

**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
RESUMEN EJECUTIVO**

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	ZONA DE ESTUDIO	4
3	METODOLOGÍA.....	6
4	RESULTADOS	9
4.1	CONSTRUCCIÓN PIEZÓMETRO DGA-INIA	9
4.1.1	<i>Descripción estratigráfica</i>	<i>11</i>
4.1.2	<i>Análisis de Calidad Química de aguas.</i>	<i>11</i>
4.1.3	<i>Ensayos hidráulicos.....</i>	<i>11</i>
4.2	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	12
4.2.1	<i>Precipitación Anual.....</i>	<i>12</i>
4.2.2	<i>Caudal Canal Bellavista</i>	<i>12</i>
4.2.3	<i>Recargas al sistema subterráneo.....</i>	<i>13</i>
4.3	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	14
4.3.1	<i>Caracterización geológica.....</i>	<i>14</i>
4.3.2	<i>Delimitación de Unidades Acuíferas</i>	<i>16</i>
4.3.3	<i>Derechos de aguas.....</i>	<i>19</i>
4.3.4	<i>Parámetros hidráulicos.....</i>	<i>19</i>
4.3.5	<i>Calidad de aguas</i>	<i>20</i>
4.3.6	<i>Piezometría.....</i>	<i>21</i>
4.3.7	<i>Balance hídrico</i>	<i>24</i>
5	BRECHAS DE LA INFORMACIÓN	26
5.1	RED DE MONITOREO E INFRAESTRUCTURA	26
5.2	ESTADO DE LA CALIDAD DE AGUA.....	28
5.3	EXTRACCIONES DE AGUA (CAUDALES EFECTIVOS DE EXTRACCIÓN)	28
5.4	VALIDACIÓN DE LOS ANTECEDENTES GEOFÍSICOS.....	29
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
6.1	CONCLUSIONES.....	31
6.2	RECOMENDACIONES	31

7	BIBLIOGRAFÍA.....	33
----------	--------------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: SECTOR HIDROGEOLÓGICO DE APROVECHAMIENTO COMÚN ACUÍFERO CULEBRÓN	5
FIGURA 3-1: DIAGRAMA DE FLUJO DE METODOLOGÍA PARA ABORDAR EL ESTUDIO	6
FIGURA 4-1: UBICACIÓN DEL SONDAJE DGA-INIA	10
FIGURA 4-2: MAPA GEOLÓGICO	15
FIGURA 4-3: FLUJOS ENTRE SUB-SECTORES ACUÍFEROS	18
FIGURA 4-4: MAPA VECTORES DE FLUJO SUBTERRÁNEO 2020	22
FIGURA 4-5: MAPA VECTORES DE FLUJO SUBTERRÁNEO 2004	23
FIGURA 5-1: RED DE MONITOREO PROPUESTA	27

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4-1: UBICACIÓN DE SONDAJE DGA-INIA 2020	9
TABLA 4-2: RESULTADOS ENSAYOS LEFRANC	12
TABLA 4-3: EVOLUCIÓN BALANCE HÍDRICO ÁREA DE ESTUDIO	24

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 Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) El Culebrón-Lagunillas. Por lo anterior

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

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.

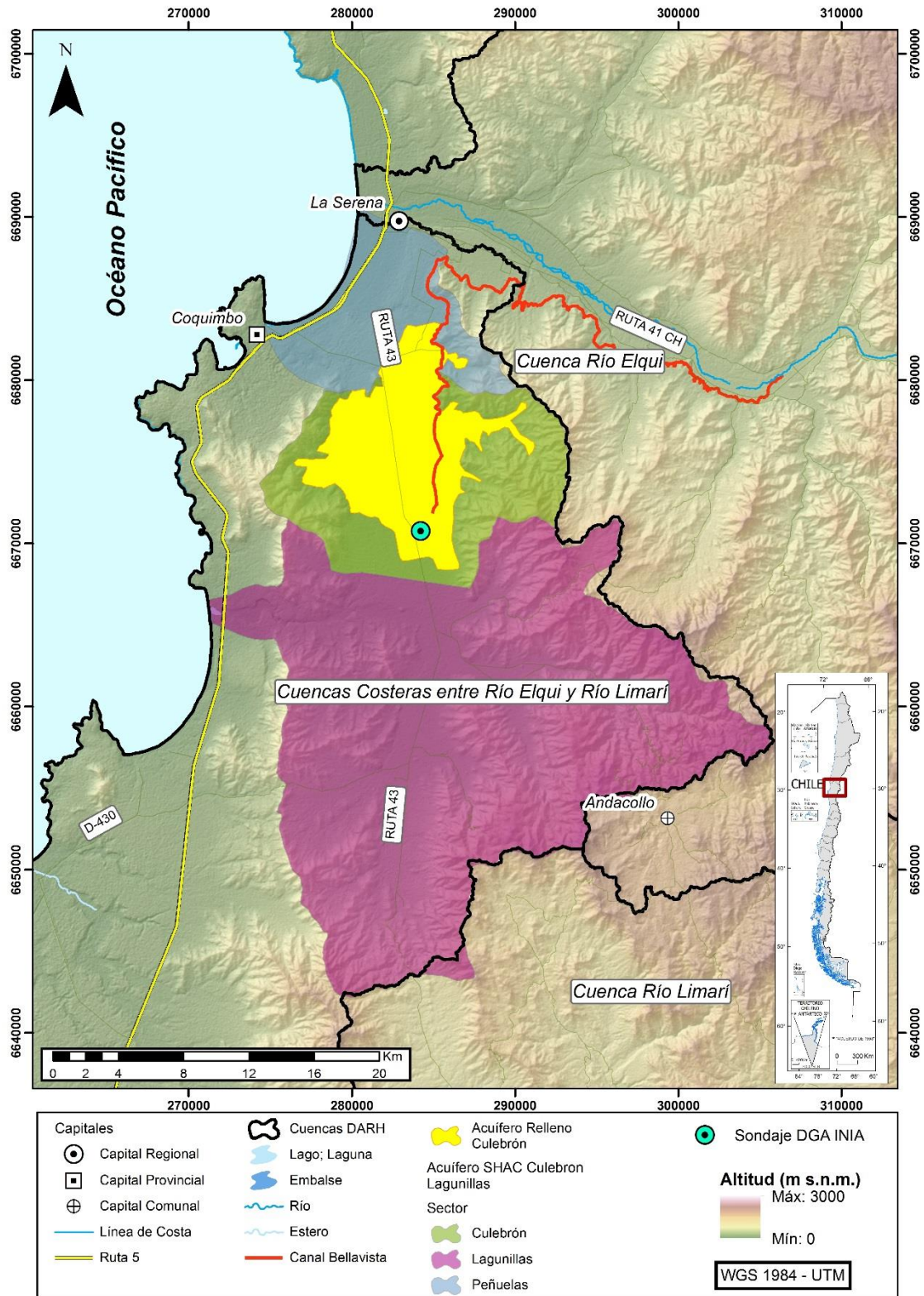
1.3 Objetivos específicos

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 ZONA DE ESTUDIO

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 Costera entre Elqui y Limarí ubicado específicamente en la zona el Valle de Pan de Azúcar, Región de Coquimbo (ver la Figura 2-1).

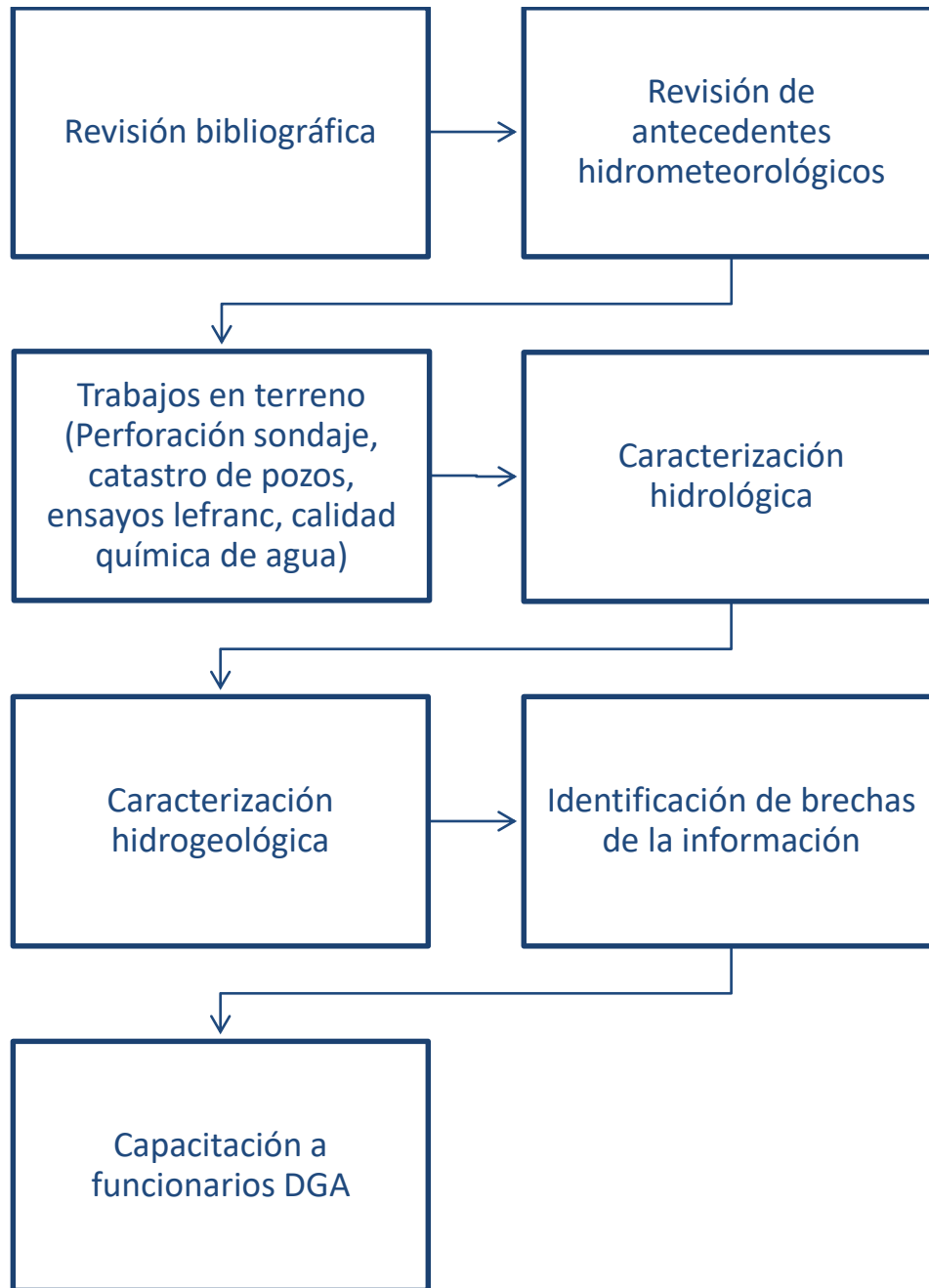


Fuente: Elaboración propia a partir de estudio CORFO (2015)

Figura 2-1: Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común Acuífero Culebrón

3 METODOLOGÍA

A continuación, en la Figura 3-1 se presenta un diagrama de flujos que permite estructurar el enfoque metodológico utilizado para llevar a cabo los objetivos del Estudio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1: Diagrama de flujo de metodología para abordar el Estudio

Para el desarrollo del estudio, se consultó la siguiente bibliografía:

- [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.

4 RESULTADOS

4.1 Construcción piezómetro DGA-INIA

Se utilizó el método de perforación en diamantina con un diámetro HQ para los 100 m de extensión del sondaje. El sondaje se habilita 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).

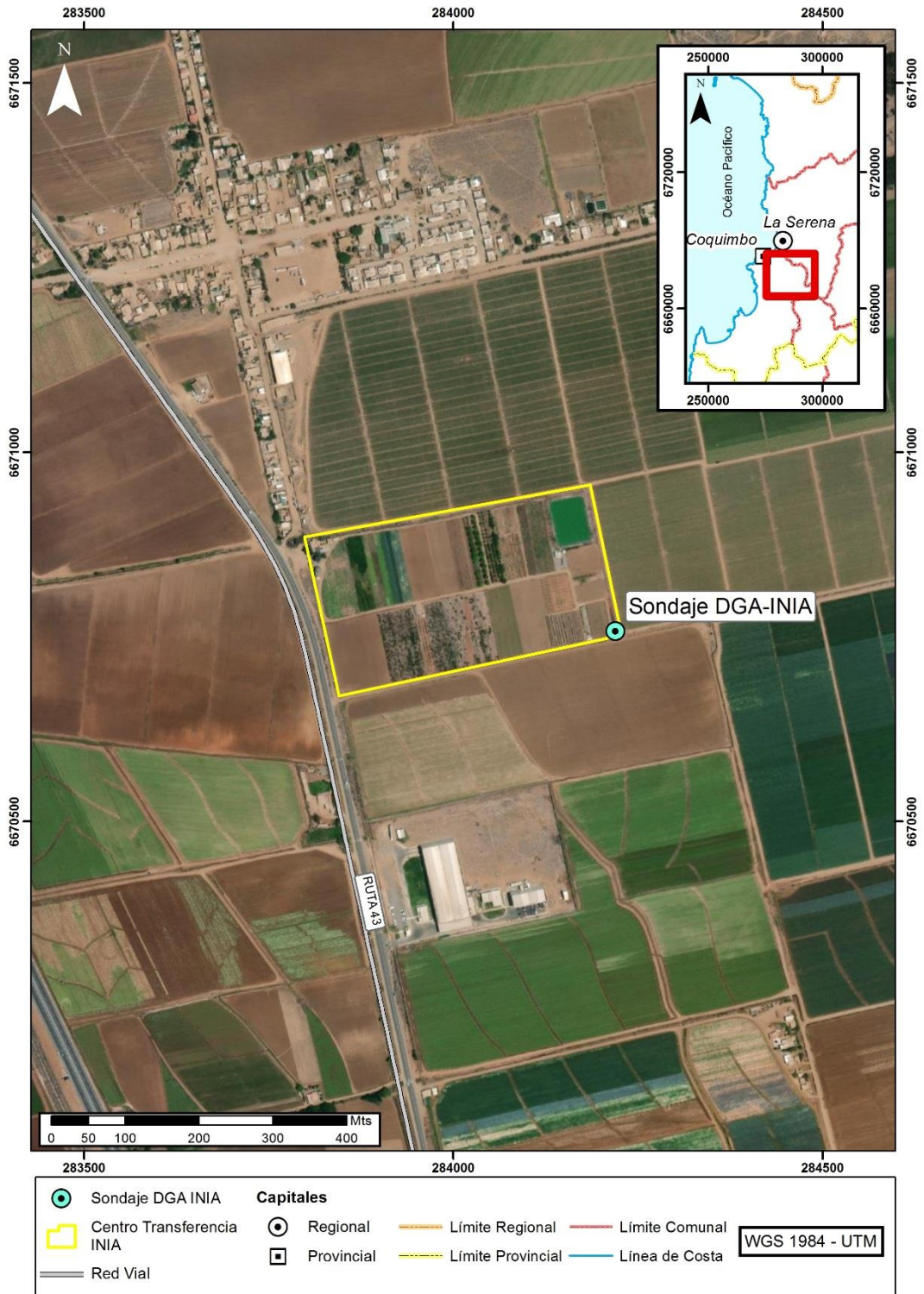
Las labores de perforación y habilitación comenzaron en día 11 de noviembre de 2020 y finalizaron el día 26 de noviembre del 2020. Se presenta en la Tabla 4-1 la ubicación geográfica del sondaje desarrollado, mientras que en la Figura 4-1 muestra la ubicación del sondaje dentro de la parcela experimental del INIA.

Tabla 4-1: Ubicación de sondaje DGA-INIA 2020

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

*Geoide de referencia EGM96

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-1: Ubicación del Sondaje DGA-INIA

4.1.1 Descripción estratigráfica

Se realiza una descripción estratigráfica por cada metro, a través de recuperación íntegra del material mediante perforación en diamantina HQ. 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).

4.1.2 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 completo de metales metaloides

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 de agua potable en el sector.

Se observan resultados similares a los obtenidos en el Estudio realizado por INIA (2019) donde se observan una alta conductividad eléctrica lo que podría indicar presencia de agua salina en la muestra. 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.

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. El agua muestreada, en el sector del sondaje DGA-INIA, se define como cloruras cálcicas, en base a un análisis usando un diagrama de Piper.

4.1.3 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 4-2 se presentan los resultados de los ensayos de permeabilidad.

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.

Tabla 4-2: 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

4.2 Caracterización hidrológica

La caracterización hidrológica presentada a continuación fue utilizada para estimar la recarga natural del acuífero de Pan de azúcar (Relleno - Culebrón). 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 lo tanto, para determinar la recarga al acuífero, se calcularon las precipitaciones aportantes ocurridas en la cuenca a nivel medio anual y se analizaron los caudales medidos en el canal bellavista.

4.2.1 Precipitación Anual

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, 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 concluir la validez de la precipitación media anual registrada por la estación "Pan de Azúcar". La precipitación anual promedio será utilizada a continuación para determinar los caudales aportantes al acuífero estudiado.

4.2.2 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.

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.

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, el caudal infiltrado en el tramo comprendido desde el Km 32,9 hasta el final es de aproximadamente 432 l/s.

4.2.3 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.

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.

4.3 Caracterización hidrogeológica

4.3.1 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 4-2 se muestra la imagen con la caracterización geológica que se describe en lo que sigue.

4.3.1.1 Rocas consolidadas

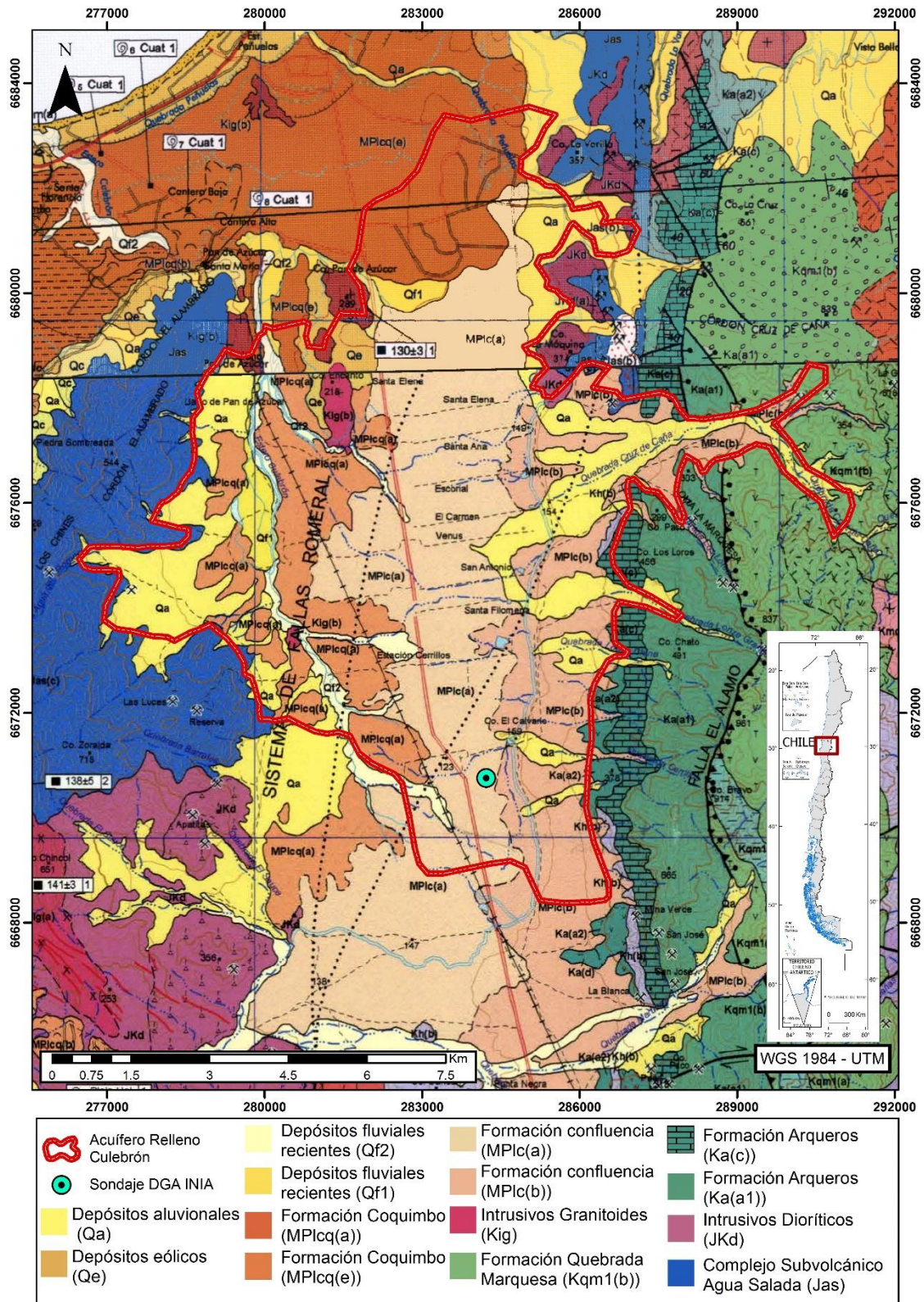
El basamento rocoso está constituido en el borde Este mayoritariamente por rocas estratificadas cretácicas y en el borde occidental por rocas estratificadas e intrusivas de edad Jurásico. El sistema de rocas cretácicas está formado por una secuencia sedimentaria y volcánica, principalmente de origen 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 intrusitos graníticos a dioríticos del Cretácico Inferior alto e intrusivos dioríticos de edad Neocomiano (Jkd) (SERNAGEOMIN, 2006).

4.3.1.2 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 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.



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

Figura 4-2: Mapa Geológico

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.

4.3.1.3 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).

4.3.1.4 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).

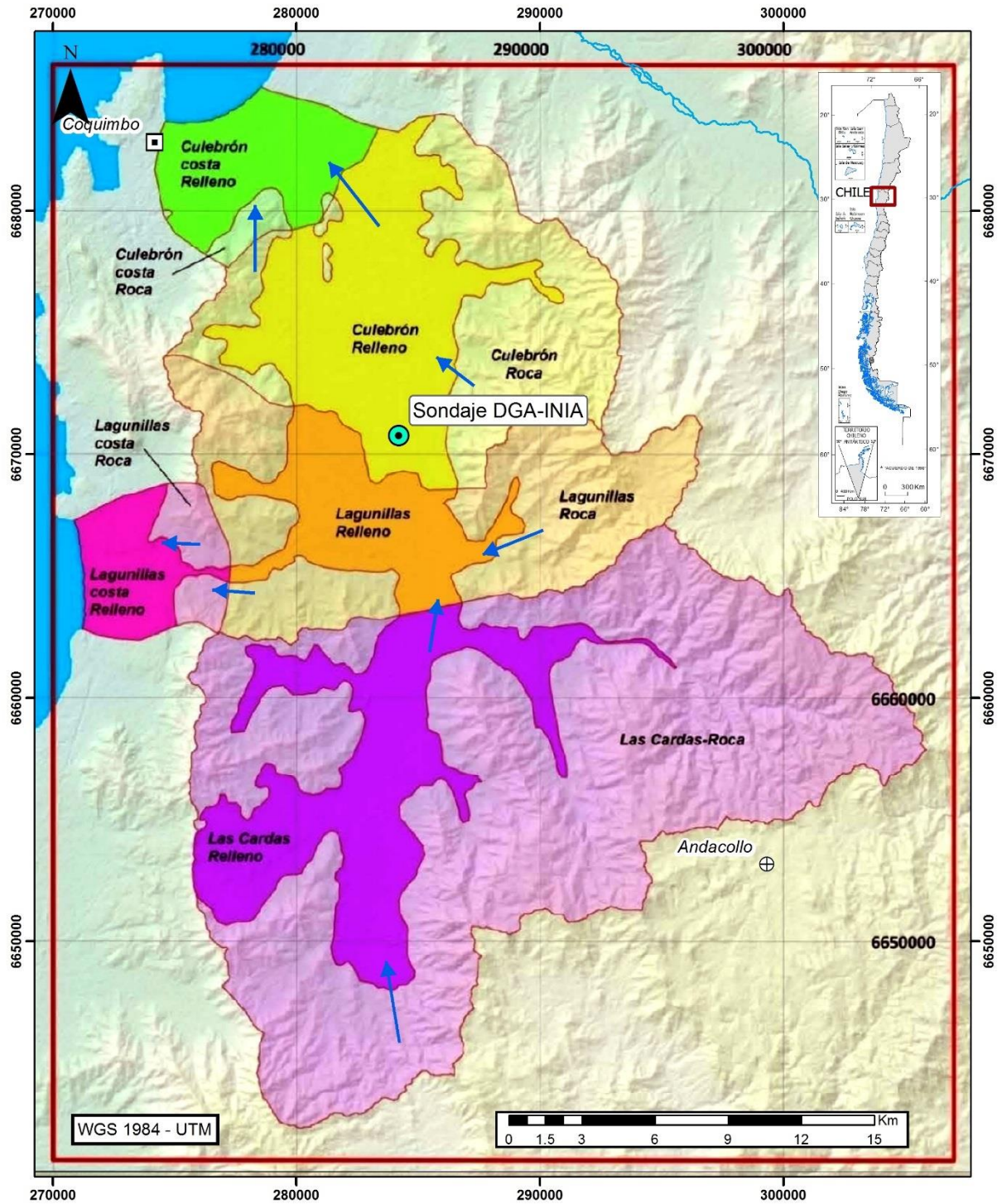
4.3.2 Delimitación de Unidades Acuíferas

En el estudio 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 4-3, 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.
- 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.).



Fuente: DGA (2014)

Figura 4-3: Flujos entre sub-sectores acuíferos

4.3.3 Derechos de aguas

Usando la información contenida en Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA, se obtiene la cantidad de derechos por tipo de uso para la Cuenca Costera entre Elqui y Limarí en la que se inserta el acuífero el Culebrón (área de Estudio). En total, se tiene a nivel de cuenca un total de 85 derechos otorgados con un caudal total de 5.904 l/s, donde 5.293 l/s tienen un régimen de extracción de permanente y continuos. Al llevar la información a nivel del área de estudio, el número de derechos disminuye a 191, con un caudal de 2.638 l/s. En términos de caudal efectivo bombeado, se tiene que el caudal efectivamente bombeado es del orden de 1.215,5 l/s.

4.3.4 Parámetros hidráulicos

En el "Estudio geofísico e hidrogeológico en la zona baja de la cuenca del río Elqui y en la zona de Pan de Azúcar" desarrollado por GCF Ingeniero 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 con el 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.

Por otra parte, de la revisión de antecedentes técnicos para habilitación y registro de pozos en el CPA, se obtiene que 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.

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.

Del análisis de las pruebas de bombeo 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.

4.3.5 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. Cabe destacar los altos valores medidos en conductividad que superan ampliamente los límites máximos en la NCh 1333 para uso de riego, esto podría implicaría la presencia de aguas salinas presentes en el acuífero.

Se observan resultados similares a los obtenidos en el estudio INIA (2019) donde se observan una alta conductividad eléctrica con $1.510 \mu\text{S}/\text{cm}$ / 25°C , mientras que el cloruro se encuentra por debajo del límite máximo para la norma de riego con una concentración de $145 \text{ mg}/\text{l}$. 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, y dados los resultados obtenidos del análisis de la muestra del sondaje DGA-INIA la cataloga como "ligeramente salina".

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 $10.705 \text{ mg}/\text{L}$ 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 $3.000 \text{ mg}/\text{l}$ 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.

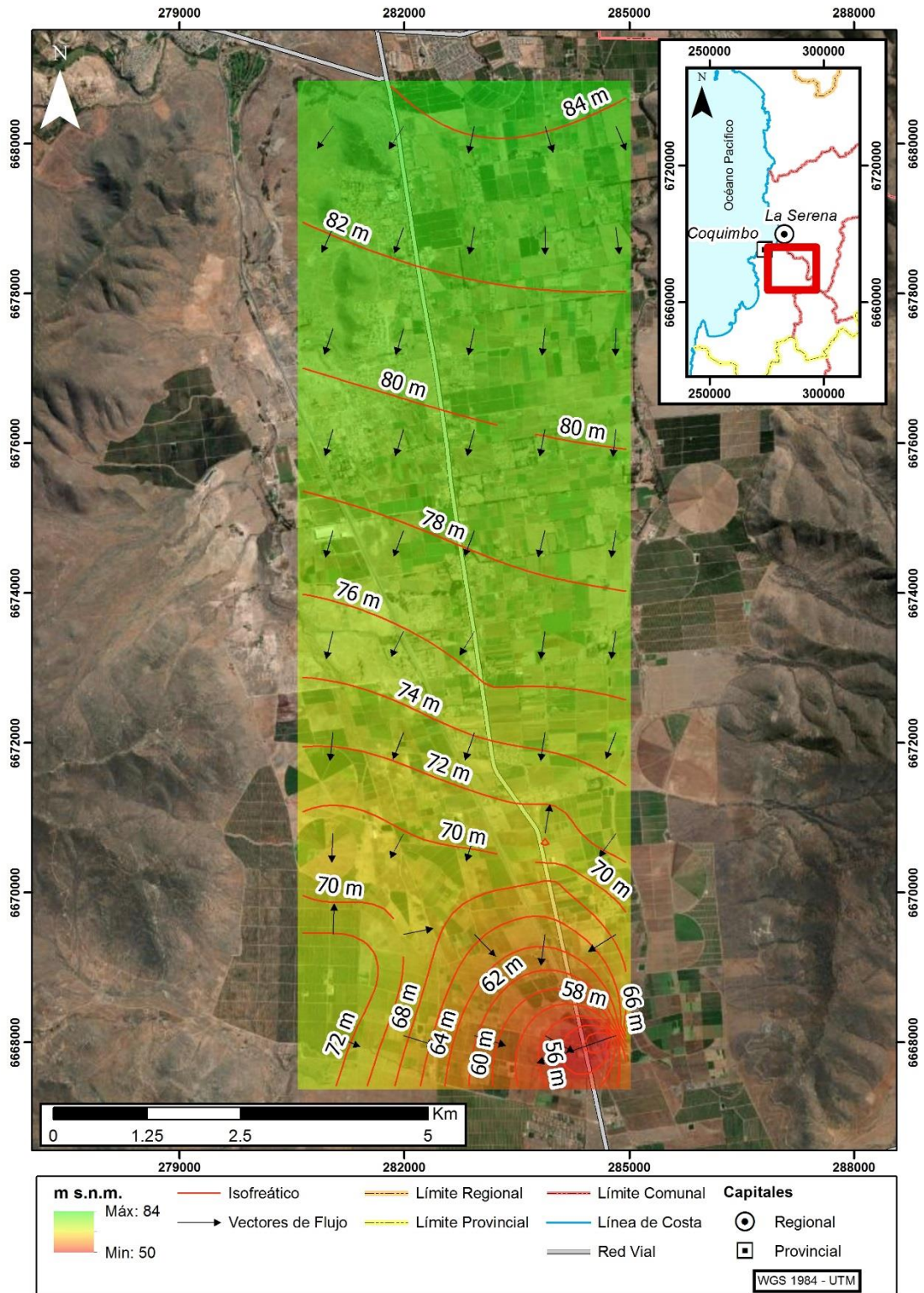
Estas peculiares concentraciones y sus ubicaciones se deben a la litología del perfil, conformado por arenas, arcillas y limos; actuando la arcilla en este caso como finas capas que debilitan el movimiento de las aguas en sentido vertical, dando como resultado, aguas de mayor densidad sobre aguas de menor densidad.

4.3.6 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 pozos. En promedio los niveles estáticos en el área de estudio se encuentran alrededor de los 55 m.

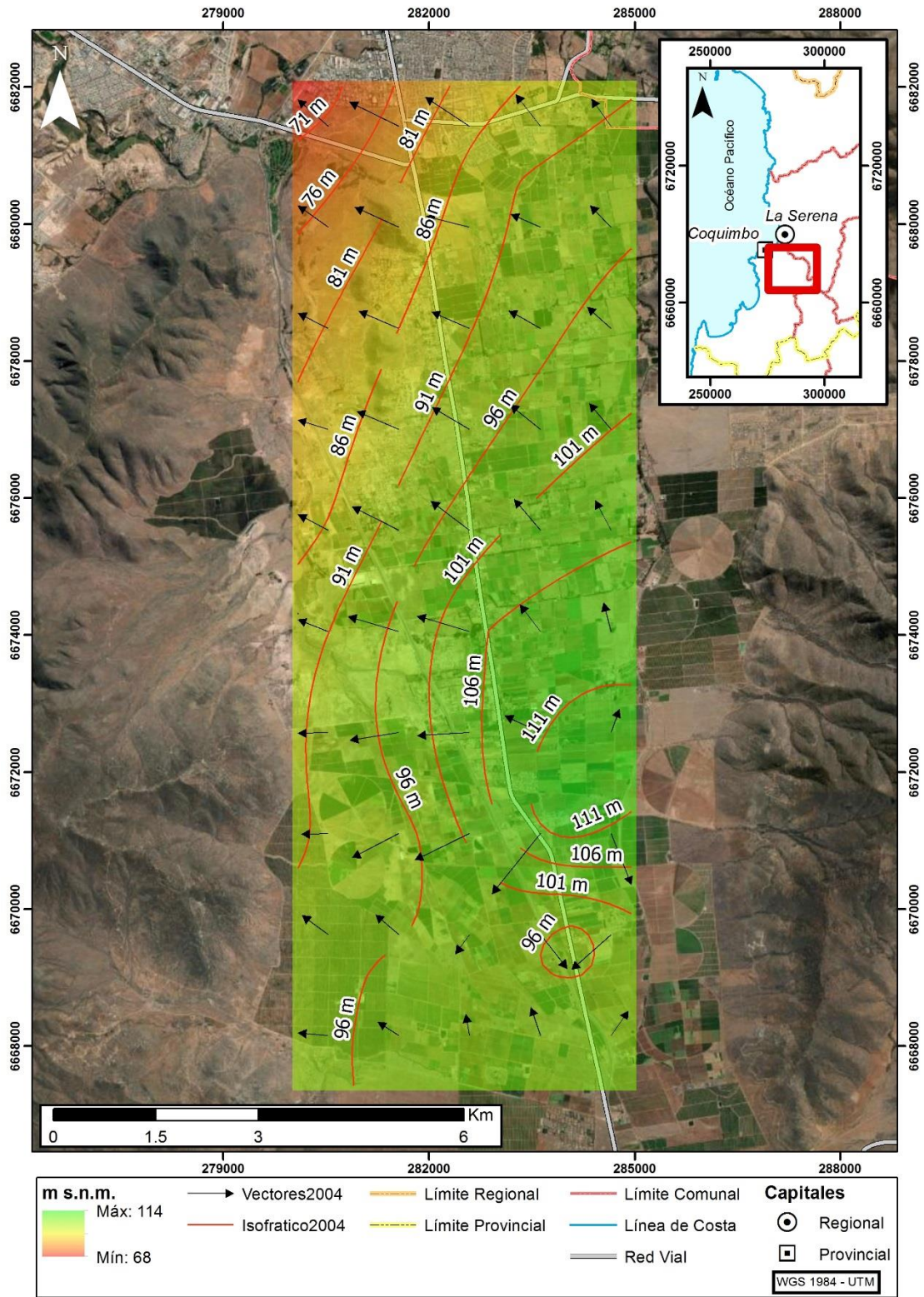
A partir de los resultados de la campaña de mediciones de pozos fue posible de construir un mapa de curvas isofreáticas y a partir de la nivelación con un modelo digital de elevaciones (SRTM con una resolución de 1 arc-segundo) se estiman las direcciones preferentes del flujo subterráneo, las que se muestran en la Figura 4-4. 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.

El 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 4-5), 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 la dirección, sería aún más clara aislando completamente el factor humano del área de estudio (condición de niveles freáticos previo a la explotación del acuífero).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-4: Mapa vectores de flujo subterráneo 2020



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-5: Mapa vectores de flujo subterráneo 2004

Se observa 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.

Además, se observa que muchas mediciones en los últimos años presentan 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.

4.3.7 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 4.2.3 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 un para el año 2004 un balance basado en modelación, el que se presenta en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: 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 4-3 (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 4-3 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 4.3.3, 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.

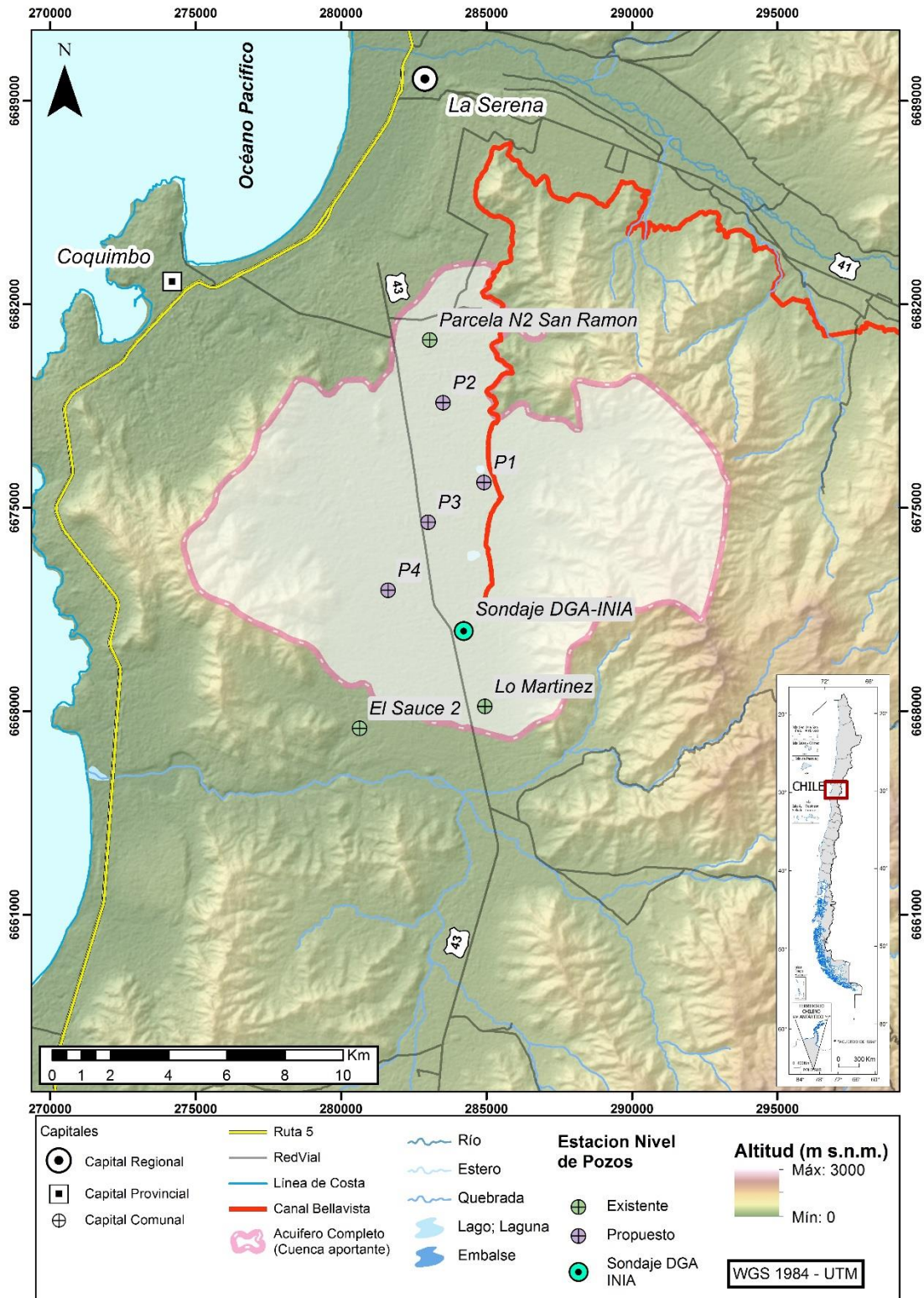
Se debe dejar en todo caso en forma muy clara que lo anteriormente presentado debe mejorarse, idealmente con una modelación integrada WEAP-Modflow, de modo de determinar en mejor forma la interacción entre el sistema superficial y subterráneo.

5 BRECHAS DE LA INFORMACIÓN

5.1 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. En la Figura 5-1 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 sondeos 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 5-1: 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.

5.2 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 5-1).

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 $\delta^{34}\text{S}$.

5.3 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.

5.4 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 permitirán estimar con mayor exactitud el volumen acumulado, por otra parte el término 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.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 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.

6.2 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.

7 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.