

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

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA QUEBRADA CARACOLES**

**ANEXOS**

**REALIZADO POR:**

Ingeniería y Gestión Ambiental Enlaces SpA

**S.I.T. N° 498**

**Febrero 2022**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Ingeniero Civil, Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas (S)  
Ingeniero Civil mención Hidráulica, Sanitaria y Ambiental, Cristian Núñez Riveros

Director Regional de Aguas, Región de Antofagasta (S)  
Ingeniero Civil, Arturo Beltrán Schwartz

Jefe División de Estudios y Planificación  
Ingeniero Civil, Mauricio Lorca Miranda

Inspectora Fiscal  
Constructora Civil, Cecilia Roa Espinoza

Inspectora Fiscal Subrogante  
Ingeniera Civil, Andrea Osses Vargas

## **INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL ENLACES SPA**

Jefa de Proyecto  
Ingeniera Civil Hidráulica, María Angélica Alegría Calvo

Profesionales Equipo Especialistas

Ingeniera Civil Hidráulica, Antonia Arroyo Welkner  
Geólogo, Mauricio Andrés Claría Hofer  
Ingeniero Civil (e), Felipe Alberto Durán Burnier  
Geógrafo, Javier Ignacio Fuentes Torrejón  
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, Pía Carolina García Peña  
Ingeniera Civil Hidráulica, María Alejandra Isamit Faure  
Antropólogo, PhD., Felipe Arturo Maturana Díaz  
Ingeniero Civil Agrícola, David Osvaldo Pavez Pavez  
Ingeniero Forestal, PhD., Rodrigo Marcelo Valdés Pineda  
Ingeniera Civil Hidráulica, Camila Francisca Vega Alvarado

## **ANEXOS**

ANEXO A ABREVIACIONES

ANEXO B REFERENCIAS

ANEXO C GLOSARIO

ANEXO D FIGURAS

ANEXO E ANTECEDENTES RECOPIADOS

ANEXO F TRABAJO DE TERRENO

ANEXO G SIG

ANEXO H MODELO HIDROLÓGICO

ANEXO I DETALLE ACTIVIDADES PAC

ANEXO J INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DE LA CUENCA

ANEXO K INICIATIVAS

**ANEXO A**  
**ABREVIACIONES**

El presente anexo contiene todas aquellas formas de expresión escritas que representan palabras o grupo de palabras específicas contenidas en este estudio.

## **ORGANISMOS**

CBR	: Conservador de Bienes Raíces
CIREN	: Centro de Información de Recursos Naturales
CNR	: Comisión Nacional de Riego
CSIRO	: Commonwealth Industrial and Scientific Research Organization
CONADI	: Corporación Nacional de Desarrollo Indígena
CONAF	: Corporación Nacional Forestal
CONAMA	: Comisión Nacional del Medio Ambiente
CORFO	: Corporación de Fomento de la Producción
CPA	: Consejo de Pueblos Atacameños
DARH	: Departamento de Administración de Recursos Hídricos
DGA	: Dirección General de Aguas
DICTUC	: Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile
DIDECO	: Dirección de Desarrollo Comunitario
DOH	: Dirección de Obras Hidráulicas
INDAP	: Instituto de Desarrollo Agropecuario
INE	: Instituto Nacional de Estadísticas
GORE	: Gobierno Regional
MINAGRI	: Ministerio de Agricultura
MINSAL	: Ministerio de Salud
MMA	: Ministerio de Medio Ambiente
MOP	: Ministerio de Obras Públicas
OCDE	: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ONEMI	: Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior
SAG	: Servicio Agrícola y Ganadero
SEA	: Servicio de Evaluación Ambiental
SEIA	: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

SEREMI	: Secretario Regional Ministerio
SERNATUR	: Servicio Nacional de Turismo
SERNAGEOMIN	: Servicio Nacional de Geología y Minería
SERVIU	: Servicios de Vivienda y Urbanización
SISS	: Superintendencia de Servicios Sanitarios
SUBDERE	: Subsecretaría del Desarrollo Regional y Administrativo
UICN	: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

### **ABREVIATURAS TÉCNICAS**

APR	: Agua Potable Rural
CC	: Cambio climático
CASEN	: Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional
CPA	: Catastro Público de Aguas
DAA	: Derechos de Aprovechamiento de Aguas
EIA	: Evaluación de Impacto Ambiental
ERNCC	: Energías Renovables No Convencionales
GIRH	: Gestión Integrada de Recursos Hídricos
IC	: Índice de Calidad
JV	: Juntas de Vigilancia
NCh	: Norma Chilena
OUA	: Organizaciones de Usuarios de Agua
PAC	: Plan de Participación Ciudadana
PEGH	: Plan Estratégico de Gestión Hídrica
PGC	: Plan de Gestión de Cuencas
PIB	: Producto Interno Bruto
PM	: Plan de Monitoreo
PTAS	: Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas
RCA	: Resolución de Calificación Ambiental
RPA	: Registro de Propiedad de Aguas
RPOU	: Registro Público de Organizaciones de Usuarios
RRHH	: Recursos hídricos

SHAC	: Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común
SIG	: Sistema de Información Geográfica
SNASPE	: Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado
U.F.	: Unidad de Fomento
WEAP	: Water Evaluation and Planning System
ZOIT	: Zonas de Interés Turística

### **PARÁMETROS CALIDAD DE AGUAS**

As	: Arsénico
Ca	: Calcio
CE	: Conductividad Eléctrica
Cd	: Cadmio
Cl	: Cloruro
Co	: Cobalto
CO <sub>3</sub>	: Carbonato
Cr	: Cromo
CT	: Coliformes Totales
Cu	: Cobre
Fe	: Hierro
HCO <sub>3</sub>	: Bicarbonato
Hg	: Mercurio
K	: Potasio
Mg	: Magnesio
Mn	: Manganeseo
Mo	: Molibdeno
Na	: Sodio
NH <sub>4</sub>	: Amonio
Ni	: Níquel
NO <sub>3</sub>	: Nitrato
Pb	: Plomo

PO <sub>3</sub>	: Fosfito
SDT	: Sólidos Disueltos Totales
Se	: Selenio
SO <sub>4</sub>	: Sulfato
T°	: Temperatura
Zn	: Zinc



**ANEXO B**  
**REFERENCIAS**

Este anexo contiene todas aquellas fuentes que se utilizaron de apoyo en el trabajo para sustentar los argumentos o los hechos mencionados en el presente estudio, presentado primero las referencias del documento "Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca Quebrada Caracoles" y posteriormente las referencias del documento "Anexo F - Aspectos metodológicos del plan de cuencas". También se incluyen registros web y conversatorios que se citan a lo largo del desarrollo de este estudio.

## **Referencias**

AC Ingenieros Consultores Ltda. 2006. Análisis y determinación de caudales de reserva para abastecimiento de la población y usos de interés nacional. DGA.

Amphos 21. 2017. Diagnóstico para desarrollar plan de riego en la región de Antofagasta. CNR.

Amphos 21 Consulting Chile Ltda. 2014. Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos. DGA.

Aquanexus y Cia Limitada. 2016. Análisis Y Sistematización Información Estaciones Hidrometereológicas Y Calidad De Aguas, Región De Antofagasta. DGA.

Aquaterra Ingenieros Limitada. 2010. Análisis De Metodología Y Determinación De Caudales De Reserva Turísticos. DGA.

AquaTerra Ingenieros Ltda. 2014. Análisis Y Sistematización De Información Regional Para Plan Estratégico Para Gestión De Recursos Hídricos Región De Antofagasta. DGA.

Arcadis. 2016. Plan Estratégico de Gestión de Recursos Hídricos de la Región de Antofagasta.

Arrau. 2012. Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta. Arrau Ingeniería.

Astudillo, N.; Ferrando, R.; Montecinos, D.; Espinoza, F.; Venegas, C.; Stephen, M.; Cornejo, P. y Arévalo, C. 2017. Carta Augusta Victoria, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Serie Geología Básica N°189. Servicio Nacional de Geología y Minería.

- Baeza, L. y Astudillo, N. 2019. Carta Pedro de Valdivia, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Serie Geología Básica N°206. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Barría, P., Chadwick, C., Ocampo-Melgar, A., Galleguillos, M., Garreaud, R., Díaz-Vasconcellos, R., ... & Poblete-Caballero, D. (2021). Water management or megadrought: what caused the Chilean Aculeo Lake drying?. *Regional Environmental Change*, 21(1), 1-15.
- Basso, M. 2004. Carta Baquedano, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Serie Geología Básica N°82. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- BM – Banco Mundial. 2013. Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua. Unidad de Ambiente y Aguas Departamento de Desarrollo Sostenible Región para América Latina y el Caribe / Gobierno de Chile.
- Centro De Ecología Aplicada Ltda. 2008. Determinación De Caudales Ecológicos En Cuencas Con Fauna Íctica Nativa Y En Estado De Conservación. DGA.
- CMZ - Compañía Minera Zaldívar. 2018. EIA Estudio de Impacto Ambiental. Proyecto Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar. . .
- Consortio Geofun - Procivil. 2000. Diagnóstico Y Propuesta De Fomento A La Agricultura Regada En La II Región. CNR.
- Consortio Geofun - Procivil. 2000. Diagnóstico Y Propuesta De Fomento A La Agricultura Regada En La Ii Región. CNR.
- Cortés, J. 2000. Hoja Palestina, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Mapa Geológico N°19. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- DARH. 2012. Evaluación De Los Recursos Hídricos Subterráneos Del Acuífero De Sierra Gorda. DGA.
- DGA. 2010. Mapoteca Digital. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca> - <http://www.ide.cl/descarga/capas>. DGA.
- DGA. 2017. Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad De Los Recursos Hídricos En Chile.

- DICTUC S.A.; SEI. 2019. Desarrollo De Herramienta Para El Análisis De Gestión En El Marco Del Plan Nacional De Recursos Hídricos. DGA.
- Domagala, J.; Escribano, J.; De la Cruz, R.; Saldías, J. y Jorquera, R. 2016. Cartas Blanco Encalada y Pampa Remiendos, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Serie Geología Básica N°187-188. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Duhart, P.; Muñoz, J.; Quiroz, D.; Mestre, A. y Varas, G. 2018. Carta Sierra Gorda, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Serie Geología Básica N°198. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Ferrando, R.; Espinoza, F.; Stephen, M.; Cornejo, P. y Arévalo, C. 2013. Carta Aguas Blancas, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Serie Geología Básica N°160. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Ferraris, F. y Di Biase F. 1978. Hoja Antofagasta, Región de Antofagasta, escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile N°30. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Fundación Para La Transferencia Tecnológica, Pontificia Universidad Católica De Chile. 2018. Aplicación De La Metodología De Actualización Del Balance Hídrico Nacional En Las Cuencas De Las Macrozonas Norte Y Centro. DGA.
- Gana, P.; Lazo, I.; Suárez, M. y Marinovic, N. 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Publicación Geológica Digital, No. 4. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- González, G. y Niemeyer, H. 2005. Cartas Antofagasta y Punta Tetas, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Serie Geología Básica N°89. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Henriquez Dole, L. E., Vicuna, S., Gironas, J. A., & Meza, F. J. 2016, December. Adaptation Measures Evaluation on Agriculture Under Future Climate and Land Use Scenarios in Central Chile. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2016, pp. H51A-1408).
- Hídrica Consultores Spa y AquaTerra Ingenieros Ltda. 2017. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. DGA.
- IMSG. 2020. PLADECO Plan de Desarrollo Comunal de Sierra Gorda 2020-2027. SUR Profesionales Consultores.

- INE. 2017. Censo de Población y Vivienda 2017. INE.
- Ley Orgánica 17.374 [Ley 17.374]. Ministerio de Economía. Creación del Instituto Nacional de Estadísticas, 10 de diciembre de 1970, art. 29 (Chile).
- Marinovic, N. 2007. Carta Oficina Domeyko, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Serie Geología Básica N°105. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Marinovic, N. y García, M. 1999. Hoja Pampa Unión, Región de Antofagasta, escala 1:100.000. Mapa Geológico N°9. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Marinovic, N., Smoje, T.; Maksaev, J.; Herve, A. y Mpodozis, M. 1992. Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta, escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile N°70. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- McNamara, I., Nauditt, A., Zambrano-Bigiarini, M., Ribbe, L., & Hann, H. 2020. Modelling water resources for planning irrigation development in drought-prone southern Chile. *International Journal of Water Resources Development*, 1-26.
- MOP - Ministerio de Obras Públicas. 2020. Mesa Nacional del Agua. Informe Final del Proceso de Participación Ciudadana. Noviembre, 2020.
- Munizaga, J. 2009. Prefactibilidad técnica de un vertedero controlado de alta densidad para la ciudad de Antofagasta, Chile. Universidad Internacional de Andalucía.
- OCDE - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. 2015. Principios de Gobernanza del Agua. En: <https://www.oecd.org/cfe/regionaldevelopment/OECD-Principles-Water-spanish.pdf>. OECD.
- Peña, H. 2020. Reforma Legal y Gestión de los Recursos Hídricos. Análisis Crítico. Charla SOCHID – Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 27/5/2020.
- Retamal, F. et al. 2013. Gobernanza del Agua y Cambio Climático: Fortalezas y Debilidades del Actual Sistema de Gestión del Agua en Chile. *Rev. Interciencia*, Vol. 38.
- SRK. 2021. ANEXO 21. Modelo hidrogeológico, DIA Proyecto Alternativo Depositación de Relaves en Rajo, Región de Antofagasta. GAC.
- Tapella, E. 2007. El mapeo de Actores Claves. Universidad Nacional de Córdoba, Inter-American Institute for Global Change Research. IAI).

UCH - PUC. 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional. DGA.

UCH Facultad de Ciencias Agronómicas. 2018. Diagnóstico Nacional De Organizaciones De Usuarios. DGA.

UNDP - United Nations Development Programme. 2009. Manual de Capacitación sobre la Integridad del Agua. En: [http://www.waterintegritynetwork.net/wp-content/uploads/2015/03/WI-TrainingManual\\_ES.pdf](http://www.waterintegritynetwork.net/wp-content/uploads/2015/03/WI-TrainingManual_ES.pdf).

Vicuña, S., Garreaud, R. D., and McPhee, J. 2011. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105(3), 469-488.

Vicuña, S., McPhee, J., and Garreaud, R. D. 2012. Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt-driven basin in semiarid Chile. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 431-441.

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500.

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.

## **Páginas Web**

<<https://www.aminerals.cl/comunicaciones/noticias/2015/agua-potable-para-sierra-gorda-y-baquedano/>>

Consultado julio 2021.

<<https://municipalidadsierragorda.cl/index.php/alcaldia/nuestra-historia/>>

Consultado julio 2021.

Salitreras de la provincia de Antofagasta. En:  
<<http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-92937.html>>

Consultado julio 2021.

<https://www.cigiden.cl/30-anos-del-aluvion-de-antofagasta-los-expertos-advierten-que-el-riesgo-persiste-en-la-region/>

Consultado julio 2021.

## **Conversatorios**

2020. Conversatorio: Gobernanza y Calidad de Agua del Biobío. 4/6/2020. OCAB - Observatorio Calidad de Agua del Biobío / CREA - Centro Regional de Estudios Ambientales de la Univ. Católica de la UCSC - Santísima Concepción UCS. Iniciativa financiada por el GORE del Biobío.

**ANEXO C**  
**GLOSARIO**



El presente anexo contiene el catálogo alfabetizado de palabras y expresiones utilizadas a lo largo del informe, las cuales podrían ser difíciles de comprender, junto con su significado. El objetivo de este anexo es facilitar la comprensión al lector de términos técnicos fundamentales de uso no habitual para quienes no son especialistas en el área.

## **A**

### **Agua potable rural**

Programa destinado a dotar de agua potable a las localidades rurales del país, mediante la construcción, mantenimiento, operación y conservación de Sistemas de agua potable.

## **E**

### **Estaciones fluviométricas**

Estaciones destinadas a la medición de caudal que llevan los cursos de agua donde se ubican, ya sea un río o estero. Los caudales son medidos y procesados por la DGA, presentándolos en diferentes unidades de tiempo, como caudales instantáneos, caudales medios mensuales, entre otros.

### **Estaciones meteorológicas**

Estaciones destinadas a la medición de parámetros meteorológicos, pudiendo incluir: temperatura, pluviometría, humedad relativa, evaporación, viento, horas de sol y radiación solar y presión atmosférica. La medición de estos parámetros se lleva a cabo mediante diversos sensores e instrumentos específicos.

### **Estaciones sedimentométricas**

Estaciones destinadas a medir la cantidad de sedimentos (Gastos sólidos) que lleva un curso de agua.

### **Estaciones de calidad de agua**

Estaciones destinadas a medir parámetros fisico-químicos de cuerpos de agua, como: aguas superficiales (ríos, esteros), aguas subterráneas o en lagos o embalses.

### **Estaciones de Aguas Subterráneas o Niveles**

Pozos que disponen de un sensor que indica la profundidad de la napa subterránea. Se utilizan para monitorear los niveles del acuífero.

### **O**

### **Obras hidráulicas**

Corresponden a: obras de riego para asegurar la disponibilidad de agua en zonas agrícolas, obras de drenaje de aguas lluvias para mitigar posibles inundaciones, obras de manejo de cauces naturales y de control aluvional.

**ANEXO D**

**FIGURAS**

**DISPONIBLE EN FORMATO DIGITAL**

**ANEXO E**

**ANTECEDENTES RECOPIADOS**

**DISPONIBLE EN FORMATO DIGITAL**

**ANEXO F**  
**TRABAJO DE TERRENO**

En el presente anexo se incluye la información relacionada con los trabajos de terreno realizados en el contexto de este estudio en la cuenca.

ANEXO F-1 Topografía

ANEXO F-2 Geofísica (Disponible en formato digital)

ANEXO F-3 Muestras de agua

## **ANEXO F-1: Topografía**



### **Georreferenciación de Pozos Ingeosal Ltda.**

**MANDANTE** : ENLACES Spa.  
**UBICACIÓN** : Quebrada Caracoles, Minera Centinela,  
Antofagasta.

## **Introducción**

El presente informe tiene como objeto señalar los procedimientos empleados en la medición del sitio antes descrito.

La solicitud de medición es realizada por ENLACES Spa. Ingeniería y gestión ambiental.

Se requiere se midan las coordenadas en pozos, norias o drenes, según existencia en el área de estudio, los registros de las ubicaciones de cada pozo se realizarán mediante topografía geodésica especificando coordenadas Norte, Este en datum WGS84H19 y elevaciones en metros s.n.m.

Lo anterior, se requiere para el catastro de captaciones (donde se medirá calidad de agua) en sector nor-este de la Cuenca Quebrada de Caracoles.

## **Desarrollo del Trabajo**

Se medirán 40 puntos de acuerdo con la planificación programada y actualizada enviada.

Estos pozos fueron medidos con equipo GPS.

## **Georreferenciación de los Pozos**

Para ligar el trabajo se utilizó como vértice base **PGE-07**, que fue ligado a partir de un vértice *IGM y suministrado por Minera Centinela*.

Las mediciones fueron realizadas con equipo GPS Geodésico de doble frecuencia, método cinemático. Los parámetros y tiempos de medición se realizaron en base a lo recomendado por el fabricante, bajo este criterio se obtienen precisiones milimétricas, generando líneas confiables y dentro de tolerancias permitidas.

## **Instrumental empleado**

- a) Sistema GPS frecuencia doble, modelo R6, marca Trimble.

## **Trabajo Gabinete**



a) Proceso de datos GPS; los datos son procesados con el software de post proceso Trimble Business Center.

VERTICE VINCULACIÓN IGM EN COORDENADAS UTM

<b>NOMBRE</b>	<b>NORTE</b>	<b>ESTE</b>	<b>ALTURA ELIPSOIDAL</b>	<b>DATUM</b>
PGE-07	7456776,163	490300,370	2331.308	SIRGAS WGS-84

Presentación y entrega de la información Se anexa informe de procesamiento datos.

Datos del archivo del proyecto		Sistema de coordenadas	
Nombre:	D:\Trimble Business Center 5.0\TRABAJOS 2021\DGA - CENTINELA\WGS84 2021NOV DGA - CENTINELA 004.vce	Nombre:	World wide/UTM
Tamaño:	93 KB	Datum:	WGS 1984
Modificado/a:	14-11-2021 14:50:21 (UTC:-3)	Zona:	19 South
Zona horaria:	Hora est. Sudamérica Pacífico	Geoide:	EGM 2008 GLOBAL 1x1
Número de referencia:		Datum vertical:	
Descripción:		Obra calibrada:	
Comentario 1:			
Comentario 2:			
Comentario 3:			

### Lista de puntos

ID	Este (Metro)	Norte (Metro)	Elevación (Metro)	Código de característica
113	493108.201	7454657.025	2381.438	TPB-2
114	493098.913	7454662.950	2380.849	TP-02
115	489212.419	7454325.586	2262.308	DP-1
116	494865.313	7453817.428	2458.514	DP-13
117	492961.549	7451827.988	2411.224	DP-5
119	493103.991	7449629.220	2436.214	DPB-2 A
120	493115.654	7449628.517	2436.502	DP-03-A
121	492201.948	7447885.770	2437.685	DP-07
124	476420.228	7429624.196	2163.420	HLPSS19-01
125	479489.329	7430691.041	2288.648	HLPSS21-03
201	491066.925	7461888.918	2242.912	REC-1
202	494716.019	7462503.961	2314.734	MW 1
203	491138.670	7462937.147	2220.568	REC-4
204	490817.394	7463625.136	2187.458	SE-02
205	477558.312	7456562.762	1887.720	RP-4
ALEJANDRA 1	487602.534	7454817.133	2220.200	BASE GARITA SUR
PGE 07	490300.370	7456776.159	2295.480	BASE CENTINELA
PGPS1	479084.119	7431764.190	2336.804	BASE POLO SUR

14-11-2021 14:50:56	D:\Trimble Business Center 5.0\TRABAJOS 2021\DGA - CENTINELA\WGS84 2021NOV DGA - CENTINELA 004.vce	Trimble Business Center
---------------------	--	-------------------------

Archivo kmz de los puntos se encuentra disponible en la versión digital.

## ANEXO F-3: MUESTREO HIDROQUÍMICO

### 1. Introducción y objetivos

El presente informe expone la planificación, metodologías y resultados de la campaña de terreno relacionada al catastro y toma de muestras de captaciones subterráneas, como parte del desarrollo del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca Quebrada Caracoles.

El objetivo fue el registro de nivel, el perfilaje de conductividad y temperatura en la profundidad (CTD), la medición de parámetros *in-situ* y la toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio, en pozos existentes pertenecientes a Mina Centinela. En paralelo, se registraron las coordenadas planimétricas y cota de cada una de las captaciones, por parte de un equipo independiente.

Los pozos analizados comprenden los pozos de exploración que ha perforado la Mina Centinela, propiedad de Antofagasta Minerals.

### 2. Planificación

En coordinación con personal de la Mina Centinela, se planificó la campaña de terreno para 3 días completos de terreno, completando un universo de 48 pozos posibles de catastrar, distribuidos en toda el área de operación de la faena, además de una nueva zona de exploración.

**Tabla 2-1 Cantidad de pozos diarios planificados.**

08-11-2021 (medio día)	13 pozos
09-11-2021	12 pozos
10-11-2021	14 pozos
11-11-2021 (medio día)	9 pozos

Fuente: Elaboración propia.

Previo al ingreso a faena, se cumplió un estricto protocolo de entrada para salvaguardar la integridad física de los participantes, tanto como del equipo consultor, DGA, topógrafos y Centinela. Se cumplió con la realización de test PCR, declaraciones de salud y controles diarios del estado general de salud de los participantes. Además, se contó con todos los elementos de protección personal requeridos para las actividades realizadas y los accesos a zonas especiales, como el sector de la mina propiamente tal.

### 3. Ejecución

Durante el período considerado, se visitaron 8 pozos en total. La Tabla 3-1 presenta un resumen de los pozos visitados y los parámetros y pruebas controladas en cada uno.

**Tabla 3-1 Pozos visitados.**

Pozo	Fecha	Parámetros controlados				
		Nivel	Perfil CTD	Topografía	Físico-químicos <i>in-situ</i>	Muestras
TP-2	08-11-2021	x	x	x		
TPB-2	08-11-2021	x	x	x		
SE-02	09-11-2021	x	x	x	x	x
REC-4	09-11-2021	x		x	x	x
REC-1	09-11-2021	x	x	x	x	x
RP-4	10-11-2021	x	x	x	x	x
DP-1	11-11-2021	x	x	x	x	x
HL1901	11-11-2021	x		x	x	x

Fuente: Elaboración propia.

Sobre los pozos con falta de parámetros controlados, por falta de tiempo el día 8 de noviembre no se alcanzó a obtener muestras de agua de los pozos catastrados. Sobre la ausencia de perfilajes CTD en los pozos REC-1 y HL1901, se mencionan dos factores. En el pozo REC-1 se registró una columna de agua en torno a los 10 metros, por lo que la información que se pudo haber obtenido a partir del perfil CTD sobre este pozo no hubiera sido relevante. Por otro lado, el pozo HL1901 presentaba una profundidad de 250 metros y una columna de agua en torno a los 80 metros. Por falta de materiales para realizar el perfilaje completo, en particular el cordel con el que se descendía la sonda en la captación

es que se optó por optimizar los tiempos y purgar y extraer las muestras antes de que se pudiera conseguir una extensión para realizar el perfilaje. Una vez removida el agua en la columna con el *bailer*, se pierde la representatividad de las condiciones naturales del acuífero de la conductividad y la temperatura en la profundidad, por lo tanto, ya no se justificaba la realización del perfilaje en la captación.

## 4. Resultados

### I. Topografía

El trabajo topográfico consistió en la determinación de las coordenadas geodésicas de cada captación catastrada. El conjunto de pozos ubicados con topografía corresponde a un conjunto mayor a aquel con catastro completo. La Tabla 4-1 presenta los puntos ubicados con topografía y las bases utilizadas como referencia.

**Tabla 4-1 Coordenadas puntos registrados.**

<b>ID Punto</b>	<b>Este [m]</b>	<b>Norte [m]</b>	<b>Elevación [m.s.n.m.]</b>	<b>Comentario</b>
TPB-2	493108,201	7454657,025	2381,436	Medición de nivel
TP-02	493098,913	7454662,95	2380,849	Medición de nivel
DP-1	489212,419	7454325,586	2262,308	Catastro completo
DP-13	494865,313	7453817,428	2458,514	-
DP-5	492961,549	7451827,988	2411,224	-
DPB-2-A	493103,991	7449629,22	2436,214	-
DP-03-A	493115,654	7449628,517	2436,502	-
DP-07	492201,948	7447885,77	2437,685	-
HLPSS19-01	476420,228	7429624,196	2163,42	Catastro completo

**Tabla 4-1 Coordenadas puntos registrados.**

<b>ID Punto</b>	<b>Este [m]</b>	<b>Norte [m]</b>	<b>Elevación [m.s.n.m.]</b>	<b>Comentario</b>
HLPSS21-03	479489,329	7430691,041	2288,648	
REC-1	491066,925	7461888,918	2242,912	Catastro completo
MW-1	494716,019	7462503,961	2314,734	-
REC-4	491138,67	7462937,147	2220,568	Catastro completo
SE-02	490817,394	7463625,136	2187,458	Catastro completo
RP-4	477558,312	7456562,762	1887,72	Catastro completo
BASE GARITA SUR	487602,534	7454817,133	2220,2	Referencia
BASE CENTINELA	490300,37	7456776,159	2295,48	Referencia
BASE POLO SUR	479084,119	7431764,19	2336,804	Referencia



**Figura 4-1 Fotografías de los trabajos topográficos. (a) Estación en pozo DP-1. (b) Estación en Base Centinela.**

## II. Niveles

La Tabla 4-2 presenta los niveles registrados en terreno.

**Tabla 4-2 Niveles registrados en terreno.**

Punto	Fecha	Profundidad Nivel [m]	Altura Brocal [cm]	Cota Nivel [m.s.n.m.]	Comentario
TBP-2	08-11-2021	57,55	8,4	2323,97	-
TP-02	08-11-2021	56,48	10	2324,47	-
REC-4	09-11-2021	164,84	45,5	2056,18	-
REC-1	09-11-2021	187,17	35	2056,09	-
SE-02	10-11-2021	127,7	75,5	2060,51	-
RP-4	10-11-2021	113,35	11	1774,48	-
DP-1	11-11-2021	63,92	10,5	2198,49	-
HL1901	11-11-2021	168,63	53	1995,32	Nivel Dinámico

## III. Parámetros in-situ

Los parámetros in-situ fueron analizados utilizando 2 herramientas: una sonda multiparámetros y un kit de alcalinidad que permite realizar la titulación de las muestras en terreno. La Tabla 4-3 presenta los resultados de esta actividad.



**Tabla 4-3 Parámetros fisicoquímicos medidos *in-situ*.**

Variable	REC-4	REC-1	SE-02	RP-4	DP-1	HL1901
<b>Temperatura [°C]</b>	25,02	24,11	21,99	28,27	24,42	29,38
<b>pH</b>	7,47	7,49	7,38	6,72	7,3	7,54
<b>mV [pH]</b>	-49,7	-45,1	-44	-5,5	-39,8	-54,1
<b>ORP [mV]</b>	197,5	-289,1	128,3	178,5	145,2	110,5
<b>EC [μS/cm]</b>	12290	5450	13000	81200	11670	24210
<b>EC Absoluta [μS/cm]</b>	12300	-	12260	86240	11540	26230
<b>RES [Ohm-cm]</b>	81	-	77	12	86	41
<b>TDS [ppm]</b>	6149	-	6501	40600	5838	12110
<b>Salinidad [psu]</b>	7,03	-	7,49	56,76	6,65	14,61
<b>Presión [psi]</b>	11,581	-	11,535	11,969	11,51	11,666
<b>D.O. [%]</b>	90,3	16,9	77,7	63,3	74,3	65,9
<b>D.O. [ppm]</b>	5,6	1,1	5,05	2,96	4,64	3,67
<b>Alcalinidad Total [mg/l CaCO3]</b>	120	570	150	135	60	420
<b>Fecha</b>	09-11-2021	09-11-2021	10-11-2021	10-11-2021	11-11-2021	11-11-2021
<b>Comentario</b>	-	Medido con multiparám. externa	-	-	-	-

#### IV. Análisis de laboratorio

Los análisis de los parámetros fisicoquímicos para las muestras obtenidas en las campañas de terreno los días 9 y 10 de noviembre de 2021 son entregados por el laboratorio y sistematizados en la Tabla 4-4 Parámetros fisicoquímicos muestreados en terreno.

**Tabla 4-4 Parámetros fisicoquímicos muestreados en terreno.**

Parámetro	Unidad	DP-1	HL-1901	REC-4	RP-4	SE-2
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	59,1	427	180	137	80,2
Aluminio	mg/L	8,2	19,6	35,4	3,5	6,6
Arsénico	mg/L	0,017	0,043	0,099	0,007	0,013
Bario	mg/L	0,074	0,11	0,126	0,122	0,048
Berilio	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Bicarbonatos	mg CaCO <sub>3</sub> /L	59,1	427	180	137	80,2
Boro	mg/L	15,4	5,1	15,3	5,3	14,9
Cadmio	mg/L	0,002	0,004	0,006	< 0,001	0,002
Calcio	mg/L	576,2	648,3	526,5	9024	626,7
Carbonatos	mg CaCO <sub>3</sub> /L	< 1,000	< 1,000	< 1,000	< 1,000	< 1,000
Cinc	mg/L	0,235	0,205	0,138	0,374	0,163
Cloruro	mg/L	1603	4417	1707	6720	2347
Cobalto	mg/L	0,006	0,011	0,012	0,009	0,005
Cobre	mg/L	0,426	0,417	0,528	0,274	0,354
Conductividad	us/cm	11350	23700	12000	80400	12970
Cromo	mg/L	0,04	0,007	0,031	< 0,005	0,013
Fluoruro	mg/L	0,593	0,337	1,87	< 0,100	2,19
Hierro	mg/L	6,9	12,2	24,5	1,5	4,6
Litio	mg/L	2,2	2,4	1,3	1,6	1,1
Magnesio	mg/L	231,2	848	111,2	2221	109,8
Manganeso	mg/L	0,178	0,556	0,668	0,746	0,125
Mercurio	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Molibdeno	mg/L	0,16	0,005	< 0,005	< 0,005	0,093
Níquel	mg/L	0,008	0,009	0,011	0,006	0,006
Nitrato	mg N/L	82,9	610,6	90,6	146	125,9

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>DP-1</b>	<b>HL-1901</b>	<b>REC-4</b>	<b>RP-4</b>	<b>SE-2</b>
Nitrito	mg N/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Nitrógeno amoniacal	mg/L	1,3	< 0,100	0,831	1	< 0,100
Nitrógeno total	mg N/L	85,3	611	92	147,5	126,3
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	2,4	0,369	1,4	1,5	0,397
pH	unidad de pH	7,3	7,61	7,34	6,72	7,49
Plata	mg/L	0,007	0,005	0,002	0,032	0,008
Plomo	mg/L	< 0,02	0,021	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Potasio	mg/L	23,3	47,5	23,7	58,7	29,7
Selenio	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Sodio	mg/L	1789	5116	2233	9894	2270
Sulfato disuelto	mg/L	3848	6886	3704	1303	3079
Vanadio	mg/L	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008
Temperatura pH	°C	20	20	20	20	20

Fuente: Elaboración propia.

## **V. Análisis de calidad de Agua**

La calidad del agua es compleja de determinar y describir, en tanto esta está determinada por un número importante de parámetros. Más aún, el concepto de "buena" calidad del agua está sujeta al uso del agua, el que determina qué parámetros son relevantes y en qué nivel son adecuados y/o aceptables.

Como una manera de tener valores de referencia o comparativos para el análisis, se utilizará la Norma Chilena "NCh 1.333 Of. 78" Requisitos de calidad de agua para diferentes usos", la cual establece estándares de calidad para aguas de regadío y la "NCh 409/01" que establece estándares para agua potable que en el caso de la cuenca en estudio es relevante ya que las aguas subterráneas se utilizan mayormente para estos fines y cuyos parámetros y concentraciones máximas permitidas se presentan en la Tabla 4-5.

**Tabla 4-5 Límites para agua de riego, NCh 1.333/78 y para Consumo humano NCh 409/01.**

N°	Indicador	Unidad	Expresión	Nch 1333/78	Nch 409/01
1	pH	Unidad	pH	5,5 – 9,0	6 - 8,5
2	Aluminio	mg/l	Al	5,00	-
3	Arsénico	mg/l	As	0,10	0,05
4	Bario	mg/l	Ba	4,00	-
5	Berilio	mg/l	Be	0,10	-
6	Boro	mg/l	Bo	0,75	-
7	Cadmio	mg/l	Cd	0,01	0,01
8	Calcio	µg/l	Ca	70,00	-
9	Cianuro	mg/l	CN	0,20	0,2
10	Cloruros	mg/l	Cl-	200,00	250
11	Cobalto	mg/l	Co	0,05	-
12	Cobre	mg/l	Cu	0,20	1,0* <sup>9</sup>
13	Cromo	mg/l	Cr	0,10 <sup>(1)</sup>	0.05
14	Hierro	mg/l	Fe	5,00	0,3
15	Fluoruros	mg/l	F <sup>-</sup>	1,00	1,5
16	Litio	mg/l	Li	2,50	-
17	Magnesio	mg/l	Mg	-	125
18	Manganeso	mg/l	Mn	0,20	0,1
19	Mercurio	mg/l	Hg	0,001	0,001
20	Molibdeno	mg/l	Mo	0,01	-
21	Níquel	mg/l	Ni	0,20	-
22	Nitratos	Mg/l	NO <sub>3</sub>	-	10
23	Plata	mg/l	Ag	0,20	-
24	Plomo	mg/l	Pb	5,00	0,05
25	Selenio	mg/l	Se	0,02	0,01
26	Sodio <sup>(2)</sup>	%	RAS	35,00	-
27	Sulfatos	mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	250,00	250
28	Vanadio	mg/l	Vn	0,10	-
29	Zinc	mg/l	Zn	2,00	5
30	Coliformes Fecales	NMP/100 ml	CF	1000	-

NOTA: El sodio porcentual es la relación entre la concentración del ión sodio y la suma de las concentraciones de los iones sodio, calcio, magnesio y potasio expresadas en miliequivalentes por litro, de acuerdo a la expresión siguiente:  $Na\% = (Na / (Na+Ca+Mg+K)) \times 100$

Teniendo en cuenta los límites máximos y/o mínimos permitidos por la normativa chilena para las aguas de uso potable, doméstico y de riego y las concentraciones resultantes de los parámetros muestreados en los puntos referidos, se realiza un cuadro comparativo para analizar qué elementos superan dichos estándares, cuyos los resultados se presentan en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6 Cuadro comparativo con límites de las normas NCh 1.333 y 409**

Parámetro	Puntos de Muestreo en Terreno campaña PEGH Caracoles					Cumple NCh 1.333/ NCh 409
	DP-1	HL-1901	REC-4	RP-4	SE-2	
Alcalinidad	59,1	427	180	137	80,2	-
Aluminio	8,2	19,6	35,4	3,5	6,6	5,00 / -
Arsénico	0,017	0,043	0,099	0,007	0,013	0,10 /0,05
Bario	0,074	0,11	0,126	0,122	0,048	4,00 / -
Berilio	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,10 / -
Boro	15,4	5,1	15,3	5,3	14,9	0,75 / -
Cadmio	0,002	0,004	0,006	< 0,001	0,002	0,01
Calcio	28,8	32,4	26,3	450,3	31,3	-
Zinc	0,235	0,205	0,138	0,374	0,163	2 / 5
Cloruro	45,2	124,6	48,2	947,8	66,2	200 / 250
Cobalto	0,006	0,011	0,012	0,009	0,005	0,05 / -
Cobre	0,426	0,417	0,528	0,274	0,354	0,20
Conductividad	11.350	23.700	12.000	80.400	12.970	1500 / 400
Cromo	0,04	0,007	0,031	< 0,005	0,013	0,10 / 0,05
Fluoruro	0,593	0,337	1,87	< 0,100	2,19	1,00 / 1,5
Hierro	6,9	12,2	24,5	1,5	4,6	5,00 / 0,3
Litio	2,2	2,4	1,3	1,6	1,1	2,50 / -
Magnesio	19	69,8	9,1	182,7	9	- / 125
Manganeso	0,178	0,556	0,668	0,746	0,125	0,20 / 0,1
Mercurio	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001
Molibdeno	0,16	0,005	< 0,005	< 0,005	0,093	0,01 / -
Níquel	0,008	0,009	0,011	0,006	0,006	0,20 / -
Nitrato	1,3	9,8	1,5	2,4	2	- / 10
Nitrito	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	-
O.D.	4,64	3,67	5,6	2,96	5,05	mayor a 5
Plata	0,007	0,005	0,002	0,032	0,008	0,20 / -
Plomo	< 0,02	0,021	< 0,02	< 0,02	< 0,02	5,00 / 0,05
Potasio	0,6	1,2	0,6	1,5	0,8	-
pH	7,3	7,61	7,34	6,72	7,49	5,5 – 9,0

**Tabla 4-6 Cuadro comparativo con límites de las normas NCh 1.333 y 409**

Parámetro	Puntos de Muestreo en Terreno campaña PEGH Caracoles					Cumple NCh 1.333/ NCh 409
	DP-1	HL-1901	REC-4	RP-4	SE-2	
Selenio	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,02 /0,01
Sodio total	78,1	223,4	97,5	432,1	99,1	-
SDT	5.838	12.110	6.149	46.600	6.501	-
Sulfatos	80,1	143,4	77,1	27,1	64,1	250,00
Temperatura	24,42	29,38	25,02	28,27	21,99	-
Vanadio	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	0,10
R.A.S. %	61,8	68,4	73,0	40,5	70,7	35,00

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los valores entregados en la tabla anterior, se evidencia una alta concentración de iones cloruros y fluoruros, lo que significa aguas de alta salinidad con conductividades eléctricas por sobre la norma, además, debido a su alta presencia de metales como el aluminio, boro, cobre, hierro, manganeso y molibdeno, se considera un agua pesada. A continuación se realiza un análisis más detallado de los parámetros relevantes que no se encuentran dentro de la norma.

- **Conductividad Específica (CE)**

Es un buen indicador para establecer el grado de mineralización del agua y evaluar la calidad para uso agrícola y consumo humano. Las normas europeas consideran que las aguas superficiales destinadas a ser potables no deben tener una conductividad superior a 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el agua potable no debe tener una conductividad superior a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Aguas de conductividad superior a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  se consideran no utilizables para el riego. En este sentido según la Norma de agua de riego NCh1333/78 los valores umbrales para la CE corresponden a 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En el caso de los puntos muestreados y las concentraciones elevadísimas de CE estas aguas no serían aptas para riego y en ningún caso para consumo humano dado que se encuentra altamente mineralizada.

- **Boro (B)**

Se encuentra contenido esencialmente en los minerales de boro (boratos), estos están asociados a fuentes termales vinculadas a actividad volcánica. Así como también al efecto de la intrusión marina en zonas costeras, está muy asociada a la presencia de aguas salobres y lixiviados de actividades antrópicas. En este caso

existe una relación directa entre la concentración de boro y la salinidad de las aguas, especialmente en los niveles más profundos, probablemente en relación a la presencia de algunos elementos evaporíticos y procesos termales propios de la zona. En Chile, se manifiesta en abundancia en ríos y aguas subterráneas del norte, desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Coquimbo. Los límites máximos recomendados para Boro en aguas de consumo humano, de acuerdo a la OMS, es de 0,5 mg/L; En Chile el Boro no se encuentra regulado en la normativa aplicable a agua de consumo humano, D.S. 735 y NCh 409. Pero si lo está para aguas de riego con una concentración de 0,75 mg/L.

- **Cloruros (Cl<sup>-</sup>)**

Altas concentraciones de cloruros indican salinidad, el sabor salado del agua producido por los cloruros es variable y dependiente de la composición química, pero es detectable a una concentración de 250 mg/l, este valor es el límite máximo permitido en el agua para consumo humano, siendo ampliamente superado en el punto de muestreo RP-4, mientras tanto en los demás puntos de la cuenca se encuentra dentro de los rangos aceptables.

- **Aluminio (Al)**

El Aluminio es un componente natural de las aguas superficiales y subterráneas, siendo el tercer elemento más abundante presente en la corteza terrestre. Aunque es un constituyente de todos los suelos, plantas y animales, es también persistente en la naturaleza en la forma elemental.

Los altos niveles de disponibilidad dependen de varios factores, el más importante de estos es el bajo pH. Los suelos ácidos con altas concentraciones de aluminio disponible pueden ser encontrados en muchos lugares donde ha habido cultivos pesados o uso de fertilizantes de nitrógeno, en sitios de mina ácido reducidos y en suelos forestales ácidos. La toxicidad del aluminio es considerada como una de las principales causas de no productividad en suelos ácidos. La concentración máxima de Al para agua de riego es de 5 mg/l, mientras que para consumo humano no se encuentra normado. En la cuenca de estudio, las concentraciones de aluminio presentes en la mayoría de las muestras sobrepasan ampliamente este valor.

- **Arsénico (As)**

El Arsénico se encuentra en la naturaleza libre o combinado en un gran número de minerales, existiendo más de 150 minerales que lo contienen. Se encuentra en mayores concentraciones en los suelos que yacen sobre depósitos de sulfuros (hasta 8000 mg/kg). En aguas superficiales generalmente se presenta en bajas concentraciones, sin embargo, cuando existe presencia de alteraciones hidrotermales, las concentraciones pueden ser muy elevadas. Las fuentes naturales de Arsénico son las zonas volcánicas (geotérmicas) y los yacimientos minerales. Las fuentes antrópicas de As, se dan como producto de la fundición de metales (Plomo y Cobre), entre los más relevantes. El límite máximo de As permitido es de 0.05 mg/l para agua de consumo humano y de 0.1 mg/l en aguas para riego. La muestra del punto REC-4 presenta una concentración mayor de la permitida para agua potable.

- **Cobre (Cu)**

La presencia de Cu es el resultado de alteraciones naturales o antrópica. En aguas subterráneas, el Cu es adsorbido por los estratos arcillosos disminuyendo su contenido a medida que aumenta la profundidad de los estratos. Es tóxico en altas concentraciones, y su exceso puede ser dañino para su uso en riego. El denominado "Drenaje ácido" (FeS) se produce en presencia de pirita y oxígeno, proveniente del mismo metal que provoca la reacción (ej.  $\text{CuFeS}_2$ ). El límite máximo de Cu permitido es de 0,2 mg/l para agua de riego, no estando normado en el agua potable. Todos los puntos muestreados presentan mayor concentración de cobre de la permitida.

- **Hierro (Fe)**

El Hierro en el agua natural proviene de la disolución de las numerosas rocas y minerales en que se encuentra. Este parámetro se puede incrementar artificialmente en las aguas superficiales como subterráneas, debido a actividades relacionadas con vertidos industriales ferrosos. Cuando desciende la oxigenación de un agua, se puede producir el incremento de la concentración de Hierro. El límite máximo de Fe permitido es de 0,3 mg/l para agua de consumo humano y de 5 mg/l, en aguas para riego. En todas las muestras analizadas se supera con creces el límite para agua potable.

- **Manganeso (Mn)**



Los compuestos de Manganeseo existen de forma natural en el ambiente como sólidos en suelos y pequeñas partículas en el agua. Las partículas de manganeseo en el aire están presentes en las partículas de polvo. Estas usualmente se depositan en la tierra en unos pocos días. Este parámetro aumenta su concentración en las aguas superficiales y subterráneas debido a las actividades industriales y a través de la quema de productos fósiles, así como las actividades ligadas a la agricultura debido al uso de pesticidas. El límite máximo de Mn permitido es de 0,1 mg/l para agua de consumo humano y de 0,2 mg/l en aguas para riego.

- **Molibdeno (Mo)**

La existencia de molibdeno en los cursos de agua es atribuible a la asociación de este compuesto con el cobre. Esta lixiviación se manifiesta tanto en las aguas subterráneas como en las superficiales. Adicionalmente los depósitos de material de descarte procedentes de la minería constituyen fuentes potenciales de contaminación de las aguas superficiales, las cuales toman su mayor relevancia cuando ocurren precipitaciones. Su concentración no puede superar los 0,01 mg/l en aguas de riego, valor superado en dos de las muestras.

Según los puntos muestreados y los resultados obtenidos es posible afirmar que las aguas subterráneas de la cuenca son de mala calidad tanto para consumo humano como para riego, corresponden a aguas altamente mineralizadas por efectos de las actividades productivas como la minería y por causas naturales como la cercanía a salares y geología propia del territorio cuyos depósitos de minerales se entremezclan y combinan para dar paso a aguas altas en metales, sales minerales y bajas en nutrientes.

Según datos entregados por Minera Centinela, este comportamiento de las aguas es una constante en todos los puntos de muestreo (29 pozos o punteras de exploración) monitoreados mensualmente por ellos (datos disponibles de abril a septiembre del presente año). Se realizó un análisis somero de la información entregada donde se calculó un promedio de las concentraciones por parámetro en cada pozo de monitoreo y a los elementos diagnosticados como fuera de norma en el análisis del muestreo de terreno se suman parámetros como el arsénico, berilio, cadmio, cromo, litio, mercurio, plomo y selenio que se ven superados en la mayoría de los puntos, con un análisis de valores máximos y mínimos se confirma que el agua en la zona posee mala calidad y no debería utilizarse para abastecer a la población, ni para rubros productivos como la crianza de animales o la producción de alimentos, ya que las muestras obtenidas superan significativamente los límites de parámetros altamente tóxicos para la salud humana.

Los registros facilitados por Minera Centinela no son suficientes para realizar un análisis espacio – temporal, los vacíos de información en algunos puntos muestreados y en las distintas campañas de monitoreo reducen la posibilidad de concluir un comportamiento diferente al mencionado en las conclusiones de este análisis. Sin embargo, el proyecto Minera Centinela ha presentado una serie de informes de seguimiento ambiental de aguas subterráneas a la SMA a lo largo de su operación los cuales pueden ser sistematizados y analizados en un estudio específico que permita contar con una serie histórica más representativa y homologada para facilitar la toma de decisiones respecto, por ejemplo, a la importancia de invertir recursos públicos en I+D y en tecnologías para recurrir a nuevas fuentes de agua para consumo humano, dada la mala calidad de las aguas subterráneas con las que se cuenta en la región. Este Plan propone medidas y acciones de corto y mediano plazo para dar respuesta a las brechas de falta de información como también a las brechas de inversión en nuevas tecnologías en el sector público y privado para dar soluciones tan relevantes como el agua potable a la población local.

**ANEXO G**

**SIG**

**DISPONIBLE EN FORMATO DIGITAL**

**ANEXO H**

**MODELOS**

## Contenido

1	MODELO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.1.1	Revisión de Antecedentes y Datos Hidrológicos.....	2
1.1.1.1	Datos Hidro-climatológicos y se uso y coberturas de suelo disponibles para la simulación WEAP.....	2
1.1.2	Revisión de Modelos Existentes.....	9
1.1.3	Modelo Hidrológico Superficial Conceptual.....	9
1.1.4	Supuestos Generales de Simulación .....	10
1.1.5	Visión General de la Simulación WEAP.....	13
1.1.5.1	Esquema Simulación Inicial WEAP .....	14
1.1.5.2	Módulo de Delineación Automática de Cuencas WEAP .....	14
1.1.6	Construcción Inicial de Template WEAP.....	16
1.2	Construcción de Modelo de Simulación Hidrológica WEAP.....	17
1.2.1	Climatología del Área de Estudio .....	17
1.2.1.1	Eventos extremos y variabilidad climática.....	19
1.2.2	Uso de Suelo y Evapotranspiración.....	25
1.2.3	Unidades Hidrológicas/Catchments.....	25
1.2.4	Ríos/Rivers .....	27
1.2.5	Agua Subterránea/Groundwater .....	27
1.2.6	Nodos de Demanda/Demand Sites .....	28
1.2.7	Horizontes de Simulación.....	28
1.3	Calibración.....	29
1.3.1	Datos de Referencia para la Calibración .....	29
1.3.2	Definición de Parámetros de Calibración .....	29
1.3.3	Análisis de Sensibilidad y Calibración Manual.....	31
1.1.1	Calibración Automática .....	32

1.3.4	Validación de Resultados de la Calibración WEAP .....	33
1.3.5	Simulación Inicial con Calibración Seleccionada .....	33
2	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA SUBCUENCA PILOTO ...	34
2.1	Definición de subcuenca piloto.....	34
2.2	Unidades Hidrogeológicas .....	37
2.3	Niveles Estáticos y Piezometría .....	45
2.4	Sectores Hidrogeológicos .....	51
2.5	Modelo Cuenca Arreica Hiperárida y Estimación de Recarga.....	53
3	INTERACCIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA.....	65
3.1	Conceptualización de Interacción Superficial-Subterránea .....	65
3.1.1	Caracterización de la Partición Precipitación-Recarga .....	65
3.1.2	Identificación de las Zonas de Recarga .....	66
3.1.3	Identificación de las Zonas de Descarga.....	67
3.2	Estimación de la Recarga .....	68
3.2.1	Recargas Estimadas desde Estudios Previos .....	68
3.2.2	Recargas Estimadas desde el Modelo Superficial WEAP .....	69
3.2.3	Discusión sobre la Estimación de la Recarga para Futuras Simulaciones Numéricas	69
4	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA .....	70
4.1	Evaluación y Proyección Futura de la Oferta y Demanda .....	70
4.1.1	Definición de Escenarios de Simulación y Gestión.....	70
4.1.1.1	Descripción de los Escenarios Climáticos Seleccionados .....	71
4.1.1.2	Descripción de los Escenarios de Gestión Establecidos .....	73
4.1.1.2.1	Escenario de gestión 1: Todos los derechos otorgados son explotados .....	74
4.1.1.2.2	Escenario de gestión 2: Demanda subterránea disminuye. ....	74
4.2	Situación Base desde el Periodo Histórico de Simulación .....	75
4.2.1	Descripción de la Situación Base.....	75
4.2.2	Resultados de la Simulación Hidrológica Histórica .....	75
4.3	Evaluación de Escenarios de Cambio Climático .....	81

4.3.1	Proyección de la Oferta y Demanda Hídrica Futura .....	81
4.3.2	Resultados de la Simulación Hidrológica para los Escenarios Climáticos Establecidos	83
4.4	Evaluación de Escenarios de Gestión Hídrica.....	85
4.4.1	Resultados de la Simulación Hidrológica para los Escenarios de Gestión Hídrica	85
5	BRECHAS EXISTENTES Y COMENTARIOS GENERALES.....	88
5.1	Evaluación de las Brechas de Simulación Hidrológica .....	88
5.1.1	Identificación de Brechas para la Modelación Hidrológica Base .....	88
5.1.2	Identificación de Brechas para el modelo Subterráneo Conceptual.....	88
5.2	Comentarios Generales.....	90
5.2.1	Consideraciones y Sugerencias para el proceso de mejora y actualización del Modelo Hidrológico WEAP .....	90

## FIGURAS

Figura 1-1	Distribución espacial de las estaciones meteorológicas disponibles en la Cuenca Quebrada Caracoles.	10
Figura 1-2	(a) Distribución espacial de temperatura media anual y (b) temperatura media mensual para la Cuenca de Caracoles calculadas desde el grillado Cr2Met para cada grilla de ~5x5 km.	1-1
Figura 1-3	Series de tiempo de lluvias diarias (mm) en estaciones cercanas a la zona de estudio comparadas con su píxel de CR2Met.	1-2
Figura 1-4	CDF de los datos grillados CR2Met (sin y con corrección de sesgo) comparados con datos observados (izq.) y gráficos de dispersión entre observaciones y CR2Met con corrección de sesgo (der.) para las estaciones Sierra Gorda, Baquedano y Antofagasta.	1-1
Figura 1-5	Conceptualización de flujos regionales en la cuenca Quebrada Caracoles.	1-3
Figura 1-6	Conceptualización de Sistema Cuenca Caracoles, Salar o Laguna, y Acuífero considerado para la implementación del modelo WEAP.	1-4
Figura 1-7	Conceptualización del Sistema Cuenca Caracoles, Salar o Laguna, y Acuífero considerado para la construcción del modelo WEAP.	1-5

Figura 1-8 Principales pasos considerados para la implementación del modelo WEAP en la cuenca de Caracoles.	1-6
Figura 1-9 Diseño de modelo de simulación WEAP para la Cuenca de Caracoles en la Región de Antofagasta.	1-7
Figura 1-10 Simulación de prueba (1979-2020) con modelo hidrológico WEAP para las Unidades hidrológicas definidas para la Cuenca de Caracoles.	1-8
Figura 1-11 Clasificación climática de Köppen para la cuenca en estudio.	1-10
Figura 1-12 Variabilidad intra-anual de la precipitación media mensual en la cuenca, periodo 1985-2015.	1-11
Figura 1-13 Variabilidad intra-anual de las temperaturas medias mensuales en la cuenca, período 1985-2015.	1-12
Figura 1-14 Variabilidad interanual de la precipitación en la cuenca, período 1985-2015.	1-13
Figura 1-15 Variabilidad interanual de las temperaturas en la cuenca, período 1985-2015.	1-14
Figura 1-16. Distribución de elementos "catchment".	1-18
Figura 1-17. Distribución tipo de elementos WEAP en cuencas.	1-20
Figura 2-1. Mapa de unidades hidrogeológico del área de estudio.	2-28
Figura 2-2. Perfil con unidades hidrogeológicas en el sector bajo de la subcuenca Quebrada de los Arrieros.	2-31
Figura 2-3. Variación de niveles estáticos en el sector bajo de la subcuenca Quebrada de los Arrieros.	2-33
Figura 2-4. Piezometría y flujo de agua subterránea en el sector Pampa Lina y Sierra Gorda.	2-37
Figura 2-5. Piezometría y flujo del agua subterránea en el sector Distrito Centinela.	2-38
Figura 2-6. Mapa de ubicación de SHAC Sierra Gorda y subcuenca piloto Quebrada de los Arrieros.	2-40
Figura 2-7. Ubicación de la cuenca de estudio, subcuenca piloto y estaciones meteorológicas.	2-41
Figura 2-8. Distribución de la precipitación anual de las estaciones de la zona de estudio, período 1992-2020.	2-43
Figura 2-9. Distribución de la precipitación media mensual de las estaciones de la zona de estudio, período 1992-2020.	2-44
Figura 2-10. Comparación de la distribución de la precipitación media mensual entre las estaciones de Calama y Campamento para distintos períodos.	2-45



Figura 2-11. Distribución de la precipitación media mensual de las estaciones de la zona de estudio, período 1992-2020.	2-45
Figura 2-12. Modelo de sección acuífera y caudal subterráneo pasante.	2-47
Figura 2-13. Ubicación de perfiles TEM y Gravimetría.	2-48
Figura 2-14. Modelo gravimétrico y TEM del techo del basamento de la cuenca.	2-49
Figura 2-15. Perfiles TEM L1 y L2 interpretados.	2-1
Figura 3-1. Modelo de la partición de la precipitación en la recarga del área de estudio.	3-3
Figura 3-2. Modelo de recarga del agua subterránea en el área de estudio.	3-4
Figura 3-3. Modelo de descarga del agua subterránea en el área de estudio.	3-5
Figura 4-1. Principales escenarios climáticos y de gestión de aguas considerados en la modelación e WEAP de la Cuenca de Caracoles en la Región de Antofagasta.	4-8

## TABLAS

Tabla 1-1 Estaciones meteorológicas localizadas dentro de la región de Antofagasta.	4
Tabla 1-2 Datos Hidro-climáticos utilizados en la simulación WEAP.	6
Tabla 1-3 Indicadores de eficiencia y medidas de error entre los datos pluviométricos observados y los pixeles del CR2Met.	1-2
Tabla 1-4 Datos utilizados en el módulo de "Delineación Automática de Cuencas" WEAP.	1-7
Tabla 1-5 Serie completa de precipitaciones medias mensuales, período 1985-2015.	1-15
Tabla 1-6 Resumen temperaturas medias mensuales.	1-16
Tabla 1-7. Cuencas definidas en el modelo.	1-17
Tabla 1-8. Ríos definidos en el modelo.	1-19
Tabla 1-9. Resumen de los datos observados disponibles para la calibración del Modelo WEAP Caracoles.	1-21
Tabla 1-10 Ejemplo de set óptimo de parámetros óptimos estimados y rango de variación permitido durante el proceso de calibración automática utilizando los resultados de escorrentía superficial del modelo WEAP-Caracoles-Princeton.	1-22
Tabla 2-1. Unidades hidrogeológicas reconocidas en la subcuenca piloto.	2-30
Tabla 2-2. Niveles estáticos pozos de monitoreo subcuenca Quebrada de los Arrieros.	2-34
Tabla 2-3. Cálculo de caudal subterráneo pasante en secciones de la subcuenca piloto.	2-1
Tabla 4-1 Estimaciones de la recarga promedio mensual (m <sup>3</sup> /mes) obtenidas desde los nodos de demanda para cada unidad hidrológica definida en el modelo WEAP-Caracoles.	4-9

Tabla 4-2 Estimaciones promedio mensuales del flujo Inter acuífero (m3/mes) desde el modelo WEAP-Caracoles.	4-9
Tabla 4-3 Estimaciones promedio mensuales de la evaporación poco profunda (m3/mes) desde el modelo WEAP-Caracoles.	4-10
Tabla 4-4 Almacenamiento promedio mensual en los acuíferos regionales (m3/mes) simulados desde el modelo WEAP-Caracoles.	4-11
Tabla 4-5 Flujos hidrológicos de la cuenca en estudio, en mm, para distintos períodos, y modelos de circulación general.	4-13
Tabla 4-6 Demanda de agua promedio mensual simulada para cada escenario de cambio climático y su correspondiente escenario de gestión hídrica utilizando el modelo WEAP-Caracoles (incluyendo todos los nodos de demanda).	1
Tabla 4-7 Lluvia promedio mensual asociada a los escenarios de simulación del modelo WEAP-Caracoles (Referencia 1980-2020, Escenario Climático 1 y Escenario Climático 2).	2
Tabla 4-8 Almacenamiento promedio mensual de agua subterránea en la cuenca de Caracoles considerando todos los acuíferos disponibles en el modelo WEAP-Caracoles.	2
Tabla 4-9: Consumo de agua fresca por parte de la minería.	4
Tabla 4-10 Demandas simuladas desde todos los nodos de demanda disponibles en la cuenca de Caracoles. Los escenarios de gestión incluyen las demandas asociadas a la activación de derechos de agua dentro de toda la cuenca.	5

# **1 MODELO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL**

## **1.1 Introducción**

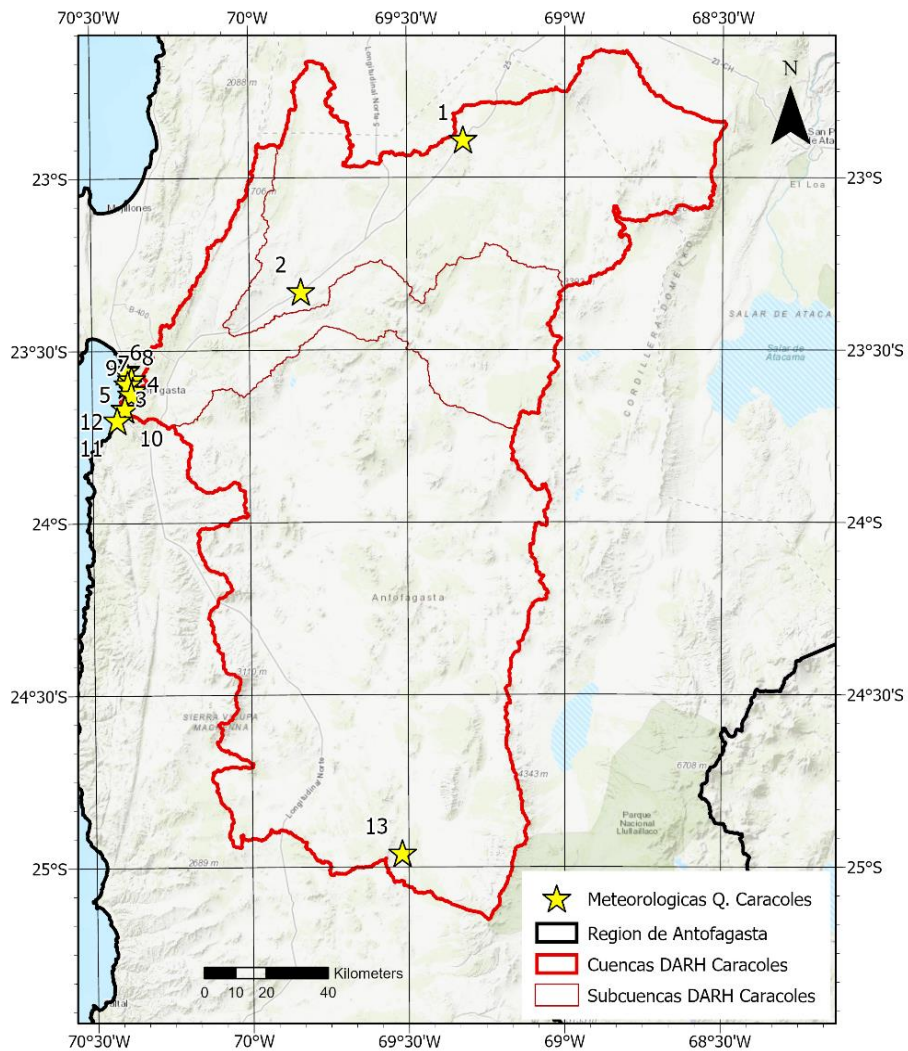
En el marco del Programa Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) de la Cuenca Quebrada Caracoles de la región de Antofagasta se construye un modelo hidrológico superficial para informar la planificación y el manejo del recurso hídrico a escala de cuenca. El modelo será construido, calibrado y validado para la simulación de flujos hidrológicos superficiales en la Cuenca Quebrada Caracoles. El modelo seleccionado por la Dirección General de Aguas ha sido el modelo WEAP (*Water Evaluation and Planning*). WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas hidrográficas (Yates et al., 2005). Este modelo ha sido implementado en varias cuencas de Chile (ver por ejemplo, Vicuña et al., 2011 and 2012; Henríquez et al., 2016; McNamara et al., 2020; Barría et al., 2021). En este contexto, el principal objetivo específico de este Anexo es detallar la construcción del modelo superficial WEAP para la cuenca Quebrada Caracoles mediante la revisión de modelos superficiales (WEAP) existentes, considerando el periodo histórico de datos observacionales disponibles dentro de la cuenca. Los principales resultados de la simulación WEAP se presentan en las siguientes secciones, así como también la descripción detallada del modelo y su construcción.

La construcción del modelo WEAP ha permitido simular y evaluar la dinámica hidrológica de los flujos superficiales de la Cuenca Quebrada Caracoles, tomando en consideración la importancia las características arreicas de la cuenca en la estimación del balance hídrico final. La evaluación de la modelación WEAP ha permitido establecer los siguientes puntos principales: (1) Construcción de Modelo WEAP y Evaluación de Simulaciones Iniciales; (2) Calibración de Parámetros del Modelo WEAP; (3) Balance de Agua Histórico, Presente y Futuro; (2) Definición de Escenarios de Modelación y Gestión; y (4) Definición de Brechas de Modelación y de Sustentabilidad Hídrica para la Cuenca Quebrada Caracoles. Para la construcción inicial del Modelo WEAP se consideró la información de Cuencas Hidrográficas delimitadas por el DARH de la Dirección General de Aguas (2015) (ver Figura 1-1 del informe final del PEGH).

### 1.1.1 Revisión de Antecedentes y Datos Hidrológicos

#### 1.1.1.1 Datos Hidro-climatológicos y su uso y coberturas de suelo disponibles para la simulación WEAP

Respecto de los datos disponibles para la modelación hidrológica WEAP, es importante mencionar que se revisaron todos los antecedentes necesarios para simular los procesos hidrológicos en la Cuenca Antofagasta. Dicha revisión se llevó a cabo tomando en consideración todos los datos climatológicos e hidrológicos disponibles dentro de la cuenca Antofagasta y entorno (Región de Antofagasta). Los datos instrumentales de trece estaciones pluviométricas manejadas por la Dirección General de Aguas (ver Tabla 1-1 y Figura 1-1) fueron seleccionadas y evaluadas para su potencial utilización en la corrección de sesgo de los productos grillados de CR2MET.



**Figura 1-1 Distribución espacial de las estaciones meteorológicas disponibles en la Cuenca Antofagasta.**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1-1 Estaciones meteorológicas localizadas dentro de la Cuenca Antofagasta.**

ID Mapa	Código BNA	Nombre	Longitud O	Latitud S	Altura (m.s.n.m.)	Inicio	Fin	Años	Cuenca BNA	Estatus
1	02700001-0	Sierra Gorda	-69,321	-22,891	1616	01-09-1992	29-09-2020	28	Quebrada Caracoles	Vigente
2	02710002-3	Baquadano	-69,836	-23,331	1032	01-11-1973	30-11-2020	47	Quebrada Caracoles	Vigente
3	02240000-2	Liceo Científico Humanista La Chimba	-70,393	-23,555	45	27-04-2015	30-06-2016	1	Costeras R. Loa - Q. Caracoles	Vigente
4	02240001-0	Escuela Fundación Minera Escondida	-70,370	-23,615	280	27-04-2015	19-11-2017	3	Costeras R. Loa - Q. Caracoles	Vigente
5	02240002-9	Quebrada La Chimba	-70,395	-23,559	33	01-04-2016	30-03-2019	3	Costeras R. Loa - Q. Caracoles	Vigente
6	02240003-7	Quebrada Bonilla	-70,374	-23,583	112	01-04-2016	30-09-2020	4	Costeras R. Loa - Q. Caracoles	Vigente
7	02240004-5	Quebrada Farellones	-70,370	-23,615	185	01-04-2016	30-09-2020	4	Costeras R. Loa - Q. Caracoles	Vigente
8	02710003-1	Antofagasta	-70,386	-23,597	50	01-01-1978	30-11-2020	43	Costeras R. Loa - Q. Caracoles	Vigente
9	02240005-3	Quebrada La Cadena	-70,375	-23,627	139	01-04-2016	30-09-2020	4	Quebrada Caracoles	Vigente
10	02760000-K	Quebrada El Toro	-70,396	-23,668	89	01-04-2016	30-09-2020	4	Q. Caracoles entre Salares Navidad y del Carmen (inclusive) y desembocadura	Vigente
11	02900000-K	Universidad De Antofagasta	-70,421	-23,702	30	27-04-2015	15-06-2020	5	Quebrada la Negra	Suspendida
12	02900001-8	Quebrada Jardines Del Sur	-70,421	-23,702	26	01-04-2016	30-09-2020	4	Quebrada la Negra	Vigente
13	02810001-9	Cachinal De La Sierra	-69,520	-24,961	2640	01-11-1986	23-11-2006	20	Quebrada la Negra	Vigente

Fuente: Elaboración propia a partir de la información DGA.

Es importante mencionar que en la Cuenca Quebrada Caracoles existen limitaciones en relación con el número de datos observacionales o instrumentales (ver Figura 1-1) disponibles para llevar a cabo los procesos de corrección de sesgo y la modelación hidrológica de la cuenca. Actualmente solo existen tres estaciones pluviométricas con registros de calidad (de un total de trece disponibles) dentro del dominio de modelación (Sierra Gorda, Baquedano, Antofagasta, Liceo científico Humanista, Escuela Fundación Minera Escondida y Cachinal de la Sierra). Estas estaciones fueron seleccionadas desde un control de calidad de datos y posteriormente utilizadas para llevar a cabo la corrección de sesgo de los datos climatológicos en la Cuenca Quebrada Caracoles (ver Figura 1-2), utilizando el año hidrológico de Abril a Marzo.

A pesar de que el análisis de calidad de datos permitió elegir las estaciones pluviométricas más indicadas para la corrección de sesgo, también se presentaron datos perdidos y periodos con datos dudosos que derivaron en limitaciones asociadas a la cantidad y calidad de los registros observacionales disponibles para corregir los datos grillados, mediante la utilización de los registros de las estaciones pluviométricas. Estas limitaciones también tuvieron influencia en la aplicación de métodos de corrección de sesgo, dado a que se desconoce cuanta incertidumbre se podría estar propagando directamente desde los datos observacionales. Por ejemplo, todas las diferencias instantáneas o acumuladas en el tiempo, entre los datos instrumentales y los productos grillados CR2MET, se propagan desde las estimaciones de eventos de tormentas a escala diaria (Figura 1-3). A pesar de estas limitaciones, se verificó que los rangos de variación de las variables hidroclimáticas se encontraran dentro de los valores históricos observados.

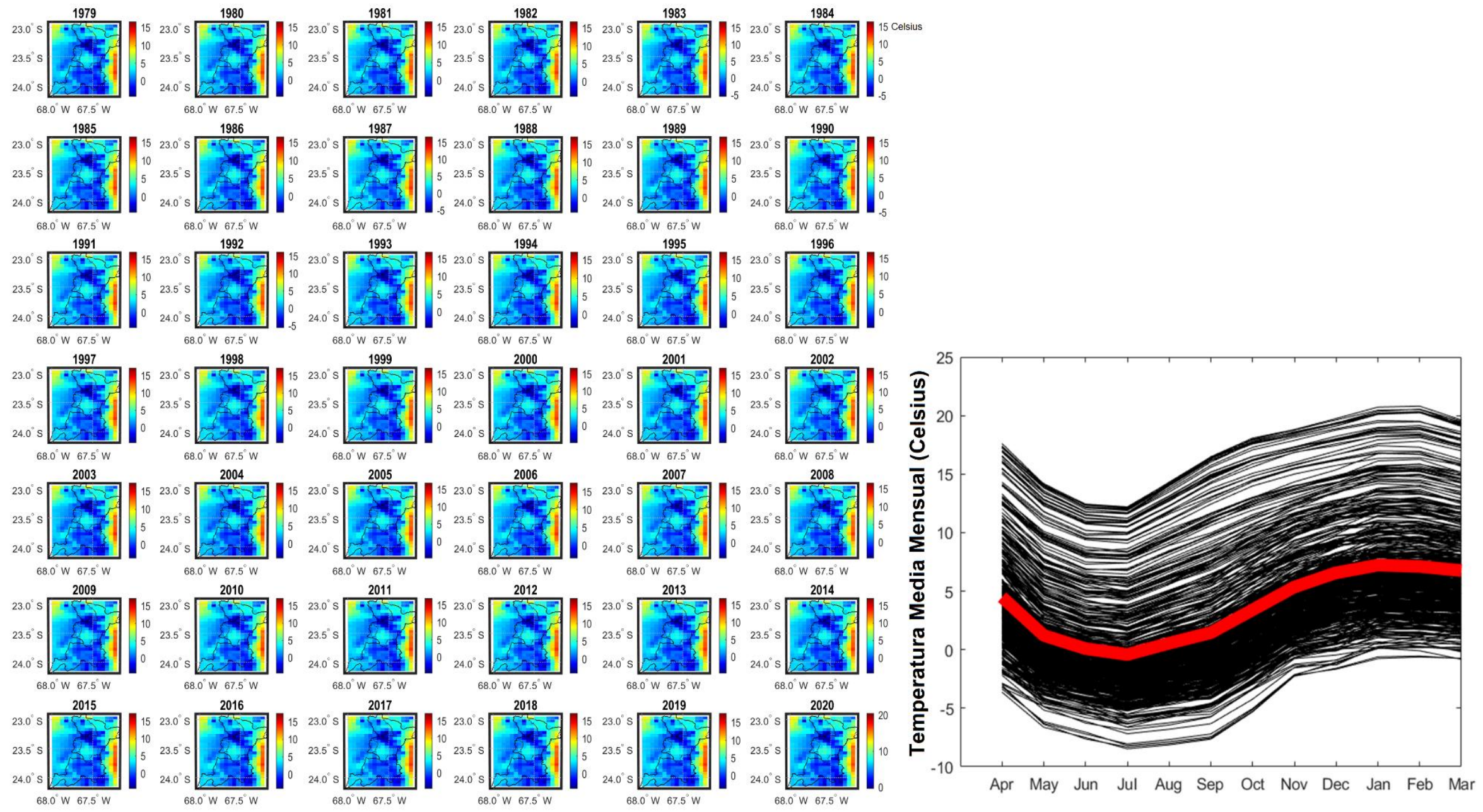
Para la construcción, implementación y validación del modelo WEAP se compilaron diversas fuentes de datos hidro-climatológicos instrumentales y productos grillados de uso de suelo. Un total de tan solo trece estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas se encuentran disponibles en la Cuenca, lo cual representa una cobertura espacial muy limitada. Para suplir la baja cobertura de los datos instrumentales perdidos y sospechosos, el producto climático grillado (con sesgo corregido) CR2MET v2.0 (Boisier et al., 2018) de aproximadamente 5 kilómetros de resolución espacial fue utilizado (ver detalles en Tabla 1-2 y Figura 1-3).

Por otra parte, la cubierta y uso de suelo utilizada en el modelo WEAP fue obtenida desde Zhao et al., (2016). Este producto es considerado una buena representación de la distribución de los patrones espaciales de uso de suelos a lo largo de Chile.

**Tabla 1-2 Datos Hidro-climáticos, uso de suelo y modelo digital de elevación utilizados en la simulación WEAP.**

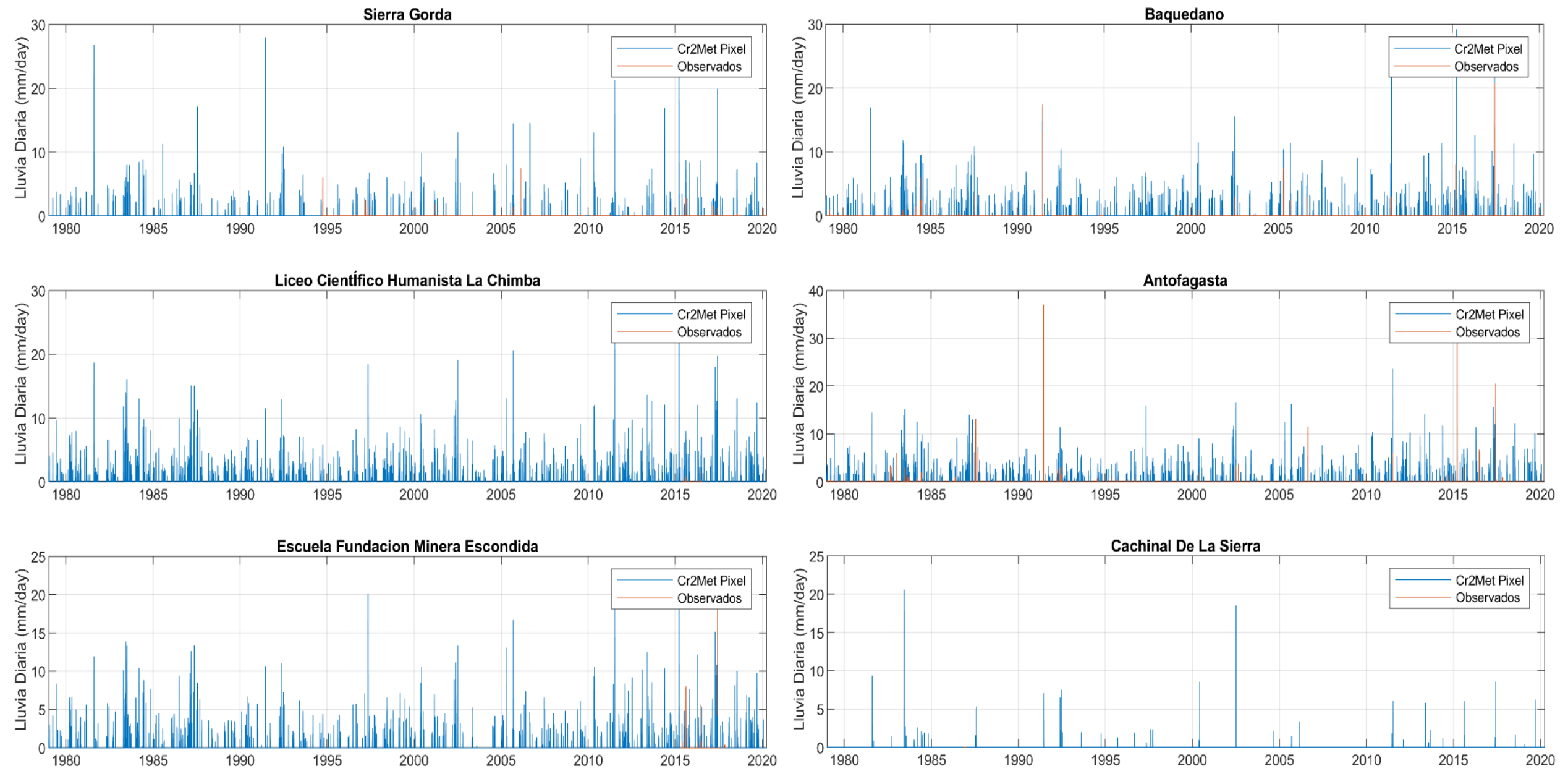
Tipo	Variable	Nombre	Resolución Temporal	Resolución Espacial	Periodo de Registro	Fuente
Instrumental	Precipitación	Red Hidrométrica DGA	Diaria	Puntual	1992-2020	Dirección General de Aguas
Grillado	Precipitación, Temperatura	CR2MET	Diaria	~ 5 km	1979-2020	Boisier et al., (2018)
Grillado	Cubierta y Uso de Suelo	LULC	N/A	30 metros	2014	Zhao et al., (2016)
Grillado	Modelo Digital de Elevación	DEM	N/A	90 metros	2007	Reuter et al., (2007)





**Figura 1-2 (a) Distribución espacial de temperatura media anual (Celsius) y (b) temperatura media mensual (Celsius) para la Cuenca de Caracoles calculadas desde el grillado CR2MET para cada grilla de ~5x5 km.**

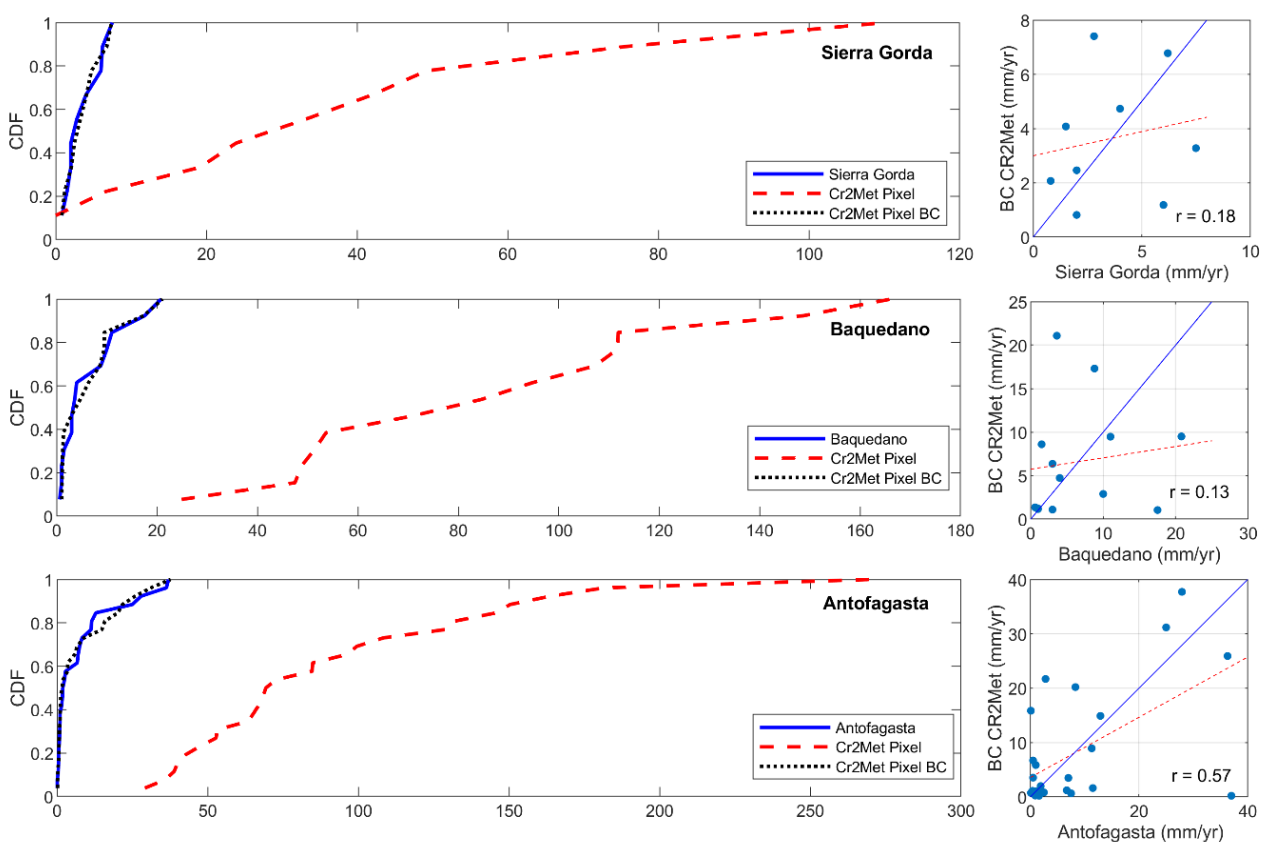




**Figura 1-3 Series de tiempo de lluvias diarias (mm) en estaciones cercanas a la zona de estudio comparadas con su píxel de CR2MET.**

Fuente: Elaboración propia

La corrección de sesgo de los productos grillados fue significativa a nivel anual mediante la aplicación de mapeo de cuantiles (Figura 1-4). Sin embargo, no es tan clara la viabilidad de poder extrapolar dichos mapeos hacia otras áreas de las cuencas debido a la alta variabilidad espacial de las lluvias convectivas propias de esta zona climática de Chile. De todas maneras, se recomienda corregir los datos del CR2MET debido a las altas diferencias encontradas a nivel de acumulación anual de lluvias. Asimismo, es importante mencionar que el proceso de corrección de sesgo se ha llevado a cabo con todas las variables hidro climáticas que tienen datos observacionales i.e. lluvias y temperaturas. En la Tabla 1-3 se muestran los indicadores de eficiencia y medidas de error comparando los datos pluviométricos observados y obtenidos del pixel de CR2MET correspondiente.



**Figura 1-4 CDF de los datos grillados CR2MET (sin y con corrección de sesgo) comparados con datos observados (izq.) y gráficos de dispersión entre observaciones y CR2MET con corrección de sesgo (der.) para las estaciones Sierra Gorda, Baquedano y Antofagasta.**

Fuente: Elaboración propia

Como indicador de eficiencia para comparar los datos observados y los datos grillados corregidos se utilizó Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), y las principales medidas de error fueron Error Cuadrático Medio Normalizado (NMSE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), y el Coeficiente de Correlación ( $R^2$ ). Todos estos indicadores fueron calculados para cada pixel con sesgo corregido utilizando los periodos de registros presentados en la Tabla 1-1. En la Tabla 1-3 se presenta el promedio de cada indicador para toda la cuenca calculado para las correcciones mensuales y anuales.

**Tabla 1-3 Indicadores de eficiencia y medidas de error entre los datos pluviométricos observados y los pixeles del CR2MET.**

Estación	Escala	NSE	NMSE	RMSE	$R^2$
Sierra Gorda	Mensual	-1,161	1,981	2,904	0,035
	Anual	-0,590	1,414	2,847	0,033
Baquedano	Mensual	-0,256	1,186	6,469	0,096
	Anual	-0,715	1,583	8,303	0,017
Antofagasta	Mensual	0,124	0,856	7,706	0,296
	Anual	0,155	0,812	1,035	0,322

### 1.1.2 Revisión de Modelos Existentes

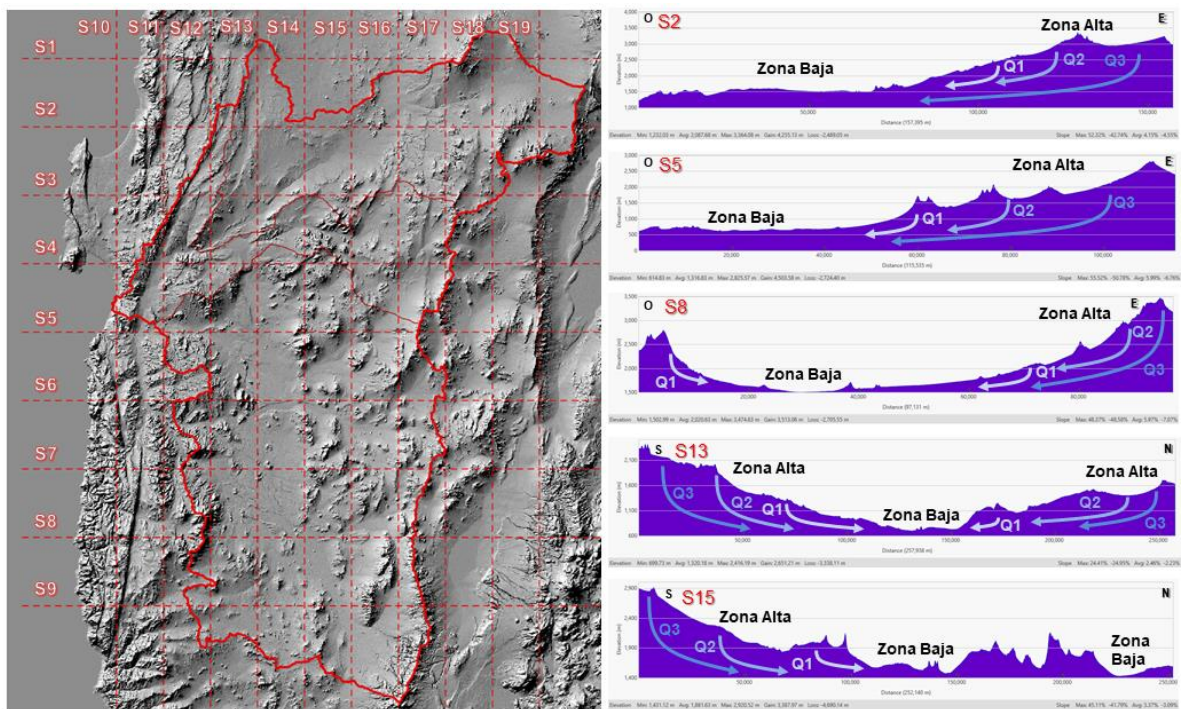
De la revisión de modelos existentes se tiene que no hay simulaciones WEAP previas en la Cuenca Quebrada Caracoles. Existen simulaciones de los flujos y los volúmenes de agua subterráneas desde los acuíferos regionales. Sin embargo, toda la información disponible corresponde a modelos hidrogeológicos pertenecientes a empresas privadas y consultoras, por lo tanto, no existe disponibilidad pública de los mismos. Una opción de datos públicos que permiten comparación y el establecimiento de marcos comparativos para esta cuenca corresponden a los datos del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018).

### 1.1.3 Modelo Hidrológico Superficial Conceptual

El modelo hidrológico conceptual se desarrolló tomando en consideración todos los antecedentes presentados en la sección 6.1. y también tomando en consideración los antecedentes proporcionados por el grupo de modelación que ha trabajado en el salar de Atacama. Como una primera aproximación se establecieron los modelos conceptuales que definen la circulación de flujos regionales dentro de la región de Antofagasta. Para esto, la morfometría de cuencas y la geomorfología regional fueron utilizadas para definir la dinámica regional de los procesos hidrológicos de largo plazo. La Cuenca Quebrada Caracoles se encuentra emplazada en un área de descarga de flujos regionales los cuales

se recargan en las zonas altas ubicadas hacia el este de la cuenca, con flujos provenientes desde las cuencas endorreicas y el salar de Atacama. Una conceptualización de estos flujos mediante el análisis de perfiles morfométricos obtenidos desde distintas secciones transversales trazadas en la cuenca se muestra en la Figura 1-5, donde Q1 y Q2 corresponden a flujos subsuperficiales de infiltración o percolación poco profunda y Q3 corresponden a flujos regionales de percolación profunda o de recarga de agua.

Dentro de la cuenca el flujo regional se encuentra dominado por un gradiente hidráulico que tiene un sentido este a oeste; sin embargo, las características propias del área de estudio, como por ejemplo la presencia de capas impermeables y estructuras geológicas de dominancia regional podrían tener influencias locales sobre los flujos superficiales y subsuperficiales los cuales podrían manifestar velocidades de descarga y recarga diferentes en comparación con los flujos regionales.



**Figura 1-5 Conceptualización de flujos regionales en la cuenca Quebrada Caracoles.**

Fuente: Elaboración propia

#### 1.1.4 Supuestos Generales de Simulación

Para la modelación superficial utilizando el modelo hidrológico WEAP se han considerado distintos procesos hidrológicos que son establecidos mediante la utilización de supuestos de simulación, y que han permitido simplificar y modelar los procesos

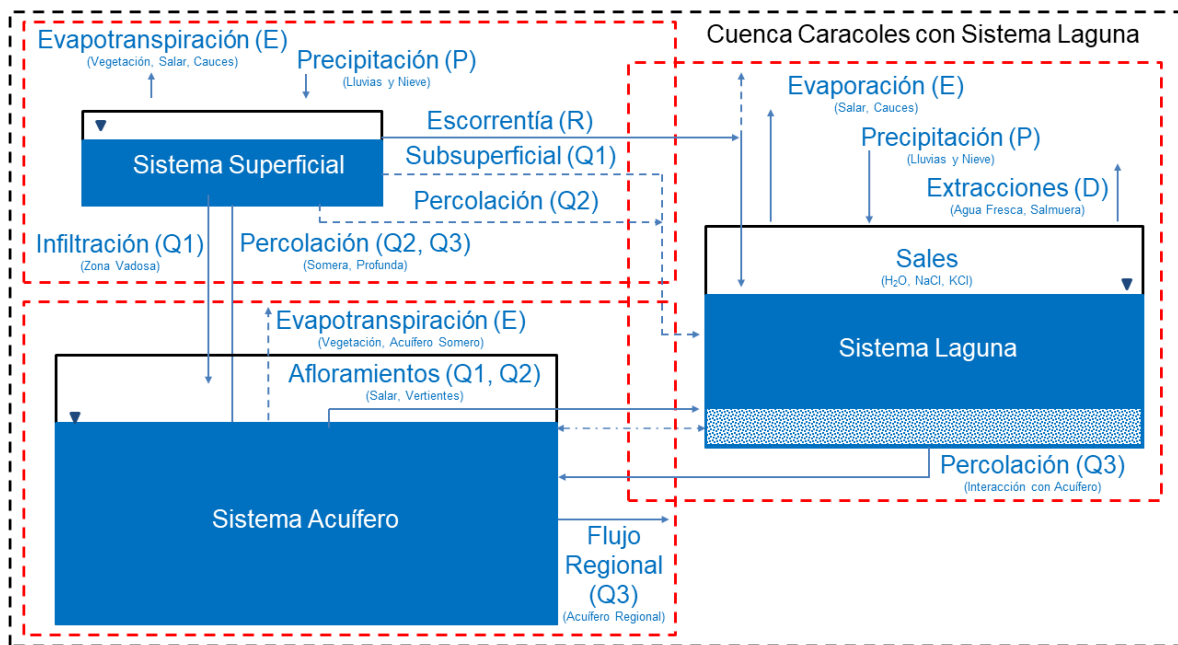
hidrológicos dominantes de la cuenca Quebrada Caracoles de una manera representativa (Figura 1-6).

De forma general se han definido supuestos que permiten minimizar las limitaciones del modelo WEAP, como, por ejemplo, la imposibilidad de poder simular todos los procesos hidrológicos concernientes a sistemas lagunares o salares, como por ejemplo, la interacción laguna-acuífero que permite establecer las tasas de captura y drenaje de agua subterránea. En la conceptualización del modelo se considera que existe una interacción entre los flujos superficiales, los acuíferos locales y/o regionales, y los sistemas de lagunas o salares existentes en cada subcuenca localizada dentro de la cuenca Quebrada Caracoles.

Para representar la complejidad de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos mencionados previamente es necesario establecer una simplificación del sistema real en base a los siguientes supuestos específicos de simulación: (1) Existe interacción hidrogeológica entre el sistema superficial, los sistemas lagunares existentes y el sistema acuífero, por ejemplo, procesos que podrían observarse en los salares Pampa Blanca, Mar Muerto, Navidad y Portezuelo, entre otros; (2) El sistema superficial posee flujos hidrológicos de caudales intermitentes y de escorrentía superficial, como los observados en la Quebrada de Mateo, con una partición de flujos hidrogeológicos subsuperficiales de infiltración, percolación somera y profunda, los cuales dependen fuertemente de la variabilidad geológica, geométrica y estructural de cada acuífero o subcuenca; (3) El sistema acuífero puede descargar hacia el sistema lagunar o salar mediante afloramientos de agua debido a la presencia de un gradiente hidráulico que se encuentra con capas poco permeables y que generan nuevas condiciones de equilibrio hidrostático; (4) el sistema acuífero también puede descargar agua mediante un flujo de evapotranspiración desde el acuífero somero, el cual es dominado por la presencia de vegetación arbustiva y por tasas de radiación elevadas propias de esta zona desértica, con temperaturas que pueden fácilmente superar los 30 grados centígrados durante los meses de verano; (5) la existencia de sistemas lagunares o salares sugiere la presencia de una interacción estrecha con su sistema acuífero local mediante flujos de percolación (descarga desde el salar hacia el acuífero) y flujos de afloramiento (recarga desde el acuífero hacia el salar); (6) todos los procesos hidrológicos e hidrogeológicos son dominados por un componente climático que incluye los flujos de evapotranspiración y precipitación en forma de agua, o nieve estacional que se genera en zonas altas de la cuenca durante años más húmedos y fríos que lo normal, (7) los procesos climáticos y su respectiva respuesta hidrológica o hidrogeológica cambian en función de la variabilidad estacional de largo plazo;

por ejemplo, los procesos de crecidas de caudales o crecidas aluvionales que generan recarga de agua hacia los sistemas acuíferos locales se generan principalmente desde tormentas que ocurren entre los meses de Mayo y Agosto.

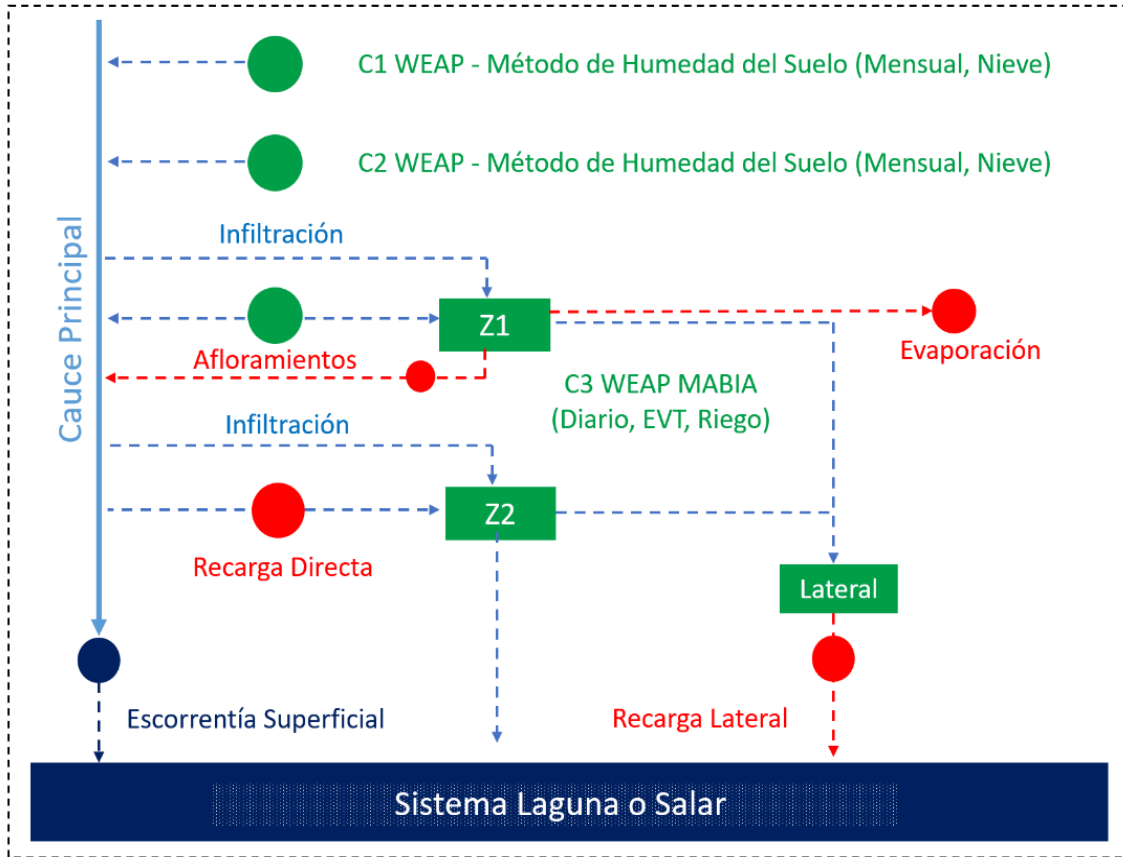
Todos los supuestos relacionados a procesos hidrológicos e hidrogeológicos permitieron establecer una partición más detallada de los flujos de agua en la Cuenca de la Quebrada Caracoles. Aspectos específicos de los supuestos asociados a componentes propios del modelo WEAP se encuentran disponibles en el manual del modelo.



**Figura 1-6 Conceptualización de Sistema Cuenca Caracoles, Salar o Laguna, y Acuífero considerado para la implementación del modelo WEAP.**

Fuente: Elaboración propia

El modelo hidrológico WEAP se construye basado en las recomendaciones de la modelación previa del Salar de Atacama y considera principalmente los módulos presentados en la Figura 1-7.

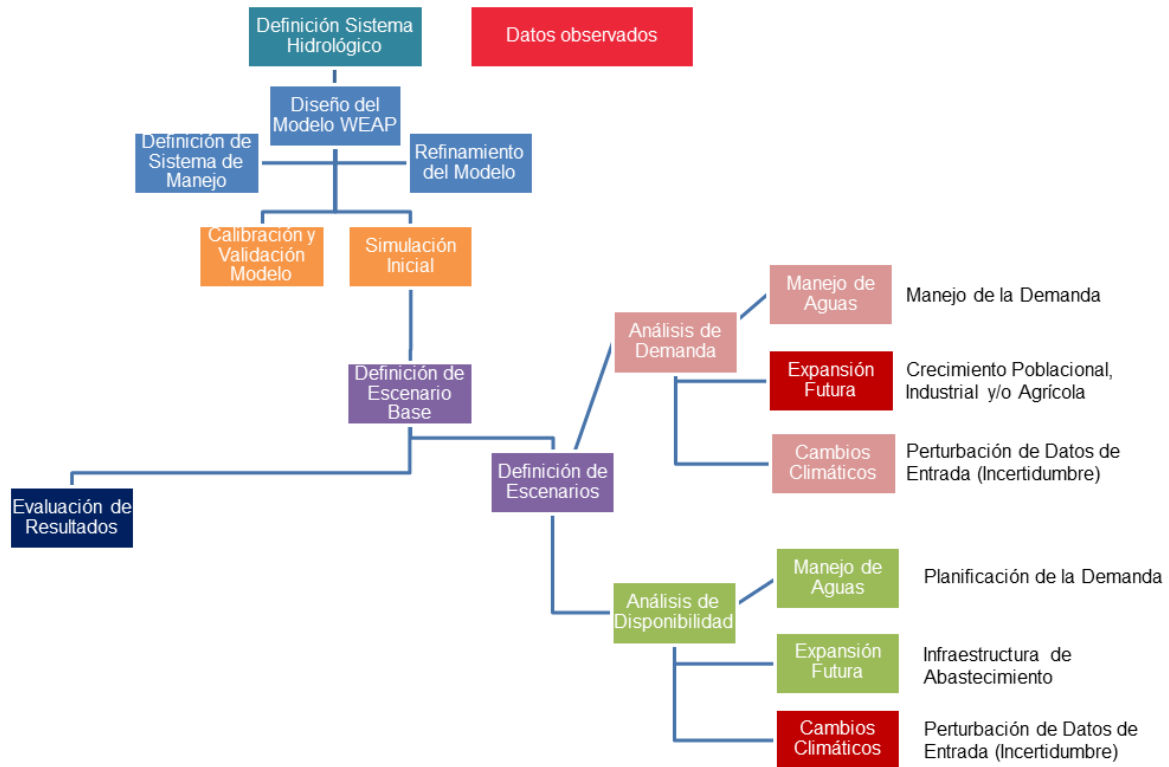


**Figura 1-7 Conceptualización del Sistema Cuenca Caracoles, Salar o Laguna, y Acuífero considerado para la construcción del modelo WEAP.**

Fuente: Elaboración propia.

### 1.1.5 Visión General de la Simulación WEAP

Las actividades necesarias para la desarrollar una simulación WEAP en las Cuenca de Caracoles se establecen como una serie de operaciones que consideran la definición del sistema hidrológico, el diseño del modelo WEAP, la calibración y validación del modelo, y la definición de escenarios base asociados a cambios en la demanda y/o la disponibilidad de agua (Figura 1-8). Todas estas actividades fueron ejecutadas tomando en consideración las recomendaciones del equipo de proyecto, así como las recomendaciones del IF.



**Figura 1-8 Principales pasos considerados para la implementación del modelo WEAP en la cuenca de Caracoles.**

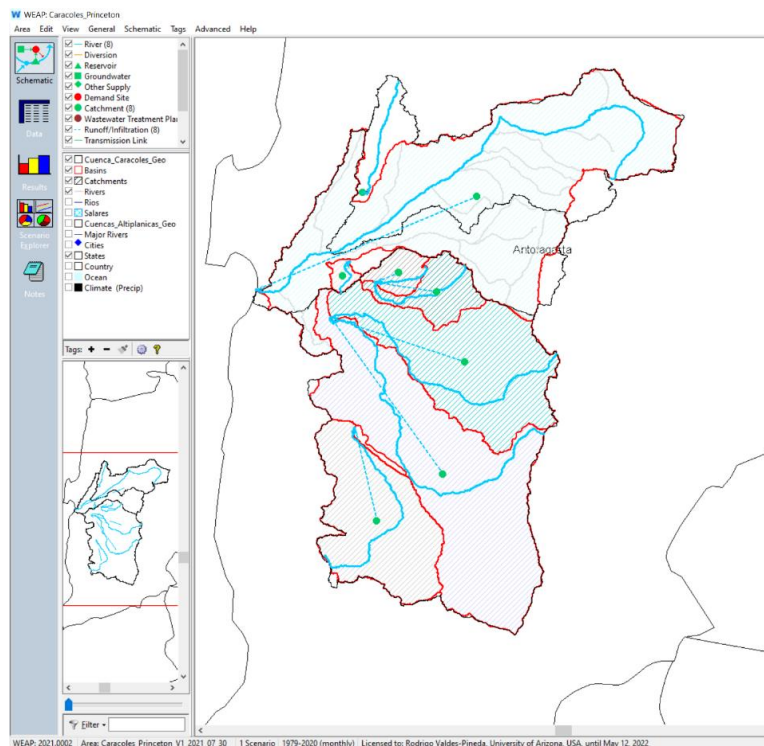
#### 1.1.5.1 Esquema Simulación Inicial WEAP

Para la construcción inicial del Modelo “WEAP-Caracoles-Princeton” se consideró la información de Cuencas Hidrográficas delimitadas por el DARH de la Dirección General de Aguas. En la Figura 1-9 se puede ver la interfaz gráfica asociada a la construcción del modelo incluyendo la red hidrográfica y las subcuencas. Las simulaciones iniciales fueron establecidas para el periodo 1979-2020.

#### 1.1.5.2 Módulo de Delineación Automática de Cuencas WEAP

WEAP fue utilizado para delinear automáticamente las subcuencas de la cuenca de Caracoles y sus correspondientes ríos (Figura 1-10), utilizando modelos digitales de elevación de Hydrosheds que vienen incorporados en el modelo. El módulo de Delineación Automática de Cuencas WEAP permite calcular el área de la cobertura y uso de Suelo de la Agencia Espacial Europea (ESA-CCI-LC) desglosada por cada banda de elevación. Asimismo, es posible descargar datos climáticos históricos (Climatología de Princeton) para cada cuenca y para cada banda de elevación (Ver detalles en Tabla 1-4).





**Figura 1-9 Vista de la interfaz de simulación WEAP para la Cuenca Antofagasta.**

**Tabla 1-4 Datos utilizados en el módulo de “Delineación Automática de Cuencas” para la construcción del modelo WEAP-Princeton.**

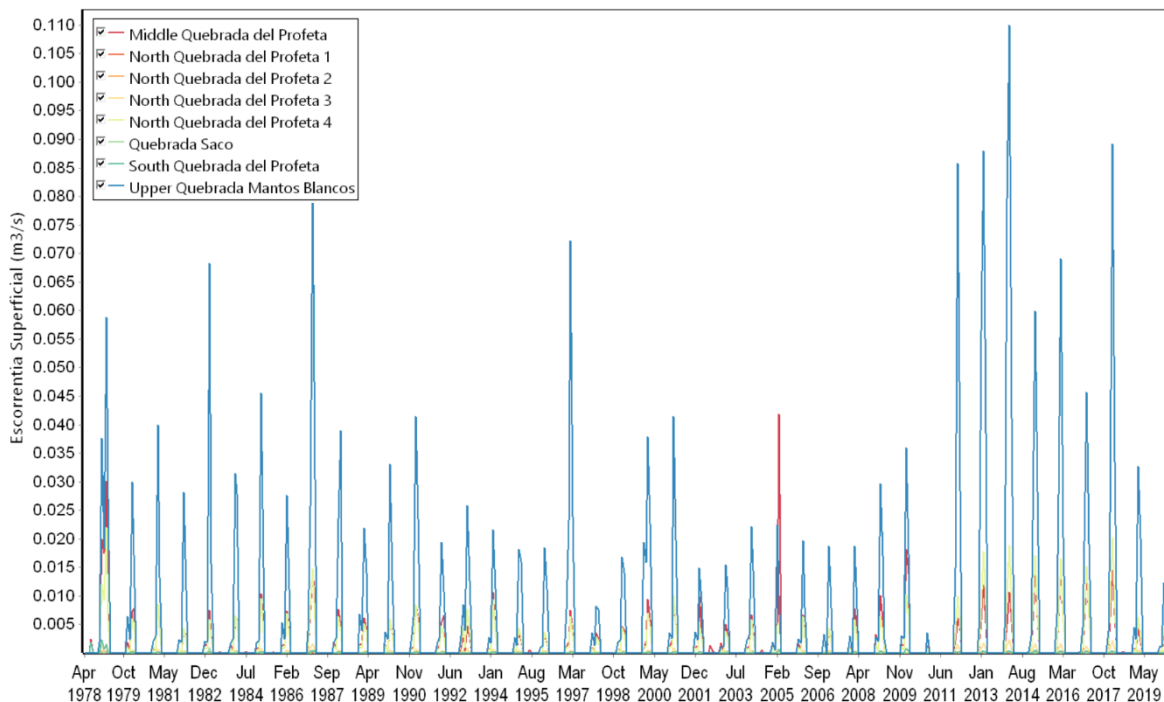
Tipo	Variable	Nombre	Resolución Temporal	Resolución Espacial	Periodo de Registro	Fuente
Grillado	Precipitación, Temperatura, Velocidad del Viento,	Princeton	Diaria	90 metros	1948-2010	Princeton University
Grillado	Modelo Digital de Elevación	Hydrosheds	Diaria	25 Km.	1979-2020	USGS
Grillado	Uso de Suelo	ESA-CCI-LC	N/A	300 metros	1992-2015	ESA-CCI-LC versión 2.0.7

El método de “Delineación Automática de Cuencas” es una forma práctica de establecer líneas base de caudales superficiales para la calibración del modelo final que incluirá una mayor cantidad de elementos WEAP, como por ejemplo, subcuencas (*Unidades*

*Hidrológicas o Catchment Node*), sistemas acuíferos (*Groundwater Node*), sitios de demanda para simular afloramientos y evaporación poco desde acuíferos poco profundos (*Demand Site Nodes*), entre otros.

### 1.1.6 Construcción Inicial de Template WEAP

La simulación inicial (1948-2010) desarrollada con el modelo WEAP para la cuenca Quebrada Caracoles permitió definir la calidad de aproximación del modelo hidrológico conceptual. Asimismo, ha sido posible definir los requerimientos de calibración necesario para mejorar las simulaciones de los procesos hidrológicos dominantes de la cuenca Quebrada Caracoles. La simulación inicial tuvo resultados favorables de validación que permiten simplificar el proceso de calibración que se está desarrollando actualmente. Lo anterior permite definir simulaciones realísticas del balance hídrico a escala de cuenca. La Figura 1-10 presenta los resultados de la simulación de prueba del modelo WEAP-Caracoles-Princeton, en el período 1979-2020.



**Figura 1-10. Simulación de prueba (1979-2020) con modelo hidrológico WEAP para las Unidades hidrológicas definidas para la Cuenca Antofagasta.**

## **1.2 Construcción de Modelo de Simulación Hidrológica WEAP**

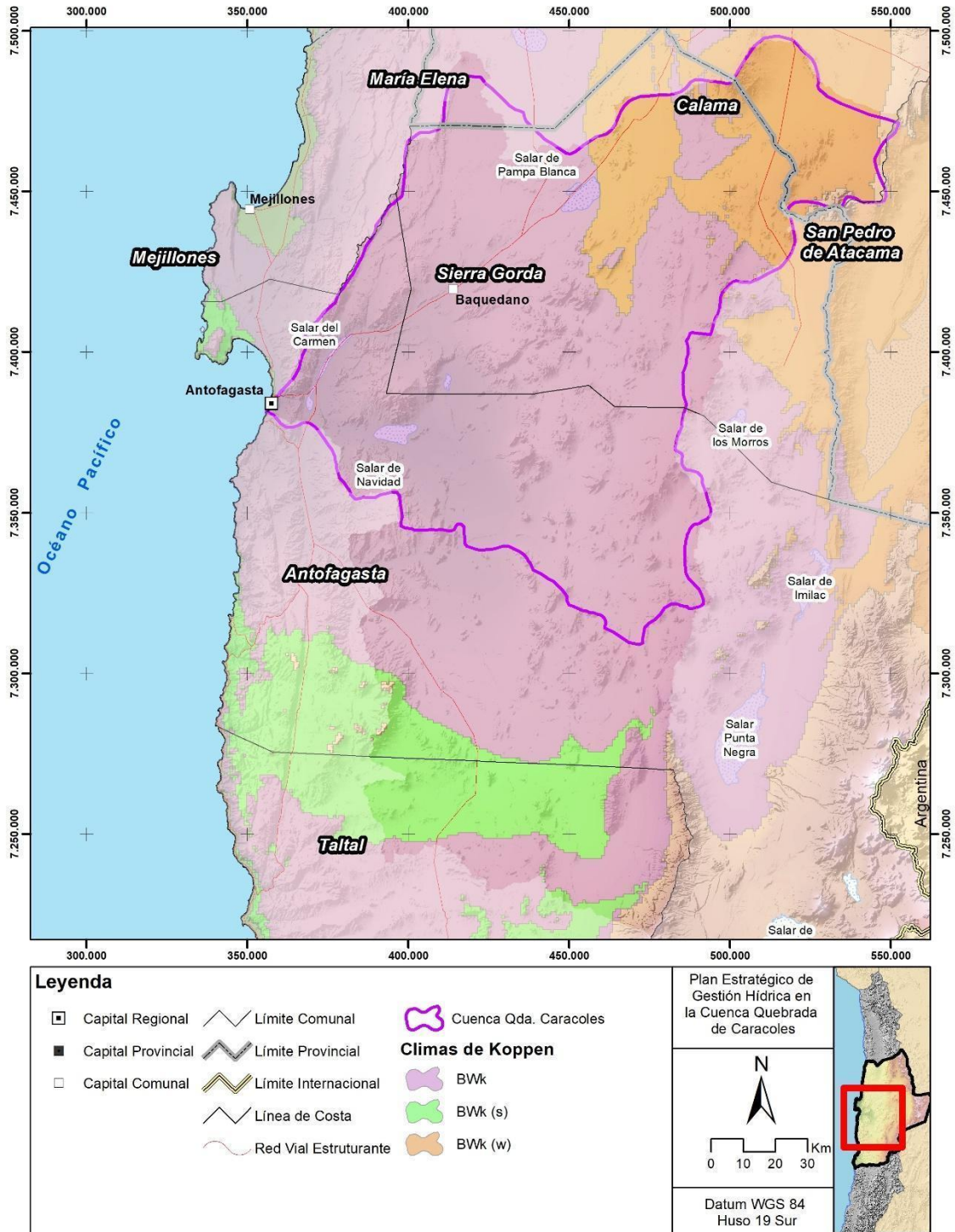
### **1.2.1 Climatología del Área de Estudio**

Este acápite describe, a partir de distintas fuentes, el clima presente en la zona de estudio.

En primer lugar, se tiene la división de zonas climáticas propuesta por Köppen-Geiger, y descrita para todo Chile por la Pontificia Universidad Católica de Chile en 2016. En la cuenca, se tiene la presencia de 3 clases de climas: desértico frío de lluvia estival (BWk(w)), desértico frío (BWk) y desértico frío de lluvia invernal (BWk(s)). Estos climas se presentan en la Figura 1-11.

Estos climas están caracterizados principalmente por una baja precipitación en temperaturas relativamente frías, donde la componente de la evaporación sobrepasa a la componente de la precipitación. Esta combinación produce una aridez extrema en la zona.

En Arcadis (2016) se describe el clima a nivel regional. El desierto se manifiesta plenamente hacia la zona intermedia, donde la influencia marina pierde importancia a 20 km hacia interior desde la costa. En esta zona intermedia la aridez es extrema, hay ausencia de humedad, gran sequedad atmosférica y una amplitud térmica importante entre el día y la noche.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 1-11 Clasificación climática de Köppen para la cuenca en estudio.**

### 1.2.1.1 Eventos extremos y variabilidad climática

Este acápite pretende describir el comportamiento de las variables hidroclimatológicas en base a la información disponible, además de definir la presencia y magnitud de los eventos extremos.

Lo que sigue se desarrolla en base a DGA (2018) y los productos grillados asociados al balance hídrico para el período histórico (1985-2015), basado en el producto grillado CR2MET v1.3. Los datos analizados se presentan en el Anexo J-6.

#### i. Variabilidad intra-anual

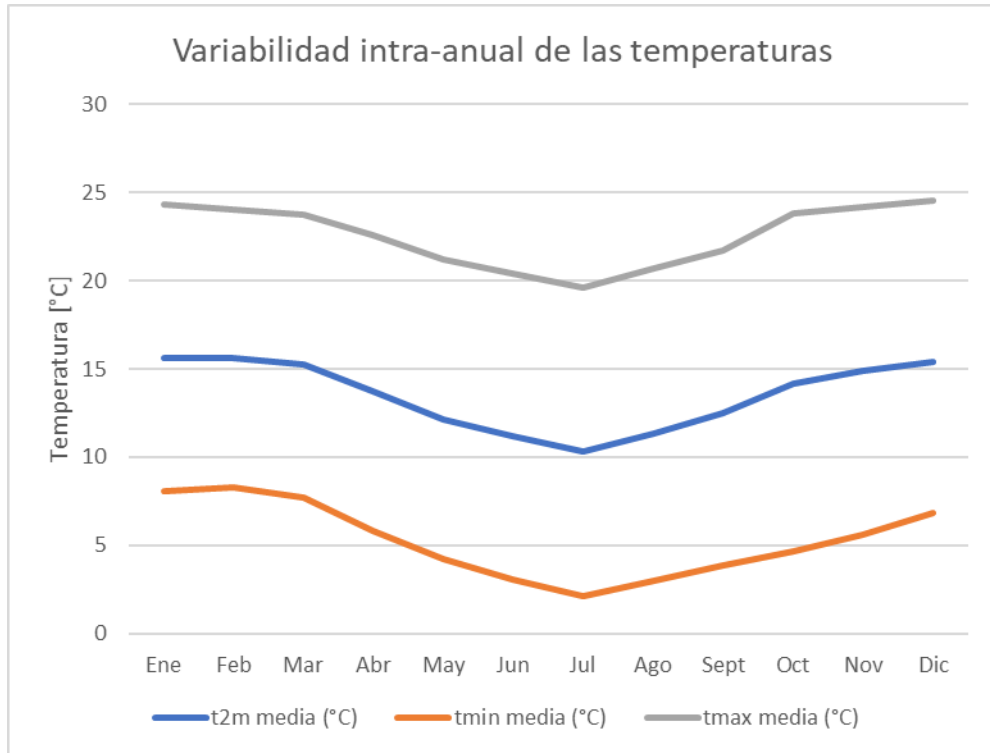
La cuenca presenta una precipitación media de 7,68 mm anuales, con una variabilidad intra-anual representada por la Figura 1-12. Se aprecia que la precipitación es baja durante el año, concentrándose en los meses de invierno.

Por otro lado, las temperaturas medias mensuales (Figura 1-13) siguen el comportamiento normal para la latitud, con las mínimas presentes en los meses de invierno (may-jul) y las máximas en los meses de verano. La relación entre las 3 temperaturas (temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y temperatura media a 2 m sobre el suelo) se mantiene constante a lo largo del año, con una amplitud media cercana a los 18 °C.



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018).

**Figura 1-12 Variabilidad intra-anual de la precipitación media mensual en la cuenca, periodo 1985-2015.**



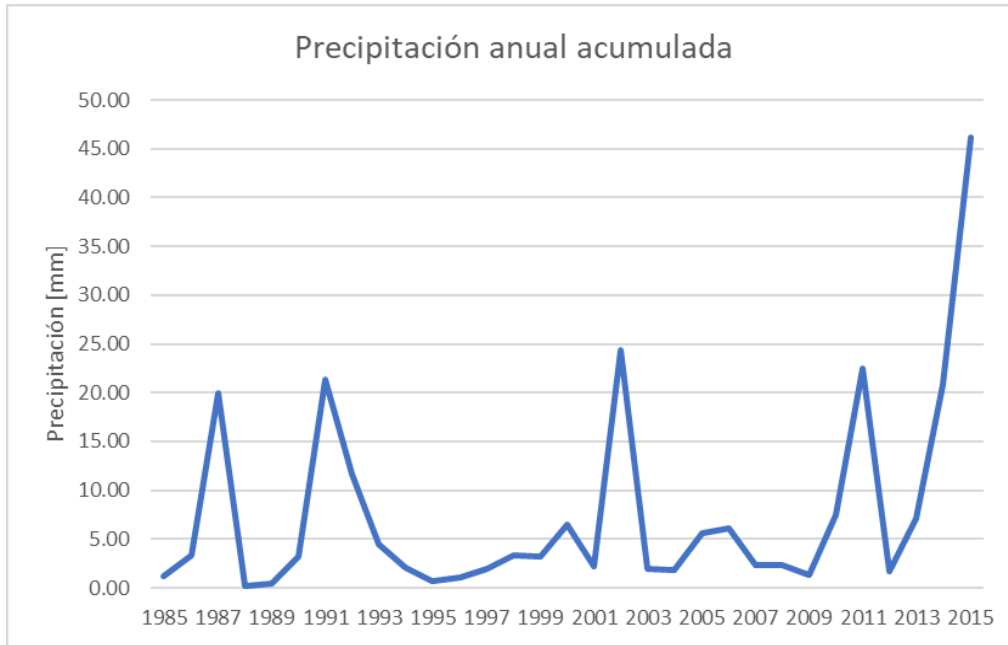
t 2m: temperatura a 2 metros del suelo; tmax: temperatura máxima; tmin: temperatura mínima.  
Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018).

**Figura 1-13 Variabilidad intra-anual de las temperaturas medias mensuales en la cuenca, período 1985-2015.**

ii. Variabilidad interanual

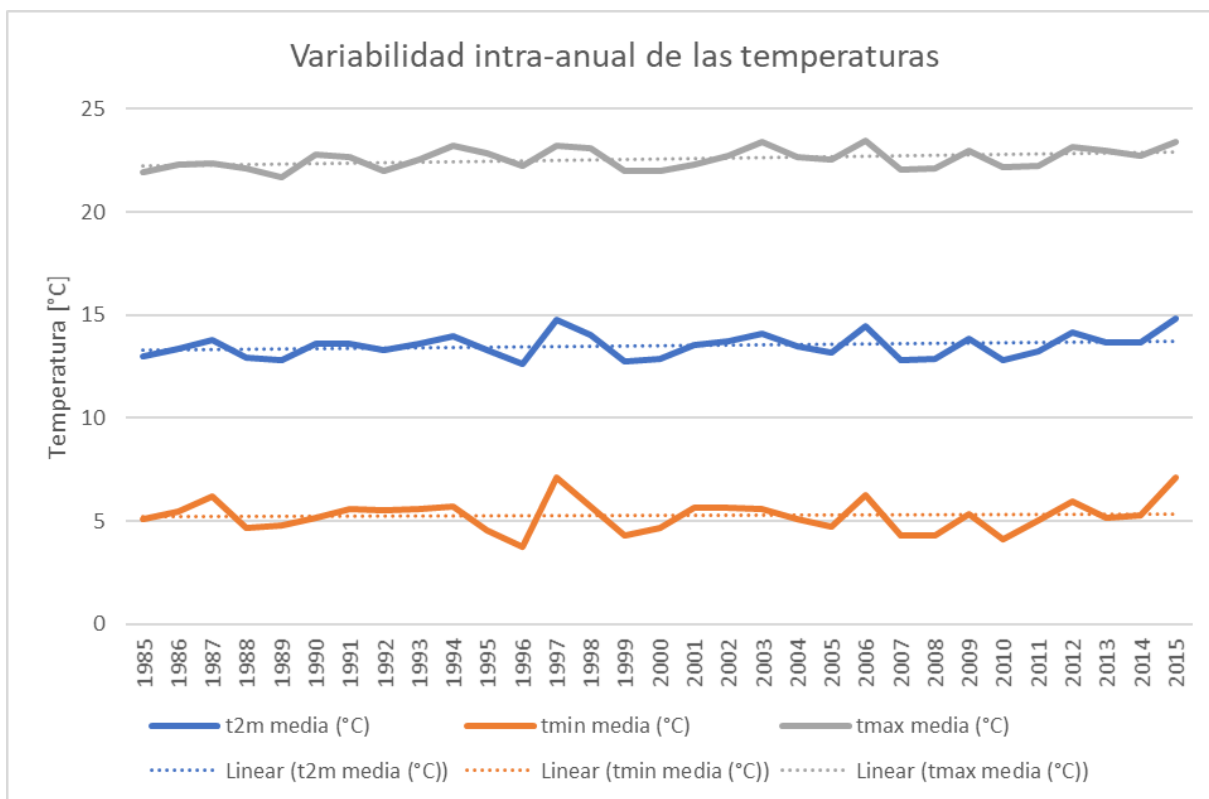
Con respecto a la variabilidad interanual de la precipitación (ver Figura 1-14 y Figura 1-15), no se observan tendencias relevantes en el período de análisis. Destacan los años 1987, 1991, 2002, 2011 y 2015, donde se registran peaks de precipitación acumulada debido a eventos extremos, como la crecida en marzo de 2015.

La variabilidad interanual de las temperaturas sí evidencia un aumento sostenido a lo largo del período de análisis, pero con una pendiente baja.



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018).

**Figura 1-14 Variabilidad interanual de la precipitación en la cuenca, período 1985-2015.**



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018).

**Figura 1-15 Variabilidad interanual de las temperaturas en la cuenca, período 1985-2015.**

iii. Eventos extremos

Dado que el análisis se hace sobre información a nivel mensual, no es posible caracterizar eventos extremos de corta duración, tales como tormentas particulares u olas de calor. Por lo tanto, en lo que sigue se destacan aquellos meses en los que se presentaron fenómenos que resultan en que el valor medio mensual se aleje significativamente de la media total.

En la Tabla 1-5 se presenta la serie completa de las precipitaciones medias mensuales. La escala de colores representa la relación de la celda con respecto a los demás valores. Un color más intenso corresponde a mayores valores. Como se adelantaba, las mayores precipitaciones se encuentran en los meses invernales y en marzo de 2015 se presentó la mayor precipitación de la serie, con 34,9 mm caído.



**Tabla 1-5 Serie completa de precipitaciones medias mensuales, período 1985-2015.**

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
1985	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,4	0,0	0,0	0,1
1986	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,1
1987	0,3	0,4	1,7	0,0	0,7	0,0	14,0	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0
1988	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0
1991	0,3	0,2	0,0	0,1	0,0	20,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
1992	0,2	0,0	0,0	3,2	4,2	2,8	0,4	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0
1993	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1994	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
1995	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1996	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0
1997	0,2	0,1	0,1	0,0	1,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
1998	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	2,5	0,1	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
1999	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	1,7	0,1	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0
2000	1,8	0,0	0,0	0,0	1,8	2,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	0,5	0,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,1	0,0	0,0
2002	0,0	0,0	0,3	0,0	4,4	0,1	18,2	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
2003	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2004	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
2005	1,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0
2006	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	4,1	0,1	0,0	0,0	0,0

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,3	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0
2008	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2010	0,0	0,0	0,0	1,2	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2011	0,5	0,3	0,0	0,2	0,0	0,5	18,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0
2012	0,3	0,3	0,0	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
2013	0,5	0,0	0,0	0,0	3,0	0,1	0,3	3,1	0,1	0,0	0,0	0,0
2014	0,1	0,0	0,0	0,3	20,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2015	0,3	0,0	34,9	0,1	0,1	0,0	0,0	9,3	0,0	0,0	1,4	0,0

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2018)

Con respecto a las temperaturas, se menciona que el mayor valor de la *temperatura media mensual medida a 2 metros (t2m)* se registra en enero de 1998, con 19,6 °C, mientras que el menor se presenta en julio de 2010, con 7,1 °C.

El mayor valor de la variable *media mensual de la temperatura máxima (tmax)* se presenta coincidentemente en enero de 1998, con 27,7 °C, mientras que el menor valor de esta variable se presenta en julio de 2010, con 2,3 °C.

Por otra parte, el mayor valor de la *media mensual de la temperatura mínima (tmin)* se presenta en enero de 1998 con 12,5 °C, mientras que el menor se presenta en julio de 2010, con -1,8 °C.

Un resumen de lo expuesto en los tres párrafos precedentes se presenta en la Tabla 1-6.

**Tabla 1-6 Resumen temperaturas medias mensuales.**

[°C / Mes y año]	t2m	tmax	tmin
Media mensual máxima	19,6 / Ene-1998	27,7 / Ene-1998	12,5 / Ene-1998
Media mensual mínima	7,1 / Jul-2010	2,3 / Jul-2010	-1,8 / Jul-2010

### 1.2.2 Uso de Suelo y Evapotranspiración

La cuenca en estudio posee un área total de aproximadamente 27.900 km<sup>2</sup>. Utilizando la herramienta de delimitación de WEAP, se definieron 8 subcuencas hidrográficas.

La cobertura y uso de suelo establecida por Zhao et al. (2016) fue utilizada para representar la variabilidad espacial de la evapotranspiración y de la recarga dentro de cada zona localizada en las Cuencas Endorreicas. El producto grillado se encuentra disponible en alta resolución espacial (~30 metros) y es considerado una alternativa más confiable para Chile en comparación con el producto grillado ESA-CCI-LC de 300 metros, perteneciente a la agencia espacial europea. La cobertura de suelo dominante en la cuenca son las tierras desnudas (93.8%) con suelos rocosos mezclados con gravas, principalmente.

La evapotranspiración se modeló utilizando nodos de demanda/los coeficientes de cultivo  $k_c$  en los elementos "catchment". Los coeficientes se definieron en los "key assumptions", asociados a las coberturas de suelo.

### 1.2.3 Unidades Hidrológicas/Catchments

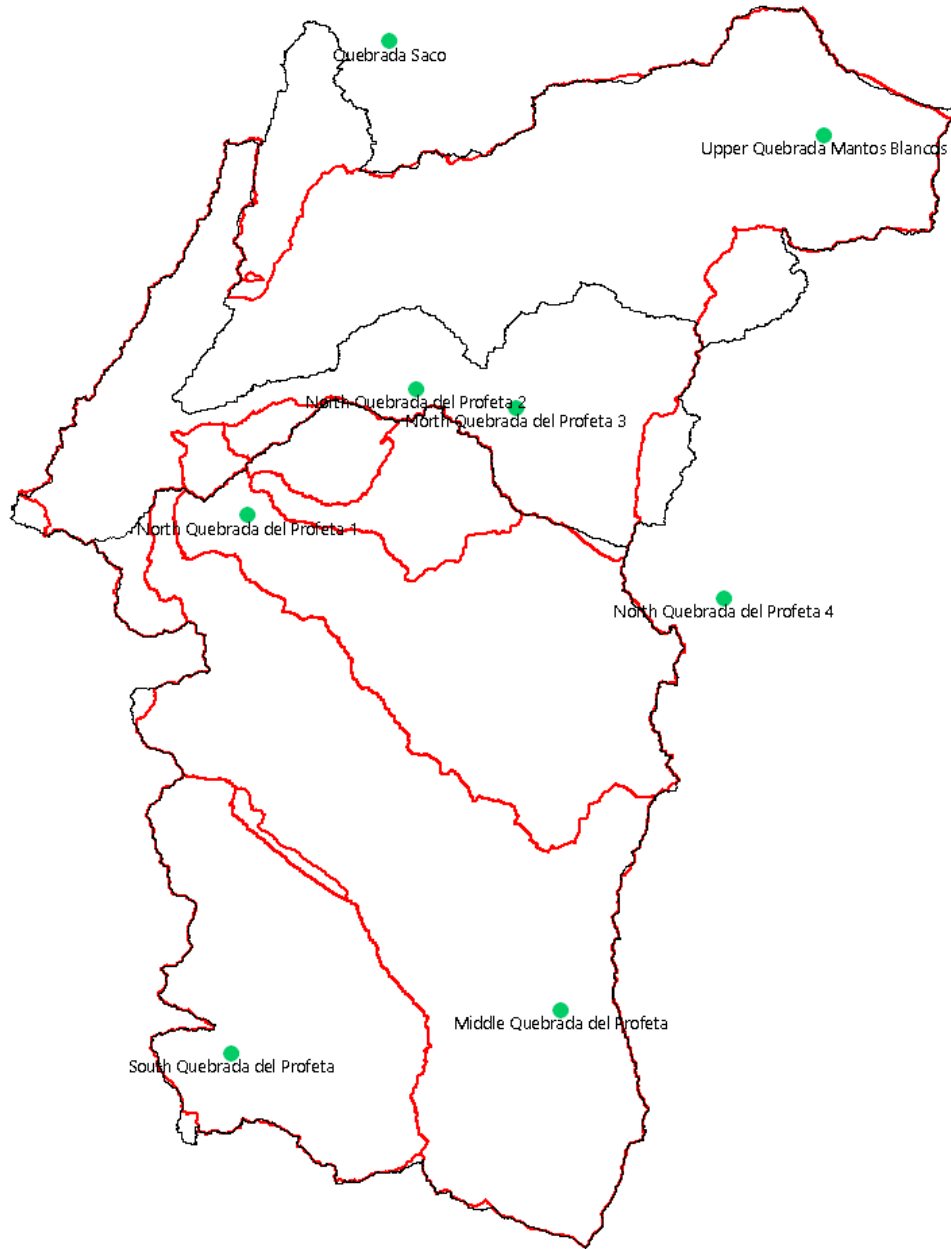
La delimitación de cuencas hidrológicas definidas en el modelo fue realizada a partir del modelo digital de elevación ALOS PALSAR utilizando la herramienta integrada de WEAP. Esta herramienta combinada con la delimitación DARH, permitió definir 8 unidades hidrológicas en la zona que cubre la cuenca Antofagasta.

A cada una de estas cuencas se le asignó un elemento "Catchment" con bandas de elevación cada 300 metros, que permiten definir distintos usos de suelo y por lo tanto diferentes parámetros asociados. El árbol de elementos tipo para cada catchment se muestra en la Figura 1-16, que muestra la vista original en WEAP. Las cuencas definidas se muestran en la Tabla 1-7.

**Tabla 1-7. Cuencas definidas en el modelo.**

Upper Quebrada Mantos Blancos	Quebrada Saco
Quebrada del Profeta Centro	Quebrada del Profeta Norte
Quebrada del Profeta 1 Norte	Quebrada del Profeta 2 Norte
Quebrada del Profeta 3 Norte	Quebrada del Profeta 4 Norte

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 1-16. Distribución de elementos "catchment".**

A cada una de las bandas de elevación, se le asignó una distribución de uso de suelo, asociada a los coeficientes de cultivo  $k_c$  específicos, proveniente de los key assumptions en WEAP. Estos coeficientes fueron parte de los parámetros calibrados, dentro del rango explicitado en la Tabla 1-10. Los datos climáticos que se le asignaron a cada catchment corresponden al producto CR2MET con sus correcciones respectivas, especificadas en el acápite 1.1.1.1.

El método de solución considerado para los nodos de cuenca es el de precipitación-escorrentía (Rainfall Runoff).

#### 1.2.4 Ríos/Rivers

Considerando que en la cuenca se encuentran principalmente condiciones arreicas y endorreicas, se definieron los principales brazos de ríos esporádicos que escurren por las quebradas identificadas. Cada elemento río tiene en su nacimiento la conexión con la cuenca aportante. A cada uno de estos ríos se les definió, cuando correspondía, tramos o "reaches" que representan una subdivisión de los ríos en su recorrido hasta su desembocadura en algún cuerpo salar o acuífero. Los ríos definidos se presentan en la Tabla 1-8.

**Tabla 1-8. Ríos definidos en el modelo.**

Upper Quebrada Mantos Blancos	Quebrada Saco
Quebrada del Profeta	North Quebrada del Profeta
North Quebrada del Profeta.	South Quebrada del Profeta
North Quebrada del Profeta 1	North Quebrada del Profeta 2

Fuente: Elaboración propia.

Debido a la existencia de lagunas salares y que WEAP no incorpora un elemento para representar cuerpos de agua detenida naturales, se utilizó el elemento "reservoir" para caracterizar los cuerpos salares ubicados en la cuenca: Salar del Carmen y Salar de Pampa Blanca en la cuenca Quebrada Mantos Blancos y el Salar de Navidad en la cuenca Quebrada del Profeta. Estos elementos reciben agua desde los nodos de demanda "Lateral Recharge", que a su vez extraen agua de los acuíferos "Lower" o desde los elementos "River" en sus últimos tramos.

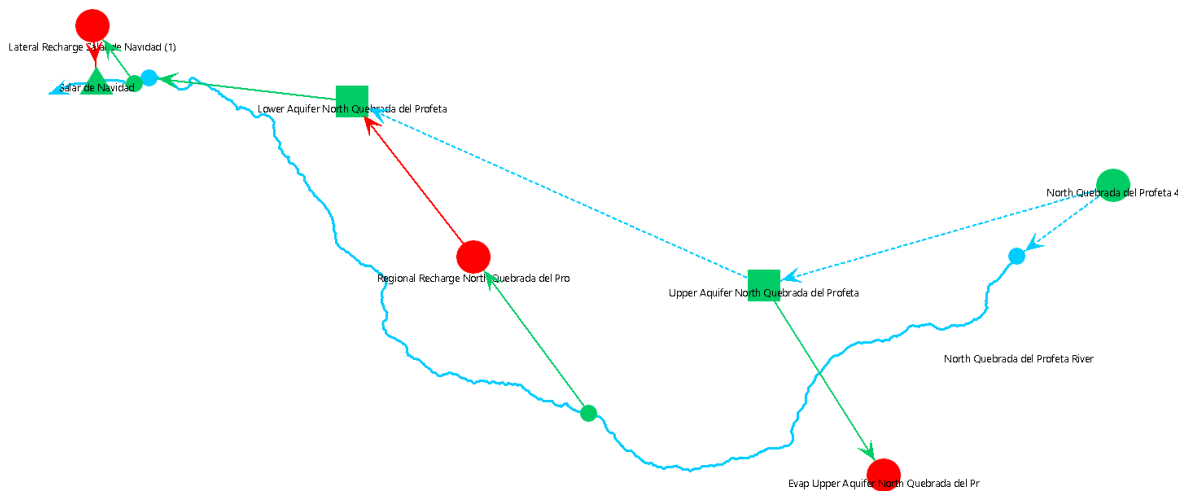
#### 1.2.5 Agua Subterránea/Groundwater

Cada cuenca hidrográfica posee definidos dos tipos de acuífero. El primero, denominado "Upper", que representa la caja acuífera asociada a la porción superior del acuífero. El segundo, "Lower", la parte inferior del acuífero, asociada a los salares en las cuencas que corresponde. En cuencas donde no existen salares, el acuífero "Lower" funciona sólo como almacenamiento.

En cada cuenca, ambos elementos se encuentran conectados mediante infiltración un arco de Escorrentía/infiltración. Los nodos de demanda asociados a la evaporación extraen agua desde los acuíferos "Upper".

### 1.2.6 Nodos de Demanda/Demand Sites

Se definieron nodos de demanda para caracterizar 3 procesos. El primero corresponde a la evaporación desde los acuíferos "Upper" (8). El segundo a la recarga regional en cada cuenca (8), denominados "Regional Recharge", que extrae aguas desde la escorrentía hacia alguno de los dos elementos acuíferos. Tercero, nodos que representan la recarga lateral afluyente a cada elemento acuífero "Lower" asociado a los salares, denominados "Lateral Recharge" (3). En la Figura 1-17 se presentan los 3 tipos de nodos de demanda utilizados.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 1-17. Distribución tipo de elementos WEAP en cuencas.**

Finalmente, para la definición de los escenarios de gestión, se definió un nodo relacionado a la demanda minera, que bombea desde los acuíferos "Lower Aquifer Middle Quebrada del Profeta" y "Lower Aquifer Quebrada Mantos Blancos"

### 1.2.7 Horizontes de Simulación

Para la modelación WEAP en la cuenca Quebrada Caracoles se definió un horizonte temporal de modelación que considera el periodo 1970-2020 y que se ha basado principalmente en la resolución temporal disponible en los datos climáticos de CR2MET. El paso de tiempo se definió con el objetivo de poder determinar los procesos hidrológicos que dominan la partición hidrológica a escala mensual. El paso de tiempo mensual sirvió para capturar la estacionalidad de esta zona climática e informar esquemas de manejo a escalas de tiempo anual.

En el horizonte de simulación WEAP el año 1979 fue definido como el año de cuenta corriente y el año 2020 fue definido como el último año de los escenarios. Para el paso de tiempo se han considerado 12 meses por año y para el comienzo del año hidrológico se consideró el mes de abril.

### 1.3 Calibración

El proceso de calibración del modelo WEAP-Caracoles consideró la parametrización clásica WEAP basada en la perturbación de los parámetros que definen la estructura general del modelo. Para este proceso se utilizaron las simulaciones de escorrentía superficial obtenidas desde el Modelo WEAP-Caracoles-Princeton. Con estos datos de referencia se desarrollaron dos esquemas principales de calibración no tradicional de parámetros: (1) Calibración Manual y (2) Calibración Automática (ver detalles en las siguientes secciones).

#### 1.3.1 Datos de Referencia para la Calibración

La construcción del modelo WEAP-Princeton permitió el desarrollo de simulaciones iniciales de los flujos hidrológicos (1979-2020) para la cuenca de Caracoles (Tabla 1-9). Las simulaciones de escorrentía superficial fueron utilizadas como datos de referencia para llevar a cabo la construcción de la versión completa del modelo WEAP-Caracoles. El modelo simplificado fue construido utilizando la opción de delineación automática de cuencas, el cual incluye la climatología de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006) y los datos de uso de Suelo de la Agencia Espacial Europea (ESA-CCI-LC) desglosada por cada banda de elevación de 300 metros.

**Tabla 1-9. Resumen de los datos observados disponibles para la calibración del Modelo WEAP Caracoles.**

Fuente	Tipo de Flujo	Fuente	Periodo de Registro	Resolución Temporal	Resolución Espacial	Cuenca / Area
Escorrentía Superficial	Escorrentía simulada	Modelo Simplificado WEAP-Princeton	1979-2020	Diaria	Puntual	Caracoles

#### 1.3.2 Definición de Parámetros de Calibración

Todos los parámetros que componen la estructura básica de WEAP fueron utilizados en el proceso de calibración del modelo WEAP-Caracoles. Un total de nueve parámetros fueron asignados y calibrados de manera independiente para las unidades hidrológicas de la cuenca de Caracoles (Dw, F, Kc, Kd, Ks, RRF, Sw, Z1, Z2). Cuatro parámetros fueron

asignados y calibrados para cada cobertura de suelo ( $K_c$ ,  $K_s$ , RRF, y  $S_w$ ) dentro de la cuenca. Adicionalmente, se implementaron parámetros auxiliares que permitieron mejorar la asimilación del modelo WEAP-Caracoles. Primero, se implementó un factor de corrección de sesgo de las lluvias (Bias Correction Factor) que permite corregir problemas de escala por los errores propagados desde el producto grillado Cr2MET. También se establecieron parámetros que permiten regular la respuesta de los siguientes flujos hidrológicos: (1) recarga lateral, (2) recarga directa, (3) evaporación desde acuíferos poco profundos, y (4) recargas o descargas desde las lagunas existentes en los sistemas salares (desarrollado como place-holder debido a la inexistencia de datos observados), y (5) otras descargas de agua desde el sistema de la Cuencas de Caracoles. Estos parámetros adicionales fueron utilizados para analizar la sensibilidad del modelo y calibrados manualmente utilizando tres niveles de respuesta hidrológica (Alta, Media y Baja). En la Tabla 1-10 se presenta un ejemplo de los sets de parámetros utilizados durante el proceso de validación del modelo WEAP.



**Tabla 1-10. Ejemplo de set óptimo de parámetros óptimos estimados y rango de variación permitido durante el proceso de calibración automática utilizando los resultados de escorrentía superficial del modelo WEAP-Caracoles-Princeton.**

Parámetro	Valor	Min	Max
Key\Hydrology\DW	3866.7	1000.00	4000.00
Key\Hydrology\F_Flux_Direction	0.89	0.50	0.90
Key\Hydrology\Kc\Urbanizadas	0.9	0.70	1.10
Key\Hydrology\Kc\Bosques	0.92	0.70	1.10
Key\Hydrology\Kc\Agrícolas Heterogéneas	0.83	0.70	1.10
Key\Hydrology\Kc\Abiertas sin o con poca Vegetación	0.95	0.95	0.95
Key\Hydrology\Kc\Pastos	1.1	0.70	1.10
Key\Hydrology\Kc\Cultivos Permanentes	0.85	0.70	1.10
Key\Hydrology\Kc\Vegetación Herbácea o Arbustiva	0.91	0.70	1.10
Key\Hydrology\Kd	228.08	50.00	300.00
Key\Hydrology\Ks_Root_Zone_K\Urbanizadas	270.33	100	700
Key\Hydrology\Ks_Root_Zone_K\Bosques	185.95	100	700
Key\Hydrology\Ks_Root_Zone_K\Agrícolas Heterogéneas	402.83	100	700
Key\Hydrology\Ks_Root_Zone_K\Abiertas sin o con poca Vegetación	348.56	100	700
Key\Hydrology\Ks_Root_Zone_K\Pastos	101.12	100	700
Key\Hydrology\Ks_Root_Zone_K\Cultivos Permanentes	467.73	100	700
Key\Hydrology\Ks_Root_Zone_K\Vegetación Herbácea o Arbustiva	234.76	100	700
Key\Hydrology\RRF\Urbanizadas	7.26	0.1	9
Key\Hydrology\RRF\Bosques	4.67	0.1	9
Key\Hydrology\RRF\Agrícolas Heterogéneas	8.3	0.1	9
Key\Hydrology\RRF\Abiertas sin o con poca Vegetación	5.6	0.1	9
Key\Hydrology\RRF\Pastos	8.16	0.1	9
Key\Hydrology\RRF\Cultivos Permanentes	4.17	0.1	9
Key\Hydrology\RRF\Vegetación Herbácea o Arbustiva	0.99	0.1	9
Key\Hydrology\Sw\Urbanizadas	254.74	50	1500
Key\Hydrology\Sw\Bosques	1331.36	50	1500
Key\Hydrology\Sw\Agrícolas Heterogéneas	389.32	50	1500
Key\Hydrology\Sw\Abiertas sin o con poca Vegetación	877.21	50	1500
Key\Hydrology\Sw\Pastos	439.46	50	1500
Key\Hydrology\Sw\Cultivos Permanentes	837.65	50	1500
Key\Hydrology\Sw\Vegetación Herbácea o Arbustiva	794.68	50	1500
Key\Hydrology\Z1	49.41	30.0	60.0
Key\Hydrology\Z2	35.22	30.0	60.0
Key\Hydrology\Precipitation\Bias_Correction_Factor	0.6	0.01	3

Finalmente es importante mencionar que todos los parámetros calibrados en el modelo WEAP-Caracoles fueron establecidos en la interfaz de WEAP. El set completo de parámetros calibrados se encuentra definido bajo los supuestos claves del modelo (*key assumptions*).

### 1.3.3 Análisis de Sensibilidad y Calibración Manual

En esta etapa se consideró un análisis de screening de los parámetros del modelo para determinar la sensibilidad de las variaciones sobre la respuesta hidrológica. De esta forma se llevó a cabo una modificación manual de los parámetros más sensibles, como, por ejemplo; el tamaño de los estanques utilizados en la simulación, la capacidad de la cuenca para generar escorrentía superficial (flujo dominado por el factor de resistencia a la escorrentía), y las condiciones iniciales del modelo, entre otros. Adicionalmente, se

perturbaron todos los parámetros que regulan la respuesta de los flujos hidrológicos de mayor importancia, mediante variaciones manuales de los rangos establecidos para la conexión hidrológica (*baja, media o alta*). Otro parámetro de importancia que fue evaluado fue el Factor de Corrección de Sesgo (*Bias Correction Factor*) el cual corresponde a uno de los parámetros de mayor sensibilidad debido a su conexión directa con la entrada de precipitaciones hacia el sistema de la Cuenca de Caracoles. La idea del proceso de calibración manual fue aproximar los parámetros del modelo hacia valores que permitieran facilitar el proceso de calibración automática. Los valores de referencia utilizados en este proceso fueron obtenidos desde estudios previos desarrollados en la cuenca.

### 1.1.1 Calibración Automática

El proceso de Calibración Automática se desarrolló mediante la implementación de dos métodos. Primero, se realizaron simulaciones automáticas utilizando variaciones aleatorias de los valores de los parámetros disponibles en el modelo WEAP utilizando una versión modificada de la herramienta "WEAP Model Inspector (WMI)" versión 1.0 (ver detalles en Angarita y Mehta, 2016). El WMI fue utilizado para encontrar un set de parámetros óptimos mediante 1.000 simulaciones WEAP con perturbaciones aleatorias de los parámetros definidos en la estructura del modelo WEAP-Caracoles (ver Tabla 1-10). Los mejores sets de parámetros fueron utilizados para aplicar un segundo método basado en la implementación de la herramienta PEST (Parameter Estimation en inglés), la cual se encuentra disponible dentro de la interfaz gráfica del modelo WEAP.

La calibración automática con PEST (versión 11.8) fue realizada en varias etapas considerando inicialmente una calibración de los parámetros que componen la estructura básica del modelo WEAP. Posteriormente, se calibraron los parámetros más sensibles del modelo de manera conjunta e independiente para continuar el refinamiento de la calibración. Los datos de referencia utilizados en esta etapa fueron las simulaciones del modelo WEAP-Princeton disponibles para todas las unidades hidrológicas evaluadas para la cuenca de Caracoles.

Es importante recordar que todas las calibraciones desarrolladas para la cuenca de Caracoles fueron aplicadas mediante la utilización de datos de referencia basados en previas simulaciones y no en datos observados o instrumentales. De esta forma, el proceso descrito corresponde a métodos no tradicionales de calibración de parámetros de modelos hidrológicos.

#### 1.3.4 Validación de Resultados de la Calibración WEAP

Para la calibración y validación del modelo WEAP-Caracoles se utilizaron dos periodos: **Periodo 1:** 1980-1997, en donde se calibraron los parámetros del modelo WEAP para mejorar las simulaciones hidrológicas, y **Periodo 2:** 1998-2020, en donde la estructura seleccionada para el modelo WEAP fue validada con nuevos datos de referencia no utilizados previamente en el proceso de calibración. Los resultados mostraron que en general la capacidad predictiva del modelo empeora cuando se utilizan datos que no fueron utilizados en el proceso de calibración; sin embargo, los errores del modelo se pueden mantener bajo los márgenes considerados razonables para desarrollar simulaciones confiables. Existen muchas formas de realizar este proceso las cuales van desde la selección aleatoria y evaluación de múltiples periodos de calibración y validación, hacia la evaluación basada en procesos hidrológicos ya conocidos a escala de cuenca. Para el caso del modelo WEAP-Caracoles, no fue posible desarrollar métodos estrictos de calibración debido a la inexistencia de datos observados o instrumentales disponibles para la cuenca. Lo anterior también se considera como incertidumbre adicional propagada durante el proceso de validación.

Para llevar a cabo futuros procesos de calibración tradicional se recomienda el establecimiento de una red de monitoreo hidrológico que además de incluir la medición de las variables básicas como por ejemplo precipitación, temperatura, viento, radiación, humedad, etc., incluya las fluctuaciones estacionales de los volúmenes almacenados en los acuíferos locales y regionales de la Cuenca de Caracoles. Todo lo anterior permitirá establecer marcos más representativos para la calibración y validación de los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca de Caracoles.

#### 1.3.5 Simulación Inicial con Calibración Seleccionada

Los resultados de la calibración PEST fueron utilizados para establecer las simulaciones iniciales del modelo WEAP-Caracoles. Las medidas de error clásicas utilizadas para la evaluación de modelos hidrológicos (NSE, RMSE, MSE, R2, etc.) fueron utilizadas para definir la estructura más adecuada para el establecimiento de las simulaciones iniciales desde el modelo WEAP-Caracoles.

Es importante mencionar que este proceso de calibración no tradicional debe ser interpretado con cautela ya que el marco cuantitativo solo permite una comparación entre los datos de referencia disponibles, los cuales también provienen desde un modelo de simulación que posee distintos productos de climatología y uso de suelo (Modelo WEAP-

Princeton). A pesar de lo mencionado, ambos modelos son consistentes y logran representar con buenos resultados la hidrología local y regional de la cuenca de Caracoles.

Tomando en consideración los resultados de la calibración, se consideró que el factor de *Bias Correction Factor* se debería aproximar a un valor para las simulaciones iniciales de 0.44. Asimismo, el Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF) fue ajustado en 0.05 (ver Tabla 1-10 para el detalle de los parámetros calibrados).

## **2 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA SUBCUENCA PILOTO**

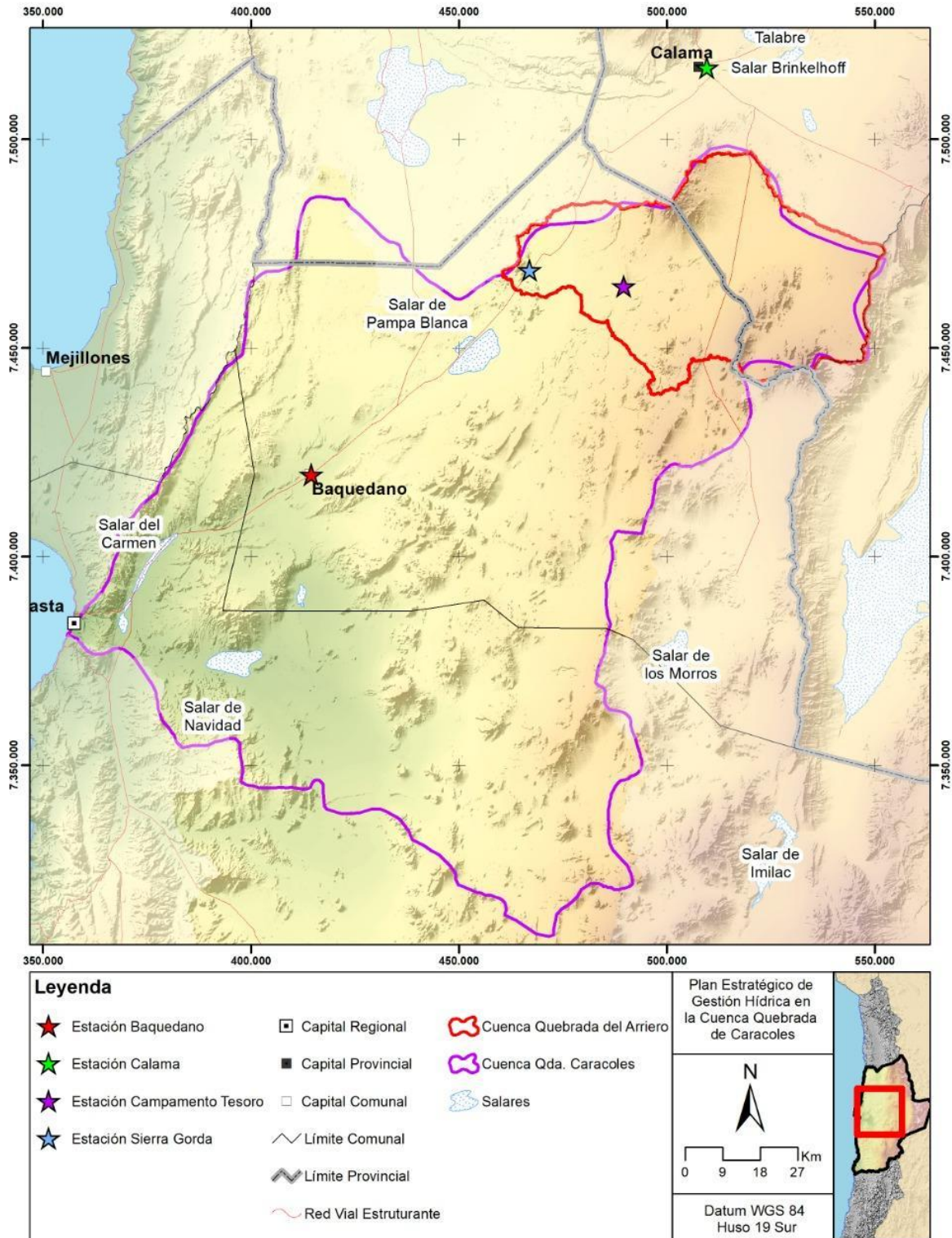
### **2.1 Definición de subcuenca piloto**

Como parte del desarrollo del presente Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la Cuenca Caracoles y con el objeto de mejorar la utilidad de la información obtenida en terreno, pensando en un producto que ayude a mejoramiento del conocimiento de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca, se definió, en conjunto con la Inspección Fiscal y la DGA Regional, una subcuenca piloto, sobre la cual se realizaron todos los trabajos de terreno y se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual, que estimó la recarga del sistema subterráneo, en un territorio con una fuerte demanda de agua para proyectos mineros actuales y futuros que utilizan este recurso hídrico subterráneo.

Este sector de estudio corresponde a la subcuenca Quebrada de los Arrieros y a la cabecera de la cuenca Quebrada Saco, cubriendo una superficie, aproximada, de 2845 km<sup>2</sup>, que corresponde a un 15% de la cuenca Quebrada Caracoles (Figura 2-1).

Esta subcuenca presenta un clima desértico con escasas precipitaciones, las que ocurren esporádicamente durante los meses de invierno y también en meses de verano como consecuencia de la extensión del invierno altiplánico hacia zonas más bajas. Pese a que las lluvias son de baja magnitud a nivel anual, es posible que puedan ocurrir ocasionalmente lluvias torrenciales que den origen a escurrimientos de agua superficial esporádicos, ya que escurrimiento de agua superficial permanente no se observa en esta subcuenca, ni en la cuenca Quebrada Caracoles.

El registro de precipitaciones de mayor data en la zona se encuentra en las estaciones de DGA: Baquedano (1032 m.s.n.m.), Sierra Gorda (1616 m.s.n.m.) y Calama (2300 m.s.n.m.), con precipitaciones medias anuales, para el período 1992-2020, de 2,02 mm, 1,06 mm y 3,64 mm, respectivamente.

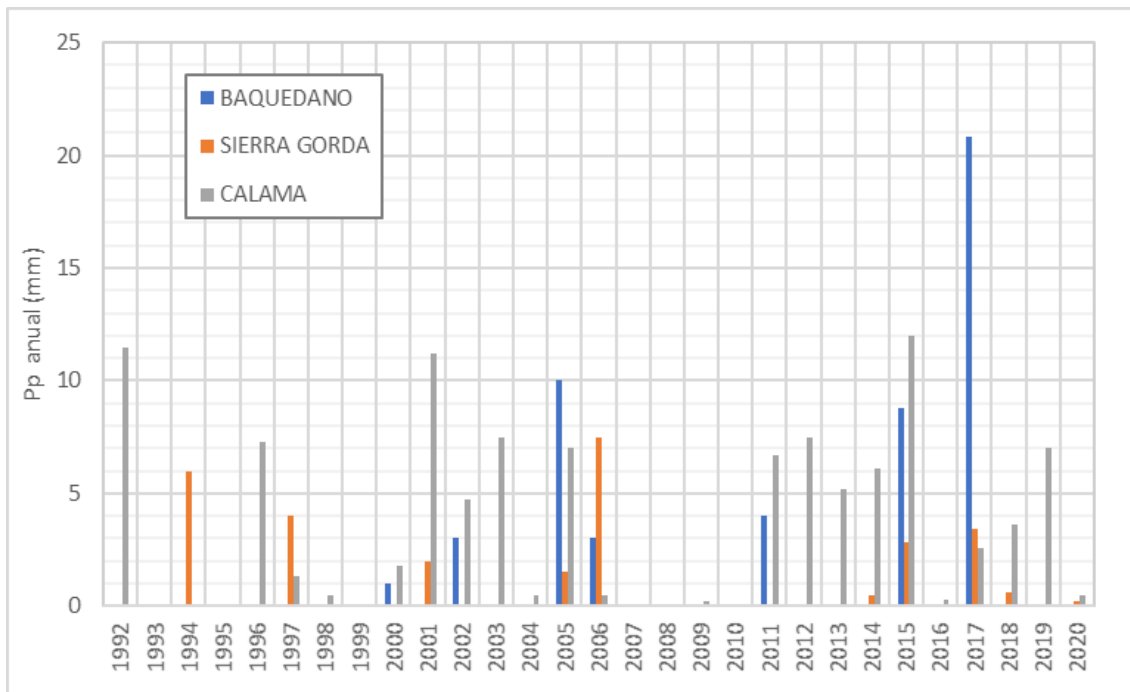


Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2-1. Ubicación de la cuenca de estudio, subcuenca piloto y estaciones meteorológicas.**

Estas precipitaciones para el período 1992-2020, como se puede ver en la Figura 2-2, sobrepasan los 10 mm/año en tan sólo 4 años y en casi la mitad de los años de la estadística, la precipitación anual no sobrepasa los 5 mm. La estación Calama, que corresponde a la ubicada a mayor altura geográfica, es la que presenta la mayor cantidad de años con precipitaciones mayores a 10 mm/año (3), fenómeno que tiene una recurrencia entre 9 y 15 años. La otra estación que alcanza un valor de precipitación mayor a 10 mm/año, corresponde a la estación Baquedano, registrada sólo en el mes de junio del año 2017 con 20,8 mm.

Como se puede ver en la Figura 2-2, la estación Sierra Gorda, ubicada en el cierre y sector más bajo de la subcuenca piloto, no registra precipitaciones anuales mayores a 7,5 mm y para el período de registro de la misma, presenta precipitaciones nulas o menores a 1 mm/año que pueden extenderse por ciclos de 3 a 7 años.



Fuente: Elaboración propia con información DGA.

**Figura 2-2. Distribución de la precipitación anual de las estaciones de la zona de estudio, período 1992-2020.**

La subcuenca de estudio se caracteriza por una morfología de pampa aluviales interrumpidas por suaves serranías orientadas norte-sur con alturas entre 2100 a 4000 m.s.n.m. Debido a las escasas precipitaciones el relieve está formado por lomajes suaves sin cambios abruptos de pendiente, en donde se ha desarrollado una red de drenaje muy

extendida en el área pero muy poco labrada, observándose algunos cauces principales que no superan algunos metros de profundidad pero que se extienden en una amplia sección.

## **2.2 Unidades Hidrogeológicas**

Para el PEGH de la Cuenca Quebrada Caracoles se consideró una subcuenca piloto de interés regional, donde se concentraron los trabajos de terreno, orientados a la búsqueda de información hidrogeológica e hidroquímica que permitieran formular en este sector un modelo hidrogeológico conceptual que apoye la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

La primera definición de las unidades hidrogeológicas de esta subcuenca, fue definida con las unidades geológicas descritas a escala regional y su capacidad potencial de almacenar y transmitir aguas subterráneas. En este sentido, y siguiendo una definición amplia y general (Struckmeier & Margat, 1995), estas unidades fueron agrupadas de acuerdo a la ocurrencia de aguas subterráneas, productividad de acuíferos y flujos en distintos medios saturados (Figura 2-1).

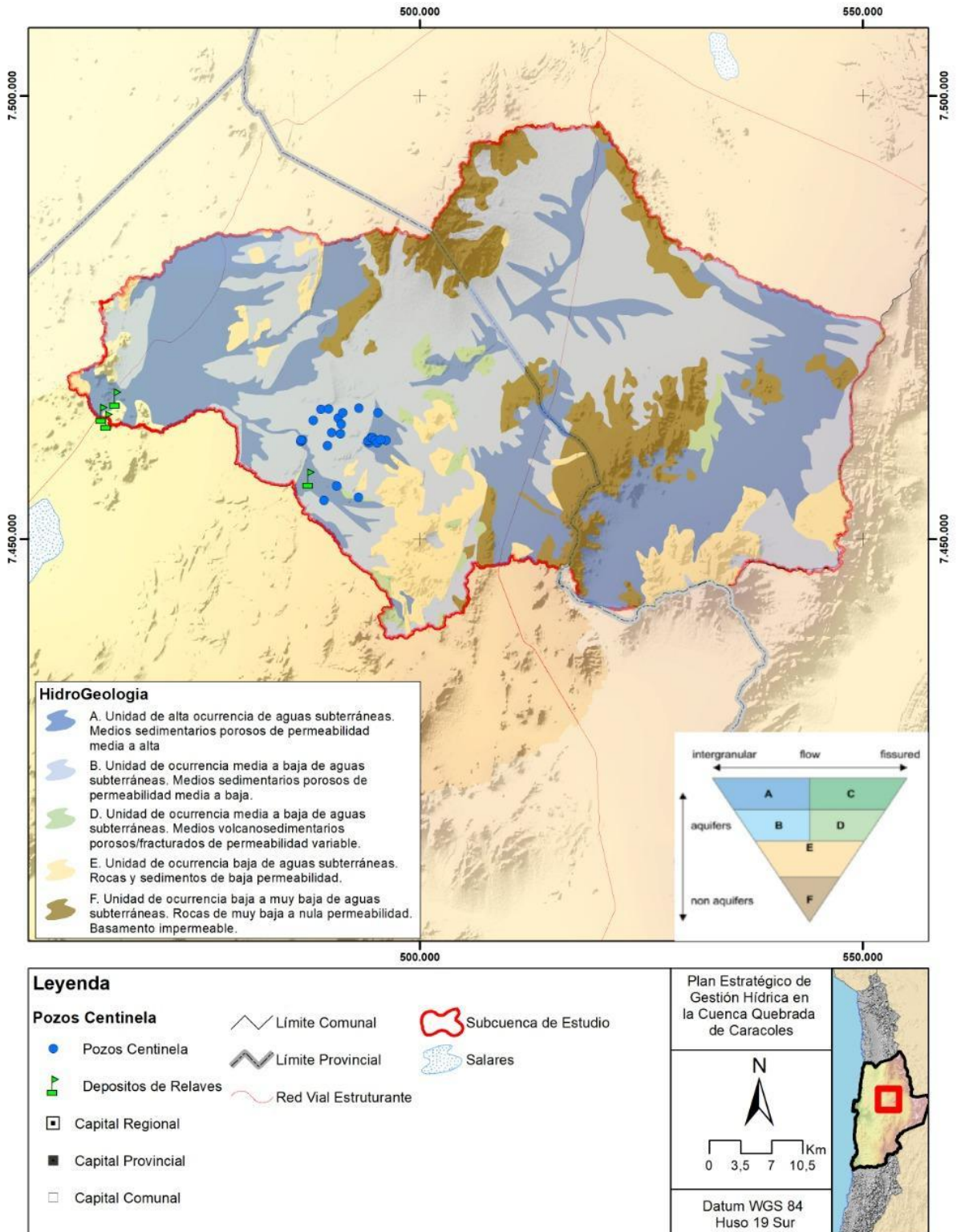
Estas unidades se definen de acuerdo a su capacidad de conformar acuíferos, ligado a la permeabilidad del medio, y a las características del mismo, es así como en el área de estudio se reconocen, en planta, las siguientes unidades hidrogeológicas:

- i. Unidad A. Acuíferos porosos en medios granulares, con permeabilidad media a alta. Esta unidad se reconoce en los centros de los valles y laderas de serranías de mayor relieve, estando conformada por depósitos sedimentarios no consolidados de carácter aluvio-coluvial, dispuestos sobre sedimentos aluviales antiguos semiconsolidados y rocas estratificadas volcánicas y sedimentarias.
- ii. Unidad B. Acuíferos porosos en medios granulares de permeabilidad media a baja. Esta unidad está conformada por gravas con intercalaciones de arenas, limos y tobas, pobremente consolidadas y compactadas, cuya distribución se reconoce en superficie formando terrazas y planicies, principalmente en el sector medio y bajo de la subcuenca.
- iii. Unidad D. Acuíferos fisurados en medios fracturados de productividad media a baja y extensión, en este caso, muy limitado en el territorio. Esta unidad está conformada por rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, meteorizadas y fracturadas que se reconocen como afloramientos puntuales y bien acotados, sin embargo, en profundidad, bajo los depósitos

sedimentarios semiconsolidados, puede tener mayor continuidad y desarrollo.

- iv. Unidad E. Acuitardos o acuíferos de muy baja productividad, reconocidos en los bordes de la subcuenca, conformados rocas intrusivas y sedimentarias con baja permeabilidad primaria, pero que en ciertos sectores pueden estar afectadas por fallas mayores que puede generar permeabilidad secundaria y servir de vías preferenciales para la conducción de flujos subterráneos.
- v. Unidad F. Acuifugos y basamento impermeable. Unidad basal de los acuíferos reconocidos en el área de estudio, conformadas por rocas intrusivas y volcánicas paleozoicas. Estas rocas presentan permeabilidades muy bajas a nulas, por consiguiente, no tienen la capacidad de almacenar o transmitir aguas subterráneas.





Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2-1. Mapa de unidades hidrogeológico del área de estudio.**

La subcuenca piloto de este PEGH tiene un desarrollo de la actividad minera en su territorio, destacando los proyectos Centinela, Spence y Sierra Gorda, el primero de ellos en la parte media de la Quebrada de los Arrieros y los restantes en la parte baja de la misma, Cada uno de estos proyectos ha realizado en su vecindad estudios y modelos hidrogeológicos que permiten obtener información de detalle y parcializada de las unidades hidrogeológicas reconocidas para este sector en subsuperficie (Arcadis, 2015; Arcadis, 2016 y SRK, 2021).

En estos proyectos se han excavados rayos y perforado una serie de sondajes mineros, pozos de monitoreo y pozos de bombeo y/o drenaje, en los cuales se ha reconocido la estratigrafía de las unidades que conforman el subsuelo y se han realizado ensayos de agotamiento, permeabilidad puntual y pruebas de bombeo, consolidando toda esta información a nivel de subcuenca, en el reconocimiento de tres unidades hidrogeológicas principales:

i. UH-1: Unidad de sedimentos coluvio-aluviales no consolidados.

Unidad superior conformadas por materiales clásticos no consolidados, principalmente gravas areno-limosas, con intercalaciones de niveles arcillosos y salinos, principalmente, en la parte baja de la subcuenca (sector Pampa Lina).

Esta unidad presenta potencias que pueden llegar a los 150 m, en los centros de los valles y sectores bajos de la cuenca, y presentan permeabilidades medias a bajas, dependiendo del contenido de sedimentos finos que presente la matriz.

ii. UH-2: Unidad de rocas fracturadas y/o meteorizadas, o sedimentos aluviales antiguos semiconsolidados.

Unidad intermedia, dispuesta bajo la unidad sedimentaria reciente no consolidada, y conformada por rocas meteorizadas o fracturadas, en el sector bajo de la subcuenca Quebrada de los Arrieros (Sierra Gorda y Pampa Lina; Arcadis, 2015 y 2016), y por depósitos sedimentarios neógenos semiconsolidados, en algunas partes tectonizados (SRK, 2021), reconocidos en el sector medio de la subcuenca, en el distrito Centinela.

Esta unidad presenta potencias variables entre 10 y 400 m, reconociendo los mayores espesores en el sector de Centinela, y presenta permeabilidades, en general bajas, las cuales pueden aumentar en sectores con fallas proclives a la conducción de aguas subterráneas.

iii. UH-3: Roca fresca

Esta unidad corresponde al basamento, considerado como impermeable, conformado por rocas intrusivas y volcánicas paleozoicas, así como también rocas volcánicas y sedimentarias mesozoicas que no presentan fracturamiento.

En la Tabla 2-1, se entrega un resumen con la información de estas unidades hidrogeológicas, recabada en los distintos estudios y modelos realizados en los proyectos mineros del sector.

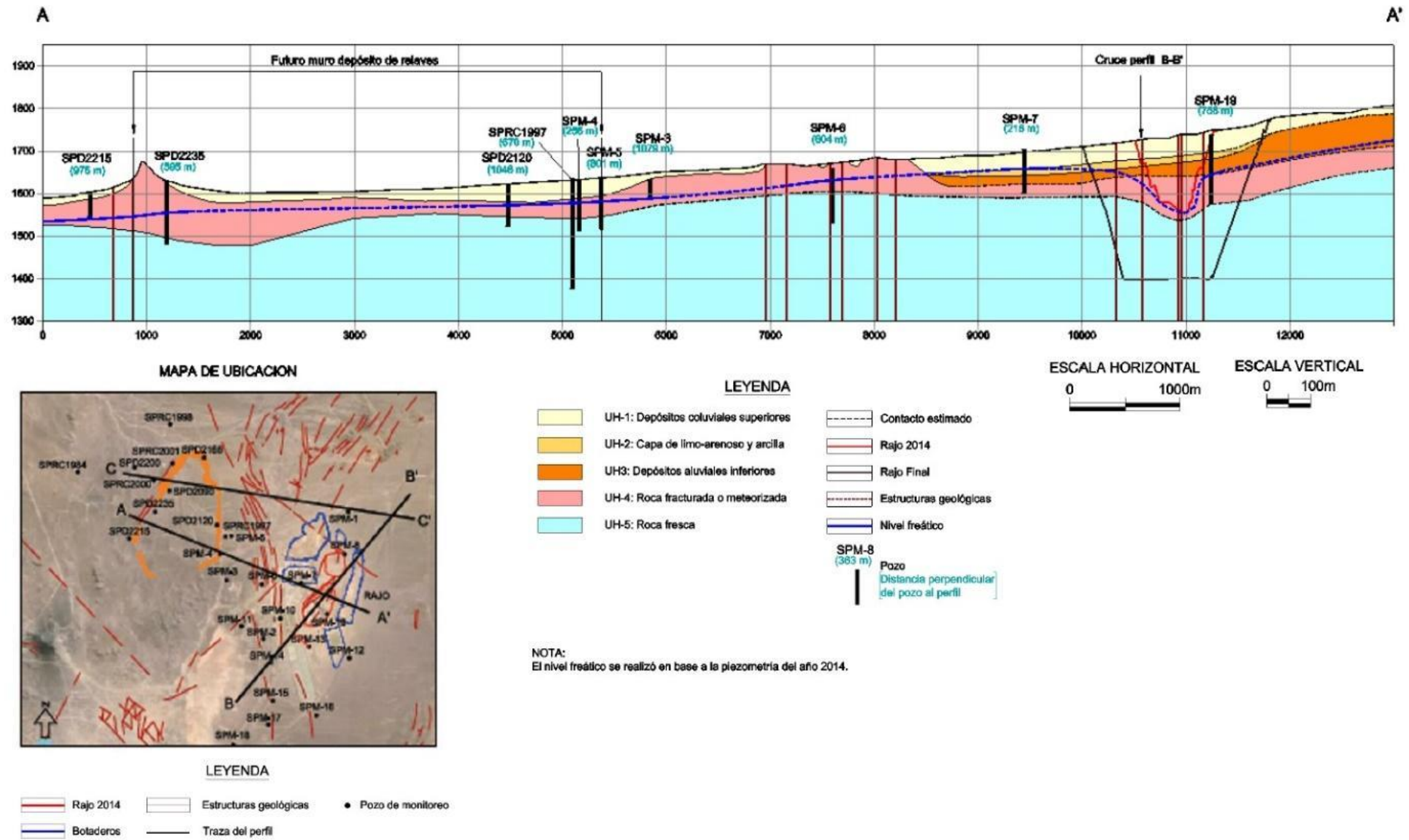
**Tabla 2-1. Unidades hidrogeológicas reconocidas en la subcuenca piloto.**

UNIDAD HIDROGEOLOGICA	SECTOR DE ESTUDIO	UNIDAD GEOLÓGICA	POTENCIA (m)	K min. (m/día)	K max. (m/día)	K medio (m/día)
UH-1	Distrito Centinela (SRK, 2021)	Depósitos sedimentarios no consolidados	10-80	1,40E-01	1,37E+00	3,45E-01
UH-2		Depósitos sedimentarios semi consolidados	10-400	1,06E-05	4,57E-02	1,95E-03
UH-3		Rocas	>700	1,00E-08	7,14E-02	2,42E-04
UH-1	Pampa Lina y Sierra Gorda (Arcadis, 2016)	Depósitos aluviales y coluviales	2-170	2,00E-01	4,80E+00	1,20E+00
UH-2		Roca fracturada	5-240	2,30E-05	4,50E-01	4,20E-02
UH-3		Roca fresca	445->700	8,60E-07	8,60E-05	5,00E-05
UH-1	Spence y Pampa Lina (Arcadis, 2015)	Depósitos coluviales	10-90	8,64E-04	2,59E-02	1,29E-02
UH-2		Limos arenosos y arcilla	18-40	1,00E-04	4,32E-03	2,21E-03
UH-3		Depósitos aluviales	34-80	8,62E-04	5,18E-01	2,59E-01
UH-4a		Rocas sedimentarias	10-60	4,32E-03	8,64E-02	4,53E-02
UH-4b		Rocas volcánicas y plutónicas	2-60	1,73E-05	3,46E-02	1,73E-02
UH-5		Roca fresca	>600	6,91E-05	8,64E-03	4,35E-03

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del proyecto Spence, se realizó para el sector estudiado, una mayor discriminación de unidades hidrogeológicas, sin embargo, las tres primeras pueden ser agrupadas en la unidad UH-1 de depósitos sedimentarios no consolidados y las unidades UH-4a y UH-4b como rocas fracturadas de distintas litologías.

La distribución de estas unidades se observa en la Figura 2-2, la cual representa, con un mayor grado de detalle, la distribución general de las unidades hidrogeológicas reconocidas en la cuenca y la intervención minera registrada en ellas.



Fuente: Arcadis, 2015.

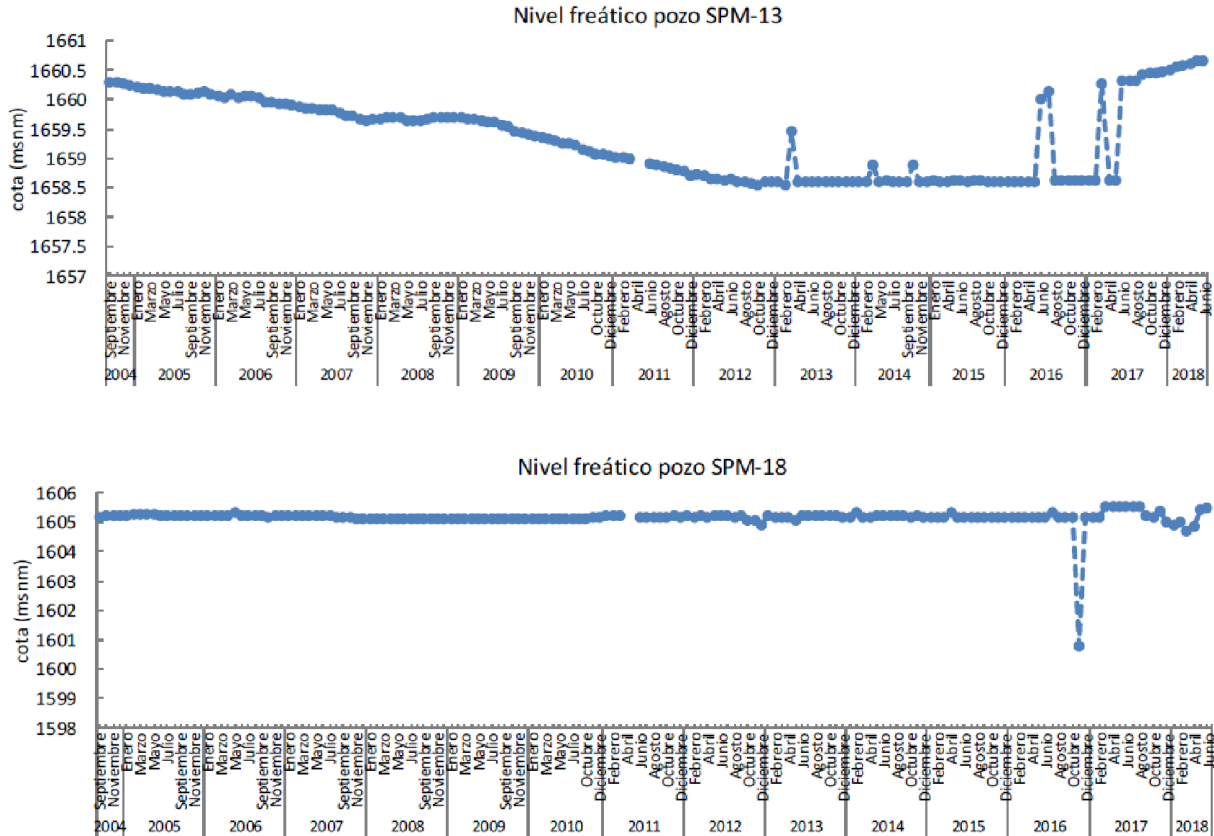
**Figura 2-2. Perfil con unidades hidrogeológicas en el sector bajo de la subcuenca Quebrada de los Arrieros.**

### **2.3 Niveles Estáticos y Piezometría**

El agua subterránea en la subcuenca piloto se emplaza en la base de la unidad de depósitos sedimentarios modernos no consolidados o saturando, parcialmente, la unidad de depósitos sedimentarios antiguos, semiconsolidados, y/o la cobertura de roca meteorizada o fracturada. Los niveles estáticos medidos en los pozos que mantiene los proyectos mineros en la zona como puntos de control del agua subterránea, varían entre profundidades de 10 a 180 m con respecto a la superficie del terreno, dependiendo de la cota del pozo y su ubicación dentro de la subcuenca, de este modo, en el sector bajo de la subcuenca, entre Sierra Gorda y Pampa Lina, sector monitoreado con pozos de los proyectos mineros Spence y Sierra Gorda, los niveles estáticos se encuentran entre 25 y 90 m de profundidad, con valores superiores en puntos de control ubicados, a mayor cota, en el borde occidental de la subcuenca. Por otro lado, en el distrito Centinela, estos niveles de agua se encuentran a profundidades entre 24 y 180 m, reconociendo los niveles de mayor profundidad aguas debajo de los rajos de explotación.

En la Figura 2-3, se puede ver, como ejemplo, la evolución de estos niveles estáticos en el sector de pampa Lina y Spence, en dos pozos que forman parte de la red de control de esta variable. En ellos se puede observar un comportamiento que es similar al registrado en el resto de la subcuenca, con niveles relativamente estables y constantes, en los sitios alejados de las obras y el territorio afectado por la actividad minera (pozo SPM-18), mientras que los puntos de control cercanos a obras de drenaje (rajos o pozos de extracción) o fuentes de infiltración (pilas de lixiviación o tranques de relave), puede sufrir variaciones que se manifiestan como descenso continuos y permanente en el tiempo (pozo SPM-13) como efecto de la profundización del rajo bajo el techo de la zona saturada del acuífero o ascensos producidos por la infiltración desde depósitos antrópicos saturados.

En general, lo que se puede observar de los planes de monitoreo de niveles llevados a cabo por estos proyectos mineros es que tantos los descensos como ascensos niveles producidos por las obras asociadas, no son de gran magnitud, lo que se explica por la baja permeabilidad de las unidades saturadas.



Fuente: BHP, 2018.

**Figura 2-3. Variación de niveles estáticos en el sector bajo de la subcuenca Quebrada de los Arrieros.**

En la Tabla 2-2, se entrega información de niveles y cotas piezómetros de los pozos medidos en la subcuenca, asociados a cada uno de los proyectos mineros del sector. Con las cotas de estos puntos de control es posible obtener las cotas piezométricas del agua subterránea, registrando valores entre 2000 y 2330 m.s.n.m. para el distrito Centinela, sector medio de la subcuenca, entre 1600 y 1750 m.s.n.m. para el sector de Spence y Pampa Lina, y entre 1450 y 1605 m.s.n.m. para el sector de Sierra Gorda-Pampa Lina, ubicada en el cierre de la subcuenca piloto.

Estos valores de carga hidráulica indican movimiento del agua subterránea en el centro de la subcuenca de dirección general EW y para la parte baja y cierre de la misma, una dirección general NE-SW.



**Tabla 2-2. Niveles estáticos pozos de monitoreo subcuenca Quebrada de los Arrieros.**

Pozo	Este_WGS84	Norte_WGS84	Nivel Estático (m.b.n.t.)	Cota Nivel (m.s.n.m.)	Proyecto
DP-1	489191	7454350	63,86	2197,88	Centinela
TP-1	490646	7455978	76,81	2199,83	
TP-2	493077	7454688	56,07	2324,59	
PM-1	486565	7461000	75,46	2010,54	
PM-2	486801	7461113	24,73	2057,27	
PM-3	486623	7461194	71,53	2006,47	
SE-2	490817	7463626	126,74	2057,76	
SE-51	487980	7463374	72,08	2053,92	
SE-8	488854	7464633	42,3	2054,20	
PMR-1	494272	7460885	67,45	2261,55	
PMR-2	494187	7461101	85,88	2240,62	
PMR-4	494708	7461417	72,63	2256,37	
PMR-5	494992	7461193	79,27	2257,73	
PMR-6	495214	7460852	67,73	2278,27	
5546	496217	7461124	79,91	2283,59	
5565	495617	7461224	76,50	2272,50	
Exp MET-33	495295	7464247	54,72	2235,28	
REC-1	491067	7461887	178,35	2063,65	
REC-4	490073	7461999	133,45	2052,55	
REC-5	491140	7462937	165,25	2052,75	
REC-9	491341	7464263	112,42	2072,58	
REC-10	493160	7464755	79,04	2151,96	
REC-11	489594	7460515	166,9	2014,10	
SPM-1	475799	7484148	83	1723,00	Spence
SPM-2	471465	7477808	9	1638,00	
SPM-4	469421	7482115	-	1750,00	
SPM-6	471376	7480516	36	1624,00	
SPM-8	475627	7482015	77	1709,00	
SPM-10	472319	7478811	26	1640,00	
SPM-11	470341	7478430	19	1617,00	

**Tabla 2-2. Niveles estáticos pozos de monitoreo subcuenca Quebrada de los Arrieros.**

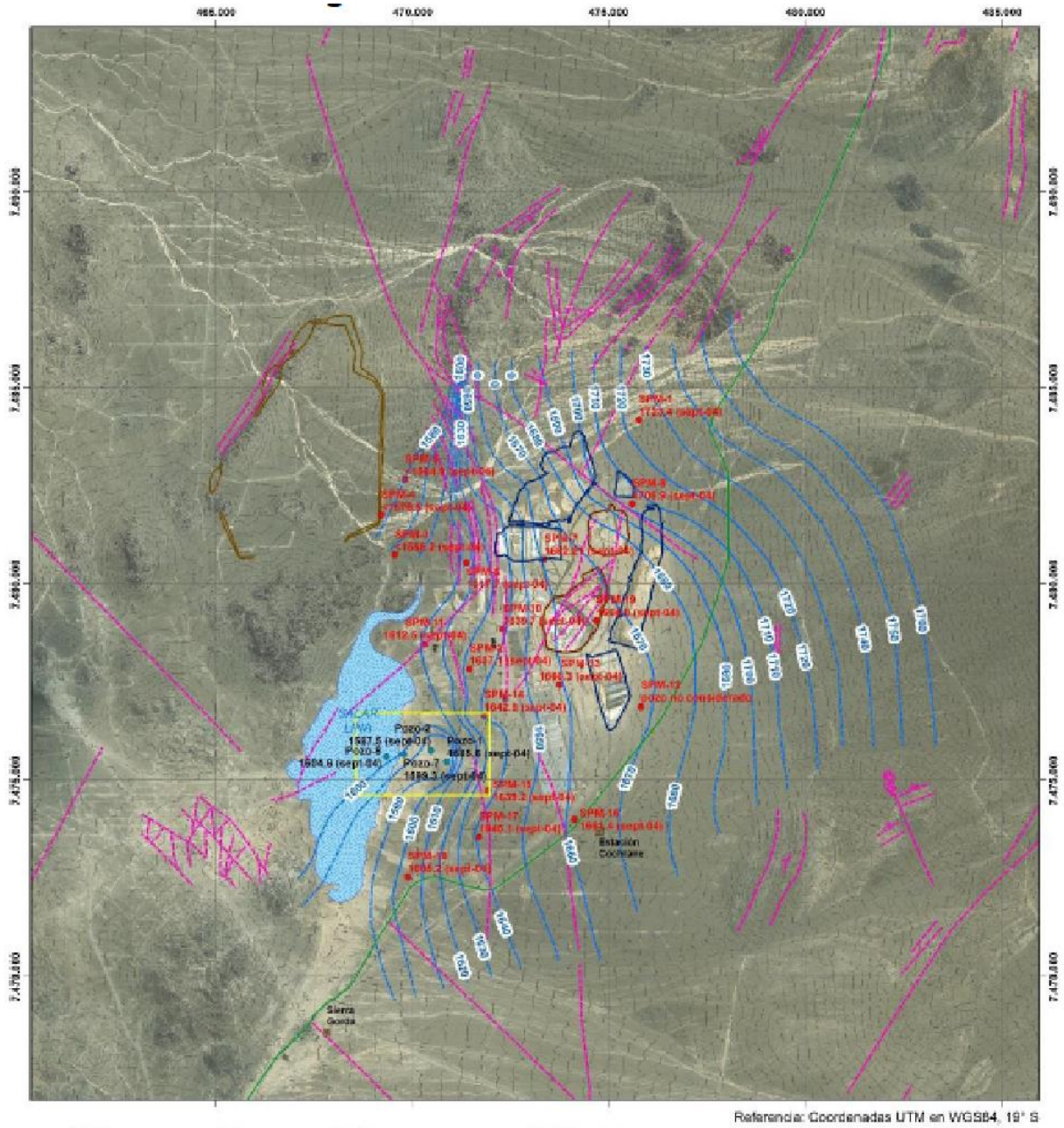
Pozo	Este_WGS84	Norte_WGS84	Nivel Estático (m.b.n.t.)	Cota Nivel (m.s.n.m.)	Proyecto
SPM-12	475849	7476842	111	1662,00	
SPM-13	473788	7477410	47	1657,00	
SPM-14	471834	7476626	11	1641,00	
SPM-15	471937	7474705	26	1639,00	
SPM-16	474166	7473988	56	1660,00	
SPM-17	471710	7473521	25	1643,00	
SPM-18	469909	7472513	37	1605,00	
GTW-17	474905	7479058	89	1648,00	
CB-2	469896	7476666	33,49	1596,17	Sierra Gorda
CB-3	468288	7474385	28,16	1600,71	
CB-4	466756	7473826	41,19	1604,54	
CB-5	461686	7475937	58,24	1599,17	
CB-6	462400	7473361	59,76	1600,88	
CB-9	462530	7468675	79,83	1599,71	
CB-10	466234	7471809	89,57	1601,24	
CON-16	456200	7471111	165,23	1453,36	
CON-21	457261	7467311	139,88	1464,37	
QSCSG6-237	467418	7470022	28,04	1596,44	
QSG08-431	465228	7474030	70,26	1601,07	
QSG08-493	466416	7473626	55,34	1604,15	
QSG09-580	462816	7477626	99,62	1585,95	
QSG09-585	462566	7476375	68,53	1598,67	
QSG09-587	468067	7471876	30,09	1601,35	
QSG09-597	466216	7474476	45,57	1604,55	
QSG09-608	468569	7472875	29,77	1601,85	
QSG10-696	461566	7474876	41,00	1599,56	
Casing Acero	468317	7475023	28,77	1599,29	
Loreto 3	467010	7474114	29,37	1604,27	
Loreto 4	468405	7475795	29,48	1598,62	
KSG14-1132S	466661	7472684	cuerda vibrante	1606,42	

**Tabla 2-2. Niveles estáticos pozos de monitoreo subcuenca Quebrada de los Arrieros.**

Pozo	Este_WGS84	Norte_WGS84	Nivel Estático (m.b.n.t.)	Cota Nivel (m.s.n.m.)	Proyecto
KSG14-1134A	466757	7474406	cuerda vibrante	1602,24	
QSG10-656A	466170	7472986	cuerda vibrante	1600,90	
KP-DH10-33	462239	7473667	54,85	1599,37	
QSG09-601	462316	7473526	59,51	1597,57	
QSG07-352	463296	7473726	67,97	1599,18	
QSG08-405	465417	7473827	70,39	1601,53	
QSG08-436	464416	7474626	60,93	1599,80	
QSG08-455	464216	7473826	78,05	1599,65	
QSG09-592	468568	7473373	25,67	1604,55	
QSG10-686	461816	7474376	45,84	1599,55	
QSG10-774	461709	7474124	45,65	1599,33	
RDH-03	462055	7472372	67,03	1598,66	

Fuente: elaboración propia con datos de Arcadis, 2015; Arcadis, 2016 y SRK, 2021.

Con respecto a la piezometría y movimiento de las aguas subterráneas en este sector, se puede observar que en el sector de bajo y terminal de la subcuenca (Figura 2-4), el flujo tiene una dirección general NE-SW con una gradiente promedio, y relativamente uniforme, de 0,01, con pequeñas variaciones producidas por las obras mineras del proyecto Spence, registran aumento en la vecindad del rajo y disminución bajo las pilas. Observando, además, una distorsión local, expresada como una depresión de la superficie piezométrica, en el sector de campo de pozos de bombeo, situado en el borde oriental del Salar Lina.



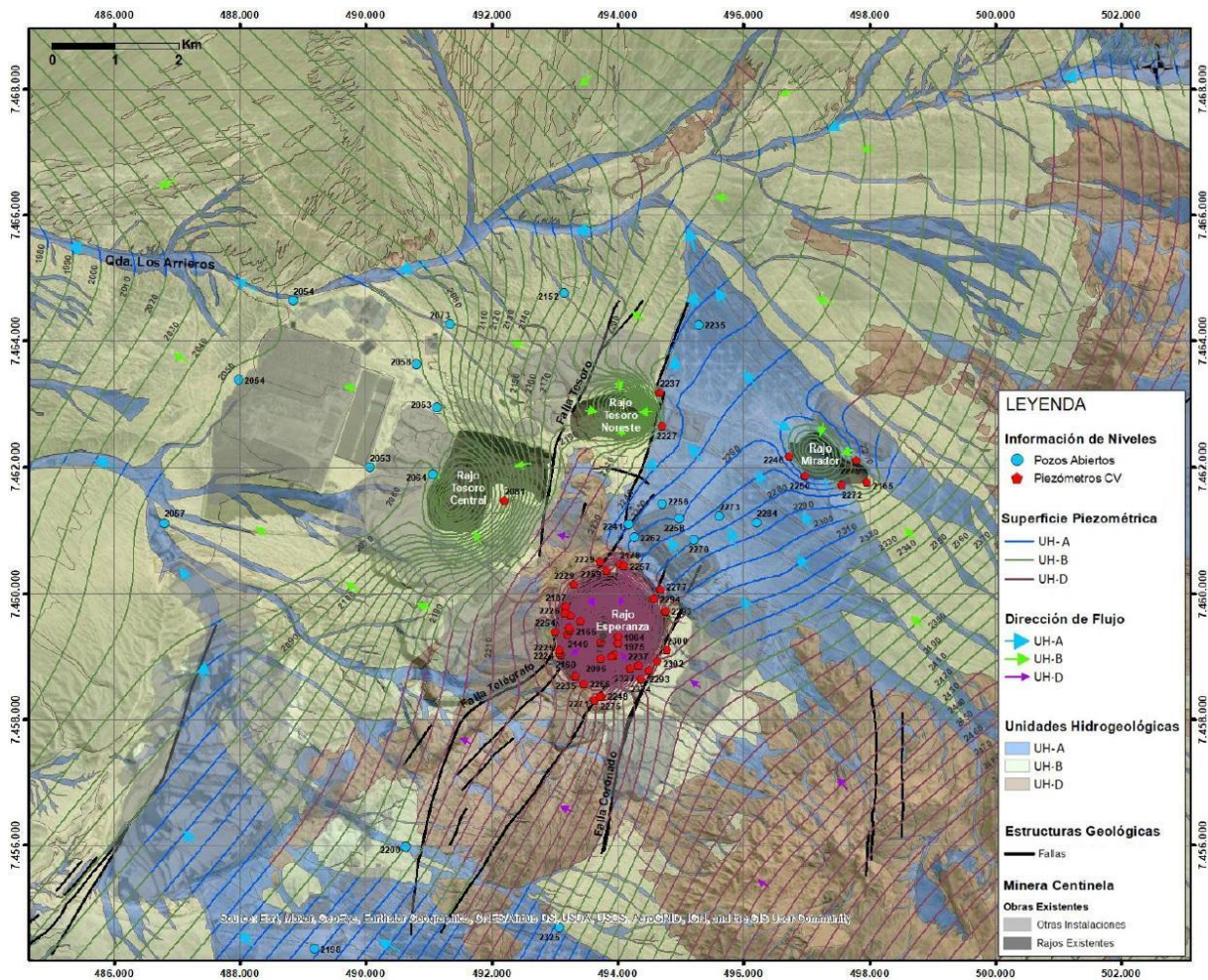
Fuente: Arcadis, 2015.

**Figura 2-4. Piezometría y flujo de agua subterránea en el sector Pampa Lina y Sierra Gorda.**

En el sector del distrito Centinela, la piezometría del agua subterránea presenta los mismos efectos de las obras mineras, registradas en el sector bajo de la subcuenca, con un aumento de gradiente, generado por el drenaje de los distintos rajos con mayor desarrollo aguas arriba del flujo y una disminución de la gradiente bajo los sectores donde se emplazan sedimentos saturados.



Además, en este sector, al contrario de lo observado en la parte baja de la subcuenca, es posible ver dos dominios con distintos gradientes hidráulicos, el dominio noroccidental con un valor promedio de 0,02, representando un flujo subterráneo en materiales de mayor permeabilidad relativa (depósitos sedimentarios) y un dominio suroriental con un valor promedio de 0,04 representando un flujo subterráneo en unidades de roca (ver Figura 2-5).



Fuente: SRK, 2021.

**Figura 2-5. Piezometría y flujo del agua subterránea en el sector Distrito Centinela.**

## 2.4 Sectores Hidrogeológicos

El sector hidrogeológico de aprovechamiento donde se emplaza el sector piloto o subcuenca de estudio, para este modelo hidrogeológico conceptual, corresponde al

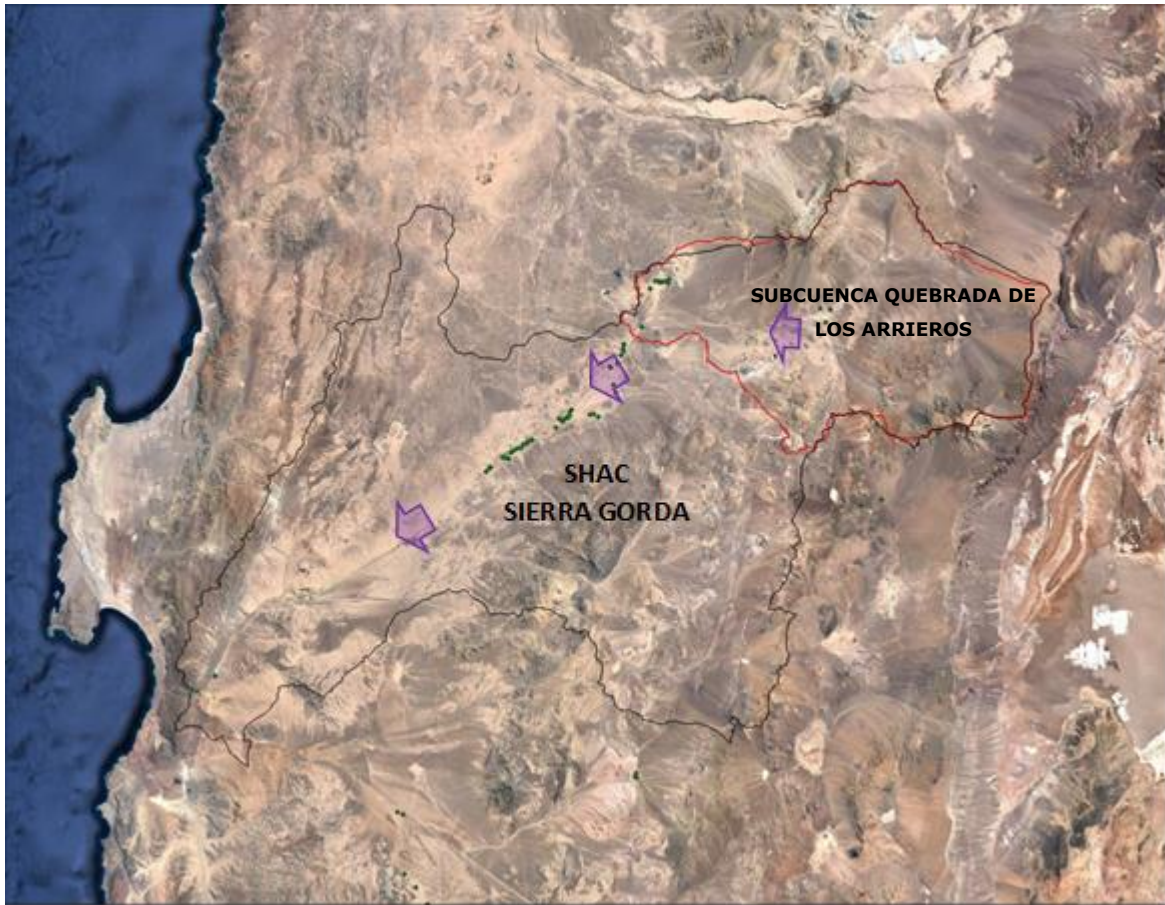
denominado Sierra Gorda declarado como Área de Restricción mediante Resolución DGA N° 759 de 21 de diciembre de 2001 (ver Figura 2-6).

La subcuenca de estudio, denominada Quebrada de los Arrieros, se emplaza en la parte alta o cabecera de este sector hidrogeológico, el cual, de acuerdo a los antecedentes estudiados, corresponde a la principal fuente de recarga de este acuífero, ya que capta las aguas generadas en la zona alta donde las precipitaciones son más significativas (superiores a 10 mm).

El flujo subterráneo en este sector se emplaza en sedimentos aluviales con distinto grado de consolidación, así como en rocas fracturadas, que en general corresponde a materiales de media a baja permeabilidad.

La dirección de este flujo, en la parte alta de la cuenca, tiene un sentido, general, EW, para luego cambiar a NE-SW en el sector terminal de la Quebrada de los Arrieros, escurriendo con este sentido por toda la Quebrada Saco, hasta descargar en el sector del Salar del Carmen.

Este sector acuífero tiene un uso del recurso hídrico, principalmente, minero, emplazándose sobre él, los proyectos Tesoro, Esperanza, Óxidos Encuentro, Spence, Sierra Gorda y Mantos Blancos, con una demanda total en derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas (para todos los usos) de 238 l/s (DGA, 2012), estimando una recarga u oferta para todo el SHAC de 125 l/s (DGA, 2012), generándose la totalidad de este recurso en la subcuenca de Quebrada de los Arrieros.



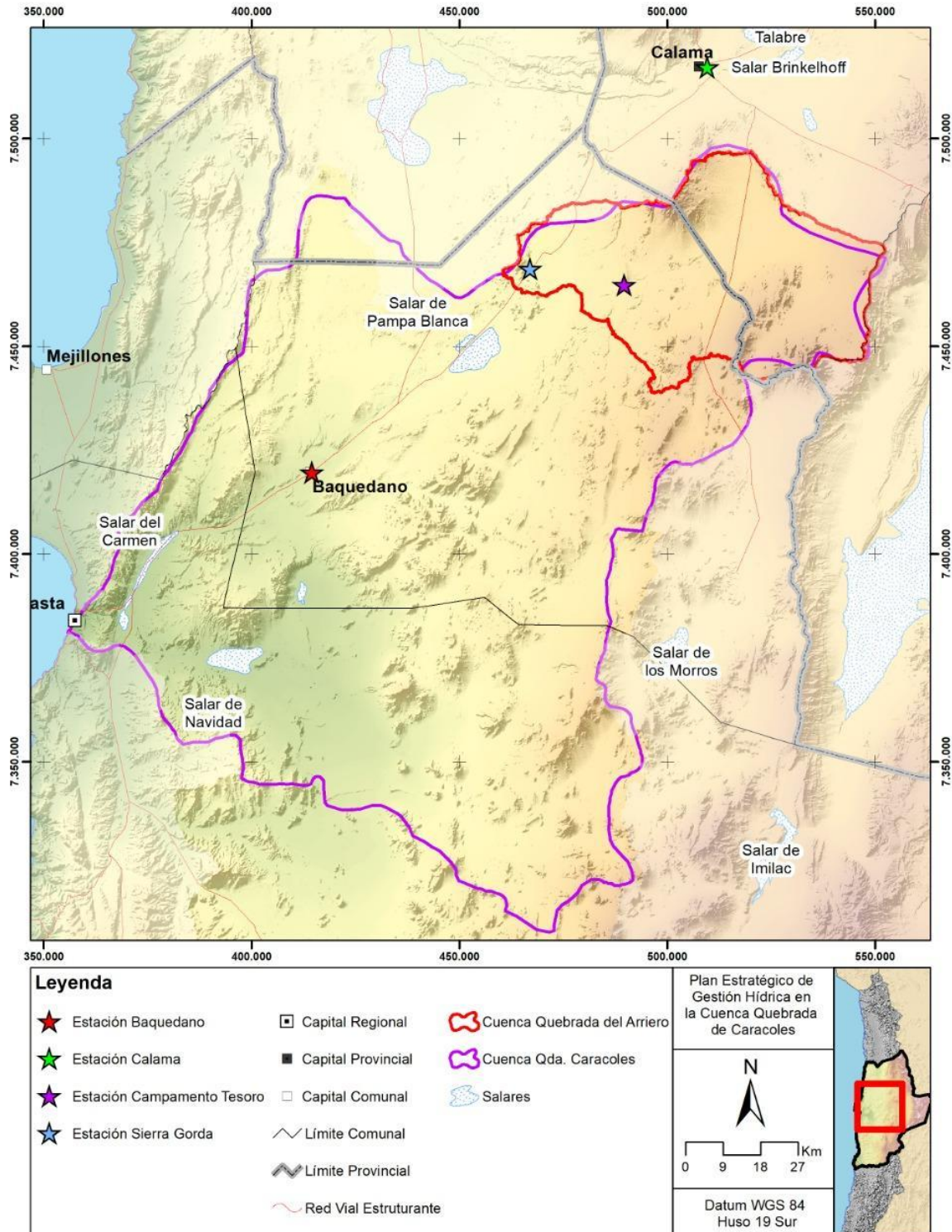
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2-6. Mapa de ubicación de SHAC Sierra Gorda y subcuenca piloto Quebrada de los Arrieros.**

## **2.5 Modelo Cuenca Arreica Hiperárida y Estimación de Recarga**

La subcuenca de estudio, seleccionada como sector piloto para desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual, corresponde a la subcuenca Quebrada de los Arrieros, la cual abarca una superficie, aproximada, de 2845 km<sup>2</sup>, que corresponde a un 15% de la cuenca Quebrada Caracoles (Figura 2-7).





Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2-7. Ubicación de la cuenca de estudio, subcuenca piloto y estaciones meteorológicas.**



En esta zona, el uso del agua es principalmente minero y las fuentes de abastecimiento corresponde a una limitada cantidad de captaciones de aguas subterráneas y con distintas condiciones de operatividad, las cuales se encuentran ubicadas en la quebrada de los Arrieros, aguas arriba de la mina El Tesoro, en el sector denominado Aguada de Las Banderas, y en los alrededores de la localidad de Sierra Gorda y Pampa Lina.

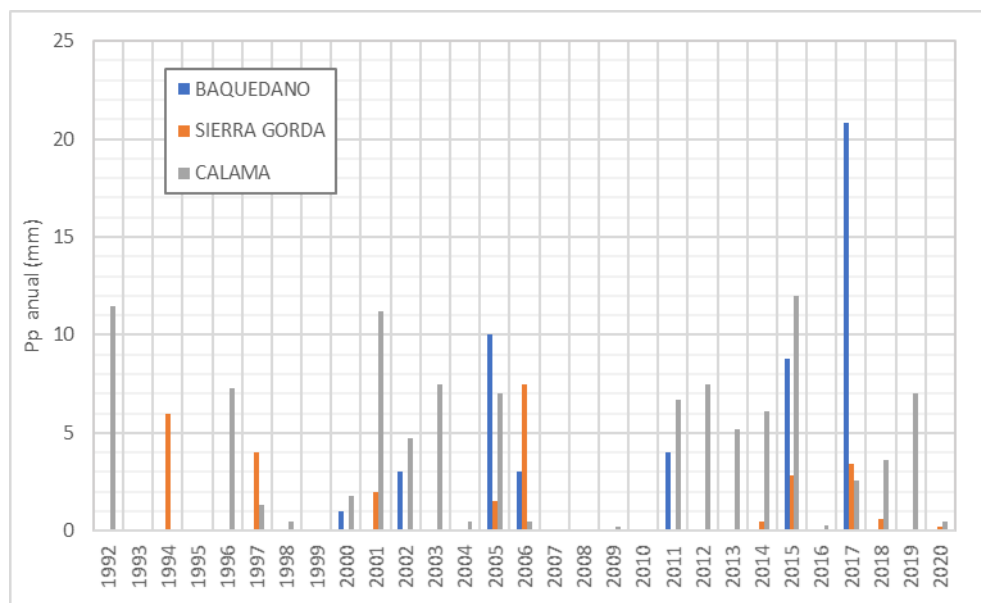
Esta subcuenca presenta un clima desértico de hiper-aridez, con escasas precipitaciones, las que ocurren, esporádicamente, durante los meses de invierno, y con mayor frecuencia, en las cabeceras de la cuenca, en los meses de verano, como consecuencia de la extensión del invierno altiplánico hacia zonas más bajas.

Pese a que las lluvias son de baja magnitud a nivel anual, es posible que puedan ocurrir ocasionalmente lluvias torrenciales que den origen a escurrimientos de agua superficial esporádicos, ya que escurrimiento de agua superficial permanente no se observa en esta subcuenca, ni en la cuenca Quebrada Caracoles.

El registro de precipitaciones de mayor data en la zona está a cargo de las estaciones de la DGA: Baquedano (1032 m.s.n.m.), Sierra Gorda (1616 m.s.n.m.) y Calama (2300 m.s.n.m.), con precipitaciones medias anuales, para el período 1992-2020, de 2,02 mm, 1,06 mm y 3,64 mm, respectivamente.

Estas precipitaciones para el período 1992-2020, como se puede ver en la Figura 2-8, sobrepasan los 10 mm/año en tan sólo 4 años y en casi la mitad de los años de la estadística, la precipitación anual no sobrepasa los 5 mm. La estación Calama, que corresponde a la ubicada a mayor altura geográfica, es la que presenta la mayor cantidad de años con precipitaciones mayores a 10 mm/año (3 eventos), fenómeno que tiene una recurrencia entre 9 y 15 años. La otra estación que alcanza un valor de precipitación mayor a 10 mm/año, corresponde a la estación Baquedano, registrada sólo en el mes de junio del año 2017 con 20,8 mm.

Como se puede ver en la Figura 2-8, la estación Sierra Gorda, ubicada en el cierre y sector más bajo de la subcuenca piloto, no registra precipitaciones anuales mayores a 7,5 mm y para el período de registro de esta, presenta precipitaciones nulas o menores a 1 mm/año que pueden extenderse por ciclos de 3 a 7 años.



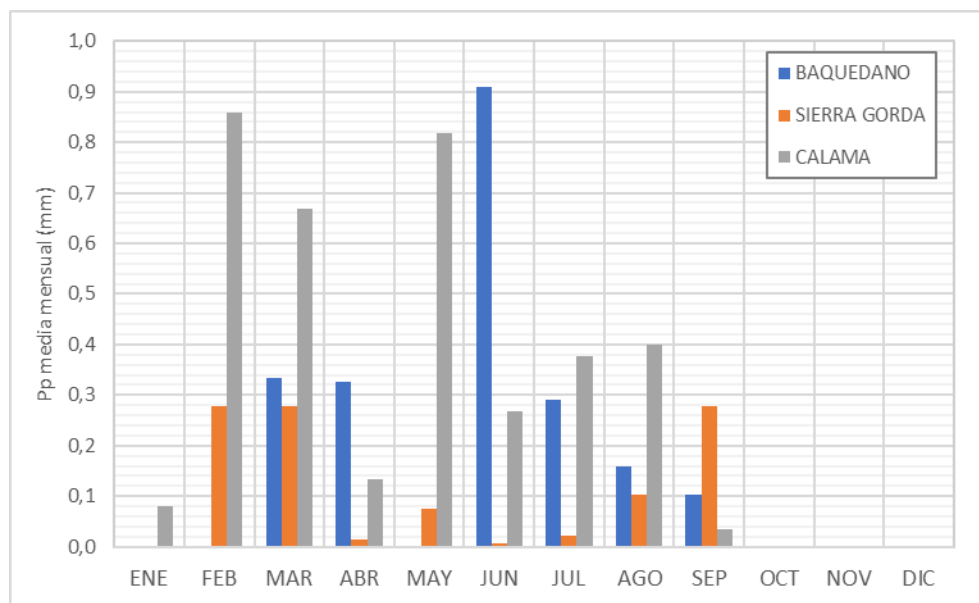
Fuente: Elaboración propia con datos DGA.

**Figura 2-8. Distribución de la precipitación anual de las estaciones de la zona de estudio, período 1992-2020.**

Con respecto a la distribución estacional de las precipitaciones en la zona, estas obedecen a frentes húmedos que provienen del pacífico e ingresan en el continente en los meses de mayo y agosto, mientras que otras masas de aire húmedo, provenientes del Amazonas ingresan, desde el oriente, por la cordillera de los Andes durante los meses de enero a marzo.

Estos frentes se ven reflejados en la distribución mensual de las precipitaciones (Figura 2-9), donde se puede observar que las estaciones ubicadas a mayor altura, en particular la estación Calama, presentan un efecto del invierno altiplánico, que en menor medida se extiende también a la estación Sierra Gorda.

Dentro de la subcuenca piloto, y en el centro de ella, se dispone de información meteorológica de menor data, asociada a instrumental instalado en la mina El Tesoro, estación denominada Campamento, ubicada a una cota de 2125 m.s.n.m., la cual tiene un registro de precipitación y evaporación, entre otras variables climatológicas, desde el año 2011.



Fuente: Elaboración propia con datos DGA.

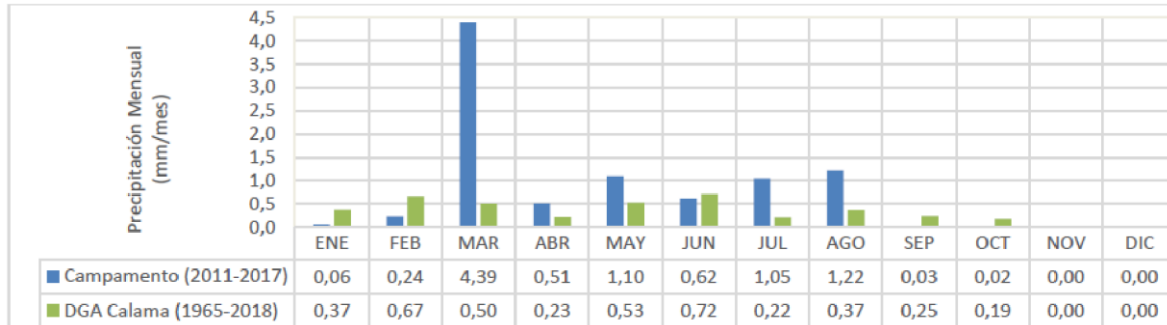
**Figura 2-9. Distribución de la precipitación media mensual de las estaciones de la zona de estudio, período 1992-2020.**

La información de la estación Campamento, disponible en los estudios ambientales ingresados al SEA por Minera Centinela (SRK, 2021), contiene una estadística para el período 2011-2017, que llevada a precipitaciones promedios mensuales y comparada con la extensa estadística (53 años) de la estación Calama (Figura 2-10), permite constatar que los promedios mensuales, para esta última estación, presentan valores menores a 0,72 mm/mes, con una distribución estacional que marca cimas en los meses de febrero y junio, mientras que, la estación Campamento, con 7 años de estadística, registra para el mes marzo un promedio mensual de precipitación de 4,39 mm y para los meses de mayo, julio y agosto precipitaciones con valores superiores a 1 mm/mes.

Por otra parte, al comparar la precipitación anual, resultante de la sumatoria de las medias mensuales, se tiene para la estación Calama una precipitación de 4,05 mm/año y para la estación Campamento una precipitación de 9,24 mm/año lo cual refleja un menor valor de la precipitación al analizar registros de mayor duración, corroborando régimen extremadamente seco de la zona, y da cuenta del efecto puntual que pueden producir períodos reducidos de registro, entregando como resultado una distribución estacional distinta o representar a ciclos de mayor o menor humedad.

En esta comparación, la estación Campamento presenta un valor de precipitación anual más del doble de la estación Calama y valores mensuales entre marzo y agosto que sobrepasan largamente los registrados en esta misma estación; lo anterior, da cuenta que

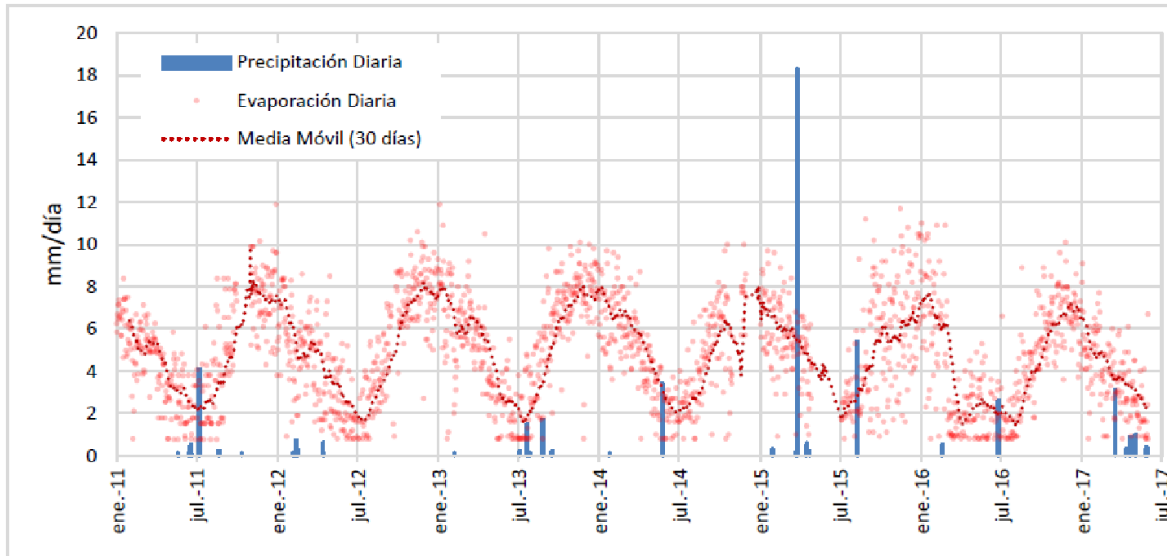
los 7 años de registro en la estación Campamento, representan un período de mayor precipitación en la zona, condicionado, aún más, por el evento de precipitaciones extremas de marzo de 2015 (27,6 mm en 2 días), lo que da cuenta también, de la variabilidad espacial de estas lluvias, que como se puede ver en el registro anual de las estaciones DGA, también se registra esta anomalía de las precipitaciones para marzo 2015 (Calama: 11,8 mm, Baquedano: 8 mm) , pero no con la intensidad registrada en la estación Campamento.



Fuente: SRK, 2021.

**Figura 2-10. Comparación de la distribución de la precipitación media mensual entre las estaciones de Calama y Campamento para distintos períodos.**

En cuanto a la evaporación registrada en evaporímetro (tanque tipo A) en la estación Campamento ésta presenta un promedio anual de 1674,6 mm/año, presentando un comportamiento diario estacional y oscilatorio, directamente relacionado con las variaciones de la temperatura en la cuenca a lo largo de año, con valores máximos promedio de 7,2 mm/día en los meses de noviembre y diciembre, y valores mínimos promedio de 1,6 mm/día en el mes de junio (SRK, 2021) (ver Figura 2-11).



Fuente: Elaboración propia con datos DGA.

**Figura 2-11 . Distribución de la precipitación media mensual de las estaciones de la zona de estudio, período 1992-2020.**

Este régimen de lluvias esporádicas, y en períodos cortos de tiempo, en los cuales el balance de precipitación- evaporación es positivo, se producen las condiciones propicias para generar recargas hacia sistema hídrico subterráneo, con un modelo de pulsos de recarga con una gran variabilidad espacial y temporal.

Esta recarga, contribuye al almacenamiento de agua embalsada en el acuífero, constituido, principalmente, por rocas fracturadas y unidades sedimentarias del Holoceno al Mioceno, con distintos grados de consolidación y asociadas principalmente a depósitos aluviales y coluviales, con algunos niveles de ceniza o depósitos salinos.

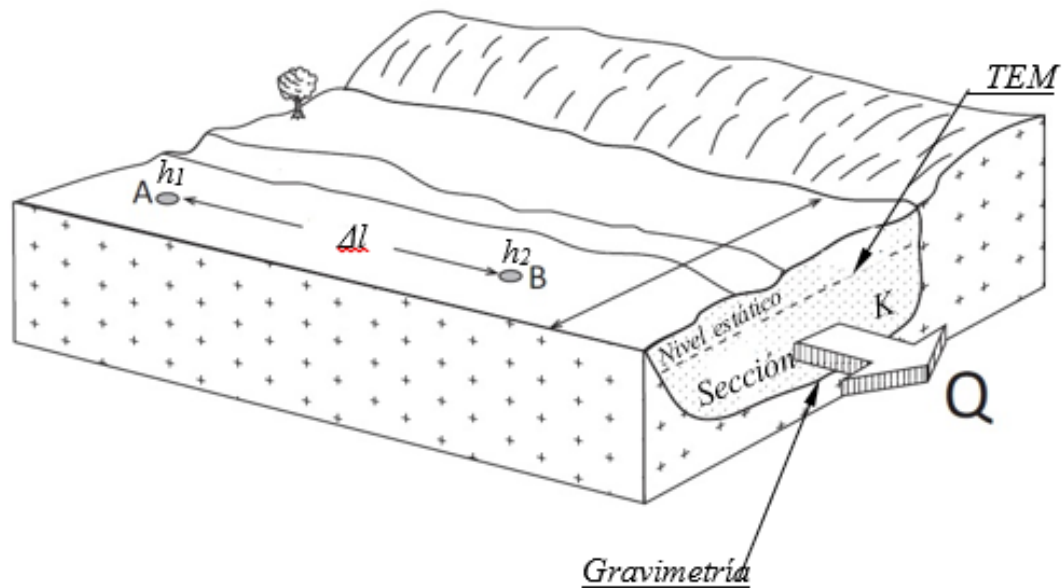
En general, en estos depósitos se reconocen acuíferos libres, que eventualmente, en niveles profundos, podrían tener confinamiento por capas de materiales volcánico o sedimentario fino. Observando también, una disminución de la permeabilidad en profundidad por efecto de un mayor grado de consolidación de los sedimentos.

Estos depósitos presentan espesores variables, dependiendo de la deformación por estructuras (grabenes), pudiendo presentar espesores de más de 400 m en algunos sectores, como se puede en las excavaciones profundas de los rajos Tesoro Central y Tesoro Noreste (SRK, 2021).

Estas unidades rellenan la cuenca y se disponen sobre rocas estratificadas y cuerpos intrusivos, que podrían conducir y almacenar agua subterránea en la cobertura

meteorizada y/o fracturada en el contacto con los depósitos aluviales que rellenan la cuenca, así como también, en zonas de falla de características extensivas, con flujos acotados y en vías preferenciales.

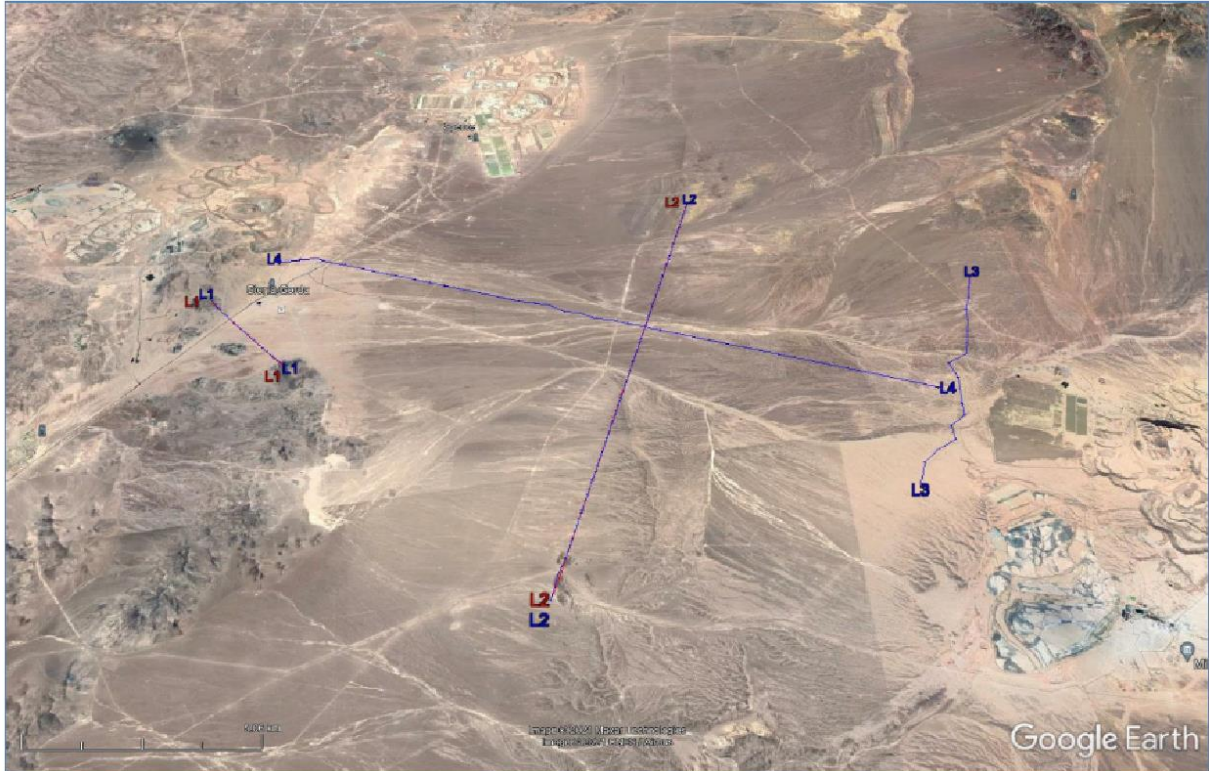
Para reconocer de mejor forma la geometría acuífera y complementar los estudios realizados en esta subcuenca, como parte de este PEGH, se trazaron perfiles geofísicos TEM y gravimétricos, situados en el parte media-baja de la subcuenca, que tienen como objetivo reconocer el techo de la zona saturada y la forma del fondo del valle, permitiendo con esto, establecer secciones acuíferas que permitirán calcular, con los demás datos hidrogeológicos, el caudal subterráneo pasante y relacionar esta información con las estimación de recarga en el balance hídrico de esta subcuenca (ver Figura 2-12).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2-12 . Modelo de sección acuífera y caudal subterráneo pasante.**

Los perfiles geofísicos realizados como parte de este PEGH se presentan en la Figura 2-13 y corresponden a 100 estaciones TEM, con separación nominal de 500 m, distribuidas en las 4 líneas y 100 estaciones gravimétricas, distribuidas en 2 líneas equivalentes a las líneas L1 y L2 TEM, con distancia nominal de 200 m entre estaciones.

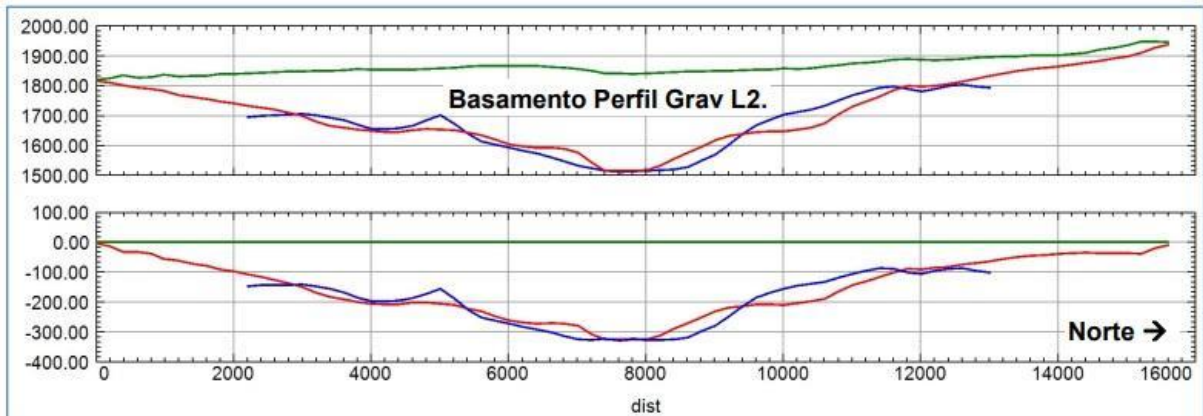
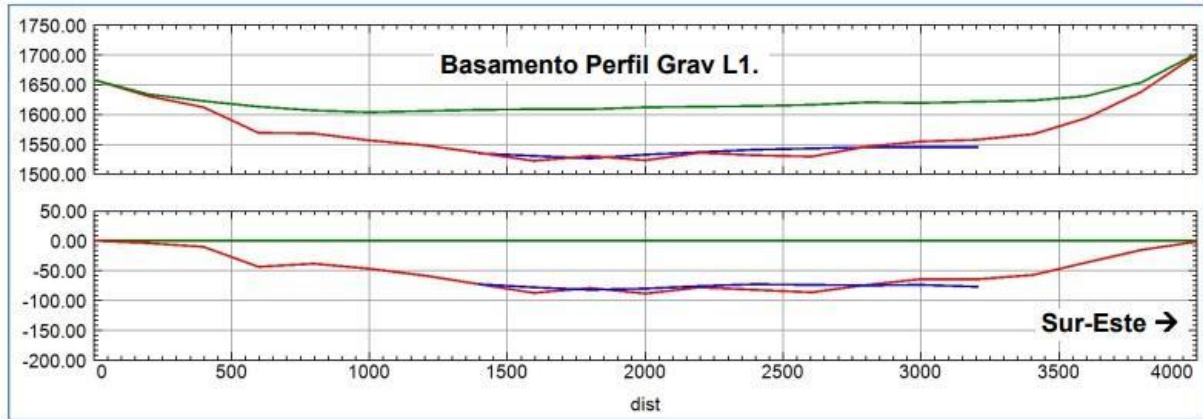


Fuente: Geodatos, 2021.

### **Figura 2-13 . Ubicación de perfiles TEM y Gravimetría.**

Los resultados de esta exploración geofísica permitieron reconocer con ambas metodologías, en forma consistente, la morfología del basamento impermeable, el cual presentan en ambas secciones (L1 y L2), una morfología de valle clásica con un depocentro simétrico y profundidad de 80 m en el perfil L1, sector Sierra Gorda, y 320 m en el perfil L2 (Figura 2-14), en llanura aluvial entre Sierra Gorda y Centinela.





**Arriba: Elevación Terreno (—), Basamento Grav (—) y Basamento TEM (—).**  
**Abajo: Profundidad Basamento Grav (—) y Basamento TEM (—).**

Fuente: Geodatos, 2021.

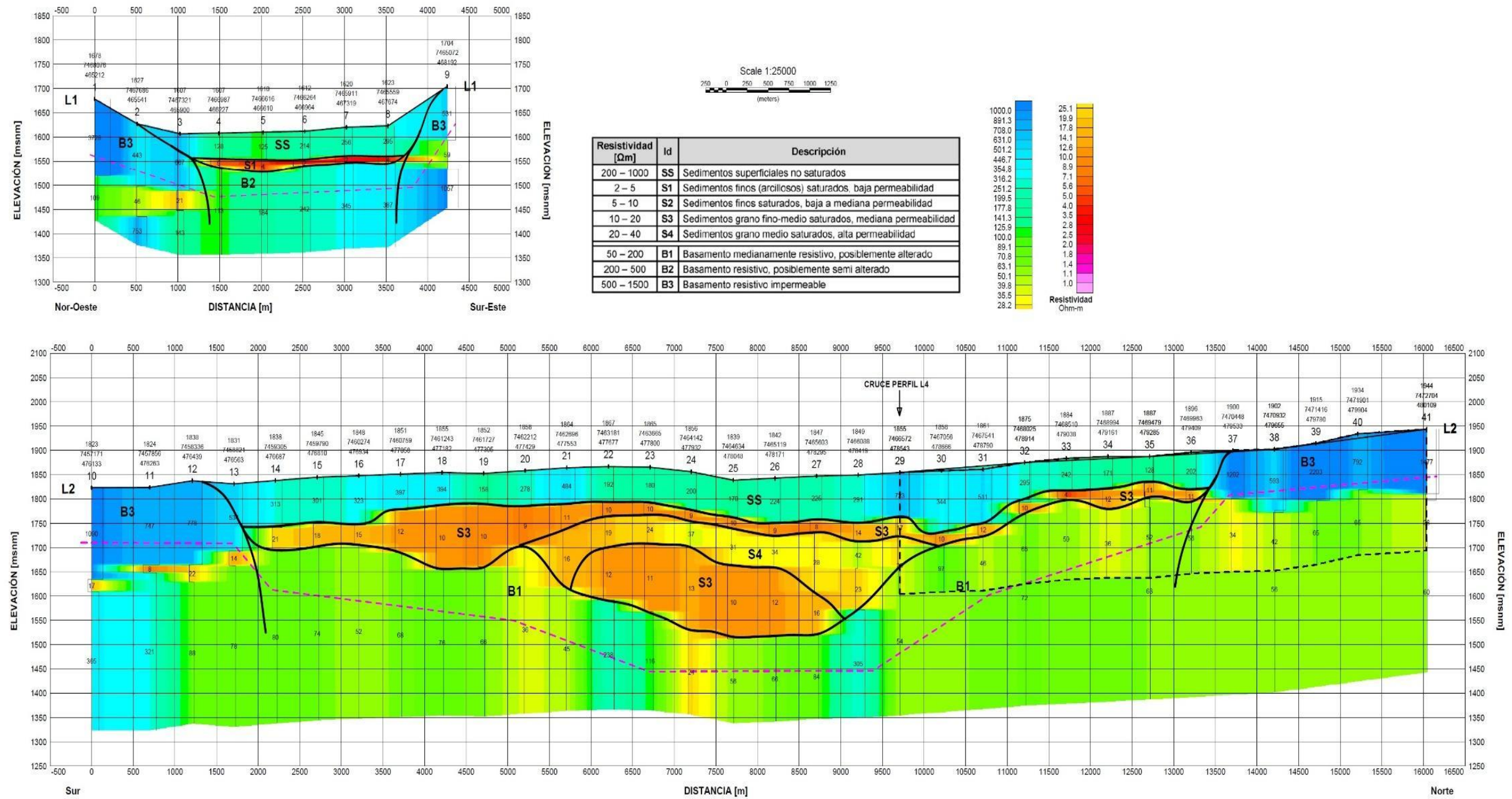
**Figura 2-14 . Modelo gravimétrico y TEM del techo del basamento de la cuenca.**

Por otra parte, los perfiles TEM, entregaron un modelo de resistividades del subsuelo, que marca con gran contraste, debido a la alta salinidad de las aguas subterráneas, el techo de la zona saturada, reconociéndola a 60 m de profundidad, aproximadamente, en el perfil L1 y entre 50 y 100 m de profundidad en el perfil L2.

Además, la metodología TEM permitió reconocer e interpretar unidades saturadas con distintos grados de permeabilidad.

Las secciones interpretadas de estos perfiles, utilizados para la determinación de la geometría acuífera y el cálculo de caudal subterráneo pasante, se muestran en la Figura 2-15.





Fuente: Geodatos, 2021.

Figura 2-15. Perfiles TEM L1 y L2 interpretados.

Con estos antecedentes, aplicando la ley de Darcy, se tiene que el caudal subterráneo pasante en las secciones estudiadas, mediante la formula:

$$Q = k * i * A$$

Donde:

- Q: Caudal subterráneo
- k: permeabilidad del medio (promedio de las unidades hidrogeológicas UH-1 y UH-2)
- i: gradiente hidráulico
- A: área de la sección saturada.

Los valores obtenidos con esta metodología se entregan en la Tabla 2-3.

**Tabla 2-3. Cálculo de caudal subterráneo pasante en secciones de la subcuenca piloto.**

Sección Acuifera	Sector de control	Área saturada (m <sup>2</sup> )	Gradiente hidráulico	k min (m/día)	k max (m/día)	k media (m/día)	Qsubt. min (l/s)	Qsubt. Max (l/s)	Qsubt.medio (l/s)
L1	Sección de cierre (Sierra Gorda)	41.877,41	0,01	0,14	1,37	0,35	0,7	6,6	1,7
L2	Sección de traspaso (Centinela-Pampa Lina)	1.307.677,44	0,02	0,07	0,71	0,17	21,2	214,3	52,4

Fuente: Elaboración propia.

### **3 INTERACCIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA**

#### **3.1 Conceptualización de Interacción Superficial-Subterránea**

##### **3.1.1 Caracterización de la Partición Precipitación-Recarga**

La recarga del acuífero estudiado, en la subcuenca piloto, se produce por infiltración de la precipitación, caída en forma líquida, con eventos de lluvias esporádicas y de corta duración, caracterizados por una gran variabilidad espacial y temporal (ver Figura 3-1).

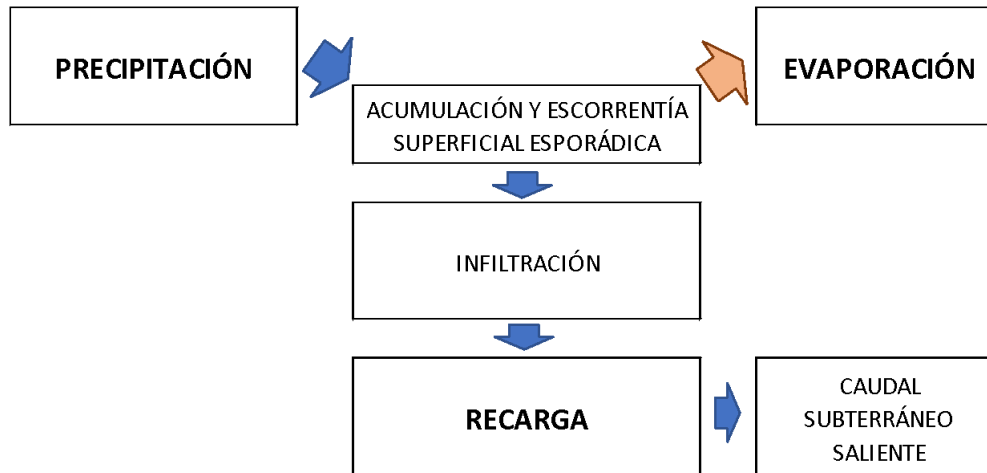
La recarga es el parámetro hidrogeológico que presenta mayor grado de incertidumbre asociado a su estimación. Incluso en áreas donde hay muchos años de datos de monitoreo meteorológico e hidrogeológico, es común que exista una amplia gama de estimaciones de recarga, y en este caso, existen escasos puntos con datos de precipitación observados y con una estadística corta de estaciones pertenecientes a la mineras situadas en el territorio, lo que se suma y otras variables meteorológicas de corta data y baja representación espacial, por lo tanto, las estimaciones de recarga realizadas se basan en la extrapolación de datos meteorológicos distantes, lo que les otorga un alto grado de incertidumbre.

El área de estudio se encuentra ubicada en una zona climática afectada por dos regímenes de precipitación diferentes que ocurren en verano e invierno. Las precipitaciones de verano provienen de la cuenca del Amazonas ("invierno altiplánico") y afectan a la cordillera de los Andes del Norte hasta aproximadamente la latitud de Copiapó, su influencia aumenta en intensidad hacia el norte y el este. La precipitación invernal, en esta subcuenca, proviene de sistemas frontales que avanzan hacia el continente desde el Océano Pacífico y disminuyen en intensidad hacia el norte, quedando gran parte de estos frentes húmedos sólo en la zona costera.

La recarga directa por precipitaciones no se produce en gran parte de la subcuenca, en particular bajo los 2000 m.s.n.m. (DGA, 2005) donde el agua caída presenta un promedio anual de 1 mm/año (estación Sierra Gorda) lo que sumado a altas tasas de evaporación hacen que el agua caída no percole y rápidamente vuelva a la atmósfera.

Esta recarga natural por infiltración de aguas lluvias, se produciría en la subcuenca de estudio, en el sector del distrito Centinela y aguas arriba, y se generaría en periodos y sitios puntuales, cuando y donde la tasa de precipitación es mayor a la tasa de evaporación.

Además, dependiendo de la intensidad-duración de la lluvia y el territorio donde cae, se puede producir escorrentía superficial esporádica con descarga de volúmenes importante de agua en los sectores bajos de la subcuenca, para luego percolar e incorporarse al almacenamiento subterráneo.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-1 . Modelo de la partición de la precipitación en la recarga del área de estudio.**

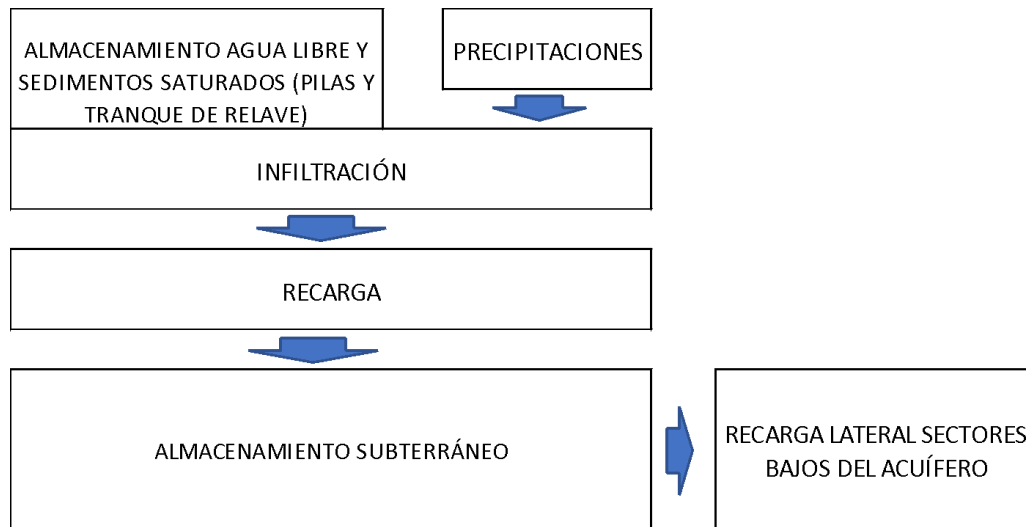
### 3.1.2 Identificación de las Zonas de Recarga

En cuanto a los procesos y zonas de recarga en la subcuenca piloto, estos se producen por eventos desarrollados en superficie y subterráneamente (ver Figura 3-2).

Los primeros tienen relación, en forma natural, con la precipitación líquida que se infiltra en eventos puntuales y sectores medios y altos de la cuenca, cuando el agua caída y acumulada sobrepasa la tasa de evaporación. Así también, estos eventos anormales de lluvias, pueden generar escorrentía superficial esporádica que termina su recorrido en las partes bajas de la subcuenca, generando acumulación de detritos saturados que se infiltran en tasas que dependen, principalmente, de la porosidad del medio y la tasa de evaporación.

Por otra parte, la actividad minera desarrollada en esta subcuenca, también genera recargas al sistema subterráneo, por la infiltración de aguas de proceso bajo sitios de acumulación de relaves o material triturado sometido a lixiviación. En esta recarga del sistema subterráneo se incorporan aguas provenientes de otras fuentes que no son parte del sistema estudiado (agua de mar y aguas continentales de otros acuíferos).

Finalmente, y principalmente, en las partes bajas de la subcuenca, la única fuente de recarga natural del acuífero lo constituyen entradas de caudal subterráneo pasante, proveniente desde sectores altos de la cuenca donde se registran mayores precipitaciones, sumado a recargas por infiltración de depósitos antrópicos.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-2 . Modelo de recarga del agua subterránea en el área de estudio.**

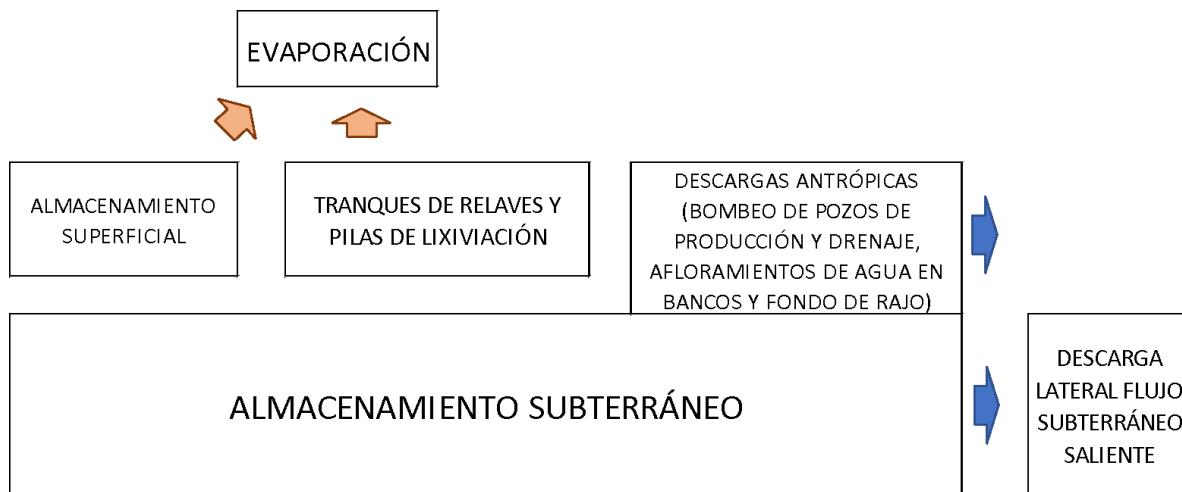
### 3.1.3 Identificación de las Zonas de Descarga

Para el caso de la subcuenca estudiada, las descargas o salidas de sistema hídrico tienen relación con fenómenos naturales y antrópicos (Figura 3-3).

La principal descarga se produce por evaporación desde el almacenamiento superficial, generado a nivel de suelo por las lluvias o escorrentía superficial esporádica, además de la generada en depósitos antrópicos saturado o con humedad, tales como tranques de relaves, pilas de lixiviación, botaderos húmedos o superficies humectadas.

Otra descarga del sistema se produce directamente del almacenamiento subterráneo y corresponde a extracciones mediante pozos de bombeo o drenaje, así como también, por descargas de afloramiento de agua subterránea en las paredes o fondo de las excavaciones mineras.

Finalmente, se produce salidas de agua desde el almacenamiento subterráneo hacia fuera de la cuenca, principalmente, caudal subterráneo saliente en el sector de Sierra Gorda, pero también se pueden producir descargas menores a través de fallas que actúen como vías de flujo subterráneo preferencial.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-3 . Modelo de descarga del agua subterránea en el área de estudio.**

### 3.2 Estimación de la Recarga

#### 3.2.1 Recargas Estimadas desde Estudios Previos

Dentro de nuestra revisión de estudios previos se encontraron estimaciones de recarga para el dominio de la Cuenca de Caracoles. Por ejemplo, DGA (2012) define un valor único de recarga equivalente a 125 l/s para todo el acuífero Sierra Gorda. Asimismo, se hace énfasis en la variabilidad de la recarga asociada a bandas hipsométricas y la cantidad de lluvias acumulada en dichas bandas. En este contexto se definen coeficientes de infiltración bajos que fluctúan entre 0 (banda <10 mm) y 20% (banda > 50mm) aludiendo específicamente a la diferencia observada entre la nula recarga que ocurre en las zonas bajas y las principales zonas de recarga ubicadas hacia las zonas de mayor elevación. Las mayores limitantes de la metodología implementada tienen que ver con cálculos desarrollados utilizando precipitación media anual y coeficientes definidos arbitrariamente. Asimismo, no se consideraron posibles salidas de agua por descarga y evaporación de agua subterránea desde las zonas de vegas o acuíferos poco profundos.

Por otra parte, es importante destacar que la recarga producida por eventos de lluvia intensa podría no revelar variaciones significativas de los niveles de agua subterránea dado que el agua de lluvia que se infiltra debe recorrer una amplia zona no saturada que presenta baja humedad, alta capacidad de absorción y baja permeabilidad, por lo cual el efecto de la recarga se atenúa a largo plazo y se va transformando en una dinámica muy lenta para alcanzar el acuífero local.

### 3.2.2 Recargas Estimadas desde el Modelo Superficial WEAP

En el modelo WEAP-Caracoles se establecieron dos procesos principales de recarga que permitieron detallar los procesos de partición hidrológica. Para esto se definieron nodos de demanda los cuales permiten simular la recarga regional de carácter vertical y la recarga lateral.

- i. **Nodos de Recarga Directa Vertical:** corresponden a recargas directas hacia los sistemas acuíferos (profundos y poco profundos). Estas recargas se producen principalmente durante los eventos de tormenta y se acumulan principalmente a lo largo del cauce principal de las cuencas. Estas recargas se establecieron como un porcentaje de partición que varió entre un 0.1% y un 10% de recarga con respecto a la precipitación total mensual.
- ii. **Nodos de Recarga Lateral Horizontal:** corresponden a recargas laterales directas producidas por el flujo subsuperficial que corresponde a descargas de agua desde los acuíferos poco profundos ubicados en zonas de mayor elevación. Las descargas subsuperficiales se mueven lentamente debido a las diferencias de permeabilidad y gradientes hidráulicos observados en la cuenca de Caracoles.

Los porcentajes de variación estacional asignados a cada flujo de recarga se encuentran definidos en los supuestos clave del modelo WEAP-Caracoles y se encuentran asociados a tres niveles de variación: *alto*, *medio*, y *bajo*. Estos parámetros pueden ser fácilmente modificados para ajustar los flujos de recarga definidos en el modelo.

### 3.2.3 Discusión sobre la Estimación de la Recarga para Futuras Simulaciones Numéricas

Es importante considerar que las estimaciones de recarga representan uno de los flujos hidrológicos con mayor incertidumbre debido a su alta variabilidad espacial y temporal. Las estimaciones establecidas en el modelo WEAP-Caracoles se condicen con los resultados de estudios previos y logran representar adecuadamente el ciclo estacional de los procesos de recarga regional.

Para futuras simulaciones numéricas, ya sean superficiales o subterráneas, se recomienda establecer mediciones de recarga en terreno mediante métodos hidráulicos p.e. permeámetros, infiltrómetros, etc., o mediante el análisis de datos de pozos de bombeo y/o monitoreo que tengan registros de fluctuaciones estacionales de los niveles de aguas subterráneas. Las estimaciones de recarga deben ser complementadas con datos

pluviométricos con el objetivo de determinar la partición precipitación-recarga a escala de evento de tormenta. Una estimación empírica del porcentaje de partición hidrológica observado desde mediciones instrumentales permitiría mejorar la representación de la recarga en el modelo WEAP-Caracoles.

## **4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA**

En el presente estudio se han construido dos modelos conceptuales independientes para representar los flujos superficiales y subterráneos de la cuenca de Caracoles. Dichos flujos explican la partición hidrológica observada desde la climatología regional, los procesos de escorrentía superficial, el comportamiento regional de los flujos subterráneos, y los procesos de recarga, entre otros. Asimismo, se ha construido un modelo numérico WEAP para simular la hidrología superficial de la Cuenca de Caracoles cuyos resultados se presentan en las siguientes secciones.

### **4.1 Evaluación y Proyección Futura de la Oferta y Demanda**

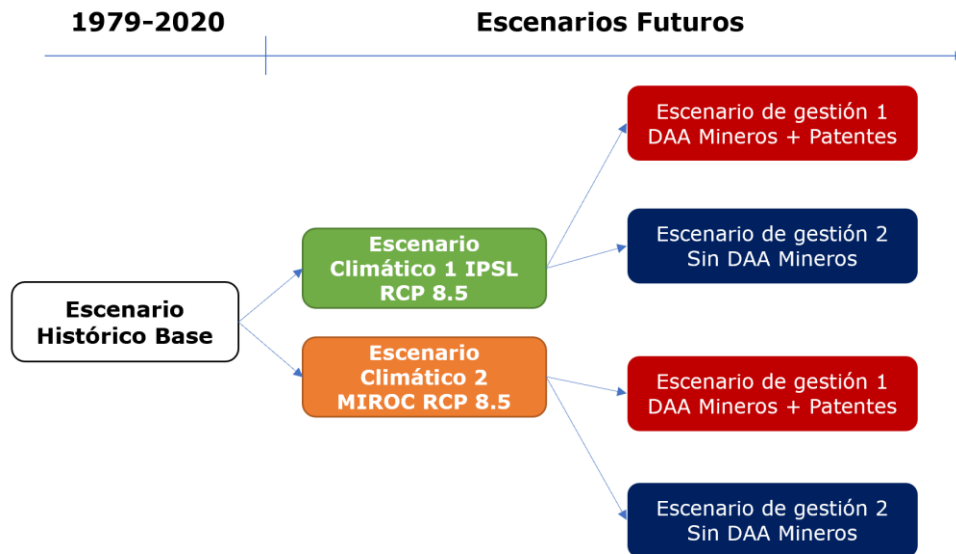
#### **4.1.1 Definición de Escenarios de Simulación y Gestión**

Tomando en consideración la simulación inicial y el proceso de calibración del modelo WEAP, se definieron dos escenarios de cambio climático, dentro de los cuales se definieron dos escenarios de gestión de aguas. En total se establecieron cuatro escenarios de gestión (Figura 4-1) que intentan responder las siguientes preguntas:

- i. Escenario Climático 1: ¿Qué pasaría si los patrones climáticos cambiaran de acuerdo con las proyecciones establecidas por el modelo climático global MIROC? Esto implica una reducción de 1.6% en las precipitaciones (~0.7 mm) y un aumento de ~1.8°C en las temperaturas medias anuales para la comparación entre los periodos 1985-2021 versus 2022-2059.
- ii. Escenario Climático 2: ¿Qué pasaría si los patrones climáticos cambiaran de acuerdo con las proyecciones establecidas por el modelo climático global IPSL? Esto implica un aumento de 5.3% en las precipitaciones (~2.4 mm) y un aumento de ~1.9°C en las temperaturas medias anuales para la comparación entre los periodos 1985-2021 versus 2022-2059.
- iii. Escenario de Gestión 1: ¿Qué pasaría si se activan los Derechos de Aprovechamiento de Aguas y las Patentes asociadas a todas las concesiones mineras existentes en la cuenca? Esto corresponde a 827.5 y 242.4 [l/s] (aproximada y respectivamente) distribuidos en la cuenca según la información recopilada de manera agregada (más información se puede revisar en Informe Final Capítulo 3: Demanda Física y legal).



- iv. Escenario de Gestión 2: ¿Qué pasaría si se desactivan los Derechos de Aprovechamiento de Aguas y las Patentes asociadas a todas las concesiones mineras existentes en la cuenca? Para este escenario los derechos de aprovechamiento fueron reducidos a 200 [l/s].



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-1 . Principales escenarios climáticos y de gestión de aguas considerados en la modelación e WEAP de la Cuenca de Caracoles en la Región de Antofagasta.**

**A continuación, se detallan las características de los escenarios descritos.**

#### 4.1.1.1 Descripción de los Escenarios Climáticos Seleccionados

Se escogió para ser evaluado al caso más desfavorable de los escenarios definidos para el quinto informe del IPCC (CMIP5), llamados *Representative Concentration Pathways* (RCP), el escenario escogido corresponde al RCP 8.5 nombrado porque la radiación forzante sobre la atmósfera en dicho escenario tendría un aumento de 8.5 W/m<sup>2</sup> para 2100. Este fue escogido debido a que existe consenso científico (Peters et al, 2012) en que actualmente las emisiones de CO<sub>2</sub> se encuentran en un nivel similar o por sobre las emisiones asociada al escenario RCP 8.5.

Por otra parte, existen más de 20 modelos de circulación general (MCG) en el proyecto CMIP5 que realizan simulaciones climáticas para el escenario escogido<sup>1</sup>, pero dada que existe información que se ha generado en el contexto del proyecto de Actualización del

<sup>1</sup> <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>

Balance Hídrico de Chile llevado a cabo por las Universidades de Chile y Pontificia Universidad Católica (DGA, 2017, 2018 y 2019), se tienen 4 MCG que se han testado para todo Chile, escogidos por la representación que han tenido del clima local. En particular, en el caso de la cuenca en estudio, los modelos seleccionados para ser evaluados fueron MIROC y IPSL en el periodo de simulación futura de 2022 a 2059.

Cabe destacar que, en el mencionado estudio, los datos de precipitación y temperatura escalados de los GCM fueron utilizados como forzantes para el modelo hidrológico VIC, de esta modelación se obtuvieron algunas variables como la evapotranspiración y la escorrentía superficial. Esta información será utilizada a modo referencial en el desarrollo del presente estudio. Las variables contenidas en el producto grillado utilizado presentan una resolución espacial de 5 km y una resolución temporal mensual. En las siguientes tablas se presenta un resumen de los principales flujos del balance hídrico: precipitación (Tabla 4-6), escorrentía (Tabla 4-7) y evapotranspiración (Tabla 4-8).

**Tabla 4-6 Precipitación de la cuenca en estudio, en mm, para distintos períodos, y modelos de circulación general.**

Modelo	Precipitación (mm)				
	1985-2015	2030-2040	2040-2050	2050-2060	2030-2060
CSIRO	7,6	5,1	5,7	4,9	5,2
CCSM	7,4	7,1	8,3	3,6	6,3
MIROC	7,3	4,7	8,6	7,7	7,0
IPSL	7,4	7,6	7,4	4,2	6,4

Fuente: Adaptado de DGA (2018).

**Tabla 4-7 Escorrentía de la cuenca en estudio, en mm, para distintos períodos, y modelos de circulación general.**

Modelo	Escorrentía (Régimen Natural, VIC) (mm)				
	1985-2015	2030-2040	2040-2050	2050-2060	2030-2060
CSIRO	0,7	0,4	0,4	0,3	0,4
CCSM	0,7	0,4	0,4	0,2	0,4
MIROC	0,7	0,3	0,6	0,4	0,5
IPSL	0,7	0,5	0,4	0,4	0,4

Fuente: Adaptado de DGA (2018).

**Tabla 4-8 Evapotranspiración de la cuenca en estudio, en mm, para distintos períodos, y modelos de circulación general.**

	Evapotranspiración (Régimen Natural, VIC) (mm)				
Modelo	1985-2015	2030-2040	2040-2050	2050-2060	2030-2060
CSIRO	7,2	4,8	5,5	4,6	4,9
CCSM	7,0	6,8	7,9	3,5	6,1
MIROC	6,8	4,3	8,1	7,4	6,6
IPSL	7,1	7,0	6,8	4,0	5,9

Fuente: Adaptado de DGA (2018).

En las tablas anteriores se aprecian distintos comportamientos. En primer lugar y el más relevante para los usos que se les darán a estos productos en el presente trabajo, el modelo CSIRO adelanta una disminución importante en las precipitaciones medias anuales en la zona de estudio, de en torno a un 30% entre el período histórico (1985-2015) y el período futuro (2030-2060). Este modelo difiere de sus semejantes, en donde la variación futura no pasa de -15%. A pesar de lo anterior, la variación de la estadística media no es descriptiva de la situación futura en su conjunto, debido a que estos modelos no pueden predecir los eventos extremos que sí destacan en la serie histórica y son relevantes.

Los otros dos flujos hidrológicos presentan un comportamiento acorde a la precipitación y sus anomalías ya descritas, toda vez que son salidas de un modelo que fue forzado con dicha variable.

#### *4.1.1.2 Descripción de los Escenarios de Gestión Establecidos*

Se definieron 2 escenarios de gestión para ser modelados, con el propósito de determinar la respuesta del sistema frente a distintas estrategias definidas para abordar problemáticas hídricas. Estas iniciativas propuestas surgieron durante el desarrollo del presente estudio, considerando las características propias de la cuenca a través de las actividades de Participación Ciudadana, del análisis de los antecedentes recopilados en coordinación con la DGA y del diagnóstico realizado.

Lo identificado, en la actividad de la PAC define los escenarios a modelar ya que ésta refleja las visiones y percepciones de los grupos que están en el territorio, colectivos de la sociedad civil y organismos públicos. La evaluación de los escenarios propuestos no limita la incorporación de distintas alternativas al Plan estratégico elaborado.

Es importante señalar que la cuenca en estudio tiene una marcada presencia minera (según los derechos otorgados y las empresas mineras presentes en la zona), donde no

existen obras de captación construida por personas naturales (ni en planes de construir), no hay población residente en la zona y tampoco en planes de poblados nuevos.

Como se ha identificado y estudiado en la cuenca Quebrada Caracoles, existen derechos de aprovechamiento de aguas otorgados a empresas mineras que al día de hoy están sujetos a cobros de patentes por no aprovechamiento de sus derechos de agua, es por eso que como ejercicio de análisis se considera importante estudiar escenarios de gestión que modelen opciones con los actuales derechos de agua otorgados en la cuenca.

#### 4.1.1.2.1 Escenario de gestión 1: Todos los derechos otorgados son explotados

Como se mencionó previamente, actualmente hay derechos en la cuenca que están afectos a pagos de patentes, es decir no se están haciendo uso de todos los derechos. Se considera importante, plantear un escenario donde los derechos de agua puedan ser explotados en un 100% por parte de las empresas. Se evaluará entonces que ocurre con el modelo con las nuevas extracciones.

El detalle de los derechos de agua otorgados y pago de patentes se puede observar en detalle en el Informe Final Capítulo 3: Demanda Física y legal.

#### 4.1.1.2.2 Escenario de gestión 2: Demanda subterránea disminuye.

Según el Capítulo 3: Demanda física y legal, se tiene que los usos de agua fresca por parte de las empresas mineras se cuantifican como se muestra en la Tabla 4-1 a continuación.

**Tabla 4-1: Consumo de agua fresca por parte de la minería para toda la región de Antofagasta.**

Tipos de extracciones	Unidades	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Aguas Superficiales	l/s	1.964	1.926	1.674	1.747	750	801
Aguas Subterráneas	l/s	2.580	2.921	3.148	2.854	3.433	3.580
Aguas adquiridas a terceros	l/s	422	484	691	715	784	834
Agua de mar	l/s	1.039	1.990	1.767	2.053	2.694	3.656
TOTAL	l/s	6.005	7.321	7.279	7.368	7.661	8.870

Fuente: COCHILCO 2018

Donde observa una tendencia en el tiempo de aumento de agua subterránea y disminución de agua superficial. Además, más importante aún, un aumento en los usos de agua de mar. Se utilizaron estas tendencias para proyectar disminuciones en los porcentajes de uso de agua en la Cuenca Quebrada de Caracoles, para simular el comportamiento de la cuenca en base a estimaciones oficiales en el rubro de la minería.

Así, se definieron 200 l/s de extracción efectiva, cerca de un 20% de lo que actualmente se encuentra otorgado como derechos de aguas subterráneas en la cuenca.

## **4.2 Situación Base desde el Periodo Histórico de Simulación**

### **4.2.1 Descripción de la Situación Base**

La modelación del Período Histórico abarca desde abril de 1980 a marzo de 2020 (30 años hidrológicos) y corresponde al modelo calibrado y validado sin cambios adicionales.

### **4.2.2 Resultados de la Simulación Hidrológica Histórica**

Para la simulación histórica se consideró la evaluación del periodo de referencia 1980-2020. Para este periodo se obtuvo un balance de aguas detallado que permite establecer la partición hidrológica entre las entradas y salidas de agua desde las unidades hidrológicas definidas para la cuenca de Caracoles. Primero se presentan los flujos de recarga, los cuales fueron agrupadas en procesos de recarga directa y procesos de recarga lateral. La variación mensual de los flujos estimados muestra recargas mensuales que fluctúan entre 0.1 l/s y 154.8 l/s como promedio para la cuenca de Caracoles (ver detalles en la Tabla 4-1 y Tabla 4-2).

Todas las unidades hidrológicas en las que se estimaron procesos de recargas fueron incluidas en los resultados finales del balance de aguas para la cuenca de Caracoles. De manera complementaria también se incluyen los flujos inter acuíferos para cada una de las unidades hidrológicas consideradas en el modelo WEAP-Caracoles Tabla 4-3.

Dentro de los flujos hidrológicos de salida más importantes necesarios para establecer un balance de aguas confiable en la cuenca de Caracoles se encuentra la evaporación desde cuerpos de agua, desde vegas, y desde los acuíferos poco profundos. La evaporación desde los acuíferos poco profundos fue estimada en cada unidad hidrológica del modelo WEAP-Endorreicas utilizando nodos de demanda conectados a cada caja acuífera denominada acuífero superior (Tabla 4-4). El área de la cuenca fue asociada a profundidades de evaporación mensual obtenidas desde la estación Campamento (7 años de registro disponibles).

**Tabla 4-1 Estimaciones de la recarga directa promedio mensual (m<sup>3</sup>/mes) obtenida desde los nodos de demanda para cada unidad hidrológica definida en el modelo WEAP-Caracoles.**

<b>Unidad Hidrológica</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
Middle Quebrada del Profeta	53.595	23.574	119.255	158.947	113.328	77.376	61.147	13.928	225.000	360.000	23.036	17.258
North Quebrada del Profeta 1	4.293	3.250	9.052	7.475	6.887	4.636	5.678	4.902	202.000	412.000	5.557	2.980
North Quebrada del Profeta 2	10.737	8.208	21.658	20.408	18.719	12.971	12.632	7.793	320.000	449.000	7.915	3.776
North Quebrada del Profeta 3	14.575	11.242	26.307	30.047	26.332	18.689	13.185	6.341	475.000	229.000	5.325	1.972
North Quebrada del Profeta 4	38.879	23.661	77.937	108.176	89.454	64.600	43.270	16.456	585.000	862.000	14.452	6.474
Quebrada Mantos Blancos	190.883	130.260	401.155	390.458	363.752	269.770	196.466	124.805	5.511	20.463	126.581	119.435
Quebrada Saco	22.806	16.217	47.731	39.650	38.284	28.428	31.634	25.224	555.000	2.620	19.410	25.880
South Quebrada del Profeta	45.029	18.793	99.097	106.733	80.000	55.643	50.350	17.356	647.000	614.000	52.040	36.460

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-2 Estimaciones de la recarga lateral promedio mensual (m<sup>3</sup>/mes) obtenida desde los nodos de demanda para cada unidad hidrológica definida en el modelo WEAP-Caracoles**

<b>Unidad Hidrológica</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
Salar de Navidad	104.000	14.429	7.799	4.924	3.261	2.445	1.753	1.084	674.000	399.000	227.000	105.000
Salar de Pampa Blanca	1.487	38.953	22.000	16.076	12.769	10.859	8.211	5.520	3.461	1.826	1.230	1.112
Salar del Carmen	852.000	38.065	21.464	14.169	10.457	21.674	6.992	4.687	2.895	1.802	1.140	620.000

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4-3 Estimaciones promedio mensuales del flujo Interacuífero (m<sup>3</sup>/mes) desde el modelo WEAP-Caracoles.**

<b>Unidad Hidrológica</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
Middle Quebrada del Profeta	749.158	600.469	1.681.865	1.233.838	887.196	602.569	383.423	221.308	123.42	67.775	40.010	39.274
North Quebrada del Profeta 1	120.463	75.217	61.459	56.296	51.383	42.746	34.977	23.492	12.518	9.771	9.958	10.837
North Quebrada del Profeta 2	328.370	196.034	154.382	143.129	127.826	101.913	75.641	47.065	25.054	16.662	13.523	17.380
North Quebrada del Profeta 3	645.239	361.664	248.750	201.682	161.824	116.365	76.412	44.548	23.896	13.504	8.457	12.717
North Quebrada del Profeta 4	884.198	1.585.427	1.037.090	782.079	586.500	409.464	264.519	153.827	84.499	46.601	27.267	32.288
Quebrada Mantos Blancos	698.237	431.481	3.198.439	2.682.672	2.256.158	1.699.838	1.184.322	720.438	384.73	248.510	223.28	295.41
Quebrada Saco	630.142	392.852	316.107	288.769	284.423	259.885	218.306	147.099	78.524	53.416	57.317	73.844
South Quebrada del Profeta	284.637	279.761	890.919	715.146	547.374	388.862	257.105	149.026	80.651	58.171	57.873	60.498
<b>Suma</b>	<b>4.340.445</b>	<b>3.922.905</b>	<b>7.589.012</b>	<b>6.103.610</b>	<b>4.902.684</b>	<b>3.621.641</b>	<b>2.494.704</b>	<b>1.506.802</b>	<b>813.29</b>	<b>514.41</b>	<b>437.69</b>	<b>542.25</b>

**Tabla 4-4 Estimaciones promedio mensuales de la evaporación poco profunda (m<sup>3</sup>/mes) desde el modelo WEAP-Caracoles.**

<b>Unidad Hidrológica</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
Middle Quebrada del Profeta	10.842.02 3	9.355.955	9.998.514	12.128.54 2	14.136.39 7	15.103.59 8	15.029.74 4	11.674.65 3	8.791.101	7.309.864	5.129.407	5.028.603
North Quebrada del Profeta 1	566.499	523.967	524.184	604.423	740.991	845.329	988.138	893.516	705.289	637.804	547.479	528.405
North Quebrada del Profeta 2	1.306.748	1.248.815	1.319.239	1.578.883	1.919.579	2.151.858	2.356.212	2.018.718	1.587.503	1.346.228	1.053.301	1.033.380
North Quebrada del Profeta 3	1.943.860	1.834.706	1.975.522	2.420.101	2.913.637	3.131.321	3.151.617	2.521.718	1.924.946	1.552.550	1.074.433	1.094.045
North Quebrada del Profeta 4	7.031.644	6.201.247	6.697.402	8.332.445	10.016.26 1	10.773.54 9	10.777.74 7	8.500.161	6.415.569	5.199.411	3.496.725	3.382.696
Quebrada Mantos Blancos	26.924.95 3	25.043.11 2	26.519.48 7	32.200.08 2	39.691.53 6	43.457.26 6	45.003.43 5	37.102.55 1	28.962.38 4	24.573.20 1	19.603.44 7	19.831.46 4
Quebrada Saco	3.037.230	2.663.442	2.589.844	3.008.005	3.854.152	4.592.574	5.421.358	4.899.893	3.954.515	3.357.057	2.913.743	2.956.303
South Quebrada del Profeta	7.227.516	6.454.089	6.862.192	8.271.031	9.766.395	10.589.53 8	10.841.66 9	8.695.180	6.698.738	6.215.459	5.463.321	5.409.940
<b>Suma</b>	58.880.47 3	53.325.33 2	56.486.38 4	68.543.51 2	83.038.94 8	90.645.03 3	93.569.92 0	76.306.39 1	59.040.04 4	50.191.57 4	39.281.85 6	39.264.83 6



Por otra parte, de acuerdo con los resultados del modelo WEAP-Caracoles, en el sistema hidrológico de la cuenca de Caracoles existe un volumen de almacenamiento de agua en acuíferos regionales que podría fluctuar estacionalmente entre los  $2.47 \times 10^{10}$  y  $3.15 \times 10^{10}$  millones de metros cúbicos de agua (Tabla 4-5), debido a pulsos de recarga provenientes desde el Este y que dependen de la acumulación anual de lluvia en las zonas altas de la cuenca. Los volúmenes iniciales de almacenamiento de cada acuífero fueron determinados utilizando la relación geométrica entre el tamaño de la cuenca y la capacidad de almacenamiento del acuífero. Esta relación fue obtenida desde el modelo WEAP del Salar de Atacama y solo corresponde a una aproximación inicial. Mayores detalles deben ser establecidos mediante la construcción y acoplamiento de un modelo regional de aguas subterráneas.

**Tabla 4-5 Almacenamiento promedio mensual en los acuíferos regionales (m<sup>3</sup>/mes) simulados desde el modelo WEAP-Caracoles.**

<b>Acuífero</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
Lower Aquifer Middle Quebrada del Profeta	5,70E+09	5,70E+09	5,70E+09	5,70E+09	5,70E+09	5,70E+09	5,73E+09	5,73E+09	5,73E+09	5,73E+09	5,73E+09	5,73E+09
Lower Aquifer North Qubrada del Profeta 3	7,60E+08	7,60E+08	7,60E+08	7,60E+08	7,60E+08	7,60E+08	7,60E+08	7,60E+08	7,60E+08	7,60E+08	7,64E+08	7,64E+08
Lower Aquifer North Quebrada del Profeta 1	1,29E+08	1,29E+08	1,29E+08	1,29E+08	1,29E+08	1,29E+08	1,29E+08	1,29E+08	1,29E+08	1,29E+08	1,30E+08	1,30E+08
Lower Aquifer North Quebrada del Profeta 2	3,69E+08	3,69E+08	3,69E+08	3,69E+08	3,69E+08	3,69E+08	3,69E+08	3,69E+08	3,69E+08	3,69E+08	3,71E+08	3,71E+08
Lower Aquifer North Quebrada del Profeta 4	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09	3,46E+09
Lower Aquifer Quebrada El Saco	6,70E+08	6,70E+08	6,70E+08	6,70E+08	6,70E+08	6,70E+08	6,70E+08	6,70E+08	6,70E+08	6,70E+08	6,73E+08	6,73E+08
Lower Aquifer Quebrada Mantos Blancos	8,96E+09	8,96E+09	8,96E+09	8,96E+09	8,96E+09	8,96E+09	8,96E+09	8,96E+09	8,96E+09	8,96E+09	9,00E+09	9,00E+09
Lower Aquifer South Quebrada del Profeta	2,71E+09	2,71E+09	2,71E+09	2,71E+09	2,71E+09	2,71E+09	2,71E+09	2,71E+09	2,71E+09	2,71E+09	2,73E+09	2,73E+09
Upper Aquifer Middle Quebrada del Profeta	1,22E+09	1,46E+09	1,95E+09	2,15E+09	2,05E+09	2,02E+09	1,81E+09	1,45E+09	4,43E+08	8,23E+07	1,01E+09	1,10E+09
Upper Aquifer North Quebrada del Profeta 1	3,87E+07	4,06E+07	4,96E+07	4,97E+07	4,86E+07	4,81E+07	4,67E+07	4,65E+07	2,18E+07	1,44E+07	3,92E+07	3,58E+07
Upper Aquifer North Quebrada del Profeta 2	9,37E+07	9,96E+07	1,33E+08	1,36E+08	1,32E+08	1,25E+08	1,17E+08	1,22E+08	5,52E+07	2,01E+07	9,35E+07	9,11E+07
Upper Aquifer North Quebrada del Profeta 3	1,61E+08	1,91E+08	2,58E+08	2,73E+08	2,62E+08	2,50E+08	2,27E+08	2,16E+08	8,82E+07	3,08E+07	1,71E+08	1,31E+08
Upper Aquifer North Quebrada del Profeta 4	8,32E+08	9,49E+08	1,23E+09	1,34E+09	1,31E+09	1,28E+09	1,20E+09	1,15E+09	4,39E+08	1,56E+08	7,89E+08	7,69E+08
Upper Aquifer Quebrada Mantos Blancos	2,97E+09	3,04E+09	3,58E+09	3,56E+09	3,50E+09	3,39E+09	3,22E+09	3,39E+09	1,70E+09	1,51E+09	2,88E+09	2,82E+09
Upper Aquifer Quebrada Saco	1,93E+08	1,91E+08	2,50E+08	2,68E+08	2,60E+08	2,57E+08	2,78E+08	2,74E+08	1,33E+08	6,30E+07	2,22E+08	2,10E+08
Upper Aquifer South Quebrada del Profeta	7,51E+08	8,07E+08	9,77E+08	1,02E+09	1,01E+09	9,41E+08	9,04E+08	7,36E+08	2,60E+08	9,46E+07	6,77E+08	6,88E+08
<b>Suma</b>	<b>2,90E+10</b>	<b>2,95E+10</b>	<b>3,12E+10</b>	<b>3,16E+10</b>	<b>3,13E+10</b>	<b>3,11E+10</b>	<b>3,06E+10</b>	<b>3,02E+10</b>	<b>2,59E+10</b>	<b>2,48E+10</b>	<b>2,87E+10</b>	<b>2,87E+10</b>

### **4.3 Evaluación de Escenarios de Cambio Climático**

#### **4.3.1 Proyección de la Oferta y Demanda Hídrica Futura**

Con los escenarios seleccionados fue posible establecer las diferencias entre las simulaciones de referencia y las simulaciones asociadas a procesos de cambio climático, o aquellas asociadas a procesos de cambios en la gestión de las aguas a escala de cuenca. Las demandas asociadas a concesiones mineras en promedio aumentaron en un 28.6% al comparar el escenario de referencia y el escenario de Cambio Climático 1 combinado con el Escenario de Gestión 1 (ver Tabla 4-6 ). Este incremento corresponde a la diferencia promedio más significativa desde el punto de vista comparativo de los nodos de demanda.

**Tabla 4-6 Demanda de agua promedio mensual simulada para cada escenario de cambio climático y su correspondiente escenario de gestión hídrica utilizando el modelo WEAP- Caracoles (incluyendo todos los nodos de demanda).**

<b>Escenario Principal</b>	<b>Escenario Perturbado</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
Escenario Climático 1	Referencia	2.144.828	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.216.322	2.001.840	2.216.322
Escenario Climático 2		2.144.828	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.216.322	2.001.840	2.216.322
Escenario Climático 1	Escenario de Gestión 1	2.758.144	2.850.082	2.758.144	2.850.082	2.850.082	2.758.144	2.850.082	2.758.144	2.850.082	2.850.082	2.574.268	2.850.082
Escenario Climático 2		2.758.144	2.850.082	2.758.144	2.850.082	2.850.082	2.758.144	2.850.082	2.758.144	2.850.082	2.850.082	2.574.268	2.850.082
Escenario Climático 1	Escenario de Gestión 2	557.124	575.695	557.124	575.695	575.695	557.124	575.695	557.124	575.695	575.695	519.983	575.695
Escenario Climático 2		557.124	575.695	557.124	575.695	575.695	557.124	575.695	557.124	575.695	575.695	519.983	575.695
Referencia (1980-2020)	Referencia (1980-2020)	2.144.828	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.144.828	2.216.322	2.216.322	2.001.840	2.216.322

#### 4.3.2 Resultados de la Simulación Hidrológica para los Escenarios Climáticos Establecidos

Los resultados de la simulación hidrológica WEAP para los escenarios climáticos revelaron las diferencias promedio mensuales asociadas a cambios en la acumulación futura de las lluvias. Alrededor de 5.291.812 m<sup>3</sup> de agua son removidos en promedio anualmente del modelo bajo el escenario Climático 1. Por otra parte, un total de 17.529.131 m<sup>3</sup> anuales de agua adicionales (en promedio) son incorporados en el modelo WEAP-Caracoles bajo el Escenario Climático 2 (ver Tabla 4-7).

Uno de los flujos de partición hidrológica más sensibles a las dinámicas de cambio climático de las precipitaciones son las recargas directas hacia los acuíferos poco profundos y hacia los acuíferos profundos localizados en la cuenca de Caracoles. Un aporte reducido o aumentado del volumen de lluvias implica cambios en la cantidad de agua recargada y finalmente almacenada en los acuíferos del sistema Caracoles. Por ejemplo, los cambios asociados a un aumento de las lluvias (Escenario Climático 2) pueden aumentar en promedio en alrededor de 494.486.616 m<sup>3</sup>/año el almacenamiento de agua subterránea en la cuenca de Caracoles (Tabla 4-8).

**Tabla 4-7 Lluvia promedio mensual (m<sup>3</sup>) asociada a los escenarios de simulación del modelo WEAP-Caracoles (Referencia 1980-2020, Escenario Climático 1 y Escenario Climático 2).**

Escenario	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Referencia	16.265.809	56.058.119	59.605.506	53.856.356	38.475.252	29.831.658	16.167.304	616.105	1.901.246	17.846.634	14.971.024	26.248.891
Escenario Climático 1	16.005.556	55.161.189	58.651.818	52.994.654	37.859.648	29.354.351	15.908.628	606.248	1.870.826	17.572.382	14.731.487	25.835.305
Escenario Climático 2	17.127.897	59.029.199	62.764.598	56.710.743	40.514.440	31.412.736	17.024.172	648.759	2.002.012	18.755.094	15.764.488	27.618.897

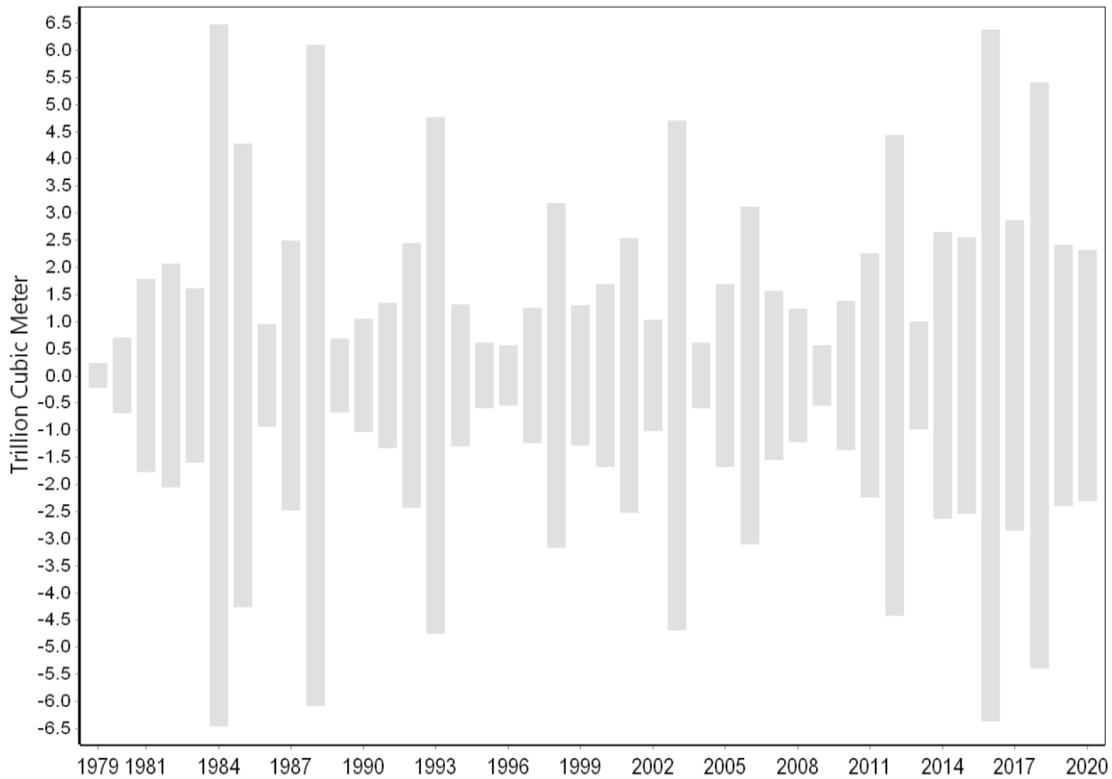
**Tabla 4-8 Almacenamiento promedio mensual (m<sup>3</sup>) de agua subterránea en la cuenca de Caracoles considerando todos los acuíferos disponibles en el modelo WEAP-Caracoles.**

Escenario Principal	Escenario Perturbado	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Escenario Climático 1	Referencia	28.264.479.347	28.750.259.992	30.781.014.768	31.435.688.652	31.205.328.418	30.833.040.510	30.249.462.967	29.588.242.824	25.505.554.886	24.063.003.170	27.958.667.868	28.000.352.331
Escenario Climático 2		28.328.716.482	28.808.081.752	30.813.847.725	31.460.576.627	31.228.372.769	30.880.929.548	30.292.958.571	29.652.630.875	25.549.105.728	24.118.683.321	28.055.359.863	28.087.003.206
Escenario Climático 1	Escenario de Gestión 1	28.264.479.347	28.750.259.992	30.781.014.768	31.435.688.652	31.205.328.418	30.833.040.510	30.249.462.967	29.588.242.824	25.505.554.886	24.063.003.170	27.958.660.332	28.000.347.307
Escenario Climático 2		28.328.716.482	28.808.081.752	30.813.847.725	31.460.576.627	31.228.372.769	30.880.929.548	30.292.958.571	29.652.630.875	25.549.105.728	24.118.683.321	28.055.353.582	28.086.999.438
Escenario Climático 1	Escenario de Gestión 2	28.264.328.660	28.750.286.284	30.779.034.993	31.397.994.701	31.167.409.010	30.795.453.191	30.229.723.190	29.577.264.896	25.507.057.917	24.064.917.993	27.959.691.304	28.001.720.347
Escenario Climático 2		28.329.845.504	28.796.503.186	30.814.210.153	31.425.866.774	31.175.159.746	30.816.769.588	30.254.565.894	29.635.741.553	25.542.765.249	24.120.571.315	28.056.345.496	28.088.397.987
Referencia (1980-2020)	Referencia (1980-2020)	28.277.638.603	28.763.086.584	30.788.574.172	31.441.467.842	31.210.707.295	30.845.069.298	30.260.235.526	29.602.880.314	25.515.726.999	24.076.084.054	27.980.899.545	28.019.399.570

#### 4.4 Evaluación de Escenarios de Gestión Hídrica

##### 4.4.1 Resultados de la Simulación Hidrológica para los Escenarios de Gestión Hídrica

Para la simulación histórica se consideró la evaluación del periodo de referencia 1979-2020 (ver Figura 4-2 ). Para este periodo se obtuvo un balance de aguas detallado que permite establecer la partición hidrológica entre las entradas y salidas de agua desde las unidades hidrológicas definidas para la cuenca de Caracoles. Primero se presentan los flujos de recarga, los cuales fueron agrupadas en procesos de recarga directa y procesos de recarga lateral. La variación mensual de los flujos estimados muestra recargas mensuales que fluctúan entre 0.1 l/s y 154.8 l/s como promedio para la cuenca de Caracoles.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-2 Balance hídrico incluyendo los flujos anuales de entrada y salida de agua subterránea (1979-2020) de todas las cajas acuíferas simuladas por el modelo WEAP-Caracoles.**

**Tabla 4-9 Demandas simuladas (m<sup>3</sup>/mes) desde todos los nodos de demanda disponibles en la cuenca de Caracoles. Los escenarios de gestión incluyen las demandas asociadas a la activación de derechos de agua dentro de toda la cuenca.**

<b>Escenario Principal</b>	<b>Escenario Perturbado</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>
Escenario Climático 1	Referencia	2.899.147.126	2.024.776.635	1.272.312.375	1.602.686.097	2.904.826.585	4.307.031.601	5.265.426.203	5.847.324.212	6.044.924.172	5.265.228.153	4.030.595.082
Escenario Climático 2		2.899.160.090	2.024.784.773	1.272.340.116	1.602.715.960	2.904.852.209	4.307.050.161	5.265.440.633	5.847.331.751	6.044.924.468	5.265.229.037	4.030.603.500
Escenario Climático 1	Escenario de Gestión 1	2.899.760.442	2.025.410.395	1.272.925.691	1.603.319.857	2.905.460.345	4.307.644.917	5.266.059.962	5.847.937.528	6.045.557.932	5.265.861.913	4.031.167.511
Escenario Climático 2		2.899.773.406	2.025.418.533	1.272.953.432	1.603.349.720	2.905.485.968	4.307.663.477	5.266.074.393	5.847.945.067	6.045.558.227	5.265.862.797	4.031.175.928
Escenario Climático 1	Escenario de Gestión 2	2.897.559.422	2.023.136.008	1.270.724.671	1.601.045.470	2.908.289.248	4.305.480.396	5.263.785.563	5.845.736.509	6.043.283.545	5.263.587.526	4.029.113.226
Escenario Climático 2		2.897.572.387	2.023.144.146	1.270.752.412	1.601.075.333	2.908.677.744	4.308.795.669	5.263.971.625	5.847.862.039	6.043.283.839	5.263.588.410	4.029.121.643
Referencia (1980-2020)	Referencia (1980-2020)	2.899.150.241	2.024.778.629	1.272.318.975	1.602.693.216	2.904.832.744	4.307.036.251	5.265.429.953	5.847.326.322	6.044.924.541	5.265.228.560	4.030.597.176



La combinación de los escenarios climáticos y los escenarios de gestión reveló importantes brechas que podrían afectar el manejo de aguas la cuenca de Caracoles. Por ejemplo, una reducción de las precipitaciones acumuladas en el tiempo, combinada con la activación de todos los derechos de agua y patentes asociados a las concesiones mineras implica cambios importantes en el almacenamiento de agua subterránea de la Cuenca de Caracoles (ver detalles en Tabla 4-9). Esto se verifica al comparar el almacenamiento del escenario de referencia en comparación con el Escenario Climático 2 combinado con el Escenario de Gestión 2 en donde el volumen de agua subterránea se reduce en promedio 286.887.316 m<sup>3</sup> por año para toda la cuenca de Caracoles.

Tomando en consideración las principales brechas asociadas a los resultados del modelo WEAP, la capacidad de la cuenca de poder sustentar las demandas futuras puede ser evaluada mediante el establecimiento de un radio de sustentabilidad hídrica que permita garantizar efectivamente la sustentabilidad de la cuenca en el mediano y largo plazo. En este contexto, desde los resultados más pesimistas de la modelación WEAP (Escenario Climático 2 y Escenario de Gestión 1), es posible observar que el volumen de agua anual que se necesitaría para satisfacer las demandas futuras crecientes, asociadas a cambios climáticos con reducción en la acumulación de las lluvias dentro del dominio de la cuenca de Caracoles, alcanzaría a los 33.557.418 m<sup>3</sup>. Asimismo, si consideramos que la recarga directa anual puede fluctuar entre 0 a 154.8 l/s (0 a 4.881.773 m<sup>3</sup>), podríamos concluir que dicha situación implicaría un radio de sustentabilidad (demandas/ofertas) de 6.87 veces, lo cual se considera un valor extremadamente alto para las características naturales de esta cuenca.

## **5 BRECHAS EXISTENTES Y COMENTARIOS GENERALES**

### **5.1 Evaluación de las Brechas de Simulación Hidrológica**

#### **5.1.1 Identificación de Brechas para la Modelación Hidrológica Base**

Las principales brechas asociadas a los resultados del modelo WEAP tienen que ver con la capacidad de la cuenca de poder sustentar las demandas futuras, mediante el establecimiento de un radio de sustentabilidad hídrica que permita garantizar efectivamente la sustentabilidad de la cuenca en el mediano y largo plazo.

Tomando en consideración las principales brechas asociadas a los resultados del modelo WEAP, la capacidad de la cuenca de poder sustentar las demandas futuras puede ser evaluada mediante el establecimiento de un radio de sustentabilidad hídrica que permita garantizar efectivamente la sustentabilidad de la cuenca en el mediano y largo plazo. En este contexto, desde los resultados más pesimistas de la modelación WEAP (Escenario Climático 2 y Escenario de Gestión 1), es posible observar que el volumen de agua anual que se necesitaría para satisfacer las demandas futuras crecientes, asociadas a cambios climáticos con reducción en la acumulación de las lluvias dentro del dominio de la cuenca de Caracoles, alcanzaría a los 33.557.418 m<sup>3</sup>. Asimismo, si consideramos que la recarga directa anual puede fluctuar entre 0 a 154.8 l/s (0 a 4.881.773 m<sup>3</sup>), podríamos concluir que dicha situación implicaría un radio de sustentabilidad (demandas/ofertas) de 6.87 veces, lo cual se considera un valor extremadamente alto para las características naturales de esta cuenca.

#### **5.1.2 Identificación de Brechas para el modelo Subterráneo Conceptual**

Las brechas identificadas como parte del análisis hidrogeológico regional para la cuenca de estudio y en el modelo hidrogeológico conceptual del sector piloto corresponden, principalmente, a la escasa información base disponible en algunos sectores para definir y caracterizar la dinámica de las aguas subterráneas, información que tiene relación con datos hidrometeorológicos para el cálculo de recarga, datos de las características del subsuelo como geofísica o estratigrafía de pozos para definir unidades hidrogeológicas y geometría acuífera, datos de ensayos de permeabilidad para establecer los parámetros hidráulicos del acuífero, datos de niveles estáticos para establecer la piezometría de los mismos y datos hidroquímicos para definir la evolución y recorrido de las aguas subterráneas.

- i. A nivel cuenca, existe una escasa información de datos hidrometeorológicos continuos y ellos corresponden, principalmente, a estaciones meteorológicas concentradas en la zona costera, en la ciudad

de Antofagasta, además de las situadas en la depresión intermedia, en los poblados de Baquedano y Sierra Gorda, quedando gran parte de la cuenca sin información de larga data de variables como la precipitación y temperatura, fundamentales para los cálculos de recarga. Así también, no existen en la cuenca estaciones de monitoreo de niveles estáticos, que permitan reconocer las variaciones del recurso hídrico subterráneo y la piezometría de los acuíferos. Así como tampoco existen, estaciones de monitoreo de calidad de agua subterránea, para reconocer variaciones de los parámetros fisicoquímicos y elementos disueltos, información fundamental para establecer relaciones entre los flujos y potenciales efectos de contaminación.

- ii. A nivel local, en la subcuenca definida como sector piloto para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual, la información requerida para aquello, vale decir: estratigrafía de pozos, geofísica, monitoreo de niveles, ensayos de permeabilidad, calidad de agua y datos hidrometeorológicos; se concentra en sectores puntuales de la subcuenca, donde se emplazan los proyectos mineros principales, a saber: Minera El Tesoro, Spence y Sierra Gorda, quedando importantes zonas de esta subcuenca, sin información hidrogeológica, y la información que existe, tiene una estadística por un período no superior a 20 años, generada para reportar antecedentes en el marco de compromisos ambientales. En parte de estas zonas sin información, en particular, entre el distrito minero Centinela y el poblado de Sierra Gorda, se realizó, como parte de este PEGH, un estudio geofísico que entregó información de la geometría acuífera, sin embargo, gran parte de la zona baja y toda la zona alta de la subcuenca Quebrada de Los Arrieros carece de información hidrogeológica, fundamental para realizar un modelo de flujos confiable, que permita representar con menor incertidumbre la dinámica y recarga de aguas subterráneas en este sector, el cual dentro de una cuenca caracterizada por su hiper-aridez, representa la zona con mayor potencial de generar escorrentía subterránea, por su altitud y vecindad a las cuencas que se ven afectadas por eventos de lluvias del invierno altiplánico.

## **5.2 Comentarios Generales**

### **5.2.1 Consideraciones y Sugerencias para el proceso de mejora y actualización del Modelo Hidrológico WEAP**

Dentro de las principales consideraciones para el proceso de mejora continua y actualización del modelo WEAP construido en el marco de este proyecto se recomienda:

(1) El establecimiento de redes de monitoreo que incluyan la colección de múltiples datos hidrometeorológicos en las unidades hidrológicas y SHACS de la cuenca de Caracoles. Estos datos servirán para establecer líneas base de datos de referencia, las cuales no se encontraron disponibles para la construcción del modelo WEAP-Caracoles. Flujos como precipitación, temperatura, dirección y velocidad del viento, radiación solar, humedad ambiental, fluctuaciones de los niveles de las lagunas en los sistemas salares, monitoreo de los niveles de aguas subterráneas, entre otros.

(2) Avanzar la conceptualización hidrogeológica y la definición de los sistemas hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHACs) establecidos en este plan, mediante la construcción y calibración de un modelo numérico regional para la simulación de aguas subterráneas en las cuencas Endorreicas.

(3) Actualizar continuamente el modelo WEAP-Caracoles con nuevos datos de entrada disponibles y establecer los protocolos necesarios para el acople exitoso de WEAP y un modelo numérico regional de simulación de Aguas subterráneas.

### **SUBANEXOS DISPONIBLES EN FORMATO DIGITAL**

Anexo H1	Representación 3D Acuífero
Anexo H2	Modelo WEAP Ejecutable
Anexo H3	Cuenca Piloto
Anexo H4	Capacitaciones

**ANEXO I**  
**PARTICIPACIÓN CIUDADANA**

## **1. Recopilación de antecedentes de participación ciudadana en la cuenca Quebrada Caracoles**

Los principales documentos revisados son el “Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta” (Arrau Ingeniería, 2012) y el “Plan Estratégico de Gestión de Recursos Hídricos de la Región de Antofagasta” (Arcadis, 2016). A continuación, se presenta un resumen de los principales temas abordados en los procesos participativos, para más detalles ver Apéndice I-01: Recopilación de Antecedentes en la cuenca Quebrada Caracoles.

Los antecedentes más recientes se encuentran en el documento “Plan Estratégico de Gestión de Recursos Hídricos de la Región de Antofagasta” (Arcadis, 2016), quienes realizaron entrevistas a diversos actores del mundo público y privado, y talleres en seis (6) localidades, siendo el realizado en la ciudad de Antofagasta el único vinculado directamente con la cuenca Quebrada Caracoles. Entre los discursos identificados, destaca el relacionado con la falta de información existente sobre el agua, tanto en cantidad como en calidad. Se considera relevante que las distintas instituciones del estado cuenten con la información necesaria sobre el recurso hídrico para tomar decisiones y fiscalizar, así como también, el generar una alianza público-privada para compartir e integrar la información sobre el recurso hídrico en la región. En tal sentido, se plantea la posibilidad de crear una corporación desde el gobierno regional. También, se estima necesario que el Estado cuente con los recursos que le permitan una adecuada gestión de los recursos hídricos, con capacidad de generar información y planificar. Para ello se propone realizar avances en la descentralización fortaleciendo los equipos regionales que trabajan en los territorios (Arcadis, 2016).

Se reconoce la utilidad de hacer un Plan Estratégico, pero se menciona que ha habido varios estudios sobre el recurso hídrico en la Región, pero no se ha visto su aplicabilidad. Se sostiene que la DGA hace permanentes diagnósticos para evaluar las necesidades de la población, además de planificar cómo abordar y superar esas brechas. Se plantea la necesidad de coordinarse con Sernageomin, ya que han estado trabajando en temas de agua (por ejemplo, modelando acuíferos). Al respecto, un punto relevante dice relación con la eficiencia de los diagnósticos, se sostiene que no se debe perder tiempo ni recursos replicando el mismo proyecto o análisis. Antes de proponer líneas de acción, se debe verificar que los estudios no han sido realizados previamente. También aparece como relevante la calidad del diagnóstico, porque hay información faltante e información errada, y la fiscalización de las inversiones vinculadas al recurso hídrico (Arcadis, 2016).

Se enfatiza la necesidad de fortalecer la labor de la Mesa Público-Privada del Agua, y se reconoce que, a partir del nombramiento del Delegado Presidencial del Agua, ha habido intentos de instalar instancias de diálogo y participación en la Región. Por su lado, la CNR informa que existe una comisión de riego a nivel regional, que se reúne de manera bimensual para discutir y debatir temas de agua y riego. Se indica que en la Región se han desarrollado varios proyectos para la gestión en temas medioambientales relacionados con el agua, los que han sido financiados por el Global Environmental Fund - GEF. Para una adecuada gobernanza es imprescindible definir si se considera al agua un bien económico o un bien social, esto se debe hacer antes de definir los objetivos del Plan (Arcadis, 2016).

Finalmente, los principales temas discutidos con representantes de organizaciones sociales y asociaciones gremiales en la ciudad de Antofagasta fueron los siguientes:

- Agua para consumo humano: Se propone restringir el uso de agua dulce sólo para consumo humano y exigir uso de agua desalada para uso minero e industrial.
- Agua y arborización: Se propone que los proyectos de arborización debieran incluir recursos para mantención; por ejemplo, con proyectos para el tratamiento y uso de aguas grises.
- Calidad de la información respecto a cobertura de agua potable: Se considera que los servidores públicos no tienen información confiable y actualizada respecto a la cobertura de agua potable en la Región, ya que los diagnósticos se hacen sin ir al terreno.
- Población flotante y disponibilidad de agua para consumo: Hoy ha mejorado la provisión en la ciudad, pero el aumento de la población flotante podría traer presión sobre el servicio.
- Iniciativas particulares para el uso de aguas grises: En una población de Antofagasta se han realizado proyectos para reutilizar el recurso en cultivos y áreas verdes urbanas. Se propone la promoción de proyectos que incentiven a que la comunidad desarrolle este tipo de proyectos.
- Fiscalización a empresas sanitarias: Hay pérdidas de agua en las cañerías; altos costo del agua (por ejemplo una familia de 3 personas gasta alrededor de \$50.000 al mes); uso industrial del agua al mismo precio que el consumo de la comunidad.
- Eficiencia en el uso: Es necesario desarrollar proyectos para promover la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, principalmente al nivel de la industria y la minería.
- Calidad del agua para consumo: Se requiere fiscalización de la calidad del agua del grifo.



Otros planteamientos relacionados con la gobernanza se encuentran en el "Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta" (Arrau, 2012), que incluye a la cuenca Quebrada Caracoles. En este documento se destaca que la situación de los recursos hídricos en la Región de Antofagasta, han estado asociada a las labores productivas, ya que la industrialización de la zona es la principal causante -junto a las condiciones medioambientales que caracterizan a la Región- de la actual escasez de agua aún a riesgo de poner en peligro su disponibilidad para el consumo humano. Existiendo una gran competencia y presión por obtener recurso hídrico por parte de las empresas extractivas (mineras), son frecuentes las compras de derechos, las demandas por exploraciones subterráneas y la búsqueda de abastecimientos alternativos (desalinización de agua de mar) aunque ello no necesariamente signifique una liberación de caudales superficiales o aguas subterráneas. La escasez y contaminación del agua compromete la convivencia de otros actores productivos y a la ciudadanía en general (Arrau, 2012).

Este mismo documento del año 2012 señala que distintas instituciones públicas constatan que no existen estudios técnicos que permitan determinar fehacientemente las características de los acuíferos o el impacto de la explotación minera sobre los mismos. Se quejan de que no cuentan con los instrumentos adecuados para resolver la profusión de solicitudes de exploración y aprovechamiento de agua, como son los casos de exploración y prospección de aguas subterráneas. Todos los entrevistados plantean que la capacidad de resolver la escasez del recurso hídrico y mitigar la contradicción entre su explotación en faenas mineras y un uso sustentable depende de la voluntad de las empresas mineras por invertir en tecnologías que permitan reutilizar el agua, obtenerla a través de la desalinización del agua de mar o su uso directo (como agua cruda). Lo cual traerá otros problemas, tales como el almacenamiento, residuos y/o contaminación. En esta perspectiva la ONEMI plantea la construcción de 22 plantas de osmosis para purificar el agua con lo que se contempla dar cobertura a toda la Región (Arrau, 2012).

En el ámbito de las relaciones o interacciones que se producen entre los actores en miras a resolver estas problemáticas, resulta interesante constatar que para la mayoría de los entrevistados/as la relación intersectorial, así como entre/con organizaciones es fundamental para hacerse cargo del problema. En tal sentido, se observa una búsqueda de estrategias, que involucra a las empresas mineras, para construir alternativas de sustentabilidad del agua en el territorio. A este respecto, existen proyectos que en conjunto con la iniciativa privada han permitido generar innovaciones no tan sólo en la obtención de agua sino que también en torno al mejoramiento de la calidad de esta, con el objetivo de

diversificar cultivos agrícolas (caso de Lomas Bayas y la planta de limpieza de arsénico y boro). También se destacan los convenios de instituciones públicas como el INDAP, con actores académicos, como la Universidad Arturo Prat, para generar un piloto de plantas de limpieza de aguas cuyos resultados podrían replicarse por parte de los agricultores (Arrau, 2012).

Es necesario comprender los procesos de transformación de los espacios regionales en Antofagasta, donde la minería, junto con otros actores sociales y productivos (turismo, migración, entre otros), han incrementado su demanda por agua complejizando el escenario de planificación e intervención. “Esos son temas importantes que hay que considerarlos, porque aquí una gota de agua es importante, un litro por segundo alimenta a 100 mil habitantes” (Entrevista DOH en Arrau, 2012). En el mismo sentido, para el SEREMI de Medio Ambiente se requiere estudiar y buscar alternativas para impulsar un desarrollo racional, no se busca poner freno a la minería sino buscar alternativas que puedan garantizar una convivencia cuyo norte sea la garantía de la sustentabilidad de los recursos y la calidad de vida (Arrau, 2012).

Con relación a los contenidos del Plan Estratégico se considera importante que este cuente con información de terreno para lograr un resultado acorde a la realidad. Para ello se requiere de un diagnóstico que permita redefinir el destino de los usos del recurso, y se debe tener en cuenta que algunos actores sociales tienen desconfianza respecto a este tipo de iniciativas, dado el potencial aprovechamiento de sus resultados por parte de los intereses de las grandes empresas. Por su parte, la empresa Minera El Tesoro, ubicada al interior de la cuenca Quebrada Caracoles -en las cercanías de Sierra Gorda-, mostraron interés por el Plan Estratégico el año 2012, pues uno de los problemas que enfrentan es la falta de comunicación entre los distintos actores, tanto gobierno, como empresa privada y comunidades. El principal desafío, según el Superintendente de Medio Ambiente de la minera El Tesoro, es “tener datos que sean manejados por un ente centralizado, para saber exactamente cuál es el balance hídrico real, es decir, cuánta agua hay disponible, cuánta de esa agua se necesita para mantener a las comunidades y los servicios ambientales y, después, el resto de los usuarios. Para eso es muy importante robustecer la red de monitoreo, para que sepamos cuánto sale exactamente de cada parte, sobre todo en los usuarios menores que son los menos regulados” (Arrau, 2012: Anexos PAC 6-50).

## 2. Mapa de actores

El Mapa de actores es una herramienta que permite reconocer las estructuras sociales y/o redes de relacionamiento social de un determinado territorio, mediante la identificación de actores sociales clave o stakeholder, los que pueden ser personas, grupos u organizaciones que tienen interés en un proyecto o programa, y tienen la capacidad de influenciar significativamente su ejecución. Es decir, son actores que tienen algo que ganar o perder, y poseen información, recursos y experiencia. En otras palabras, el actor social clave es una unidad generadora de acción o de relación social, que opera siempre con orientaciones, motivos, expectativas y fines, dentro de una situación determinada. Por lo tanto, los actores sociales o stakeholders se identifican y definen en relación a un aspecto específico de la realidad, tópico o asunto sobre los cual las personas realizan una acción concreta (Tapella, 2007).<sup>2</sup>

En este caso, un proceso de transformación de la gestión hídrica de la cuenca desde un modelo enfocado en el aprovechamiento hacia otro orientado a la gestión integrada de cuenca se relaciona con diversos tipos de actores sociales clave. En el caso de la cuenca Quebrada Caracoles se identificaron cinco (5) tipos de actores:

- i. Actores Públicos: Aquellos dependientes del Gobierno y/o el Estado de Chile, e incluye a los funcionarios de los distintos ministerios, servicios públicos, gobiernos regionales y municipalidades.
- ii. Actores Político: Incluye autoridades electas como alcaldes, concejales, gobernadores y/o parlamentarios relacionados de manera directa o indirectamente con la cuenca.
- iii. Actores Privados: En esta categoría se incluyeron aquellos actores vinculados a la transformación de los recursos naturales en productos esenciales, a gran y mediana escala en la cuenca.
- iv. Actores de la Sociedad Civil: Se consideran en esta categoría a todas aquellas organizaciones formales e informales que buscan influir en la toma de decisiones en el ámbito público. Se incluyen a las Juntas de Vecinos, organizaciones de regantes, a los Comité de Agua Potable Rural (APR), las organizaciones indígenas y organizaciones territoriales, formales e informales relacionadas con el medioambientales, turismo y el patrimonio, entre otras.

---

<sup>2</sup> Tapella, E. (2007) El mapeo de Actores Claves, documento de trabajo del proyecto Efectos de la biodiversidad funcional sobre procesos ecosistémicos, servicios ecosistémicos y sustentabilidad en las Américas: un abordaje interdisciplinario", Universidad Nacional de Córdoba, Inter-American Institute for Global Change Research (IAI).

- v. Actores Académicos, Profesionales y/o Técnicos: Esta tipología incluye a las universidades, centros de estudios, colegios profesionales, ONG, consultoras, investigadores, asesores y/o expertos.

## **I. Listado Largo de Actores Identificados en la cuenca**

Un primer paso es la elaboración de un listado largo de actores a partir de la revisión de los procesos participativos del "Plan Estratégico de Gestión de Recursos Hídricos de la Región de Antofagasta" (Arcadis, 2016) y el "Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta" (Arrau Ingeniería, 2012), complementado con caracterización social y cultural de la cuenca (ver capítulo 2.5 Caracterización socio cultural), la revisión de redes sociales, medios de comunicación y respuestas recibidas desde los Servicios Públicos a través de la "Ley de Transparencia". Es importante recordar que el Mapa de Actores es un proceso iterativo, de constante actualización. Sin embargo, destaca la ausencia de actores tradicionales en la gestión hídrica en Chile como los son las OUA -Organizaciones de Usuarios de Agua- que en esta cuenca han sido reemplazadas por propietarios de DAA tales como la Compañía Minera Picacho de CODELCO (75,8 l/s) y la empresa SQM (68,3 l/s), quienes poseen un porcentaje importante de los DAA otorgados en la cuenca Quebrada Caracoles.

### **i. Actores Públicos:**

- Unidad de Organización de Usuarios de Aguas y Eficiencia Hídrica - DGA Nacional
- MOP Antofagasta
- DGA MOP Antofagasta
- DOH MOP Antofagasta
- Dirplan MOP Antofagasta
- Arquitectura MOP Antofagasta
- SISS Antofagasta
- MINAGRI Antofagasta
- CNR MINAGRI Antofagasta
- INDAP MINAGRI Antofagasta
- SAG MINAGRI Antofagasta
- CONAF MINAGRI Antofagasta
- MMA Antofagasta
- SEA MMA Antofagasta
- SMA Antofagasta

- CONADI MDSyF Antofagasta
- Min. Minería Antofagasta
- MINVU Antofagasta
- Min. de Salud Antofagasta
- Min. de Economía, Fomento y Turismo de Antofagasta
- ONEMI Antofagasta
- GORE Antofagasta
- I.M. de Antofagasta
- I.M. de Sierra Gorda

ii. Actores Político:

- Gobernador - GORE Antofagasta
- Consejeros (OOPP, Salud y MMAA)– GORE Antofagasta
- Concejales, Antofagasta

iii. Actores Privados o Empresas

- Aguas Antofagasta
- Minera Lomas Bayas
- SQM – Pampa Blanca y Salar del Carmen
- Minera Escondida MEL
- CODELCO - Compañía Minera Picacho SCM
- Compañía Minera Centinela (El Tesoro y Esperanza)
- Compañía Minera Sierra Gorda SCM
- Compañía Minera Spence
- Compañía Minera Algorta Norte
- Compañía Minera Mantos Cooper
- Compañía Minera Meridian - El Peñón
- Compañía Minera Antofagasta Minerals (AMSA) -Aguas Blancas
- Compañía Minera Xtratas Copper Chile
- Asociación de Industriales de Antofagasta
- Ferrocarril Antofagasta Bolivia FCAB
- Empresa de Transporte Ferroviario S.A. (FERRONOR)
- Cámara de Comercio
- Federación de Agropecuario desierto de Atacama

iv. Actores Sociedad Civil

- Unión Comunal J.J.V.V.
- Mesa de buenos vecinos Sierra Gorda
- JJVV nº1 de Sierra Gorda (Baquedano)
- JJVV nº3 de Sierra Gorda (Baquedano)
- JJVV nº2 de Sierra Gorda (Sierra Gorda)
- JJVV nº4 de Sierra Gorda (Sierra Gorda)
- JJVV Villa El Salto de Antofagasta
- Asociación Indígena de Regantes y Agricultores del Kilómetro 12 de Antofagasta.
- Corporación Ecológica y Cultural Caminantes del Desierto
- Comunidad GEN / Corporación GEN

v. Actores Académicos, Profesionales y/o Técnicos:

- CREA Centro Regional de Estudios y Educación Ambiental - Universidad de Antofagasta
- CEITSAZA Centro de Investigación Tecnológica del Agua en el Desierto – Universidad Católica del Norte
- Universidad Arturo Prat
- GEF- Global Environmental Fund

## **II. Categorización de Actores Identificados según Interés e Influencia**

A continuación, se presenta la categorización de cada uno de los actores sociales relevantes identificados en la cuenca en estudio y su respectiva valoración según el grado de interés e influencia; utilizando las categorías de "Alto" y "Bajo". El grado de interés se pondera según la participación del actor en los diversos procesos participativos en relación a la gestión del agua, siendo "Alto" igual o mayor a 2 menciones y "Bajo" una sola mención en ARCADIS (2016) y/o Arrau (2012); para más detalles ver "Apéndice I-1: Recopilación de Antecedentes PAC". Mientras que el grado de influencia se establece según el grado de relación del actor con los recursos hídricos y su gestión en la cuenca, utilizando la distinción del Banco Mundial (BM,2013)<sup>3</sup> entre organismos líderes y operativos en la gestión hídrica como la DGA, la DOH o los propietarios de los DAA (valor "Alto"), y organismos de apoyo como lo son los Municipio, SAG, MINSAL y SERVIU (valor "Bajo"), entre otros.

---

<sup>3</sup> Banco Mundial. 2013. Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua. Unidad de Ambiente y Aguas Departamento de Desarrollo Sostenible Región para América Latina y el Caribe. Elaborado junto con el Gobierno de Chile.

**Tabla I-1: Grado de Interés e Influencias de los Actores**

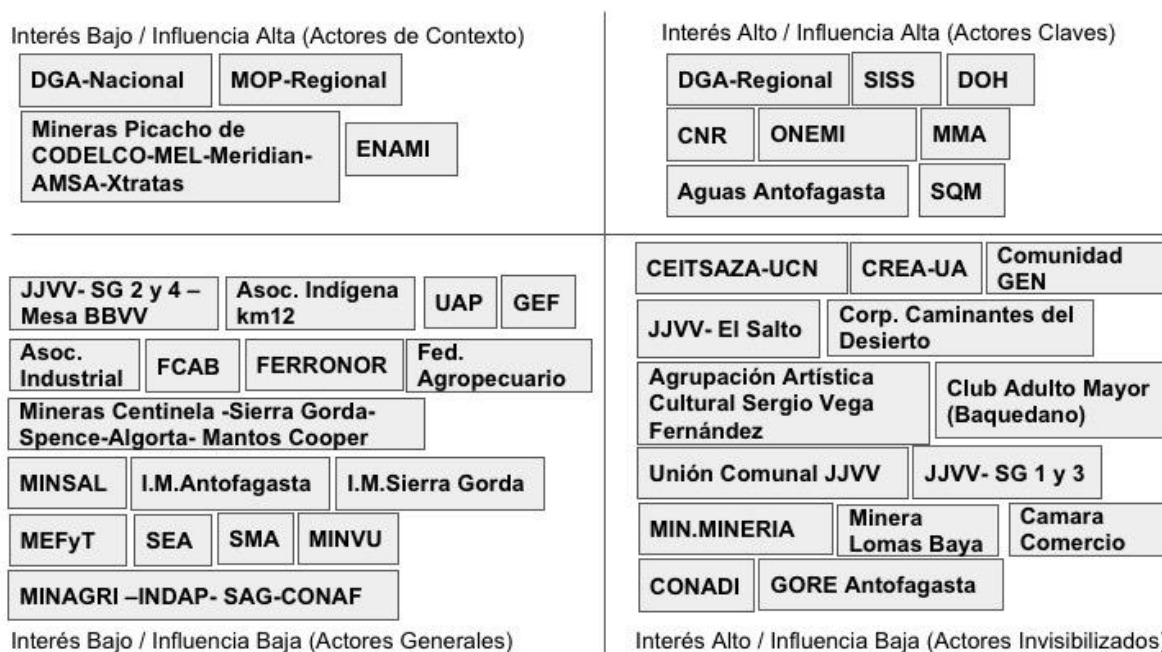
<b>Actor</b>	<b>Interés</b>	<b>Influencia</b>
DGA Nacional	Bajo	Alto
SEREMI-MOP Antofagasta	Bajo	Alto
DGA-MOP Antofagasta	Alto	Alto
SISS-MOP Antofagasta	Alto	Alto
DOH-MOP Antofagasta	Alto	Alto
SEREMI-MINAGRI Antofagasta	Bajo	Bajo
CNR-MINAGRI Antofagasta	Alto	Alto
INDAP-MINAGRI Antofagasta	Bajo	Bajo
SAG-MINAGRI Antofagasta	Bajo	Bajo
CONAF-MINAGRI Antofagasta	Bajo	Bajo
SEREMI-MMA Antofagasta	Alto	Alto
SEA-MMA Antofagasta	Bajo	Bajo
SMA Antofagasta	Bajo	Bajo
CONADI-MDSyF Antofagasta	Alto	Bajo
Min. Minería Antofagasta	Alto	Bajo
MINVU Antofagasta	Bajo	Bajo
MINSAL Antofagasta	Bajo	Bajo
Min. de Economía, Fomento y Turismo de Antofagasta	Bajo	Bajo
ONEMI Antofagasta	Alto	Alto
GORE Antofagasta – Gobernador y Consejeros	Alto	Bajo
I.M. de Antofagasta – Alcalde y Concejales	Bajo	Bajo
I.M. de Sierra Gorda – Alcalde y Concejales	Bajo	Bajo
Aguas Antofagasta	Alto	Alto
Minera Lomas Bayas	Alto	Bajo
SQM – Pampa Blanca y Salar del Carmen	Alto	Alto
Minera Escondida MEL	Bajo	Alto
CODELCO - Compañía Minera Picacho SCM	Bajo	Alto
Compañía Minera Centinela (El Tesoro y Esperanza)	Bajo	Bajo
Compañía Minera Sierra Gorda SCM	Bajo	Bajo
Compañía Minera Spence	Bajo	Bajo

**Tabla I-1: Grado de Interés e Influencias de los Actores**

<b>Actor</b>	<b>Interés</b>	<b>Influencia</b>
Compañía Minera Algorta Norte	Bajo	Bajo
Compañía Minera Mantos Cooper	Bajo	Bajo
Compañía Minera Meridian - El Peñón	Bajo	Alto
Compañía Minera Antofagasta Minerals (AMSA) - Aguas Blancas	Bajo	Alto
Compañía Minera Xtratras Copper Chile	Bajo	Alto
Empresa Nacional de minería (EMANI)	Bajo	Alto
Asociación de Industriales de Antofagasta	Bajo	Bajo
Ferrocarril Antofagasta Bolivia FCAB	Bajo	Bajo
Empresa de Transporte Ferroviario S.A. (FERRONOR)	Bajo	Bajo
Cámara de Comercio	Alto	Bajo
Federación de Agropecuario desierto de Atacama	Bajo	Bajo
Unión Comunal J.J.V.V.	Alto	Bajo
Mesa de buenos vecinos Sierra Gorda	Bajo	Bajo
JJVV n°1 de Sierra Gorda (Baquedano)	Alto	Bajo
JJVV n°3 de Sierra Gorda (Baquedano)	Alto	Bajo
Agrupación Artística Cultural Sergio Vega Fernández (Baquedano)	Alto	Bajo
Club Adulto Mayor (Baquedano)	Alto	Bajo
JJVV n°2 de Sierra Gorda (Sierra Gorda)	Bajo	Bajo
JJVV n°4 de Sierra Gorda (Sierra Gorda)	Bajo	Bajo
JJVV Villa El Salto (Antofagasta)	Alto	Bajo
Comunidad GEN (Estación Uribe)	Alto	Bajo
Asociación Indígena de Regantes y Agricultores del Kilómetro 12 (Antofagasta)	Bajo	Bajo
Corporación Ecológica y Cultural "Caminantes del Desierto" (Antofagasta)	Alto	Bajo
CREA Centro Regional de Estudios y Educación Ambiental - Universidad de Antofagasta (UA)	Alto	Bajo
CEITSAZA - Universidad Católica del Norte (UCN)	Alto	Bajo
Universidad Arturo Prat (UAP)	Bajo	Bajo
GEF- Global Environmental Fund	Bajo	Bajo



A partir de la valoración de los grados de influencia e interés de los actores sociales relevantes identificados, se elaboró una representación visual de la posición de los actores identificados donde se identifican preliminarmente los actores claves, aquellos con alto nivel de interés e influencia en la gestión hídrica como la DGA, MMA, ONEMI, SISS, DOH y CNR junto a privados que tiene un volumen importante de derechos de aprovechamientos de agua como SQM y la sanitaria Aguas Antofagasta; estos actores son considerados "actores claves" o *stakeholders*.



**Figura I-1: Diagrama Influencia / Interés de Actores Sociales en la cuenca Quebrada Caracoles**

### 3. Plan de Participación y Comunicación

El presente Plan de Participación y Comunicación considera las orientaciones entregadas por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) a través de su "Manual de Participación Ciudadana" (2008) y la "Guía de Gestión para la Participación Ciudadana" (2018) que orientan la gestión participativa. Además, se tiene a la vista las orientaciones entregadas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) a través de su "Inventario de Metodologías de Participación Ciudadana en el Desarrollo Urbano" (2010), el texto de la División de Organizaciones Sociales (DOS) del Ministerio Secretaría General de Gobierno "Criterios y Orientaciones para la Implementación de Mecanismos de Participación

Ciudadana en la Gestión Pública” (2015), y el estándar internacional Spectrum of Public Participation desarrollado por la Asociación Internacional para la Participación Pública (IAP2). Instrumentos que, pese a sus distintos orígenes, son en gran parte no sólo compatibles, sino complementarios.

En Chile, la participación ciudadana en la gestión pública está normada por una serie de cuerpos legales y administrativos que, con distintas jerarquías, orientan y aseguran el derecho a participar. Los principales textos legales son la Ley 18.575 de Bases Generales del Estado (2000) y la ley 20.500 sobre Participación Ciudadana en la Gestión Pública (2011), que señalan que la Administración del Estado deberá observar, entre otros principios, el de transparencia y el derecho de las personas a participar en igualdad de oportunidades en la vida nacional.

La Participación Ciudadana se define como el “proceso de cooperación mediante el cual el Estado y la ciudadanía identifican y deliberan conjuntamente acerca de los problemas públicos y sus soluciones con metodologías y herramientas que fomentan la creación de espacios de reflexión y diálogos colectivos, encaminados a la incorporación activa de la ciudadanía en el diseño y elaboración de las decisiones públicas” (Presidencia de la República, 2014:2).

Uno de los principales factores de éxito en la participación ciudadana es la presencia de la visión territorial, entendida como “el conocimiento del territorio, sus comunidades, los intereses, las actividades productivas, los sueños, los anhelos, los problemas” (MOP, 2018:119).

Tradicionalmente los espacios de encuentro y deliberación entre las autoridades y la ciudadanía se encontraban circunscritos solamente a la participación presencial, que tiene la ventaja de que participen personas, grupos, líderes y representantes de organizaciones de la sociedad civil, entre otros. En la actualidad como consecuencia del desarrollo de las tecnologías para la información, es posible construir un espacio de participación virtual de gran influencia y alcance. En este sentido, el uso de internet como canal de comunicación extiende, añade, amplía y posibilita la participación a aquellos ciudadanos/as que por diversos motivos no pueden participar de forma presencial (DOS, 2015).

Existen cuatro niveles de participación ciudadana: Informativa, Consultiva, de Habilitación Social (empoderamiento) y Gestionaria (MOP, 2018). Sin embargo, el presente Plan de Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) solo considera los dos (2) primeros niveles, que según, el modelo Spectrum de la IAP2 se definen de la siguiente manera:

- Nivel Informativo: Que la población pueda conocer e informarse de manera objetiva de los alcances de la intervención, con el fin de que comprenda el problema, las alternativas, las oportunidades y/o las soluciones.

- Nivel Consultivo: Que la población tenga la oportunidad de opinar sobre la materia. Generando un espacio de escucha de sus preocupaciones y aspiraciones. Que sirva además para dar respuesta acerca de cómo influyó la opinión pública en las decisiones finales. Sin embargo, esto no significa que dicha opinión sea implementada.

El nivel Informativo corresponde al nivel básico de la participación, y debe estar presente en todo el proceso de relación con la ciudadanía. Los principales objetivos de este nivel son informar, difundir y educar. El nivel Informativo es una condición básica para los siguientes niveles de participación, pues el involucramiento y la deliberación conjunta requiere que los actores conozcan un mínimo de antecedentes que valide la emisión de cualquier opinión (MOP, 2018).

Mientras que el nivel consultivo corresponde al nivel de cooperación, identificación y deliberación conjunta. En este nivel la ciudadanía participa dando su opinión y haciendo aportes a los temas que se tratan, mientras que le corresponde al Estado atender a estas consideraciones, analizar las factibilidades técnicas, normativas, económicas y otras relevantes e informar las resoluciones que se tomen al respecto (MOP, 2018).

En el plano de la estrategia de comunicación se establecieron tres instancias sucesivas y que se enmarca en un proceso participativo de nivel consultivo orientado tanto hacia los actores claves /stakeholders como hacia los actores con alto interés y baja influencia. Estos últimos caracterizados como actores invisibilizados y que requieren de una estrategia informativa constante que permita identificar actores con grados de influencia en aumento y que potencialmente se transformen actor clave.

- Nivel 1 - Comunicación Formal: Envío de cartas vía e-mail a los actores claves del PEGH solicitando una reunión para presentar los objetivos del proyecto y primeros resultados de la caracterización de la cuenca. Esta comunicación fue reforzada con llamados telefónicos a los actores y/o sus representantes. Además, se enviaron solicitudes de información a ciertos servicios públicos por transparencia para establecer su vinculación con la cuenca en estudio.
- Nivel 2 - Comunicación Directa: Trabajo en terreno visitando a las organizaciones territoriales, autoridades y/o servicios públicos de la cuenca,

entregando cartas de presentación y solicitudes de reunión. Adicionalmente se entregó una presentación con los principales resultados de la caracterización (Etapa 1) a través de un pendrive y/o e-mail para su revisión por parte de la directiva y sus integrantes.

- Nivel 3 – Comunicación Dialógica: Se realizaron reuniones con actores de la sociedad civil para presentar los resultados del PEGH y su cartera de acciones.

Adicionalmente, se realizaron actividades de monitoreo hacia los actores de contexto, aquellos con bajo interés pero alta influencia, así como también hacia los actores generales, con bajo interés e influencia con el objetivo de identificar procesos de transformación o de irrupción de nuevos actores no identificados.

A continuación, se presenta las principales actividades implementadas y una breve descripción de los resultados del “Plan de Comunicación” para los distintos tipos de actores.

**Tabla I-2: Actividades y Resultados del Plan de Comunicación por Actor**

Tipología de Actor	Actores Contactados y Resultados
<p><b>I) Actores Claves o Stakeholders</b></p> <p>DGA MOP Antofagasta</p> <p>SISS Antofagasta</p> <p>CNR MINAGRI Antofagasta</p> <p>MMA Antofagasta</p> <p>ONEMI Antofagasta</p> <p>Aguas Antofagasta</p> <p>SQM – Pampa Blanca y Salar del Carmen</p>	<p><b>DGA – UGAT Antofagasta</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p> <p>7/10/21 Se envía e-mail solicitando reunión con director regional (s) de la DGA Arturo Beltrán. Se agenda reunión para el 18/10/21 en la cual participa UGAT-MOP Lorena Herrera.</p> <p><b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b></p> <p>18/10/21 Reunión virtual con director regional (s) de la DGA Arturo Beltrán y la encargada de la UGAT-MOP Lorena Herrera. Se presentan los resultados de la Etapa 1, se reciben comentarios sobre medioambiente - humedales km.12 y La Negra-, la calidad de las aguas producto de los relaves y presencia de habitantes en Estación Uribe (ver Apéndice I-02: Reunión DGA – UGAT Antofagasta).</p>
<p><b>II) Actores Invisibilizados (Interés Alto/Influencia Baja)</b></p>	<p><b>CONADI MDSyF Antofagasta</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p> <p>El 27/7/2021 se recibe respuesta por transparencia, Folio N°AI002T0008193, a la solicitud de información acerca de</p>

**Tabla I-2: Actividades y Resultados del Plan de Comunicación por Actor**

Tipología de Actor	Actores Contactados y Resultados
<p>CONADI MDSyF Antofagasta</p> <p>Min. Minería Antofagasta</p> <p>GORE Antofagasta</p> <p>Gobernador - GORE Antofagasta</p> <p>Consejeros - GORE Antofagasta</p> <p>Minera Lomas Bayas</p> <p>Minera Escondida MEL</p> <p>Cámara de Comercio</p> <p>Unión Comunal J.J.V.V.</p> <p>Comunidad GEN</p> <p>CREA - UA</p> <p>CEITSAZA - UCN</p>	<p>comunidades y/o asociaciones indígenas al interior de la cuenca Quebrada Caracoles. Al respecto, se señala que:</p> <p>-CONADI, envía listado con 5 Asociaciones en la comuna de Antofagasta, destacando la “Asociación Indígena de Regantes y Agricultores del Kilómetro 12 de Antofagasta” (ver Apéndice I-03: CONADI Respuesta por Transparencia).</p> <p><b>GORE Antofagasta</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p> <p>7/10/21 Se envía e-mail solicitando reunión con Hugo Pizarro de la DIPLAR - División de Planificación Regional- GORE Antofagasta. Se agenda reunión para el 18/10/21</p> <p><b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b></p> <p>18/10/21 Reunión virtual con Hugo Pizarro y Salomé Córdova de la DIPLAR-GORE Antofagasta. Se presenta parte del PEGH y se acuerda agendar una segunda reunión para abordar en profundidad la cuenca Quebrada Caracoles. Destacamos de la reunión la mención a la Mesa Regional del Agua conformada por del Gobernador y que involucra la participación de 29 actores claves a nivel regional y que tuvo su primera sesión presencial el viernes 29/10/21. Entre sus funciones destaca la coordinación intersectorial a nivel local y regional e impulsar las capacidades institucionales y de conocimiento sobre sustentabilidad hídrica. Se observa un potencial aumento en la influencia del GORE y sus consejeros, así como también de los centros investigativos CREA-UA y CEITSAZA-UCN.(ver Apéndice I-04: Reunión GORE Antofagasta).</p> <p><b>Comunidad GEN</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p>

**Tabla I-2: Actividades y Resultados del Plan de Comunicación por Actor**

Tipología de Actor	Actores Contactados y Resultados
	<p>18/1/22 Se envía e-mail y mensajes de telefonía solicitando reunión. Se agenda reunión para el 24/1/22</p> <p><b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b></p> <p>24/1/22 Reunión telefónica con Alfredo Chau presidente de la Comunidad GEN, quien señala que la organización habita el lugar desde 1985. Actualmente viven 4 personas de manera permanente, es un terreno de 12 hectáreas en concesión de Bienes Nacionales (2014) pero solo riegan 4 hectáreas. El agua se la compran a FCAB (viene del río Silala) a un valor aproximado de 0,1 UF el m<sup>3</sup>, hasta un tope de 251 m<sup>3</sup>; sobre esta cantidad el valor del m<sup>3</sup> se multiplica por 3 aproximadamente. Tienen dificultades para acceder a fondos pues son una fundación sin fines de lucro, solicita apoyo económico o acceso a concursos.</p>
<p><b>III) Actores de Contexto (Interés Bajo/Influencia Alta)</b></p> <p>DGA Nacional</p> <p>DOH MOP Antofagasta</p> <p>CODELCO - Picacho SCM</p>	<p>Actividades de monitoreo no muestran movimientos entre los actores de contexto (bajo interés / alta influencia). Ninguno de ellos fue considerado como parte de la Mesa Regional del Agua</p>
<p><b>III) Actores Generales (Interés Bajo/Influencia Baja)</b></p> <p>MOP Antofagasta</p> <p>Dirplan MOP Antofagasta</p> <p>Arquitectura MOP Antofagasta</p> <p>MINAGRI Antofagasta</p> <p>INDAP MINAGRI Antofagasta</p>	<p>Actividades de monitoreo muestran movimientos entre los actores generales (bajo interés / baja influencia), algunos de los cuales fueron considerados como parte de la Mesa Regional del Agua, tales como SEREMI MOP, SEREMI MINAGRI, SEREMI MINSAL, SEREMI MEFyT, SEREMI MINVU, la Federación de Agropecuario desierto de Atacama, la Asociación de Industriales de Antofagasta y el presidente del AMRA (Asociación de Municipalidades de la Región de Antofagasta).</p> <p><b>JJVV n°1 de Sierra Gorda (Baquedano)</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p>

**Tabla I-2: Actividades y Resultados del Plan de Comunicación por Actor**

Tipología de Actor	Actores Contactados y Resultados
SAG MINAGRI Antofagasta	15/10/21 Solicitud de Información DIDECO.
CONAF MINAGRI Antofagasta	21/10/21 Contacto Telefónico con Presidenta
SEA MMA Antofagasta	JJVV nº1 Graciela Vega y se agenda reunión
SMA Antofagasta	presencial por problemas de internet para el
MINVU Antofagasta	26/10/21 a las 19.30-Participarán otras
MINSAL Antofagasta	organizaciones territoriales.
MEFyT de Antofagasta	<b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b>
I.M. de Antofagasta	26/10/21 Reunión presencial con Graciela
I.M. de Sierra Gorda	Vega Presidenta JJVV nº1, Rosa Ulloa
Concejales, Antofagasta	Secretaria JJVV nº1, Esmirna Campos
C.M. Centinela	Presidenta Agrupación Artística Cultural
Sierra Gorda SCM	Sergio Vega Fernández (AAC-SVF), Maritza
C.M. Spence	Bustamante 1 Director AAC-SVF y Gladys
C.M. Algorta Norte	Urquieta Presidenta Club Adulto Mayor
C.M. Mantos Cooper	Baquedano. Se presenta PEGH y resultados
C.M. Meridian - El Peñon	Etapa 1 y se contestan preguntas. Hay
C.M. Antofagasta Minerals (AMSA)	preocupación por los cobros del agua potable,
C.M. Xtratras Copper Chile	la mala calidad del agua y el destino de las
Asociación de Industriales de	aguas tratadas. Preguntan por profundidad y
Antofagasta	calidad de las aguas subterráneas pensando
FCAB	en una solución para la localidad. ¿Cuánta
FERRONOR	agua usan las mineras y en que lo usan?,
	¿por qué tienen DAA si ocupan agua
	desalada? Hay empresas como Flomax con
	DAA pero ya no funcionan. Antiguamente
	usaban agua del ferrocarril que proviene del
	Silala y que aun abastece a quienes viven en
	sus instalaciones. Se dejan volantes
	informativo impreso con los objetivos del
	PEGH, mapa y datos de contacto (fono y e-
	mail) en caso de dudas o preguntas de los
	vecinos.
	<b>JJVV nº3 de Sierra Gorda (Baquedano)</b>
	<b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b>
	15/10/21 Solicitud de Información DIDECO.
	21/10/21 Contacto Telefónico con Osvaldo
	Torres Presidente JJVV nº3 y se agenda
	reunión presencial para el 21/10/21 a las
	17.45.
	26/10/21 Se envía email con presentación

**Tabla I-2: Actividades y Resultados del Plan de Comunicación por Actor**

Tipología de Actor	Actores Contactados y Resultados
<p>Federación de Agropecuario desierto de Atacama</p> <p>Mesa de buenos vecinos Sierra Gorda</p> <p>JJVV n°1,2,3y4 de Sierra Gorda</p> <p>JJVV Villa El Salto de Antofagasta</p> <p>Comunidad GEN</p> <p>Asociación Indígena de Regantes y Agricultores del Kilómetro 12 de Antofagasta.</p>	<p><b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b></p> <p>26/10/21 Reunión presencial con Osvaldo Torres Presidente JJVV n°3. Se presenta PEGH y resultados Etapa 1. Comenta preocupación por aluviones en Baquedano y Sierra Gorda que afectan directamente a las localidades. Necesidad de hacer obras hidráulicas de protección aluvional. Hay preocupación por la mala calidad del agua potable (Aguas Antofagasta) y nuevo proyecto de CRAMSA que pasara cerca de Baquedano llevando agua a Calama. Se entrega volante informativo impreso con los objetivos del PEGH, mapa y datos de contacto en caso de dudas o preguntas de los vecinos.</p>
<p>Corporación Ecológica y Cultural Caminantes del Desierto</p> <p>Universidad Arturo Prat</p>	<p><b>JJVV n°2 de Sierra Gorda (Sierra Gorda)</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p> <p>15/10/21 Solicitud de Información DIDECO.</p>
<p>GEF- Global Environmental Fund</p>	<p>21/10/21 Contacto Telefónico con Margarita Martínez Presidenta JJV n°2 quién señala no encontrarse en la comuna.</p>
	<p>25/10/21 Contacto Telefónico con Julio Echeverría Secretario JJV n°2 quién señala ya no ocupar el cargo.</p>
	<p>26/10/21 DIDECO se compromete a gestionar número de otros dirigentes.</p>
	<p><b>JJVV n°4 de Sierra Gorda (Sierra Gorda)</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p>
	<p>15/10/21 Solicitud de Información DIDECO.</p>
	<p>21/10/21 Contacto Telefónico con Henry Apablaza Presidente JJV n°4 quién señala no querer participar del PEGH.</p>
	<p>26/10/21 DIDECO se compromete a gestionar número de otros dirigentes.</p>



**Tabla I-2: Actividades y Resultados del Plan de Comunicación por Actor**

Tipología de Actor	Actores Contactados y Resultados
	<p><b>DIDECO I.M. Sierra Gorda</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p> <p>15/10/21 Solicitud de reunión con DIDECO, se agenda para el 26/10/21</p> <p><b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b></p> <p>26/10/21 Reunión presencial con encargado de Fortalecimiento Comunitario Ramón Vega. Señala problemas de corte y calidad del agua Potable (Aguas Andinas). Parte de la cuenta del agua es pagado por DIDECO (subsidio), destaca la cantidad de población flotante en Baquedano producto de empresas locales que trabajan para las mineras.</p> <p><b>Villa El Santo - Antofagasta</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p> <p>15/10/21 Solicitud de información DIDECO.</p> <p>15/10/21 Contacto Telefónico con Feliza Godoy presidenta JJVV Villa El Salto-Antofagasta. No responde.</p> <p><b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b></p> <p>27/10/21 Reunión presencial con Feliza Godoy presidenta JJVV Villa El Salto-Antofagasta. Se presenta PEGH y resultados Etapa 1 en relación al aluvión en calle Quito que afecto a sus vecinos el año 1991. Se hace recorrido de la zona afectada (campamento niño feliz), se visita hito conmemorativo de los muertos en calle Quito y las piscinas aluvionales construidas en la qda. Cadenas que actualmente es usado como basural informal. Se conversa con vecinos quienes manifiestan preocupación por deslizamiento de tierras en las faldas de los cerros donde se ubican estanques de Aguas Antofagasta. Se deja volante informativo impreso con los objetivos del PEGH, mapa y datos de contacto en caso de dudas o preguntas de los vecinos.</p>

**Tabla I-2: Actividades y Resultados del Plan de Comunicación por Actor**

Tipología de Actor	Actores Contactados y Resultados
	<p><b>Comunidad GEN- Ex Estación Uribe - Antofagasta</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p> <p>18/01/22 Contacto WhatsApp con Alfredo Chau presidente de la Corporación GEN.</p> <p><b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b></p> <p>24/01/22 Reunión telefónica Alfredo Chau presidente de la Corporación GEN. Se presenta PEGH y se abordan preocupaciones de la comunidad GEN en relación al agua. El objetivo de GEN es probar que se puede "domesticar" el desierto y volverlo sombreado y verde, y, por otra, cultivar la amistad y la fraternidad en una atmósfera limpia de contaminación y libre del ruido incesante de la ciudad. Según su presidente, Alfredo Chau, actualmente viven de manera permanente 4 personas, en un predio de 12 hectáreas de Bienes Nacionales. La principal fuente de agua de esta comunidad proviene de FCAB, quien les vende agua del río Silala (frontera con Bolivia) hasta una cantidad máxima de 251 m<sup>3</sup>; en caso de consumir mayor volumen el precio del m<sup>3</sup> de agua se multiplica por 3 aproximadamente. Para poder seguir desarrollando su proyecto necesitan acceder a nuevas fuentes de agua.</p> <p><b>Corporación Caminantes del Desierto</b></p> <p><b>Nivel 1 - Comunicación Formal</b></p> <p>15/10/21 Solicitud de reunión vía email.</p> <p>18/10/21 Contacto Telefónico con Mauricio González representante de la Corporación se agenda reunión para el 27/10/21 a las 18.30</p> <p><b>Nivel 2 - Comunicación Directa</b></p> <p>27/10/21 Reunión virtual con Mauricio González representante de la Corporación. Se presenta PEGH y resultados Etapa 1. Comenta que humedal de km.12 está muy deteriorado. Recomienda realizar actividades de preservación y restauración ambiental en</p>

**Tabla I-2: Actividades y Resultados del Plan de Comunicación por Actor**

<b>Tipología de Actor</b>	<b>Actores Contactados y Resultados</b>
	la Quebrada del Arriero, aguada de los Ratonos, y la mina de plata de Caracoles.  28/10/21 Se envía email con presentación para su revisión y comentarios por parte de la corporación y sus integrantes a la dirección:  <a href="mailto:caminantesdeldesierto@gmail.com">caminantesdeldesierto@gmail.com</a>  <a href="mailto:caminantes@caminantesdeldesierto.cl">caminantes@caminantesdeldesierto.cl</a>

#### **4. Resultados de la Participación Ciudadana en el PEGH de la Cuenca Quebrada Caracoles**

En el caso de la cuenca Quebrada Caracoles, los estudios anteriores no realizaron actividades participativas al interior de la cuenca siendo los más cercanos aquellos realizados en Antofagasta y Calama. Además, se consideraron las actividades de participación ciudadana realizados por el presente PEGH. En total se identificaron un total de 65 discursos o preocupaciones, siendo la "Gobernanza" (44%) la principal temática abordada, seguida de Infraestructura (26%).

**Tabla I-3: Resultados Temáticos PAC**

<b>Categoría Principal</b>	<b>Menciones</b>	<b>Porcentaje</b>
Gobernanza	29	44%
Infraestructura	17	26%
Medio Ambiente	12	18%
Legal	3	5%
Minería	3	5%
Prácticas Culturales	1	2%
<b>TOTAL</b>	<b>17</b>	<b>100%</b>

El tema de la Gobernanza (44%) se relaciona con la necesidad de realizar trabajos intersectoriales coordinados tanto a nivel de los servicios públicos (DGA-DOH-SISS-MINAGRI-MMA-etc.) como con el mundo privado (empresas) y la sociedad civil (JJVV, comunidades, ONG, centros de investigación etc.). Además, aborda temáticas como el fortalecimiento de las instituciones públicas (mayor personal y atribuciones), la necesidad de tener una planificación estratégica que permita priorizar los recursos hídricos y una red de monitoreo que permita tener información para la toma de decisiones.

La. Segunda temática relevante es Infraestructura (26%) está relacionado principalmente con las desaladoras, su ubicación en la costa, sus efectos y la necesidad de ordenar su instalación y su conducción. Fue abordado por los servicios públicos, señalando que Antofagasta se puede convertir en líder a nivel sudamericano en agua desalada. También, señalaron su interés por aumentar el porcentaje de agua reutilizada para uso industrial (La Negra y Lomas Bayas). Sin embargo, a nivel de la sociedad civil el principal tema el agua potable en las localidades de Baquedano y Sierra Gorda, sus habitantes se quejan del alto costo (subsidiado por el Estado y pagado por la Municipalidad), así como también, de la mala calidad del agua en relación a la usada históricamente desde las estaciones del FCAB (rio Silala). Adicionalmente, se mencionó la necesidad de contar con infraestructura en Sierra Gorda y Baquedano para evitar las inundaciones que se producen cada cierto tiempo producto de las lluvias.

En relación al Medio Ambiente (18%), destaca el Humedal del Km.12 el cual será declarado humedal urbano y su deterioro ambiental, la contaminación de las aguas subterráneas por los relaves mineros y el estado de conservación de los acuíferos . Mientras que el tema Minería se relaciona con el aumento de consumo de agua producto de la baja ley, la optimización del recurso hídrico en las operaciones mineras y la preocupación ciudadana por el consumo de agua subterránea por parte de las mineras (para más detalles ver Apéndice I-05: Análisis Temático de Discursos de los Actores Relevantes).

Finalmente, se realizó un proceso de valorización de las temáticas para la priorización de brechas y acciones del PEGH. De esta manera, cada acción fue puntuada de acuerdo al valor de la temática, es decir la cantidad de veces fue mencionada directamente por los actores, más un valor ponderado (en un 20%) de la categoría principal. Esto se expresa mediante la siguiente fórmula = ("valor menciones temática") + (20% del "valor menciones categoría principal"). Posteriormente, el valor final fue normalizado en un puntaje o índice único que oscila entre 1 y 5, lo que permite su comparación con los otros criterios analizados. A continuación, se presentan las categorías y temáticas, con sus menciones (valores) y su respectivo valor normalizado.

**Tabla I-4: Resultados Temáticos PAC y Valor Normalizado**

Temática	Menciones	Valor Final
<b>Gobernanza (29 - 44%)</b>		
Trabajo Intersectorial	9	5,0
Fortalecimiento Institucional	5	3,8
Planificación Estratégica	4	3,6
Red Monitoreo	4	3,6
Gestión Hídrica Sustentable	2	3,0
Organismo de Manejo de Cuenca	2	3,0
Protección Recursos Hídricos	1	2,7
Acceso a la información	1	2,7
Solución de Conflictos	1	2,7
<b>Infraestructura (17 - 26%)</b>		
Agua Potable	5	3,8
Aluviones	3	3,3
Desaladora	6	4,1
Reutilización de Recursos Hídricos	3	3,3
<b>Medio Ambiente (12 - 18%)</b>		
Calidad del Agua	3	3,3
Disponibilidad del Recurso Hídrico	2	3,0
Estudios/Proyectos	2	3,0
Protección de acuíferos / Aguas Subterráneas + Protección de Ecosistemas Hídricos	5	3,8
<b>Legal (3 -5%)</b>		
DAA	3	3,3
<b>Minería (3 -5%)</b>		
Mantiene consumo de agua dulce / continental	2	3,0
Optimización Recursos Hídricos	1	2,7
<b>Prácticas Culturales (1 - 2%)</b>		
Patrimonio	1	2,7

## **5. Recomendaciones a los Procesos de Participación Ciudadana en la Cuenca Quebrada Caracoles**

A nivel de los actores de la sociedad civil, existe una cierta desconfianza de los estudios y de los procesos de participación ciudadana llevados por consultoras externas. Esto tanto por el uso que puedan dar a la información, como por la continuidad del proceso y el impacto que estos estudios puedan tener. Es por ello que es importante, que estos procesos estén acompañados por una autoridad que respalde y valide el proceso frente a los distintos actores, y que estos procesos sean de carácter vinculante. La participación de autoridades locales y/o de servicios públicos permiten a los actores de la sociedad civil tener un interlocutor identificable y accesible, pues sabe dónde ubicarlo.

La creación de los Consejos de Cuenca debiera ser una prioridad para las futuras actividades de participación ciudadana, por su carácter participativo, transversal y vinculante. Es importante iniciar este proceso, con el fin de poder identificar a los actores que están dispuestos a participar y conocer sus requerimientos para dicha participación.

**SUBANEXOS DISPONIBLES EN DISPONIBLES EN FORMATO DIGITAL**

**ANEXO J**  
**INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA**



### **III. SUBANEXOS**

Anexo J1	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
Anexo J2	Caracterización Ambiental (Disponible en formato digital)
Anexo J3	Derechos de Agua (Disponible en formato digital)
Anexo J4	Infraestructura (Disponible en formato digital)
Anexo J5	Geología de la cuenca
Anexo J6	Resumen Actualización Balance Hídrico (Disponible en formato digital)
Anexo J7	Valorización Económica (Disponible en formato digital)
Anexo J8	Antecedentes demográficos

## **ANEXO J-1**

# **1. ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DE LA GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HIDRÍCOS**

## **I. GENERALIDADES**

La DGA postula que se requiere de un nuevo enfoque de gestión estratégico por cuenca, que permita formular planes de corto, mediano y largo plazo, con resultados concretos de acuerdo con las necesidades propias de cada cuenca a fin de hacer frente a los desafíos que enfrenta Chile para la gestión del agua. Para lo anterior considera que el instrumento a desarrollar debe ser tal que sea posible construir e implementar un Plan de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) a nivel de cuencas hidrográficas.

En consecuencia, la DGA promueve la GIRH a nivel de cuencas como un elemento esencial que dé la gobernabilidad del agua en dicha unidad territorial, entendida como la existencia de sistemas de gestión que posibiliten efectivamente, en un marco de sustentabilidad, la implementación y seguimiento de las políticas de gestión del agua.

## **II. CONTEXTO HISTÓRICO DE LA GIRH**

El concepto de la GIRH nace en el mundo en oposición a las miradas y enfoques fragmentados que se habían venido haciendo a nivel global desde épocas pretéritas, en donde las consideraciones sociales y medioambientales y el concepto del agua como un bien común, fueron obviado principalmente con el advenimiento del mundo moderno y más recientemente, el modelo económico de mercado.

Por lo tanto, para entender por qué la GIRH emerge en el mundo como un proceso necesario, se debe entender el contexto histórico que precedió a su formulación y promoción y que tiene que ver con lo que conservar los bienes comunes y recursos naturales de la humanidad toda.

En particular, se tiene que la instauración de la economía de mercado generó un modo de explotación de los bienes comunes y recursos naturales cuyas características hicieron que finalmente desembocara en una crisis que se inició en los años 80 en el mundo y que se fue incrementando de manera sostenida hasta la fecha, en donde, adicionalmente, el efecto de la sobrepoblación, el cambio climático y muy recientemente la pandemia, y en particular en nuestro país el estallido social, evidenciaron que se debe fomentar de manera urgente un nuevo pacto que permita conciliar las necesidades y condiciones de las personas, los países, los recursos naturales y el desarrollo.

En un contexto mundial, se tiene que en 1979 comenzó en Inglaterra el régimen de Margaret Thatcher, que puso en práctica programas neoliberales para la economía, lo que sumado a una serie de acontecimientos políticos en Estados Unidos y Europa permitieron la aplicación de la teoría de libre mercado en las economías de casi todos los países del norte de Europa occidental, a excepción de Suecia y Austria. Además, la recesión mundial de los años 70 que aumentó los problemas de eficiencia de algunas empresas estatales reenfocó la atención hacia el papel que el sector privado podía desempeñar en el crecimiento económico y en el desarrollo, por considerarse el neoliberalismo como única salida a la crisis económica.

En Chile, tras el golpe de Estado de 1973, se aplicó esta misma teoría neoliberal en donde posteriormente se agregó un componente norteamericano, el de Milton Friedman y la Escuela de Chicago. De esta forma, el Estado debía reducir su tamaño y su rol debía focalizarse en aquellas materias en que el mercado no funcionaba, en tanto que el sector privado se volvía más vigoroso, en especial a través de las grandes corporaciones, y de mayor importancia en las decisiones económicas. Así, la regulación de los mercados se constituía, desde el punto de vista económico, en una de las actividades trascendentales de ese sector. Este modelo económico se vio fortalecido por la garantía constitucional del derecho de propiedad sobre los bienes comunes y los recursos naturales del país.

A nivel regional ocurrieron los primeros indicios de los efectos de este modelo en los años 90, cuando en 1994 en Chiapas se generó una lucha por parte de los campesinos por sus tierras y bienes comunes que les daban sustento y alimentos, en contra de los planes de ajuste estructural del Estado orientado por las instituciones económicas mundiales que buscaba la privatización de las tierras a favor de las corporaciones y el desalojo de los campesinos.

Le siguieron los grandes movimientos campesinos en contra de la deforestación de la Amazonia por parte del negocio de la madera o de liberar tierra para los grandes monocultivos por ejemplo, o la construcción de grandes embalses que impactaron a pueblos y culturas enteros en Brasil y China, respaldados por las políticas de Estado y la llegada de grandes empresas.

A nivel más sectorial, en enero de 1992 se desarrolló la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente: "Cuestiones de desarrollo para el siglo 21", en Dublín, Irlanda, cuya declaración final señaló que la escasez y el uso abusivo del agua dulce planteaba una creciente y seria amenaza para el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente por lo que la salud y el bienestar humanos, la seguridad alimentaria, el

crecimiento industrial y el ecosistema de que dependen se hallaban en peligro, a no ser que la gestión de los recursos hídricos y del suelo se efectuara de forma más eficaz en dicho decenio que en el pasado.

En dicha conferencia se establecieron cinco principios rectores<sup>4</sup> que fueron la base para la formulación de la GIRH:

Principio N° 1: El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial como sostén de la vida, el desarrollo y el medio ambiente.

Dado que el agua sustenta todas las formas de vida, la gestión sostenible de los recursos hídricos requiere un enfoque integrado que vincule al desarrollo económico y social con la protección de los ecosistemas naturales. La gestión eficaz establece una relación entre el aprovechamiento del suelo y del agua en la totalidad de una cuenca fluvial o un acuífero.

Principio N° 2: El aprovechamiento y la gestión del agua debe basarse en un planteamiento participativo, en el que intervengan los usuarios, los planificadores y los encargados de tomar decisiones a todos los niveles.

Este planteamiento participativo supone que los encargados de la adopción de las políticas y el público en general cobren una mayor conciencia de la importancia del agua. Dicho planteamiento implica que las decisiones se adoptan al nivel más elemental apropiado, efectuando plenas consultas con el público y dejando participar a los usuarios en la planificación y aplicación de los proyectos sobre el agua.

Principio N° 3: La mujer desempeña un papel fundamental en el suministro, la gestión y la preservación del agua.

Este papel axial de la mujer como usuaria y custodio del medio ambiente vivo rara vez se ha reflejado en acuerdos institucionales para el aprovechamiento y la gestión de los recursos hídricos. La aceptación de este principio requiere políticas positivas que preparen y doten a la mujer de la capacidad para participar a todos los niveles en programas sobre los recursos hídricos.

Principio N° 4 El agua tiene un valor económico en los diversos usos a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico.

---

<sup>4</sup> <https://es.ircwash.org/sites/default/files/71-ICWE92-19134.pdf>

De acuerdo con este principio, es esencial reconocer ante todo el derecho fundamental de todos los seres humanos a tener acceso a un agua limpia y condiciones de salubridad adecuadas por un precio asequible. El haber ignorado en el pasado el valor económico del agua ha conducido al derroche y a la utilización de este recurso con efectos perjudiciales para el medio ambiente. La gestión del agua como un bien económico es un medio importante de conseguir un uso eficiente y equitativo y de alentar la conservación y protección de los recursos hídricos.

En el año 1996 la organización internacional Global Water Partnership (GWP) se fundó con la misión de fomentar la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en base de los principios de Dublín y lograr en último término un mundo con seguridad hídrica.

Este organismo adopta la GIRH como el proceso que debe aplicarse a fin de reemplazar el enfoque tradicional sectorial y fragmentado por uno intersectorial, donde el agua es un componente importante de los ecosistemas, que engloba un valor económico, social y ambiental y que su uso debe estar acorde con el bien común, que asegure igualdad y sostenibilidad de este.

Cabe mencionar también, la aparición de los llamados movimientos antiglobalización cuya mayor visibilización ocurrió en Seattle en 1999, en la tercera Conferencia Ministerial de la OMC, cuyo objetivo principal era ampliar la liberalización del comercio internacional, las personas y la lucha por los bienes comunes y los recursos naturales se convirtieron en protagonistas del proceso político global ya que evidenciaron las falencias y tremendas inequidades, que a su vez generaban enorme inestabilidad, del modelo neoliberal, impuesto económicamente por la OMC y por el G7 (hoy G8). En Seattle ese año, y tras muchas discusiones entre los delegados, e infinidad de disturbios por las constantes manifestaciones de protesta en las calles de Seattle, la Cumbre de la Organización Mundial de Comercio (OMC) fracasó quedando de manifiesto la incompatibilidad entre las prioridades de los grandes bloques comerciales y el reclamo y una fuerte protesta social por los efectos de dicho modelo.

Un evento que evidenció de manera brutal las fallas del modelo de gestión del agua impuesto por los organismos internacionales aconteció entre los meses de enero y abril de 2000 en Cochabamba, Bolivia, en donde se aplicó por parte del gobierno políticas de reestructuración económica teniendo como uno de sus principales elementos el de la privatización, no sólo de las empresas estratégicas sino también de los servicios básicos.

En septiembre de 1999 el Parlamento aprobó la Ley de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario que no incluyó el respeto y la consideración de los sistemas tradicionales de manejo del agua. Un mes después el Gobierno entregó en concesión a un consorcio privado internacional (Aguas del Tunari) la empresa municipal de distribución de agua de Cochabamba y la ejecución del proyecto Misicuni (megaproyecto de agua de usos múltiples), buscando solucionar la crónica escasez de agua en la región.

En su desempeño, Aguas del Tunari prohibió el funcionamiento de sistemas alternativos de distribución de agua en las áreas de concesión de las ciudades, aplicó el principio de recuperación total de costos en la fijación de tarifas sin ninguna gradualidad y sin considerar la participación ciudadana en la fijación de tarifas, las que además fueron indexadas al dólar americano.

La empresa además, fue implacable en iniciar juicios coactivos por falta de pago para usuarios de bajos ingresos y no reconoció el aporte comunitario en ejecución de obras ya existentes.

Ello, generó una enorme ola de protestas y bloqueos que, como primer resultado fue abrir un espacio para discutir la revisión del contrato de concesión y reformar la Ley de Agua Potable, insuficiente como solución a la urgencia generada, en donde finalmente y ante una fuerte presión social, la empresa Aguas del Tunari se retira de Bolivia. El Gobierno boliviano tuvo que aceptar esa decisión y modificar la Ley de Agua.

La Guerra del Agua en Cochabamba fue uno de los conflictos por el derecho al agua más importantes de América Latina que permite entender el impacto de la aplicación a rajatabla de políticas de reestructuración económica sin considerar las otras dimensiones socioeconómicas y ambientales de la explotación de los recursos naturales.

Debe considerarse también en este análisis, el Objetivo de Desarrollo Sostenible, ODS, No 6 "Agua Limpia y Saneamiento", promulgado en 2015 por la ONU, que requería de nuevos enfoques y marcos conceptuales, que articularan e integraran de manera práctica las intervenciones en el sector de Agua Potable, Saneamiento e Higiene, directamente relacionado con GIRH, cuyo cumplimiento no ha sido el esperado. Este tema cobra especial importancia a la luz de la actual pandemia por el coronavirus.

### **III. LA GIRH EN LA ACTUALIDAD**

A 25 años de la instauración del proceso de la GIRH en el mundo, se tiene que éste ha sido un proceso lento y confuso que no ha podido superar el desafío del desarrollo

sustentable del agua en los territorios y que no hace frente de manera efectiva al Cambio Climático, originado en parte por el inadecuado desarrollo de los recursos naturales en el mundo, entre ellos el agua. Uno de los aspectos relevantes que no ha podido implementarse ni fortalecerse de manera robusta es la gobernanza del agua entendida como un sistema que proporciona un marco conceptual, que permite analizar y potenciar la GIRH.

Hoy en día, organismos como el Banco Mundial, hace más de 10 años viene analizando de manera crítica la formulación del tema de la GIRH en el mundo, y plantea que es necesario planificar de una manera diferente<sup>5</sup>, en donde se debe reenfocar la GIRH incorporando las incertidumbres climáticas entre otras, ya que los escenarios de cambio climático no están diseñados para la gestión del agua sino que para la reducción y mitigación de emisiones de GEI y no son muy certeros en temas de eventos hidrometeorológicos extremos pero se intenta bajar o escalar a los aspectos hídricos que incluyen la precipitación y temperatura. Igualmente, señala que los aspectos sociales también involucran incertidumbres que hay que enfrentar ya que generan presiones en la gestión y la planificación del recurso hídrico que se deben resolver en la planificación.

La planificación tradicional que se ha hecho en la GIRH ha sido sobre la base de distintos escenarios en donde se ha supuesto que hay consenso entre los distintos sectores de interés por el agua en los territorios, minimizando principalmente los costos financieros lo que ha llevado a soluciones frágiles ya que no permiten incorporar la flexibilización de esas acciones, tampoco esta planificación ha sido efectiva en la distribución igualitaria entre los sectores ni tampoco ha incorporado adecuadamente la parte social y ambiental y no considera acciones frente a situaciones contingentes: por ejemplo, pandemia, sequía, cambio climático.

Postula que hay que intentar planificar con flexibilidad, resiliencia y robustez adoptando la toma de decisiones bajo incertidumbre como metodología para diseñar inversiones en el tema de la gestión del agua

---

<sup>5</sup> Planificación de Cuenca Participativa y Resiliente, Diego Rodríguez, Especialista Senior de Gestión de Recursos Hídricos del Banco Mundial. Webinar: Gestión Integrada del Agua a Nivel de Cuenca en Chile, <https://www.bancomundial.org/es/events/2021/04/16/webinar-gesti-n-integrada-del-agua-a-nivel-de-cuenca-en-chile#2>

Para ello hay que entender el sistema, su funcionamiento que no está necesariamente bien integrado para luego analizar su vulnerabilidad y que opciones hay para reducir esa incerteza

Un aspecto clave en esto son las decisiones participativas y la planificación colaborativa, la cocreación de todo el proceso, es decir, que todos los colectivos entienden cómo funciona el sistema y de esa forma poder decidir qué se quiere lograr de ese sistema y que se quiere obtener de ese sistema, que se quiere para una determinada cuenca.

Para lo anterior se deben entender y responder algunas cuestiones como:

- Cuál es el Sistema y cuál es el desempeño actual
- Con qué frecuencia y con qué severidad el sistema falla y cómo se recupera
- Cómo se desempeña el Sistema frente a múltiples futuros posibles
- Cuáles son las acciones que reducen la vulnerabilidad, como hacerlas robustas y resilientes

Y finalmente dicho organismo plantea como reflexiones:

- La planificación de la GIRH debe considerar una realidad con una convergencia de serios desafíos que requieren un cambio de actuar
- Considerar que los enfoques de planificación y de priorización, diseño y operación de inversiones tradicionales no son suficientes
- La toma de decisión bajo incertidumbre es útil para mitigar los efectos de la tormenta perfecta
- Soluciones costo-eficientes deben considerar maximizar la robustez y resiliencia de los sistemas y del capital social y natural
- Se requiere como condición sine qua non una institucionalidad sólida a nivel de cuencas con participación en la toma de decisión (gobernanza)

Seguidamente, se debe considerar el enfoque actual de la DGA sobre la GIRH, que dice relación con que se requiere de un nuevo enfoque de gestión estratégico por cuenca, que proporcione conocimiento y diagnóstico para formular planes de corto, mediano, y largo plazo, que generen productos reales de acuerdo a las necesidades propias de cada cuenca, con el fin de formular hojas de ruta trazables, desde la perspectiva DGA para hacer frente a los desafíos que enfrenta Chile para la gestión del agua.

Por ello, la elaboración de "Planes Estratégicos de Gestión Hídrica" (PEGRH) por cuencas del país, a diferencia de los instrumentos de planificación abordados



anteriormente, apuntan a subsanar los problemas identificados en anteriores estudios, principalmente con la incorporación de modelos hidrológicos operacionales superficiales-subterráneos que busca poner en valor la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, permitiendo además mantener actualizaciones en el tiempo, aportando escenarios que entregan valor a los tomadores de decisión, y que permitan establecer una visión temporal de la misma.

Como conclusión respecto de la GIRH, en relación con nuestras cuencas y la realidad mundial y nacional, se deben tener en cuenta aspectos que se están evidenciando de manera indubitable como el cambio climático y el estallido social de octubre de 2019 por el fracaso de un sistema que gestiona los bienes comunes y los recursos naturales que han generado una tremenda desigualdad e inequidad social<sup>6</sup> que debe subsanarse.

Finalmente, y respecto de la pandemia por el coronavirus, es necesario señalar que se ha puesto a prueba la capacidad de los países y sus gobiernos en donde se ha evidenciado que no existe en ningún Estado la capacidad ni la organización para hacer frente y poder superar esta situación, y donde y no sólo respecto de la gestión del agua se deben tener consideraciones diferentes a las que se han tenido.

En relación en este caso de este Plan Estratégico y con la propuesta de actividades dentro del plan de acción, es bueno tener en cuenta que esta vez, y dada la coyuntura que se está viviendo, las propuestas no pueden limitarse a enfoques clásicos o tradicionales ya que son necesarias nuevas e innovadoras propuestas hasta disruptivas puesto que la pandemia ha significado un desafío brutal ya que ha remecido todas las formas de vida, costumbres y hábitos.

El Covid 19 está forzando al mundo y a los países a un cambio de mentalidad colectiva para reformular una nueva hoja de ruta abandonando los enfoques de la vieja escuela de pensamientos y antiguos paradigmas. La forma de hacer las cosas hasta ahora ha sido la receta para un desastre con las consecuencias que estamos viviendo, incluido el ámbito de los planes estratégicos y de las cuencas de nuestra consultoría.

---

<sup>6</sup> Que se ha visto refrendado por los fallos de la corte suprema en cuanto al derecho humano al agua, sentencia Rol N°131.140-2021 y el uso preferente del agua para riego, Rol N° 13.920-2019. <https://www.diarioconstitucional.cl/wp-content/uploads/2021/03/131.140-2021PROTECCION-AGUA-PETORCA-SUPEMA.pdf>

[https://www.cooperativa.cl/noticias/site/artic/20210317/asocfile/20210317110023/laquna\\_maule\\_suprema.pdf](https://www.cooperativa.cl/noticias/site/artic/20210317/asocfile/20210317110023/laquna_maule_suprema.pdf)

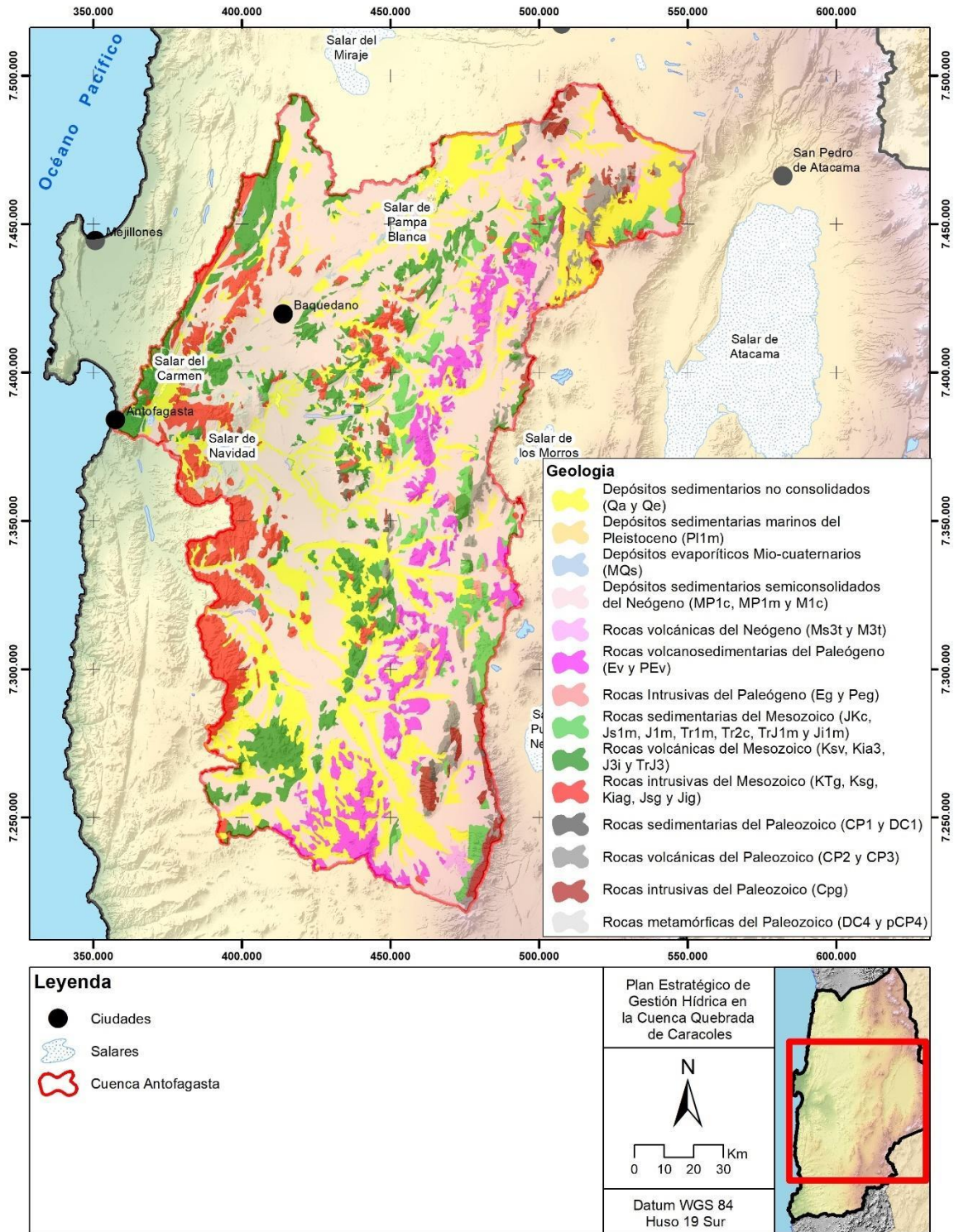
El enfoque tradicional de hacer y proponer acciones hoy por hoy, a la luz del estallido social en lo local y, en lo global, el coronavirus, además del cambio climático largamente anunciado y comprobado, son señales de que se necesita un cambio radical. Este deterioro que finalmente se agudizó de manera extrema con el Covid 19, nos ha puesto en un pie forzado para avanzar en superar este dilema, y obliga a apurar un proceso de aprendizaje que nos prepare como sociedad para encontrar y articular estructuras que cambien la forma de relacionarnos.

Por ello serán necesarias propuestas, desde lo más básico a lo más fundamental, que consideren los aspectos que han sido ignorados hasta ahora y que debieran mejorar el actual sistema económico y fortalecer el rol de lo público como garante de equidad e igualdad a partir de consideraciones mínimas de bienestar y protección de las sociedades lo que incluye como se maneja y gestiona el recurso hídrico.

## **ANEXO J-5**

### **Geología del área de estudio**

En esta sección se describen las unidades de relleno y roca que afloran en las cuencas Quebrada Caracoles y Antofagasta, definidas a nivel regional (Sernageomin, 2003), y agrupadas de acuerdo a tipos de depósitos, rocas y edades, estableciendo algunas de sus características con la información de las cartas geológicas escala 1:100.000, elaboradas por el Sernageomin, que cubren toda el área de estudio (Figura 2-2).



Fuente: Sernageomin 2003.

**Figura 1-2: Geología del área de estudio.**

### Depósitos sedimentarios no consolidados

Estos depósitos se reconocen en la cuenca como escombras de falda, llanuras aluviales o rellenos de actuales quebradas y flujos esporádicos recientes, localizados rellenando los principales valles de la cuenca.

#### **Qa (Pleistoceno-Holoceno)**

Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. En la Depresión Central, regiones I a III: abanicos aluviales. En el área de estudio estos depósitos se reconocen rellenando las principales quebradas y valles de la cuenca, conformando conos y avenidas aluviales, depositados por los cursos esporádicos de escorrentía superficial caracterizados por flujos densos de barro y detritos.

#### **Qe (Pleistoceno-Holoceno)**

Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes tanto activos como inactivos. En las regiones I a VII: dunas de Santo Domingo y Quivolgo. En el área de estudio estos depósitos se reconocen en la ladera oriental del valle que alberga al salar Del Carmen, tramo final de la cuenca de la Quebrada Caracoles.

### Depósitos sedimentarios marinos del Pleistoceno

#### **PI1m (Pleistoceno)**

Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas: coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos. En la costa, regiones II y III: Estratos de Mejillones y de Caldera; en la región X: Estratos de Niebla (Cancagua). En el área de estudio observan unos pequeños afloramientos en el tramo final de la cuenca correspondiente al borde costero y fallaron de la ciudad de Antofagasta.

### Depósitos evaporíticos Mio-cuaternarios

Estos depósitos se reconocen en sectores deprimidos de las subcuencas que conforman el área de estudio, situados en zonas terminales de flujos detríticos o avenidas, conformados por una alternancia de sales y sedimentos finos.

### **MQs (Mioceno-Cuaternario)**

Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos, localmente con bórax y/o litio. En los salares, regiones I a III: salares de Surire, Huasco, Coposa, Pintados, Bellavista, Grande, Atacama, Pedernales y Maricunga. En la cuenca de estos depósitos se encuentran asociados a pequeños salares ubicado en los tramos finales de cursos esporádicos de agua, entre los cuales destacan los salares de Pampa Blanca, del Carmen, de Navidad y Mar Muerto.

### *Depósitos sedimentarios semiconsolidados del Neógeno*

Los materiales que conforman esta unidad corresponden a depósitos aluviales, coluviales y marinos, con grados de variables de consolidación, que se reconocen principalmente en el borde costero y en las principales quebradas del sector, formado llanuras y pampas, sobre las cuales se depositan los sedimentos aluviales recientes. Forman parte de las quebradas del Arriero, Saco, Mantos Blancos, del Profeta y Chimborazo.

### **MP1c (Mioceno Superior-Plioceno)**

Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas. En las regiones I a IV: formaciones Huaylas, Lauca y Pastos Chicos, Gravas del Copiapó; en la región XI: Formación Galeras

### **MP1m (Mioceno Superior-Plioceno)**

Secuencias sedimentarias marinas transgresivas: areniscas, limolitas, coquinas, conglomerados, calizas y fangolitas. En la costa, regiones II a VIII: formaciones La Portada, Bahía Inglesa, Coquimbo, Navidad y Tubul.

### **M1c (Mioceno Inferior-Medio)**

Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas. En las regiones I a III: formaciones Diablo, Chucal, Altos de Pica (superior) y Gravas de Atacama; en las regiones VIII a IX: Formación Cura-Mallín (superior); en la región XI: Formación Las Dunas.

### Rocas volcánicas del Neógeno

Estas unidades de roca se reconocen en el área de estudio como afloramientos pequeños y aislados ubicados en el borde oriental de la cuenca Quebradas Caracoles y corresponden, principalmente, a los depósitos piroclásticos más distales a las fuentes de emisión ubicados en la Cordillera Occidental.

#### **Ms3t (Mioceno Superior)**

Ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos piroclásticos asociados a estratovolcanes. En la Cordillera Principal, regiones I a IV: ignimbritas Ujina, Sifón, San Andrés, Grande y Formación Vallecito.

#### **M3t (Mioceno Inferior-Medio)**

Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso. En la Cordillera Principal, regiones I a III: ignimbritas Huasco, Maricunga y Vega Helada.

### Rocas volcanosedimentarias del Paleógeno

Estas rocas se reconocen en el borde oriental de la cuenca y conforman una secuencia estratificada que se emplaza sobre las rocas volcánicas y sedimentarias cretácicas.

#### **Ev (Eoceno)**

Secuencias volcanosedimentarias: brechas sedimentarias y volcánicas, areniscas e intercalaciones de tobas. En la Precordillera, regiones II a IV: Estratos de Loma Amarilla, formaciones Pircas y Astaburuaga, Gravas del Torín.

Secuencias y centros volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas con intercalaciones de rocas piroclásticas y domos riolíticos. En la Precordillera, regiones I y II: Formación Icanche y Estratos del Cerro Casado; en la Cordillera Patagónica, región XI: domos de Lago Chacabuco y alto Río Cisnes.

#### **PEv (Paleoceno-Eoceno Inferior)**

Secuencias y complejos volcánicos continentales ácidos: domos y rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas asociados a calderas de colapso. En la Precordillera, región III: calderas El Salvador, San Pedro de Cachiyuyo y Lomas Bayas.

Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y domos, andesítico-basálticos a dacíticos, con intercalaciones de rocas piroclásticas y epiclásticas. En la Precordillera, regiones II y III: formaciones Cinchado, Augusta Victoria y Chile-Alemania.

#### Rocas Intrusivas del Paleógeno

Estas rocas corresponden a cuerpos intrusivos emplazados por pulsos magmáticos originados en el paleógeno que generaron gran parte de la mineralización de los yacimientos que se emplazan en el borde oriental de la cuenca (minas Esperanza, Sierra Gorda, Spence, entre otras) y en las cuencas vecinas (Chuquicamata, Escondida, etc).

#### **Eg (Eoceno, 52-33 Ma)**

Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a V; en la Cordillera Patagónica, región XI: archipiélago de los Chonos.

#### **PEg (Paleoceno-Eoceno, 63-38 Ma)**

Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita, dioritas, gabros y pórfidos riolíticos y dacíticos, asociados a mineralización de Cu-Au. En la Precordillera, regiones II y III: San Cristóbal, Inca de Oro; en la Cordillera Principal, región IV; en la Cordillera Patagónica, región XII: islas Hoste y Londonderry.

#### Rocas sedimentarias del Mesozoico

Estas rocas, al igual que las rocas volcánicas de este período, corresponden a una secuencia estratificada reconocida con profusos afloramientos entre la Cordillera de Costa y la Precordillera, formando franjas que van disminuyendo en edad de oeste a este.

#### **JKc (Jurásico Superior-Cretácico Inferior)**

Secuencias sedimentarias transicionales: areniscas, lutitas, calizas, conglomerados. En la Precordillera, regiones I a III: formaciones Santa Ana, Picudo, Los Cuartitos.

Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y eólicas, en parte transicionales: areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados rojos. En la Precordillera, regiones I a III: formaciones Chacarilla, Quinchamale y Quehuita (superior), Cerritos



Bayos, Llanura Colorada y Quebrada Monardes; en la Cordillera de la Costa, regiones I a II: formaciones Atajaña y Caleta Coloso

### **Js1m (Jurásico Medio-Superior)**

Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, areniscas, lutitas calcáreas, en parte bituminosas, con intercalaciones epiclásticas y niveles evaporíticos superiores. En las regiones I y II: formaciones Los Tarros, Chiza, Guantajaya, Cholita, Pachica, Duplijsa y Grupo Caracoles; en las regiones V a VII: formaciones Cerro Calera, Río Colina y Nacientes del Teno

### **J1m (Jurásico-Neocomiano)**

Secuencias sedimentarias marinas carbonatadas y clásticas: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, paraconglomerados, niveles de yeso e intercalaciones volcánicas subordinadas. En la Precordillera, regiones I a III: formaciones Livilcar, Sierra del Cobre, Quehuita (inferior), Quinchamale (inferior) y El Profeta (superior).

### **Tr1m (Triásico Superior)**

Secuencias sedimentarias marinas y transicionales: areniscas, conglomerados, limolitas y calizas. En la Precordillera y zona costera, regiones II a IV: formaciones Cerro Minado, San Félix y El Quereo.

### **Tr2c Triásico Medio-Superior**

Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales: rocas epiclásticas fosilíferas, calizas estromatolíticas, lavas, brechas y tobas andesíticas a riolíticas. En la región I: Formación Pintados, Estratos de Conacona; en la Precordillera, región II: Estratos El Bordo; en la Cordillera de la Costa, regiones II a III: formaciones Agua Chica y Cifuncho; en la Precordillera y costa, región IV: formaciones Las Breas y La Ligua.

### **TrJ1m (Triásico-Jurásico Inferior)**

Secuencias sedimentarias marinas litorales y transicionales: areniscas cuarcíferas, ortoconglomerados, calizas fosilíferas, lutitas y limolitas calcáreas con intercalaciones volcánicas subordinadas. En la Precordillera y localmente en la costa, regiones II a III: Estratos de Rencoret y formaciones Quebrada del Salitre, El Profeta (inferior) y Canto del Agua.

### **Ji1m (Jurásico Inferior-Medio)**

Secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma: calizas, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas; basaltos almohadillados. En la Precordillera, regiones II a IV: formaciones Montandón y Asientos; en la Cordillera de la Costa: formaciones Pan de Azúcar y Posada Los Hidalgos, en la Cordillera Principal, regiones III a IV: formaciones Lautaro y Tres Cruces; en la Cordillera Principal, regiones VIII y IX: Formación Nacientes del Biobío (inferior).

### Rocas volcánicas del Mesozoico

#### **Ksv (Cretácico Superior)**

Secuencias volcanosedimentarias continentales: rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas. En la Precordillera, región I a III: formaciones Quebrada Mala, Llanta, Hornitos; en las regiones IV a Metropolitana: formaciones Quebrada Seca, Viñita (oriental), Los Elquinos y Lo Valle.

Secuencias y complejos volcánicos ácidos: ignimbritas, domos e intrusivos dacíticos a riolíticos, asociados a calderas de colapso. Entre las cordilleras Principal y de la Costa, regiones II a IV: ignimbritas de Cerro Los Trigos-Cerro Dominador, calderas de Condoriaco, Las Pircas y Cerro Tololo.

Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos y brechas basálticos a dacíticos con intercalaciones piroclásticas y epiclásticas. En la Precordillera, regiones I a IV: Formación Cerro Empexa (superior), Estratos del Estanque, Cerro Los Carneros; en la Cordillera Patagónica, región XI: Grupo Ñireguao

#### **Kia3 (Cretácico Inferior alto)**

Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias. En las regiones I y II: formaciones Suca, Punta Barranco y Estratos de Quebrada San Cristóbal; en la Cordillera Patagónica, región XI: Grupo Divisadero.

#### **J3i (Jurásico)**

Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: formaciones

Camaraca y La Negra; en la Cordillera Principal, región VIII: Formación Nacientes del Biobío (Miembro Icalma).

### **TrJ3 (Triásico-Jurásico Inferior)**

Secuencias volcánicas continentales y transicionales: lavas, domos, brechas, basálticos a riolíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados. En la Precordillera, regiones II y III: Estratos Las Lomas y Formación La Ternera; en la Cordillera Principal, región IV: Estratos de los Tilos; en la Cordillera de la Costa, región IV: Formación Pichidangui.

### *Rocas intrusivas del Mesozoico*

Las rocas intrusivas del mesozoico en esta cuenca se presentan, al igual que las rocas estratificadas, como cuerpos alargados, dispuestos en el sentido NS, formando franjas que disminuyen en edad de oeste a este, debido a corresponder a las raíces de arco volcánico que fue migrando, progresivamente, hacia el este hasta su posición actual en la Cordillera Occidental.

### **KTg (Cretácico Superior-Terciario Inferior)**

Granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos. Entre las cordilleras de la Costa y Principal, regiones I a IV; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: granitoides y pórfidos de Puerto Ibañez e islas Evans. (a) Facies marginales de granodioritas y gabros del Batolito Surpatagónico: isla Riesco y estrecho de Magallanes

### **Ksg (Cretácico Superior, 90-65 Ma)**

Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda; pórfidos andesíticos y dioríticos. En la Precordillera, regiones I a III y entre las cordilleras de la Costa y Principal, regiones IV, V y Metropolitana; en la región XII: granitoides de las islas Wollaston y Navarino, Cordillera Darwin.

### **Kiag (Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo, 123-85 Ma)**

Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. En la Cordillera de la Costa, regiones II a IV, al este del Sistema de Fallas Atacama-El Romeral y asociados a mineralización de Fe-Cu-Au (Candelaria) y Cu-Au (Andacollo); en la Cordillera de la Costa, regiones V a X.

### **Jsg (Jurásico Medio-Superior, 180-142 Ma)**

Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. En la Cordillera de la Costa, regiones I a VI; en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Plutón Panguipulli y borde oriental del Batolito Norpatagónico; en la península Antártica.

### **Jig (Jurásico Inferior, 202-178 Ma)**

Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. En la Cordillera de la Costa, regiones II a III: plutones Flamenco y Caldera-Pajonales.

### Rocas sedimentarias del Paleozoico

#### **CP1 (Carbonífero Superior-Pérmico)**

Secuencias sedimentarias continentales y marinas: areniscas, conglomerados, lutitas, calizas y mármoles. En las regiones I a IV: formaciones Juan de Morales, Diablo, Cerro del Arbol, Huentelauquén; en la región XII: Calizas Tarlton, Complejo Duque de York; en la península Antártica: Grupo Whiteout.

#### **DC1 (Devónico-Carbonífero)**

Secuencias sedimentarias marinas, en parte transicionales: areniscas cuarzo-feldespáticas, lutitas micáceas, conglomerados. En la Precordillera, regiones II a III: formaciones Lila y Chinchas; en la Cordillera Principal, regiones II y IV: formaciones Zorritas y Hurtado.

### Rocas volcánicas del Paleozoico

#### **CP2 (Carbonífero-Pérmico)**

Secuencias volcanosedimentarias: basaltos almohadillados, cherts y calizas marinas. En la región XII: complejos Duque de York y Denaro.

#### **CP3 (Carbonífero-Pérmico)**

Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos, tobas y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas. Incluye cuerpos hipabisales riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: formaciones Quipisca, Collahuasi, Cas y La Tabla.

### Rocas intrusivas del Paleozoico

#### **CPg (Carbonífero-Pérmico, 328-235 Ma)**

Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: Batolitos compuestos, 'stocks' y cuerpos hipabisales (Sierra Moreno, Cordillera de Domeyko, Batolito Elqui-Limarí); en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Batolito Panguipulli-Riñihue y 'Stock' Leones.

### Rocas metamórficas del Paleozoico

#### **DC4 (Devónico-Carbonífero)**

Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange'. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: Formación El Toco, Complejo Epimetamórfico Chañaral; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: Complejo Metamórfico Oriental de Aisén y Magallanes

#### **pCP4 (Precámbrico-Pérmico)**

Esquistos micáceos, metabasitas, anfibolitas, ortoneises y, en menor proporción, cuarcitas y mármoles con protolitos de probable edad desde Precámbrico a Paleozoico temprano y metamorfismo del Carbonífero al Pérmico. En la Precordillera, regiones II y III: complejos metamórficos Limón Verde y El Tránsito, Neises de la Pampa.

## ANEXO J-8

### Antecedentes demográficos

La cuenca Quebrada Caracoles abarca administrativamente varias comunas y áreas tanto urbanas como rurales. La población total de la región de Antofagasta según el último Censo de Población y Vivienda del 2017 es de 607.534 habitantes, de los cuales 571.748 habitantes viven en áreas a Urbanas (94,1%) y 35.786 personas viven en las áreas rurales correspondiendo al 5,9% del total de la población regional, la Tabla 2-1 muestra el detalle de la población regional.

**Tabla 2-1 Población regional**

Genero	Rural	Urbano	Región de Antofagasta
Hombres	28.621	286.393	315.014
Mujeres	7.165	285.355	292.520
Total	35.786	571.748	607.534

Fuente: INE 2017.

Como se aprecia en la tabla anterior, la población rural tiene una gran diferencia de habitantes entre hombres y mujeres, esto se da principalmente por la actividad minera predominante en la región, que contrata una mayor cantidad de hombres para sus faenas a pesar de las campañas del gobierno y de las empresas por aumentar la participación femenina.

Esto queda demostrado en parte por el auge de la minería en las últimas décadas, con el aumento constante de la población regional, la cual ha demostrado un alza constante, incluso en comunas como Sierra Gorda donde en el censo de 1992 contaba con 1.425 habitantes, y para el censo del 2017 ya tenía 10.186 habitantes, este aumento claramente no es fruto de un crecimiento natural de la población, sino más bien al movimiento de población a campamentos mineros, reflejado en que los centros urbanos de esta comuna siguen teniendo un bajo número de habitantes. En la Tabla 2-2 se muestra el crecimiento de la población regional y comunal del área que abarca la cuenca de estudio.

**Tabla 2-2 Crecimiento de la población regional y comunal del área de estudio.**

Región y Comunas	1992	2002	2017
Región de Antofagasta	410.724	493.984	607.534
Comuna Antofagasta	228.408	296.905	361.873
Comuna Sierra Gorda	1.425	2.356	10.186
Comuna Taltal	10.852	11.100	13.317
Comuna Calama	121.807	138.402	165.731
Comuna María Elena	13.660	7.530	6.457

Fuente: INE 2017

La Cuenca Quebrada Caracoles se encuentra presente en las comunas de Antofagasta, María Elena, Sierra Gorda, Calama y Taltal. Su presencia en las comunas se puede ver en la Tabla 2-3. Para este estudio se dejarán fuera del cálculo demográfico las comunas de San Pedro de Atacama y Mejillones, ya que su presencia en la cuenca es inferior al 0,1%.

**Tabla 2-3 Población Comunas dentro del área de estudio.**

Comuna	Genero	Rural	Urbano	Región de Antofagasta
María Elena	Hombres	1.318	2.774	4.092
	Mujeres	214	2.151	2.365
	<b>Total</b>	<b>1.532</b>	<b>4.925</b>	<b>6.457</b>
Sierra Gorda	Hombres	8.662	-	8.662
	Mujeres	1.524	-	1.524
	<b>Total</b>	<b>10.186</b>	<b>-</b>	<b>10.186</b>
Taltal	Hombres	1.780	5.701	7.481
	Mujeres	414	5.422	5.836
	<b>Total</b>	<b>2.194</b>	<b>11.123</b>	<b>13.317</b>
Calama	Hombres	5.619	80.430	86.049
	Mujeres	1.625	78.057	79.682
	<b>Total</b>	<b>7.244</b>	<b>158.487</b>	<b>165.731</b>
Antofagasta	Hombres	6.906	174.940	181.846
	Mujeres	863	179.164	180.027
	<b>Total</b>	<b>7.769</b>	<b>354.104</b>	<b>361.873</b>
<b>Total</b>	Hombres	24.285	263.845	288.130
	Mujeres	4.640	264.794	269.434
	<b>Total</b>	<b>28.925</b>	<b>528.639</b>	<b>557.564</b>

Fuente: INE 2017

Como se puede ver en la tabla anterior, la comuna de Sierra Gorda no presenta población urbana, esto se debe a que en el último Censo sus centros poblados fueron clasificados como rurales (según la división geográfica censal de INE para el censo 2017)<sup>7</sup>.

Para poder acotar y calcular de una forma más representativa la población de la cuenca se trabajará a nivel de Entidades Censales para los sectores rurales, estos, aunque sobrepasen los límites de la cuenca, se tomarán como completamente dentro de la cuenca,

<sup>7</sup> <http://www.censo2017.cl/servicio-de-mapas/descargas/mapas/alcances-base-cartografica-censo2017.pdf>



esto debido a que no se cuenta con mayores detalles del territorio, en el caso que solo una parte pequeña de la entidad esté dentro de la cuenca, esta no se sumará al total.

En la cuenca de estudio se identifica un solo centro urbano, la ciudad de Antofagasta, para esta zona urbana se trabajará a nivel de distrito censal. Se identificaron trece distritos censales dentro del área urbana, de estos, cuatro distritos se dejarán fuera ya que su superficie dentro del urbano es menor al 10%. De esta forma en el sector urbano el área de estudio abarca 9 distritos censales, sumando 147.759 habitantes urbanos. Por otra parte, en el área rural se encuentran en total 24 entidades, las cuales se distribuyen en 7 categorías, sumando 17.729 habitantes en el área rural de la cuenca, en las siguientes tablas se muestra la población de la cuenca en las áreas urbana y rural.

**Tabla 2-4 Distritos Censales Urbanos dentro de la cuenca, ciudad de Antofagasta**

Distrito Censal	Hombres	Mujeres	Total Población
3	8.959	9.091	18.050
5	7.104	7.383	14.487
6	4.966	4.895	9.861
7	10.644	10.969	21.613
8	6.469	7.053	13.522
15	9.533	9.750	19.283
16	6.933	6.961	13.894
17	8.483	8.639	17.122
18	9.791	10.136	19.927
Total Población Urbana en Cuenca			<b>147.759</b>

Fuente: INE 2017

**Tabla 2-5 Distritos Censales Rurales dentro de la cuenca, ciudad de Antofagasta**

Nro. Entidades	Categorías	Población
2	Aldea	1.335
11	Asentamiento Minero	14.479
1	Caserío	268
1	Comunidad Indígena	17
3	Indeterminada	71
3	Otros	101
3	Parcela-Hijuela	1.458
Total		<b>17.729</b>

Fuente: INE 2017

Para los sectores rurales no se puede determinar el número de hombres y mujeres, ya que varias de las entidades presentan los campos de género como indeterminados, esto debido a la poca población existente en estas, y que al desagregar la información se puede llegar a identificar a la persona, para esto el INE se ampara en el secreto estadístico y así “no podrán divulgar los hechos que se refieren a personas o entidades determinadas de que hayan tomado conocimiento en el desempeño de sus actividades” (Ley 17.374, art. 29).

Con los antecedentes entregados se puede estimar la población de la cuenca Quebrada Caracoles en 165.488 Habitantes, de estos 147.759 son urbanos y 17.729 rurales.

**ANEXO K**  
**INICIATIVAS**

## **SUBANEXOS**

Anexo K1	Fichas de las iniciativas (Disponible en formato digital)
Anexo K2	Manual metodológico de Evaluación Multicriterio (Disponible en formato digital)
Anexo K3	Evaluación Multicriterio (Disponible en formato digital)
Anexo K4	Matriz de Priorización de iniciativas (Disponible en formato digital)