



**GOBIERNO DE CHILE**

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

**DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

# **DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO DEL RÍO CAMARONES, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA**

## **RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR:**

DICTUC S.A.

S.I.T. N° 495

**Santiago, 2 de diciembre de 2021**

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Industrial, Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas

Ingeniero Comercial, Sr. Oscar Cristi Marfil

Dirección Regional de Aguas, Arica y Parinacota

Ingeniero Agrónomo, Sr. Osmán Hernán Cataldo Ayala

Inspectora Fiscal – Analista de Fiscalización y Medio Ambiente DGA

Ingeniera Agrónomo, MSc. Ambientales, Sra. Natalia Varas Mena

Inspectora Fiscal Subrogante – Analista de Fiscalización y Medio Ambiente DGA

Ingeniero Químico Ambiental, Sra. Verónica Maldonado Araya

**DICTUC – Unidad de Hidrogeología**

Jefe de Proyecto

Ingeniero Civil Dr. José Muñoz Pardo

Ingeniero A, Coordinador Proyecto

Ingeniero Civil MSc. Magdalena Lagos del Río

Especialistas

Ingeniero Civil Dr. Jorge Gironás León, Hidrología

Ingeniero Civil Dr. Francisco Suárez Poch, Hidrogeólogo

Ingeniero Civil MSc. Gonzalo Yáñez Morroni, Informática

Profesionales Área Ingeniería de Proyecto

Ingeniero Civil Bruno Capponi

Ingeniero Civil José Jiménez

Área Geología

Geólogo Víctor Godoy

Especialistas Externos

Ingeniera en Recursos Naturales, Catalina Eastman - Especialista PAC (Arrau Ingeniería)

Antropóloga Nathaly Ardiles – Especialista PAC (Arrau Ingeniería)

Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, Valeska Cárcamo - Especialista SIG

Antropólogas, Candy Paredes y Paula Carrasco – Encargadas de Catastro

MsC. en Geofísica aplicada, Juan Carlos Parra Espinoza – Especialista Geofísica (Geodatos)

Para citar bibliográficamente este estudio, se recomienda hacerlo de esta forma:

DGA (2021), “Diagnóstico hidrogeológico del acuífero del Río Camarones, Región de Arica y Parinacota”. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Región de Arica y Parinacota, Chile, Realizado por: DICTUC S.A.

## Contenido

1	Introducción .....	9
2	Descripción del área de estudio y su estado hídrico actual preliminar .....	12
2.1	Variables recopiladas desde datos satelitales .....	14
2.2	Marco Climático .....	15
2.3	Marco geológico.....	15
2.3.1	Mapas y perfiles geológicos.....	15
2.3.2	Estratigrafía (extraído de SERNAGEOMIN (2004; 2012; 2013; 2014)).....	15
2.4	Análisis del balance Hídrico .....	16
2.4.1	Diagnóstico del estado hídrico del área de estudio .....	16
2.4.2	Oferta de agua .....	17
2.4.3	Demanda de agua.....	19
2.4.4	Balance hídrico .....	20
3	Caracterización Hidrogeológica .....	21
3.1	Resultados TEM.....	22
3.2	Resultados gravimétricos .....	22
3.3	Campaña de aforo de caudales.....	22
4	Modelo hidrogeológico conceptual .....	24
4.1	Unidades hidrogeológicas y tipos de acuíferos.....	24
4.2	Caracterización de la geometría de los acuíferos .....	25
4.2.1	Modelo geológico 3D .....	25
4.2.2	Geometría y caracterización de los acuíferos .....	25
4.3	Balance hídrico .....	44
5	Recomendaciones, brechas y acciones de mejora.....	45
5.1	Hidrología .....	46
5.1.1	Estación fluviométrica.....	46
5.1.2	Curvas de descarga en secciones de aforo DICTUC .....	47
5.1.3	Estaciones meteorológicas .....	48
5.2	Hidrogeología .....	49

5.2.1	Pozos de monitoreo y bombeo DGA .....	49
5.2.2	Estudio de recarga de la cuenca del Río Camarones .....	52
5.3	Calidad del agua .....	52
5.3.1	Calidad de agua APR.....	52
5.3.2	Análisis de tritio y Carbono 14 ( <sup>14</sup> C) .....	54
5.4	Identificación de nuevas fuentes o fuentes alternativas de agua .....	55
5.4.1	Explotación de agua subterránea .....	55
5.4.2	Agua de niebla .....	56
6	Participación ciudadana .....	57
6.1	Objetivos.....	57
6.2	Levantamiento de actores.....	57
6.3	Reuniones presentación del estudio .....	58
6.4	Reuniones de entrega de resultados .....	59
6.5	Conclusiones y recomendaciones .....	59
7	Conclusiones .....	61
8	Referencias.....	70

### **Anexos Digitales**

Anexo 1: Antecedentes Generales

Anexo 2: Análisis de estaciones meteorológicas

Anexo 3: Análisis de estaciones fluviométricas

Anexo 4: Recopilación de derechos de aguas

Anexo 5: Estudio Geofísico

Anexo 6: Catastro

Anexo 7: Campaña de aforo

Anexo 8: PAC

Anexo 9: Modelo Geológico 3D

Anexo 10: Cotizaciones

Anexo 11: Balance

Anexo 12: Cartera de Proyectos

Anexo 13: Figuras y sistemas de información geográfica

## Índice de Figuras

Figura 1-1: Modelo geológico 3D de la cuenca del Río Camarones.....	11
Figura 2-1: Zona de estudio, cuenca del Río Camarones. ....	13
Figura 2-2 Subcuenas Río Camarones. ....	14
Figura 2-3: Evolución de la oferta hídrica futura. ....	18
Figura 2-4: Evolución de la disponibilidad hídrica. ....	21
Figura 3-1: Puntos de campaña de aforo DICTUC en la cuenca del Río Camarones. Datum: WGS84 UTM Z19S. ....	23
Figura 4-1: Ubicación de las doce secciones geológicas del modelo geológico 3D.....	27
Figura 4-2: Sección geológica D1 transversal a la desembocadura del Río Camarones .....	28
Figura 4-3: Sección geológica D2 longitudinal al Río Camarones entre la confluencia con Quebrada Chiza y la desembocadura. ....	29
Figura 4-4: Sección geológica D3 longitudinal al Río Camarones, entre 0 y 13,3 km aguas arriba la confluencia con Quebrada Chiza.....	30
Figura 4-5: Sección geológica D4 longitudinal al Río Camarones, entre 13,3 y 16 km aguas arriba la confluencia con Quebrada Chiza.....	31
Figura 4-6: Sección geológica D5 transversal al Río Camarones en la zona baja-media.....	32
Figura 4-7: Sección geológica D6 longitudinal al Río Camarones. A una distancia aproximada $x = 8.000$ m se encuentra la estación meteorológica Conanoxa. ....	33
Figura 4-8: Sección geológica D7 longitudinal al Río Camarones entre Conanoxa y Humayani (parte 1). ....	34
Figura 4-9: Sección geológica D8 longitudinal al Río Camarones entre Conanoxa y Humayani (parte 2). ....	35
Figura 4-10: Sección geológica D9 longitudinal al Río Camarones entre Taltape y Pachica. ....	36
Figura 4-11: Sección geológica D10 longitudinal al Río Camarones entre Pachica e Illapata. ....	37
Figura 4-12: Sección geológica D11 en sector Caritaya.....	38
Figura 4-13: Sección geológica D12 en sector Ajatama.....	39
Figura 5-1: Ubicación de estación fluviométrica propuesta, "Río Camarones en Cerro Blanco".....	46

Figura 5-2: Ubicación de estación meteorológica propuesta "Tranque Caritaya" .....	48
Figura 5-3: Propuesta de ubicación de pozos de monitoreo y bombeo en la cuenca del Río Camarones .....	51
Figura 5-4: Ubicación de puntos de muestreo físico-químico según Nch. 409 para consumo de agua potable. Los números indican el ID de catastro. ....	53
Figura 7-1: Evolución de la disponibilidad hídrica.....	64

## Índice de Tablas

Tabla 1-1: Evolución de la disponibilidad hídrica.....	10
Tabla 2-1: Cálculo de oferta hídrica para la cuenca del Río Camarones (1979 – 2015).....	17
Tabla 2-2: Distribución de derechos de agua referenciados.....	17
Tabla 2-3: Distribución de oferta promedio según subcuenca (periodo 1979 - 2020). ....	18
Tabla 2-4: Resumen de demanda hídrica por sector actual y proyección para el año 2030 para el área de estudio: Cuenca del Río Camarones sin la subcuenca de Quebrada Chiza .	19
Tabla 2-5: Evolución de la demanda. ....	20
Tabla 4-1: Balance hídrico del sistema hidrogeológico para el periodo histórico (1979-2020). ....	45
Tabla 4-2: Balance hídrico del río Camarones y afluentes para el periodo histórico (1979-2020). ....	45
Tabla 5-1: Ubicación de estación fluviométrica propuesta .....	46
Tabla 5-2: Ubicación estación meteorológica propuesta "Tranque Caritaya" .....	48
Tabla 5-3: Propuesta de ubicación de pozos de monitoreo y bombeo en la cuenca del Río Camarones .....	50
Tabla 5-4: Geología en subsuperficie esperada en los sectores de los pozos a perforar ....	51
Tabla 5-5: Puntos de pozos y vertientes con consumo humano a realizar análisis físico-químico del agua .....	54
Tabla 6-1: Autoridades regionales .....	57
Tabla 6-2: Actores comunitarios .....	58



## 1 Introducción

Las proyecciones de la DGA muestran que en las próximas décadas la demanda de agua tenderá a duplicarse en Chile, debido principalmente al aumento de la población, la introducción de nuevos actores productivos y demandas y el aumento de la superficie agrícola. El último reporte de la ONU sobre el cambio climático (IPCC, 2021), el cual analizó más de 14.000 artículos científicos, establece cómo el calentamiento global cambiará el planeta en el corto y mediano plazo. El aumento de las temperaturas afecta negativamente las precipitaciones totales y los eventos extremos, por lo que la disponibilidad del recurso hídrico será más incierta.

El área de la cuenca de Camarones no está ajena a este fenómeno. La disponibilidad hídrica por habitante es baja y su calidad química es restrictiva para el desarrollo económico. Consiguientemente, es necesario mejorar el entendimiento de la disponibilidad y ocurrencia actual y futura del recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo. De esta manera, se obtendrá un balance hídrico más preciso para gestionar eficazmente el uso del agua. La caracterización hidrogeológica propuesta en el presente estudio “Diagnóstico Hidrogeológico del acuífero del Río Camarones” (en adelante, el Estudio) permite además tener una línea base para proyectos de inversión futuros, y provee información para estudios de vulnerabilidad de acuíferos y otorgamientos de derechos de agua.

El presente informe da cuenta de los resultados obtenidos en el Estudio “Diagnóstico Hidrogeológico del Acuífero del Río Camarones” mandado por la Dirección General de Aguas Región de Arica y Parinacota y ejecutado por DICTUC S.A., Unidad de Hidrogeología.

En este se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Descripción del área de estudio a partir de antecedentes, información en línea, estudios anteriores, campañas de aforo, estudios geofísicos y catastro de usuarios e infraestructura hídrica.
- Diagnóstico del estado hídrico actual y tendencias del área de estudio, incorporando la estimación de oferta y demanda del agua, identificación de cartera de acciones hídricas y síntesis de brechas en la gestión de recursos hídricos.
- Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual.
- Formulación de recomendaciones, brechas y acciones de mejora de la información hidrogeológica.
- Presentación del estudio mediante Participación Ciudadana, 2 reuniones virtuales y una presencial.

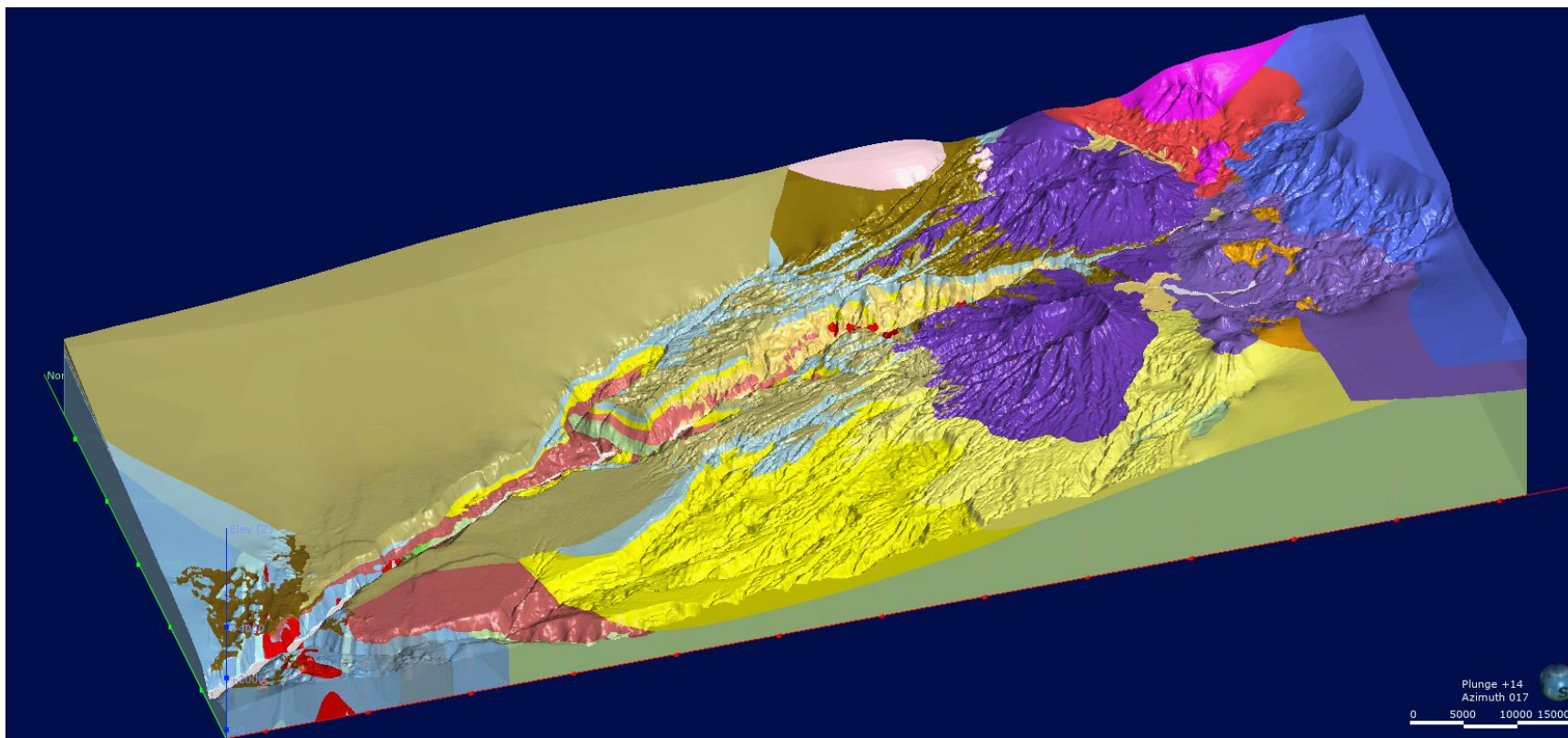
Dentro de las actividades principales ejecutadas en el proyecto se encuentra la construcción de un modelo geológico 3D usando el software Leapfrog Works y los resultados del balance hídrico histórico y futuro para la cuenca. El modelo confeccionado (Figura 1-1) considera la información geológica recopilada desde los antecedentes revisados y los resultados de las campañas geofísicas realizadas durante el desarrollo del presente estudio.

Los valores obtenidos para el balance hídrico se presentan en la Tabla 1-1. Estos resultados consideran la disponibilidad hídrica una vez extraídos los derechos utilizados por cada subcuenca. El análisis a nivel decadal muestra una condición crítica para los periodos 2041-2050 y 2050-2060.

**Tabla 1-1: Evolución de la disponibilidad hídrica.**

Fuente: Elaboración propia.

Periodo	Hasta estación Chilpe	Disponibilidad hídrica promedio (l/s)	
		Entre Chilpe y Conanoxa	Area restante cuenca de Río Camarones (sin quebrada de Chiza)
<b>Histórico (1979 – 2020)</b>	1.678,12	827,95	431,37
<b>2021 - 2030</b>	1.591,53	749,92	362,75
<b>2031 - 2040</b>	1.524,05	686,98	300,37
<b>2041 - 2050</b>	1.245,86	406,86	20,57
<b>2051 - 2060</b>	1.260,94	428,22	42,46
<b>Futuro (2021-2060)</b>	1.405,60	567,99	181,54



**Figura 1-1: Modelo geológico 3D de la cuenca del Río Camarones**  
Fuente: Elaboración propia

## 2 Descripción del área de estudio y su estado hídrico actual preliminar

**El área de estudio de este proyecto comprende la cuenca del Río Camarones sin la subcuenca de Quebrada de Chiza**, la cual puede verse delimitada en rojo en la Figura 2-1 y comprende un área de 2.386 km<sup>2</sup>. La cuenca completa del río Camarones se presenta en color celeste y comprende un área total de 4.645 km<sup>2</sup>.

El área geográfica de la cuenca del Río Camarones corresponde a la Región de Arica y Parinacota, Provincia de Arica, Comuna de Camarones y a la Región de Tarapacá, Provincia del Tamarugal, comunas de Huara y Camiña (Figura 2-1). Al norte de la cuenca se presenta la zona norte de la comuna de Camarones (Valle de Codpa) y la comuna de Putre en la Región de Arica y Parinacota. Al sur de la cuenca, se presentan las zonas sur de las comunas de Huara y Camiña en la Región de Tarapacá. Al este, la cuenca limita con las comunas de Putre (XV Región) y Colchane (I Región) y al oeste con el Océano Pacífico.

La cuenca del Río Camarones limita al norte con la cuenca del Río Vítor, al sur con la cuenca de Camiña y al oriente con la cuenca del Salar de Surire (DGA-UTA, 2010). Además, posee una población de 785 habitantes según el CENSO de población y vivienda del 2017 (INE, 2017). Según género se divide en un 42,7% de mujeres y un 57,3% de hombres.

Por su ubicación, es una región de características desérticas. En su geografía se observan terrenos desprovistos de vegetación, especialmente en la zona este, mientras que, en el valle de Camarones, se presentan los terrenos agrícolas, praderas, matorrales y humedales. El valle de Camarones se ubica a 106 km al sur de la ciudad de Arica y debido a las altas concentraciones de arsénico y boro en sus aguas superficiales, la variedad de actividades agropecuarias en el valle está restringida especialmente al cultivo de alfalfa y ganadería caprina y ovina (DOH-Arrau Ingeniería E.I.R.L., 2013).

A lo largo del valle del Río Camarones, las actividades agrícolas se abastecen de manera superficial a partir del río mismo. Además, las comunidades ubicadas al este de la cuenca han logrado suplir su demanda de agua a través de vertientes de agua subterránea, como es el caso de Pachica, Esquiña, Illapata, Sahuara, Sucuna y Mulluri.

La descripción del área de estudio incluye los siguientes tópicos:

- Caracterización física y geográfica
- Caracterización socioeconómica e institucional
- Caracterización de usos y demandas
- Caracterización de infraestructura hídrica
- Caracterización de la calidad de las aguas
- Caracterización ambiental
- Diagnóstico preliminar del estado hídrico del área de estudio



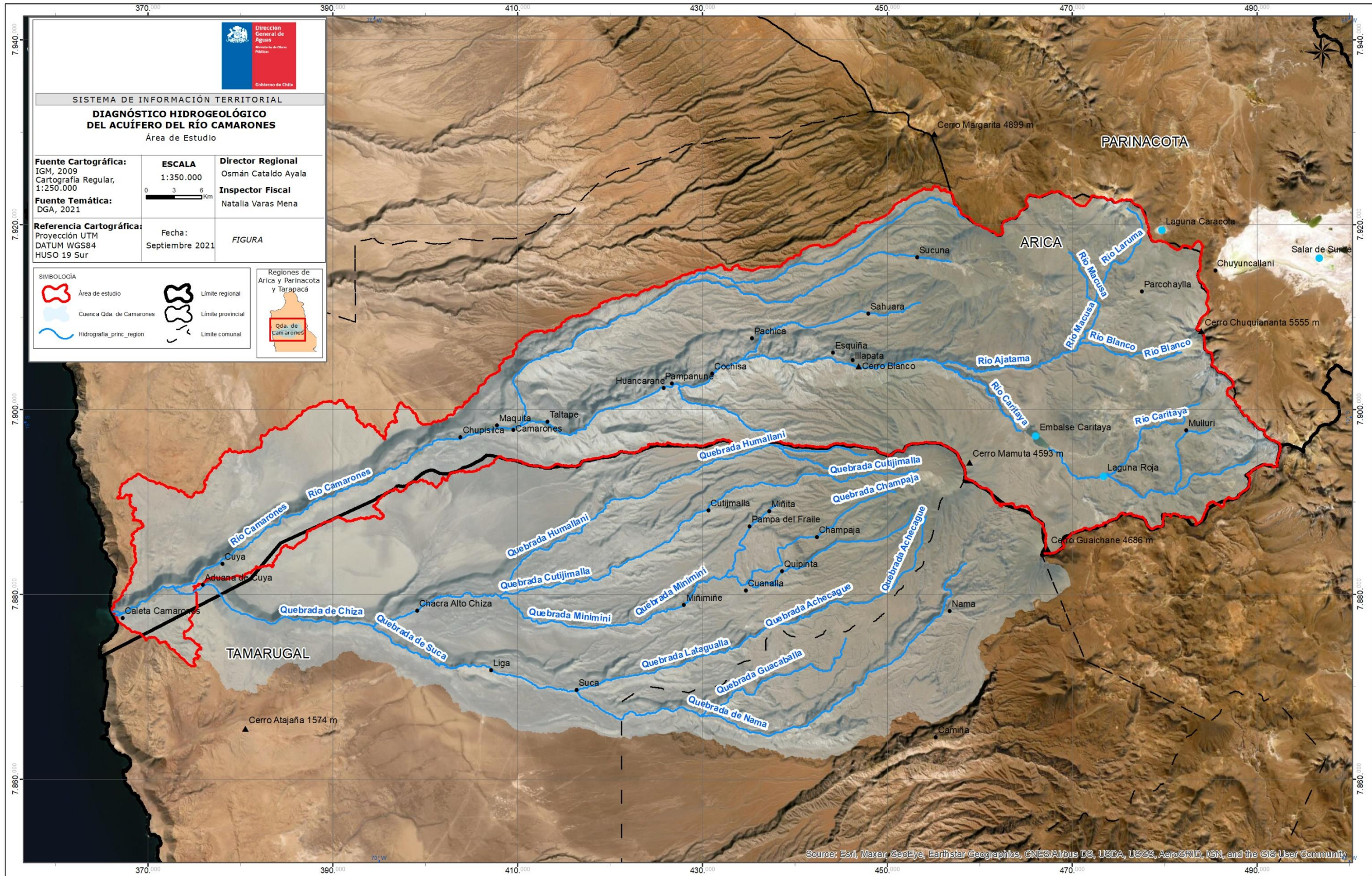
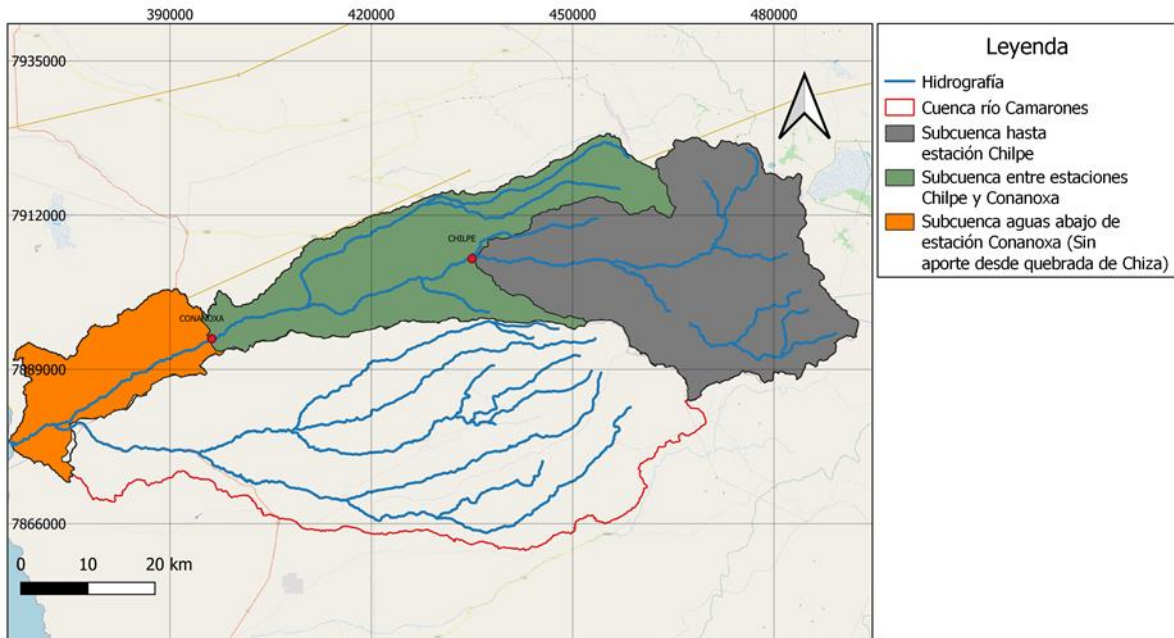


Figura 2-1: Zona de estudio, cuenca del Río Camarones.  
 Fuente: Elaboración propia.



## 2.1 Variables recopiladas desde datos satelitales

El análisis de datos satelitales consideró como base de información los resultados del estudio Balance hídrico Nacional (DGA-UC-PUC, 2017) disponibles en la página del CR<sup>2</sup> <sup>1</sup>. Para el análisis se consideraron tres distribuciones espaciales: la subcuenca del Río Camarones hasta la estación de Chilpe, la subcuenca hasta la estación Conanoxa y finalmente la cuenca del Río Camarones en su totalidad. Esta división se presenta en la Figura 2-2. Los datos recopilados corresponden al periodo entre los años 1979 hasta el año 2015.



**Figura 2-2 Subcuencas Río Camarones.**  
Fuente: Elaboración propia con datos de DGA.

---

<sup>1</sup> Para mayor información: <https://www.cr2.cl/datos-de-precipitacion/>.

## 2.2 Marco Climático

En la Región de Arica y Parinacota se presentan cuatro subtipos climáticos relacionados con las condiciones desérticas que, desde el poniente al oriente, son los siguientes:

**Clima desértico costero nuboso:** este subtipo climático se localiza en toda la costa. Presenta abundantes nieblas matinales, o "camanchacas", originadas principalmente por la influencia de la corriente fría de Humboldt; este subtipo climático se presenta en Arica con una temperatura media anual de 18,8 °C, y existe una predominancia de precipitaciones anuales inferiores a 3 mm en la costa.

**Clima desértico interior:** se localiza en las pampas, sobre los 1.000 metros de altura y sin influencia oceánica costera. Este subtipo se caracteriza por ser de extrema aridez, donde las precipitaciones anuales son nulas, y las temperaturas medias alcanzan a 18 °C. Característicos de este clima son los días con cielos despejados y mucha luminosidad, y más seco que el clima del desértico costero, la humedad relativa en promedio es de 50%.

**Clima desértico marginal de altura:** Este subtipo se ubica por sobre los 2.000 metros de altura, debido a ello las temperaturas son más atenuadas presentando una media anual de 10° C. En este subtipo aparecen las primeras lluvias que fluctúan entre 50 y 100 mm anuales, ellas se presentan en los meses de verano producto de las lluvias estivales.

**Clima de estepa de altura:** este subtipo predomina en el altiplano por sobre los 3.000 metros de altura. La principal característica es el aumento de las precipitaciones que alcanzan a 300 mm de agua caída en el año.

## 2.3 Marco geológico

La zona de estudio se encuentra en el segmento de los Andes del Norte de Chile (Skarmeta, 1983), que se extiende desde los 18° hasta los 27° de latitud sur. Esta zona se caracteriza por: (a) Presencia de volcanismo Cenozoico superior en altura. (b) Mayor concentración de epicentros de sismos de profundidad media (110-130 Km), aproximadamente bajo el eje volcánico de la cordillera (Barazangi y Isacks, 1976).

### 2.3.1 Mapas y perfiles geológicos

La geología del área de estudio fue extraída de diferentes cartas geológicas desarrolladas por SERNAGEOMIN, estas son: Hoja Arica escala 1:250.000, Carta Cuya escala 1:100.000, Carta Miñimiñi escala 1:100.000 y Carta Camiña escala 1:100.000.

### 2.3.2 Estratigrafía (extraído de SERNAGEOMIN (2004; 2012; 2013; 2014))

En el segmento occidental afloran típicamente rocas ígneas y sedimentarias en su mayoría de edad Mesozoicas; en la Depresión Central, afloran rocas del Oligoceno a Mioceno

Temprano (Formaciones Azapa y Oxaya) mientras que en la Precordillera se exponen principalmente rocas del Mioceno (Formación El Diablo y algunos volcanes), en el borde oriental de la Depresión Central afloran rocas volcánicas y sedimentarias del Plioceno – Holoceno.

## **2.4 Análisis del balance Hídrico**

El estudio “Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la macrozona norte y centro” (DGA-UC, 2018) fue usado como fuente de información base para el desarrollo del Plan Estratégico en las cuencas seleccionadas. Este estudio cuenta con forzantes meteorológicas (temperatura y precipitación) necesarias para alimentar el modelo hidrológico VIC, con el cual se hizo el balance a nivel nacional. De este modelo hidrológico se obtienen como salidas distintas variables hidrológicas que representan las características locales de cada cuenca y zona del país, en términos de proporción entre escorrentía y evapotranspiración, entre otros flujos importantes. El objetivo es ocupar este insumo para caracterizar la precipitación o la recarga donde no haya información dentro de las cuencas a modelar, para poder así mejorar la caracterización hidrológica de éstas.

Para la zona de Camarones, se ocuparon las forzantes del estudio DGA-UC (2018), es decir, precipitación, y temperatura, con las cuales se logró una caracterización espacial y temporal del área de estudio. También se consideró la evapotranspiración, la cual se obtiene como flujo de salida de la modelación hidrológica hecha con VIC. Se consideraron dos escenarios, el histórico (1979-2015), y el futuro (2030-2060). La descripción y análisis de estos datos se realiza en las siguientes secciones.

### **2.4.1 Diagnóstico del estado hídrico del área de estudio**

En esta sección se presenta un resumen de los resultados observados para las diferentes componentes del balance hídrico de la cuenca del Río Camarones. En relación a la oferta de recursos hídricos, la estimación realizada por DGA (2011) corresponde a 8.014,8 l/s para la cuenca. La estimación obtenida en este estudio considerando los datos históricos obtenidos desde el balance obtenido por DGA (2018) corresponde a 6.717,12 l/s. Esta actualización del balance se presenta en la Tabla 2-1. Para realizar esta estimación se utilizó la subdivisión espacial de subcuencas. Para verificar esta distribución se recomienda revisar la Figura 2-2. Los derechos otorgados en la cuenca para la Región de Arica y Parinacota corresponden a 1.653,5 l/s aproximadamente debido a la presencia de vertientes, canales y pozos. Los valores diferenciados por origen se presentan en la Tabla 2-2.



**Tabla 2-1: Cálculo de oferta hídrica para la cuenca del Río Camarones (1979 – 2015).**

Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	Precipitación promedio mensual (mm)	Área (Km <sup>2</sup> )	Caudal Estimado (l/s)
Hasta estación Chilpe	13,69	1181	6.237,63
Entre Chilpe y Conanoxa	1,47	826	469,14
Area restante cuenca de Río Camarones (sin quebrada de Chiza)	0.07	381	10,35
<b>Total</b>			<b>6.717,12</b>

**Tabla 2-2: Distribución de derechos de agua referenciados.**

Fuente: Elaboración propia con datos DGA.

Derechos (l/s)	Cuenca Río Camarones
Subterráneos	162,8
Superficiales	1.490,7
<b>Total</b>	<b>1.653,5</b>

## 2.4.2 Oferta de agua

La oferta de recursos hídricos neta actualizada hasta el año 2020 considera los efectos de los procesos de evapotranspiración que se desarrollan en la zona de estudio. Estos valores fueron obtenidos considerando la distribución por subcuencas y áreas aportantes. Para la subcuenca aportante hasta la estación fluviométrica Camarones en Chilpe se realizó un ajuste de los datos obtenidos desde el Balance desarrollado por DGA (2018). El procedimiento utilizado se presenta en detalle en el Anexo digital (ANEXO 11 Balance).

### 2.4.2.1 Oferta hídrica histórica (1979 – 2020)

Como se observa en la Tabla 2-3 la principal fuente de oferta ocurre en la zona alta de la cuenca de estudio. Lo anterior se debe a la relación creciente entre la precipitación – altitud, que se incrementa en los meses de Diciembre – Marzo como consecuencia de las lluvias altiplánicas. Es necesario señalar que los procesos evapotranspirativos representan cerca de un 70% en la disminución de recursos en la zona, por lo que poseen un impacto relevante en la oferta neta de recursos disponibles en la cuenca.

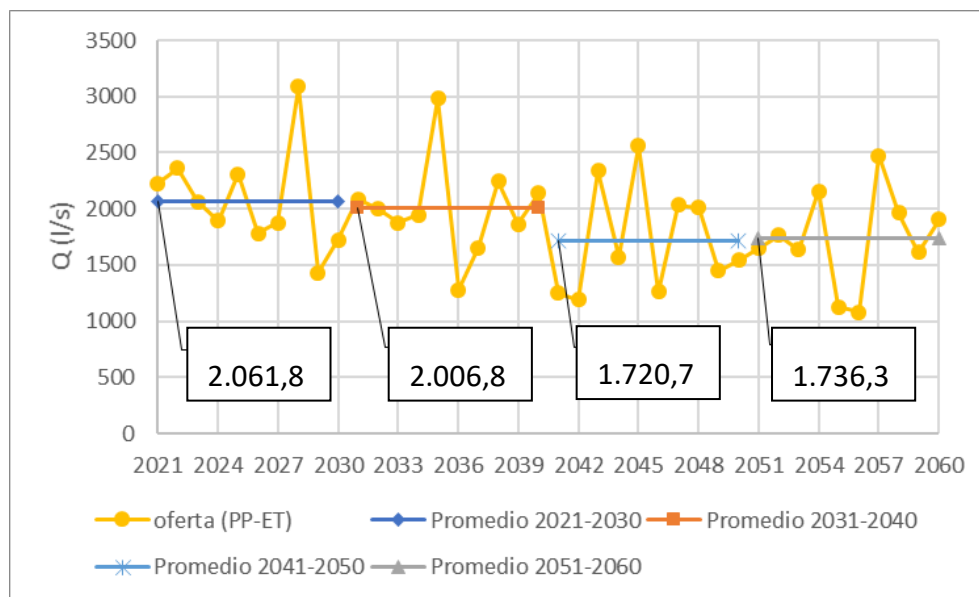
**Tabla 2-3: Distribución de oferta promedio según subcuenca (periodo 1979 - 2020).**

Fuente: Elaboración propia con datos DGA.

Oferta según área aportante	Q (l/s) - Precipitación	Q (l/s) – Evapotranspiración	Caudal neto (l/s)
Hasta estación Chilpe	6.394,92	4.281,80	2.113,12
Entre Chilpe y Conanoxa	486,88	465,28	21,60
Area restante cuenca de Río Camarones (sin quebrada de Chiza)	32,69	19,76	12,93
<b>Total</b>	<b>6.914,49</b>	<b>4.766,84</b>	<b>2.147,65</b>

#### 2.4.2.2 Oferta hídrica futura (2021 – 2060)

La estimación de recursos futuros considera los efectos producidos en las forzantes (precipitación, temperatura y evapotranspiración) debido al cambio climático. En la Figura 2-3 se observa una tendencia a la baja en la oferta hídrica futura estimada. El rango estimado para los recursos hídricos disponibles para satisfacer la demanda varía entre los 1100 l/s y 3100 l/s aproximadamente. El promedio decadal para el periodo 2021-2030 presentan una disminución cercana a 90 l/s en comparación con el periodo histórico, mientras que al compararlo con el periodo 2041 – 2050 se incrementa aún más alcanzando una variación de 430 l/s aproximadamente.



**Figura 2-3: Evolución de la oferta hídrica futura.**

Fuente: Elaboración propia.

### 2.4.3 Demanda de agua

A continuación, se presenta en la Tabla 2-4 el resumen de los resultados obtenidos de la demanda hídrica por subrubro, tanto para condiciones actuales (año 2020) y proyecciones para el año 2030. Se estima que la demanda hídrica actual es de 1.529 l/s y que esta disminuirá ligeramente a 1.523 l/s para el año 2030, debido principalmente a la disminución de superficies agrícolas cultivables.

**Tabla 2-4: Resumen de demanda hídrica por sector actual y proyección para el año 2030 para el área de estudio: Cuenca del Río Camarones sin la subcuenca de Quebrada Chiza**

Fuente: Elaboración propia

Demanda Hídrica por sector	2020	2030
	l/s	
<b>Agua potable Urbana</b>	0,0	0,0
<b>APR</b>	1,2	1,4
<b>Agrícola</b>	1.252,5	1.246,2
<b>Pecuario</b>	39,0	39,2
<b>Forestal</b>	195,2	195,2
<b>Minero</b>	0,5	0,7
<b>Industrial</b>	0,0	0,0
<b>Generación Eléctrica</b>	0,0	0,0
<b>Turístico</b>	0,0	0,0
<b>Ambiental</b>	0,7	0,7
<b>Caudal Ecológico</b>	40,0	40,0
<b>Total</b>	<b>1.529,1</b>	<b>1.523,3</b>

Las proyecciones de demanda estimada para la cuenca según sector consideran un aumento lineal relacionado con la recopilación de información realizada. Para la estimación de la demanda se consideró incrementar el valor de la estimación obtenida para el sector agrícola en un factor de 1,10 con el objetivo de evaluar una posible variación en el consumo actual de recursos para esta actividad, ya que el funcionamiento para cada subcuenca está relacionado a la oferta disponible en el tramo del río Camarones correspondiente. Además, la demanda perteneciente a cada subcuenca fue distribuida considerando la cubierta de suelo presentada en la sección 3.1. Anexo digital (ANEXO 11 Balance) se muestra en detalle este procedimiento.

En la Tabla 2-5 se observa la evolución de la demanda distribuida bajo las mismas condiciones que la oferta hídrica. Los valores futuros no presentan una variación importante respecto a la actual, ya que el principal sector de consumo corresponde a la actividad agrícola. En particular para este sector, se espera una disminución de la demanda debido a procesos de tecnificación de riego como ha ocurrido a nivel regional en Arica y Parinacota.

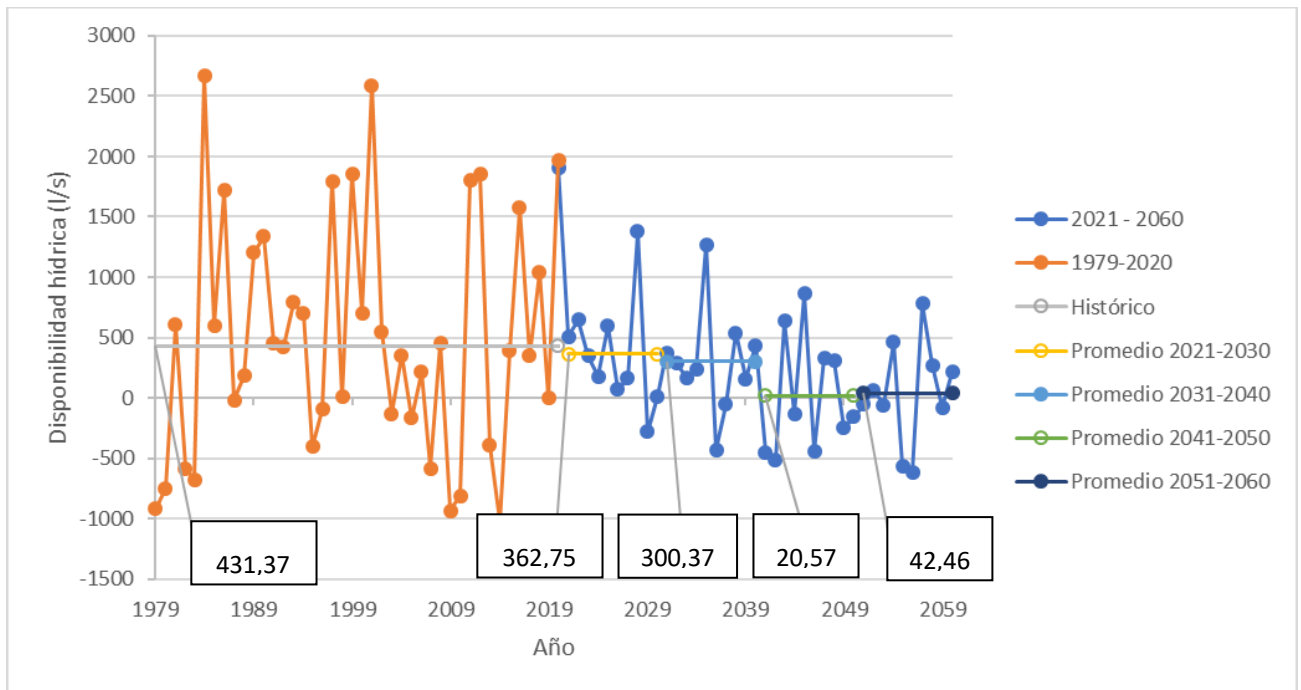
**Tabla 2-5: Evolución de la demanda.**

Fuente: Elaboración propia.

Año	Demanda (l/s)			Total
	Hasta estación Chilpe	Entre Chilpe y Conanoxa	Area restante cuenca de Río Camarones (sin quebrada de Chiza)	
<b>2020</b>	435.00	871.76	409.51	1716.27
<b>2030</b>	432.82	868.08	409.05	1709.95
<b>2050</b>	428.47	860.71	408.12	1697.31

#### 2.4.4 Balance hídrico

Los valores obtenidos para el balance hídrico se presentan en la Figura 2-4. Estos resultados consideran la disponibilidad hídrica una vez extraídos los derechos utilizados por cada subcuenca. Al comparar el periodo histórico y futuro se observa una disminución cercana a 250 l/s relacionada principalmente a la disminución de recursos hídrico. El análisis a nivel decadal muestra una condición crítica para los periodos 2041-2050 y 2050-2060, ya que la zona aguas abajo de la estación fluvimétrica Río Camarones en Conanoxa presenta valores de un orden de magnitud más bajos.



**Figura 2-4: Evolución de la disponibilidad hídrica.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3 Caracterización Hidrogeológica

En la siguiente sección se presenta en primer lugar un análisis de todos los antecedentes hidrogeológicos disponibles del área de estudio y luego los resultados de los trabajos en terreno realizados por DICTUC para caracterizar hidrogeológicamente la cuenca, incluyendo:

- Estudio geofísico de gravimetría y transiente electromagnético TEM.
- Catastro de 50 puntos hidrogeológicos importantes.
- Campaña de aforo de caudales en 15 puntos de importancia hidrogeológica, a lo largo del Río Camarones, Caritaya y Ajatama.

El basamento sobre el cual se emplazan los perfiles de estudio puede corresponder tanto a roca intrusiva, volcánica o sedimentarias antiguas, la cual se evidencia en el estudio gravimétrico como una unidad de mayor densidad que la del promedio de los sedimentos sobreyacentes, mientras que geoelectricamente se manifiesta con una resistividad mayor que la de los sedimentos.

Sin embargo, cuando la roca volcánica o sedimentaria antigua está saturada y/o alterada, puede presentar resistividades moderadas a bajas, lo que difiere del caso en que el basamento corresponde a un intrusivo (resistividades muy altas).

### **3.1 Resultados TEM**

Las diferentes secciones de los perfiles de resistividad realizadas por Geodatos pueden asociarse a distintas unidades geológicas a rangos de resistividad de la roca (interpretación geoelectrica de tipo hidrolitológica de los perfiles TEM. En el sector oeste del área de estudio se detectó basamento (Formación Cuya, lavas del Jurásico Medio, Jmc(a)).

### **3.2 Resultados gravimétricos**

En la zona oeste, los perfiles del estudio se emplazan sobre basamento correspondiente a rocas volcánicas jurásicas. Este basamento se expresa en la gravimetría con una mayor densidad que la densidad promedio de los sedimentos sobreyacentes. Sin embargo, en los estudios geoelectricos TEM la resistividad de la roca volcánica jurásica se manifiesta con una resistividad ligeramente mayor que la de los sedimentos (magnitud moderada a baja), por lo que la roca está saturada o alterada. Dado esto, para la interpretación gravimétrica se consideró la profundidad del substrato geoelectrico como información de control de la profundidad del substrato gravimétrico.

En la zona centro y noreste de la cuenca del Río Camarones, solo se observan depósitos y secuencias sedimentarias de distintas antigüedades, diferenciadas por su grado de consolidación y por ende un aumento en la densidad para los sedimentos más antiguos. En estas zonas se definió un interfaz que corresponde al límite entre sedimentos de distintas edades.

Las 54 líneas gravimétricas se presentan en el Anexo 5: Estudio gravimétrico, en formato modelo cuenca gravimétrico con ajuste de profundidad al basamento detectado por el TEM.

### **3.3 Campaña de aforo de caudales**

Se realizaron tres campañas de aforo y parámetros fisicoquímicos en la cuenca del Río Camarones durante las semanas del 19 de julio, 2 de agosto de 2021 y del 23 de agosto de 2021. El objetivo principal de esta campaña consistió en la medición en 15 puntos de interés hidrogeológico del caudal y parámetros fisicoquímicos a lo largo del Río Camarones, Ajatama y Caritaya en la zona norte de la cuenca. Las mediciones de caudal se realizaron con molinete OTT C2 y se utilizó un multiparámetro MP 9500 para obtener los parámetros fisicoquímicos, específicamente pH, temperatura del agua, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica. En la Figura 3-1 se presenta la ubicación de los 15 puntos donde se realizaron los aforos de caudal.



## 4 Modelo hidrogeológico conceptual

La confección del presente modelo hidrogeológico conceptual implicó la revisión detallada de los antecedentes de la región, ya sea sobre geología, hidrología, hidrogeología, calidad del agua, infraestructura hidráulica, entre otros.

Gracias a la magnitud y gran cobertura del estudio geofísico la geometría de los acuíferos en toda la cuenca estará caracterizada de forma adecuada. No obstante, hay que acotar que la cuenca no cuenta con suficientes perforaciones, especialmente a lo largo del curso del Río Camarones, que permitan validar los resultados de geofísica a partir de estratigrafías.

### 4.1 Unidades hidrogeológicas y tipos de acuíferos

A partir de las cartas geológicas de SERNAGEOMIN, antecedentes hidrogeológicos y las caracterizaciones hidrogeológicas anteriores (DOH-SMI, 2008; CNR-GeoHidrología, 2014; DGA-Icass, 2017), se clasificaron las unidades geológicas en 9 unidades hidrogeológicas (HU), siendo los acuíferos más importantes representados por las siguientes unidades hidrogeológicas:

- **HU1a:** Depósitos detríticos superficiales formados por procesos físicos en canales y planicies de inundación, los cuales muestran una baja o media consolidación. Los clastos por lo general muestran una buena selección y los contenidos de finos son menores. Se compone de depósitos fluviales y aluviales y tiene un carácter de acuífero libre. Son recargados por aguas hidrotermales y meteóricas.
- **HU2a y HU2b:** Acuífero de roca volcánica (muy) alterada y fracturada por actividad hidrotermal. Alta porosidad secundaria y se recargan mayormente por aguas hidrotermales. En las Lagunas de Amuyo se exhibe un comportamiento confinado artesiano, donde las aguas afloran en superficie y luego se vierten hacia el río Caritaya.
- **HU3a:** Depósitos sedimentarios semiconsolidados con mayores contenidos de arenas y gravas. Incluye los depósitos con mayor porosidad primaria de las Formaciones Macusa, el Diablo y Azapa. Pueden actuar posiblemente como acuíferos, cuando la unidad geológica se encuentra bajo el nivel de agua subterránea en la cuenca.



## **4.2 Caracterización de la geometría de los acuíferos**

### **4.2.1 Modelo geológico 3D**

Para modelar numéricamente el comportamiento del agua superficial y subterránea de la cuenca del Río Camarones se necesita una representación tridimensional (3D) de la hidrogeología. Esto requiere el desarrollo de un modelo geológico 3D, el cual puede ser importado en un modelo numérico de agua subterránea.

En esta sección se presenta la construcción de un modelo geológico actualizado de la zona de estudio a partir de todos los antecedentes disponibles de geología, geofísica e hidrogeología. El modelo 3D fue desarrollado usando el software internacional Leapfrog Works, un motor de modelación que permite construir modelos desde varias fuentes de información distintas, tales como información geológica y geofísica.

### **4.2.2 Geometría y caracterización de los acuíferos**

A partir de los resultados de geofísica, específicamente TEM y gravimetría, se logró interpretar los contactos de las distintas unidades geológicas del área de estudio, lo que, apoyado de mapas geológicos e interpretación de litología de sondajes a estratigrafía, permitió la generación de volúmenes de las unidades geológicas más importantes. El resultado de la modelación tridimensional de la cuenca del río Camarones se presenta en la Figura 1-1, que muestra la topografía y las unidades geológicas aflorantes según los mapas geológicos de SERNAGEOMIN.

La geología del subsuelo se presenta en las siguientes 12 secciones transversales y longitudinales. La ubicación de estos perfiles se muestra en la Figura 4-1. En ellos se presenta la geología perpendicular a la zona de desembocadura (Figura 4-2) y longitudinal al río Camarones entre la confluencia con Quebrada Chiza y la desembocadura (Figura 4-3). Se muestra también la geología en subsuperficie a lo largo del río Camarones aguas arriba de Cuya, entre 0 y 13,3 km aguas arriba de la confluencia del Río Camarones con Quebrada Chiza (Figura 4-4) y entre 13,3 y 16 km aguas arriba de esta confluencia (Figura 4-5). La sección transversal a esta zona baja-media del río Camarones se presenta en la Figura 4-6. La Figura 4-7 muestra un perfil geológico longitudinal de la zona del Río Camarones entre 16 a 25 km aguas arriba de la confluencia del Río Camarones con Quebrada Chiza. En la Figura 4-8 y Figura 4-9 se puede ver la geología en subsuperficie a lo largo del Río Camarones entre Conanoxa y Humayani. La Figura 4-10 y la Figura 4-11 representan el perfil geológico a lo largo del Río Camarones entre Taltape y Pachica, y entre Pachica e Illapata, respectivamente. Finalmente, la geología en subsuperficie para las zonas de Caritaya y Ajatama se presentan en la Figura 4-12 y Figura 4-13, respectivamente.

En la zona baja, incluyendo Quebrada Chiza y el río Camarones desde la desembocadura hasta 13 kilómetros aguas arriba de la confluencia con Quebrada Chiza, el basamento está representado por el contacto de depósitos fluviales con las lavas de la Formación Cuya (Jmc(a)) y por intrusivos del Jurásico (Complejo Plutónico Cuya Jsc, Intrusivo Hipabisal del Jurásico Superior Jsch, Complejo Plutónico Chuquichambe Jsh). Se observa que las lavas de la Formación Cuya están muy fracturadas y saturadas, lo que constituye un acuífero. La profundidad de este acuífero en varios sectores no pudo ser alcanzada con las estaciones TEM.

En la zona media baja del río Camarones, entre los 13 y 25 km aguas arriba de la confluencia del río Camarones con la Quebrada Chiza, el contacto roca-relleno se presenta entre los depósitos fluviales y los intrusivos del Cretácico y las lavas de la Formación Suca, las cuales en algunos sectores se presenta fracturadas y saturadas.

En la zona central del río Camarones, desde 25 km aguas arriba de la confluencia del Río Camarones y Quebrada Chiza hasta Taltape, no se detectó basamente geoeléctrico, por lo que los modelamientos de gravimetría indican el contacto de los depósitos fluviales con la Formación Azapa de depositación de baja energía (OMa(b), arcillas). El contraste de densidad promedio entre estas dos unidades fue de  $-0,6 \text{ gr/cc}$ .

En la Quebrada Humayani el contacto de los depósitos fluviales se da con los depósitos de baja energía de la Formación Azapa (OMa(b), arcillas) e intrusivos del cretácico. El contraste de densidad promedio entre OMa(b) y los depósitos fluviales fue de  $-0,7 \text{ gr/cc}$ .

En la zona de Caritaya, el contacto roca-basamento fue interpretado a partir de resultados de gravimetría y representado por el contacto de los depósitos detríticos (depósitos fluviales y aluviales) con rocas volcánicas (Secuencias Volcánicas del Mioceno, Mmv y Msv), con diferencias de densidad de  $-0,55 \text{ gr/cc}$  (Densidad promedio sedimentos – Densidad promedio basamento). Bajo las secuencias volcánicas, se observan capas de ignimbritas muy alteradas y fracturadas, en este caso, las Ignimbritas Sucuna (Omo3a), Ignimbrita Nama (Min) y Areniscas de la Formación Mauque (Mmm). Esta última unidad está asociada a una gran alteración en los mapas geológicos de SERNAGEOMIN.



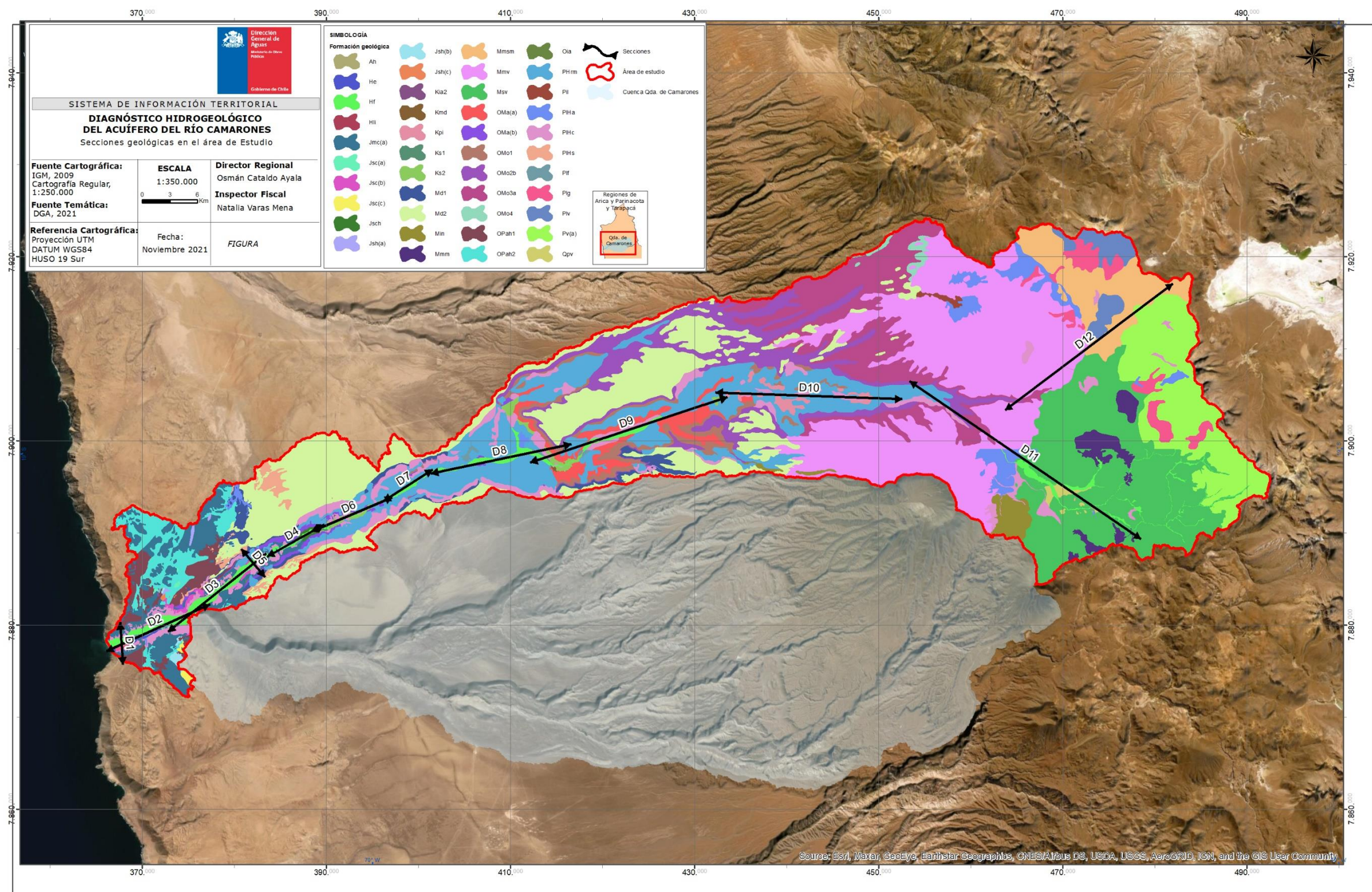
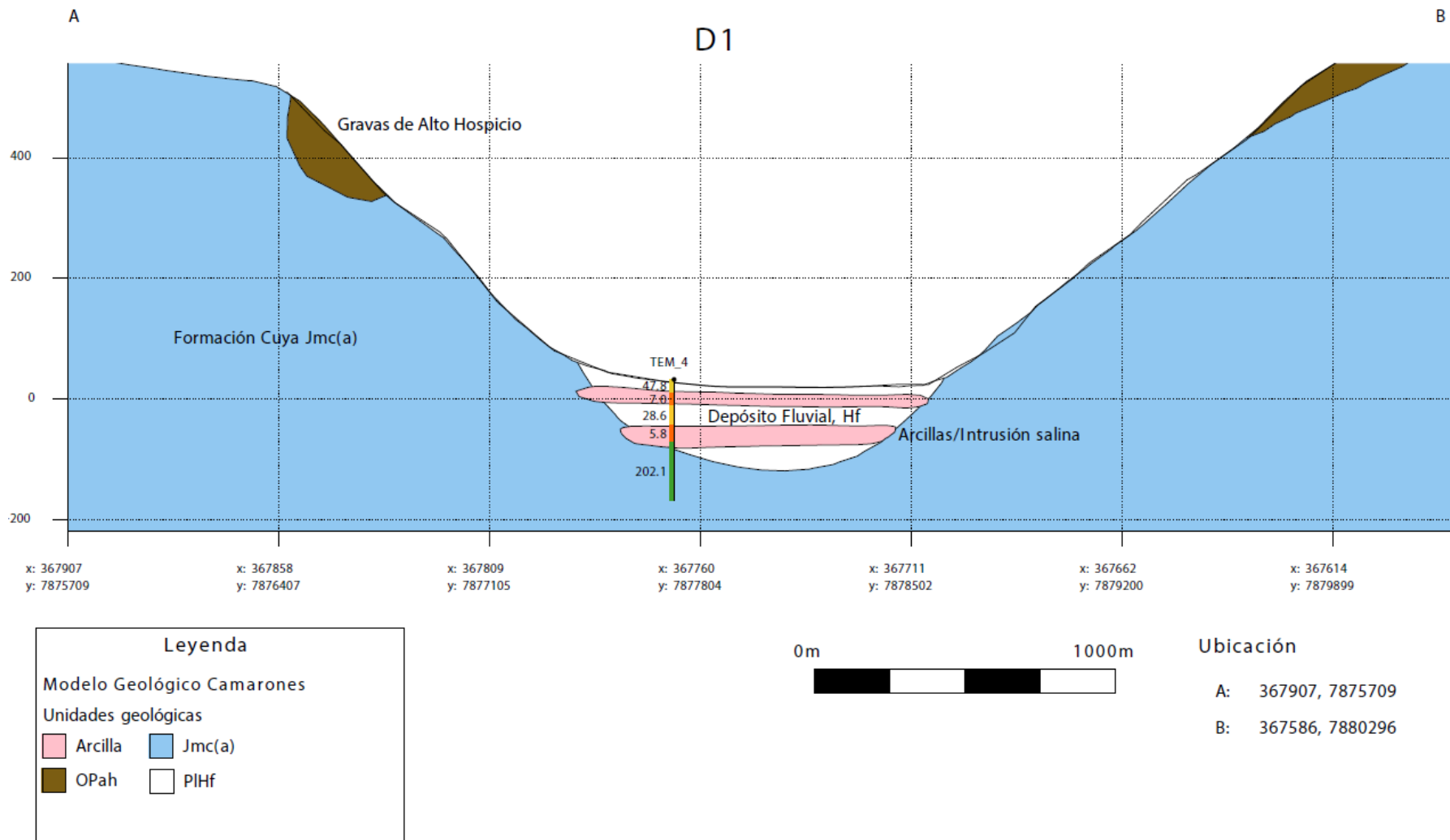
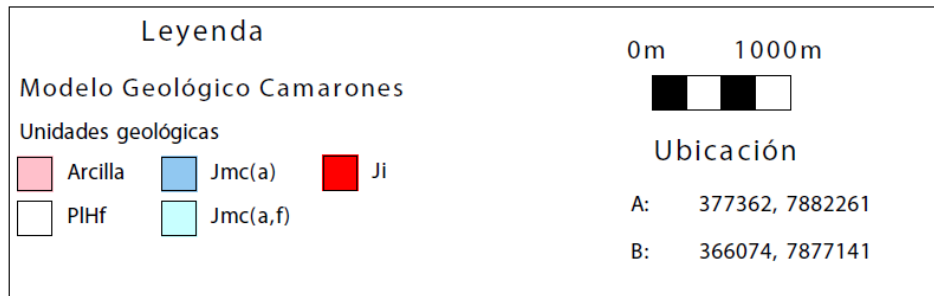
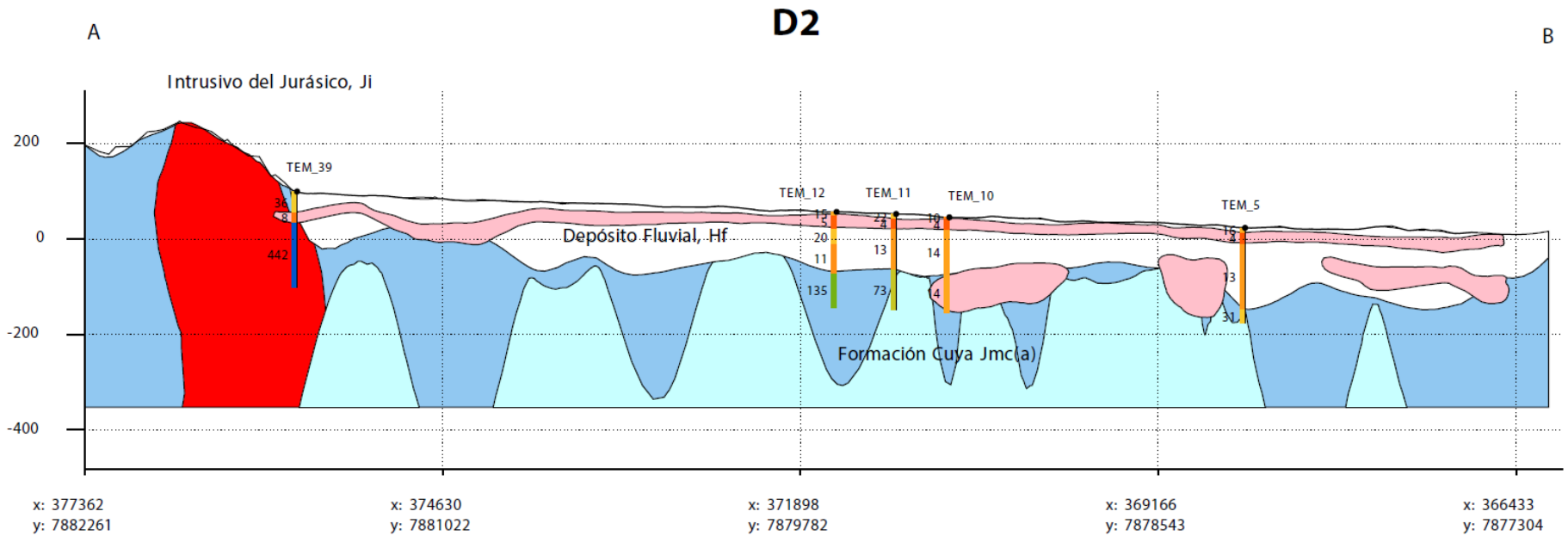


Figura 4-1: Ubicación de las doce secciones geológicas del modelo geológico 3D.  
 Fuente: Elaboración propia

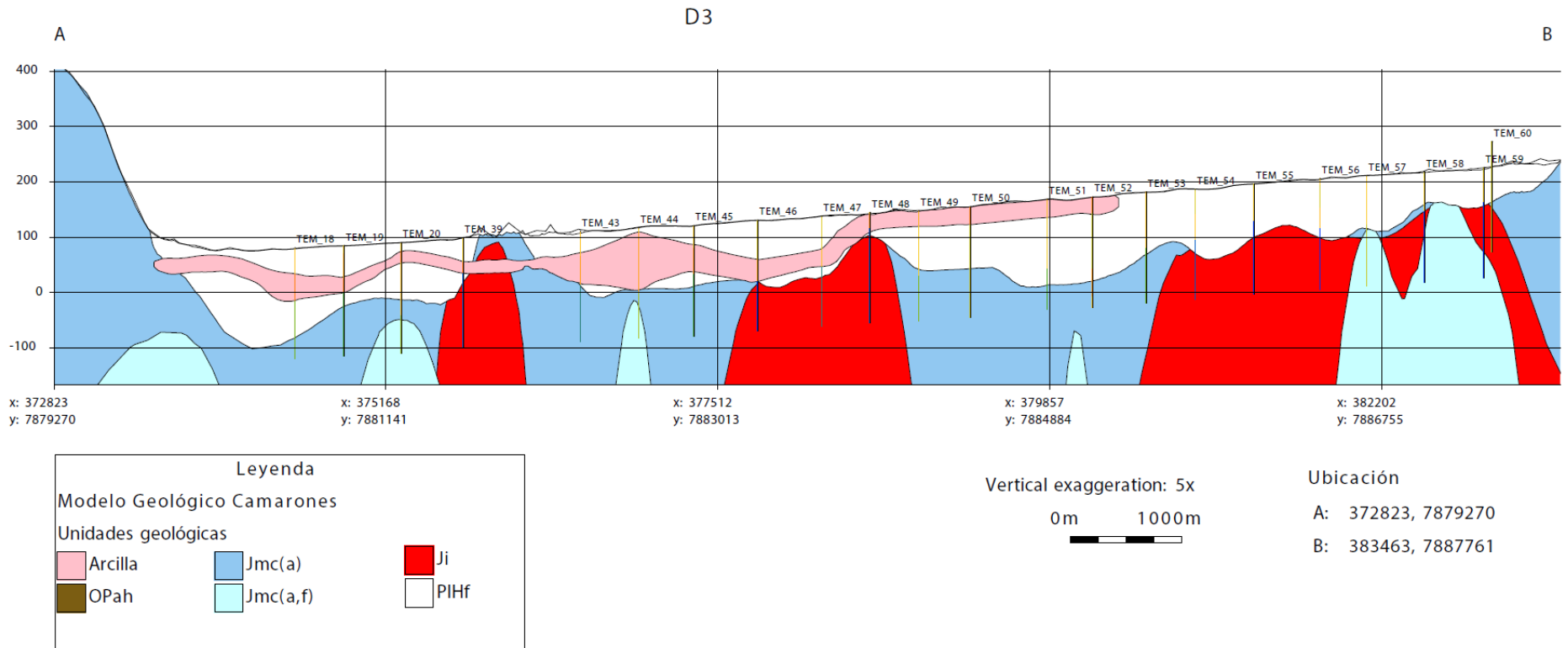




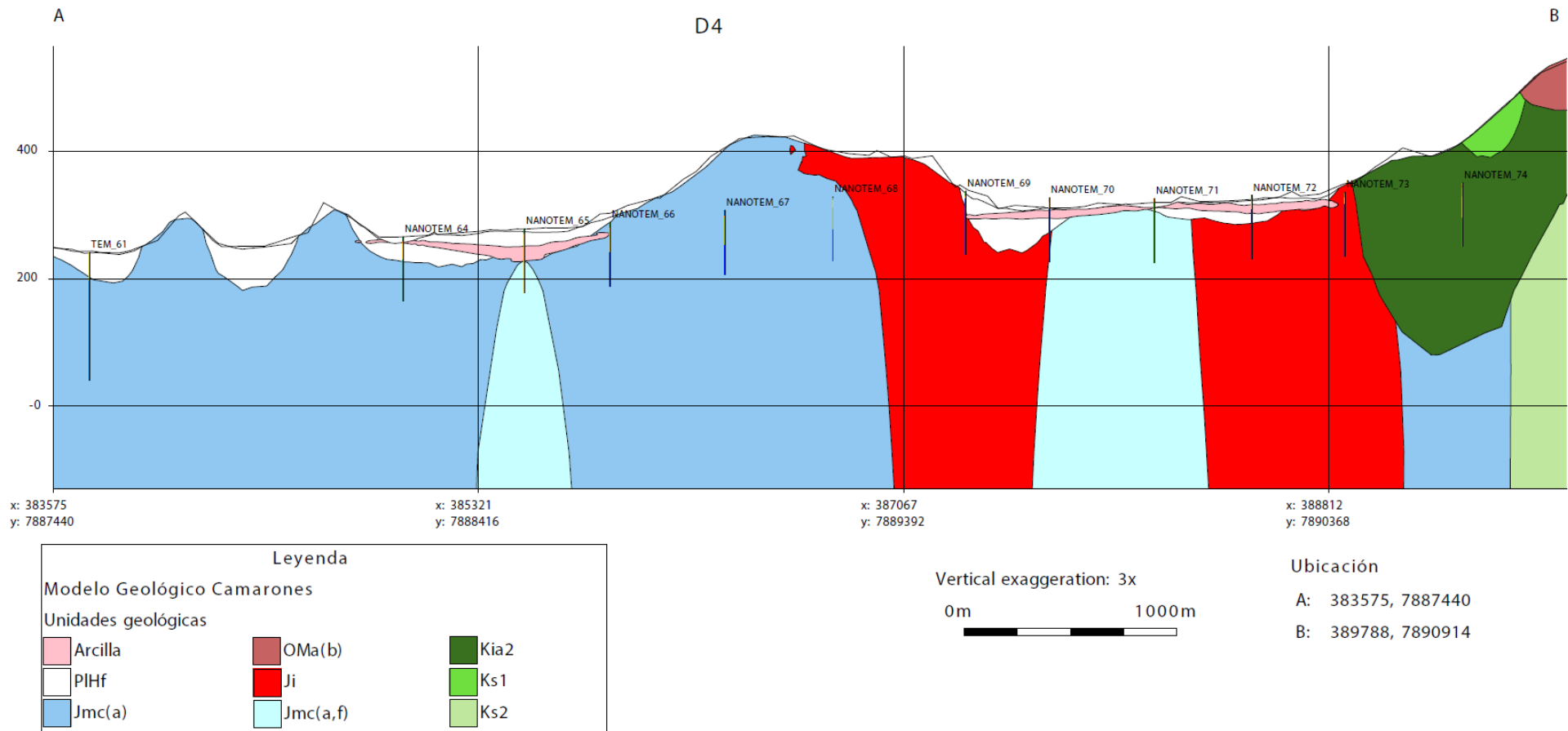
**Figura 4-2: Sección geológica D1 transversal a la desembocadura del Río Camarones**  
 Fuente: Elaboración propia



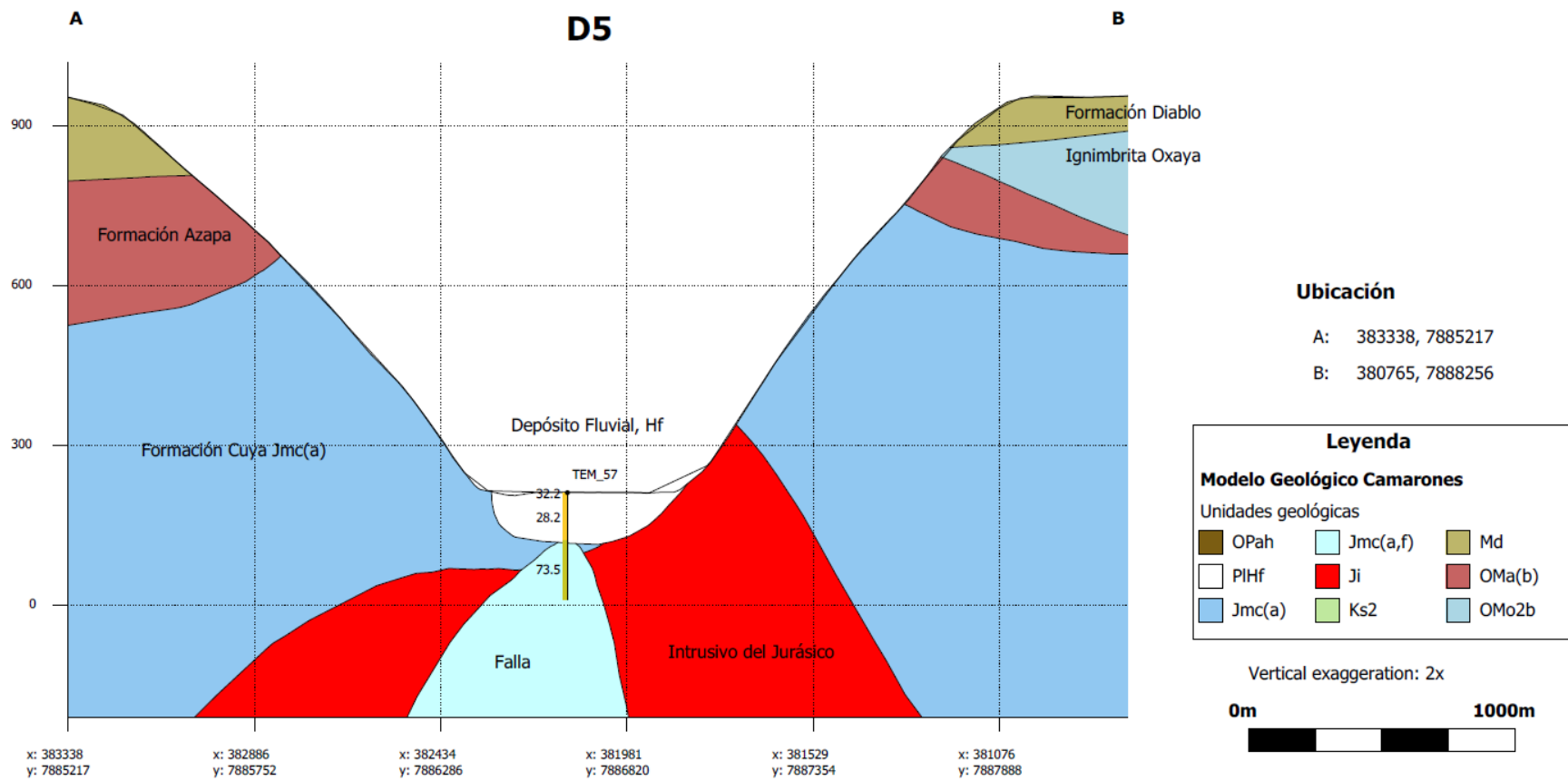
**Figura 4-3: Sección geológica D2 longitudinal al Río Camarones entre la confluencia con Quebrada Chiza y la desembocadura.**  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 4-4: Sección geológica D3 longitudinal al Río Camarones, entre 0 y 13,3 km aguas arriba la confluencia con Quebrada Chiza.**  
Fuente: Elaboración propia

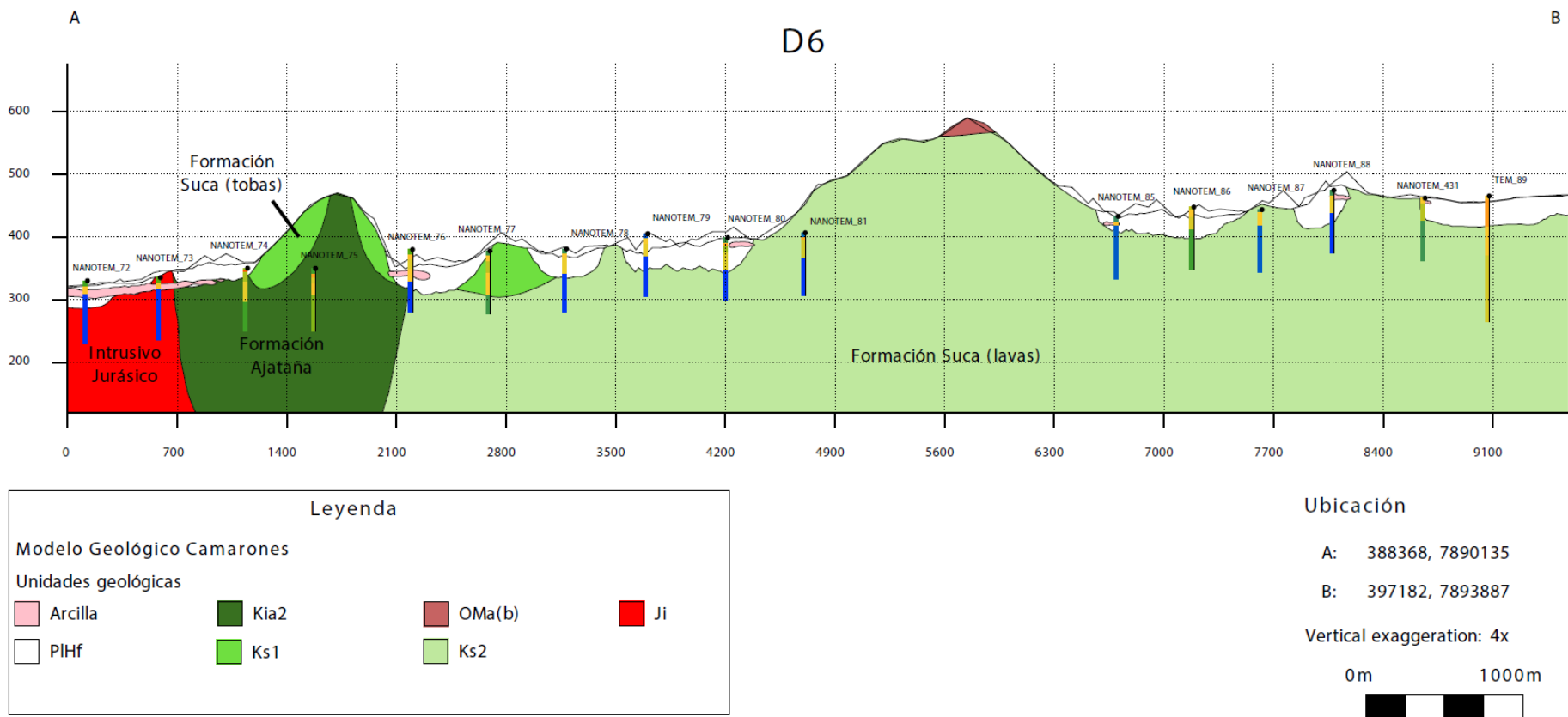


**Figura 4-5: Sección geológica D4 longitudinal al Río Camarones, entre 13,3 y 16 km aguas arriba la confluencia con Quebrada Chiza.**  
 Fuente: Elaboración propia

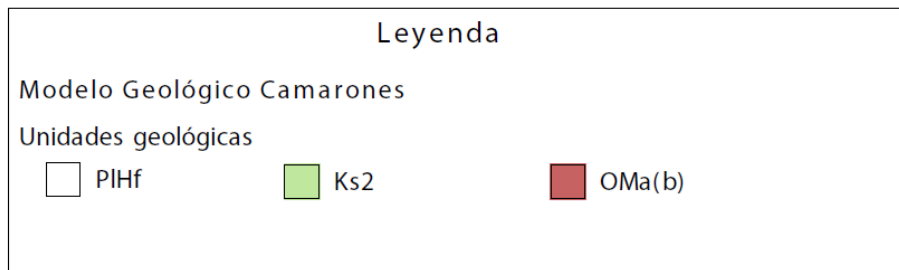
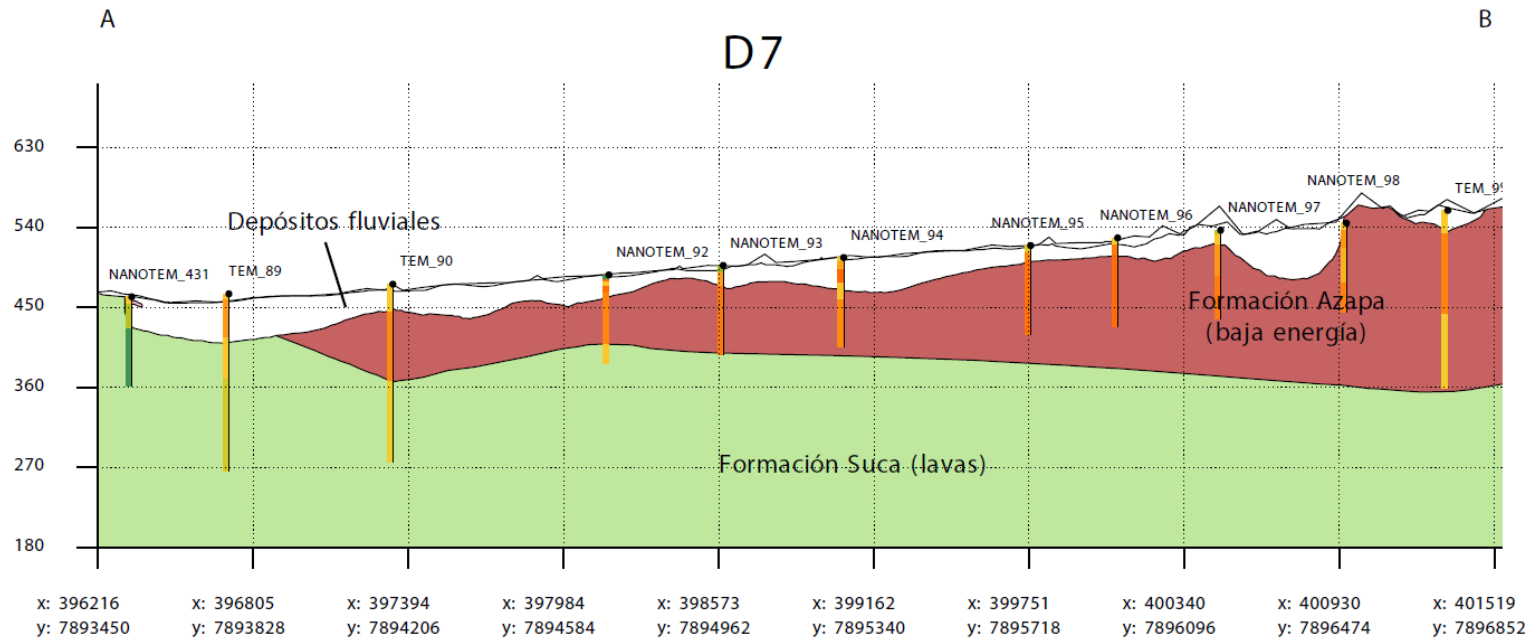


**Figura 4-6: Sección geológica D5 transversal al Río Camarones en la zona baja-media.**  
Fuente: Elaboración propia





**Figura 4-7: Sección geológica D6 longitudinal al Río Camarones. A una distancia aproximada  $x = 8.000$  m se encuentra la estación meteorológica Conanoxa.**  
 Fuente: Elaboración propia



**Ubicación**

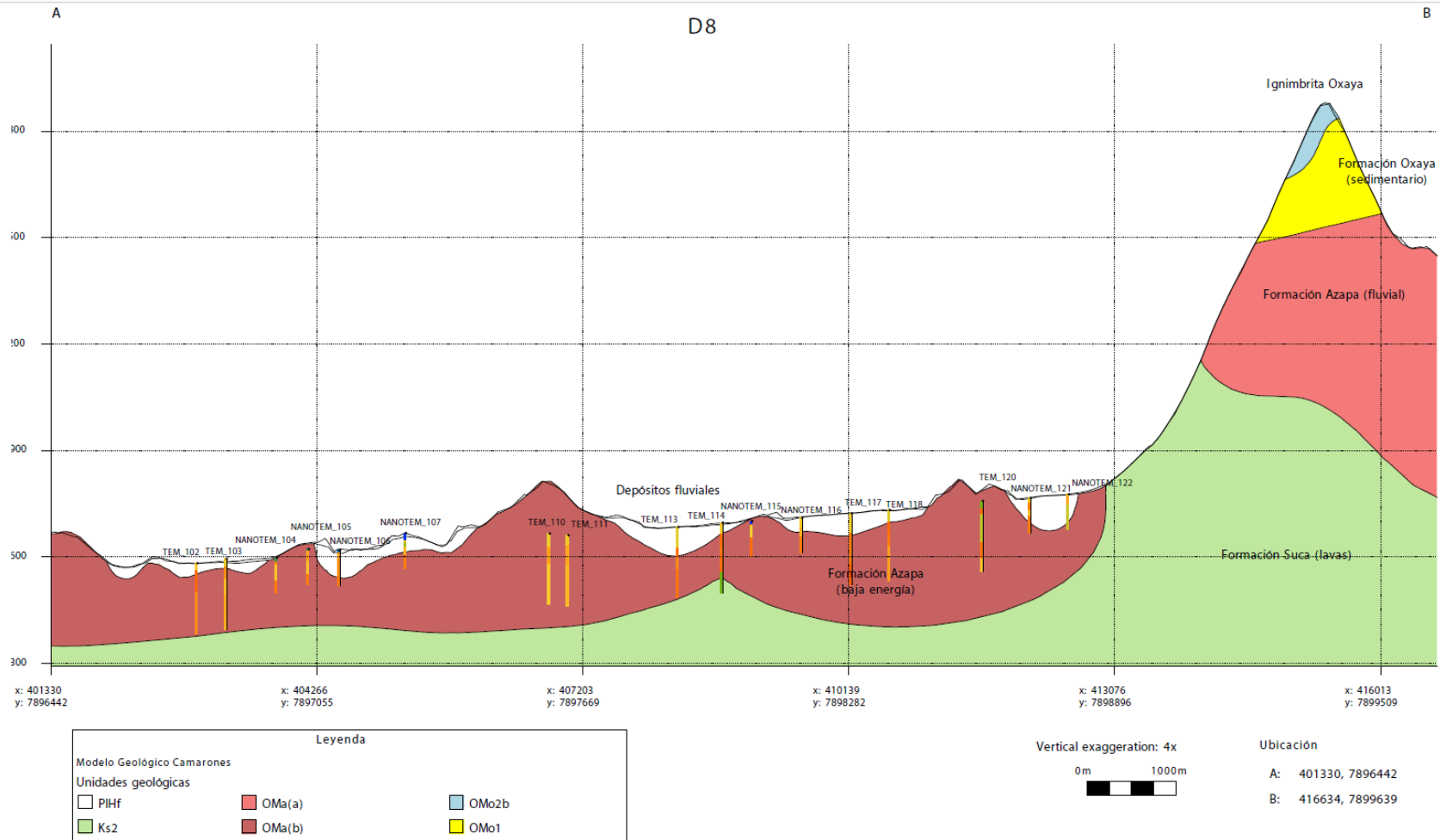
A: 396216, 7893450

B: 401549, 7896871

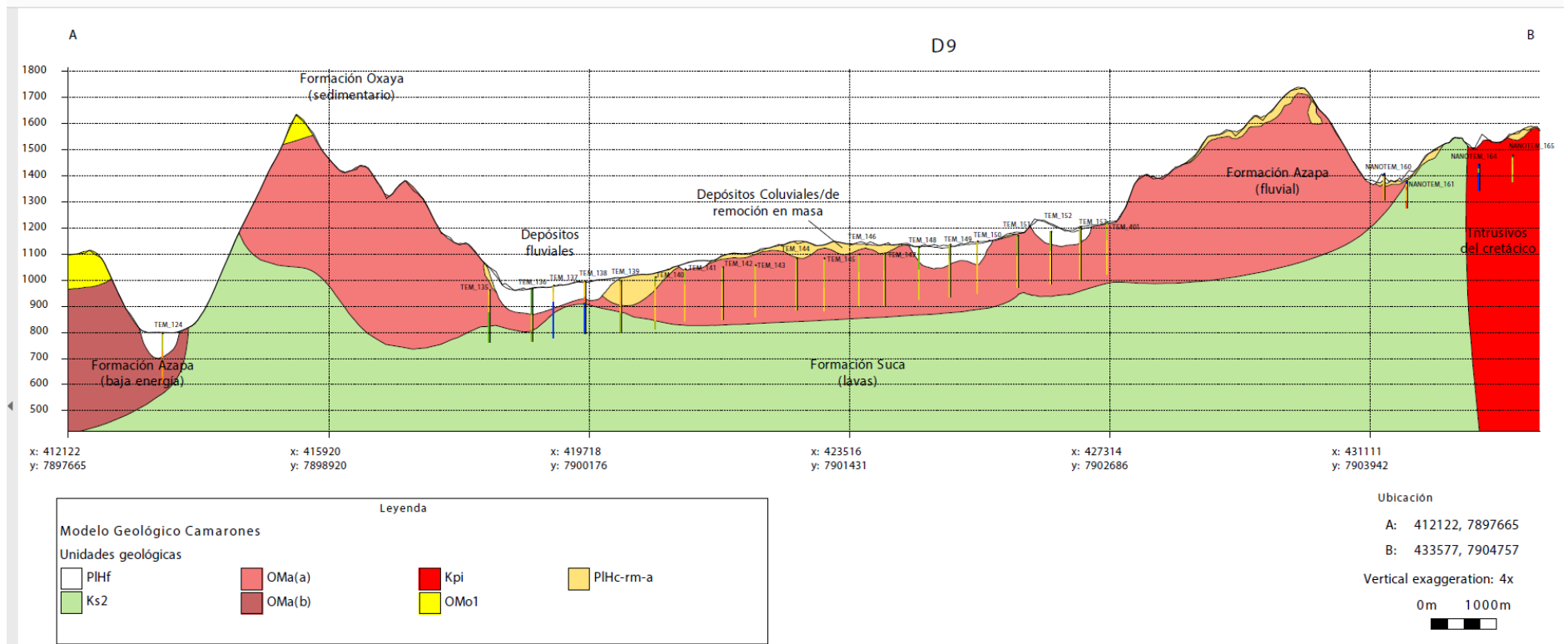


**Figura 4-8: Sección geológica D7 longitudinal al Río Camarones entre Conanoxa y Humayani (parte 1).**

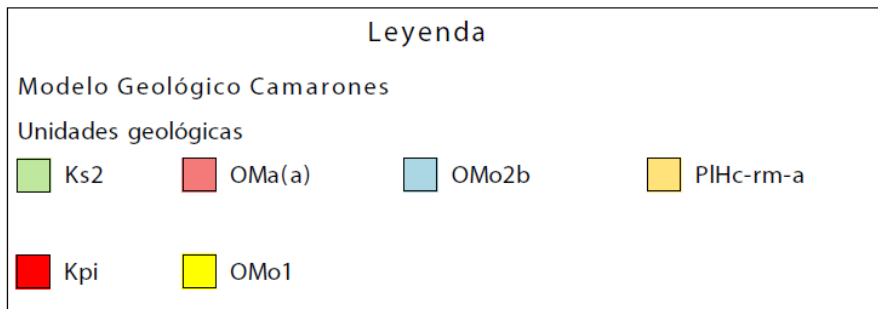
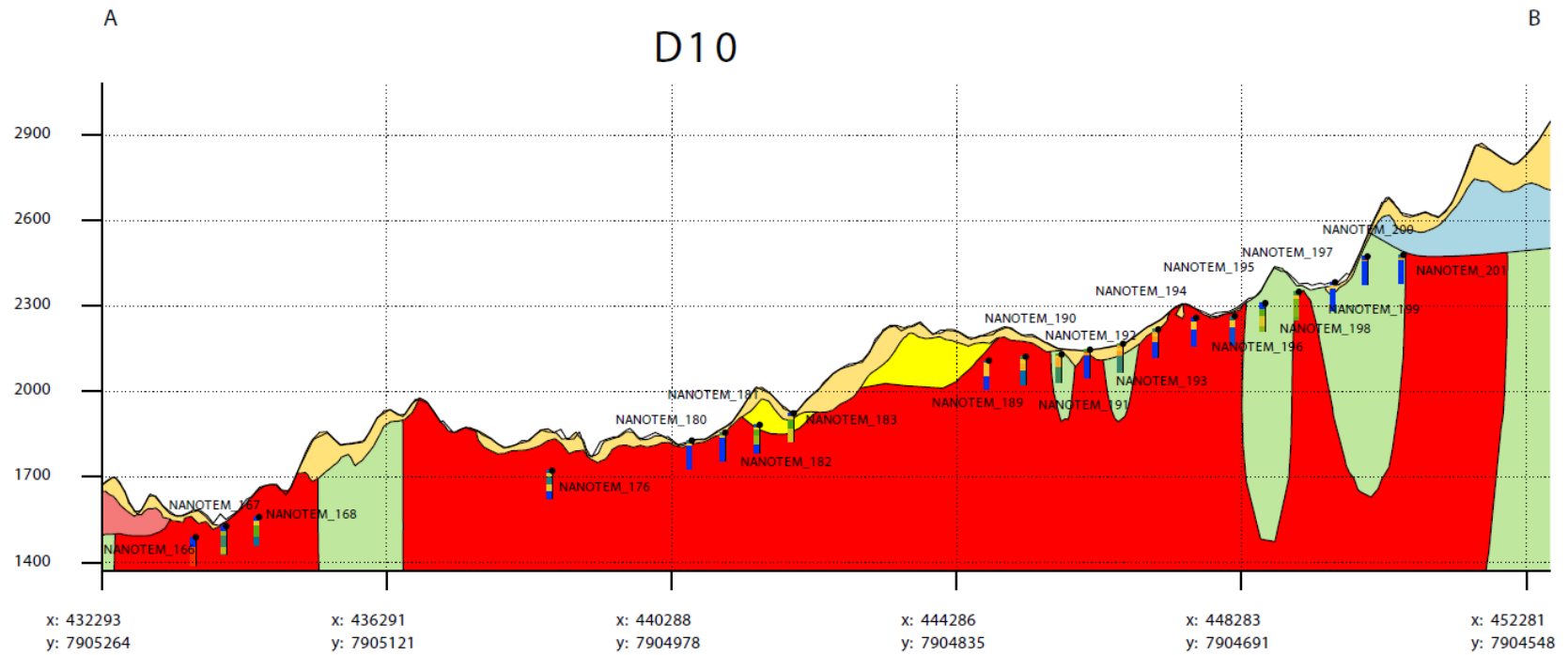
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4-9: Sección geológica D8 longitudinal al Río Camarones entre Conanoxa y Humayani (parte 2).**  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 4-10: Sección geológica D9 longitudinal al Río Camarones entre Taltape y Pachica.**  
Fuente: Elaboración propia



**Ubicación**

A: 432293, 7905264

B: 452613, 7904536

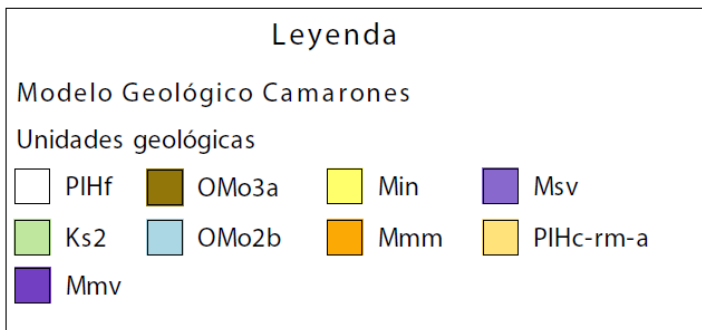
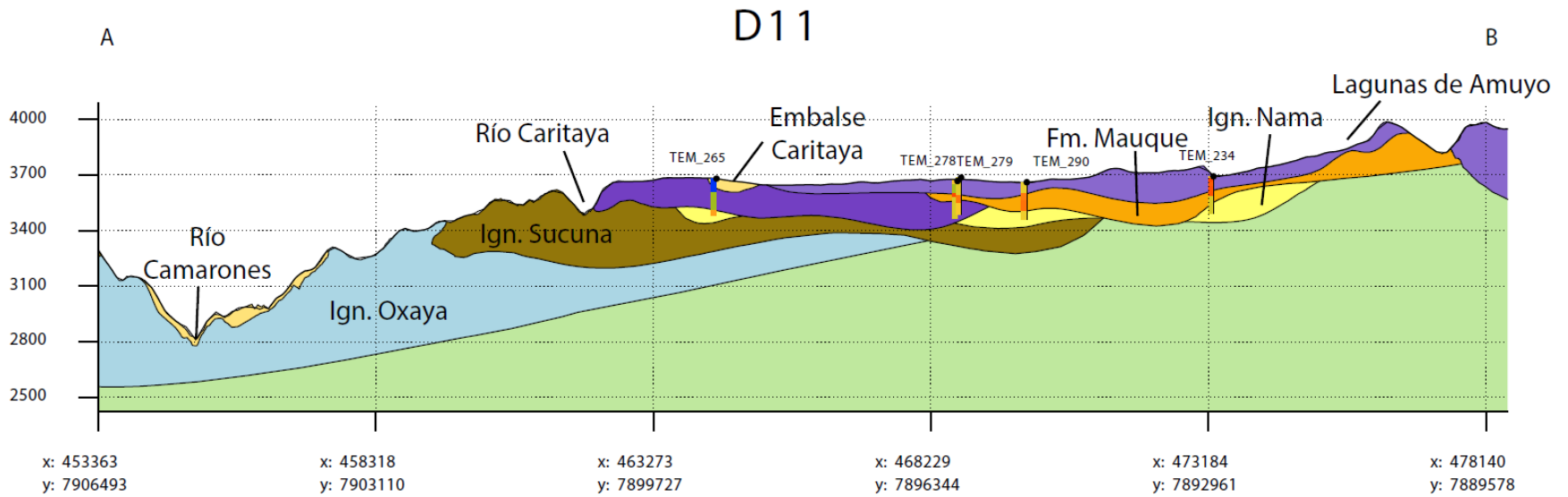
Vertical exaggeration: 4x

0m 4000m



**Figura 4-11: Sección geológica D10 longitudinal al Río Camarones entre Pachica e Illapata.**

Fuente: Elaboración propia



**Ubicación**

A: 453363, 7906493

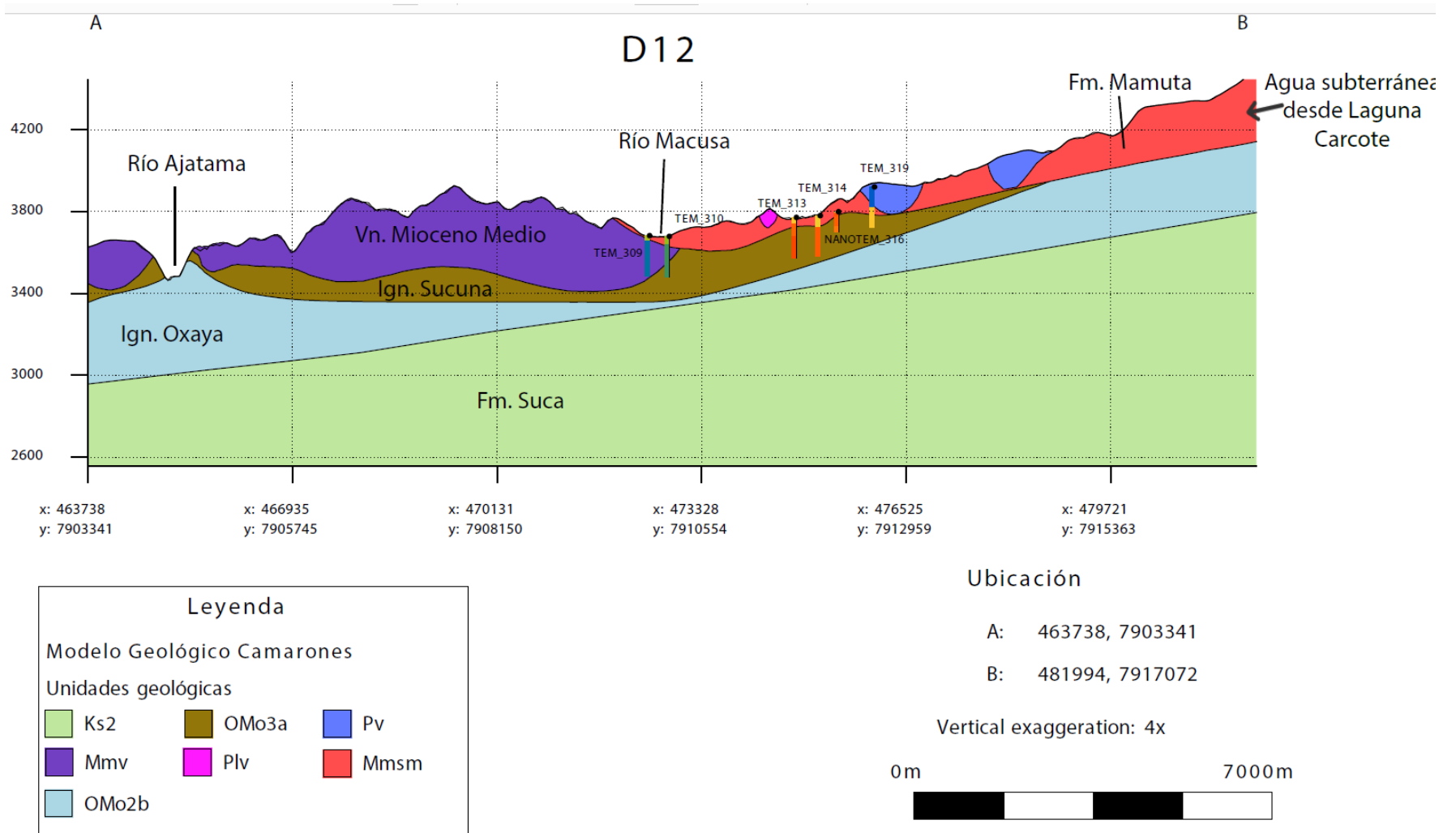
B: 478518, 7889320

Vertical exaggeration: 4x



**Figura 4-12: Sección geológica D11 en sector Caritaya.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4-13: Sección geológica D12 en sector Ajatama.**

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.1 Sector entre la confluencia de Quebrada Chiza con el Río Camarones hasta la desembocadura

Este sector se ve representado por la Figura 4-2 y la Figura 4-3, de los cuales se interpreta lo siguiente:

- No se encontró basamento de alta resistividad durante la campaña geofísica hasta los 200 m de profundidad de investigación. La Formación Cuya (lavas, Jmc(a)) es la unidad geológica más profunda alcanzada, la cual se observa a aproximadamente a 80-150 m de profundidad. Esta unidad presenta una resistividad muy baja, lo que indica que la roca está extremadamente fracturada, alterada y saturada. Se observan zonas de muy baja resistividad correspondientes a fallas.
- El basamento, si bien no fue encontrado, correspondería a lavas de la Formación Cuya (Jmc(a)) no fracturadas e intrusivos del Jurásico.
- Los depósitos fluviales se presentan saturados y la napa cercana a la superficie. Según catastro, el nivel de la napa está a menos de 10 m de profundidad a lo largo del río Camarones, excepto para el pozo APR Cuya, ubicado en la subcuenca de Quebrada Chiza, donde el nivel está a casi 22 m de profundidad.
- El acuífero de depósitos fluviales presenta intrusión salina y arcillas. El espesor saturado de este acuífero es de entre los 80 y 120 m. En los primeros 20 metros aproximadamente se presentan sedimentos más gruesos, seguidos por una capa de arcillas de aproximadamente 20 metros de espesor. Finalmente, se presenta una capa de sedimentos de grano fino a medio, de alrededor de 60 a 80 metros.
- El acuífero de roca volcánica fracturada de las lavas de la Formación Cuya presenta grano medio a grueso y subyace el acuífero de depósitos fluviales. La potencia de este acuífero es de al menos 100 metros. En zonas muy falladas se observa posible presencia de arcillas (resistividades menores a 10 ohm-m).

#### 4.2.2.2 Quebrada Chiza

Se presenta un perfil transversal de la geología e hidrogeología de la zona de Quebrada Chiza. En esta zona se observó lo siguiente:

- A partir de los resultados de las estaciones TEM 33 y 34, se infiere la presencia de Falla Chiza, la cual indica el contacto entre las unidades geológicas Jmc(a) y Jmc(b), siendo esta última unidad de mayor resistividad. Las lavas de la Formación Cuya (Jmc(a)) en Quebrada Chiza se encuentran con un menor grado de alteración, a diferencia de la que se encuentra aguas abajo de la confluencia entre el Río Camarones y Quebrada Chiza, la cual se encuentra saturada, muy fracturada y alterada.



- La presencia de fallas en esta zona genera la intrusión de la Formación Cuya por intrusivos del Jurásico, es decir, el Complejo Plutónico Cuya (Jsc) y los Intrusivos Hipabisales del Jurásico Superior (Jsh).
- El estrato de depósitos fluviales se encuentra seco en los primeros 50-90 metros de profundidad. A medida que se avanza aguas arriba de Quebrada Chiza, la napa se va acercando a la superficie. Se tienen alrededor de 60 m de depósitos de grano medio-grueso saturado, cuyas **aguas tendrían una buena calidad**.

#### 4.2.2.3 Río Camarones entre la confluencia con Quebrada Chiza hasta 16 km aguas arriba de esta confluencia.

Esta zona está representada por la Figura 4-4 y la Figura 4-5. De la información recopilada se puede mencionar lo siguiente:

- En los primeros 2,5 km aguas arriba de la confluencia Chiza-Camarones, se presenta un estrato de arcillas a más de 40 m de profundidad. Este estrato tiene aproximadamente 60 m de espesor.
- Entre los 2,5 y 5 km aguas arriba de la confluencia Chiza-Camarones, el estrato de arcillas se encuentra en superficie y presenta aproximadamente 30 m de espesor.
- El estrato de depósitos fluviales tiene un espesor de alrededor de 100 a 120 metros y disminuye progresivamente hacia aguas arriba, hasta alcanzar los 40 metros. El material es de grano fino a medio. Se observan espesores saturados del acuífero fluvial de entre 90 a 50 m, disminuyendo hacia aguas arriba.
- El basamento está conformado por lavas de la Formación Cuya (Jmc(a)), la cual se encuentra fracturada y alterada en algunos sectores, donde correspondería a acuíferos locales. Se observan fallas e intrusión del Complejo Plutónico Cuya a 6 km aguas arriba de la confluencia.

#### 4.2.2.4 Río Camarones entre los 16 y 26 km aguas arriba de la confluencia Chiza-Camarones

La Figura 4-7 presenta la sección geológica longitudinal del Río Camarones entre los 16 y los 26 km aguas arriba de la confluencia Chiza-Camarones. A partir de los resultados del estudio se concluye que:

- Posiblemente existe un acuífero detrítico fluvial de importancia hidrogeológica baja-media con un espesor promedio aproximado de 35 m. La napa estaría a 7-10 m de profundidad, lo que daría un espesor saturado de 25 m.
- Se presentan acuíferos locales y aislados de la Formación Ajataña (Kia2) de 50 m de espesor saturado y grano grueso y las tobas de la Formación Suca (Ks1) de 20 a 30 m de espesor saturado.

- El basamento corresponde a las lavas de la Formación Suca no fracturadas. Aguas arriba de la estación Fluviométrica Conanoxa, las lavas de la Formación Suca (Ks2) se presentan altamente fracturadas, y correspondería a 1 km de un acuífero a 100 m de profundidad de al menos 100 m de espesor saturado y grano medio a grueso.

#### **4.2.2.5 Río Camarones entre 26 km aguas arriba de la confluencia Chiza-Camarones hasta la confluencia Humayani-Camarones.**

A continuación, se presenta la interpretación hidrogeológica de la sección entre los 26 km aguas arriba de la confluencia Chiza-Camarones y la confluencia de la Quebrada Humayani al norte con Camarones, a la altura de la localidad de Taltape (Figura 4-8 y Figura 4-9):

- El acuífero fluvial es principalmente de grano fino en la parte más baja de esta sección y aumenta a grano medio en la zona más alta de esta sección. Los espesores varían entre los 20 a 50 m y la napa se encontraría cercana a la superficie cerca del río.
- Bajo el acuífero fluvial se observaron resistividades muy bajas, menores a 10 ohm-m, lo que indica presencia de arcillas y está relacionado a limolitas de la Formación Azapa de depositación de baja energía (OMa(b)). Este estrato correspondería a una zona impermeable de nulo potencial hidrogeológico.
- Bajo la Formación Azapa de depositación de baja energía se encontrarían las lavas de la Formación Suca, que representarían el basamento.

#### **4.2.2.6 Río Camarones entre la confluencia Humayani-Camarones y Pachica.**

La Figura 4-10 presenta la interpretación geológica del sector del Río Camarones entre la confluencia del Río Camarones con la Quebrada Humayani hasta Pachica. Se concluye que:

- Posiblemente existe un acuífero fluvial de variado espesor de grano grueso a medio. En las zonas baja y alta de esta sección, afloran las lavas de la Formación Suca (Ks2) y es aquí donde el espesor del acuífero fluvial se ve reducido entre 15 y 40 m. En la zona media de la sección, el acuífero fluvial tiene una alta importancia hidrogeológica y alcanza espesores de entre 70 y 100 m (entre Pampanune hasta 5 km aguas abajo).
- Bajo los depósitos fluviales se presenta un acuífero de importancia hidrogeológica media, representado por la formación sedimentaria Azapa de origen fluvial (OMa(a)). Este acuífero es de grano fino/medio y tiene al menos 120 m de espesor saturado.
- El basamento está representado por las lavas de la Formación Suca (Ks2) y por los intrusivos del Cretácico en la zona alta de la sección presentada.

#### 4.2.2.7 Río Camarones entre Pachica e Illapata.

La Figura 4-11 muestra la geología en subsuperficie del sector entre Pachica e Illapata. A partir de la interpretación hidrogeológica se puede mencionar lo siguiente:

- En este sector predomina el afloramiento de intrusivos del Cretácico, los cuales corresponden al basamento, por lo que no hay almacenamiento ni transmisión de agua subterránea.
- El acuífero de depósitos coluviales y de remoción en masa no presentan una importancia hidrogeológica alta, los espesores de los sedimentos son bajos, de entre 10 a 30 m de espesor. Existe presencia de arcillas y materiales de grano fino a medio.
- Posiblemente se presenta un acuífero local de grano grueso de los depósitos sedimentarios de la Formación Oxaya (OMO1).

#### 4.2.2.8 Sector del Río Caritaya.

La geología del sector del Río Caritaya y el embalse homónimo se presenta en la Figura 4-12. A partir de la modelación 3D de la geología y resultados geofísicos se puede establecer que:

- Aguas abajo del tranque Caritaya se presenta en profundidad la Ignimbrita Sucuna (Omo3a) con resistividades entre 20 a 100 Ohm-m. Sobre esta unidad se presentan lavas bien preservadas del Mioceno Medio (Mmv).
- Aguas arriba del tranque se presenta un traslape entre las unidades Mmv (inferior) y las lavas del Mioceno Superior (Msv). Estas unidades presentan resistividades más bajas a medida que se avanza aguas arriba del tranque, lo que significa alteración y fracturamiento. Bajo estas dos unidades se encuentra la Unidad Formación Mauque (Mmm), la cual presenta alta alteración hidrotermal y resistividades por lo general menores a 10 Ohm-m.
- En el sector aguas abajo del Embalse Caritaya y al noroeste de este se observa un acuífero confinado de la Ignimbrita Sucuna de la Formación Oxaya a una profundidad de unos 130 metros a lo largo del río y 100 metros en la zona norte del embalse. Este acuífero tiene espesores saturados de al menos 65 m.
- En la zona media del embalse Caritaya se observa desconfinamiento del acuífero de la Ignimbrita Sucuna y conexión con la superficie, donde la roca volcánica se encuentra profundamente alterada y fracturada. La alteración se acerca a la superficie a medida que se avanza aguas arriba del Río Caritaya, hasta llegar a las Lagunas de Amuyo. La napa está muy cercana a la superficie del terreno.
- El acuífero fluvial tiene una importancia hidrogeológica menor, al tener espesores entre 5 a 10 m.

- Acuíferos colgados presentes en depósitos aluviales y coluviales en las laderas de los volcanes tienen una importancia hidrogeológica media, siendo de grano medio a grueso y teniendo espesores entre 15 a 30 m.

#### 4.2.2.9 Sector del Río Ajatama-Macusa

Finalmente, la Figura 4-13 muestra la interpretación geológica del sector de los Ríos Ajatama y sus tributarios. A partir de esta información se concluye que:

- En el sector del Río Ajatama en el sector del cajón, se presentaría un acuífero de Ignimbrita Sucuna (OMo3a) de al menos 80 m de espesor saturado. La napa estaría a 12 m de profundidad. La permeabilidad de este acuífero sería media y se observan alteraciones.
- En el sector del Río Ajatama antes de la confluencia con la Quebrada Parcohaylla, se observa un acuífero de roca volcánica fracturada y alterada (Mmv) de grano medio a grueso, con un espesor saturado entre 25 y 40 m.
- En el sector del Río Macusa, se observa un acuífero superficial de la Formación Macusa con espesores saturados importantes entre 80 y 120 m. Bajo este acuífero de la Formación Macusa se presenta un acuífero confinado y muy alterado en Ignimbrita Sucuna con al menos 80 m de espesor saturado.
- En las zonas laterales de las secuencias volcánicas del Plioceno (Plv), en la misma Formación Macusa se detectó alta actividad hidrotermal y alteraciones, que le darían alta permeabilidad a esta unidad.
- En el sector del Río Laruma, se interpreta la presencia de un acuífero a 40 m de profundidad en posiblemente la Ignimbrita Sucuna. El espesor saturado sería de mínimo 50 m.

### 4.3 Balance hídrico

A partir de los datos históricos (1979 a 2020) de precipitación y evaporación e información recopilada en las campañas de terreno de catastro y geofísica, se estimaron los valores promedios históricos de los componentes de entradas y salidas al sistema hidrogeológico (Tabla 4-1).

Se observa que las entradas y salidas son estimadas en 2.231,6 l/s. Con respecto a las entradas, la mayor parte proviene de recarga por precipitación (2.204,8 l/s), seguida por entradas de agua subterránea desde las subcuencas de Chiza y cuenca de la Laguna Carcote, que suman en total un estimado de 26,8 l/s.

La mayor salida se produce del acuífero al río, cuya componente neta es estimada en 1.709,7 l/s. Además, el total de agua subterránea estimada que descarga al mar es de 275,2 l/s. En la zona baja se producen las extracciones del acuífero por bombeo, las cuales a partir

de datos de catastro se estimaron en 162,8 l/s. Finalmente, la evaporación desde cuerpos de agua superficiales se estimó en 84 l/s.

**Tabla 4-1: Balance hídrico del sistema hidrogeológico para el periodo histórico (1979-2020).**

<b>Balance Sistema Hidrogeológico</b>	
<b>Entradas (l/s)</b>	
Recarga por precipitación	2204,84
Recarga desde Subcuenca Qda. Chiza	21,90
Recarga desde cuenca Laguna Carcote	4,90
<b>Total entradas</b>	<b>2231,64</b>
<b>Salidas (l/s)</b>	
Evaporación desde cuerpos de agua superficiales	84,00
Bombeo de pozos	162,80
Conexión Río-Acuífero	1709,68
Salida de agua subterránea al mar	275,16
<b>Total salidas</b>	<b>2231,64</b>

Además, se determinó el balance hídrico del río Camarones y todos sus afluentes para el periodo histórico comprendido entre 1979 y 2020 (Tabla 4-2). Del balance se establece a lo largo del río Camarones, este recibe un aporte neto de 1.709,7 l/s desde la serie de acuíferos presentes en la cuenca del Río Camarones. La salida al mar se estimó en 156,2 l/s, lo que da una estimación de extracciones desde bocatomas en la cuenca de 1.553.5 l/s.

**Tabla 4-2: Balance hídrico del río Camarones y afluentes para el periodo histórico (1979-2020).**

<b>Balance Río</b>	
<b>Entradas (l/s)</b>	
Conexión Río-Acuífero	1709,68
<b>Total entradas</b>	<b>1709,68</b>
<b>Salidas (l/s)</b>	
Extracciones superficiales	1553,47
Salida del Río al mar	156,21
<b>Total salidas</b>	<b>1709,68</b>

## **5 Recomendaciones, brechas y acciones de mejora**

A continuación, se presentan recomendaciones para disminuir la brecha de información hidrogeológica e hidrológica en la cuenca del Río Camarones, los cuales se dividen en hidrología, hidrogeología y calidad del agua.

## 5.1 Hidrología

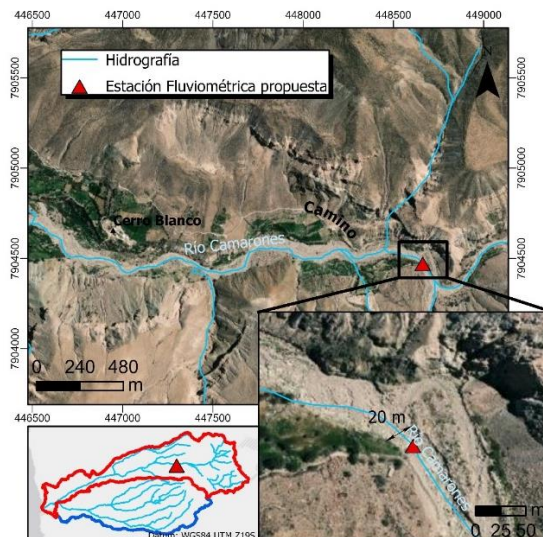
### 5.1.1 Estación fluviométrica

DICTUC recomienda ampliar la red de monitoreo de las aguas superficiales, para incluir al menos una estación fluviométrica en la zona alta de la cuenca. Considerando limitaciones de acceso y la disposición de las comunidades a participar en la generación de nueva información de caudales para la cuenca del Río Camarones, se recomienda instalar una estación fluviométrica en el sector de Cerro Blanco en Río Camarones. Esta zona está caracterizada por presentar afloramientos de intrusivos del cretácico, por lo que no se presentan acuíferos subterráneos más que el fluvial de escasos metros de espesor y los caudales aforados representarían de mejor manera la oferta hídrica de toda la subcuenca aportante aguas arriba de esta nueva estación fluviométrica, incluyendo las subcuencas de los ríos Ajatama y Caritaya. Además, aguas arriba de esta estación se presenta escasa actividad agrícola, por lo que el caudal aforado representaría las condiciones naturales de la cuenca. La ubicación de la estación fluviométrica propuesta, "Río Camarones en Cerro Blanco", se presenta en la Tabla 5-1 y en la Figura 5-1.

**Tabla 5-1: Ubicación de estación fluviométrica propuesta**

Fuente: Elaboración propia

Estación fluviométrica propuesta	WGS84 UTM Z19S		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
Río Camarones en Cerro Blanco	448.662	7.904.475	2.300



**Figura 5-1: Ubicación de estación fluviométrica propuesta, "Río Camarones en Cerro Blanco".**

Fuente: Elaboración propia



La empresa Con Potencial Consultores entregó una cotización de el diseño de ingeniería de detalle de la estación fluviométrica “Río Camarones en Cerro Blanco” . El valor cotizado es de 1.890 UF, que a valor de la UF al 11/11/2021, da un costo de \$56.800.850. Se envió a cotizar preliminarmente el precio de una estación fluviométrica con las características antes descritas a la empresa Constructora Regional Spa, quien participó en la licitación “Reparación Est. Fluviométrica del Río Camarones en Conanoxa”. Una propuesta razonable según la empresa para un volumen aproximado de 50 m<sup>3</sup> es del orden de los \$135.000.000, precio 2021, basado en la construcción de la Estación Fluviométrica en Río San José en Ausipar de similares características.

A futuro, se recomienda construir estaciones fluviométricas en el río Caritaya antes del tranque homónimo para un mejor entendimiento de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos de esta subcuenca y evaluar la instalación de un caudalímetro a la salida de la tubería del tranque Caritaya, caudal que junto al medido en la futura estación “Río Camarones en Cerro Blanco” permitiría estimar el aporte del río Ajatama y poder también entender los procesos hidrogeológicos en esta subcuenca. El entendimiento de estos procesos es fundamental, ya que son áreas donde se produce la mayor precipitación y recarga de acuíferos y, por lo tanto, el área de estudio donde se produce la mayor oferta de agua para la cuenca del Río Camarones. El tener series de tiempo continuas del caudal de salida de las subcuencas aportantes permite construir modelos hidrogeológicos de recarga y escurrimiento superficial más precisos.

### **5.1.2 Curvas de descarga en secciones de aforo DICTUC**

Si se continúa con mediciones de caudal en las secciones de aforo de DICTUC, se puede ir construyendo con el tiempo curvas de descargas de caudal, las cuales relacionan caudal v/s altura de agua. Estas curvas de descarga pueden facilitar a futuro las mediciones continuas de caudal superficial a través de transductores de presión instalados en el río.

Actualmente ya se tiene información de tres puntos altura vs caudal en las secciones aforadas y se recomienda obtener al menos 5 relaciones de altura vs caudal más durante 5 campañas adicionales de aforo en estos puntos.

El precio del proyecto con monitoreo trimestral por un año tendría un valor de aproximadamente \$76.978.212. La continuación del monitoreo trimestral tendría un valor anual de \$18.124.000.

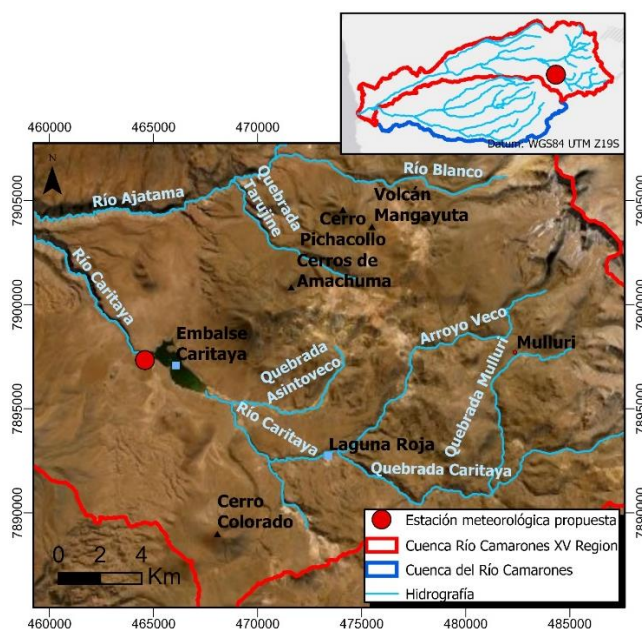
### 5.1.3 Estaciones meteorológicas

Con respecto a las estaciones meteorológicas, se ha observado en la zona alta de la cuenca una falta importante en la información, ya que actualmente no existen estaciones meteorológicas vigentes en la zona del altiplano y cordillera occidental. Para estudios avanzados de recarga de acuíferos, es importante tener información precisa de las precipitaciones sólidas y líquidas en las zonas de altas de la cuenca, donde se produce principalmente la recarga de los acuíferos y mejorar la información sobre la variabilidad espacial de las precipitaciones en la cuenca. Es por esto, que se recomienda instalar al menos una estación meteorológica completa con sistema de medición precisos de nieve en la zona alta de la cuenca del río Camarones, específicamente en la zona del tranque Caritaya (Tabla 5-2, Figura 5-2), para que además las mediciones sean un apoyo en la estimación de la evaporación potencial en el tranque mediante el método de Penman-Monteith.

**Tabla 5-2: Ubicación estación meteorológica propuesta "Tranque Caritaya"**

Fuente: Elaboración propia

Estación meteorológica propuesta	WGS84 UTM Z19S		
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
Embalse Caritaya	464.584	7.897340	3.653



**Figura 5-2: Ubicación de estación meteorológica propuesta "Tranque Caritaya"**

Fuente: Elaboración propia

La estación meteorológica debe contener los siguientes componentes y características para poder estimar la evapotranspiración potencial:

- Sensores básicos y kit de montaje de la estación meteorológica: datalogger, sistema de energía solar, trípode y cajas o contenedores.
- Sensores de temperatura y humedad relativa del aire
- Medidores de precipitaciones líquidas y sólidas a través de un pluviómetro con calefactor.
- Barómetro
- Anemómetro
- Radiación neta
- Transmisión por satélite de los datos adquiridos
- Certificación de las mediciones del sensor (1 vez al año)

Los costos estimados de la instalación de la estación meteorológica completa, incluyendo despacho y mano de obra, junto a todos los componentes, mantención y un plan anual de comunicación de telemetría satelital ascienden a \$46.448.091, IVA incluido.

## **5.2 Hidrogeología**

La complejidad del modelo hidrogeológico conceptual está limitado a la cantidad de información disponible en la cuenca del Río Camarones. Existen escasos estudios de estimación de recarga, los cuales arrojan valores muy bajos de recarga y están sujetos a una gran incertidumbre. Además, la cuenca no cuenta con suficiente información de pruebas de bombeo y piezometría en el tiempo. Sólo se presenta una prueba de bombeo en el pozo N° 1 de Ariztía en el sector bajo del Río Camarones. La cuenca no cuenta además con suficientes perforaciones, especialmente a lo largo del curso del Río Camarones, que permitan validar los resultados de geofísica a partir de estratigrafías. A partir de estas problemáticas se recomiendan acciones con respecto a pozos de monitoreo, estudios de recarga y pruebas de bombeo.

### **5.2.1 Pozos de monitoreo y bombeo DGA**

Se recomienda perforar dos tríos de pozos, consistente cada uno en dos pozos de monitoreo y uno de bombeo en la cuenca del Río Camarones. La perforación de pozos permitirá obtener primero la litología en subsuperficie y validar los resultados entregados por estudios geofísicos. En la sección media del río se estudiarán los acuíferos compuestos por depósitos sedimentarios y fluviales y en la zona baja los acuíferos en lava fracturada y depósitos fluviales. Los pozos debiesen contar con transductores de presión que permitan medir continuamente el nivel de agua subterránea.

Se recomienda realizar pruebas de bombeo de gasto constante, de recuperación de gasto constante, de gasto variable y de recuperación de gasto variable en todos los pozos de bombeo. Se recomienda, por consiguiente, perforar al menos cuatro pozos de monitoreo y dos pozos de bombeo en la cuenca, un par de pozos de monitoreo en el río Camarones en el sector de Huancarane (para la caracterización del acuífero fluvial y el acuífero en roca sedimentaria de la Formación Azapa de Origen Fluvial, OMa(a), respectivamente) y un par de pozos de monitoreo en la zona baja del río Camarones, sector de Cuya, para tener control del efecto de las extracciones y caracterizar de mejor manera el acuífero profundo de lava fracturada de la Formación Cuya y el acuífero superficial de depósitos fluviales. La distancia entre el pozo de bombeo y monitoreo debe ser de 100 m.

Para determinar la ubicación de los pozos, se consideraron los siguientes factores:

- Caracterización de potenciales nuevas fuentes de agua, en acuíferos definidos como importantes.
- Zona de fácil acceso.
- Alejado de zona de recarga de río.

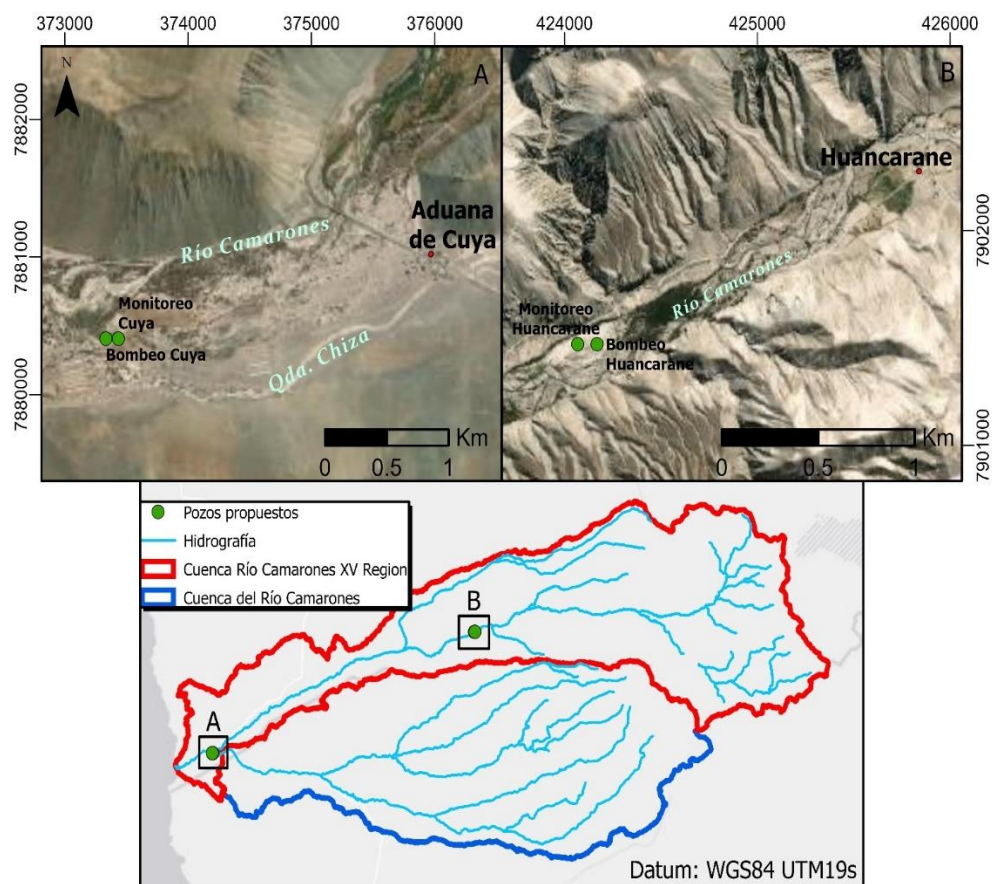
Las ubicaciones preliminares de los pozos se presentan en la Tabla 5-3 y en la Figura 5-3. En el sector de Cuya habría que ver qué terrenos son fiscales para ubicar los pozos en las inmediaciones de la ubicación propuesta. La Tabla 5-4 presenta la geología en subsuperficie esperada en los sectores de los pares de pozos a perforar. Para explorar las características de los dos acuíferos profundos, el ranurado del pozo de bombeo debe estar en los últimos 30 metros. El par de pozos de monitoreo por sector tienen el objetivo tanto monitorear el nivel del acuífero superficial del río y el nivel del acuífero profundo. Esta propuesta es en condiciones ideales y con el objetivo de tener una caracterización precisa de los dos niveles de acuíferos en las zonas de Cuya y Huancarane. Para reducir gastos, se pueden dejar un pozo de bombeo profundo y un pozo de monitoreo superficial en cada sector.

**Tabla 5-3: Propuesta de ubicación de pozos de monitoreo y bombeo en la cuenca del Río Camarones**

Fuente: Elaboración propia

Pozo propuesto	WGS84 UTM19S		Altitud (msnm)	Profundidad (m)	Ranurado	Diámetro
	Este (m)	Norte (m)				
Pozo monitoreo Cuya 1	373.435	7.880.406	74	60	Últimos 30 m	6"
Pozo monitoreo Cuya 2	373.435	7.880.406	74	150	Últimos 30 m	6"
Pozo bombeo Cuya	373.335	7.880.406	74	150	Últimos 30 m	12"
Pozo monitoreo Huancarane 1	424.168	7.901.470	1.102	60	Últimos 30 m	6"

Pozo propuesto	WGS84 UTM19S		Altitud (msnm)	Profundidad (m)	Ranurado	Diámetro
	Este (m)	Norte (m)				
Pozo monitoreo Huancarane 2	424.168	7.901.470	1.102	100	Últimos 30 m	6"
Pozo bombeo Huancarane	424.068	7.901.470	1.102	100	Últimos 30 m	12"



**Figura 5-3: Propuesta de ubicación de pozos de monitoreo y bombeo en la cuenca del Río Camarones**  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-4: Geología en subsuperficie esperada en los sectores de los pozos a perforar**  
Fuente: Elaboración propia

Sector	Desde (m)	Hasta (m)	Unidad geológica esperada
Huancarane	0	67	Depósito Fluvial de grano medio
Huancarane	67	200	Arenisca saturada de la Formación Azapa (Oma(a))
Cuya	0	120	Depósitos detríticos
Cuya	120	200	Lavas saturadas de la Formación Cuya, alterada y fracturada

El valor estimado de la perforación de seis pozos en la Región de Arica y Parinacota, con un total de perforación de 620 metros lineales es de \$1.114.412.963 con IVA, mientras que el valor estimado de la perforación de 4 pozos con un total de 370 metros lineales (pozos de monitoreo N° 1 en Cuya y Huancarane y pozos de bombeo) es de \$706.837.962, con IVA.

Los seis pozos de monitoreo deben contar con sensores de presión que monitoreen continuamente el nivel de las aguas subterráneas. Se recomienda instalar el sensor Leverlogger M5 junto con el sensor Barologger M.1.5 que han tenido buenos resultados en los trabajos realizados por DICTUC. La instalación de los sensores y el monitoreo anual de estos por externos tendría un valor total de \$19.992.576, IVA incluido.

### **5.2.2 Estudio de recarga de la cuenca del Río Camarones**

Como se mencionó anteriormente, los estudios de recarga anteriores no son precisos y están sujetos a una gran incertidumbre. Por lo tanto, se recomienda realizar un estudio de recarga semidistribuido que considere la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas, subcuencas y la topografía de la cuenca. Se deben utilizar datos distribuidos de precipitación, evapotranspiración, temperaturas, caudales superficiales y extracciones antropogénicas de caudal de aguas superficiales. Los cálculos deben estar basados en balances de masa por subsecciones de la cuenca, los cuales deben ser calibrados con mediciones de caudal superficial a la salida de las subcuencas.

La evaluación económica de un estudio de recarga completo, calibrado con datos fluviométricos y validado con datos de evaporación y cobertura de nieve arroja un valor de \$30.969.863, con precio de la UF al 11/11/2021.

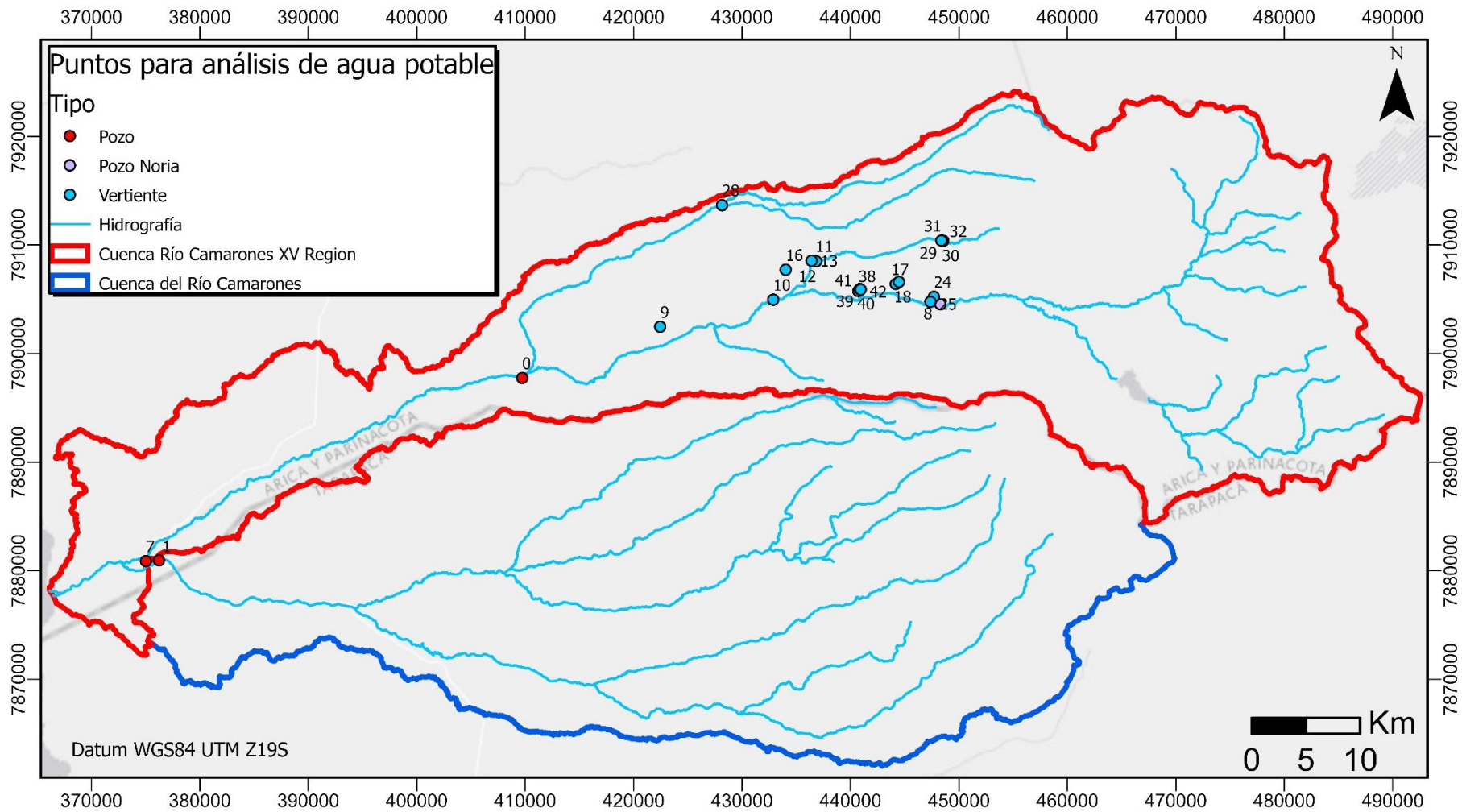
## **5.3 Calidad del agua**

### **5.3.1 Calidad de agua APR**

Se recomienda tomar muestras de agua de los sistemas de agua potable rural (APR) y vertientes con uso para consumo humano y realizar un análisis físico-químico con norma NCH. 409 para agua potable más el análisis de boro.

Para la elección de los puntos a realizar el análisis físico-químico, se tomó en consideración los resultados del catastro de vertientes y pozos, escogiendo aquellos puntos que tengan un uso de consumo humano. En total se incluyen 23 puntos, entre ellos un pozo noria, 3 pozos profundos (APR Cuya, APR Camarones y Pozo Ariztía en Ruta 5) y 19 puntos de vertiente, cuya agua es utilizada para consumo humano. La ubicación de los puntos se presenta en la Figura 5-4 y el detalle de estos se muestra en la Tabla 5-5.





**Figura 5-4: Ubicación de puntos de muestreo físico-químico según Nch. 409 para consumo de agua potable. Los números indican el ID de catastro.**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-5: Puntos de pozos y vertientes con consumo humano a realizar análisis físico-químico del agua**

Fuente: Elaboración propia

N°	ID Catastro	Nombre	Tipo	WGS84 UTM Z19S		Uso
				Norte (m)	Este (m)	
1	1	APR Cuya	Pozo	7880957	376223	Consumo humano
2	7	Pozo 1 Hacienda Cuya	Pozo	7880886	375021	Consumo humano
3	8	APR Illapata	Pozo Noria	7904542	448299	Consumo humano
4	9	Huancarane	Vertiente	7902469	422450	Cultivo y consumo humano
5	10	Cochiza	Vertiente	7904954	432876	Cultivo y consumo humano
6	11	Caquena 2	Vertiente	7908521	436781	Cultivo y consumo humano
7	12	Caquena 1	Vertiente	7908492	436838	Cultivo y consumo humano
8	13	Huarache	Vertiente	7908547	436409	Cultivo y consumo humano
9	16	Sipaya 2	Vertiente	7907711	434025	Cultivo y consumo humano
10	17	Vertiente 1	Vertiente	7906408	444167	Cultivo y consumo humano
11	18	Vertiente 2	Vertiente	7906602	444473	Consumo humano
12	24	Islacache	Vertiente	7905221	447697	Cultivo y consumo humano
13	25	vertiente	Vertiente	7904762	447370	Cultivo y consumo humano
14	28	vertiente	Vertiente	7913666	428150	Empresa vial
15	29	vertiente 1	Vertiente	7910393	448554	Cultivo y consumo humano
16	30	vertientes 2	Vertiente	7910391	448438	Cultivo y consumo humano
17	31	vertiente 3	Vertiente	7910407	448380	Cultivo y consumo humano
18	32	vertiente 4	Vertiente	7910408	448376	Cultivo y consumo humano
19	38	vertiente 2	Vertiente	7905755	440732	Cultivo y consumo humano
20	39	vertiente 3	Vertiente	7905952	440865	Cultivo y consumo humano
21	40	vertiente 4	Vertiente	7905940	440887	Cultivo y consumo humano
22	41	vertiente 5	Vertiente	7905888	440919	Cultivo y consumo humano
23	42	vertiente 6	Vertiente	7905904	440930	Cultivo y consumo humano
24	0	APR Camarones	Pozo	409732	7897748	Consumo humano

### 5.3.2 Análisis de tritio y Carbono 14 (<sup>14</sup>C)

Se recomienda realizar determinaciones de tritio y <sup>14</sup>C en aguas superficiales, vertientes y pozos de Ariztía y pozos de monitoreo DGA perforados a futuro, a través de un protocolo aceptado por la comunidad científica para el muestreo de las aguas subterráneas. Estos datos proporcionarán información adicional de edades del agua que permite comprender mejor la relación entre los sistemas de de las subcuencas del Río Caritaya, del Río Ajatama y sucuencia de la Quebrada Chiza, y la conexión río-acuífero.

Las cotizaciones realizadas a los laboratorios de ALS para 19 muestras de aguas para tritio y <sup>14</sup>C alcanzan un valor de \$ 9.729.761 pesos a cambio del día 11/11/2021, mientras que las 19 muestras de análisis químico de estas mismas muestras tienen un costo de \$ 1.700.000

aproximadamente, a cambio del día 11/11/2021. Considerando ambas campañas, el tipo de análisis y valor unitario cotizado, el valor total de todos los análisis a realizar es aproximadamente \$ 11.500.000 (estos valores son referenciales, considerando las cotizaciones realizadas y el tipo de cambio a día de 11/11/2021).

El segundo trabajo que tiene por objetivo muestrear 23 puntos para evaluar la calidad química de las aguas para consumo humano se realizaría en 6 días de terreno. Al igual que en la primera campaña de muestreo se medirán todos los parámetros físico-químicos de las aguas en terreno. El análisis químico de cada muestra tiene un costo aproximado de 12,83 UF (En Anexo 10: Cotizaciones se presenta el archivo con la cotización de las determinaciones requerida según la norma chilena de calidad para consumo humano). En total las determinaciones analíticas tienen un valor aproximado de \$ 9.000.000. Los costos de honorarios de Investigador Principal son de \$ 1.200.000 y los costos de hidrogeólogo colaborador son de \$ 660.000.

Los costos indicados anteriormente no consideran pasajes, arriendo de camionetas, combustible, alojamiento, alimentación, materiales e insumos para la toma de muestras enumerados anteriormente, ni tampoco los costos de envío de muestras a Canadá (estos valores podrían superar los dos millones de pesos debido al volumen de muestras).

#### **5.4 Identificación de nuevas fuentes o fuentes alternativas de agua**

Los habitantes de la cuenca del Río Camarones han suplido su demanda hídrica para consumo humano y agrícola desde fuentes superficiales del Río Camarones y sus tributarios y de vertientes de agua subterránea. Debido a las extracciones de canales a lo largo del Río Camarones a lo largo de toda su extensión, la zona baja de la cuenca se ve enfrentada muchas veces a escasez hídrica, por lo que han debido buscar fuentes alternativas a través del bombeo de agua subterránea desde el acuífero superficial de depósitos fluviales.

##### **5.4.1 Explotación de agua subterránea**

A partir del análisis de los antecedentes hidrogeológicos y de los resultados de las campañas de geofísica y aforo de caudales, se logró construir un modelo hidrogeológico de la cuenca del Río Camarones e identificar zonas donde la importancia hidrogeológica inferida es media a alta y representaría nuevas fuentes de agua para la comunidad. Es importante recalcar que para el estudio no se contó con información de monitoreo de aguas subterráneas ni estratigrafía de pozos, por lo que los resultados son interpretaciones de toda la información disponible. Las zonas con mayor importancia hidrogeológica son:

- En la zona entre la desembocadura del Río Camarones y la confluencia de Quebrada Chiza con Camarones se presentan dos acuíferos importantes, de tipo fluvial en superficie, donde la napa no está a más de 10 m de profundidad y el espesor saturado está entre los 80 y 120 m. Se presentan capas de arcilla. Bajo

este acuífero se encontraría un acuífero posiblemente confinado en roca volcánica muy fracturadas y con potencias de al menos 100 m.

- En la zona entre la confluencia de la Quebrada Humayani y Camarones hasta Pachica, se presenta en la zona media un acuífero fluvial de espesor relativamente importante (entre 70 y 100 m) y bajo este acuífero, se presentan areniscas saturadas, representada por la Formación Azapa OMa(a) de grano medio y con espesores saturados de al menos 120 m.
- Finalmente, ya en las zonas altas se presentan una serie de acuíferos confinados en roca volcánica y sedimentaria, incluyendo a las Ignimbritas Sucuna, Oxaya, Nama, las areniscas de la formación Mauque y la Formación Macusa. Estos acuíferos se presentan saturados y de variable espesor y cercanía a la superficie. En algunos sectores se encuentran confinados por secuencias volcánicas del Mioceno, Pleistoceno y Plioceno.

#### 5.4.2 Agua de niebla

Se analizó además el uso no convencional de agua en la cuenca a través del uso de agua niebla a través del estudio de factibilidad técnica y económica. Según el libro “Agua de Niebla, Nuevas tecnologías para el Desarrollo sustentable en Zonas Áridas y Semiáridas” (Cereceda et al., 2014). Se establece que el costo de instalar 4 neblinómetros sería aproximadamente de \$7.064.800, sin considerar mantenciones trimestrales por un año. Las mantenciones podrían ser hechas por personas de la zona para abaratar costos. Detalles que no se toman en cuenta, es el costo de unidades o partes de los neblinómetros en caso de alguna falla.

La instalación de 4 neblinómetros podría producir, de forma optimista, hasta 880 litros de agua al día. Esto considerando una alta velocidad de viento y una presencia consistente de niebla convectiva en las horas que tienen mayor incidencia (entre 5:00 y 8:00 am y entre las 17:00 y 20:00 horas). Cabe mencionar que es recomendable antes de instalar los neblinómetros realizar monitoreo de la velocidad y dirección del viento e instalar cámaras que registren la formación de niebla en las horas de mayor producción.

## 6 Participación ciudadana

### 6.1 Objetivos

Los objetivos principales de las actividades de Participación Ciudadana en este estudio son:

- Dar a conocer el estudio entre la comunidad y los actores interesados en las temáticas del agua, tanto públicos como privados.
- Transmitir la relevancia del desarrollo del estudio.
- Realizar actividades de presentación del estudio, que además de entregar contenidos, faciliten el trabajo de las labores que se realizarán en terreno, particularmente lo asociado al catastro de usuarios e infraestructura.
- Facilitar la comunicación entre los actores locales y el equipo consultor.
- Recoger en las actividades información que sea de relevancia para el estudio.
- Favorecer el acceso a la información resultante del estudio por parte de los actores locales, entregando las facilidades a los actores locales de participar en los talleres.

### 6.2 Levantamiento de actores

Un trabajo fundamental para el desarrollo de las actividades de participación ciudadana y para el correcto desarrollo de actividades como el catastro en terreno, es construir un listado de actores del territorio.

Para el caso de los actores institucionales, se revisaron las páginas web de los diferentes servicios para identificar a los directores de servicio y Secretarios Regionales Ministeriales (SEREMI), y a las autoridades regionales como Gobernador, Delegado Presidencial y alcalde de la Comuna de Camarones. El listado obtenido se presenta en la Tabla 6-1.

**Tabla 6-1: Autoridades regionales**

Fuente: Elaboración propia

Nombre	Cargo	Institución
Jorge Díaz	Gobernador	Gobernación Regional Arica Parinacota
Roberto Erpel	Delegado Presidencial	Delegación Presidencial Regional de Arica y Parinacota
Cristian Zavala	Alcalde	Ilustre Municipalidad de Camarones
Jorge Heiden	SEREMI	Ministerio de Agricultura
Miguel Donoso	Encargado Macrozona Norte	Comisión Nacional de Riego - CNR
Juan Horacio Grant	Director	Instituto de Desarrollo Agropecuario - INDAP
Honorino Córdova	Director Regional	Superintendencia de Servicios Sanitarios - SISS
Emiliano García Choque	Director Regional	Corporación Nacional de Desarrollo Indígena - CONADI
Guillermo Beretta	SEREMI	Ministerio de Obras Públicas
Walton O'Ryan	Director Regional	Dirección de Obras Hidráulicas
Osman Cataldo	Director Regional	Dirección General de Aguas

Para elaborar el listado de actores comunitarios, se tomó contacto con la Ilustre Municipalidad de Camarones, a fin de solicitar información de contactos de los dirigentes de las juntas vecinales de las comunidades correspondientes a la cuenca de Camarones, información que fue entregada con detalles de nombres y contactos, respecto de los presidentes de las organizaciones.

En este mismo proceso se consultó por dirigentes de organizaciones de regantes o comités de APR. La respuesta general fue que en cuanto al riego son las mismas comunidades indígenas las que lo ordenan y como aún no se conforma la Junta de Vigilancia no existen otras dirigencias formales. En cuanto a los APR, se consiguieron los contactos para aquellos sectores que tienen implementado el sistema.

A partir de este listado, se inició el contacto telefónico con presidentes de juntas de vecinos, a través de ellos, se logra contactar a presidentes de las Comunidades Indígenas de cada una de las comunidades del área de estudio. Adicionalmente, Octavio Taquias encargado de Participación Ciudadana de la SEREMI MOP, facilitó la información actualizada de los consejeros del Área de Desarrollo Indígena (ADI) de la comuna de Camarones. Toda la información recopilada se elaboró la lista de actores que se presenta en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2: Actores comunitarios**

Fuente: Elaboración propia

<b>Rene Viza</b>	<b>Presidente</b>	<b>Junta de Vecinos Camarones</b>
Angelica Gonzales	Presidenta	Junta de Vecinos Cuya
Jorge Ardiles	Presidente	Junta de Vecinos Caleta Camarones
Eric Viza	Presidente	Junta de Vecinos Pachica
Victoria Mamani	Presidenta	Junta de Vecinos Esquiña
Manuel Viza	Presidente	Junta de Vecinos Illapata
Enrique Bisa	Presidente	Junta de Vecinos Parcohaylla
Elva García	Presidenta	Junta de Vecinos Mulluri
Roberto Carizaya	Presidente	Junta de Vecinos Taltape
Inés Castro	Tesorerera	Junta de Vecinos Sahuara
Sergio Viza Huayta	Presidente	Comunidad Indígena de Camarones
Edith Capacunda	Presidenta	Comunidad Indígena de Pachica
Dagoberto Mamani	Presidente	Comunidad Indígena de Esquiña
Luis Mamani	Presidente	Comunidad Indígena de Illapata
Araceli Mamani	Presidenta	Comunidad Indígena de Mulluri
Verónica Chambe	Presidenta	Comunidad Indígena de Taltape
David Hume	Presidente	APR CUYA
Fredy Altina	Director	Comunidad Indígena de Pachica
Inés Castro	Representante	Junta de Vecinos Sahuara

### 6.3 Reuniones presentación del estudio

Teniendo en cuenta la situación sanitaria actual en el país, producto de la pandemia de COVID-19, y particularmente las restricciones asociadas a cada fase en que se encuentran las comunas, se decidió que aquellas reuniones en que los convocados se encontraran en



la ciudad de Arica que se encontraba en Fase 2 del Plan Paso a Paso, se realizarían en formato online. Esto aplica en general a las actividades con funcionarios y directivos de los servicios públicos vinculados al agua.

Respecto de las reuniones cuyo objetivo era convocar a las organizaciones de la sociedad civil con interés en la gestión del agua y con las comunidades indígenas, se decidió en conjunto con la Inspección Fiscal, replantear estas reuniones sin dividir a los asistentes, sino más bien convocar en función de su residencia habitual, las posibilidades de conexión a internet, etc. Así se definió que se realizarían dos actividades, una en formato online para aquellos que se encuentran en Arica y tuvieran posibilidades de conectarse, y una actividad presencial en la comuna de Camarones, para quienes habitan en el Valle o estuvieran interesadas en asistir en este formato, facilitando los medios necesarios para ello.

En relación con los medios para convocar, se acordó con la Inspectora Fiscal que las comunicaciones se realizarían mediante correo electrónico, además de aquellos medios de difusión definidos por Términos de Referencia, como radio y redes sociales.

#### **6.4 Reuniones de entrega de resultados**

Durante la Etapa 2, se contemplaban por bases dos talleres, los cuales serían realizados, uno en la ciudad de Arica y el otro en la Comuna de Camarones, ambos en formato presencial si es que las condiciones sanitarias así lo permitieran.

La convocatoria de las actividades inicialmente fue realizada considerando estas dos instancias, abiertas a la participación de todos los actores interesados, sin distinción, lo que fue modificado luego a solicitud de la Inspección Fiscal, separando las reuniones online dirigidas a la comunidad y a las autoridades y representantes de servicio, generando así una tercera actividad.

El objetivo de estos talleres es informar de los resultados del estudio del acuífero y están dirigidos a todos los actores que participaron de la primera ronda de reuniones, así como a todos aquellos interesados en conocer los productos del Estudio.

#### **6.5 Conclusiones y recomendaciones**

Luego de realizadas las actividades de PAC es posible señalar que si bien la contingencia por COVID-19 implica tomar resguardos, no presentó mayor dificultad para el desarrollo de las actividades, puesto que, ya pasado más de un año desde el inicio de la emergencia sanitaria, las herramientas digitales como vía de comunicación y desarrollo de reuniones, ya ha sido internalizada por la mayor parte de las personas.

Respecto de las actividades presenciales realizadas, es importante relevar que la comunidad da muestras de tener internalizadas las medidas necesarias para prevenir los contagios de

COVID-19, manteniendo en todo momento sus mascarillas y manteniendo las distancias físicas.

Las reuniones se realizaron con normalidad, pero dejaron claras señales de la necesidad de mantener contacto de manera fluida entre las comunidades y los organismos del Estado que impulsan y ejecutan iniciativas en sus territorios, a fin de que existan acuerdos respecto de los alcances y requerimientos para su implementación. Estas buenas relaciones y acuerdos previos facilitan el desarrollo de estudios en los territorios, además de promover la colaboración de las comunidades en especial cuando hay trabajos de terreno o levantamiento de información necesaria para la correcta ejecución de una iniciativa. La ausencia de esta comunicación y experiencias de trabajos previos, predisponen la forma en que la comunidad recibirá las nuevas intervenciones o estudios realizados por parte el Estado.

## 7 Conclusiones

Las proyecciones DGA indican un aumento de la demanda de agua en Chile, que, sumado a las conclusiones de los últimos reportes de la ONU sobre cambio climático (IPCC, 2021) establecen que el aumento de la temperatura afectará negativamente las precipitaciones totales y los eventos extremos, representaría una incertidumbre de la disponibilidad del recurso hídrico. Esto se daría especialmente en la zona de la cuenca del Río Camarones, debido a su baja disponibilidad hídrica por habitante y la calidad química restrictiva para el desarrollo económico.

El presente estudio “Diagnóstico Hidrogeológico del Acuífero del Río Camarones”, mandatado por la Dirección General de Aguas Región de Arica y Parinacota, mejoró el entendimiento de la disponibilidad y ocurrencia actual y futura del recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo. De esta manera, se obtuvo un balance hídrico más preciso para gestionar eficazmente el uso del agua y una caracterización hidrogeológica.

El área de estudio comprendió la cuenca del Río Camarones sin la subcuenca de Quebrada de Chiza, con un área total de 2.386 km<sup>2</sup>. El área de estudio se encuentra completamente en la Región de Arica y Parinacota. La cuenca completa del Río Camarones comprende las Regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá, con un área total de 4.645 km<sup>2</sup>.

Por su ubicación, es una región de características desérticas. En su geografía se observan terrenos desprovistos de vegetación, especialmente en la zona este, mientras que, en el valle de Camarones, se presentan los terrenos agrícolas, praderas, matorrales y humedales. El valle de Camarones se ubica a 106 km al sur de la ciudad de Arica y debido a las altas concentraciones de arsénico y boro en sus aguas superficiales, la variedad de actividades agropecuarias en el valle está restringida especialmente al cultivo de alfalfa y ganadería caprina y ovina.

A lo largo del valle del Río Camarones, las actividades agrícolas se abastecen de manera superficial a partir del río mismo. Además, las comunidades ubicadas al este de la cuenca han logrado suplir su demanda de agua a través de vertientes de agua subterránea, como es el caso de Pachica, Esquiña, Illapata, Sahuara, Sucuna y Mulluri.

Los eventos de precipitación que ocurren en la cuenca poseen variaciones a lo largo de ella, debido a cambios de altitud y condiciones físicas que caracterizan al sistema. Al analizar la precipitación promedio anual de las estaciones meteorológicas dentro o cercanas al área de estudio, se observa un gradiente lineal para el aumento de precipitaciones con la altura que puede ser separado en dos rangos: el primero entre los 0 y 3.848 m.s.n.m. de 0,019 mm/año/m, y el segundo de 0,4587 mm/año/m sobre los 3.848 m.s.n.m.

Se realizó un análisis de datos satelitales, considerando como base de información los resultados del estudio Balance hídrico Nacional (DGA-UC-PUC, 2017) disponibles en la

página del CR<sup>2 2</sup>. De los datos satelitales de precipitación, temperatura, evapotranspiración y equivalente nieve-agua (Snow Water Equivalent o SWE, por sus siglas en inglés) se puede concluir que:

- Para la precipitación y evapotranspiración se observa un comportamiento común entre los meses de diciembre y abril en el que los valores son mayores a cero. El aumento de los registros de evapotranspiración también se explica por un incremento en los valores de temperatura y disponibilidad hídrica para este mismo periodo. Las precipitaciones promedio mensuales son mayores para el mes de enero, siendo mayor a 45 mm/mes en la subcuenca del Río Camarones hasta Chilpe.
- Los resultados observados para la variable SWE permiten concluir que existen 2 periodos que generan acumulación de nieve en la cuenca, correspondientes a diciembre-marzo y junio-julio. Esta distribución explica la presencia de un caudal permanente para el Río Camarones producido por procesos de deshielo en la zona alta de la cuenca.

Con respecto a las zonas de mayor importancia medioambiental se presentan:

- 26 glaciares al oriente de la zona de estudio.
- Humedales a lo largo del río Camarones y bofedales en la zona alta.
- Cinco masas de agua, de las cuales se incluye el embalse Caritaya y las Lagunas de Amuyo.
- Áreas protegidas:
  - o Río Camarones: declarado sitio prioritario para conservación de la biodiversidad por CONAMA.
  - o Acuíferos de Parcohaylla y Jaruma en la zona oriental de la cuenca.
  - o Reserva Nacional Las Vicuñas perteneciente al Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE).
- DICTUC estimó la demanda hídrica actual y futura, la cual incluye demandas hídricas del Agua Potable Rural (APR), agrícola, pecuario, forestal, minero, ambiental y del caudal ecológico. Para 2020 se estimó que la demanda hídrica total es de 1.591 l/s, donde el 79% es utilizado con fines agrícolas y un 4% para fines pecuarios. Para 2030 se estimó que la demanda agrícola sería de 1.585 l/s, cuya variación se debería por la disminución de la demanda de agua en el sector agrícola debido a la tecnificación del riego.
- A partir de la información de derechos de agua superficiales y subterráneos e información de canales no organizados y de catastro, se estimó que el caudal anual

---

<sup>2</sup> Para mayor información: <https://www.cr2.cl/datos-de-precipitacion/>.

promedio extraído es de 1.653,5 l/s, de los cuales 162,8 l/s proviene de extracción de pozos y vertientes y el resto de canales.

El estudio “Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la macrozona norte y centro” (DGA-UC, 2018) fue usado como fuente de información base para el desarrollo del diagnóstico del estado hídrico del área de estudio.

El estudio DGA-UC (2018) cuenta con forzantes meteorológicas (temperatura y precipitación) necesarias para alimentar el modelo hidrológico VIC (*Variable Infiltration Capacity*), con el cual se hizo el balance a nivel nacional. De este modelo hidrológico se obtienen como salidas distintas variables hidrológicas que representan las características locales de cada cuenca y zona del país, en términos de proporción entre escorrentía y evapotranspiración, entre otros flujos importantes.

Para la zona de Camarones, se ocuparon las forzantes del estudio DGA-UC (2018), es decir, precipitación, y temperatura, con las cuales se logró una caracterización espacial y temporal del área de estudio. También se consideró la evapotranspiración, la cual se obtiene como flujo de salida de la modelación hidrológica hecha con VIC. Se consideraron dos escenarios, el histórico (1979-2015), y el futuro (2030-2060).

De los resultados de DGA-UC (2018), se obtiene un flujo de entrada por precipitación para el periodo histórico (1979-2015) y para la zona de estudio de 6.717 l/s. La precipitación se da en su mayoría (93%) aguas arriba de la estación Fluviométrica Chilpe.

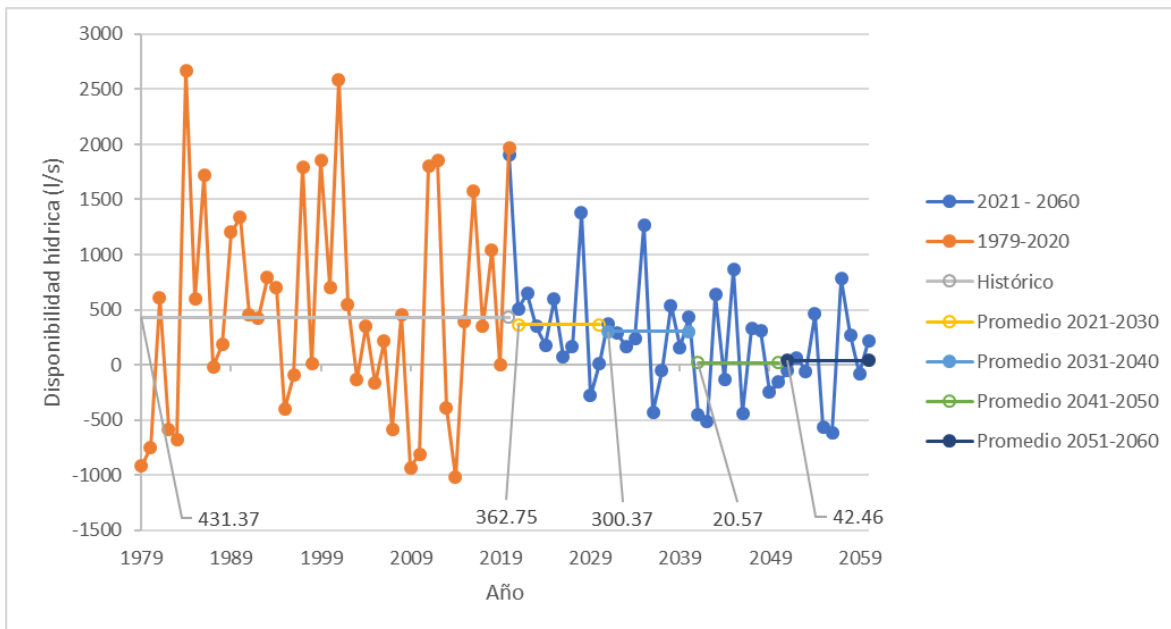
La oferta de recursos hídricos neta actualizada hasta el año 2020 consideró los efectos de los procesos de evapotranspiración (PP – ET) que se desarrollan en la zona de estudio. Estos valores fueron obtenidos utilizando la distribución por subcuencas y áreas aportantes. **La oferta hídrica para el periodo histórico es de 2.147,7 l/s.**

A partir de simulaciones hidrológicas considerando escenarios de cambio climático (DGA-UC, 2018), se estimó la oferta hídrica futura para el periodo 2020-2060, **donde se observa una tendencia a la baja en la oferta hídrica futura estimada. Para el periodo 2050-2060, la oferta disminuye en casi un 20% con respecto al periodo histórico, llegando a 1.736 l/s.**

Las proyecciones de demanda consideraron incrementar las estimaciones obtenidas en el sector agrícola en un factor de 1,1 con el objetivo de incluir valores conservadores en el consumo actual de recursos de esta actividad, debido a la tendencia a utilizar técnicas de riego poco eficientes, especialmente riego por gravedad.

Considerando las proyecciones de oferta y demanda descritas anteriormente, se obtuvo un balance hídrico y la disponibilidad hídrica a futuro (Figura 7-1). **Para el periodo histórico la diferencia estimada entre oferta y demanda es de solo 431 l/s, situación que empeorará y drásticamente a tan solo 21 l/s para el periodo 2041-2050.** De la Figura 7-1 se observa

que en varios años no se podrá satisfacer la demanda hídrica (disponibilidad hídrica menor a cero), especialmente en el sector bajo de la cuenca donde los recursos de agua superficiales son más escasos.



**Figura 7-1: Evolución de la disponibilidad hídrica**

Fuente: Elaboración propia.

El presente estudio presentó además una caracterización hidrogeológica, la cual incluyó un análisis de todos los antecedentes hidrogeológicos disponibles del área de estudio y trabajos en terreno para caracterizar hidrogeológicamente y en detalle la cuenca, incluyendo:

- Estudio geofísico de gravimetría y transiente electromagnético TEM.
- Catastro de 50 puntos hidrogeológicos importantes.
- Campaña de aforo de caudales en 15 puntos de importancia hidrogeológica, a lo largo del Río Camarones, Caritaya y Ajatama.

La confección del modelo hidrogeológico implicó la revisión detallada de antecedentes geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, de infraestructura hidráulica, entre otros. Además, se realizaron una serie de trabajos de terreno, los cuales consistieron en una campaña geofísicas, tres campañas de aforo de caudales y un catastro de 50 puntos hidrogeológicos, incluyendo pozos y vertientes.

La complejidad del modelo hidrogeológico conceptual está limitada por la cantidad de información hidrogeológica disponible en la cuenca del Río Camarones. La cuenca no cuenta con suficiente información de pruebas de bombeo ni de series de niveles piezométricos, caudales del río y variables meteorológicas. Sin embargo, gracias a la magnitud y gran



cobertura del estudio geofísico, la geometría de los acuíferos en toda la cuenca se caracterizó de forma adecuada. No obstante, hay que acotar que la cuenca no cuenta con suficientes perforaciones, especialmente a lo largo del curso del Río Camarones, que permitan validar los resultados de geofísica a partir de estratigrafías.

La cuenca del Río Camarones comprende un área de 2.386 km<sup>2</sup> y está caracterizada por sistemas hidrogeológicos complejos, cuyas propiedades son variables espacialmente, dependiendo de la unidad morfoestructural que se presente.

Con respecto a la hidrogeología, la zona alta de la cuenca del Río Camarones (Precordillera y Altiplano) se caracteriza por presentar rocas y secuencias volcánicas de edades entre el Pleistoceno y Mioceno. Estas rocas son más jóvenes en comparación a las ubicadas al oeste de la cuenca y exhiben alteraciones hidrotermales. La actividad hidrotermal más la meteorización en estas zonas han aumentado la porosidad secundaria de la roca a través de fracturamientos de ésta, lo que ha permitido la conexión entre las aguas superficiales y precipitación y las aguas subterráneas.

Se ha observado alta actividad hidrotermal en las lagunas de Amuyo, cuyas aguas están altamente contaminadas con metales pesados, especialmente arsénico y boro, y sales disueltas. Estas aguas hidrotermales afloran desde acuíferos de roca volcánica a través de las lagunas, cuyas aguas se vierten en el río Caritaya, causando un aumento de metales pesados y salinidad (CNR-GeoHidrología, 2014; DGA-ConPotencial, 2016).

Frente a eventos de precipitación en las zonas más altas de la cuenca, las aguas pueden almacenarse como nieve, evaporar, escurrir superficialmente o recargar acuíferos. Generalmente en las zonas altas, parte de la precipitación o nieve derretida infiltra en las rocas fracturadas. El agua infiltrada como recarga escurre como flujo subsuperficial o subterráneo, y aguas abajo aflora en vertientes o recarga cursos de agua principales a través del lecho del río. El caudal aumenta progresivamente en la parte alta del Río Camarones debido a aportes de estas aguas subterráneas. Se han registrado vertientes en toda la parte alta de la cuenca, especialmente en Nama, Parcohaylla, Mulluri, Condumaya, Esquiña e Illapata.

Las unidades geológicas fueron divididas en 8 unidades hidrogeológicas, dependiendo de sus propiedades hidráulicas, grado de fracturamiento y/o alteración y tipo de acuífero. Las unidades hidrogeológicas más importantes son:

- HU1a: Depósitos detríticos formados por procesos físicos en canales y planicies de inundación, compuestos principalmente por depósitos fluviales, coluviales y aluviales a lo largo del valle del río. Representa un acuífero libre y son recargados directamente a través de la precipitación, recibe aportes desde acuíferos subyacentes o desde acuíferos colgados laterales a través de quebradas en las

- paredes del cañón, especialmente en la zona alta de la cuenca. Este acuífero tiene una importancia hidrogeológica alta en la zona baja de la cuenca del Río Camarones.
- HU2a y HU2b: Acuífero de roca volcánica (muy) alterada y fracturada debido a fallas y/o actividad hidrotermal. La porosidad secundaria es alta, lo que le otorga una alta conductividad hidráulica. La recarga por precipitación de esta unidad se produce en las zonas altas de la cuenca, en la precordillera y la Cordillera Occidental, donde las rocas volcánicas se presentan fracturadas. El agua escurre a las zonas bajas a través de rocas alteradas y fracturadas, donde podrían estar confinadas por estratos superiores de mayor permeabilidad. En la zona de las Lagunas de Amuyo, el acuífero de roca volcánica presenta un nivel piezométrico superior al nivel de la superficie y no se presenta un estrato confinante de baja permeabilidad, lo que produce el desconfinamiento del acuífero de roca volcánica fracturada y la formación de las lagunas de Amuyo, cuyas aguas son posteriormente vertidas al río Caritaya.
  - HU3a: Este acuífero está conformado por unidades sedimentarias con mayor contenido de gravas y arenas y de porosidad primaria media-alta y permeabilidad secundaria que dependería del grado de fracturamiento. Estas características influyen en una mayor conductividad hidráulica, dando una importancia hidrogeológica media-alta a este acuífero. Podrían representar tanto acuíferos libres como confinados. Las formaciones más importantes serían la Formación Macusa (Mmsm) en el sector del Río homónimo y la Formación Azapa de origen fluvial (OMa(a)) en la zona media de la cuenca y las areniscas alteradas de la Formación Mauque (Mmm), en el sector del Río Caritaya. La formación Macusa y Mauque tendrían recargas directas por precipitación en las zonas altas. La formación Azapa recibiría recarga desde el río Camarones.

El basamento de la cuenca del Río Camarones es representado por intrusivos del Jurásico y del Cretácico, así como también por lavas de las Formaciones Cuya y Suca que no han sufrido fracturas ni alteraciones.

La geometría del modelo hidrogeológico se representó a través de un modelo geológico 3D a través del software Leapfrog Geo. El modelo 3d se construyó a partir de 26 unidades geológicas, las cuales incluyen la distinción de arcillas en los depósitos fluviales y fracturas en rocas volcánicas. La geología del subsuelo se representó a partir de 12 secciones geológicas transversales y longitudinales al río Camarones.

En la zona entre la desembocadura del Río Camarones y la confluencia de Quebrada Chiza con Camarones se presentan dos acuíferos importantes, de tipo HU1a en superficie, donde la napa no está a más de 10 m de profundidad y el espesor saturado está entre los 80 y 120 m. Se presentan capas de arcilla. Bajo este acuífero se presenta el acuífero de tipo HU2b, con rocas volcánicas muy fracturadas y con potencias de al menos 100 m.

En la zona entre la confluencia de la Quebrada Humayani y Camarones hasta Pachica, se presenta en la zona media un acuífero fluvial de espesor relativamente importante (entre

70 y 100 m) y bajo este acuífero, se presenta la unidad hidrogeológica HU3a, representada por la Formación Azapa OMa(a) de grano medio/fino y con espesores saturados de al menos 120 m.

Finalmente, ya en las zonas altas se presentan una serie de acuíferos confinados en roca volcánica y sedimentaria, incluyendo a las Ignimbritas Sucuna, Oxaya, Nama, las areniscas de la formación Mauque y la Formación Macusa. Estos acuíferos se presentan saturados y de variable espesor y cercanía a la superficie. En algunos sectores se encuentran confinados por secuencias volcánicas del Mioceno, Pleistoceno y Plioceno. En la zona de las Lagunas de Amuyo, la formación Mauque (areniscas alteradas) se desconfinan al no estar cubierta por secuencias volcánicas de baja permeabilidad.

Los niveles piezométricos de la cuenca del río Camarones se obtuvieron de resultados NanoTEM del estudio Geofísico DICTUC-GeoDatos, catastro DICTUC, expedientes DGA, y de los estudios SMI-DOH (2008), CNR-Geohidrología (2014) y DGA-SMI (2011). De los datos se observa que, en Quebrada Chiza, la napa se encuentra entre 20 y 88 m de profundidad. En la zona baja y centro del Río Camarones, la napa está muy cercana a la superficie, hasta una profundidad máxima de 20 m. Se observa la napa en superficie especialmente entre Conanoxa y la localidad de Taltape. En la zona alta del Río Camarones, entre Cochiza y Condumaya, se observa la napa subterránea a una mayor profundidad, entre los 5 y 54 m de profundidad. En la zona del río Caritaya, la napa está principalmente en superficie, lo que podría reflejar el desconfinamiento de acuíferos profundos y aporte al sistema del río Camarones. Finalmente, en la zona del río Ajatama y Macusa, el nivel piezométrico se encuentra entre los 5 y 16 m bajo la superficie del terreno.

A partir del análisis de los caudales del río Camarones con probabilidad de excedencia de 85% y los resultados de las campañas de aforo DICTUC en 2021, se concluyó que:

- Entre los sectores de Condumaya y Chilpe existe un aporte de alrededor de 550,1 l/s de agua subterránea. Debido a que la napa se encuentra bajo el nivel del terreno, estos aportes provienen de quebradas laterales desde los cerros Mamuta y Macusa. Desde la pared norte del cañón del río y específicamente aguas arriba de Cochisa/Pampanune, se observan vertientes de agua subterránea, provenientes de acuíferos de Ignimbritas de la Formación Oxaya.
- Entre Chilpe y Conanoxa se producen aportes de agua subterránea de aproximadamente 1035 l/s. Esto se debe a la presencia de arcillas bajo el acuífero fluvial entre Conanoxa y Taltape (OMa(b)), lo que obliga al agua subterránea aguas arriba, proveniente del acuífero de la Formación Azapa de origen fluvial (OMa(a)) a emerger a la superficie y aportar hacia el río.
- Finalmente, entre Conanoxa y Ruta 5 se observaría un aporte del río hacia el acuífero de aproximadamente 334 l/s.

A partir de los datos históricos (1979 a 2020) de precipitación y evaporación e información recopilada en las campañas de terreno de catastro y geofísica, se estimaron los valores promedios históricos de los componentes de entradas y salidas al sistema hidrogeológico.

Se observa que las entradas y salidas son estimadas en 2.231,6 l/s. Con respecto a las entradas, la mayor parte proviene de recarga por precipitación (2.204,8 l/s), seguida por entradas de agua subterránea desde las subcuencas de Chiza y cuenca de la Laguna Carcote, que suman en total un estimado de 26,8 l/s.

La mayor salida se produce del acuífero al río, cuya componente neta es estimada en 1.709,7 l/s. Además, el total de agua subterránea estimada que descarga al mar es de 275,2 l/s. En la zona baja se producen las extracciones del acuífero por bombeo, las cuales a partir de datos de catastro se estimaron en 162,8 l/s. Finalmente, la evaporación desde cuerpos de agua superficiales se estimó en 84 l/s. Es importante destacar que estos resultados representan un promedio histórico entre 1979 y 2020, y por lo tanto no reflejan periodos que han existido de sequía y estrés hídrico, donde la demanda es mayor a la oferta. Además, la oferta hídrica ha disminuido con los años y se proyecta que siga disminuyendo en hasta un 20% para el periodo 2050-2060, lo que se verá reflejado en periodos de estrés hídrico más frecuentes.

Finalmente, la calidad de las aguas subterráneas y superficiales se ve empobrecida por actividad hidrotermal en la zona alta de la cuenca y por contacto con unidades geológicas de origen marino y posible almacenamiento de aguas fósiles marinas en la zona baja de la cuenca.

Los habitantes de la cuenca del Río Camarones han suplido su demanda hídrica para consumo humano y agrícola desde fuentes superficiales del Río Camarones y sus tributarios y de vertientes de agua subterránea. Debido a las extracciones de canales a lo largo del Río Camarones a lo largo de toda su extensión, la zona baja de la cuenca se ve enfrentada muchas veces a escasez hídrica, por lo que han debido buscar fuentes alternativas a través del bombeo de agua subterránea desde el acuífero superficial de depósitos fluviales. Además, frente a la identificación de brechas negativas entre la oferta y demanda hídrica, se plantearon nuevas fuentes o fuentes alternativas de agua para poder suplir la demanda hídrica futura.

A partir del análisis de los antecedentes hidrogeológicos y de los resultados de las campañas de geofísica y aforo de caudales, se logró construir un modelo hidrogeológico de la cuenca del Río Camarones e identificar zonas donde la importancia hidrogeológica inferida es media a alta y representaría nuevas fuentes de agua para la comunidad. Es importante recalcar que para el estudio no se contó con información de monitoreo de aguas subterráneas ni estratigrafía de pozos, por lo que los resultados son interpretaciones de toda la información disponible. Las zonas con mayor importancia hidrogeológica son:

- En la zona entre la desembocadura del Río Camarones y la confluencia de Quebrada Chiza con Camarones se presentan dos acuíferos importantes, de tipo fluvial en superficie, donde la napa no está a más de 10 m de profundidad y el espesor saturado está entre los 80 y 120 m. Se presentan capas de arcilla. La permeabilidad de este acuífero es media. Bajo este acuífero se encontraría un acuífero posiblemente confinado en roca volcánica muy fracturadas y con potencias de al menos 100 m. La permeabilidad sería alta.
- En la zona entre la confluencia de la Quebrada Humayani y Camarones hasta Pachica, se presenta en la zona media un acuífero fluvial de espesor relativamente importante (entre 70 y 100 m) y bajo este acuífero, se presentan areniscas saturadas, representada por la Formación Azapa OMa(a) de grano medio y con espesores saturados de al menos 120 m. La permeabilidad sería media.
- Finalmente, ya en las zonas altas se presentan una serie de acuíferos confinados en roca volcánica y sedimentaria, incluyendo a las Ignimbritas Sucuna, Oxaya, Nama, las areniscas de la formación Mauque y la Formación Macusa. Estos acuíferos se presentan saturados y de variable espesor y cercanía a la superficie. En algunos sectores se encuentran confinados por secuencias volcánicas del Mioceno, Pleistoceno y Plioceno.

Finalmente, se analizó el uso no convencional de agua niebla, la cual es muy común en los cordones costeros del norte y presenta un ciclo anual bien definido con mayor presencia desde mayo a noviembre, y un ciclo diario predominante, con mayor presencia durante la noche y amanecer. Para poder “capturar” esta agua de niebla se ocupa un sistema denominado redes de captación o neblinómetros. Un “atrapa niebla” (captador de agua niebla) es capaz de tener una productividad de 3 a 8 litros de agua niebla al día, por metro cuadrado del neblinómetro (del Río, 2020). Relacionado a la factibilidad técnica para la retención de agua niebla a tener en cuenta que exista cordillera que intercepte la niebla (depende la latitud para la altura aproximada de la nube), orientación frente a los vientos predominantes y existencia de portezuelos (valle entre las cimas del cerro). A partir de los antecedentes, se cumplen las tres condiciones, pero habría que verificar la orientación de los vientos predominantes.

El costo de instalar 4 neblinómetros de 40 m<sup>2</sup> cada uno sería aproximadamente de \$7.064.800, sin considerar mantenciones trimestrales por un año. Las mantenciones podrían ser hechas por personas de la zona para abaratar costos. La instalación de 4 neblinómetros podría producir, de forma optimista, hasta 880 litros de agua al día (0,01 l/s). Esto considerando una alta velocidad de viento y una presencia consistente de niebla convectiva en las horas que tienen mayor incidencia (entre 5:00 y 8:00 am y entre las 17:00 y 20:00 horas). Cabe mencionar que es recomendable antes de instalar los neblinómetros realizar monitoreo de la velocidad y dirección del viento e instalar cámaras que registren la formación de niebla en las horas de mayor producción.

## 8 Referencias

- Abele, G. (1989). The influence of age, climate, and relief on the preservation of volcanic landforms in the North Chilean Andes. *Bamberger Geographische Schriften*, v. 11, p. 45–57.
- Acosta, O. y Custodio, E. et al. (2008). Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1): 33-50
- Argandoña, R. (1984). *Geología del cuadrángulo Cerro Socora y características generales del área geotermal de Puchuldiza*. Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile. 150 p.
- Aron, G. and V.H. Scott. (1965). Simplified solution for decreasing flow in wells. J. Hydraulic Div., Proc. Am. Soc. Civil Engrs. 91(HY5):1-2.
- Arvidson, T., Goward, S., Gasch, J., & Williams, D. (2006). Landsat-7 long-term acquisition plan: Development and validation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(10), 1137–1146. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.10.1137>
- BCN (2021). *Camarones Reporte Comunal 2021*. Santiago: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Birsoy, Y.K. and W.K. Summers. (1980). Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data. *Ground Water*. 18: 137-146.
- Bouwer, H. (2002). Artificial Recharge of Groundwater: Hydrogeology and Engineering. *Hydrogeological Journal*. 10: 121-142.
- British Standard. (2007). *Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*. (ISO 748).
- Brüggen, H. (1950). *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, 510 p.
- Barazangi, M. y Isacks, B.L. (1976). Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4, 686-692.
- Cecioni, G. y García, F. (1960). *Observaciones geológicas en la Cordillera de la Costa de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 6, 28 p.
- Cereceda, P., Hernández, P., Leiva, J., & Rivera, J. (2014). Agua de niebla: Nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable en zonas áridas y semiáridas. Santiago, Chile: Corporación de Fomento de la Producción.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote*



*Sensing of Environment*, 113(5), 893–903.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Chávez, A. (2001). *Evolución paleoambiental y sedimentación sintectónica durante el Mioceno en el sector del cerro Chucal (Cordillera Occidental, Región de Tarapacá; 69°10'O-18°45'S), y su relación con la estructuración del Altiplano*. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 73 p.

CNR (2014). Estudio básico “Diagnóstico de la subcuenca aportante al Embalse Caritaya”. Informe Final. Ministerio de Agricultura, Comisión Nacional de Riego, Chile. Realizado por: GeoHidrología Consultores.

CONAF. (2020). Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra. Disponible en IDE MINAGRI website: <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/22/planificacion-catastral/>

CONAF (1998). *Plan de Manejo, Reserva Nacional las Vicuñas*. Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal.

CONAF (s.f.). Reserva Nacional Las Vicuñas. Disponible en: <https://www.conaf.cl/parques/reserva-nacional-las-vicunas/>

Convención de Ramsar (s.f.). La Convención de Ramsar: ¿De qué trata? Disponible en: [https://www.ramsar.org/sites/default/files/fs\\_6\\_ramsar\\_convention\\_sp\\_0.pdf](https://www.ramsar.org/sites/default/files/fs_6_ramsar_convention_sp_0.pdf)

Cooper, H.H. and C.E. Jacob. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geophys. Union Trans* 27: 526-534.

Custodio, E. y M.R. Llamas, 1983. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vols. 2290 pp.

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

Del Río, C. (20 de noviembre de 2020). *Agua de niebla ¿Una fuente alternativa para territorios de escasez hídrica?* [Discurso principal]. Charla de IAHR Chile YPN.

División de Normas del Instituto Nacional de Normalización. (1987). *REQUISITOS DE CALIDAD DE AGUA PARA DIFERENTES USOS*. (Nch 1333).

- DGA (1986). Mapa hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Chile. Realizado por: IPLA.
- DGA (2002). *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Chile. Realizado por: Ayala, Cabrera y Asociados LTDA. Ingenieros Consultores.
- DGA (2007). *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Chile. Realizado por: Ayala, Cabrera y Asociados LTDA. Ingenieros Consultores.
- DGA (2018). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro. Fundación para la transferencia tecnológica Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- DGA (2018). *Diagnóstico Nacional de Organizaciones de Usuarios*. Informe final. Santiago: Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas de Chile.
- DGA (2010). *Cuenca de Camarones: Identificación y Caracterización de Fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: Rol del tranque Caritaya*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Región de Arica y Parinacota, Chile. Realizado por: Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas (LIMZA), Centro de Investigaciones del Hombre en el Desierto (CIHDE), Universidad de Tarapacá.
- DGA (2011). *Estimación de recargas en cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente Pacífica*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Chile. Realizado por: Aquaterra Ingenieros Limitada.
- DGA (2016a). *Estudio Diagnóstico de disponibilidad hídrica, cuenca del Río Camarones*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Región de Arica y Parinacota, Chile. Realizado por: Con Potencial Consultores SPA.
- DGA (2016b). *Análisis integral de soluciones a la escasez hídrica, Región de Arica y Parinacota*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Región de Arica y Parinacota, Chile. Realizado por: Icass Ltda.
- DGA (2017a). *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Chile. Realizado por: Hídrica Consultores SPA y Aquaterra Ingenieros Ltda.
- DGA (2017b). *Análisis integral de soluciones a la escasez hídrica, Región de Arica y Parinacota*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Región de Arica y Parinacota, Chile. Realizado por: ICASS SpA.

- DGA (2017c). *Análisis integral de soluciones a la escasez hídrica, (Segunda Parte) Región de Arica y Parinacota*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Región de Arica y Parinacota, Chile. Realizado por: Icass Ltda.
- DGA (2017d). *Actualización del balance hídrico nacional*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Chile. Realizado por: Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Dirección General de Aguas (2021). *Acerca de la DGA*. Ministerio de Obras Públicas. <https://dga.mop.gob.cl/acercadeladga/Paginas/default.aspx>
- DOH (2008). *Diagnóstico y diseño definitivo Reparación Embalse Caritaya, Provincia de Arica, I Región*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas, Chile. Realizado por: SMI Ltda.
- DOH (2013). *Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada Camarones*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas, Región de Arica y Parinacota, Chile. Realizado por: Arrau Ingeniería E.I.R.L.
- Drori, R., Dan, H., Sprintsin, M., & Sheffer, E. (2020). Precipitation-sensitive dynamic threshold: A new and simple method to detect and monitor forest and woody vegetation cover in sub-humid to arid areas. *Remote Sensing*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/rs12081231>.
- Duffield, G. (2009). Aquifer testing 101: Hydraulic properties representative values of hydraulic properties. Obtenido de: [http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer\\_properties.htm](http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer_properties.htm)
- Dunai, T.J., González, G. y Juez-Larré, J. (2005). Oligocene-Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology*, Vol. 33, Nº 4, p. 321-324.
- Fryar, A.E. y A. Mukherjee. (2021). Encyclopedia of Geology. Groundwater Hydrogeology. 2: 399-407.
- Galli, O.C. (1957). Las formaciones geológicas en el borde occidental de la Puna de Atacama, Sector de Pica, Tarapacá. *Minerales*, Vol. 12, No. 56, p. 14-26.
- Gana, F. (2020). *Proyecciones Económicas Silvoagropecuarias 2021*. Sociedad Nacional de Agricultura. <https://www.ccs.cl/wp-content/uploads/2020/11/Proyecciones2021-SNA.pdf>
- García, M. (2002). *Évolution Oligo-Néogène de l'Altiplano occidental (arc et avant-arc du Nord du Chili, Arica) tectonique, volcanisme, sédimentation, géomorphologie et bilan érosion-sédimentation*. Université Joseph Fourier.

- García, M., Gardeweg, M., Clavero, J. y Hérail, G. (2004). *Hoja Arica, Región de Tarapacá*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 84, 150 p., 1 mapa escala 1:250.000.
- García, M., Riquelme, R., Farías, M., Herail, G., y Charrier, R. (2011). Late Miocene-Holocene canyon incision in the western Altiplano, northern Chile: tectonic or climatic forcing? *Journal of the Geological Society*, 168(4), 1047-1060. doi:10.1144/0016-76492010-134
- García, M.; Fuentes, G. (2012). *Carta Cuya, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° 146, xx p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago, Chile.
- García-Garizábal, I., Abrahao, R. y J. Cauapé. (2012). El manejo del riego y la contaminación por sales y nitrato: un caso de inundación vs. Aspersión. *Información técnica económica agraria*, 108(4), 482-500.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.06.031>
- Hoke, G., Isacks, B., Jordan, T. y Yu, J. (2004). Groundwater-sapping origin for the giant quebradas of northern Chile. *Geology*, 32, 605–608.
- Hossain, M. S., Bujang, J. S., Zakaria, M. H., & Hashim, M. (2015). Assessment of Landsat 7 Scan Line Corrector-off data gap-filling methods for seagrass distribution mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 36(4), 1188–1215. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1007257>
- Hoke, G.D., Isacks, B.L., Jordan, T.E., Blanco, N., Tomlinson, A.J. y Ramezani, J. (2007). Geomorphic evidence for post-10 Ma uplift of the western flank of the central Andes 18830'–228S. *Tectonics*, 26, TC5021, doi:10.1029/2006TC002082.
- Hwang, H.T., Jeon, S.W., Suleiman, A.A., Lee, K.K. (2017). Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Estimated by Three Different Methods. Basel, Suiza. *Water*, 9(12), 942.
- INE. (1997). *VI Censo Nacional Agropecuario: Principales Resultados*. Retrieved from <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/14039>
- INE (2002). *Censo de Población y Vivienda 2002*. Santiago: Instituto nacional de estadísticas-Chile.
- INE. (2009). *VII Censo Nacional Agropecuario: Principales Resultados*. Retrieved from <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>
- INE (2017). *Censo de Población y Vivienda 2017*. Santiago: Instituto nacional de estadísticas-

Chile.

Infraestructura de Datos Geospaciales (IDE) (s.f.). Información Territorial. Disponible en: <https://www.ide.cl/index.php/informacion-territorial/descargar-informacion-territorial>

Instituto de Desarrollo Agropecuario. (2021). *Quienes somos*. Ministerio de Agricultura. <http://www.indap.gob.cl/indap/qu%C3%A9-es-indap>

Jabar, A. S. A., Sulong, G., & George, L. E. (2014). Survey on gap filling algorithms in Landsat 7 ETM+ images. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 63(1), 136–146.

Jones, H. G., & Vaughan, R. (2010). *Remote sensing of vegetation : principles, techniques, and applications*. Oxford: Oxford University Press.

Lahsen, A. (1973). *Evaluación de los resultados de la exploración del campo geotérmico de Puchuldiza, I región Tarapacá*. CORFO - Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica, Santiago. Informe Inédito. 82 p.

Lewis, M.A., Cheney, C.S., Odochartaigh, B.E (2006). *Guide to Pemeability Indices*. UK.

Marquardt, C., Marinovic, N., Muñoz, V. (2008). *Geología de las Ciudades de Iquique y Alto Hospicio, Región de Tarapacá*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 113: 33 p., 1 mapa escala 1:25.000. Santiago.

Maksaev, V. (1978). *Cuadrángulo Chitigua y sector oriental del Cuadrángulo Cerro Palpana, Región de Antofagasta*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 31: 55 p., escala 1:50.000.

MDS (2017). *Encuesta CASEN 2017*. Ministerio de Desarrollo Social de Chile.

MDS (2021). *Registro Social de Hogares*. Ministerio de Desarrollo Social de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (s.f.). Registro Nacional de Áreas Protegidas. Disponible en: <http://areasprotegidas.mma.gob.cl/preguntas-frecuentes/>

Montecinos, F. (1963). *Observaciones de Geología en el Cuadrángulo de Campanani, Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá*. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 109 p.

MOP (2000). *Declaración de impacto ambiental. Instalación de sistema de Agua Potable Rural de Camarones*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas, Región de Tarapacá, Chile.

- MOP (2002). *Declaración de impacto ambiental. Instalación de sistema de Agua Potable Rural de Illapata*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas, Región de Tarapacá, Chile.
- Mortimer, C., Saric, N. (1972). Landform evolution in the coastal region of Tarapacá Province, Chile. *Rev. Géomorphol Dyn.* 21, 162– 170.
- Mortimer, C. and Saric, N. (1975). Cenozoic studies in northernmost Chile. *Geologische Rundschau*, Vol. 64, p. 395-420.
- Muñoz, N., Elgueta, S., Harambour, S. (1988). *El Sistema Jurásico (Formación Livilcar) en el curso superior de la quebrada Azapa, I Región: Implicancias paleogeográficas*. Actas V Congreso Geológico Chileno, Santiago, Tomo 1, p. A403-A415.
- Muñoz, N. (1988). *Estratigrafía y Paleontología de la Formación Blanco (Aptiano) y Formación Lauca (Mioceno), I Región*. Empresa Nacional del Petróleo, Proyectos de exploración fuera de Magallanes (Inédito), 10 p. Santiago.
- Muñoz, N. (1991). *Marco geológico y estratigráfico de un sistema fluvio-lacustre paleógeno, Altiplano de Arica, Norte de Chile*. En Congreso Geológico Chileno, No. 6, Actas, Vol. 1, p. 201-204. Viña del Mar.
- Mpodozis, C., Ramos, V. (1989). The Andes of Chile and Argentina. Houston, Texas, Circum-Pacific council for Energy and Minerals Resources. *Earth Science Series*, V. 11, p. 59-90.
- Mpodozis, C., Ramos, V.A. (2008). Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63: 481-497.
- Mustafa, M. T., Hassoon, K. I., Hussain, H. M., & Abd, M. H. (2017). Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI AND AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Research-Granthaalayah*, 5(10), 117. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1040209>
- Muzzio, G. (1986). *Geología de los cuadrángulos Caleta Camarones, Cuya, Punta Gorda y Atajaña*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe inédito, 43 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Muzzio, G. (1987). *Geología de los cuadrángulos Pisagua, Zapiga, Caleta Buena y Huara*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe inédito, 74 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Naranjo, J.A. y Paskoff, R. (1985). *Evolución cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, norte de Chile (18°–21° S)*. Actas IV Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, 5, 149–164.

- Niemeyer, H., Niemeyer, H. y Schiappacasse, V. (1984). Una falla geológica sub-actual detectada en el sitio arqueológico 14. Desembocadura del Río Camarones-Desierto de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile* 22: 91-94.
- Opazo, T. (2009). *Modelo Hidrogeológico conceptual de las cuencas altiplánicas fronterizas Mucar y Sico, II Región de Antofagasta*. Memoria de Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 203 p.
- Osses, P., Escobar, R., del Rio, C., Garcia, R., & Vargas, C. (2017). El Clima desértico costero con nublados abundantes del desierto de Atacama y su relación con los recursos naturales energía solar y agua de niebla. Caso de estudio Alto Patache (20, 5° S), región de Tarapacá, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (68), 33-48.
- Pampa Camarones (s.f.). Medio Ambiente. Disponible en: <https://www.pampacamarones.cl/medio-ambiente/>
- Parraguez, G. (1998). *Sedimentología y geomorfología producto de la tectónica cenozoica, en la Depresión Central, Pampa de Chaca, I Región Tarapacá, Chile*. Memoria de Título de Geólogo (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 108 p.
- Paskoff, R. (1979). *Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del norte grande de Chile*. Norte Grande, Instituto de Geografía, Universidad. Católica de Chile; N° 6 (1978-1979). Santiago, Chile.
- Peña, F., Sulca, P. y Carpio, J. (2010). Comportamiento Hidrogeológico de las Rocas Volcánicas en la parte alta de la cuenca del Río Quilca-Vitor-Chili. *Sociedad Geológica del Perú*, N°9, p.113-117.
- Pizarro, O., Hormazabal, S., González, A., & Yáñez, E. (1994). Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. *Investigaciones marinas*, 22, 85-101.
- Prodesal (2020). *Catálogo virtual PRODESAL Camarones 2020*. Programa de Desarrollo Local Camarones.
- Riquelme, R. (1998). *Evolución tectonosedimentaria post-oligocénica del borde occidental del Altiplano, entre Tignámar y el Salar de Surire, I Región, Chile*. Tesis de Magíster y Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 123 p.
- Rouse, J. W. J., Haas, R. H., Deering, D. W., Shell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report: Greenbelt, MD, USA*. 371.



- Salas, R., Kast, R., Montecinos, F y Salas, I. (1966). *Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 21, 130 p.
- Salas, R. (1966). *Breve informe geológico de la Mina Santa Ana, quebrada de Camarones, Departamento de Arica*. Instituto de Investigaciones Geológicas-Empresa Nacional de Minería, 4 p.
- Sébrier, M., J. L. Mercier, J. Machare, D. Bonnet, J. Cabrera y Blanc, J. L. (1988). State of stress in an overriding plate situated above a flat slab: The Andes of central Peru. *Tectonics*, 7, 895– 928.
- Chakravorty, B. y Pandey, N.G. (1998). Determination of Hydraulic conductivity of Soils in Central Bihar. *National Institute of Hydrology*. CS (AR)-2/98-99.
- SII (2021). *Estadísticas de empresas*. Servicio de Impuestos Internos de Chile.
- Silob Chile (2014). *Informe de ensayo de agua (RS 14.16)*. Aguas sódicas cloruradas.
- Skarmeta, J. (1983). *The structural geology of the Sierra de Moreno, northern Chile*. PhD Thesis, University of London, 299 p.
- Theis, C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Amer. Geophys. Union* 16: 519-524.
- Tobar, A., Salas, I. y Kast, R. (1968). *Cuadrángulos Camaraca y Azapa. Provincia de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 19-20: 13 p., escala 1:50.000. Santiago.
- Tosdal, R., Clark, A. y Farrar, E. (1984). Cenozoic polyphase landscape and tectonic evolution of the Cordillera Occidental, southernmost Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 1318–1332.
- Tribunal Ambiental (2018). Tribunal concluyó que Pampa Camarones causó daño ambiental irreparable y la condenó a repararlo. Disponible en: <https://www.tribunalambiental.cl/sentencia-d-25-2016-pampa-camarones/>
- USGS. (1969). *Discharge Measurement at Gaging Stations*. (Capítulo A8).
- Valenzuela, I., Herrera, S., Pinto, L., Del Real, I. (2014). *Carta Camiña, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá*. Mapa escala 1:100.000.
- Vargas, G, Ortlieb, L. y Rutlant, J. (2000). Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile* 27 (2): 157-176.

- Vásquez, M.A. (2016). *Evaluación de Recursos Hídricos y Modelo Operacional, Embalse Caritaya, Valle Camarones, Región de Arica y Parinacota*. [Memoria. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile]. Repositorio Institucional – Universidad Técnica Federico Santa María.
- Viteri, E. (1979). *Geología y Recursos Minerales de la Formación Huaylas en el Altiplano de Arica*. En Congreso Geológico Chileno, No. 2, Actas, p. C57-C68. Arica.
- Vogel, S. y Vila, T. (1980). *Cuadrángulos Arica y Poconchile, Región de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 35: 24 p. Santiago.
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., ... Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.05.016>