



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

INFORME TÉCNICO:

# Diagnóstico del Estado Hidrogeológico de la Cuenca del Limarí

REALIZADO POR:

Carlos Flores Arenas PhD

Modelador Hidrológico

y

Marcelo Aliaga Alvarado

Geólogo

División de Estudios y Planificación

SDT Nº 427

Santiago, Septiembre de 2020

## Contenidos

1.	<i>Introducción</i> .....	4
2.	<i>Objetivos</i> .....	4
3.	<i>Área de estudio</i> .....	4
3.1.	<i>Aspectos administrativos</i> .....	5
3.2.	<i>Clima</i> .....	5
3.2.1.	<i>Semiárido con nublados abundantes</i> .....	5
3.2.2.	<i>Clima semiárido templado con lluvias invernales</i> .....	5
3.2.3.	<i>Clima semiárido frío con lluvias invernales</i> .....	5
3.3.	<i>Geomorfología</i> .....	7
3.3.1.	<i>Alta Montaña</i> .....	7
3.3.2.	<i>Media Montaña</i> .....	7
3.3.3.	<i>Franja Litoral</i> .....	7
3.3.4.	<i>Valles Fluviales Transversales</i> .....	7
3.4.	<i>Precipitación</i> .....	7
3.5.	<i>Hidrografía</i> .....	8
3.5.1.	<i>Subcuenca río Hurtado</i> .....	8
3.5.2.	<i>Subcuenca río Grande</i> .....	8
3.5.3.	<i>Subcuenca río Cogotí</i> .....	9
3.5.4.	<i>Subcuenca río Limarí</i> .....	9
3.6.	<i>Geología</i> .....	11
3.7.	<i>Hidrogeología</i> .....	14
3.7.1.	<i>Unidad Hidrogeológica de Alta Permeabilidad</i> .....	14

3.7.2.	<i>Unidad Hidrogeológica Semipermeable</i>	14
3.7.3.	<i>Unidad Hidrogeológica de Permeabilidad Media</i>	14
3.8.	<i>Sectores Hidrogeológicos DGA</i>	15
4.	<i>Métodos</i>	17
4.1.	<i>Dominio del modelo</i>	17
4.2.	<i>Estratigrafía</i>	18
4.3.	<i>Condiciones de borde</i>	19
4.3.1.	<i>Ríos principales y altura constante</i>	19
4.3.2.	<i>Bombes de agua subterránea</i>	20
4.3.3.	<i>Recarga de agua subterránea</i>	22
4.4.	<i>Parámetros</i>	23
4.5.	<i>Zonas de balance hídrico</i>	23
4.6.	<i>Criterios de calibración</i>	25
4.7.	<i>Criterios de sustentabilidad de agua subterránea DGA</i>	27
5.	<i>Resultados y discusión</i>	30
5.1.	<i>Estado de calibración modelo Limarí 2020</i>	30
5.2.	<i>Niveles de agua subterránea</i>	32
5.3.	<i>Balance hídrico subterráneo</i>	39
5.4.	<i>Cálculo de criterios de sustentabilidad DGA</i>	42
6.	<i>Comentarios Finales</i>	43
7.	<i>Agradecimientos</i>	44
8.	<i>Referencias</i>	44

## 1. Introducción

Las condiciones climáticas de los últimos años han acentuado la aridez en climas mediterráneos (DGA 2018a). En Chile, gran parte de su extensión es mediterránea, donde se ha desarrollado una mega sequía que ya alcanza 10 años (DGA, 2018b, 2019a). Los efectos de la aridez aumentada se han expresado con mayor fuerza desde Atacama hasta Los Lagos, entre los paralelos 25° y 40° S, afectando áreas de alta productividad socioeconómica y de gran riqueza medioambiental (DGA 2019b). Las proyecciones indican que el cambio climático acentuará estas condiciones hacia el 2050, generando periodos secos más largos, seguidos de periodos húmedos más cortos (DGA 2019c). En dicho contexto, la seguridad hídrica se ve desafiada, al igual que la prosperidad del país. Una de las regiones con mayor riesgo es Coquimbo, donde sus cuencas hidrográficas han sufrido un déficit cercano a  $-40 \text{ m}^3/\text{s}$ , y se estima que al 2050 llegaría a  $-95 \text{ m}^3/\text{s}$  (DGA, 2018a, 2016, 2014). De las cuencas en dicha región, la del río Limarí se enmarca como de alta incertidumbre hídrica, puesto que la base de información para la toma de decisiones está desactualizada, particularmente respecto al estado del acuífero en la cuenca.

Si bien existen herramientas de modelación y cálculo de balances hídricos desarrollados para la cuenca del Limarí (e.g. CORFO, 2015), estas requieren actualizaciones y perfeccionamientos para solventar la falta de información respecto a por ejemplo ¿Cómo ha variado el volumen del acuífero Limarí en la última década? ¿Es necesario declarar nuevas zonas de restricción? ¿Existe desbalance hídrico subterráneo?, entre otras, para planificar y gestionar adecuadamente el uso del agua subterránea. Lo anterior sienta precedente para el desarrollo de este estudio, que se enfoca en diagnosticar el estado del agua subterránea en la cuenca del río Limarí, a través de modelación hidrogeológica, con el fin de apoyar la toma de decisiones que fortalezcan el desarrollo hídrico de la cuenca del Limarí

## 2. Objetivos

Modelar y diagnosticar el estado del agua subterránea en la cuenca del río Limarí

## 3. Área de estudio

El área de estudio se emplaza en la región de Coquimbo, en el centro norte de Chile, específicamente en la cuenca del río Limarí, que comprende un gran sistema interconectado de ríos y acuíferos, lo cual fue considerado como unidad de análisis en el presente estudio. Por aspectos referenciales, el área de estudio se ha denominado “*Sistema Limarí*”. La Figura 1 ilustra dicho sistema, desplegando sus principales aspectos geográficos, administrativos, geomorfológicos, y redes fluviales, los cuales son descritos a continuación, junto a otros aspectos relevantes del Sistema Limarí, que sustentan la competencia de la unidad de análisis. La información presentada

en texto fue adaptada desde DGA (2004), DGA (2008), Sernageomin (2020), y Ramos (2020), mientras que las Figuras 1 a 4 fueron desarrolladas durante este estudio por la DGA.

### **3.1. Aspectos administrativos**

El Sistema Limarí se define por aspectos geográficos, colindando con la cuenca del río Elqui por el norte, la del Choapa por el sur, la Cordillera de los Andes por el este y el Océano Pacífico por el oeste. El área abarca 11.800 km<sup>2</sup> aproximadamente, extendiéndose entre los 30°15' y 31°20' latitud sur. Administrativamente, el área de estudio contempla cinco comunas, las cuales son Río Hurtado, Monte Patria, Combarbalá, Punitaqui y Ovalle, siendo esta última la capital provincial (ver Figura 1).

### **3.2. Clima**

El Sistema Limarí en su extensión general, se encuentra bajo la influencia de un bioclima seco y árido, que implica sequías prácticamente durante todo el año, con excepción de los meses de invierno. La temperatura media anual bordea los 17°C, con una mínima de 10°C y una máxima de 24°C. Particularmente, se desarrollan tres tipos de clima:

#### **3.2.1. Semiárido con nublados abundantes**

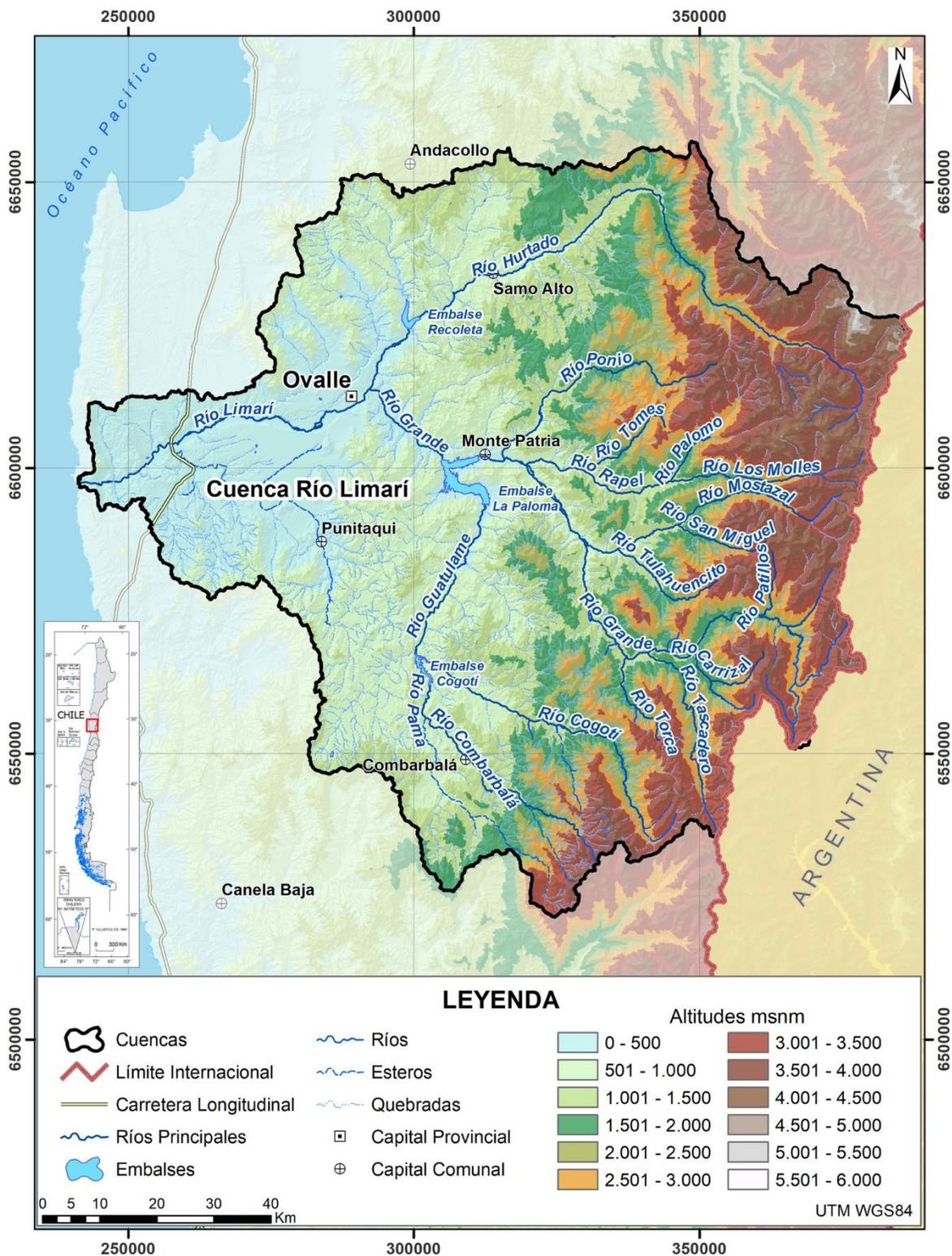
Se desarrolla en toda la costa, llegando hasta 40 km al interior, a través de los valles transversales y quebradas. Se destaca por la abundante nubosidad, humedad, temperaturas moderadas, entre 5 y 12°C, y un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales, presentando periodos secos de 8 a 9 meses.

#### **3.2.2. Clima semiárido templado con lluvias invernales**

Se despliega en los valles del río Limarí, presentando un clima seco, donde la evaporación es superior a la precipitación, sin presencia de excedentes hídricos. Sus temperaturas medias anuales no superan los 18°C.

#### **3.2.3. Clima semiárido frío con lluvias invernales**

Se localiza en la Cordillera de Los Andes sobre los 3.000 metros de altitud, presentando altas precipitaciones, escorrentías, temperaturas bajas y nieves permanentes, las cuales conforman un aporte de agua importante hacia el Sistema Limarí durante periodos estivales.



**Figura 1. Área de estudio: Sistema Limarí.**

El área de estudio es la cuenca del río Limarí, como un sistema hídricamente conectado, sin relación hidráulica con el resto de sus áreas vecinas, ya sea por divisorias de agua producto de la geomorfología, o unidades hidrogeológicas impermeables.

### **3.3. Geomorfología**

El relieve del Sistema Limarí es del tipo montañoso, como lo expuso la Figura 1, con angostos valles alargados transversales de Este a Oeste, siendo algunos de gran extensión, como hacia el interior de Ovalle. Así, dentro del área de estudio, se distinguen cuatro grandes conjuntos físicos, estos son:

#### **3.3.1. Alta Montaña**

Se desarrolla en la Cordillera de Los Andes, emplazándose en el extremo oriental del Sistema Limarí. Esta zona se distingue por sus alturas, puesto que las cumbres superan los 3.500 m, alcanzando en la frontera chileno-argentina los 6.000 m de altitud. Además destaca su capacidad de retención nival, y la ausencia de volcanismo cuaternario.

#### **3.3.2. Media Montaña**

Corresponde a zonas con alturas menores a 3.000 m. que están separadas de la Cordillera de los Andes por la Falla de Vicuña. Producto de intensa disección fluvial, el relieve es desmembrado y discontinuo en la Media Montaña. Hacia el oeste limita con la franja litoral y los relieves asociados a ella. Generalmente, es esta zona los cursos de agua no alcanzan a desarrollar escorrentías permanentes aguas abajo, ni como para constituir valles con depósitos sedimentarios ni terrazas.

#### **3.3.3. Franja Litoral**

Está dominada por terrazas de sedimentación marina, tales como. Los Altos de Talinay, en áreas de altitud entre los 300 y 500 m, limitando hacia el este con macizos de cientos de metros, separados unos de otros por quebradas, que han sido formadas por la acción de los cursos de agua que atraviesan el Sistema Limarí para desembocar al mar.

#### **3.3.4. Valles Fluviales Transversales**

Se desarrollan como producto de la actividad de las aguas corrientes, en áreas de altitud inferior a 300 m. debajo de las cuales se desarrollan los acuíferos productivos del sistema Limarí, por el establecimiento de secuencias sedimentarias permeables, a lo largo de la historia. Además, presentan un completo sistema de terrazas sedimentarias marinas, las cuales, se correlacionan con los cambios del nivel de mar experimentados durante el Cuaternario.

### **3.4. Precipitación**

Debido al clima árido del área de estudio y a la presencia de un efecto de inversión térmica en el área de estudio, el movimiento vertical de aire es limitado, provocando baja generación de

precipitaciones. Lo anterior es característico de climas mediterráneos, donde el 70% de la precipitación ocurre durante los meses de invierno, siendo nulas en verano. Anualmente, según datos DGA, el Sistema Limarí recibe en promedio 90 mm por el norte y 280 mm por el sur, no obstante, en los últimos años, el área de estudio ha experimentado una tendencia negativa en precipitaciones de -25 mm/década. Particularmente, en áreas sobre los 1.000 m de altitud, ocurren la mayoría de los eventos de precipitación, alcanzando tasas anuales sobre los 500 mm en periodos lluviosos, mientras que en los sectores medios y bajos, las lluvias alcanzan entre 100 a 500 mm/año en épocas húmedas.

### **3.5. Hidrografía**

En el Sistema Limarí, los cursos de agua se desarrollan en subcuencas, las cuales por aspectos geomorfológicos, contienen y transmiten las aguas que escurren desde la cordillera al mar. La mayoría de las aguas corrientes confluyen al río Limarí, en la parte baja del área de estudio, el cual ejerce como efluente final del sistema. Las subcuencas y sus ríos son ilustradas en la Figura 2, y descritas a continuación:

#### **3.5.1. Subcuenca río Hurtado**

Contiene un cauce principal que da origen a la subcuenca, el río Hurtado. Este nace en la Cordillera de los Andes, fluyendo inicialmente en dirección SE - NO y luego girando en 90° en dirección NE - SO, a la altura de la localidad de Hurtado. En su recorrido, se nutre de las aguas del río Ternero, la quebrada Elqui, la quebrada Rapel y el río Chacay, aunque con caudales menores, por lo que representa el único gran dren del área norte del Sistema Limarí. El caudal promedio anual del río Hurtado es de 2,8 m<sup>3</sup>/s, el cual en su curso inferior, es regulado por el embalse Recoleta, que almacena un volumen útil de 100 millones m<sup>3</sup>.

#### **3.5.2. Subcuenca río Grande**

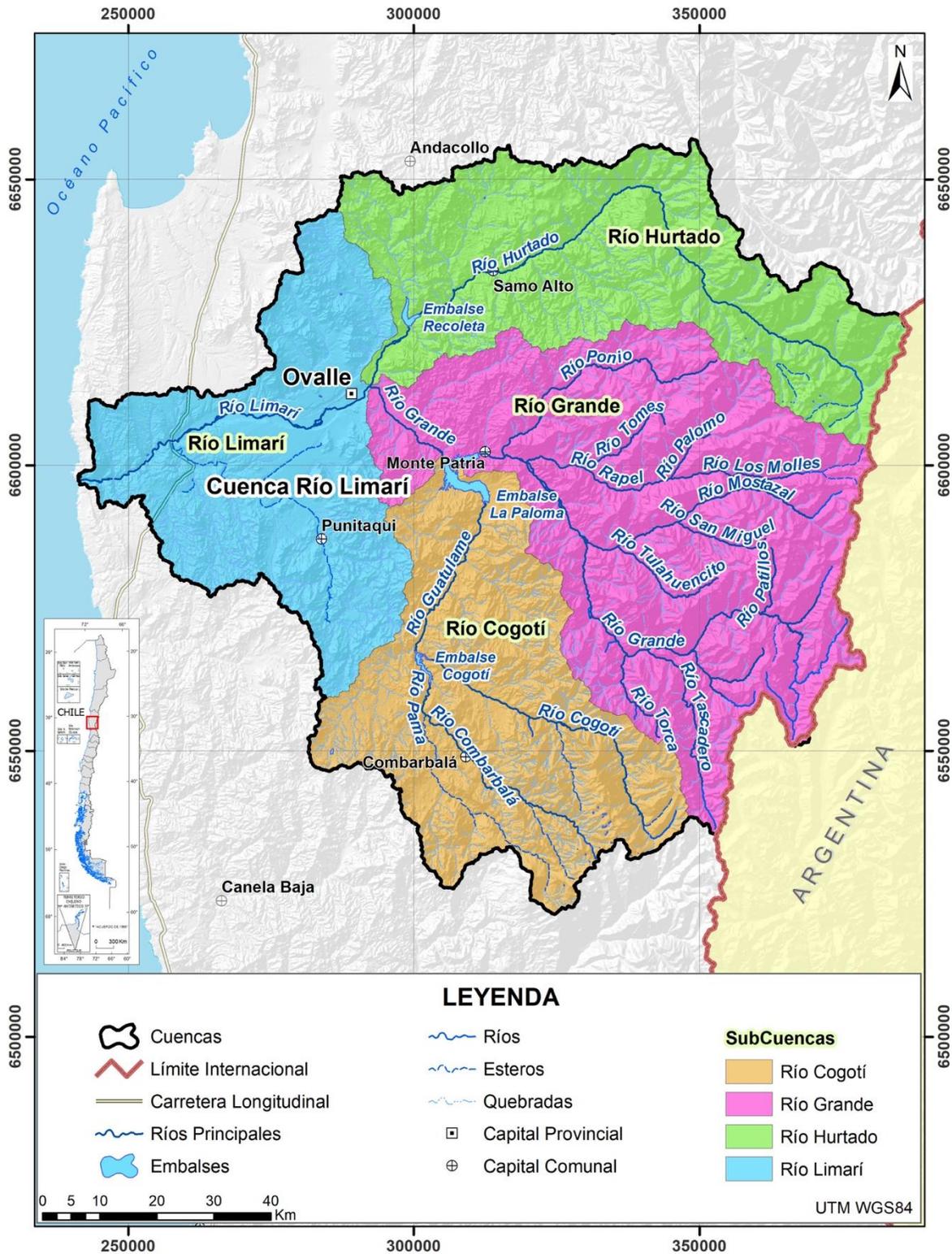
Posee numerosos cauces, que confluyen al río Grande, que da origen a la subcuenca. Este río nace en la Cordillera de los Andes, se extiende a lo largo de toda la subcuenca, y es biseccionado en su curso inferior por el Embalse La Paloma, a la altura de la localidad de Monte Patria. Los mayores afluentes del río Grande antes del embalse son el río Rapel, con sus tributarios Palomo y Molles, y los ríos Mostazal y Ponio. A la altura del embalse por el lado sur, convergen las aguas de la próxima subcuenca, Cogotí, por lo que la sección terminal del río Grande drena dos subcuencas de forma regulada, para desembocar en el río Limarí. El caudal promedio anual del río Grande antes del embalse es de 8,5 m<sup>3</sup>/s, mientras que posterior a este, fluye a tasas promedio de 5,3 m<sup>3</sup>/s anuales. El embalse La Paloma almacena un volumen útil de 750 millones m<sup>3</sup>.

### **3.5.3. Subcuenca río Cogotí**

Corresponde al área de drenaje sur del Sistema Limarí, en la cual fluyen numerosos cauces que confluyen al río Guatulame, el cual nace en la confluencia de los ríos Cambarbalá, Pama y Cogotí. En este sector se emplaza el embalse Cogotí, que regula las aguas de dichos tributarios, definiendo el flujo del río Guatulame. El caudal promedio anual de los tributarios al embalse Cogotí es de 1.5 m<sup>3</sup>/s, mientras que aguas abajo, el río Guatulame aporta 1.8 m<sup>3</sup>/s al embalse la Paloma. Por otro lado, el embalse Cogotí almacena un volumen útil de 150 millones m<sup>3</sup>.

### **3.5.4. Subcuenca río Limarí**

Se origina en la confluencia de los ríos Hurtado y Grande, donde nace el río Limarí, aproximadamente 4 km aguas arriba de la ciudad de Ovalle, y extendiéndose por cerca de 60 km hacia el oeste donde desemboca al mar, en la localidad de Punta Limarí. En su curso, el río Limarí recibe descargas menores de los Esteros Ingenio por el norte y Punitaqui por el sur, los cuales se originan en la cordillera de la costa. En esta subcuenca los valles son abiertos, con suelos de buena aptitud agropecuaria, y los cauces fluyen repetidamente aterrazados. En el sector de desembocadura, la subcuenca se estrecha de forma significativa, y el río Limarí entrega sus aguas al mar por un cauce de 500 m de ancho, aproximado. El caudal promedio anual del río Limarí es de 6.7 m<sup>3</sup>/s a lo largo de su extensión.



**Figura 2. Hidrografía del área de estudio.**

El área de estudio comprende las cuencas del río Limarí y Quebrada Seca, como un sistema hídricamente conectado, en la Región de Coquimbo, Chile.

### 3.6. Geología

La geología del Sistema Limarí (ver Figura 3) está constituida por rocas volcano-clásticas con intercalaciones sedimentarias marinas y volcano-continentales de edad Cretácica (entre 145-66 Ma), las cuales están en contacto intrusivo con rocas graníticas de edad Cretácico-Terciario, exceptuando el dominio costero, donde hay una franja Norte-Sur de rocas metamórficas de edad Paleozoico inferior (~350 Ma) en contacto con extensos afloramientos de rocas intrusivas de edad Paleozoico (Thomas, 1967; Charrier et al.,2007). A nivel estructural, se destaca la ubicación de un sinclinal en el centro del área, presentando un sistema de fallas en sentido preferencial N-S asociado a la Falla de Vicuña, y en menor medida a sistemas estructurales NNO-SSE vinculados a contactos intrusivos y zonas de alteración hidrotermal (Thomas, 1967; Charrier et al.,2007). Así, la geología de la cuenca del Limarí se puede sectorizar en 4 regiones principales, en dirección Oeste-Este:

1. En la región de la serranía costera (entre 5 a 10 km desde la línea de costa), se presenta afloramientos de rocas metamórficas, específicamente filitas, esquistos cuarzo-micáceos, metabasitas y mármol asociadas al Complejo Metamórfico del Choapa que se atribuye a una edad Paleozoico inferior (Rivano y Sepulveda, 1986). Esta última presenta un contacto inferido con rocas intrusivas del Paleozoico. Paralelo a la línea de costa se ubica una franja de depósitos Cenozoicos que presentan la formación de terrazas de abrasión altas y bajas. Limita el este por un sistema de fallas N-S irregular que pone en contacto rocas intrusivas jurásicas y rocas estratificadas del Mesozoico Inferior (Thomas, 1967).
2. La región occidental (ubicada al este de la anterior) está formada casi exclusivamente por rocas volcánicas del Mesozoico Inferior que presentan contacto con una gran cantidad de afloramientos de rocas intrusivas de edad Jurásica-Cretácica (predominantemente graníticas). Sobre estas formaciones, específicamente en el sector de la ciudad de Ovalle, la ubicación del grupo Ovalle (Cretácico Inferior), compuesta por sucesiones Marino Continental, la cual subyace por una sucesión importante de rocas volcánicas intermedias de ambiente continental (Estratos de Tamayo), sobre la cual se desarrollan secuencias volcánicas con intercalaciones de rocas sedimentarias marinas fosilíferas (Estratos del Reloj y Fm. Arqueros), todas con edades del Neocomiano y manteo ligero hacia el Este. Sobreyaciendo y en discordancia progresiva al Grupo Ovalle, destaca la presencia de la Fm. Quebrada Marquesa (Neocomiano superior-Aptiano), la cual presenta un contacto intrusivo con una gran cantidad de afloramientos graníticos de edad Cretácico-Terciario (Thomas, 1967). Un área importante de esta región (específicamente en los alrededores de la ciudad de Ovalle) está cubierta por una extensa área de depósitos sedimentarios marinos y continentales aterrizados de edad Cenozoicos, acumulados por los aportes provenientes de

la confluencia de los valles transversales presentes (Valle de en el sector, estos últimos de gran importancia, pues es donde ocurre la mayor cantidad de procesos de sedimentación, y formación de unidades hidrogeológicas de interés.

3. En la región central, limitada al este por el sistema de falla Vicuña, se presenta el ala occidental del sinclinal mesozoico. Destaca la ubicación de la Fm. Viñitas, la cual sobreyace a través de una discordancia progresiva a la Fm Quebrada Marquesa. La Fm. Viñitas (Cretácico Superior), asociada a un ambiente continental, corresponde a una sucesión de rocas volcánicas, tobas, ignimbritas, areniscas, conglomerados, con fósiles de algunos tipos de Dinosaurios (Thomas, 1967). Al igual que la región anterior, está en contacto intrusivo con una gran cantidad de cuerpos graníticos de edad Cretácico-Terciario, destacando el batolito Elqui-Limarí (Charrier et al.,2007). En este sector se reconoce una cubierta de depósitos aluviales y sedimentos continentales de edad cuaternario que se localizan al interior de los valles transversales.
4. La región de la Cordillera principal, (al este del sistema de falla Vicuña), está constituida por el ala oriental del sinclinal de rocas mesozoicas. En este sector destaca por el afloramiento de rocas plegadas de la Fm. Viñita, y Fm. Elquinos (Cretácico superior), esta ultima compuesta por rocas volcánicas andesíticas basálticas y riolíticas con intercalaciones de rocas sedimentarias clásticas continentales (Thomas, 1967). También hacia el este se reconoce parte del grupo Ovalle que subyace a las anteriores formaciones. En este sector, de mayores gradientes topográficos, se reconocen depósitos sedimentarios Cuaternarios acotados a los valles y quebradas.

Así, las unidades de mayor interés hidrogeológico, por su potencial en conformar acuíferos detríticos, son los depósitos sedimentarios Cenozoicos, tipo "*Unidad Sedimentos*", constituidos por sedimentos fluviales, aluviales y coluviales aterrazados, localizados y acotados principalmente a los valles y quebradas de la cuenca del Río Limarí, las cuales poseen diversos grados de compactación, desde no consolidados a débilmente n de alta inclinación, depósitos de playa y dunas; 'botaderos' de estéril de minas, 'pilas' de lixiviación, embalses de relaves abandonados y muros de embalses de regadío.

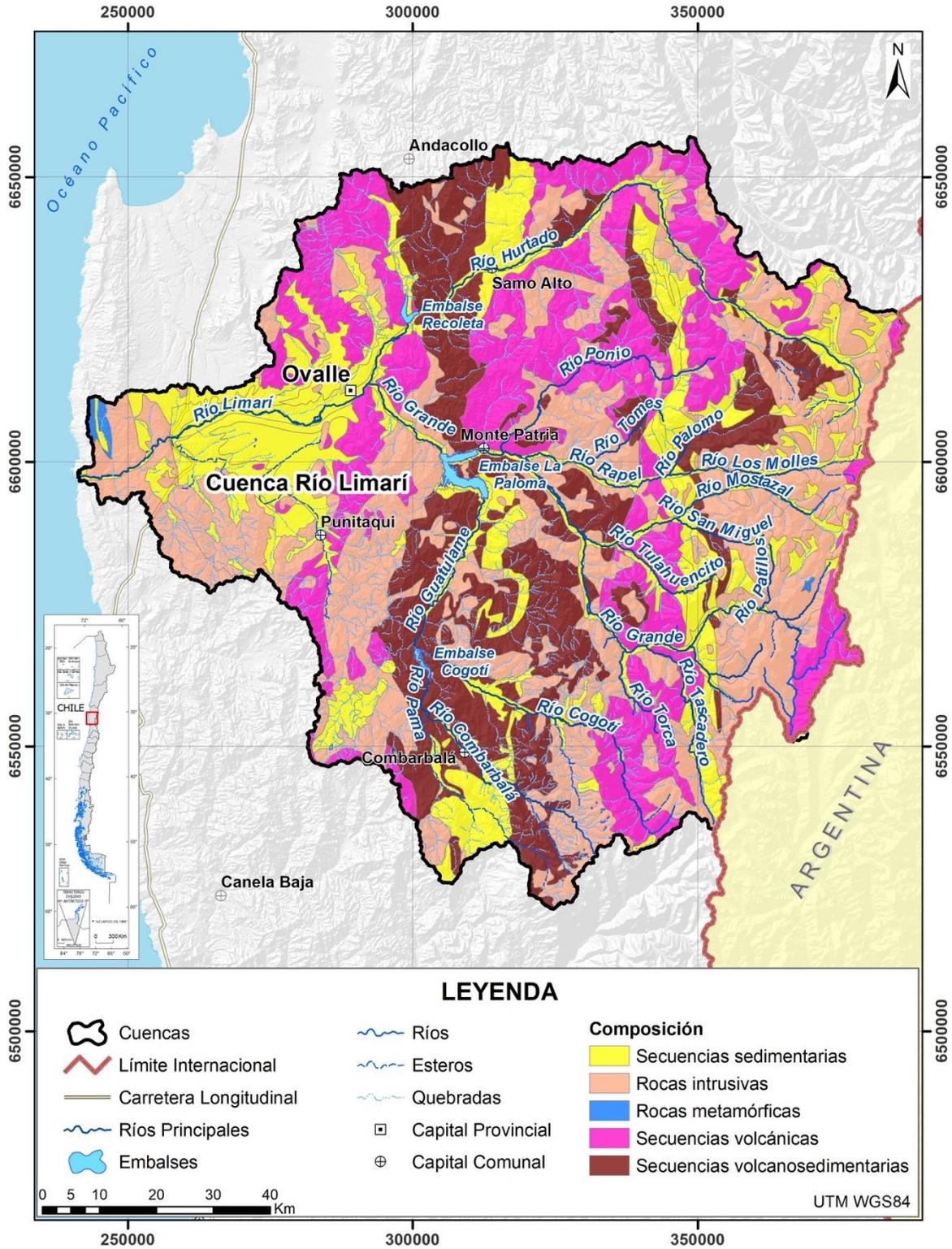


Figura 3. Formaciones geológicas del área de estudio según composición. Basado en Sernageomin (2003).

### **3.7. Hidrogeología**

La hidrogeología del área de estudio ocurre en la unidad litológica de sedimentos, que da origen al relleno que almacena y transmite agua subterránea, es decir, el acuífero. En función de la heterogeneidad en permeabilidad que manifiestan los sedimentos, se distinguen tres Unidades Hidrogeológicas, las cuales según Ramos (2020), se describen como:

#### **3.7.1. Unidad Hidrogeológica de Alta Permeabilidad**

Se presenta en rellenos sedimentarios no consolidados, en los depósitos fluviales a lo largo de los cauces actuales, en conos aluviales, coluviales y terrazas fluviales subactuales, todos de edad cuaternaria. Está compuesto principalmente por bolones, gravas, arenas y sedimentos finos en menor cantidad. El espesor de esta parte del acuífero oscila entre los 6 m y 30 m. Presenta características de acuífero libre asociado a los ríos Limarí, Grande, Cogotí y estero Punitaqui, con los cuales tiene una alta interacción. La baja compactación de sus sedimentos condiciona a altas conductividades hidráulicas, variando de  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$  m/s, lo que se traduce en un alto potencial hidrogeológico. En el cauce del río Limarí presenta un nivel freático somero, que no desciende de los 5 m., en los conos aluviales y depósitos coluviales se presentan acuíferos libres, con niveles freáticos que varían entre 5 y 30 m. y que generalmente se encuentran conectados a acuíferos en roca.

#### **3.7.2. Unidad Hidrogeológica Semipermeable**

Esta unidad se presenta en rellenos sedimentarios no consolidados, principalmente en los depósitos de terrazas aluviales, con edades entre el Mioceno y Holoceno (Cenozoico), debido a esto y a su compactación presentan una mayor cantidad de materiales finos, como mezclas de arenas, gravas y limos, con una cantidad variable de arcilla, donde esta combinación puede ser clasto o matriz soportada. El espesor de esta zona puede llegar hasta los 100 m. Presenta características de acuífero libre, no obstante, también se pueden encontrar algunos acuíferos cubiertos, semiconfinados y confinados. El coeficiente de permeabilidad varía dependiendo de la cantidad de sedimentos gruesos y finos presentes y en particular de la cantidad de arcilla, oscilando entre  $10^{-8}$  y  $10^{-4}$  m/s. El potencial hidrogeológico de esta unidad es moderado.

#### **3.7.3. Unidad Hidrogeológica de Permeabilidad Media**

Esta unidad se presenta en roca, correspondiente al sector este de la cuenca, correspondiente la zona de Intrusivos Mesozoicos y de Rocas Metamórficas Paleozoicas. Corresponde a porciones de roca meteorizadas y/o fracturadas que almacenan agua en distintas proporciones. Puede presentar una alta porosidad y permeabilidad primaria, pero no conforma un acuífero. No obstante, al

encontrarse con porciones de roca meteorizadas y fracturadas pueden lograr almacenar distintos volúmenes de agua, por lo tanto, puede contener acuíferos de permeabilidad media a baja. Su extensión y profundidad no se conoce con exactitud debido al escaso número de pozos en esta zona. Sin embargo, los pozos presentes en estas zonas tienen un carácter de acuífero libre, con niveles freáticos que varían entre 3 m y 30 m, encontrándose en la parte superior del acuífero formaciones de depósitos coluviales que cubren la roca. Su potencial hidrogeológico se ha considerado en la práctica despreciable.

### **3.8. Sectores Hidrogeológicos DGA**

Administrativamente, la DGA ha definido 14 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC singular y SHACs plural), los cuales abarcan los sectores del relleno sedimentario, con el objetivo de administrar el agua subterránea en el Sistema Limarí. Técnicamente, según el Decreto Supremo N°203 (2013), donde en el Art. 54, letra g), se establece como SHAC a un 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”, no obstante pueden no ser equivalentes a la delimitación de cuencas ni divisionarias de agua subterráneas. La Figura 4 ilustra los SHACs del Sistema Limarí, destacando cuales de estos se encuentran declarados como zona de restricción, y cuales se encuentran abiertos al otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de agua subterráneo. Para una descripción ampliada de los SHACs del área de estudio, referirse a Ramos (2020).



Figura 4. Sectores Hidrogeológicos DGA.

#### **4. Métodos**

Este trabajo se realizó por medio de modelación hidrogeológica, tomando como base un modelo existente desarrollado por CORFO (2015). El código de modelación subterránea corresponde a Modflow 96, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (U.S. Geological Service, 1996), y se aplica en la cuenca del Limarí por medio del software Visual Modflow, en su versión 4.6 o superior (Waterloo Hydrogeologic, 2011). De lo anterior, el modelo Limarí existente se actualizó y perfeccionó a su estado “Modelo Limarí 2020”, construido para simular la ocurrencia mensual de flujo de agua subterránea y sus estreses en la cuenca.

El énfasis del trabajo en el modelo se enfocó en representar los sectores permeables de la formación geológica, identificados en el estudio de Sernageomin (2019), para luego incorporar nuevas extracciones de agua subterránea, condicionadas por los pozos inscritos en DGA y sus respectivos derechos de agua hasta abril del 2018, y finalmente extender las series hidrológicas de las condiciones de borde, tales como recarga y flujos de intercambio del agua subterránea con ríos y embalses. El modelo Limarí 2020 simula 28 periodos de estrés, cada uno con 10 pasos de tiempo, y un multiplicador temporal con valor de 1,2. Esto permite modelar la hidrogeología de la cuenca a escala mensual, para el periodo de tiempo entre abril de 1964 y abril de 2018.

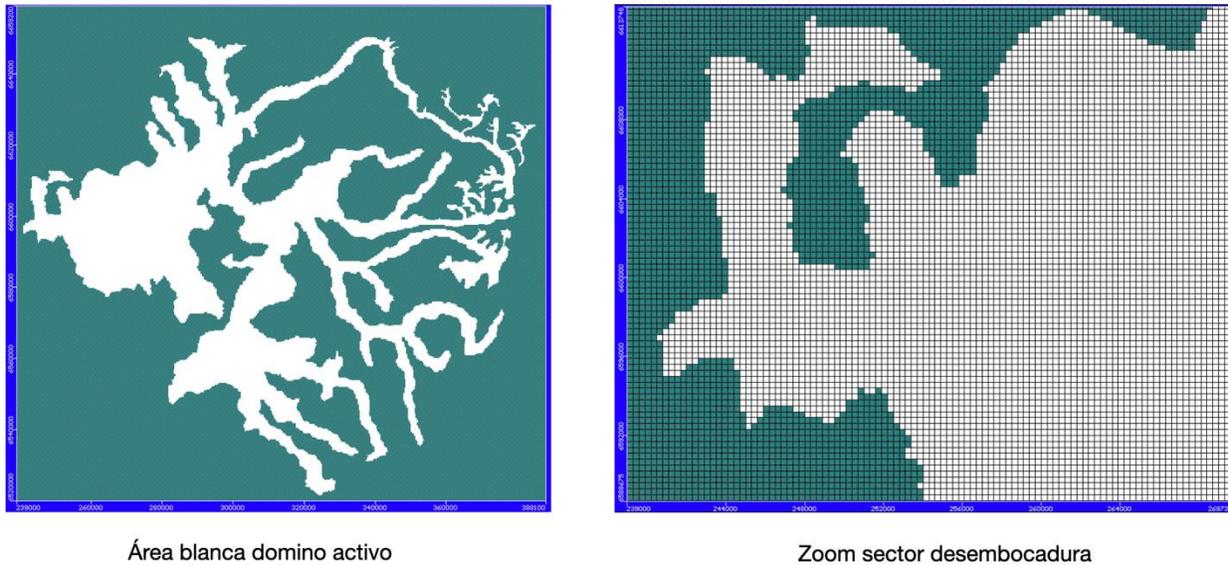
Las condiciones de calibración se mantuvieron equivalentes al modelo base, principalmente en el set de datos observados, el cual fue validado respecto a las simulaciones realizadas en el presente trabajo. Una vez actualizado y perfeccionado el modelo, se procedió a su aplicación para estimar las variaciones temporales y tendencias de los flujos subterráneos, sus tasas de intercambio con ríos y embalses, cuantificar el cambio en el almacenamiento del acuífero, un balance hídrico, y las condiciones particulares de cada SHAC.

Lo anterior permitió establecer una condición actualizada del estado del agua subterránea en la cuenca del Limarí. Finalmente, para diagnosticar el estado de cada SHAC, se evaluaron las causales de declaración de área de restricción en cada uno, calculando los criterios de sustentabilidad de agua subterránea DGA (2008), contenidos en el Código de Aguas, según lo estipulado en el Artículo 30 del Decreto Supremo N° 203, referente a las normas que aplican para la exploración y explotación de aguas subterráneas en Chile (2013).

##### **4.1. Dominio del modelo.**

Según la información contenida en el modelo base y el estudio más reciente de Sernageomin (2019), el dominio del modelo se estableció en aquellos sectores de la cuenca que presentan sectores con relleno sedimentario permeable, de espesores entre los 50 cm y 500 m, los cuales ocurren principalmente alrededor de los cauces principales de la cuenca del Limarí. Por lo tanto, se

construyó una grilla con celdas homogéneas de 300 x 300 m, que abarcan los sectores acuíferos de la cuenca según las figuras 3 y 4. Así, el modelo Limarí 2020 comprende 61.985 celdas activas, totalizando un área de flujo equivalente a 5.579 km<sup>2</sup>, es decir, casi la mitad del área total de la cuenca registrada en el Banco Nacional de Agua. La siguiente Figura 5 ilustra el dominio del modelo Limarí 2020. Se menciona que el sistema de coordenadas del modelo corresponde a UTM WGS 84 Huso 19.

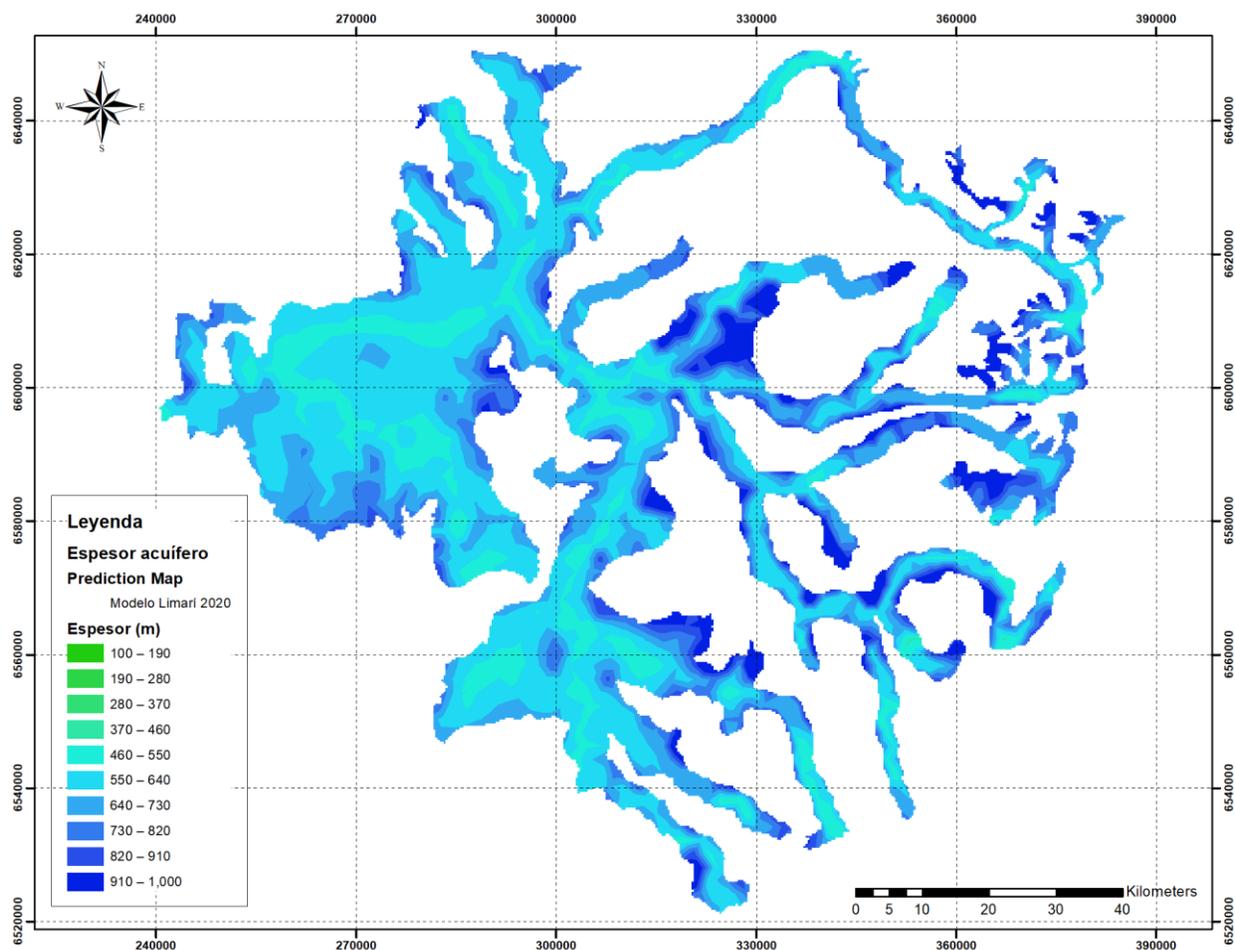


**Figura 5. Dominio y celdas activas del modelo hidrogeológico Limarí 2020.**

El modelo contempla 66.896 celdas activas de 300 x 300 m cada una, abarcando un área de flujo subterráneo equivalente a 5.579 km<sup>2</sup>.

#### 4.2. Estratigrafía

El modelo Limarí 2020 considera una capa única de acuífero, con profundidades variables a través del dominio activo, las cuales van entre los 90 y 1000 m. Se destaca que esta característica proviene del modelo base CORFO (2015), en el cual para su construcción, se realizaron estudios de geofísica y análisis espaciales para distribuir las profundidades del acuífero en su extensión a través del valle. También se distinguen diferencias con la estratigrafía presentada en estudios recientes realizados por Sernageomin (2019), por lo que mejoras a esta componente del modelo Limarí 2020 son deseables. No obstante, en rangos generales a nivel de cuenca, la representación del espesor del acuífero Limarí se observa adecuada para realizar simulaciones que representen las condiciones de flujo del territorio en estudio. La Figura 6 ilustra la distribución espacial del espesor del acuífero que considera el modelo Limarí 2020.



**Figura 6. Espesor del acuífero simulado en modelo Limarí 2020.**

Los valores de espesor provienen del modelo base, los cuales se mantuvieron en base al estudio CORFO (2015). Su actualización es deseable en función de los resultados del estudio Sernageomin (2019).

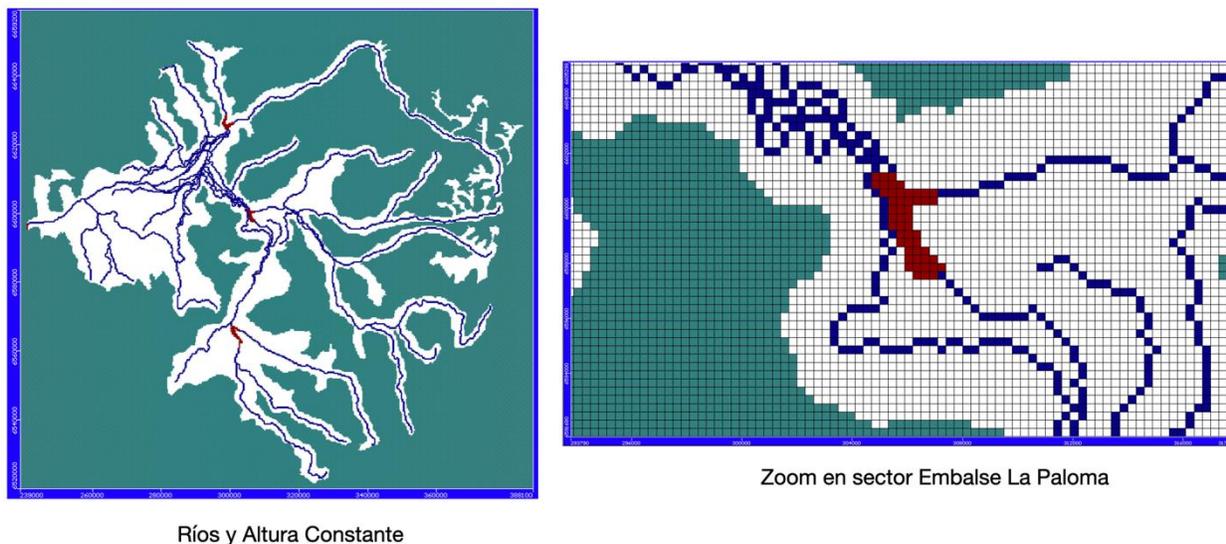
### 4.3. Condiciones de borde

Las condiciones de borde son aquellas características que inciden directamente en las entradas y salidas de flujo subterráneo desde el dominio activo del modelo. Estas condiciones en el modelo Limarí 2020 son los ríos y otros cauces que atraviesan la cuenca, sectores de altura constante de agua subterránea, como en desembocadura a nivel del mar, los bombeos de agua subterránea, y las tasas de recarga que ocurren en el tiempo y espacio en la cuenca.

#### 4.3.1. Ríos principales y altura constante

El modelo Limarí 2020 simula los flujos de agua en los cauces principales según la hidrografía de la cuenca, y las interacciones con el agua subterránea por medio de la condición de borde *River de Modflow*, en la cual se establece para cada celda activa del modelo que contiene ríos, las alturas de

agua en la caja del cauce, y la conductancia de la cama del río para cada tiempo de simulación. Así, los ríos y canales simulados abarcan la mayoría de los cuerpos de flujo de escorrentía en la cuenca del Limarí, logrando una representación adecuada de los cauces que fluyen a través de la cuenca. Por otro lado, se definieron celdas de altura constante por medio de la condición *Constant Head*, para representar los sectores de desembocadura del sistema subterráneo al mar, y altura constante de agua subterránea en la base de los embalses, equivalentes a la altura del terreno. El despliegue de los cauces y cuerpos de agua superficiales se muestra en la siguiente Figura 7.



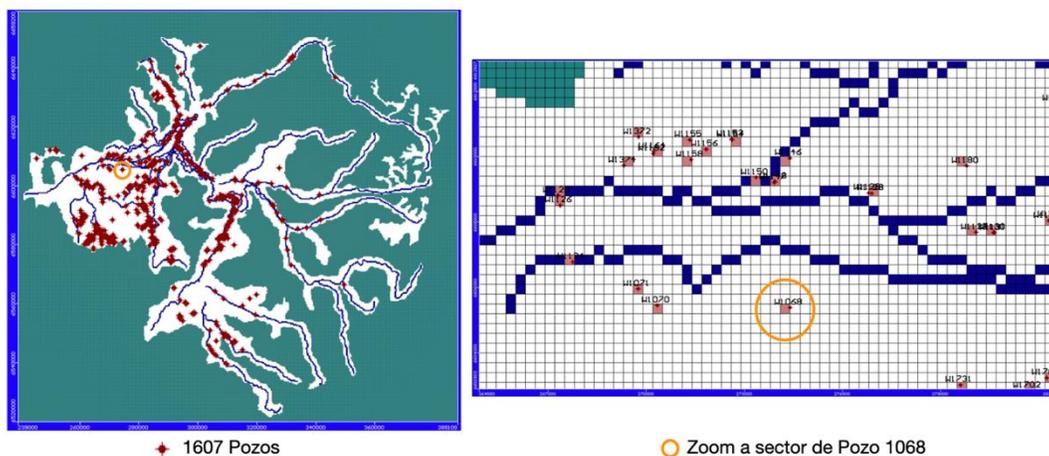
**Figura 7. Condiciones de borde River y Constant Head en modelo Limarí 2020.**

Celdas azules representan los ríos, y celdas rojas corresponden a condiciones Constant Head, que simulan altura constante de agua subterránea en la base de los embalses, y en los sectores de desembocadura del sistema subterráneo al mar.

#### 4.3.2. Bombeos de agua subterránea

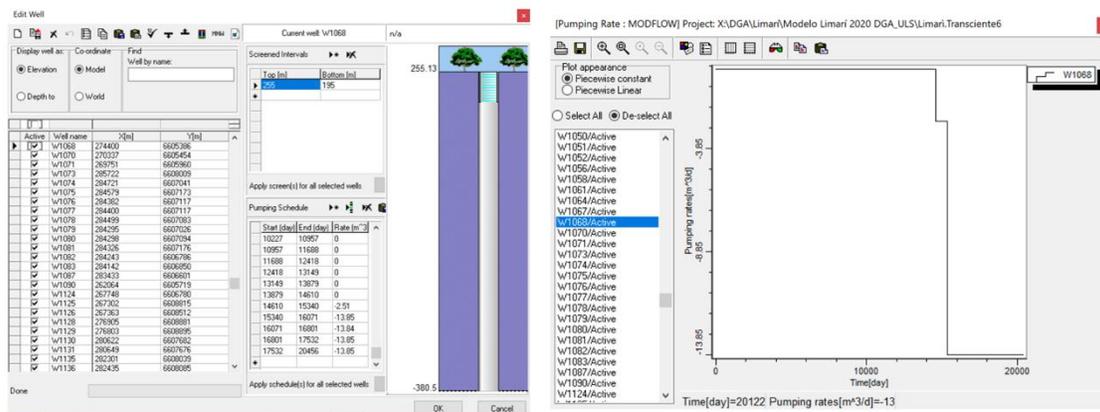
Se simulan 1607 pozos de extracción de agua subterránea registrados en DGA, los cuales fueron representadas por la condición de borde *Well* de Modflow, donde se expresa la localización de los pozos existentes y registrados en DGA hasta abril del 2018, junto a sus características hidráulicas, y tasas de bombeo. Esta última fue expresada mediante el derecho de agua asociado al pozo, condicionada por un “Factor de Uso” (FC), que varía entre 0,2 a 0,4 del valor del derecho, para representar el consumo efectivo de agua subterránea en la cuenca del Limarí, principalmente agrícola. Se indica que dicho procedimiento está sujeto a gran incertidumbre y que los valores del FC fueron tomados como parámetros de calibración dentro del desarrollo del modelo. Por lo tanto, las variables ingresadas para cada pozo corresponden a su localización en coordenadas UTM WGS84H19, sus tasas de bombeo de consumo efectivo, y localización en profundidad de los filtros de cada pozo. Se destaca que el modelo base ya contaba con la información los pozos hasta abril

del 2014, por lo que en este trabajo, se procedió a extender la serie de tiempo de bombeo de cada uno hasta abril del 2018, e incluir nuevos pozos en el sector de Río Ponio. Esto permitió simular la acción de cada pozo con sus respectivas características y consumo estimado para el tiempo de simulación abril 1964 a abril 2018. La Figura 8 ilustra el set de pozos simulados en el dominio activo del modelo, y la Figura 9 muestra sus características hidráulicas y tasas de bombeo ingresadas en el modelo, ejemplificadas para el Pozo 1068.



**Figura 8. Pozos de bombeo simulados en modelo Limarí 2020.**

Símbolos rojos representan pozos en el dominio activo del modelo según base de datos DGA Abril 2018, los cuales son asociados a celdas de la grilla, que se identifican por su color rosa en la interfaz gráfica de modelación. El círculo naranja ejemplifica un zoom para el área del pozo W1068.



**Figura 9. Características de los pozos simulados en modelo Limarí 2020.**

En “Edit Well” se especifican la localización de los pozos en coordenadas UTM WGS 84H19, la ubicación en profundidad del filtro, y la tasa de bombeo para cada tiempo de simulación, en valores negativos para simbolizar extracción en  $m^3/día$ . En “Pumping Rate” se visualiza la tasa de bombeo ingresada para cada pozo. Se ejemplifica pozo activo W1068. Este bombea  $-14 m^3/día$  ( $0,16 l/s$ ), y posee una profundidad de extracción efectiva de 60 m, en un perfil acuífero de 635 m.

### 4.3.3. Recarga de agua subterránea

Esta condición de borde expresa las entradas de agua al acuífero desde la superficie, producto de las lluvias y aplicaciones de riego, como una tasa de flujo variable en el tiempo y espacio en el dominio activo. La simulación de la recarga se realiza implementando la condición de borde *Recharge* de Modflow. Por lo tanto, utilizando dicha característica, en el modelo se han definido 55 zonas de recarga, en las cuales cada una contiene series de tiempo a escala bianual, que expresan la recarga estimada en mm/año.

Se destaca que el modelo base contenía dichas series de recarga hasta abril del 2018, las cuales fueron desarrolladas en el estudio CORFO (2015) por medio de un modelo externo de precipitación/riego-escorrentía-recarga, desde donde se generaron las series ingresadas en el modelo. Durante este trabajo, se realizó la extensión de dichas series para cada zona de recarga, mediante un enfoque estocástico lineal por mínimos cuadrados, lo que permitió obtener una ecuación de extrapolación viable para cada zona. Esto permitió extender la serie de recarga hasta abril del 2018. La Figura 10 ilustra las zonas de recarga simuladas en el modelo Limarí 2020, ejemplificando la serie de tiempo para la zona 48, la cual se desarrolla mayormente en zonas del río Limarí.

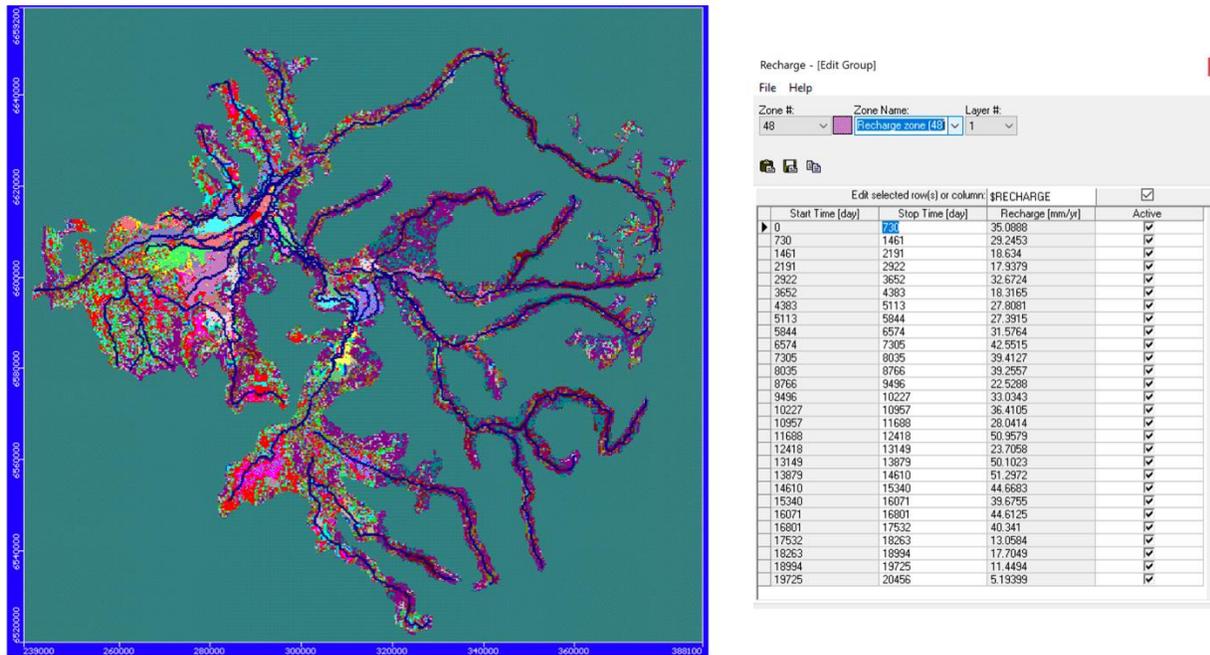


Figura 10. Zonas de recarga de agua subterránea en el modelo Limarí 2020.

Se simulan 55 zonas de recarga definidas que contienen series de tiempo bianuales expresadas en tasas de mm/año para cada tiempo de simulación. Se ejemplifica la zona 48, en color rosa en el modelo, exponiendo en "Recharge" los valores de recarga simulada en dicha área. Cada zona contiene su equivalente respectivo, las cuales son impuestas al modelo, en mm/año (mm/yr) para cada paso de tiempo en la simulación.

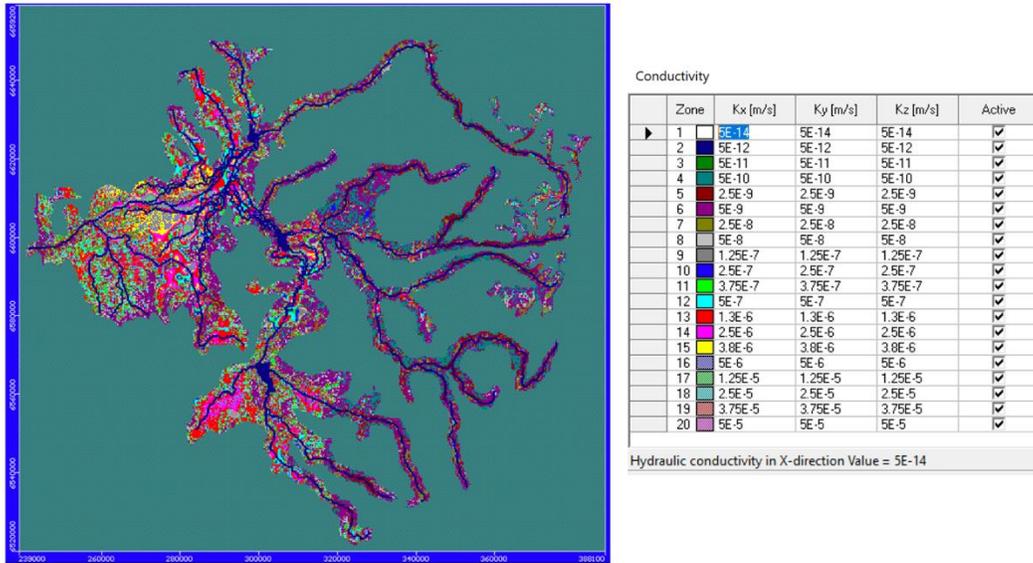
#### 4.4. Parámetros

Los parámetros son características hidráulicas del acuífero que establecen su capacidad de flujo y almacenamiento, los cuales son obtenidos por pruebas de bombeo en terreno, o por estudios de laboratorio, y que por lo general son invariables en el tiempo. Estos parámetros están definidos por la conductividad hidráulica (K), y los coeficientes de almacenamiento (Ss y Sy) del acuífero, que en suma establecen la Estoratividad (S) de la formación permeable. El modelo base contiene una detallada representación espacial de K, Ss, y Sy, la cual se establece por zonas de ocurrencia en el dominio activo, de forma similar que la recarga. Las magnitudes de K varían entre  $10^{-6}$  y  $10^{-5}$  m/s en sectores productivos, y disminuyen hasta  $10^{-8}$  m/s en los perímetros del dominio cercanos a formaciones impermeables del basamento rocoso.

Las magnitudes de S varían entre  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$  en áreas productivas, cercanos a los cauces donde existen condiciones de acuífero libre, y disminuyen a valores del orden de  $10^{-6}$  en sectores de mayor confinamiento de la formación geológica. Se menciona que también deben especificarse valores de porosidad efectiva y total de la formación geológica, las cuales se establecieron de forma homogénea con valores estándar de 0,3 y 0,35 respectivamente, por la inexistencia de información al respecto. Durante la actualización y perfeccionamiento del modelo base, los parámetros fueron sometidos a calibración, pero no de forma significativa, por lo que el modelo Limarí 2020 mantiene las características hidráulicas de su antecesor. La Figura 11 ilustra la distribución espacial y valores de K en el modelo, mientras que la Figura 12, lo expone para los coeficientes de almacenamiento.

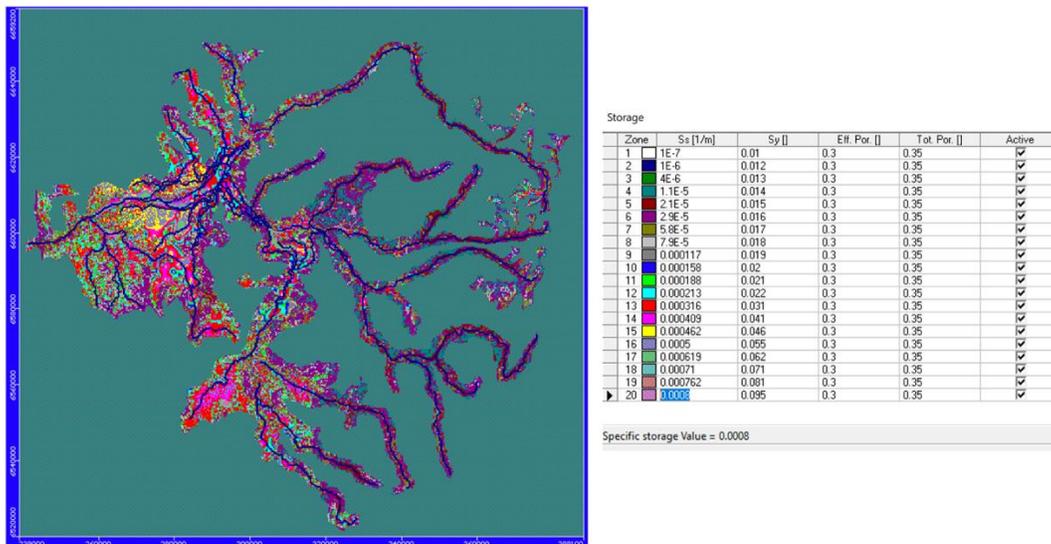
#### 4.5. Zonas de balance hídrico

El modelo Limarí 2020 se construyó para representar zonas de balance hídrico correspondientes a los SHAC DGA, con el objeto de otorgar a la herramienta de modelación, aspectos de análisis específicos en dichas zonas. Para establecer lo anterior, se realizó en el software de visualización, una superposición de capas entre las áreas de cada SHAC Limarí, y el dominio activo del modelo, para luego asignar las celdas correspondientes a cada SHAC. Así, fue posible obtener zonas de balance hídrico para los 14 sectores SHAC DGA en la cuenca del Limarí, que permiten el cálculo de flujos en cada área y sus interacciones. La Figura 13 ilustra las zonas de balance hídrico en el modelo Limarí 2020, destacando que estas ocurren en los sectores permeables del valle, presentando diferencias con las áreas definidas en la capa SHAC Limarí, que considera subcuencas hidrológicas más amplias como sectores de agua subterránea.



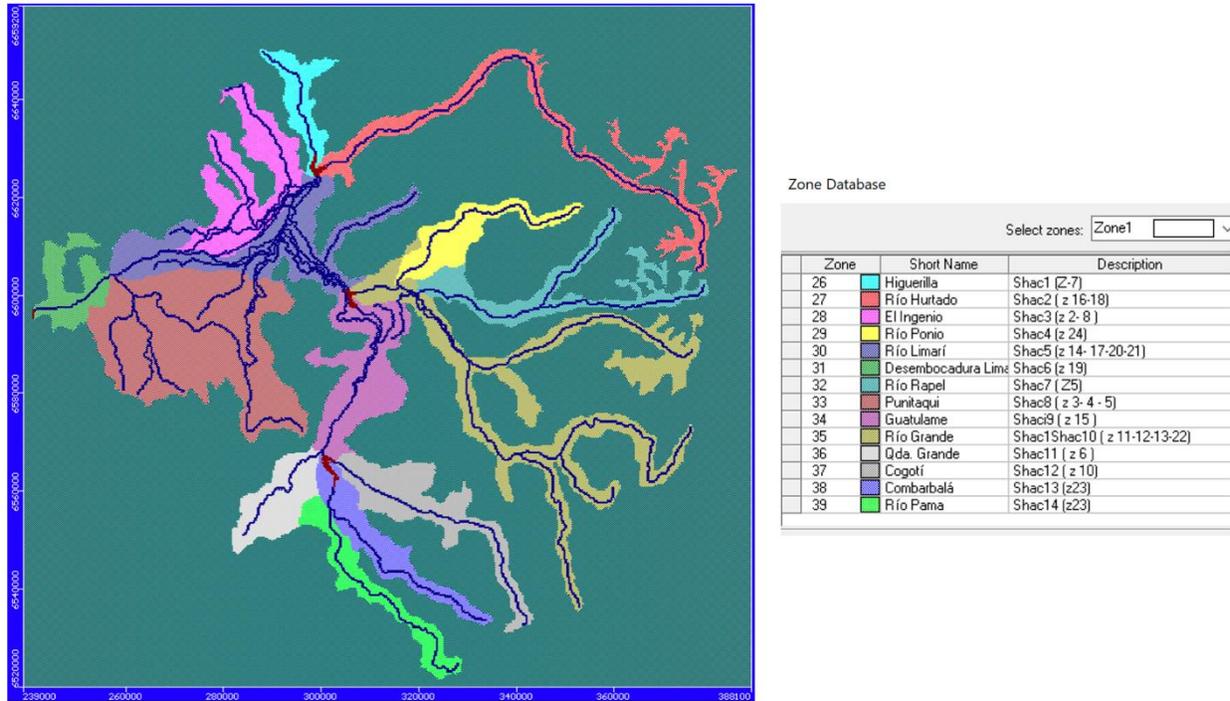
**Figura 11. Distribución espacial y valores de conductividad hidráulica (K) en el modelo Limarí 2020.**

Puesto que la simulación es en 3D, los valores de K deben establecerse para las tres dimensiones, x, y, z, las cuales para cada zona de conductividad hidráulica, la simulación consideró condiciones homogéneas para los valores de Kx, Ky, y Kz. Las magnitudes de K varían entre  $10^{-6}$  y  $10^{-5}$  m/s en sectores productivos, y disminuyen hasta  $10^{-8}$  m/s en los perímetros del dominio cercanos a formaciones impermeables del basamento rocoso.



**Figura 12. Distribución espacial y valores de coeficientes de almacenamiento en el modelo Limarí 2020.**

Estoratividad del acuífero (S) es igual a la suma de los coeficientes de almacenamiento Ss y Sy, la cual varía entre  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$  en áreas productivas, cercanas a cauces donde existen condiciones de acuífero libre, y disminuyen a valores del orden de  $10^{-6}$  en sectores de mayor confinamiento de la formación geológica.



**Figura 13. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) definidos en el modelo Limarí 2020.**

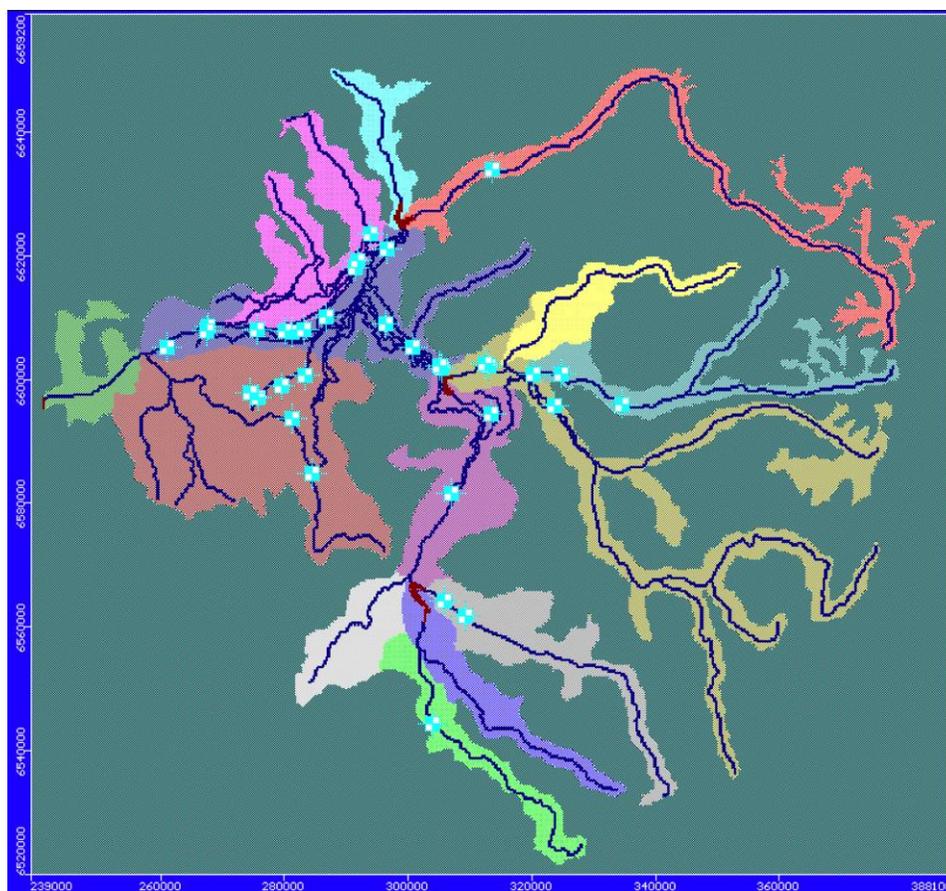
Existen 14 SHAC, definidos en los sectores permeables de la formación geológica de la cuenca del río Limarí, sobre la base del área establecida como SHAC por DGA. Se menciona que en el modelo existen otras zonas de balance, correspondientes al modelo base, las cuales no afectan los cálculos del modelo actual, y se dejaron para efectos de consulta. Por lo tanto, la Zona 1 corresponde a todo el dominio del modelo, y las zonas 26 a 39 corresponden a los SHAC DGA.

#### 4.6. Criterios de calibración

Para calibrar el modelo Limarí 2020, se obtuvieron datos de profundidad de agua subterránea del registro de 36 pozos de monitoreo DGA, que poseían datos desde 1960 hasta 2019, los cuales se transformaron a elevación de agua subterránea, respecto a la altura del terreno donde se ubica cada pozo. Este set de datos se ingresó al software de simulación, para mediante su uso, calcular el ajuste de valores simulados versus los observados, estadígrafos, e hidrogramas para evaluar el modelo. Se indica que debido al esquema de paso de tiempo del modelo, se considero tomar como valor observado de comparación, el promedio bianual de datos en la serie, es decir para 1970-1971, 1972-1973, ..., 2018-2019, los cuales fueron sometidos a evaluación de ajuste del modelo, para los mismos periodos de tiempo. En dicho sentido, el set de datos de calibración contempló un universo de 679 puntos comparables, distribuidos en el espacio y tiempo de la cuenca. La Tabla 1 expone las características principales de los pozos de monitoreo DGA utilizados para la calibración, mientras que la Figura 14, ilustra la localización de los pozos de monitoreo en el modelo Limarí 2020.

**Tabla 1. Características de los pozos de observación para calibrar modelo Limarí 2020.**

Estación niveles	Código BNA	Pozo	UTM Norte	UTM Este	Altitud (m.s.n.m.)	Inicio datos	Fin de datos	Nº de datos
AP Chañaral	04537006-2	1	6581576	307069	486	1970	2019	327
AP Puntiaqui	04555002-8	2	6584756	284511	235	1970	2019	353
AP Sotaqui	04540008-5	3	6609067	296363	271	1970	2019	331
AS Santa Catalina	04540012-3	4	6610012	293618	338	1975	1975	2
Asentamiento alborada juntas	04522006-0	5	6600844	320248	495	1975	2019	437
Asentamiento campo lindo	04556003-1	6	6597913	274372	176	1972	2019	356
Asentamiento cerrillos	04522005-2	7	6600818	324787	617	1975	2019	329
Asentamiento graneros	04555003-6	8	6593745	281240	198	1970	2019	386
Asentamiento las vegas	04550005-5	9	6608032	283110	165	1976	2019	194
Asentamiento nogales	04556002-3	10	6597133	275872	189	1970	2019	375
Asentamiento nueva aurora	04555004-4	11	6600678	283379	206	1986	2019	259
Asentamiento sol de la pradera	04522004-4	12	6595972	334594	980	1970	2019	330
Asentamiento unión campesina	04555005-2	13	6598868	279548	201	1970	2019	328
Barraza	04553005-1	14	6605244	261062	49	1976	2019	369
Canal tabali	04553008-6	15	6608638	267670	78	1970	2019	381
Carachilla	04540011-5	16	6605181	300804	295	1989	2019	252
Chilecito	04516004-1	17	6595834	323659	572	1978	2019	265
Embalse La Paloma	04524004-5	18	6601801	305518	353	1975	2019	108
Fundo Cogotí	04531004-3	19	6561652	309216	736	1986	2019	216
Fundo el mirador	04550008-K	20	6610192	286670	191	1970	2019	379
Fundo las represas vitivinícolas	04537005-4	21	6602122	313036	410	1986	2019	271
Fundo san Félix	04506008-K	22	6621042	296644	301	1970	2019	327
La Higuera	04537010-0	23	6594487	313344	408	1972	2019	265
La Paloma	04540009-3	24	6602198	305091	337	1970	2019	295
Llanos de Chingay	04533006-0	25	6544390	303926	873	1970	2019	299
Mina Panulcillo	04551007-7	26	6618057	291502	267	1982	2019	301
Monte Patria	04524003-7	27	6602608	312477	406	1970	2019	269
Parcela 13 Limarí	04550004-7	28	6607629	281357	160	1970	2019	379
Parcela 24 Limarí	04550006-3	29	6607761	280126	153	1970	2019	340
Pueblo La Ligua	04531005-1	30	6564109	305830	684	1978	2019	299
Pueblo Laguinilla	04506009-8	31	6619231	291902	277	1978	2019	320
Pueblo Recoleta	04551006-9	32	6623558	293938	324	1982	2019	298
Pueblo Samo Alto	04503005-9	33	6634011	313689	593	1976	2019	298
Pueblo San Julián	04552003-K	35	6607964	275603	120	1978	2019	336
Pueblo San Julián 2	04552004-8	34	6608112	275650	121	1982	2019	293
Pueblo Tabali	04553007-8	36	6607937	267424	78	1978	2019	167
<b>Total</b>								<b>10734</b>



**Figura 14. Localización de pozos de observación DGA en el modelo Limarí 2020.**

En la cuenca existen 36 pozos de monitoreo DGA, ilustrados en los símbolos cuadrados en celeste, con datos disponibles para calibrar el modelo Limarí 2020.

El modelo Limarí 2020 se consideró adecuado para realizar simulaciones cuando los siguientes criterios de calibración se lograron: (1) Coeficiente de correlación  $r^2$  entre valores observados y simulados sobre 0,8; (2) Distribución normal de residuos entre valores calculados y observados; (3) Raíz del error cuadrático medio normalizado menor al 5%; (4) Un error residual promedio menor a 1 metro; y (5) errores en el balance de masa menores al 1% para cada paso de tiempo simulado. Estas condiciones son concordantes con los criterios de calibración establecidos en la guía de modelación del Sistema de Evaluación Ambiental (SEA, 2012), la cual ha sido el estándar en DGA en los últimos años en ejercicios de simulación hidrogeológica.

#### **4.7. Criterios de sustentabilidad de agua subterránea DGA**

Según lo dictado por el Artículo 30 del Decreto Supremo N° 203 (2013), referente a las normas que aplican para la exploración y explotación de aguas subterráneas en Chile, la DGA ha desarrollado un set de criterios de cálculo que se enfocan en evaluar la condición de explotación de acuíferos en

Chile, para analizar la declaración de áreas de restricción para nuevas explotaciones de aguas subterráneas. Estos criterios están compilados en el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos de la DGA (DGA, 2008), los cuales están formulados para evaluar condiciones de: (1) Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero; (2) Interferencia río-acuífero; (3) Satisfacción de la demanda; (4) Pozos secos; y (5) Afectación a sectores abiertos. Además, existe un último criterio, sobre riesgos de afectación a la calidad de agua subterránea, el cual escapa a las posibilidades de análisis en el presente trabajo, puesto que se construyó un modelo de flujo, y no de transporte de contaminantes.

Por lo tanto, para calcular los criterios de sustentabilidad DGA, se consideró lo siguiente:

*Criterio 1- Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector de acuífero*

Si los descensos en el volumen de agua subterránea son sostenidos, se considera que el volumen de afectación sobre el acuífero en el largo plazo (50 años) no debe afectar más allá de un 5% del volumen total del acuífero, según Ecuación 1:

$$\frac{V_0 - V_{50}}{V_0} < 0,05 \quad \text{Ecuación 1}$$

donde,

$V_0$ : Volumen inicial del acuífero en análisis por el modelo

$V_{50}$ : Volumen simulado del acuífero a los 50 años de explotación.

Ambas variables  $V_0$  y  $V_{50}$ , son obtenidas directamente de los resultados de la modelación subterránea, considerando volumen el volumen total almacenado para cada área de análisis, al año 0 y año 50 de simulación.

*Criterio 2 – Interferencia río acuífero*

Este criterio busca no afectar los recursos superficiales ya comprometidos, considerando que el grado de interacción río acuífero debe ser menor que 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas de análisis, considerando caudales anuales promedio con 85% de probabilidad de excedencia. El planteamiento de este criterio se muestra en la Ecuación 2:

$$\Delta Q_{int} \leq 10\% \cdot Q_{anual\ 85\% Excedencia} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde,

$\Delta Q_{int}$ : Delta entre caudal que ingresa y sale del acuífero desde cauce.

$Q_{anual\ 85\% Excedencia}$ : Caudal superficial pasante con 85% de excedencia.

Se menciona que para el cálculo de este criterio, en particular la variable  $Q_{\text{anual } 85\% \text{ Excedencia}}$ , se utilizaron los resultados de un modelo superficial desarrollado en WEAP para la cuenca del Limarí (CORFO, 2015), obteniendo para cada SHAC, los caudales anuales de los cauces mayores con 85% de excedencia. La variable  $\Delta Q_{\text{int}}$  se obtiene directamente desde de la modelación subterránea.

### *Criterio 3 – Satisfacción de la demanda*

Para cada sector hidrogeológico, la simulación debe indicar una extracción mínima del 95% del caudal ingresado como demanda, considerando la oferta de agua como el caudal de los pozos que es factible de obtener según la modelación, el cual en términos prácticos para sustentar el acuífero en el tiempo, se estimó que la oferta de agua correspondería a la recarga de agua subterránea. Por lo tanto, la expresión para estimar este criterio está dada por la Ecuación 3:

$$Q_{\text{oferta}} > 95\% \cdot Q_{\text{demanda}} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde,

$Q_{\text{oferta}}$ : Caudal disponible para extracción producto de la recarga de agua subterránea.

$Q_{\text{demanda}}$ : Caudal de extracción subterránea simulado como consumo efectivo.

El cálculo de este criterio se obtiene directamente desde el modelo subterráneo, considerando  $Q_{\text{oferta}}$  como el volumen de recarga del acuífero, estipulada por la condición de borde *Recharge* de Modflow, y  $Q_{\text{demanda}}$  es la tasa de bombeo ingresada en la condición de borde *Well* de Modflow, la cual representa el consumo efectivo de agua subterránea.

### *Criterio 4 – Pozos secos*

Esta condición indica que en cada SHAC, no debe haber más de un 5% de pozos desconectados del nivel de agua subterránea, es decir colgados, sin posibilidad de extracción debido que el agua subterránea se encuentra por debajo de la profundidad de extracción del pozo. Por la naturaleza del criterio, esta condición aplica para pozos perforados en la formación acuífera libre, la cual en el caso de la cuenca del Limarí, es la condición preponderante de los pozos de bombeo. Entonces, para la estimación de este criterio, se considera la expresión expuesta por la Ecuación 4:

$$\frac{N_{ps}}{N_{pt}} < 5\% \quad \text{Ecuación 4}$$

donde,

$N_{ps}$ : Número de pozos secos

$N_{pt}$ : Número total de pozos.

Para establecer  $N_{ps}$ , se utilizó una combinación de técnicas de simulación y análisis de información geográfica, procediendo a identificar en cada SHAC, los pozos que su profundidad de extracción se encuentra sobre el nivel de agua subterránea simulada, y por lo tanto secos.  $N_{pt}$  es obtenido de la base de datos directa del modelo por SHAC, lo que en conjunto con  $N_{ps}$ , habilita las condiciones para estimar este criterio.

#### *Criterio 5 – Afectación a sectores abiertos*

La premisa de este criterio establece que ninguno de los sectores abiertos, en que se aumente la demanda, provoque condiciones desfavorables en áreas vecinas, que les signifique incumplir alguno de los criterios de sustentabilidad ya expuestos. Para abordar este criterio, se considera que el flujo lateral neto de un sector no debe verse afectado sobre un 5% del volumen total acumulado al último año de simulación. El cálculo de este criterio se desprende directamente del modelo subterráneo, por medio del análisis de las zonas de balance hídrico definidas en el dominio activo, que indican los flujos laterales entre SHACs y los volúmenes almacenados al último año de simulación.

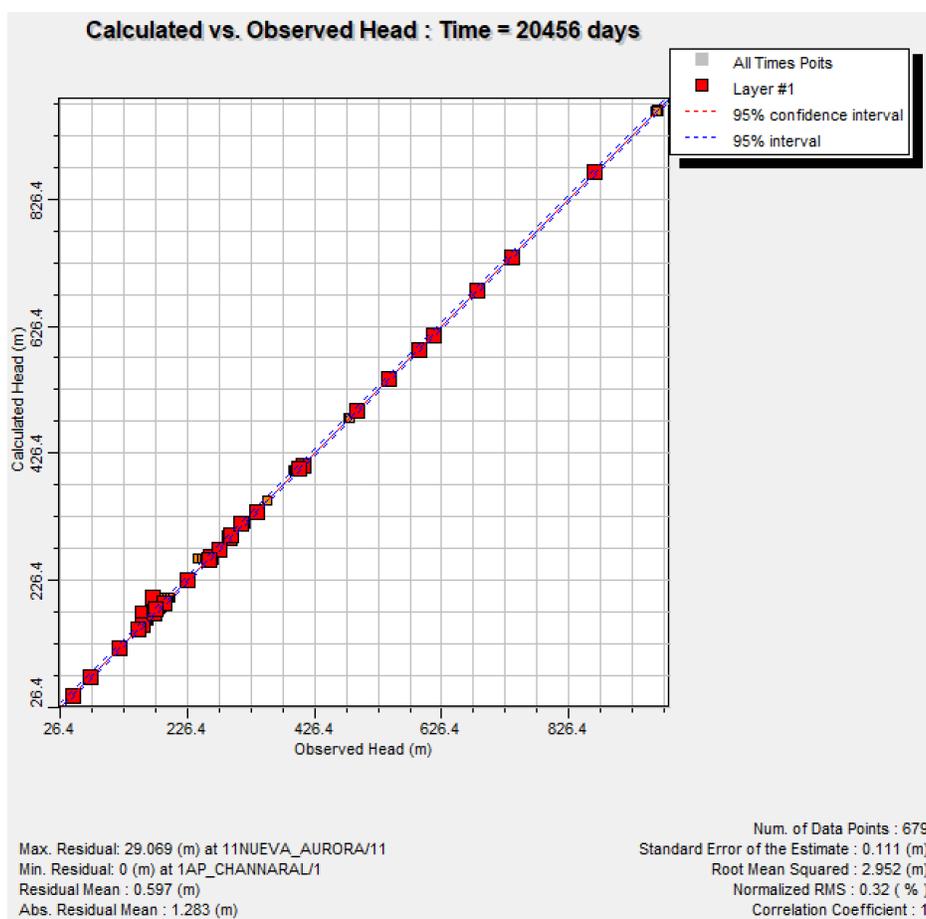
## **5. Resultados y discusión**

La construcción del modelo Limarí 2020 entregó una herramienta robusta y calibrada para análisis de flujo subterráneo, la cual permite estudiar las condiciones de los acuíferos, bajo diversos escenarios posibles de evaluar, e igualmente, realizar rutinas de cálculo como la estimación de criterios de sustentabilidad DGA. Así, en esta sección se presentan resultados respecto a la calibración del modelo, balances de agua a nivel de cuenca para el periodo histórico y última década de simulación, análisis de tenencias de los principales flujos del sistema subterráneo, y cambio de almacenamiento del acuífero. Luego se exponen resultados sobre la estimación de los criterios de sustentabilidad DGA para cada SHAC de la cuenca del Limarí, para diagnosticar el estado particular de cada uno respecto al agua subterránea. El modelo Limarí 2020 se entrega en formato digital, anexo al presente informe.

### **5.1. Estado de calibración modelo Limarí 2020**

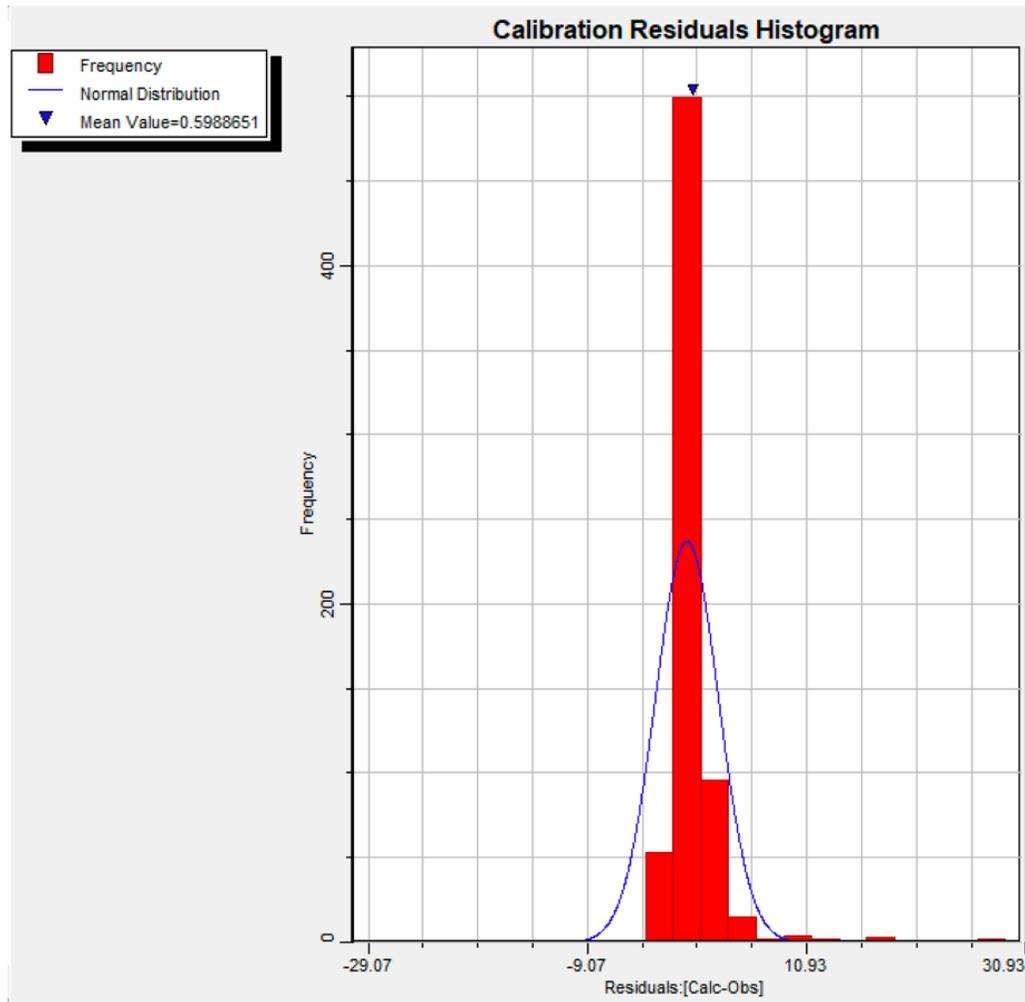
Los resultados de calibración fueron satisfactorios para cumplir con los criterios de ajuste del modelo. Al contrastar los niveles de agua subterránea simulados con el set de datos de calibración, se obtuvo un coeficiente de correlación  $r^2$  igual a 0,99, una distribución normal de residuos entre valores calculados y observados; un valor de la raíz del error cuadrático medio normalizado de 0,32%, un error residual promedio igual a 0,597 m, y errores en el balance de masa iguales a 0,05% para todos los tiempos simulados. Estas condiciones combinadas indican un ajuste adecuado del modelo para realizar simulaciones.

Por lo tanto, los estadígrafos obtenidos fueron satisfactorios, y al analizar los extremos de ajuste, el modelo localmente, a nivel de pozo, presenta un residuo absoluto promedio de 1,28 m, lo que indica que las simulaciones de niveles de agua subterránea están por lo general bajo o sobre ese rango en las áreas de menor ajuste del modelo, lo cual es aceptable. Se observa que el máximo residuo corresponde a un punto del pozo 11 Nueva Aurora, igual a 29.06 m, el cual ocurre al final del periodo de simulación, y que indicaría la necesidad de ajuste en dicha área respecto a las tasas de bombeo y recarga existentes. La Figura 15 muestra un gráfico 1:1 de niveles de agua subterránea simulados versus observados, ilustrando el ajuste y exponiendo los estadígrafos de calibración, mientras que la Figura 16 ilustra el histograma de residuos, donde se expone la distribución normal de estos.



**Figura 15. Gráfico 1:1 niveles de agua subterránea simulados versus observados, y estadígrafos de calibración.**

Esta figura proviene del software de simulación. Head es la elevación de agua subterránea, Calculated y Observed son los valores simulados y observados respectivamente, Normalized RMS equivale a la raíz del error cuadrático medio normalizado, Correlation Coefficient es el coeficiente de correlación  $r^2$ , Residual Mean es el error residual promedio, y Abs. Residual Mean corresponde al error residual absoluto promedio. Como se observa en la figura, los indicadores de calibración son aceptables y dentro de los rangos esperados para realizar simulaciones a nivel de cuenca.

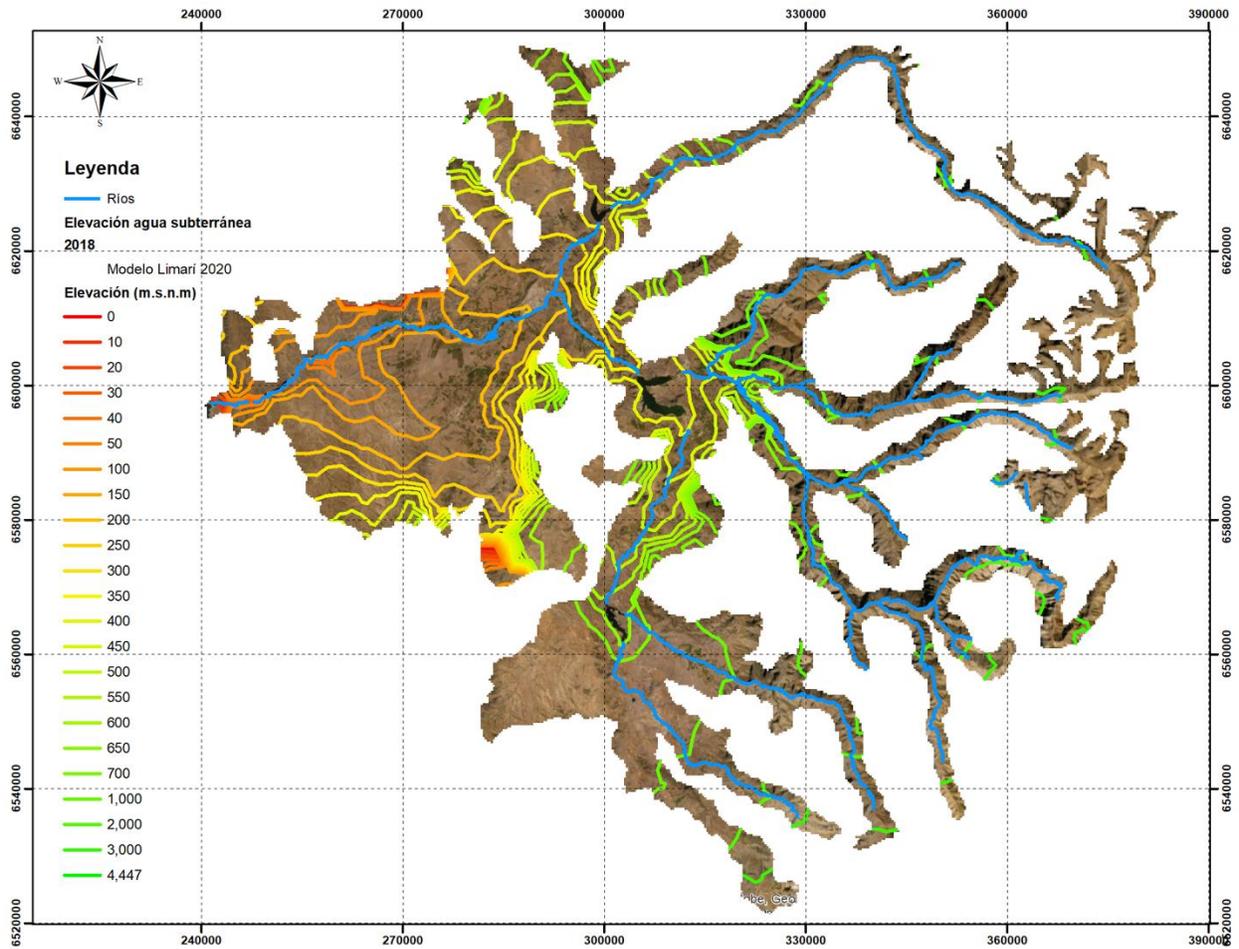


**Figura 16. Histograma de residuos entre niveles de agua subterránea simulados y observados.**

Esta figura proviene del software de simulación. Residuals corresponde a los residuos entre los datos de elevación de agua subterránea calculados y observados, Frequency es la frecuencia de ocurrencia del valor de residuos en el histograma, Mean Value es el valor medio de residuos, que es igual a 0,598 m, lo que implica que las simulaciones presentan errores bajos respecto a los datos observados.

## 5.2. Niveles de agua subterránea

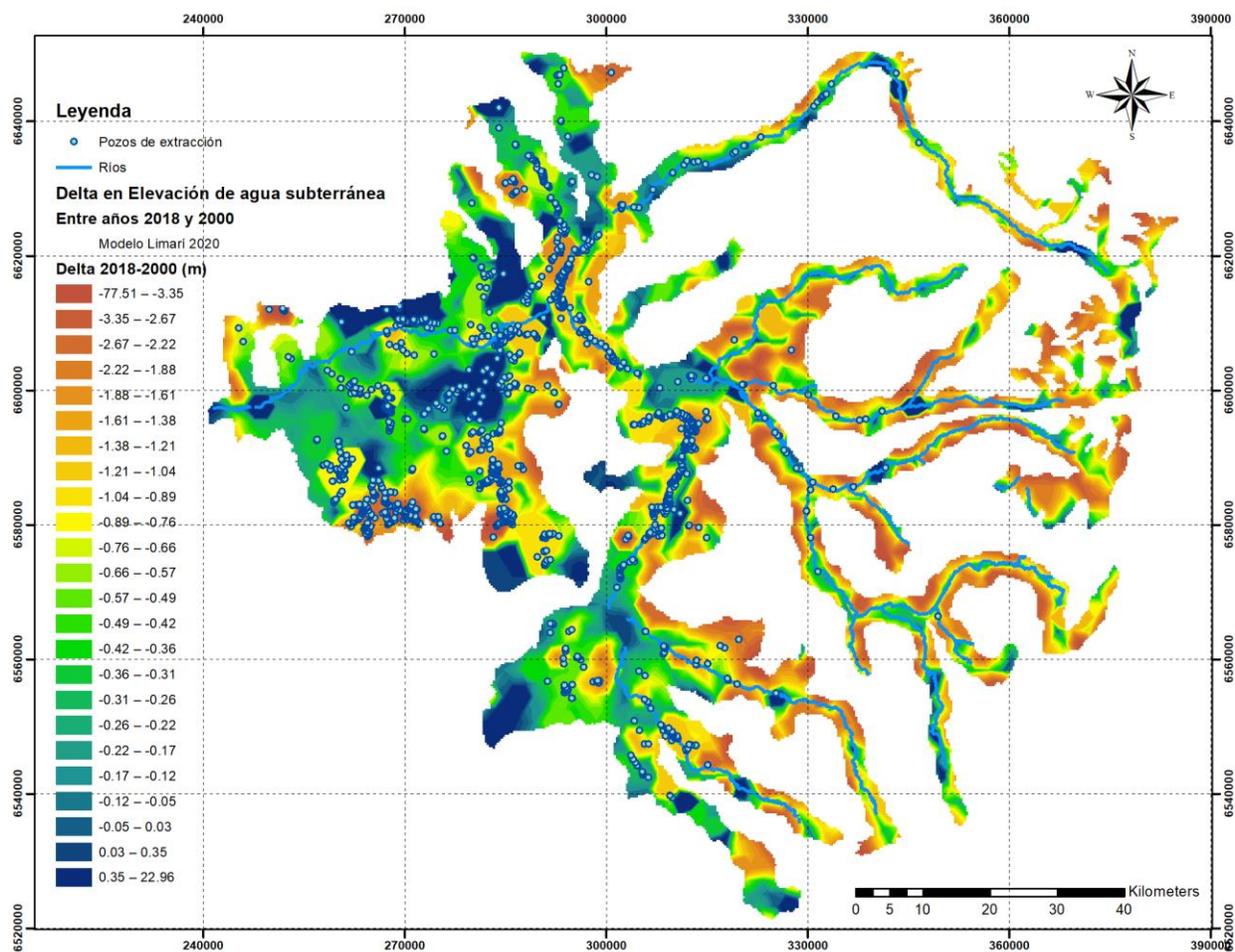
Los resultados de modelo indican que los niveles de agua subterránea han variado en el tiempo en el Sistema Limarí, experimentando bajas en elevación promedio de -0,9 m desde el año 2000, y -1,4 m desde el año 1980. Esto implica una condición de flujo transitoria, que significaría la presencia de un desbalance hídrico subterráneo. La Figura 17 ilustra un mapa de equipotenciales de elevación de agua subterránea regional para el año 2018, mientras que la Figura 18, muestra los deltas de elevación experimentados entre los años 2018 y 2000.



**Bondad de ajuste:**

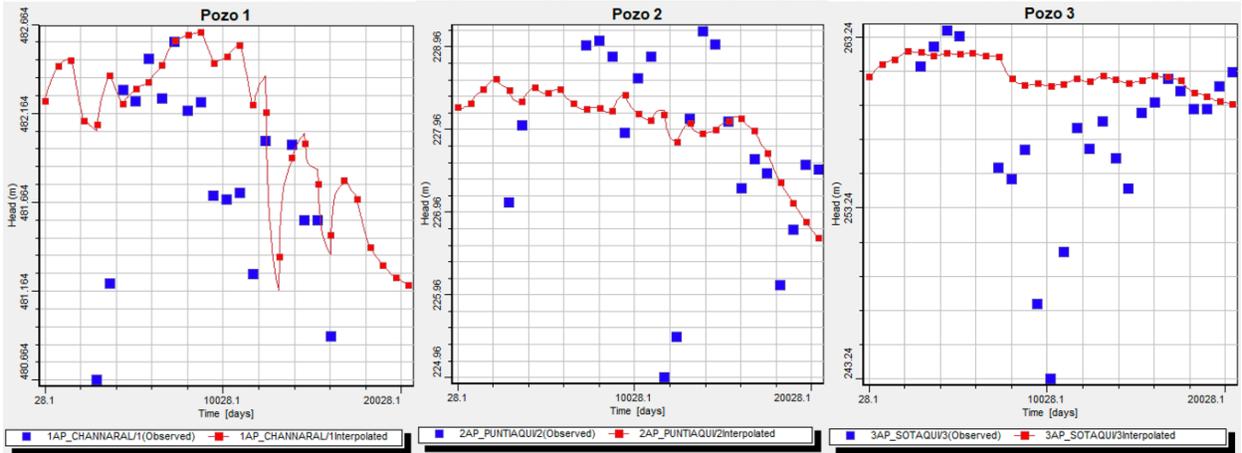
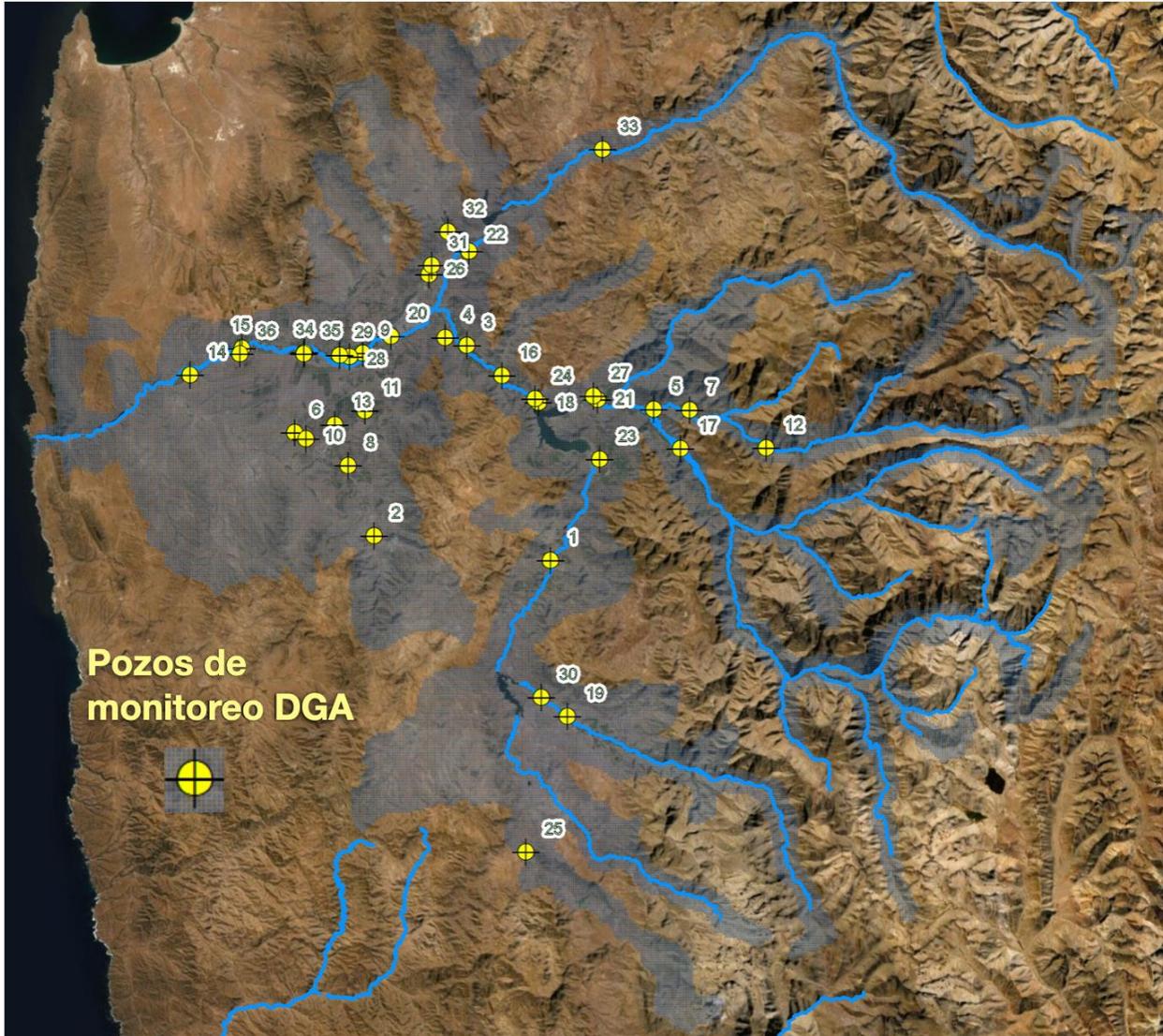
El modelo se ajusta a la realidad con un coeficiente de correlación  $r^2$  entre valores observados y simulados en los pozos de monitoreo igual a 0,99, presenta una distribución normal de residuos entre valores calculados y observados, con un valor de la raíz del error cuadrático medio normalizado de 0,32%, un error residual promedio igual a 0,597 m, y errores en el balance de masa iguales a 0,01% en cada paso de tiempo de la simulación.

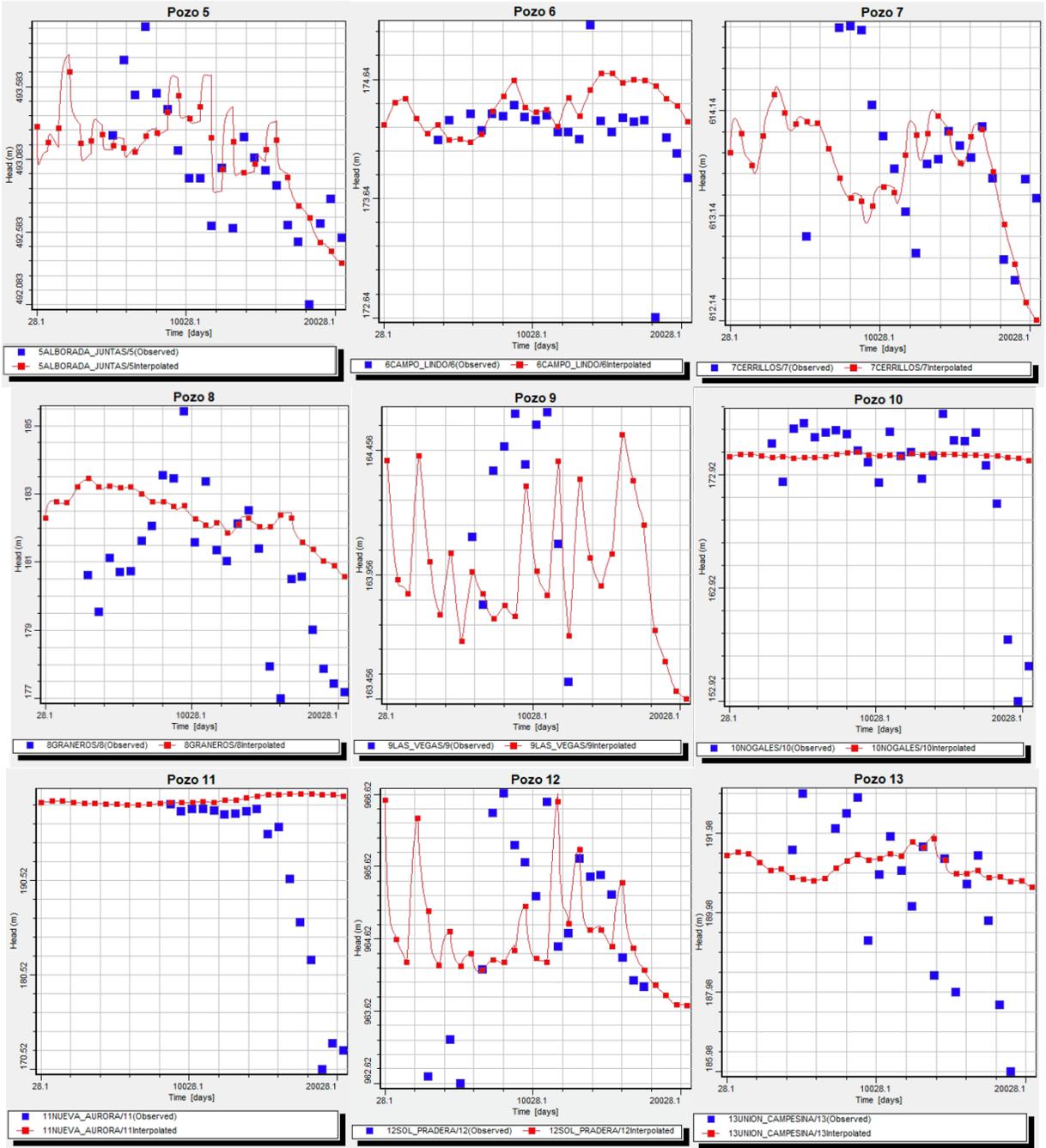
**Figura 17. Elevación de agua subterránea regional en el Sistema Limarí año 2018.**

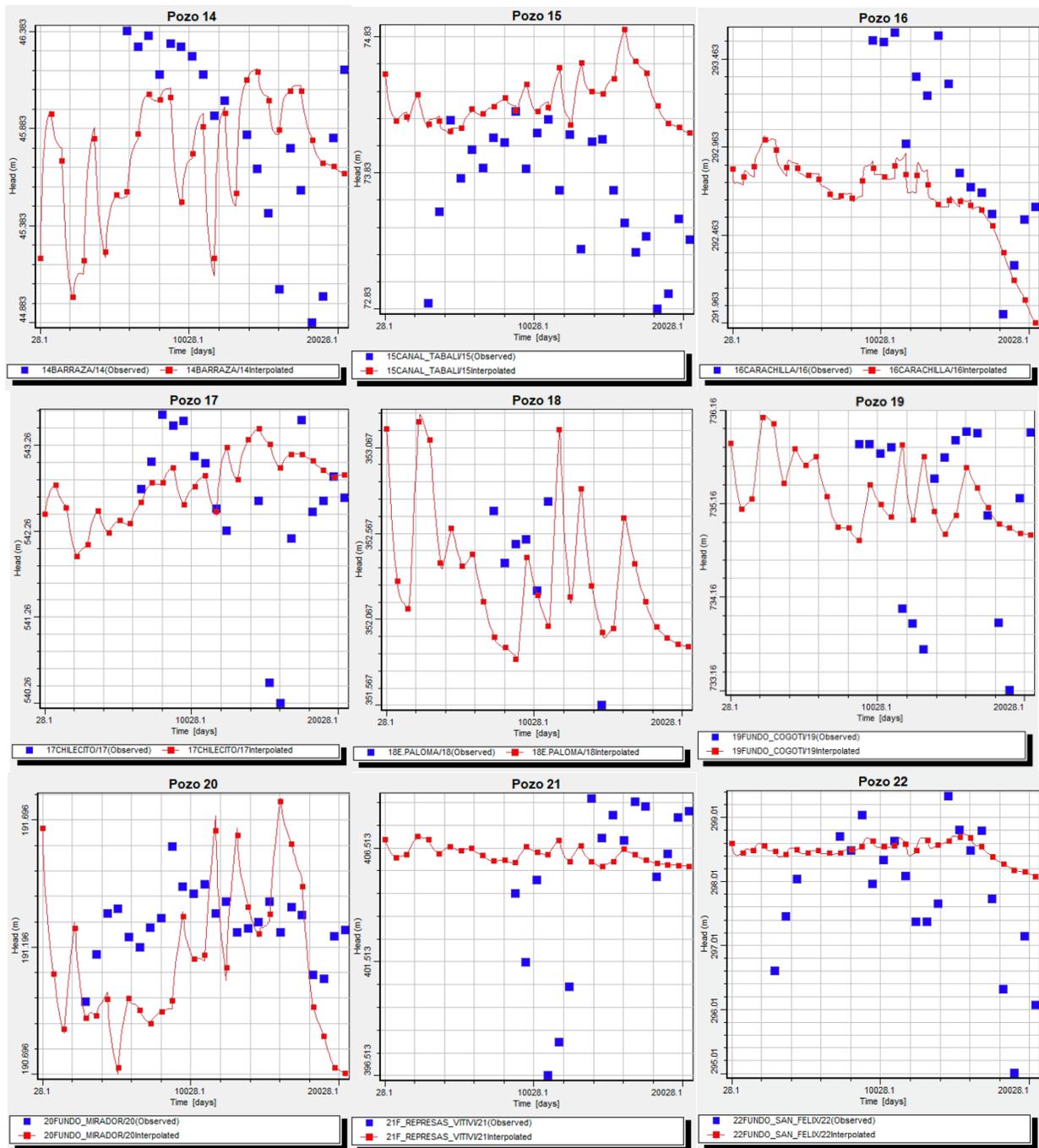


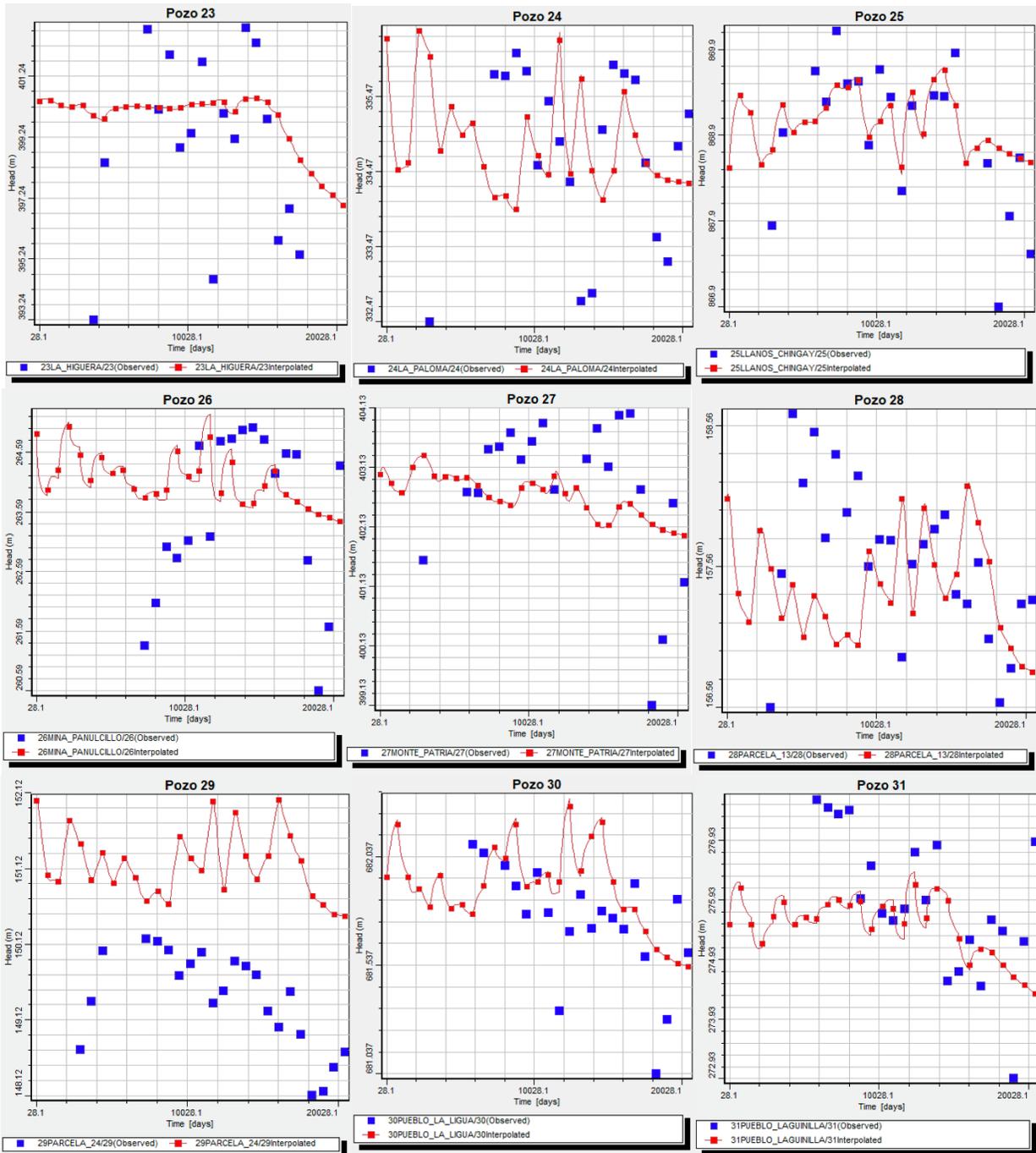
**Figura 18. Delta en Elevación de agua subterránea entre años 2018 y 2000, en metros.**

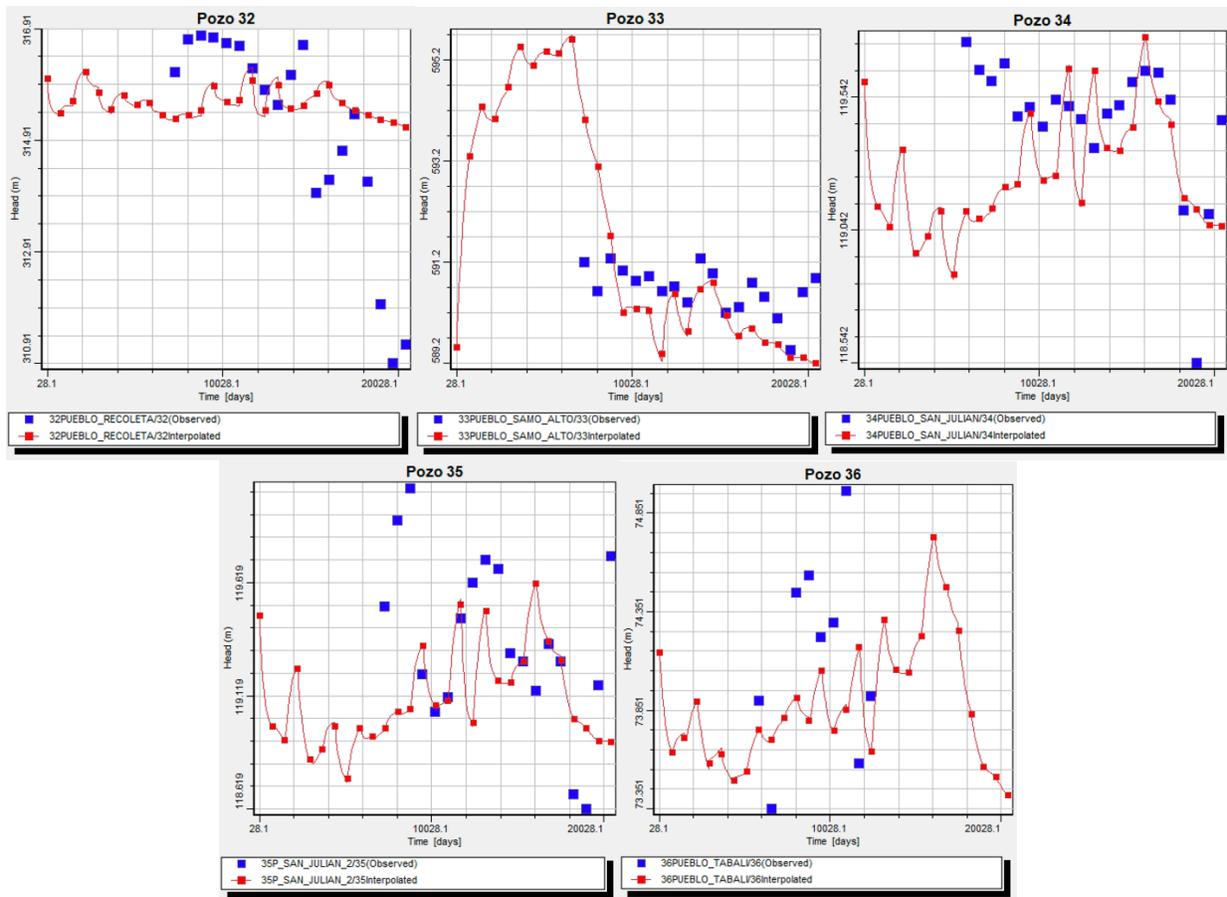
Por otro lado, al analizar condiciones locales del acuífero, a nivel de pozo de monitoreo, la simulación mostró que los descensos experimentados en la elevación de agua subterránea comienzan a ocurrir desde el año 2005, alcanzando valores entre -1 y -10 m en general. No obstante, en la mayoría de los pozos de monitoreo, se observan periodos cíclicos de aumento y baja en la elevación de agua subterránea, los cuales duran entre 5 y 10 años. Las condiciones actuales sugieren que el acuífero del Sistema Limarí se encuentra en un ciclo de baja elevación, con indicios de recuperación a partir del año 2016. Lo anterior es posible evidenciarlo en hidrogramas para los pozos de monitoreo, donde se exponen las variaciones temporales en la elevación de agua subterránea. Lo anterior se ilustra en la Figuras 19, donde se despliegan la ubicación e identificación de cada pozo, y los hidrogramas de agua subterránea para los pozos de monitoreo respectivamente, exhibiendo sus datos observados y simulados, para referencia de ajuste de la modelación. Se menciona que el pozo de observación 4 no se despliega, por presentar sólo y dato medido en el periodo de simulación. También se indica que la Figura 19 es extensa, y se despliega por en hojas continuas.











**Figura 19. Hidrogramas de agua subterránea en el Sistema Limarí.**

Como fue posible apreciar en los hidrogramas de agua subterránea, si bien, el modelo presenta errores en la estimación local del agua subterránea, estos son menores de acuerdo a su calibración, logrando replicar la temporalidad de los niveles de agua en el acuífero, en cuanto a la frecuencia y amplitud de las variaciones en la elevación de agua subterránea, lo que significa un aspecto destacable de la herramienta de modelación del Sistema Limarí.

### 5.3. Balance hídrico subterráneo

Con los resultados del modelo, se construyeron balances hídricos subterráneos a nivel de cuenca histórico y para la última década, junto con análisis particulares a nivel de cada SHAC. Las simulaciones indican que a escala histórica 1964 a 2018, el acuífero del Sistema Limarí se encuentra en un desbalance mínimo, siendo la diferencia entre las entradas y salidas igual a  $-0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que en la última década, 2008 a 2018, las condiciones son más desfavorables, puesto que el desbalance se expresa mayor, del orden de  $-0,35 \text{ m}^3/\text{s}$  entre las entradas y salidas de agua subterránea. Las razones de esto radican en que la recarga ha disminuido un 20% y las extracciones han aumentado un 52% en la última década respecto al periodo histórico, lo que ha

significado un descenso anual en el volumen almacenado considerable, presentando una tendencia lineal igual a 5068 m<sup>3</sup> de desembalse por año, desde 1964 a 2018.

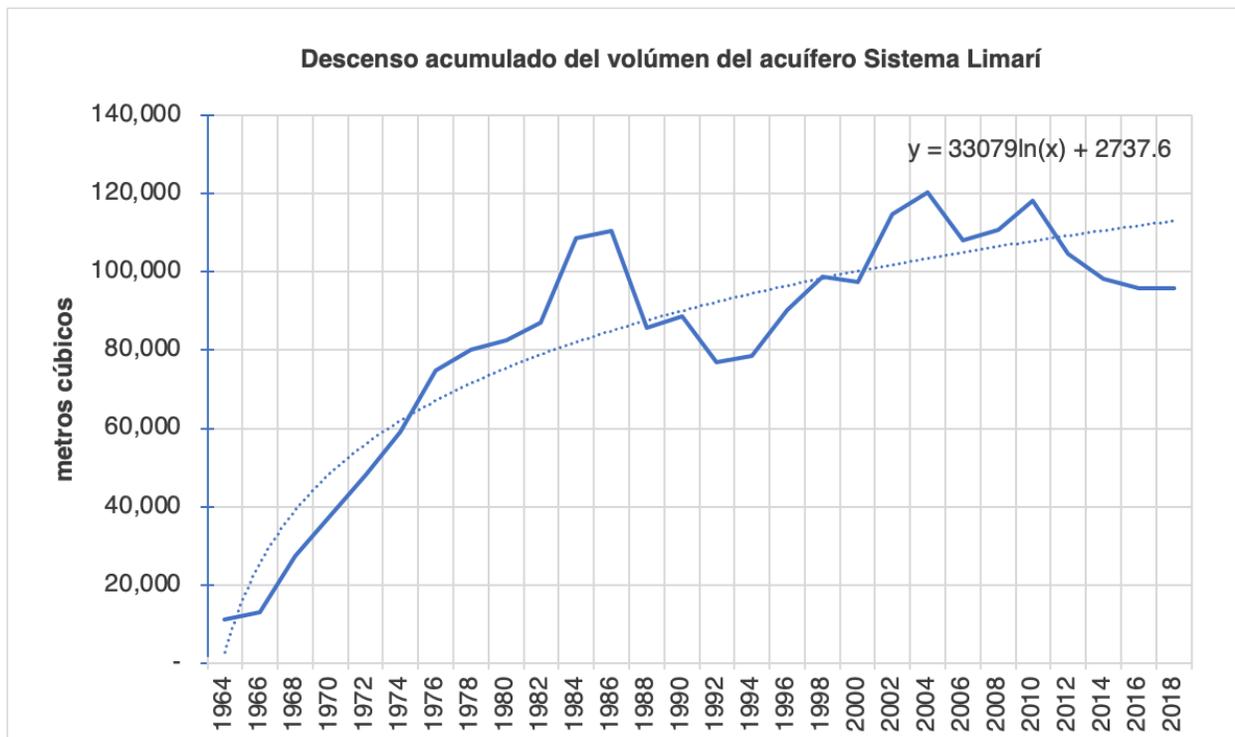
Producto de lo anterior, como ya se mencionó, los niveles de agua subterránea han disminuido en el Sistema Limarí, y junto a esto, los ríos han comenzado a infiltrar más hacia al acuífero, mermando su caudal en -0,14 m<sup>3</sup>/s en la última década respecto al periodo histórico. Estas situaciones indican que el Sistema Limarí se encuentra en una situación de riesgo, que amenaza la sustentabilidad de las aguas superficiales y subterráneas.

Al analizar la situación por SHAC en el Sistema Limarí, las simulaciones indican que la mayoría del tiempo, las áreas experimentan desembalces de hasta -213 m<sup>3</sup>/mes, mientras que durante los periodos de alta recarga, las tasas de ganancia alcanzan los +3 m<sup>3</sup>/mes, promediando un cambio en almacenamiento de -38 m<sup>3</sup>/mes. Los SHACs que experimentan las mayores tasas desembalse corresponden a Río Grande, Río Rapel, Río Hurtado, Río Ponio y Río Cogotí, abarcando el 80% de los movimientos de agua subterránea en el Sistema Limarí.

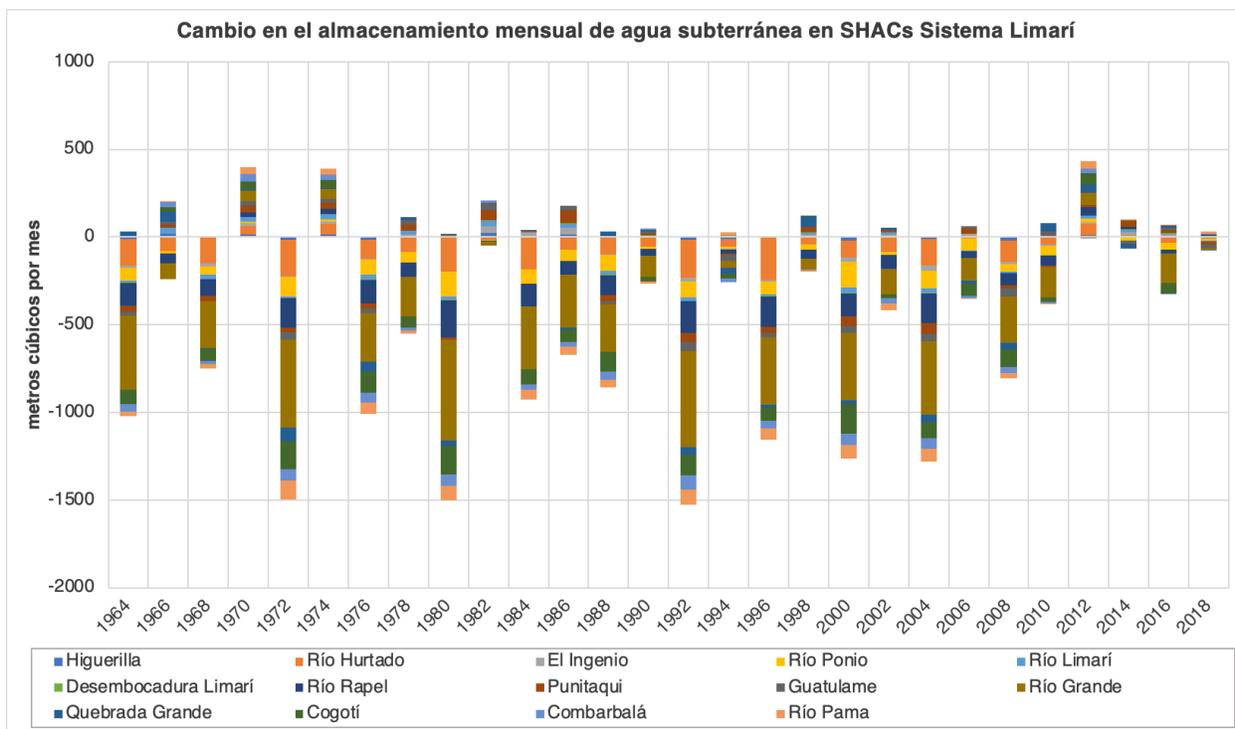
Para un despliegue en detalle, la Tabla 2 expone un cuadro resumen del balance hídrico subterráneo histórico y para la última década en el Sistema Limarí, mientras la Figura 20 ilustra el descenso acumulado en el volumen del acuífero durante el periodo 1964 al 2018, y la Figura 21 ilustra el cambio en almacenamiento de agua subterránea para cada SHACs Sistema Limarí durante 1964 al 2018.

**Tabla 2. Balance hídrico regional Sistema Limarí.**

Balance hídrico promedio (m <sup>3</sup> /s)		Histórico 1964-2018	Década 2008-2018	Delta
Entrada	Recarga	1.61	1.30	-0.31
	Recarga desde ríos	1.86	2.00	0.14
	Flujo desde el mar	0.04	0.04	0.00
	Flujo desde embalses	0.01	0.01	0.00
	Flujo hacia almacenamiento	0.59	0.61	0.02
	<b>Entrada Total</b>	<b>4.11</b>	<b>3.96</b>	<b>-0.15</b>
Salidas	Extracciones pozos	0.40	0.61	0.21
	Afloramientos a ríos	3.41	3.42	0.01
	Salida al mar	0.04	0.04	0.00
	Descarga a embalses	0.01	0.01	0.00
	Descarga desde almacenamiento	0.28	0.23	-0.05
	<b>Salida total</b>	<b>4.14</b>	<b>4.32</b>	<b>0.17</b>
<b>Balance Entradas - Salidas</b>		<b>-0.04</b>	<b>-0.35</b>	<b>-0.32</b>



**Figura 20. Descenso acumulado en volumen del acuífero Sistema Limarí periodo 1964 a 2018.**



**Figura 21. Cambio en almacenamiento de agua subterránea en SHACs Sistema Limarí.**

#### 5.4. Cálculo de criterios de sustentabilidad DGA

Ramos (2020), haciendo uso del modelo base y extendiendo sus series de tiempo hacia presente, examinó los procedimientos de cálculo de los criterios de sustentabilidad agua subterránea en la cuenca del río Limarí, para lo cual en conjunto con DGA, se estimaron dichos criterios para cada SHAC de la presente área de estudio, obteniéndose como resultado situaciones de baja sustentabilidad en los SHACs del Sistema Limarí. Los cálculos, al ser realizados con el modelo base, requieren de actualizaciones usando el Modelo Limarí 2020, pero entregan precedentes para entender la particularidad de cada SHAC, y las necesidades de acción en cada uno de ellos para preservar la sustentabilidad del agua subterránea en el Sistema Limarí. En base a lo anterior, los resultados del cálculo de los criterios de sustentabilidad se presenta en formato estilo “cumple” o “no cumple” con criterio, de acuerdo a la siguiente Figura 22.

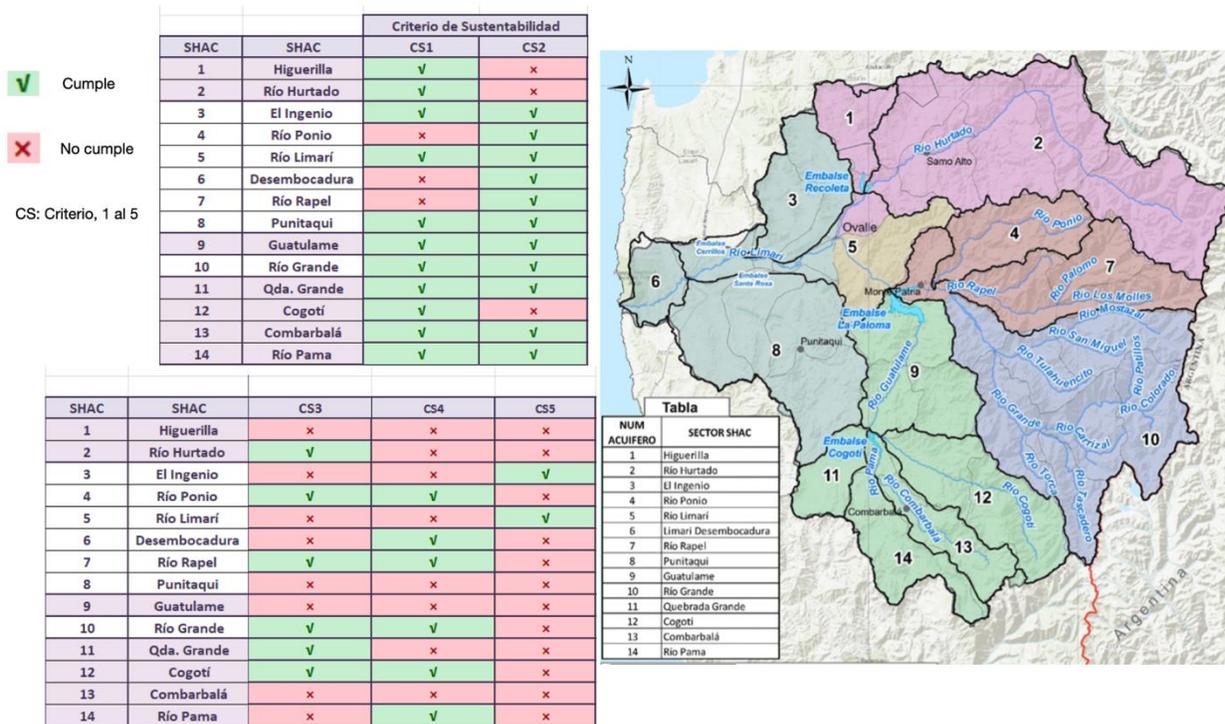


Figura 22. Resultados cálculo de criterios de sustentabilidad DGA para aguas subterráneas en los SHACs del Sistema Limarí.

Adaptado de Ramos (2020).

## 6. Comentarios Finales

La situación del agua subterránea en el Sistema Limarí presenta un desbalance de  $-0,34 \text{ m}^3/\text{s}$  desde los últimos 10 años, producto de que la recarga de agua subterránea ha disminuido un 20%, y las extracciones han aumentado un 52%, respecto al periodo histórico 1964 a 2018. Esto se debe a la tendencia negativa de precipitaciones y escorrentía en la cuenca, que implica menos recarga hacia el acuífero, y el aumento del número de extracciones en el tiempo, que implica una tendencia de desembalse equivalente a  $5068 \text{ m}^3$  por año. Estas condiciones revelan que el Sistema Limarí se encuentra en riesgo, con pérdidas en la sustentabilidad de sus aguas superficiales y subterráneas.

El modelo presenta errores locales en el nivel de agua subterránea simulado, que pueden ser de alta magnitud, lo cual indica la necesidad de un refinamiento en la calibración del modelo en ciertos lugares donde se obtuvo una distribución plana en la elevación de agua subterránea simulada. No obstante, el modelo simula la hidrogeología en rangos aceptables a escala regional, con una distribución normal de residuos entre datos observados y simulados, junto con estadígrafos que demuestran un buen ajuste. Por otro lado, existe incertidumbre sobre tasas de recarga, recomendándose mejorar las zonas de recarga con series de tiempo que provengan de un modelo superficial, calibrado en conjunto con el actual modelo subterráneo.

Al año 2018, los criterios de sustentabilidad DGA indican que el acuífero está en condiciones desfavorables para sostener la demanda actual, sentando incertidumbres sobre la seguridad hídrica hacia el futuro en el Sistema Limarí. En este escenario, algunas acciones posibles de considerar por DGA serían:

- 1) Evaluar declaración de nuevas zonas de restricción/prohibición en SHACs.
- 2) Crear y fortalecer comunidades de agua subterránea.
- 3) Analizar aplicación de artículo 62 en SHACs con mayor desbalance.
- 4) Fortalecer la gestión integrada del agua.
- 5) Estudiar los efectos del cambio climático en el futuro de los recursos hídricos del Sistema Limarí, para orientar las acciones de desarrollo hídrico en función de las ofertas de agua proyectadas, y planificaciones de uso.

Como recomendaciones a futuro, sería interesante complementar el dominio del Modelo hidrogeológico detrítico, con potenciales acuíferos fracturados que pueden estar vinculados al sistema de falla Vicuña, o a los sectores de alteración hidrotermal presentes en las secuencias sedimentarias Mesozoicas.

Finalmente, se destaca que mediante el uso de la herramienta de modelación hidrogeológica generada, fue posible caracterizar y diagnosticar el estado del agua subterránea en el sistema

Limarí, proporcionando información útil y una herramienta de cálculo de alta precisión, para asistir la toma de decisiones que promuevan el desarrollo hídrico sostenible del área de estudio.

## 7. Agradecimientos

A Natalia Ramos, quien actuó en el desarrollo y procesamiento de resultados del modelo DGA Limarí 2020, como parte de su trabajo de investigación, para optar al Título de Ingeniera Ambiental de la Universidad de la Serena. A Guillermo Tapia, Cartógrafo DGA, por desarrollar los mapas presentados en las Figuras 1 a 4, y por su constante asistencia. A la División de Estudios y Planificación DGA, por proveer los medios necesarios para desarrollar el estudio. A la Dirección Regional de Coquimbo, por promover el desarrollo de esta iniciativa y proporcionar información clave para su desarrollo. Al Departamento de Administración de Recursos Hídricos DGA, por sus aportes constructivos para mejorar aspectos de modelación, que permitieron lograr el estado actual del modelo Limarí 2020, y por su guía en los procedimientos DGA de cálculo para los criterios de sustentabilidad de agua subterránea. A CORFO, la Corporación de Fomento de la Producción, por su colaboración en el traspaso a DGA del modelo base, producto de su estudio 2015. A GCF Ingenieros por su guía y apoyo en el entendimiento del modelo base, entrega de versiones mejoradas, y aporte de herramientas de modelación WEAP, desarrolladas en la cuenca del Limarí, las que fueron fundamentales para el estudio. A Sernageomin, por facilitar información actualizada de la geología de la cuenca del Limarí, que formó parte de la definición del dominio del modelo Limarí 2020. Finalmente a la audiencia, que por medio de este Informe Técnico, pueda hacer uso de la información y herramienta de modelación generada, para progresar en el desarrollo hídrico del Sistema Limarí.

## 8. Referencias

- Charrier R., Pinto L., Rodriguez M. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. Geological Society Special Publication, 21-114
- CORFO. 2015. Estudio geofísico e hidrogeológico en la cuenca del río Limarí. Innova Chile, Subdirección de Entorno para la Innovación, Chile. Realizado por GCF Ingenieros.
- Decreto Supremo Nº 203. 2013. Aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- DGA. 2018a. Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Norte y Centro, SIT; No. 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica, Pontificia Universidad Católica de Chile.

- DGA. 2019b. Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral. SIT; No. 441. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Realizado por Universidad de Chile.
- DGA. 2019c. Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos, SIT N° 445, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DICTUC S.A. & SEI.
- DGA. 2004. Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Limarí. SIT; No. 104. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos; realizado por Cade-Idepe Consultores en Ingeniería.
- DGA. 2014. Evaluación de los caudales ecológicos en cuencas de la IV, V y VI región: informe final borrador. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Geohidrología Consultores Ltda.
- DGA. 2008. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Limarí: informe técnico. SDT; No. 268. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- DGA. 2016. Impacto aplicación caudal ecológico mínimo retroactivo en cuencas de la IV, V y VI región. SIT; No. 392. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Realizado por: Geohidrología Consultores Ltda.
- DGA. 2008. Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos. SIT; No. 156. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos; Edición General: Luis Alberto Moreno Rubio.
- DGA. 2018b. Pronóstico de caudales de deshielo: Temporada de riego 2018 – 2019. SDT; No. 412. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Hidrología.
- DGA. 2019a. Pronóstico de caudales de deshielo: temporada de riego 2019 – 2020. SDT; No. 419. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Hidrología.
- Ramos. 2020. Análisis actualizado de la disponibilidad hídrica subterránea en la cuenca del río Limarí. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de la Serena, Facultad de Ingeniería, Departamento de Minas.

- Rivano S., Sepúlveda, P. 1986. Hoja Illapel Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica Chile N° 69.
- Sernageomin. 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- Sernageomin. 2019. Geometría de la cuenca del río Limarí, región de Coquimbo Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-19-78, 118 p. Santiago, Chile. Autores: López, L.; Donoso, C.; Huerta, S.; Cifuentes, J.L.; Fuentes, F.
- SEA. 2012. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Editor: Servicio de Evaluación Ambiental, SEA ISBN: 978-956-9076-12-1.
- Thomas H. 1967. Geología de la Hoja Ovalle Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas-Chile. Carta Geológica. Boletín N° 23.
- U.S. Geological Service. 1996. User's Documentation for MODFLOW-96, and update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference groundwater Flow Model. Open-File Report 96-485.
- Waterloo Hydrogeologic. 2011. Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual. Integrated Conceptual & Numerical Groundwater Modeling Software.