



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

**INFORME TÉCNICO**

# **ANÁLISIS DE LA OFERTA HÍDRICA DEL SALAR DE ATACAMA**

**REALIZADO POR:**

**División de Estudios y Planificación**

**SDT N° 339**

**Santiago, Abril de 2013**

**Equipo de Trabajo**

Michael Finger

Miguel Ángel Caro H.

Andrea Osses Vargas

Adrián Lillo Zenteno

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BREVE ANÁLISIS DE ESTUDIOS ANTERIORES</b>	<b>2</b>
2.1	Estudio de evaporación de Leonardo Mardones	2
2.2	Minuta 60	8
2.3	Reporte DGA/GCF-2010	12
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS CRÍTICO DE LA METODOLOGÍA ANTERIOR</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN</b>	<b>20</b>
4.1	Evapotranspiración del Salar	20
4.2	Evapotranspiración de las sub-cuencas aportantes	21
4.3	Evapotranspiración del Salar (áreas sensibles)	21
<b>5</b>	<b>RECARGA</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO</b>	<b>22</b>
6.1	Subcuencas	22
6.2	Precipitación	25
6.3	Evapotranspiración del Salar	28
6.4	Evapotranspiración desde El Salar (áreas sensibles)	29
6.5	Recarga	30
6.6	Oferta Hídrica Actualizada	35
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

---

La presente minuta técnica pretende corregir la determinación del balance hídrico del Salar de Atacama del último estudio realizado el año 2010 por GCF Ingenieros Limitada para la Dirección General de Aguas. El estudio se denominó "Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las sub-cuencas afluentes al Salar de Atacama, II Región" S.I.T. N°210 de enero de 2010 al cual denominaremos reporte DGA/GCF-2010. En este reporte en el cálculo del balance hídrico no se descontó la precipitación sobre el Salar para la determinación de la evaporación neta sobre el mismo. Esto ha causado una sobreestimación de los recursos disponibles en la cuenca.

La actualización del balance, considerada en el reporte DGA/GCF-2010, consideró nuevas metodologías para actualizar las áreas de las cuencas, calcular la precipitación efectiva y las pérdidas por evaporación y evapotranspiración de la zona de estudio.

En esta minuta técnica, se describe sucintamente lo que se ha hecho en informes anteriores para analizar los cambios en los valores determinados para cada componente del balance hídrico. Cabe notar que todos los informes coinciden en que la manera más adecuada de realizar la determinación de la recarga al Salar de Atacama, es determinar con toda la precisión posible las descargas desde el Salar, debido principalmente a que esta cuenca es una cuenca endorreica. Este trabajo lo realizó con mucho detalle Leonardo Mardones entre los años 1983 y 1984.

Todos los autores coinciden que la recarga total efectiva (superficial y subterránea) sobre el Salar provenientes desde las cuencas circundantes debe ser igual a la evaporación neta del Salar, es decir, la evaporación del Salar calculadas con las tasas de Mardones descontada la precipitación sobre la superficie del salar.

## **2 BREVE ANÁLISIS DE ESTUDIOS ANTERIORES**

---

Muchos de los estudios realizados para determinar el balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama consideran que, debido a su naturaleza de cuenca endorreica, las recargas superficiales y subterráneas descargan directamente hacia la atmósfera por medio de evaporación de aguas subterráneas a través del suelo y de costras salinas. Esta evaporación se produce en zonas donde el nivel freático es poco profundo, condición que se cumple en el Salar de Atacama. Por lo tanto la adecuada estimación de éstas pérdidas, elemento importante en el balance hidrológico, permite estimar los caudales de recarga que ingresan a la cuenca.

### **2.1 ESTUDIO DE EVAPORACIÓN DE LEONARDO MARDONES**

En 1986, Leonardo Mardones P. presenta su estudio que reviste mucha importancia en el cálculo del balance hídrico del Salar de Atacama, éste se denomina: "El litio, un nuevo recurso para Chile". En este estudio se presentan las características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama, su diferencia con otros salares y las razones de por qué existe una gran acumulación de salmueras en el Salar. Además se incluyen antecedentes muy importantes acerca de la evaporación del Salar. Estos antecedentes se obtuvieron a partir de mediciones de evaporación realizadas por Leonardo Mardones entre los años 1983 y 1984, información que permitió asignar tasas de evaporación a distintas zonas del Salar.

Al momento de realizar el presente análisis no se disponía del estudio realizado por Leonardo Mardones en 1986, sin embargo se cuenta con un estudio de evaporación del Salar de Atacama realizado por Leonardo Mardones en 1997, y en el cual utiliza los resultados de sus investigaciones.

Este estudio fue encargado por DICTUC S.A. para incorporarlo al modelo que DICTUC estaba desarrollando para la empresa MINSAL, y cuyo fin fue simular el comportamiento de la napa subterránea y de la calidad de la salmuera del Salar de Atacama. El principal objetivo del estudio de evaporación fue el de determinar los valores de evaporación que presentan los diferentes sectores pertenecientes al Salar de Atacama. Como resultado, se divide el Salar en 16 zonas diferentes de evaporación, con tasas variables de evaporación que fluctúan entre 2 mm/año y 5,8 mm/día en un área total de 2.716 km<sup>2</sup>.

Aquí citaremos algunos aspectos importantes, mencionados en el estudio de Leonardo Mardones, que nos ayudarán a entender el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Atacama. Para esto es importante decir algo acerca de los cursos superficiales y de por qué los principales cauces se ubican en el sector nororiental de la cuenca. Esto tiene una explicación en el régimen pluviométrico de la zona, inducido principalmente por las masas de aire provenientes de la cuenca amazónica.

De acuerdo a Mardones, la hoya hidrográfica del Salar de Atacama, abarca un área de aproximadamente 13.300 Km<sup>2</sup>. El principal aporte superficial de la hoya proviene desde el Sector Norte, con los ríos San Pedro y Vilama, constituyendo aproximadamente el 70% de la descarga superficial total. Alrededor del 40% de este volumen se ha destinado a los riegos agrícolas.

Los aportes superficiales totalizan 1.744 l/s y constituyen aproximadamente el 32% de la recarga estimada para la cuenca. El caudal total promedio de los escurrimientos del borde oriental es del orden de 505 l/s. Cabe notar que ninguno de los ríos del borde oriental, alcanza la superficie del Salar, ya que se infiltran en la zona aluvial, aguas abajo de la zona de riego. La **Figura 2-1** muestra la hoya hidrográfica del Salar de Atacama y los principales afluentes y sus respectivas sub-cuencas. El **Cuadro 2-1** muestra los principales cursos de agua del sector norte y oriental del Salar de Atacama, sus tributarios y los caudales promedio correspondientes.

Sector	Nombre Cauce	Caudal [L/s]	Tributarios
Norte	Río San Pedro	1021	Río Grande Río Salado
	Río Vilama	218	Río Frío Río Puritama Río Puripica
	<b>Total Sector Norte</b>	<b>1239</b>	
	Río Zapar	7	
Oriental	Río Honar	54	
	Río Pocor	30	
	Quebrada Aguas Blancas	150	
	Río Soncor	6	
	Quebrada Camar	3	
	Quebrada Socaire	170	
	Quebrada Peine	15	
	Río Tulan	70	
	<b>Total Sector Oriental</b>	<b>505</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>1744</b>		

Cuadro 2-1 Caudales superficiales promedios

Por otra parte, de las isoyetas mostradas en la **Figura 2-2**, se puede notar que la parte nororiental del Salar de Atacama alcanza un monto de precipitaciones medias anuales por sobre los 200 mm, en contraste con la parte sur y sobre todo la parte occidental en donde las precipitaciones son prácticamente nulas. La falta de precipitaciones sobre el sector occidental, se atribuye a la inversión térmica que afecta a la masa de aire situada entre la costa y los Andes, ocurriendo un descenso del aire, reforzado por el efecto enfriador de la corriente de Humboldt.

Las precipitaciones ocurridas entre diciembre y marzo sobre la cuenca del Salar, se originan a partir de la humedad transportada por las masas de aire desde la Cuenca Amazónica (Fuenzalida, 1986). Las precipitaciones de menor importancia ocurren entre abril y agosto debido al desplazamiento de frentes fríos desde la Antártica.

Del análisis de la estadística de precipitaciones de la Estación San Pedro, la que posee el registro más largo en la zona, se aprecia que las precipitaciones ocurren en cualquier época del año en cantidades poco importantes, concentrándose principalmente durante el verano (invierno Boliviano). El promedio anual para la cuenca se estima en 69,1 mm.

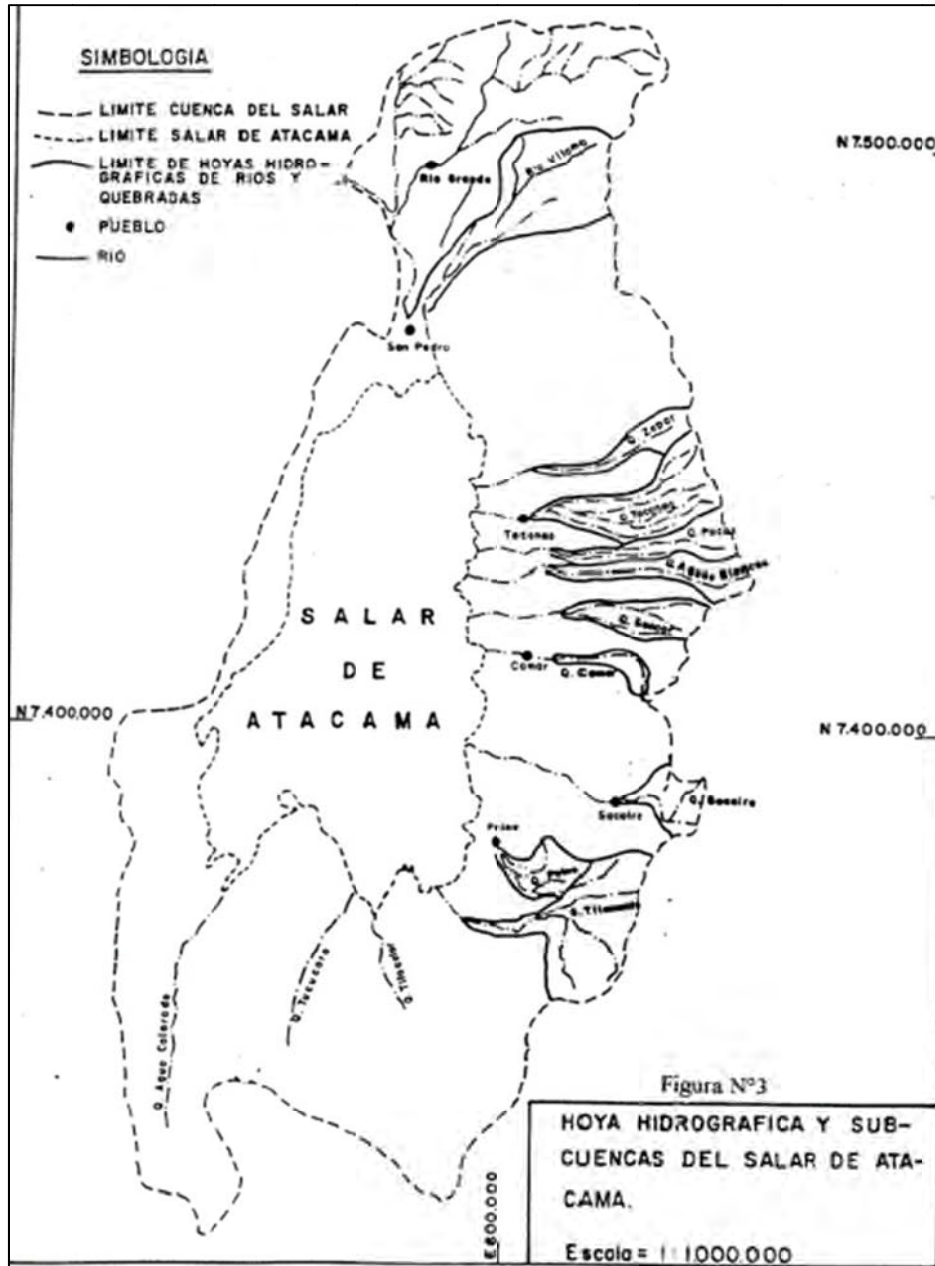


Figura 2-1 Hoya hidrográfica del Salar de Atacama



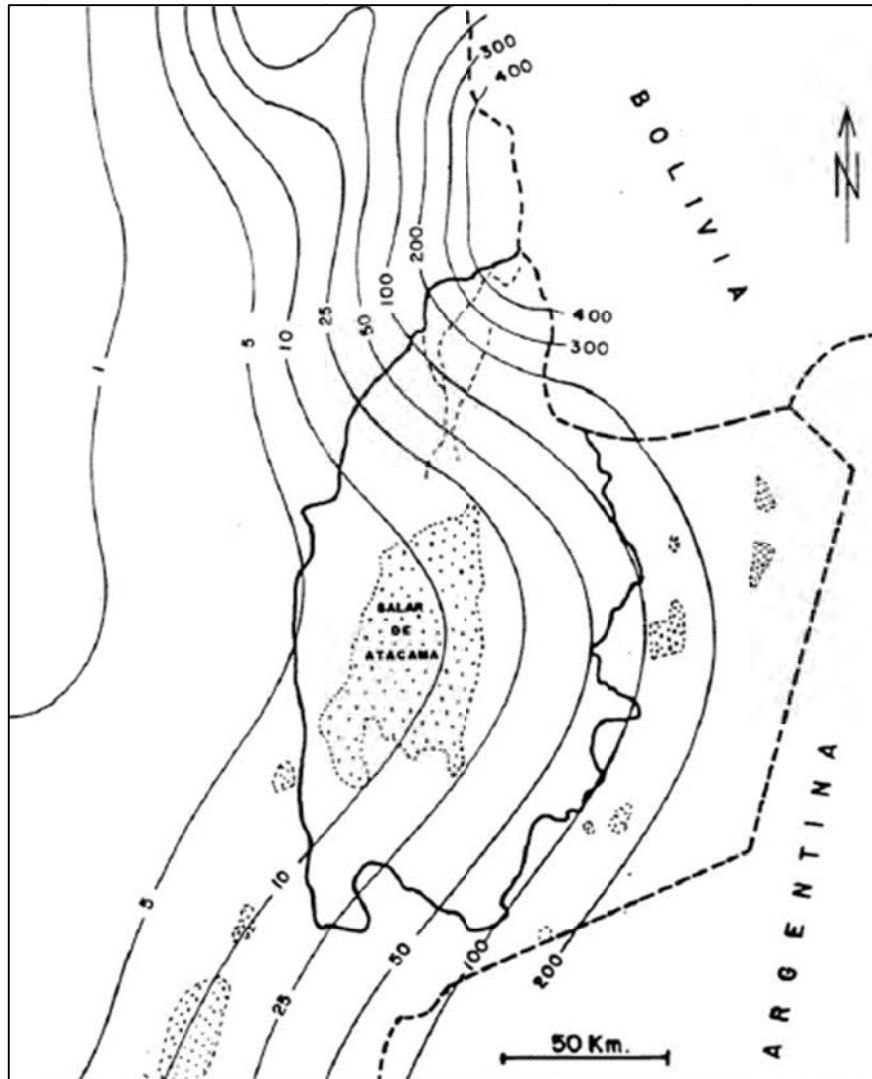


Figura 2-2Curvas de Isoyetas

Debido a su ubicación geográfica, el Salar de Atacama es una unidad geomorfológica, condicionada por la interacción de factores tales como: variaciones de temperatura, alta tasa de evaporación, precipitaciones escasas pero concentradas, escurrimiento superficial y variaciones de nivel de agua subterránea. Características que han dado como resultado en la superficie del Salar, una zonificación de unidades de limo-salinas y salinas, con una amplia variedad de micro-relieves y estructuras positivas y negativas. La siguiente descripción corresponde a las zonificaciones mencionadas:

- a) Materiales Detríticos. Principalmente limos, arena fina y arcilla de origen aluvial, cementados localmente por sales (cloruros y sulfatos). Se distribuyen marginando al Salar, especialmente en los frentes de conos aluviales, en

algunas partes con límites muy definidos, marcados por líneas de vegetación, y por el Noroeste la lengua de sedimentos arenosos, limosos y arcillosos depositados por el Río San Pedro.

- b) Eflorescencia y costras salinas. Depósitos salinos con abundantes lagunas y vegas, que forman una faja entre los materiales detríticos y el cuerpo salino central. Estos depósitos en general presentan la siguiente zonificación desde fuera hacia adentro:
  - a. Costra de cloruro yesífera.
  - b. Costra de cloruro y limo.
  - c. Costras de cloruro formando glóbulos.
  - d. Costras acordonadas de cloruros con incrustaciones de yeso.
  - e. Costras de yeso y carbonatos.
  - f. Costra de superficie plana de sulfatos y carbonatos:
    - i. Costra de sulfatos, carbonatos y escasos cloruros.
    - ii. Costras de carbonato y pocos cloruros.
  - g. Costra de transición de cloruros.
  - h. Costra de cloruros en superficie plana con grietas rellenas de cloruros en superficie plana algo rugosa.
- c) Costra Núcleo de Cloruros. Costra de cloruro pardo clara, originada por un mayor aporte de agua; costra de cloruro de color blanco, superficie muy irregular y esquirloza.

Por otra parte, la evaporación desde el Salar, depende de la densidad del agua, del tipo de sedimentos, de la profundidad del agua y de la presencia y características de la costra que lo cubre.

Los resultados de las experiencias de evaporación de Mardones en el Salar de Atacama se muestran en el **Cuadro 2-2**.

Item	Descripción	Superficie [km <sup>2</sup> ]	N.F. promedio [m]	Evaporación [mm/día]	Volumen evaporado [l/s]
A.1	Costra limo salino	20	0.50 - 0.55	0,4	92,5
A.2	Costra limo salino sobre costra dura, costra dura (CaCO <sub>3</sub> )	130	0,37	0,1	150,17
A.3	Costra delgada sobre sal granulada	80,32	0,34	1,45	1348
A.4	Yeso limoso, blando	120	0,72	0,3	416,4
A.5	Yeso limoso, blando	200	1,11	0,1	231,3
A.6	Costra de NaCl dura (0.3 m)	100	1	4.4 mm/año	13,9
A.7	Zona C Costra salino limosa de yeso y halita	45	0,31	1	520,8
		17	0,5	0,5	98,3
A.8-1	Zona D, Limo salino sobre costra dura de CaCO <sub>3</sub>	26	0,47	0,1	30,06
A.8-2	Limo salino	16	0,27	1,45	185,18
A.9	Zona E (Tilomonte)				
A.9-1	Limo salino	30	0,32	1,5	520,8
A.9-2	Limo salino	48	0,6	0,1	55,5
A.10	Zona E (Tilopozo)				
A.10.1	Limo salino sobre costra dura de CaCO <sub>3</sub>	8	0,25	1	92,5
A.10.2	Limo salino sobre costra dura de CaCO <sub>3</sub>	50	0,25	0,2	115,74
A.11	Lagunas (I)	13,4		5,8	792
	(V)	11,8			
A.12	Vegas	180		0,3	624,7
A.13	Núcleo, costra de NaCl dura > 0.25 m	1620	0,67	2 mm/año	102,7
<b>TOTAL</b>		<b>2715,52</b>			<b>5390,55</b>

Cuadro 2-2 Evaporación de las distintas zonas del Salar de Atacama (Mardones, 1997)

Se puede notar que para una superficie de 2.716 km<sup>2</sup> del Salar, la evaporación de las distintas zonas y Vegas alcanza en torno a los 5.400 litros por segundo.

## 2.2 MINUTA 60

En 1999, la Dirección General de Aguas genera la Minuta Técnica N° 60, la cual tiene por objeto determinar el balance hídrico global de las aguas de la cuenca del Salar de Atacama, de modo de desprender de él, el balance hídrico subterráneo; determinando así, si existe o no disponibilidad para constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, que están siendo solicitados en diversos sectores, afluentes al Salar de Atacama.

La Minuta 60, basó principalmente sus análisis en los resultados de estudios previos del Salar de Atacama, particularmente en el reporte DGA/Orphanopoulos-1998 denominado "Evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, cuenca del Salar de Atacama, II Región", realizado para la DGA por Damaris Orphanopoulos en junio de 1998.

En este reporte técnico, se divide el área de estudio en seis zonas, las que se muestran en la **Figura 2-3**.

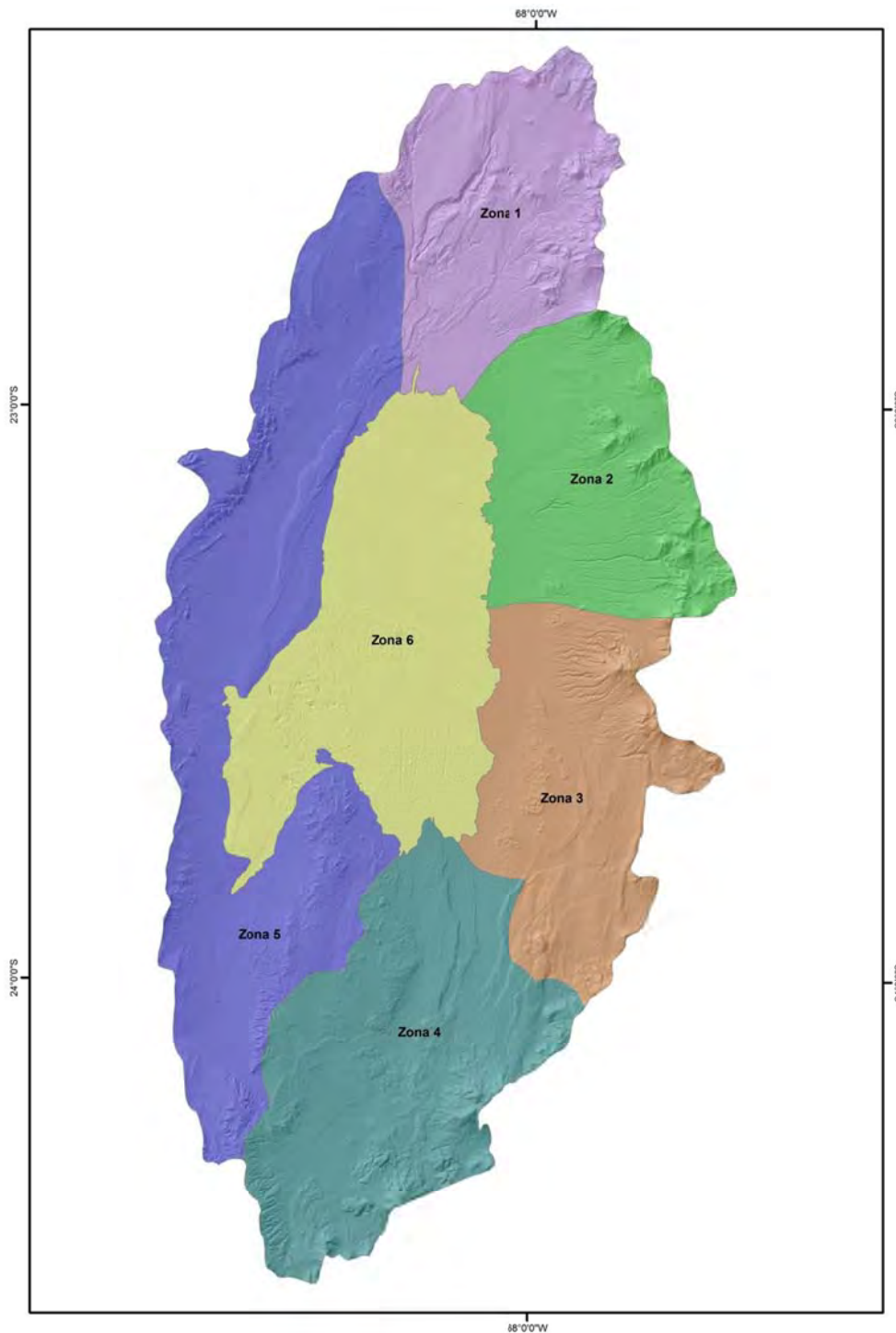


Figura 2-3 Sub-Cuencas Minuta 60

Esta zonificación fue definida en base a los siguientes criterios:

- a) Criterios geológicos, que muestran las estructuras de superficie y sub-superficie, las cuales permitieron conocer las formaciones con valor hidrogeológico, y las barreras entre o bajo ellas.
- b) Criterios hidrológicos, relativos a los aportes de las precipitaciones, basados fundamentalmente en la configuración de las sub-cuencas, y en sus alturas aportantes.
- c) Criterio de ubicación de pozos, el cual muestra en la práctica cuáles son las unidades más solicitadas, de modo que el análisis que se presenta se pueda centrar en cada una de estas unidades.

En este trabajo, el balance hídrico se efectuó sobre la cuenca en condiciones de régimen natural. Este régimen se refiere a un estado base de la cuenca, en que el único uso consuntivo no natural es el riego ancestral efectuado en zonas cultivadas de San Pedro, Socaire y Tilomonte.

El balance en las cuencas aportantes al Salar se determina como:

$$\text{Aportes de Precipitación} - \text{Evapotranspiración Real} = \text{Escorrentía superficial} + \text{subterránea}$$

El balance en el Salar mismo está dado por:

$$\text{Aportes de Precipitación} + \text{Escorrentía afluyente} = \text{Evaporación desde el Salar}$$

De ambas ecuaciones se observa que la escorrentía generada en cada una de las sub-cuencas es la que llega como escorrentía afluyente al salar, en régimen natural. Sin embargo, la escorrentía generada en las sub-cuencas es también la fuente para los diversos usos que se desee dar al agua. De esta forma, al aumentar los usos en las sub-cuencas aportantes, disminuirá la escorrentía afluyente al Salar.

Cabe notar que para la cuenca del Salar de Atacama, la principal fuente de recursos hídricos, superficiales y subterráneos renovables, es la precipitación sobre la propia cuenca.

Dado que en la cuenca del Salar de Atacama, la precipitación muestra un claro aumento con la altura, el reporte DGA/Orphanopoulos-1998 determinó la magnitud del recurso hídrico generado por la precipitación, para cada una de las 5 cuencas aportantes al Salar, a través de la consideración de bandas de altura espaciadas cada 1.000 metros de altura. El aporte total así calculado, por concepto de precipitación, a las cuencas afluentes al Salar alcanza los 35,96 m<sup>3</sup>/s.

En el Salar de Atacama se distinguen 3 tipos de superficies evaporantes:

1. Superficies con vegetación natural.
2. Superficies cultivadas.
3. Salar.

El valor anual de evapotranspiración desde superficies con vegetación natural se determinó a través de la fórmula de Turc, la determinación se realizó para cada franja de altura definida.

Por su parte, el valor anual de la evapotranspiración debida a zonas cultivadas se realizó considerando las siguientes superficies por sector:

- a) 1.000 há en la zona 1 (San Pedro de Atacama)
- b) 180 há en la zona 3 (Socaire)
- c) 40 há en la zona 3 (Tilomonte)

Para ellas se consideró una demanda neta de los cultivos de 0,5 l/s/há, con lo que se obtuvieron los siguientes consumos: 500 l/s en la zona 1 y 110 l/s en la zona 3

Finalmente para la evaporación desde el Salar se consideraron los cálculos realizados por Leonardo Mardones, Aravena y Grilli en 1985. Para las condiciones hidrológicas de 1985 se determinó que la superficie total del Salar evaporaba entre 4,6 y 5,4 m<sup>3</sup>/s.

En el reporte DGA/Orphanopoulos-1998 se estimó pertinente considerar un valor para la evaporación del Salar de 5,32 m<sup>3</sup>/s.

Los resultados del balance hídrico por zonas se muestran en el **Cuadro 2-3**. Cabe destacar que en base a medidas de algunas escorrentías superficiales, para algunos sectores, se distinguió el recurso total renovable, entre recurso superficial y subterráneo.

Zona	Área [km <sup>2</sup> ]	Altura media [m.s.n.m.]	Precipitación media [mm/año]	Caudal Afluente por Precipitación [m <sup>3</sup> /s]	T° media anual [°C]	Evaporación total [m <sup>3</sup> /s]	Escorrentía superficial [m <sup>3</sup> /s]	Escorrentía subterránea [m <sup>3</sup> /s]	Escorrentía total [m <sup>3</sup> /s]
Zona 1	1890	3894	128	7,64	3,3	6,37	0,3	0,97	1,27
Zona 2	1930	3688	110	6,75	4,6	5,7	0,21	0,84	1,05
Zona 3	1925	3593	100	6,13	5,3	5,42	0,25	0,46	0,71
Zona 4	2915	3598	98	9,03	5,2	8,15	0	0,88	0,88
Zona 5	3120	2961	51	5,03	9,5	5	0	0,03	0,03
<b>Total Zonas afluentes</b>	<b>11780</b>	<b>3491</b>	<b>93</b>	<b>34,58</b>	<b>6</b>	<b>30,64</b>	<b>0,76</b>	<b>3,18</b>	<b>3,94</b>
Zona 6 Salar	3020	2300	14	1,38	14	5,32			-3,94
<b>Balance</b>	<b>14800</b>		<b>77</b>	<b>35,96</b>		<b>35,96</b>			<b>0</b>

Cuadro 2-3 Resultados del Balance Hídrico por zonas, Minuta 60

### 2.3 REPORTE DGA/GCF-2010

En enero de 2010 finalizó el estudio "Actualización de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las sub-cuencas afluentes al Salar de Atacama, II Región" realizado por GCF Ingenieros Limitada para la DGA.

En este reporte técnico, se dividió las la zona de estudió en 13 sub-cuencas. La **Figura 2-4** muestra la 13 sub-cuencas y el **Cuadro 2-4** singulariza la superficie asociada a cada sector. Esta nueva delimitación fue realizada considerando modelos digitales de elevación (GDEM), curvas de nivel cada 100, 50 y 10 metros de equidistancia y el software WMS versión 7.1, además de corrección manual. El área total de la zona de estudio alcanza los 17.257 km<sup>2</sup> resultando superior en 2.457 km<sup>2</sup> al total de área considerado en la Minuta 60. Por otra parte la superficie del Salar corresponde a las sub-cuencas 12 y 13 las que suman un área de 2.928 km<sup>2</sup> en contraste con la Minuta 60, la que considera 3.020 km<sup>2</sup>, resultando esta última en 92 km<sup>2</sup> mayor.

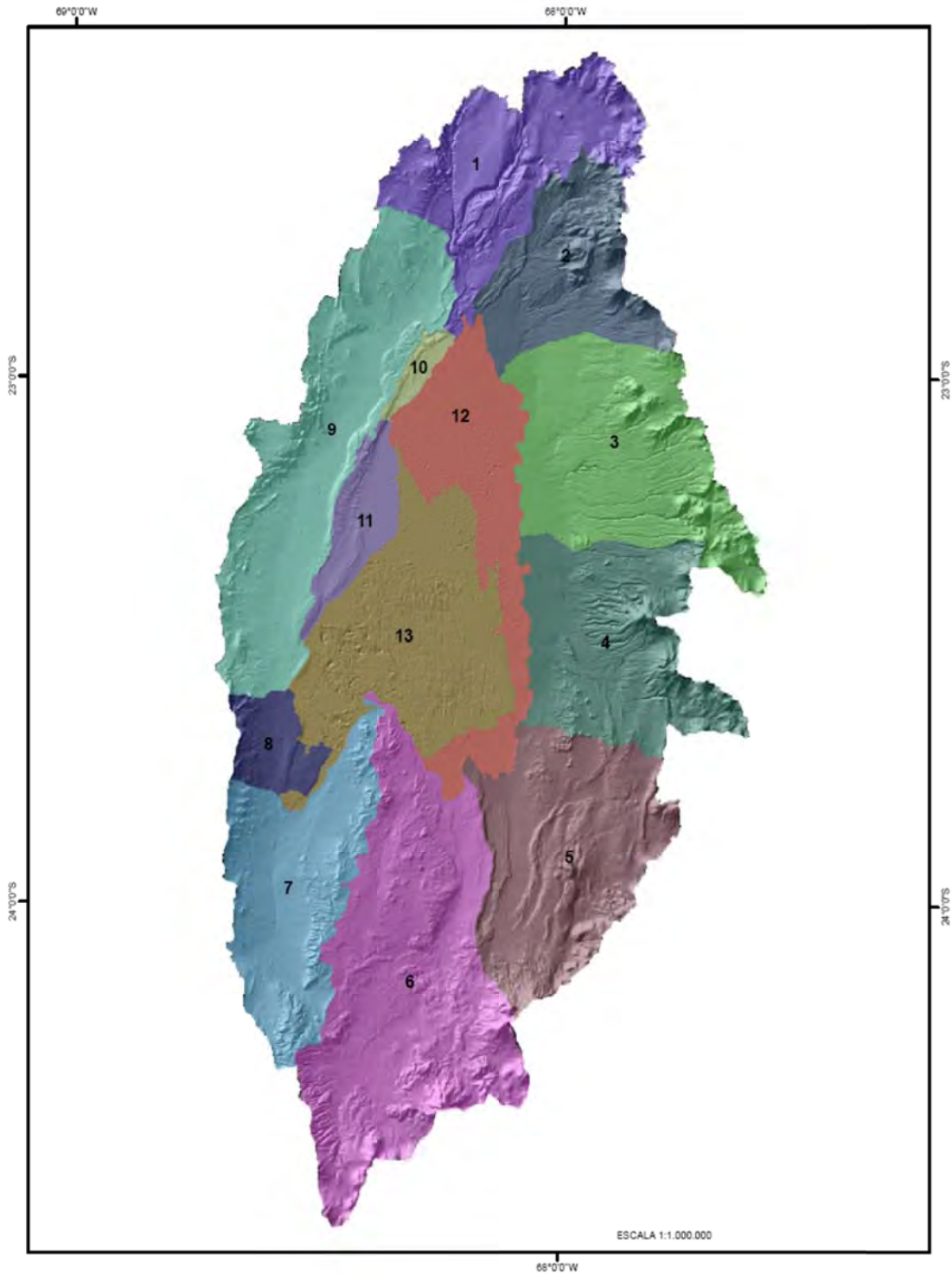


Figura 2-4 Subdivisión del área de estudio (13 cuencas) Reporte DGA/GCF-2010



Subcuenca	Superficie [km <sup>2</sup> ]
1	1.348,54
2	1.020,62
3	1.757,42
4	1.486,21
5	1.726,49
6	2.774,50
7	1.366,38
8	312,99
9	2.048,17
10	101,09
11	386,21
12	1.185,06
13	1.742,91
<b>Total</b>	<b>17.256,59</b>

Cuadro 2-4 Superficie de Sub-cuencas Zona de estudio

En el reporte DGA/GCF-2010 se redefinió el mapeo de los distintos tipos de suelo y costras salinas realizado anteriormente por Leonardo Mardones, para esto se consideró un plano geológico utilizado por Mardones como base para la zonificación. La **Figura 2-5** muestra las distintas zonas de evaporación consideradas por Mardones en su estudio de Evaporación del Salar de Atacama.

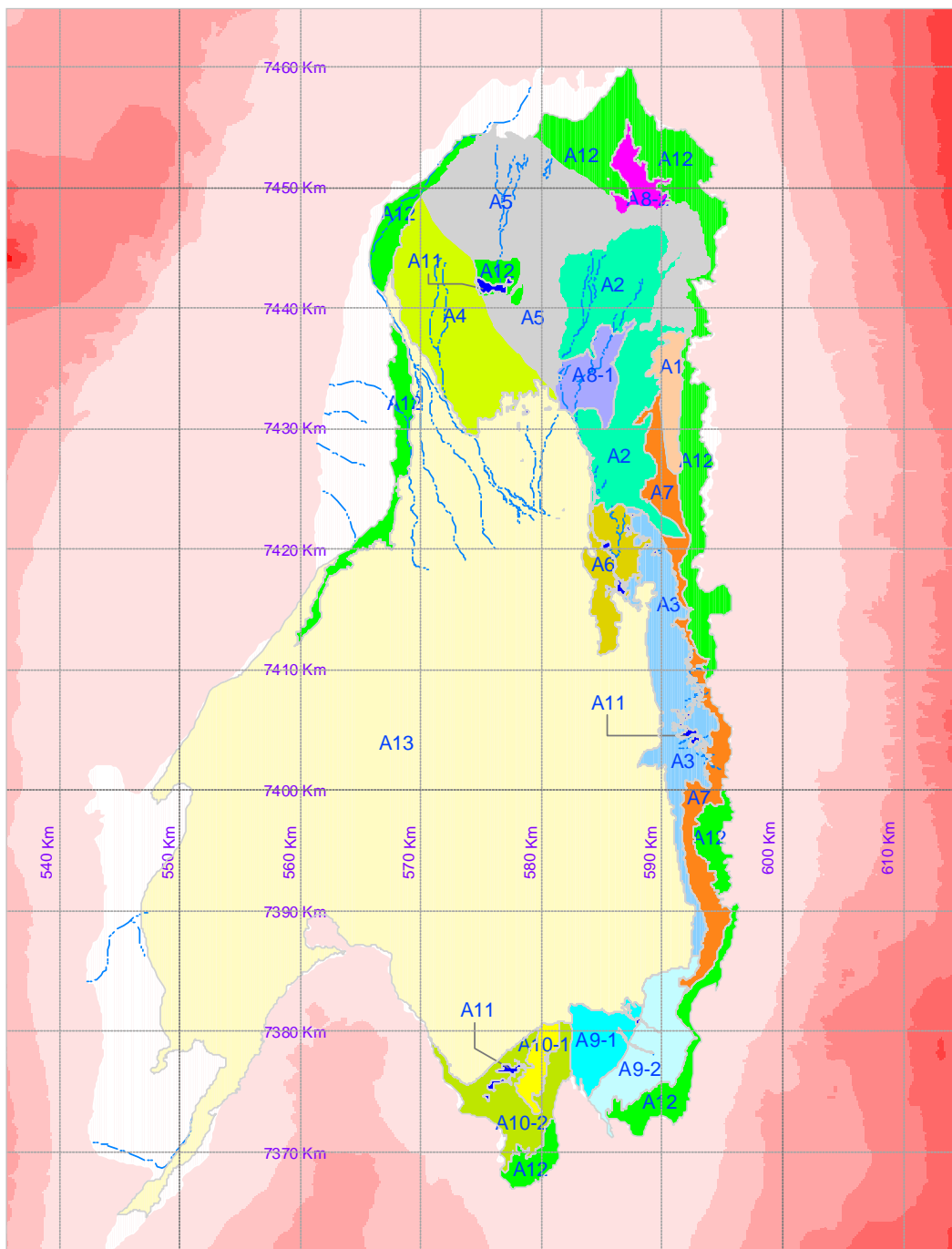


Figura 2-5 Zonas de Evaporación del Salar de Atacama según Mardones

zona	descripción	prof. promed. del agua [m]	tasa prom. de evap. [mm/día]	Caudales de evaporación calculados con datos de superficie de zonas, incluidos en otros estudios		Caudales de evaporación calculados con áreas medidas según plano geológico, presente estudio.	
				áreas según estudios anteriores [Km <sup>2</sup> ]	caudal prom. de evap. [l/s]	áreas según Plano Geológico [Km <sup>2</sup> ]	caudal prom. de evap. [l/s]
A1	costra de limo salino blando (la profundidad promedio del agua varía entre 0.50 m y 0.55 m; se usó un valor intermedio, 0.53 m)	0.53	0.400	20.0	92.6	20.0	92.6
A2	costra de limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0.37	0.100	130.0	150.5	134.0	155.1
A3	costra delgada sobre sal granulada	0.34	1.450	80.3	1347.6	84.0	1409.7
A4	yeso limoso blando	0.72	0.300	120.0	416.7	112.0	388.9
A5	yeso limoso blando	1.11	0.100	200.0	231.5	197.0	228.0
A6	costra de cloruro de sodio (NaCl) (la tasa promedio de evaporación es de 4.4 mm/año)	1.00	0.012	100.0	13.9	34.0	4.7
A7-1	costra salino limosa de yeso y halita (se distribuyó la superficie de la zona A7 en A7-1 y A7-2, según la proporción de áreas establecida por Mardones)	0.31	1.000	45.0	520.8	50.0	578.7
A7-2	costra salino limosa de yeso y halita (idem anterior)	0.50	0.500	17.0	98.4	19.0	110.0
A8-1	limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0.47	0.100	26.0	30.1	28.0	32.4
A8-2	limo salino (se detectó un error de transcripción en el texto, ya que aparecía, en la tabla original, una superficie de 16 Km <sup>2</sup> , una tasa de evaporación de 1.45 mm/día, y un caudal evaporado de 185 l/s, en vez de 269 l/s, que corresponde según el cálculo; analizando comparativamente los datos, es probable que la tasa de evaporación sea 1.00 mm/día, en vez de 1.45 mm/día. Por consiguiente, se adoptó 1.00 mm/día.)	0.27	1.000	16.0	185.2	16.0	185.2
A9-1	limo salino	0.32	1.500	30.0	520.8	29.0	503.5
A9-2	limo salino	0.60	0.100	48.0	55.6	49.0	56.7
A10-1	limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0.25	1.000	8.0	92.6	12.0	138.9
A10-2	limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0.25	0.200	50.0	115.7	48.0	111.1
A11	lagunas (Área verano=11.8 Km <sup>2</sup> / Área invierno=13.4 Km <sup>2</sup> / Área promedio=12.6 Km <sup>2</sup> )	0.00	5.800	12.6	845.8	12.6	845.8
A12	vegas	0.00	0.300	180.0	625.0	261.0	906.3
A13	núcleo, costra dura de cloruro de sodio (NaCl) (La tasa promedio de evaporación es de 2 mm/año)	0.67	0.005	1620.0	93.8	1664.0	96.3
<b>Totales</b>				<b>2703</b>	<b>5437</b>	<b>2770</b>	<b>5844</b>

Cuadro 2-5 Evaporación por zonas en el Salar de Atacama según Mardones

Según el cuadro **Cuadro 2-5** se obtienen caudales totales de evaporación de 5.437 l/s al estimarlas con las tasas definidas por Mardones y las áreas consideradas en su estudio y de 5.844 l/s al considerar la nuevas áreas redefinidas en el reporte DGA/GCF-2010 y las mismas tasas de evaporación de Mardones.

El reporte DGA/GCF-2010 toma un valor intermedio para la evaporación desde el Salar, a saber 5,6 m<sup>3</sup>/s. valor que excede en 280 l/s el valor de evaporación considerado en la Minuta 60.

El aporte de caudal por precipitación en las sub-cuencas aportantes al Salar de Atacama (sub-cuencas 1 a 11) se realiza considerando primero un relleno estocástico de 27 estaciones pluviométricas, la definición de gradientes pluviométricos mensuales y la desagregación de las superficies de las cuencas en bandas de altura. El cálculo además considera la acumulación y derretimiento de nieve, a través de la estimación de la cota de cero grados de temperatura utilizando gradientes de temperaturas para cada mes.

Por su parte las pérdidas evapotranspirativas consideran las superficies naturales de cultivo y las correspondientes a vegas y bofedales, denominadas zonas sensibles. A esto se agrega la evaporación desde superficies de agua libre. Los cuatro tipos de pérdidas se consideran analizando datos de evaporación en evaporímetros de bandeja, para determinar relaciones de evaporación con la altura. Se utilizaron coeficientes de reducción de tanque y de cultivo para determinar la evaporación de superficies libres y de zonas con vegetación.

La evaporación de las zonas sensibles dentro del Salar se calculó utilizando las tasas determinadas por Mardones.

El **Cuadro 2-6** muestra el balance hídrico del Salar de Atacama según el reporte DGA/GCF-2010. En él se aprecia que la escorrentía total efectiva corresponde a 5,6 m<sup>3</sup>/s equivalente a la evaporación total considerada para el Salar en este estudio.

<b>Cuadro Resumen [m3/s]</b>							
Subcuenca	Precipitación	Pp efectiva	ETR	Ev. Lagunas	Escorrentía		Factor 1-(Pp ef/Pp)
					Total Efectiva	% del Total	
1	3,422	1,567	0,536	0,000	<b>1,031</b>	18,41%	0,54
2	2,242	1,027	0,042	0,000	<b>0,985</b>	17,58%	0,54
3	3,541	1,324	0,596	0,005	<b>0,723</b>	12,91%	0,63
4	2,717	1,016	0,077	0,000	<b>0,939</b>	16,76%	0,63
5	2,808	1,050	0,155	0,000	<b>0,895</b>	15,99%	0,63
6	5,566	0,891	0,000	0,000	<b>0,891</b>	15,90%	0,84
7	1,681	0,092	0,000	0,000	<b>0,092</b>	1,65%	0,95
8	0,016	0,000	0,000	0,000	<b>0,0005</b>	0,01%	0,97
9	1,325	0,038	0,000	0,000	<b>0,038</b>	0,69%	0,97
10	0,146	0,004	0,000	0,000	<b>0,0042</b>	0,08%	0,97
11	0,054	0,002	0,000	0,000	<b>0,002</b>	0,03%	0,97
<b>Suma</b>	<b>23,52</b>	<b>7,01</b>	<b>1,41</b>	<b>0,005</b>	<b>5,60</b>		

#### Cuadro 2-6 Balance Hídrico en el Salar de Atacama según Reporte DGA/GCF-2010

Sin embargo el cálculo anterior está sobreestimado porque no se consideró la precipitación sobre el Salar la que debe ser descontada. Por tanto el balance general de las cuencas aportantes debe ser inferior a 5,6 m<sup>3</sup>/s.

### **3 ANÁLISIS CRÍTICO DE LA METODOLOGÍA ANTERIOR**

---

El reporte DGA/GCF-2010 realizó un análisis estadístico de precipitaciones, empleando un método estocástico para 27 estaciones meteorológicas, ubicadas en y alrededor de la zona de estudio. De las 27 estaciones meteorológicas fueron consideradas 6 estaciones para la determinación de la relación precipitación-altura. Las estaciones seleccionadas fueron: Río Grande, El Tatio, Toconao Experimental, Socaire, Peine y Camar.

Los valores de precipitación media mensual se correlacionaron con la altura para obtener relaciones de precipitación-altura para cada mes.

Cabe notar que todas las estaciones utilizadas para la determinación de las relaciones precipitación-altura se ubican en el sector oriental de la cuenca, lugar en donde se encuentra la mayoría de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio. El rango de alturas comprendido por las estaciones meteorológicas fluctúa entre los 2430 m.s.n.m. hasta los 4320 m.s.n.m. De esta forma, las relaciones de precipitación-altura planteadas por el reporte DGA/GCF-2010, son extrapoladas en la zona occidental y en los sectores bajos de la cuenca. Esto incluye las sub-cuencas 10, 12 y 13, las cuales tienen alturas promedios inferiores a los 2430 m.s.n.m., sucede lo mismo con algunas áreas de otras sub-cuencas de la zona de estudio.

El Cuadro 3-1 muestra como la relación precipitación-altura no produce resultados confiables para el sector occidental de la cuenca. Es especialmente claro en el caso de la estación meteorológica Imilac, que la variación en la precipitación a través de la cuenca no se puede explicar sólo por la variación en la altura, existe un gradiente de precipitación que aumenta en el sentido poniente-oriental. La mayoría de la precipitación que cae en la cuenca proviene de tormentas asociadas al invierno boliviano, las que se producen por el movimiento de masas de aire húmedo desde la cuenca amazónica a través del altiplano, es decir, desde el oriente. Por lo tanto es razonable postular que en principio la precipitación cae en las zonas elevadas de las sub-cuencas orientales, disminuyendo el contenido de humedad de las masas de

aire, y disminuyendo con esto el potencial de precipitaciones en el sector occidental de la cuenca, cuando la masa de aire altiplánica llega hasta las sub-cuencas occidentales.

<b>Estación</b>	Precipitación Promedio (con datos rellenados) [mm]		Precipitación Promedio (con relacion pp-altura) [mm]	
	Monturaqui	Imilac	Monturaqui	Imilac
<b>ENE</b>	40,6	0,0	27,3	18,7
<b>FEB</b>	12,1	0,3	23,9	17,0
<b>MAR</b>	4,0	0,9	19,5	13,9
<b>ABR</b>	1,8	0,9	0,7	0,6
<b>MAY</b>	0,0	0,0	2,9	2,5
<b>JUN</b>	0,0	0,6	2,9	2,5
<b>JUL</b>	0,0	0,0	0,5	0,4
<b>AGO</b>	0,0	0,0	1,3	1,0
<b>SEP</b>	0,0	0,0	1,1	0,9
<b>OCT</b>	0,0	0,0	0,4	0,2
<b>NOV</b>	0,0	0,0	0,5	0,4
<b>DIC</b>	0,0	0,0	3,6	2,3
<b>Anual</b>	<b>58,5</b>	<b>2,7</b>	<b>84,6</b>	<b>60,6</b>

Cuadro 3-1 Comparación de precipitaciones medias mensuales en estaciones Monturaqui e Imilac

En la determinación de las precipitaciones por sub-cuencas, el reporte DGA/GCF-2010 empleó como patrón el promedio simple entre las precipitaciones de las estaciones El Tatio y Socaire, posteriormente aplicó factores derivados de las relaciones de precipitación-altura. La principal ventaja de usar la estación meteorológica El Tatio como componente en el patrón, es que esta estación es una de las más elevadas, presentando mayores montos de precipitaciones, y por tanto, menos precipitaciones nulas. Cabe notar que el uso de un patrón con demasiados días con precipitación nula, daría como resultado una distribución mensual errónea.

En el reporte DGA/GCF-2010 el cálculo de la precipitación y su eventual recarga al acuífero (o escorrentía total) contempla la acumulación de nieve considerando un nivel de nieve en base a temperaturas promedio mensuales. Sin embargo un error en la planilla de cálculo, indujo la eliminación de la nieve en el balance en vez de su eventual aporte a la recarga.

## **4 EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN**

---

Se pueden considerar tres tipos de evaporación y evapotranspiración en la cuenca:

1. Evapotranspiración desde el Salar mismo.
2. Evapotranspiración desde las sub-cuencas aportantes por vegetación nativa y cultivos.
3. Evapotranspiración y evaporación desde las áreas sensibles del Salar (vegas y lagunas)

El valor de estas tres componentes son claves en la estimación de recurso disponible en las cuencas aportantes.

### **4.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL SALAR**

La evapotranspiración desde el Salar es considerada como una de las descargas más importantes del sistema y por lo mismo es el factor más significativo en la determinación de la recarga y la disponibilidad del recurso.

Las estimaciones de evaporación del salar de Atacama frecuentemente se basan en el trabajo de Mardones. En dicho trabajo se mapearon los distintos tipos de suelo del Salar y se instalaron lisímetros en distintas zonas del Salar. Para cada zona se desarrollaron relaciones entre la profundidad de la napa y la evaporación. Así también se estimaron tasas de evaporación para cada tipo de suelo aplicando las relaciones evaporación-profundidad a la profundidad promedio observada. El caudal de evaporación total se calculó en 5,437 m<sup>3</sup>/s.

El reporte DGA/GCF-2010 reinterpretaban los mapas geológicos para actualizar el mapeo de los distintos tipos de suelo. El cambio más importante fue el aumento en la superficie de vegas desde 180 km<sup>2</sup> a 261 km<sup>2</sup>. Aplicando las tasas de Mardones a estas nuevas áreas resulta un caudal de evaporación total de 5,844 m<sup>3</sup>/s.

Dada la gran incertidumbre en las áreas, el reporte DGA/GCF-2010 adoptó el promedio de las dos estimaciones, estimando un caudal de evaporación de 5,6 m<sup>3</sup>/s.

Esta evaporación se consideró como la descarga de las sub-cuencas aportantes al Salar. No obstante, existe precipitación sobre el Salar mismo, la que alimenta una parte de la evaporación, por lo tanto, la descarga de las sub-cuencas aportantes

deberá ser igual a la evaporación neta del Salar. Considerando la evaporación neta como la evaporación bruta menos la precipitación sobre el Salar mismo.

#### **4.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LAS SUB-CUENCAS APORTANTES**

En el reporte DGA/GCF-2010 se desarrollaron relaciones entre evaporación y altura en base a estaciones meteorológicas de tipo bandeja. Aplicando estas relaciones a las bandas de elevación de cada sub-cuenca se estimó la evaporación de bandeja para cada sub-cuenca.

Adoptando un factor de bandeja de 0,75 se calculó la evaporación potencial.

Esta evaporación potencial considera la evaporación desde superficies de agua libre y fue aplicada directamente a las superficies de lagos y lagunas. Para áreas de cultivos y vegetación nativa se aplicaron factores de cultivos.

#### **4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL SALAR (ÁREAS SENSIBLES)**

En el reporte DGA/GCF-2010 las relaciones entre evaporación y altura se basaron en estaciones con altura superior a 2430 msnm y para la aplicación de éstas a la superficie del salar se extrapolaron los datos. En vez de usar estas relaciones, en el presente análisis, se aplicaron las tasas de Mardones para lagunas y vegas en la estimación de la evapotranspiración del salar.

La superficie de vegas delimitada por el reporte DGA/GCF-2010 corresponde a 57,08 km<sup>2</sup>, se observó que esta es diferente a la cifra adoptada por Mardones, debido a que las áreas de las vegas han cambiado en respuesta a los cambios en la explotación y de las precipitaciones sobre el Salar. No obstante esta consideración genera una inconsistencia interna en el balance hídrico. Por una parte tenemos una alta evaporación desde el Salar, y por lo tanto un elevado recurso disponible, debido a una mayor superficie, pero por otro lado, tenemos una baja evaporación desde las áreas sensibles del Salar, lo que resulta en un recurso disponible aún mayor.

No queda claro si la estimación de la extensión de las vegas sea la correcta, sin embargo la misma superficie debe ser adoptada en ambos cálculos.



## **5 RECARGA**

---

La recarga al Salar se calculó a través de un simple balance de la zona no saturada. La precipitación mensual sobre la cuenca se ajustó a través de factores que representan la evaporación por interceptación y la evaporación desde el suelo, determinándose con esto la precipitación efectiva. A este valor se le resta la evapotranspiración natural desde la vegetación nativa, la evapotranspiración de los cultivos y la evaporación desde superficies de agua libre, determinando con esto la recarga al acuífero. En este contexto la recarga considera el caudal total en exceso por sobre la capacidad evaporativa de las sub-cuencas, este caudal puede ser parte tanto del flujo superficial como del flujo subterráneo de las sub-cuencas, en este contexto consideraremos el concepto de recarga como sinónimo de escorrentía total. Con la excepción del río San Pedro y Canal Vilama (Sub-cuenca A1) y de algunos eventos infrecuentes de otras sub-cuencas este flujo se presenta de forma subterránea.

Los factores de precipitación efectiva se calibraron para generar una recarga total de la cuenca sobre el Salar igual a la evaporación del Salar mismo, dicha evaporación es considerada como la descarga de la cuenca. Se aplicaron distintos factores a cada sub-cuenca, sin embargo no existe una justificación robusta para el uso de éstos factores.

## **6 ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO**

---

### **6.1 SUBCUENCAS**

El estudio DGA/GCF-2010 delimitó sub-cuencas hidrográficas. Ésta delimitación fue muy útil para facilitar el cálculo del balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama, sin embargo no corresponde a las cuencas hidrogeológicas y por lo tanto ésta situación limita la gestión del recurso hídrico. Dado lo anterior se estimó pertinente delimitar las sub-cuencas hidrogeológicas, cuyos aportes se relacionan con las zonas ecológicas definidas dentro del Salar. La delimitación se basó en las líneas equipotenciales generadas en el estudio de CORFO (CORFO, 1977), el modelo digital de elevación (DEM), la actual distribución de extracciones y las potenciales extracciones futuras.

Se consideró pertinente utilizar como superficie total del Salar la suma de las áreas de evaporación obtenidas a partir de los planos geológicos del Salar de Atacama y que dan forma a las áreas de evaporación de la Figura 2-5 definidas en el reporte DGA/GCF-2010. Estas superficies suman 2.770 km<sup>2</sup>, superficie menor a la formada por las áreas de los sectores 12 y 13 del Salar (DGA/GCF-2010) las que totalizan 2.928 km<sup>2</sup>. Se corrigió esta diferencia de 158 km<sup>2</sup> utilizando las herramientas de edición de ArcGis, redefiniendo el área del Salar la que disminuyó en 156 km<sup>2</sup>, y dando como resultando en un error de cierre razonable de 0,07%. Esto se hizo distribuyendo la superficie de 158 km<sup>2</sup> de acuerdo a las proyecciones hacia el Salar de las áreas circundantes.

Las superficies actualizadas se muestran en el Cuadro 6-1 y la Figura 6-1.

Sub-cuenca	Área [km <sup>2</sup> ]
A1	2.057
A2	1.738
B1	2.026
C1	1.712
C2	2.735
N1	4.217
Salar	2.772
<b>TOTAL</b>	<b>17.257</b>

Cuadro 6-1 Áreas actualizadas de las sub-cuencas del Salar de Atacama

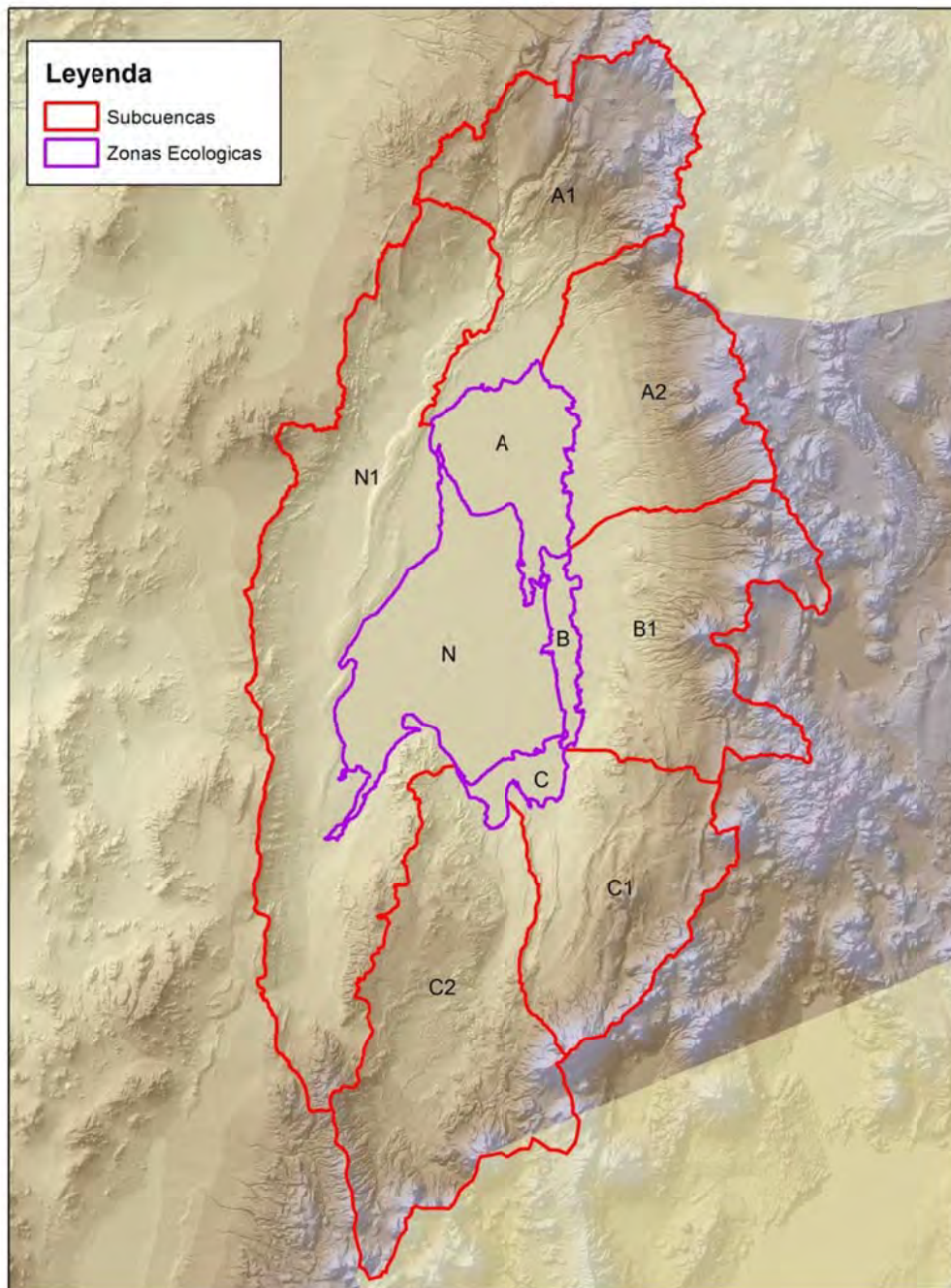


Figura 6-1 Sub-cuencas actualizadas y zonas ecológicas correspondientes

## 6.2 PRECIPITACIÓN

Se investigaron varias alternativas para estimar las precipitaciones sobre las sub-cuencas, de forma de representar adecuadamente la distribución espacial y temporal de las mismas, además se buscó la forma de simplificar los cálculos.

La cuenca del Salar de Atacama no tiene glaciares ni acumulación de nieve interanual, y como el objetivo del balance es la determinación de una recarga promedio anual, los efectos de acumulación de nieve dentro del año no afectan el resultado. Al comparar la cota de nieve calculada por el reporte DGA/GCF-2010 con el DEM indica que existen áreas que siempre se ubican sobre la cota de nieve, provocando la formación de glaciares. A pesar de eso los glaciares no acumulan nieve, indicando que toda la nieve se sublima en las zonas altas. Estos efectos se pueden estimar con un modelo más complejo que requiere datos y parámetros adicionales. No obstante como el objetivo es tener un análisis más simple, estos efectos se considerarán dentro de un factor de precipitación efectiva.

Como se descartó el efecto de acumulación de nieve como elemento importante se hace una simplificación significativa en la estimación de las precipitaciones. Se pudieron eliminar las franjas de elevación usadas en el reporte DGA/GCF-2010 y a su vez aplicar una sola precipitación media anual para cada sub-cuenca considerada.

Para determinar la precipitación promedio anual sobre las sub-cuencas se consideraron tres fuentes de datos: las precipitaciones rellenadas del reporte DGA/GCF-2010 y sus precipitaciones promedios anuales resultantes, las isoyetas del balance hídrico de Chile del año 1987 (en formato raster), y las isolíneas de precipitación desarrollados en el reporte DGA/DICTUC-2008 (ver bibliografía).

Las estadísticas desarrolladas en el reporte DGA/GCF-2010 se consideraron robustas y abarcan un periodo de observación extenso, no obstante no proveen de una buena cobertura en la zona poniente de la cuenca. Las isoyetas del balance hídrico de Chile y las isolíneas del reporte DGA/DICTUC-2008 cubren toda la extensión de la cuenca, pero en el caso del balance nacional sus valores están desactualizados. Para comprobar los tres conjuntos de datos se interpolaron y se extrajeron los valores de las isoyetas e isolíneas en los puntos considerados en el reporte DGA/GCF-2010. Solo se compararon los puntos relevantes que se ubican en la cuenca o que la rodean. Los resultados se presentan en el Cuadro 6-2 y en la Figura 6-2 se muestra las isoyetas del balance hídrico de Chile, las que no tienen un buen ajuste en términos absolutos, siendo en promedio, los valores del reporte DGA/GCF-2010 mayores en 1,435 veces.

Sin embargo, el ajuste relativo de las isoyetas del balance hídrico de Chile con respecto a los valores del reporte DGA/GCF-2010 es mejor, ya que se obtiene un coeficiente de correlación de 0,9736. Es decir, las isoyetas del balance hídrico de Chile representan mejor la variación espacial a pesar de que sus valores están desactualizados en términos absolutos, debido a que el periodo de observación es diferente al de los datos considerados.

Estación	Precipitación media anual [mm] DGA/GCF-2010	Precipitación media anual [mm] DGA/DICTUC-2008	Precipitación media anual [mm] Balance Nacional
Chiu-Chiu	5,5	10,1	7,3
Caspana	81,0	72,6	99,4
El Tatio	146,5	152,2	219,6
Calama	3,7	10,0	3,2
Toconao Experimental	31,3	22,7	43,2
Camar	33,0	28,0	42,0
Socaire	37,4	27,8	62,5
Peine	19,2	21,4	19,9
Rio Grande	69,1	70,9	99,7
Imilac	2,7	25,4	25,6
Monturaqui	58,5	79,0	83,2

Cuadro 6-2 Comparación de valores medios anuales de la precipitación en estaciones meteorológicas.

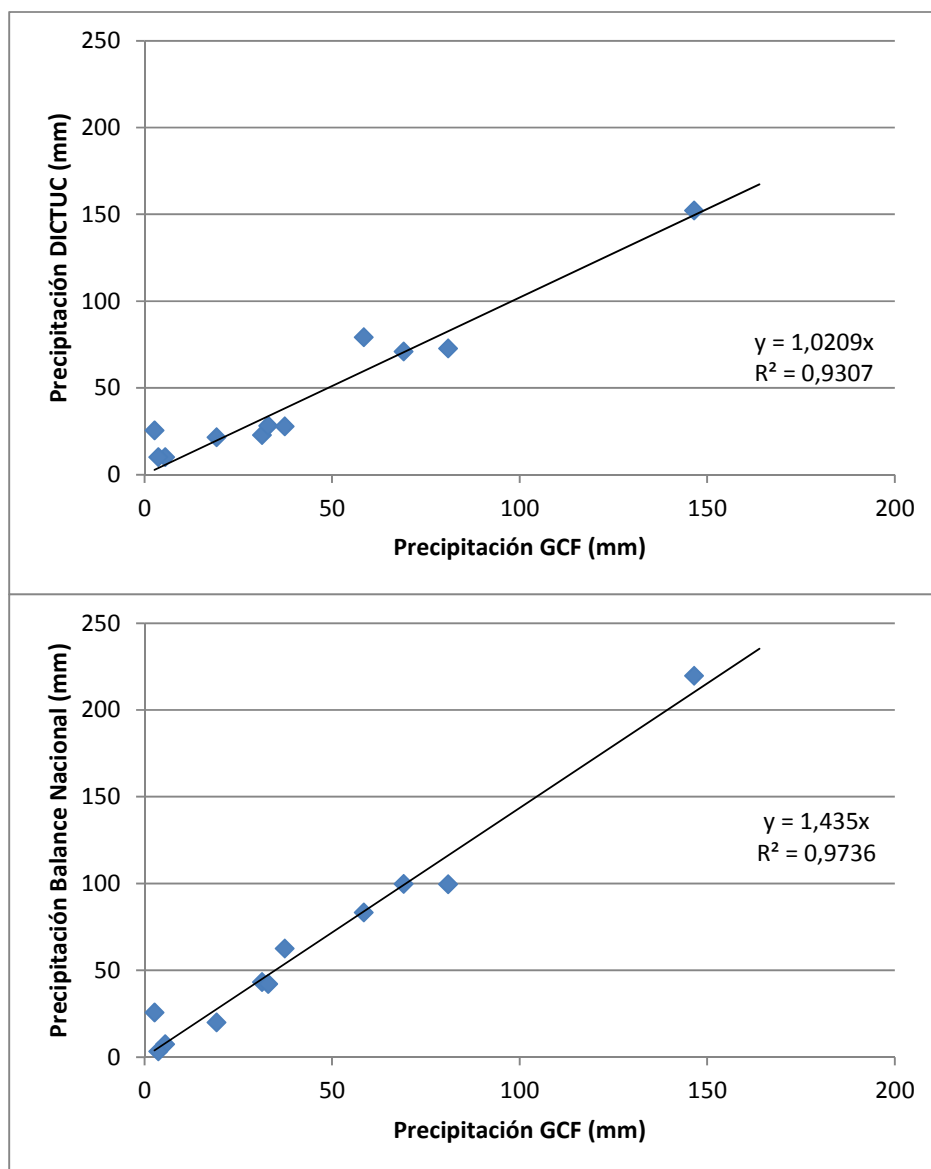


Figura 6-2 Comparación de valores medios de la precipitación en estaciones meteorológicas.

Para los conjuntos de datos correspondientes a las isoyetas del balance hídrico de Chile y las isolíneas del reporte DGA/DICTUC-2008, se calcularon factores de ajuste para los puntos que representan estaciones en el reporte DGA/GCF-2010, estos datos fueron interpolados en ArcGIS dando como resultado un raster de factores. Aplicando los respectivos raster de factores a los raster de precipitación del balance hídrico de Chile y del reporte DGA/DICTUC-2008 se calcularon raster de precipitación ajustada. Estos raster tienen valores de precipitación que coinciden con los valores promedios

anuales de las estaciones analizadas por el reporte DGA/GCF-2010. Se puede apreciar que, debido a la mejor correlación con las estaciones cercanas a la cuenca, el raster de factores del balance hídrico de Chile es más consistente, es decir, los factores varían menos, confirmando que la representación espacial de las isoyetas del balance hídrico de Chile entrega una mejor información de la distribución espacial de la precipitación.

Se evaluaron las precipitaciones promedios para cada sub-cuenca aplicando la herramienta zonal statistics de ArcGIS. El patrón mensual de precipitación de cada cuenca se calculó como el promedio simple de la precipitación mensual de las estaciones El Tatio y Socaire. Los raster de precipitación ajustada coincidieron con todos los valores promedios anuales de las estaciones analizadas por el reporte DGA/GCF-2010.

Las precipitaciones promedios anuales resultantes se muestran en el Cuadro 6-3.

Sub-cuenca	Área [km <sup>2</sup> ]	Precipitación [mm/año]
A1	2.057	104,2
A2	1.738	96,8
B1	2.026	85,9
C1	1.712	90,6
C2	2.735	64,6
N1	4.217	23,9
Salar	2.772	11,2
<b>TOTAL</b>	<b>17.257</b>	<b>-</b>

Cuadro 6-3 Cálculos para la estimación del Balance

### 6.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL SALAR

La evapotranspiración del salar se considera como la descarga de la cuenca y por lo tanto éste es el factor más importante en la determinación de la recarga y disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca del Salar de Atacama

Sin embargo es necesario tener en cuenta que existe precipitación sobre el Salar mismo, la cual alimenta una porción de la evaporación. Las descargas de las sub-cuencas aportantes deben ser iguales a la evaporación neta del salar. Es decir evaporación bruta menos precipitación.

No obstante, al efectuar el cálculo anterior sobre el núcleo del Salar, se obtiene una evaporación negativa ( $95 \text{ l/s} - 525 \text{ l/s} = -430 \text{ l/s}$ ), indicando una recarga neta sobre el núcleo, evidentemente esta situación no se ajusta con la realidad.

Existen dos posibles explicaciones para este desequilibrio.

- i. Es posible que la tasa estimada por Mardones de  $0,005 \text{ mm/día}$  esté subestimada dado el corto periodo de observación considerado y la limitada cobertura de los lisímetros utilizados.
- ii. Es posible que una parte de la precipitación caída sobre el Salar no infiltra hacia la napa, formando charcos sobre la costra del Salar. Estos charcos evaporan rápidamente el agua contenida en ellos, a una tasa de evaporación mayor en varios órdenes de magnitud a la considerada por Mardones.

Se recomienda realizar estudios adicionales para levantar nueva información sobre tasas de evaporación del Salar. Mientras tanto, se propone considerar que la precipitación sobre el núcleo del Salar no contribuye al balance hídrico y por tanto en este caso no se sustrae la precipitación sobre el núcleo

La precipitación sobre el Salar, excluyendo el núcleo, se calculó según el método planteado para las otras sub-cuencas, y resultó en  $0,462 \text{ m}^3/\text{s}$ , producto de una precipitación sobre la superficie del Salar de  $11,2 \text{ mm/año}$ . Esta precipitación es muy parecida a los  $14 \text{ mm}$  adoptados en la minuta 60.

Al restar esta precipitación de la evaporación bruta del Salar, resulta una descarga neta de las sub-cuencas aportantes al Salar de  $5,17 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### **6.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DESDE EL SALAR (ÁREAS SENSIBLES)**

Mardones estimó las áreas de zonas de vegas y lagunas en el Salar de Atacama, las que posteriormente se actualizaron en el reporte DGA/GCF-2010 en base a mapas geológicos.

Por otro lado, en la delimitación de áreas de vegas y lagunas en el reporte DGA/GCF-2010 se utilizó un método distinto al empleado por Mardones. Las tres estimaciones de superficies sensibles se comparan en el Cuadro 6-4.



	Mardones	Mardones Actualizada	GCF
Vegas [km <sup>2</sup> ]	180,00	261,00	57,08
Lagunas [km <sup>2</sup> ]	12,60	12,60	16,57

Cuadro 6-4 Comparación del tamaño de áreas de Vegas y Lagunas dentro del Salar

No queda claro cuál de las estimaciones del tamaño de las áreas de las vegas es la correcta, sin embargo la superficie adoptada debe estar alineada con la superficie adoptada en la estimación de la evaporación y de la descarga del Salar. Por lo tanto se adoptó el promedio de las superficies originales y actualizadas de Mardones.

La distribución de áreas sensibles se basó en el mapeo de zonas de Mardones y los resultados se muestran en el Cuadro 6-5.

Zona	Caudal Vegas [m <sup>3</sup> /s]	Caudal Lagunas [m <sup>3</sup> /s]	Caudal Ecológico [m <sup>3</sup> /s]
A	0,53	0,35	0,88
B	0,13	0,22	0,35
C	0,11	0,28	0,38
N	0	0	0
Total	0,77	0,85	1,61

Cuadro 6-5 Cálculo de Caudal Ecológico para áreas sensibles

Lo anterior corresponde a un aumento de 0,3 m<sup>3</sup>/s respecto de la estimación del reporte DGA/GCF-2010.

## 6.5 RECARGA

La recarga al salar desde las sub-cuencas aportantes se calculó según el mismo método propuesto en el reporte DGA/GCF-2010. Debido al cambio en la descarga de las sub-cuencas al Salar como resultado de considerar la precipitación sobre el Salar, los factores de precipitación efectiva se recalibraron.

Para determinar el aporte de las distintas sub-cuencas, se dividió el Salar en cinco grandes zonas de descarga que en general se relacionan con las zonas ecológicas, las cuales reciben sus aportes desde las distintas sub-cuencas circundantes. No se aplicó

una delimitación más fina debido a la incertidumbre en las direcciones de flujo dentro del Salar. La Figura 6-4 muestra las distintas zonas de descarga del Salar y las sub-cuencas aportantes asociadas.

La delimitación se basa en el análisis de las líneas equipotenciales generadas en el estudio de CORFO (CORFO, 1977) mostradas en la Figura 6-3. No se consideró flujo desde los sectores noreste o sur del Salar hacia el núcleo dado el efecto impermeabilizador de la cuña salina.

Se puede observar que la zona C del Salar, se ha dividido en 2 sub-zonas, una que recibe el aporte de la sub-cuenca C1 y la otra que recibe el aporte de la sub-cuenca C2. Se dividió la zona C debido a que se estima que el sistema hídrico funcionaba de esta forma históricamente. No obstante, debido al gran caudal de derechos otorgados en la sub-cuenca C2, el que supera la recarga estimada, podría resultar que la zona oeste de la zona C del Salar dependa de un flujo proveniente de la sub-cuenca C1. Por lo tanto se estima necesario para fines de gestión de los recursos hídricos administrar la zona C como una sola unidad.

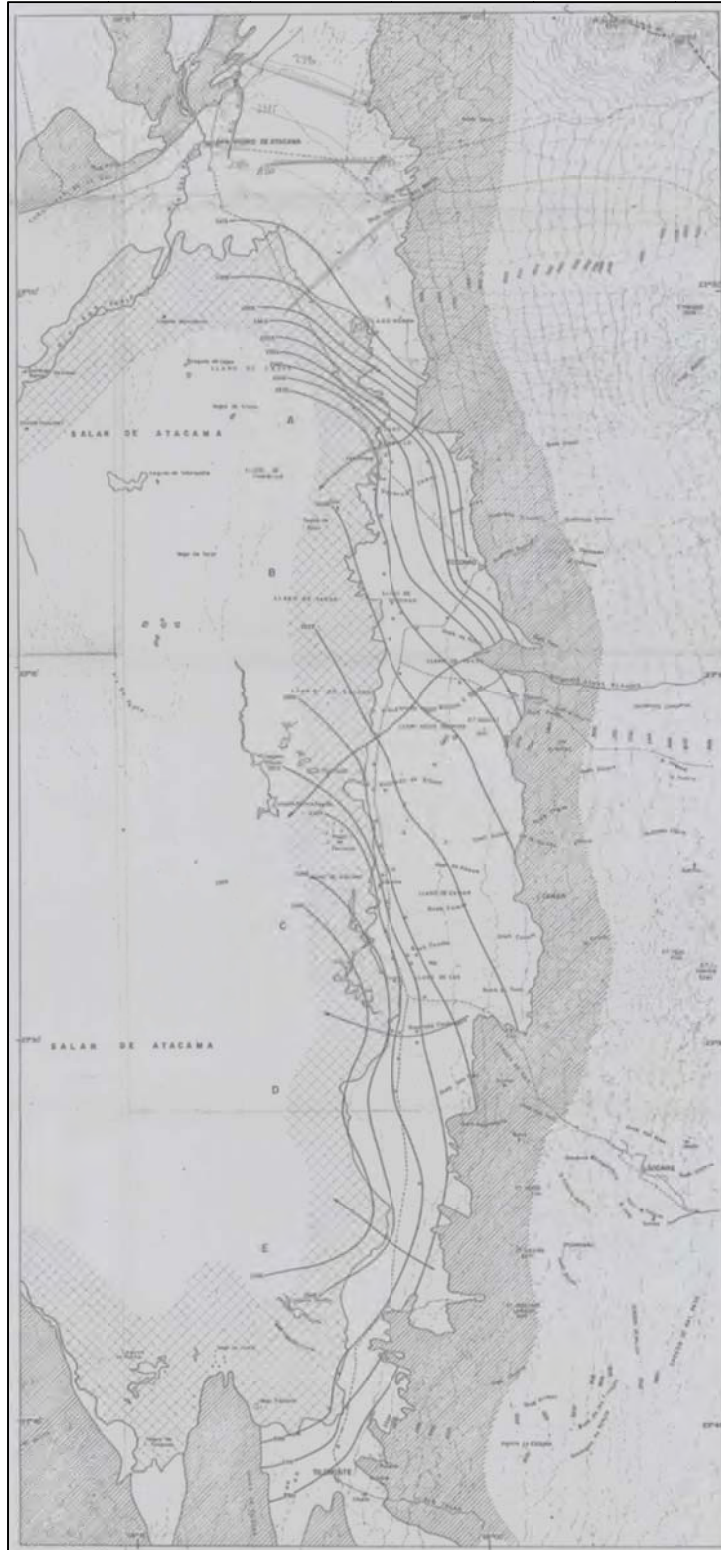


Figura 6-3 Equipotenciales (CORFO-1977)

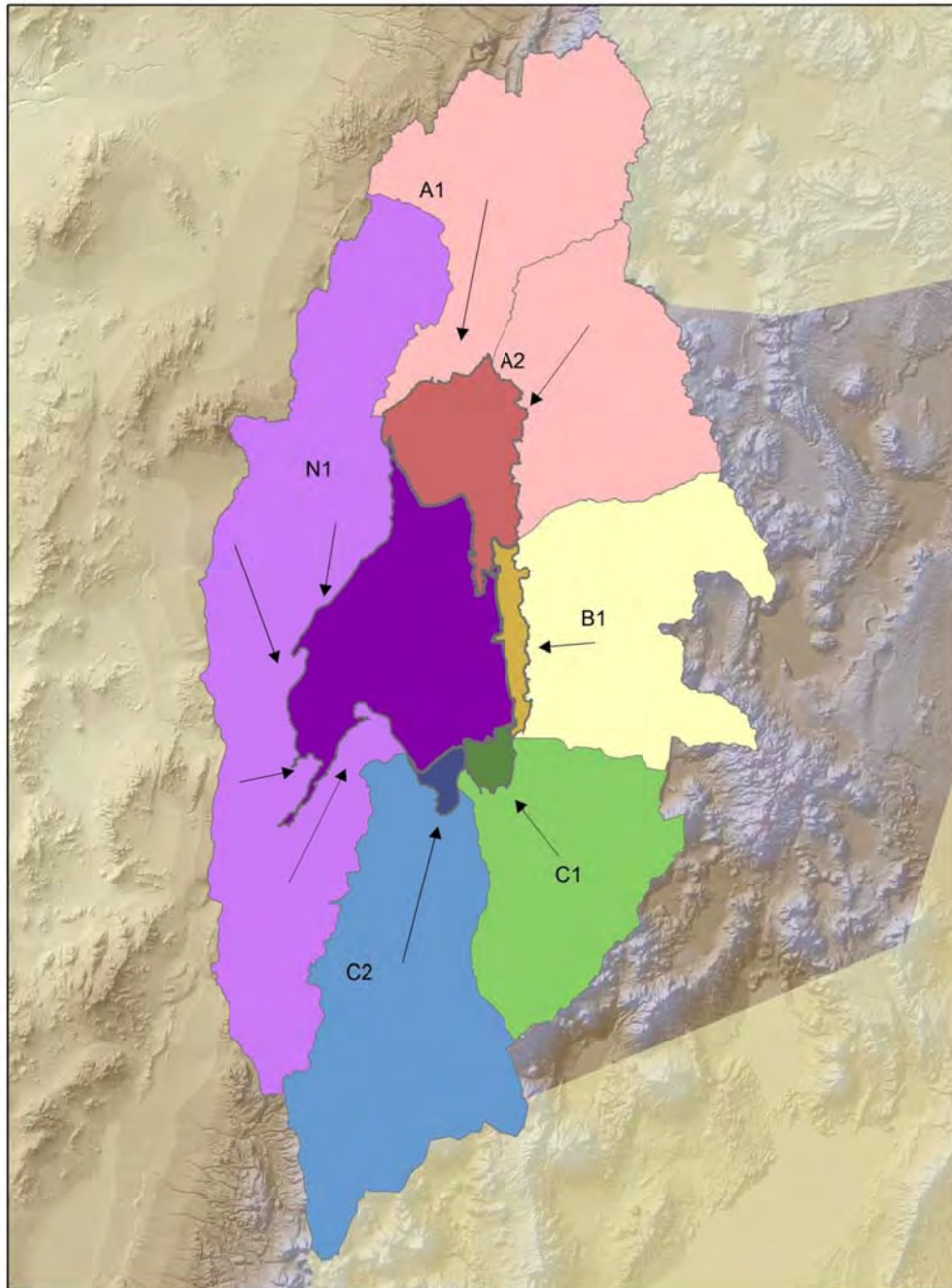


Figura 6-4 zonas de descarga del Salar y sus respectivas sub-cuencas aportantes.  
(Los colores y flechas indican hacia qué zonas del Salar aportan las distintas sub-cuencas)

Se cruzaron las 5 zonas de descarga con las distintas costras identificadas por Mardones las que se muestran en la Figura 2-5.

Aplicando la metodología señalada en la sección 6.3 para cada zona de descarga del Salar se pueden obtener las evaporaciones netas para cada una de las tres zonas.

Se adoptaron factores de precipitación efectiva cuyo valor resultó del balance entre la recarga de las sub-cuencas aportantes y la descarga de la zona de descarga correspondiente. El resultado final de las recargas se muestran en el Cuadro 6-6 y

Cuadro 6-7. Se puede ver que la recarga total se ajusta bien a la descarga del Salar, estimada anteriormente en un monto de 5,17 m<sup>3</sup>/s.

Zonas del Salar	Subcuencas	Descarga desde zonas del Salar [m <sup>3</sup> /s]	Precipitación sobre subcuencas [m <sup>3</sup> /s]	Factor	Escorrentía Total desde subcuencas [m <sup>3</sup> /s]	Demanda Ecológica subcuencas aportantes [m <sup>3</sup> /s]	Caudal Pasante al Salar [m <sup>3</sup> /s]
A	A1, A2	2,703	12,133	0,2487	3,017	0,314	2,703
B	B1	1,244	5,518	0,2523	1,392	0,148	1,244
C	C1	0,724	4,917	0,1555	0,765	0,040	0,724
	C2	0,403	5,607	0,0719	0,403	0,000	0,403
N	N1	0,095	3,200	0,0297	0,095	0,000	0,095
Total		5,170	31,375	-	5,672	0,502	5,170

Nota – La Demanda Ecológica aquí se refiere a la demanda dentro de las sub-cuencas aportantes.

Cuadro 6-6 Balance entre zonas de descarga y recarga de sub-cuencas aportantes

Sub-cuenca	Caudal Pasante al Salar [m <sup>3</sup> /s]
A1	1,442
A2	1,261
B1	1,244
C1	0,724
C2	0,403
N1	0,095
<b>TOTAL</b>	<b>5,170</b>

Cuadro 6-7 Recargas por sub-cuenca aportante al Salar

## 6.6 OFERTA HÍDRICA ACTUALIZADA

En base a las recargas y demandas ecológicas actualizadas se reevaluó la oferta de los recursos hídricos. Los resultados se muestran a continuación en el Cuadro 6-8.

Sub-cuenca	Caudal Aportante [m <sup>3</sup> /s]	Caudal Demanda Ecológica [m <sup>3</sup> /s]	Escorrentia Superficial [m <sup>3</sup> /s]	Caudal Subterráneo Remanente [m <sup>3</sup> /s]	Zona Aguas Abajo	Demanda Ecológica Aguas Abajo [m <sup>3</sup> /s]	Oferta Hídrica [m <sup>3</sup> /s]
A1	1,691	0,249	0,830	0,612	A	0,880	0,993
A2	1,326	0,065	0,000	1,261			
B1	1,392	0,148	0,000	1,244	B	0,350	0,894
C1	0,765	0,040	0,000	0,724	C	0,380	0,748
C2	0,403	0,000	0,000	0,403			
N1	0,095	0,000	0,000	0,095	N	0,000	0,095
<b>Total</b>	<b>5,672</b>	<b>0,502</b>	<b>0,830</b>	<b>4,340</b>	<b>Total</b>	<b>1,610</b>	<b>2,730</b>

Cuadro 6-8 Oferta Hídrica de la cuenca del Salar de Atacama.

Cabe recordar que el caudal subterráneo remanente es la oferta hídrica en la sub-cuenca sin considerar las demandas ecológicas aguas abajo dentro del Salar. Al tomar en cuenta estas demandas ecológicas se reduce el posible caudal otorgable como se puede ver en la última columna del Cuadro 6-8.

El Cuadro 6-8 muestra una oferta hídrica menor a la estimada anteriormente en el reporte DGA/GCF-2010.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

Luego de analizados los resultados presentados en este informe, se concluye lo siguiente:

- En el presente informe técnico se consideró la misma sectorización del área del estudio generada en el reporte DGA/GCF-2010. Dicha selección se basó en el prolijo análisis cartográfico incluido en ese reporte.
- La oferta hídrica de recursos hídricos en el Salar de Atacama ha disminuido con respecto a los resultados del reporte DGA/GCF-2010, debido principalmente a que en el presente informe técnico se ha considerado la precipitación sobre el salar para determinar la evaporación neta. En el reporte DGA/GCF-2010 se consideró una evaporación de 5,6 m<sup>3</sup>/s y en el presente informe técnico, el valor de la evaporación neta alcanzó un valor de 5,178 m<sup>3</sup>/s.
- En el reporte DGA/GCF-2010 la determinación de la precipitación efectiva sobre las cuencas aportantes al Salar se realizó a través de coeficientes de precipitación efectiva cuyo valor no está claramente justificado. Para el presente informe técnico sí fue considerado y justificado este cálculo.
- Mientras la demanda ecológica se ha considerado en la estimación de la oferta hídrica, es probable que el cálculo simple de caudales promedios anuales a nivel de sub-cuenca no sea del todo adecuado para asegurar la completa protección de estas entidades ambientales. No sólo se debe considerar un cierto valor mínimo de caudales para una zona de demanda ecológica, sino que también es importante considerar el nivel freático mínimo que asegure la subsistencia de estas entidades que son objeto de protección. En este sentido se deberán desarrollar herramientas de gestión que consideren un nivel adecuado de la napa en cada área de protección. En síntesis, se recomienda que se desarrolle un PAT para el Salar de Atacama.
- La gestión de los recursos hídricos del salar debe considerar la disponibilidad dentro de las sub-cuencas aportantes, asegurando que las extracciones no superen la recarga descontadas las demandas ecológicas. Además, se debe considerar la disponibilidad a nivel de las zonas ecológicas del Salar aguas abajo que presentan demandas ecológicas adicionales lo cual resultará en una reducción de la disponibilidad en las sub-cuencas aportantes.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

“Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Para Constituir Derechos de Aprovechamiento en la Subcuencas Afluentes al Salar de Atacama. II Región”, Minuta 60, DGA, DEP, 1999.

“Levantamiento Hidrogeológico Para el Desarrollo de las Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile XV, I, II Y III Regiones”, SIT N° 157, DGA, DEP, DICTUC, 2008.

“Actualización Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Para Constituir derechos de Aprovechamiento en la Subcuencas Afluentes al Salar de Atacama. II Región”, DGA, DEP, GCF, 2010.

“Proyecto Chi 535, Investigación de recursos hidráulicos en el Norte Grande”, CORFO, 1977.