



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

**INFORME TÉCNICO
ESTIMACIÓN DE RECARGA EN CUENCAS
ALTIPLÁNICAS, REGIÓN DE ATACAMA.**

**REALIZADO POR:
División de Estudios y Planificación
SDT N° 334**

Santiago, diciembre de 2012

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	OBJETIVOS.....	7
2.1.	Objetivo General	7
2.2.	Objetivos Específicos	7
3.	ÁREA DE ESTUDIO.....	8
4.	METODOLOGÍA.....	11
4.1.	Análisis Metodológico Previo	11
4.1.1.	Etapa I: Relación Escorrentía Total – Precipitación Media.....	11
4.1.2.	Etapa II: Estimación de la Recarga Neta	14
4.2.	Esquema Metodológico.....	15
4.3.	Cálculo Precipitación Media Anual	16
4.4.	Cálculo de Coeficientes de Escorrentía	18
4.5.	Componentes de Invierno y Verano de la Precipitación Media Anual.....	18
4.6.	Cálculo de Caudal Medio Anual y Estimación de la Recarga	19
5.	RESULTADOS.....	20
5.1.	Precipitación Media Anual	20
5.2.	Coeficientes de Escorrentía y de Distribución de Precipitaciones	23
5.3.	Caudal Medio Anual y Estimación de la Recarga	28
6.	CONCLUSIONES	34
7.	BIBLIOGRAFÍA	36
	ANEXO	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales características de cuencas altiplánicas de la Región de Atacama .	10
Tabla 2: Precipitación media anual de cada cuenca obtenida por método de las isoyetas y por estimación.	20
Tabla 3: Coeficientes de escorrentía y coeficientes de distribución de precipitaciones de invierno y verano para cada cuenca.	23
Tabla 4: Síntesis de resultados de Caudales y Recarga Neta Mínima Final	29
Tabla 5: Cuencas con valor mínimo y máximo de la recarga neta mínima final estimada.	31
Tabla 6: Cálculo de Parámetros, Caudales y Recarga Neta con isoyetas DICTUC	38
Tabla 7: Cálculo de Parámetros, Caudales y Recarga Neta con isoyetas Balance Hídrico	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación geográfica de cuencas altiplánicas de la Región de Atacama (SIT N° 157, DICTUC, 2009).	9
Figura 2: Esquema metodológico	16
Figura 3: Isoyetas originales e interpoladas DICTUC y Balance Hídrico	17
Figura 4: Distribución espacial de la precipitación media anual calculada con isoyetas DICTUC y Balance Hídrico.	21
Figura 5: Distribución espacial de la precipitación media para invierno y verano calculada a partir de isoyetas DICTUC	26
Figura 6: Distribución espacial de la precipitación media para invierno y verano calculada a partir de isoyetas Balance Hídrico	27
Figura 7: Recarga neta mínima final calculada para las cuencas en estudio	30
Figura 9: Distribución espacial de cuencas con recarga neta mínima final por sobre y bajo el promedio	33
Figura 10: Distribución espacial de la recarga neta calculada	40

INDICE DE GÁFICOS

Gráfico 1: Correlación entre caudales medios anual históricos y promedio de caudales mínimos decadales promediados.	15
Gráfico 2: Coeficientes de escorrentía desagregados para invierno y verano	18
Gráfico 3: Precipitación media anual de cada cuenca calculada con las isoyetas de DICTUC y Balance Hídrico.	22
Gráfico 4: Distribución de precipitaciones en invierno y verano, obtenidas a partir de isoyetas DICTUC.....	24
Gráfico 5: Distribución de precipitaciones en invierno y verano, obtenidas a partir de isoyetas del Balance Hídrico	25
Gráfico 6: Valores de recarga neta mínima final estimada por cuenca y valor promedio.	32

1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones de extrema aridez de la XV, I, II y III Regiones, determinan que los recursos subterráneos de la meseta altiplánica y de las quebradas con vertiente pacífica sean la principal fuente de abastecimiento de recursos de agua continentales, sin embargo, corresponden también a sectores con escasa información, en la mayoría de los casos sin estaciones hidrométricas, y con poco conocimiento hidrológico lo que dificulta la evaluación de la disponibilidad del recurso.

Aumentar el conocimiento de los procesos hidrogeológicos e hidrológicos que intervienen y determinan los flujos aprovechables de estos sistemas es un trabajo de largo plazo, no obstante, el incremento de la demanda de agua (compañías mineras principalmente, y en menor grado ganadería y agricultura de los pueblos originarios) implica la búsqueda de soluciones de corto a mediano plazo, que a partir de la información disponible y en forma razonable, se pueda hacer cargo de la evaluación hidrológica dentro de un cierto nivel de certidumbre.

Dentro de esta línea de trabajo, desde el año 2008, la DGA ha abordado diferentes estudios que han permitido plantear diversas metodologías para la estimación de las recargas que se producen en el altiplano y en la precordillera del Norte de Chile. Estos trabajos son:

- Estudio Evaluación de Los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama Ubicadas entre el Río Copiapó y La Región de Antofagasta: Informe Técnico; SDT N° 276; DARH – DGA, 2009.
- Estudio Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III, SIT N° 157 (parte I) y SIT N° 195 (parte II); DICTUC, 2009.
- Estudio Metodología para la Estimación de Recarga de Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica en el Norte de Chile XV, I, II, y III Regiones, SIT N° 221; GCF Ingenieros Limitada, 2010.
- Propuesta Metodológica para Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas y de Vertiente Pacífico: Minuta Técnica; Luis Rojas Badilla y Carlos Salazar M.; DEP – DGA, 2010.
- Estimación de Recargas en Cuencas Altiplánicas Y Precordilleranas de Vertiente Pacífica; SIT N° 251; Aquaterra Ingenieros Limitada, 2011.
- Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas Seleccionadas: Informe Técnico; SDT N° 317; DEP – DGA, 2011.

Es en este último informe donde se recogen los avances y consideraciones anteriores y además, considerando la necesidad original de contar con una herramienta de aplicación simple y de precisión razonable dada la escasa información disponible, se presenta una propuesta metodológica basada en un modelo simplificado del proceso de recarga en ambientes áridos a nivel regional orientada a estimar la recarga neta en cuencas altiplánicas del norte de Chile con escasa información hidrométrica. Su dominio de aplicación queda demarcado a las cuencas y subcuencas altiplánicas o de

vertiente Pacífica entre la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Atacama, y que tengan una altura mínima de 1.500 msnm.

Basándose en lo anteriormente mencionado, este trabajo tiene el propósito de aplicar la metodología desarrollada en las cuencas altiplánicas de la Región de Atacama para estimar la recarga en cada una de ellas y aportar, de esta forma, en la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos de la zona.

Para su desarrollo fueron consideradas las 32 cuencas endorreicas presentadas en el estudio de DICTUC (2009) y para el cálculo de precipitación media anual de cada cuenca, se utilizó el método de las isoyetas. Las isoyetas fueron las del Balance Hídrico Nacional (1987) y las generadas en el estudio de DICTUC (2009). A pesar que en la metodología se establece que es adecuado el uso de las isoyetas del Balance Hídrico, se utilizan también las isoyetas de DICTUC ya que fueron generadas considerando datos de estaciones pluviométricas en territorio argentino que aportan mayor información, sobre todo en este caso donde se tienen cuencas compartidas con la nación trasandina.

Luego, se calcularon los coeficientes de escorrentía de invierno y verano de cada cuenca y se determinó la componente de invierno y verano de la precipitación media anual en cada cuenca (variable hidrológica, relación Escorrentía Total - Precipitación Media de la cuenca) para obtener el caudal medio anual de salida de la cuenca o escorrentía total de largo plazo.

Así, se obtuvo la recarga neta mínimo de cada cuenca que corresponde al 40% de la escorrentía total de salida de cada una de ellas. Como se aplicó la metodología considerando dos fuentes de información de precipitaciones, en el análisis de los resultados se consideró utilizar el menor valor de recarga para estar del lado de la seguridad en la evaluación de la disponibilidad del recurso en cada una de las cuencas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Estimar la recarga mínima en las cuencas altiplánicas de la Región de Atacama, aplicando la metodología desarrollada en el Informe Técnico SDT N° 317 (DEP-DGA, 2011), para apoyar en la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos en el área de estudio.

2.2. Objetivos Específicos

Para la consecución del objetivo general del trabajo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la metodología desarrollada para verificar si las cuencas en estudio cumplen con las restricciones y consideraciones establecidas en ella.
- Calcular la precipitación media anual y los coeficientes de escorrentía de invierno y verano de cada cuenca.
- Determinar la componente de invierno y verano de cada cuenca según su ubicación geográfica.
- Calcular el caudal medio anual de salida y la recarga neta mínima de cada cuenca.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca las 32 cuencas de características endorreicas en la franja del Altiplano o Puna de la Región de Atacama (DICTUC, 2009).

En el extremo norte, colindando con la cuenca del salar de Pajonales, se encuentran las cuencas de los salares de Gorbea, de la Azufrera y de Agua Amarga. En el extremo sur, situada al oriente de la cuenca exorreica del río Copiapó y representando el último exponente de este tipo de cuencas a lo largo del país, se ubica la Laguna del Negro Francisco. Entre el primer grupo y esta última cuenca de la Puna chilena existe un gran número de unidades de variada extensión y morfología.

Dentro de las cuencas con mayores dimensiones en la Región están las de los salares de Pedernales, Maricunga, Grande y la Isla, además de las de Laguna Verde, Lagunas Bravas, Piedra Pómez y Laguna del Negro Francisco, todas con más de 700 km² de superficie.

De las cuencas existentes, algunas poseen un desarrollo compartido con la República Argentina, siendo la cuenca del Salar de las Parinas la de mayor extensión. De las hoyas hidrográficas descritas sólo la Laguna de Colorados posee una pequeña parte de su superficie en territorio chileno, similar a lo que ocurre con Laguna del Bayo. Otras hoyas (Quebrada la Trinchera, Lagunas Bravas, Sierra Nevada) se desarrollan casi en forma íntegra en territorio nacional, con una pequeña extensión más allá de los límites fronterizos. Por último, las cuencas de Quebrada Las Amarillas, Laguna Escondida y Salar de las Parinas comparten su área en proporciones similares en ambos países.

Es importante mencionar que se utilizó la definición realizada por DICTUC ya que corresponden a una representación más precisa que las cuencas administrativas definidas en el BNA. Para la delineación de las cuencas se utilizó como información de entrada, principalmente, modelos digitales de elevación de la USGS¹, complementados con diversas fuentes de información (coberturas shape de la DGA y DICTUC, imágenes Landsat, Google Earth, mapas hidrográficos, otros estudios, etc.) y la delineación automática se realizó con el software *Watershed Modeling System (WMS)*².

En la Figura 1 se presenta la ubicación geográfica de las cuencas y en la Tabla 1 se presenta un cuadro resumen con las principales características de las cuencas.

¹ U.S. Geological Survey (<http://seamless.usgs.gov>)

² www.scisoftware.com

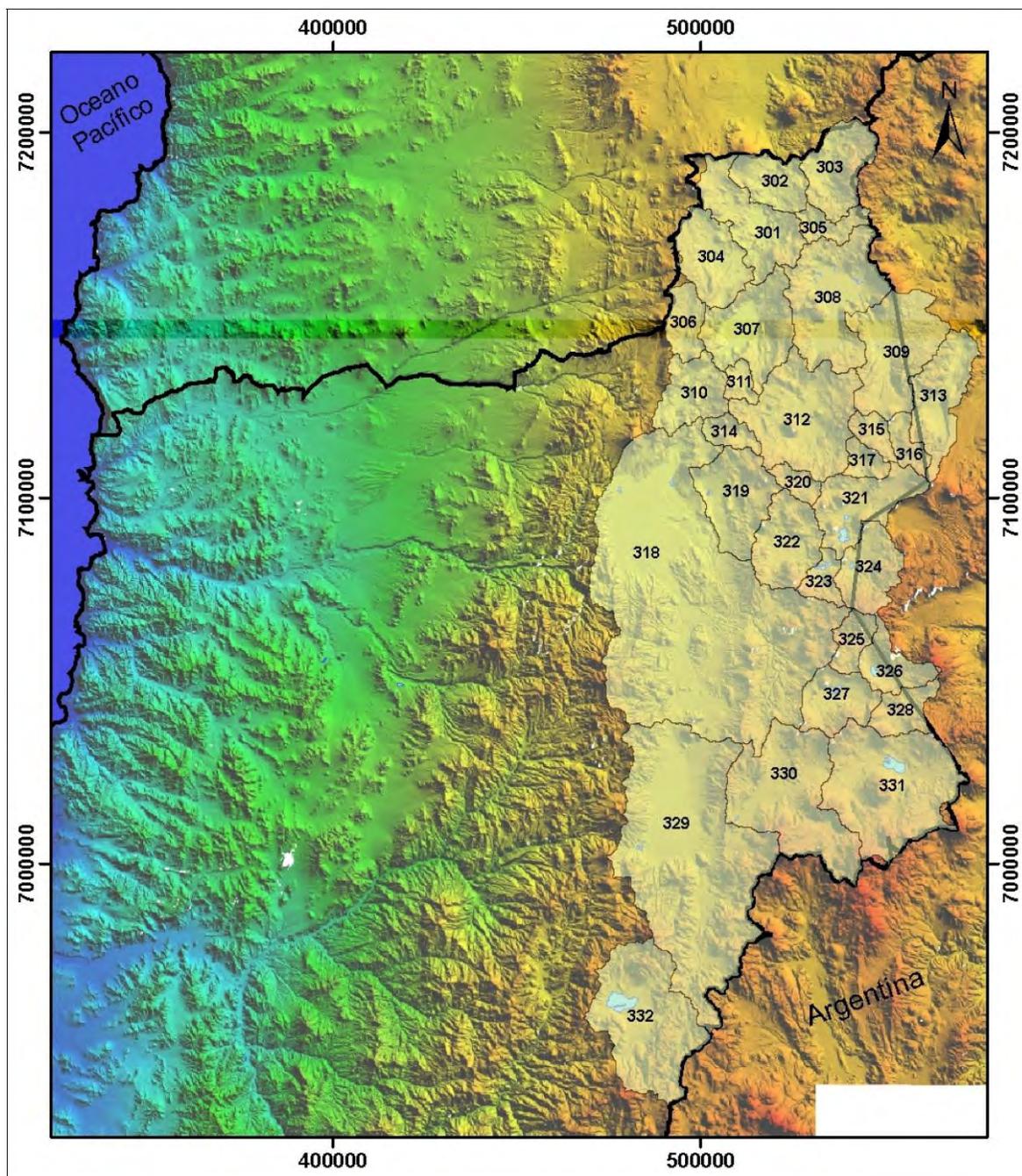


Figura 1: Ubicación geográfica de cuencas altiplánicas de la Región de Atacama (SIT N° 157, DICTUC, 2009).

ID	Nombre Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Altura Min (m)	Altura Med (m)	Altura Max (m)	Area Cuenca (km ²)	Compartida	Orientación
301	Salar de Agua Amarga	513653	7175294	3550	4037	5075	461,753	No	NO-SE
302	Salar de la Azufrera	519395	7186080	3580	3998	5465	250,170	No	S/O
303	Salar de Gorbea	537657	7189719	3940	4446	5430	363,811	No	N-S
304	Cerro Blanco	503041	7165020	3650	4023	4600	379,264	No	NO-SE
305	Qda. La Rossa	535426	7174447	4220	4457	4980	128,896	No	O-E
306	Cerro El Encanche	495894	7147565	4090	4268	4970	176,331	No	N-S
307	Salar de Aguilar	514084	7145910	3330	3920	5040	513,903	No	S/O
308	Salar de La Isla	536212	7154111	3960	4325	5750	736,399	No	N-S
309	Salar de Las Parinas	552958	7140031	3960	4373	5750	613,782	Si	NE-SO
310	Salar de Infieles	497533	7128218	3530	4040	4980	304,625	No	S/O
311	Cerro Conito de los Infieles	510876	7131052	4000	4287	4940	76,336	No	S/O
312	Salar Grande	527824	7121812	3970	4400	5380	781,104	No	S/O
313	Laguna de Colorados	565565	7127330	3880	4420	6010	416,727	Si	NE-SO
314	Qda. Los Maranceles	508019	7117275	3915	4389	4870	107,058	No	O-E
315	Qda. El Llano	547012	7117160	4430	4761	5760	104,149	No	NO-SE
316	Qda. La Trinchera	556322	7114311	4390	4807	5940	111,748	Si	NO-SE
317	Laguna de Las Parinas	544766	7109631	4300	4666	5760	95,591	No	S/O
318	Salar de Pedernales	498821	7070221	3350	3996	6070	3587,556	No	NO-SE
319	La Laguna	509670	7099754	3510	4205	5530	456,868	No	N-S
320	Cerro Agua de Morales	526338	7103759	4590	4789	5530	89,427	No	NO-SE
321	Lagunas Bravas	543927	7098084	4220	4614	6040	408,032	Si	S/O
322	Salar de Piedra Parada	523487	7087401	4130	4503	5910	380,576	No	N-S
323	Lagunas del Jilguero	533445	7077469	4170	4729	5910	112,866	No	S/O
324	Laguna del Bayo	546100	7079975	4240	4873	6140	317,052	Si	N-S
325	Sierra Nevada	541377	7060636	4670	5112	6110	141,837	Si	NE-SO
326	Laguna Escondida	551996	7054019	4370	4847	6400	217,229	Si	S/O
327	Wheelwright	537163	7044236	4240	4674	6070	292,265	No	S/O
328	Qda. Las Amarillas	555387	7041806	4560	4893	5880	183,562	Si	S/O
329	Salar de Maricunga	497260	7001524	3740	4265	6700	2194,516	No	N-S
330	Piedra Pomez	524983	7017595	4360	4910	6700	918,737	No	S/O
331	Laguna Verde	551385	7020864	4340	4914	6850	1001,739	No	S/O
332	Laguna del Negro Francisco	485091	6957239	4130	4547	5990	905,326	No	N-S

Tabla 1: Principales características de cuencas altiplánicas de la Región de Atacama

4. METODOLOGÍA

4.1. Análisis Metodológico Previo

Previo a la aplicación de la metodología propuesta en el SDT N° 317, es necesario hacer un análisis de ella, principalmente para revisar su aplicabilidad al área de estudio de acuerdo a los supuestos, restricciones y otras consideraciones que se plantean. A continuación se analizan las dos etapas en las que se desarrolla la metodología para establecer la línea de trabajo en su aplicación.

4.1.1. Etapa I: Relación Escorrentía Total – Precipitación Media

En la primera etapa de la metodología se busca desarrollar un modelo conceptual que determine una relación de largo plazo entre la escorrentía total de salida y la precipitación media sobre la cuenca (fuente principal de recarga de acuífero altiplánicos) ya que se considera que *“si una cuenca o subcuenca posee caudal de salida conocido (superficial y subterráneo), es razonable asumir que su valor medio de largo plazo representa la escorrentía total”*.

Para esto se adopta como base el modelo conceptual desarrollado por la JICA (1995)³, donde se establece una primera relación entre la precipitación media y la escorrentía total en cuencas del norte de Chile y se considera la hipótesis que para que la relación sea teóricamente correcta el flujo subterráneo pasante debe ser nulo o poco significativo respecto al caudal superficial.

$$Q_{salida} = f \cdot Pp_{cuenca} \cdot A_{cuenca}$$

$$Pp_{cuenca} = m \cdot f + C$$

Donde

Pp_{cuenca}	Precipitación media anual de largo plazo en la cuenca
Q_{salida}	Caudal medio superficial de salida de la cuenca o escorrentía total de largo plazo
A_{cuenca}	Área de la cuenca
f	Coefficiente de escorrentía en la cuenca
m y C	Coefficientes de ajuste lineal

De acuerdo a lo anterior, se complejizó el modelo de la JICA incorporando de forma individual e independiente dos nuevas variables o variantes: una variante de orden hidrogeológico y una variante de orden hidrológico. Ambas deben ser evaluadas de forma independiente, lo cual establece dos líneas de trabajo a seguir en esta etapa de la metodología, por lo que se analiza cada una de ellas para determinar su aplicabilidad al área de estudio.

³ *The Development of Water Resources in Northern Chile*, JICA-DGA, PCI, 1995.

Variante Hidrogeológica

Se propone la zonificación de la cuenca de drenaje en dos zonas en función de la geología superficial: la zona Z_2 , zona de cabecera de la cuenca asociada a suelos poco permeables (rocas antiguas y formaciones volcánicas impermeables) y la zona Z_1 , asociada a formaciones de origen sedimentario (antiguas y modernas) de mayor permeabilidad. El modelo queda expresado de la siguiente forma:

$$Q_2 = f_2 \cdot P_c \cdot Z_2$$

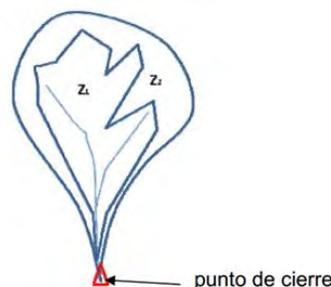
$$\frac{Q_2}{Z_1} = P_{2,1}$$

$$Q_1 = f_1 \cdot (P_c + P_{2,1}) \cdot Z_1$$

$$Q_1 = f_1 \cdot P_c \cdot Z_1 + f_1 \cdot f_2 \cdot Z_1$$

$$P_c = m_2 \cdot f_2 + C_2$$

$$(P_c + P_{2,1}) = m_1 \cdot f_1 + C_1$$



Donde

Q_2	Escorrentía total de salida de la cuenca 2
Q_1	Escorrentía total de salida de la cuenca 1
Z_2	Área de la cuenca 2
Z_1	Área de la cuenca 1
f_2	Coefficiente de escorrentía de la zona 2
f_1	Coefficiente de escorrentía de la zona 1
P_c	Precipitación media anual de largo plazo de la cuenca
$P_{2,1}$	Aporte de la escorrentía total desde la zona 2 a la zona 1, expresada en términos de precipitación media
m_1, m_2, C_1, C_2	Coefficientes de ajuste lineal

Las restricciones que presenta el modelo para esta variante son dos. En primer lugar, el modelo tiene un buen ajuste para cuencas ubicadas sobre la coordenada UTM 7.500.000 Norte, por lo que no es posible aplicarlo en cuencas ubicadas al sur de dicha coordenada. En segundo lugar, el modelo tiene un buen ajuste para cuencas con precipitación media anual superior a 100 mm/año por lo que en cuencas con menor precipitación no es posible su aplicación. Si no se cumple una o ambas restricciones, esta variante no puede ser aplicada.

Considerando la ubicación del centroide de cada cuenca (Tabla 1), se tiene que todas ellas están ubicadas al sur del área donde este modelo tiene un buen ajuste, por lo que para este trabajo se descarta la utilización de la variante hidrogeológica.

Variante Hidrológica

A partir del análisis realizado para la variante hidrogeológica, se sugiere una fuerte relación entre la precipitación media anual y la latitud de la cuenca. Un análisis más detallado en el desarrollo de la metodología sugiere que tanto el monto de la

precipitación media, como su distribución estacional de invierno y verano, podrían ser los factores de mayor influencia sobre el modelo de escurrimiento. Todo esto porque es posible plantear fundadamente que:

- La magnitud de la precipitación estival por efecto del “invierno altiplánico” (octubre-marzo) disminuye gradualmente hacia el sur, al mismo tiempo que la precipitación de invierno (abril-septiembre) se incrementa.
- Las precipitaciones medias dependen de las isoyetas de precipitación media, que a su vez, dependen de los criterios y consideraciones hidrológicas adoptadas para su trazado.

Por lo anterior, se propone que la relación entre la precipitación media y la escorrentía total fuese formulada en dos relaciones paralelas, es decir, una relación entre la precipitación media anual de invierno y la escorrentía generada por ella, y otra entre la precipitación media anual de verano y su propia escorrentía. Esto basado en que:

- Para un mismo volumen de agua caída en invierno o verano, las condiciones meteorológicas de temperatura, humedad relativa, evaporación y de evapotranspiración, presentan grandes diferencias, determinando diferentes condiciones de infiltración y de escurrimiento.
- El caudal medio de salida de la cuenca (escorrentía total), corresponde a la suma de escorrentía de invierno y verano.

Así, el modelo desarrollado por la JICA se complejizó en los términos expuestos anteriormente y queda expresado de la siguiente forma:

$$Q_{inv} = f_{inv} \cdot P_{p_{inv}} \cdot A_{cuenca}$$
$$Q_{vno} = f_{vno} \cdot P_{p_{vno}} \cdot A_{cuenca}$$

$$P_{inv} = m_1 \cdot f_1 \cdot C_1$$
$$P_{vno} = m_2 \cdot f_2 \cdot C_2$$

$$Q_{salida} = Q_{inv} + Q_{vno}$$

Donde

Q_{inv}	Escorrentía media anual de invierno
Q_{vno}	Escorrentía media anual de verano
P_{inv}	Precipitación media anual de invierno
P_{vno}	Precipitación media anual de verano
f_{inv}	Coefficiente de escorrentía de invierno
f_{vno}	Coefficiente de escorrentía de verano
Q_{salida}	Caudal medio anual de salida de la cuenca o escorrentía total de largo plazo
A_{cuenca}	Área de la cuenca
m_i y C_i	Coefficientes de ajuste lineal

Esta relación, desagregada en invierno y verano, se ajusta de mejor manera a la totalidad del área de estudio en que se desarrolló la metodología y es considerada adecuada para el nivel de información disponible según lo que se concluye. Por esto se considera esta variante en el desarrollo de este trabajo.

4.1.2. Etapa II: Estimación de la Recarga Neta

La segunda etapa está enfocada a la determinación de la recarga neta o efectiva de cada cuenca, estimada a partir del comportamiento de los caudales superficiales estacionales controlados a la salida de las cuencas estudiadas en el desarrollo metodológico, con el objeto de encontrar una eventual relación entre la recarga neta y el caudal de salida o escorrentía total. Para ello se adoptaron las siguientes hipótesis y conceptos hidrológicos de base:

- i. Los flujos subterráneos son despreciables y los caudales superficiales controlados a la salida de las 25 cuencas representan la escorrentía total.
- ii. Se entiende **como "recarga neta de la cuenca", aquella parte de la escorrentía total de salida de una cuenca, compuesta por el agua que ha infiltrado al menos una vez y que ha transitado subterráneamente en algún momento, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior a la de un año hidrológico.**
- iii. Esta recarga neta o caudal base interanual de salida de la cuenca puede ser estimada, en términos de caudal medio mensual, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de junio, julio y agosto. Lo anterior sobre la base que:
 - Las precipitaciones de invierno sobre las cuencas seleccionadas de la zona norte son escasas y de bajo monto, y hacia el sur son mayoritariamente sólidas. Por lo que los aportes al escurrimiento durante el invierno son significativamente menores que en verano. Las bajas temperaturas limitan el deshielo de la nieve y la escorrentía de salida se aproxima al caudal base de la cuenca, y períodos de sequía interanual, puede llegar a estar muy cerca de este valor.
 - Durante el verano, el caudal base persiste pero es difícil de ser medido, debido a las mayores pérdidas de evaporación y evapotranspiración, que incluso pueden llegar a consumir la totalidad del flujo base en años secos, y/o períodos de sequía interanual.
 - Por otra parte, existe consenso en interpretar las series hidrológicas del norte, bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de lo cual resulta razonable estimar el flujo base como el promedio del conjunto de los 4 mínimos decadales observados históricamente.

En el anexo del estudio SDT N° 317 es posible observar las fluctuaciones anuales de la temperatura, la evaporación y la distribución de caudales para los meses de invierno de junio, julio y agosto, en algunas estaciones de control hidrométrico específicas localizadas en la zona de estudio. En el Gráfico 1, se observa la relación que se obtiene

entre el promedio de estos mínimos decadales y la escorrentía total observada para las cuencas seleccionadas en el desarrollo metodológico.

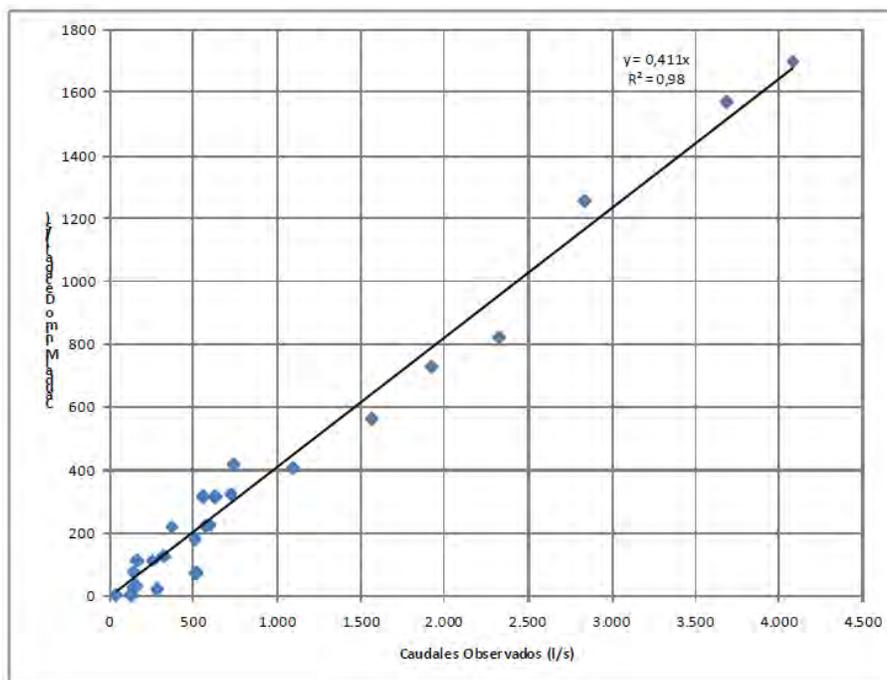


Gráfico 1: Correlación entre caudales medios anual históricos y promedio de caudales mínimos decadales promediados.

De acuerdo a este resultado del desarrollo metodológico, se asume con propiedad que aproximadamente un 40% de la escorrentía total de salida de una cuenca altiplánica corresponde a flujo base o recarga neta de esta. Para este caso, en donde las cuencas a las que se les ha aplicado el método son todas del tipo endorreicas, éste porcentaje de la escorrentía total constituye un valor mínimo de recarga. El valor adecuado está entre este mínimo (40%) y el valor total.

4.2. Esquema Metodológico

En la Figura 2 se presenta esquemáticamente la metodología a seguir en este trabajo.

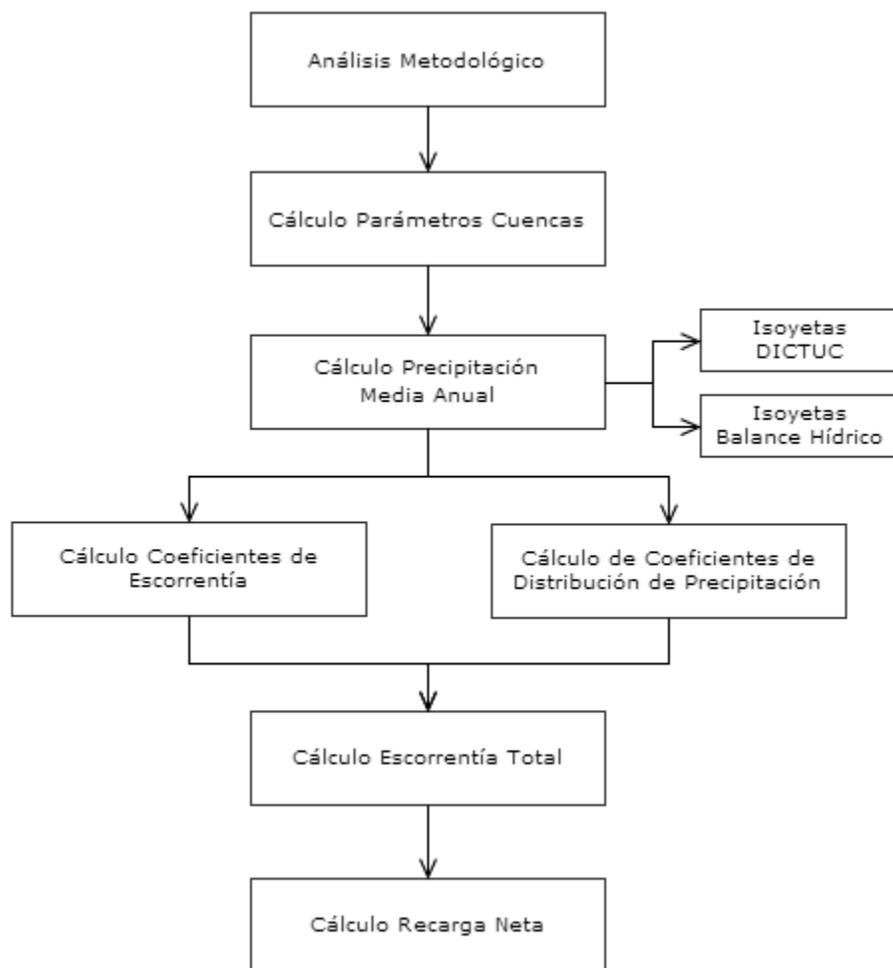


Figura 2: Esquema metodológico

4.3. Cálculo Precipitación Media Anual

Para la aplicación de la variante hidrológica de la metodología, se requiere como datos de entrada el área de las cuencas y la precipitación media anual en cada una de ellas. El área se obtiene de la caracterización hecha en el estudio de DICTUC (Tabla 1), pero es necesario calcular la precipitación.

El cálculo de la precipitación media anual se realizó utilizando el método de las isoyetas de forma independiente tanto con las isoyetas del Balance Hídrico (1987) como con las isoyetas generadas por el reporte DGA/DICTUC-2009. A pesar que en la metodología del reporte DEP/DGA-2011, se establece que es adecuado el uso de las isoyetas del Balance Hídrico de 1987, porque constituyen el mejor referente de precipitaciones a nivel nacional, se han utilizado también las isoyetas del reporte DGA/DICTUC-2009, ya que fueron generadas considerando datos de estaciones pluviométricas del lado argentino, las que aportan información extra, habida cuenta de que en el presente estudio se tienen cuencas compartidas con el vecino país. En ambas situaciones se consideraron los siguientes pasos:

- i. Se densificó la cobertura de las isoyetas en el área de estudio, utilizando el módulo *Spatial Analyst* de ArcGIS 10, donde se interpolaron las isoyetas faltantes para pasar de tener isoyetas en un rango de 50 mm a isoyetas en un rango de 10 mm.
- ii. Se identificaron visualmente las zonas en que las isoyetas interpoladas se ajustaban de buena manera a las isoyetas originales y se calculó para las cuencas coincidentes la precipitación aplicando el método de las isoyetas.
- iii. En las zonas donde la interpolación de las isoyetas no se ajustaba de buena manera, principalmente por la falta de información, se estimó el valor de precipitación media considerando la o las isoyetas originales más cercanas.

En la Figura 3 se pueden observar las isoyetas interpoladas para ambos casos y se destacan las cuencas donde se aplicó el criterio señalado en el punto iii anterior.

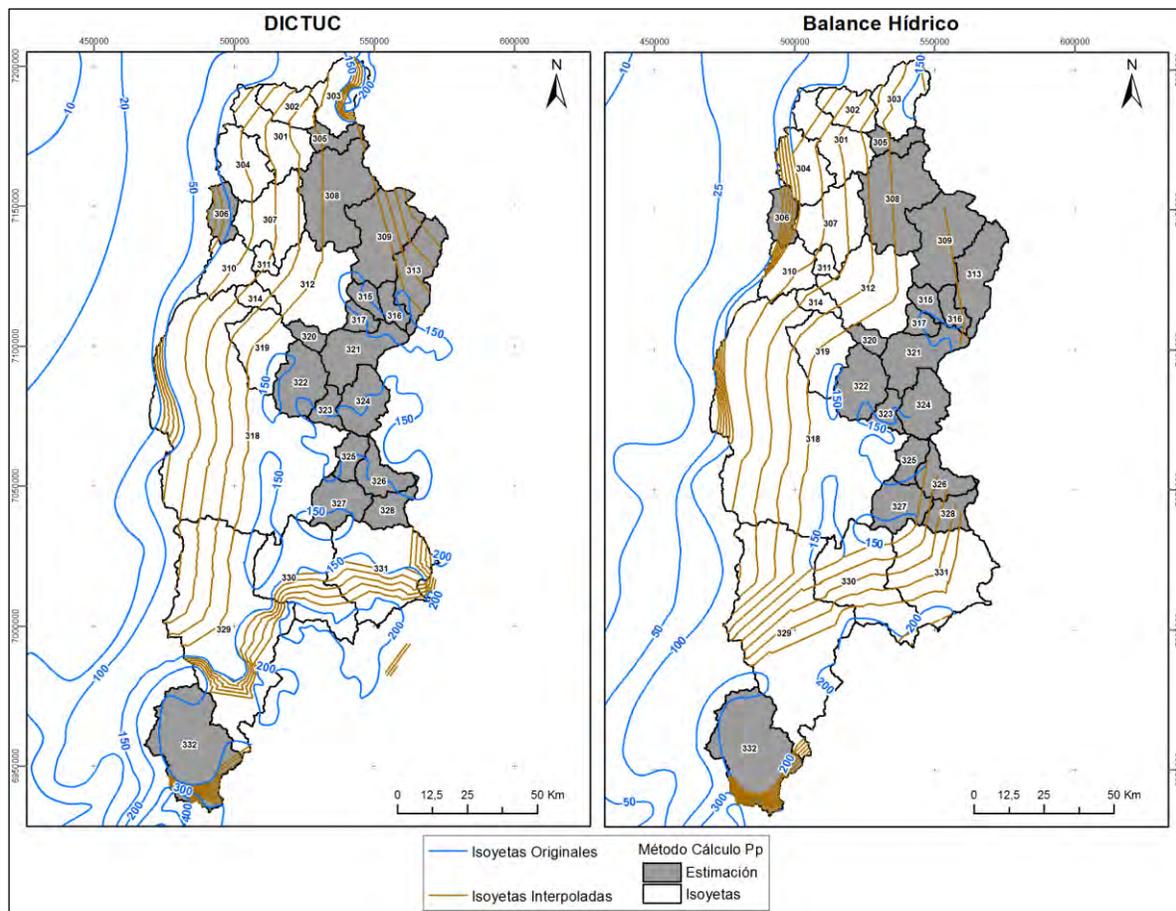


Figura 3: Isoyetas originales e interpoladas DICTUC y Balance Hídrico

Se entiende que, de aquí en adelante, la metodología fue aplicada de forma paralela e independiente a ambos resultados de precipitación media anual.

4.4. Componentes de Invierno y Verano de la Precipitación Media Anual

Una vez obtenida la precipitación media anual de cada cuenca, es necesario distribuir dicho valor obtenido en sus componentes de invierno y verano. Para esto, en la metodología se proponen los coeficientes de distribución para todo el área de estudio ($F(X)_{inv}$ y $F(X)_{vno}$ en Tabla N° 4 en SDT N° 317) y se deben adoptar para cada cuenca los valores más cercanos a la coordenada UTM norte del centroide.

$$P_{inv} = P_{media\ anual} \cdot F(X)_{inv}$$

$$P_{vno} = P_{media\ anual} \cdot F(X)_{vno}$$

A pesar que esta desagregación de la precipitación constituye una fuente de dispersión en los resultados, la tabla con los coeficientes propuestos está basada en un sencillo procedimiento para estimar la componente de invierno y verano de la precipitación media sobre cualquier cuenca situada en el área de estudio, cuyo aporte a la desviación estándar de los resultados finales es mínimo, y que constituye un excelente aporte a la simplificación de los cálculos.

4.5. Cálculo de Coeficientes de Escorrentía

De acuerdo al modelo a utilizar, se calcularon los coeficientes de escorrentía de cada cuenca para invierno (f_{inv}) y verano (f_{vno}). Para ello se utilizaron las relaciones determinadas en la metodología y que se presentan en el Gráfico 2.

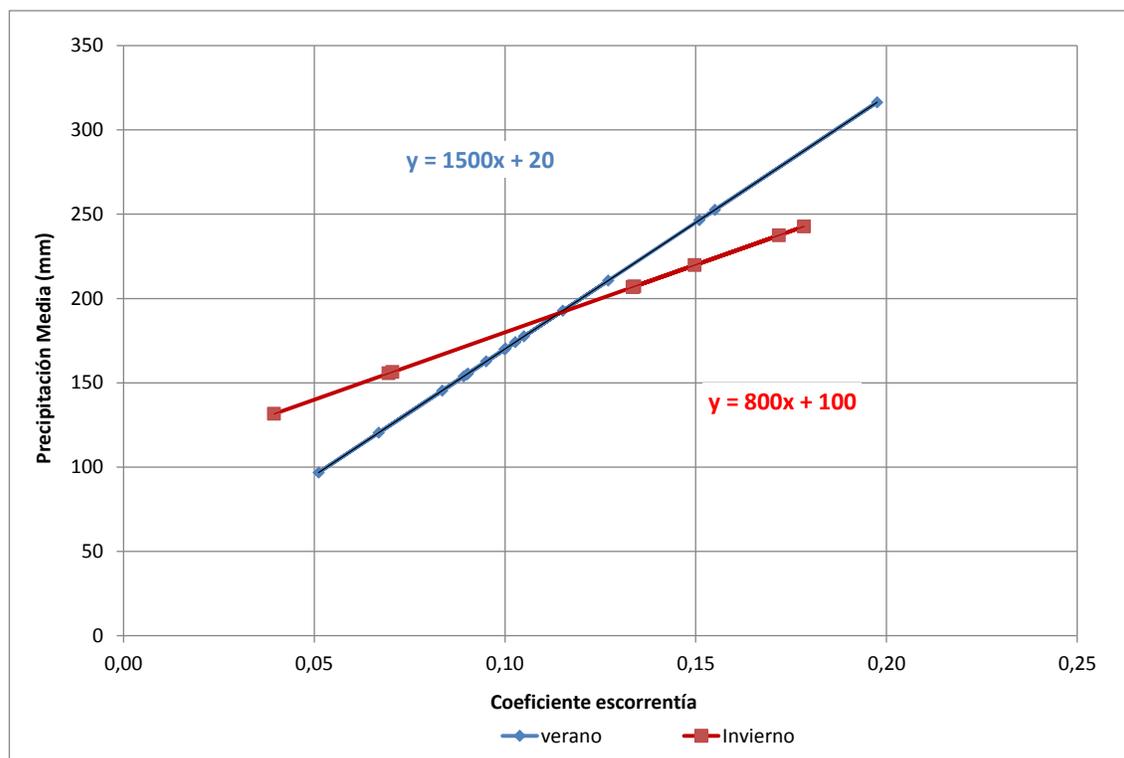


Gráfico 2: Coeficientes de escorrentía desagregados para invierno y verano

4.6. Cálculo de Caudal Medio Anual y Estimación de la Recarga

Para obtener el caudal medio anual de salida de la cuenca o escorrentía total de largo plazo se aplicó el modelo planteado, es decir, se obtuvo el caudal desagregado en invierno y verano y luego se sumaron dichos valores en cada cuenca. Así, se calculó el 40% del caudal medio anual de cada cuenca para obtener la recarga neta mínima de cada una de ellas.

Finalmente, se considera el valor más bajo de recarga para estar del lado de la seguridad en la evaluación de la disponibilidad del recurso en cada una de las cuencas.

5. RESULTADOS

5.1. Precipitación Media Anual

La precipitación media anual de cada cuenca, calculada por el método de las isoyetas y por estimación para ambas fuentes de información se presenta en la Tabla 2. Gráficamente, el resultado por cuenca se presenta en la Figura 4 y el Gráfico 3.

ID	Nombre Cuenca	Pp Media DICTUC (mm/año)	Pp Media B. Hídrico (mm/año)	Diferencia Porcentual (%)	Método
301	Salar de Agua Amarga	120,28	115,58	4,1	Isoyetas
302	Salar de la Azufrera	123,07	116,90	5,3	Isoyetas
303	Salar de Gorbea	158,52	142,40	11,3	Isoyetas
304	Cerro Blanco	109,05	98,30	10,9	Isoyetas
305	Oda. La Rossa	150	150	0	Estimación
306	Cerro El Encanche	100	63	59,1	Estimación
307	Salar de Aguilar	119,31	115,01	3,7	Isoyetas
308	Salar de La Isla	150	150	0	Estimación
309	Salar de Las Parinas	150	150	0	Estimación
310	Salar de Infieles	108,17	103,62	4,4	Isoyetas
311	Cerro Conito de los Infieles	117,98	114,82	2,8	Isoyetas
312	Salar Grande	142,61	134,68	5,9	Isoyetas
313	Laguna de Colorados	150	150	0	Estimación
314	Oda. Los Maranceles	126,49	123,76	2,2	Isoyetas
315	Oda. El Llano	150	150	0	Estimación
316	Oda. La Trinchera	150	150	0	Estimación
317	Laguna de Las Parinas	150	150	0	Estimación
318	Salar de Pedernales	126,57	127,90	1	Isoyetas
319	La Laguna	140,09	141,39	0,9	Isoyetas
320	Cerro Agua de Morales	150	150	0	Estimación
321	Lagunas Bravas	150	150	0	Estimación
322	Salar de Piedra Parada	150	150	0	Estimación
323	Lagunas del Jilguero	150	150	0	Estimación
324	Laguna del Bayo	150	150	0	Estimación
325	Sierra Nevada	150	150	0	Estimación
326	Laguna Escondida	150	150	0	Estimación
327	Wheelwrigth	150	150	0	Estimación
328	Oda. Las Amarillas	150	150	0	Estimación
329	Salar de Maricunga	149,38	167,25	12	Isoyetas
330	Piedra Pomez	166,06	170,64	2,8	Isoyetas
331	Laguna Verde	164,24	183,98	12	Isoyetas
332	Laguna del Negro Francisco	200	200	0	Estimación

Tabla 2: Precipitación media anual de cada cuenca obtenida por método de las isoyetas y por estimación.

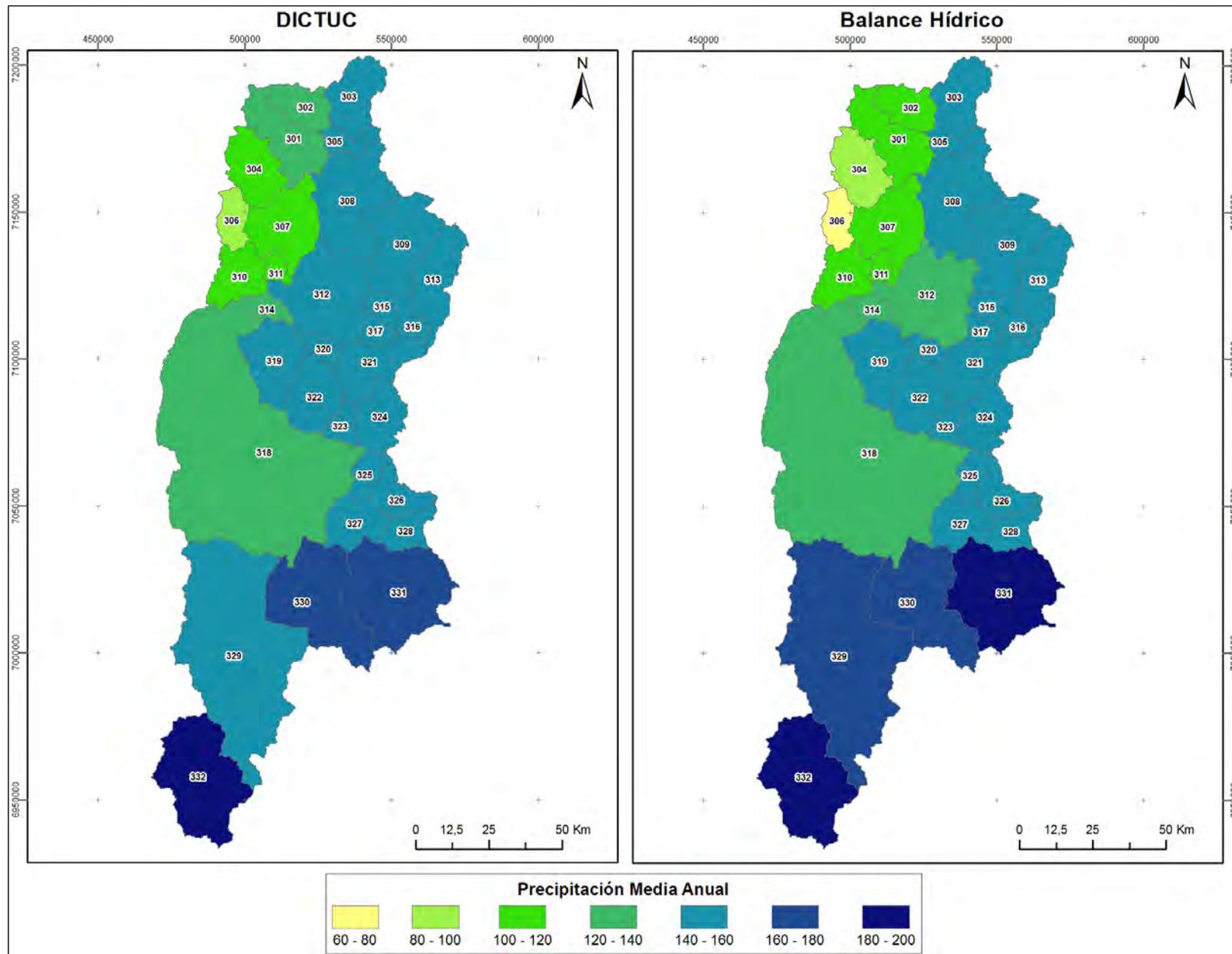


Figura 4: Distribución espacial de la precipitación media anual calculada con isoyetas DICTUC y Balance Hídrico.

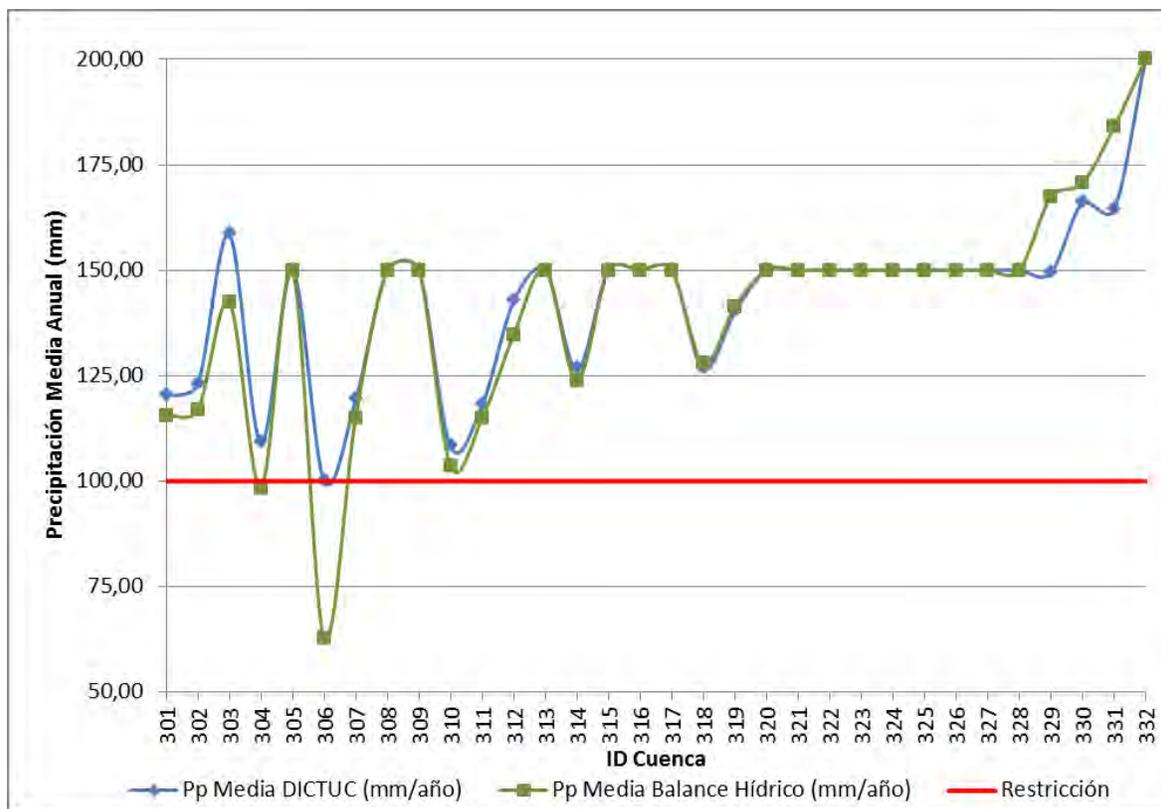


Gráfico 3: Precipitación media anual de cada cuenca calculada con las isoyetas de DICTUC y Balance Hídrico.

Como se puede ver, la diferencia porcentual promedio que se tiene en el cálculo con ambas fuentes de información es aproximadamente del 4%, pero destaca con más del 59% de diferencia la cuenca Cerro El Encanche (306) lo que se debe a que el cálculo de la precipitación en esta cuenca utilizando el balance hídrico se hizo con el método de las isoyetas (las isoyetas interpoladas se ajustan de buena manera a las dos isoyetas originales que cubren la cuenca) y utilizando las isoyetas de DICTUC, se estimó su valor en 100 mm por que el ajuste de las isoyetas interpoladas no fue bueno. Ahora, si se analiza solo la diferencia porcentual de las cuencas en donde se utilizó el método de las isoyetas, el promedio de la diferencia sube a 5.7% aproximadamente.

Por otro lado, si se considera la restricción que tiene implícita el modelo (Pp media anual de la cuenca > 100 mm), no se puede aplicar la metodología a las cuencas Cerro Blanco (304) y Cerro El Encache (306) con la precipitación obtenida de las isoyetas del Balance Hídrico.

5.2. Distribución de Precipitaciones y Coeficientes de Escorrentía

Los coeficientes de distribución de invierno y verano de las precipitaciones y los coeficientes de escorrentía de invierno y verano, para cada fuente de información de precipitaciones y para cada cuenca se presentan en la Tabla 3.

ID	Nombre Cuenca	Coeficientes Distribución Pp		Balance Hídrico		DICTUC	
		F(X)inv	F(X)vno	finv	fvno	finv	fvno
301	Salar de Agua Amarga	0,369	0,631	0	0,015	0	0,014
302	Salar de la Azufrera	0,369	0,631	0	0,017	0	0,015
303	Salar de Gorbea	0,35	0,65	0	0,026	0	0,022
304	Cerro Blanco	0,331	0,669	--	--	0	0,008
305	Oda. La Rossa	0,331	0,669	0	0,02	0	0,02
306	Cerro El Encanche	0,295	0,705	--	--	0	0
307	Salar de Aguilar	0,295	0,705	0	0,01	0	0,009
308	Salar de La Isla	0,295	0,705	0,007	0,016	0,007	0,016
309	Salar de Las Parinas	0,278	0,722	0,01	0,014	0,01	0,014
310	Salar de Infieles	0,262	0,738	0	0,006	0	0,005
311	Cerro Conito de los Infieles	0,262	0,738	0	0,007	0	0,007
312	Salar Grande	0,262	0,738	0,009	0,01	0,002	0,009
313	Laguna de Colorados	0,246	0,754	0,013	0,013	0,013	0,013
314	Oda. Los Maranceles	0,246	0,754	0	0,007	0	0,007
315	Oda. El Llano	0,246	0,754	0,016	0,011	0,016	0,011
316	Oda. La Trinchera	0,231	0,769	0,019	0,01	0,019	0,01
317	Laguna de Las Parinas	0,231	0,769	0,019	0,01	0,019	0,01
318	Salar de Pedernales	0,216	0,784	0,005	0,002	0,007	0,002
319	La Laguna	0,216	0,784	0,012	0,007	0,014	0,007
320	Cerro Agua de Morales	0,216	0,784	0,022	0,008	0,022	0,008
321	Lagunas Bravas	0,202	0,798	0,022	0,008	0,022	0,008
322	Salar de Piedra Parada	0,189	0,811	0,025	0,007	0,025	0,007
323	Lagunas del Jilguero	0,189	0,811	0,027	0,006	0,027	0,006
324	Laguna del Bayo	0,177	0,823	0,027	0,006	0,027	0,006
325	Sierra Nevada	0,165	0,835	0,029	0,004	0,029	0,004
326	Laguna Escondida	0,154	0,846	0,034	0,002	0,034	0,002
327	Wheelwright	0,144	0,856	0,036	0,001	0,036	0,001
328	Oda. Las Amarillas	0,144	0,856	0,036	0,001	0,036	0,001
329	Salar de Maricunga	0,125	0,875	0,041	0	0,061	0
330	Piedra Pomez	0,125	0,875	0,057	0,001	0,062	0,001
331	Laguna Verde	0,109	0,891	0,055	0	0,076	0,002
332	Laguna del Negro Francisco	0,084	0,916	0,104	0	0,104	0

Tabla 3: Coeficientes de escorrentía y coeficientes de distribución de precipitaciones de invierno y verano para cada cuenca.

El resultado con la distribución de las precipitaciones para las isoyetas DICTUC y las isoyetas del Balance Hídrico se puede consultar en las Tabla 6 y Tabla 7 respectivamente, que se encuentran en el anexo.

De forma gráfica, las precipitaciones obtenidas con las isoyetas DICTUC quedan distribuidas para cada cuenca como se presenta en el Gráfico 4.

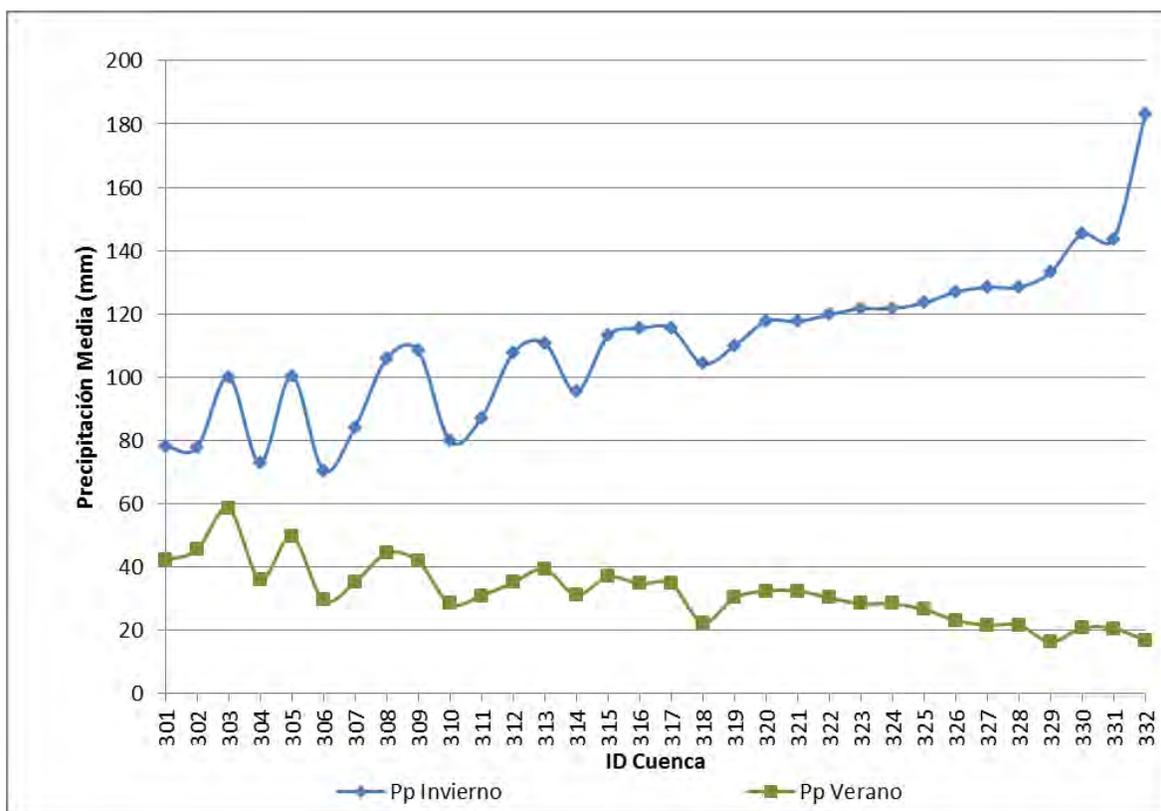


Gráfico 4: Distribución de precipitaciones en invierno y verano, obtenidas a partir de isoyetas DICTUC

La distribución de invierno y verano de las precipitaciones obtenidas para cada cuenca con las isoyetas del Balance Hídrico quedan representadas en el Gráfico 5.

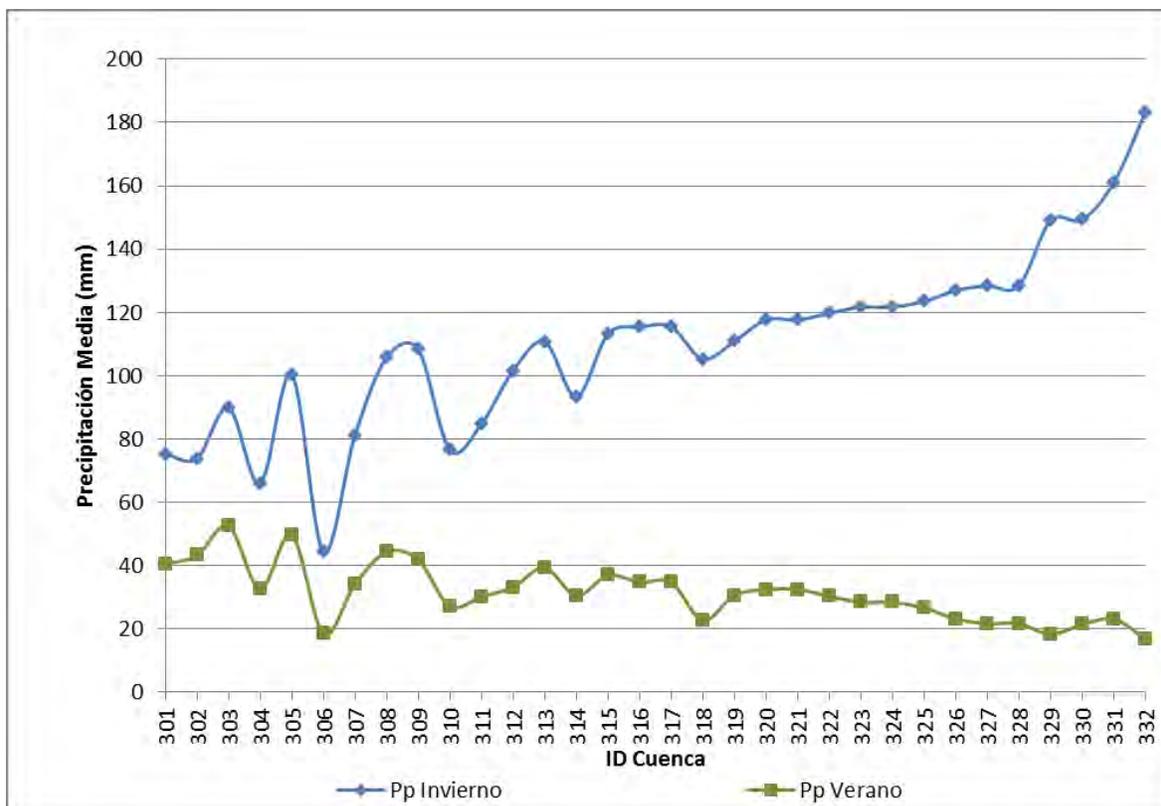


Gráfico 5: Distribución de precipitaciones en invierno y verano, obtenidas a partir de isoyetas del Balance Hídrico

En ambos gráficos se aprecia que las precipitaciones son mayores en el periodo de invierno que en verano, lo cual es esperable ya que son las cuencas altiplánicas ubicadas al norte de la Región de Atacama aquellas que tienen mayor influencia del “invierno altiplánico”, que es casi imperceptible en esta región.

Además, el coeficiente de distribución de precipitaciones propuesto en la metodología del reporte DEP/DGA-2011 SDT N° 317 disminuye en verano y aumenta en invierno hacia el sur. Este gradiente de precipitaciones queda evidenciado en la Figura 5 y la Figura 6, donde se tiene que aumenta en sentido norte-sur en invierno y en verano aumenta en sentido opuesto.

En cuanto a los coeficientes de escorrentía, se observa que para ambas fuentes de información de precipitaciones hay cuencas cuyos coeficientes resultan ser negativos (calculados a partir de las relaciones del Gráfico 2), por lo que se les asigna el valor cero. Con esto, el valor del caudal de invierno y/o verano también será cero.

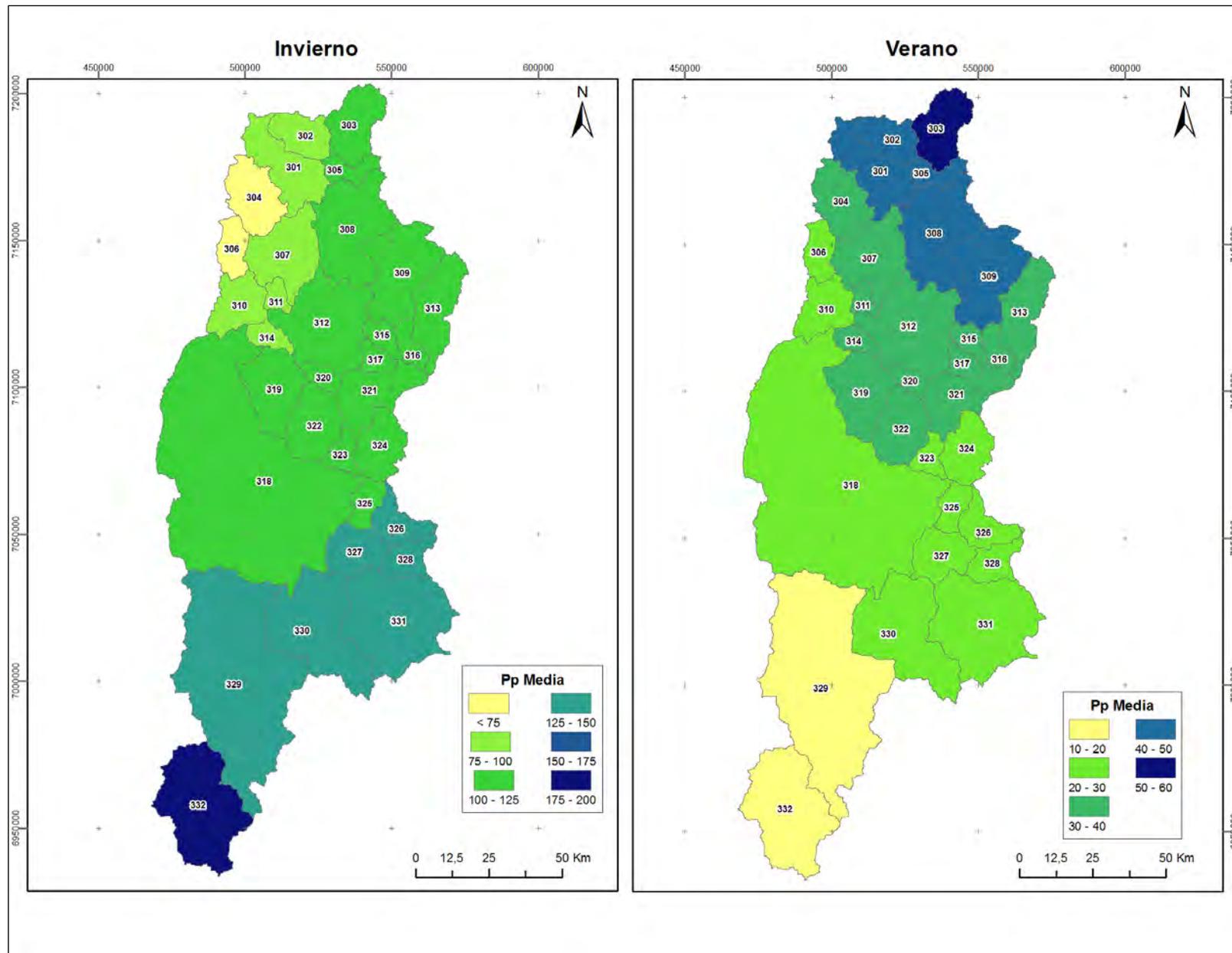


Figura 5: Distribución espacial de la precipitación media para invierno y verano calculada a partir de isoyetas DICTUC

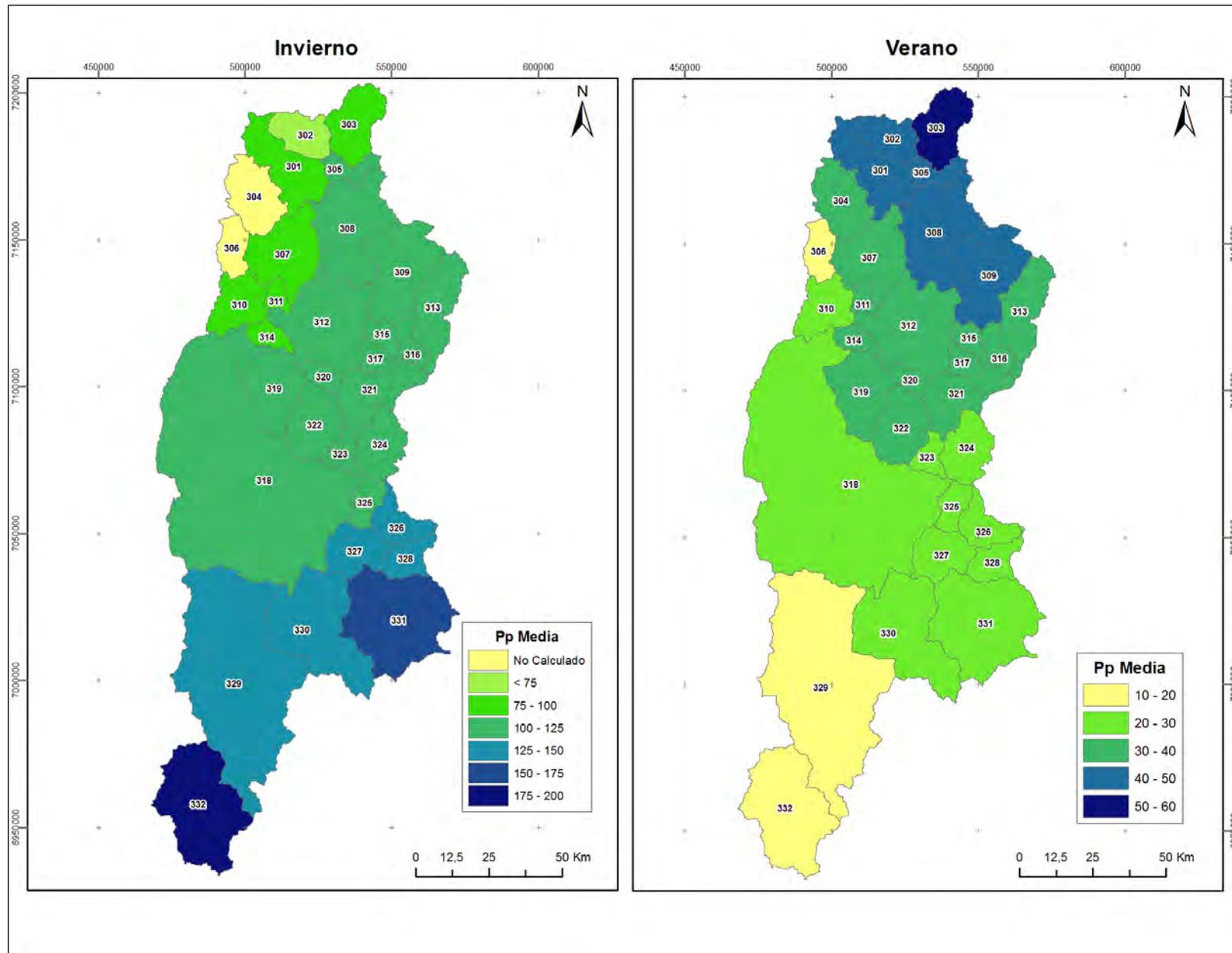


Figura 6: Distribución espacial de la precipitación media para invierno y verano calculada a partir de isoyetas Balance Hídrico

5.3. Caudal Medio Anual y Estimación de la Recarga

Luego de obtener todos los parámetros requeridos, se aplicó el modelo de la variante hidrológica para calcular el caudal medio anual de salida de la cuenca o esorrentía total de largo plazo, tanto con la precipitación obtenida de las isoyetas del reporte DGA/DICTUC-2009, como con las isoyetas del Balance Hídrico. Además, se estimó la recarga mínima para ambos resultados, para tomar finalmente el menor valor de recarga y, así, estar del lado de la seguridad en la utilización de este valor.

A continuación se presenta, en la Tabla 4, una síntesis de lo expuesto y en la Figura 7 se presenta la distribución espacial de la recarga neta mínima final calculada (la tabla completa con todos los parámetros de cálculo y la distribución espacial de la recarga por fuente de información se puede consultar en el Anexo).

ID	Nombre Cuenca	DICTUC				Balance Hídrico				Recarga Neta Min Final (l/s)
		Q Vno (l/s)	Q Inv (l/s)	Q Total (l/s)	Recarga Neta Min (l/s)	Q Vno (l/s)	Q Inv (l/s)	Q Total (l/s)	Recarga Neta Min (l/s)	
301	Salar de Agua Amarga	10,56	0,00	10,56	4,23	9,43	0,00	9,43	3,77	3,77
302	Salar de la Azufrera	6,10	0,00	6,10	2,44	5,28	0,00	5,28	2,11	2,11
303	Salar de Gorbea	15,14	0,00	15,14	6,06	11,44	0,00	11,44	4,58	4,58
304	Cerro Blanco	4,66	0,00	4,66	1,86	--	--	--	--	1,86
305	Qda. La Rossa	4,01	0,18	4,19	1,68	4,01	0,18	4,19	1,68	1,68
306	Cerro El Encanche	1,04	0,00	1,04	0,42	--	--	--	--	0,42
307	Salar de Aguilar	5,81	0,00	5,81	2,32	5,13	0,00	5,13	2,05	2,05
308	Salar de La Isla	16,70	17,75	34,45	13,78	16,70	17,75	34,45	13,78	13,78
309	Salar de Las Parinas	11,74	21,87	33,61	13,44	11,74	21,87	33,61	13,44	13,44
310	Salar de Infieles	1,52	0,00	1,52	0,61	1,25	0,00	1,25	0,50	0,50
311	Cerro Conito de los Infieles	0,54	0,00	0,54	0,22	0,49	0,00	0,49	0,20	0,20
312	Salar Grande	10,71	17,10	27,81	11,12	8,91	0,00	8,91	3,56	3,56
313	Laguna de Colorados	5,49	24,47	29,97	11,99	5,49	24,47	29,97	11,99	11,99
314	Qda. Los Maranceles	0,78	0,00	0,78	0,31	0,72	0,00	0,72	0,29	0,29
315	Qda. El Llano	1,37	6,12	7,49	3,00	1,37	6,12	7,49	3,00	3,00
316	Qda. La Trinchera	1,20	7,84	9,04	3,62	1,20	7,84	9,04	3,62	3,62
317	Laguna de Las Parinas	1,03	6,71	7,73	3,09	1,03	6,71	7,73	3,09	3,09
318	Salar de Pedernales	15,22	0,00	15,22	6,09	15,98	3,93	19,91	7,96	6,09
319	La Laguna	3,00	19,55	22,54	9,02	3,11	21,79	24,89	9,96	9,02
320	Cerro Agua de Morales	0,76	7,34	8,10	3,24	0,76	7,34	8,10	3,24	3,24
321	Lagunas Bravas	2,69	38,14	40,83	16,33	2,69	38,14	40,83	16,33	16,33
322	Salar de Piedra Parada	1,90	39,73	41,63	16,65	1,90	39,73	41,63	16,65	16,65
323	Lagunas del Jilguero	0,56	11,78	12,35	4,94	0,56	11,78	12,35	4,94	4,94
324	Laguna del Bayo	1,17	36,38	37,55	15,02	1,17	36,38	37,55	15,02	15,02
325	Sierra Nevada	0,35	17,78	18,13	7,25	0,35	17,78	18,13	7,25	7,25
326	Laguna Escondida	0,33	29,39	29,72	11,89	0,33	29,39	29,72	11,89	11,89
327	Wheelwright	0,21	42,24	42,46	16,98	0,21	42,24	42,46	16,98	16,98
328	Qda. Las Amarillas	0,13	26,53	26,67	10,67	0,13	26,53	26,67	10,67	10,67
329	Salar de Maricunga	0,00	349,14	349,14	139,66	0,88	589,98	590,86	236,34	139,66
330	Piedra Pomez	0,31	239,71	240,02	96,01	0,55	268,08	268,63	107,45	96,01
331	Laguna Verde	0,00	269,22	269,22	107,69	0,02	416,08	416,10	166,44	107,69
332	Laguna del Negro Francisco	0,00	546,96	546,96	218,78	0,00	546,96	546,96	218,78	218,78

Tabla 4: Síntesis de resultados de Caudales y Recarga Neta Mínima Final

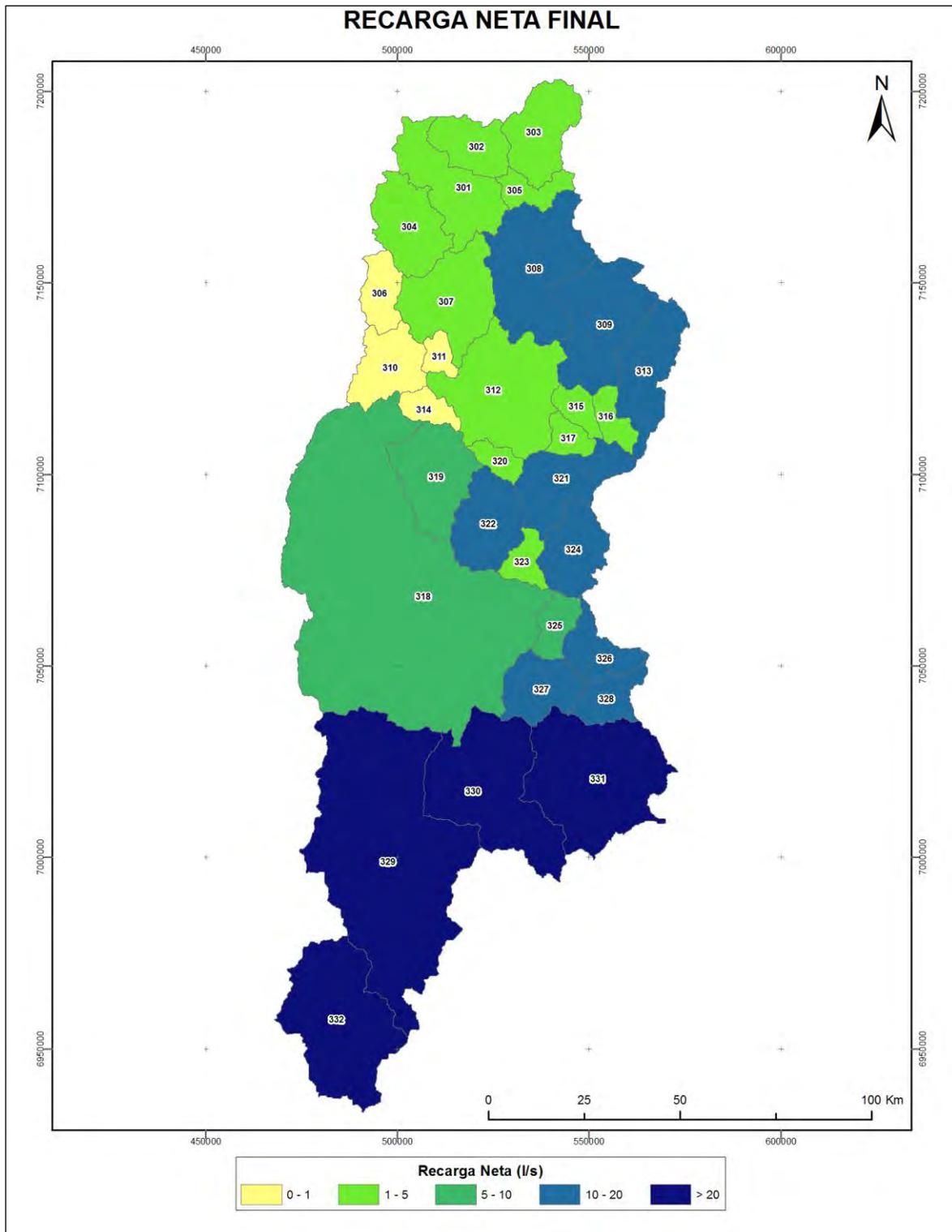


Figura 7: Recarga neta mínima final calculada para las cuencas en estudio

En cuanto al valor de la recarga neta mínima final propiamente tal, destaca la cuenca Laguna del Negro Francisco (332) con la máxima recarga neta mínima final en el área de estudio, lo que se explica por ser la cuenca ubicada más al sur por lo que los

montos de precipitación son mayores. Le sigue la cuenca del Salar de Maricunga (329), que también está ubicada en el extremo sur del área de estudio por lo que registra mayores montos de precipitaciones y, además, es la segunda cuenca con mayor área.

En el otro extremo se encuentra la cuenca Cerro Conito de los Infieles (311) que a pesar de no tener el menor monto de precipitación, si tiene la menor área de todas las cuencas en estudio. Los valores, además del promedio, se presentan en la Tabla 5.

ID	Nombre Cuenca	Recarga Neta Mínima (l/s)
311	Cerro Conito de los Infieles	0,20
332	Laguna del Negro Francisco	218,78
Valor Promedio		23,43

Tabla 5: Cuencas con valor mínimo y máximo de la recarga neta mínima final estimada.

Respecto al promedio, son las cuencas ubicadas en el extremo sur las que registran una recarga neta mínima superior al promedio, lo que es esperable considerando que se registran mayores precipitaciones en esa zona y el área de estas cuencas está también por sobre el promedio del resto de las cuencas.

Gráficamente, los valores de recarga neta mínima final por cuenca y el valor promedio se presentan en la Gráfico 6. Especialmente, las cuencas con recarga neta mínima final por sobre el promedio y bajo este se presentan en la Figura 8. Como se puede observar en ambas figuras, son cuatro las cuencas que se encuentran por sobre el promedio y destacan por estar ubicadas en la zona sur del área de estudio donde los montos de precipitación son mayores con lo que se encuentra razonable que el valor de la recarga este muy por encima del promedio.



Gráfico 6: Valores de recarga neta mínima final estimada por cuenca y valor promedio.

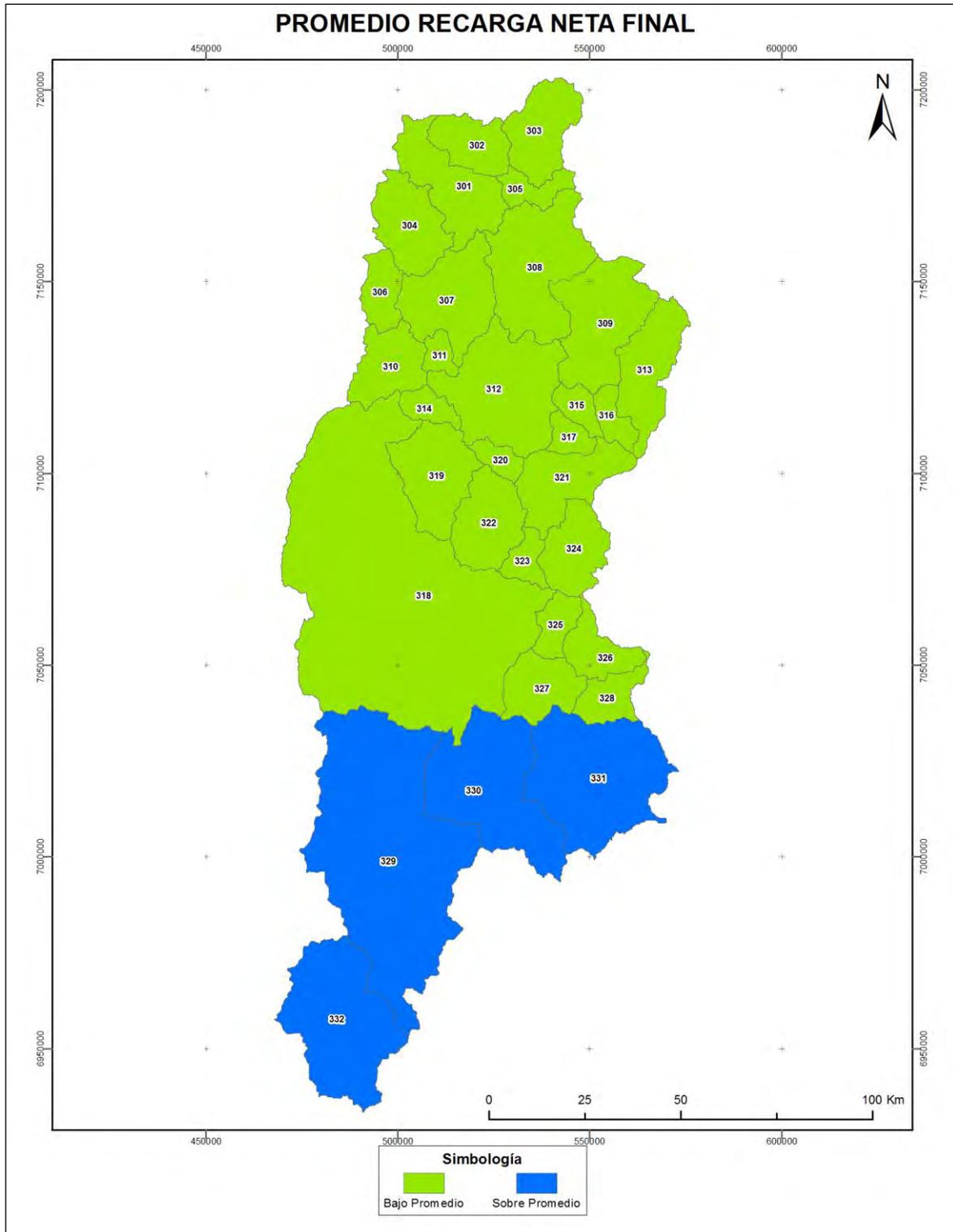


Figura 8: Distribución espacial de cuencas con recarga neta mínima final por sobre y bajo el promedio

6. CONCLUSIONES

En términos generales, de trabajo realizado se puede concluir que, a través del logro de los objetivos específicos, fue posible cumplir a cabalidad con el objetivo general del trabajo ya que se estimó la recarga mínima en las cuencas altiplánicas de la Región de Atacama, a partir de la aplicación de la metodología propuesta en informe técnico SDT N° 317.

Respecto de la metodología, por la ubicación de las cuencas analizadas y la restricción latitudinal que presenta la variante hidrogeológica no fue posible su aplicación para determinar la relación escorrentía total – precipitación media. Por esto se utilizó la variable hidrológica que, además, se ajusta de mejor manera al área de estudio, lo que se evidenció en el informe técnico SDT N° 317, donde se señala que la precipitación media sobre la cuenca y su distribución latitudinal resulta ser la variable más importante por sobre las condiciones geológicas del área de estudio.

En cuanto al cálculo de la precipitación media anual, utilizando las isoyetas DICTUC y las del Balance Hídrico, la diferencia porcentual promedio es 4% en total. Si se consideran las cuencas en que se utilizó el método de las isoyetas y no aquellas en que se calculó por estimación la precipitación media, la diferencia porcentual es de un 5,7%. Esta diferencia se explica básicamente porque el trazado de las isoyetas difiere de una fuente de información a otra. A pesar que las isoyetas DICTUC fueron trazadas considerando datos de estaciones ubicadas en Argentina (lo que se entiende es una mejora en la calidad de las isoyetas, principalmente para las cuencas fronterizas y compartidas) y las isoyetas del Balance Hídrico datan de hace más de 20 años, esta diferencia porcentual menor valida, de alguna manera, el seguir utilizando las isoyetas del Balance Hídrico para este tipo de estudios donde se aplican metodologías simplificadas por el alcance de ellos o por no contar con mayor información.

De la desagregación y distribución de la precipitación en invierno-verano, se tiene un marcado gradiente latitudinal, donde en invierno las precipitaciones aumentan hacia el sur a diferencia del verano donde disminuyen hacia el sur. Además, como en esta **región el "invierno altiplánico" tiene muy poca influencia, los montos de precipitación en invierno son mayores a los de verano.**

Como se mencionó en la metodología, entre los valores obtenidos de recarga mínima con ambas fuentes de información de isoyetas, se adoptó en cada cuenca el menor valor para estar del lado de la seguridad en la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico. El valor mínimo de la recarga estimada es de 0,20 l/s correspondiente a la cuenca Cerro Conito de los Infieles y el valor máximo corresponde a la cuenca Laguna del Negro Francisco y es de 218,78 l/s (Promedio: 23,43 l/s).

Se entiende que estos valores han sido obtenidos con una metodología simplificada, que fue desarrollada a escala regional y que los valores obtenidos son una primera aproximación al cálculo de la recarga. Además, es importante mencionar que las cuencas a las que se les ha aplicado el método son todas del tipo endorreicas, por lo tanto, el valor de recarga obtenido (40% de la escorrentía total) corresponde a un

valor mínimo de recarga. El valor adecuado está entre este mínimo (40%) y el valor total. Para determinarlo con exactitud se deben considerar otros métodos y variables.

En definitiva, se requiere un estudio más detallado en las cuencas de la región que considere métodos más precisos e incorporar al análisis más variables que permitan establecer el valor de la recarga con mayor exactitud.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Estudio Evaluación de Los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama Ubicadas entre el Río Copiapó y La Región de Antofagasta: Informe Técnico; SDT N° 276; DARH – DGA, 2009.
- Estudio Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III, SIT N° 157 (parte I) y SIT N° 195 (parte II); DICTUC, 2009.
- Estudio Metodología para la Estimación de Recarga de Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica en el Norte de Chile XV, I, II, y III Regiones, SIT N° 221; GCF Ingenieros Limitada, 2010.
- Propuesta Metodológica para Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas y de Vertiente Pacífico: Minuta Técnica; Luis Rojas Badilla y Carlos Salazar M.; DEP – DGA, 2010.
- Estimación de Recargas en Cuencas Altiplánicas Y Precordilleranas de Vertiente Pacífica; SIT N° 251; Aquaterra Ingenieros Limitada, 2011.
- Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas Seleccionadas: Informe Técnico; SDT N° 317; DEP – DGA, 2011.

ANEXO

ID	Nombre Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Area Cuenca (km2)	Pp Media (mm/año)	fvno	finv	F(X) vno	F(X) Inv	Pp Vno (mm/año)	Pp Inv (mm/año)	Q Vno (l/s)	Q Inv (l/s)	Q Total (l/s)	Recarga Neta Min (l/s)
301	Salar de Agua Amarga	513653	7175294	461,750	120,28	0,015	0	0,369	0,631	44,38	75,89	10,56	0	10,56	4,23
302	Salar de la Azufrera	519395	7186080	250,170	123,07	0,017	0	0,369	0,631	45,41	77,66	6,1	0	6,10	2,44
303	Salar de Gorbea	537657	7189719	363,810	158,52	0,026	0	0,35	0,65	55,48	103,04	15,14	0	15,14	6,06
304	Cerro Blanco	503041	7165020	379,260	109,05	0,011	0	0,331	0,669	36,10	72,96	4,66	0	4,66	1,86
305	Qda. La Rossa	535426	7174447	128,900	150	0,02	0	0,331	0,669	49,65	100,35	4,01	0,18	4,19	1,68
306	Cerro El Encanche	495894	7147565	176,330	100	0,006	0	0,295	0,705	29,50	70,50	1,04	0	1,04	0,42
307	Salar de Aguilar	514084	7145910	513,900	119,31	0,01	0	0,295	0,705	35,20	84,11	5,81	0	5,81	2,32
308	Salar de La Isla	536212	7154111	736,400	150	0,016	0,007	0,295	0,705	44,25	105,75	16,7	17,75	34,45	13,78
309	Salar de Las Parinas	552958	7140031	613,780	150	0,014	0,010	0,278	0,722	41,70	108,30	11,74	21,87	33,61	13,44
310	Salar de Infieles	497533	7128218	304,630	108,17	0,006	0	0,262	0,738	28,34	79,83	1,52	0	1,52	0,61
311	Cerro Conito de los Infieles	510876	7131052	76,340	117,98	0,007	0	0,262	0,738	30,91	87,07	0,54	0	0,54	0,22
312	Salar Grande	527824	7121812	781,100	142,61	0,01	0,007	0,262	0,738	37,36	105,25	10,71	17,1	27,81	11,12
313	Laguna de Colorados	565565	7127330	416,730	150	0,013	0,016	0,246	0,754	36,90	113,10	5,49	24,47	29,97	11,99
314	Qda. Los Maranceles	508019	7117275	107,060	126,49	0,007	0	0,246	0,754	31,12	95,38	0,78	0	0,78	0,31
315	Qda. El Llano	547012	7117160	104,150	150	0,011	0,016	0,246	0,754	36,90	113,10	1,37	6,12	7,49	3,00
316	Qda. La Trinchera	556322	7114311	111,750	150	0,01	0,019	0,231	0,769	34,65	115,35	1,2	7,84	9,04	3,62
317	Laguna de Las Parinas	544766	7109631	95,590	150	0,01	0,019	0,231	0,769	34,65	115,35	1,03	6,71	7,73	3,09
318	Salar de Pedernales	498821	7070221	3587,560	126,57	0,002	0	0,216	0,784	27,34	99,23	15,22	0	15,22	6,09
319	La Laguna	509670	7099754	456,870	140,09	0,007	0,012	0,216	0,784	30,26	109,83	3	19,55	22,54	9,02
320	Cerro Agua de Morales	526338	7103759	89,430	150	0,008	0,022	0,216	0,784	32,40	117,60	0,76	7,34	8,10	3,24
321	Lagunas Bravas	543927	7098084	408,030	150	0,008	0,025	0,202	0,798	30,30	119,70	2,69	38,14	40,83	16,33
322	Salar de Piedra Parada	523487	7087401	380,580	150	0,007	0,027	0,189	0,811	28,35	121,65	1,9	39,73	41,63	16,65
323	Lagunas del Jilguero	533445	7077469	112,870	150	0,006	0,027	0,189	0,811	28,35	121,65	0,56	11,78	12,35	4,94
324	Laguna del Bayo	546100	7079975	317,050	150	0,006	0,029	0,177	0,823	26,55	123,45	1,17	36,38	37,55	15,02
325	Sierra Nevada	541377	7060636	141,840	150	0,004	0,032	0,165	0,835	24,75	125,25	0,35	17,78	18,13	7,25
326	Laguna Escondida	551996	7054019	217,230	150	0,002	0,034	0,154	0,846	23,10	126,90	0,33	29,39	29,72	11,89
327	Wheelwright	537163	7044236	292,270	150	0,001	0,036	0,144	0,856	21,60	128,40	0,21	42,24	42,46	16,98
328	Qda. Las Amarillas	555387	7041806	183,560	150	0,001	0,036	0,144	0,856	21,60	128,40	0,13	26,53	26,67	10,67
329	Salar de Maricunga	497260	7001524	2194,520	149,38	0	0,038	0,125	0,875	18,67	130,71	0	349,14	349,14	139,66
330	Piedra Pomez	524983	7017595	918,740	166,06	0,001	0,057	0,125	0,875	20,76	145,30	0,31	239,71	240,02	96,01
331	Laguna Verde	551385	7020864	1001,740	164,24	0	0,058	0,109	0,891	17,90	146,33	0	269,22	269,22	107,69
332	Laguna del Negro Francisco	485091	6957239	905,330	200	0	0,104	0,084	0,916	16,80	183,20	0	546,96	546,96	218,78

Tabla 6: Cálculo de Parámetros, Caudales y Recarga Neta con isoyetas DICTUC

ID	Nombre Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Area Cuenca (km2)	Pp Media (mm/año)	fvno	finv	F(X) vno	F(X) Inv	Pp Vno (mm/año)	Pp Inv (mm/año)	Q Vno (l/s)	Q Inv (l/s)	Q Total (l/s)	Recarga Neta Min (l/s)
301	Salar de Agua Amarga	513653	7175294	461,750	115,58	0,015	0	0,369	0,631	42,65	72,93	9,43	0	9,43	3,77
302	Salar de la Azufrera	519395	7186080	250,170	116,9	0,015	0	0,369	0,631	43,14	73,77	5,28	0	5,28	2,11
303	Salar de Gorbea	537657	7189719	363,810	142,4	0,020	0	0,35	0,65	49,84	92,56	11,44	0	11,44	4,58
304	Cerro Blanco	503041	7165020	379,260	98,3	0,008	0	0,331	0,669	32,54	65,76	0	0	0	--
305	Qda. La Rossa	535426	7174447	128,900	150	0,020	0,000	0,331	0,669	49,65	100,35	4,01	0,18	4,19	1,68
306	Cerro El Encanche	495894	7147565	176,330	63	0	0	0,295	0,705	18,54	44,30	0	0	0	--
307	Salar de Aguilar	514084	7145910	513,900	115,01	0,009	0	0,295	0,705	33,93	81,08	5,13	0	5,13	2,05
308	Salar de La Isla	536212	7154111	736,400	150	0,016	0,007	0,295	0,705	44,25	105,75	16,70	17,75	34,45	13,78
309	Salar de Las Parinas	552958	7140031	613,780	150	0,014	0,010	0,278	0,722	41,70	108,30	11,74	21,87	33,61	13,44
310	Salar de Infieles	497533	7128218	304,630	103,62	0,005	0	0,262	0,738	27,15	76,47	1,25	0	1,25	0,50
311	Cerro Conito de los Infieles	510876	7131052	76,340	114,82	0,007	0	0,262	0,738	30,08	84,73	0,49	0	0,49	0,20
312	Salar Grande	527824	7121812	781,100	134,68	0,010	0	0,262	0,738	35,29	99,40	8,91	0	8,91	3,56
313	Laguna de Colorados	565565	7127330	416,730	150	0,011	0,016	0,246	0,754	36,90	113,10	5,49	24,47	29,97	11,99
314	Qda. Los Maranceles	508019	7117275	107,060	123,76	0,007	0	0,246	0,754	30,44	93,31	0,72	0	0,72	0,29
315	Qda. El Llano	547012	7117160	104,150	150	0,011	0,016	0,246	0,754	36,90	113,10	1,37	6,12	7,49	3,00
316	Qda. La Trinchera	556322	7114311	111,750	150	0,010	0,019	0,231	0,769	34,65	115,35	1,20	7,84	9,04	3,62
317	Laguna de Las Parinas	544766	7109631	95,590	150	0,010	0,019	0,231	0,769	34,65	115,35	1,03	6,71	7,73	3,09
318	Salar de Pedernales	498821	7070221	3587,560	127,9	0,005	0,000	0,216	0,784	27,63	100,28	15,98	3,93	19,91	7,96
319	La Laguna	509670	7099754	456,870	141,39	0,007	0,014	0,216	0,784	30,54	110,85	3,11	21,79	24,89	9,96
320	Cerro Agua de Morales	526338	7103759	89,430	150	0,008	0,022	0,216	0,784	32,40	117,60	0,76	7,34	8,10	3,24
321	Lagunas Bravas	543927	7098084	408,030	150	0,007	0,025	0,202	0,798	30,30	119,70	2,69	38,14	40,83	16,33
322	Salar de Piedra Parada	523487	7087401	380,580	150	0,006	0,027	0,189	0,811	28,35	121,65	1,90	39,73	41,63	16,65
323	Lagunas del Jilguero	533445	7077469	112,870	150	0,006	0,027	0,189	0,811	28,35	121,65	0,56	11,78	12,35	4,94
324	Laguna del Bayo	546100	7079975	317,050	150	0,004	0,029	0,177	0,823	26,55	123,45	1,17	36,38	37,55	15,02
325	Sierra Nevada	541377	7060636	141,840	150	0,003	0,032	0,165	0,835	24,75	125,25	0,35	17,78	18,13	7,25
326	Laguna Escondida	551996	7054019	217,230	150	0,002	0,034	0,154	0,846	23,10	126,90	0,33	29,39	29,72	11,89
327	Wheelwrioth	537163	7044236	292,270	150	0,001	0,036	0,144	0,856	21,60	128,40	0,21	42,24	42,46	16,98
328	Qda. Las Amarillas	555387	7041806	183,560	150	0,001	0,036	0,144	0,856	21,60	128,40	0,13	26,53	26,67	10,67
329	Salar de Maricunga	497260	7001524	2194,520	167,25	0,001	0,058	0,125	0,875	20,91	146,35	0,88	589,98	590,86	236,34
330	Piedra Pomez	524983	7017595	918,740	170,64	0,001	0,062	0,125	0,875	21,33	149,31	0,55	268,08	268,63	107,45
331	Laguna Verde	551385	7020864	1001,740	183,98	0,000	0,080	0,109	0,891	20,05	163,92	0,02	416,08	416,10	166,44
332	Laguna del Negro Francisco	485091	6957239	905,330	200	0	0,104	0,084	0,916	16,80	183,20	0	546,96	546,96	218,78

Tabla 7: Cálculo de Parámetros, Caudales y Recarga Neta con isoyetas Balance Hídrico

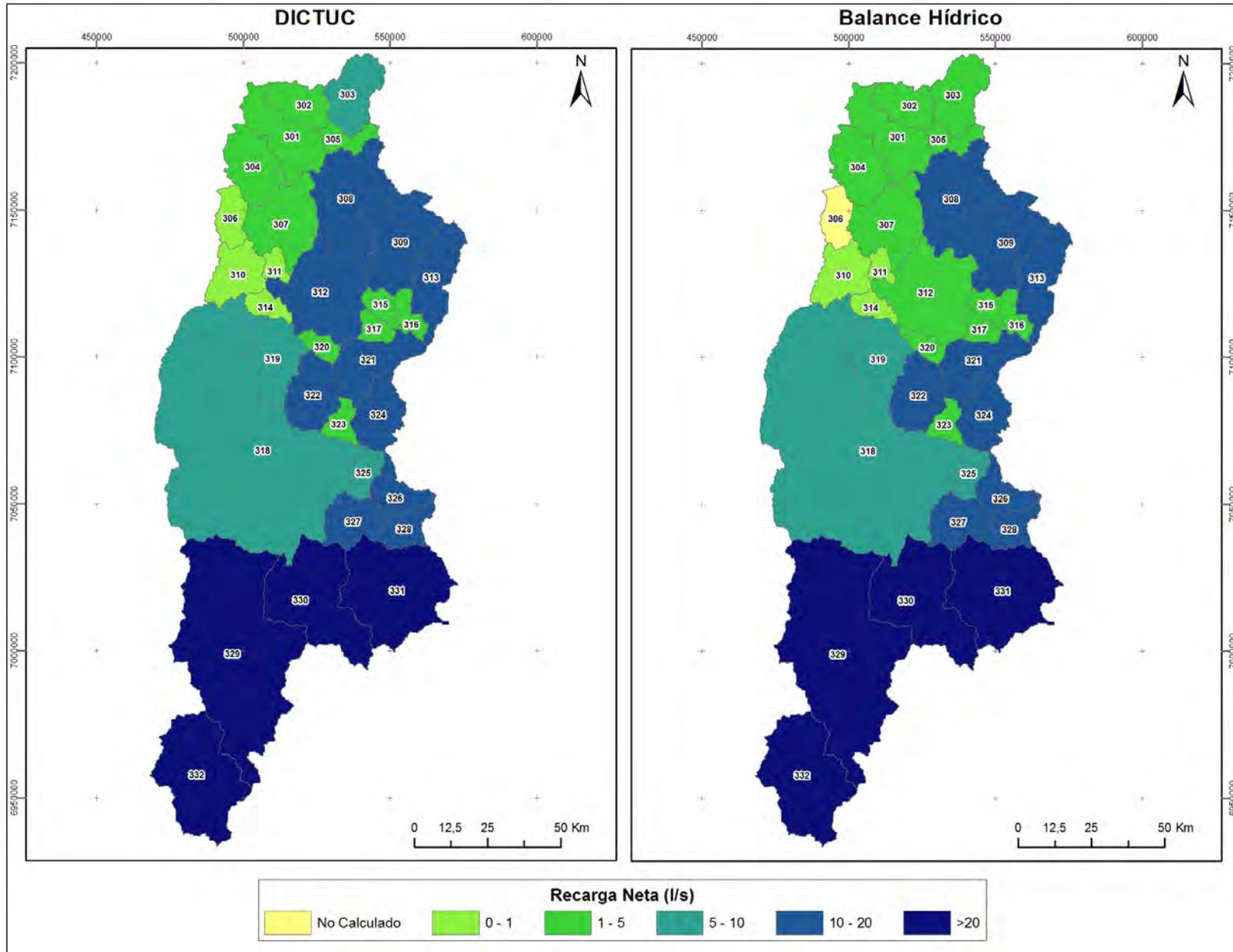


Figura 9: Distribución espacial de la recarga neta calculada