



Gobierno
de Chile

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

SECTORIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL RÍO LAJA, REGIÓN DEL BIOBÍO

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

HÍDRICA CONSULTORES SPA

S.I.T. N° 430

Santiago, Octubre 2018

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Juan Andrés Fontaine

Director General de Aguas
Ingeniero Comercial Sr. Óscar Cristi Marfil

Jefa (S) División de Estudios y Planificación
Ingeniera Civil Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal
Ingeniera Agrícola Pamela García Serrano

Inspector Fiscal Subrogante
Ingeniero Civil en Geografía Juan Carlos Salgado

HÍDRICA CONSULTORES SPA

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

Profesionales

Ingeniero Agrónomo Irene Bernaus (MRecHid)
Ingeniero Civil Felipe Orellana M. (MEngSc)
Geofísico Juan Carlos Parra (MSc)
Cartógrafo Salomón Vielma P.
Ingeniero Civil Darío Vargas G.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	GENERAL	1
1.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	1
1.3	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA Y ZONA DE ESTUDIO	2
CAPÍTULO 2	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	3
2.1	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	3
2.2	RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE	3
CAPÍTULO 3	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	5
3.1	PLUVIOMETRÍA	5
3.2	TEMPERATURA	6
3.3	FLUVIOMETRÍA	6
CAPÍTULO 4	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA	7
4.1	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	7
4.1.1	Marco Geomorfológico	7
4.1.2	Marco Geológico	8
4.2	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLOGICA	9
4.2.1	Definición de Acuíferos	9
4.2.2	Unidades Hidrogeológicas	10
4.2.3	Niveles Freáticos	11
4.2.4	Parámetros Hidráulicos	12
4.2.5	Extracciones Existentes	12
CAPÍTULO 5	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	13
5.1	INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA EXISTENTE	13
5.2	ANÁLISIS Y RESULTADOS	13
5.2.1	Aguas superficiales	13
5.2.1	Aguas subterráneas	13
CAPÍTULO 6	DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO	14
6.1	ANÁLISIS DE LA ESTRATIGRAFÍA EXISTENTE	14
6.2	SELECCIÓN DE PUNTOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	15

6.3	TRABAJOS GEOFÍSICOS REALIZADOS	15
CAPÍTULO 7	GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES Y CAMPAÑA DE TERRENO	17
7.1	CAMPAÑA DE INVENTARIO DE NIVELES EN POZOS	17
7.1.1	Análisis de Derechos de Aprovechamiento inscritos	17
7.1.2	Campaña de terreno	17
7.2	GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES	19
CAPÍTULO 8	DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO	20
8.1	REPRESENTACIÓN HIDROGEOLÓGICA	20
8.1.1	Formaciones acuíferas	20
8.1.2	Parámetros elásticos	21
8.1.3	Nivel freático y dirección de flujo	23
8.1.4	Singularidades	23
8.2	BALANCE HÍDRICO	23
8.2.1	Entradas y salidas del sistema	24
8.2.2	Estimación del balance hídrico del sistema acuífero	24
CAPÍTULO 9	PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN	25
9.1	SECTORIZACIÓN DEL ACUÍFERO	25
9.1.1	Delimitación del SHAC	25
9.1.2	Unidades del SHAC	26
9.2	VÍNCULOS Y RELACIONES ENTRE ELEMENTOS DEL SISTEMA	27
CAPÍTULO 10	DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA	28
10.1	ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA	28
10.1.1	Recarga del acuífero	28
10.1.1	Recarga estimada de las unidades del acuífero	29
CAPÍTULO 11	IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS	30
11.1	BRECHAS DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA	30
11.2	BRECHAS EN REGISTROS DE CONTROL HIDROMÉTRICO	30
CAPÍTULO 12	IMPLEMENTACIÓN DEL SIG	31
12.1	PLATAFORMA COMPUTACIONAL	31
12.2	SISTEMATIZACIÓN Y ORDENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	31
CAPÍTULO 13	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
13.1	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO	32
13.2	RECOMENDACIONES	35

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERAL

El Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas, aprobado en el Decreto Supremo Nº203 de 2013, en su artículo 54 define Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC, en adelante) como “acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente” (DGA, 2014b). En algunos SHAC el Servicio de la Dirección General de Aguas (DGA) se ha visto imposibilitado de resolver el creciente número de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas debido a que en la actualidad no se dispone para aquellos, información con un nivel de incertidumbre aceptable, sobre su volumen sustentable y las características geológicas, geofísicas, hidrometeorológicas, entre otras.

Este estudio tiene como propósito disponer de los antecedentes técnicos que permitan mejorar el conocimiento para la gestión de derechos de aguas subterráneas en el valle del río Laja, en la región del Biobío.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general del estudio es realizar una propuesta de sectorización hidrogeológica y una estimación de la recarga (oferta) para el acuífero del valle del río Laja.

Para cumplir con este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

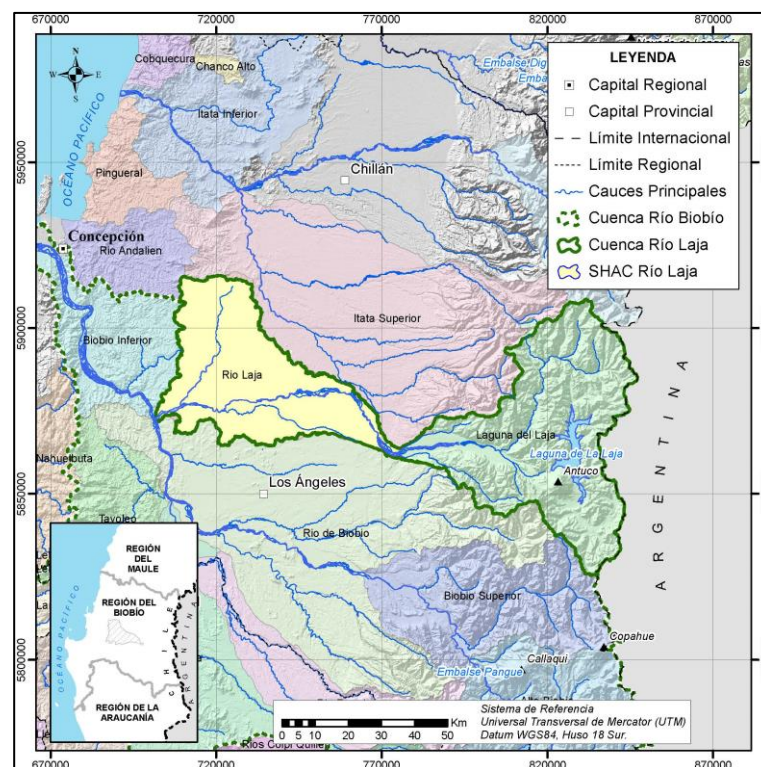
- Analizar antecedentes.
- Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
- Identificar las zonas de recarga y descarga del acuífero.
- Elaborar una propuesta de sectores hidrogeológicos para el acuífero del valle del río Laja.
- Determinar la oferta hídrica de cada sector.
- Desarrollar una base de datos consolidada, representada en un SIG.
- Detectar brechas de información que impliquen realizar actividades en terreno (geofísica, monitoreo, etc.).

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA Y ZONA DE ESTUDIO

El río Laja es el principal afluente del río Biobío, situándose su cuenca en la zona norte de la del del río Biobío. Con una superficie total de 4.667 km², está dividida en 2 subcuencas:

- Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucúe): Corresponde a la subcuenca asociada a los ríos Laja en su primer tramo, Polcura, Rucúe y Manco. Tiene una superficie de 2.749 km². La Laguna del Laja es la entidad hidrológica representativa, con una superficie de 80,5 km²; se la considera como embalse, con una capacidad de 5.582 Mm³ (DGA, 2016c).
- Río Laja Bajo: Con 1.917 km² de superficie, corresponde a la cuenca en el tramo que transcurre por el valle central. Recibe las aguas de los ríos afluentes Claro y Caliboro. El río Laja fluye en dirección W hasta su confluencia con el río Bío-Bío.

El SHAC del río Laja se ubica en la subcuenca del Laja bajo, en el valle central. Cabe destacar que, alrededor de éste, existen otros SHAC colindantes correspondientes a las subcuencas limítrofes, los cuales se identifican en la Figura 1.3-1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.3-1 Ubicación SHAC del río Laja y colindantes

Cabe mencionar que la delimitación del SHAC del río Laja corresponde, inicialmente y como punto de partida del presente estudio, a su propia subcuenca (río Laja bajo).

CAPÍTULO 2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

La recopilación de antecedentes se enfocó en la caracterización hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica de la cuenca del río Laja y en particular, del sector comprendido por el SHAC del Laja.

En total, los antecedentes revisados y que han sido consultados en el desarrollo del presente estudio fueron 34, de los cuales 19 correspondieron a estudios solicitados o desarrollados por la DGA y 15 fueron antecedentes de instituciones públicas o privadas, universidades o personas naturales. Para cada uno de los antecedentes se elaboró una ficha resumen con su identificación, alcance y ámbito geográfico, tipología del antecedente, objetivo de la información y resultados de interés para el presente estudio.

Adicionalmente a éstos, se consideraron otras fuentes de información que proporcionan datos relevantes como, por ejemplo, estadísticas de la Red Hidrométrica de la DGA y/o expedientes de derechos de aprovechamiento de aguas del Catastro Público de Aguas.

2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE

Los estudios u otras fuentes e información clave en los aspectos principales de la caracterización del acuífero del valle del río Laja se detallan a continuación:

- Antecedentes generales:
 - El documento “Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional” (DGA, 2014c) resume los pasos a seguir en la sectorización de acuíferos en territorio chileno, como es el caso del presente estudio.
- Antecedentes hidrológicos:
 - El estudio “Análisis Efecto en el Régimen Hídrico por Cambio en Patrones Meteorológicos” (DGA, 2016) recopila estadística de pluviometría y registros de temperatura en la cuenca del Biobío, proporcionando datos rellenados y con

- análisis de consistencia en el periodo hidrológico 1960-2014 de las estaciones seleccionadas.
- Estadística de precipitaciones y temperatura de estaciones meteorológicas de la DGA y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).
 - Estadística de caudales de las estaciones fluviométricas y niveles estáticos de pozos de la DGA en la zona de estudio.
 - Antecedentes hidrogeológicos:
 - Según el “Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Biobío” (DGA, 2012), el sistema presentaría una gran unidad acuífera, con una división en 3 sub-acuíferos definidos a partir de su composición litológica.
 - Del mismo estudio se extrae cobertura geológica a escala 1:250.000 así como catastro de pozos, con información de niveles estáticos, parámetros elásticos y equipotenciales de la zona del SHAC del río Laja.
 - Del estudio citado anteriormente como de la publicación “*The Andes. Active Subduction Orogeny*” (Oncken, 2006) se recopilan antecedentes de trabajos geofísicos, concretamente de puntos de gravimetría existente, con información relativa a la profundidad del basamento.
 - Expedientes de derechos de aprovechamiento de aguas disponibles en la web institucional del Catastro Público de Aguas.
 - Antecedentes hidrogeoquímicos:
 - Registros de calidad físico-químicos de las estaciones de aguas superficiales y subterráneas de la Red Hidrométrica de la DGA.

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

En base a la información disponible, se realizó una caracterización de las variables precipitación, temperatura y caudal, enfocada en la zona definida por el SHAC.

3.1 PLUVIOMETRÍA

En la caracterización de las precipitaciones del SHAC del río Laja se consideraron las 27 estaciones meteorológicas que posee la DGA en la zona¹ y que de acuerdo a DGA (2016) presentan, para la cuenca del río Biobío, la mejor disponibilidad y calidad de información para permitir el relleno de su registro. Adicionalmente, y puesto que el SHAC se sitúa en el extremo norte de la cuenca del río Biobío, se consideraron 3 estaciones situadas en la zona sur de la cuenca del río Itata, pertenecientes también a la Red Hidrométrica de la DGA, para tener una mayor distribución de información pluviométrica.

El registro de las estaciones meteorológicas se completó hasta el mes de marzo de 2017 desde lo presentado por DGA (2016), esto es, desde abril de 1960 hasta el año hidrológico 2016/17, mediante la actualización de los registros con información oficial de la DGA y por medio del relleno de acuerdo a los parámetros expuestos en DGA (2016), obteniendo un periodo de análisis de 57 años. Se procedió de igual forma para las estaciones de la cuenca del río Itata, tomando los valores históricos y rellenados hasta abril de 2011 de DGA (2012), completando el registro a marzo de 2017.

Con los registros actualizados y rellenados de las 30 estaciones pluviométricas, se construyeron curvas isoyetas para caracterizar la pluviometría del SHAC del río Laja. La pluviometría promedio obtenida fue de 1.064 mm/año.

Posteriormente, la estadística fue utilizada en la construcción de curvas de variación estacional. En el área de estudio, éstas muestran una concentración de las lluvias entre los meses de mayo y agosto, coincidente en gran parte con el periodo otoñal e invernal. Se observa que la precipitación con una probabilidad de excedencia del 50% corresponde a valores

¹ Excepto la estación 370033 María Dolores, Los Ángeles Ad. que pertenece a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

alrededor de 1.000 mm/año en centro (estación Las Achiras) y poniente (estación Laja), mientras que en el extremo oriente del SHAC, ascienden a un valor superior a 1.300 mm/año (estación Río Laja en Tucapel) por la proximidad a la precordillera.

3.2 TEMPERATURA

Por su ubicación y representatividad en el sector del SHAC del río Laja, se seleccionó la estación 370033 “María Dolores Los Ángeles Ad.”, de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), ubicada a 120 m.s.n.m., en la caracterización térmica. El resto de estaciones se sitúan en zonas alejadas y a cotas disímiles al valle del Laja, considerándose no convenientes para el análisis.

El registro de la estación se rellenó a la fecha de marzo de 2017 desde lo presentado en DGA (2016), esto es, desde abril de 1960, completando el año hidrológico 2016/17 (periodo de análisis de 57 años). Posterior al relleno del registro se obtuvo el valor de temperatura media mensual y anual, siendo esta última de 13,4°C. Es posible observar una estacionalidad a lo largo del año; la temperatura promedio en invierno es de 10,9°C y 18,4°C para verano.

3.3 FLUVIOMETRÍA

La caracterización fluviométrica se realizó a partir de la información disponible desde abril de 1960 al mes de marzo de 2017 (año hidrológico 2016/17) de las estaciones que posee la DGA en el curso del cauce del río Laja y sus afluentes. De las estaciones fluviométricas midiendo flujo sobre cauce natural se seleccionaron, de entre aquellas ubicadas sobre el SHAC del río Laja, las más representativas en cuanto a serie de registros, importancia de la fuente y situación para caracterizar al cauce del río Laja en la zona de estudio así como el río Claro, identificando un total de 5 estaciones: Río Laja en Tucapel, Río Laja en Tucapel 2, Río Laja en Puente Perales, Río Laja en San Rosendo y Río Claro en Camino Yumbel-Estación.

Se realizaron curvas de variación estacional de los caudales de las estaciones río Laja en Tucapel y río Laja en Puente Perales. Los mayores caudales se dan principalmente entre mayo y octubre, siendo entre enero y marzo el periodo de menor flujo circulante; cabe señalar aquí que en el valle del río Laja existe una red de canales de regadío, la cual debe considerarse por la importancia de las extracciones en el periodo de riego, principalmente en verano.

Los caudales anuales con una probabilidad de excedencia del 85% obtenidos corresponden a 99,7 m³/s en río Laja en Tucapel y 106,9 m³/s en río Laja en Puente Perales. Otro aspecto que se extrae de los resultados es que los caudales del río Laja son superiores en Puente Perales respecto los obtenidos en Tucapel (entrada de la subcuenca).

CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La caracterización hidrogeológica realizada a partir de antecedentes contempló la recopilación geológica de la zona, la identificación de unidades hidrogeológicas y la generación de los antecedentes básicos de los acuíferos de interés, tales como sus parámetros hidráulicos y profundidad del agua subterránea.

4.1 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

La caracterización de la geología del área de estudio se presenta mediante un análisis inicial de la geomorfología y la definición de las unidades geológicas representativas de la zona.

4.1.1 Marco Geomorfológico

De acuerdo a la caracterización geomorfológica realizada por Börgel (1983), citado en DGA (2012), se distinguen cuatro unidades morfológicas en el área comprendida por el SHAC del río Laja, en sentido E-W: Precordillera, Depresión Central, Cordillera de la Costa y Planicies Litorales.

El SHAC del río Laja se encuentra prácticamente en su totalidad dentro de la unidad geomorfológica “Depresión Central”. Constituida por una planicie fuertemente ondulada cuyas alturas no superan los 200 m.s.n.m., en esta sección se encuentran depósitos fluvio-glacio-lacustres que han sido arrastrados desde la cordillera de Los Andes. Este extenso valle ha sido socavado por fenómenos de transportes de aguas o aluviones provenientes de la cordillera andina; por efecto de avances y retrocesos de glaciares y por la actividad volcánica de la zona. Los materiales más comunes como arenas, bloques, limos y arcillas constituyen la secuencia estratigráfica típica del sector.

Solo en el extremo NW de la cuenca del río Laja aparece una pequeña porción de la Cordillera de la Costa, caracterizándose más por lomeríos moderados que grandes orogenias, formando así una vía de comunicación de tipo transicional entre la depresión central y la cordillera de la costa.

Hacia el extremo oriental del SHAC del río Laja, se encuentra una zona de transición conocida como “La Montaña”, la cual corresponde a la base pre-cordillerana ubicada a los

pies de la Cordillera de los Andes. Las cotas se ubican entre los 300 y 850 m.s.n.m. Localmente, dentro del SHAC en estudio, esta unidad es poco representativa.

Finalmente, la unidad Planicies Litorales aflora en el límite SW del SHAC, en las cercanías del desembocadura del río Laja con el río Biobío, ocupando solo un pequeño porcentaje en cuanto a ocupación espacial. Se incluyen las llanuras de sedimentación fluvial y/o aluvial, caracterizándose por la presencia de sedimentos arenosos negros provenientes del arrastre de material volcanoclástico del volcán Antuco, con alturas variables entre 10 y 50 m.s.n.m.

4.1.2 Marco Geológico

La descripción geológica del SHAC del río Laja se desarrolla en base a los principales levantamientos realizados para la elaboración de las hojas Concepción-Chillán (1981) y Los Ángeles-Angol (1981), a escala 1:250.000 para la región del Biobío. Estas cartas fueron digitalizadas dentro de los trabajos realizados en el “Estudio Hidrogeológico de la cuenca del Biobío” (DGA, 2012).

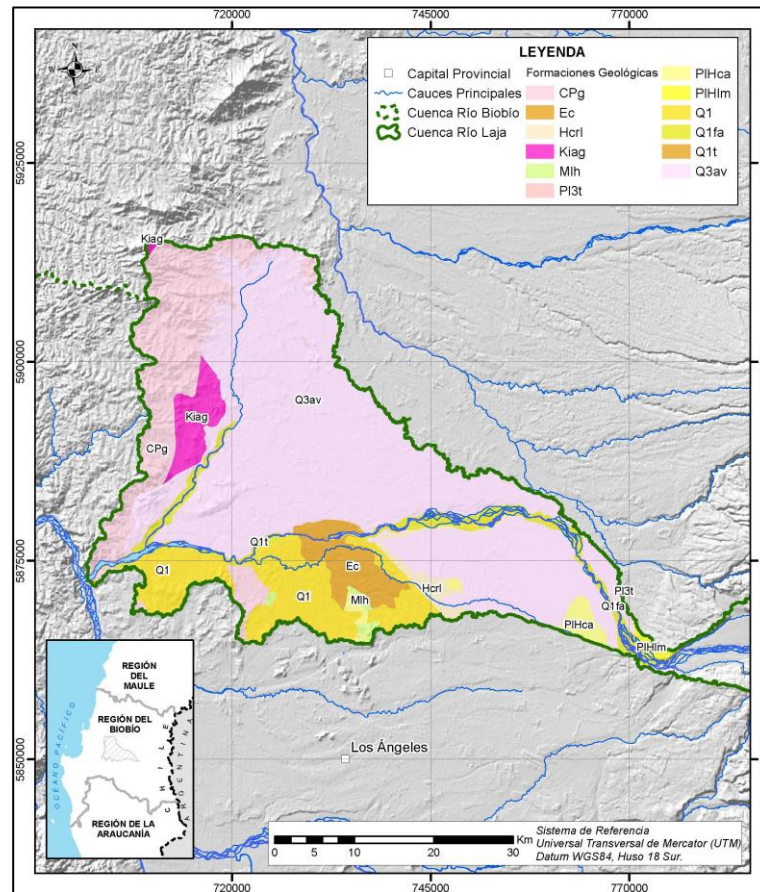
La identificación de las unidades geológicas presentes en el SHAC se tomó desde la base de estudios de SERNAGEOMIN (2003) y se agrupan cronológicamente de la siguiente manera:

- Ec Formación Curanilahue (Eoceno Inferior)
- MIh Lavas de Huelehueico (Mioceno Inferior)
- PIHca Sedimentos Glacio-Lacustres Collipulli-Angol (Pleistoceno-Holoceno)
- Hcrl Depósitos del cono fluvial del río Laja (Pleistoceno-Holoceno)
- Q3av Depósitos de avalancha volcánica (Pleistoceno-Holoceno)
- Q1fa Depósitos fluvio-aluviales antiguos (Pleistoceno-Holoceno)
- Q1 Depósitos fluvio-aluviales actuales (Pleistoceno-Holoceno)
- Q1t Sedimentos de terrazas fluviales (Holoceno)

Hacia el extremo occidental del SHAC se presentan de manera limitante cuerpos intrusivos que representan el inicio de la cordillera de la costa, al oeste. Dentro de estas intrusiones se encuentran:

- Kiag Intrusivos Cretácicos
- CPg Intrusivos Carboníferos-Pérmicos tonalitas y granodioritas indiferenciadas

En la Figura 4.1-1 se muestra la distribución espacial de estas unidades para el SHAC del río Laja.



Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2012).

Figura 4.1-1 Formaciones Geológicas SHAC río Laja

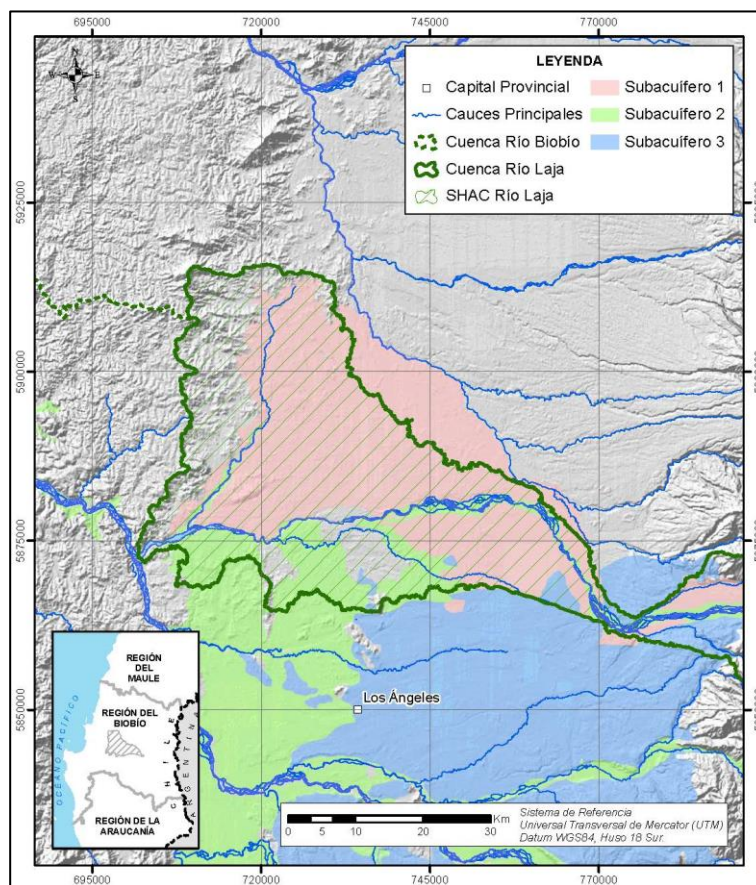
4.2 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA

4.2.1 Definición de Acuíferos

A lo largo de toda la cuenca del río Biobío, donde afloran las unidades geológicas terciarias superiores y cuaternarias, se reconoce la existencia de un solo acuífero de carácter freático. Esta gran unidad hidrogeológica, sin embargo, exhibe variaciones tanto laterales como en profundidad de la permeabilidad lo que permitió, según DGA (2012), reconocer en ella tres subunidades o sub acuíferos diferenciados entre sí por su composición y características permeables:

- Sub-acuífero 1: Unidad Q3av, depósitos de avalancha volcánica.
- Sub-acuífero 2: Unidades Q1, depósitos fluvio-aluviales y sedimentos de valles recientes; Q1fa, depósitos fluvio-aluviales antiguos; Q1t, sedimentos de terrazas fluviales y Hcrl, depósitos de conos fluviales.
- Sub-acuífero 3: Unidad PIHca, sedimentos glacio-lacustres.

En la Figura 4.2-1 se detalla la configuración espacial de estos sub acuíferos.



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2012).

Figura 4.2-1 Sub-acuíferos presentes en el SHAC del río Laja

Espacialmente, el sub acuífero 1 presenta mayor extensión en el SHAC del río Laja, limitando al oeste con el borde oriental de la cordillera de la costa, representando una barrera natural para el flujo local de aguas subterráneas. El sub acuífero 2 se ubica paralelamente al cauce de los ríos Laja y río Claro, ocupando solo una porción al extremo suroeste de la cuenca. El sub acuífero 3 es el menos representativo dentro del SHAC; se ubica al sur en pequeños sectores aislados y hacia el sureste, limitando al este con la precordillera.

4.2.2 Unidades Hidrogeológicas

En el área de estudio correspondiente al SHAC de río Laja se definen tres unidades hidrogeológicas descritas en DGA (2012), según su potencial para transmitir agua.

i. Unidad de alta importancia hidrogeológica

Estas unidades corresponden a los depósitos no consolidados del cuaternario tales como depósitos fluviales y fluvio-aluviales, actuales y antiguos, depósitos coluviales,

sedimentos de terrazas fluviales y terrazas marinas. Litológicamente está conformada por gravas y arenas polimícticas negras, de origen principalmente volcánico, en una matriz de arenas finas y escasos limos de espesor variable entre 4 y 25 m, que presentan una baja compactación. La importancia hidrogeológica radica en que tiene la habilidad de conducir las aguas provenientes de la recarga hacia niveles inferiores saturados.

ii. Unidad de media a baja importancia hidrogeológica

En esta categoría se han agrupado sedimentos que por su origen glacio-lacustre poseen porcentajes de finos superiores a 30%. Están genéticamente relacionados con procesos de glaciación y desglaciación de masas de hielo ubicadas a mayores elevaciones. Se reconocen en las riberas de los principales cauces, formando terrazas o lomajes suaves, que permiten un buen desarrollo de suelo y vegetación. Litológicamente consiste en depósitos estratificados, conformados por clastos angulosos, predominantemente volcánicos, de tamaño bloque a arena en una matriz arenosa-arcillosa.

iii. Acuícludos de nula importancia hidrogeológica

Esta unidad lo constituyen los intrusivos ígneos y rocas metamórficas que se reconocen en el área de estudio.

De lo anterior se deduce una relación entre la anterior clasificación y los sub-acuíferos mencionados en el acápite 4.2.1:

- Unidad de alta importancia hidrogeológica: se relaciona con el sub -acuífero 1, caracterizado por depósitos de avalancha volcánica; tiene la mayor extensión dentro del SHAC del río Laja.
- Unidad de media a baja importancia hidrogeológica: se incluye en esta categoría los sub-acuíferos 2 y 3, siendo estos depósitos fluvio-aluviales y sedimentos de valles, terrazas y glacio-lacustres.
- Acuícludos de nula importancia hidrogeológica: corresponde a las áreas no incluidas como sub-acuífero 1, 2 o 3, y que se presentan principalmente al poniente del área definida como SHAC del Laja.

4.2.3 Niveles Freáticos

El registro de antecedentes de niveles freáticos en el valle del río Laja se obtuvo desde la información del catastro de pozos realizado durante la campaña de terreno realizada en DGA (2012), en los meses de agosto y septiembre del mismo año. Se tomaron en consideración las captaciones ubicadas en el SHAC del río Laja, de las cuales se recopiló información de nivel estático en 49 pozos.

El patrón general de flujo subterráneo mostró una tendencia E-W, siguiendo la dirección de flujo de las aguas superficiales pertenecientes al río Laja. El rango de profundidades de niveles estáticos se maneja principalmente entre los primeros 5 m bajo el nivel de terreno (más del 60% de estos casos).

4.2.4 Parámetros Hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de los acuíferos asociados al SHAC del río Laja, se empleó tanto la información técnica contenida en los expedientes de solicitudes de derechos de aguas subterráneas como la disponible del “Estudio Hidrogeológico de la cuenca del Biobío” (DGA, 2012).

4.2.5 Extracciones Existentes

En base al CPA² y a información proporcionada por la DGA³, se analizaron los derechos de aprovechamiento de aguas(DAA) de naturaleza subterránea en el SHAC del río Laja.

- **Derechos de aprovechamiento de agua subterráneos inscritos en CPA**

La zona en estudio posee 417 DAA subterráneos inscritos por un total de 2.584 l/s. De estos, 414 derechos son de ejercicio permanente y continuo que corresponde a un caudal de 2.575 l/s, y los 3 restantes son de ejercicio permanente y discontinuo (8 l/s). Las comunas con una mayor cantidad de derechos corresponden a Cabrero y Yumbel. En el caso de la primera, se tiene un total de 136 derechos, siendo que ésta también corresponde a la comuna con el mayor caudal de explotación, con 1.277 l/s. La comuna que presenta mayor extracción, luego de Cabrero, corresponde a Quilleco con 462 l/s.

- **Derechos de aprovechamiento de agua subterráneos en trámite**

En total se identifican 84 derechos en trámite, totalizando un caudal de 1.313 l/s. La mayoría presentan un ejercicio de derecho permanente y continuo (1.312 l/s), mientras que solo 1 (0,4 l/s), ubicado en la comuna de Yumbel, corresponde a ejercicio permanente y discontinuo. Se observa que la mayor cantidad de solicitudes en trámite se encuentra en las comunas de Los Ángeles y Yumbel; el mayor caudal solicitado, 955 l/s, corresponde a la comuna de Los Ángeles.

² Fecha de actualización 08/06/2018.

³ Fecha de actualización 10/07/2018.

CAPÍTULO 5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

5.1 INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA EXISTENTE

Se recopiló información de la calidad del agua superficial del río Laja y sus afluentes en base a las estaciones de control DGA. Por otra parte, no existen estaciones de calidad físico-química subterránea de la Red Hidrométrica de la DGA en la zona de estudio; por este motivo, su caracterización se apoyó en los registros de estaciones cercanas al SHAC.

5.2 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para la caracterización de la calidad de los cuerpos de agua, se representó los elementos mayores (aniones HCO_3^- , Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- ; cationes Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) a través de los diagramas de Piper, Stiff, Schoeller y Box-Whisker. Los elementos menores (potenciales indicadores de contaminación) se analizaron respecto las normas chilenas de calidad.

5.2.1 Aguas superficiales

Se determinó la composición del río Laja, además de su afluente principal en el sector del SHAC, el río Claro. Se constató que la calidad de agua superficial del río Laja es del tipo carbonatada cálcica sin mayor presencia de sulfatos y sodio/potasio. El aporte del río Claro no tiene un efecto mayor sobre las aguas del río Laja debido a que su composición química no presenta grandes variaciones.

5.2.1 Aguas subterráneas

Al no tener información acerca del agua subterránea en la zona debido a la inexistencia de estaciones de medición de esta naturaleza, se deben considerar los pozos cercanos al acuífero. De los dos que se encontraron cercanos a la zona se infiere que la calidad de agua subterránea presente en el SHAC del Laja tendrá una composición similar a la del pozo Chillán en Fundo Cato, debido a que las concentraciones de químicos en este punto son similares a las del agua superficial que cruzan la zona. Esto también se correlaciona con el estudio “Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile” (González *et al.*, 2003), en donde se define que la composición química del agua del acuífero del Laja es bicarbonatada cálcica con un cambio de tipo cálcico por un tipo mixto cálcico-magnésico hacia el sector poniente.

CAPÍTULO 6 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO

En este capítulo se caracterizó la distribución acuífera dentro de la zona de estudio a partir de antecedentes geofísicos existentes y la elaboración y análisis de perfiles estratigráficos; posteriormente, se procedió a definir zonas propicias para la realización de nuevos ensayos geofísicos. Finalmente, se analizaron los resultados de la campaña geofísica llevada a cabo.

6.1 ANÁLISIS DE LA ESTRATIGRAFÍA EXISTENTE

A partir de la información de expedientes de derechos de aprovechamiento de agua subterránea de la DGA se recopilaron los datos de las estratigrafías observadas durante el proceso de perforación de cada pozo. Se analizaron 22 expedientes a partir de los cuales se generaron 6 secciones litológicas para estimar la distribución y la extensión de las posibles formaciones acuíferas dentro del SHAC del río Laja. Asimismo, se incorporó información de pozos ubicados fuera del SHAC, a modo de caracterizar el comportamiento e interacción de las unidades permeables hacia los límites de la zona de estudio.

Se definió una importante unidad hidrogeológica caracterizada con permeabilidades medias a altas, correspondiendo a arenas de granulometría fina a media de origen volcánico, relacionadas a las arenas del Laja, junto a sedimentos más fluviales presentes a mayor profundidad. De manera intercalada aparecieron lentes limo-arcillosos, en algunos casos de manera consolidada, que se comportan como medios de baja a muy baja permeabilidad. Dentro de la zona del SHAC se presenta una gran capa potencialmente acuífera, a escasa profundidad, que mantiene una tendencia al acuñamiento hacia el sector oeste, presentando mayor desarrollo hacia el este.

En resumen, del análisis de columnas estratigráficas se concluye que los suelos son de carácter arenoso en los primeros 80 metros de profundidad, con presencia puntual de lentes de arcilla.

6.2 SELECCIÓN DE PUNTOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Se identificaron dos estudios con información geofísica relevante, tratándose en ambos casos de mediciones de tipo gravimétricas. En el estudio desarrollado por DGA (2012), se realizaron un total de 454 estaciones gravimétricas para la región del Biobío, generando un total de 15 perfiles gravimétricos, de los cuales 6 de ellos se ubican dentro del SHAC. En cuanto al segundo estudio (Oncken *et al.*, 2006), corresponde a un informe de carácter internacional, del cual se desprenden 168 mediciones gravimétricas en la zona de interés.

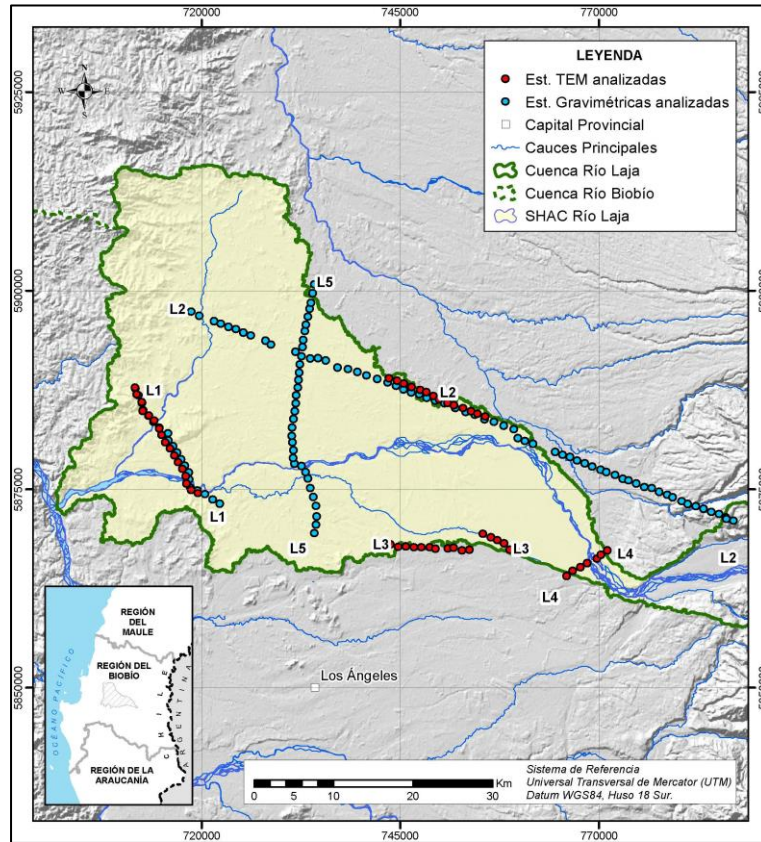
Se contempló una propuesta de ubicación de 50 mediciones gravimétricas distribuidas en el acuífero del valle del río Laja complementando los perfiles ya existentes. Como resultado, se definieron 3 nuevos perfiles gravimétricos: uno en la zona próxima a la salida de la cuenca, y otros dos formando parte de un gran perfil cruzando el SHAC en sentido WE.

Las 55 mediciones de tipo Transiente Electromagnético (TEM) se repartieron en 4 perfiles de resistividad, distribuidos en los sectores más representativos de la cuenca a caracterizar; éstos son: entrada y salida del SHAC, y límites norte y sur, respectivamente. Esta última consideración se tomó con la finalidad de analizar el comportamiento y extensión del acuífero en las adyacencias de la zona de estudio.

6.3 TRABAJOS GEOFÍSICOS REALIZADOS

La campaña de mediciones geofísicas se inició el día 29 de julio de 2018 y se dio por concluida el 11 de agosto del mismo año. En ella se desarrollaron los dos estudios previstos (gravimetría y medición TEM), junto a sus respectivos levantamientos topográficos. Se señala que, si bien la zona de estudio se encuentra contenida entre los Husos 18 y 19 sur, se consideró por términos de uniformidad la referenciación de todas las estaciones en Datum WGS84 Huso 19S.

En la Figura 6.3-1 se ubican los puntos finales objeto de análisis, tanto de medición en terreno como de interpretación de antecedentes previamente existentes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.3-1 Perfiles gravimétricos y TEM analizados

En base a los ensayos geofísicos ejecutados, se define que el acuífero del río Laja se emplaza en una depresión sedimentaria que mantiene una marcada tendencia de profundización hacia el E. Se identificaron rellenos saturados de hasta 400 m de espesor, donde el basamento se ubica de manera más somera al W y flancos del área de estudio. Asimismo, se distingue gran variedad granulométrica en la composición de las unidades que conforman el subsuelo, desde bolones y ripios húmedos que presentan medianas a altas resistividades, hasta materiales más arcillosos que arrojan menores resistividades y representan las zonas menos permeables dentro del sistema acuífero.

En resumen, los resultados geofísicos confirman de esta manera la existencia de una formación acuífera de gran continuidad tanto vertical como horizontal, de importante espesor, donde el basamento se hallaría por lo menos a 1 km de profundidad desde la cota de terreno.

CAPÍTULO 7 GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES Y CAMPAÑA DE TERRENO

7.1 CAMPAÑA DE INVENTARIO DE NIVELES EN POZOS

7.1.1 Análisis de Derechos de Aprovechamiento inscritos

De manera previa al inicio de la actividad de terreno, se realizó un análisis de los DAA subterráneos sobre el SHAC del río Laja registrados en la DGA (a fecha de junio de 2018).

El total de derechos otorgados (417 casos) se dividió en tres capas. En la primera capa se consideraron los derechos otorgados con caudales mayores a 4 l/s, los cuales ascienden a 88 resoluciones. Para la segunda capa, se seleccionaron, de entre los puntos restantes, aquellos con un caudal mayor a 0,25 l/s y que estuvieran distribuidos espacialmente de forma conveniente con el objetivo de cubrir la zona de análisis. Estas dos capas sumaron 100 pozos objetivo. De ser necesario, se contó con los 317 puntos restantes, los cuales se escogieron en caso de falta de datos.

7.1.2 Campaña de terreno

La campaña de terreno fue realizada en un lapso total de tres semanas, dividiéndose en dos periodos separados entre sí por un espacio de descanso de una semana. La primera campaña se llevó a cabo entre el día 17 y 27 de julio de 2018; la segunda campaña se desarrolló entre el día 06 y 11 de agosto de 2018.

El inventario consistió en primer lugar en verificar la identificación del pozo visitado, por entrevistado y propietario del mismo. Posteriormente, se validó la ubicación de la captación, detallando sus coordenadas UTM (WGS84, H18S); igualmente se constató la altura con respecto al nivel del mar. Luego, se procedió a realizar la medición del nivel freático mediante pozómetro. Se consideró medición de nivel estático en aquellos casos sin operación de bombeo en el último día; dadas las permeabilidades de la zona, los tiempos de recuperación de la napa no son especialmente altos.

Se visitaron un total de 166 pozos; de éstos, se logró medir el nivel de agua en 103 pozos⁴. Los principales inconvenientes que se presentaron fueron:

- Pozos sellados: En estos pozos no se presenta un orificio por el cual ingresar el pozómetro para medir la profundidad del espejo de agua (31 casos).
- Accesibilidad o ausencia del propietario: La calidad de los caminos hizo imposible la llegada a estos pozos o el recinto donde se encuentra el pozo estaba cerrado y no se encontró a los dueños de éste (28 casos).
- Permisos o inexistencia: En alguna ocasión no se permitió el acceso o bien el pozo no se situaba en las coordenadas registradas (4 casos).

A partir de los pozos con medición de nivel de agua, se presentan los siguientes análisis:

- **Nivel Estático:** Se midieron 92 niveles estáticos (en 11 casos los pozos se encontraron en funcionamiento en el momento de la visita, por lo cual se midió su nivel dinámico), mostrando generalmente niveles someros. En el Cuadro 7.1-1 se observa un resumen de la distribución de niveles de agua de los pozos.

Cuadro 7.1-1 Profundidades del nivel estático de los pozos

Rango de profundidad del Nivel Estático	N° pozos
< 2 m	49
≥ 2 m y < 5 m	30
≥ 5 m y < 10 m	8
≥ 10 m	5
Total	92

Fuente: Elaboración propia.

- **Tipología del pozo:** Se cuantificaron los pozos según la profundidad y/o tipología de construcción del mismo; en el Cuadro 7.1-2 se muestra el resultado.

Cuadro 7.1-2 Tipología de las captaciones con medición de nivel

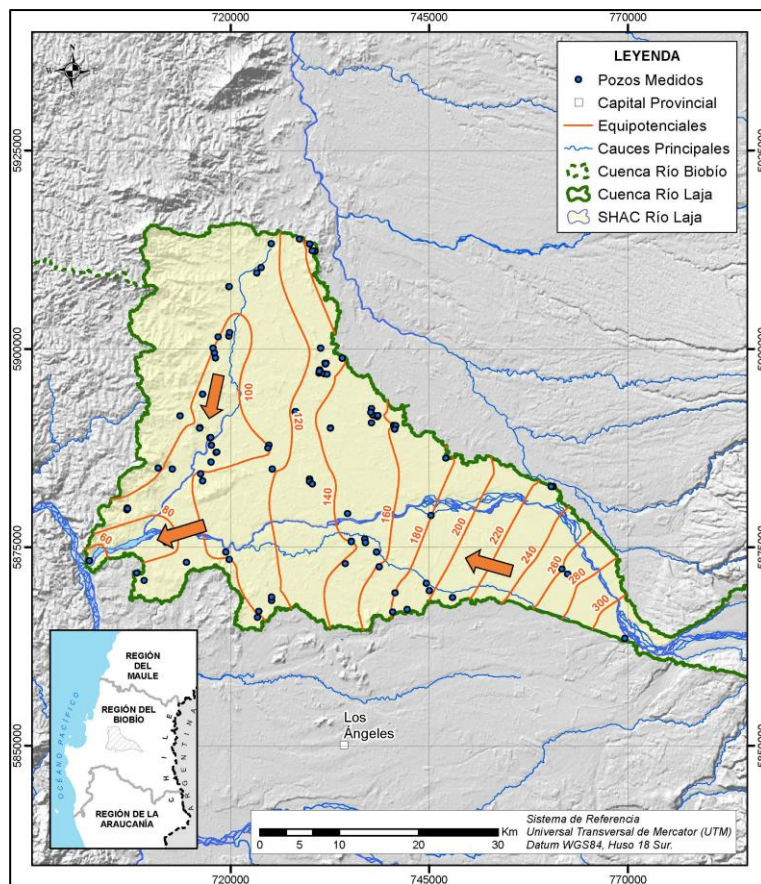
Tipo de captación	N° pozos
Pozo profundo	44
Puntera	34
Noria	17
Pozo zanja	8
Total	103

Fuente: Elaboración propia.

⁴ Cabe señalar que 6 mediciones de nivel corresponden a pozos no inscritos en el CPA, y que se llegaron a éstos en el transcurso de la campaña por sugerencia de propietarios que espontáneamente facilitaban el acceso hasta éstos.

7.2 GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES

A partir de la información de nivel estático de los pozos procedentes de la campaña de terreno, se estimaron las curvas equipotenciales del acuífero (ver Figura 7.2-1).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.2-1 Curvas equipotenciales y sentido de escurrimiento del SHAC del río Laja

En términos generales, el flujo subterráneo transcurre de forma similar a la dirección y sentido de escurrimiento de los cauces superficiales de la subcuenca. Así pues, se observa que el sentido de escurrimiento avanza en sentido E-W, como el río Laja, hasta el sector del río Claro, en que las aguas subterráneas se mueven de norte a sur. La salida del acuífero se presenta en el extremo SW del área de estudio, coincidente con la zona de confluencia del río Laja en el río Biobío.

CAPÍTULO 8 DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO

A partir de la información recopilada y analizada en los capítulos anteriores, se realizó la construcción del modelo conceptual del SHAC del río Laja.

8.1 REPRESENTACIÓN HIDROGEOLÓGICA

8.1.1 Formaciones acuíferas

En base a la definición de acuíferos descritos en DGA (2012), para el sector de estudio se define una sola formación acuífera, cuyas características tanto litológicas como hidráulicas permiten derivarla en tres subunidades: Sub-acuífero 1, Sub-acuífero 2 y Sub-acuífero 3. Esta delimitación se presentó en la Figura 4.2-1.

En vista a esta descripción y adicional a las actividades de monitoreo de niveles en pozos realizadas en la campaña de terreno, se pudo constatar que la litología asociada al Sub-acuífero 1 corresponde a secuencias volcánicas representadas por suelos de arenas de composición andesíticas a basálticas y gravas muy finas de color gris oscuro a negro. Estas características corresponden a la denominada unidad “Arenas del Laja”, asociada a los deslizamientos gravitacionales provocados por episodios volcánicos, y que fue definida por Thiele *et al.* (1998). En términos hidrogeológicos, esta primera formación figura con un importante potencial acuífero al representar sedimentos poco consolidados y de adecuada extensión lateral, principalmente en la zona centro-norte del SHAC, aun cuando se presentan algunos horizontes arcillosos⁵ que contrastan la alta permeabilidad del medio.

Hacia el extremo sur del SHAC, y en las proximidades de los ríos Laja y Claro, aparecen sedimentos no consolidados fluvio-aluviales recientes. Se identifica como parte del sub-acuífero 2, compuesto principalmente por gravas, y arenas gruesas con poca presencia de limos y arcilla, además de bolones de composición principalmente lávica y en menor proporción, graníticas. Debido a esta misma composición heterogénea, se asignan

⁵ Horizontes arcillosos observados a raíz de la revisión de los perfiles estratigráficos realizada en el acápite 6.2 Análisis de la estratigrafía existente.

potenciales hidrogeológicos medios a altos para las adyacencias de los cursos principales y hacia el sector sur del SHAC.

En menor medida aparecen detritos de origen glacio-lacustre asociados al descrito sub-acuífero 3, definido igualmente en DGA (2012). En general, esta unidad no presenta gran desarrollo dentro de los límites de la zona de estudio, manifestándose hacia la entrada del SHAC, siendo poco característico en el conjunto del área del mismo⁶.

Por último, hacia el límite occidental del SHAC del río Laja (y en un reducido sector del sur), aparecen cuerpos intrusivos ígneos, representativos de la Cordillera de la Costa, los cuales debido a su misma naturaleza cristalina representan unidades de muy baja a nula relevancia hidrogeológica; en estos, el potencial acuífero podría estar focalizado sobre posibles suelos residuales de escaso espesor y/o fisuras en rocas meteorizadas.

- **Análisis de la geometría del acuífero**

La interpretación de los perfiles TEM permitió establecer la existencia de sedimentos saturados, principalmente de tipo granular, hasta (como mínimo) una profundidad de 400 m por debajo de la superficie⁷. Especialmente, y en base a los resultados de los perfiles gravimétricos, se considera que la potencialidad acuífera aumenta desde el límite SW del subacuífero 1 hacia la zona E de área de estudio, y de manera directamente proporcional a la profundización del basamento. Lo anterior es debido a la reducción del espesor del relleno hacia el extremo sur-occidental por la presencia de basamento a escasa profundidad.

Además, la reinterpretación de los valores de resistividad derivados desde antecedentes revisados permitió definir una conducta de acortamiento en las formaciones acuíferas en sus extremos; se detecta dicha reducción en el norte del sub-acuífero 1 y en el sur del sub-acuífero 2, ampliándose a medida que se introduce hacia la zona central del SHAC, alcanzando profundidades de hasta 1 km de espesor.

8.1.2 Parámetros elásticos

Con el fin de obtener una representación espacial de los parámetros elásticos en el área completa del SHAC, se seleccionaron expedientes de DAA subterráneos ubicados fuera de los límites de la zona de estudio, cercanos a ésta, que detallaran cálculos de las constantes elásticas. Junto con la recopilación de dichos parámetros en la etapa de revisión de antecedentes, se modeló el conjunto de valores mediante una interpolación espacial.

⁶ Cabe recordar que el estudio DGA (2012) analiza los sub acuíferos de la cuenca completa del Biobío.

⁷ Los ensayos de transiente electromagnético (TEM) sólo alcanzan a registrar una profundidad de aproximadamente 500 m.

- **Permeabilidad**

Para la modelación, se utilizaron los rangos permeables establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1971).

Gran parte de los valores resultantes se ubican por encima de los 14 m/día, clasificándose como permeabilidades muy altas, características de suelos arenosos, lo cual se corresponde con las litologías revisadas para el sector. En menor proporción aparecen zonas con valores ubicados entre el rango “moderada” a “moderadamente alta” (0,384 – 3,84 m/día), coincidiendo con zonas donde se reconoce la existencia de cambios litológicos y acortamiento de espesores sedimentarios. Esta situación se aprecia hacia el límite occidental y hacia la zona de salida del SHAC.

- **Transmisividad**

Se tomó como referencia la clasificación establecida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (Villanueva e Iglesias, 1984).

Los valores obtenidos en la modelación son concordantes a las permeabilidades observadas. Si bien dentro de la zona de interés se tienen por lo general de medias a altas transmisividades (mayores a 100 m²/día), es posible definir zonas con mayores potenciales acuíferas hacia la entrada y centro del SHAC, donde se alcanzan máximos de hasta 11.450 m²/día. Ésta decrece de manera progresiva en sentido W, observándose bajas transmisividades hacia la salida de la zona de estudio y aún menores fuera de las áreas correspondientes a los sub-acuíferos, esto es, hacia la cordillera de la costa, lo cual es esperable.

- **Almacenamiento**

El coeficiente de almacenamiento representa el volumen de agua que podría extraerse de un acuífero. Para el análisis de este parámetro se tomó igualmente como referencia la clasificación definida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en Villanueva e Iglesias (1984) para materiales permeables de origen granular.

El SHAC presenta en toda su extensión valores asociados principalmente a acuíferos libres, excepto por un pequeño sector anexo al cauce del río Claro que muestra una condición más cercana a tipo semi-confinado. Sin embargo, el comportamiento general observado presenta una tendencia similar a los anteriores parámetros antes analizados; mejores potenciales acuíferos hacia el este y centro del SHAC, con notable decaída hacia el límite occidental.

8.1.3 Nivel freático y dirección de flujo

Durante la campaña de terreno se realizaron 103 mediciones de niveles freáticos dentro del SHAC, correspondiendo a este total a 92 mediciones de niveles estáticos y 11 dinámicos. La profundidad de los niveles de aguas se manejó principalmente dentro de los primeros 5 m bajo la superficie, y en menor medida, entre los 5 - 10 m.

A través de la generación de curvas equipotenciales (ver Figura 7.2-1) fue posible recrear el movimiento del flujo subterráneo, observando una clara tendencia de escurrimiento análoga a los cauces superficiales. Específicamente, en la parte central del SHAC se mantiene un sentido de flujo E-W, siguiendo el curso del río Laja hasta su confluencia con el río Bío-Bío. Por otra parte, se observó un cambio en este flujo en las cercanías al río Claro, al oeste del SHAC, donde el agua subterránea discurre notoriamente en dirección N-SW, influenciada por cambios topográficos y por la presencia de formaciones rocosas de origen cristalino que actúan como barrera al movimiento de agua.

8.1.4 Singularidades

Existen dos formaciones que ameritan tratarse como singularidades del modelo conceptual del acuífero del río Laja, las cuales ya se identificaron en la Figura 4.1-1:

- La formación Curanilahue del Eoceno (Ec) está representada como capas de areniscas con presencia de algunas intercalaciones de arcillas bien consolidadas; dicha formación aflora en las cercanías al Salto del Laja, ocasionando la presencia de salidas de agua a modo de afloramiento a través de las rocas existentes. En términos hidrogeológicos, esta formación presenta altas características permeables, por lo que se considera competente al acopio y traspaso de agua subterránea. Sin embargo, en comparación al potencial acuífero del SHAC, su importancia sería secundaria.
- Por otra parte, existen cuerpos ígneos intrusivos de edades Paleozoicas a Cretácicas cuyo aporte al potencial hidrogeológico del SHAC es más bien escaso. De acuerdo al comportamiento observado de la napa subterránea, se ha definido que estos grandes afloramientos granodioríticos sí condicionan la dirección de flujo en profundidad, y que la existencia de agua en estas zonas estaría relacionada a flujos someros en suelos residuales provenientes del efecto de meteorización que actúa sobre estos cuerpos. Se establece dotar a estos sectores intrusivos (CPg y Kiag) de un carácter particular en la posterior sectorización del acuífero, debido a la poca a la contribución hidrogeológica.

8.2 BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico comprende la sumatoria de los flujos de entrada y salida que influyen e interactúan con la dinámica de un acuífero.

8.2.1 Entradas y salidas del sistema

Respecto de las entradas al SHAC, existe un flujo subterráneo de entrada por el extremo E del acuífero; según Arumí *et al.* (2012a), la parte superior del río Laja corresponde a un río que infiltra agua hacia los sistemas de aguas subterráneas, gracias a que, en su curso superior, el río posee un cauce ancho con predominio de material gravo-arenoso.

Además, existe un componente de recarga por infiltración gracias a las precipitaciones; lo anterior fue cuantificado preliminarmente en el estudio DGA (2014). Igualmente, y dada la red de canales y de acuerdo a los comentarios recogidos en de terreno, existe una recarga de agua desde éstos durante la temporada de riego⁸.

En base a la información geofísica obtenida de los perfiles TEM, cabe señalar la factibilidad de flujo subterráneo desde acuíferos adyacentes (SHAC Itata Superior en el N y del SHAC del Río Biobío en el S) (ver Figura 1.3-1).

En cuanto a las salidas, cabría señalar los afloramientos en el río Laja y en el río Claro; recordar que el río Claro actúa como eje de afloramiento de las aguas de las Arenas del Laja al encontrarse con el sistema de rocas intrusivas del W del sector.

Otro componente de salida del sistema acuífero corresponde a las extracciones por DAA subterráneas otorgados.

Según la interpretación de los TEM, se podría considerar que el flujo de agua subterráneo en la salida del acuífero es mínimo. La salida, en el SW, coincide con un estrechamiento con afloramientos rocosos a ambos lados, y por tanto la sección acuífera potencial de conducir flujo subterráneo sería mucho menor (se considera que el flujo subterráneo aflora).

8.2.2 Estimación del balance hídrico del sistema acuífero

El estudio DGA (2012) realizó, para la cuenca del río Biobío, un modelo hidrogeológico desarrollado mediante el software Visual Modflow 4.2. A partir del mismo, se acotó el modelo a la zona de estudio del SHAC, sin considerar en él las áreas de rocas intrusivas. De los valores obtenidos entre la comparación de un escenario en condiciones naturales versus situación con bombeos, se desprende que la componente extractiva de agua tiene relación directa con los afloramientos resultantes; es decir, al incorporar la acción de los pozos sobre el sistema, el afloramiento disminuye un 7,6%.

⁸ Ciertos propietarios comentaron que, durante la temporada de riego, observaban un incremento del nivel freático de sus pozos.

CAPÍTULO 9 PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN

9.1 SECTORIZACIÓN DEL ACUÍFERO

9.1.1 Delimitación del SHAC

En vista de las características hidrogeológicas analizadas en capítulos anteriores fue posible concluir que, dentro de la zona de estudio identificada preliminarmente como “SHAC Río Laja” en el estudio DGA (2014), se presentan tanto áreas de relleno (que conforman las unidades acuíferas) como zonas de rocas intrusivas.

Respecto de las zonas de relleno sedimentario, se presentan propiedades hidráulicas muy similares entre los sub-acuíferos definidos en DGA (2012), con permeabilidades y transmisividades que se manejan entre medias a altas en toda su extensión. Asimismo, el patrón de movimiento del agua subterránea observado no representa interrupciones o cambios abruptos en su dirección de flujo. Además, y en vista de las relaciones con SHAC colindantes (Itata, Biobío) y los resultados de la interpretación geofísica de los perfiles TEM, tanto por el límite norte como por el sur del área de estudio existen intercambios de flujo de agua.

Por otro lado, el área comprendida por las rocas intrusivas del extremo W tiene un potencial hidrogeológico bajo o nulo.

Cabe recordar que se define Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC), según el Art. 54 del Reglamento de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas, como *“acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión de forma independiente”*.

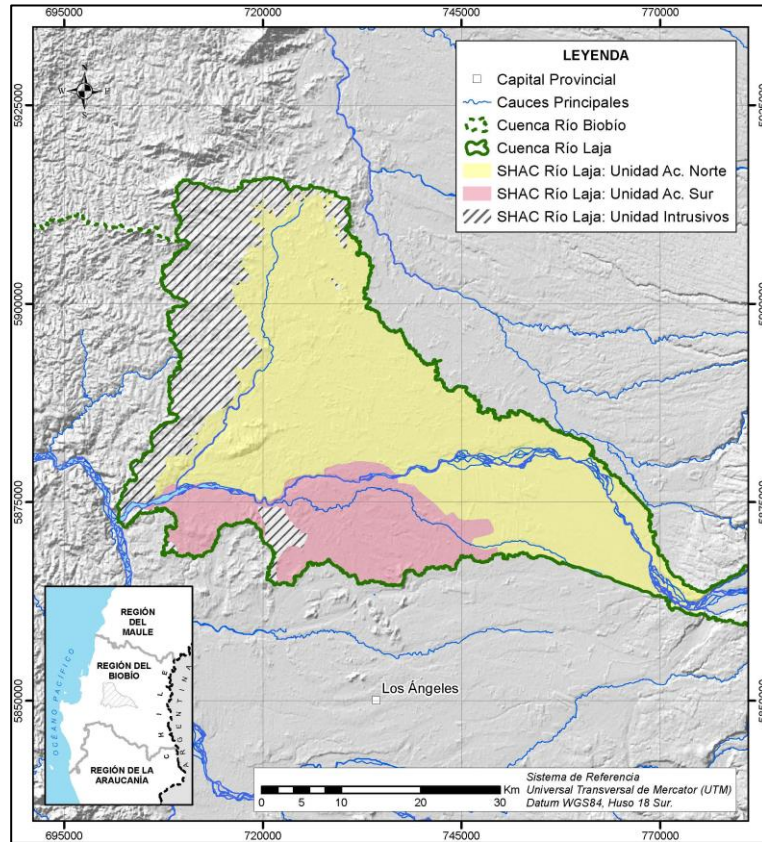
Atendiendo a todo lo anterior, la delimitación del SHAC en este caso viene definida por las siguientes consideraciones:

- i. No se puede fijar un límite o contorno cerrado del acuífero del valle del río Laja, entendiéndose como tal que éste quede circunscrito o rodeado en su totalidad de material impermeable, puesto que existen intercambios de flujo de agua con áreas adyacentes. Como referencia, el estudio DGA (2012) comprende un gran acuífero del Biobío en el valle central.
- ii. Existe una vasta zona de relleno sedimentario que conforma el acuífero del valle del río Laja, que parte desde el extremo oriental y ocupa gran parte del área de estudio.
- iii. Se identifica un límite rocoso en la zona oeste, caracterizado por rocas intrusivas, las cuales sí limitan el flujo de agua subterránea. En esta zona, si bien se no constituye como acuífero en términos hidrogeológicos, presenta extracciones existentes de carácter superficial (norias), las cuales se deben gestionar, pero de forma particular y/o local.

9.1.2 Unidades del SHAC

A través de la integración de los resultados obtenidos, fue posible establecer que, para la zona de relleno del SHAC del río Laja, los sub-acuíferos 1 y sub-acuífero 3 del estudio DGA (2012) presentan un comportamiento hidráulico muy similar, por lo que se considera factible unificar dichas secciones en un solo subconjunto que representa las zonas de alto potenciales acuíferos, en comparación a la conducta vista para el sub-acuífero 2, donde se manifiesta potenciales hidrogeológicos más bien medios.

En la Figura 9.1-1 se muestra la propuesta de sectorización del acuífero asociado al SHAC del río Laja en base a los antecedentes recabados y análisis realizados en el presente estudio, dividiéndolo en 2 unidades acuíferas, además de la zona de rocas intrusivas del O de la zona estudiada. Un sector del acuífero asociado al SHAC del río Laja, nombrado como “Unidad Acuífera Norte”, abarca la mayor parte y se extiende del E hacia el NW, y tiene una superficie de 1.182,66 km². Por su parte, la “Unidad Acuífera Sur” está situada en el S como indica su nombre, y se extiende en 362,05 km², hasta la salida de la subcuenca. La “Unidad Intrusivos” comprende principalmente el sector poniente del SHAC, con un área total de 379,42 km², y caracterizada por un potencial hidrogeológico bajo y sólo a nivel superficial.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9.1-1 Propuesta de sectorización del SHAC del río Laja

9.2 VÍNCULOS Y RELACIONES ENTRE ELEMENTOS DEL SISTEMA

Se identificó, según la modelación de DGA (2012), intercambio de flujo en los límites norte y sur de las Unidades Acuíferas con los SHAC del Itata y del Biobío, así como flujo entre estas 2 unidades propiamente. Se observa que la Unidad Intrusivos se comporta como una barrera en el flujo subterráneo, por lo que esta unidad debe enmarcarse en una explotación particular, mientras que las Unidades Acuíferas Norte y Sur están influenciadas entre ellas. Las extracciones (bombeos) en estas unidades afectan claramente sobre los afloramientos generados.

CAPÍTULO 10 DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

10.1 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

10.1.1 Recarga del acuífero

La oferta hídrica, en un acuífero, se corresponde con la cantidad de agua que entra al mismo, esto es, la recarga. De acuerdo a DGA (2014), el SHAC río Laja posee un volumen sustentable de 101.151.038 m³/año; este valor corresponde a la recarga total estimada en base a una precipitación media de aproximadamente 1.100 mm/año y un coeficiente de infiltración del 5%.

Sin embargo, y de acuerdo a los artículos 20 letra e) y 30 letra d) del “Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas” (DGA, 2014b), se comprobó previamente que la oferta hídrica no estuviera limitada por el grado de afectación a cauces superficiales. Para ello, y bajo el supuesto que las extracciones subterráneas afectan directamente el caudal de afloramientos (como es reflejado en el modelo numérico del estudio DGA (2012) y observado en los balances hídricos resultantes para el SHAC del río Laja), se estimó para cada mes el caudal correspondiente al 10% del caudal medio de 85% de probabilidad de excedencia para la estación Río Laja en Puente Perales.

De los resultados obtenidos, se observó que la oferta hídrica para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo se encontraría limitada por el grado de interferencia superficial-subterránea; esto sucede cuando el 10% del Q_{85%} es inferior al valor de descarga estimado en 101.151.038 m³/año. También se encontraría afecto el sistema superficial/subterráneo en el mes de abril tomando la referencia del valor de la recarga determinado en DGA (2012), y cuantificado en 161.316.860 m³/año. Sin embargo, esto no ocurre durante 6 meses consecutivos en ningún caso, por lo que se concluye que la oferta hídrica, en el caso del SHAC del río Laja, queda definida por la recarga al sistema.

Si bien el cálculo preciso se debe realizar en el cierre de la cuenca, los registros de la estación río Laja en San Rosendo son escasos (1971-1983) y no permiten la realización de un análisis de frecuencias de manera correcta, del mismo modo que los aportes del río Claro (1985-2000). No obstante, el cálculo realizado resulta conservador al considerarse un caudal

menor que pudiera restringir la magnitud de la oferta y no afecta el resultado final, en vistas que se observan menos de 6 meses consecutivos en que el 10% del Q85% es inferior a la recarga de referencia, por lo se considera válido el anterior supuesto.

10.1.1 Recarga estimada de las unidades del acuífero

Se estimó la recarga asociada a las unidades definidas tras el análisis de sectorización del área de estudio, según la metodología establecida en el “Estudio Preliminar de las Recargas de agua subterránea y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos” (DGA, 2014). El valor de coeficiente de infiltración para las Unidades Acuíferas Norte y Sur se mantuvo en 5%, igual a lo considerado en el estudio DGA (2014) y atendiendo al hecho que se encuentran en el Valle Central y tienen carácter sedimentario. En el caso de la unidad “Intrusivos”, no se cree oportuno aplicar tal valor de infiltración, ya que el material rocoso presente no dispone de la capacidad infiltradora considerada en las otras unidades; por ello se estimó apropiado asignar un coeficiente de infiltración del 1%.

En base a las consideraciones anteriores, los valores resultantes de estimación de recarga se presentan en el Cuadro 10.1-1.

Cuadro 10.1-1 Estimación de recarga en las Unidades del SHAC del río Laja

SHAC Río Laja	Área (km ²)	Precip. Media (m/año)	Coef. Infiltración (%)	Recarga estimada (m ³ /año)
Ud. Ac. Norte	1.182,66	1,07	5%	63.418.377
Ud. Ac. Sur	362,05	1,02	5%	18.448.790
Ud. Intrusivos	379,42	1,08	1%	4.108.563
	1.924,13			85.975.730

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la recarga principal cuantitativamente se genera en la Unidad Acuífera Norte, debido a su mayor extensión de área aportante al acuífero. Se obtiene un volumen de recarga para el conjunto del área de estudio de 85.975.730 m³/año, cifra inferior a 101.151.038 m³/año, estimada preliminarmente en el estudio de DGA (2014), debido principalmente a la revisión a la baja (de 5% a 1%) del coeficiente de infiltración aplicado en la Unidad de Intrusivos del sector oeste, por su propia característica litológica.

CAPÍTULO 11 IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS

11.1 BRECHAS DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA

Una de las brechas identificadas durante la elaboración del estudio se presenta en relación a la escasa información referente a ensayos geofísicos de tipo transiente electromagnético (TEM) en la zona del SHAC del río Laja. Se recomienda una futura campaña geofísica que contemple al menos 50 mediciones TEM adicionales para definir las características estratigráficas de la zona central del SHAC.

11.2 BRECHAS EN REGISTROS DE CONTROL HIDROMÉTRICO

Se han identificado diversas brechas a la hora de extraer información histórica espacial en el SHAC del río Laja; las principales propuestas de mejora y/o ampliación en este ámbito son:

- **Control fluviométrico:** Sería interesante contar con registros fluviométricos del río Laja en la salida de la cuenca, puesto que actualmente no existe ninguna vigente; ello sería importante para determinar los afloramientos. También se considera conveniente contar con registros de su afluente principal en este tramo, el río Claro.
- **Control de calidad de aguas subterráneas:** No existe ninguna estación de calidad de aguas subterráneas perteneciente a la Red Hidrométrica de la DGA. Se cree oportuno la instalación de una (o más de una) en lugares representativos de los sectores definidos y de acuerdo al sentido de escurrimiento de las aguas.
- **Control de nivel freático:** Si bien en el SHAC del río Laja existen 3 pozos de nivel freático, éstos disponen de una cantidad de registros muy limitada para realizar un análisis detallado de la evolución de la napa. Por ello, se estima oportuno seguir con las lecturas en los mismos y a su vez disminuir el periodo entre lecturas, para captar posibles oscilaciones interanuales.

CAPÍTULO 12 IMPLEMENTACIÓN DEL SIG

12.1 PLATAFORMA COMPUTACIONAL

Se desarrolló un Sistema de Información Geográfica (SIG) para facilitar la visualización, consulta y manejo de la información generada, mediante el software ArcGis 10.1 de Esri, la cual se presenta en capas temáticas (coberturas tipo *shapefile* y ráster) y mapas presentados en figuras a través de proyectos *.mxd.

12.2 SISTEMATIZACIÓN Y ORDENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Se elaboró una serie de mapas bajo una estructura de carpetas en ambiente ArcGis, siguiendo el esquema descrito a continuación:

- i. CARPETA “CARTA BASE”. Corresponde a una serie de *shapefiles*, archivos ráster y geodatabase con información territorial del SIG de la DGA.
- ii. CARPETA “ESTUDIO”. Contiene capas en formato *shapefile* y ráster de la recopilación y análisis geográfico realizado en el presente estudio. La información de esta carpeta se encuentra en el sistema de referencia UTM Huso 18 sur, conforme la mayor parte del área se encuentra en este huso UTM.
- iii. CARPETA “MXD”. Esta carpeta contiene las composiciones cartográficas realizadas en ArcGis con su extensión *.mxd.
- iv. CARPETA “FIGURAS”. Contiene la salida impresa en formato PDF de los mapas compuestos. Estos archivos fueron exportados con resolución de 300 dpi.

CAPÍTULO 13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

A continuación, se exponen las conclusiones del presente estudio:

- De la revisión de antecedentes se concluyó que, además de los registros históricos de la red hidrométrica de la DGA y de los expedientes de DAA subterráneos del CPA, el antecedente principal corresponde al “Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Biobío” (DGA, 2012), en el cual se realizó un levantamiento de la información hidrogeológica y un modelo conceptual del acuífero de la cuenca del río Biobío.
- La caracterización hidrológica permitió verificar que las precipitaciones (con un valor promedio de 1.064 mm/año, calculado a partir de la generación de las isoyetas) se concentran entre mayo y agosto, asociados al periodo otoñal e invernal. La temperatura promedio anual es de 13,4°C, en la estación Las Achiras. El caudal con probabilidad de excedencia del 85% en la estación Río Laja en Tucapel es de 99,7 m³/s, mientras que en Río Laja en Puente Perales asciende a 106,9 m³/s.
- Respecto de la caracterización hidrogeológica, del estudio DGA (2012) se extrae la identificación de tres sub acuíferos: el sub acuífero 1 representa el de mayor extensión y potencial hidrogeológico; de manera secundaria, los sub acuíferos 2 y 3 son característicos en la zona de entrada y salida del SHAC. Los niveles freáticos, de acuerdo a antecedentes, se sitúan mayoritariamente dentro de los primeros 10 m.
- Sobre la caracterización hidrogeoquímica, se constató que la calidad de agua superficial del río Laja es del tipo carbonatada cálcica sin mayor presencia de sulfatos y sodio/potasio. El aporte del río Claro no tiene un efecto mayor en las aguas del río Laja. No existe información de calidad de aguas subterráneas en la zona del SHAC; sin embargo, su composición sería similar a la de las aguas superficiales.

- De la revisión de columnas estratigráficas de los expedientes de DAA subterráneos se concluye que los suelos son de carácter arenoso en los primeros 80 metros de profundidad, con presencia puntual de lentes de arcilla.
- En base a los ensayos geofísicos ejecutados (55 estaciones TEM y 50 puntos gravimétricos) se define que el acuífero del río Laja se emplaza en una depresión sedimentaria con una marcada tendencia de profundización hacia el E. Se identificaron rellenos saturados de hasta 400 m de espesor. Se confirma la existencia de una formación acuífera de gran continuidad tanto vertical como horizontal, de importante espesor, donde el basamento se hallaría por lo menos a 1 km de profundidad desde la cota de terreno.
- La campaña de terreno de monitoreo de niveles de agua en 103 pozos realizada entre Julio y Agosto de 2018 permitió recopilar los niveles freáticos, los cuales generalmente se presentan entre los 0-5 metros. Las curvas equipotenciales mostraron un flujo subterráneo en sentido E a SW, excepto en el sector del río Claro, avanzando de N a S.
- Teniendo en consideración la subdivisión de acuíferos del estudio DGA (2012), en el modelo conceptual, se delimitaron zonas con mayor o menor potencial hidrogeológico dentro del SHAC del Laja. Se presentan permeabilidades y transmisividades altas a muy altas principalmente en la zona central. Se considera dar un tratamiento particular, debido a su comportamiento hidrogeológico con bajo potencial, a los cuerpos intrusivos ígneos que afloran al W del área de estudio.
- Respecto de la delimitación del SHAC del río Laja, no puede fijarse un límite o contorno cerrado del acuífero asociado al SHAC, entendiendo como tal que éste quede circunscrito o rodeado en su totalidad de material impermeable, puesto que forma parte del gran acuífero del Biobío; así mismo, también se observan intercambios de flujo por el límite norte, desde la cuenca del río Itata. Sin embargo, se identifica una clara y vasta zona de relleno sedimentario que conforma el acuífero.
- El SHAC del río Laja, entendido tal como el área analizada en el presente estudio y que parte de la delimitación de la subcuenca “Río Laja bajo”, se ha dividido en 3 unidades. Las Unidades Acuíferas Norte y Sur poseen potencial hidrogeológico alto y medio, respectivamente. La Unidad Intrusivos tiene un potencial hidrogeológico bajo o nulo, debido a su composición litológica.
- Se analizaron los vínculos y relaciones de las unidades entre sí y con los acuíferos adyacentes, identificando intercambio de flujo en los límites norte y sur de las Unidades

Acuíferas con los SHAC del Itata y del Biobío, así como flujo entre estas 2 unidades propiamente. Se observa que la Unidad Intrusivos se comporta como una barrera en el flujo subterráneo, por lo que esta unidad debe enmarcarse en una explotación particular.

- A partir del modelo numérico realizado en el estudio DGA (2012), las extracciones (bombeos) en las Unidades Acuíferas afectan claramente sobre los afloramientos generados. Lo anterior se debe a que la zona de estudio posee niveles someros de aguas subterráneas, los cuales se conectan de manera directa a los cauces superficiales, generando afloramientos en todo el tramo del río Laja y principalmente en la zona baja.
- En relación con la definición de los SHAC, es importante recordar que actualmente existe una metodología de definición de los mismos recogida en el estudio “Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional” (DGA, 2014c). Ésta toma como punto de partida la información básica de una subcuenca y avanza en la delimitación del SHAC adicionando información por etapas, siendo la componente hidrogeológica la más relevante de ellas. De este modo, y a juicio de este consultor, la definición de los SHAC debe considerar sólo aquellos sectores con un real potencial hidrogeológico para el otorgamiento de DAA subterráneas, siendo los sectores rocosos, cerros o zonas de bajo o nulo potencial zonas excluidas del SHAC, cuya administración de recursos hídricos debe ser evaluada de manera separada, dada su condición particular, y en general, más compleja de evaluar.
- Se comprueba que, en base a lo establecido en los artículos 20 e) y 30 d) del Reglamento sobre normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas (DGA, 2014b), la oferta hídrica del acuífero del río Laja no está limitada por la afectación a cauces superficiales; se considera así que la oferta hídrica corresponde a la recarga. Se obtiene una recarga estimada de 85.975.730 m³/año para el SHAC del río Laja.
- Las principales brechas de información identificadas son las relativas al control de nivel freático (por escasos registros históricos) y de calidad de aguas subterráneas (debido a la ausencia de estaciones de esta tipología en el área de estudio).
- Se ha desarrollado un SIG, mediante ArcGis 10.1 de Esri, para permitir la visualización, la consulta y el manejo de la información recopilada y generada para el estudio, tanto a nivel de coberturas (*shapefile* y ráster) como mapas (proyectos tipo *.mxd).

13.2 RECOMENDACIONES

Para estudios de sectorización hidrogeológica, se estima conveniente tener presente las siguientes consideraciones:

- Iniciar el estudio de sectorización sin acotar el área de estudio a la subcuenca, ya que ésta se define según el drenaje superficial y, si bien generalmente el flujo subterráneo suele seguir la misma trayectoria, no siempre es así; ello permite estudiar (a nivel de revisión de antecedentes, pero sobre todo de planteamiento de las campañas de terreno, tanto de niveles freáticos como trabajos geofísicos) los límites más probables del acuífero.
- Para lo anterior, debería darse una revisión de antecedentes previa a la definición del área en que se enmarca un estudio; por ejemplo, en el caso concreto del SHAC del río Laja, el trabajo se podría abordar de mayor a menor escala, desde el gran acuífero del Biobío hasta los sub-acuíferos que lo conforman.
- Se debe tener presente que este planteamiento prioriza el conocimiento técnico del acuífero globalmente, y no siempre coincidente con la estructura administrativa relativa a la gestión de expedientes de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, la cual debe abordar la DGA.
- Sería muy conveniente (si no necesario) disponer de registros históricos de control de nivel freático de los SHAC a caracterizar, así como información sistematizada de calidad de aguas subterráneas, puesto que las medidas puntuales en el espacio y/o el tiempo no siempre permiten caracterizar confiablemente las aguas.
- El uso de GPS con corrección diferencial en las campañas de terreno para monitorear los niveles estáticos de los pozos permite minimizar los errores de medición respecto los equipos que no poseen esta característica. En el análisis histórico de los niveles de las napas, las diferencias de lecturas debido a los errores asociados a las limitantes técnicas de los equipos, como es el caso del GPS sin diferencial, arrojan resultados con menor grado de confiabilidad, aspecto relevante en la generación de las curvas equipotenciales y posterior comparativa entre diferentes estudios.