



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

# **ESTUDIO ACUÍFERO DE CALAMA SECTOR MEDIO DEL RÍO LOA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR:  
MATRAZ CONSULTORES ASOCIADOS S.A.  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA  
S.I.T. N°295**

**Santiago, Diciembre 2012**



## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Abogada Sra. Loreto Silva

Director General de Aguas  
Abogado Sr. Francisco Echeverría

Jefe de División de Estudios y Planificación  
Ingeniero Civil Sr. Adrian Lillo

Inspector Fiscal  
Ingeniero Civil Sra. Andrea Osses

Inspector Fiscal Subrogante  
Ingeniero Civil Sr. Juan Carlos Salgado

### CONSORCIO MATRAZ CONSULTORES – UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Director de Proyecto - España  
PhD Ingeniero Civil Xavier Sanchez-Vila

Director de Proyecto - Chile  
Mcs. Hidrogeólogo Nicolás Iturra Jáuregui

#### Equipo de Profesionales:

Hidrogeólogo Pau Balart Nolla  
Mcs. Ingeniero Geólogo Albert Brangari  
PhD Ingeniero Civil Daniel Fernández  
Hidrogeólogo Genís Freixas  
Ingeniero Ambiental Christopher Henri  
Hidrogeólogo Narcís Martí Antón  
Geólogo Estanislao Pujades  
Geóloga Violeta Velasco



# INDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>4</b>
<b>1. RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>5</b>
1.1 ANÁLISIS DE FORTALEZAS.....	9
1.2 ANÁLISIS DE DEBILIDADES .....	10
1.3 RECOMENDACIONES .....	11
1.4 INTRODUCCIÓN.....	14
1.5 OBJETIVOS Y ALCANCE .....	16
1.6 METODOLOGÍA.....	16
1.6.1 <i>Recopilación y Análisis de Antecedentes</i> .....	17
1.6.2 <i>Fase de Campo. Prospección geofísica</i> .....	17
1.6.3 <i>Caracterización Geológica, Hidrológica e Hidrogeológica</i> .....	17
1.6.4 <i>Desarrollo del modelo conceptual</i> .....	17
1.6.5 <i>Proyecto SIG</i> .....	19
1.6.6 <i>Red básica de monitoreo</i> .....	20
1.6.7 <i>Desarrollo del modelo numérico</i> .....	20

## **Agradecimientos**

Quisieramos agradecer a quienes ayudaron en la etapa de recopilación, digitalización y compilación de la información. Especialmente a Gianinna Leyton por su colaboración y apoyo en las etapas iniciales.

Al equipo formado de DGA por Adrián Lillo, Andrea Osses y Juan Carlos Salgado por haber facilitado la ejecución y coordinación durante toda la evolución del proyecto.

Agradecimientos especiales a Martin Brown, Superintendente de Medio Ambiente de Minera El Tesoro, por la disposición a aportar y colaborar en la construcción de un modelo integrado para la cuenca. Así como a Juan Pablo Schuster de Montgomery & Associates por facilitarnos el acceso a la información solicitada.

Nuestros agradecimientos a Jorge Jemio, y a Gladys Lorca Directora de Exploración Distrital e Hidrogeología GRMDD de Codelco, por el suministro de información hidrogeológica sobre el Tranque Talabre.

# 1. Resumen Ejecutivo

La Dirección General de Aguas - MOP resolvió por licitación pública (No de Resolución 1962 de 11 de julio de 2012) adjudicar a Matraz Consultores Asociados Limitada, en consorcio con la Universitat Politècnica de Catalunya, el proyecto denominado "MODELACION ACUIFERO DE CALAMA CUENCA DEL RIO LOA".

La zona de estudio ha sido objeto de un número importante de estudios que han abordado ámbitos parciales del dominio y con objetivos diversos. El estudio que se presenta tiene como tarea principal la integración de toda la información hidrogeológica disponible, con el objetivo de elaborar un modelo conceptual del funcionamiento del sistema acuífero de Calama. Para conseguir esto, además de compilar un vasto volumen de información, ha sido necesario levantar nueva información en zonas en las que se disponía de un conocimiento prácticamente nulo del sistema acuífero. Esto se ha logrado mediante una campaña gravimétrica, ejecutada durante el desarrollo de este proyecto.

El trabajo realizado permite reunir en un único trabajo, el estado del conocimiento hidrogeológico para la cuenca de Calama. De esta forma, el presente estudio se transforma en una herramienta de consulta y análisis para abordar los distintos planes de seguimiento, alerta, monitoreo y control de las extracciones existentes, con una perspectiva global del sistema de recursos hídricos de Calama.

Las conclusiones a las que se han podido llegar en el presente trabajo se resumen a continuación:

- La zona geográfica dónde se ubica el presente estudio se sitúa en la cabecera del río Loa y engloba las poblaciones de Calama y San Francisco de Chiu Chiu. Los principales ríos que discurren por el contorno son el Loa, el San Salvador y el río Salado. Dentro del contorno se localizan los salares de Talabre, del Indio, Rudolph y Brinkerhoff.
- En la zona de estudio dominan tres subtipos climáticos que corresponden al clima desértico interior (cotas superiores a 1000 m.s.n.m.), el clima desértico marginal de altura (> 2000 m.s.n.m.) y clima de estepa de altura (> 3000 m.s.n.m.).
- Desde el punto de vista geológico, la cuenca engloba una serie de materiales sedimentarios que han rellenado la cuenca del río Loa durante los últimos 50 millones de años. Estos materiales presentan un espesor variable con un valor medio entorno los 300 m, y están dispuestos sobre un basamento de rocas ígneas y metamórficas, que también componen las principales cumbres de la zona.

- La gran cuenca de Calama está fuertemente controlada por el régimen tectónico y sistema estructural. De esta forma, el fondo rocoso de la cuenca se compone de un basamento impermeable de bloques hundidos y alzados limitados por fallas. Lo anterior provoca la presencia de zonas con un relleno sedimentario espacialmente variable.
- Las principales unidades hidrogeológicas presentes en la zona corresponden a la UH-1, formada por depósitos de cobertura aluvio-evaporíticos y no saturados; la UH-2 que engloban los materiales calcáreos del acuífero superior del Loa; las UH-3 y UH-4 que conjuntamente conforman el acuitardo limo-arcilloso; la UH-5 que conforma el acuífero inferior de Calama compuesto por gravas y conglomerados y la UH-6 compuesta por el basamento ígneo-metamórfico. De este modo se pueden suponer la existencia de dos unidades acuíferas principales: el acuífero superior, de carácter libre, y el acuífero inferior, de carácter semiconfinado. Ambos acuíferos se encuentran separados por un acuitardo en la gran mayoría del área modelada.
- Las conductividades hidráulicas para el acuífero superior tienen un rango amplio, que está en función del grado de porosidad secundaria y van del orden de  $1 \times 10^{+02}$  a  $1 \times 10^{-02}$  m/d. El acuitardo tiene unos valores siempre inferiores a  $1 \times 10^{-03}$  -  $1 \times 10^{-06}$  m/d, y el acuífero profundo tiene un rango promedio de  $1 \times 10^{+01}$  a  $1 \times 10^{-03}$  m/d.
- Los coeficientes de almacenamiento estimados para el acuífero superior tienen un rango de valores de  $1 \times 10^{-4}$  a  $2 \times 10^{-2}$ , mientras que el acuífero inferior oscilarían entre los  $3 \times 10^{-5}$  a  $3 \times 10^{-1}$ , valores representativos de su carácter semiconfinado.
- Se ha observado a través del análisis hidroquímico que la recarga de la gran cuenca de Calama proviene subterráneamente desde dos fuentes principales: la más importante provendría de la cuenca del río Salado con una marcada huella clorurada sódica con influencias geotermales, y otra fuente importante provendría desde aguas arriba del embalse Conchi con una marca de aguas tipo cloruradas más magnésico-cálcicas
- En términos generales, la dirección principal de flujo subterráneo para ambos acuíferos es de norte-este a sur-oeste, con salida subterránea por el borde oeste de la cuenca. Los gradientes hidráulicos oscilan entre 0.2%-1.0% para el acuífero superior y entre 0.1%-1.5% para el inferior.
- En la parte central de la cuenca, la dirección principal de flujo se re-orienta en sentido norte-sur, bordeando una zona de menor velocidad de flujo en el entorno



del Salar Del Indio, al norte de la ciudad de Calama. Inmediatamente atravesada la zona del Salar de Talabre la dirección de flujo principal se vuelve a reorientar en sentido este-oeste hasta la salida de la cuenca en el borde oeste.

- Los mapas de conductividad eléctrica (CE) confirman la presencia de una zona de menor velocidad de flujo o mayor tiempo de residencia en la zona en torno al Salar Del Indio, al norte de la ciudad de Calama. En esta zona, se registran valores de CE elevados ( $>25.000$  uS/cm) en ambos acuíferos.
- La orientación o lineamiento dibujado por la quebrada de la vertiente Ojos de Opache tiene el mismo rumbo que el sentido de flujo del agua subterránea del acuífero superior. De esta forma, la geomorfología reciente sustenta la tesis de que el acuífero superior se drena por completo a través de una serie de vertientes, de las cuales Ojos de Opache es la principal.
- En el caso del acuífero inferior, dentro del dominio modelado no se observan afloramientos naturales y por lo tanto se estima que el flujo sale subterráneamente fuera del dominio modelado hacia el oeste.
- Las entradas al sistema se han evaluado en el rango 1200 l/s a 2000 l/s. El aporte principal al sistema procede de la entrada de agua por los contornos norte y este (75% del total de entradas). El resto de elementos de recarga incluyen la infiltración del Tranque Talabre, precipitación, los excedentes de riego y las pérdidas de redes urbanas y mineras.
- Las salidas del sistema oscilarían entre 1200 l/s y 2300 l/s. Las descargas del acuífero superior al río Loa y las descargas de las vertientes suponen la salida natural más importante (70% del total de salidas), mientras que las extracciones por pozos suponen entre el 10% - 15% de las descargas totales. El sistema presenta también una descarga subterránea a través del contorno oeste del modelo, y pérdidas por evaporación directa.
- El balance neto del sistema es deficitario, con una diferencia que oscilaría en el rango de 0 l/s y 300 l/s. La consecuencia directa de esta situación deficitaria es el descenso progresivo de los niveles piezométricos, especialmente concentrado en las zonas de extracción.
- Toda variación en el nivel del río Loa afectará directamente el gradiente con el acuífero superior y por lo tanto afectará la descarga desde el acuífero al río, afectando el balance global. A su vez, una variación en la descarga del acuífero al río afectará directamente la descarga registrada en las vertientes.

- El análisis histórico de caudales superficiales confirma la estrecha relación entre el río Loa y el acuífero superior, y la hipótesis presentada por Ingeorec 2005 que establece que en general es el acuífero superior quien aporta recursos hídricos al río Loa. En este trabajo se ha determinado además, que ese aporte es variable, estacional y depende de la altura de carga hidráulica del río Loa.
- Se ha calculado que entre el periodo 2007 y 2011, los aportes del acuífero superior al río Loa se comportaron de manera estacional y registraron una media para el periodo de 400 l/s.
- En función del estado deficitario en el balance hídrico de la cuenca, y el uso intenso de los recursos hídricos en esta árida región del país, se propone realizar un estudio de recarga artificial sobre las avenidas por eventos meteorológicos esporádicos. Esto permitiría modificar el balance hídrico agregando recursos que naturalmente van a parar fuera del dominio modelado.
- Se recomienda realizar una gestión integrada a nivel de la cuenca, que permita gestionar los planes de alerta temprana de forma integrada entre los principales usuarios de los recursos hídricos.

El gran volumen de antecedentes e información disponible ha permitido construir un modelo hidrogeológico regional integrado de la gran cuenca de Calama. El modelo hidrogeológico conceptual ha sido construido a partir de 3 elementos básicos como son: geología, hidrología e hidrogeología.

A partir del desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual de la gran cuenca de Calama, se ha construido un modelo numérico de flujo preliminar. Este modelo numérico preliminar representa el primer paso en la etapa de modelación y adelanta los lineamientos para el desarrollo de un modelo numérico de detalle, que permita en el futuro ejecutar a la DGA una gestión integral de los recursos hídricos de la cuenca.

## **1.1 Análisis de fortalezas**

Las fortalezas del trabajo presentado aquí residen en:

- Integración y compilación de toda la información disponible provista por DGA.
- Desarrollo de una base de datos integrada de gran potencialidad, y desarrollo de un modelo geológico 3D a nivel regional.
- Generación de más de 200 Km de nuevos datos gravimétricos, que muestran señalan sobre la posición del basamento en zonas donde existía escasa o nula información sobre la geometría de la cuenca.
- Integración de la geología, hidrología e hidrogeología como 3 aspectos base en la metodología para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual integrado.
- Análisis de los datos hidroquímico y desarrollo de un modelo de flujo hidroquímico coherente con los datos de niveles, geología estructural, parámetros hidroquímicos generales y elementos mayores.
- Postulación de un modelo hidrogeológico conceptual que integra información de de diversas y variadas fuentes.
- Construcción de un modelo numérico de flujo preliminar que permite estimar las características y requerimientos técnicos de un modelo de estas dimensiones regionales, volumen de bases de datos necesarias y posibilidades para construir potenciales escenarios de simulación.

## 1.2 Análisis de debilidades

Los aspectos que requieren de mayor atención y cuidado son los siguientes:

- Existen áreas del dominio modelado con ausencia de información. Esta ausencia de información dice relación con la geometría de la cuenca y presencia de las unidades acuíferas, información de niveles y hidroquímica.
- El enorme volumen de información disponible requiere de un esfuerzo de revisión y análisis crítico de los datos para poder compilar todo en una única base y lenguaje común, especialmente cuando las fuentes que han generado la información provienen de una amplio abanico de empresas, competencias e intereses. Lo anterior obliga a mantener una revisión crítica permanente del origen y calidad de los datos utilizados, puesto que una incorrecta gestión de la base de datos puede inducir a errores en el análisis posterior.
- Ausencia de análisis detallados sobre aspectos y zonas específicas de la cuenca que si requieren mayor atención.
- No se han desarrollado estudios hidrogeológicos en las sub-cuencas que alimentan a la gran cuenca de Calama, y por lo tanto parte del conocimiento que existe sobre las fuentes de alimentación de la hidrogeología de Calama se basan en supuestos e hipótesis que necesitan ser validados.

### 1.3 Recomendaciones

En relación con los planes de monitoreo y futuras investigaciones de la hidrogeología en la gran cuenca de Calama se puede señalar lo siguiente:

- La zona geográfica de mayor incidencia en los recursos de la sub-cuenca corresponde a la importante cuenca hidrográfica del río Salado y a las cuencas ubicadas aguas arriba del embalse Conchi. La sub-cuenca del río Salado posee una hidroquímica particular puesto que recibe sus aguas desde manantiales geotermales, descarga subterránea y aguas de precipitación y deshielos. Resulta altamente provechoso realizar un estudio dedicado de esta subcuenca, en donde se integre el conocimiento hidrogeológico con las condicionantes hidroquímicas y geotermales. Un modelo de estas características permitiría cuantificar los caudales de recarga que esta sub-cuenca vierte hacia la gran cuenca de Calama, y permitiría caracterizar en detalle la influencia hidroquímica que ejercen sus aguas sobre las zonas más bajas.
- De la misma forma que con la sub-cuenca del río Salado, sería provechoso contar con una modelación conceptual que integre la hidrogeología de la sub-cuenca del río Loa aguas arriba del embalse Conchi, debido a que esta sub-cuenca regula la la segunda fuente más importante de recursos hídricos que alimentan la cuenca de Calama.
- En una amplia zona del borde este del dominio modelado, existe incertezas sobre la presencia y extensión de los acuíferos así como de los tiempos de residencia del agua subterránea. Estas incertezas provocan que no sea posible valorar la recarga desde el borde sur-este (al sur de la sub-cuenca del río Salado). Para resolver estas interrogantes, resulta necesario lograr medir niveles y medir conductividades eléctricas o sólidos totales disueltos.
- En la entrada norte del dominio, cerca del área del embalse Conchi es necesario cuantificar los caudales de entrada subterránea y la presencia o ausencia de los niveles acuíferos superior e inferior. Esto se lograría mediante sondajes, geofísica dedicada y muestras químicas de aguas subterráneas.
- La salida oeste del modelo, actualmente considera un caudal de 240 l/s a través del acuífero inferior. Este valor es una estimación gruesa recopilada de la bibliografía que fue obtenido a través de cálculos de secciones de Darcy. Este valor debiese ser precisado con un balance hídrico dedicado al acuífero inferior mediante

las investigaciones propuestas para mejorar el conocimiento de las entradas, así como una geofísica dedicada para modelar con precisión la geometría de la sección de paso del borde oeste.

- En relación con los planes de monitoreo de niveles de ambos acuíferos, se recomienda mantener las frecuencias mensuales actuales para todas las captaciones disponibles, y mejorar la base de datos entregada en este proyecto mediante su actualización periódica.
- En relación con los planes de alerta temprana (PAT), se recomienda una revisión técnica que apunte a considerar el sistema de forma integrada y en su conjunto. En este sentido, la recomendación pasa por considerar que las medidas de gestión aguas arriba inciden directamente aguas abajo y por tanto no es posible gestionar eficientemente las zonas de forma separada.
- Se recomienda investigar la relación que existe entre la altura de la superficie del río Loa y las descargas de las vertientes. El análisis de esta situación requiere determinar la existencia de una correlación entre las descargas del embalse Conchi con los niveles de aforo del río Loa (en distintas secciones de aforo) y las descargas históricas de las vertientes en la salida oeste de la cuenca.
- Se recomienda la revisión de los cálculos de almacenamiento en aquellas zonas sujetas a un bombeo intensivo. Producto de los caudales de bombeo, existen áreas sensibles en donde es posible que se produzcan cambios en los flujos verticales entre el acuífero superior e inferior.
- Se recomienda desarrollar un modelo numérico de flujo de detalle a partir del modelo hidrogeológico conceptual y modelo numérico preliminar desarrollado en este trabajo. Esta herramienta permitiría realizar una gestión integrada de los recursos de la cuenca y evaluar en su conjunto los impactos de distintos escenarios de simulación.
- La precipitación directa sobre la cuenca es una componente menor del balance global, y por lo tanto no incide sustancialmente en la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos. Sin embargo, las avenidas e inundaciones esporádicas producto de eventos meteorológicos de carácter torrencial si contienen un potencial importante como fuente de recarga de aguas subterráneas. Para poder hacer uso de estos recursos, se propone el estudio de la infiltración y almacenamiento subterráneo de eventos meteorológicos torrenciales en la zona.

- Se puede realizar un estudio de investigación e inversión, compartida con los privados y que les permita operar en el futuro a modo de cuenta de ahorro de los recursos hídricos infiltrados artificialmente. Sobre esto último existe experiencia en otras partes del mundo, como forma de revertir los descensos regionales sostenidos en la cuenca.

## 1.4 Introducción

La Región de Antofagasta presenta condiciones de extrema aridez y escasez de recursos hídricos. Esta situación se ha incrementado durante la última década, particularmente por el crecimiento de los sectores productivos, y en especial por el desarrollo de la minería, principal motor de la economía del país. La aparición de nuevos proyectos en la Región ha generado un aumento de la demanda de aguas subterráneas, lo que se ha traducido en un mayor uso intensivo de los derechos de aprovechamiento otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA). A lo señalado se suma el hecho de que existe una gran cantidad de derechos subterráneos constituidos, fundamentalmente para la minería, dentro de la región. La cuenca del río Loa constituye la principal fuente de abastecimiento de recursos hídricos de la región; sin embargo, el desarrollo productivo, socio-cultural y los intereses del medioambiente dependientes de estos recursos se encuentran en una situación crítica desde el punto de vista de su sostenibilidad. En una condición en que por un lado, el río Loa está declarado agotado, y por otro lado, que el sistema río-acuífero está fuertemente interconectado en gran parte de la cuenca, lo que significa que una explotación subterránea intensiva sin el control adecuado impactará necesariamente los recursos superficiales. El sector acuífero de la cuenca media del río Loa, en adelante acuífero de Calama, se localiza entre Yalquincha y la Confluencia del río Loa con el San Salvador. Sobre este acuífero existe una extracción subterránea neta en el orden de los 500 l/s, y se espera que a fines de la presente década se incremente en al menos 400 l/s adicionales, ya sea por el inicio de las extracciones en Pampa Yalqui o por el necesario drenaje de los rajos asociados a la explotación minera de Mansa Mina y El Toqui. A este escenario se agrega el potencial efecto sobre la calidad de los recursos hídricos provenientes de la actividad minera, tal como el Tranque de Relave Talabre situado en la zona norte del área de estudio. Con una escorrentía subterránea renovable estimada en el orden de los 750 l/s para el sector medio de la cuenca del río Loa, la sostenibilidad en el largo plazo del acuífero de Calama se basa principalmente en el gran volumen de agua almacenada y la dinámica de los sub acuíferos que lo componen, así como de un adecuado manejo y control de los posibles efectos no deseados asociados a cada una de las intervenciones. Los acuíferos que componen el acuífero de Calama presentan características perfectamente diferenciables. Un acuífero superior localizado en roca cálcica y espesor medio aproximado de 50m, de naturaleza kárstica debido al flujo preferencial por fracturas de origen tectónico y por una red de canales generados por



dilución de la roca. Presenta una rápida renovación y en algunos sectores una estrecha interrelación con el río Loa y su variabilidad estacional, tanto en su recarga como en su descarga. Un acuífero inferior, muy antiguo, conformado por detritos no homogéneos y mal clasificados, de espesor medio cercano a los 150 m, de escasa productividad general y dinámica de flujo lenta, con recarga y descarga sin relación aparente con el río Loa, debido al fuerte confinamiento ejercido por un paquete de sedimentos finos de aproximadamente 100 m de espesor que subyace al acuífero superior.

La DGA estima que en algunos sectores específicos la desconexión hidráulica entre ambos acuíferos pueda estar debilitada, y que frente al aumento de las explotaciones del acuífero inferior es esperable que la proyección espacial de las depresiones induzca una recarga significativa desde el acuífero superior, por sobre la condición de equilibrio actual, y con ello eventualmente se afecte al río Loa y las vertientes de escurrimiento superficial permanente del área. No obstante lo anterior, el efecto indicado podrá ser percibido en la medida que sobre estos sectores de conexión concurren algunos factores desfavorables, como por ejemplo: cercanía al río Loa o vertientes, valor alcanzado por el gradiente inducido, permeabilidad hidráulica de la conexión existente, etc. En el mejor de los escenarios los efectos podrán ser imperceptibles debido a la atenuación propia del almacenamiento de los acuíferos y a la estacionalidad del río Loa, que durante el invierno escurre hasta su desembocadura posibilitando una mayor recarga, del mismo modo que con los aportes eventuales de las crecidas originadas por las precipitaciones estivales. Nuevas investigaciones efectuadas por las Mineras de la zona, han aumentado el conocimiento hidrogeológico del acuífero de Calama, aunque el detalle y el análisis de la información levantada se enmarcan en los intereses y compromisos asumidos individualmente por cada una de ellas. Así, la zona oeste se encuentra levantada en detalle por Minera El Tesoro, producto de compromisos de orden ambiental y de un Plan de Alerta Temprana asociado al ejercicio de derechos de agua; la zona centro norte, levantada detalladamente por CODELCO con motivo de compromisos ambientales relacionados con las infiltraciones del Tranque Talabre y de sus proyectos Mineros Mansa Mina y Quetena; la zona suroeste, recientemente levantada por la empresa KGHM International en razón de la elaboración de un PAT para la explotación de sus derechos en Pampa Yalqui. Las dos primeras empresas poseen modelos conceptuales y matemáticos construidos fundamentalmente sobre la base de la información propia, y la tercera se encuentra en vías de construcción de su modelo conceptual y la definición del dominio de

su modelación matemática. En razón de lo anterior, la DGA ha estimado pertinente la licitación de un trabajo de modelación hidrogeológica, que sobre la base de la integración de toda la información disponible, elabore un modelo conceptual único del acuífero de Calama, cuya modelación matemática permita dar coherencia y seguimiento de los distintos planes de seguimiento, monitoreo y control de las extracciones.

## **1.5 Objetivos y alcance**

El objetivo general del estudio es construir un modelo de hidrogeológico del acuífero de Calama, que a partir de la integración de toda la información hidrológica disponible, permita dar coherencia y seguimiento de los distintos planes de seguimiento, monitoreo y control de las extracciones existentes. Como objetivos específicos se identifican los siguientes:

- Generar la geometría del Acuífero.
- Generar catastros de la demanda.
- Definición y caracterización de unidades acuíferas principales.
- Realizar catastro de pozos y niveles.
- Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
- Identificar las zonas de recarga y descarga.
- Obtener parámetros hidrogeológicos del acuífero.
- Definir modelo conceptual del acuífero.
- Definición del dominio, y construcción preliminar de un modelo hidrogeológico matemático en base Visual Modflow para el acuífero de Calama con la información del estudio.
- Representación territorial de la información del estudio (SIG).

Para abordar los objetivos del proyecto, se han definido X etapas principales

## **1.6 Metodología**

El desarrollo de este proyecto contempla una extensa recopilación de antecedentes y análisis; caracterización hidrogeológica de la cuenca; definición y caracterización de los acuíferos principales; desarrollo de modelo conceptual; elaboración de un modelo

hidrogeológico y proposición de red básica de monitoreo. A continuación se describe y detalla la metodología seguida para desarrollar los objetivos del estudio.

### **1.6.1 Recopilación y Análisis de Antecedentes**

Se efectúa una completa recopilación de los estudios básicos y antecedentes (informes, estudios, tesis, expedientes, estadísticas, datos puntuales, etc.) provistos por la DGA. En particular, se considera la información de distintas instituciones e iniciativas privadas que están descritas en las bases administrativas de la prestación de servicios personales para la modelación del acuífero de Calama. El resultado de esta actividad es utilizar mapas topográficos, geológicos, hidrogeológicos, climatológicos, de suelo y uso de la tierra de la zona de estudio. La revisión de la información hidrogeológica existente pone énfasis en los datos de pozos perforados en la zona, pruebas de bombeo, perfiles estratigráficos y geofísicos.

### **1.6.2 Fase de Campo. Prospección geofísica**

Específicamente se ha ejecutado un estudio de prospección de perfiles geofísicos gravimétricos del orden de 200 km, considerando que cada estación gravimétrica debiese tener una separación máxima a lo más de 2 Km, con el objeto de levantar datos en los sectores con déficit de información, tal como en el sector oeste, sur y noreste del área de estudio.

### **1.6.3 Caracterización Geológica, Hidrológica e Hidrogeológica**

Caracterización de las precipitaciones y caudales dentro de la cuenca con el objeto de identificar la dinámica de las recargas y descargas al río Loa, los flujos bases dentro de la cuenca y la influencia de las crecidas en los procesos de recarga del acuífero de Calama. Para la caracterización hidrogeológica del Acuífero de Calama se efectúa un estudio hidrogeológico en base a la definición del marco geológico y geomorfológico de la zona. Se considera toda la información sobre mapas hidrogeológicos, prospecciones existentes, estratigrafía de sondajes, informes hidrogeológicos asociados a pozos, estudios de modelación de aguas subterráneas, informes de monitoreo de empresas mineras entre otros.

### **1.6.4 Desarrollo del modelo conceptual**

El desarrollo del modelo conceptual integra toda la información referente a la geometría

del acuífero, las características físicas del medio, las acciones a las que está sometido el acuífero y los procesos fisicoquímicos relevantes que tienen lugar en él. A continuación se citan de manera esquemática todos los aspectos que se especificarán en el modelo conceptual fruto del estudio hidrogeológico. Dichos aspectos tienen en cuenta toda la información recopilada de los estudios anteriores y antecedentes nuevos obtenidos. A su vez, aporta un modelo espacial y conceptual sobre el funcionamiento del sistema acuífero y la cuenca hidrológica, e incluye una descripción de las unidades relevantes de los acuíferos del sistema, indicando su composición, localización en profundidad y espesores, profundidad del basamento, parámetros elásticos representativos, nivel o niveles freáticos, las zonas y mecanismos de recarga, así como afloramientos, entre otros.

Caracterización de los tipos de acuíferos que forman el sistema y las características del medio. De esta forma, se describe la geometría de los acuíferos, sus límites y elementos relevantes como ríos, condiciones de borde (nivel fijo, caudal conocido o condición mixta o de goteo) y zonificación de las propiedades elásticas del medio (transmisividad y coeficiente de almacenamiento).

Descripción y cuantificación de todos los elementos que recargan y descargan sobre el sistema acuífero. Con especial interés en la caracterización de la interacción vertiente-acuífero, conceptualizando la conexión hidráulica que relaciona las entradas y salidas del sistema entre las dos unidades acuíferas (superficial y profunda).

### **1.6.5 Proyecto SIG**

El análisis geológico e hidrogeológico desarrollado depende de la estructura de la base de datos que se utilice. Es por ello que, como parte de nuestra metodología, hemos creado una base de datos geo-espacial cuyo diseño se ha basado en diferentes estándares internacionales y que integra de una manera eficiente información espaciotemporal de diversa naturaleza (geológica, hidrogeológica, hidroquímica, geográfica, hidrológica, hidrometeorológica, otros) y de distinto origen (diferentes formatos, diferente escala espacio-temporal). Actualmente se puede encontrar en el mercado diversos software de SIG, siendo el más extendido ArcGIS (ESRI). Las herramientas disponibles en dicho software son múltiples y variadas, pero la mayoría de las veces no están orientadas al usuario final, que se siente perdido en la maraña de funciones y herramientas que ofrece. Nuestro grupo de investigación trabaja en concentrar las ventajas de ArcGIS en un pequeño set de herramientas, reduciendo al mínimo las barreras que tiene que superar el usuario final. Gracias a nuestros expertos que trabajan día a día en soluciones de geología, hidrología e hidrogeología, hemos desarrollado herramientas enfocadas directamente al trabajo específico que realizan en estas áreas. De esta manera se obtienen los óptimos resultados, minimizando tiempo y recursos. Se ha creado un set de herramientas que permiten la visualización de la información geológica del punto deseado en forma de columna estratigráfica y además permiten al usuario generar automáticamente perfiles geológicos entre puntos seleccionados directamente en la pantalla. Información complementaria como los perfiles geofísicos de pozos y las diferentes unidades definidas aparecen también en el perfil geológico digital. Sobre estos perfiles geológicos digitales el usuario puede correlacionar y definir posibles superficies de contacto, unidades y subunidades en la pantalla. Esta información quedará almacenada en la base de datos y permitirá al usuario posteriormente visualizarla e integrarla en modelos tridimensionales. Paralelamente, se han desarrollado diversas técnicas que correlacionan las características texturales de cada tramo del sondeo descrito y almacenado en la base de datos con la permeabilidad hidráulica, a través de fórmulas empíricas. En cuanto a la explotación de datos hidrogeológicos, se ha generado un set de herramientas que nos permite realizar diversas consultas espacio-temporales. Particularmente, sobre los datos hidroquímicos, nos permiten realizar diversos cálculos sobre estos datos consultados (como el balance iónico), mapas temáticos, y diversos análisis estadísticos (matrices de correlación, análisis bivariable, etc). Además genera diagramas típicamente usados en análisis hidroquímicos como Stiff, Piper, Schöeller-

Berkaloff entre otros pudiendo además visualizar su distribución espacio-temporal.

Toda la información obtenida puede ser analizada de forma integrada dentro de la misma plataforma, ArcGIS, o bien puede ser exportados a otras plataformas de modelación hidrogeológica cuyos resultados pueden cargarse nuevamente en ArcGIS para su post-procesamiento. Toda la información que se recopile quedará respaldada en formato digital (CD o DVD según formatos estándar del software empleado) y será entregado a la DGA.

#### **1.6.6 Red básica de monitoreo**

Una vez realizado el estudio hidrogeológico de la zona, y establecido el modelo conceptual y espacial del acuífero y la cuenca hidrogeológica, se propondrá a la DGA los puntos de monitoreo y control que permitan en el futuro verificar las hipótesis y supuestos efectuados durante el estudio, como son las condiciones de borde, entradas y salidas, zonas de mayor interés.

#### **1.6.7 Desarrollo del modelo numérico**

Sobre la base del modelo conceptual se ha construido un modelo numérico en Visual Modflow. El modelo representará adecuadamente las variables de interés hidrológico e hidrogeológicos, así como aquellas que se encuentran incluidas en los planes de monitoreo, seguimiento y control de las extracciones.

Normalmente la estructura del modelo no es única ni segura, existen varias estructuras posibles. Una buena discretización repercute en que el tiempo necesario para completar el proceso de modelación se reduzca de modo significativo.