

Parámetro	Resultado	Unidad	Límite NCh 1333 (agua de riego)	Límite NCh 409 (agua potable)	Observación
Metales Totales					
Molibdeno Total	0,00978	mg/L	0,01		
Níquel Total	0,00467	mg/L	0,2		
Plata Total	<0,0005	mg/L	0,2		
Plomo Total	0,0019	mg/L	5	0,05	
Selenio Total	0,00068	mg/L	0,02	0,01	
Vanadio Total	0,02142	mg/L	0,1		
Zinc Total	0,026	mg/L	2	3	

Fuente: Elaboración propia

Balance Iónico

Para verificar la calidad del análisis físico-químico realizado en la muestra, se realiza su balance iónico. Este procedimiento permite saber si una muestra se encuentra debidamente equilibrada en las cargas de sus principales iones¹¹.

Principales Cationes:

Calcio, Sodio, Magnesio, Potasio

Principales Aniones:

Bicarbonato, Nitrato, Sulfato y Cloruro.

Para determinar el error porcentual del balance iónico de una muestra se utiliza el criterio de Standard Methods para exactitud de análisis, el cual se presenta continuación:

$$\% \text{ diferencia} = 100 \cdot \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})}$$

En la Finalmente, el resultado para la muestra analizada en el sector del sondaje DGA-INIA es de -2,63 % lo que se considera un error aceptable, y valida el análisis efectuado.

Tabla 5-3 se presentan los analitos utilizados para el cálculo del balance iónico y sus respectivas concentraciones presentadas en meq/l.

Finalmente, el resultado para la muestra analizada en el sector del sondaje DGA-INIA es de -2,63 % lo que se considera un error aceptable, y valida el análisis efectuado.

¹¹ Curso de Hidrogeoquímica, P. Universidad Católica de Chile, Leonel Barra O.

Tabla 5-3: Analitos utilizado en el cálculo del balance iónico y resultados en meq/l

Parámetro	Concentración (mg/l)	Concentración (meq/l)	Concentración en (%)
Cationes +			
Calcio Total	125	6,25	38,41
Magnesio Total	44,4	3,65	22,46
Potasio Disuelto	2,47	0,06	0,39
Sodio Total	145	6,30	38,74
Total cationes		16,27	100
Aniones -			
Bicarbonatos	403	6,61	38,52
Nitrato	52,6	0,83	4,87
Cloruros	98,4	2,77	16,16
Sulfatos	333	6,94	40,45
Total aniones		17,15	100

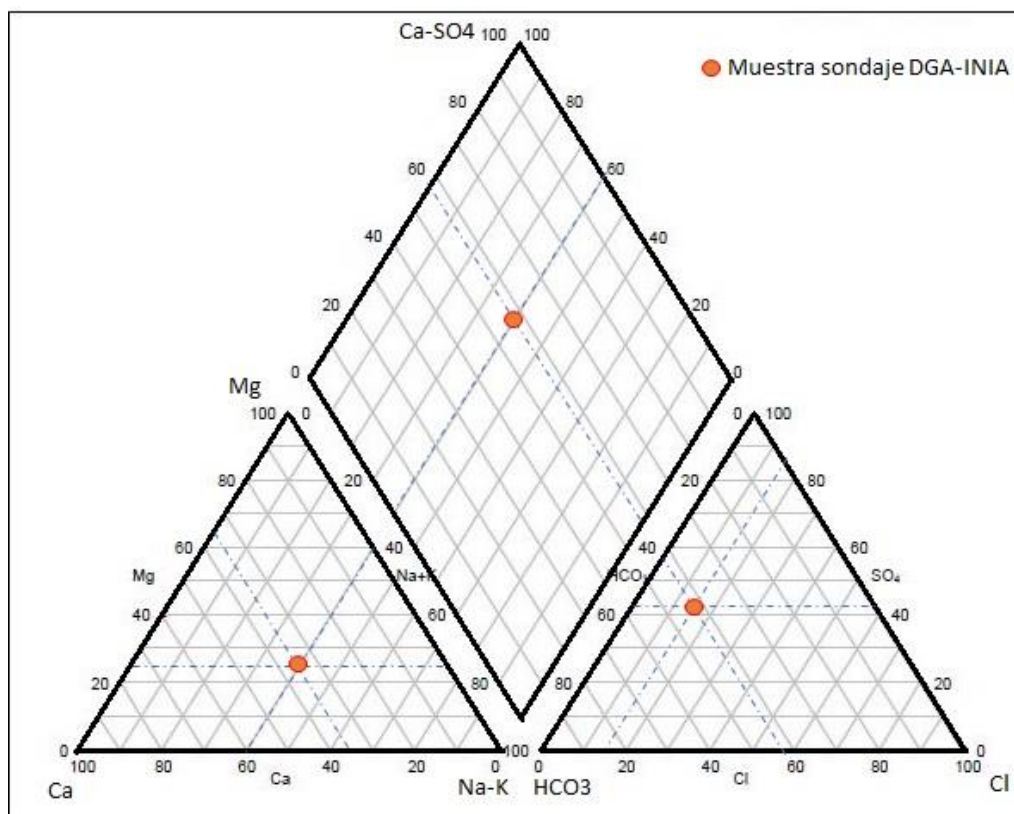
Fuente: Elaboración propia

Diagrama de Piper

Es una de las gráficas más utilizadas, en ella se incluyen aniones y cationes en forma simultánea. Este gráfico permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (INIA, 2019).

Está formado por dos triángulos equiláteros donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Los vértices del triángulo de aniones son SO_4^{2-} , Cl^- y HCO_3^- . Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión (INIA, 2019).

Se presenta en la Figura 5-5 la representación gráfica del diagrama de Piper que identifica el agua muestreada, en el sector del sondaje DGA-INIA, como cloruras cálcicas. Los parámetros considerados se presentan en la Tabla 5-4.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-5: Diagrama de Piper

Tabla 5-4: Datos para Diagrama de Piper

Parámetro	Concentración (mg/l)	Concentración (meq/l)	Concentración en (%)
Cationes +			
Calcio Total	125	6,25	38,41
Magnesio Total	44,4	3,65	22,46
Potasio Disuelto	2,47	0,06	0,39
Sodio Total	145	6,30	38,74
Total cationes		16,27	100,00
Aniones -			
Bicarbonatos	403	6,61	40,49
Cloruros	98,4	2,77	16,99
Sulfatos	333	6,94	42,52
Total aniones		16,32	100,00

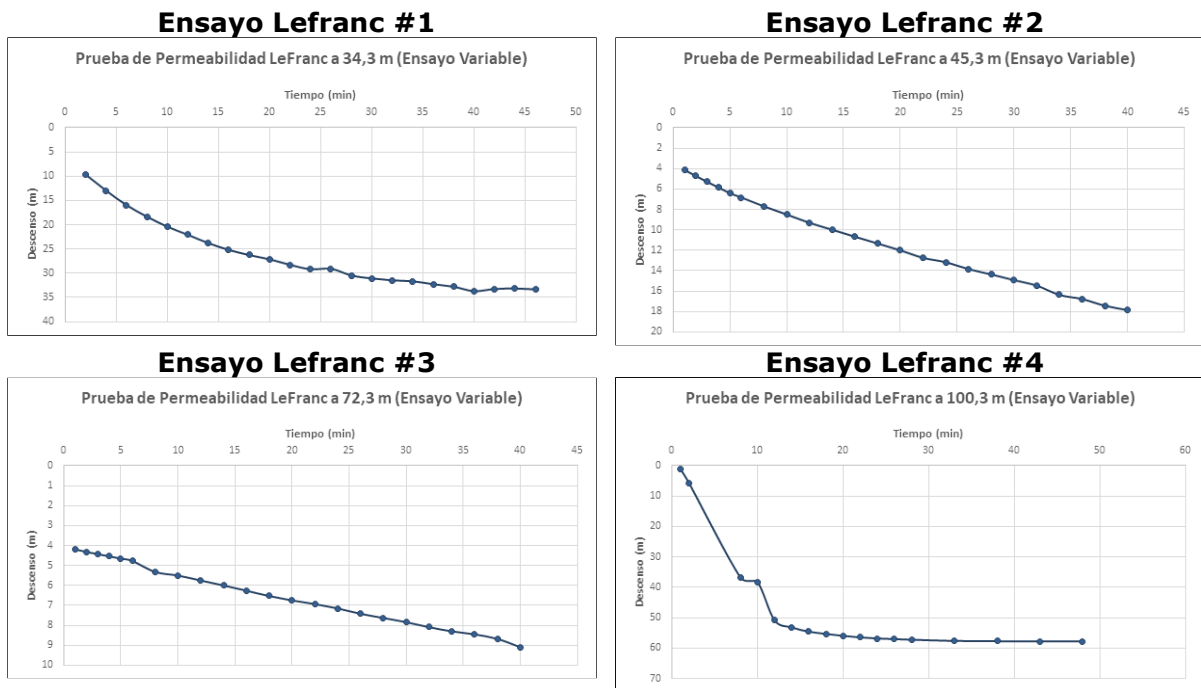
Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Ensayos hidráulicos

Durante la perforación del sondaje DGA-INIA, se realizaron un total de 4 ensayos de permeabilidad tipo Lefranc a los 35, 45, 72 y a los 100 m de profundidad. En la Tabla 5-5 se presentan los resultados de los ensayos de permeabilidad. El detalle de las pruebas se puede observar en el **Anexo B**.

Los resultados obtenidos de los ensayos Lefranc, realizados en el sondaje DGA-INA, indican una permeabilidad media a baja asociadas a materiales formados por una matriz de finos (limos). Cabe destacar, que los segmentos ensayados corresponden según descripción litológica a materiales limosos o arcillosos (ver detalle de descripción litológica en **Anexo B**). Por otra parte, es importante destacar que los resultados podrían estar influenciados por la aplicación de aditivos solubles en agua para estabilizar las paredes del sondaje por debajo de los 45 m de profundidad.

Se presenta en la Figura 5-6 los descensos registrados en los ensayos de Lefranc.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-6: Resultados ensayo Lefranc

Tabla 5-5: Resultados ensayos Lefranc

ID	Profundidad (m)	Permeabilidad (cm/s)
Lefranc 1	34,3	$3,3 \cdot 10^{-4}$
Lefranc 2	45,3	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Lefranc 3	72,3	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Lefranc 4	100,3	$5,7 \cdot 10^{-4}$

Fuente: Elaboración propia

5.1.5 Instalación de letrero

De acuerdo a lo dispuesto en las bases técnicas se realiza la instalación del letrero del Pozo de observación construido en el predio INIA (ver Figura 5-7). Las características del letrero se presentan en el **Anexo B**.



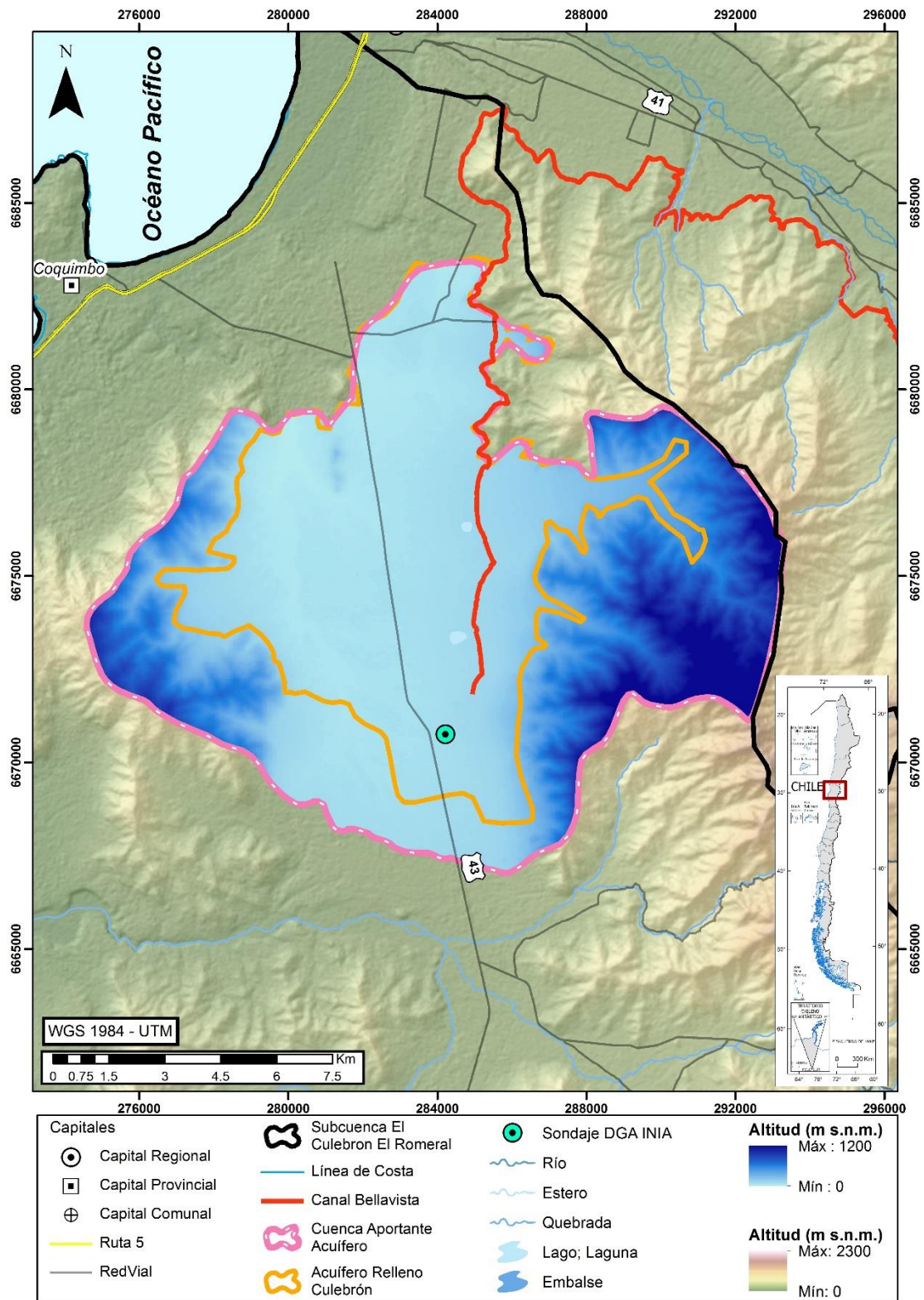
Fuente: Equipo Consultor

Figura 5-7: Letrero del Pozo de observación DGA-INIA construido en predio INIA

5.2 Caracterización hidrológica

La caracterización hidrológica presentada a continuación tiene como fin estimar la recarga natural al acuífero Pan de azúcar. Para desarrollar esta labor, se consideró que la recarga al acuífero se encuentra conformada entre un 80% y un 90% por aguas provenientes del canal Bellavista y entre un 10% y 20% por aguas provenientes de precipitaciones, tal como se indicó en el estudio INIA (2019). Por otra parte, en el estudio CRDP (2015) se señala que el acuífero Culebrón se alimenta fundamentalmente desde la cuenca del Elqui a través de las pérdidas del canal Bellavista y de las percolaciones de sus zonas agrícolas de riego asociadas, se tendría que faltaría incorporar las percolaciones desde la zona de riego, las que también son aguas del canal Bellavista. Por lo tanto, para determinar la recarga al acuífero, se calculan en primer lugar las precipitaciones aportantes ocurridas en la cuenca a nivel medio anual, y los caudales medidos en el canal bellavista, para luego incorporar los aportes desde las zonas de riego.

El acuífero estudiado se encuentra dentro de la subcuenca Estero el Culebrón – Quebrada el Romeral, sin embargo, solo una sección de la subcuenca es aportante al sector del acuífero, por este motivo, se definió usando herramientas SIG, la cuenca aportante al acuífero. La orografía de esta cuenca se representó por medio de la información satelital SRTM con resolución de 1 arco de segundo (aproximadamente un punto cada 30 m). La Figura 5-8 presenta la cuenca aportante al acuífero estudiado, la que presenta una altura máxima de 1.200 m s.n.m. Para determinar el régimen de escurrimiento en la cuenca, se compara la altura máxima de la cuenca con la cota de la línea de nieves, la cual corresponde a una línea que representa el sector donde suele ubicarse la isoterma 0°C. Usando el estudio de Peña y Vidal (1993) se determinó que para la zona de estudio la línea de nieves se encuentra a 2.350 m s.n.m., por lo que se tiene entonces que la cuenca aportante es de régimen pluvial, es decir, los caudales mas importantes ocurren durante el invierno, coincidentes con las precipitaciones.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-8: Acuífero Relleno – Culebrón y Cuenca aportante

5.2.1 Análisis de Información Estadística Disponible

5.2.1.1 Estaciones Meteorológicas

Debido a que se desean estimar las precipitaciones ocurridas sobre el acuífero delimitado, se analizó la información meteorológica disponible en las proximidades del acuífero e idealmente ubicado dentro de él. En la Figura 5-9, se presentan las estaciones meteorológicas identificadas y más relevantes cuyas fuentes corresponden a la DGA (Estación "La Serena" y Estación "Prueba GPRS10") y a la Red Agrometeorológica de INIA (Estación Pan de Azúcar).

La Tabla 5-6 muestra las ubicaciones y altitudes de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio.

Tabla 5-6: Estaciones de medición meteorológicas en el sector de estudio

ID	Estación	Coordenadas UTM WGS84 - H19S		Elevación (m s.n.m.)	Registro (desde - hasta)	Medición
		Norte (m)	Este (m)			
LS	La Serena	6.689.159	282.122	15	1971-2020	Meteorológica/DGA
PG	Prueba GPRS10	6.689.843	282.770	15	2013-2020	Meteorológica/DGA
PA	Pan de Azúcar	6.670.789	284.189	130	2009-2020	Meteorológica/Red Agromet

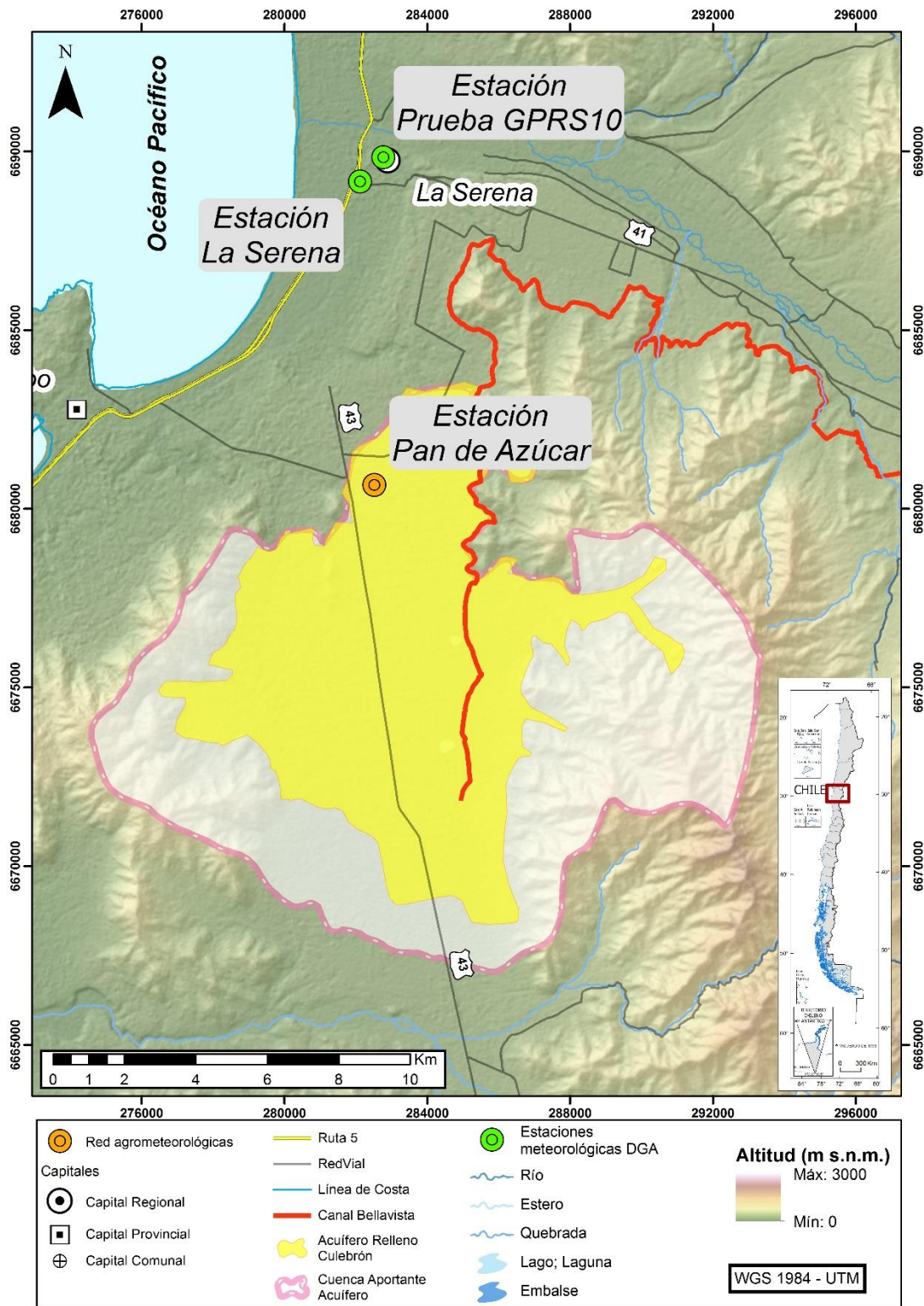
Fuente: BNA-DGA y Red Agromet

Respecto a las estaciones DGA, cabe mencionar que finalmente, fue considerada solo la estación "La Serena" debido a su mayor densidad estadística respecto a la estación "Prueba GPRS10", la cual se encuentra ubicada a 1 km de distancia al norte de la estación "La Serena". En relación a la estación "La Serena", se destaca que tiene aproximadamente 40 años de información, lo cual se considera una extensa cantidad de información estadística capaz de representar adecuadamente la precipitación media anual de la zona.

Por otra parte, la red agrometeorológica cuenta con la información de la estación "Pan de Azúcar", la cual se encuentra ubicada dentro del sector acuífero delimitado (lo cual se considera ideal), sin embargo, posee solo 10 años de información.

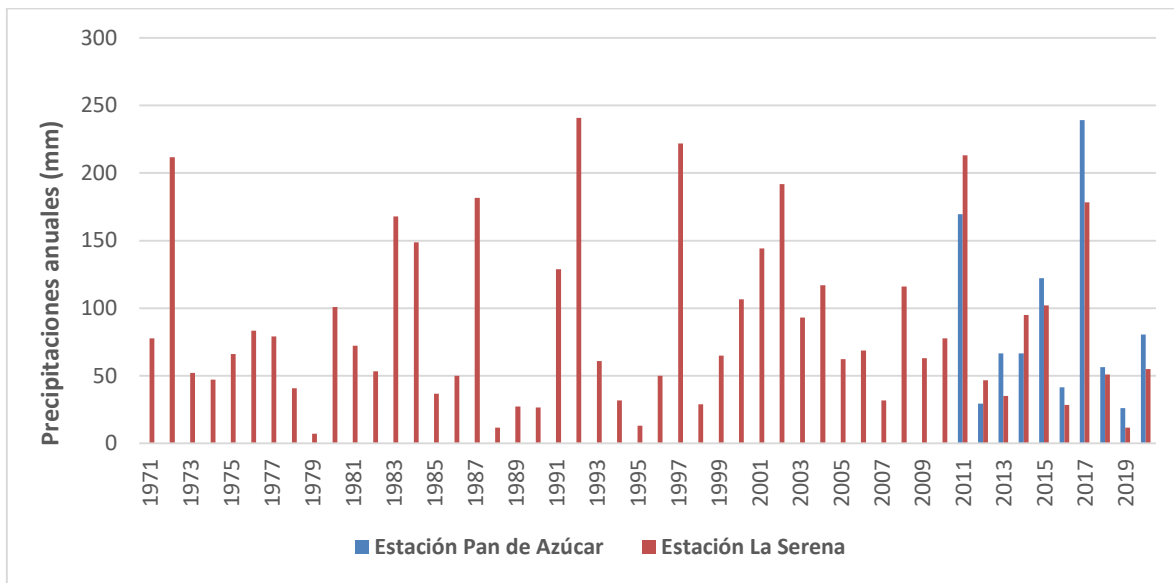
En la Figura 5-10 se presentan las precipitaciones anuales para las estaciones La Serena y Pan de Azúcar. Se observa que en general, la respuesta de ambas estaciones es similar mostrando un ciclo en los últimos 10 años bastante parecido, con una correlación superior al 80%.

Para más información de rango y meses con información de las estaciones se puede revisar el **Anexo B**.



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos DGA e INIA

Figura 5-9: Ubicación estaciones meteorológicas



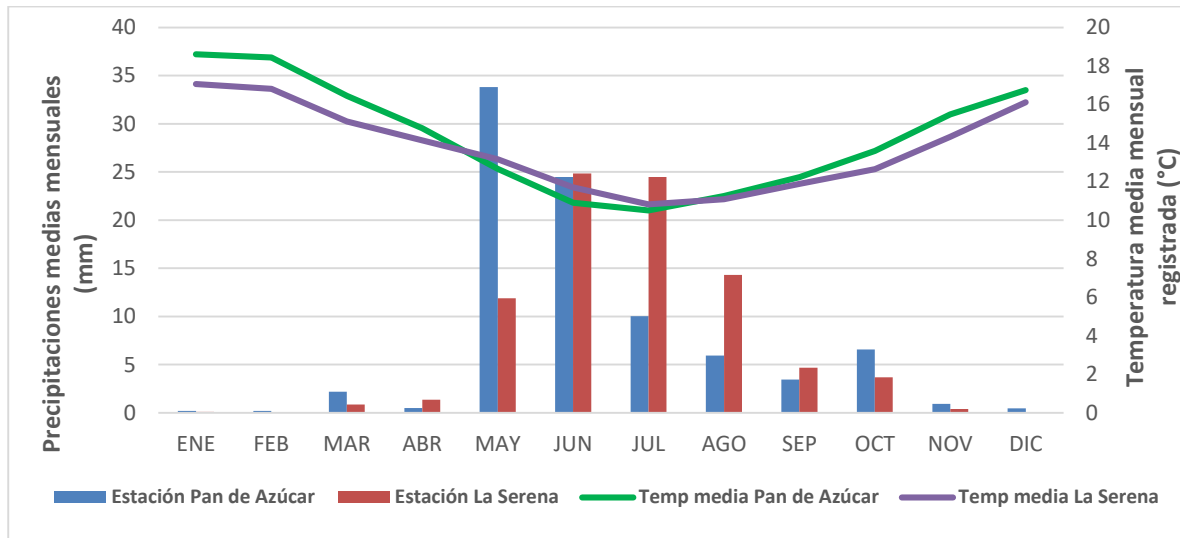
Fuente: Elaboración propia con antecedentes DGA-BNA y Agromet

Figura 5-10: Precipitaciones anuales estaciones La Serena y Pan de Azúcar

Respecto a los años analizados, para el caso de la estación Pan de Azúcar, se descartó la información correspondiente al año 2010 debido a que, para ese año la estación no contaba con información suficiente para poder identificar la precipitación máxima anual ocurrida. De forma análoga, para la estación La Serena, se descartó la información correspondiente a los años 1989, 2019 y 2020 puesto que no contaban con suficiente información.

Se presenta en la Figura 5-11 las precipitaciones medias mensuales registradas por ambas estaciones. Para el caso de la estación "Pan de Azúcar", el período de registro utilizado para la construcción de este gráfico corresponde a las precipitaciones mensuales registrados entre los años 2013 y 2020. Respecto a la estación DGA "La Serena", el período de registro considerado corresponde a los caudales mensuales registrados entre los años 1971 y 2020.

Se destaca de las precipitaciones medias mensuales de ambas estaciones, la similitud del comportamiento entre ambas con precipitaciones prácticamente nulas en la época de verano. Se aprecia en la estación La Serena el comportamiento pluvial asociado a los meses de invierno a diferencia de la estación Pan de Azúcar que registra las más grandes precipitaciones para el mes de mayo. En términos de temperatura, el comportamiento mostrado por ambas estaciones también es similar, con una temperatura media de 14,3 °C para la estación Pan de Azúcar, y 13,7 °C para La Serena.

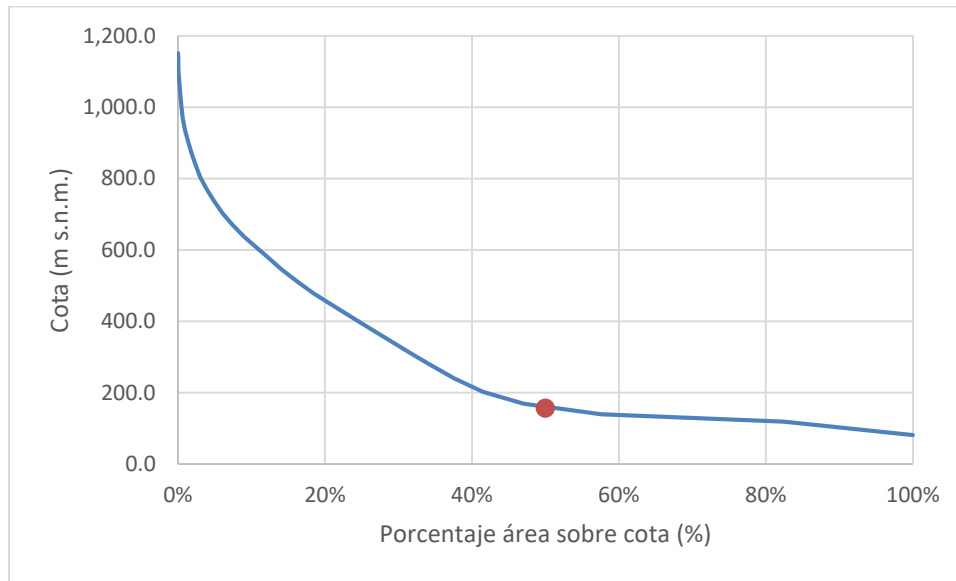


Fuente: Elaboración propia a partir del registro de precipitaciones de estación DGA y de la red Agrometeorológica INIA

Figura 5-11: Variables climáticas medias mensuales históricas por estación

Dado que, la estación La Serena posee una mayor cantidad de información respecto a la estación Pan de Azúcar, resultaría adecuado definir esta estación como fuente de información principal, sin embargo, antes de definir la estación principal es necesario identificar cuál de ellas se encuentra más cercana al centroide de la cuenca estudiada, ya que se considera que la información de una estación meteorológica es representativa de la cuenca si se encuentra ubicada a una altura tal que, el 50% del área de la cuenca se encuentre por debajo de dicha cota. Esto, debido a que las precipitaciones aumentan con la altura.

Con el fin anterior, se construyó la curva hipsométrica de la cuenca, que liga la altura con la superficie. Su cálculo se presenta en el **Anexo B**, y se muestra en la Figura 5-12, donde el punto rojo denota la ubicación del punto medio de la cuenca, el que está a una cota de 156,7 m.s.n.m. Usando la información de la Tabla 5-6, se tiene que entre las estaciones Pan de Azúcar y la Serena, la primera es mas representativa del régimen de escurrimiento, ya que cerca de un 75% del área de la cuenca se encuentra sobre la estación, en contra de un 100% para la estación La Serena. Por ende, para este análisis se considera mas representativa la estación Pan de Azúcar, incluso al no cumplir la condición de área indicada en el párrafo anterior, además de disponer de registros mas cortos.

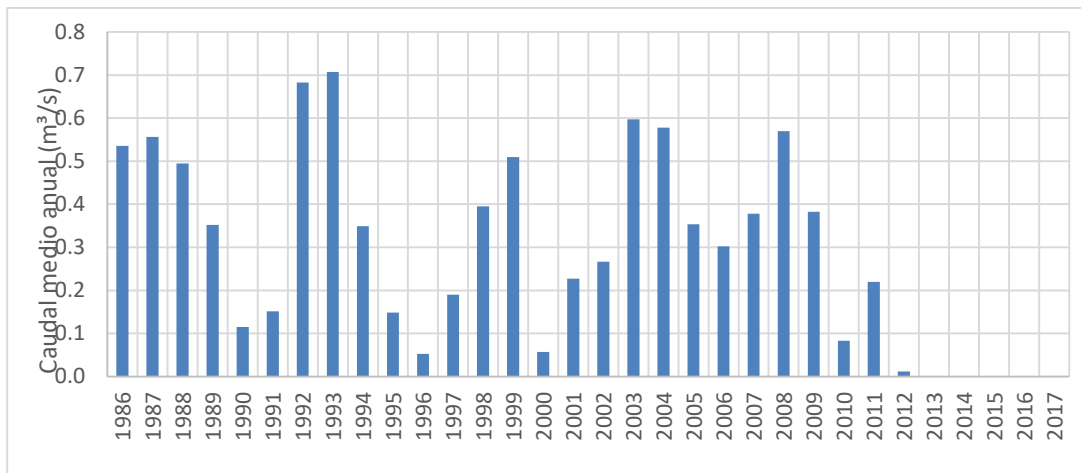


Fuente: Elaboración propia

Figura 5-12: Curva Hipsométrica

5.2.1.2 Estación Fluviométrica "Estero El Culebrón en el sifón"

El estero "El Culebrón", el cual es el principal cauce que atraviesa el acuífero estudiado, tiene una estación de medición fluviométrica aguas abajo del acuífero estudiado. Esta estación de medición posee un registro desde el año 1986 hasta el año 2017, sin embargo, este registro no es estrictamente continuo puesto que, los años 2011, 2013, 2014 y 2017 no poseen suficiente información para realizar una estimación del caudal medio anual pasante por este estero (ver Figura 5-13).



Fuente: Elaboración propia a partir de información estadística DGA

Figura 5-13: Caudal medio anual registrado por la estación "Estero El Culebrón en el Sifón"

Los registros estadísticos de esta estación de medición fluviométrica evidencian un comportamiento cíclico en el estero el culebrón a una escala temporal aproximada de 5 años, sin embargo, este comportamiento no se verifica en el tramo desde el año 2010 al 2017. Si bien, los años, 2011, 2013, 2014 y 2017 tienen solo entre 4 y 7 meses con información y, por tanto, no es posible considerar estimar el caudal medio anual de estos años, si es posible destacar que se evidencia una depresión significativa de los caudales pasantes por el estero "El Culebrón" durante estos años alcanzando un caudal nulo desde el año 2013 en adelante.

El comportamiento cíclico antes descrito es usual para cauces, puesto que se condice con las escalas temporales de variaciones meteorológicas (tales como años secos y húmedos), sin embargo, la información registrada desde los años 2010 a 2017 no responde a este patrón, esto se debe a que el estero "El Culebrón" se encuentra fuertemente intervenido, lo cual, sumado a la escases hídrica de la región, provocaron que el estero se secase durante estos últimos años.

5.2.2 Precipitación Anual

Para estimar la recarga producida por las precipitaciones se consideró que la escala de tiempo adecuada es anual, ya que las crecidas puntuales (por ejemplo, máximas en 24 horas) permiten cuantificar la recarga producto de fenómenos meteorológicos inusuales (como fenómenos de tormenta particulares) y, por tanto, estos fenómenos, no pueden ser considerados como valores de recarga esperados para el acuífero.

Según la información estadística de la estación "Pan de Azúcar", la precipitación acumulada anual registrada por esta estación meteorológica es de 90 mm. Sin embargo, tal como se mencionó anteriormente, la información de esta estación es escasa, por este motivo, la precipitación acumulada anual fue comparada con la registrada por la estación "La Serena" la cual registra 89 mm.

La gran similitud entre las precipitaciones acumuladas anuales promedio, permite ratificar la validez de la precipitación media anual registrada por la estación "Pan de Azúcar". Los resultados del análisis se presentan en el **Anexo B**.

Al considerar la cuenca aportante al acuífero, el caudal máximo posible de aportar por precipitación es a lo más de 570 l/s, ya que en este cálculo no se consideran pérdidas a nivel superficial, ya sea por retención foliar, evaporación, o evapotranspiración de la vegetación existente. De hecho, al aplicar la ecuación de Blanney y Criddle modificada, la precipitación efectiva es de 80 mm, con lo que la recarga máxima por este concepto es a lo más de 507 l/s.

5.2.3 Caudal Canal Bellavista

El caudal aportante al acuífero, se encuentra conformado en gran parte por aportes entregados por el canal bellavista y excesos de riego dentro de la cuenca. Por lo tanto, resulta de gran interés conocer los caudales pasantes por este canal.

En el estudio desarrollado por ARCADIS Chile para la CNR (2015), se presentó un completo análisis de este canal incluyendo mediciones de aforo y pérdidas calculadas.

En primer lugar, es necesario identificar la sección del canal bellavista que se encuentra afectando el acuífero. En la Figura 5-15 es posible observar que solo los últimos 12 km del canal (Km 35 en adelante, medido desde la compuerta inicial aguas arriba) se encuentran dentro del acuífero estudiado, por lo tanto, los caudales pasantes desde ese punto serán los que generen un caudal aportante al acuífero.

En la Tabla 5-7 se presentan los caudales medidos en los aforos realizados en el estudio CNR (2015).

Tabla 5-7: Caudales de Aforo Canal Bellavista

Tramo (km)		Longitud (km)	Caudal medido (m ³ /s)		Pérdida de Caudal		
Inicio	Término		Inicio	Término	(m ³ /s)	(%)	(%/km)
0,1	1,8	1,7	1,145	1,116	0,029	3%	1%
32,9	35,1	2,2	0,757	0,629	0,128	17%	8%
35,1	36,8	1,7	0,629	0,563	0,066	10%	6%
41,7	45,2	3,5	0,472	0,41	0,062	13%	4%
47	48,5	1,5	0,347	0,339	0,008	2%	2%
49,2	50,0	0,8	0,801	0,792	0,009	1%	1%
50,0	50,8	0,8	0,792	0,732	0,06	8%	9%
52,2	54,2	2	0,195	0,161	0,034	17%	9%

Fuente: CNR (2015)

Se puede observar en la tabla anterior que, la primera fila corresponde a los caudales medidos en el inicio del canal Bellavista aguas arribas, la cual permite identificar el orden de magnitud del caudal pasante por este canal. En las filas posteriores, se presenta el caudal aforado desde el tramo de interés hasta el final del canal. Es posible advertir una disminución considerable de los caudales producto de las filtraciones ocurridas los primeros 32 km de canal.

A lo largo del tramo de interés del canal, se obtuvo una pérdida de caudal por km en promedio del 6%. Las pérdidas porcentuales calculadas en esta última sección del canal fueron de las más grandes medidas debido a que la sección del canal en esta zona es más grande comparada con el caudal que transporta, lo que genera mayores tiempos de concentración. Además, previo al desarrollo de las mediciones, se ejecutaron obras de excavación en esta sección, lo

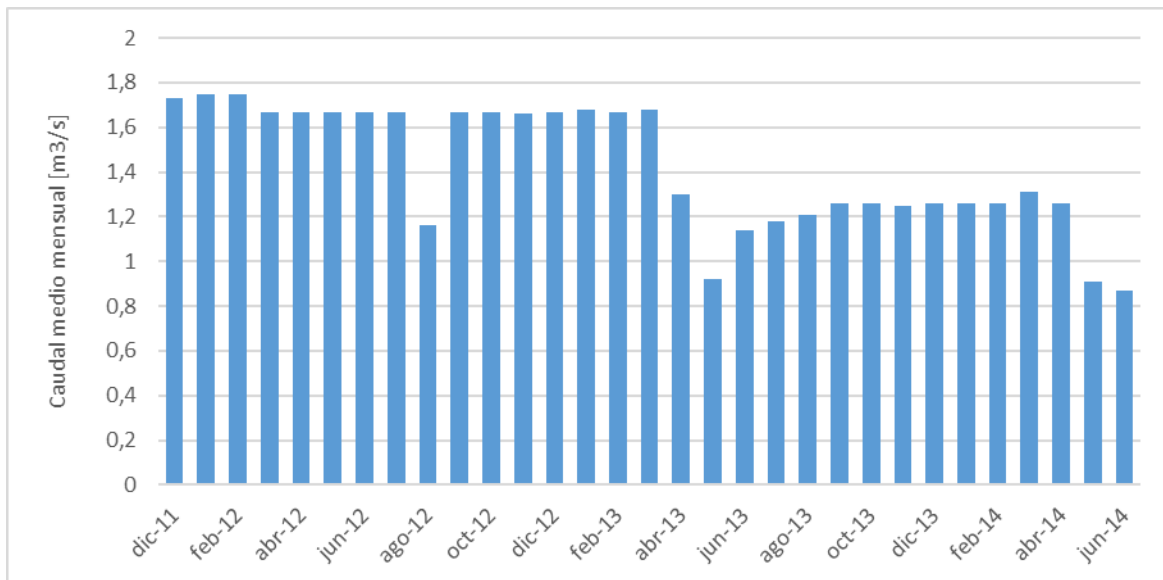
que generó la pérdida de la primera capa formada por la acumulación de sedimentos, la cual realizaba la función de impermeabilizar el canal.

No obstante, se debe reconocer que las mediciones de aforo presentadas, fueron realizadas en forma puntual para el desarrollo de dicho estudio, por lo tanto, no permiten asegurar que el caudal medio anual pasante por el canal sea el presentado en la tabla anterior. Por este motivo, resulta de gran relevancia conocer el caudal medio pasante por el canal Bellavista.

La Figura 5-14 presenta los caudales medios mensuales medidos en la bocatoma del canal Bellavista desde diciembre del año 2011 hasta junio del año 2014.

Aproximadamente, el caudal medio anual pasante por el canal bellavista es de 1,5 m³/s considerando los años completos 2012 y 2013.

Finalmente, a partir del supuesto de que las pérdidas porcentuales registradas para los aforos realizados son similares para el caudal medio anual del canal Bellavista calculado, se presenta en la Tabla 5-8 el caudal pasante desde el Km 32 en adelante y las pérdidas por filtración asociadas para el caudal medio anual calculado.

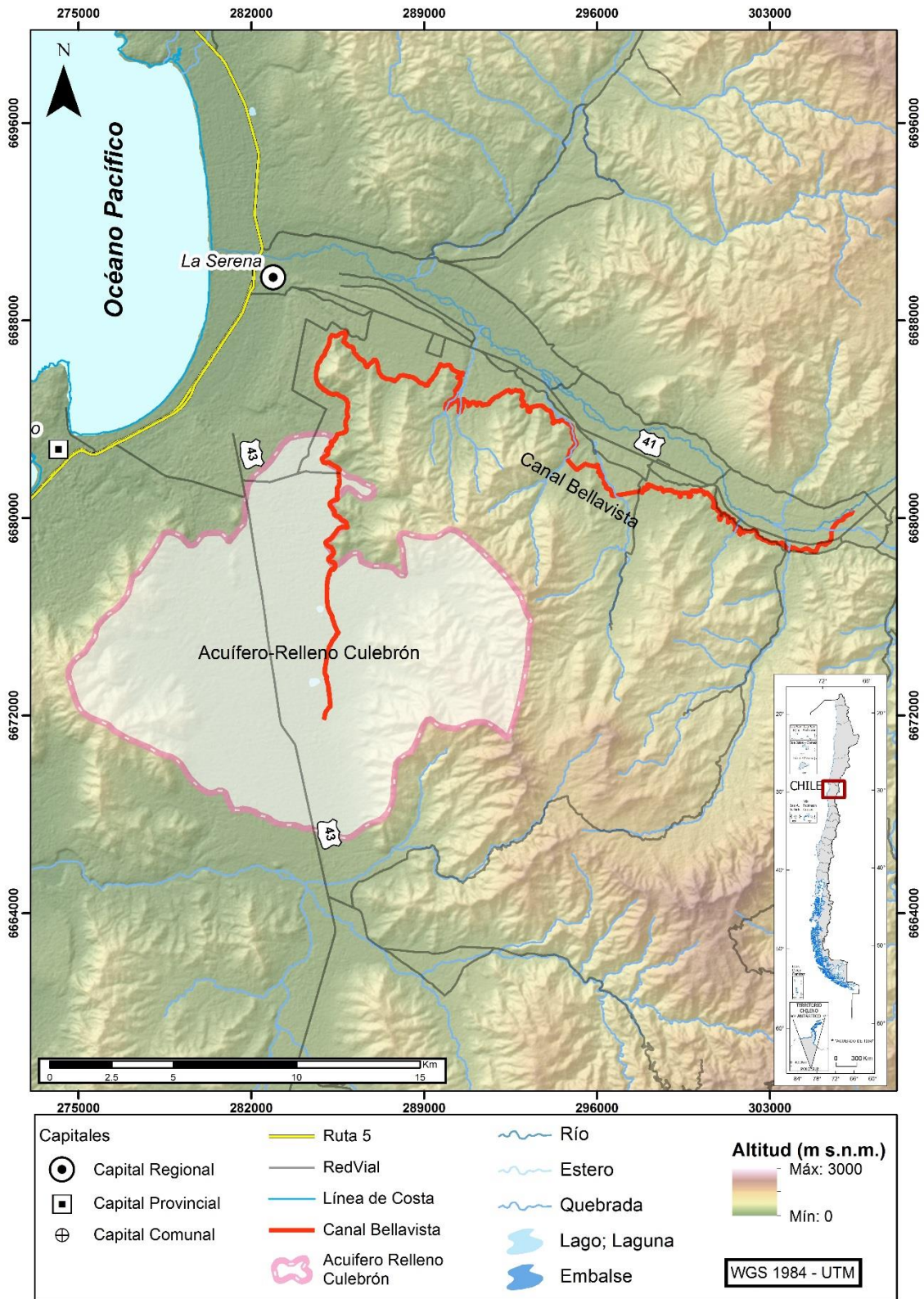


Fuente: CNR (2015)

Figura 5-14: Caudales Medios Mensuales canal Bellavista

Se desprende de la Tabla 5-8 que el caudal infiltrado en el tramo comprendido desde el Km 32,9 hasta el final es de aproximadamente 432 l/s.

El análisis desarrollado se presenta en el **Anexo B**.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-15: Canal Bellavista y su extensión dentro del acuífero "Relleno-Culebrón".

Tabla 5-8: Caudales medios anuales pasantes por el canal Bellavista para el caudal medio anual calculado al inicio del canal

Tramo (km)		Longitud (km)	Caudal medido (m ³ /s)		Pérdida de Caudal		
Inicio	Término		Inicio	Término	(m ³ /s)	(%)	(%/km)
0,1	1,8	1,7	1,500	1,462	0,038	2,5%	1,5%
1,8	3,9	2,1	1,462	1,293	0,169	11,6%	5,5%
3,9	6,3	2,4	1,293	1,286	0,007	0,5%	0,2%
6,3	8,1	1,8	1,286	1,195	0,091	7,1%	3,9%
12,4	14,5	2,1	1,304	1,304	0,000	0,0%	0,0%
14,5	15,5	1	1,304	1,304	0,000	0,0%	0,0%
15,5	17,5	2	1,304	1,174	0,130	10,0%	5,0%
17,5	19,8	2,3	1,174	1,139	0,035	3,0%	1,3%
19,8	22,6	2,8	1,139	1,071	0,068	6,0%	2,1%
22,6	25	2,4	1,071	1,002	0,068	6,4%	2,7%
25	27,1	2,1	1,002	1,002	0,000	0,0%	0,0%
27,1	30,5	3,4	1,002	0,961	0,041	4,1%	1,2%
30,5	31,7	1,2	0,961	0,961	0,000	0,0%	0,0%
31,7	32,9	1,2	0,961	0,890	0,071	7,3%	6,1%
32,9	35,1	2,2	0,890	0,740	0,151	16,9%	7,7%
35,1	36,8	1,7	0,740	0,662	0,078	10,5%	6,2%
41,7	45,2	3,5	0,555	0,482	0,073	13,1%	3,8%
47	48,5	1,5	0,408	0,399	0,009	2,3%	1,5%
49,2	50	0,8	0,942	0,932	0,011	1,1%	1,4%
50	50,8	0,8	0,932	0,861	0,071	7,6%	9,5%
52,2	54,2	2	0,229	0,189	0,040	17,4%	8,7%

Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Recargas al sistema subterráneo

El elemento final es incorporar el efecto de los aportes de las zonas de riego. Con el fin de determinar este aporte se requiere conocer los cultivos existentes en el área, la superficie cultivada, los métodos de riego junto a sus eficiencias y la oferta de agua. Toda esta información debe ser integrada y a partir de un análisis complejo que escapa a los alcances de este estudio, es posible determinar las recargas al sistema.

Por lo anteriormente expuesto, y al considerar los resultados generados por el modelo hidrológico del estudio DGA (2020), es posible estimar para el acuífero Culebrón una recarga promedio de 1,052 m³/s para el periodo 1989 – 2018, recarga que incluye todos los efectos antes mencionados, es decir, pérdidas desde el canal Bellavista, aporte de las precipitaciones y las pérdidas de las zonas de riego. En particular, para la situación actual la recarga asciende a 435 l/s, considerando como representativo de la situación actual el periodo 2015-2018. Se hace notar que en la situación modelada, el canal Bellavista no portea agua en algunos meses, lo que justifica la drástica reducción de recarga al acuífero. La serie de recargas generada por el modelo WEAP se presentan en el **Anexo B**.

Se hace notar que la modelación desarrollada no permite verificar la condición de mezcla isotópica inicialmente referida, pero al menos garantiza que en su determinación están incluidos todas las posibles fuentes que la originan.

5.3 Caracterización hidrogeológica

5.3.1 Caracterización geológica

El relleno del área de estudio está compuesto por sedimentos marinos y continentales, conformados por rocas consolidadas y depósitos semi-consolidados. En la Figura 5-16 se muestra la imagen con la caracterización geológica que se describe en lo que sigue.

5.3.1.1 Rocas consolidadas

El basamento rocoso está constituido en el borde Este mayoritariamente por rocas estratificadas cretácicas y en el borde occidental por rocas estratificadas e intrusivas de edad Jurásico. El sistema de rocas cretácicas está formado por una secuencia sedimentaria y volcánica, principalmente de origen continental, denominado Formación Arqueros (Ka) con rocas volcánicas depositadas en ambientes submarinos y subaéreos, y que incluye una gruesa intercalación de sedimentos marinos, lavas porfíricas (Ka(a1)), andesitas basálticas (Ka(a2)), tobas y brechas piroclásticas (ka(d)) (SERNAGEOMIN, 2006).

El sistema de rocas estratificadas del Jurásico lo conforma el Complejo Volcánico continental Agua Salada (Jas), con lavas andesíticas y dacíticas y escasas intercalaciones de areniscas y lutitas. Las rocas intrusivas presentan afloramientos subordinados en la cuenca y tienen cierta importancia en el extremo sur occidental del sector estudiado, en el resto del área sólo se reconocen pequeños afloramientos dispersos. Se trata de intrusivos graníticos a dioríticos del Cretácico Inferior alto e intrusivos dioríticos de edad Neocomiano (Jkd) (SERNAGEOMIN, 2006).

5.3.1.2 Depósitos semiconsolidados

Presentan una gran exposición en el valle de Pan de Azúcar y corresponden a depósitos sedimentarios de origen continental y marino. Los depósitos marinos de la Formación Coquimbo compuestos por areniscas finas limosas (MPlcq (a)) afloran ampliamente en la ladera poniente de la hoya, mientras que los sedimentos de la Formación Confluencia (MPlc (a)) constituidos por conglomerados medios a muy gruesos con intercalaciones de arenas finas a gruesas, afloran en la cabecera, eje central y ladera oriental de la hoya del Estero Culebrón (SERNAGEOMIN, 2006).

La Formación Coquimbo comprende una secuencia sedimentaria marina fosilífera con débil litificación. En la zona de estudio se han distinguido dos facies sedimentarias de ambiente

litoral y transicional. La primera facies aflora en la zona costera y corresponde a areniscas finas de coloración gris anaranjado a pardo claro, con intercalaciones de areniscas muy gruesas de guijarros con bioclastos y escasas diatomitas.

La segunda facies comprende calizas bioclásticas blancas con intercalación de areniscas bioclásticas finas a gruesas de color pardo claro. Esta facies se expone en los flancos de las quebradas y en el sector llano del poniente de la hoya del Estero Culebrón, presenta espesores de hasta 40 m en la base de la quebrada Lagunillas y hasta 60 m en las inmediaciones del cerro Pan de Azúcar.

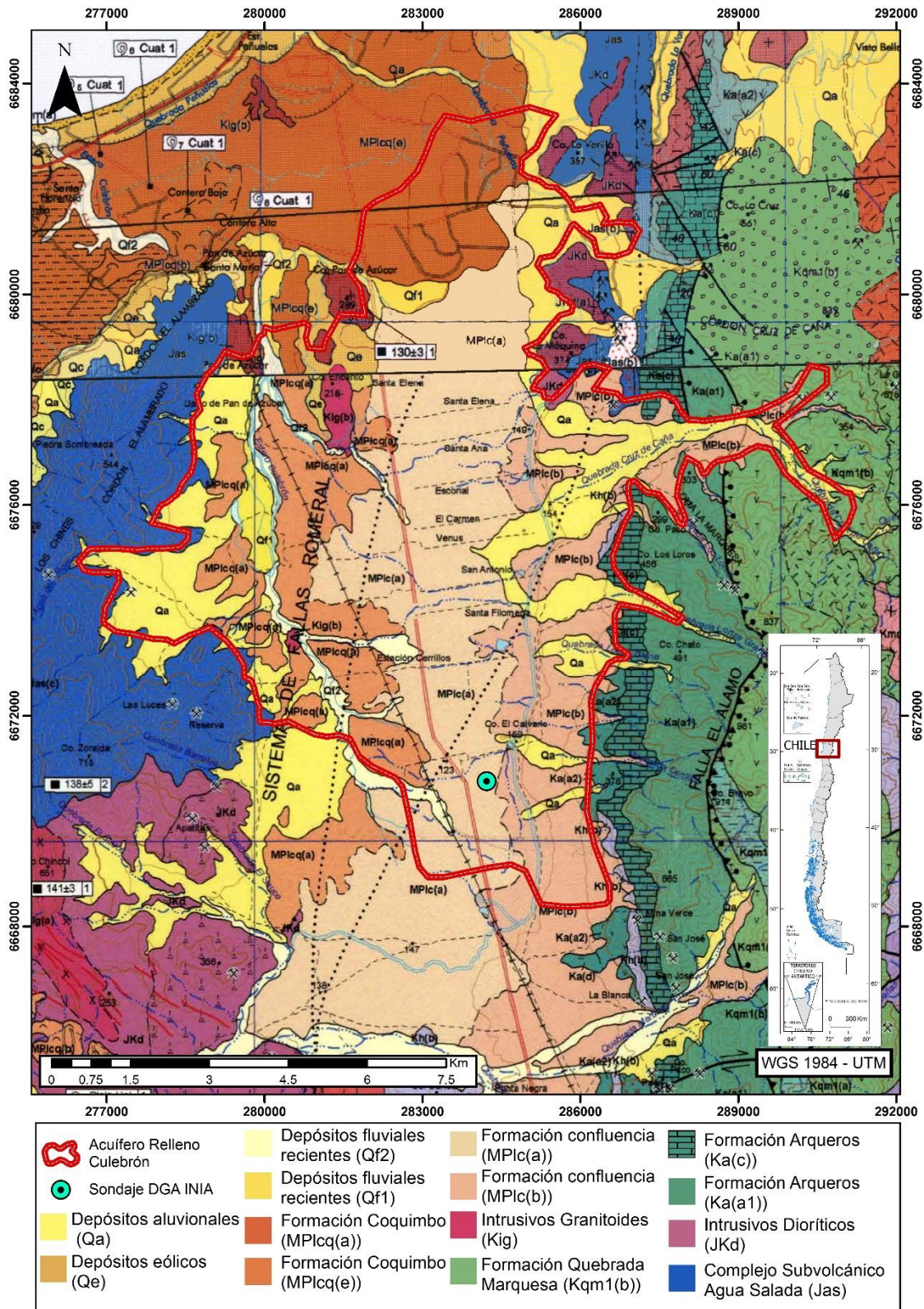
La formación Confluencia comprende secuencias sedimentarias de gravas gruesas bien redondeadas con intercalaciones de areniscas poco consolidadas y lentes de limos continentales y brechas muy gruesas con abundante matriz limo arenosa. En la zona de estudio se presentan como faciales fluviales, clastosoportadas con estratificación gruesa de gravas y clastos redondeados, con una edad miocen – pleistocena.

5.3.1.3 Depósitos aluvionales Qa – Cuaternario

Constituyen el relleno de quebradas y forman conos en la salida de ellas, donde se pueden observar en pequeñas quebradas afluentes. Son depósitos originados por flujos turbulentos y breves, con cierta incidencia en procesos de remociones en masa. Están compuestos por brechas no consolidadas, polimícticas, con matriz de arena y limo. Su edad se calcula al Pleistoceno-Holoceno (SERNAGEOMIN, 2006).

5.3.1.4 Depósitos Fluviales Recientes Qf2 – Cuaternario

Constituyen el relleno de cauces fluviales. En la zona de estudio se presentan como depósitos recientes (Holoceno), originados por flujos turbulentos y breves, con cierta incidencia en procesos de remociones en masa. Están compuestos por gravas gruesas y muy gruesas polimícticas, con abundante matriz de arena no consolidada. (SERNAGEOMIN, 2006).



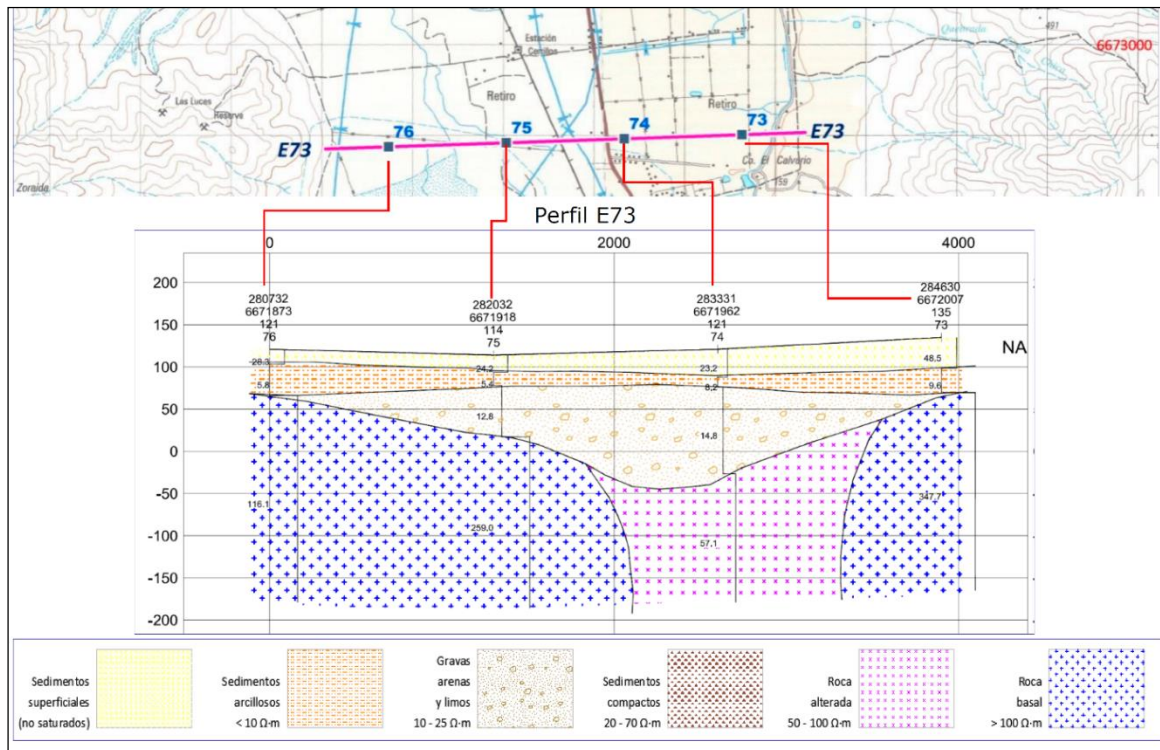
Fuente: CARTAS GEOLÓGICAS 1:100.000 SERNAGEOMIN (2000 y 2006)

Figura 5-16: Mapa Geológico

5.3.2 Antecedentes Geofísicos

5.3.2.1 Resultados del levantamiento Geofísico realizado por CORFO (2015)

La Figura 5-17 presenta los perfiles TEM que se realizaron en el área de Estudio, donde la estación TEM 74 del perfil E73 está próxima al punto demarcado para la posición del Sondaje (1 km de distancia aprox.) se observa un primer estrato de sedimentos superficiales no saturados de un espesor aproximado de 25 m, seguido por un estrato no permeable de tipo arcilloso de un espesor de 20 m, para pasar a un tercer estrato con compuesto de materiales gravas arenas limos con un tipo de permeabilidad media, que podría considerarse la unidad acuífera del sector, con un espesor aproximado de 100 m, por último, se llega a roca alterada con una profundidad estimada entre 100 m a 150 m según la Figura 5-17 que presenta los resultados del análisis gravimétrico corregido para estimación de basamento rocoso (para estos efectos roca basamental).



Fuente: CORFO (2015)

Figura 5-17: Perfiles E73 TEM a 1 km al Norte del Sondaje DGA-INIA

5.3.2.2 Resultados del levantamiento Geofísico realizado por Geodatos (2019)

La geofísica realizada por GEODATOS SAIC en el año 2019 se presenta en la Figura 5-19, donde el perfil L2 con la estación TEM número 12 es la más cercana al área de estudio

(200 m de distancia), el primer estrato presenta un espesor de 15 m con una resistividad correspondiente a sedimentos secos, luego se presenta un segundo estrato de baja permeabilidad de sedimentos arcillosos de un espesor de 20 m, para pasar a un tercer estrato de 75 m de espesor con una resistividad correspondiente a gravas arenas limos saturadas (unidad acuífera), por último desde los 120 m, se presentan resistividades del orden de los 250 Ω -m correspondientes a roca basal (ver Figura 5-20 y Figura 5-21).

Para el área de estudio se definieron las siguientes unidades:

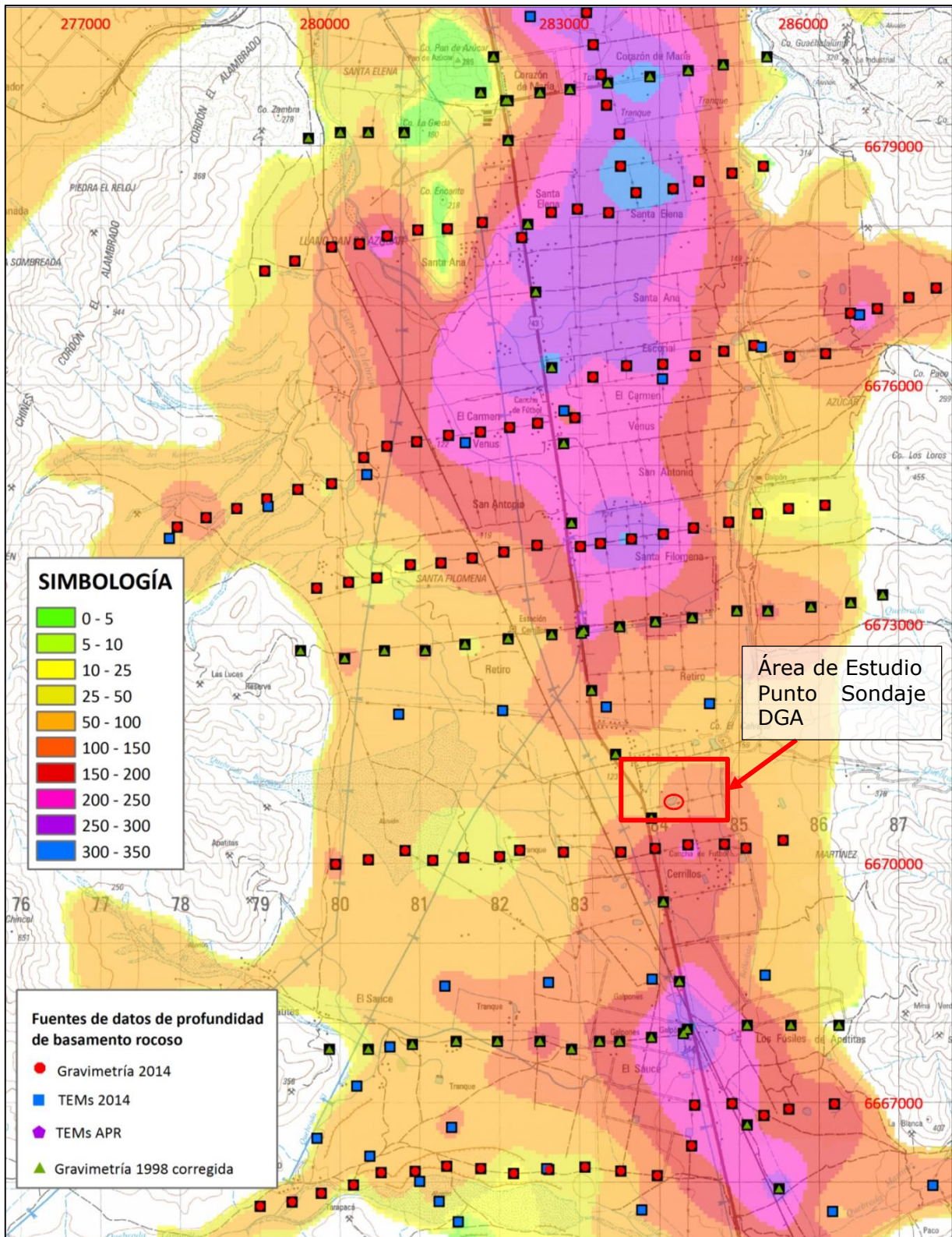
- **Unidad Superficial:** Interpretada como Sedimentos superficiales no saturados con resistividades en torno a los 80 Ω -m pero alcanzando valores en el rango de 50 – 100 Ω -m. Posee un espesor de 20 – 50 m y tiene una presencia constante en el área estudiada. (CORFO, 2015).

- **Unidad Conductora:** Presenta resistividades comprendidas entre 3 y 12 Ω -m; un espesor variable entre 10-40 m y un espesor anómalo de 100 m bajo la estación 105, se ubica entre la unidad superficial (sedimentos no saturados) y la unidad intermedia (gravas, arenas y limos). Esta unidad se ha interpretado como Sedimentos arcillosos, los cuales son sedimentos finos de baja permeabilidad (CORFO, 2015).

- **Unidad Intermedia:** Se observa a una profundidad entre 40-60 m, con una profundidad anómala de 140 m bajo la estación 105. Tiende a acuñarse hacia el sector Oriental de la zona de estudio y en el sector central es la unidad de mayor potencia alcanzando los 120 m de espesor. Con una resistividad entre 12–31 Ω -m se identifica como gravas, arenas y limos. El valor de resistividad para este estrato geoelectrico varía según el sector y tiene relación con el grado de humedad de los sedimentos prospectados (CORFO, 2015).

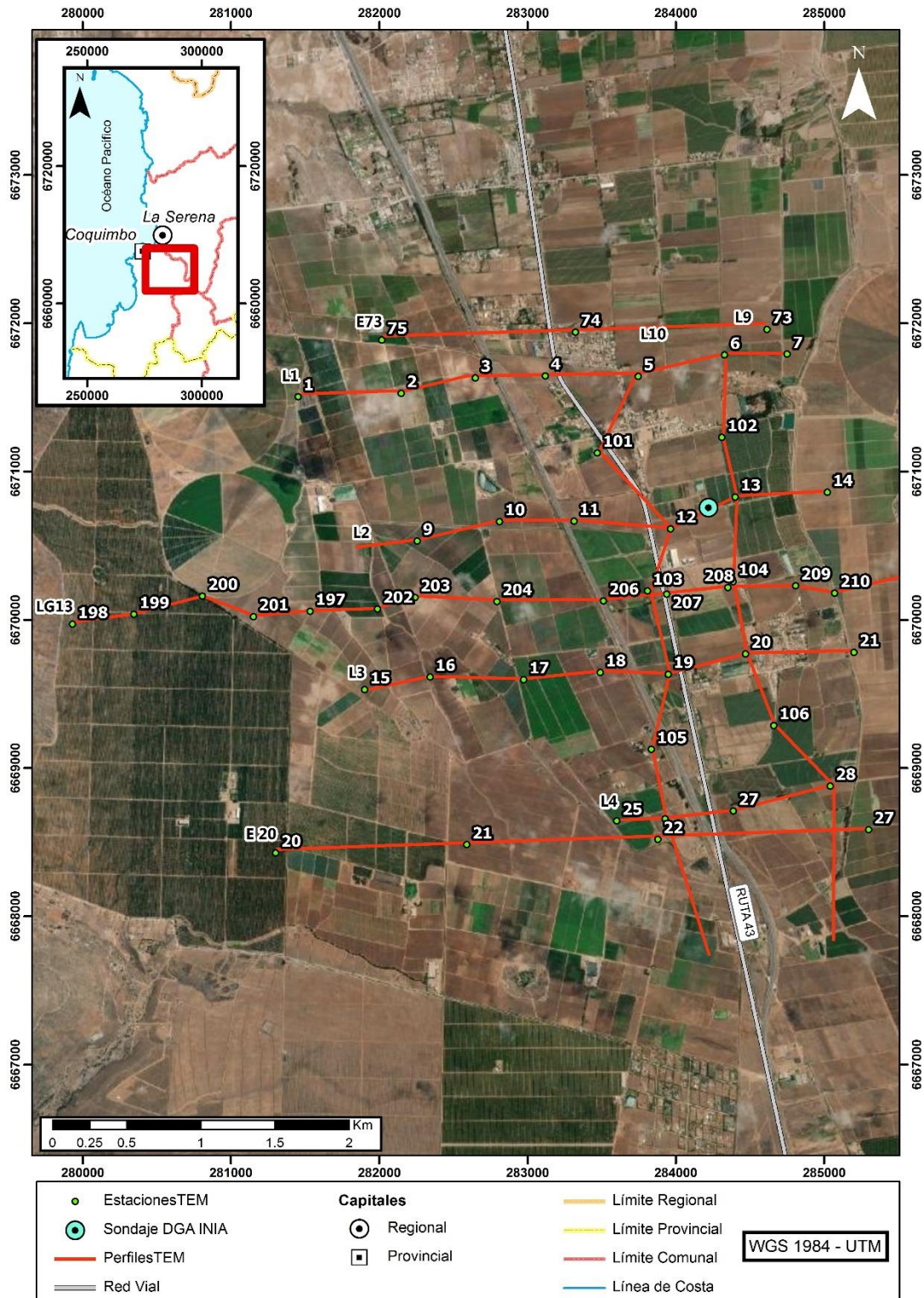
Existe una unidad de mayor resistividad que solo se ha identificado en algunas estaciones, con un valor en torno a los 40 Ω -m corresponde a sedimentos compactos.

- **Unidad asociada a basamento:** Unidad resistiva con valores entorno a los 200 Ω -m pero alcanzando resistividades en el rango de 136–384 Ω -m. Con profundidades variables entre 70–180 m se ha observado en toda la zona prospectada, salvo ciertas estaciones donde la señal no pudo alcanzar la profundidad donde ésta se encontraba y corresponde a la roca basal. Esta unidad en algunas estaciones se encontró bajo una sección de menores resistividades en el rango de 50–100 Ω m, presente en solo algunas estaciones esta sección se identificó como roca alterada (CORFO, 2015).



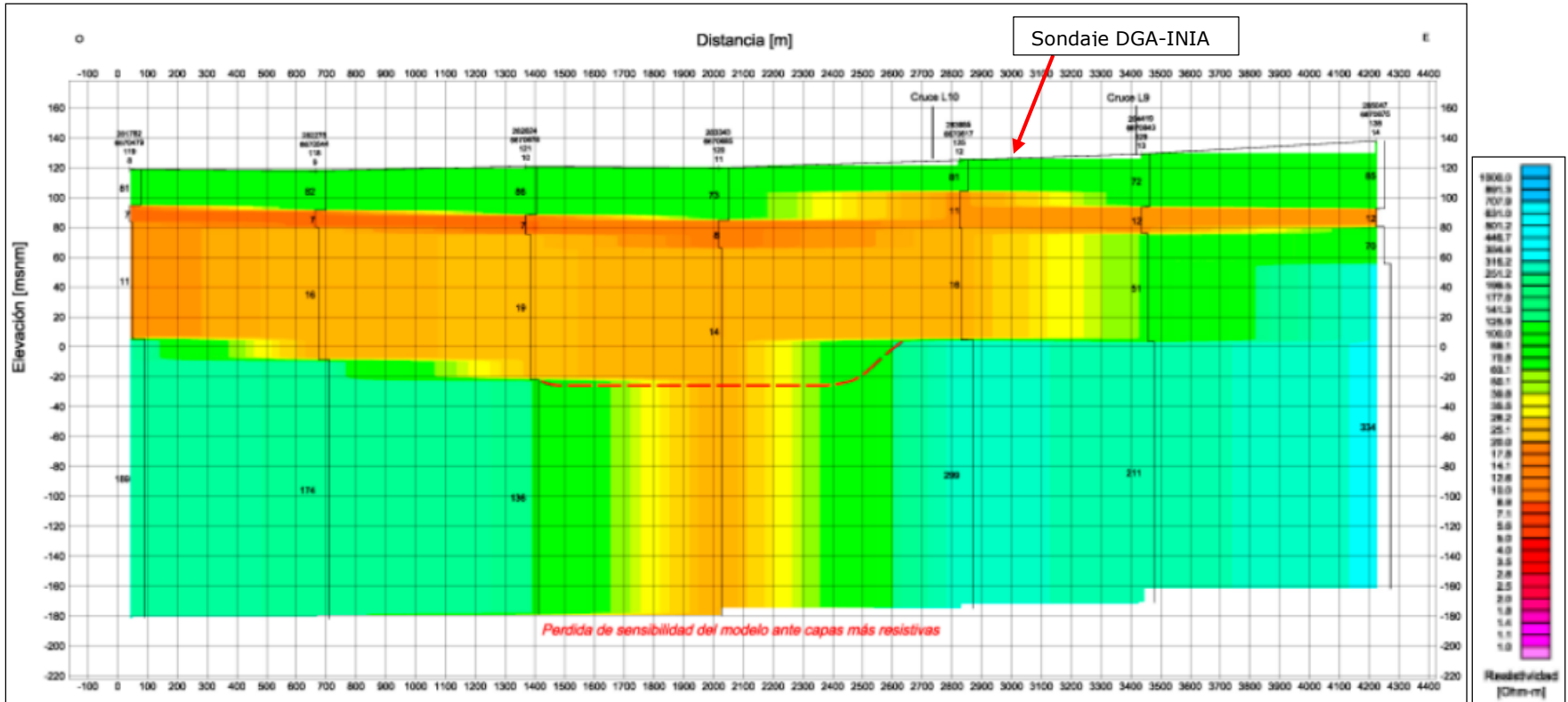
Fuente: CORFO (2015)

Figura 5-18: Perfiles Geofísicos realizados en el área de Estudio

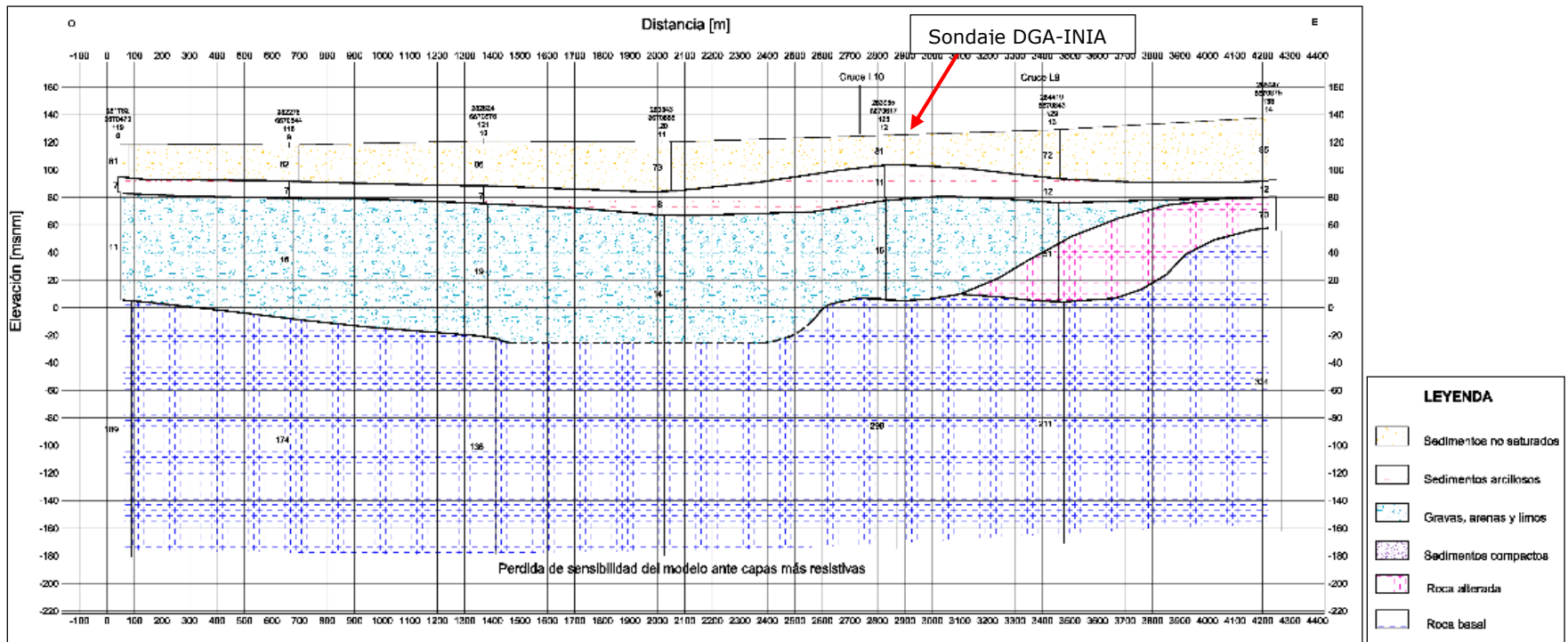


Fuente: Elaboración propia, a partir de Estudio CORFO (2015)

Figura 5-19: Ubicación Perfiles TEM



Fuente: CORFO (2015)
Figura 5-20: Perfil TEM L2



Fuente: CORFO (2015)

Figura 5-21: Perfil TEM L2 interpretado

5.3.3 Unidades Hidrogeológicas

En el estudio INIA, 2019 se identifican 4 unidades hidrogeológicas a partir de la revisión de antecedentes geológicos, datos piezométricos perfiles geofísicos.

Unidad I

Unidad ampliamente distribuida en la cuenca sedimentaria con desarrollo muy homogéneo en la subcuenca central, de espesor y características más variables en el área de la subcuenca Oeste. Presenta una profundidad variable entre 20 y 40 m. Esta unidad está conformada por limos y arcilla con contenidos muy subordinados y variables de arenas y clastos tamaño grava (INIA, 2019).

Esta unidad aflora y representa la porción superior de las unidades de origen marino correspondiente a la Formación Coquimbo y de origen fluvio aluvional correspondiente a la Formación Confluencia, por lo que su composición varía drásticamente en un perfil Oeste – Este. En el sector de la subcuenca Oeste estos sedimentos presentan coloración parda blanquecina a pardo claro y corresponden a sedimentos finos (INIA, 2019).

La presencia de este estrato superficial de material fino explica semi-confinamientos locales que presenta el acuífero. Inmediatamente al sur del cerro Pan de Azúcar esta unidad descansa directamente sobre rocas del basamento en el sector de separación entre las subcuencas oeste y central (INIA, 2019).

Unidad II

Presente exclusivamente en el dominio de la subcuenca Oeste, está conformada por sedimentos no consolidados a semi-consolidados de origen transicional costero a marino costero. El sector norte de la subcuenca oeste alcanza un máximo de 70 m y 25 a 30 m en el área central, en el sector sur, cerca de la quebrada Lagunillas, su espesor alcanza entre 40 y 50 m (INIA, 2019). Su constitución litológica está dada por areniscas, areniscas calcáreas bioclásticas y calizas. En general los estratos de calizas se ubican en profundidad, los que gradan hacia arriba y hacia la desembocadura a areniscas bioclásticas y areniscas, evidenciando un lento proceso de regresión marina en el sector (INIA, 2019).

Unidad III

Esta unidad alcanza grandes profundidades en el dominio de la subcuenca central, llegando a presentar espesores de hasta 210 m en el centro y sobre 300m en el área Norte del valle. El espesor de esta unidad disminuye rápidamente hacia el sector oriente, alcanzando espesores mínimos en la zona de trazado del Canal de Bellavista. Hacia el Este y ya en

terrenos de la subcuenca oriental aumenta el espesor de estos sedimentos hasta 50 m (INIA, 2019).

Esta unidad sedimentaria se encuentra tanto en la subcuenca central como oriental y está conformada por sedimentos continentales de la Formación Confluencia, de origen fluvio aluvial en el sector central del valle (subcuenca central) y con facies aluviales que engranan por interdigitación con las primeras en el área oriental del valle (subcuenca central y subcuenca este), (INIA, 2019).

Unidad IV

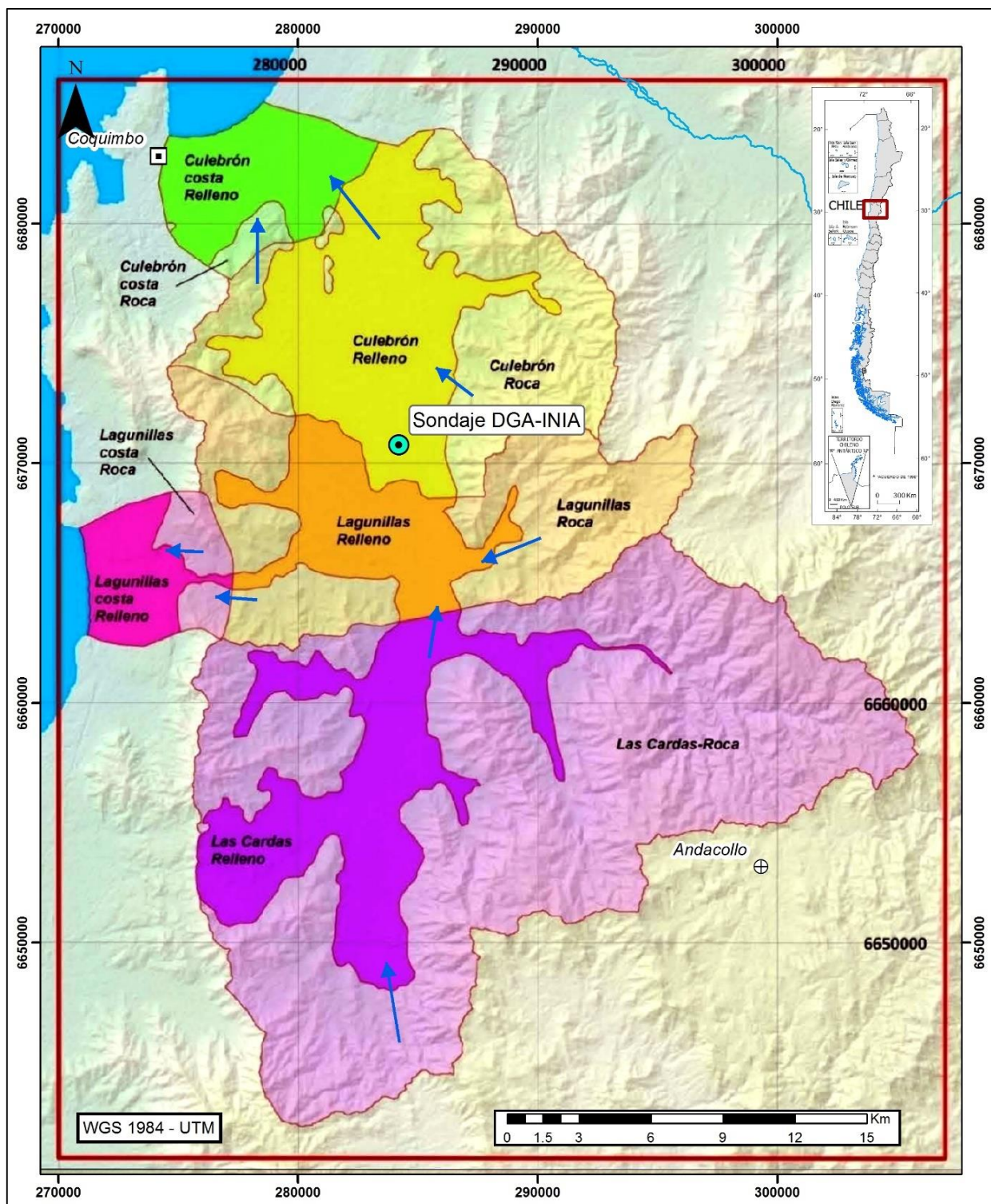
El basamento rocoso está formado predominantemente por rocas consolidadas volcánicas e intrusivas mesozoicas. Tanto en el borde Este como Oeste afloran extensamente facies volcánicas de las formaciones Agua Salada, Quebrada Marqueza y Arqueros (INIA, 2019).

La presencia de rocas intrusivas hace suponer que el área central de la cuenca puede estar conformado por un alto porcentaje de rocas de origen intrusivo. Estas rocas poseen algún grado de permeabilidad secundaria dada por fracturas y estructuras mayores tipo fallas (INIA, 2019).

5.3.4 Delimitación de Unidades Acuíferas

En el estudio "metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional" (DGA, 2014), se realiza una detallada descripción de las unidades acuíferas presente en el sistema acuífero del Valle del Pan de azúcar identificando 10 subsectores, las que son presentadas en la Figura 5-22, y se detallan a continuación:

- En la zona sur, aguas arriba de la quebrada Lagunillas, se definió el macro-sector Las Cardas. Según la geofísica disponible, en esa zona el relleno saturado tiene espesores saturados de a lo más 35 m y las transmisividades son inferiores a 5 m²/d.
- Inmediatamente aguas abajo del sector Las Cardas, se definió el macro-sector Lagunillas. Su límite norte se trazó coincidente con la divisoria de aguas subterráneas, que se encuentra más al norte que la divisoria de aguas superficiales. El flujo en este sector es hacia el Sur, Sur-Oeste y Oeste.
- El tercer macro-sector corresponde a la cuenca hidrogeológica del estero Culebrón. En esta zona el flujo es hacia el norte y nor-oeste.
- Posteriormente, los macro-sectores Culebrón y Lagunillas se dividieron según sus vertientes costeras, obteniéndose los 5 sectores acuíferos definitivos, antes mencionados.



Fuente: DGA (2014)

Figura 5-22: Flujos entre sub-sectores acuíferos

- El sub-sector Las Cardas-Relleno presenta cierta homogeneidad y un potencial hidrogeológico limitado. El espesor saturado en la zona, con materiales de granulometría gruesa, es de tan solo 32 m.
- El sub-sector Lagunillas-Relleno tiene un volumen sedimentario importante, con espesores saturados de arenas y gravas, cercanos a los 100 m.
- El sub-sector Culebrón-Relleno presenta las mejores condiciones hidrogeológicas del área estudiada. El relleno sedimentario alcanza una profundidad máxima cercana a los 350 m. Además, gran parte de ese sector es regado por el canal Bellavista, por lo tanto, existe una recarga por excedentes de riego. Debido a la disponibilidad hídrica superficial, las captaciones subterráneas constituyen un complemento del riego superficial y no son usadas de forma continua. Por otro lado, en Lagunillas el escenario es diferente debido a que existe un preponderante uso potable (abastecimiento de Andacollo, Tongoy, Guanaqueros, Las Tacas, etc.) (DGA, 2014b).

5.3.5 Derechos de aguas

De la base de datos del Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA, se obtiene la cantidad de derechos por tipo de uso, específicamente para la Cuenca Costera entre Elqui y Limarí en la que se inserta el acuífero el Culebrón (área de Estudio). La Tabla 5-9 presenta la información antes descrita asignando un porcentaje de uso sobre la totalidad de los derechos otorgados en la cuenca, y el área de estudio. De la Tabla 5-9 se puede observar que el mayor porcentaje de los derechos tienen uso para riego con un 66% que abastece al sector agrícola, en segundo lugar, con un 19% para uso de agua potable y en tercer lugar para la minería con un 11% de la extracción de la cuenca. La cuenca cuenta con un total de 854 derechos otorgados con un caudal total de 5.904 l/s, de los cuales 5.293 l/s tienen un régimen de extracción de permanente y continuos.

Tabla 5-9: Derechos subterráneos Cuenca Costera entre Elqui y Limarí

Tipo Uso	Cuenca			Área de Estudio		
	Cantidad	Total (l/s)	Porcentaje (%)	Cantidad	Total (l/s)	Porcentaje (%)
Agua potable	534	1.207	20%	107	264	10%
Riego	295	4.040	68%	69	1.731	66%
Minería	19	596	10%	10	583	22%
Otros	6	62	1%	5	60	2%
Total	854	5.904	100%	191	2.638	100%

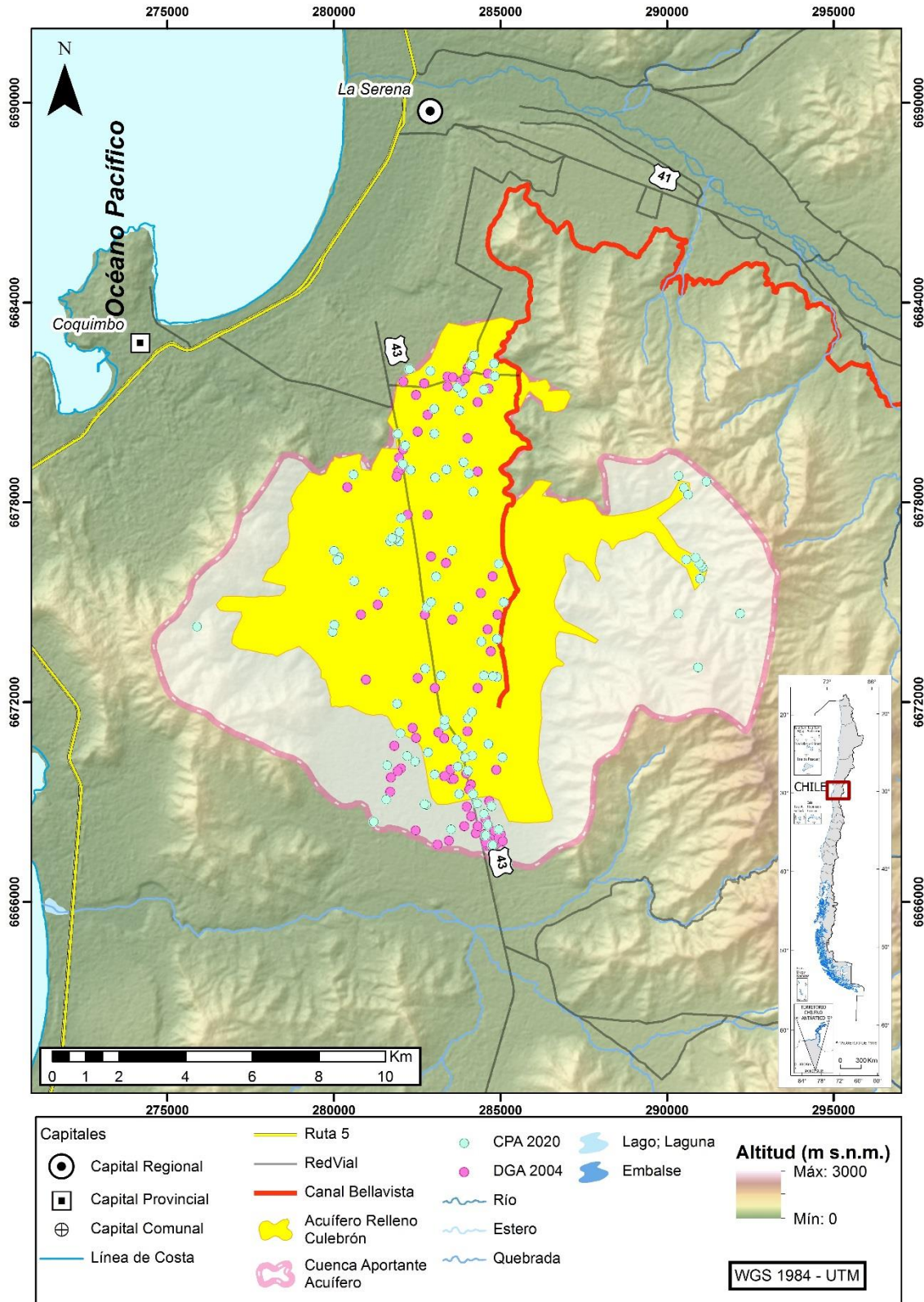
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos CPA-DGA¹²

¹² http://www.dga.cl/DGADocumentos/Derechos_Concedidos_IV_Region.xls

Se presenta en la Figura 5-23 la ubicación espacial de los derechos subterráneos otorgados en la cuenca. Para el área de estudio se identifican un total de 191 captaciones subterráneas las que presentan un régimen de extracción de "permanentes y continuos" de 2.638 l/s. Cabe destacar que los tipos de usos señalados en la Tabla 5-9 son de carácter estimativo dado que en el CPA no presenta esta información de manera completa, por lo que se determinó a través del giro del solicitante o la cantidad de caudal otorgado para asignar un tipo de uso. En la figura se muestran también los derechos consignados en el estudio DGA (2004b), los que suman 91 pozos con un caudal efectivo de 631 l/s. Se hace notar que la diferencia en caudal está dada por el hecho que el caudal reportado en el estudio DGA (2004b) corresponde a caudal efectivo, esto es, lo que realmente se extrae del acuífero. Por ejemplo, para riego se consideró un uso promedio de 6 h diarias, lo que equivale a 0,25. De esta forma, los caudales reportados en la Tabla 5-9 como caudales de extracción equivalen a 1.215,5 l/s, como caudal efectivo. La base de datos considerada se presenta en el **Anexo B**, en conjunto con el cálculo del caudal efectivo.

Se debe hacer notar que este caudal efectivo no considera la posibilidad de que haya pozos que no estén extrayendo agua, por lo que representa una cota superior a las extracciones actuales.

Cabe mencionar que mediante la Resolución DGA N° 672 emitida el 26 de noviembre del año 2003 se declara área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas al Sector Hidrológico de Aprovechamiento Común Culebrón-Lagunillas, provincia de Elqui, Región de Coquimbo. Que mediante minuta técnica DARH N°42 del 2003, establece que en el SHAC Culebrón-Lagunillas existe un riesgo de un descenso generalizado de los niveles estáticos en el largo plazo, debido a la insuficiente recarga natural en relación con la demanda existente.



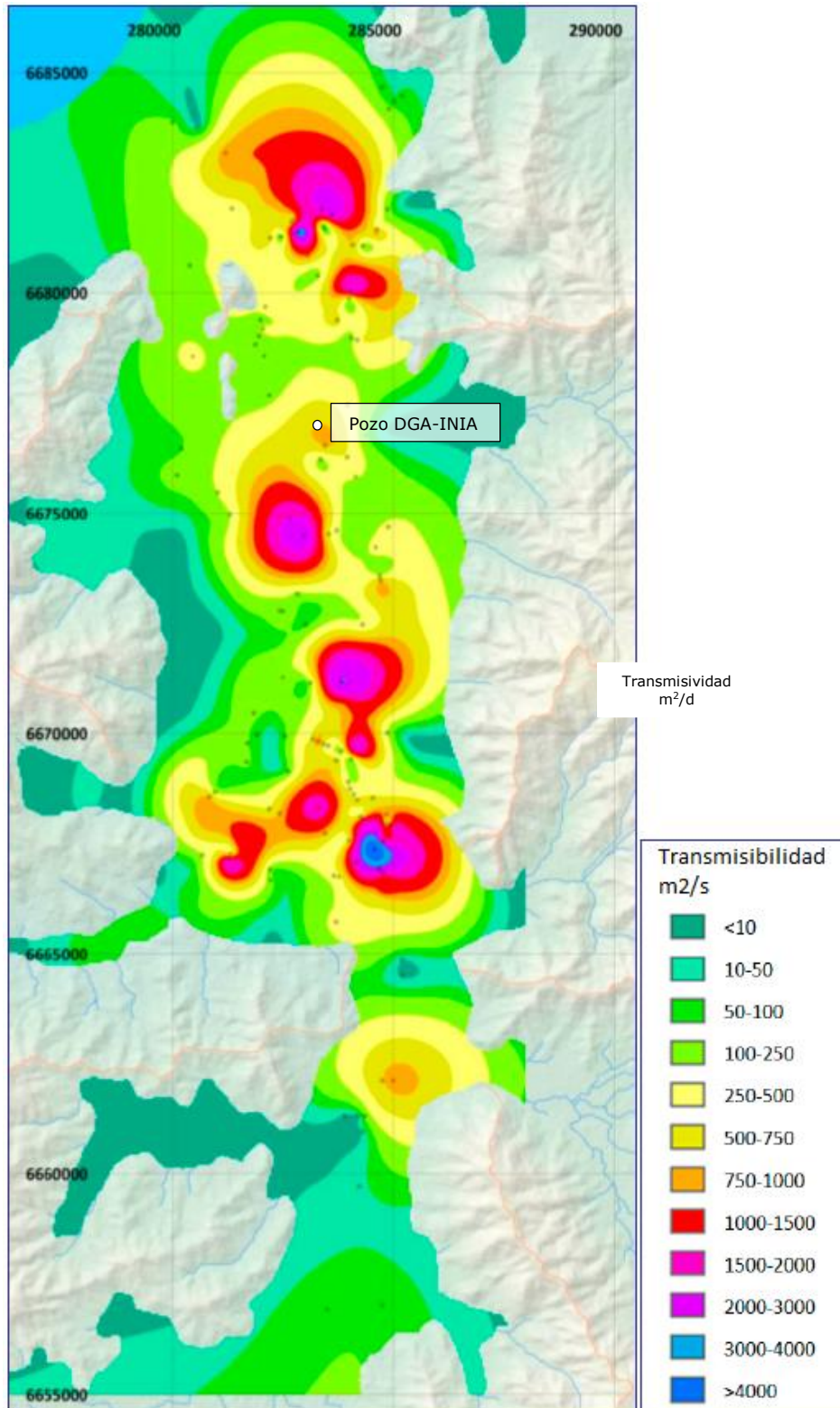
Fuente: Elaboración propia a partir del CPA-DGA y DGA (2004b)
Figura 5-23: Comparación y Ubicación derechos subterráneos

5.3.6 Parámetros hidráulicos

En el estudio CORFO (2015) se revisaron los expedientes de las solicitudes de derechos de las captaciones de agua subterránea existentes en el área de interés. En los expedientes es posible encontrar datos registrados en pruebas de bombeo efectuadas en las captaciones, para las cuales se intenta obtener un derecho de explotación. Los datos de niveles medidos durante las pruebas de bombeo permiten calcular la permeabilidad o la transmisividad del medio conductor que aporta a la captación donde se realiza la prueba de bombeo.

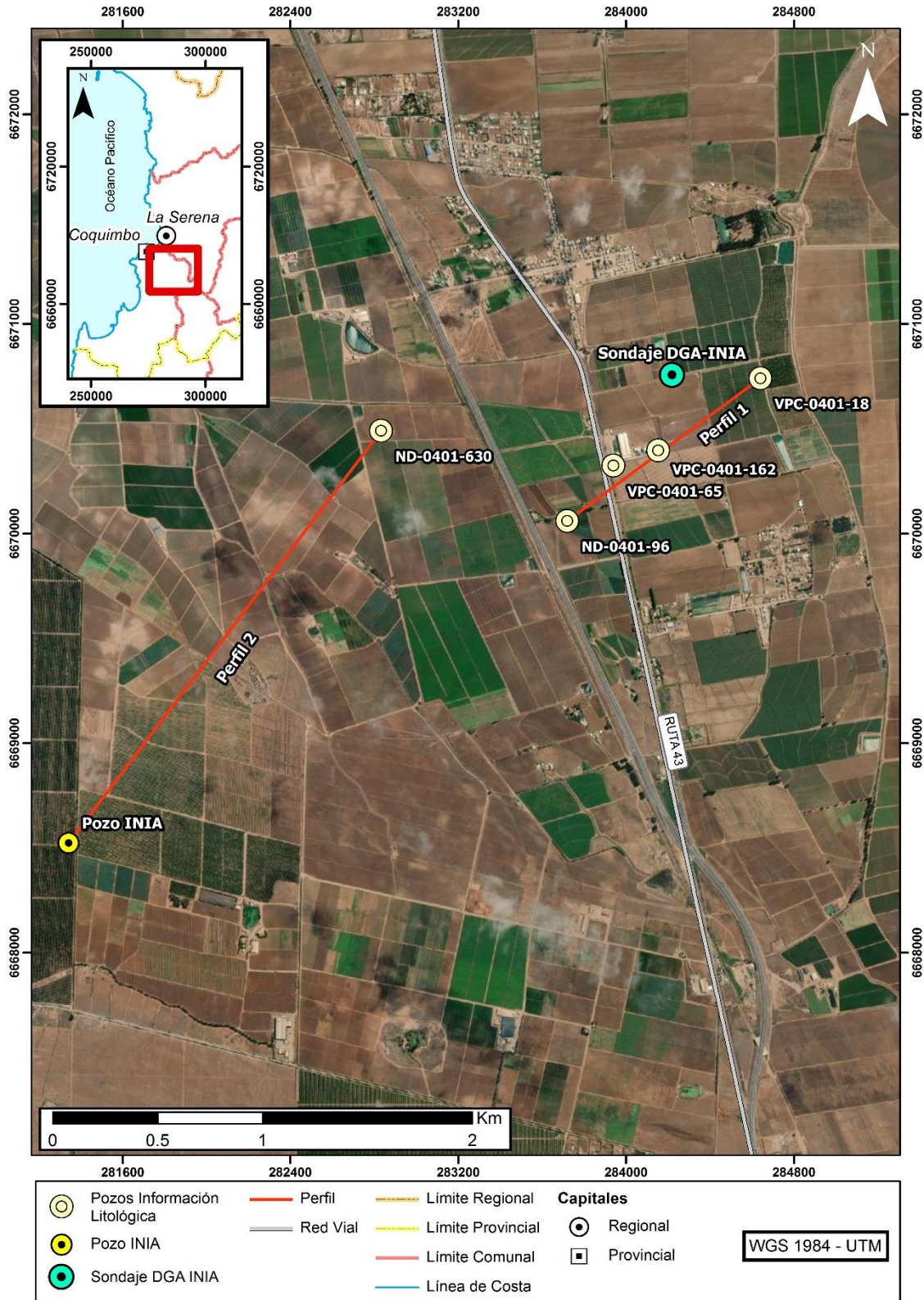
De acuerdo al estudio DGA (2014), para la estimación de los valores representativos de cada punto con información, se adoptó el siguiente criterio: en caso de contarse con ambas pruebas, se compararon los valores obtenidos con los datos de cada una; si los valores son del mismo orden, se optó por el de caudal constante. En dicho estudio se utilizaron los datos de expedientes de 63 captaciones; 46 de ellas tienen pruebas de caudal variable y 44, de caudal constante, de los resultados se obtiene que las transmisividades son inferiores a 1.500 a 2.000 m²/d para la zona donde se construyó el sondaje DGA-INIA (ver Figura 5-24).

Por otra parte, de la revisión de antecedentes técnicos para habilitación y registro de pozos en el Catastro Público de Aguas (CPA). En la Figura 5-25 se presenta la ubicación de los pozos registrados en el CPA con información litológica en pozos cercanos al punto de interés agrupados en 2 perfiles, y su descripción estratigráfica es presentada en la Figura 5-26 y Figura 5-27.



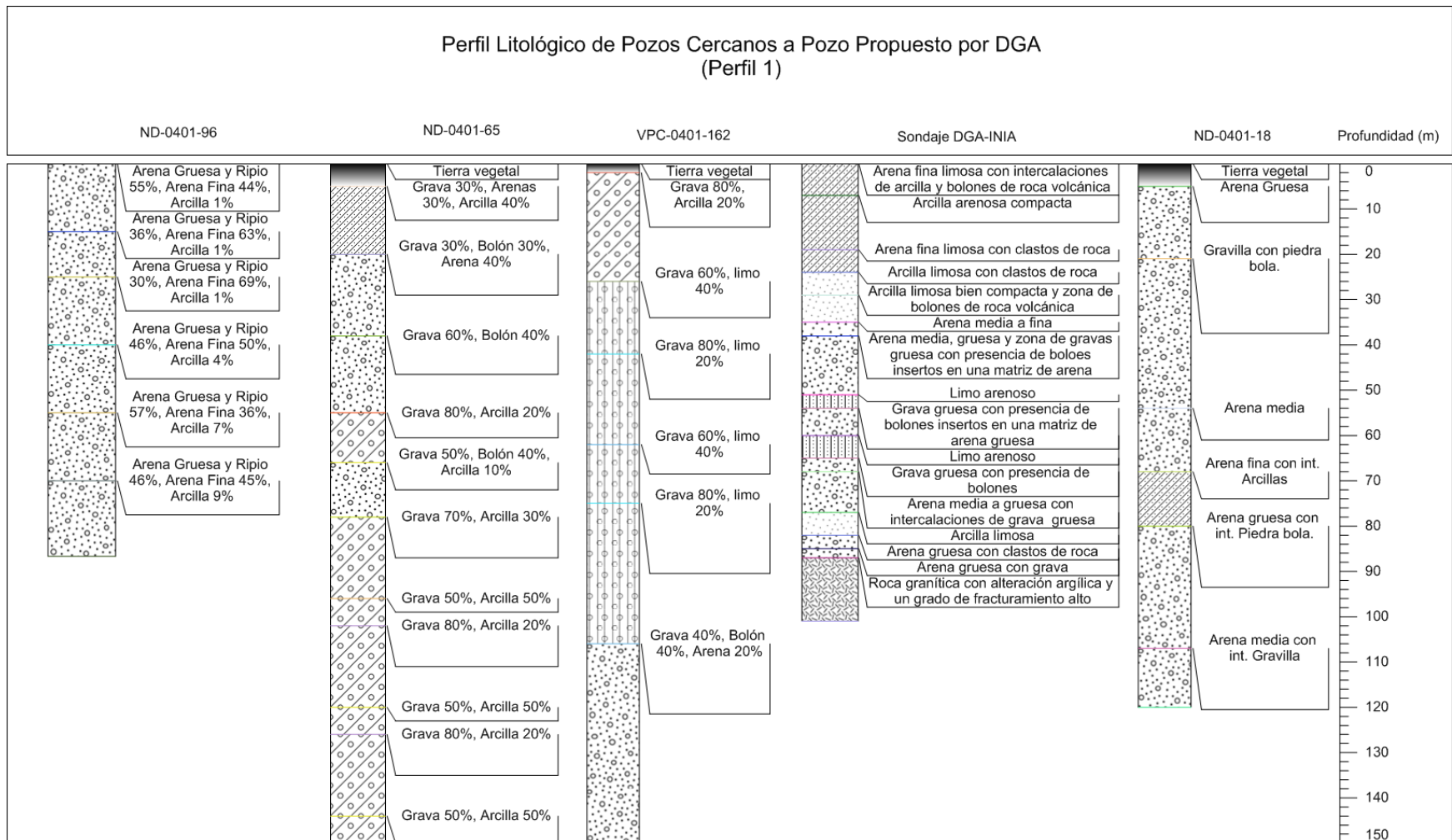
Fuente: DGA, 2014

Figura 5-24: Transmisividades acuífero Pan de Azúcar



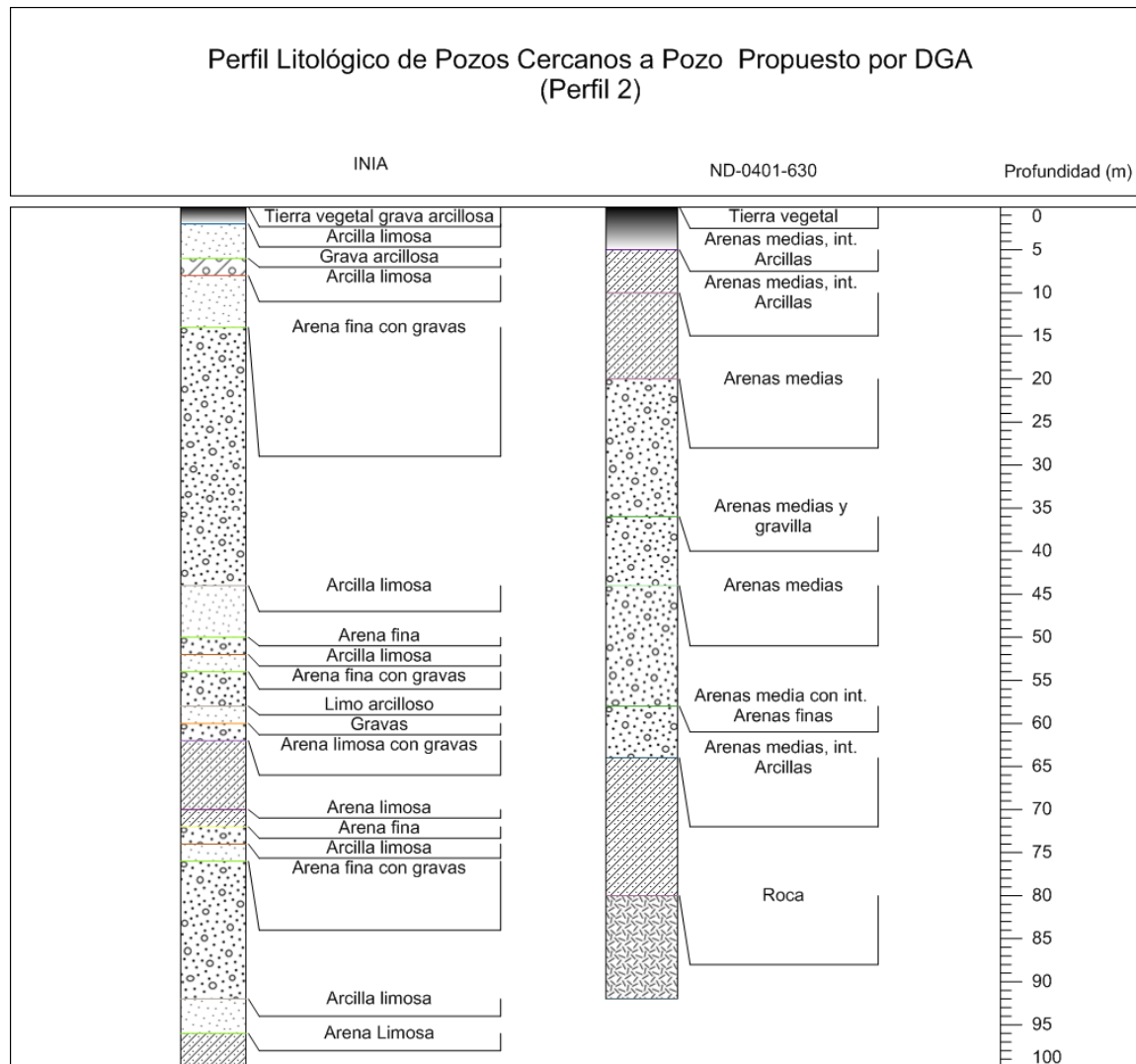
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-25: Ubicación de pozos cercanos a sondaje DGA-INIA con información litológica



Fuente Elaboración propia

Figura 5-26: Perfiles estratigráficos cercanos al punto de perforación sondaje DGA-INIA (Perfil 1)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-27: Perfiles estratigráficos cercanos al punto de perforación sondaje DGA-INIA (Perfil 2)

Los pozos presentan un perfil estratigráfico similar identificando un primer estrato de arenas gruesas con gravas secas, luego un estrato arenas gruesas a finas con matriz arcillosa de baja permeabilidad entre los 70 a 80 m, luego un estrato conductor de arenas gruesas y ripio (ver Figura 5-26).

Para la caracterización de los parámetros elásticos del acuífero se cuenta con la información de pruebas de bombeo de 7 pozos cercanos al punto de interés. Cabe mencionar, que los siguientes valores corresponden a los valores de la habilitación de los pozos pudiendo estar restringidos a la técnica de perforación y habilitación como a la curva de descarga de la bomba instalada.

A continuación, en la Tabla 5-10, se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de las pruebas de bombeo. De este se desprenden los datos de Transmisividad y permeabilidad, que, en términos generales, resulta ser coincidentes a los resultados observados en los perfiles estratigráficos, donde los materiales de arenas medias a finas son los que conforman principalmente el estrato conductor (acuífero), con permeabilidades del orden de 10^{-5} m/s.

Tabla 5-10: Resumen pruebas de bombeo realizadas en pozos cercanos

Parámetros	Pozos registrados en CPA			
	ND-0401-96	ND-0401-630 (1)	ND-0401-630 (3)	ND-0401-630 (4)
Fecha	30-05-1990	05-02-1994	01-02-2000	02-04-2000
Caudal constante (l/s)	57,50	95,00	45,00	46,00
Nivel Estático (m)	16,90	9,10	23,90	21,89
Nivel Dinámico (m)	23,00	43,12	37,98	46,54
Transmisividad (m²/s)	1,73·10 ⁻³	5,11·10 ⁻⁴	5,85·10 ⁻⁴	3,42·10 ⁻⁴
Permeabilidad (m/s)	2,83·10 ⁻⁴	1,50·10 ⁻⁵	4,15·10 ⁻⁵	1,39·10 ⁻⁵
Parámetros	Pozos registrados en CPA			
	VPC-0401-18	VPC-0401-65	VPC-0401-149	VPC-0401-162
Fecha	12-09-1994	16-06-2013	21-04-2018	20-01-2013
Caudal constante (l/s)	110,00	120,00	6,29	60,00
Nivel Estático (m)	23,90	39,90	51,86	36,53
Nivel Dinámico (m)	48,16	56,68	54,46	47,05
Transmisividad (m²/s)	8,30·10 ⁻⁴	1,31·10 ⁻³	4,43·10 ⁻⁴	1,04·10 ⁻³
Permeabilidad (m/s)	3,42·10 ⁻⁵	7,80·10 ⁻⁵	1,70·10 ⁻⁴	9,92·10 ⁻⁵

Fuente: Elaboración propia a partir de Expediente de inscripción de pozos en la DGA

5.3.7 Calidad de aguas

De la revisión de los antecedentes técnico de habilitación de pozos para el registro en el CPA se cuenta con la información de análisis químico de tres pozos cercanos al punto de interés, cuyos valores medidos se presentan en la Tabla 5-11. Cabe destacar los altos valores medidos en conductividad que superan ampliamente los límites máximos en la NCh 1.333 para uso de riego, Las mediciones de conductividad eléctrica detectan la cantidad de cationes o aniones (sales) en solución. Cuanto mayor es la cantidad de aniones o cationes tanto mayor es la lectura de la conductividad eléctrica. Los iones generalmente asociados con salinidad son cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , o aniones NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , OH^- (INIA, 2019).

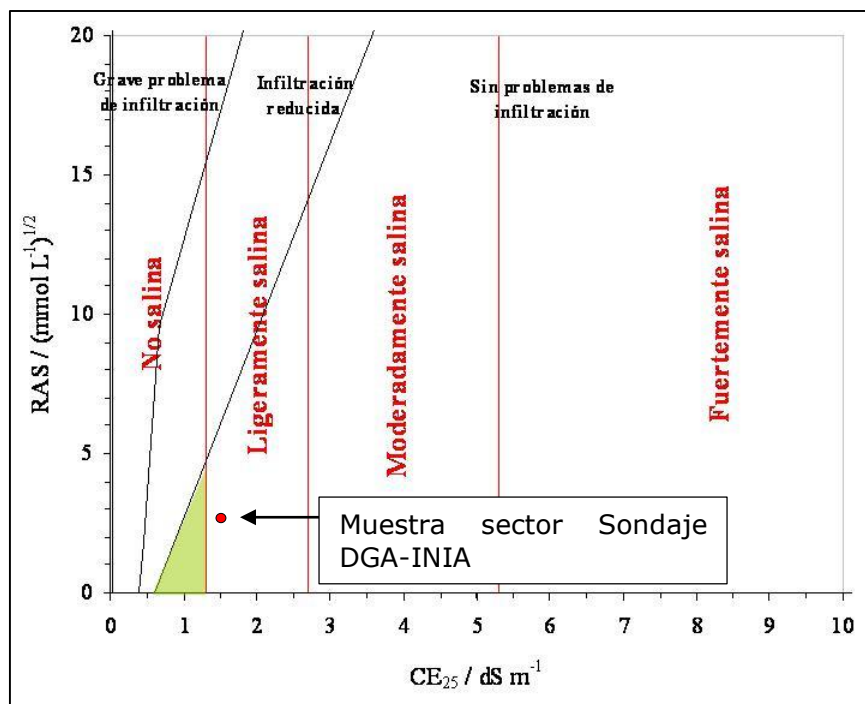
Tabla 5-11: Calidades químicas en pozos cercanos al sondaje DGA-INIA

Parámetro	Límite máximo (NCh 1333)	ND-0401-630	VPC-0401-18	VPC-0401-65	Sector Sondaje DGA-INIA
		Valor medido			
Turbiedad (UNT)	5	0,6	3		
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}/25\text{ }0^\circ\text{C}$)	750	1.000	1.057		1.510
Color aparente	20	0	15		
Sabor	Insípido	Insípido	salobre débil		
pH	6 - 8,5	7,5	6,7		7,77
pH Saturación Larson		6,9			
Índice Lagenlier		0,6			
Índice de agresividad		12,6			
Sólidos disueltos totales (mg/l)	1500	730	946		1004
Residuo fijo (mg/l)		685			
Residuo volátil (mg/l)		45			
Concentración Medida (mg/l)					
Alcalinidad total		233			
Aluminio	5	0,06	0,25	0,25	<0,005
Anhídrico carbónico		7			
Bicarbonato		233			403
Calcio		201			125
Dureza total EDTA		687,6			
Dureza magnésica		185,1			
Dureza cálcica EDTA		502,5			
Fosfato		0,47			
Nitrógeno albúminas		0,07			
Potasio		0,56			2,47
Silicatos		0,3			
Sodio		27,1			145
Bario	4			4	0,05318
Berilio	0,1			0,05	<0,00025
Boro	0,75	0,2		0,4	0,452
Litio		0,007		2,5	0,00608
RAS		0,44			

Parámetro	Límite máximo (NCh 1333)	ND-0401-630	VPC-0401-18	VPC-0401-65	Sector Sondaje DGA-INIA
		Valor medido			
RAS corregido		0,47			2,8
Sodio porcentual (%)	35	7,9		31	39,8
Molibdeno	0,01	0,02		0,01	0,00978
Amoniaco	0,25	0,12	0,2		50
Plata	0,2			0,01	<0,0005
Arsénico	0,1	0,001	0,1	0,005	0,00301
Cadmio	0,01	0,001	0,001	0,005	0,00007
Cobalto	0,05			0,02	0,00018
Cianuro libre	0,2	0,005	0,005	0,05	0,04
Cloruro	200	179,2	321,8	145	98,4
Cobre	1	0,011	0,07	0,01	0,00188
Compuestos fenólicos	0,002	0,001	0,001		
Cromo hexavalente	0,05	0,001	0,01	0,05	0,01036
Detergentes	1,5	0,005	0,005		
Flúor	0,3	0,2	0,5		
Hierro Total	5	0,064	0,11	0,07	1,03
Magnesio	0,1	0,03	64,9		
Manganeso	0,2		0,05	0,2	0,0019
Mercurio	0,001	0,001	0,001	0,001	<0,0001
Nitratos	10	2,3	6,5		52,6
Nitritos	1	0,002	0,02		0,65
Plomo	5	0,001	0,01	0,01	0,0019
Residuos sólidos filtrables	1.000	730	1.365		
Selenio	0,02	0,001	0,01	0,02	0,00068
Sulfatos	250	300	273,5	226	333
Zinc	2	0,013	0,12	0,228	0,026
Bacteriológico		Concentración Medida			
NMP Coliformes totales		2			
NMP Coliformes fecales	1.000	<1,8		2	

Fuente: Elaboración propia a partir de los expedientes de habilitación de pozos

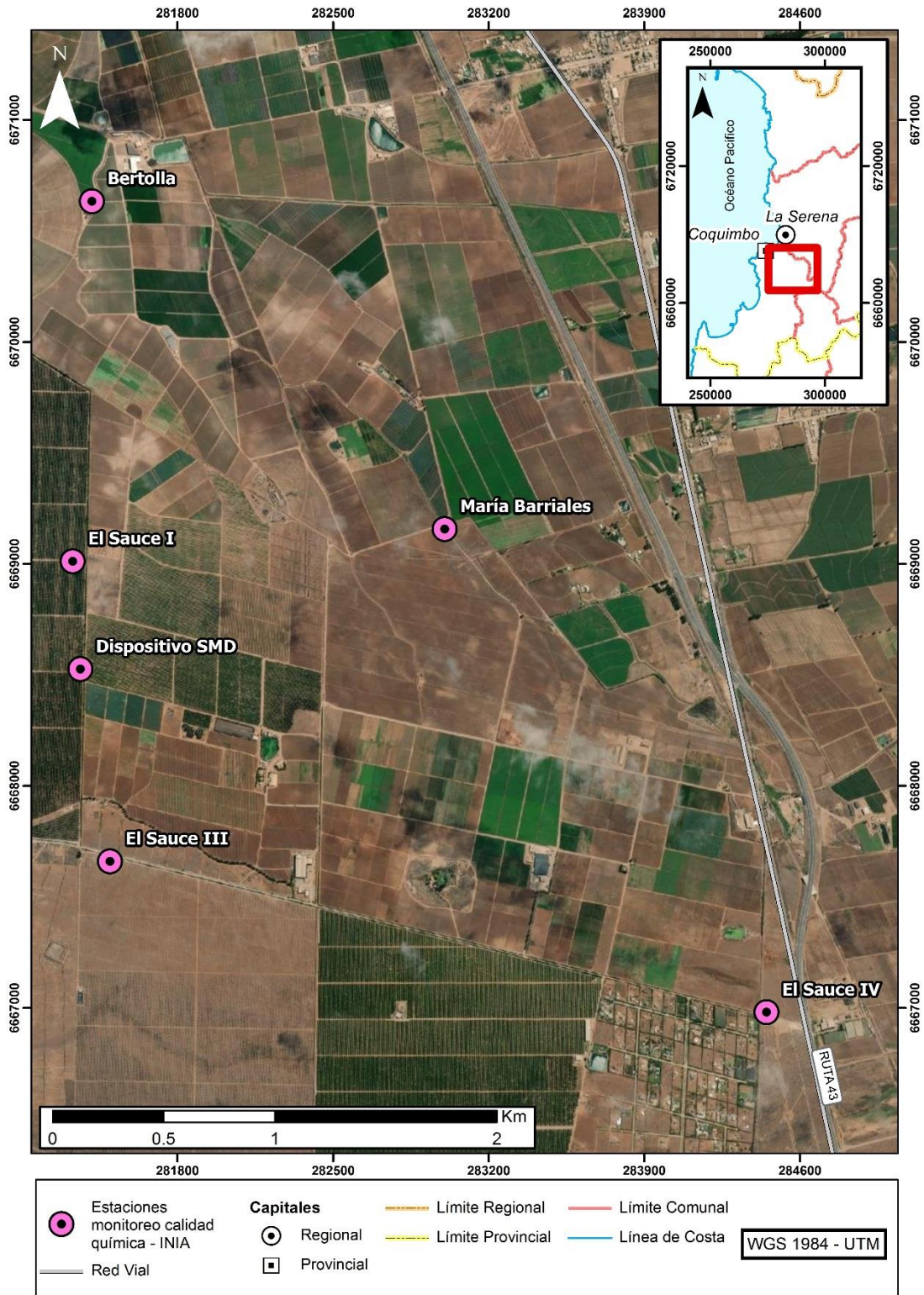
En la Tabla 5-2 se observan resultados similares a los obtenidos en el Estudio realizado por INIA, 2019 donde se observan una alta conductividad eléctrica con 1.510 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el cloruro se encuentra por debajo del límite máximo para la norma de riego con una concentración de 145 mg/l. Por otra parte, se observan altas concentraciones de nitratos y sulfatos, lo que se puede deber a la producción agrícola en el sector, lo que significaría una conexión por infiltración directa al acuífero. Por otra parte, mediante la relación entre la conductividad eléctrica y la relación de absorción del sodio (RAS) es posible estimar el grado de salinidad del agua, la cual es presentada en la Figura 5-28 y dados los resultados obtenidos del análisis de la muestra del sondaje DGA-INIA la cataloga como "ligeramente salina".



Fuente: <http://agrosal.ivia.es/evaluar.html>

Figura 5-28: Relación para estimar salinidad con la conductividad eléctrica y el RAS

Por otra parte, en el estudio Seguimiento del perfil salino del acuífero El Culebrón en tiempo real" (INIA, 2019) se realizó una campaña y análisis químico de agua subterránea en 6 puntos, que se observan en la Figura 5-29 cuyos resultados son presentados en la Tabla 5-12.



Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes extraídos de INIA, 2019

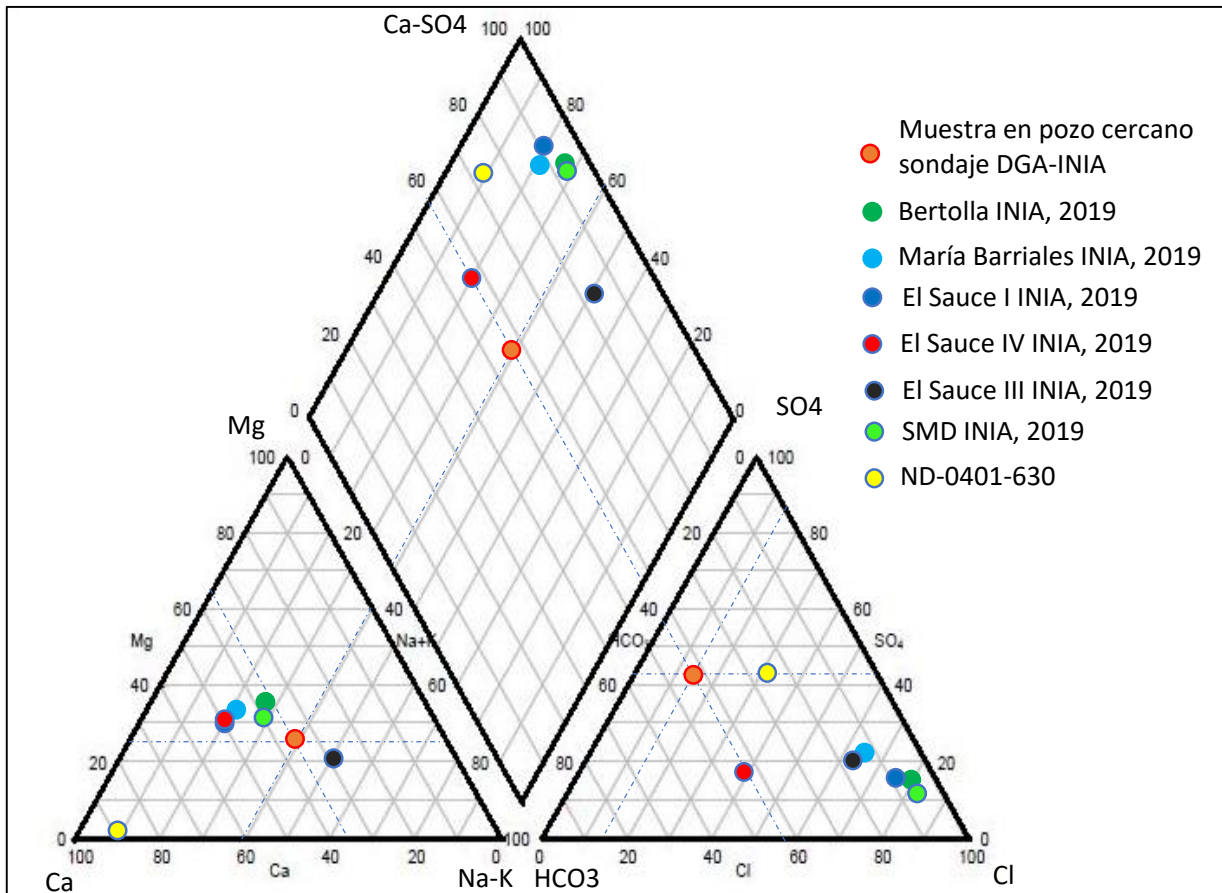
Figura 5-29: Ubicación Estaciones de monitoreo calidad química

Tabla 5-12: Resultado de análisis químico de agua Subterránea

Parámetro	Unidad	Límite NCh 1333 (riego)	Límite NCh 409 (Agua potable)	Muestras en Pozos					
				Bertolla	María Barriales	El Sauce I	SMD	El Sauce III	El Sauce IV
Potencial de Hidrógeno	(pH)	6 - 8,5	6,5 - 8,5	7,51	7,38	7,48	7,44	7,46	7,87
Conductividad Eléctrica	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	750		7.400	4.200	4.800	5200	2.600	960
Relación de absorción del sodio				4,4	2,6	2,6	4	6,7	1,3
Sodio porcentual	%	35		24,8	20,6	19,1	28,9	470	20,5
Dureza				2.760	1.520	1.940	1.595	700	445
Calcio	(mg Ca^{2+}/L)			614	356	482	374	166	110
Magnesio	(mg Mg^{2+}/L)	0,1	-	298	153	179	160	69	41
Potasio	(mg K^{+}/L)			6	4	5	6	4	2
Sodio	(mg Na^{+}/L)			421	182	212	299	288	53
Cloruro	(mg Cl^{-}/L)	200	400	2.092	1.028	1.312	1.524	599	149
Sulfato	(mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$)	250	500	509	432	346	403	254	86
Bicarbonato	(mg $\text{HCO}_3^{-}/\text{L}$)			256	293	232	226	244	275
Nitrato	(mg $\text{NO}_3^{-}/\text{mg}$)	10	50	2,2	2	10,8	2	7,2	4,9

Fuente: INIA, 2019

Se presenta en la Figura 5-30 el diagrama de Piper con todos los pozos que tienen información suficiente para realizar este análisis en el área de Estudio. De este análisis se puede clasificar las aguas principalmente como cloruradas cálcicas.



Fuente: Elaboración propia a partir de INIA, 2019, expediente pozo DGA y sondaje DGA-INIA

Figura 5-30: Diagrama de Piper de muestreos en el área de Estudio

Las principales conclusiones identificadas en el estudio INIA (2019) se detallan a continuación:

- A partir de los resultados de los diagramas de Stiff y Piper, se determinó para el sector norte de la subcuenca Oeste del acuífero, aguas cloruradas cálcicas - magnésicas, con una altísima salinidad de 10.705 mg/L y una conductividad eléctrica de 15.492 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para el sector centro del acuífero, se observan salinidades considerablemente más bajas en torno a los 2.000 a 3.000 mg/l y una conductividad eléctrica de 5.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mientras que al lado sur de la subcuenca se presentan aguas menos cloruradas, con una menor conductividad eléctrica entre 960 y 970 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

-
- La salinidad se encuentra distribuida desde capas superiores a inferiores, según el perfil litológico observado al construir el pozo de observación durante la instalación del dispositivo SMD. En el perfil litológico se estudiaron 40 m de salinidad, observándose una variabilidad en las concentraciones de sales a lo largo del perfil. Estas peculiares concentraciones y sus ubicaciones se deben a la litología del perfil, conformado por arenas, arcillas y limos; actuando la arcilla en este caso como finas capas que debilitan el movimiento de las aguas en sentido vertical, dando como resultado, aguas de mayor densidad sobre aguas de menor densidad.

Toda la información de calidad de aguas se presenta en el **Anexo B**.

5.3.8 Piezometría

Se realizó una campaña de catastro de niveles de pozo entre los días 9 y 14 noviembre, cuyo objetivo principal fue la de levantar información de niveles estáticos de los pozos cercanos al punto definido para el sondaje de DGA. Dicho catastro constó de mediciones de niveles freáticos de 19 puntos (ver Figura 5-33). En promedio los niveles estáticos en el área de estudio se encuentran alrededor de los 55 m.



Fuente: Equipo Consultor

Figura 5-31: Panorámica P6 (ubicado en terreno de INIA)



Fuente: Equipo Consultor

Figura 5-32: Medición de nivel freático P6 (ubicado en terreno de INIA)

Los puntos catastrados de los pozos, su ubicación, cota y nivel estático se presentan en la Tabla 4-13.

Tabla 5-13: Niveles piezométricos medidos en terreno

ID	Coordenadas UTM WGS84 H19S		Cota (m s.n.m.)	Nivel Estático (m)	ID-DGA	Observación
	Norte	Este				
P1	6.668.998	281.313	126	51,84	Sauce 1	
P2	6.667.414	280.643	127	53,15	Sauce 2	
P3	6.670.327	280.939	122	54,18		
P4	6.670.160	283.974	126	58,24		
P5	6.672.725	283.144	122	45,99		
P6	6.670.906	283.938	125	53,9		
P7	6.670.410	284.440	130	58,65		
P8	6.670.675	283.857	125	52,59		
P9	6.680.775	283.054	116	31,3	Parcela N2 San Ramón	
P10	6.668.170	284.955	141	70,17	Lo Martínez	
P11	6.668.074	284.721	140	90,27		
P12	6.670.955	281.467	114		Asentamiento Vida Barriales 2	Nuevas obras y sistema de bombeo industrial sin acceso
P13	6.675.821	280.089	98		Santa Amalia	Seco
P14	6.667.637	281.491	130		Sauce 3	Seco
P15	6.669.608	284.110	128		Nueva Vida	Seco

ID	Coordenadas UTM WGS84 H19S		Cota (m s.n.m.)	Nivel Estático (m)	ID-DGA	Observación
	Norte	Este				
P16	6.667.880	284.142	138		Santa Carmen	Seco
P17	6.682.018	280.295	94		Endesa	No ubicados
P18	6.681.216	282.321	110		Parcela san Ramón N 1	No ubicados
P19	6.674.085	282.832	124		Asent. Santa Filomena	Seco

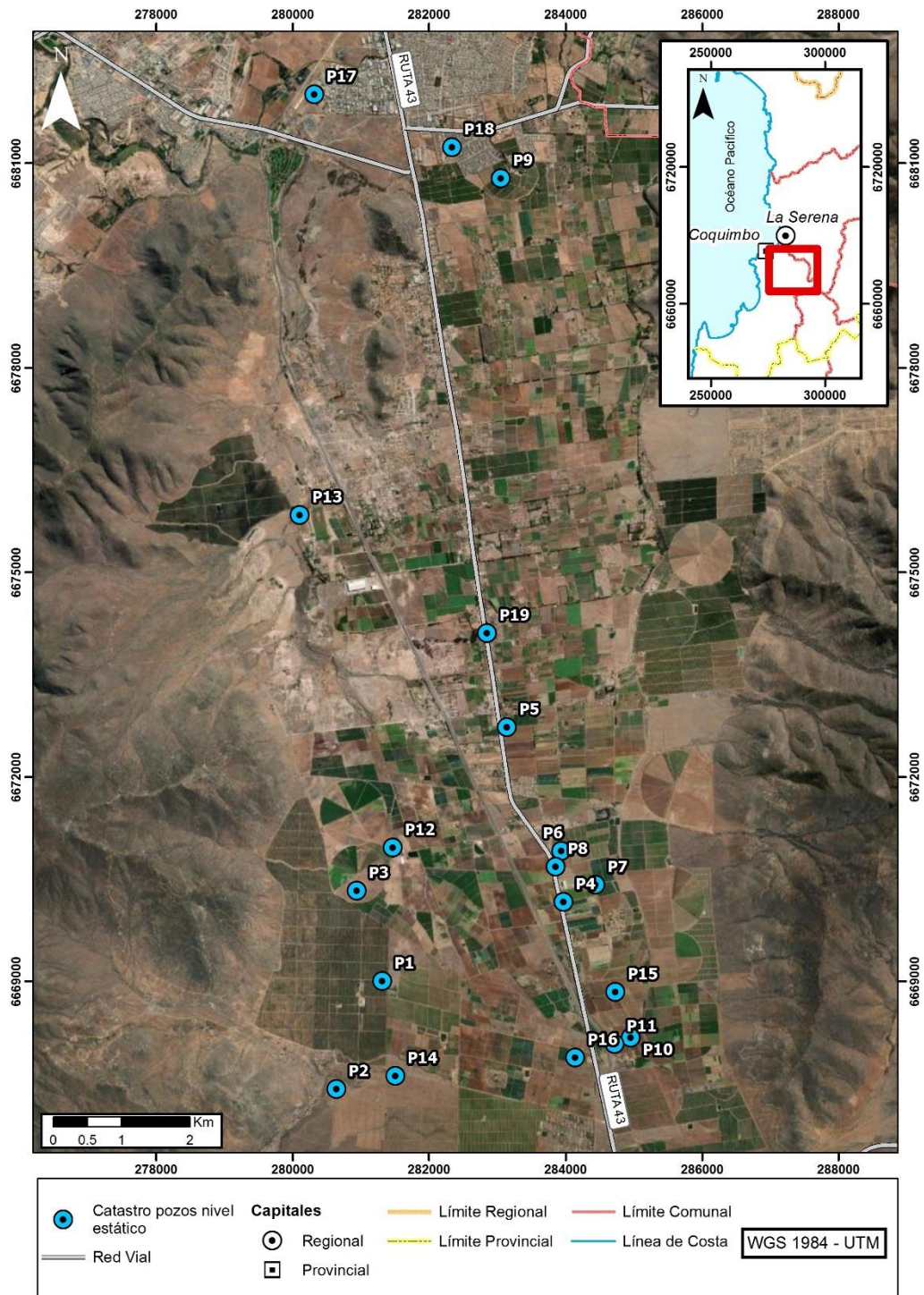
Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-33 presenta la ubicación y distribución de los 19 pozos en el área de estudio, este catastro incluye la red de monitoreo de niveles freáticos de la DGA. Cabe destacar que 5 pozos estaban secos, el pozo de Asentamiento Vida Barriales 2 no se pudo debido a que no existía el acceso, y por último los pozos Endesa y Parcela San Ramón 1 no pudieron ser ubicados en base a las coordenadas UTM registradas en la red de monitoreo de la página de la DGA.

A partir de los resultados de la campaña de mediciones de pozos fue posible de construir un mapa de curvas isofreáticas y a partir de la nivelación con un modelo digital de elevaciones (SRTM con una resolución de 1 arc-segundo) se estiman las direcciones preferentes del flujo subterráneo en la Figura 5-34 para el año 2020.

En general los resultados de las mediciones de niveles estáticos se encuentran a una profundidad media entre los 31 a los 90 m de profundidad. En cuanto a la dirección del flujo de aguas subterráneas tiene una dirección de norte a sur lo que se podría explicar debido a la alta explotación que tiene el acuífero en el sector centro sur del área estudiada, lo que podría propiciar la intrusión salina al acuífero. Para comprobar esta hipótesis se realiza el mismo ejercicio, pero tomando la situación de los niveles freáticos del año 2004 (se eligió este año porque es el que reúne mayor cantidad de datos de niveles estáticos espacialmente) (ver Figura 5-35). Se observa una tendencia en los flujos hacia noroeste en dirección al mar, cabe destacar que en esta ventana de tiempo ya había comenzado el descenso de niveles en el valle debido a la explotación del acuífero, por lo que esta tendencia en los vectores de flujos sería aún más clara aislando completamente el factor humano del área de estudio (condición de niveles freáticos previo a la explotación del acuífero). Cabe mencionar que tanto el modelo hidrogeológico realizado por la DGA el 2004 y el estudio CORFO 2015, no pudieron predecir este cambio en la dirección del flujo subterráneo, por lo que se recomienda una actualización de los modelos hidrogeológicos

en acople con un modelo superficial tipo WEAP para la apropiada caracterización de los escurrimientos superficiales del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-33: Ubicación de los pozos catastrados

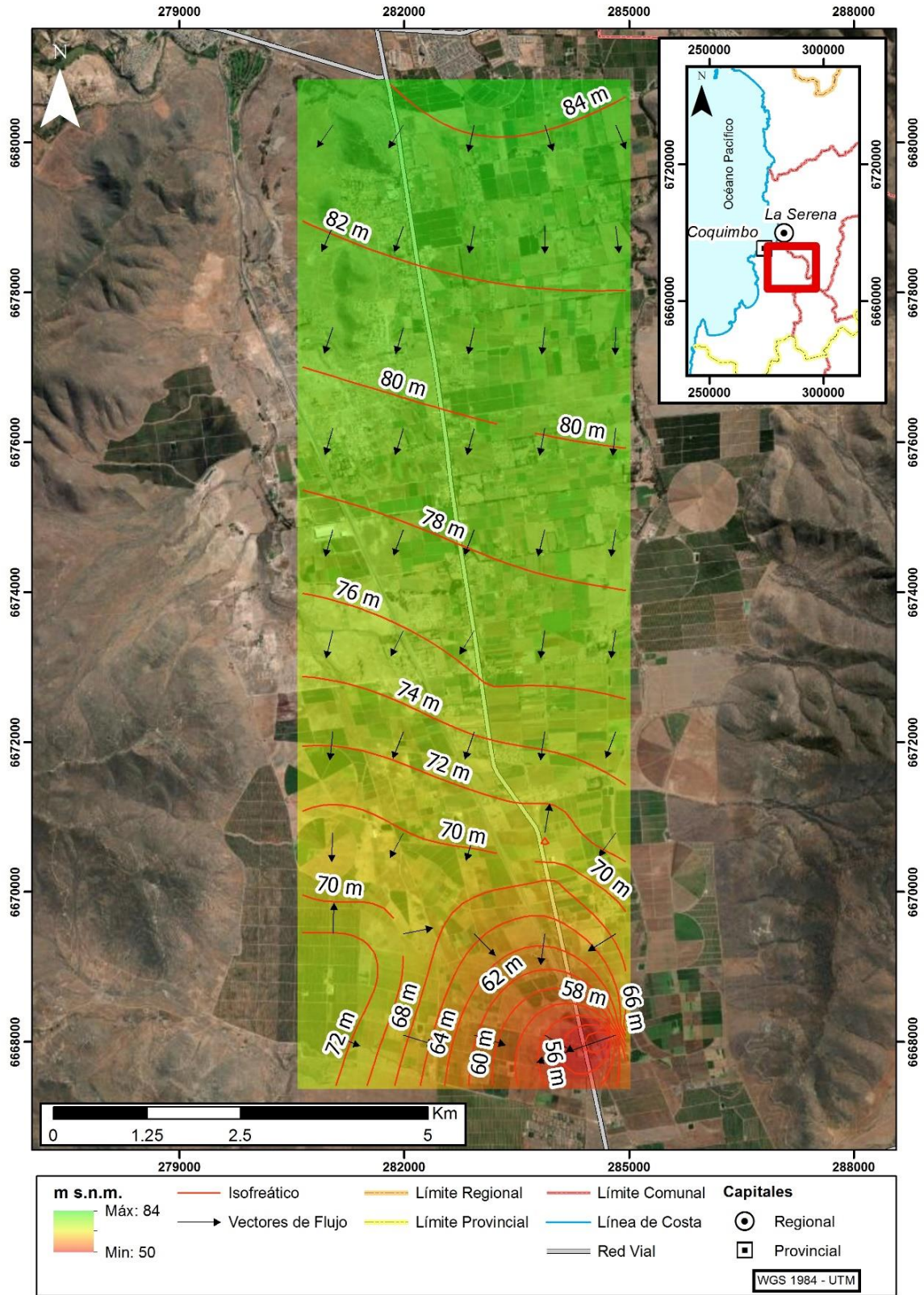
En la Tabla 5-14 se presenta un resumen de las estaciones de monitoreo de niveles de pozos DGA. Por otra parte, en la Figura 5-36 se presenta la evolución de la totalidad de los registros de los niveles estáticos en el área de Estudio (la base de datos se incluye en el **Anexo B**), con un descenso sostenido con un promedio de más de 17 m en los últimos 20 años, lo que da una tasa de disminución de los niveles de 0,87 m/año. Cabe destacar las variaciones observadas en el pozo de monitoreo de "Nueva Vida" que se pueden producir al medirse los niveles en un estado dinámico (pozo en producción con un nivel estabilizado en los 90 m) mientras que su nivel estático se encuentra en los 63 m. Se recomienda estandarizar las mediciones y comprobar si los niveles del pozo se encuentran efectivamente en un régimen estático, para no malinterpretar los niveles del acuífero.

Por último, del análisis de la estadística de niveles de pozos, se puede observar muchas mediciones en los últimos años con registro cero, esto se debe a que los pozos quedaron colgados (secos), pues los niveles freáticos descendieron por debajo de la profundización total de la habilitación de los pozos.

Tabla 5-14: Resumen pozos de monitoreo de niveles DGA

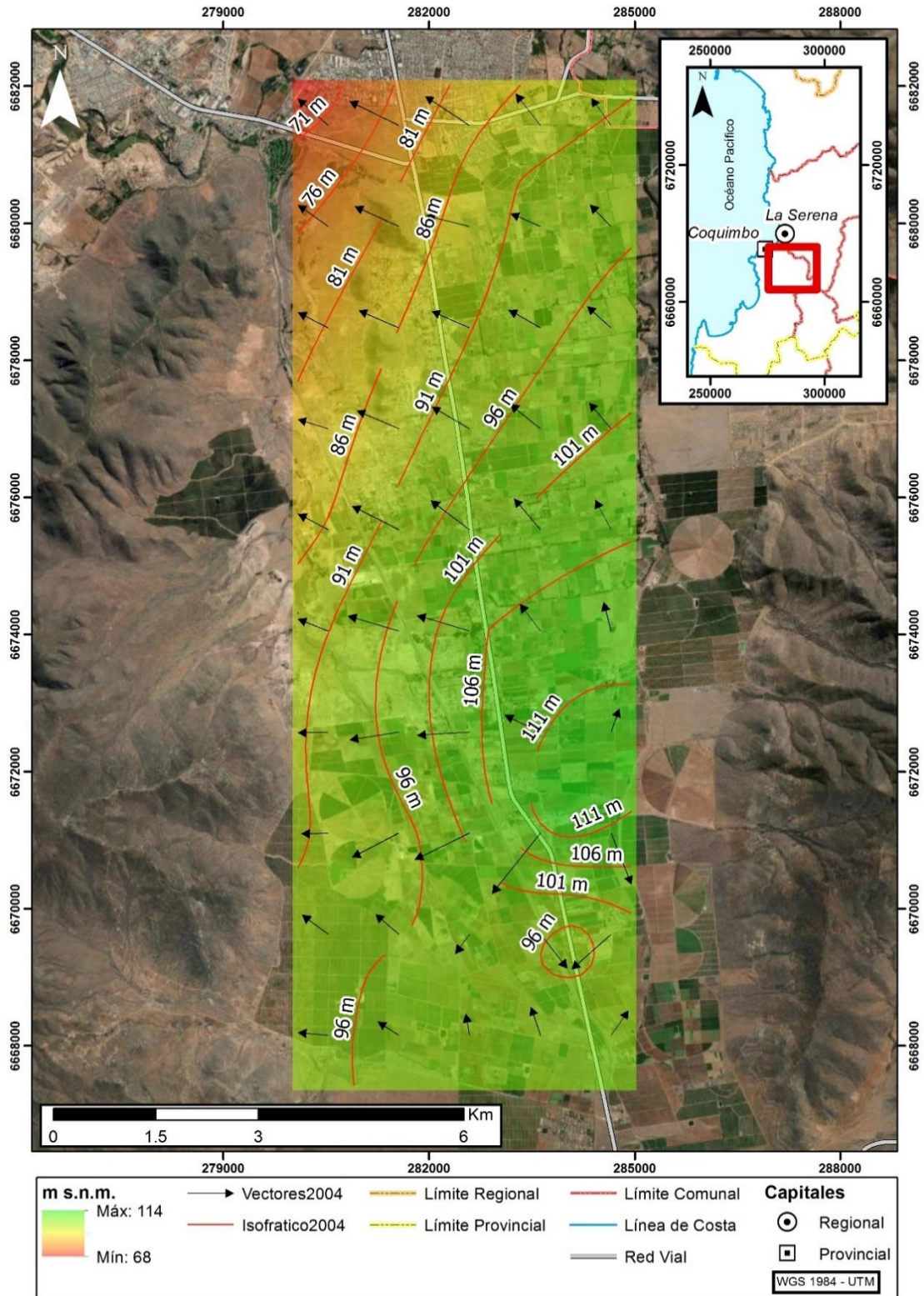
Nombre Pozo	Coordenada UTM WGS84 H19S		Vigencia	Fecha Inicio	Fecha Término
	Este (m)	Norte (m)			
AS. SANTA AMALIA	280.089	6.675.821	VIGENTE	31-03-1989	
ASENTAMIENTO VIDA BARRIALES A - 2	281.467	6.670.955	VIGENTE	14-10-1969	
ASENTAMIENTO SANTA FILOMENA	282.832	6.674.085	VIGENTE	09-10-1970	27-08-2015
EL SAUCE 1	281.313	6.668.998	VIGENTE	14-05-1981	
EL SAUCE 2	280.643	6.667.414	VIGENTE	19-05-1978	
EL SAUCE 3	281.491	6.667.637	VIGENTE	20-04-1981	
ENDESA S/E PAN DE AZUCAR	280.295	6.682.018	SUSPENDIDA	15-05-1978	17-06-2003
HIJUELA SANTA ELENA P.A.	283.949	6.671.372	SUSPENDIDA	19-05-1978	12-12-2014
LO MARTINEZ	284.955	6.668.170	VIGENTE	16-02-1981	
NUEVA VIDA	284.110	6.669.608	VIGENTE	18-07-1973	
NUEVA VIDA 2	286.721	6.670.082	SUSPENDIDA	25-06-1973	27-12-2017
POZO DGA INIA	284.226	6.670.760	VIGENTE	01-12-2020	
SANTA CARMEN	284.142	6.667.880	SUSPENDIDA	20-04-1981	22-08-2014

Fuente: Elaboración propia a de catastro DGA



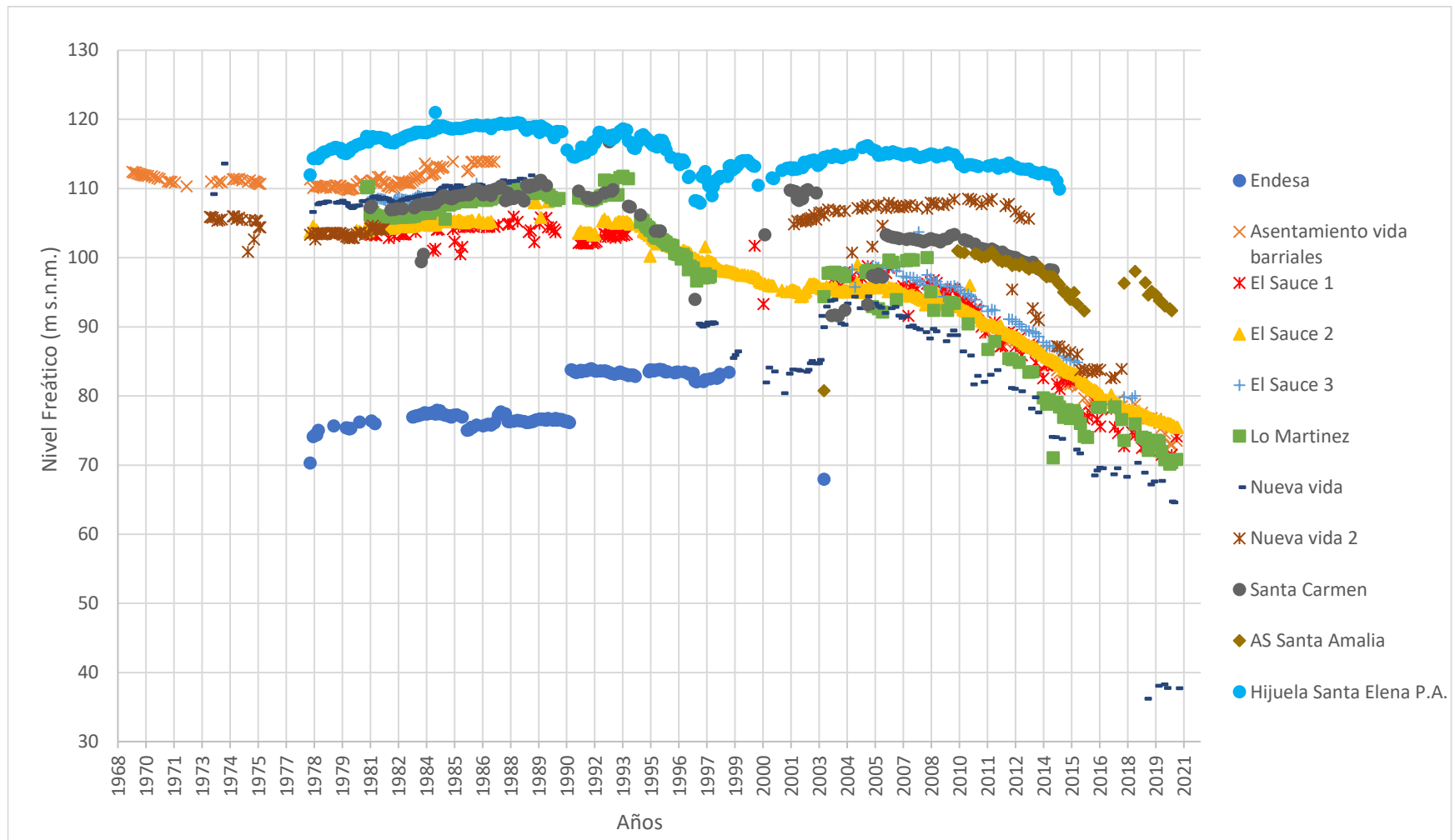
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-34: Mapa vectores de flujo subterráneo 2020



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-35: Mapa vectores de flujo subterráneo 2004



Fuente: Elaboración propia a partir de estadística de pozos DGA

Figura 5-36: Evolución de los niveles freáticos en los últimos 20 años

5.3.9 Balance hídrico

Se hace notar que el sistema subterráneo está separado en 3 elementos: un acuitardo superior, y 2 lentes acuíferos (DGA, 2004b). Por lo tanto, la estimación de recarga presentada en el acápite 5.2.4 corresponde a la recarga al acuitardo, ya que por sus características físicas solo una fracción del total es capaz de alcanzar el acuífero inferior, y, por lo tanto, puede estar disponible para su almacenamiento y uso posterior.

Para analizar de mejor forma lo que ocurre en el sistema acuífero, se utiliza la información presentada en el estudio DGA (2004b), donde se presenta para el año 2004 un balance basado en modelación, el que se presenta en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15: Evolución Balance Hídrico Área de Estudio

	Modelo 2004		Situación Actual	
	Entra	Sale	Entra	Sale
Aporte desde quebradas laterales	191,6		191,6	
Recarga (Riego, Precipitación, esteros)	114,6		40,4	
Flujo Subterráneo entrada	0,6		0,6	
Bombeos		577,9		1.215,5
Flujo Subterráneo Saliente		115,1		115,1
Flujo Superficial Saliente		38,4		38,4
Total	306,8	731,4	232,2	1.369,0
Diferencia		-424,6		-1.136,4

Valor adoptado del balance 2004 ya que se requiere modelación para determinar valor adecuado a la realidad actual

Estimación basada en mantener razón recarga/recarga total al año 2004, razón que es igual a 9,3 %

Determinado en base a factores de uso junto a los derechos consignados en el CPA

Estimación del balance

Fuente: Elaboración propia con antecedentes DGA (2004b)

Para el balance al año 2004 se conocen todos sus componentes ya que los resultados provienen de la modelación realizada. En este caso, se tiene un desbalance que es consistente con el descenso de niveles medido.

Para la situación actual no se dispone de resultados de una modelación, por lo que se adoptan algunos flujos desde el balance del año 2004, los que también se incluyen en la Tabla 5-15 (coloreados en amarillo). Para la recarga asociada a riego y precipitaciones, se utilizan los resultados generados por el modelo hidrológico WEAP Elqui (DGA, 2020), donde la recarga total al año 2004 para el sistema acuífero Culebrón asciende a 1.235 l/s.

Considerando que en el balance al año 2004 se indica que la recarga al acuífero inferior es de 114,6 l/s, se tiene entonces que esta equivale a un 9,3 % de la recarga total. Suponiendo que en la situación actual se mantiene esta proporción, es posible estimar la recarga al acuífero inferior. Tal como se indicó en el acápite 5.2.4 la recarga total al acuífero es de 435 l/s. Ocupando este flujo como valor representativo de la situación actual, se estima una recarga para el acuífero inferior de 40,4 l/s. En el balance de la Tabla 5-15 esta celda se marca en color lila. El elemento restante del balance corresponde a los bombeos, los que se adoptaron como los caudales efectivos de bombeo según se indicó anteriormente en el acápite 5.3.5, y se colorearon en salmón claro. Finalmente, el resultado para la situación actual determina que el desbalance del acuífero es mayor que al año 2004, lo que ratifica que la tendencia a la baja en los niveles se debe a la sobreexplotación del acuífero, ya que el agua faltante se extrae del almacenamiento.

Se debe dejar en todo caso en forma muy clara que lo anteriormente presentado debe mejorarse, idealmente con una modelación integrada WEAP-Modflow, de modo de determinar en mejor forma la interacción entre el sistema superficial y subterráneo.

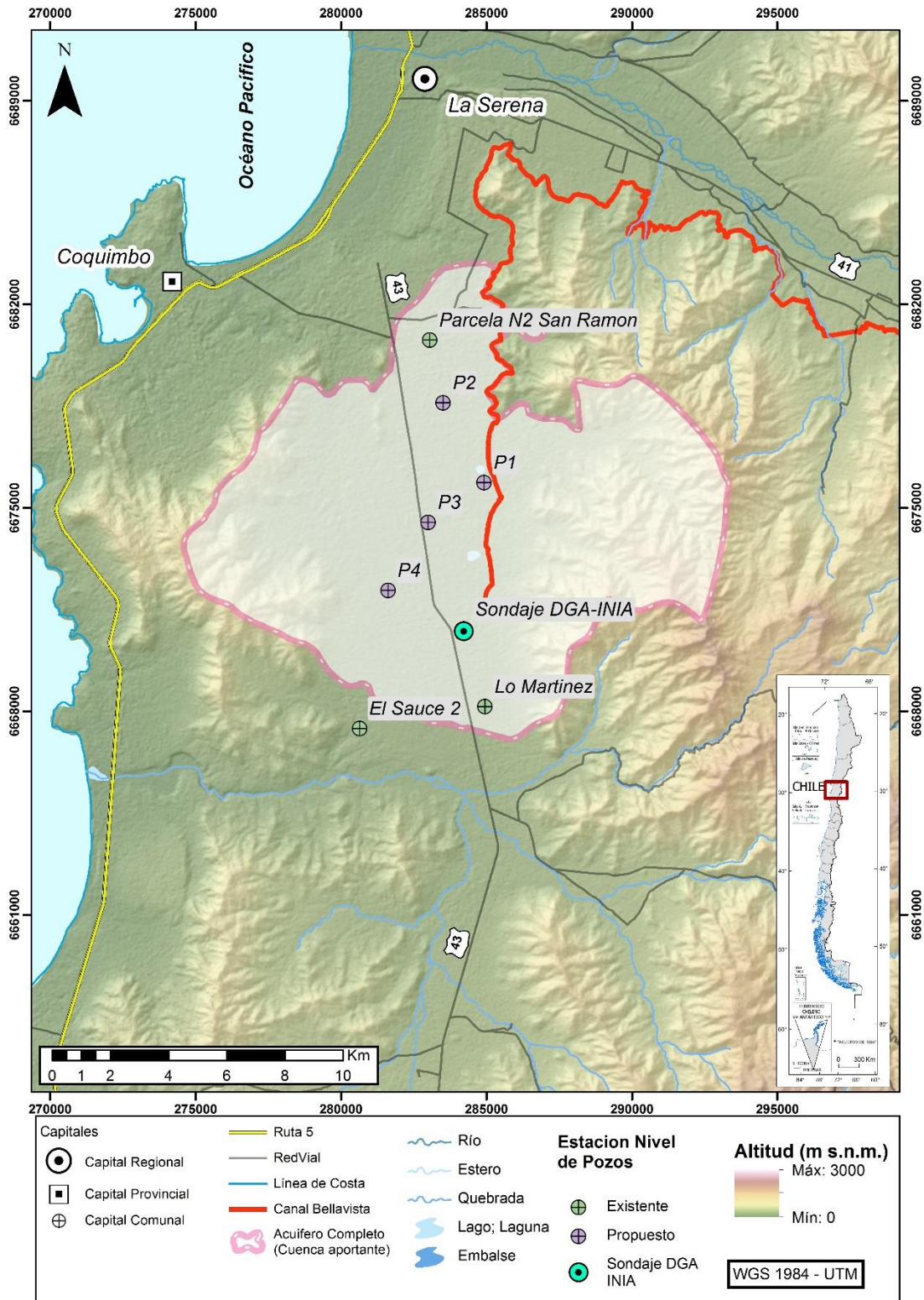
El balance se presenta en el **Anexo B**, en conjunto con el respaldo de cálculo de todos los elementos para los que fue posible esto, ya sea por cálculo o estimación.

6 BRECHAS DE LA INFORMACIÓN

6.1 Red de monitoreo e infraestructura

Para el monitoreo de niveles freáticos representativos se recomiendan los siguientes puntos:

- La red de monitoreo de niveles de pozos debe ser instalada de manera que cubra espacialmente toda el área de Estudio, incorporando puntos de medición en las zonas altas en puntos de recarga natural debido al escurrimiento por las quebradas (se presenta en **Anexo C** un .KMZ con el detalle de la red de monitoreo propuesta). En la Figura 6-1 se presenta una propuesta para la red de monitoreo de niveles que se integra a la existente red de monitoreo DGA (Parcela N2 San Ramón, Lo Martínez y El Sauce 2).
- Los piezómetros de la red de monitoreo, solo deben tener como función el monitoreo de niveles, no la explotación, además, estos piezómetros se deben encontrar fuera del área de influencia de pozos de explotación. Esto debido a que actualmente la red de monitoreo se encuentra muy influenciada por pozos de explotación lo que no permite representar adecuadamente los niveles piezométricos del acuífero.
- En lo posible su construcción se debe realizar en diamantina con recuperación de testigos inalterados, hasta el contacto con la roca basamental. Esto permitirá una precisión en la caracterización litológica, y por otra parte, no presentarán el problema de quedar secos, como es el caso de al menos 5 pozos en el área de Estudio. Por otra parte, la importancia de llegar hasta la roca basamental en los sondajes es para lograr una calibración en los ensayos geofísicos en particular con las estaciones GRAV que determinan la profundidad del basamento rocoso.
- Es recomendable instalar transductores de presión con almacenamiento continuo (datalogger) y transmisión de la información vía telemetría, pero si no se dispone de la instrumentación se debe realizar un monitoreo periódico de al menos una vez al mes.
- Los piezómetros deben estar ubicado preferentemente en terreno fiscal para tener acceso expedito al punto, o de lo contrario se deben generar convenios claros con Privados, para asegurar el libre acceso para el monitoreo de los niveles, medición de calidades químicas y mantenciones del piezómetro, de lo contrario se hace difícil la medición permanente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-1: Red de monitoreo propuesta

-
- Se recomienda la implementación de un modelo hidrológico e hidrogeológico integrado para la gestión hídrica de la cuenca, dado que los anteriores modelos no han integrado estos resultados, y más importantes se requiere una actualización de las fuentes de recargas al acuífero, puesto que en los estudios anteriores se indicaba al estero Culebrón como el principal aportante en la recarga natural del acuífero y según los antecedentes presentados este se encuentra con caudal nulo desde el 2013. Por otra parte, se requiere un análisis crítico del recurso hídrico que considere las variables de cambio climático más proyecciones de oferta y demanda que incluya información del Monitoreo de Extracciones Efectivas (MEE).

Además, se recomienda el monitoreo permanente vía telemetría de los caudales en los cursos principales del área de Estudio (por ejemplo, canal Bellavista), esto permitirá relacionar los niveles del acuífero según recarga directa debido a infiltración por cursos de agua no revestidos.

6.2 Estado de la calidad de agua

Se debe considerar la instalación permanente una red de monitoreo de variables hidrogeoquímicas con énfasis en el análisis, tanto espacial como en distintas profundidades de la columna de agua, para evaluar la intrusión salina en el acuífero de Pan de azúcar, esto permitirá estimar de mejor manera el volumen almacenado apto para el riego y consumo humano, analizando parámetros como, pH, conductividad eléctrica, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, magnesio, etc. Se propone que al menos se consideren en esta red los pozos propuestos para medición de niveles (ver Figura 6-1).

Por otra parte, el resultado de nitratos resultó levemente alterado para ambos límites en las normas (NCh 409 y NCh 1.333) así también se han detectado sobrepaso de las normas para los sulfatos en resultado de análisis realizados para otros estudios, por lo que se recomienda un monitoreo en distintos puntos del acuífero para determinar si esto es una alteración puntual o si es un problema general. Si fuera el caso se recomendaría, para trazar la contaminación de las aguas subterráneas con fertilizantes, un estudio de los siguientes parámetros en el área de estudio:

- Isótopos estables de Nitrógeno ^{14}N y ^{15}N .
- Oxidación de sulfatos $\delta^{34}\text{S}$.

6.3 Extracciones de agua (caudales efectivos de extracción)

Para determinar la demanda real del acuífero es necesario un estudio en detalle de los de las extracciones subterráneas del área de Estudio, considerando las captaciones con

derechos de aprovechamiento como las captaciones ilegales, además es necesario hacer un profundo levantamiento en el CBR para detectar posibles irregularidades en la asignación de los derechos como por ejemplo duplicidad de derechos. Otro punto importante para tener en cuenta en la sistematización de la información de demanda del recurso subterráneo son los trámites por regularización que no fueron terminados sus procesos de inscripción en el CPA teniendo que revisar los expedientes judiciales y su estado de sentencia que otorga o rechaza la solicitud de regularización bajo el 2º artículo Transitorio del Código de Aguas.

Por otra parte, mediante Resolución DGA N° 1238 del año 2019, se introduce una herramienta de gestión y fiscalización, tanto para derechos superficiales como subterráneos con el Monitoreo de Extracciones Efectivas (MEE), que permite ordenar y caracterizar la explotación de los recursos hídricos.

6.4 Validación de los antecedentes geofísicos

Uno de los principales desafíos a la hora de la interpretación geofísica y su misma calibración es contar con una fuente de información robusta de los perfiles estratigráficos presente en los pozos del área de estudio. Esto va a depender principalmente de la técnica empleada para la perforación en la obtención una mejor calidad en dicha información.

Particularmente en el área de estudio la totalidad de los sondeos realizados tenían un fin de explotación del recurso hídrico, y si bien se realizan descripciones estratigráficas, estas carecen de exactitud debido a que es una interpretación del material molido extraído en el proceso de perforación.

Dada esta incertidumbre y de acuerdo a los resultados obtenidos en el sondeo DGA-INIA se recomienda la extracción de muestras inalteradas de los materiales en el perfil excavados, mediante perforación en diamantina con un diámetro mínimo en HQ.

Finalmente, la calidad de esta información implica en una mejor caracterización hidrogeológica del área de estudio, definiendo de manera correcta potencias del acuífero, cómo posibles grados de confinamiento del mismo, lo que es interesante de analizar para proyecto de recarga artificial de acuífero.

Si bien los ensayos geofísicos realizados en el área de estudio estiman una geometría preliminar del acuífero, esta información se debe validar con una mayor cantidad de piezómetros hasta tocar basamento, y en lo posible con recuperación inalterada del material perforado, estos permitirá estimar con mayor exactitud el volumen acumulado, por otra parte el termino sustentable debe estar referido al volumen disponible de agua

dulce, y por estudio anteriores se tiene certeza de intrusión salina lo que tampoco está bien monitoreado, lo que disminuye el volumen disponible para la explotación.

Por otra parte, la caracterizar adecuadamente del fracturamiento del basamento permitiría estimar en mejor medida el volumen de agua almacenada en dichas fracturas.

7 CAPACITACIÓN A FUNCIONARIOS DGA

La capacitación se desarrolló según lo acordado con la Inspección Fiscal, la primera semana de enero del año 2021. Las presentaciones de cada jornada y el listado de participantes se pueden revisar en los archivos adjuntados en el **Anexo D**. A continuación, se detalla el programa de la capacitación:

Día 1:

- Principios de hidrogeología física (9:00-10:45)
- El agua en el subsuelo
- Zona no saturada y Zona saturada
- Acuíferos
- Ley de Darcy
- Almacenamiento y Permeabilidad
- Velocidad del agua subterránea
- Potencial hidráulico
- Superficies piezométricas y mapas
- Relación río-acuífero y recarga vs descarga

Mapas hidrogeológicos y modelos conceptuales (11:15-13:00)

- Inventarios hidrogeológicos
- Mapas hidrogeológicos
- Unidades hidrogeológicas
- Modelos conceptuales

Día 2:

Hidrogeofísica (9:00-10:45)

- Métodos eléctricos
- Métodos electromagnéticos
- Método gravimétrico

Perforación de pozos (11:15-13:00)

- Métodos de perforación de pozos
- Pruebas hidráulicas-bombeo
- Perfilaje de pozos

Aplicación de sistemas de recarga y resultados del Estudio (13:05-14:00)

- Que son los sistemas de recarga
- Casos de aplicación de recarga artificial en Chile
- Resultados del estudio

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

Se realizó un sondaje mediante perforación en diamantina con recuperación inalterada de muestras de materiales, esto permitió caracterizar litológicamente la totalidad del perfil atravesado. Además, se realizan 4 ensayos de permeabilidad tipo Lefranc, a los 35, 45, 70, y 100 m de profundidad y sus resultados concluyen una permeabilidad media baja asociadas a materiales limosos o arcillosos. Por otra parte, las muestras fueron cedidas a la Universidad Católica del Norte y al INIA, para su estudio y caracterización (ensayos de permeabilidad, análisis granulométrico y análisis químicos) con el fin de seguir ampliando el conocimiento del acuífero.

Se realizó catastro a pozos profundos del sector, además de registrar niveles en la red de monitoreo de niveles freáticos del a DGA, en la cual se pudo detectar que al menos 5 pozos se encuentran secos (Asentamiento Santa Filomena, Endesa S/E Pan de Azúcar, Hijuela Santa Elena P.A., Nueva Vida 2, Santa Carmen).

Aplicando un balance de la cuenca de estudio se determinó que el acuífero se encuentra en un régimen no sustentable donde existe un desequilibrio provocado por explotación de los derechos otorgados en la cuenca que sobrepasan las recargas, provocando los descensos sostenidos de los niveles freáticos.

Se determinó que el flujo de las aguas subterráneas es norte a sur lo que propicia el ingreso de una cuña salina, desde el mar, lo que es comprobado en el análisis realizado por el INIA (2019), donde se detectan altas conductividades eléctricas asociadas a agua salina en las muestras de los pozos del acuífero.

8.2 Recomendaciones

En base a los resultados de la descripción estratigráfica del Sondaje DGA-INIA, la recarga directa por medio de balsas no sería recomendable, dado que existe un primer estrato de baja permeabilidad lo que no permitiría la infiltración, por lo que la recomendación sería el sistema de recarga por pozos de inyección directa al estrato permeable no saturado ubicado entre los 35 a los 50 m aprox., según estratigrafía pozo DGA-INIA y en base al catastro de niveles presentado en donde en promedio los niveles freáticos están en torno a los 50 m de profundidad. Si bien bajo esta profundidad existen materiales de mayor permeabilidad, habría que vencer la presión del agua para inyectar la recarga lo que significaría un gasto

extra en energía, es por esto que se acota el sector de la recarga entre el rango de profundidades señalado.

Se recomienda un análisis en detalle para la calibración de la geofísica realizada en el área de estudio, mediante la ejecución de más sondajes geotécnicos con recuperación inalterada de testigos, para comprobar de manera fehaciente la real geometría del acuífero, esto es de suma importancia para calcular el volumen total almacenado, y por ende su sustentabilidad en el tiempo.

Se recomienda la implementación de la red de niveles descrita anteriormente.

Se recomienda el monitoreo permanente de variables químicas del acuífero, para determinar el grado de influencia de la cuña salina en el área de estudio, este resultado va directamente relacionado con la explotación sustentable del volumen de agua dulce disponible en la zona.

A partir de los resultados de la piezometría y de la necesidad de conocer un balance hídrico adecuado y actualizado para la zona, se recomienda una actualización de los modelos hidrogeológicos en acople con un modelo superficial tipo WEAP (basado en el desarrollado en el estudio DGA (2020)) para la apropiada caracterización de los escurrimientos superficiales del área de estudio, tanto en dirección como magnitud.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Börgel, R. (1983). Geografía de Chile, Tomo II, Geomorfología. Geografía de Chile, Ediciones Instituto Geográfico Militar, Santiago, 182 pp.
- [2] Carrasco, P. (2019). Proyecto "GIRAgua": síntesis de la cooperación internacional. *Latin American Journal of Trade Policy*, 2(4), 5-19.
- [3] CNR. (2015). Mejoramiento Canales Bellavista, Villalón y Buzeta: Canal Bellavista, Comisión Nacional de Riego. Realizado por Arcadis.
- [4] CORFO. (2015). Estudio geofísico e hidrogeológico en la zona baja de la cuenca del río Elqui y en la zona de Pan de Azúcar, Corporación de Fomento de la Producción. Realizado por Arcadis.
- [5] Corporación Regional de Desarrollo Productivo de Coquimbo (CRDP). (2015). Estudio de modelos de gestión de recursos hídricos superficiales y subterráneos, para las cuencas de las provincias de Elqui, Limarí y Choapa. Realizado por RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda.
- [6] DGA. (1984). Balance Hidrológico Nacional. Regiones III y IV. Realizado por IPLA Ltda., Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Realizado por IPLA Ltda.
- [7] DGA. (2003a). Minuta Técnica DARH N°42. Declaración Área de Restricción Culebrón-Lagunillas Provincia de Elqui, IV Región, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- [8] DGA. (2003b). Resolución DGA N° 672. Declara Área de Restricción Culebrón-Lagunillas Provincia de Elqui, IV Región, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- [9] DGA. (2004a). Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivo de Calidad: Cuenca del Río Elqui y Limarí, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- [10] DGA. (2004b). Aplicación de la modelación hidrogeológico valle Pan de Azúcar S.D.T. N° 176, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Realizado por División de Estudios y Planificación, DGA-MOP.
- [11] DGA. (2014). Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional, SIT N° 341, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Realizado por GCF Ingenieros Ltda.

-
- [12] DGA. (2019a). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Elqui (SIT N° 463), Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Realizado por UTP Hídrica-Eridanus.
- [13] DGA. (2019b). Levantamiento y Análisis de Información Geofísica en el Valle de Pan de Azúcar, Región de Coquimbo (SIT N° 443), Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Realizado por GEODATOS SAIC.
- [14] Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.
- [15] INIA. (2017). Implementación de la sonda de salinidad en aguas subterráneas en el acuífero El Culebrón, Pan de Azúcar, Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Serena, Chile. Realizado por Viviana Andaur Pavez.
- [16] INIA. (2019). Seguimiento del perfil salino del acuífero El Culebrón en tiempo real. *Boletín INIA N° 394*, Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Serena, Chile. Realizado por Gustavo Cárdenas-Castillero, Francisco Meza Álvarez y Viviana Andaur Pavez.
- [17] Karl, B.J., Ríos, B.W., Rivera, G. G. y P. H. Tirado, 1974. Estudio Regional Valle del Río Elqui. 1er capítulo: Caracterización Geológica del Norte Chico. Universidad de Chile, La Serena, pp. 1-9.
- [18] Merlet, H., & Santibáñez, F. (1989). Evaluación y cartografía de la evapotranspiración potencial en la zona de climas mediterráneos de Chile. *Boletín Técnico, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile*, 48, 27-50
- [19] Peña, H., & Vidal, F. (1993). Estimación Estadística de la Línea de Nieves durante los Eventos de Precipitación entre las latitudes 28 y 38 grados Sur. In XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Concepción, Chile.
- [20] Romero Figueroa, C. (2009). Análisis de Embalse Subterráneo: Aplicación en Acuífero Subyacente al Río Elqui, IV Región de Coquimbo. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103428>
- [21] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (2006). Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Escala 1:100.000 Mapa: M120.
- [22] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (2000). Área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo, Escala 1:100.000. N° Mapa: M35.