



Universidad de Chile.

Facultad de Arquitectura y Urbanismo.

Escuela de Geografía.

**ESTUDIO DE CUENCAS ALTIPLÁNICAS ENDORREICAS DE LA SEGUNDA
REGIÓN DE CHILE.**

CARACTERIZACIÓN, TIPOLOGÍA Y POTENCIALIDADES DE USO.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓGRAFO.

Licenciada: Constanza Marcela Jiménez Riveros.

Profesor Guía: Dr. Francisco Ferrando Acuña.

Santiago, Chile

2012.



Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi familia, mis padres Marcela y Ricardo, a mi hermana Tamara y a mi marido Mauricio por el esfuerzo, apoyo incondicional, la tranquilidad, confianza y comprensión que me han dado durante todo este tiempo y la formación que me han entregado a lo largo de mi vida. Los quiero mucho.

A los académicos de la escuela de Geografía de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, por la formación profesional y apoyo entregado, tanto dentro de la sala de clases como fuera de ella, a lo largo de mis estudios universitarios.

Finalmente me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a mi profesor guía, Don Francisco Ferrando, una excelente persona y profesor. Le agradezco todo su tiempo, excelente disposición, paciencia y buena voluntad.

Y a todas las personas que estuvieron ahí apoyándome y dándome ánimo, a todos mis amigos y a todos quienes aportaron de alguna manera a que fuera capaz de desarrollar este trabajo, muchas gracias.



TABLA DE CONTENIDOS		
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	2	
CAPÍTULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4	
CAPÍTULO 3 ÁREA DE ESTUDIO	6	
CAPÍTULO 4 OBJETIVOS	8	
4.1.1	Objetivo general	8
4.1.2	Objetivos específicos	8
CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA		9
CAPÍTULO 6 ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO		13
6.1	CLIMA	13
6.1.1	Precipitaciones	18
6.1.2	Temperatura	22
6.2	GEOLOGÍA	25
6.2.1	Morfoestructura	25
6.2.2	Marco geológico	25
6.2.3	Mapa geológico y vías evolutivas	29
6.2.4	Características generales de cada una de las cuencas	30
6.3	ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS	52
6.4	ANTECEDENTES GEOMORFOLÓGICOS	54
6.4.1	Formas volcánicas terciarias, sector del Plateau Altiplánico	54
6.4.2	Modelado de los Plateau volcánicos terciarios	55
6.4.3	Formas derivadas del volcanismo central Cuaternario	55
6.4.4	Salares y lagunas	56
CAPÍTULO 7 CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS CONSIDERADAS		57
7.1	ANTECEDENTES HIDROGRÁFICOS	57
7.2	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS CUENCAS ENDORREICAS EN ESTUDIO	60
7.2.1	Cuenca del salar de Aguas Calientes 1	60
7.2.2	Cuenca del salar de Pujsa	61
7.2.3	Cuenca de la Laguna Helada	62
7.2.4	Cuenca del salar de Loyoques o Quisquiró	63
7.2.5	Cuenca del salar de Aguas Calientes 2	64
7.2.6	Cuenca de la Laguna Lejía	65
7.2.7	Cuenca de la Laguna Miscanti	66
7.2.8	Cuenca del salar del Lago	67
7.2.9	Cuenca de la Laguna Miñiques	68
7.2.10	Cuenca del salar de Aguas Calientes 3 o Talar	69
7.2.11	Cuenca del salar de Capur	70
7.2.12	Síntesis de los datos de las cuencas	71



CAPÍTULO 8 HIDROGRAFÍA DE SALARES	72	
8.1	CICLO HIDROLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO	72
8.2	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LOS SALARES Y TIPOLOGÍA	73
CAPÍTULO 9 HIDROMORFOMETRIA	77	
9.1	CUENCAS Y DRENAJE	77
9.2	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS	78
9.2.1	Perímetro	78
9.2.2	Exposición y orientación	78
9.2.3	Elevación	79
CAPÍTULO 10 PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS	80	
10.1	FORMA	80
10.2	PENDIENTE MEDIA	81
10.3	ÁREA	82
10.4	JERARQUÍA DE LA RED DE DRENAJE	84
10.5	TEMPORALIDAD	84
10.6	FRECUENCIA DEL DRENAJE	84
10.7	DENSIDAD DEL DRENAJE	85
CAPÍTULO 11 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	86	
11.1	FACTORES QUE CONTROLAN EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	86
11.1.1	Factores climáticos	86
11.1.2	Factores orográficos y morfológicos	87
11.1.3	Factor litológico	88
11.1.4	Factor vegetacional	89
CAPÍTULO 12 RESULTADOS	92	
12.1	RESULTADOS OBTENIDOS	92
12.1.1	Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana bryoides</i> y <i>Parastrephia quadrangularis</i>	92
12.1.2	Matorral bajo tropical andino de <i>Mulinum crassifolium</i> y <i>Urbania pappigera</i>	93
12.2	TIPOLOGÍA PROPUESTA	107
12.3	APLICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA PROPUESTA	122
12.4	POTENCIALIDADES DE USO	128
12.4.1	Reservas para la conservación de la biodiversidad	128
12.4.2	El desarrollo del litio	130
CAPÍTULO 13 CONCLUSIONES	138	
CAPÍTULO 14 BIBLIOGRAFIA UTILIZADA	143	



Índice de figuras

Figura 1	Ciclo hidrológico	72
Figura 2	"El triángulo del litio"	131
Figura 3	Proceso de producción de LiCO₃ desde salmueras	135

Índice de mapas

Mapa 1	Cuencas consideradas	7
Mapa 2	Climas existentes en la región de Antofagasta	17
Mapa 3	Isoyetas de la región de Antofagasta	21
Mapa 4	Isotermas de la región de Antofagasta	24
Mapa 5	Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 1	31
Mapa 6	Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Pujsa	33
Mapa 7	Secuencias geológicas existentes en la cuenca Laguna Helada	35
Mapa 8	Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Loyoques o Quisquiró	37
Mapa 9	Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 2	39
Mapa 10	Secuencias geológicas existentes en la cuenca Laguna Lejía	41
Mapa 11	Secuencias geológicas existentes en la cuenca Laguna Miscanti	43
Mapa 12	Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar del Laco	45
Mapa 13	Secuencias geológicas existentes en la cuenca Laguna Miñiques	47
Mapa 14	Secuencias geológicas existentes en el salar de Aguas Calientes 3 o Talar	49
Mapa 15	Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Capur	51
Mapa 16	Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Aguas Calientes 1	95
Mapa 17	Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Aguas Calientes 2	96
Mapa 18	Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Aguas Calientes 3	97
Mapa 19	Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Capur	98
Mapa 20	Pisos vegetacionales en la cuenca del salar del Laco	99
Mapa 21	Pisos vegetacionales en la cuenca de la Laguna Helada	100
Mapa 22	Pisos vegetacionales en la cuenca de la Laguna Lejía	101
Mapa 23	Pisos vegetacionales en la cuenca de la Laguna Miscanti	102
Mapa 24	Pisos vegetacionales en la cuenca de la Laguna Miñiques	103
Mapa 25	Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Pujsa	104
Mapa 26	Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 2	111
Mapa 27	Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 3	112
Mapa 28	Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 1	113
Mapa 29	Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Capur	114
Mapa 30	Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar del laco	115
Mapa 31	Unidades geológicas existentes en la cuenca Laguna Helada	116



Mapa 32	Unidades geológicas existentes en la cuenca Laguna Lejía	117
Mapa 33	Unidades geológicas existentes en la cuenca Laguna Miñiques	118
Mapa 34	Unidades geológicas existentes en la cuenca Laguna Miscanti	119
Mapa 35	Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Loyoques o Quisquiró	120
Mapa 36	Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Pujsa	121
Mapa 37	Diferenciación de las cuencas según su escurrimiento y aplicación de la tipología propuesta	139
Mapa 38	Usos potenciales de las cuencas consideradas	142

Índice de tablas

Tabla 1	Total de estaciones pluviométricas seleccionadas para el área de estudio.	19
Tabla 2	Precipitaciones mensuales promedio por estaciones (mm)	20
Tabla 3	Estaciones meteorológicas utilizadas	22
Tabla 4	Temperatura media anual.	22
Tabla 5	Temperatura máxima anual	22
Tabla 6	Temperatura máxima absoluta anual	23
Tabla 7	Cuencas hidrográficas del sistema Pacífico Seco y origen altiplánico	58
Tabla 8	Síntesis cuantitativa de las cuencas consideradas.	71
Tabla 9	Clasificación de pendientes	82
Tabla 10	Superficie de las cuencas analizadas	83
Tabla 11	Superficie de cada piso vegetacional	94
Tabla 12	Índices hidromorfométricos de las cuencas consideradas.	106
Tabla 13	Densidad y frecuencia del drenaje para las cuencas y asignación de claves.	107
Tabla 14	Índice de compacidad para las cuencas y asignación de claves.	107
Tabla 15	Pendientes del dren principal claves asignadas	108
Tabla 16	Cálculo del IPE por cuenca	109
Tabla 17	Unidades geológicas propuestas	110
Tabla 18	Tipología propuesta	123



RESUMEN

El Altiplano es una zona geográfica poco estudiada en su conjunto y muy rica tanto en ecosistemas endémicos como en reservas de recursos minerales. Cuenta con una geografía muy particular, presentando riqueza y variedad en lo climático, ecológico, morfológico, hidrológico y paisajístico, todo lo cual lo coloca en un plano de gran laboratorio natural.

Dado este contexto, la presente memoria se avoca al análisis y tipología de los sistemas hidrológicos, proceso que se desarrolla en tres partes. La primera consiste en la descripción de las características de once cuencas altiplánicas. Se utiliza información de diversas instituciones para poder caracterizar físicamente a los sistemas de cuencas altiplánicas para poder así tener una visión de cómo es su funcionamiento y de sus características. La segunda parte es una propuesta para clasificar cuencas, la cual consiste en una actualización de la clasificación hidrodinámica (Ferrando, 1993) pero esta vez agregándole un nuevo componente. Y la tercera parte consiste en proponer algunos usos potenciales para estas cuencas, completamente distintos unos de otros, pero que demuestran que el área de estudio cuenta con recursos muy interesantes de aprovechar y de proteger. Uno de ellos está enfocado a la protección del medio ambiente y el otro a la explotación responsable de los recursos minerales existentes en las salmueras. A pesar de ser muy distintos y completamente opuestos, ambos son posibles de llevar a cabo de manera responsable y protegiendo el ecosistema altiplánico.



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Las cuencas son un sistema dinámico abierto que, además de presentar componentes físicas de orden geológico, geomorfológico, edáfico, topográfico y vegetacional, también tienen características dinámicas de tipo hidrológico, hidrogeológico, erosivo y sedimentacional que dependen de fuentes externas directamente relacionadas con el clima, especialmente las temperaturas, las precipitaciones y los vientos, cada uno con sus propias manifestaciones, variaciones e intensidades. El estudio y evaluación de este complejo sistema sirve, en cierta forma, para poder entender el valor real que tiene una cuenca en relación con la población, las actividades económicas, el desarrollo sustentable y el ordenamiento territorial. Por ende, son sistemas hidroespaciales relevantes para poder potenciar un área determinada y pensar en planes de desarrollo a futuro.

Debido a la importancia que tienen estas cuencas en relación con el sistema altiplánico y el desierto adyacente, se decidió estudiar esta área tan inhóspita y poco investigada de la segunda región de nuestro país, especialmente en este caso once cuencas, para poder generar información la cual en un futuro pueda ser utilizada para implementar planes de desarrollo sustentable o para ser considerado como base y ser aplicado en otras regiones de nuestro país.

Los geógrafos tienen la capacidad de ver más allá de lo evidente, son capaces de observar los paisajes y poder ver cosas que el normal de las personas no ven, analizar el paisaje como un sistema y poder de esta manera estudiar las variables que forman este sistema para así entender su funcionamiento y poder proponer planes de desarrollo de determinadas áreas teniendo como pilar fundamental la sustentabilidad, dado que para que un plan tenga esta meta debe generar crecimiento económico para el área geográfica considerada, debe preocuparse de la equidad social de los pobladores de dicha área y debe considerar y velar por la protección del medio ambiente.

Dada esta óptica es que se pensó en poder analizar ciertas cuencas altiplánicas, levantar información, a veces crear información ya que la existente es muy poca y no de muy buena calidad y poder proponer una metodología de clasificación de ellas como un aporte a futuros planes de desarrollo.

Las cuencas de la zona altiplánica de Chile constituyen sistemas hidrológicos sobre los cuales existe poca información respecto de sus características de funcionamiento, de los recursos hídricos, de su dinámica en términos cuantitativos, especialmente respecto de los montos de las reservas hídricas, su alimentación y reposición de las mismas.

Las características de estos sistemas, hacen que la clasificación existente las incluya sólo en uno o dos categorías, lo que no permite tener una visión completa de ellas como sistema, quedando en algunos casos ocultos componentes que las diferencian, no siendo considerados en los estudios.

Por este motivo, se pretende optimizar la clasificación dentro de la cual se encuentran las once cuencas consideradas, utilizando métodos geográficos para poder generar otra propuesta de clasificación que potencie a la clasificación existente.



Se eligieron sólo cuencas endorreicas debido a lo interesantes que son como sistema, para demostrar que las cuencas localizadas en el altiplano de nuestro país son sistemas independientes muy ricos y con características propias y bien definidas que los hacen muy interesantes para realizar estudios los cuales permitan contar con información de mejor calidad. Ya que los datos que actualmente se poseen de ellas son pocos y, en la mayoría de los casos, inexistentes, resulta fundamental tener mayor información del sistema de las cuencas endorreicas altiplánicas para poder profundizar de cierta manera en estos sistemas evaporíticos, entender su comportamiento y desarrollo, y para poder establecer potencialidades de uso.

Las cuencas altiplánicas seleccionadas son las siguientes:

- Salar de Aguas Calientes 1
- Salar de Pujsa
- Laguna Helada
- Salar de Loyoques o Quisquiró
- Salar de Aguas Calientes 2
- Laguna Lejía
- Laguna Miscanti
- Salar del Laco
- Laguna Miñiques
- Salar de Aguas Calientes 3 o Talar
- Salar de Capur

Todas ellas son cuencas endorreicas, se encuentran ubicadas en la meseta altiplánica, presentan diferencias de altitud que van de 4.000 a 5.000 msnm, carecen de estaciones meteorológicas y de aforo.



CAPÍTULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde su aparición en la tierra, el hombre ha tenido que satisfacer sus necesidades básicas, y para atenderlas ha utilizado en escala creciente los recursos naturales disponibles.

Históricamente, la manera en que se ha poblado nuestro territorio y el desarrollo histórico, económico y social, ha estado íntimamente relacionado con la disposición y seguridad del recurso hídrico, producto de lo cual, las ciudades y pueblos del norte de Chile se han localizado en los bordes de los ríos, esteros, quebradas y manantiales, a excepción de ciertas ciudades-puerto de localización costera.

El agua es considerada un recurso natural renovable aunque sólo se recicla naturalmente, es decir, es único, finito y las cantidades a nivel local son variables en el tiempo y en el espacio. Además, es indispensable para todo ser vivo y para todas las actividades económicas y productivas del hombre. Al observar tanto la naturaleza como el desarrollo de las actividades humanas se comprueba que este recurso es el factor esencial de toda manifestación de vida.

Sin embargo, este recurso se presenta cada vez más variable o esquivo, tanto en cantidad como en calidad, en relación con las demandas crecientes de la sociedad.

Dada esta situación, la atención del gobierno se ha centrado, entre otros, en el interés de expandir y subsidiar el desarrollo del sector hídrico teniendo como base la gestión sustentable del recurso y la evaluación de la asignación de derechos.

El sostenido crecimiento económico y el desarrollo social experimentado por nuestro país en las últimas décadas ha generado demandas cada vez mayores sobre los recursos hídricos por parte de los distintos sectores usuarios.

Entre las regiones de Arica-Parinacota y Metropolitana, donde la condición climática es del tipo árido a semiárido (por cuanto la evapotranspiración potencial supera la precipitación), ocurre que la totalidad de los recursos de agua superficiales se encuentran ya comprometidos entre los distintos usos. Situación similar ocurre con el agua subterránea.

La disponibilidad natural de agua promedio por habitante de la región Metropolitana al Norte es muy pequeña, inferior a 1.000 m³/año por habitante, umbral considerado internacionalmente como altamente restrictivo para el desarrollo económico de los países.

En este contexto, las demandas de agua representan una presión muy grande sobre los recursos hídricos de las regiones del norte del país. También se observa que en ellas, las demandas superan el caudal disponible, situación que se puede explicar tanto por la condición climática como por la extracción del recurso en forma desmedida en múltiples lugares y a lo largo de los cursos de agua existentes excediendo las reservas y afectando el sistema ecológico.



En el futuro, este escenario claramente restrictivo se acentuará mucho debido a los nuevos requerimientos¹. Es aquí donde los recursos de agua subterránea representarán la única fuente de abastecimiento para el desarrollo de futuros proyectos de las regiones (excluida la extracción de agua del mar y su potabilización), no obstante que gran parte de los acuíferos localizados en las cercanías de los centros urbanos también se encuentran copados en su disponibilidad. En este sentido, parte importante de las posibles fuentes de agua subterránea para el Norte Grande se encuentran localizadas en la zona altiplánica, lugar donde se registra la mayor cantidad de precipitaciones, pero zonas que son extremadamente complejas hidrológicamente, con amplios sectores sin control hidrométrico y una geología e hidrogeología muy diversa producto de la tectónica de bloques y del volcanismo que controló el origen y evolución de estos territorios.

En este sentido, el estudio de las cuencas altiplánicas de la cordillera de Los Andes resulta ser altamente relevante, siendo trascendental tener el más completo conocimiento de ellas, ya que representan posibles fuentes de extracción de un determinado volumen de agua no sólo para uso urbano sino también para las principales faenas mineras, reservando los caudales ambientales necesarios para el buen estado de los ecosistemas.

Considerando que las mayores inversiones anunciadas para Chile van a llevarse a cabo en la minería, los requerimientos de agua se van a ver notoriamente aumentados. En 1993 la demanda hídrica sobre estos recursos alcanzaba a los 7 m³/s, con una demanda regional cercana al 35% de este valor, sin embargo, se prevee que en el futuro próximo (2017) esta demanda se duplicará, concentrando el 50% en la I región².

Ante este escenario, se considera muy importante el poder contar con un análisis hidrológico, una metodología y una tipología adecuada, para que el Estado pueda establecer y determinar aquellas posibles fuentes de agua que puedan satisfacer los enormes problemas de requerimientos existentes en nuestro país y cuales fuentes o sistemas hidrológicos deber ser preservados o sometidos a medidas restrictivas en cuanto a extracción de este vital recurso.

¹ MOP-DGA. 1999.

² DGA, 1996.



CAPÍTULO 3 ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio se realiza en el Altiplano de nuestro país, específicamente en once cuencas localizadas en la II región de Antofagasta (

Mapa 1).

Básicamente las cuencas analizadas corresponden a cuencas sedimentarias formadas en altura, en su mayoría sobre los 4.000 msnm debido al tectonismo y a la actividad volcánica existente en esas latitudes. Producto de la morfología del área, (cuencas endorreicas en un clima de extrema aridez) se han formado numerosas lagunas y salares.

La mayor parte de las precipitaciones en estas cuencas son de origen tropical-amazónico y ocurren durante el verano del hemisferio sur (invierno Boliviano o altiplánico). Estas precipitaciones son de carácter convectivo, con una alta variabilidad espacial y se concentran en los meses de enero y febrero, fenómeno que desaparece hacia el sur siendo mínimo en la región de Atacama. En invierno, incluso primavera, suelen registrarse precipitaciones sólidas (nieve) producto de la llegada de eventuales frentes polares. Si bien estas son relevantes, su monto es inferior a las lluvias estivales.

Las condiciones climáticas extremas sólo permiten que subsista una vegetación especializada, con pocos requerimientos hídricos y capaces de soportar amplias oscilaciones térmicas. Los bofedales conforman sistemas adaptados a estas condiciones, así como la vegetación de hierbas o arbustos o esteparios, que minimizan la transpiración debido a la reducida superficie de sus hojas, algunas de las cuales han evolucionado transformándose en espinas.

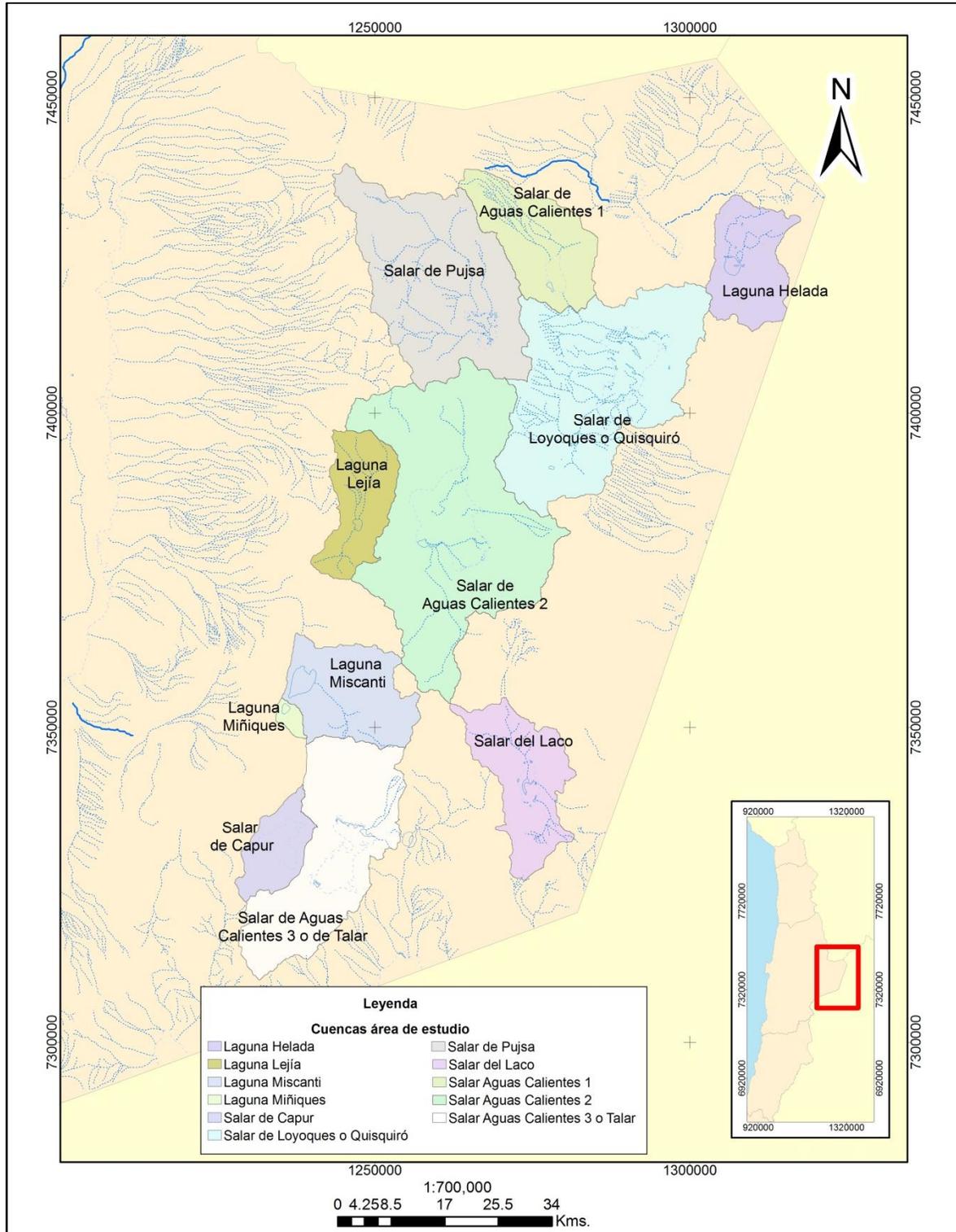
En Chile, las principales actividades que se desarrollan en la zona de interés son la minería y el turismo, así como también la ganadería extensiva y la agricultura localizada por parte de los pueblos originarios.

Dada la etapa de desarrollo en que se encuentra el área de estudio, ésta presenta una oportunidad casi única para la elaboración y evaluación de planes de gestión y aprovechamiento del agua y del territorio de manera sustentable.

El uso de los recursos hídricos en el Altiplano debe considerar por una parte su importancia para el desarrollo económico y social del país y las regiones comprometidas y, por otra, la protección y cuidado de los sistemas ambientales sensibles que allí existen.



Mapa 1 Cuencas consideradas





CAPÍTULO 4 OBJETIVOS

4.1.1 Objetivo general

Estudiar y realizar una descripción de las características hidrológicas e hidromorfológicas de once cuencas altiplánicas de la segunda región de nuestro país, y establecer una tipología para clasificar dichas cuencas y evaluar su potencialidad de uso con el fin de aportar a la generación de planes de desarrollo sustentable para dichas cuencas.

4.1.2 Objetivos específicos

- Realizar una caracterización de componentes físico – naturales de cada una de las once cuencas seleccionadas.
- Desarrollar un modelo metodológico de clasificación que indique características diferenciantes de los sistemas.
- Generar una nueva tipología y clasificación de estas cuencas.
- Proponer potenciales usos para desarrollar en estas cuencas.



CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA

En general, la investigación se desarrolla en base a una fase de recopilación de información, pasando luego al análisis e interpretación. En el proceso, se genera información en base a datos indirectos, se aplican índices y se maneja digitalmente tanto las bases cuantitativas y cualitativas como el desarrollo de la cartografía.

En lo específico, con los datos del Balance Hídrico Nacional se procedió a:

- Seleccionar cuencas sobre los 4.000 msnm.
- Obtener información pluviométrica de las estaciones localizadas en el área de estudio o vecinas a ella para poder observar el comportamiento que presentan las once cuencas seleccionadas en este trabajo de memoria.

Con los antecedentes cartográficos se:

- Delimitó las cuencas seleccionadas, utilizando imágenes satelitales y la cobertura del IGM a escala 1:50.000.
- Calculó el área de las cuencas.
- Aplicó la información digital del balance hídrico (isoyetas).

Para el análisis de caudales, los pasos metodológicos fueron los siguientes:

- Descarga de mediciones históricas llevadas a cabo durante el período 1950 – 2008 en cada una de las estaciones de monitoreo pluviométrico existentes en el área de estudio o vecinas a ella.
- Para poder realizar el análisis cualitativo y cuantitativo de las componentes físicas se trabajó con variables exógenas (precipitación, temperatura, etc.) de las cuales se disponía de datos, los que fueron extraídos del Banco Nacional de Aguas, en el cual se encuentran todos los registros que han sido tomados en las distintas estaciones de monitoreo que cuenta la Dirección de Aguas a lo largo de todo nuestro país.
- Para trabajar la hidrología se utilizó cartografía digital generada por la DGA e información pluviométrica proveniente del Banco Nacional de Aguas, en donde se puede obtener información que ha sido registrada en las estaciones de medición.
- El análisis de las precipitaciones sobre un área determinada se basó en el hecho que la precipitación puntual observada en una estación pluviométrica corresponde a la precipitación caída en una zona más o menos extendida según la densidad de la red pluviométrica, lo cual depende de las características meteorológicas y topográficas del área estudiada.
- Dentro de los métodos utilizados para representar datos pluviométricos en una cuenca, está el cálculo de la precipitación media sobre una zona, en este estudio se utilizó el método de las isoyetas.
- Se calculó, utilizando estas mismas isoyetas (base de datos digital, trabajada en Arcgis 9.3) el área que abarca cada isoyeta dentro de las subcuencas seleccionadas.



- La información requerida para este análisis fue extraída del Balance Hídrico Nacional, de la cobertura topográfica aportada por el USGS, de imágenes satelitales LANDSAT dispuestas por NASA, del levantamiento geológico escala 1:250.000 del SERNAGEOMIN, de la información hidrogeológica contenida en los diversos estudios disponibles en la DGA, así como de los estudios técnicos de apoyo para la presentación de solicitudes de agua y de los estudios de Impacto Ambiental.
- Respecto de la componente geológica en este estudio, ella fue estudiada a través de imágenes LANDSAT y de las cartas geológicas del SERNAGEOMIN, además de información generada por la Dirección General de Aguas, la cual actualmente es utilizada en el software SIGIRH (Sistema de Información Geográfica de los Recursos Hídricos).
- Finalmente, para poder desarrollar un análisis del aspecto geomorfológico se utilizó información proveniente de CIREN- CORFO, de bibliografía y estudios anteriores.

La delimitación de las divisorias de agua se realizó utilizando distintas fuentes de información, siendo la principal los modelos de elevación digital (DEM) del USGS. Otras fuentes de información utilizadas fueron las coberturas digitales (SIG) provistas por la DGA, el Mapa Hidrográfico de Chile del IGM³, e imágenes satelitales Landsat (1990).

Se consideraron una componente cualitativa integrada por parámetros geológicos, geomorfológicos y vegetacionales y una componente cuantitativa donde se consideraron parámetros como las pendientes, la forma de las cuencas y el grado de desarrollo del drenaje.

Componente cualitativa:

Geología: se diferenció las unidades litológicas en función de su naturaleza geológica, del grado de alteración, fracturamiento y fallamiento. Con lo cual es posible establecer el grado de erosión geológica y la erodabilidad del sector analizado.

Geomorfología: se utilizaron las características de las laderas según la clasificación de Araya (1985) lo que permite diferenciar según su estabilidad y grado de producción detrítica.

Vegetación: se utilizó la definición de pisos vegetacionales de Luebert y Pliscoff. Los pisos vegetacionales corresponden a franjas altitudinales de vegetación, las cuales están limitadas por las curvas de nivel. Estos pisos permiten una determinación aproximada del grado de protección de las cubiertas detríticas y regolíticas.

Componente cuantitativa:

Debido a la carencia de estaciones fluviométricas en las cuencas que componen esta memoria de título, se buscó información sobre el significado de los resultados arrojados por una gran multiplicidad de índices hidromorfométricos con el objeto de seleccionar los más adecuados para caracterizar a las cuencas.

³ Niemeyer & Cereceda, 1984



Se trabajó con diferentes métodos para determinar las pendientes medias, la forma de las cuencas y sus características hidrodinámicas.

Para la caracterización hidromorfométrica se utilizaron los siguientes índices:

Frecuencia de la red de drenaje, corresponde a la división entre la cantidad total de cauces existentes en una cuenca y la superficie total de esta cuenca. El resultado corresponde a un valor adimensional. Al obtener el número de cauces por km^2 se establece la mayor o menor posibilidad de que cualquier gota de agua encuentre un cauce a mayor o menor tiempo.

La densidad del drenaje es un reflejo de la dinámica de la cuenca, de la estabilidad de la red hidrográfica y del tipo de escorrentía de superficie, así como de la respuesta de la cuenca ante un evento de precipitación. Corresponde al cociente entre la longitud de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca, expresados en kilómetros y el área total de la unidad hidroespacial expresada en km^2 interpretando el resultado como el número de cauces existentes por km^2 . La densidad expresa las características geocológicas del territorio de la cuenca. Dicha densidad está controlada por la litología, la permeabilidad del suelo y su capacidad de infiltración, la cobertura vegetal y el tipo de la misma.

De esta manera, a mayor densidad más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y por tanto en un menor tiempo al peak del hidrograma. Aquellas cuencas que presentan altos valores de densidad se caracterizan por presentar texturas finas a ultra fina, son fácilmente erosionables, son poco permeables y presentan pendientes fuertes. Mientras que aquellas cuencas que presentan bajas densidades se caracterizan por presentar texturas groseras a medias, son altamente resistentes a la erosión, muy permeables y pendientes suaves.

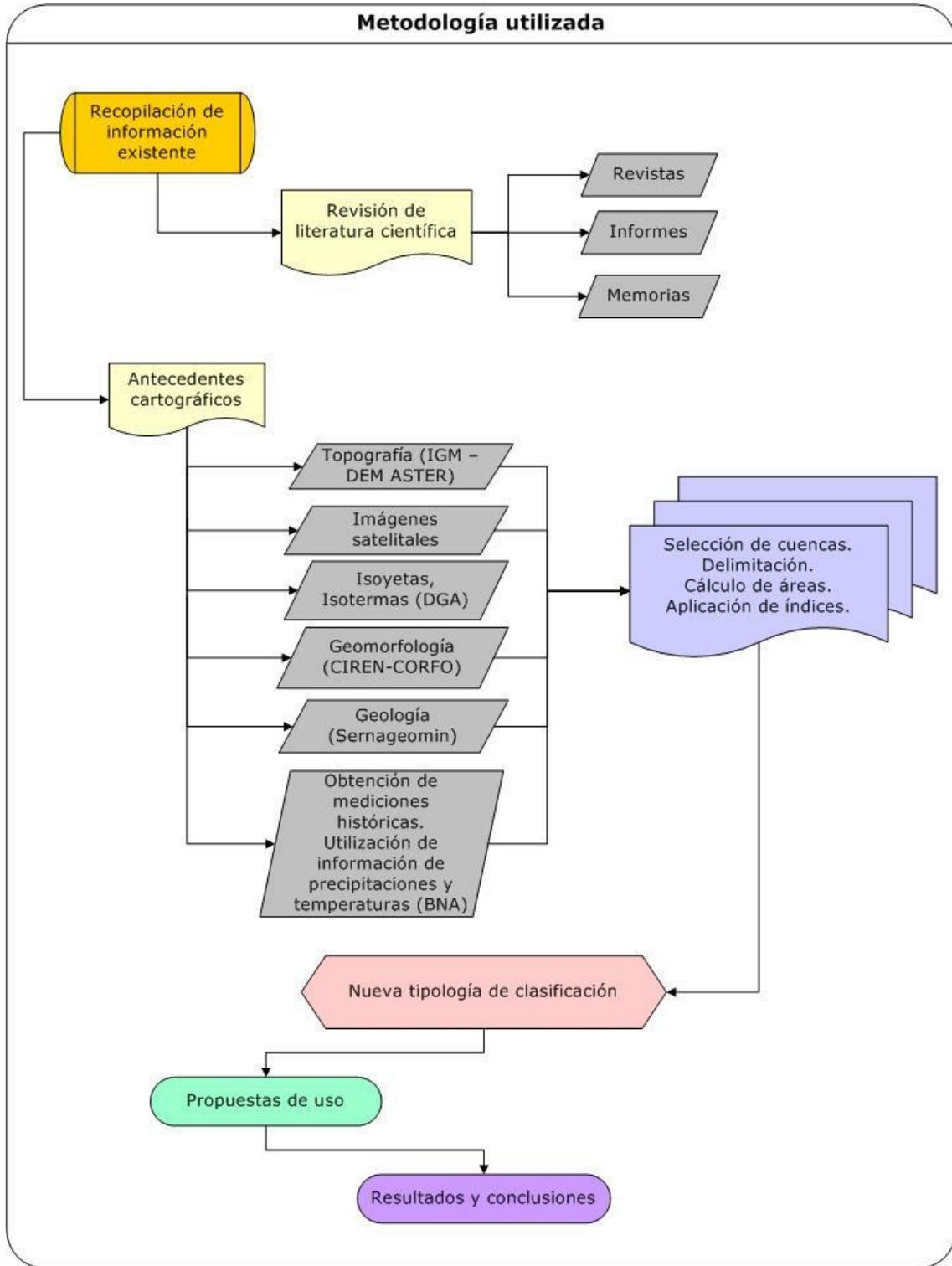
De esta manera, aquellos materiales geológicos duros y resistentes (granito, gneiss, arenisca y cuarcitas) tienden a originar bajas densidades de drenaje; debido a que la erosión fluvial es muy difícil. En materiales blandos (margas y arcillas) las cuencas por pequeñas que sean pueden suministrar la escorrentía suficiente como para erosionar el cauce. Los materiales muy permeables como las arenas o gravas, tienden a originar bajas densidades dado que la infiltración es elevada.

La pendiente media de la cuenca fue calculada sectorizadamente utilizando la extensión Zonal Statistics de Arcgis 9.3. Identificándose para cada cuenca considerada en este trabajo 3 sectores distintos: El sector correspondiente a las laderas de la cuenca, el sector correspondiente al fondo de valle y finalmente el sector correspondiente a la superficie misma del salar o laguna. Dicho cálculo fue obtenido mediante el uso de una herramienta 3D Analyst la que genera un tin⁴. Luego con dicho tin se realiza un mapa de pendientes y con Zonal Statistics se realiza el cálculo correspondiente a la pendiente media para cada uno de los sectores identificados.

⁴ Triangulated irregular network. Corresponde a un modelo de datos topológico formado por una red de triángulos irregulares con información X, Y, Z, para los puntos. Es una forma eficiente, diferente a la de los modelos raster de almacenar y tratar datos aplicables a superficies a través de interpolación.



De acuerdo a lo señalado, la secuencia metodológica que sigue el desarrollo de esta memoria es la siguiente:





CAPÍTULO 6 ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

6.1 CLIMA

El área de estudio se encuentra sometida durante todo el año al régimen de los alisios o vientos variables del cinturón de altas presiones subtropicales, por lo que las precipitaciones en dicha región son extraordinariamente escasas.

El clima imperante es estepario de altura, con precipitaciones que ocurren principalmente durante los meses estivales, en forma torrencial y valores de evaporación potencial muy alta. Presenta gran oscilación térmica diaria y es extremadamente seco. Domina el paisaje desértico, con una gran insuficiencia de recursos hídricos superficiales, donde cobran importancia los ríos Loa, Silala y Salado.

Las condiciones climáticas se encuentran asociadas a lo que se define como sistema altiplánico, una altiplanicie delimitada por cordones volcánicos y andinos que controlan una hidrología tanto endorreica como exorreica con dirección al Océano Pacífico o al Océano Atlántico, la cual se extiende desde el límite de la Concordia por el norte, hasta la cuenca alta del río Copiapó (26° 30' S) con altura superior a los 4.000 msnm⁵.

Las variaciones climáticas están determinadas por el clima de influencia amazónica⁶ el cual se caracteriza por presentar un tipo especial de circulación atmosférica, donde las condiciones anticiclónicas predominantes durante la mayor parte del año son interrumpidas en los meses estivales por precipitaciones importantes, las cuales se originan en la interacción entre la intensa actividad convectiva que se produce en estos meses y la advección de masas húmedas desde el NE o E cerca de la superficie altiplánica⁷. Durante los meses de invierno pueden presentarse precipitaciones, las cuales difieren en su comportamiento de las precipitaciones estivales, siendo las invernales del tipo frontal, asociadas con vientos del O o del SW y sólido (nieve). Las precipitaciones estivales presentan una distribución espacial con incremento de W a E, lo cual parece responder aumento de la altura. Sin embargo, en términos generales, se trataría de una disminución de la distancia a los centros convectivos del Altiplano. La precipitación del Oeste del Altiplano se origina en la extensión de la nubosidad alta que caracteriza la parte superior de los sistemas convectivos.

Las condiciones meteorológicas pueden resumirse de la siguiente manera⁸:

- En el verano:

Existe un anticiclón cálido en la troposfera superior sobre las mesetas y montañas subtropicales. Su presencia modifica el flujo de los vientos del oeste austral, los que se extienden en promedio al menos hasta los 12° latitud S. Durante el invierno no se observa esta particularidad de la circulación

⁵ Romero, 1985.

⁶ Romero, 1985.

⁷ Fuenzalida-Rutlant, 1986.

⁸ Fuenzalida – Rutlant, 1986.



sobre la zona altiplánica encontrándose el anticiclón en altura más bien sobre el NE del continente sudamericano en la región amazónica.

La intensa radiación solar que afecta a la zona altiplánica desde las primeras horas de la mañana produce un fuerte gradiente vertical de temperatura tipo adiabático en los primeros 500 a 1000 metros sobre la superficie, generándose convección húmeda y precipitación. La liberación de calor latente asociada a este proceso supera el calor sensible transmitido desde la superficie en una proporción aproximada de 2:1. Esta fuente elevada de calor es compensada como en todo proceso convectivo, por una advección lateral fría y por el enfriamiento radiativo en el tope de las nubes.

Se advectan masas de aire relativamente húmedas desde el NE o E sobre la superficie altiplánica, proceso que alimenta la convección húmeda.

- En el invierno, masas de aire relativamente secas provienen del Oeste las que caracterizan la estación sin lluvia. En caso de existir precipitaciones son minoritarias y escasas y en su mayoría sólidas. Las bajas temperaturas limitan los deshielos y las pérdidas se producen principalmente por sublimación, motivo por el cual no se presentan aportes significativos a la escorrentía de salida en esos meses.

Desde el punto de vista térmico, el área de estudio se encuentra definido por un importante descenso de la temperatura con la altura, con una temperatura anual cercana a los 5° C⁹. La existencia de fuertes amplitudes térmicas tanto diarias como anuales (que disminuyen durante el período estival por la mayor proporción de humedad), poseen como factor explicativo el alto índice de continentalidad de la región, a pesar de que esta se encuentra a baja latitud, lo que es compatible con los regímenes climáticos de altura.

Las tasas de evaporación pueden elevarse desde los 1.500 a 2.000 mm/año. Se suma a estos montos la evapotranspiración y la evaporación proveniente desde las superficies de agua libre que se encuentran en la mayoría de las cuencas endorreicas alto andinas. Estos montos de evaporación, que se asocian en sus patrones de distribución espacial a los montos de precipitación, se rigen en forma directamente proporcional a los montos de insolación y de precipitación existentes en la región.

La escorrentía está directamente relacionada con los montos pluviométricos que precipitan en el sector, reaccionando según su ocurrencia y monto.

En las regiones alto andinas se desarrollan principalmente cuencas endorreicas y arreicas estacionales por la falta de cursos superficiales de agua permanentes. Como el arreísmo absoluto no existe, áreas arreicas pueden presentar eventualmente y por breves momentos, formas de escurrimiento superficial, generalmente con características de flujos detríticos o de lodo si se presentan precipitaciones importantes, ya sean líquidas o sólidas que no se infiltran ni se evaporen o sublimen, escurriendo hacia el fondo de las cuencas, recargando las vegas, bofedales y cuerpos superficiales de agua que puedan presentarse en el sector.

La variabilidad interanual de las precipitaciones se expresa en la alternancia de períodos "húmedos" y períodos "secos". A pesar de que los datos pluviométricos son limitados, es posible concluir que los aportes

⁹ Balance Hídrico, Dirección General de Aguas, 1987.



hídricos de origen pluvial, presentan fuertes variaciones interanuales, originadas por las disímiles condiciones climáticas que pueden acaecer.

En la zona desértica existe una asociación entre los años considerados "secos" y la ocurrencia del fenómeno "El Niño". Este fenómeno se relaciona con anomalías manifestadas en lluvias abundantes, ascensos de temperatura del mar y del aire y descensos de la presión atmosférica en Chile central y sequías relativas en el Altiplano y Sur de Chile¹⁰, fenómenos que se manifiestan en períodos que han demostrado cierta periodicidad.

Durante el fenómeno "El Niño" se presenta una disminución importante de los montos de precipitaciones anuales altiplánicas, siendo su distribución relativamente más homogénea durante el año, pero a la vez se constata un aumento parcial de las precipitaciones de carácter invernal.

Hacia el sur, las precipitaciones invernales aumentan debido a que las colas de los frentes polares llegan a extenderse a zonas más septentrionales de forma que en el invierno (mayo a septiembre) se presenta relativamente lluvioso. Hacia el sur de esta área, las altas presiones pueden ser a veces perturbadas por borrascas originadas por los avances estacionales del frente polar, los cuales en algunos años dan origen a lluvias copiosas en el sur de la región desértica que en otros años no se presentan.

De las precipitaciones que se registran en esta zona una parte infiltra y luego retroalimenta múltiples vertientes de las cuales depende la vida de igual cantidad de ríos y de oasis.

En el sector andino – altiplánico se presentan dos fenómenos, uno es el efecto orográfico que genera aumento de la precipitación con la altura y el otro es que durante el período estival, esta zona es alcanzada por el Frente Ecuatorial, recalentando la montaña y favoreciendo los movimientos convectivos en las masas de aire, originando un fenómeno lluvioso denominado "Invierno Boliviano".¹¹

En el extremo NE es posible sentir en verano la influencia del sistema continental o amazónico, el cual induce las lluvias del "Invierno Boliviano" que son las responsables del régimen estival de los ríos del norte del país. La variación anual de las precipitaciones es grande, presentándose años muy secos y años lluviosos que pueden llegar a registrar hasta tres veces la precipitación media. De esta manera, los eventos pluviométricos anormalmente altos sobrepasan la red de drenaje produciendo grandes aluviones, los cuales han modelado de manera importante la morfología de los sectores medios y bajos.¹²

En la zona altiplánica la evaporación desde superficies de agua y desde el suelo es muy elevada (1.500 a 2.000 mm/día). Ello supera con creces la precipitación media anual a los 4.000 metros de altura, la que varía entre 200 y 300 mm. Esta situación sumada a las bajas temperaturas explica la condición estepárica fría imperante.

¹⁰ Romero y Garrido, 1985.

¹¹ MOP – DGA, 1986.

¹² Risacher F, et als, 1999.

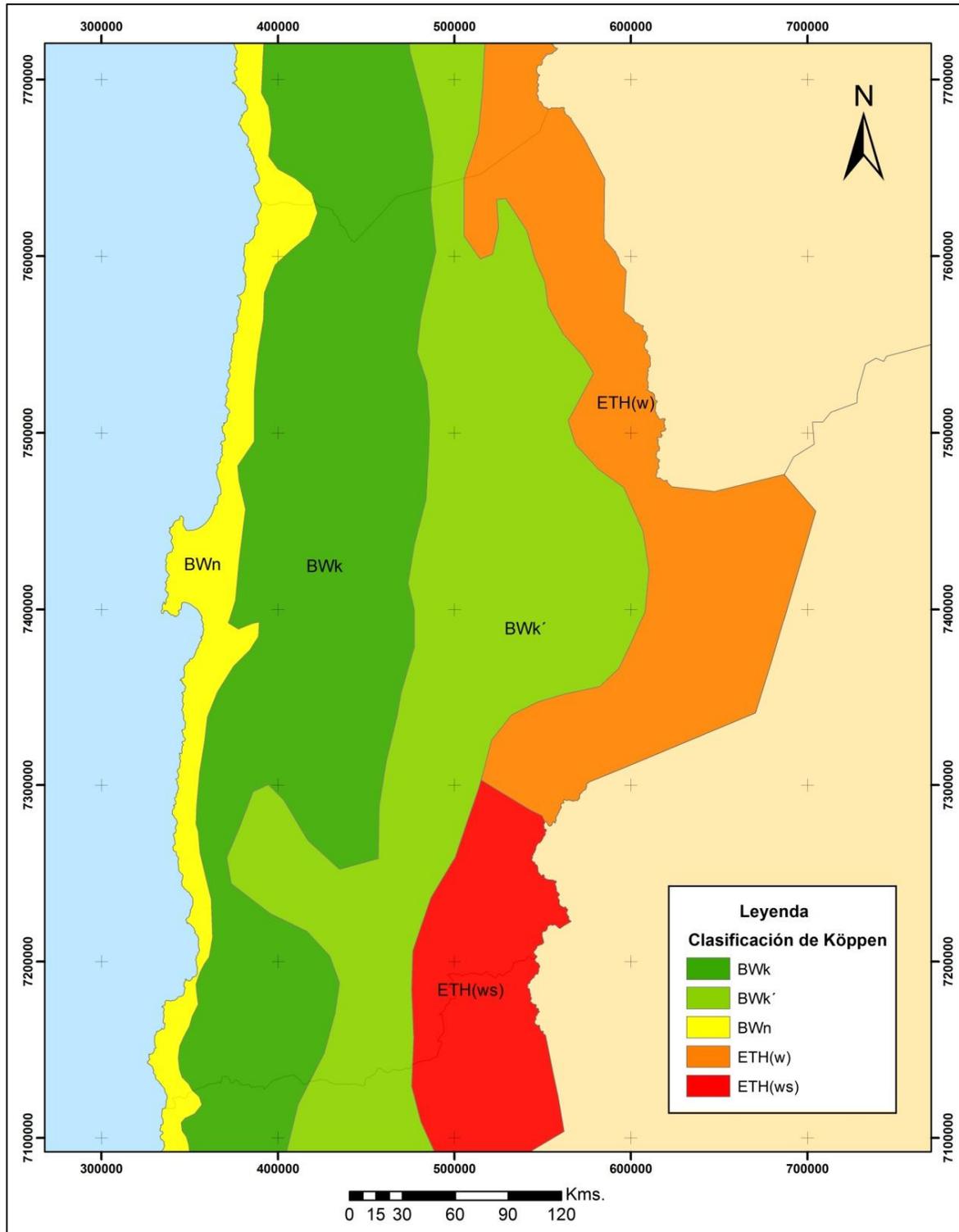


De acuerdo a la clasificación generada por Köppen, modificada por el Instituto Geográfico Militar, es posible distinguir los siguientes climas presentes en el área de estudio, los cuales se observan en el Mapa 2:

- Hacia el interior, al acercarse a la cordillera de Los Andes, comienza a disminuir la temperatura y a aumentar el agua caída. Hacia los 3.000 metros se inicia el clima desértico frío (BWK') con una temperatura promedio de 10° C, con lluvias de régimen mixto donde el agua caída en invierno se impone a las lluvias convectivas estivales.
- Sobre los 3.000 metros, aparece la tundra (ETH[w]) producto de precipitaciones estivales que favorecen el desarrollo vegetacional con presencia de cactáceas, arbustos, gramíneas y comunidades de coirón. Sobre los 4.000 metros se aprecian praderas de pajas bravas, yaretas y especies leñosas amacolladas. Muy localmente se presentan ejemplares de queñoa (*Polylepis tarapacana*).



Mapa 2 Climas existentes en la región de Antofagasta



Fuente: Köppen modificado por IGM. 2004.



6.1.1 Precipitaciones

La gran variabilidad que caracteriza a las precipitaciones en la segunda región de Antofagasta, influenciada por el Invierno Boliviano, las hace difíciles de representar a través de métodos tradicionales. En primer lugar, la reducida extensión espacial de las lluvias hace que la relación entre los registros en distintas estaciones sea muy variable, ya que suele ocurrir que mientras una estación registra una cierta tormenta, otra estación relativamente cercana queda fuera de su radio de influencia. Además, la variabilidad interanual de las precipitaciones puede hacer que una misma estación tenga comportamientos aparentemente diferentes de un año a otro.

Los datos de precipitaciones disponibles en el área de estudio corresponden a los registrados por las estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (D.G.A). A través del Departamento de Hidrología de dicha institución se recopiló la información histórica a nivel mensual existente en el Banco Nacional de Aguas (B.N.A).

En general el área altiplánica presenta grandes vacíos de datos de precipitaciones, principalmente del área fronteriza, donde no existen registros por parte de ningún país.

Para poder caracterizar las variables meteorológicas de un área determinada es necesario contar con registros continuos, homogéneos y de la mayor longitud posible. Gran parte de las estadísticas meteorológicas presentan vacíos, por la supresión de estaciones, fallas en los instrumentos, errores de los operadores, etc. Estos problemas determinan que existan estaciones meteorológicas con estadísticas de mejor o peor calidad.

Para efectos de este análisis se ha determinado agrupar las estaciones en tres tipos, el primero de ellos corresponde a las estaciones vigentes para las cuales existe un registro consistente y que en el presente y futuro seguirán siendo fuentes de información confiables. El segundo tipo lo conforman las estaciones suprimidas con información importante. Son estaciones que no se encuentran operativas en la actualidad pero presentan registros históricos importantes, de los que es posible inferir información relevante. Finalmente el tercer tipo lo conforman las estaciones suprimidas con poca información, son estaciones que no se encuentran activas y que durante su período de registro no alcanzaron a generar una estadística suficientemente confiable.

Como criterio se considera aquellas que hayan alcanzado al menos generar 10 años de información completa durante los últimos 40 años. En la Tabla 1 se presentan las estaciones seleccionadas.

El criterio de selección consiste en utilizar las estaciones vigentes y las suprimidas cuyo registro sea extenso y cuya ubicación sea la más cercana respecto a las cuencas del área de estudio.



Tabla 1 Total de estaciones pluviométricas seleccionadas para el área de estudio.

Código	Estación pluviométrica	UTM		Altitud (msnm)	Años de registro
		Este	Norte		
02110013-7	Calama	509832	7517389	2323	36
02500015-3	Toconao retén	601376	7434668	2477	17
02500016-1	Toconao experimental	602573	7435183	2507	32
02500017-k	Camar	605954	7411015	2772	32
02500019-6	Socaire	613011	7391031	3285	34
02500020-k	Peine	596045	7380388	2491	36
02500021-8	Talabre	613727	7421415	3330	14
02510006-9	San Pedro de Atacama	582019	7466710	2436	20
02510007-7	Río Grande	585709	7494705	3309	34

Se seleccionaron aquellas estaciones pluviométricas que cuentan con más de 10 años de registro y que proporcionan un coeficiente de correlación aceptable con otras estaciones. Aquellos registros sólo con valores nulos tienen una desviación estándar igual a cero, por lo cual se indefinieron el coeficiente de correlación con cualquier otra estación. Al evaluar la información disponible en cada estación se debe considerar que el relleno se realiza mensualmente, por lo cual se requieren al menos 10 años de registro para los valores mensuales de cada mes del año, en un período común de modelación. Se eligió un período entre 1970 y 2009, obteniéndose 40 años de estadísticas pluviométricas mensuales completas.

Se realizó una caracterización hidrológica a nivel regional de las cuencas altiplánicas chilenas, considerando variables meteorológicas (precipitaciones, temperaturas) e hidrológicas (escurrimientos). Para este análisis se utilizaron series históricas de las variables a nivel mensual y anual.

A través de las precipitaciones históricas, se pudo caracterizar la distribución espacial y temporal de ellas, estimando el aporte de lluvias a las cuencas. Se pudo observar que hay un cambio significativo en la precipitación media anual en función de la latitud.

Además se observó el comportamiento espacial y temporal de los escurrimientos. Los registros de escurrimiento al interior de las cuencas altiplánicas son escasos. De hecho, ninguna de las estaciones de medición de la Dirección General de Aguas se encuentra dentro de las cuencas altiplánicas.

En la Tabla 2 es posible identificar las precipitaciones mensuales promedio de las estaciones cercanas a las cuencas consideradas en esta investigación.



Tabla 2 Precipitaciones mensuales promedio por estaciones (mm)

Nº	Estación	Años	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	Calama	36	0,5	1,3	0,7	0,4	3	3,3	0,1	3,3	2,4	0,9	0,0	1,8	17,5
2	Río Grande	34	16,5	18,9	12,5	0,6	0,9	3,3	0,6	1	0,6	0,1	0,2	1,6	57,8
3	San Pedro de Atacama	20	9,9	15	8,4	0	0,9	2,7	0	1,7	0,8	0,5	0,7	0,2	27,9
4	Toconao experimental	32	9,3	11,1	6,5	0,3	1,3	2,3	0,6	0,4	1	0,4	0,1	1	34,4
5	Toconao retén	17	13,4	10,4	3,4	0	1	2,7	0	0,6	0,6	0,1	0,2	0,9	41,1
6	Talabre	14	11,3	12,2	11,9	1,2	5,6	0,4	0,2	2,5	0,3	0,1	0	0,1	60,3
7	Camar	32	9,9	11,9	6,7	0,2	0,7	3,5	0,1	0,7	0,8	0	0,2	0,6	33,1
8	Socaire	34	14,7	11,1	6,8	1,6	3,7	2,6	0,4	1,3	1	0,3	0,3	0,8	45,1
9	Peine	36	5,8	5,8	5,3	0,7	1,2	2,1	0,4	0,4	0,5	0,1	0	0,2	23,1

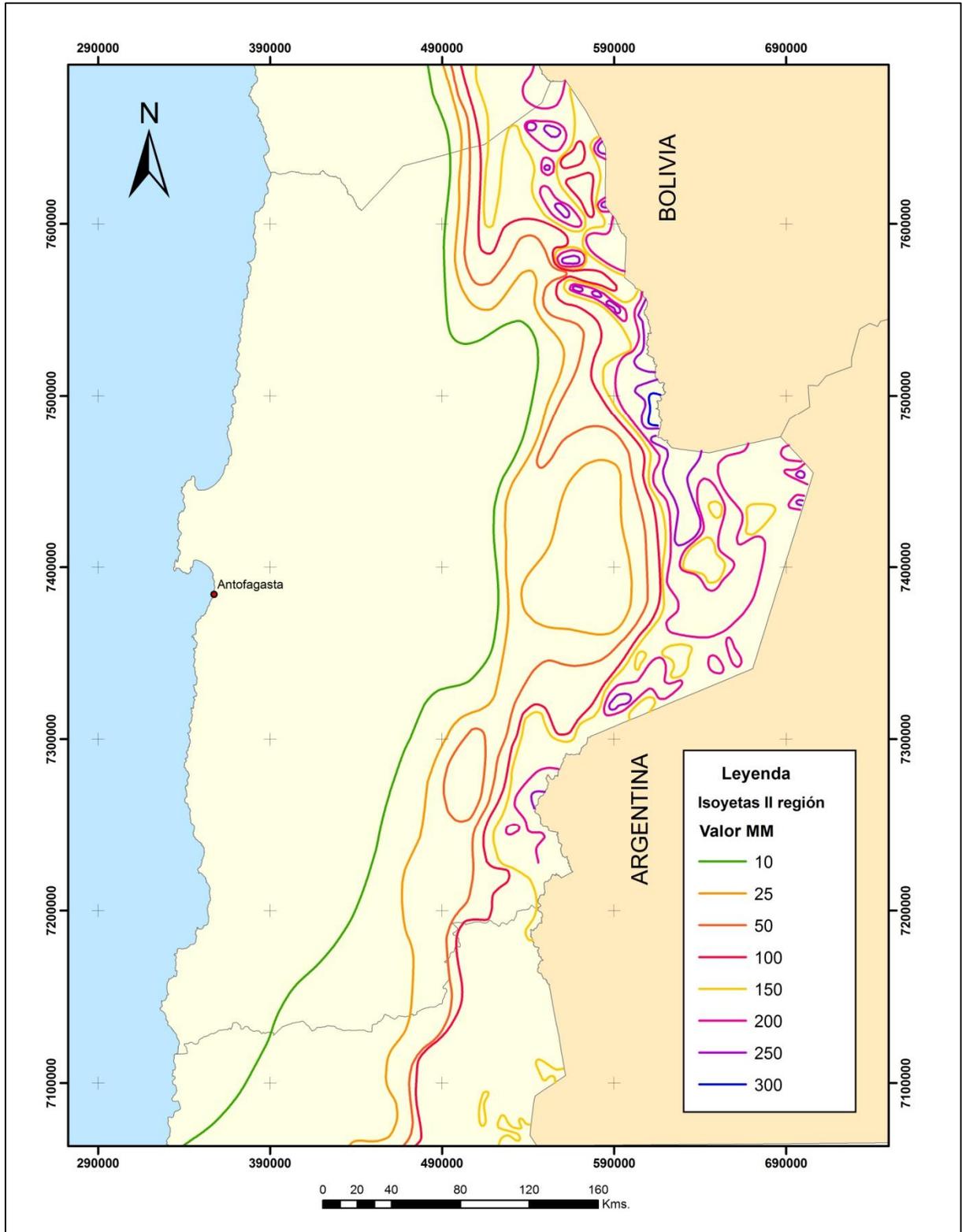
Las precipitaciones mensuales promedio asociadas a cada cuenca se estimaron como un promedio ponderado de las precipitaciones sobre toda su superficie, utilizando el software arcgis. Como entradas fueron consideradas un shapefile con los polígonos delimitantes de cada cuenca (1) y un shapefile con los puntos de ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el estudio (2), conteniendo como uno de sus atributos la precipitación anual promedio calculada para cada estación.

Se generó un raster de precipitaciones anuales promedio, utilizando la herramienta "Topo to Raster" de Arcgis para interpolar este manto a partir de los valores puntuales del shapefile 1. Por simplicidad se generó un único raster que considera todas las estaciones pluviométricas seleccionadas, abarcando toda el área de estudio. Ello no implica que estaciones muy lejanas a una cuenca carezcan de influencia sobre las precipitaciones estimadas para ella. En este caso, el raster será posteriormente superpuesto con las cuencas, de forma que sólo la zona del raster que intersecta a cada cuenca es considerada en cada cálculo.

Utilizando la herramienta "Zonal Statistics" del conjunto "Spatial Analyst" se obtuvo el respectivo valor representativo de la precipitación anual promedio para cada cuenca. Esta herramienta permite calcular un promedio de las precipitaciones de interés al considerar los valores de cada celda del raster que se encuentre dentro de una cuenca en particular. El monto de precipitaciones es intersectado con cada cuenca y dentro de cada una de ellas se promedian las precipitaciones asociadas a cada celda del raster intersectado, de donde resulta el Mapa 3 de Isoyetas de la región de Antofagasta.



Mapa 3 Isoyetas de la región de Antofagasta





6.1.2 Temperatura

Para la temperatura de las cuencas seleccionadas se recopilieron series de temperatura media, mínima promedio, mínima absoluta, máxima promedio y máxima absoluta a nivel mensual y anual. En la Tabla 3 se presentan las estaciones meteorológicas que se consideraron en esta descripción.

Tabla 3 Estaciones meteorológicas utilizadas

Código	Estación meteorológica	UTM		Altitud (msnm)	Años de registro	Estado
		Este	Norte			
02110013-7	Calama	509.841	7.517.409	2.260	29	S
02500019-6	Socaire	613.485	7.391.129	3.251	12	S
02500020-K	Peine	595.346	7.381.030	2.480	33	V

En la Tabla 4,

Tabla 5 y Tabla 6 se puede decir que la temperatura de acuerdo a lo que nos muestran las mediciones, presenta gran estabilidad interanual. La temperatura media absoluta se mantiene alrededor de los 5° C, la temperatura mínima promedio puede llegar a los -5° C y la temperatura máxima promedio alcanzar los 15° C. Al observar las temperaturas extremas, la mínima absoluta desciende a los -15° C y la máxima absoluta alcanza los 20° C.

En los meses de Junio, Julio y Agosto se alcanzan las temperaturas más bajas y en los meses de Diciembre, Enero y Febrero se alcanzan las temperaturas más altas.

Tabla 4 Temperatura media anual.

Estación meteorológica	Años registro	Media
Calama	21	12,5
Peine	20	16,0

Tabla 5 Temperatura máxima anual

Estación meteorológica	Años registro	Máx
Calama	29	22,8
Socaire	12	16,0
Peine	32	24,9



Tabla 6 Temperatura máxima absoluta anual

Estación meteorológica	Años registro	Media
Calama	29	26,3
Socaire	12	19,5
Peine	32	28,4

Los datos históricos de temperatura a nivel mensual, fueron obtenidos a través de la Dirección General de Aguas por medio del Departamento de Hidrología existente en el Banco Nacional de Aguas (B.N.A) y del Balance Hídrico Nacional¹³.

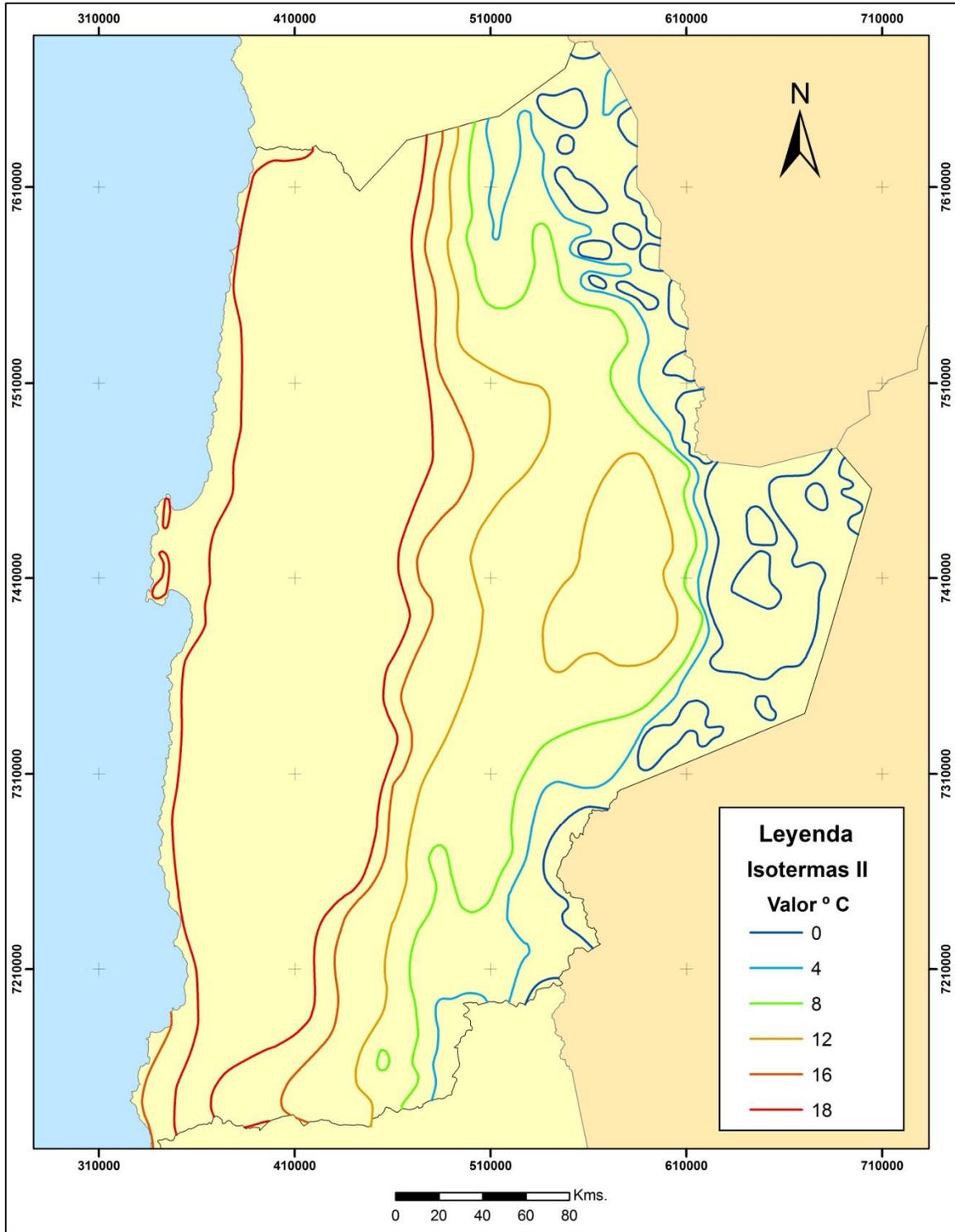
Las series de tiempo de la temperatura mensual disponible se analizaron con el fin de seleccionar las estaciones meteorológicas que se consideraron en este trabajo. El criterio de selección consiste en utilizar las estaciones vigentes y suspendidas cuyo registro tenga al menos 10 años.

En el Mapa 4 es posible identificar espacialmente la distribución de las temperaturas en la región de Antofagasta, pudiéndose decir que las mayores temperaturas, de acuerdo a la información cartográfica del Balance Hídrico Nacional del año 1986, se registran en la zona de menor altitud a lo largo de toda la zona costera, con temperaturas promedio de 18° C, para luego comenzar a disminuir a medida que se va aumentando en altitud. De esta manera en la zona de la Depresión Intermedia se presentan valores de 16°C; en la zona prealtiplánica se encuentran valores entre los 12 a 8° C; y en la zona altiplánica valores que van entre los 4 a 0°C.

¹³ DGA,1986.



Mapa 4 Isotermas de la región de Antofagasta



Fuente: Elaboración propia en base a información del Balance Hídrico Nacional DGA. 1986.



6.2 GEOLOGÍA

6.2.1 Morfoestructura

La unidad morfológica denominada Altiplano o Puna corresponde a una estructura monoclinial en forma de una extensa meseta de altura promedio de 4.000 metros, de forma elongada norte-sur, y marginada por dos grandes cordones de la cordillera de Los Andes. Se extiende entre los 17° 30' y los 28° de latitud sur, adosada al borde oriental del territorio con un ancho variable entre 20 y 70 kms. Lateralmente al Altiplano en su borde occidental medio se encuentra el Salar de Atacama, el cual es una gran cuenca tectónica limitada por la cordillera de Domeyko y de Los Andes, elongada en sentido Norte-Sur, disimétrica y de unos 200 kms de largo por 100 kms de ancho. Este salar se encuentra a 2.300 msnm. El borde oriental de su hoya hidrográfica participa plenamente de todas las características del Altiplano.

6.2.2 Marco geológico

El área de estudio, tiene como principales rasgos geológicos un basamento de tobas riolíticas y andesitas del terciario, así como edificios volcánicos cuaternarios andesíticos. En las partes bajas se presentan depósitos aluviales y salinos más modernos.

- Volcanitas terciarias: corresponden a secuencias de andesitas de disposición monoclinial con inclinación hacia el sur.
- Tobas del terciario superior: consisten en tobas pumicíticas y cineríticas de composición riolítica y tobas con mayor consolidación (ignimbritas) en la parte basal.
- Volcanitas cuaternarias: son rocas volcánicas de composición andesítica, las que se distribuyen en numerosas coladas de lava, que se han desplazado hacia las depresiones.
- Rocas piroclásticas: las manifestaciones de actividad volcánica explosiva más moderna en el área, corresponde a una secuencia de piroclastos de pocos metros de profundidad.

6.2.2.1 Sedimentos cuaternarios

A. Depósitos aluviales:

En las faldas de los conos volcánicos y marginando los salares se presentan tanto formas como sedimentos aluviales de variada granulometría, los cuales corresponden a numerosos conos aluviales y sedimentos de piedmont. Los conos aluviales originados a los pies de las quebradas que se desarrollan en las faldas de los volcanes, están constituidos por rocas andesíticas, escoriáceas y en menor proporción por piroclastos redepositados en otros eventos. Estos depósitos constituyen formas de base de ladera, las que se extienden desde las partes más bajas de los conos volcánicos hacia las depresiones de los salares. Los depósitos de morrenas, lahares y de piroclastos se extienden por las faldas de los volcanes y avanzan sobre el plateau cubriendo parte de él¹⁴.

¹⁴Ramírez y Huete, 1981, op cit.



La granulometría de los sedimentos corresponde desde grava a limo-arcilla¹⁵ dicho material se distribuye de manera gradacional con las fracciones más gruesas en los sectores más altos de los nacimientos de los abanicos aluviales y zonas de piedemonte en contacto con los salares. Las fracciones granulométricas más frecuentes corresponden a arena mediana a fina, en parte limosas, con gravas medianas. En los bordes de los salares predominan las arenas limosas.

B. Depósitos salinos:

Los factores que inciden en la génesis de los depósitos salinos de origen continental y que pueden ser aplicados a aquellos presentes en la alta cordillera andina de la región de Antofagasta, pueden ser catalogados en 3 grupos¹⁶:

1. Topografía adecuada y condiciones que permitan la formación de lagos interiores cerrados.
2. La existencia de materiales salinos solubles dentro de las cuencas de drenaje, actuales y pasadas.
3. Condiciones favorables para la concentración y precipitación salina (alta evaporación).

La procedencia de los elementos que constituyen las diversas sales de los depósitos salinos andinos aún no se encuentra bien dilucidada. La procedencia de estos elementos podría corresponder a¹⁷:

- Emanaciones volcánicas gaseosas.
- Aportes de vertientes.
- Lixiviación de la cubierta riolítica.
- Lixiviación de formaciones salinas mesozoicas (las rocas de la Cordillera de Los Andes se depositaron bajo el mar).

Los minerales presentes son principalmente halita y yeso, con concentraciones importantes de boratos dobles como ulexita. Las costras salinas presentan variadas texturas y estructuras en función de su composición y crecimiento.¹⁸

Es común que en las zonas litorales de estos depósitos salinos, se desarrollen facies sedimentarias finas del tipo limos arcillosos negros con débiles impregnaciones de pirita, facies que engranan lateralmente hacia el interior del depósito con costras sulfatadas o carbonatadas¹⁹.

La ubicación geográfica y tectónico-estratigráfica de estos depósitos condiciona en gran medida sus características composicionales, ya que estas dependen del tipo de materiales solubles existentes en las cuencas de drenaje y del tipo de clima al cual han estado sometidas.

¹⁵ CORFO, et al, 1977, op cit.

¹⁶ Vila, 1973.

¹⁷ Vila, 1973.

¹⁸ CORFO et al, 1977, op cit.

¹⁹ Vila, 1975 op.cit.



Esta dependencia de las condiciones climáticas hace que los depósitos salinos andinos constituyan sistemas cinemáticos que experimentan variaciones geomorfológicas, estructurales y composicionales en ciclos diarios y estacionales²⁰.

La mayor parte del área está formada por rocas riolíticas del terciario superior y cuaternario, y rocas andesíticas cuaternarias (coladas de lava).

Escasos afloramientos de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas (Paleozoico-Mesozoico) se distribuyen desuniformemente y corresponden a cerros islas o bloques solevantados.

Además existen sedimentos cuaternarios en forma de conos aluviales, bancos de sedimentos eólicos y depósitos de sedimentos clásticos finos asociados a flujos de lodos.

El borde oriental de la cuenca del salar de Atacama tiene una geología muy similar a la del altiplano, el borde occidental, constituido por la cordillera de Domeyko, a la cual se le antepone los cerros de La Sal, los cuales están formados por rocas sedimentarias clásticas y evaporíticas, siendo las más antiguas de edad jurásica. Estos relieves se encuentran parcialmente cubiertos por rocas riolíticas del terciario superior. Estructuralmente este sector corresponde a un Horst de dirección aproximada Norte 30° Este.

C. Rocas riolíticas:

Tienen una gran distribución areal incluso logrando alcanzar la Cordillera de la Costa en algunos sectores. Se disponen generalmente en forma horizontal a sub-horizontal con manto promedio entre 5° y 15° constituyendo a nivel regional un monoclin con suave inclinación hacia el Oeste. Repetidas efusiones de materiales riolíticos han originado espesores superiores a 1.000 metros.

Su origen está relacionado a extrusiones a través de grandes fisuras de dirección preferencial NW-SE al norte de los 23° y N-S al sur de dicho paralelo. Normalmente se encuentran interestratificadas con sedimentos aluviales y lacustres originados a sus expensas.

Estudios radiométricos indican que la depositación de estas riolitas se produjo principalmente entre los 12 y 2 millones de años, es decir durante el Plioceno y Pleistoceno.

D. Rocas andesíticas cuaternarias:

La secuencia de materiales riolíticos ha sido intruída por numerosos aparatos volcánicos cuaternarios, la mayoría de ellos relacionados al sistema de fisura que permitieron las efusiones ácidas anteriormente descritas. Los volcanes cuaternarios son principalmente andesíticos con una gran distribución areal y se disponen sobre la secuencia riolítica.

²⁰ Vila, 1975 op.cit.



El volcanismo cuaternario además de contribuir a la formación de cuencas cerradas donde posteriormente se han acumulado sedimentos clásticos, salinos, salmueras y agua, ha originado extensas áreas geotermales y algunos yacimientos de azufre.

E. Conos aluviales:

Se distribuyen en los bordes de las áreas más deprimidas, son de poca extensión y de origen aluvional. Petrográficamente están constituidos esencialmente por fragmentos de riolitas y andesitas.

F. Evaporitas y sedimentos clásticos finos a veces con material orgánico:

Están rellenando las áreas más deprimidas de las cuencas hidrográficas, estos materiales se encuentran puros o mezclados e inter estratificados con una distribución de engrane tanto vertical como horizontal.

La disposición horizontal de los extensos mantos de riolitas depositados a fines del Terciario y comienzos del Cuaternario, conformaron un paisaje muy regular. Posteriormente debido al fuerte tectonismo y al desarrollo de numerosos volcanes cuaternarios, este paisaje fue modificado configurando la actual morfología del Altiplano, caracterizada por la existencia de numerosas cuencas endorreicas.

En estas cuencas que fueron generadas por tectonismo y/o volcanismo se formaron salares, los cuales son unidades hidrológicas muy dinámicas, tienen una respuesta rápida a las variaciones de precipitación, escurrimiento superficial, aportes de agua subterránea, evaporación, deflación, deposición eólica y movimientos tectónicos lo cual se traduce en una morfología compleja.

En los bordes de los salares normalmente es posible diferenciar tres grupos de unidades con una zonación bien definida, la que está controlada por una depositación fraccionada de los materiales clásticos y precipitación de los sólidos disueltos de acuerdo a su solubilidad.

- Una primera unidad está formada por materiales detríticos principalmente por limos y arcillas de origen aluvial, cementados localmente por sales, marginan los salares constituyendo la zona distal de los conos aluviales por lo general muy marcados por líneas vegetacionales.
- A continuación hay una segunda unidad de eflorescencias y costras salinas de sulfatos y/o cloruros, asociadas a pequeñas lagunas y vegas la que, forma una angosta faja entre los materiales detríticos y el cuerpo salino central.
- Por último se encuentra un cuerpo salino central que puede estar formado por sulfatos y/o cloruros.

En la superficie de los salares hay una gran variedad de micro relieves tales como costras planas, colofomas, acordonadas, etc, a los que se deben agregar los agrietamientos poligonales, en los que en algunos casos hay alzamientos diferenciales de los polígonos por crecimientos de sales entre grietas.

Además en zonas periféricas de algunos salares se han encontrado hundimientos de terreno de tipo dolina y estructuras lineales de desplome.



6.2.3 Mapa geológico y vías evolutivas

Las cuencas cerradas del Altiplano, se caracterizan por presentar rasgos morfológicos muy similares, los cuales se resumen en lo siguiente:

- Son elongados en sentido norte-sur o aproximadamente circulares.
- Las áreas más deprimidas de ellas se ubican próximas a los bordes occidentales ya sea en el extremo norte, sur o intermedios, constituyendo salares y/o lagunas, donde se colecta todo el aporte de agua tanto superficial como subterránea.
- Los conos aluviales de material detrítico, formados a partir de las rocas circundantes, tienen características permeables y confluyen hacia los salares y lagunas.
- Las precipitaciones que se producen en el Altiplano son colectados por sistemas de drenaje, que se caracterizan por la ausencia de cursos perennes. Por lo general el escurrimiento superficial se produce a través de pequeños cursos que se desarrollan en rocas impermeables o en las cubiertas detríticas, cuyo caudal se infiltra ya sea en fracturas de rocas o en los materiales sedimentarios clásticos, pasando a constituir generalmente acuíferos freáticos.
- Es común encontrar en las proximidades de los salares y lagunas, numerosos afloramientos de agua en forma de vertientes; estos ocurren generalmente en la superficie de contacto entre riolitas infrayacentes y andesitas suprayacentes como también en los contactos entre los materiales ubicados en la parte distal de los conos aluviales con sedimentos finos asociados a salares.
- En los márgenes orientales de las depresiones, por lo general, se encuentran continuas paleoclinas de costas, las cuales corresponden a diferentes niveles de agua, indicando que el sector oriental experimentó un basculamiento positivo.
- El material sedimentario que rellena las depresiones es francamente salino, mezcla de sales y sedimentos finos, sedimentos finos salinos y/o sedimentos finos. Estos materiales a veces están saturados encontrándose agua con distintos grados de salinidad. La saturación es tal que a veces se forman lagunas.
- Las sales predominantes son sulfatos, boratos y cloruros en diferentes proporciones.

En cuanto a la evolución estructural de la zona de este estudio, esta se relaciona con la tectónica de bloques originada por deformaciones en la corteza de la placa Sudamericana, debido al esfuerzo producido por la subducción bajo ella de la placa de Nazca. Es un caso de margen continental activo el cual se mantiene desde el Carbonífero Superior. Dicha evolución se desarrolló por una sucesión de etapas de compresión y distensión, cuyo resultado fue la formación de grandes bloques estructurales caracterizados por una serie de horst y graben de orientación N-S, proceso tectónico relacionado con episodios volcánicos cuaternarios, los cuales han generado los rasgos morfológicos dominantes.



6.2.4 Características generales de cada una de las cuencas

A continuación se presentan las características geológicas de las once cuencas estudiadas, de acuerdo a la información geológica existente (Sernageomin).

6.2.4.1 Cuenca del salar de Aguas Calientes 1

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 5, las secuencias geológicas presentes en esta cuenca son las siguientes:

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Correspondientes a depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

Ms3i: Mioceno superior. Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

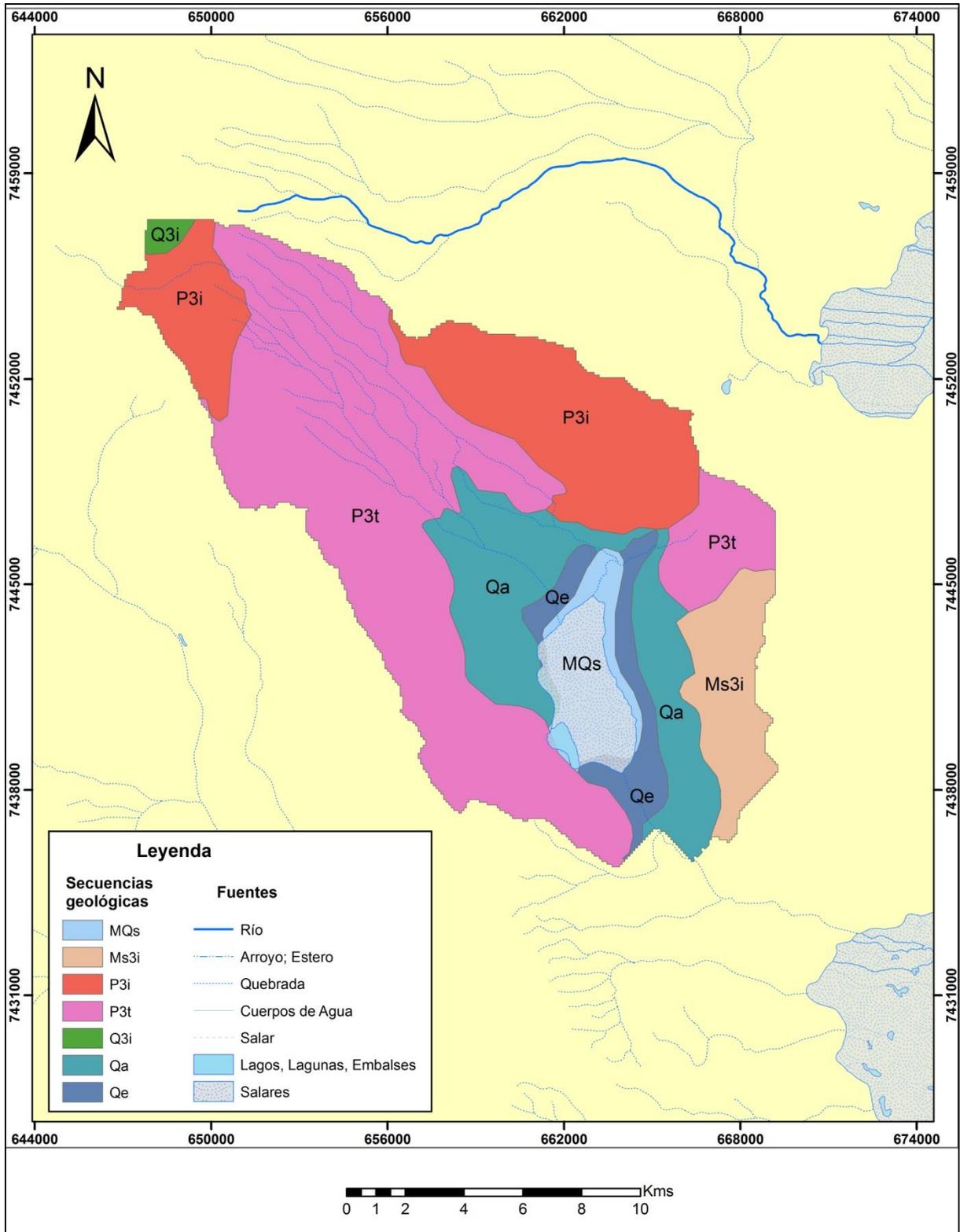
Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.

Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.

Qe: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes activos e inactivos.



Mapa 5 **Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 1**





6.2.4.2 Cuenca del salar de Pujsa

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 6, las secuencias geológicas existentes en esta cuenca son las siguientes:

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

Ms3i: Mioceno superior. Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.

Ms3t: Mioceno Superior. Ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos piroclásticos asociados a estratovolcanes.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

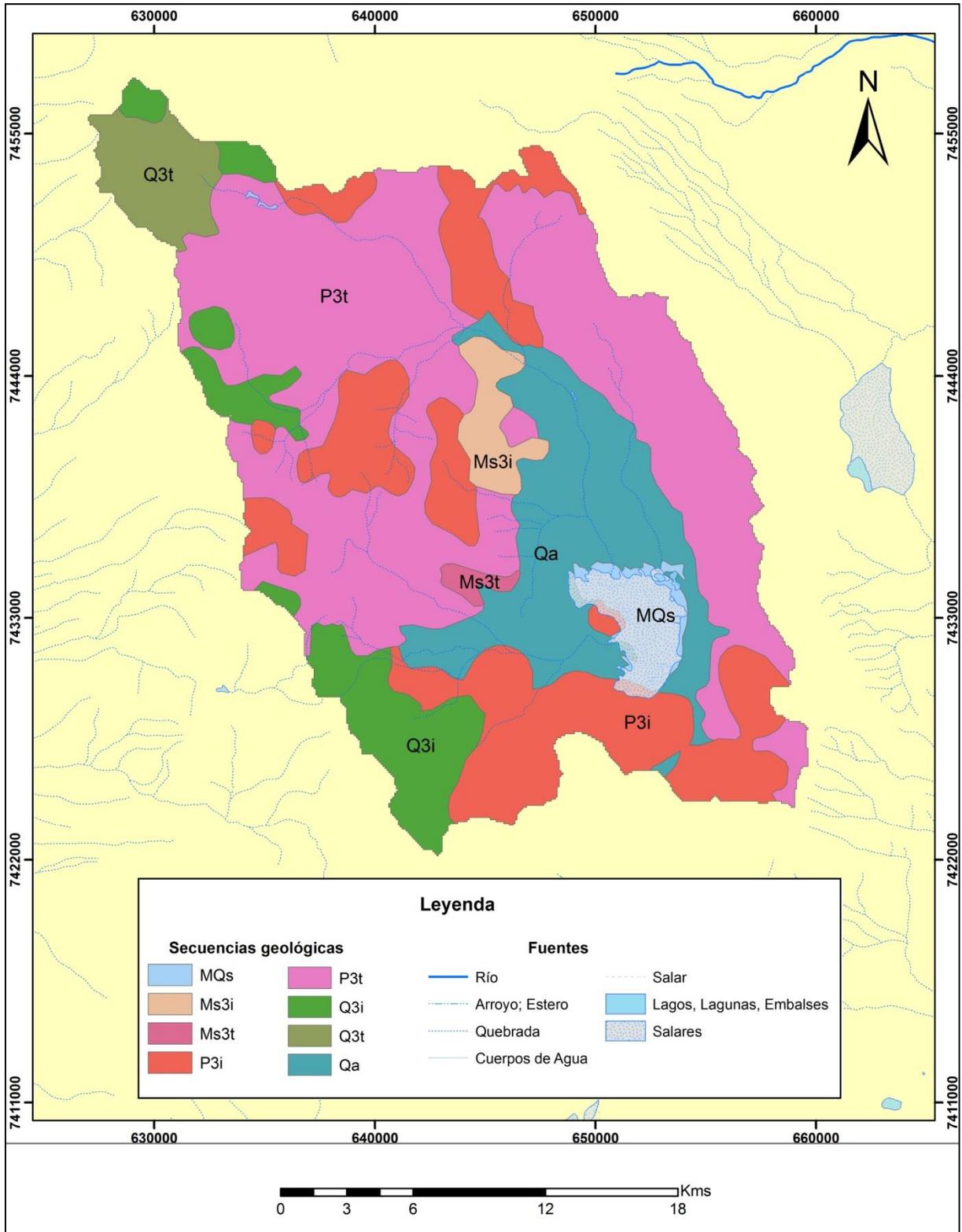
Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.

Q3t: Cuaternario. Depósitos de flujo piroclástico, localmente soldados.

Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.



Mapa 6 Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Pujsa





6.2.4.3 Cuenca Laguna Helada

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 7, las secuencias geológicas presentes en esta cuenca son las siguientes:

Ms3i: Mioceno superior. Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

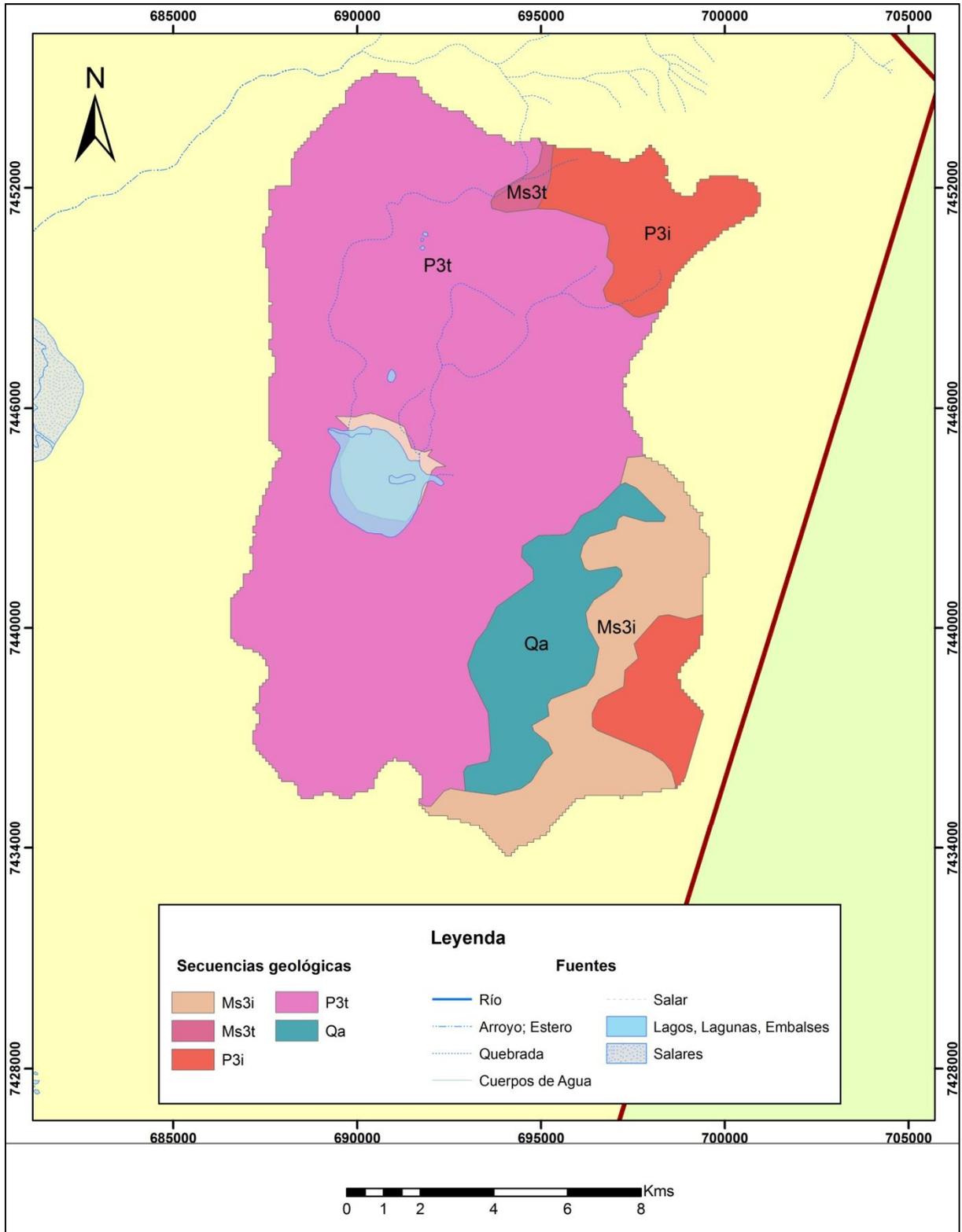
P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

Ms3t: Mioceno Superior. Ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos piroclásticos asociados a estratovolcanes.

Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.



Mapa 7 Secuencias geológicas existentes en la cuenca Laguna Helada





6.2.4.4 Cuenca del salar de Loyoques o Quisquiró

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 8, las secuencias geológicas presentes en esta cuenca son las siguientes:

DC1: Devónico-Carbonífero. Secuencias sedimentarias marinas, en parte transicionales: areniscas, cuarzo-feldespáticas, lutitas micáceas, conglomerados.

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas.

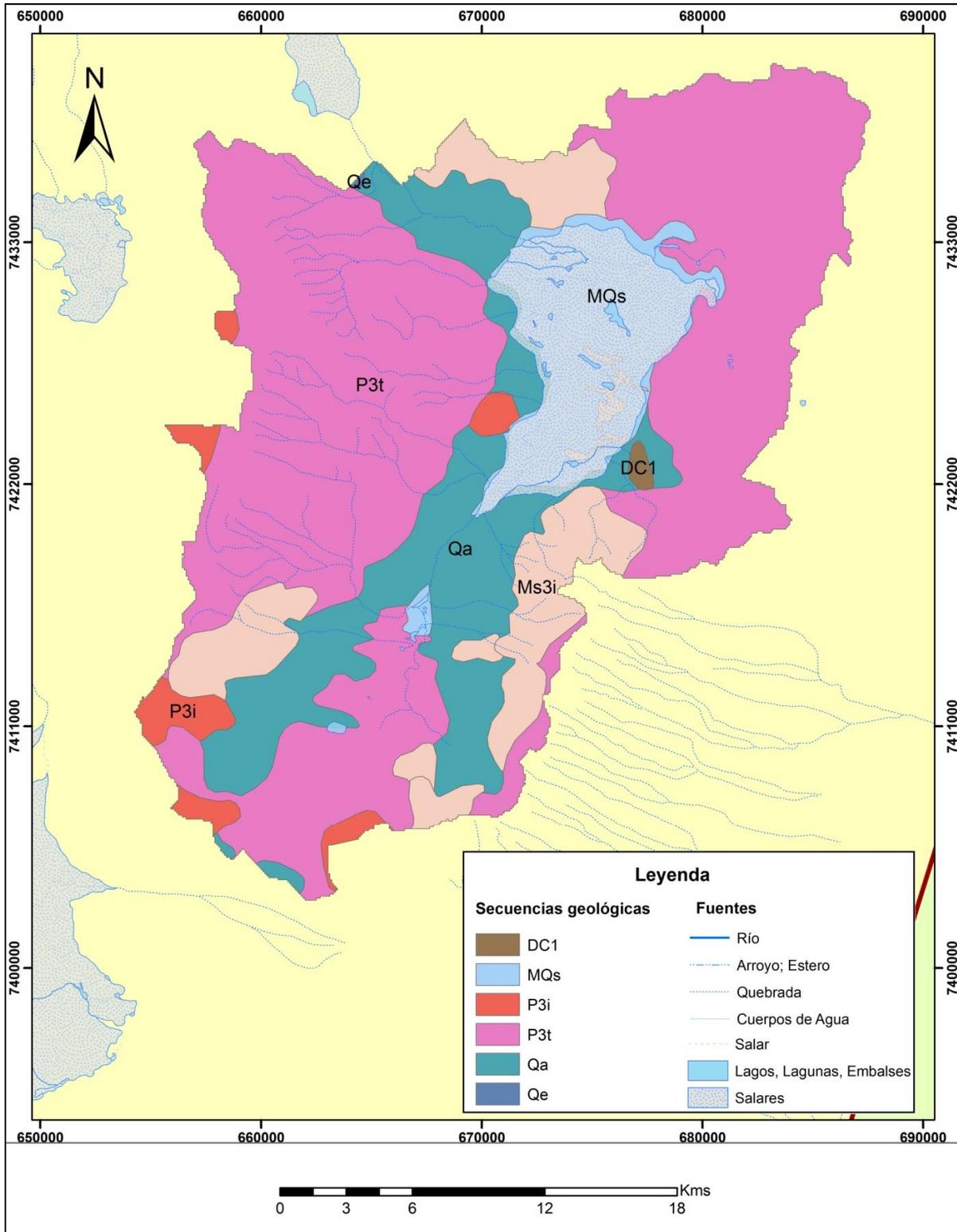
P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.

Qe: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes activos e inactivos.



Mapa 8 Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Loyoques o Quisquiró





6.2.4.5 Cuenca del salar de Aguas Calientes 2

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 9, las secuencias geológicas presentes en esta cuenca son las siguientes:

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

Ms3i: Mioceno superior. Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.

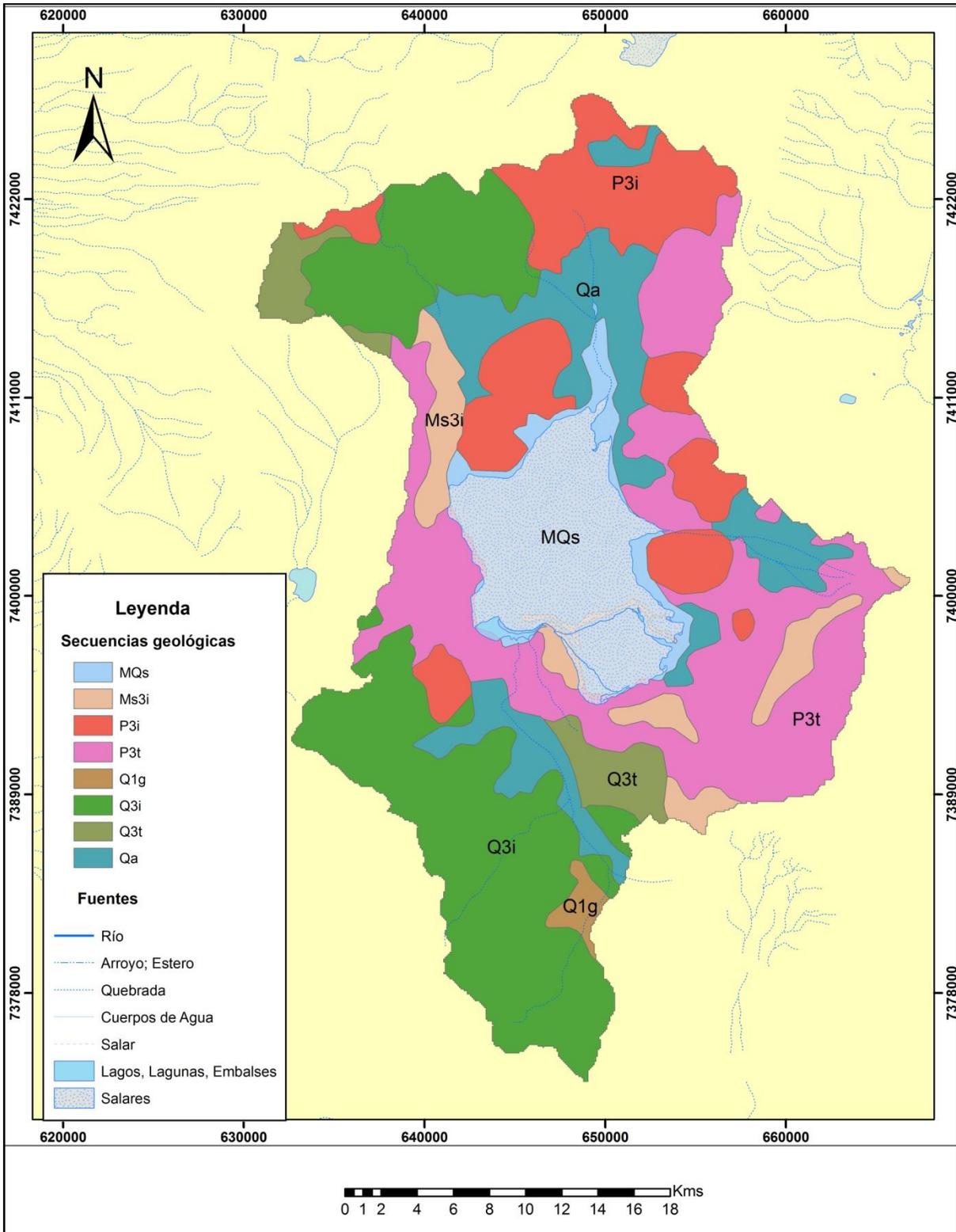
Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.

Q1g: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glaciolacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos.

Q3t: Cuaternario. Depósitos de flujo piroclástico, localmente soldados.



Mapa 9 **Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 2**





6.2.4.6 Cuenca Laguna Lejía

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 10, las secuencias geológicas existentes en esta cuenca son las siguientes:

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfates, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

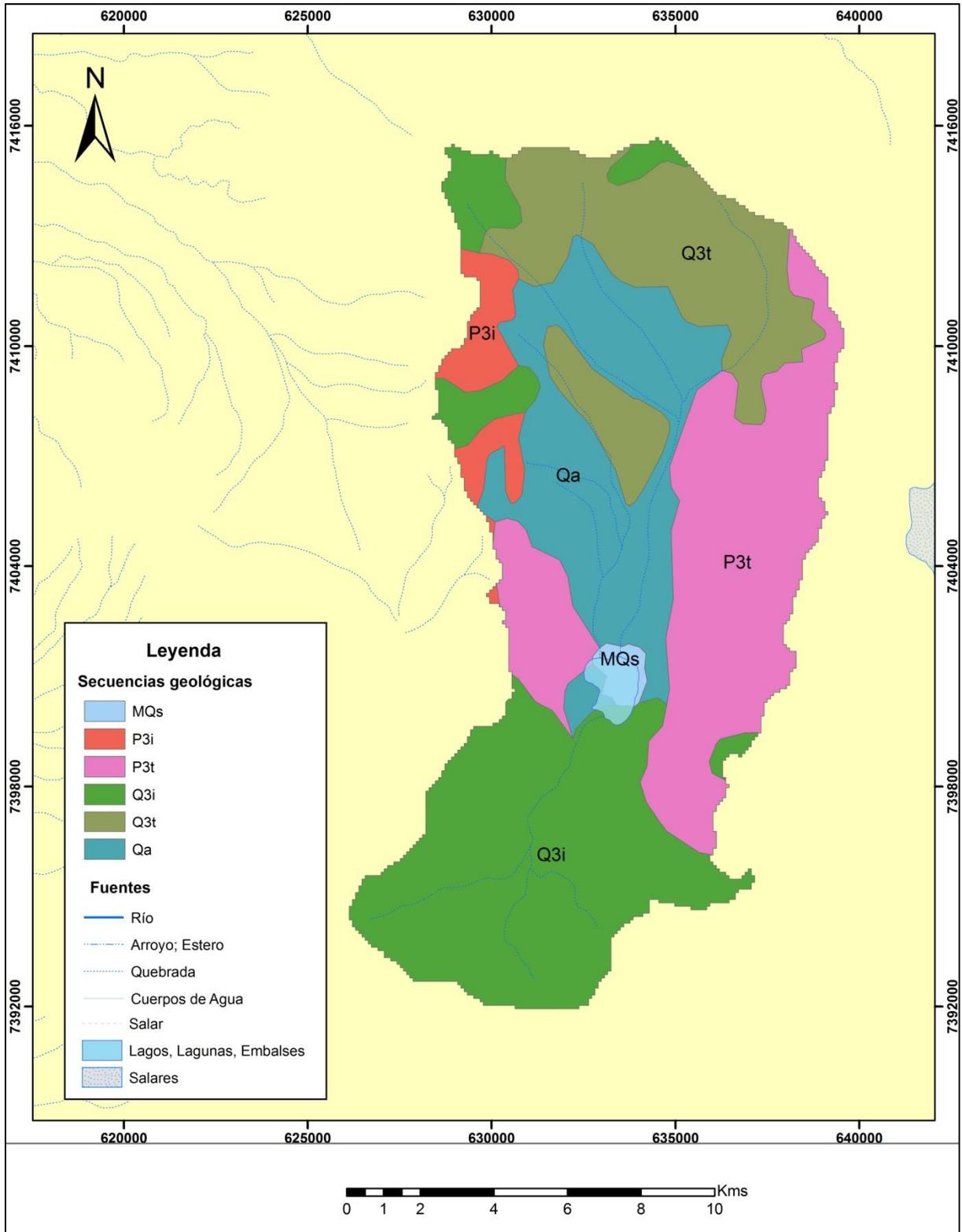
Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.

Q3t: Cuaternario. Depósitos de flujo piroclástico, localmente soldados.

Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.



Mapa 10 Secuencias geológicas existentes en la cuenca Laguna Lejía





6.2.4.7 Cuenca Laguna Miscanti

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 11, las secuencias geológicas presentes en esta cuenca son las siguientes:

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfates, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.

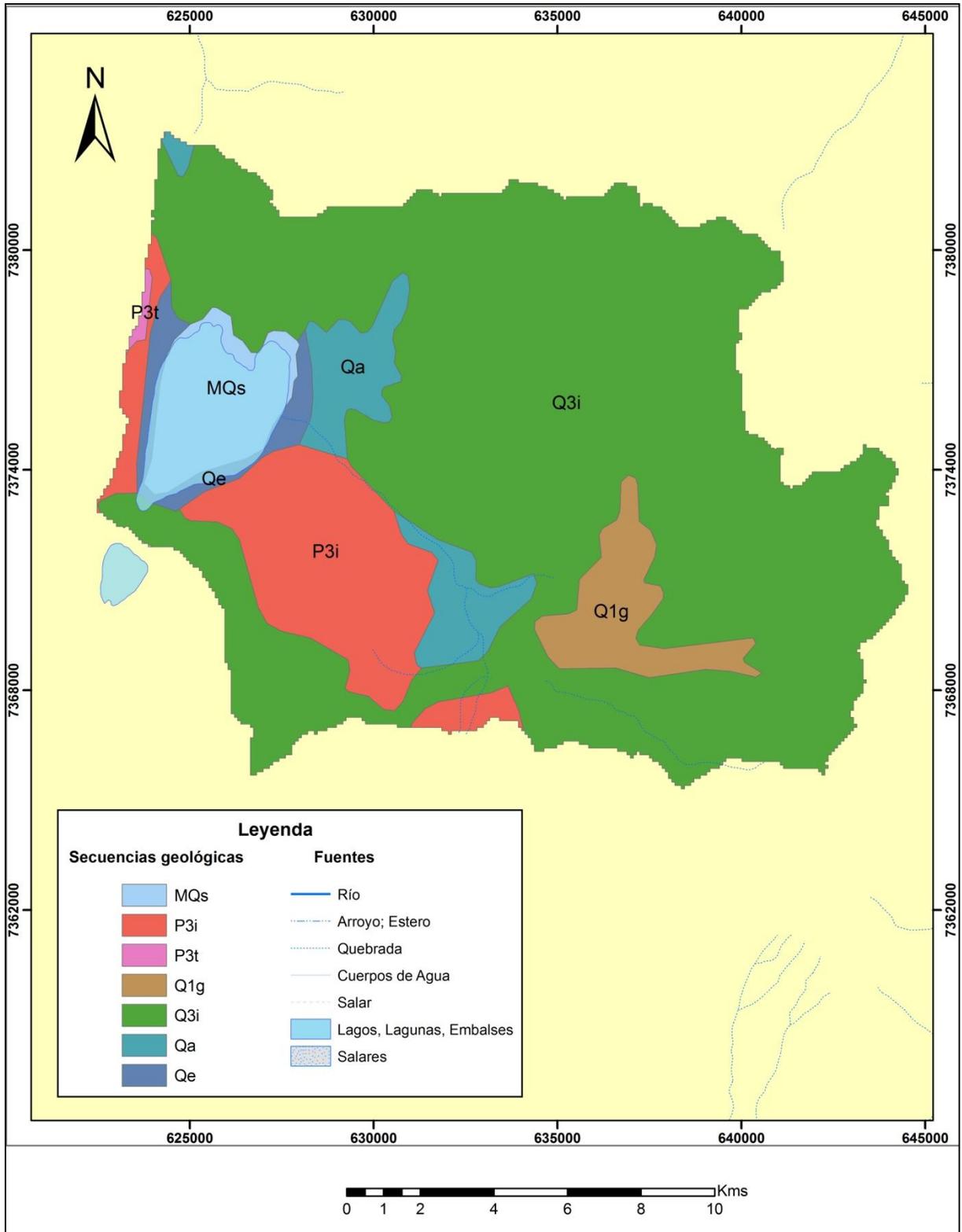
Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.

Qe: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes activos e inactivos.

Q1g: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glaciolacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos.



Mapa 11 Secuencias geológicas existentes en la cuenca Laguna Miscanti





6.2.4.8 Cuenca del salar del Laco

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 12, las secuencias geológicas presentes en esta cuenca son las siguientes:

M3i: Mioceno Inferior-Medio. Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesito-basálticas a dacíticas.

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias Sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

Ms3i: Mioceno superior. Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas.

P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

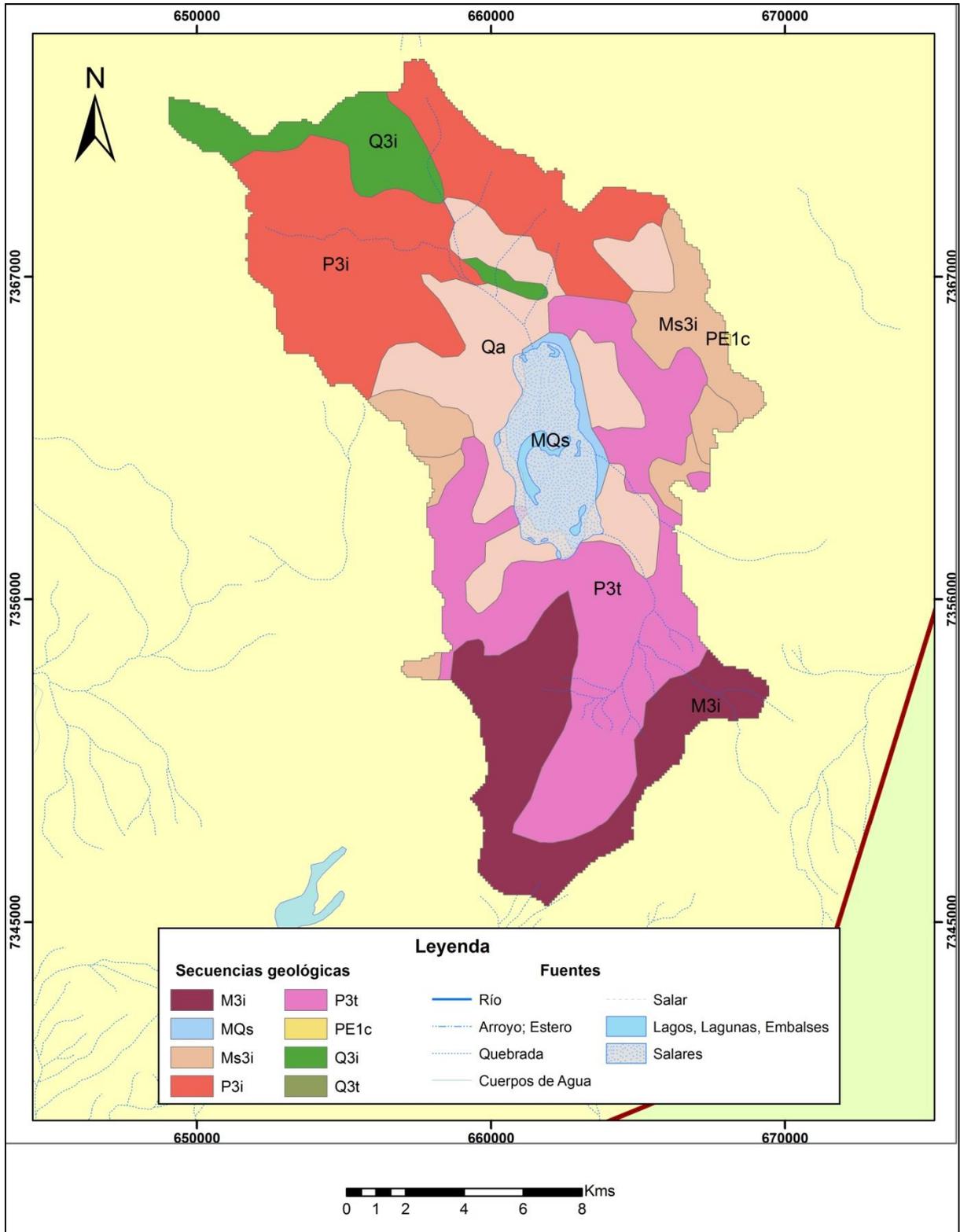
PE1c: Paleoceno-Eoceno Inferior. Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales o lacustres: areniscas, conglomerados, lutitas, niveles evaporíticos y carbonosos.

Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.

Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.



Mapa 12 Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar del Laco





6.2.4.9 Cuenca Laguna Miñiques

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 13, las secuencias geológicas presentes en esta cuenca son las siguientes:

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfates, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

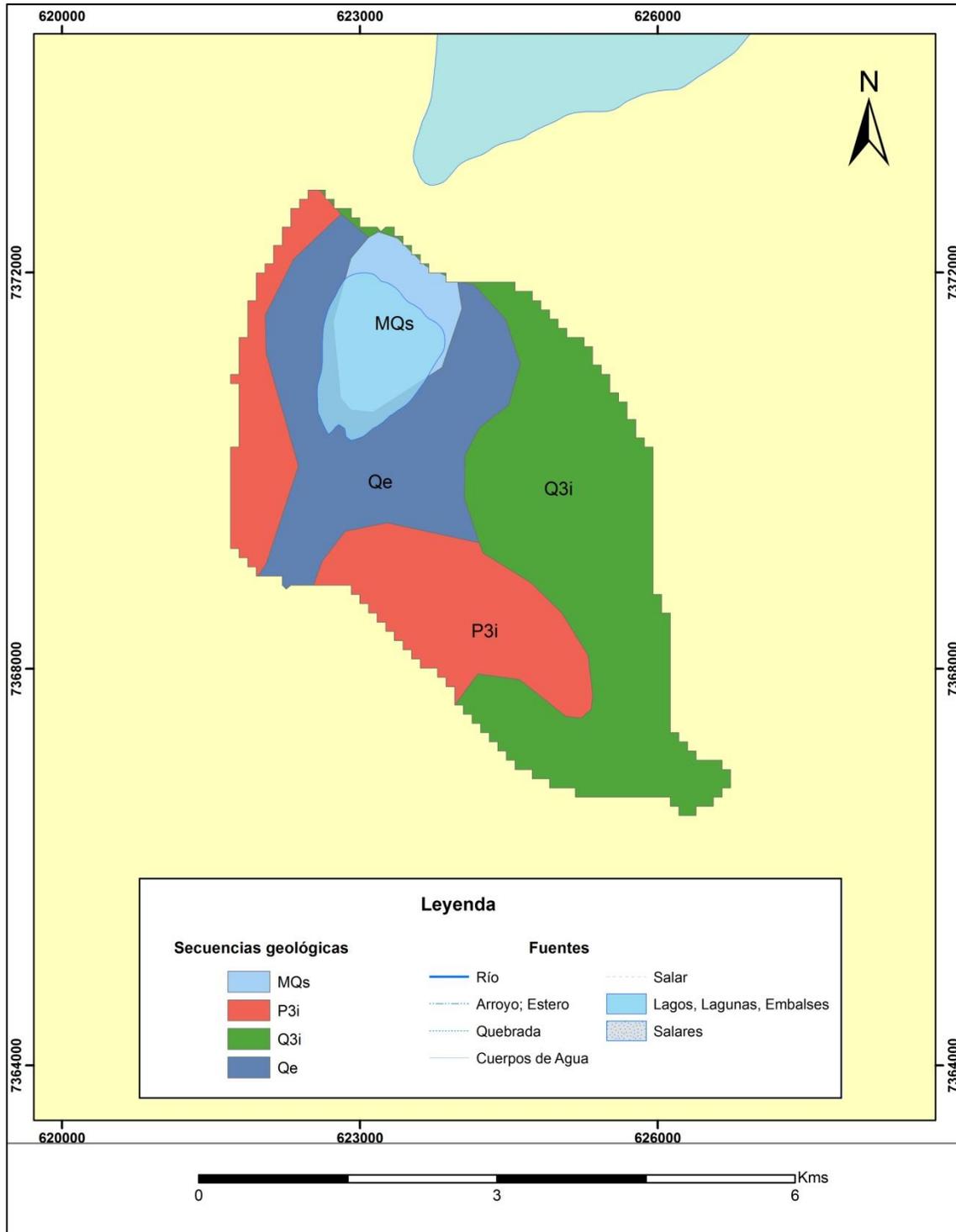
P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.

Qe: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes activos e inactivos.



Mapa 13 **Secuencias geológicas existentes en la cuenca Laguna Miñiques**





6.2.4.10 Cuenca del salar de Aguas Calientes 3 o Talar

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 14, las secuencias geológicas existentes en esta cuenca son las siguientes:

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfates, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

Ms3i: Mioceno superior. Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

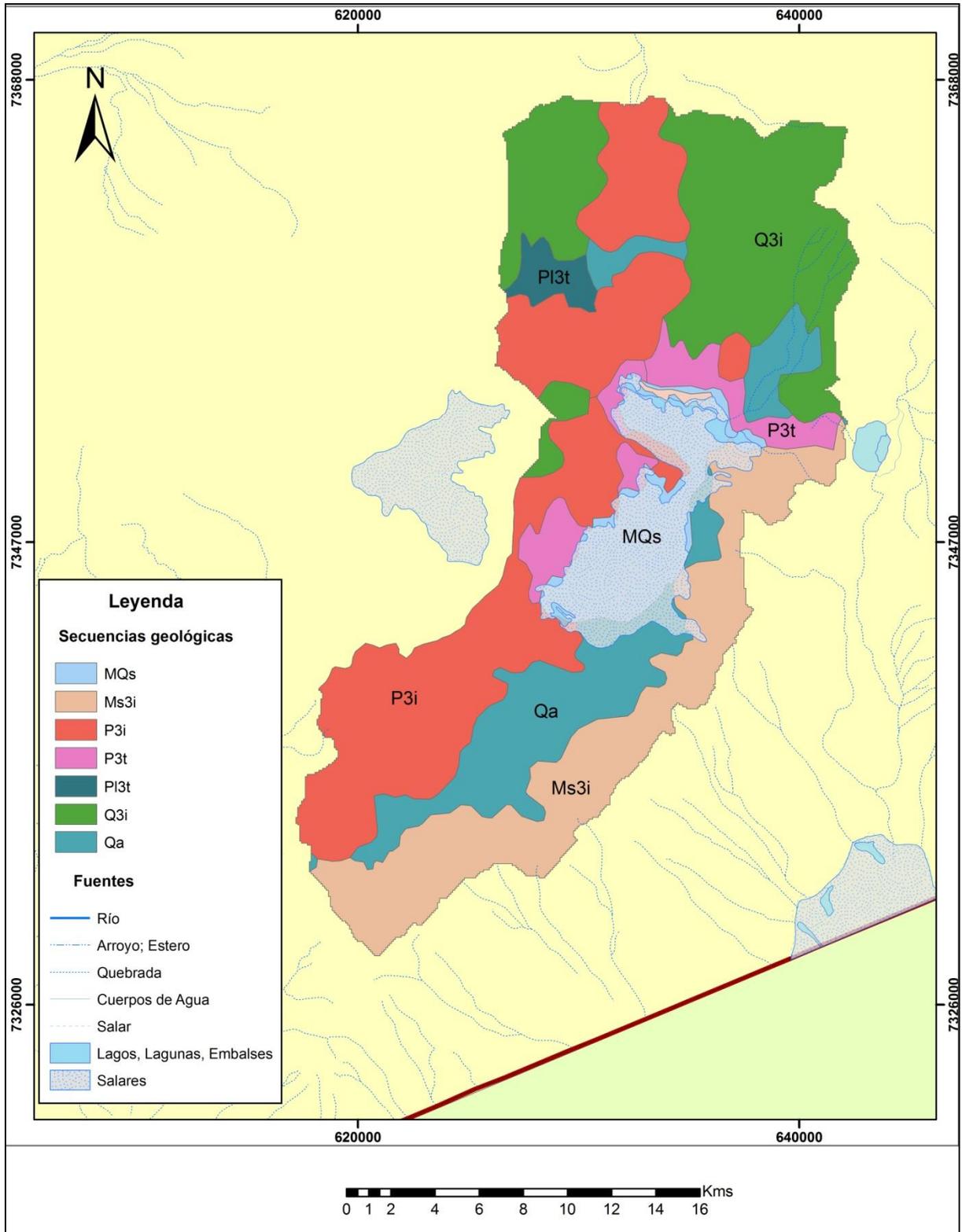
Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.

Qa: Pleistoceno-Holoceno. Secuencias sedimentarias. Depósitos aluviales, coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. Abanicos aluviales.

Pl3t: Plioceno-Pleistoceno. Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.



Mapa 14 **Secuencias geológicas existentes en el salar de Aguas Calientes 3 o Talar**





6.2.4.11 Cuenca del salar de Capur

De acuerdo a lo que se observa en el Mapa 15, las secuencias geológicas existentes en esta cuenca son las siguientes:

MQs: Mioceno-Cuaternario. Secuencias sedimentarias. Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos.

P3i: Plioceno. Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesito-basálticas-

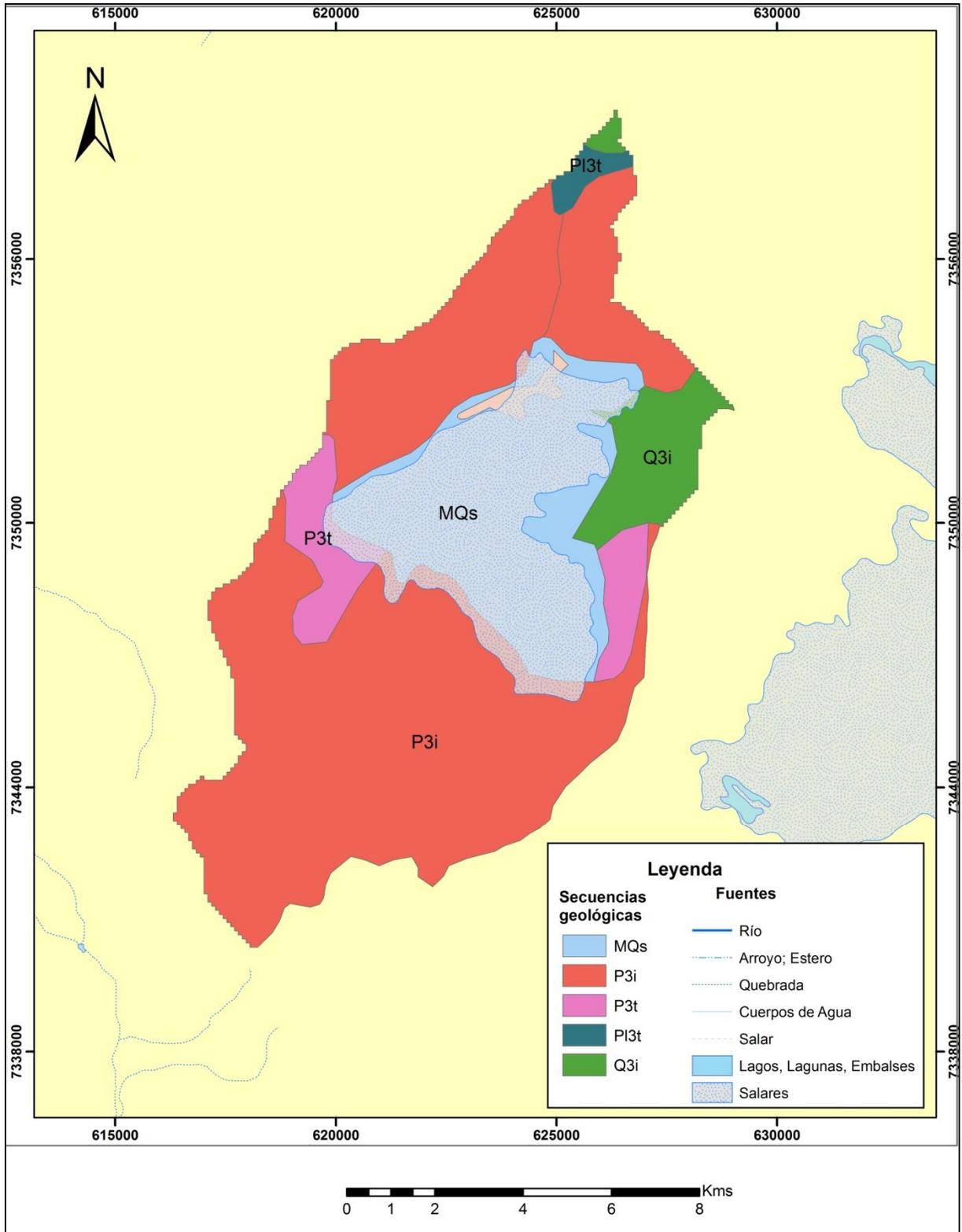
P3t: Plioceno. Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados.

PI3t: Plioceno-Pleistoceno. Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.

Q3i: Cuaternario. Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesito-basálticos a dacíticos: principalmente calcoalcalinos.



Mapa 15 Secuencias geológicas existentes en la cuenca del salar de Capur





6.3 ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS

El sustrato geológico está constituido principalmente por riolitas y andesitas fisuradas y conos aluviales permeables, lo cual facilita la infiltración de las precipitaciones. Ello se traduce en una ausencia casi total de cursos de agua superficiales perennes que alcancen hasta los salares. Una excepción la constituye el río Zapaleri con 600 l/seg en la hoya del Salar de Tara.

Los conos aluviales de material detrítico, están formados a expensas de riolitas y andesitas y son muy permeables. Por lo general el escurrimiento superficial se organiza a través de pequeños cursos que se desarrollan en rocas impermeables y cuyo caudal se infiltra por las fracturas de las rocas y en los materiales sedimentarios clásticos, originándose un acuífero freático en la periferia y en los salares mismos.

Además en algunos salares, está comprobada la existencia de inter-estratificaciones de materiales riolíticos y sedimentarios clásticos permeables que dan origen a excelentes acuíferos de características artesianas.

En el sector norte del salar de Atacama, uno de estos acuíferos descarga por difusión a través de la capa confinante recargando el acuífero freático, originando en este sector un gran número de lagunas de variados tamaños, cuyo mecanismo de formación correspondería al de disolución y otros fenómenos asociados.

El único mecanismo de descarga que existe en estas cuencas es la evaporación, por lo que se originan salares de agradación, en cuyas márgenes se intercalan paulatinamente acumulaciones sedimentarias clásticas con estratos de evaporitas. La evaporación en los salares es muy alta ya que se trata de acuíferos saturados que se pueden considerar como superficies de agua libre sometidas prácticamente a un 100% de días con sol. Algunos salares son de color predominante pardo lo que aumenta la absorción de calor.

Esta fuerte evaporación produce un gradiente hidráulico que moviliza las aguas subterráneas desde las periferias con direcciones convergentes hacia los centros de los salares, enriqueciéndose progresivamente en contenidos salinos, por lo cual los salares están rodeados por una aureola de aguas de menos contenido salino provenientes del aporte lateral. Estas aguas disuelven sales anteriormente precipitadas y a continuación se evaporan aumentando el contenido de sólidos disueltos.

Los materiales sedimentarios que rellenan las partes bajas de estas cuencas endorreicas están formados por sales puras, mezcla de sales con sedimentos finos, y sedimentos finos. Las sales predominantes son sulfatos de calcio, boratos de sodio, cloruros de sodio y marginalmente carbonatos de calcio. Los sedimentos finos corresponden a limos y arcillas, las cuales no han sido aun mineralógicamente determinadas.

Todos los materiales anteriormente citados más las características hidrodinámicas de los salares, permiten la acción de muchos de los mecanismos que originan subsidencias de terrenos. En estos salares concurren en forma individual o combinada los siguientes mecanismos:

- Disminución del contenido salino de los suelos y cuerpos salinos por disolución.
- Dispersión de arcillas por sales sódicas.
- Disociación y/o reemplazo de sales existentes en los suelos



- Desplazamientos hidrodinámicos de partículas finas de los suelos por gradiente hidráulica en terrenos de permeabilidad y granulometría adecuada.

Por otra parte, todos los mecanismos están ampliamente favorecidos por un alto grado geotérmico generalizado en el Altiplano, producto del volcanismo actual, el cual se refleja en flujos de lavas muy recientes, zonas de géiseres, fumarolas, vertientes termales, extensos depósitos de azufre exalativo, etc.

Es así como en algunos salares se han encontrado hundimientos naturales de terreno, los cuales se han interpretado ligados a la circulación de aguas subterráneas, las que se estima, han podido mantener un poder disolvente que ha favorecido una erosión mecánica subsuperficial.

El análisis geológico estructural de las cuencas cerradas del Altiplano, y las características químicas de las sales y aguas permiten interpretar el origen de salares y lagunas en base a un mecanismo hidrogeológico. Este mecanismo nos permite distinguir 2 tipos de cuencas:

- Cuencas hidrogeológicamente cerradas, es decir que no reciben ni entregan aporte a cuencas vecinas tanto en forma superficial como subterránea por lo tanto el único mecanismo de descarga de agua es la evaporación.
- Cuencas hidrogeológicamente abiertas, que son aquellas que a pesar de ser superficialmente cerradas tienen intercomunicación subterránea con una o más cuencas circundantes. El agua que ellas reciben tiene las siguientes posibilidades de descarga: evaporación y circulación subterránea hacia cuencas vecinas, a través de inter-estratificaciones de sedimentos permeables en riolitas, contactos entre riolitas y andesitas, contacto entre coladas de andesitas y fallas o fracturas. Dependiendo del mecanismo de descarga predominante se originan diferentes tipos de depósitos.

La concentración de sólidos disueltos en las lagunas están controladas por la relación entre evaporación y circulación subterránea. Se tendrán concentraciones mayores de sólidos disueltos cuando prima la evaporación. Dichas concentraciones serán siempre deficientes en elementos de alta solubilidad. En el caso de que los valores de circulación subterránea sean muy altos en relación a la evaporación se tendría en un caso extremo sólo acumulación de sedimentos clásticos.

Las lagunas Miscanti y Miñiques separadas por coladas de andesitas y con cuencas de superficie muy similares, que en conjunto tienen aproximadamente 400 km², presentan un contenido de sólidos disueltos de 5 y 10 gr/l respectivamente, lo que indica que existe un drenaje subsuperficial hacia laguna Miñiques, de agua previamente infiltrada. La laguna Lejía, con una cuenca hidrográfica de solo 329 km², tiene un contenido de sólidos disueltos de 64 gr/l, lo que indica que podría estar recibiendo aporte subterráneo de aguas previamente infiltrada desde otra cuenca, afectada por descargas subterráneas.

En las tres lagunas citadas anteriormente debe existir una recarga y descarga subterránea que impide que el agua adquiera un grado de saturación tal, como para precipitar sales.

Los salares constituyen generalmente acuíferos saturados con recarga subterránea continua, por lo que se puede considerar que las tasas de evaporación real y potencial son muy similares.



En cuencas hidrogeológicamente cerradas, donde el único mecanismo de descarga del agua es la evaporación, se forman salares. La evaporita puede estar constituida hasta por las sales más solubles.

En las cuencas hidrogeológicamente abiertas la descarga de agua, además de producirse por evaporación, lo hace por escurrimiento subterráneo hacia cuencas vecinas a través de los materiales permeables. Dependiendo de la relación entre recarga y descarga se podrán tener lagunas, o lagunas con depositaciones de evaporitas o simplemente acumulación de sedimentos clásticos. Las evaporitas en estas cuencas son generalmente formadas por elementos menos solubles.

6.4 ANTECEDENTES GEOMORFOLÓGICOS

La unidad morfológica "Altiplano" ha sido sometida a una fuerte acción tectónica y a extensa actividad volcánica originando, por si solos o por acción combinada, numerosas cuencas cerradas, donde por efectos hidrometeorológicos se han acumulado sedimentos clásticos, evaporitas y agua que constituye salares y lagunas.

Morfológicamente, la aridez se ha mantenido desde el Eoceno Superior²¹ al Terciario, aunque hubo períodos húmedos desde el Oligoceno al Mioceno Inferior, los que han sido necesarios para producir algunas de las unidades sedimentarias conocidas.

La erosión disminuyó su intensidad en el Mioceno Medio, lo cual tuvo una influencia fundamental en la preservación de los grandes yacimientos de minerales y sales, los que en un ambiente más húmedo, sin duda habrían sido lixiviados.

En el Cuaternario, procesos glaciales y pluviales con diferente intensidad vinieron a remodelar el paisaje producto de los procesos de erosión y sedimentación tanto de formas de origen glacial (morrenas), fluvio-glacial y fluvial, apreciándose su impronta claramente en el paisaje actual.

Producto de estos procesos, tanto morfoestructurales como morfoclimáticos, se generaron una serie de unidades geomorfológicas, las que al oriente de la depresión del salar de Atacama presentan las siguientes características:

6.4.1 Formas volcánicas terciarias, sector del Plateau Altiplánico

Este sector se encuentra localizado al Este del salar de Atacama, sobre los 4.000 msnm entre los 67° 50' W y el límite internacional.

Se encuentra formado por pequeños afloramientos de rocas paleozoicas como filitas, pizarras, cuarcitas y areniscas, los cuales están ahogados por rocas volcánicas terciarias (ignimbritas riolíticas), las que conforman amplias mesetas limitadas por los cordones volcánicos pleistocénicos y afectados por fallas con orientación N-S predominante.

²¹ Mortimer, 1980.



La irrupción de la actividad volcánica del tipo central y los edificios volcánicos por ella constituidos, ha separado estas mesetas en segmentos menores, los que han adquirido condiciones de depresiones relativas de carácter endorreico.

6.4.2 Modelado de los Plateau volcánicos terciarios

La morfología que presentan estos plateau es el resultado de la erosión de las aguas corrientes sobre amplias superficies estructurales, las que han sido objeto de desnivelaciones sectoriales por la tectónica.

Es posible distinguir tres diferentes morfologías, en relación al grado de erosión y tectónica, motivo por el cual se puede determinar más de un período de actividad dentro del volcanismo fisural.

- Las volcanitas terciarias más antiguas, las cuales están en los cordones de cerros de La Pacana, los que se extienden al NW del salar de Loyoques o Quisquiró, están fuertemente disectados por quebradas, presentan numerosos escarpes y líneas de cumbres agudas.
- Los planos estructurales inclinados, los que han pasado a constituir superficies de erosión. Presentan un borde superior muy abrupto de origen tectónico, desde el cual se ha organizado un drenaje de tipo rill-wash; producto de lo cual presentan una superficie densamente disectada y recorrida por una red de pequeñas gargantas de costados escarpados y fondo pedregoso. Los planos pluviuales, que han quedado entre estas agudas disecciones poseen una cubierta de derrubios y clastos originados por la fracturación in situ de la superficie rocosa, en razón de las amplias variaciones térmicas y la presencia de humedad (termoclastia y gelifración).
- Extensas planicies ignimbríticas, prácticamente horizontales, las que presentan una topografía de suaves ondulaciones y un denso manto de derrubios angulosos y arenas, originados por el mismo proceso anterior. Esta superficie aparece quebrada y con grandes lajas desprendidas de ella misma en algunas áreas (como es posible de apreciar al sur del salar Aguas Calientes). Los sectores estructurales bajos condujeron a la concentración de las aguas, provistas de abundantes sales en solución, las que dieron origen a pequeñas cuencas mediante la fragmentación y transporte del manto superior de riolita. Posteriormente en las partes más bajas se acumularon las sales que han llegado a constituir grandes salares.

6.4.3 Formas derivadas del volcanismo central Cuaternario

Corresponden a un gran número de edificios volcánicos de forma predominantemente cónica, pero que producto de su cercanía intersectan sus relieves por la base. A esta continuidad geomorfológica contribuyen las coladas de lava y flujos laháricos como la presencia de depósitos morrénicos generados por los glaciares que por su magnitud desarrollaron lenguas de hielo que descendieron por sus vertientes. Producto de lo señalado se configuran una serie de cordones montañosos entre los cuales se generaron depresiones cerradas y, consecuentemente, sistemas hidrológicos endorreicos.

Esta unidad orográfica es morfológicamente simple a pesar de ser muy extensa, ya que corresponde a los resultados morfológicos derivados de un mismo tipo de proceso que es el volcanismo central, pudiéndose distinguir los conos volcánicos mayores, con una serie de conos parásitos en sus flancos, domos, coladas y campos de lavas, algunas corrientes laháricas y conos de deyección de material volcánico que conforman el piedmont. Corresponden a la cadena de volcanes pleistocénicos que recorren el límite oriental de la región.



Las cumbres de estos centros volcánicos presentan cráteres bastante destruidos, por lo que es común encontrar agujas o necks.

Estos relieves volcánicos aparecen afectados por fallas cuaternarias, las que han dislocado las coladas de lava, como el piedmont de algunos de los centros extrusivos.

Además, estos relieves constituyen el principal centro de acumulación y reserva de agua, pudiéndose observar en sus cumbres superiores a 5.000 metros una gran cantidad de glaciares de tipo irradiante y estrella, de acuerdo a la clasificación de Cailleux y otros pocos de tipo alpino así como campos de penitentes.

6.4.4 Salares y lagunas

Dado lo anteriormente señalado, la zona geográfica donde se realiza esta investigación se caracteriza por la presencia de muchos salares y lagunas, contabilizándose cerca de treinta de todas formas y tamaños, de los cuales aproximadamente el 50% corresponde a lagunas y lagunitas y el otro 50% a salares propiamente tales.

Entre las principales lagunas se encuentran las lagunas del Límite, Ojos del río Salado, Lejía, Miscanti, Miñiques y Tuyajito.

Los salares comparten su superficie entre un 60% de costras salinas y 40% de lagunas salobres. Por lo general, es posible apreciar una diferencia muy pronunciada y un contacto claro entre las costras y el agua (exceptuando el salar Incahuasi que posee una superficie pareja de costrales muy húmedos).

Escapa a este esquema general el salar de Loyoques o Quisquiró que tiene costrales salinos puros en su borde oriental, así como algunas lagunillas.

Algunos salares en su parte central y occidental presentan una mezcla de arenas y sal, de aspecto barroso, con topografía débilmente ondulada. En las partes bajas de estos sectores las sales se encuentran más concentradas.

En otros sectores sobresalen algunos afloramientos de roca, los que están severamente fragmentados y representan una topografía abrupta y escarpada dentro de la planicie del salar. Corresponden a los escasos afloramientos de rocas paleozoicas que existen en el área.



CAPÍTULO 7 CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS CONSIDERADAS

Las cuencas hidrográficas del presente estudio corresponden a aquellas que se encuentran al E de la cuenca del salar de Atacama, en el límite oriental de la segunda región de Chile, las que en su mayoría poseen características endorreicas.

Un número importante de este grupo tiene como nivel de base salares y lagunas, otras presentan un aspecto uniforme, sin alumbramientos superficiales de agua.

La delimitación de dichas cuencas se realizó tomando como referencia los estudios previos hechos en la zona, donde se considera como límite oeste de las cuencas a las altas cumbres de la cordillera andina occidental, que separan la zona de estudio de la cordillera de Domeyko y la depresión Preandina.

Todas estas cuencas se encuentran al oriente de la cordillera de Los Andes, en un ámbito biogeográfico conocido como Puna de Atacama²².

7.1 ANTECEDENTES HIDROGRÁFICOS

Según la Dirección General de Aguas, nuestro país se encuentra dividido en tres grandes sistemas hidrográficos, los cuales son los siguientes:

Pacífico Seco:	Entre el extremo Norte y los 31° latitud Sur.
Chile Central:	Entre los 31° y los 38° latitud Sur.
Pacífico Sur:	Desde los 38° latitud Sur hasta el extremo Sur del país.

El sistema hidrográfico donde se encuentra el área de estudio corresponde al Pacífico Seco, el que se caracteriza por la presencia de ríos de escurrimiento esporádico, y régimen pluvio-nival con caudal máximo de verano. Este sistema hidrográfico se encuentra limitado por la frontera con Perú por el Norte (18° latitud Sur), abarcando hasta la cuenca del Limarí por el Sur (31° latitud Sur), entre la divisoria de aguas en la cordillera de Los Andes por el este y el océano Pacífico por el oeste. Comprende las regiones Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, con un área aproximada de 157.353 km².

Dentro de estos sistemas, los de origen altiplánico corresponden a los siguientes, observables en la Tabla 7:

²² Niemeyer & Cereceda, 1984.



Tabla 7 Cuencas hidrográficas del sistema Pacífico Seco y origen altiplánico

Nombre	Región	Superficie	Precipitación		Escorrentía superficial	
		(km ²)	(m ³ /s)	(mm/año)	(m ³ /s)	(mm/año)
Loa	II	33.865	42,6	39,7	0,59	0,55
Puna de Atacama	II	5.050	30,7	192	0	0
Salar de Atacama	II	14.767	33,1	70,7	0	0
Cuencas endorreicas	II	68.877	38,3	17,5	0,04	0,02

Fuente: DGA, "Balance Hídrico de Chile". 1987.

Esta zona se caracteriza por la presencia de cursos de agua que, en general presentan caudales poco abundantes. Sin embargo, por efecto de las lluvias convectivas que ocurren en el Altiplano adquieren en algunos veranos un carácter aluvional. Varios de éstos drenan hacia cuencas endorreicas las cuales tienen por nivel de base a grandes salares. La actividad tectónica y volcánica fueron las encargadas de modelar un relieve el cual ha permitido la existencia de este tipo de cuencas sin desagüe superficial o endorreicas.

En el sector altiplánico es posible distinguir distintos grupos de sistemas hidrográficos²³:

1. Grupo constituido por cuencas cerradas andinas y pre-andinas (cordillera de Los Andes y cordillera central), cuyo nivel de base hidrológico es un salar o una laguna. Hidrológicamente pueden considerarse como pozas de evaporación para las aguas superficiales y subterráneas que fluyen en la cuenca.
2. Cuencas que nacen en el sector andino-altiplánico pero debido a las pocas precipitaciones, muy pocas veces logran llegar las aguas al mar, ya que desaparecen al sumirse y alimentan las napas subterráneas o por pérdidas por evaporación. Aparecen como quebradas de cuencas generalmente secas, pero que pueden activarse en verano.
3. Cuencas cuyos ríos nacen en la cordillera de Los Andes y son suficientemente alimentadas para poder llegar al océano. Presentan escorrentía permanente y corresponden a los ríos de los valles transversales del norte Grande, como el San José, Lluta y el Loa.

El régimen hidrológico está fuertemente influenciado por las precipitaciones estivales, parte de las cuales se deposita en forma de nieve en las cumbres más elevadas, permitiendo la continuidad del régimen hidrológico, lo que se traduce en la presencia de algunos cursos de agua permanentes.

Dado el origen amazónico de las lluvias de verano, los caudales específicos (caudal por unidad de área) de los ríos altiplánicos y andinos decrecen de norte a sur.

En el área de estudio se trazaron los límites de 11 cuencas hidrográficas, con áreas que van desde 17 km² hasta 975 km² (ver Tabla 8). Estas se encuentran entre los 22° 45' y los 24° 30' de latitud sur, zona que corresponde al bloque centro-este de las cuencas de la región. Dos bloques más se desarrollan en esta

²³ Fuenzalida en Klohn, 1972.



región, uno en el norte, separados del centro por la parte alta del río Loa, y otro en el sur, separados del centro por parte de las cuencas del SE del salar de Atacama y por el salar de Punta Negra.

Algunas de las cuencas más importantes se encuentran en el bloque central, donde destacan por su tamaño las cuencas de los salares de Aguas Calientes 2 (975 km²), Pujsa (633 km²) y Loyoques (749 km²).

A continuación se presenta una descripción de las cuencas consideradas en este estudio. Los porcentajes del área de los salares respecto al área total de la cuenca se obtuvo usando la cartografía IGM escala 1:50.000, imágenes satelitales georeferenciadas y cobertura de cuencas proporcionada por la DGA.



7.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS CUENCAS ENDORREICAS EN ESTUDIO

7.2.1 Cuenca del salar de Aguas Calientes 1

Se encuentra al E del salar de Pujsa. La cuenca está limitada por dos cadenas de cerros: el Cordón de Quilapana (cerros de Losloyo y Negro) por el E, que la separan de la cuenca del salar de Tara, y los cerros de La Pacana por el W, que la separan del salar de Pujsa. Por el norte tiene su límite en los cerros de Guayaques y el cerro Incahuasi. Las coordenadas del centro de esta cuenca son N 7.446.554 y E 659.604, y su superficie es de 263,4 km², el área del salar es de 15 km² lo que representa al 5,7% del total de la cuenca.

La alimentación superficial principal del salar es a través de las quebradas que descienden de las laderas del cerro Incahuasi (quebrada Peña Negra) por el norte y, por el este, la quebrada que corre entre el cerro Losloyo y la Pampa del Morado. Esta última forma importantes vegas en su desembocadura y alimenta la laguna de este extremo. La otra laguna destacable se encuentra al suroeste del área del salar.

Foto 1 Salar de Aguas Calientes 1





7.2.2 Cuenca del salar de Pujsa

Se ubica en el bloque centro-oriental de las cuencas cerradas de la región, siendo una de las de mayor superficie en esta zona, se encuentra completamente en territorio nacional. Limita al oriente con la cuenca del salar de Aguas Calientes 1 y al poniente con la cuenca del salar de Atacama. Su punto más alto es el cerro Pili con 6.046 msnm. cuyas coordenadas del centro son N 7.439.553 y E 644.344, y su superficie es de 633 km², el área del salar es de 18 km² lo que representa el 2,8% respecto al total de la cuenca.

El salar propiamente tal es de tipo "playa" y tiene algunas lagunas superficiales. En este salar existen antiguas islas de hielo que proveen aguas diluidas a las lagunas al derretirse²⁴. Su alimentación principal es por el norte, y está dada por la quebrada Quepiaco que recibe aporte de las quebradas Agua Amarga y Peña Blanca antes de llegar al salar. En el curso de esta quebrada se encuentran las vegas de Pujsa o de Quepiaco, cuando el curso principal tiene orientación oeste-este antes de tomar su orientación definitiva y encontrarse con la quebrada Agua Amarga. Otros manantiales difusos llegan al salar por el nororiente y suroriente. En el sur poniente de la hoya se encuentra un pequeño cuerpo de agua llamado laguna Hedionda o Helada, que también es parte del sistema hidrográfico.

Foto 2 Salar de Pujsa



²⁴ Hurlbert & Chang, 1984.



7.2.3 Cuenca de la Laguna Helada

La cuenca de Laguna Helada se encuentra en el bloque central altiplánico al NE del salar de Loyoques, y está flanqueada por el N y el W por el salar de Tara. Es la cuenca endorreica que se encuentra más al oriente en todo el norte del país. Su punto más alto es el Nevado de Poquis con 5.745 msnm y su litología es exclusivamente volcánica. Las coordenadas del centro son N 7.444.328 y E 693.137, y tiene una superficie de 209,9 km², la superficie de la laguna es de 5,8 km², lo que representa el 2,7% de la superficie total de la cuenca.

La pequeña laguna en el lado poniente de la cuenca recibe aportes de quebradas provenientes desde el norte. Existen otros afloramientos y pozas de menor importancia, que están dispersos en puntos altos de la cuenca, al norte y al este de la laguna.

Foto 3 Laguna Helada





7.2.4 Cuenca del salar de Loyoques o Quisquiró

También conocido como Quisquiró se encuentra al S del salar de Laguna Helada y del de Aguas Calientes 1, tiene una altura media de 4.430 msnm y su mayor elevación es el cerro Purifica con 5.285 msnm en su límite poniente. En algunos estudios se define en una sola unidad junto a la cuenca del salar de Aguas Calientes 1. Las coordenadas del centro son N 7.423.898 y E 669.756, y tiene una superficie de 748,6 km².

El sistema está compuesto por un salar de unos 80 km², lo que representa el 10,6% de la superficie total de la cuenca. Este salar contiene un gran número de lagunas en su interior y dos lagunas fuera de éste en la parte sur de la cuenca. Estas últimas son las lagunas Trinchera y Chivato Muerto, además de los ojos del río Salado, todas tienen relativamente poca superficie (menor a 50 ha). Estas lagunas son pequeñas depresiones con agua salada en las pampas que prolongan la cuenca del salar de Loyoques al sur (pampa del río Salado, pampa Trinchera y pampa Chivato Muerto) y se podrían considerar como subcuencas del salar de Loyoques.

Los principales aportes superficiales los recibe del río Salado en el S, que nace en las vegas Ojos del Salado, y del estero Loyoques por el N. Además hay aportes de tres quebradas por el poniente que son (de norte a sur) Quebrada de Agua Escondida, Quebrada de Tauna y Quebrada de Quisquiró.

Foto 4 Salar de Loyoques o Quisquiró





7.2.5 Cuenca del salar de Aguas Calientes 2

Esta cuenca se encuentra al S del Salar de Pujsa y al E de Laguna Lejía en el bloque central de las cuencas endorreicas de la región. Abarca una superficie de 975,1 km² y tiene una altura media de 4.562 msnm. Su punto más alto es el volcán Acamaranchi o cerro Pili ubicado en la línea del límite norte (6.046 msnm). Las coordenadas del centro son N 7.402.290 y E 647.936.

Al norte del salar se encuentra el aporte superficial más importante, el río Pili, que baja por la ladera del cerro del mismo nombre. Otros aportes se producen por el vértice NW del salar, paralelo al cordón Alto de Toro Blanco, y por el oriente (quebrada de Chamaca), al sur del cerro Chamaca o Chivato Muerto, que forma unas vegas poco menos importantes que las del río Pili antes de desembocar.

El salar es de tipo playa, su superficie es de 134 km² y representa casi un 13,7% del área de la cuenca con varias lagunas de extensión variable, siendo la más importante la que se encuentra al surponiente, alimentada por vertientes que surgen al pie del cerro Overo y que da vida a los bofedales aquí presentes.

Otras fuentes intermitentes desde el sur (pampa Loma Amarilla) también harían sus aportes en el período estival.

Foto 5 Salar Aguas Calientes 2





7.2.6 Cuenca de la Laguna Lejía

Limita con las cuencas del salar de Atacama al W y al S y la del salar Aguas Calientes 2 al E y al N. De esta última está separada por el cordón montañoso Alto de Toro Blanco. Las coordenadas del centro de esta cuenca son N 7.404.299 y E 633.303, y su superficie es de 196,8 km².

Su cota más elevada es el volcán Simbao o Aguas Calientes (5.924 msnm), en el límite norte de la cuenca, donde también se encuentra el volcán Lascar, activo.

La cuenca de drenaje posee una pequeña laguna de unos 2 km² (0,96% de la superficie total de la cuenca) que recibe aportes de quebradas que provienen principalmente del norte y del oeste.

Esta hoya tiene una forma elongada en dirección N-S. Presenta señales de erosión producidas por aportes de agua que proviene de la ladera E de los cerros que rodean la laguna (cordón alto de Toro Blanco).

Foto 6 Laguna Lejía





7.2.7 Cuenca de la Laguna Miscanti

Esta cuenca tiene una superficie de 267,7 km², sus coordenadas son N 7.373.898 y E 633.188, tiene como vecina por el W y el N a la cuenca del salar de Atacama. Al SW limita con la cuenca de la pequeña Laguna Miñiques y el salar de Aguas Calientes 3 o Talar. Algunos estudios definen ambas cuencas, Miscanti y Miñiques como una sola debido a que la primera se encuentra unos 10 metros más arriba que la segunda. Esta última es una laguna salada y se supone que las aguas drenarían subterráneamente por gravedad de una hacia otra, su superficie es de 13,4 km² lo que representa el 5% de la superficie total de la cuenca.

En la cuenca, la alimentación se hace sobre todo por descarga de napas subterráneas en la laguna, que provendrían de la zona de mayor captación de la cuenca, en el oriente.

Foto 7 Laguna Miscanti





7.2.8 Cuenca del salar del Laco

El salar del Laco se encuentra en el rincón SE del bloque central del Altiplano de la región de Antofagasta. Limita al E con la gran hoya del salar del Rincón, ubicado en Argentina y con área aportante desde Chile. Al poniente limita con las cuencas de Tuyajto (N), Pampa Colorada (centro) y Pampa las Tecas (S). Junto a la cuenca de la laguna Tuyajto tiene una forma parecida a un riñón.

La cuenca completa tiene una superficie de 207,8 km², sus coordenadas del centro son N 7.361.531 y E 660.895, y alcanza su cota máxima en los 5.852 msnm en su límite N (volcán Puntas Negras). El salar ubicado en el centro es de tipo playa con una laguna poco profunda y es alimentado por la quebrada del Hueso desde el NW y la quebrada de la Astilla por el W, su superficie es de 16,2 km² lo que representa el 7,7% de la superficie total de la cuenca.

Foto 8 Salar del Laco





7.2.9 Cuenca de la Laguna Miñiques

Esta cuenca, de coordenadas N 7.369.706 y E 624.038, y superficie de 17,7 km² limita en su borde occidental con la cuenca del salar de Atacama, separada de éste por el Cordón de Chuculaqui, una cadena angosta que corre de norte a sur en esta zona dividiendo a la cuenca de elevación intermedia del Altiplano. La superficie de la laguna es de 1,6 km², correspondiendo al 8,8% de la superficie total de la cuenca.

Hacia el S limita con la Pampa Varela, separada por un portal que parece ser un antiguo desagüe. Al NE la cuenca está limitada con la cuenca de la laguna Miscanti.

La cuenca de laguna Miñiques, Meñique o Menique, como ha sido llamada, es de las más pequeñas de las que se desarrollan en el Altiplano. Tiene una elevación máxima de 5.910 msnm en el cerro Miñiques y la alimentación a la laguna se hace sobre todo por descarga de napas subterráneas.

Foto 9 Laguna Miñiques





7.2.10 Cuenca del salar de Aguas Calientes 3 o Talar

La hoya del salar de Aguas Calientes 3 o de Talar, se encuentra al sur de la cuenca de la laguna Miscanti. Esta cuenca recibe ambos nombres debido al angostamiento del salar, donde la parte sur ha recibido el nombre de Talar (IGM). Esta cuenca tiene una superficie de 501,2 km² y las coordenadas del centro son N 7.349.050 y E 630.986.

La cuenca tiene una forma alargada de norte a sur, terminando con una leve inclinación hacia el oeste. Los mayores aportes de agua a la zona del salar y sus lagunas provienen del norte, de las quebradas intermitentes que bajan entre los cerros Miñiques y Tuyajto y por el sur de las laderas del cordón de Puruchare, que llegan a la pampa del mismo nombre. Las lagunas principales también se forman en los extremos norte y sur del salar.

La altura máxima, cuya característica también comparten las cuencas de la laguna Miñiques, Miscanti y Pampa Varela, se encuentra en el límite norte de la cuenca y es el cerro Miñiques con 5.910 msnm. El salar propiamente tal tiene un área de 46 km² (9 % de la cuenca), y presenta varias lagunas en su interior.

Foto 10 Salar de Aguas Calientes 3 o de Talar





7.2.11 Cuenca del salar de Capur

El salar de Capur se encuentra en el bloque central del Altiplano de la región, al W del salar Aguas Calientes 3 y al sur de Pampa Varela. Una parte de la cuenca también limita con el salar de Atacama, por el W. Las coordenadas del centro son N 7.348.931 y E 622.694. Posee una superficie de 121,8 km².

La forma de la cuenca es alargada de norte a sur, y su eje posee una leve inclinación de NNE a SSW. Los aportes al salar y las lagunas superficiales son de carácter subterráneo como en la mayoría de estos casos de cuencas cerradas, presentándose en forma de afloramientos pocos metros antes de caer en las zonas bajas de cada unidad hidrográfica.

Respecto de la morfología de la cuenca, el salar es de tipo playa y presenta lagunas superficiales, su superficie es de 27 km², lo que representa al 22% de la superficie total de la cuenca. El punto más alto es el Cerro Capur con 5.204 msnm. Esta zona es muy poco conocida por su difícil acceso.

Foto 11 Salar de Capur





7.2.12 Síntesis de los datos de las cuencas

A modo de resumen se presenta la siguiente tabla en la cual es posible observar las características cuantitativas de las cuencas consideradas.

Tabla 8 Síntesis cuantitativa de las cuencas consideradas.

Nombre cuenca	UTM Norte	UTM Este	Sup. Salar (km ²)	% área Salar	Sup. laguna (km ²)	% área Laguna	H.Min (msnm)	H. Max (msnm)	H. Med (msnm)	Perímetro (km)	Área cuenca (km ²)
Salar de Aguas Calientes 1	7.446.554	659.604	15	5,7	2,5	1	4.215	5.370	4.556	99	263,4
Salar de Pujsa	7.439.553	644.344	18	2,8	4,5	0,7	4.500	6.046	4.778	167	633
Laguna Helada	7.444.328	693.137	5,8	2,7	5,8	2,7	4.297	5.745	4.460	87	209,9
Salar de Loyoques o Quisquiró	7.423.898	669.756	80	10,6	5	0,6	4.150	5.217	4.430	196	748,6
Salar de Aguas Calientes 2	7.402.290	647.936	134	13,7	9	0,92	4.165	6.046	4.562	234	975,1
Laguna Lejía	7.404.299	633.303	-----		1,9	0,96	4.324	5.924	4.611	90	196,8
Laguna Miscanti	7.373.898	633.188	-----		13,4	5	4.120	5.910	4.692	99	267,7
Salar del Lago	7.361.531	660.895	16,2	7,7	2,2	1	4.219	5.852	4.518	121	207,8
Laguna Miñiques	7.369.706	624.038	-----		1,6	8,8	4.120	5.758	4.420	23	17,7
Salar de Aguas Calientes 3 o Talar	7.349.059	630.986	46	9	2,5	0,5	3.908	5.910	4.322	48	501,2
Salar de Capur	7.348.931	622.694	27	22,1	0,9	0,7	3.903	5.204	4.166	65	121,8
TOTALES			342		49,3						4.143

Las cuencas se trazaron usando Modelos de elevación digital (DEM), con el apoyo de coberturas digitales SIG, imágenes satelitales y otros estudios realizados en la zona.



CAPÍTULO 8 HIDROGRAFÍA DE SALARES

8.1 CICLO HIDROLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO

El movimiento general que realiza el agua, fundamentalmente entre la atmósfera, los océanos, el suelo y el subsuelo, que asciende por evaporación o desciende por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea recibe el nombre de ciclo hidrológico²⁵, el cual está compuesto por distintos procesos como los siguientes:

El ciclo hidrológico presenta 8 procesos fundamentales, los cuales son:

1. La evaporación
2. La sublimación.
3. La condensación.
4. La infiltración
5. La escorrentía superficial
6. La circulación subterránea
7. La fusión
8. La solidificación o congelamiento (puede ser atmosférico o superficial)

En la Figura 1 es posible identificar todas las fases antes mencionadas:

Figura 1 Ciclo hidrológico



²⁵ Sánchez, FJ. 2001



Forman parte integral de la dinámica del sistema y del balance hídrico. En este sentido, dentro de una cuenca hidrológica bien definida, el balance de entradas y salidas de agua al interior de ella, teniendo en cuenta las variaciones efectivas de la acumulación, recibe el nombre de balance hidrológico.

Este balance es la aplicación detallada de la ecuación general de balance de masa cuya expresión general es la siguiente²⁶:

$$X = Y + ds / dt$$

Donde:

X = Corresponde a los insumos o entradas al sistema por unidad de tiempo.

Y = Corresponde a las salidas por unidades de tiempo.

ds/dt = Corresponde a la tasa de variación con el tiempo del almacenamiento de masa o volumen del sistema.

Está basado en el principio de que durante un intervalo de tiempo dado, el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua.

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \Delta \text{ Almacenamiento}$$

8.2 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LOS SALARES Y TIPOLOGÍA

El área de estudio se caracteriza por la presencia de salares, los cuales corresponden a depósitos que se desarrollan en cuencas cerradas, labradas generalmente sobre volcanitas ácidas de la formación riolítica y en las cuales el rango de evaporación (y posible infiltración) supera, para períodos más o menos largos, a los aportes de agua que confluyen en la cuenca.

La continua evaporación de las aguas acumuladas en éstas dada la fuerte radiación y la sequedad del aire, genera un paulatino enriquecimiento iónico hasta transformarlas en salmueras (sobre 50.000 mg/lit de sólidos disueltos), debido a la precipitación de las diversas sales a medida que alcanzan sus respectivos puntos de insolubilidad.

Según las características morfoestructurales y la topografía de las depresiones donde se emplazan estos depósitos, se pueden diferenciar tres tipos principales²⁷:

- Cuencas topográficas controladas por el relieve volcánico plio-cuaternalio, de paredes abruptas y con un marcado desnivel entre el fondo de la cuenca y el relieve circundante >1.000 mts.

²⁶ Espildora B., et.als. 1975.

²⁷ Vila T., 1975.



- Cuencas estructurales modeladas sobre la cubierta riolítica mio-pliocena según fallas normales, rodeadas generalmente por un relieve suave en donde se desarrollan extensos abanicos aluviales coalescentes.
- Calderas volcánicas de paredes semi verticales y de extensión areal relativamente reducidas.

El aspecto geomorfológico y las características geológicas de los depósitos salinos emplazados en estos diferentes tipos de cuencas no tienen grandes variaciones, pudiendo ser considerados como constituidos por una fracción líquida que corresponde normalmente a salmueras, una fracción salina representada por la depositación de las diferentes sales transportadas en solución a la cuenca y una fracción detrítica, constituida por lentes y niveles relativamente potentes de arenas, limos y arcillas ínter estratificados en el cuerpo salino principal.

En este sentido, los salares corresponden a un conjunto de sedimentos de naturaleza evaporítico detrítica, cuya génesis ha tenido lugar en la zona más deprimida de una cuenca cerrada sometida a un clima árido o semiárido²⁸. Los salares son un testigo de la existencia en la zona de lagos más o menos profundos, que en determinadas fases del Cuaternario ocuparon las áreas más deprimidas de muchas cuencas cerradas de los Andes chilenos y bolivianos²⁹.

Hay dos requisitos fundamentales para que se desarrollen ambientes evaporíticos: los cuales son que la evaporación potencial sea superior a la pluviosidad y que existan cuencas cerradas.

La ubicación geográfica y tectónico-estratigráfica de los depósitos condiciona en gran medida su composición, ya que ésta depende del tipo de materiales solubles existentes en las cuencas de drenaje y del tipo de clima al cual han estado sometidas.

Esta dependencia de las condiciones climáticas hace que los depósitos salinos andinos constituyan sistemas climáticos que experimentan variaciones geomorfológicas, estructurales y de composición en ciclos diarios y estacionales.

Los tipos de aportes que reciben los salares son los siguientes³⁰:

1. Vertientes fluyentes o fuentes corrientes: Son manantiales de agua bien localizados donde el agua fluye visiblemente. Se puede medir su caudal. Se encuentran en las orillas del salar como en las laderas de la cuenca. Es posible que existan varios manantiales fluyentes a lo largo de una orilla, muy cerca uno del otro.
2. Vertientes difusas: Aportan aguas que escurren lentamente tanto que no es posible apreciar su movimiento visualmente (corriente intraregolítica). No hay una salida localizada, sino una escorrentía a lo largo de la orilla con una extensión que puede alcanzar varios cientos de metros. Es muy raro encontrar estas vertientes aguas arriba. No se puede medir el caudal. Cuando las

²⁸ Chong, 1988.

²⁹ Stoertz & Ericksen, 1974.

³⁰ Risacher, 1999.



aguas son diluidas (muy bajo contenido de sales disueltas) se producen los bofedales. Es proclive a dos mecanismos de salinización los cuales son una mezcla con una cuña salina del salar o la pre- evaporación a través de los sedimentos de la orilla, donde la napa subterránea que está a muy poca profundidad asciende por capilaridad, se evapora y produce concentración y depositación de sales eflorescentes a lo largo de la orilla.

3. Ríos y riachuelos: provienen de la unión de aguas de varias vertientes. No son muy comunes en zonas áridas y su caudal es bajo (litros a centenares de litros por segundo) en relación a los ríos de zonas húmedas. En muchos casos se infiltran cuenca arriba alimentando napas subterráneas que se descargan luego en vertientes a orillas del salar.
4. Napas subterráneas: son las principales reservas de agua de la cordillera de Los Andes en el norte de nuestro país. Estas napas afloran muy poco y lo hacen en algunas vertientes aportando a los salares.

Según Risacher (1999), hay dos grandes tipos de salares y lagos salinos en nuestro país:

- Los salares de la costa y de la depresión central: dentro de los cuales es posible encontrar salares inactivos, fósiles, con costras de sales muy secas, encontrándose yacimientos de nitratos y yodo. También es posible encontrar algunos salares como el caso de Pintados, los cuales se activan durante los aluviones de verano o por las aguas infiltradas que afloran en el contacto de la depresión central con la cordillera de la Costa.
- Los lagos salados y salares de la cordillera de Los Andes: son activos, reciben aportes de agua de su cuenca de drenaje que se concentran por evaporación en lagunas superficiales donde precipitan sales evaporíticas.

En la cordillera de Los Andes se pueden encontrar dos tipos de salares activos³¹:

- Las costras de sales: ellas son porosas y permeables, contienen salmueras intersticiales (al contrario de las costras secas de la depresión central). Se encuentran localizadas en la precordillera a altitudes inferiores a los 3.500 msnm. Como ejemplo de estas costras pueden ser mencionados los salares de Atacama, Punta Negra, Imilac y Pedernales.
- Los salares de tipo "playa": los cuales se encuentran constituidos por sedimentos salinos finos y casi impermeables sobre los cuales se extienden lagunas someras de extensión muy variable. Dentro de los sedimentos se encuentra una napa cautiva de salmuera la cual no está conectada con las lagunas superficiales. Se encuentran localizados en el Altiplano o en la alta cordillera andina.

Así como se identifican salares, también se desarrollan lagunas salobres, las cuales, constituyen verdaderos oasis que albergan ecosistemas complejos y variados, desde microorganismos que sirven de alimento a los flamencos y otras aves, hasta mamíferos como vicuñas, guanacos y zorros, para los cuales los manantiales constituyen la única fuente de agua.

³¹ Stoertz, Ericksen. 1974, Chong. 1984.



"Estudio de cuencas altiplánicas endorreicas de la segunda región de Chile. Caracterización, tipología y potencialidades de uso."

Estas lagunas se constituyen en la base de equilibrio de las cuencas cerradas. Las napas subterráneas de estas cuencas de drenaje proceden a descargar preferentemente en estas depresiones topográficas dando origen a manantiales o a vertientes las cuales alimentan los salares³².

³² Risacher F., et. als. 1999.



CAPÍTULO 9 HIDROMORFOMETRIA

Conjuntamente con las características cualitativas y descripciones físicas de las cuencas en estudio, se procedió a establecer aspectos cuantitativos de ellas, tales como área, perímetro, pendiente media y alturas máxima, media y mínima. Además se hizo una breve descripción de cada una de estas unidades. La escala de trabajo es equivalente al uso de mapas 1:50.000.

9.1 CUENCAS Y DRENAJE

La cuenca hidrológica corresponde a una unidad hidroespacial delimitada topográficamente y drenada por un sistema de cauces superficiales (ríos y esteros), de tal manera que toda la escorrentía que se genera en la superficie encerrada por la línea divisoria de las aguas, se descarga a través de una salida única e identificable (exorreísmo) o hacia un punto interior (endorreísmo).

Una cuenca puede describirse y analizarse, entre otros enfoques, por medio del balance hidrológico.

Existen tres tipos de cuencas de acuerdo a su drenaje³³.

1. Cuencas exorreicas: corresponden a aquellas cuencas que drenan hacia un océano dado. En dichas cuencas se puede determinar el balance hídrico cuando se controla el caudal que entrega al océano o se puede determinar éste en forma indirecta.
2. Cuencas endorreicas o cerradas: corresponden a aquellas cuencas cuyo drenaje superficial se orienta hacia el punto interior más bajo donde se concentra (depresiones). Tipos de cuencas endorreicas:
 - a) La que posee un lago o espejo de agua permanente en la depresión. En estas cuencas, el caudal efluente del lago se expresa en evaporación y eventualmente, en flujos efluentes subterráneos, estableciéndose de esta manera un equilibrio dado por la igualdad, expresada en volumen.
 - b) La que posee un salar. En este tipo de cuenca el agua no genera un lago o espejo de agua permanente dada una condición semipermanente de desbalance hídrico (déficit).
3. Cuencas arreicas: corresponden a aquellas cuencas que carecen casi por completo de drenaje superficial. Los lechos se presentan la mayor parte del tiempo secos, eventualmente pueden registrar escorrentías de poca duración. Hay dos tipos de cuencas arreicas:
 - a) Que no presentan escurrimientos superficiales. Estas se producen en zonas desérticas donde las precipitaciones son muy escasas, no alcanzando a saturar el terreno para producir escorrentía.
 - b) Que presentan escurrimientos eventuales y por infiltración (hipodérmicas), los que se secan por evaporación desde la superficie del agua. Estas se producen en las zonas desérticas o semidesérticas en las que se generan temporales de corta duración y gran intensidad que producen escorrentía del tipo flujos de lodo con porcentajes variables de detritos, pero al escurrir el agua por terrenos sumamente secos, el caudal disminuye rápidamente hasta desaparecer, llegando raras veces al océano.

³³ MOP – DGA, 1984.



En estos casos, generalmente la cuenca puede subdividirse en dos subcuencas, una alta en la cual se producen los temporales (como por el ejemplo el Altiplano) y se generan los escurrimientos y otra baja desértica donde la precipitación es mínima y en la cual los ríos desaparecen al atravesarla. (Ejemplo: Desierto de Atacama).

Considerando la escasez de datos cuantitativos respecto de las cuencas en estudio, los parámetros morfométricos permiten su caracterización aportando antecedentes sobre una serie de parámetros los cuales si se profundizan permiten establecer los tipos de comportamientos y reacciones hidrológicas más probables. Estos parámetros desempeñan un rol muy importante en el estudio y comportamiento de los componentes en el ciclo hidrológico. Asimismo, algunos parámetros son requeridos como datos de entrada en la mayoría de los modelos hidrológicos³⁴.

9.2 PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

9.2.1 Perímetro

Este parámetro por sí solo no da ningún tipo de información respecto al tamaño o forma de la cuenca, sólo si se comparan cuencas de igual superficie el valor del perímetro podrá entregar una idea de la forma de las cuencas. El perímetro y su forma están íntimamente relacionados con la litología y edad de la cuenca de drenaje, de esta manera los materiales blandos generan formas redondeadas mientras que los materiales más duros generan formas más quebradas o lobuladas; y de igual manera, debido a que la tendencia de las cuencas es conseguir formas redondeadas, a igual litología, una cuenca de forma seniles o desgastadas implicará mayor desarrollo.

9.2.2 Exposición y orientación

La localización geográfica de una cuenca hidrográfica tanto en latitud como altitud, así como la altura y la configuración del relieve, influyen en el grado de exposición solar (solana - umbría) lo que varía de acuerdo a la latitud y a la posición. Lo cual, junto a la orientación de la cuenca (sotavento – barlovento) determina las características meteorológicas predominantes en ella.

La orientación de una cuenca se determina de acuerdo a la dirección de procedencia de los frentes de precipitación y su influencia está dada con respecto a la disposición de las cadenas montañosas que la rodean y que actúan como barreras o biombos climáticos.

La diferenciación se realiza según la cuenca mire al norte o al sur. Si mira al oeste, aproximadamente la mitad es solana y la otra es umbría, y los frentes de precipitaciones la afectan más directamente que en el caso de las que miran al este.

³⁴ Jardí, M. 1985.



9.2.3 Elevación

Se refiere a la variación altitudinal de la cuenca hidrográfica e incide directamente sobre el clima y por tanto sobre el régimen hidrológico, además de dar una base para caracterizar zonas climatológicas y ecológicas con características específicas dentro de la misma cuenca.

En general para zonas de montaña no intervenidas, los rendimientos medios de las cuencas aumentan con la elevación hasta una determinada altura (óptimo pluviométrico) que corresponde a la altura media de la formación de nubes, por encima de la cual disminuye, llegándose rápidamente a sectores de precipitación sólida. Este comportamiento está directamente relacionado con la formación y distribución de las precipitaciones.

La altimetría de la cuenca y su variación afectan el comportamiento de las corrientes de agua que la drenan, ya que al variar la temperatura tanto del agua como del ambiente con la altura se altera la relación retención - evacuación. También la diferencia interna de altura tiene relación con las pendientes, motor de la escorrentía.



CAPÍTULO 10 PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS

10.1 FORMA

Las condiciones geológicas y morfo-estructurales son las encargadas de sentar las bases de la fisiografía de una región, cuya posterior erosión y modelación terminan por dar la forma que las cuencas hidrográficas poseen.

Para cuencas de igual área y diferente forma se espera un comportamiento hidrológico diferente, influenciado por el "factor forma", ya que la forma afecta directamente la longitud y la estructura de la red de drenaje de la cuenca y por lo tanto su respuesta frente a la ocurrencia de precipitaciones.

Las cuencas con ríos de gran longitud, facilitan el amortiguamiento o reducción del efecto de una crecida, al aumentar el tiempo de la formación de la avenida y distribuir el caudal en un mayor lapso de tiempo. Por el contrario, cuando la forma de la cuenca conduce al desarrollo de múltiples ríos de poca longitud y confluencia cercana, hay susceptibilidad a la formación de avenidas ante eventos de precipitación no necesariamente muy altos.

La forma se entiende como lo más o menos lobulada que puede ser una cuenca, independiente de que sea alargada o redondeada. Una cuenca muy lobulada tendrá un perímetro muy superior a otra de forma similar, pero cuyo contorno sea liso, sin entrantes ni salientes. Una forma u otra si bien tiene importancia en el comportamiento hidrológico, también indica diferentes orografías y litologías, componentes que son muy importantes en el funcionamiento hidrológico³⁵.

Por lo general, la forma de la cuenca se evalúa comparando la divisoria de aguas con una figura geométrica regular conocida, existiendo gran cantidad de factores, determinados por diversos autores, siendo según TRAGSA³⁶ los factores que mejor determinan la forma de la cuenca los siguientes:

- Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (K_c): Este índice se utiliza para representar la relación contorno-superficie de una cuenca, donde se compara la relación entre el perímetro de una cuenca y el de un círculo que tuviera la misma superficie que la cuenca en estudio³⁷.

$$K_c = 0.282 * P / \sqrt{S}$$

Donde:

- P = Perímetro de la cuenca.
S = Superficie de la cuenca.
 K_c = Coeficiente de compacidad.

³⁵ Modificación de Jardí, M. 1985.

³⁶ Instituto de Agronomía de Madrid, España, 1994.

³⁷ López, 1994.



A medida que los resultados se acercan a la unidad, indica la tendencia de la cuenca a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento en menor tiempo, siendo más acentuado cuanto más cercano a 1 sea, pudiendo alcanzar valores mayores que 2 en cuencas muy alargadas.

Las cuencas de acuerdo a su forma se clasifican de la siguiente manera:

Valores de K_c	Forma
1.00 a 1.25	Redonda
1.25 a 1.50	Ovalada
1.50 a 1.75	Alargada

Fuente: TRAGSA, 1994.

Dicha forma de la cuenca influye sobre los escurrimientos y sobre el hidrograma resultante de una precipitación dada.

Así, en una cuenca de forma alargada el agua escurre generalmente por un solo cauce principal, mientras que en otra de forma ovalada los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a un principal, por lo que la duración del escurrimiento es superior.

10.2 PENDIENTE MEDIA

Corresponde al valor de la inclinación o gradiente media de una cuenca. Su determinación es importante para definir el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de los mantos edáficos y detríticos (erosión o sedimentación), ya que en zonas de pendientes fuertes se presentan con mayor frecuencia los problemas de erosión, mientras que en regiones con menor pendiente, aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación.

Como resultado de la combinación de las características de uso de suelo y de la red de drenaje, la pendiente influye en el comportamiento de la cuenca, en particular en la relación magnitud- duración de las crecidas en el cauce principal.

En cuencas de pendientes fuertes, existe la tendencia a la generación de crecidas frecuentes y breves. Estas cuencas se conocen con el nombre de torrenciales, igual a los ríos que las drenan.

El método más directo para calcular la pendiente media de una cuenca es considerarla como la media ponderada de todas las superficies elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante. Se calcula mediante la siguiente ecuación³⁸:

$$J = \frac{D * L_i}{S}$$

³⁸ Horton, 1945.



Donde:

- J = Pendiente media.
- D = Equidistancia entre las curvas de nivel.
- Li = Longitud de todas las curvas de nivel.
- S = Superficie de la cuenca.

La pendiente de las cuencas manifiesta su influencia en el comportamiento de ellas afectando directamente el escurrimiento de las aguas lluvias, esto es, en la magnitud y en el tiempo de formación de una crecida en el cauce principal. La clasificación de pendientes de acuerdo a su valor en grados y los procesos asociados puede observarse en la Tabla 9.

Tabla 9 Clasificación de pendientes

Valor en grados	Tipo de pendiente	Umbral geomorfológico, procesos asociados.
0 – 2	Horizontal, leve	Erosión nula a leve.
2 – 5	Suave	Suave erosión leve, difusa, Sheet wash. Inicio de regueras. Soliflucción fría.
5 – 10	Moderada	Erosión moderada a fuerte. Inicio erosión lineal. Rill wash o desarrollo de regueras.
10 – 20	Fuerte	Fuerte erosión intensa. Erosión lineal frecuente. Cárcavas incipientes.
20 – 30	Muy fuerte	Moderadamente escarpada, cárcavas frecuentes. Movimientos en masa, reptación.
30 – 45	Escarpada	Coluvionamiento, soliflucción intensa.
>45	Muy Escarpada a Acantilada	Desprendimientos, derrumbes, corredores de derrubios frecuentes.

Fuente: Clasificación de pendientes de Araya Vergara y Borgel (1972); Young (1975) y Ferrando (1993).

10.3 ÁREA

El área de la cuenca nos permite, establecer una primera clasificación entre diversas cuencas en orden a su tamaño y para identificar la escala a la cual se debe trabajar. Depende de otras variables de la cuenca, dentro de ellas se encuentra la escorrentía superficial, la cual provoca un efecto erosivo que se traduce en un vaciado de material el cual se lleva a cabo a través de los canales en que se jerarquiza la red de drenaje; dicha jerarquización va a depender de la litología del área y del espacio en el cual se desarrolla, siendo decisiva en el tamaño de las cuencas y en su forma.

Este parámetro se define como el área plana en proyección horizontal limitada por una línea denominada divisoria de aguas, que separa la precipitación de la cuenca de estudio de la que cae en las cuencas vecinas. La línea divisoria de aguas no debe cortar ninguna corriente de agua, salvo en su exutorio y en los sectores montañosos se traza por la convergencia de las vertientes de los cordones montañosos que separan un sistema hidrológico de otro u otros, lo que no impide que en el interior de una cuenca existan alturas aisladas con cotas superiores a la de la divisoria. Está conformada por los sistemas de vertientes, que son las áreas receptoras que se extienden a cada lado del río principal.



Para homogeneizar la terminología dada a las diferentes sub áreas que conforman una cuenca hidrológica se adoptó la siguiente clasificación³⁹:

Unidad hidrológica:	Inferior a 5 km ²
Sector hidrológico:	De 5 a 20 km ²
Microcuenca:	De 20 a 100 km ²
Subcuenca:	De 100 a 300 km ²
Cuenca:	Mayor a 300 km ²

Este parámetro es muy importante, ya que influye en el régimen hidrológico, específicamente en la magnitud del caudal que va a drenar, ya que dependiendo del tamaño, los caudales resultantes serán mayores o menores. Por otro lado, existe una relación directa entre el tamaño de la cuenca área de recepción, y los caudales promedios mínimos y los máximos. Los gradientes de crecimiento del caudal promedio con el área de la cuenca no son constantes ni homogéneos en una región, sino que van variando debido a las características hidrometeorológicas y fisiográficas de la región y la capacidad de retención.

Influye también la severidad de crecidas, de esta manera es así como en cuencas de poca extensión la avenida se presenta en un corto lapso de tiempo y presenta un peak más marcado que puede ser de algunos minutos u horas mientras que para grandes cuencas, la crecida se presentará al cabo de algunos días o semanas y con un peak más atenuado debido a que el agua precipitada debe recorrer una mayor distancia para llegar al punto de drenaje.

Paralelamente, la superficie de las cuencas tiene una relación de tipo inverso con la pendiente media, por lo que incide en la presencia de diversos fenómenos relacionados con el tiempo de respuesta, la torrencialidad, la erosión y la sedimentación. Al respecto, las superficies de las once cuencas analizadas se pueden observar en la Tabla 10.

Tabla 10 Superficie de las cuencas analizadas

Cuenca	Superficie (km ²)
Salar de Aguas Calientes 1	263,4
Salar de Pujsa	633
Laguna Helada	209,8
Salar de Loyoques o Quisquiro	748,6
Salar de Aguas Calientes 2	975,1
Laguna Lejía	196,8
Laguna Miscanti	267,7
Salar del Lago	270,7
Laguna Miñiques	17,6

³⁹ Jiménez, 1986.



Cuenca	Superficie (km ²)
Salar de Aguas Calientes 3 o Talar	501
Salar de Capur	121,7

Por lo tanto, y de acuerdo a Jiménez (1986), el sector presenta una variada clasificación hidrológica.

10.4 JERARQUÍA DE LA RED DE DRENAJE

Esta representa el grado de desarrollo de la red de drenaje en términos de los afluentes que aportan al río principal. Para su determinación se utiliza el método de Strahler. De acuerdo a éste, se consideran ríos de primer orden aquellas corrientes hídricas de las nacientes y que por lo tanto, no tienen afluentes.

Las corrientes de segundo orden son las resultantes de la unión de dos corrientes de primer orden.

Las corrientes de tercer orden corresponden a la unión de los ríos de segundo orden y así sucesivamente. Este método presenta un problema de omisión, dado que en el caso en el que una o varias corrientes de orden inferior desemboquen en otra de orden superior, estas conservan el mismo orden, sin embargo se ha seguido usando.

10.5 TEMPORALIDAD

Según la constancia del caudal, la escorrentía en los cauces se puede clasificar como perenne, intermitente o efímera⁴⁰.

- Perenne: se refiere a aquellos cauces que poseen agua todo el tiempo, sin importar las condiciones meteorológicas adversas, debido a que el nivel freático mantiene una alimentación constante y nunca desciende debajo el nivel del río.
- Intermitente o estacional: son aquellos cauces que llevan agua en la época de lluvia y se secan en época de verano. El nivel freático se conserva por encima del nivel del lecho del río sólo en época de lluvia.
- Efímera u ocasional: registran escorrentía durante o inmediatamente después de los eventos de lluvia. Transportan agua sólo superficialmente y el nivel freático siempre se mantiene por debajo del lecho de la corriente.

10.6 FRECUENCIA DEL DRENAJE

De acuerdo con Horton (1945) corresponde al cociente entre la sumatoria total del número de drenes de una unidad hidroespacial y su superficie. Una mayor frecuencia de drenes por unidad de superficie permite una más rápida organización y concentración del escurrimiento, inicialmente laminar, lo cual conduce a una mayor prontitud en la evacuación de las aguas desde la zona de captación de una cuenca.

⁴⁰ Monsalve, 1995.



10.7 DENSIDAD DEL DRENAJE

Definida por Horton (1945) corresponde al cociente entre la sumatoria del largo total de los drenes de una unidad hidroespacial y la superficie de la misma. Es uno de los factores que controla la velocidad del escurrimiento a continuación de un período de precipitaciones. Es un índice complementario de la frecuencia.



CAPÍTULO 11 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

11.1 FACTORES QUE CONTROLAN EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Nada traduce mejor el conjunto de los procesos climáticos, orográficos, geológicos, biogeográficos y humanos que caracterizan una cuenca que los ríos. Son ellos, por lo tanto, una síntesis de la intervención de todos estos factores y componentes del medio natural en la organización del escurrimiento desde sus inicios⁴¹.

Dentro de los factores que determinan el escurrimiento se encuentran los climáticos, orográficos, morfológicos, litológicos y vegetacional.

11.1.1 Factores climáticos

Son los factores más determinantes, ya que un río es la expresión sub-aérea o la respuesta a las condiciones atmosféricas y a los fenómenos del ciclo del agua que ocurren en dicha cuenca.

Estos factores se subdividen en dos, los cuales son precipitaciones y evapotranspiración, los cuales interactúan para determinar el diferencial que va a escurrir y el que podría infiltrarse dependiendo de la permeabilidad.

Entonces la escorrentía de una cuenca corresponde, en términos generales, a la resultante de lo que precipita menos lo que evapora menos lo que se infiltra. Pero también hay que considerar el aporte hacia la cuenca que entregan otras fuentes como los glaciares, napas, vertientes y lagos.

Es muy importante la combinación que tiene la precipitación con la temperatura (°C) en su relación con el Déficit de Escurrimiento, el cual corresponde a la parte de las precipitaciones que escapa al drenaje superficial por evaporación o infiltración.

Al aumentar las precipitaciones, este déficit se va reduciendo, llegando a estabilizarse en un determinado valor, a partir del cual aumenta. Las cifras de precipitación a partir de las cuales el déficit tiende a estabilizarse con la temperatura media son las siguientes⁴²:

- Para 15° C la curva tiende a estabilizarse a los 1.600 mm.
- Para 20° C la curva tiende a estabilizarse a los 1.900 mm.
- Para 25° C la curva tiende a estabilizarse entre 2.100 – 2.200 mm.

Hay un techo del déficit, el cual corresponde al poder evaporante de la atmósfera, el cual es una función creciente de la temperatura y sobre este techo todas las precipitaciones suplementarias se transforman en escurrimiento y/o infiltración.

⁴¹ Guilcher, 1965.

⁴² Wundt, 1953.



De acuerdo al efecto de la estabilidad (precipitación versus temperatura) sobre el caudal de los ríos de régimen pluvial de la zona templada con estaciones marcadas, se establece la siguiente relación:

Estación	Precipitación	Evaporación	Caudal
Verano	Mínima	Máxima	Mínimo
Invierno	Máxima	Mínima	Máximo

11.1.2 Factores orográficos y morfológicos

El relieve interviene en el condicionamiento de los factores climáticos como un elemento azonal. Con la altura aumentan las precipitaciones hasta un óptimo pluviométrico.

A partir de cierta altura, las precipitaciones líquidas pasan al estado sólido (nieve), esta altura se denomina "Línea de las nieves estacionales", la cual varía con la latitud y con la exposición solar.

De igual manera varía la "Línea de las nieves persistentes", salvo por la prolongación hacia aguas bajo las lenguas glaciales en los valles. Este nivel es más elevado en los trópicos y más bajo en la zona ecuatorial.

De los trópicos esta línea desciende según aumenta la altitud, más rápido en el hemisferio Sur que en el hemisferio Norte, esto debido al rápido enfriamiento de la masa oceánica austral a partir de la convergencia subtropical.

La orientación de los relieves permite diferenciar entre vertientes de barlovento y de sotavento, y la exposición solar la cual establece diferencias entre laderas de solana, semi solana, umbría y semi umbría. Y de ambas variables respecto de la radiación solar, la circulación atmosférica y la repartición de océanos y continentes.

El relieve no influye solamente sobre las precipitaciones, sino también sobre el escurrimiento, el cual provoca una disminución del déficit hídrico al incrementarse la altura, ya que se reduce gradualmente la temperatura.

También se acelera o reduce la velocidad de los cursos de agua en forma proporcionalmente directa con el valor de la pendiente, lo cual hace que se registre una relación directa entre pendiente y evaporación, ya que mientras más rápido escurre el agua, menos tiempo tiene de evaporarse. Por esto, el déficit hídrico en las zonas montañosas es mucho menor que en los terrenos bajos o de llanuras.

Los lagos, ejercen un rol ponderador por almacenamiento del aporte de los ríos tributarios y luego por restitución regulada en el río emisario. Contribuyen a incrementar el déficit del escurrimiento al aquietar las aguas y constituir una mayor superficie evaporante.

La morfología del lecho fluvial es muy importante. Si bien es más una consecuencia que una causa de las modalidades del escurrimiento, es un factor de dinámica fluvial, es decir, el lecho ejerce influencia, según su morfología y resistencia de los materiales que lo constituyen, sobre la dinámica del curso de agua. Hay una



relación de interacción constante de fuerzas de resistencia y efectos de rugosidad (el lecho) y de fuerzas erosivas (el agua), lo que determina si el balance de disección resultante tiene connotación positiva o negativa.

El relieve, específicamente la amplitud altimétrica y la gradiente, tiene relación con la evolución de los suelos, los que, según la naturaleza del material parental y la contribución de la vegetación (presencia, densidad, tipos, etc.), genera cubiertas edáficas más o menos permeables y con mayor o menos capacidad de retención, lo que establece los montos en que se reduce la lluvia neta o efectiva y por lo tanto, el escurrimiento superficial.

Debido a la reducción de la temperatura con la altura, el agua se congela en las grietas o en el interior de los poros de materiales permeables, con lo que estacionalmente se transforman estos poros en impermeables.

11.1.3 Factor litológico

La escorrentía se relaciona con la geología en lo que se refiere a la permeabilidad de las rocas, ya sea natural o adquirida, y con las estructuras geológicas predominantes.

La permeabilidad natural depende del volumen de poros internos, de su diámetro y del grado de conectividad entre ellos. Una roca con poros aislados entre sí se comporta como un material impermeable.

La permeabilidad adquirida es el resultado tanto del fracturamiento y de la fragmentación de la roca durante los procesos orogénicos, producto de las fuerzas tectónicas como del intemperismo diferencial según las características que haya tenido o que tenga el clima, principalmente la intensidad e interacción entre humedad y temperatura.

La resistencia o dureza de las rocas es relativo, ya que depende de las condiciones climáticas imperantes tanto en el pasado geológico como en el reciente. Como ejemplo las rocas que son muy resistentes a la erosión en climas fríos son fácilmente intemperizadas y erosionadas en climas cálidos y húmedos.

Se derivan diferentes situaciones hidrológicas según las características del sustrato (permeables, semipermeables, impermeables) ya que de ello depende la relación entre cuanto de la lluvia efectiva o del agua de fusión nival o glacial escurre superficialmente y cuando de ella se infiltra.

Cambian las relaciones de retroalimentación de los cursos de agua desde las napas por medio de surgencias o manantiales. Una cuenca de sustrato poco permeable tendrá poca capacidad de almacenar agua y sus aportes a los cursos de agua superficiales en la estación seca serán reducidos, con lo que los caudales también disminuirán notoriamente.

Los terrenos permeables (calcáreos y arenosos), juegan un rol retardador y ponderador del escurrimiento al comportarse como verdaderas esponjas. Y los impermeables favorecen el escurrimiento inmediato.

El rol de las estructuras geológicas está relacionado con el diferente comportamiento hidrológico de las formaciones sedimentarias respecto de los cuerpos intrusivos y de los efectos que sobre ambos haya tenido la tectónica (plegamientos en las primeras y fallamientos en ambos cuerpos litológicos).



En las formaciones de rocas sedimentarias afectadas por plegamientos, resultan paquetes de capas de rocas modificadas en su integridad y en su posición. El doblamiento de las capas genera diferentes grados de fracturamiento local y cambio en el ángulo de inclinación o manteo de ellas.

La relación entre esta disposición de los materiales del sustrato, y los resultados de la erosión, genera dos tipos principales de laderas, las conformes que son aquellas donde las capas tienen un manto concordante con la gradiente de las laderas y las disconformes cuyo manteo es opuesto a la inclinación de la superficie de los terrenos.

Dado que el agua que se infiltra escurre tanto por el espacio poroso como por los planos de fracturas y las superficies de contacto entre las capas de roca, la disposición de estas en relación al relieve, modifica el movimiento de las aguas en el subsuelo, produciendo cambios en la dirección del movimiento hídrico y en la posición de la divisoria freática, lo que condiciona los aportes al sistema de drenaje superficial, pudiendo favorecer a unas cuencas y a otras el caso contrario.

Hay una fuerte relación de control del patrón de diseño de las redes hidrográficas con los efectos de las acciones tectónicas sobre las estructuras geológicas. Debido a que las líneas de falla y fractura constituyen discontinuidades y representan mayor debilidad frente a la acción de las aguas corrientes, estas son naturalmente orientadas a concentrarse y desarrollar sus mecanismos de erosión en estas franjas.

11.1.4 Factor vegetacional

La vegetación efectúa un rol muy importante en la regulación del escurrimiento superficial, la infiltración y la evapotranspiración.

Es así como los bosques reducen el escurrimiento, ya que los árboles interceptan la lluvia y parte de la nieve, parte de lo que precipita no llega directamente al suelo, sino que lo hace a través de la precipitación interna o por medio del escurrimiento fustal (escurrimiento por el tronco) y otras que son devueltas a la atmósfera por evaporación.

La umbría (sombra) crea un microclima más fresco bajo el bosque, lo que retarda la fusión nival bajo el follaje y reduce la evaporación desde el suelo o la capa herbácea.

Pero por otro lado, la cubierta vegetal extrae agua del suelo, parte de la cual transpira a través de la masa foliar, junto a la evaporación de la humedad retenida en la superficie de ésta, proceso que se reconoce como evapotranspiración.

La vegetación atenúa la mayoría de las crecidas fluviales, aunque en el caso de lluvias excepcionales y conducentes a una saturación rápida del suelo, su efecto puede ser ineficiente para controlar las inundaciones más desastrosas e incluso puede ser removida por ellas.

En los períodos secos, su rol varía de acuerdo con la naturaleza de los terrenos. Sobre aquellos terrenos impermeables, la vegetación atenúa la sequedad y sobre permeables ayuda a incrementar las reservas hídricas del subsuelo, ya que su efecto de favorecer la infiltración es generalmente superior a las



extracciones de humedad por vía radicular. En estación seca la vegetación claramente puede producir un descenso en el nivel freático.

De esta manera, la vegetación, dependiendo de las condiciones locales, puede jugar un rol favorable en términos de humedad, temperatura, erosión, paisaje, etc , pero también puede actuar negativamente principalmente en los casos en que la gradiente es fuerte y el peso de la biomasa junto a la mayor humedad que provoca en el sustrato, pueden actuar en contra respecto de la estabilidad de los suelos o las cubiertas sedimentarias de las laderas.

La alta rocosidad de algunos suelos de media montaña, que representa una alta rugosidad de la superficie de contacto entre el sustrato y el suelo o el manto detrítico, juega un rol trascendental en el afianzamiento de estos materiales en las laderas, a la vez que restringe el movimiento del agua en el subsuelo, procesos que colaboran en la estabilidad de las vertientes.

La vegetación tiene un límite altitudinal de desarrollo según la latitud. Sobre el límite vegetacional, el desarrollo de los suelos es escaso y predominan las superficies con alta rocosidad y una gran pedregosidad.

Los mantos detríticos sobre este límite están sueltos y son fácilmente incorporables en flujos y transportables, por lo que en los ambientes de alta montaña debe considerarse otro tipo de medidas para estabilizar algún sector.

Para poder estudiar este factor, se utilizó la metodología de pisos vegetacionales propuesta por Luebert y Pliscoff (2004), la cual define al piso de vegetación como el espacio caracterizado por un conjunto de comunidades vegetales con una fisonomía y especies dominantes asociadas a un piso bioclimático específico. En ellos la respuesta de la vegetación, en términos de su fisonomía y especies dominantes, está dada por la influencia del mesoclima.

La vegetación de la Cordillera de Los Andes presenta una marcada zonación altitudinal, producto de la influencia combinada del descenso de la temperatura y del aumento de las precipitaciones. La composición y estructura de la vegetación también es variable con la latitud.

Si bien no existe necesariamente una relación determinista entre vegetación y el clima, puesto que también hay otros factores que influyen en la fisonomía y composición de la cubierta vegetal, las condiciones climáticas establecen restricciones y potencialidades para la expresión de la composición y, especialmente, la fisonomía de la vegetación de un área⁴³, de manera que algunas formaciones de vegetación pueden encontrarse bajo la influencia de determinadas condiciones climáticas y otras no.

La variación local de la vegetación provocada por cambios en la topografía o en el sustrato es asumida dentro de la variabilidad de un Piso de Vegetación, cuando se presenta bajo las mismas condiciones mesoclimáticas. En términos operacionales los pisos de vegetación se construyeron mediante la integración

⁴³ Mueller-Dombois y Ellenberg 1974, Braun-Blanquet 1979, Ozenda 1986, Cox y Moore 2000, Ricotta *et al.* 2002, Walter 2002, Zunino y Zullini 2003.



"Estudio de cuencas altiplánicas endorreicas de la segunda región de Chile. Caracterización, tipología y potencialidades de uso."

de cuatro capas de información espacial: formaciones vegetacionales⁴⁴, bioclimas, pisos bioclimáticos y tipos de continentalidad.

⁴⁴ Gajardo 1983, 1994.



CAPÍTULO 12 RESULTADOS

Al haber evaluado todas aquellas variables físicas consideradas como fundamentales y condicionantes de la dinámica de los sistemas de cuencas, se puede decir que estos factores realmente influyen en como los sistemas se van desarrollando en el tiempo y en el espacio.

A pesar de que el origen y que las cuencas se encuentran localizadas en áreas geográficas con similares características climáticas, hidrológicas y morfológicas, presentan diferencias en los materiales constitutivos que forman estas cuencas, y por ende al tener diferencias geológicas, esto ha generado que existan diferencias importantes en la capacidad de constituir buenos o malos acuíferos dependiendo del tipo de material constitutivo y de las edades de éstos.

Se propone una nueva tipología para las cuencas, la cual puede ser utilizada para futuras clasificaciones más completas y precisas. Esta tipología, tiene como finalidad el poder dar a conocer que el sistema de cuencas constituye un "sistema abierto" ya que se encuentra afectado por muchas variables las que influyen directamente en él y en la manera como se va a comportar en el tiempo.

Y también que para poder realizar un estudio completo y lo más preciso posible resulta imprescindible el estar constantemente considerando cuales constituyen variables que realmente nos permitan responder todas las dudas que existan respecto a cómo una cuenca evoluciona y a que se debe dicha evolución y como esto puede ser utilizado para el beneficio de la sociedad.

Luego de contar con todos los antecedentes disponibles mencionados anteriormente en este trabajo de investigación, se pudo llegar los siguientes resultados, lográndose proponer una nueva manera de clasificación de cuencas, la cual al ser una propuesta está abierta a ser modificada y adaptada dependiendo de la zona y objetivos que se pretende conseguir y también se proponen dos tipos de usos potenciales para las cuencas aquí consideradas, ambos completamente opuestos, uno enfocado a un tema tan importante como es la protección de la biodiversidad y de los ecosistemas altiplánicos; y el otro un uso más bien enfocado en otra necesidad del país, en la necesidad de generar fuentes energéticas, en este caso la posible extracción de minerales como el litio, el cual en los últimos años ha adquirido una gran importancia en la economía mundial. A continuación se desarrollan los resultados obtenidos.

12.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Los pisos vegetacionales identificables en las cuencas consideradas en este trabajo fueron son los siguientes:

12.1.1 Matorral bajo tropical andino de *Fabiana bryoides* y *Parastrephia quadrangularis*

Este piso se caracteriza por el matorral bajo pobre en especies, dominado por arbustos *Parastrephia quadrangularis* y *Fabiana bryoides* y las gramíneas *Stipa frígida* y *Festuca chrysophylla*. También se destacan otras especies, las cuales pueden ser localmente abundantes, como *Adesmia erinacea*, *A. melanthes* y *Senecio xerophilus*.



Se presentan las comunidades zonales *Fabiana bryoides-Parastrephia quadrangularis*⁴⁵, *Festuca chrysophylla-Fabiana bryoides*, *Fabiana bryoides-Parastrephia lepidophylla*⁴⁶, *Fabiano bryoidis-Adesmetum erinaceae*⁴⁷.

Y las comunidades azonales *Oxychloetum andinae*⁴⁸ (bofedales), *Puccinellio frigidiae-Calamagrostietum eminentis*⁴⁹ (quebradas), *Deyeuxia eminens-Distichlis scoparia-Ges* (quebradas), *Oxychloe andina-Ges*⁵⁰ (bofedales).

La composición florística existente corresponde a: *Adesmia erinacea*, *A. melanthes*, *Baccharis incarum*, *Fabiana bryoides*, *Festuca chrysophylla*, *Parastrephia lepidophylla*, *Senecio xerophilus*, *Stipa frigida*, *S. venusta*.

No existen datos sobre la dinámica natural de este piso de vegetación. Se encuentra distribuido en Altiplano de la región, entre los 3800-4200 m, en las formaciones vegetacionales de la Estepa subdesértica de la Puna de Atacama y Estepa desértica de los salares andinos.

12.1.2 Matorral bajo tropical andino de *Mulinum crassifolium* y *Urbania pappigera*

Este piso se caracteriza por el matorral bajo dominado por plantas pulvinadas y gramíneas en mechón, entre las que se destacan *Mulinum crassifolium*, *Urbania pappigera*, *Adesmia caespitosa*, *Stipa frigida* y *Deyeuxia crispa*, a las que se asocia un elenco diversificado de herbáceas rosuladas, tales como *Chaetanthera revoluta*, *Nototriche auricoma* y *Perezia atacamensis*. En algunos sectores marca el límite altitudinal de la vegetación vascular, en cuya extensión puede mezclarse en una transición difusa con los elementos del Desierto tropical-mediterráneo andino de *Chaetanthera sphaeroidalis*, el que en algunos casos define un piso de vegetación por encima de éste.

Presentando las comunidades zonales *Mulinum crassifolium-Oxalis exigua*⁵¹, *Festuca chrysophylla*⁵², *Pycnophyllum molle-Oxalis exigua*⁵³, ?*Festuca chrysophylla*⁵⁴, *Mulino crassifolii-Deyeuxietum crispae*, *Stipo*

⁴⁵ Mieres 1984.

⁴⁶ Gajardo 1994.

⁴⁷ Luebert 1999, Luebert y Gajardo 2000.

⁴⁸ Ruthsatz 1995, Luebert 1999, Luebert y Gajardo 2000.

⁴⁹ Luebert 1999, Luebert y Gajardo 2000.

⁵⁰ Ackermann 2001.

⁵¹ Villagrán et al. 1981.

⁵² Mieres 1984.

⁵³ Gajardo, 1994.

⁵⁴ Teillier 1998.



frigidae-Adesmietum caespitosae, Senecionetum chrysolepidis⁵⁵, Mulinum crassifolium-Ges., Urbania pappigera-Ges⁵⁶.

Y las comunidades azonales Oxychloetum andinae (bofedales)⁵⁷, Oxychloe andina-Ges (bofedales)⁵⁸.

La composición florística corresponde a Adesmia caespitosa, Chaetanthera revoluta, C. spaheroidalis, Deyeuxia crista, Festuca chrysophylla, Moschopsis monocephala, Mulinum crassifolium, Nototriche auricoma, Opuntia ignescens, Oxalis exigua, Parastrephia quadragularis, Perezia atacamensis, Pycnophyllum bryoides, P. macropetalum, P. molle, Senecio chrysolepis, S. rosmarinus, Stipa frigida, S. venusta, Urbania pappigera, Werneria glaberrima⁵⁹.

Tal como se ha señalado para otros pisos de vegetación andinos, es probable que las plantas en cojín y las gramíneas en mechón actúen como colonizadores y luego permitan la llegada de otras especies mediante su efecto nodriza.

Este piso se encuentra ampliamente repartido en las zonas cordilleranas altas de los Andes, entre 4200 y 4900 m. Se encuentra en las formaciones vegetacionales de la Estepa arbustiva prepuneña, Estepa subdesértica de la Puna de Atacama, Estepa Desértica de los salares andinos y muy marginalmente en el Desierto de los aluviones y la Estepa alto-andina subdesértica.

En los mapas siguientes se presentan los pisos vegetacionales en cada una de las cuencas consideradas. Para cada una de ellas, estos pisos representan las siguientes superficies (%) de la cuenca:

Tabla 11 Superficie de cada piso vegetacional

Cuenca	Matorral 1 (*)	%	Matorral 2 (**)	%
Salar de Aguas Calientes 1	90,5	34,3	157,8	59,9
Salar de Pujsa	N/A	N/A	552,4	87,2
Laguna Helada	N/A	N/A	202,9	96,6
Salar de Loyoques o Quisquiró	378,9	50,6	368,1	49,1
Salar de Aguas Calientes 2	370,4	37,9	501,7	51,4
Laguna Lejía	29,05	14,7	150,1	76,2
Laguna Miscanti	73,8	27,5	131,2	49
Salar Del Laco	105,2	38,8	154,8	57,1
Laguna Miñiques	11,27	63,6	4,83	27,2
Salar de Aguas Calientes 3	333	66,4	141,8	28,2
Salar de Capur	102,2	83,9	18,27	15

(*) de Fabiana y Parastrephia. (**) de Mulinum y Urbania.

⁵⁵ Luebert 1999, Luebert y Gajardo 2000.

⁵⁶ Ackermann 2001.

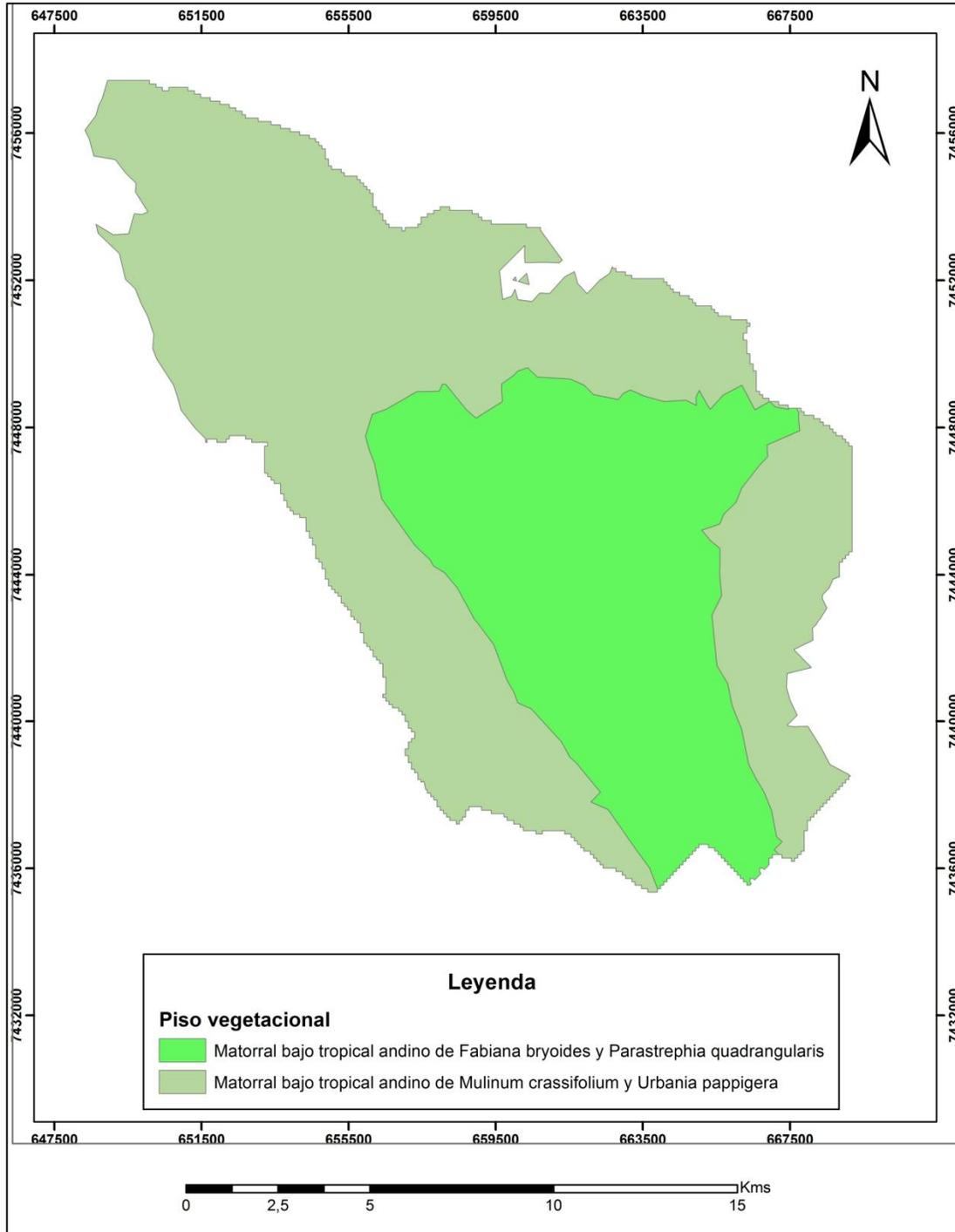
⁵⁷ Ruthsatz 1995, Luebert 1999, Luebert y Gajardo 2000.

⁵⁸ Ackermann 2001.

⁵⁹ Teillier 1998, 2004, Luebert y Gajardo 2000.

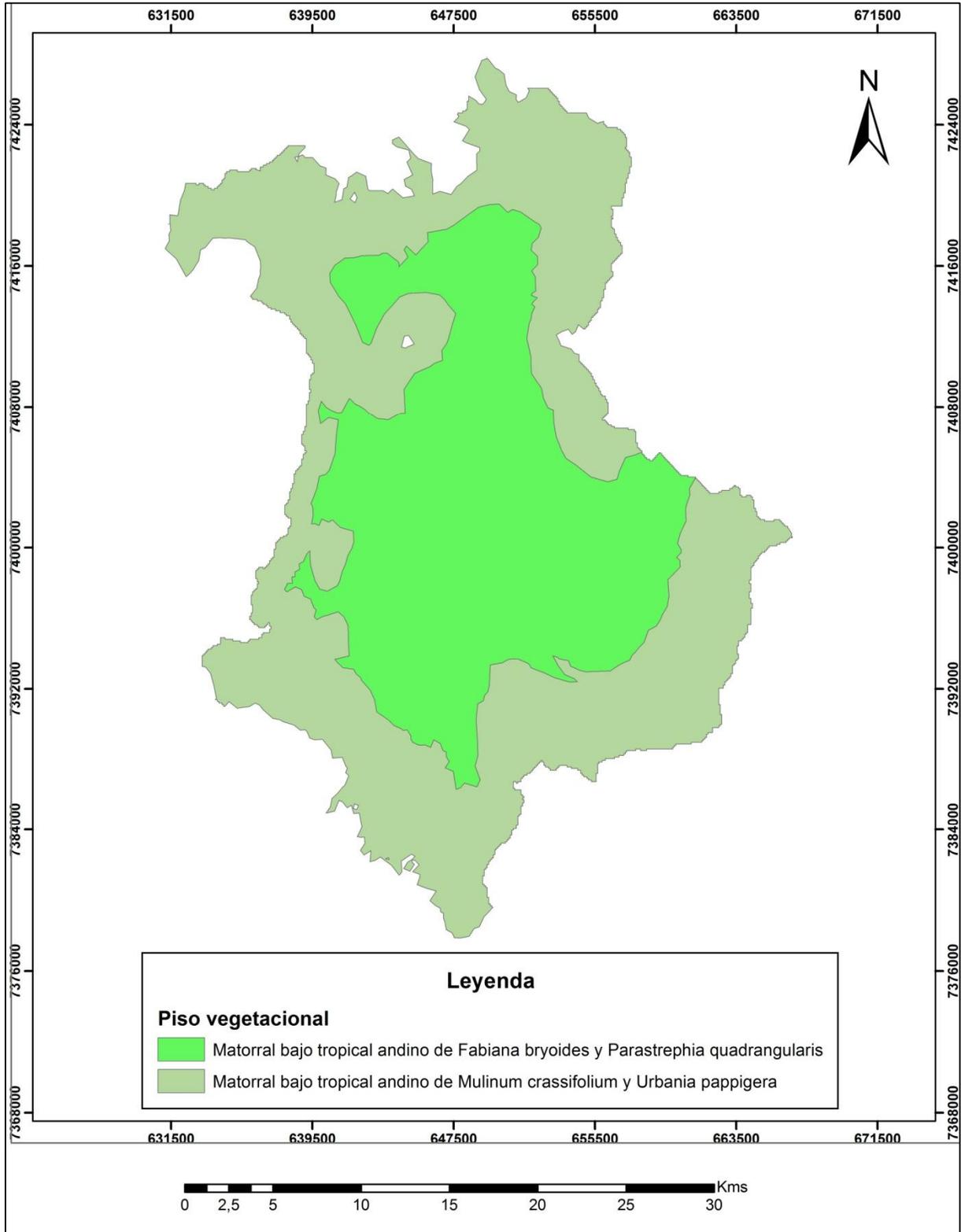


Mapa 16 Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Aguas Calientes 1



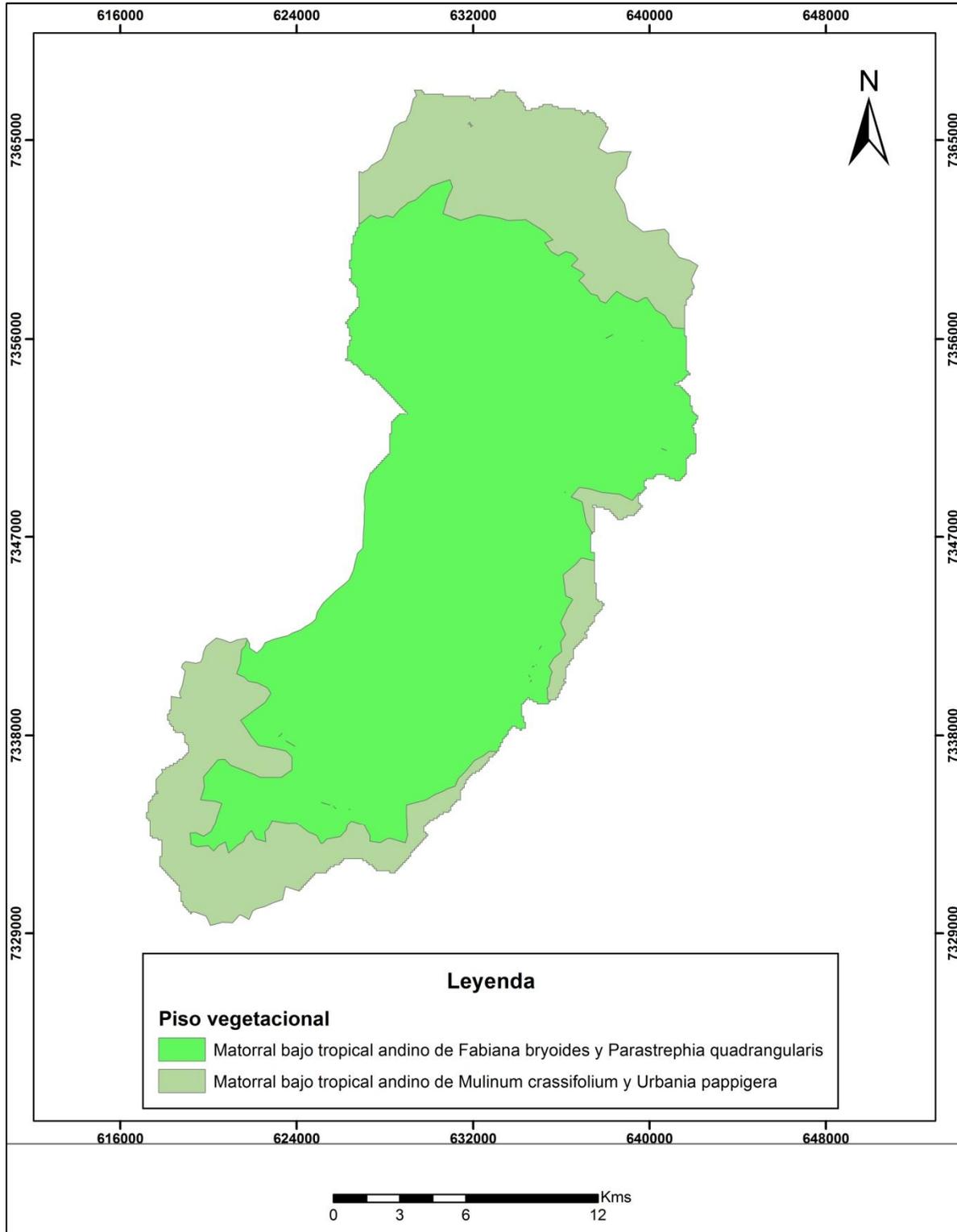


Mapa 17 Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Aguas Calientes 2



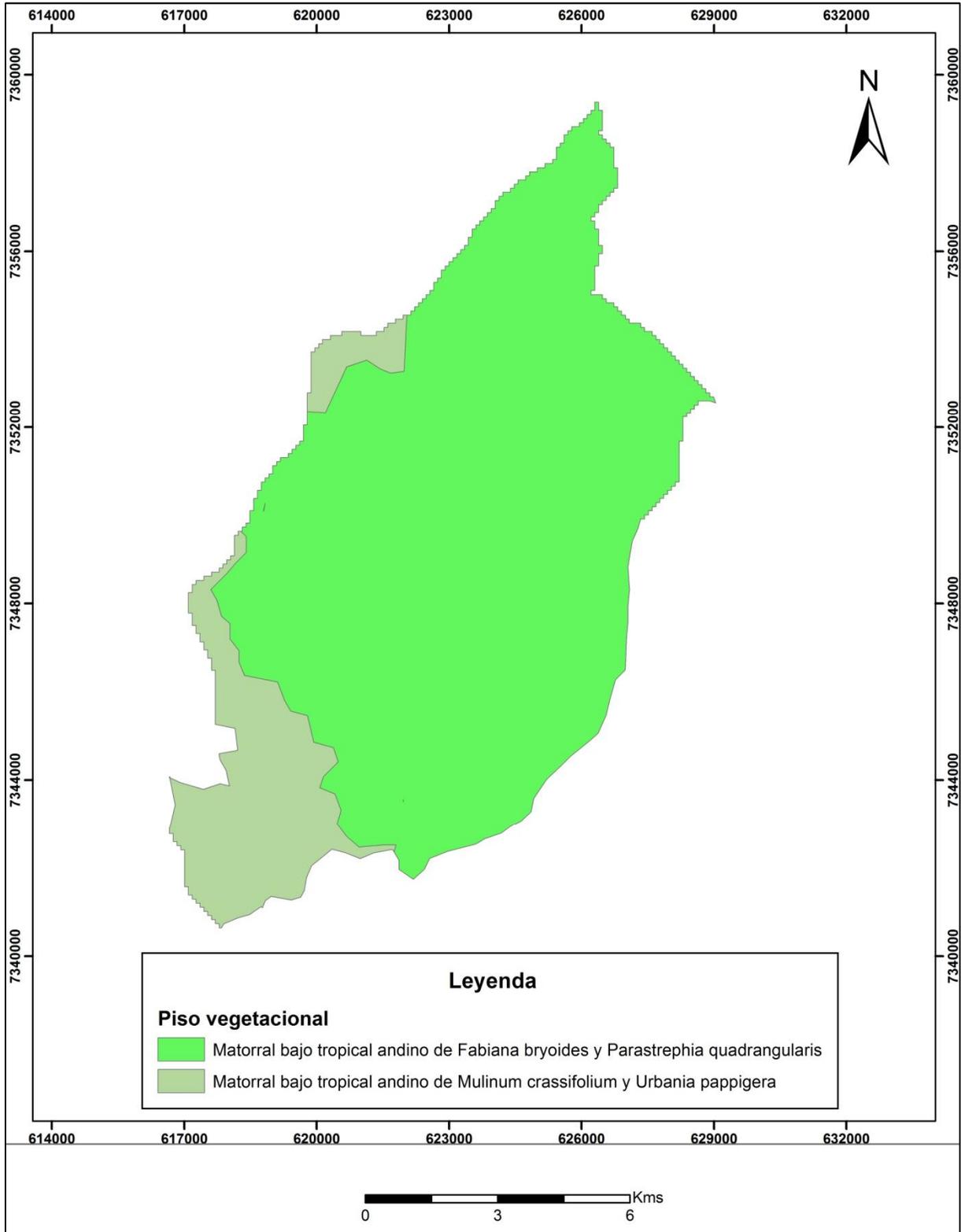


Mapa 18 Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Aguas Calientes 3



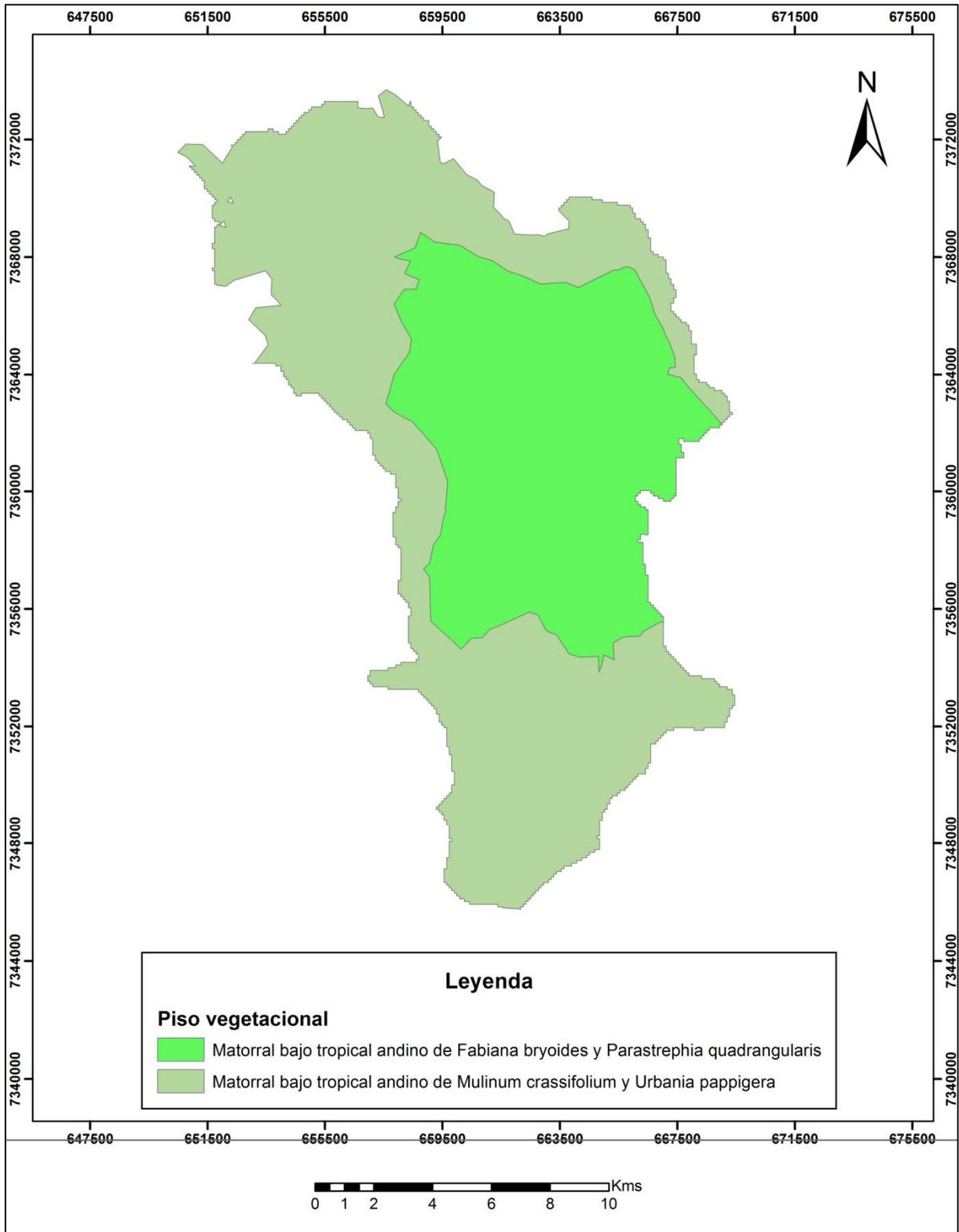


Mapa 19 Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Capur



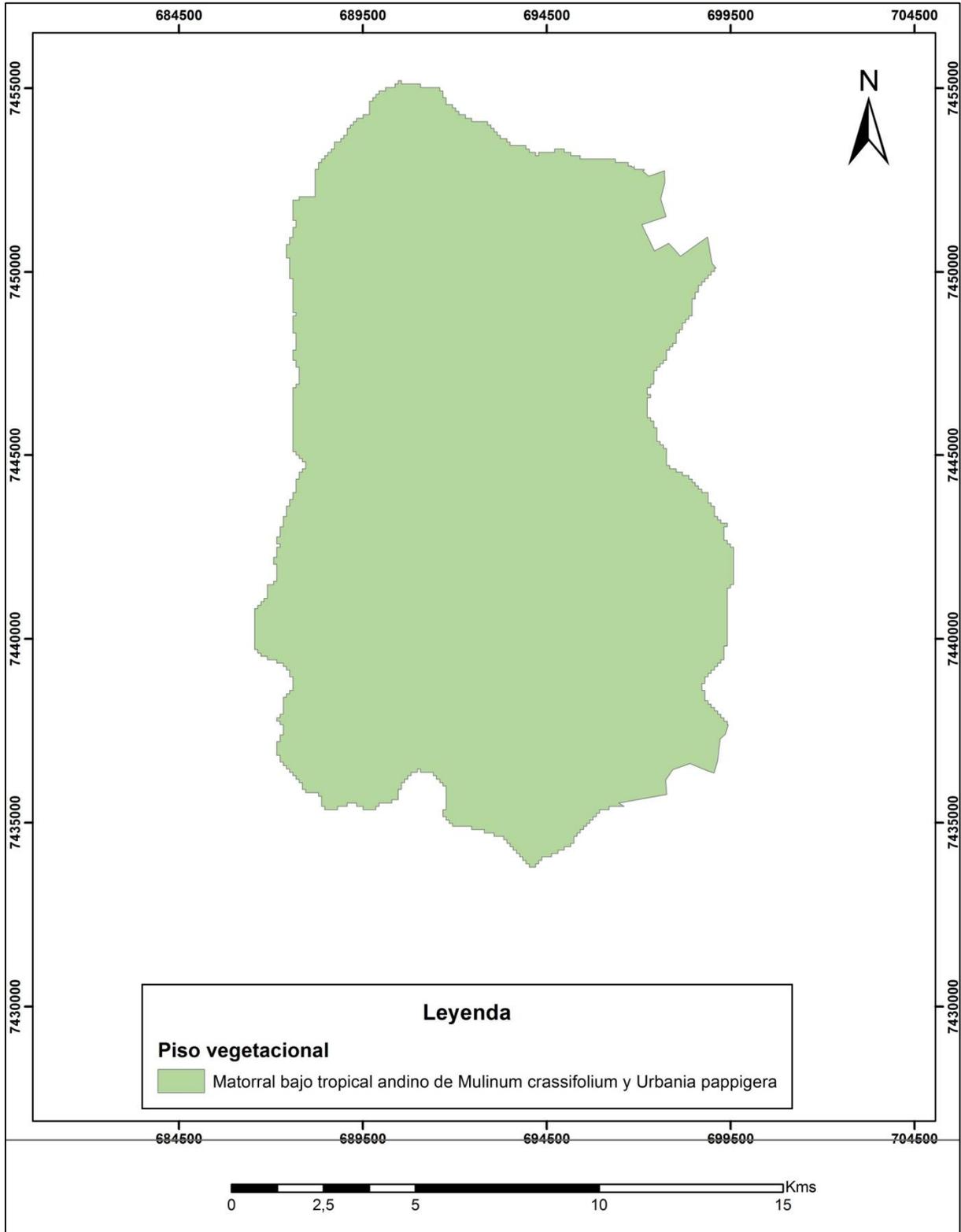


Mapa 20 Pisos vegetacionales en la cuenca del salar del Lago



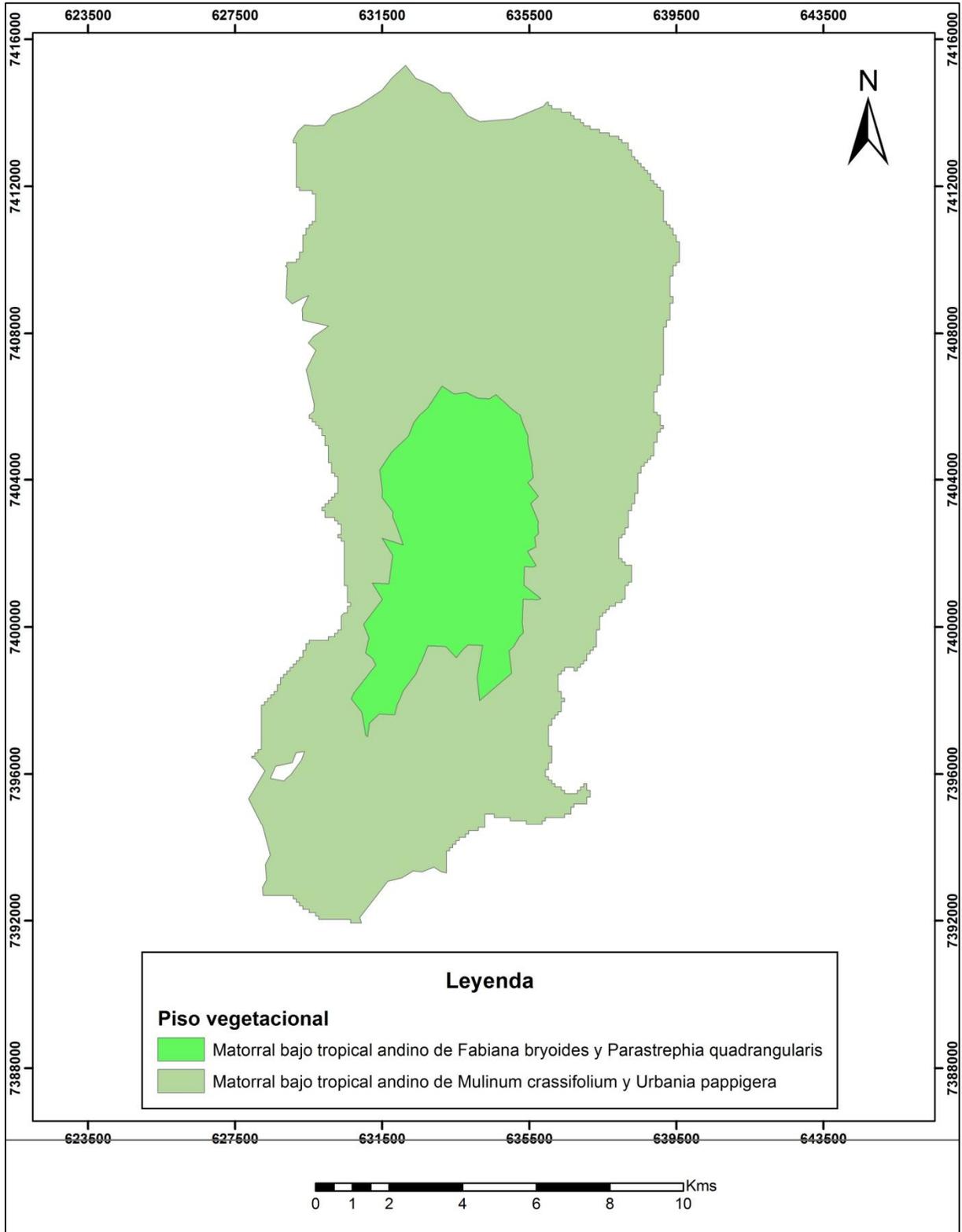


Mapa 21 Pisos vegetacionales en la cuenca de la Laguna Helada



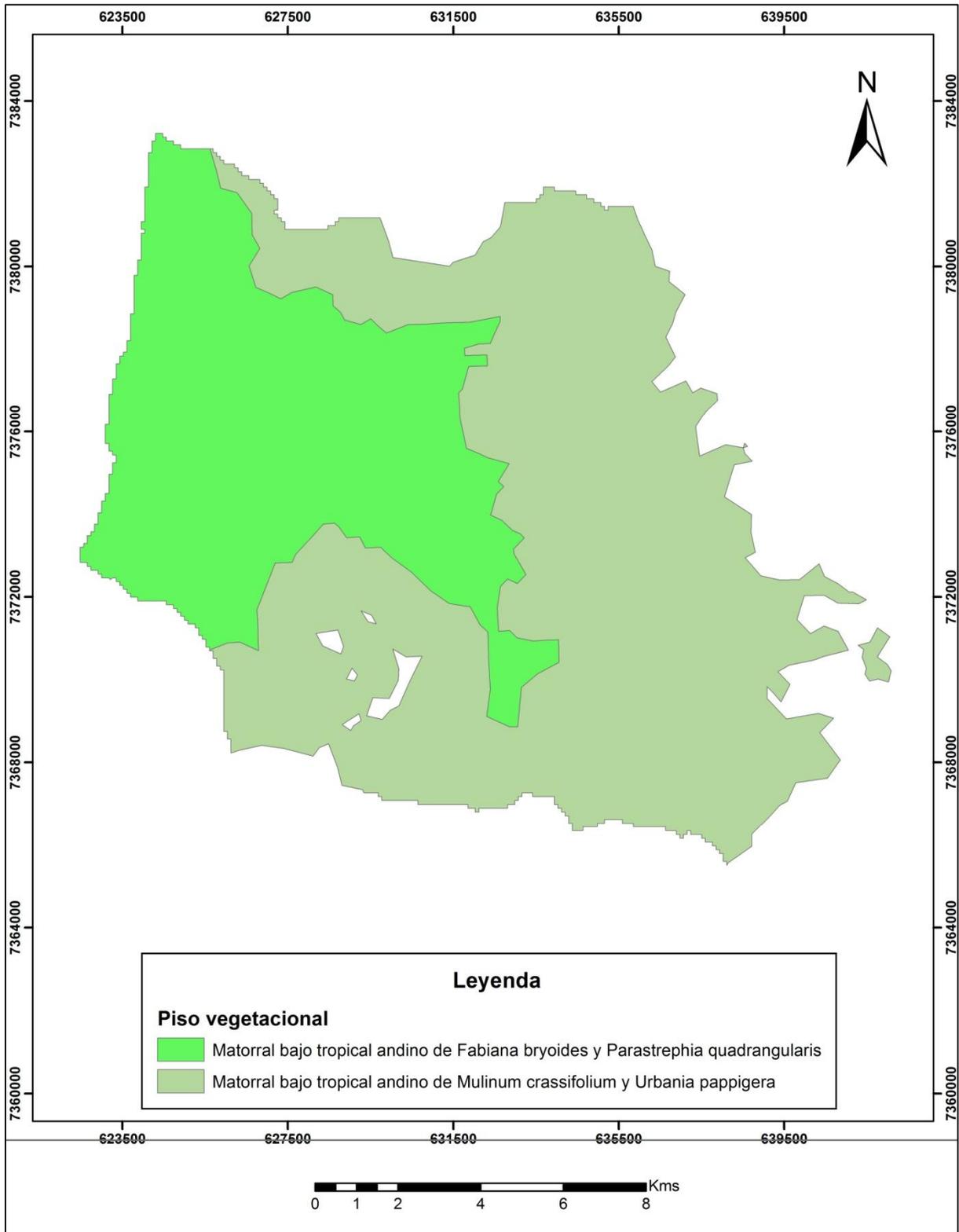


Mapa 22 Pisos vegetacionales en la cuenca de la Laguna Lejía



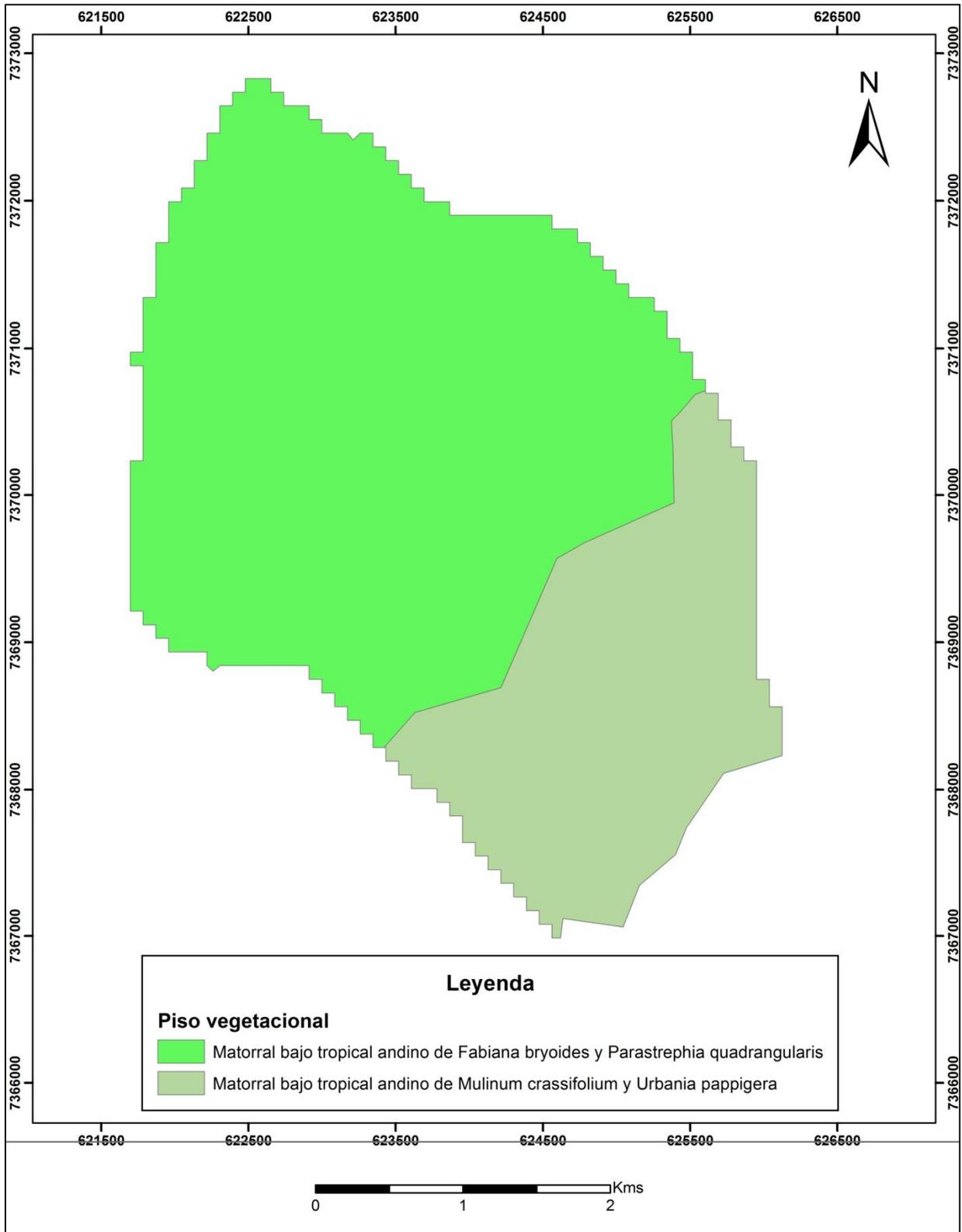


Mapa 23 Pisos vegetacionales en la cuenca de la Laguna Miscanti



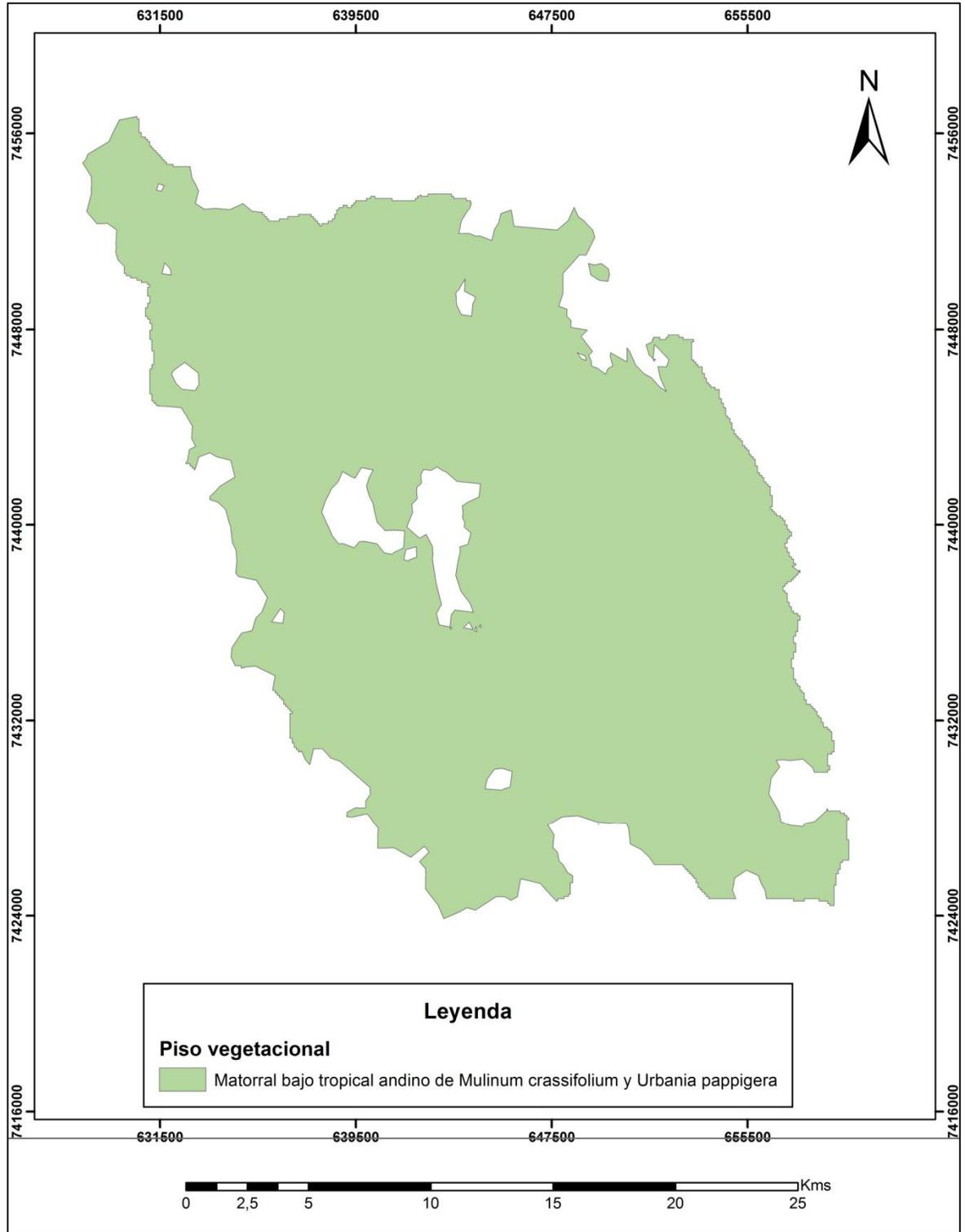


Mapa 24 Pisos vegetacionales en la cuenca de la Laguna Miñiques





Mapa 25 Pisos vegetacionales en la cuenca del salar de Pujsa





De acuerdo a lo presentado en la Tabla 11 y en los mapas, es posible decir que el piso vegetacional correspondiente al matorral bajo tropical andino de *Mulinum crassifolium* y *Urbania pappigera* es el que presenta una mayor superficie, alcanzando los 2.383,9 km², lo que representa el 61,4% de la superficie total de las cuencas estudiadas, el cual está presente en todas las cuencas. Este piso se desarrolla en la altiplanicie en el bioclima xérico tropical y fenología de tipo siempre verde. El piso vegetacional denominado matorral bajo tropical andino de *Fabiana bryoides* y *Parastrephia quadrangularis* tiene una superficie de 1.494,3 km², lo que corresponde al 38,5% de la superficie total de las cuencas estudiadas. Se desarrolla en fisiografía de montaña en el bioclima desértico-tropical y la fenología es del tipo semi-caducifolio y se encuentra en 9 de las 11 cuencas estudiadas.

Luego de haber realizado los cálculos de los índices considerados en este trabajo, se llegó a la información la cual se presenta en la Tabla 12. Con dichos cálculos fue posible realizar una caracterización más completa y los valores aquí presentados fueron utilizados para poder identificar similitudes y diferencias entre las cuencas consideradas así como también para poder tener un conocimiento más completo de ellas, de su comportamiento hidrológico, entender los procesos erosivos, sedimentológicos y poder ver como en cada una de ellas trabaja la alimentación hídrica.

La Tabla 12 entrega las directrices iniciales para poder realizar diferenciaciones entre las cuencas y se propone como punto inicial para desarrollar estudios científicos, con los analizar cuencas. Son en cierta manera los índices básicos que permiten realizar estudios más detallados y específicos en áreas tan interesantes y poco estudiadas como lo han sido las cuencas altiplánicas del norte de nuestro país y las que son ecosistemas muy ricos tanto en biodiversidad como en otros recursos tan indispensables para satisfacer las demandas energéticas del día de hoy y de los años que vendrán.



Tabla 12 Índices hidromorfométricos de las cuencas consideradas.

Nombre de la Cuenca	Superficie de la cuenca (km ²)	Perímetro de la cuenca (km)	Compacidad	Pendiente del dren principal (grados)	Suma de segmentos (n° total de cauces)	Longitud total del drenaje (km)	Densidad drenaje (km/km ²)	Frecuencia del drenaje (Nº/km ²)	Dist. máx entre divisoria y salar o laguna (km)	Nieve Estacional
Salar de Aguas Calientes 1	263,4	99,1	1,7	1,2	56	194,9	0,74	0,21	21,3	No
Salar de Pujsa	633,0	166,5	1,9	0,28	96	274,7	0,43	0,15	34,6	No
Laguna Helada	209,8	86,7	1,7	0,2	37	138	0,66	0,18	12,1	No
Salar de Loyoques o Quisquiró	748,6	195,7	2,0	0,55	81	241,9	0,32	0,11	16,5	No
Salar de Aguas Calientes 2	975,1	233,7	2,1	0,79	122	314,6	0,32	0,13	26,9	Si
Laguna Lejía	196,8	89,8	1,8	5,3	66	171,1	0,87	0,34	16,8	No
Laguna Miscanti	267,7	99	1,7	8,6	16	55,7	0,21	0,06	11,0	Si
Salar Del Lago	270,7	120,6	2,1	1,33	32	96,3	0,36	0,12	14,2	Si
Laguna Miñiques	17,6	22,9	1,5	4,3	8	14,9	0,85	0,45	5,4	No
Salar de Aguas Calientes 3	501,1	154	1,9	1,65	13	57,9	0,12	0,03	11,3	Si
Salar de Capur	121,7	65,1	1,7	1,7	11	22,8	0,19	0,09	5,9	Si



12.2 TIPOLOGÍA PROPUESTA

Con la información que se presenta en la Tabla 12 fue posible generar la tipología para las cuencas, para lo cual se consideró la densidad, frecuencia, pendiente del dren principal, la compacidad, la superficie, el tipo de escurrimiento, la presencia de nieve en las cumbres, el tipo de piso vegetacional, la unidad geológica preponderante y el índice de potencial erosivo como aquellos atributos que nos permitirían entender y generar diferenciaciones entre las 11 cuencas que se estudiaron.

De esta manera, para la densidad, de acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 12 se generaron dos rangos el de valores 0,1 – 0,5 al cual se le asignó el número 1 y para valores de 0,51 – 1 se le asignó un número 2 y para la frecuencia se identificaron también dos rangos, para los valores de 0,01 – 0,15 se le asignó la letra A y para aquellos valores > 0,15 se le asignó la letra B. En la Tabla 13 plantea la siguiente matriz con sus respectivos claves.

Tabla 13 Densidad y frecuencia del drenaje para las cuencas y asignación de claves.

Nombre cuenca	Densidad	Clave asignada	Frecuencia	Clave asignada
Salar de Aguas Calientes 3	0,12	1	0,03	A
Salar de Capur	0,19	1	0,09	A
Laguna Miscanti	0,21	1	0,06	A
Salar de Loyoques o Quisquiró	0,32	1	0,11	A
Salar de Aguas Calientes 2	0,32	1	0,13	A
Salar del Laco	0,36	1	0,12	A
Salar de Pujsa	0,43	1	0,15	A
Laguna Helada	0,66	2	0,18	B
Salar de Aguas Calientes 1	0,74	2	0,21	B
Laguna Miñiques	0,85	2	0,45	B
Laguna Lejía	0,87	2	0,34	B

Respecto al índice de compacidad calculado para las cuencas analizadas, se determinaron tres rangos, los cuales fueron de 1 – 1,5 asignándosele como clave la letra (a); 1,51-2 cuya clave era la letra (b) y > 2 al cual se le asignó la letra (c). Obteniéndose los resultados indicados en la Tabla 14:

Tabla 14 Índice de compacidad para las cuencas y asignación de claves.

Nombre cuenca	Compacidad	Clave
Salar de Aguas Calientes 3	1,9	a
Salar de Capur	1,7	b
Laguna Miscanti	1,7	b
Salar de Loyoques o Quisquiró	2	b
Salar de Aguas Calientes 2	2,1	c



Salar del Laco	2,1	c
Salar de Pujsa	1,9	b
Laguna Helada	1,7	b
Salar de Aguas Calientes 1	1,7	b
Laguna Miñiques	1,5	a
Laguna Lejía	1,8	b

Para la pendiente del dren principal, se determinaron 2 rangos, los cuales fueron de 0 - 5°, considerada como suave (S), de 5 - 10°, considerada como moderada (M), los cuales se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15 Pendientes del dren principal claves asignadas

Nombre cuenca	Pendiente	Clave
Salar de Aguas Calientes 3	1,65	S
Salar de Capur	1,7	S
Laguna Miscanti	8,6	M
Salar de Loyoques o Quisquiró	0,55	S
Salar de Aguas Calientes 2	0,79	S
Salar del Laco	1,33	S
Salar de Pujsa	0,28	S
Laguna Helada	0,2	S
Salar de Aguas Calientes 1	1,2	S
Laguna Miñiques	4,3	S
Laguna Lejía	5,3	M

Con los índices mencionados en las tablas anteriores, se calculó un índice mixto denominado índice de potencialidad erosiva (IPE⁶⁰) donde se relacionaron estos índices, el cual fue calculado utilizando la siguiente fórmula:

$$IPE = IT * Rh / Ic$$

Donde:

IT = índice de torrencialidad, el cual corresponde al producto de la densidad del drenaje por la frecuencia.

⁶⁰ Ferrando F., "Amenazas naturales en el sector oriente de la región Metropolitana de Santiago de Chile: Los movimientos en masa. Tesis de doctorado. 2008.



Rh = relief ratio, el cual corresponde a una adaptación del índice propuesto por Schumm (1956), ya que el de Schumm indica el valor de la pendiente media del dren principal.

Ic = índice de compacidad de Gravelius.

Cuyos rangos son los siguientes:

	IPE
< 0,5	Leve
0,5-1	Moderado
1-1,5	Fuerte
1,5-2	Muy fuerte
>2	Máximo

Fuente: Ferrando, 2008.

Los valores calculados para las cuencas consideradas se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16 Cálculo del IPE por cuenca

Nombre cuencas	Compacidad calculada	Densidad calculada	Frecuencia calculada	Pendiente media	Valor IPE calculado	Índice de potencial erosivo
Salar de Aguas Calientes 3	1,9	0,12	0,03	1,65	0,003	Leve
Salar de Capur	1,7	0,19	0,09	1,7	0,02	Leve
Laguna Miscanti	1,7	0,21	0,06	8,6	0,06	Leve
Salar de Loyoques o Quisquiró	2	0,32	0,11	0,55	0,01	Leve
Salar de Aguas Calientes 2	2,1	0,32	0,13	0,79	0,02	Leve
Salar del Laco	2,1	0,36	0,12	1,33	0,03	Leve
Salar de Pujsa	1,9	0,66	0,15	0,28	0,02	Leve
Laguna Helada	1,7	0,66	0,18	0,2	0,02	Leve
Salar de Aguas Calientes 1	1,7	0,74	0,21	1,2	0,11	Leve
Laguna Miñiques	1,5	0,80	0,40	4,3	0,9	Moderado
Laguna Lejía	1,8	0,87	0,34	5,3	0,5	Moderado

Con los valores calculados, es posible identificar que se presentan dos tipos de IPE, 9 de las 11 cuencas presentan IPE leve y dos presentan IPE moderado.



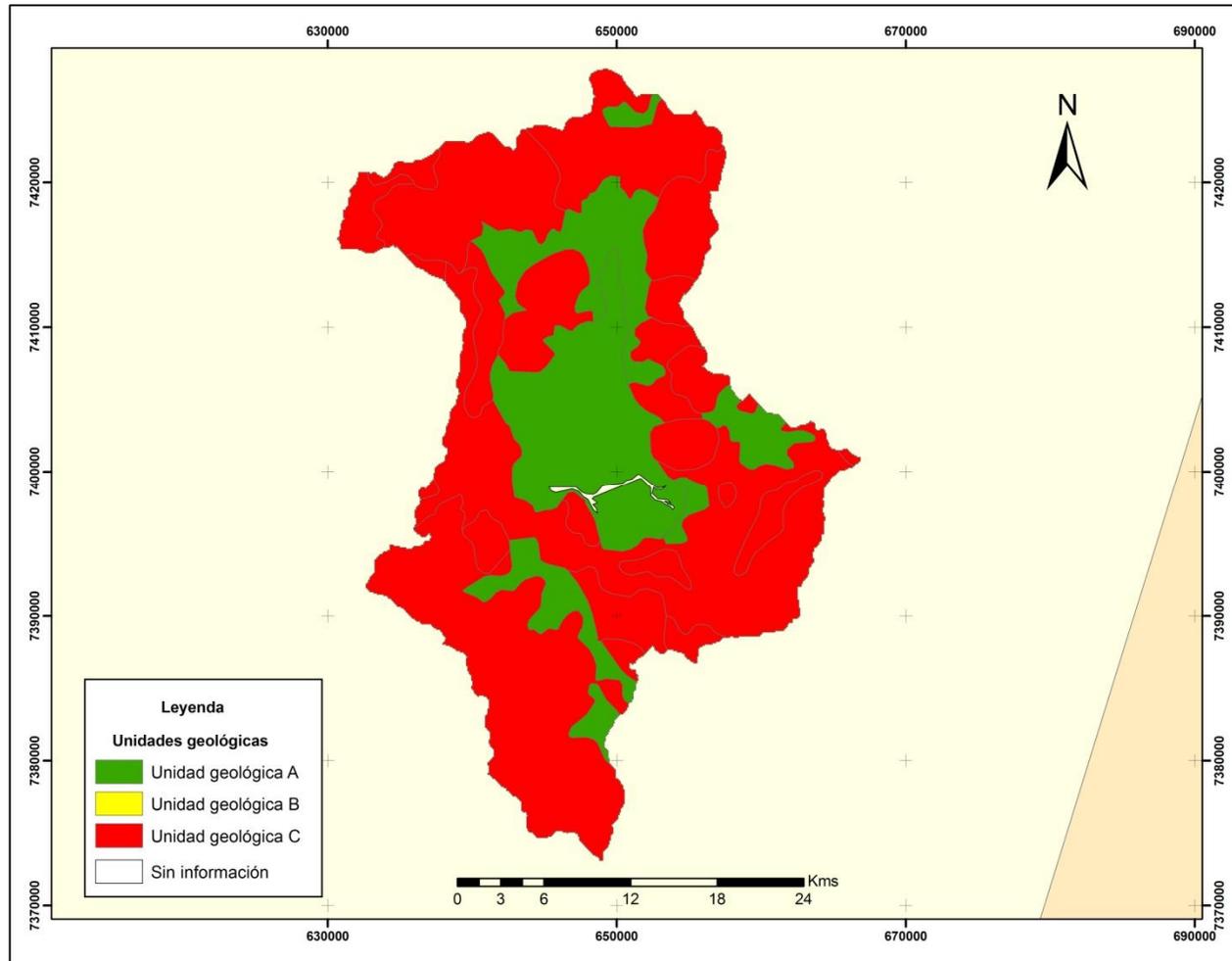
Luego de haber caracterizado las cuencas consideradas, calculado sus parámetros morfométricos e hidrodinámicos se consideró interesante para la nueva tipología de cuencas considerar la variable geología como uno de los factores relevantes para poder generar diferenciaciones entre las cuencas. De esta manera se generaron tres unidades geológicas las cuales se denominaron unidad geológica 1, 2 y 3, cuyas características se presentan en la Tabla 17 y cuya distribución en cada cuenca se presenta en los mapas siguientes.

Tabla 17 Unidades geológicas propuestas

Clasificación	Nombre Asignado	Significado
A	Unidad Geológica A	Zona 1 corresponden a las secuencias sedimentarias del cuaternario (depósitos fluviales, aluviales, eólicos o glaciales), que se encuentran bajo y en las cercanías del cauce principal de la cuenca. Si no hay depósitos cuaternarios, se considera como zona 1 la roca sedimentaria un poco más antigua del plioceno o pleistoceno.
B	Unidad Geológica B	Zona 2 las secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias de las laderas, donde se encuentran quebradas y abanicos aluviales esporádicos.
C	Unidad Geológica C	Zona 3 secuencias volcánicas, rocas intrusivas y metamórficas con baja permeabilidad

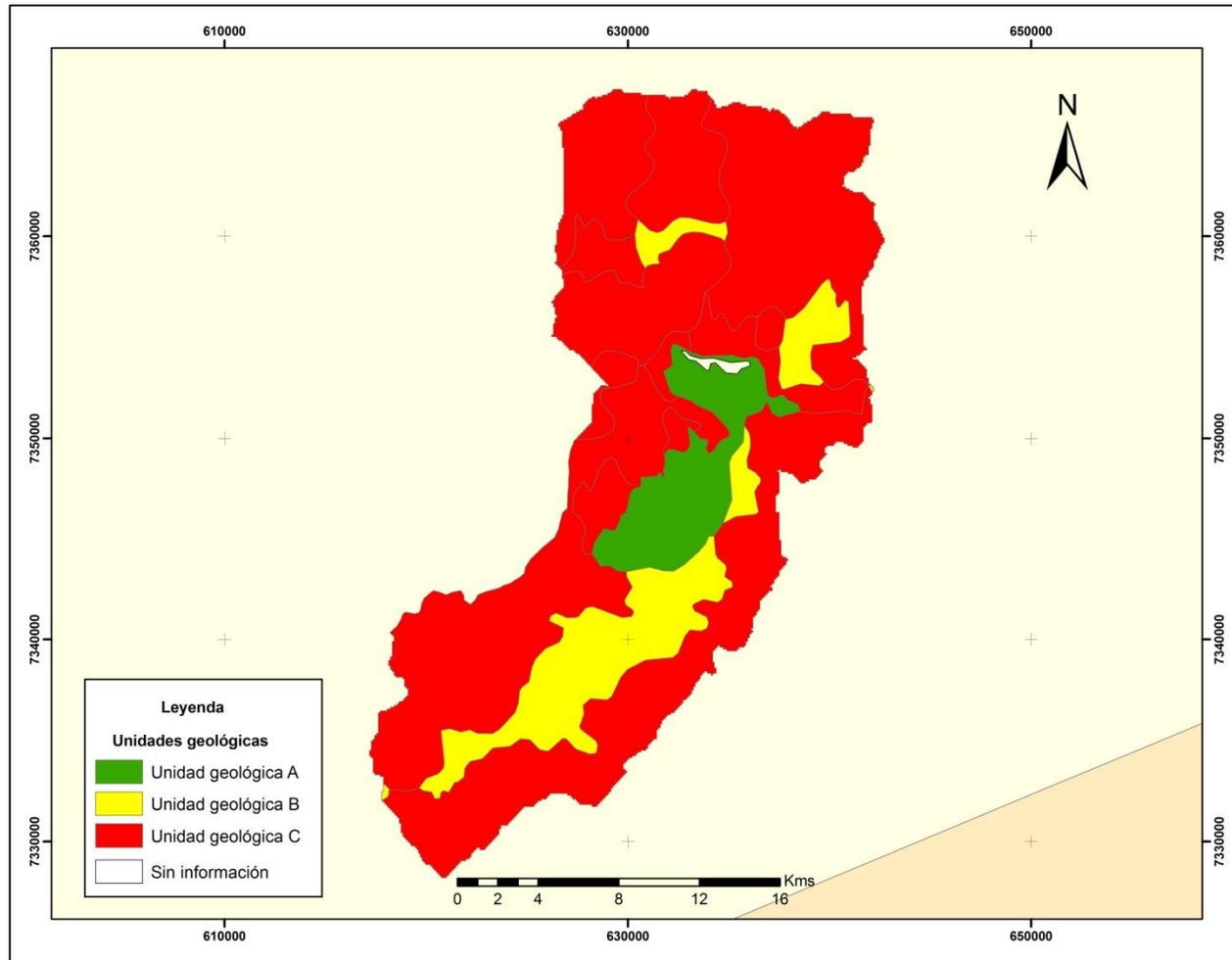


Mapa 26 Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 2



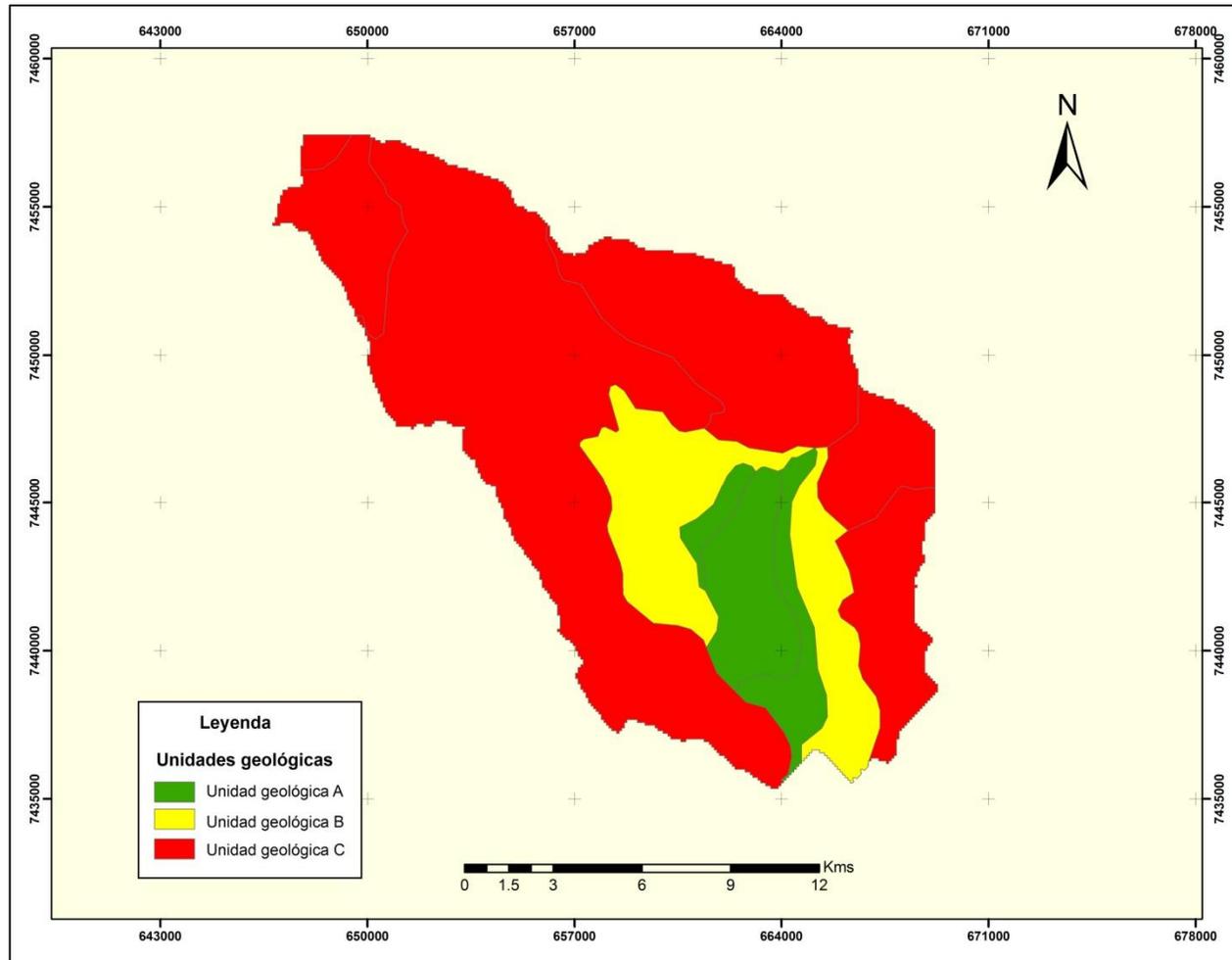


Mapa 27 **Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 3**



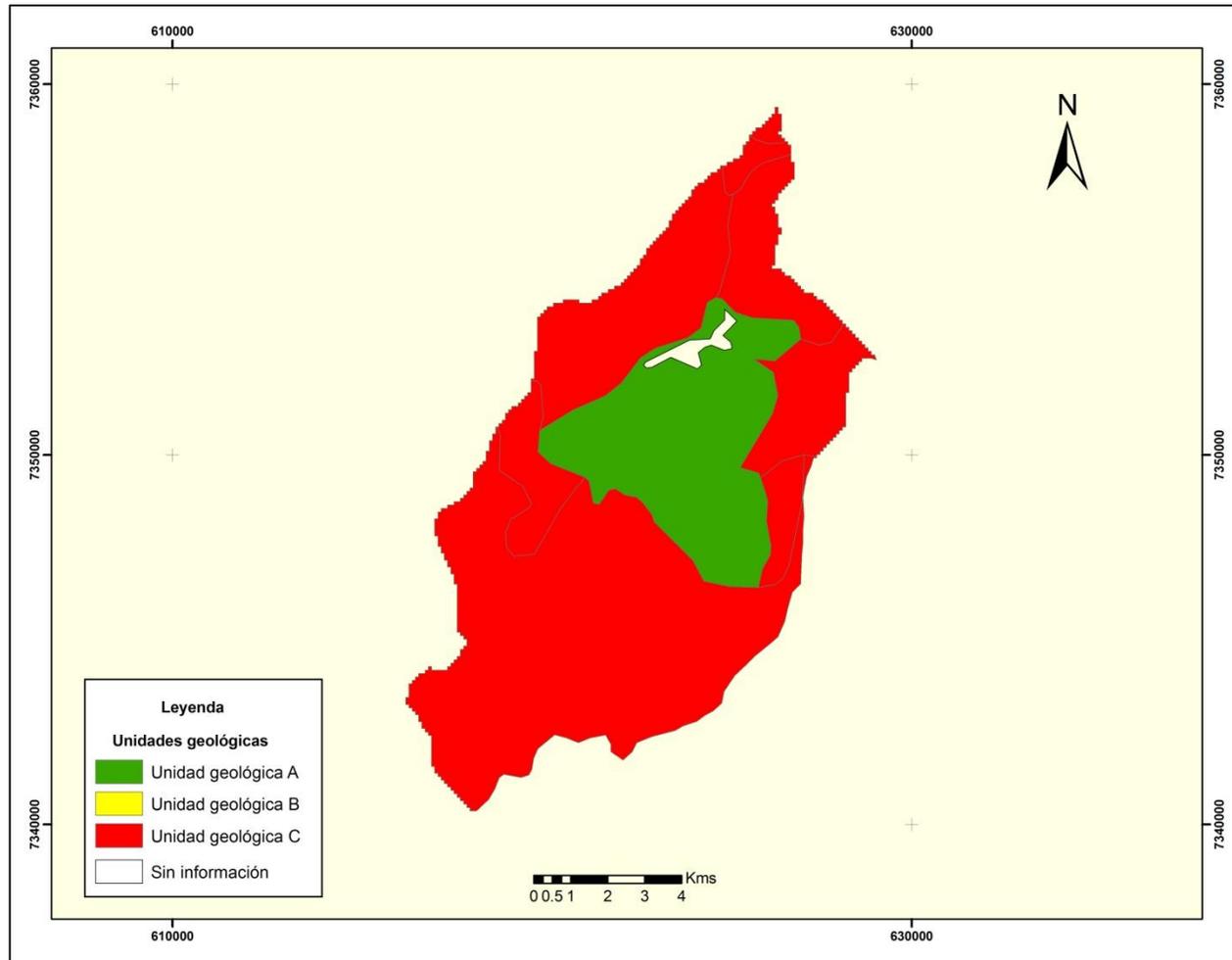


Mapa 28 **Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Aguas Calientes 1**



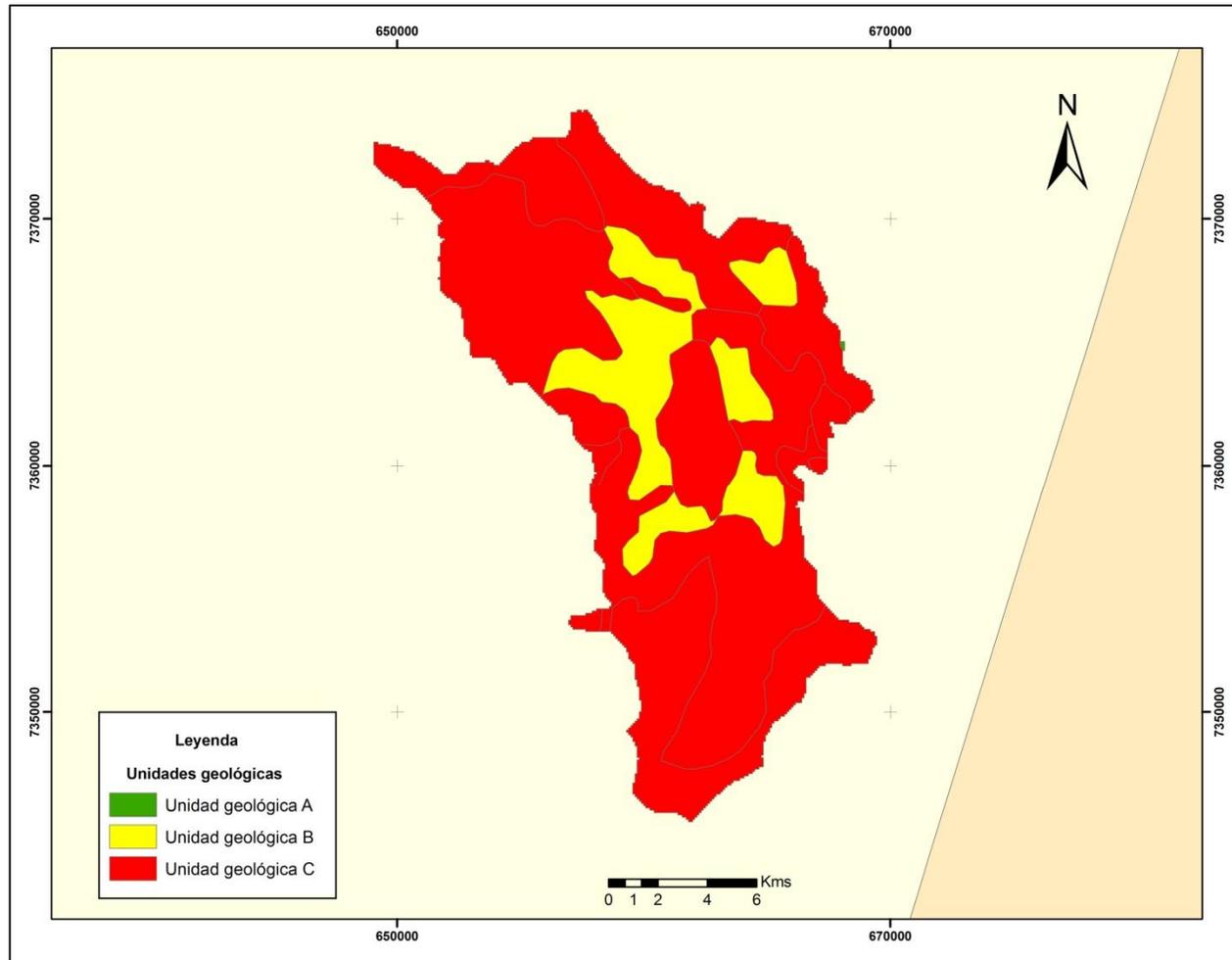


Mapa 29 Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Capur



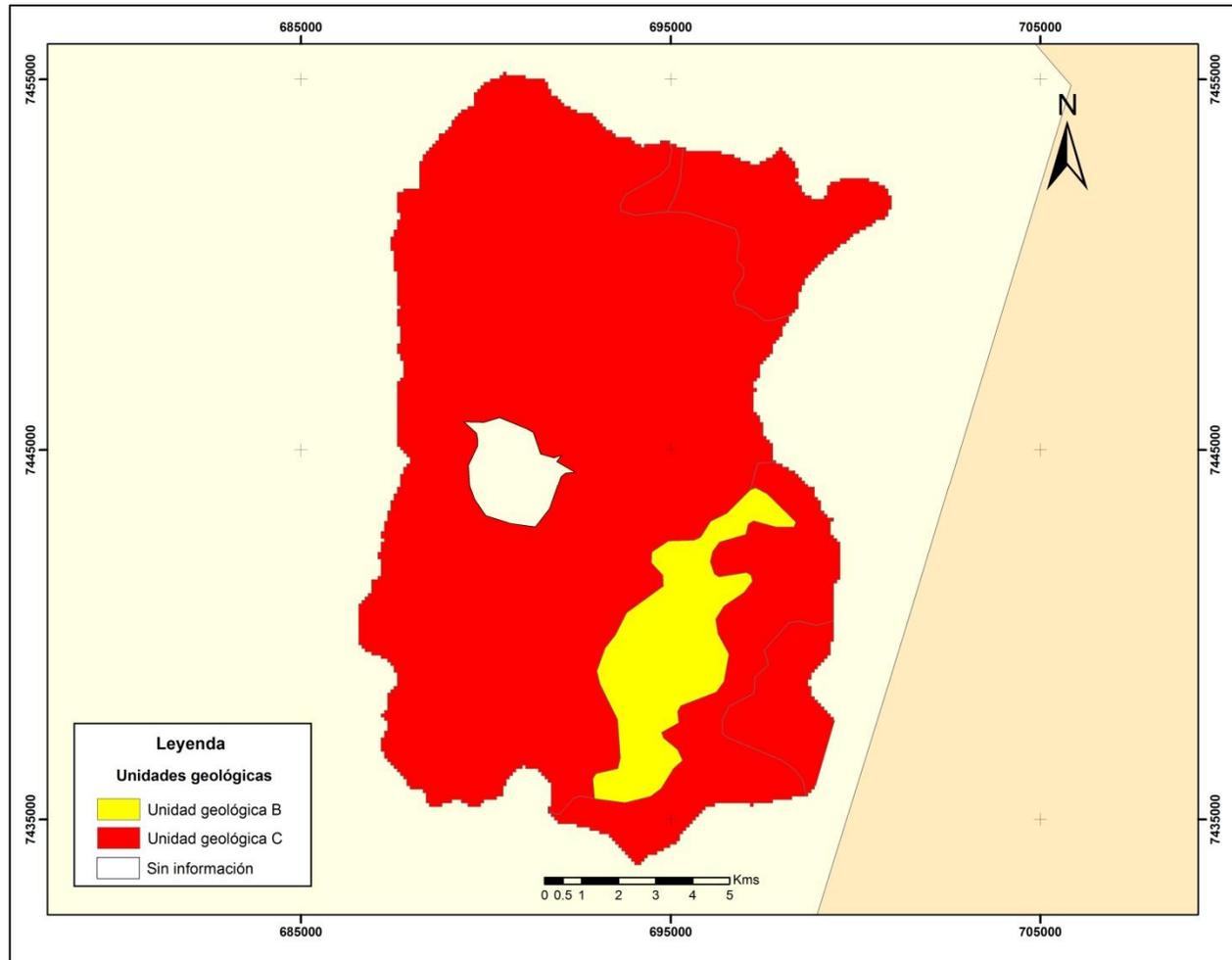


Mapa 30 **Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar del lago**



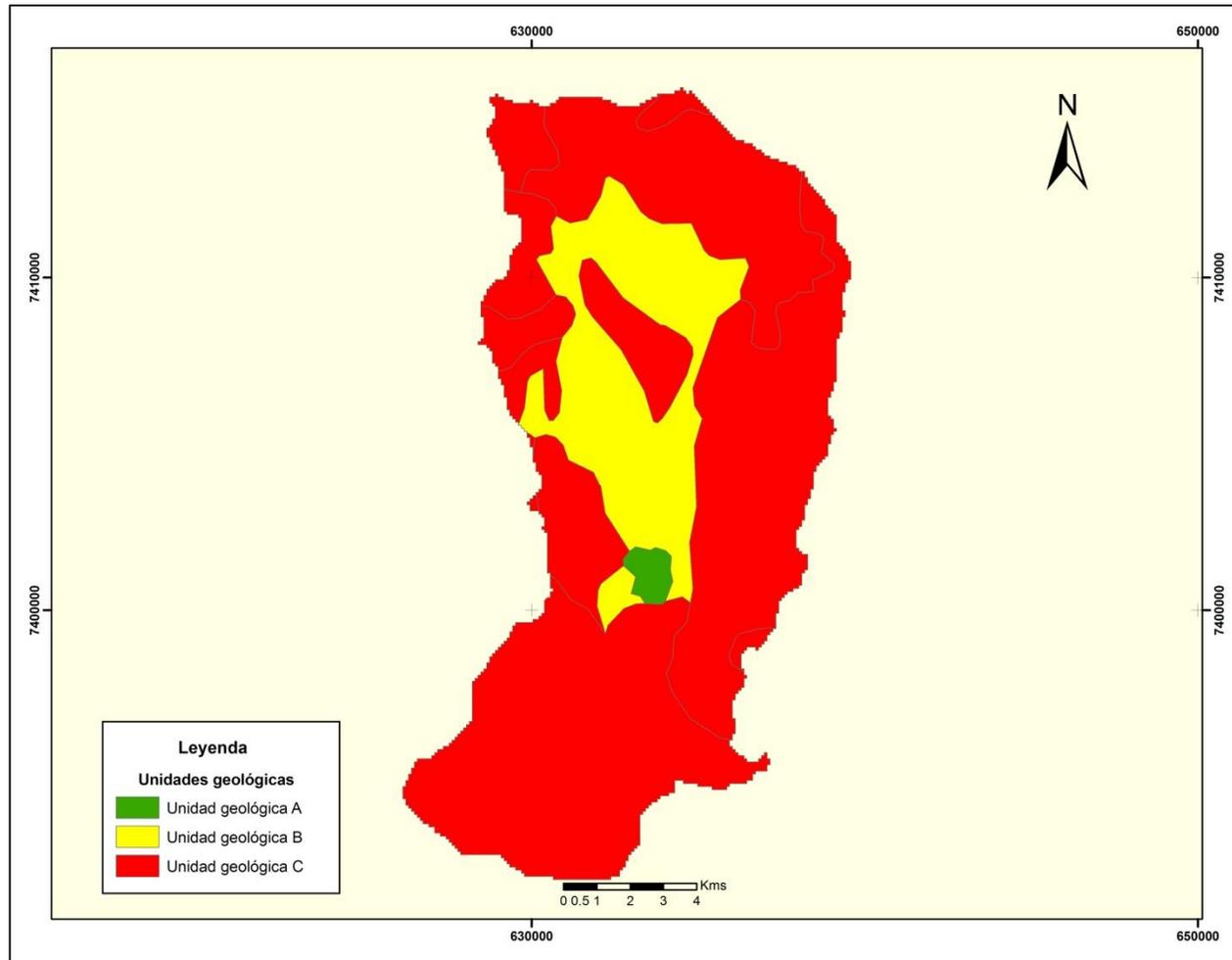


Mapa 31 **Unidades geológicas existentes en la cuenca Laguna Helada**



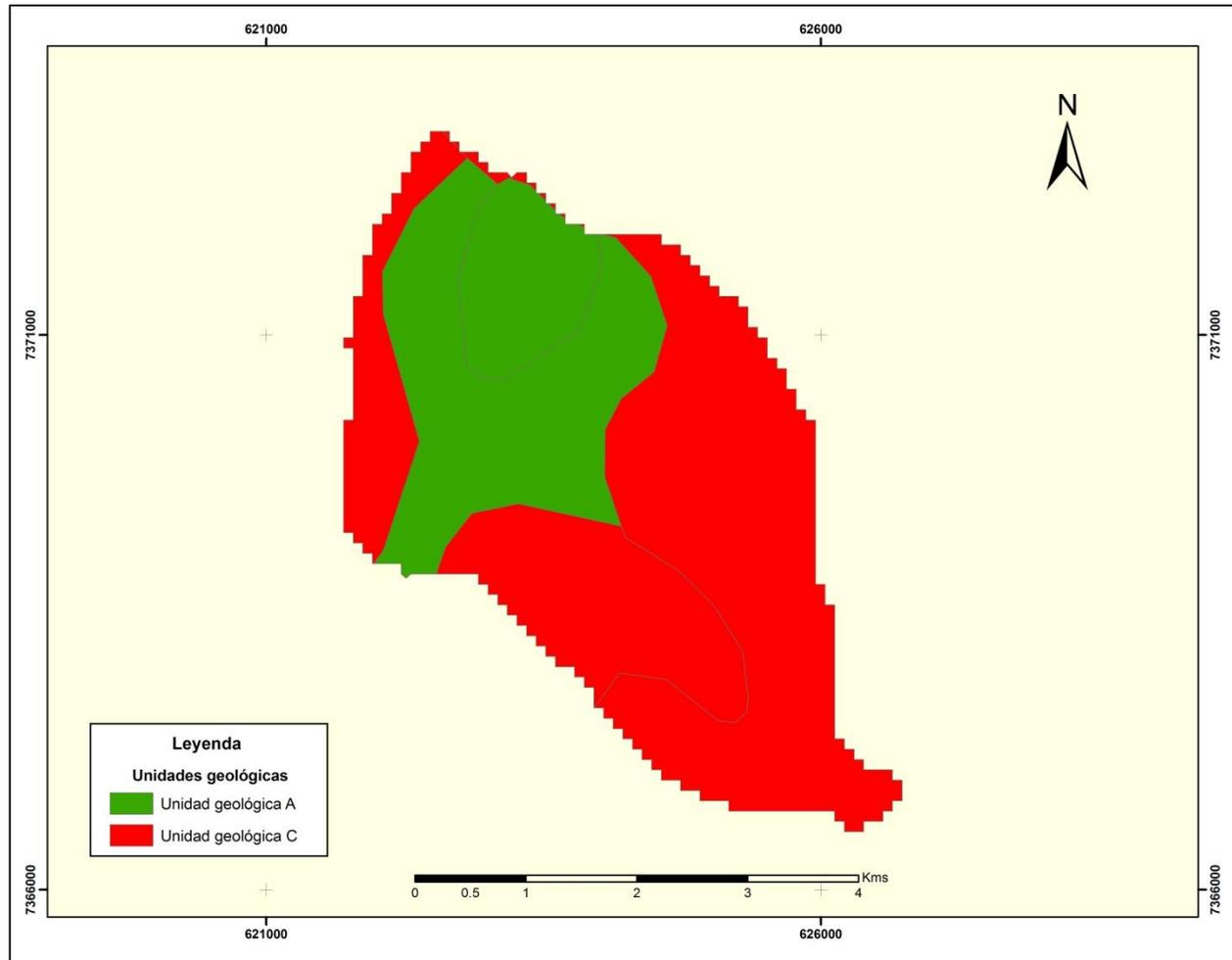


Mapa 32 **Unidades geológicas existentes en la cuenca Laguna Lejía**



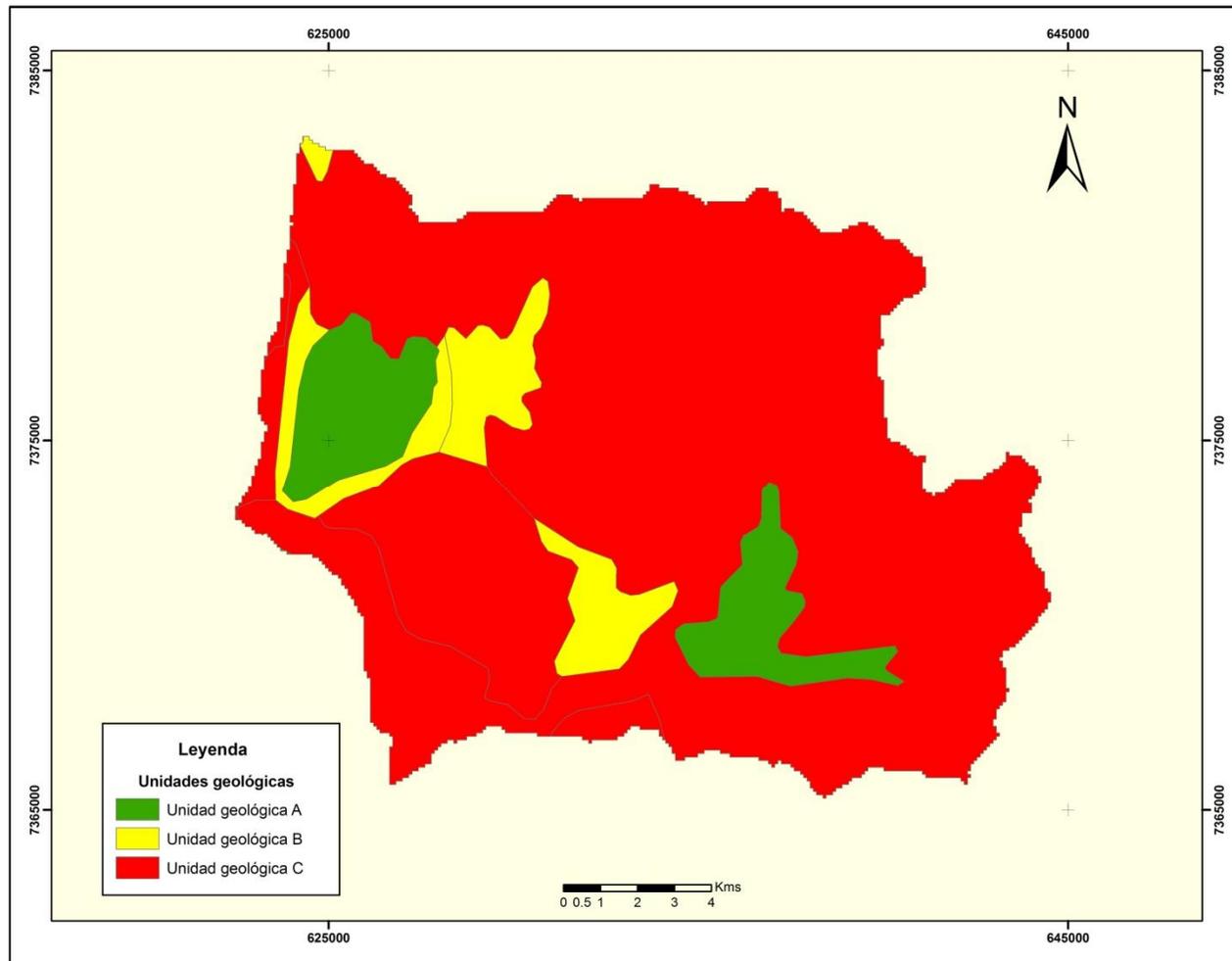


Mapa 33 **Unidades geológicas existentes en la cuenca Laguna Miñiques**



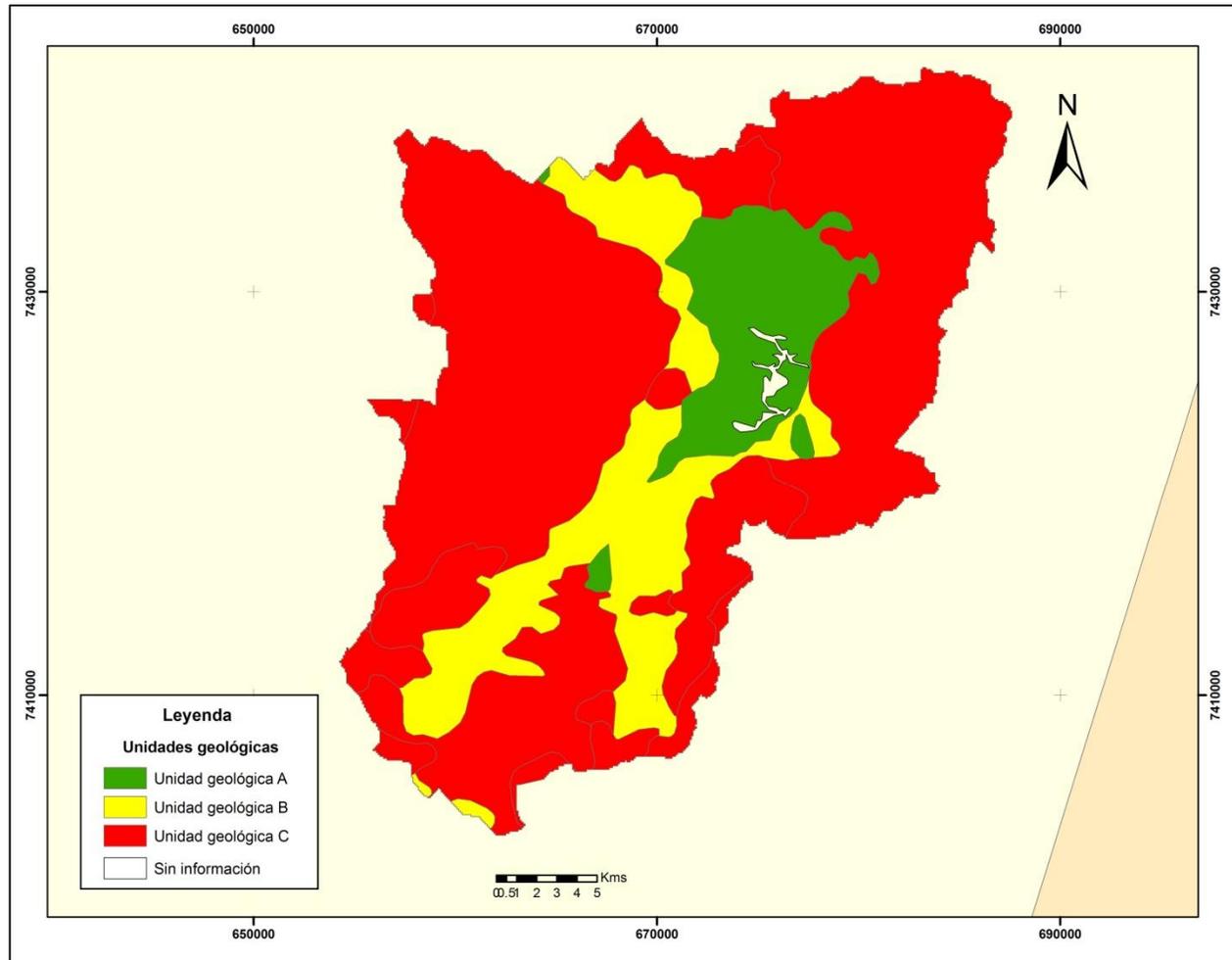


Mapa 34 **Unidades geológicas existentes en la cuenca Laguna Miscanti**



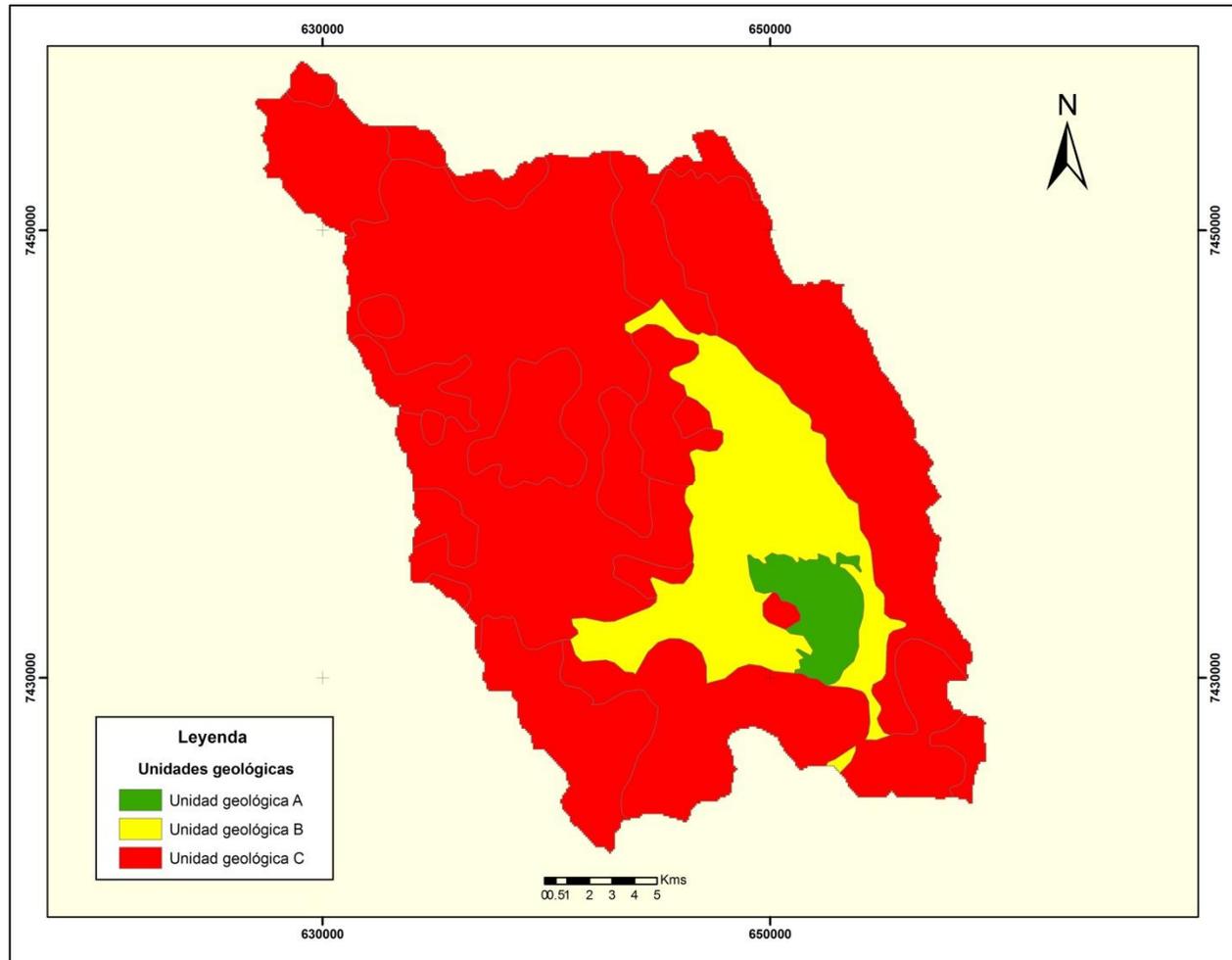


Mapa 35 Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Loyoques o Quisquiró





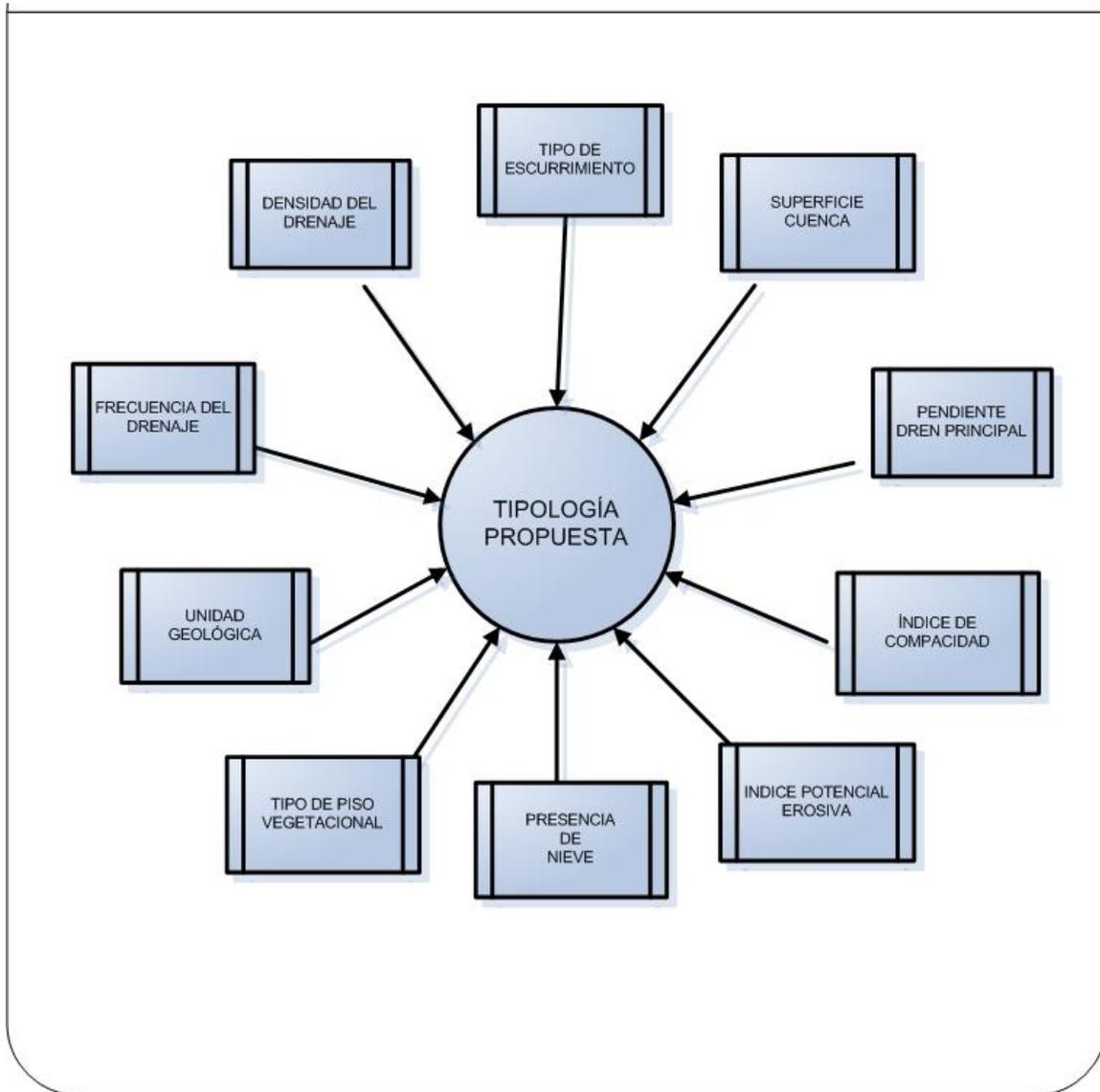
Mapa 36 Unidades geológicas existentes en la cuenca del salar de Pujsa





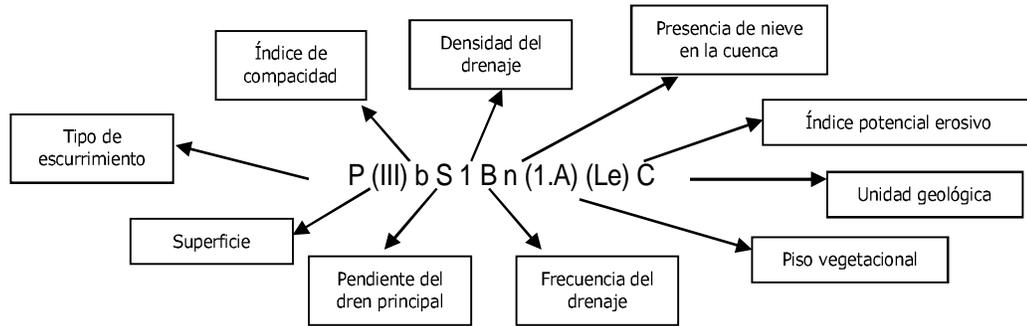
12.3 APLICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA PROPUESTA

Luego de analizar todos los indicadores y las variables consideradas en esta investigación, y usando como guía la clasificación hidrodinámica propuesta por Ferrando (1993), se logró la siguiente propuesta de tipología para las cuencas consideradas:





Generándose la siguiente ecuación, la cual considera todas las variables utilizadas para clasificar las cuencas:



De acuerdo a lo cual, las cuencas presentarían la siguiente tipología:

Tabla 18 Tipología propuesta

Cuenca	Tipología propuesta	Significado
Laguna Helada	P(III)bS2Bn(1.A)(Le)C	<p>Escorrentamiento perenne con aporte a la laguna.</p> <p>Rango de superficie: 100 – 300 km².</p> <p>Índice de Compacidad: 1,70</p> <p>Pendiente dren principal: 0,2° (Suave)</p> <p>Densidad del drenaje: 0,66</p> <p>Frecuencia del drenaje: 0,18</p> <p>Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: No</p> <p>Piso vegetacional: Matorral</p> <p>IPE: 0,11 (Leve)</p> <p>Unidad geológica predominante (> 88,8% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>
Salar de Pujsa	E(IV)bSBn(1.A)(Le)C	<p>Escorrentamiento estacional con aporte al salar.</p> <p>Rango de superficie: > 300 km².</p> <p>Índice de Compacidad: 1,9</p> <p>Pendiente dren principal: 0,28° (Suave)</p> <p>Densidad del drenaje: 0,43</p> <p>Frecuencia del drenaje: 0,15</p> <p>Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: No</p> <p>Piso vegetacional: Matorral</p> <p>IPE: 0,02 (Leve)</p> <p>Unidad geológica predominante (> 82% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>



Cuenca	Tipología propuesta	Significado
Salar de Aguas Calientes 1	E(III)bS2Bn(1.A)(Le)C	<p>Escurrimiento estacional con aporte al salar.</p> <p>Rango de superficie: 100-300 km².</p> <p>Índice de Compacidad: 1,70.</p> <p>Pendiente dren principal: 1,2°(Suave)</p> <p>Densidad del drenaje: 0,74</p> <p>Frecuencia del drenaje: 0,21</p> <p>Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: No</p> <p>Piso vegetacional: Matorral</p> <p>IPE: 0,11 (Leve)</p> <p>Unidad geológica predominante (> 73% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>
Salar de Aguas Calientes 2	E(IV)cS1Ay(1.A)(Le)C	<p>Escurrimiento estacional con aporte al salar.</p> <p>Rango de superficie: >300 km².</p> <p>Índice de Compacidad: 2,1</p> <p>Pendiente dren principal: 0,79 °(Suave)</p> <p>Densidad del drenaje: 0,32</p> <p>Frecuencia del drenaje: 0,13</p> <p>Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: Si</p> <p>Piso vegetacional: Matorral</p> <p>IPE: 0,02 (Leve)</p> <p>Unidad geológica predominante (> 73% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>
Laguna Lejía	E(III)bM2Bn(1.A)(Mo)C	<p>Escurrimiento estacional con aporte a la laguna.</p> <p>Superficie: 100-300 km².</p> <p>Índice de Compacidad: 1,8.</p> <p>Pendiente dren principal: 5,3° (Moderada)</p> <p>Densidad del drenaje: 0,87</p> <p>Frecuencia del drenaje: 0,34</p> <p>Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: No</p> <p>Piso vegetacional: Matorral</p> <p>IPE: 0,5 (Moderado)</p> <p>Unidad geológica predominante (> 78% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>



Cuenca	Tipología propuesta	Significado
Salar del Laco	O(III)cS1Ay(1.A)(Le)C	<p>Escurrimiento ocasional con aporte al salar. Superficie: 100-300 km². Índice de Compacidad: 2,1. Pendiente dren principal: 1,33° (Suave) Densidad del drenaje: 0,36 Frecuencia del drenaje: 0,12 Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: Si Piso vegetacional: Matorral IPE: 0,03 (Leve) Unidad geológica predominante (> 77% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>
Salar de Aguas Calientes 3	E(IV)bS1Ay(1.A)(Le)C	<p>Escurrimiento estacional con aporte al salar. Superficie: > 300 km². Índice de Compacidad: 1,9 Pendiente dren principal: 1,65° (Suave) Densidad del drenaje: 0,15 Frecuencia del drenaje: 0,03 Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: Si Piso vegetacional: Matorral IPE: 0,003 (Leve) Unidad geológica predominante (> 76% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>
Salar de Capur	E(III)bS1Ay(1.A)(Le)C	<p>Escurrimiento estacional con aporte al salar. Superficie: 100-300 km². Índice de Compacidad: 1,70. Pendiente dren principal: 1,7° (Suave) Densidad del drenaje: 0,19 Frecuencia del drenaje: 0,09 Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: Si Piso vegetacional: Matorral IPE: 0,02 (Leve) Unidad geológica predominante (> 77% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>



Cuenca	Tipología propuesta	Significado
Salar de Loyoques o Quisquiró	E(IV)cS1An(1.A)(Le)C	<p>Escorrentamiento estacional con aporte al salar</p> <p>Superficie: >300 km².</p> <p>Índice de Compacidad: 2,0</p> <p>Pendiente dren principal: 0,55° (Suave)</p> <p>Densidad del drenaje: 0,32</p> <p>Frecuencia del drenaje: 0,11</p> <p>Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: No</p> <p>Piso vegetacional: Matorral</p> <p>IPE: 0,01 (Leve)</p> <p>Unidad geológica predominante (> 70% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>
Laguna Miscanti	P(III)bM1Ay(1.A)(Le)C	<p>Perenne con aporte a la laguna</p> <p>Superficie: 100-300 km².</p> <p>Índice de Compacidad: 1,70.</p> <p>Pendiente dren principal: 8,6° (Moderada)</p> <p>Densidad del drenaje: 0,21</p> <p>Frecuencia del drenaje: 0,06</p> <p>Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: Si</p> <p>Piso vegetacional: Matorral</p> <p>IPE: 0,06 (Leve)</p> <p>Unidad geológica predominante (> 83% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>
Laguna Miñiques	P(I)aS2Bn(1.A)(Mo)C	<p>Perenne con aporte a la laguna</p> <p>Superficie: 5-20 km².</p> <p>Índice de Compacidad: 1,50</p> <p>Pendiente dren principal: 4,3° (Suave)</p> <p>Densidad del drenaje: 0,85</p> <p>Frecuencia del drenaje: 0,45</p> <p>Presencia de nieve en las cumbres de la cuenca: No</p> <p>Piso vegetacional: Matorral</p> <p>IPE: 0,9 (Moderado)</p> <p>Unidad geológica predominante cuenca (> 64% de la superficie de la cuenca): unidad geológica C.</p>



La propuesta de tipología, como se mencionó anteriormente se basa en la clasificación hidrodinámica de Ferrando (op.cit), pero se agregan otros parámetros como por ejemplo la presencia de nieve, el piso vegetacional dominante en la cuenca, el índice de potencialidad erosiva y la unidad geológica que presente la mayor superficie en la cuenca analizada.

Esta tipología se propone con la finalidad de que pueda seguir complementándose y potenciando a medida que se posea de mejor información de las cuencas que se considerarán en los estudios.

Respecto a la unidad geológica, todas las cuencas se agruparon bajo las mismas unidades geológicas integradas, ya que se encuentran en la zona altiplánica, muy cerca una de otra y debido a que los procesos de formación de ellas ha sido el mismo. Proponer una tipología como esta puede ser interesante de aplicar en cuencas de distintas zonas climáticas, de diferentes regiones, que presenten otras coberturas vegetacionales y otra geología, para así poder ver los comportamientos y realizar comparaciones entre ellas y poder plantear nuevas maneras de estudiar y analizar sistemas tan interesantes, completos y dinámicos como son las cuencas hidrológicas.

Esta discusión se deja abierta para futuros estudios y se demuestra la necesidad imperiosa de ir innovando, modificando y actualizando esta tipología. Así como también queda demostrado que las cuencas son sistemas dinámicos, diferentes unos de otros y que son unidades complejas y que en su interior poseen muchas variables y parámetros los cuales nos indican las directrices de sus comportamientos y de los procesos que al interior de ellas suceden.



12.4 POTENCIALIDADES DE USO

Uno de los objetivos específicos planteados en el comienzo de esta investigación consiste en la propuesta de potencialidades de uso para estas cuencas altiplánicas desde un punto de vista sostenible y sustentable.

Es así como se plantean dos tipos de usos potenciales para estas áreas, una de ellas responde a la necesidad de preservar la biosfera, como especie de reserva ecológica para la conservación de la biodiversidad y por otro lado se plantea un uso enfocado netamente a satisfacer una necesidad muy importante para la población de hoy en día, el cual consiste en que algunas de estas cuencas sean explotadas para poder extraer las enormes reservas de litio y otras sales existentes en los salares del norte de nuestro país. Si bien ambas potencialidades son completamente opuestas una de la otra, esto se ha hecho con la finalidad de demostrar que la zona altiplánica es muy rica tanto biológicamente como económicamente, motivo por el cual, se propone que deben realizarse planes de manejo en las cuencas de esta zona ya sea para proteger a los ecosistemas existentes como para poder aprovechar los recursos minerales disponibles de modo sustentable (amigable con los ecosistemas).

12.4.1 Reservas para la conservación de la biodiversidad

De acuerdo al Convenio sobre diversidad biológica, suscrito y ratificado por Chile en el año 1994, la biodiversidad se refiere a la cantidad y variedad de los organismos vivos existentes en el planeta la cual está definida en términos de genes, especies y ecosistemas.

Los seres humanos dependemos de la diversidad biológica para nuestra supervivencia. Por lo tanto, es posible decir que "biodiversidad" es sinónimo de "vida sobre la tierra". Debido a lo anterior, y al hecho de que la biodiversidad es el eje de la vida sobre la tierra, es necesario concentrar los esfuerzos en la conservación de ésta, incluyendo el uso sustentable de sus componentes.

La biodiversidad comprende ecosistemas, comunidades de especies animales y vegetales, las propias especies y sus relaciones y recursos genéticos. Toda la diversidad existente participa de múltiples procesos que inciden sobre el equilibrio climático, de los ciclos del agua y de la evolución de los suelos, cumpliendo funciones ecológicas vitales para todo el sistema.

La biodiversidad nos entrega servicios directos e indirectos, los directos se extraen principalmente de las plantas y animales de un ecosistema en forma de alimentos y materias primas; y los indirectos surgen de las interacciones y retroalimentaciones entre los organismos que viven en un ecosistema, controlan la erosión, purificación y almacenamiento de agua por parte de las plantas y microorganismos del suelo en una cuenca o polinización y dispersión de semillas vía insectos, aves y mamíferos. También hay otros beneficios que poseen un alto valor, estos son la belleza escénica, el disfrute del paisaje, etc.

Como fuente de riqueza y bienestar, la diversidad biológica resulta indispensable para el bienestar humano, la integridad cultural, los medios de vida de la población y la supervivencia de las generaciones actuales y futuras; desempeña una función decisiva en el desarrollo del país y es una pieza fundamental para la erradicación de la pobreza. Motivo por el cual, su estado se encuentra directamente relacionado con la presión que ejerce la actividad humana.



Un sector que está relacionado con la biodiversidad y el paisaje lo constituye el turismo, el cual ha ido en aumento en los últimos años; un gran porcentaje de los turistas que llegan al país lo hacen atraídos por la naturaleza, existiendo una gran oferta de ecosistemas desde las zonas desérticas del norte, los bosques húmedos y lagos del sur, hasta las estepas y glaciares de la zona austral.

Se han realizado grandes esfuerzos por expandir las áreas protegidas y por mejorar su manejo, destacando que éstas alcanzan el 18,6% de la superficie nacional⁶¹, pese a ello no se cuenta con una estrategia nacional efectiva de conservación de la biodiversidad, faltando investigación sistemática y dirigida, lo que dificulta el conocer exactamente el patrimonio que se pierde, aumenta o mantiene.

Las características que acentúan la importancia para Chile de la diversidad biológica están dadas por la existencia de especies, ecosistemas, y territorios singulares y de elevado valor ecológico global (endemismo); la presencia de hotspots de biodiversidad reconocidos mundialmente, los servicios ambientales que proporcionan, la alta productividad biológica y el significativo valor económico de sus recursos naturales.

El considerar la vulnerabilidad de este patrimonio frente a las presiones antrópicas y a los fenómenos catastróficos previsibles, como terremotos, cambios climáticos, destrucción de la capa de ozono y los efectos de la corriente del Niño y otros han sido parte de la preocupación de la Política Ambiental del país, al incluir la necesidad de proteger efectivamente los principales componentes del patrimonio natural. Mejorar la gestión sustentable del patrimonio natural, con el objeto de resguardar su capacidad vital y garantizar el acceso a los beneficios para el bienestar de las generaciones actuales y futuras es una necesidad imperiosa. Es de primera prioridad prevenir el deterioro del patrimonio natural, asegurando la conservación de la biodiversidad en sus tres niveles (gen, especie, ecosistema), de los atributos y procesos relevantes de los suelos y las aguas.

De esta manera, resulta fundamental conservar la biodiversidad de las zonas áridas, fortalecer las medidas de prevención y luchar contra la desertificación, mitigar los efectos de la sequía a través de políticas y programas pertinentes.

Se debe promover el turismo sustentable, lo que incluye el turismo de naturaleza y ecoturismo, para aumentar los beneficios que las comunidades receptoras obtienen de los recursos que aporta el turismo, estableciendo las prácticas y responsabilidades adecuadas de las propias comunidades, operadores, empresas turísticas y de los usuarios (destinatarios) de los servicios turísticos, manteniendo la integridad cultural y ambiental de dichas comunidades y aumentando la protección de las zonas ecológicamente delicadas y del patrimonio natural; se debe promover el desarrollo sustentable del turismo y el fomento de la capacidad para contribuir al fortalecimiento de las comunidades rurales y locales, por las oportunidades de crecimiento de esa actividad económica y los importantes aportes que puede significar para el logro de la protección de los ecosistemas.

⁶¹ Estrategia Nacional de Biodiversidad. CONAMA. 2003.



En Chile el tema de asignarle valor a los sistemas hídricos ha adquirido más relevancia lo cual ha generado que hoy en día exista una mayor conciencia acerca de la sustentabilidad ambiental de estos sistemas.

En el Altiplano debido a sus condiciones climáticas muy especiales, es posible encontrar cuencas cerradas lo cual en conjunto al hecho de que la evaporación es mayor a la cantidad de agua que precipita, caracterizan a estas zonas como una de las regiones más áridas del planeta. Pero es en el cuaternario donde, debido a la alternancia de períodos húmedos y secos, cálidos y glaciares, determinaron el desarrollo de lagos que posteriormente se fueron transformando en salares.

Debido a las reiteradas extensiones y contracciones de los sistemas altiplánicos, los organismos acuáticos han sido sometidos a cambios drásticos, especialmente relacionados con la salinidad del agua, lo cual junto con la altitud fueron determinantes en el desarrollo de ecosistemas muy particulares y con una biodiversidad única. Los períodos más secos, se caracterizan por una fragmentación geográfica de los ambientes húmedos, los cuales se resumen a lagunas y salares esparcidos sobre el antigua área donde se extendía el paleolago del altiplano⁶²; los cuales son verdaderas islas aisladas en el desierto constituyendo sistemas extremadamente ricos debido al alto nivel de endemismo y constituyendo reservas únicas de biodiversidad.

Se pretende generar un cambio en la forma de ver estos ecosistemas, y considerarlos como sistemas que se deben proteger, cuidar y mantener en el tiempo ya que constituyen sistemas únicos. Es por esto que se propone proteger los recursos de estos sistemas y generar formas de manejo de estos ecosistemas.

De hecho, un ejemplo de esta forma de ver a las cuencas altiplánicas lo constituyen los humedales, los cuales corresponden a uno de los mejores ejemplos de la aplicación de este nuevo enfoque, por la dependencia con sus cuencas y porque proveen recursos así como funciones del ecosistema altiplánico.

12.4.2 El desarrollo del litio

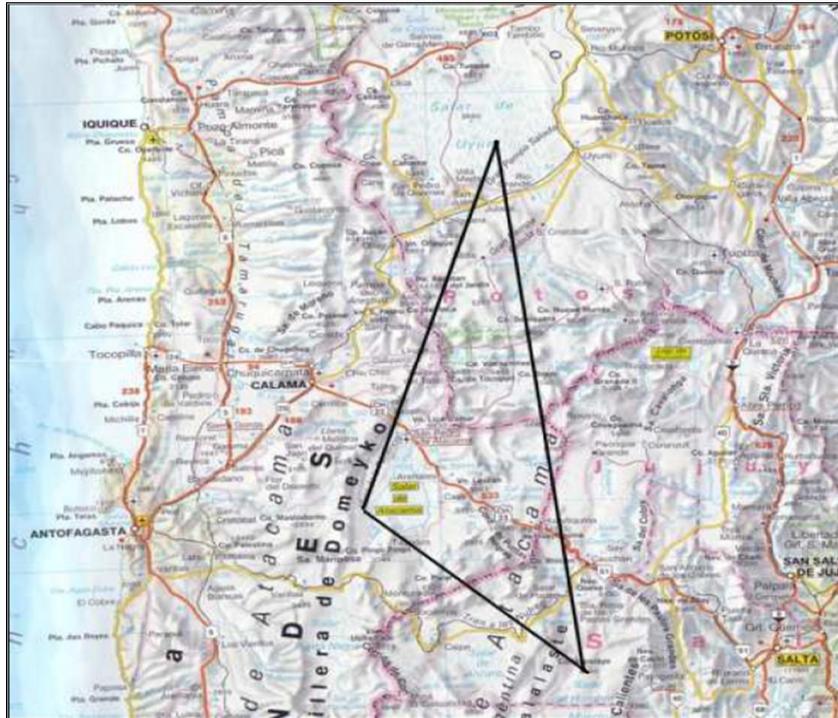
La región altiplánica de nuestro país, junto con los salares de Bolivia y Argentina forman parte de lo que internacionalmente se conoce como "el triángulo del litio" (Figura 2), debido a que concentran cerca del 85% de las reservas mundiales conocidas de este mineral⁶³. Motivo por el cual sería ilógico si no se considerara y aprovechara esta situación para el desarrollo de un cluster de litio en la zona norte de nuestro país.

⁶² U. de Chile. Propuesta de manejo de las cuencas altiplánicas para la conservación de la biodiversidad.

⁶³ Cochilco, 2009.



Figura 2 "El triángulo del litio"



Fuente: Tahil, 2008.

La explotación del litio y el desarrollo de una amplia industria de productos de alta tecnología basados en este mineral ofrecen una oportunidad única para el país. La energía del futuro está contenida en este mineral con el que se fabrican baterías, celulares, MP3, cámaras fotográficas, etc... también se utiliza en la industria farmacéutica, aeronáutica, energía nuclear, elaboración de vidrio, cerámica y lubricantes. Motivo por el cual, se explica la importancia y la manera como ha crecido la explotación de litio durante la última década.

Sin embargo, debido a la aparición de los vehículos híbridos y eléctricos y la proyección de la industria automovilística, el litio se encuentra actualmente en el centro de las miradas de los mercados internacionales, debido a lo cual, el precio del mineral ha crecido exponencialmente entre los años 2000 y 2010. Por su gran capacidad de almacenamiento los autos eléctricos funcionarán con baterías de litio, motivo por el cual gigantes de la industria automovilística como son Toyota y Mitsubishi ya tienen interés en los salares de nuestro país.

Aprovechando este mercado en expansión, y ya que contamos con las mayores reservas de litio con los menores costos de producción, Chile podría verse muy beneficiado si comienza a explotar dichas reservas y debido a las auspiciosas perspectivas para el desarrollo de la industria del litio, este mineral se considera como un mineral estratégico para el país en varios sentidos.



12.4.2.1 Restricciones legales que impiden la extracción

Legalmente, el litio es considerado como un mineral "estratégico" lo que limita la formación de una industria del litio de rango mundial en Chile. Esto sucede debido a que el mineral está protegido por la legislación minera y no constituye un recurso que pueda ser objeto de concesión.

Su explotación está supervisada por el Estado y la no concesionabilidad del litio fue decretada en 1979 en el decreto de ley N° 2.886 en el cual las reservas quedaron reservadas al Estado. Esta situación ocurrió debido al potencial uso militar del litio en las armas nucleares, pero hoy esta situación ha cambiado y no se justifica mantener las restricciones legales; cabe destacar que la fusión nuclear ha avanzado poco desde los años 70 y aún nos encontramos a décadas de un gran avance tecnológico en este campo y aún más de un uso comercial de ello, por lo tanto, parece no tener sentido restringir la explotación del litio sobre la base de su rol potencial para la energía nuclear en un futuro lejano⁶⁴. Por ejemplo, Estados Unidos, que suele mantener reservas de aquellos materiales considerados estratégicos, liquidó el stock de litio hace años en el mercado⁶⁵.

Hoy en día, la situación legislativa vigente evita la explotación y el desarrollo de productos de mayor valor agregado. Muchas empresas quieren realizar contratos en nuestro país pero no lo hacen porque la situación actual representa un riesgo estratégico e impide firmar contratos a largo plazo⁶⁶.

12.4.2.2 La demanda del litio

La concepción histórica sobre lo "estratégico" del litio, está obsoleta. Sin embargo, la valoración estratégica sigue vigente pero bajo otro concepto. El litio hoy en día es la fuente de movilidad del futuro, como antes lo fue el petróleo, y por lo tanto tiene una importancia decisiva y fundamental para el futuro del desarrollo económico del país.

Este mineral presenta diversas características que lo hacen tan apetecido, entre ellas se encuentran las baterías de Litio-ion las cuales se han ganado una posición dominante en el mercado ya que se utilizan en variados dispositivos (cámaras fotográficas, notebooks, celulares, MP3, entre otros). Además, durante los últimos años se ha desarrollado sostenidamente la industria de los autos híbridos (superando las 940.000 unidades en el 2010), los cuales requieren de una batería para almacenar la energía generada por el motor a combustión interna y por diversos procesos que libran energía, así como también, los autos eléctricos deben conectarse a la red eléctrica para recargar las baterías, siendo las baterías de litio las que mejor responden a los requerimientos de esta estricta industria. Así también, el litio es utilizado intensivamente en la industria de los vidrios, cerámicas, en grasas, lubricantes y en la industria farmacéutica entre otros.

A modo de resumen, en el Gráfico 1 es posible identificar los diferentes tipos de uso que tiene este mineral.

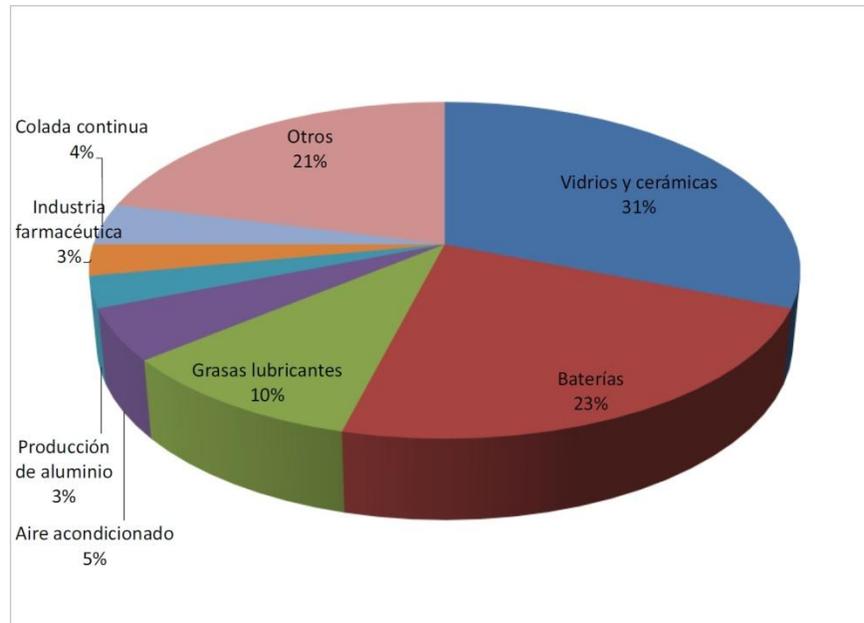
⁶⁴ Boletín N° 6.781-07. En <http://sil.senado.cl>

⁶⁵ Ministro de Minería Laurence Golborne. En <http://www.gobiernodechile.cl/blog/2010/08/05/el-litio-estrategico-y-no-concesible.htm>

⁶⁶ http://www.mch.cl/revistas/index_neo.php?id=1401



Gráfico 1 **Uso industrial del litio**

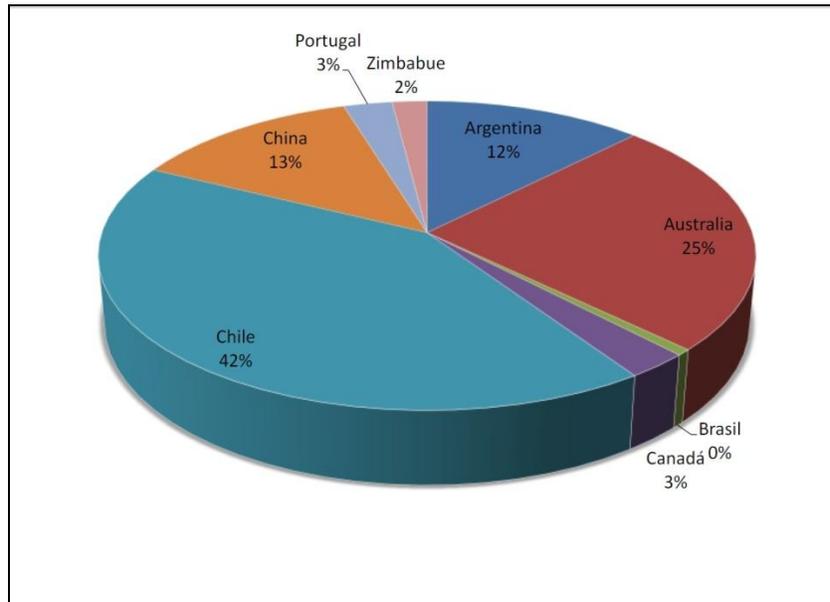


Fuente: Servicio Geológico de EEUU. 2009.

En la última década la industria mundial del litio ha experimentado un cambio considerable, duplicándose la demanda mundial de carbonato de litio. Correspondiendo la mayor parte de este incremento a cuatro países que concentran el 92% de la producción mundial de litio en el año 2009 (Argentina, Australia, China y Chile). Situación que se puede observar en el Gráfico 2.



Gráfico 2 Distribución de la producción mundial del litio



Fuente: Servicio Geológico de EEUU. 2009.

12.4.2.3 Reservas de litio en Chile

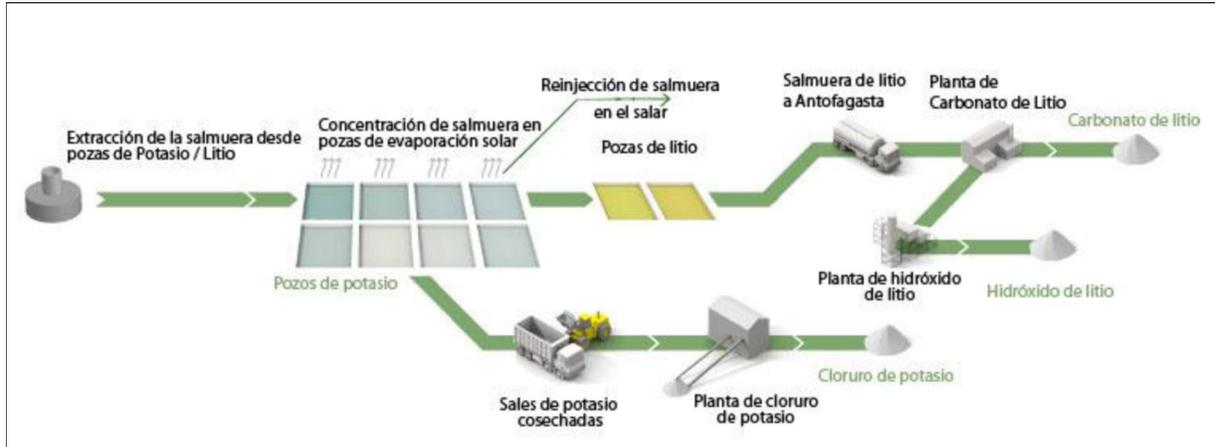
El litio se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza. La concentración promedio de éste en la corteza terrestre se estima en 20 ppm. Si bien, hay diversas fuentes de litio, actualmente sólo dos procesos de obtención son económicamente factibles, mediante salmueras (100 - 2.700 ppm) y minerales (2.300-18.000 ppm). En nuestro país se localizan en salmueras, donde el proceso de extracción es más barato, debido a que no se necesita de la exploración subterránea ni el uso de explosivos.

En los salares del norte de nuestro país se encuentran depósitos salinos continentales con compuesto de litio, potasio, boro y sodio. Se encuentra entre las regiones de Arica-Parinacota a Atacama en un área de 250.000 km² entre los 1.000 y 5.000 msnm. Y la forma de explotación carbonato de litio (LiCO₃) se origina a partir de soluciones de cloruro de litio obtenidas en los salares como sub-producto de la producción de cloruro de potasio. Dichas soluciones son procesadas posteriormente para producir carbonato de litio. Las salmueras no utilizadas se reinyectan al salar⁶⁷. En la Figura 3 es posible observar el proceso por el cual se produce LiCO₃ desde las salmueras.

⁶⁷ SQM. En: <http://www.sqm.com/asp/AcercaDe/ProcesoProduccion.aspx>



Figura 3 Proceso de producción de LiCO_3 desde salmueras



Fuente: SQM.

No hay consenso de la dimensión exacta de las reservas extraíbles de litio con que cuenta nuestro país, ya que actualmente se está explotando sólo la mitad del salar de Atacama, motivo por el cual las reservas totales se desconocen, pero para tener un acercamiento al volumen del que se está hablando, cabe mencionar que en el año 2001 el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) estimó que las reservas base eran de 3,0 millones de toneladas, lo cual corresponde a un 100% más respecto del volumen estimado en el año 1988 (1,36 millones de toneladas), por su parte CORFO estima que las reservas base son de 4,5 millones de toneladas⁶⁸ y en el año 2008 SQM estimó que la reserva base era de 6,9 millones de toneladas.

Respecto a la extracción del litio cabe mencionar que hay que tener mucha precaución ya que extraer litio de lugares con poca concentración requeriría de mayor inversión, resultado menores utilidades, así como también hay que saber hasta qué punto se puede extraer el mineral sin llegar a explotar la totalidad del salar para no generar un impacto ambiental negativo el cual podría resultar en la destrucción total de un ecosistema único en el mundo. Tomando en consideración lo anterior, una estimación realista de la reserva extraíble no superaría el millón de toneladas de litio⁶⁹.

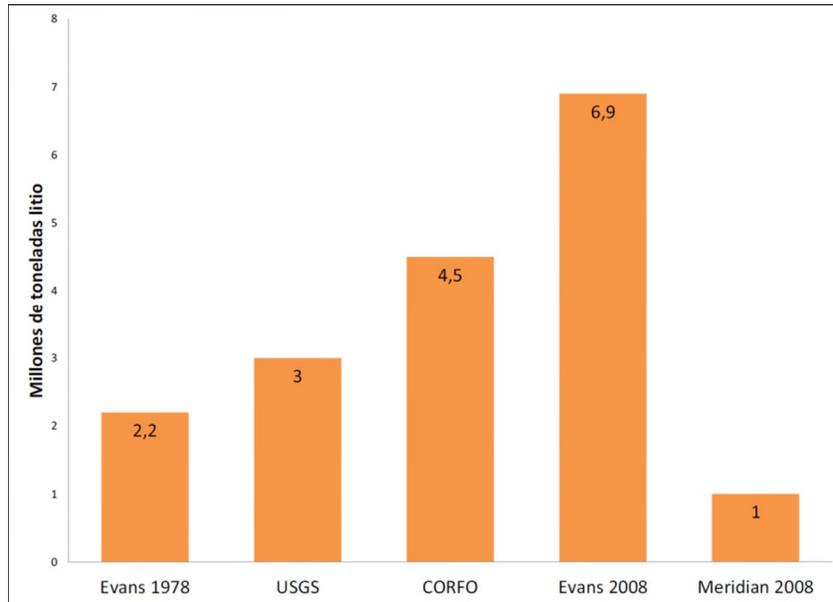
A continuación, en el Gráfico 3 se presentan las estimaciones dispares para las reservas de litio para el caso del salar de Atacama.

⁶⁸ Meridian International Research (2008).

⁶⁹ Meridian International Research (2008).



Gráfico 3 Estimaciones para las reservas de litio (Salar de Atacama)



Fuente: Meridian Research. 2008.

En Chile, se encuentran depósitos salinos continentales con compuesto de litio, potasio, boro y sodio, los cuales se encuentran en los salares preandinos y en los salares y lagos andinos

12.4.2.3.1 Salares preandinos

Estos salares se encuentran en las cuencas preandinas alineadas en dirección N-S al oriente de la precordillera y a 2.500 – 3.000 msnm. Corresponden a los más antiguos salares activos, con costras salinas bien desarrolladas y salmueras con alta concentración de sólidos disueltos, sobresaturados en cloruro de sodio.

La recarga de aguas superficiales y subsuperficiales altamente concentradas proviene de la cordillera de Los Andes.

12.4.2.3.2 Salares y lagos andinos

Estos salares y lagos se encuentran localizados en cuencas controladas por el volcanismo plio-cuaternario, en la alta cordillera de Los Andes y Altiplano, a más de 3.500 msnm y afectados por la pluviosidad.

Corresponden a los depósitos salinos más jóvenes y presentan salmueras subsaturadas en cloruro de sodio. Contienen importantes concentraciones de sales de boro en la costra salina.

12.4.2.3.3 Factores para definir el potencial en litio de salares preandinos y andinos

Para definir el potencial de litio existente en los salares (preandino y andinos) se considera la siguiente información:



- Contenido de litio equivalente (mg/l)
- Extensión areal de la costra salina (km²)
- Razón litio/potasio (Li/K)

Con cuya información es posible categorizar los salares, llegando a la siguiente situación⁷⁰:

- Categoría 1: 220-1.080 mg/l Li; 104-335 km²; 0,02-0,18 Li/K. (Salar de Aguas Calientes 2)
- Categoría 2: 337-640 mg/l Li; 40-80 km²; 0,06-0,30 Li/K. (Salar de Loyoques o Quisquiró)
- Categoría 3: 205-620 mg/l Li; 15-27 km²; 0,02-0,24 Li/K. (Salar de Pujsa, Talar y Aguas Calientes 1)

12.4.2.4 Oportunidades para Chile

Litio es posible de encontrar en varias partes del mundo, pero la gran ventaja de Chile es que tenemos las mejores reservas y que la extracción de litio de los salares tiene uno de los costos más bajos de la industria, lo que nos entrega una ventaja competitiva muy fuerte respecto a los demás productores⁷¹. Si además se agrega el hecho que por la no concesionabilidad del litio otros salares aún no han sido explorados es posible vislumbrar una gran oportunidad para capturar la futura demanda.

Resulta imprescindible que el Estado reconsidere su política que declara al litio como mineral estratégico para poder explotar este recurso y aprovechar todas las ventajas con que se cuenta y convertirnos en líderes mundiales. Sin embargo, para ser líderes mundiales no basta con aumentar la producción de litio, sino que debemos desarrollar una industria de productos de alta tecnología basados en litio. Hay una oportunidad para que Chile destaque sobre los demás productores de litio, tanto por los imponderables de la producción mundial como para minimizar el riesgo de depender de un oligopolio de productores en América Latina, las industrias de alta tecnología en Europa ya están explorando la creación de un sistema de reciclaje de baterías a base de litio, dicho reciclaje destaca la necesidad de un desarrollo sustentable y en armonía con el medio ambiente. Una explotación del litio sin respeto por los ecosistemas de los salares y con una eventual destrucción total de una región única en el mundo sería incompatible con la imagen de un auto eléctrico. Motivo por el cual resulta preponderante que la industria chilena del litio se enfoque no sólo en la riqueza de sus reservas, sino en ofrecer tecnologías e innovaciones de acorde con la imagen verde del combustible que en el futuro moverá al mundo.

70 Gajardo A., Carrasco R, 2010. Salares del Norte de Chile, Potenciales fuentes de litio.

71 Lagos G, 2000.



CAPÍTULO 13 CONCLUSIONES

El área donde se desarrolló esta investigación se caracteriza por ser muy poco estudiada, no existiendo información cuantitativa del comportamiento de las cuencas existentes, motivo por el cual es muy difícil poder contar con datos. Debido a ello, esta investigación resultó ser en gran parte descriptiva de las características cualitativas de ellas. Sin embargo, se aplicaron algunos parámetros cuantitativos, los que fueron calculados mediante software e imágenes satelitales.

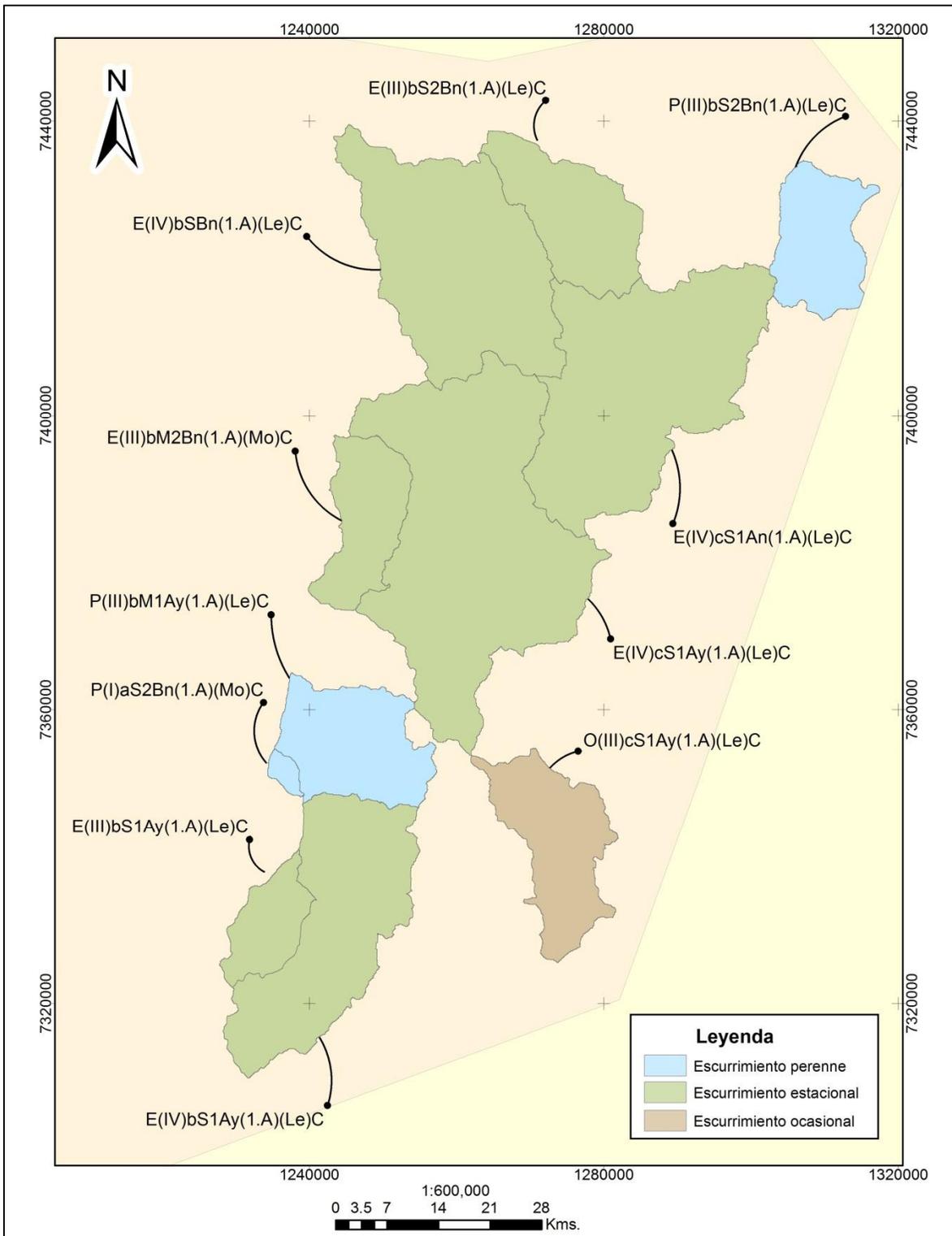
Las cuencas altiplánicas consideradas en esta investigación presentan rasgos topográficos y morfológicos muy similares, los cuales complican el tema de generar una tipología para poder aplicar en ellas, esto debido principalmente a que los fenómenos responsables de la evolución de éstas cuencas han sido los mismos.

Es por este motivo que para poder encontrar diferencias, se planteó realizar una caracterización de la manera más completa posible, utilizándose con este fin parámetros e índices morfodinámicos, hidrológicos y otros, los cuales permitieron poder encontrar respuestas para entender los procesos naturales que se desarrollan al interior de estas cuencas y poder determinar áreas de interés científico en ellas.

La tipología planteada corresponde a una caracterización cualitativa-cuantitativa basada en distintas variables. Para ello se generó una ecuación la cual contiene variables cualitativas y cuantitativas y los resultados de dicha ecuación y su expresión cartográfica se presentan en el Mapa 37.



Mapa 37 Diferenciación de las cuencas según su escurrimiento y aplicación de la tipología propuesta





El tipo de escurrimiento se considera como una variable relevante al momento de generar diferenciaciones entre las cuencas, ya que dependiendo del escurrimiento, de la pendiente y de la cobertura vegetal, se llevarán en ellas procesos distintos a los que suceden en las cuencas con escurrimiento ocasional y las de escurrimiento estacional. De esta manera, las cuencas con escurrimiento perenne (todo el año), presentan flujo constante, el cual se acumula en las depresiones de las cuencas, formando lagunas. En este grupo de cuencas, se encuentran las lagunas Helada, Miscanti y Miñiques, las cuales son ricas en fauna y flora, además de presentar suelos con menor capacidad de infiltración, lo que permite la acumulación y la generación de lagunas.

Aquellas cuencas donde el escurrimiento es estacional, los cuales se secan al menos un mes en el año, generalmente están asociados a la presencia de napas freáticas, las cuales, debido a las características del suelo, acumulan el agua que se infiltra y pueden ser posibles lugares donde exista recurso hídrico subterráneo, el cual en un futuro pudiera ser utilizado para distintos fines. En este grupo se encuentran las cuencas de los salares Loyoques, Pujsa, Aguas Calientes 1, Capur, Aguas Calientes 2, Aguas Calientes 3 y laguna Lejía.

Ahora, respecto al escurrimiento existente en la cuenca del salar del Laco, éste es ocasional, aquí escasamente fluye agua, y ésta proviene solamente de las precipitaciones ocasionales o en este caso, del derretimiento de la nieve existente en las cumbres de dicha cuenca. Por ende, en esta cuenca debería ser posible identificar procesos erosivos activos.

Respecto a la variable superficie, es posible mencionar que se pueden apreciar tres tamaños de cuencas, la más pequeña corresponde a la laguna Miñiques clasificada en el tipo I, cuyo rango de superficie es entre 5 - 20 km², luego se observan seis cuencas que presentan un tipo III, cuyo rango es de 100 – 300 km² y cuatro cuencas que presentan tipo IV, que corresponden a superficies sobre los 300 km², sin identificarse cuencas de tipo II (20-100 km²) en el área de estudio.

Al observar el mapa y las ecuaciones para cada cuenca, se identifica que hay cuencas con pendientes suaves y otras con pendientes moderadas. Las que están en el grupo considerado con pendientes suaves corresponden a las cuencas de los salares Pujsa, Aguas Calientes 1, Loyoques, Aguas Calientes 2, del Laco, Aguas Calientes 3, Capur, y Laguna Helada, de acuerdo al rango de pendiente, en estas cuencas se deberían presentar procesos erosivos leves. En el otro rango se encuentran dos cuencas correspondientes a las lagunas Miscanti y Lejía, las cuales presentan pendientes consideradas como moderadas, y en ellas deberían presentarse procesos erosivos moderados a fuertes y lineales.

Respecto a la presencia de nieve permanente en las cuencas, en cinco de ellas se presenta nieve la cual, al derretirse aporta agua a las cuencas aumentando el escurrimiento superficial, transportando y depositando los minerales provenientes de las laderas hacia el fondo de las cuencas, posibilitando a la vez una mayor acumulación de minerales en los salares y a la vez, al aumentar este escurrimiento, puede generar procesos erosivos activos. Dentro de esta categoría se encuentran los salares de Aguas Calientes 3, Capur, del Laco, Aguas Calientes 2 y la laguna Miscanti.

Otra variable que se considera en la tipología corresponde al índice potencial erosivo (IPE), al observar el mapa es posible identificar también dos grupos de cuencas, uno que presenta valores IPE leves y otro que



presenta valores de IPE moderados. Dentro del segundo grupo se encuentran las cuencas de las lagunas Lejía y Miñiques. En las cuales, de acuerdo al IPE calculado, sería posible que se llevasen a cabo desprendimientos debido a que el suelo es más inestable que en las cuencas donde se presenta un valor IPE bajo.

Si bien, dentro de las variables consideradas para la nueva tipología propuesta se consideró el piso vegetacional para las once cuencas que conformaron este estudio, esta variable no es determinante para generar diferenciaciones entre ellas ya que en todas se presenta el piso vegetacional de tipo matorral.

El Altiplano de la II región de Antofagasta, constituye un área muy interesante de analizar y de considerar para posibles estudios tanto mineros como de protección a la biodiversidad. Debido a la condición de ser poco explorado, representa un territorio el cual debe ser considerado y valorado para el futuro, ya que es bien sabido que aquí se localizan minerales muy apetecidos hoy en día (litio, potasio, boro y sodio), los cuales si fueran explotados y se analizaran las fuentes existentes y tomando en consideración la alta y creciente demanda de estos minerales en la actualidad, Chile tendría un desarrollo económico importante, tanto o quizás más que lo que sucedido con el desarrollo y explotación del salitre en los años 1880-1930, el cual era un mineral muy apetecido en esa época y que presentaba condiciones similares a los minerales que se propone extraer de los salares (ubicación geográfica, accesibilidad y extracción de bajo costo).

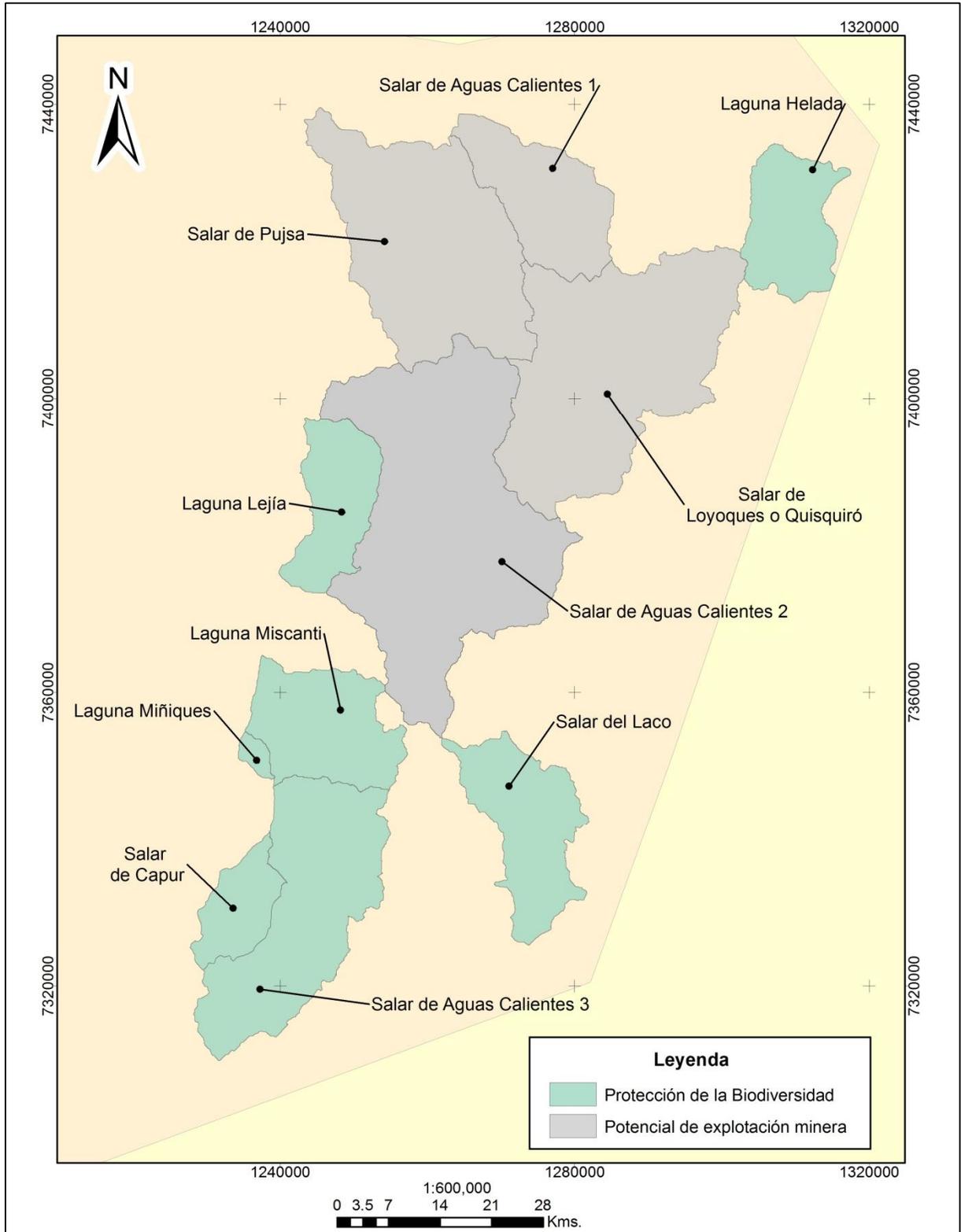
De acuerdo a lo señalado, y además de la tipología propuesta, a cada cuenca se le ha asignado un uso/destino conforme a sus características (cualitativas como cuantitativas), lo que viene a representar los criterios de justificación de dichos usos, planteándose dos tipos de usos, el primero corresponde a ser considerados para protección de la biodiversidad y el otro está enfocado al uso regulado minero.

De esta manera, se propone que las cuencas de los salares Capur, Aguas Calientes 3, del Laco y las lagunas Miñiques, Miscanti, Helada y Lejía debiesen ser consideradas como lugares de protección de la biodiversidad, ya que estas siete cuencas presentan un gran riqueza a nivel de ecosistema (flora y fauna) la cual sería muy interesante de poder proteger y conservar, y así aumentar la cantidad de superficie destinada a la protección de las especies animales y vegetales del altiplano chileno y debido a que no presentan, de acuerdo a los estudios existentes hoy en día, condiciones favorables para la extracción de minerales.

Respecto a las cuatro cuencas restantes, las cuales corresponden a las cuencas de los salares de Aguas Calientes 2, Loyoques o Quisquiró, Pujsa y Aguas Calientes 1, se recomienda el uso potencial de explotación minera, lo cual se debe fundamentalmente a la existencia de minerales los cuales en la actualidad son muy apetecidos por el mercado y los que pueden ser extraídos de una manera responsable y consiente con el medio ambiente. Ambas situaciones se presentan en el Mapa 38.



Mapa 38 Usos potenciales de las cuencas consideradas





CAPÍTULO 14 BIBLIOGRAFIA UTILIZADA

- ACEITUNO P, 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate.
- ACEITUNO et al, 1993. Circulation anomalies associated with wet and dry periods in the South American Altiplano.
- ACKERMANN, M. 2001. Die Vegetation der Bachläufe in der Hochatacama (II Region) in Chile. Diplomarbeit Biologie, Phillips-Universität Marburg, Marburg, DE.
- ACOSTA, O. 2004. Impactos de las Extracciones de Agua Subterránea en el Salar del Huasco (Norte de Chile).
- ASPDEN, J.A., MCCOURT, W.J. (1986). Mesozoic oceanic terrane in the Central Andes of Colombia. *Geology* 14, 415-418.
- AUBOUIN, J., et al. 1973. Esquisse paléogéographique et structurale des Andes méridionales. *Revue de Géographie Physique et Géologie Dynamique*, 15(1/2), 11–72.
- BAKER, M., 1981. The nature and distribution of upper cenozoic ignimbrite centres in the Central Andes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 11, 293–315.
- BAHLBURG, H. y BREITKREUZ, C. 1991. Paleozoic evolution of active margin basins in the southern Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 4,171–188
- BAHLBURG, H. & HERVÉ, F. 1997. Geodynamic evolution and tectonostratigraphic terranes of northwestern Argentina and northern Chile. *GSA Bulletin*, 109, 869–884.
- BOND, M. y GARCÍA, M. 2002. Nuevos restos de toxodonte (Mamalia, Notoungulata) en estratos de la Formación Chucal, Mioceno, Altiplano de Arica, norte de Chile. *Revista Geológica de Chile*, 29,81–92.
- BROWN, E., SALDIVIA J. 2000. Informe Nacional Sobre la Gestión del Agua en Chile.
- BRÜGGEN, W. A. 1950. "Fundamentos de la geología de Chile". Instituto Geográfico Militar: 128-130 ref. Santiago.
- CABRERA et al, 1994. Primeras mediciones de radiación UV en Chile con resolución espectral media.
- CHARRIER, R. et al. 1979. Edades K-Ar de vulcanitas cenozoicas del sector cordillerano del río Cachapoal (34°15' de latitud Sur). *Revista Geológica de Chile*, 7, 41–51.
- CHARRIER, R., et al. 2005. Rapid tectonic and paleogeographic evolution associated with the development of the Chucal Anticline and the Chucal-Lauca Basin in the Altiplano of Arica, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 19, 35–54.



- CHARRIER, R., et al. 2007. Tectono-stratigraphic evolution of the andean orogen in Chile. The Geology of Chile, Chapter 3. Spec. Publ. Geological Society, London.
- CHONG, G. 1984. Die Salare in Nordchile – Geologie, Struktur und Geochemie. Geotektonische Forsch.67, 146 pp . Stuttgart.
- CHONG, G. 1988. The cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18°00' and 27°00' south latitude. The Southern Central Andes, Springer – Verlag.
- CHOW, V.T., MAIDMENT D.R, MAYS L.W. 1994. Hidrología Aplicada.
- CORFO, Departamento de Recursos Hidráulicos, 1971. Mapa Hidrográfico de Chile.
- CORNEJO, P. et al. 2003. The "K-T" compressive deformation event in northern Chile (24°–27°S). Proceedings 10th Congreso Geológico Chileno, Concepción.
- CONAMA. 2004. Recursos Hídricos en Chile: Desafíos para la Sustentabilidad. Programa Chile Sustentable.
- DAVID, C. 2007. Comportamiento actual del ante-arco y del arco del codo de Arica en la orogénesis de los Andes Centrales. Tesis de Doctorado en Ciencias, Mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 299 p.
- DE SILVA, S. 1989. Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes, Geology, 17, 1102–1106.
- Dirección General de Aguas, Universidad Católica del Norte, Institute de Recherche Pour le Développement, 1999. Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones – Chile (S.I.T. N° 51).
- Dirección General de Aguas, 2007. Coberturas digitales SIG.
- DÍAZ-MARTÍNEZ, E. et al. 2000. Permian marine sedimentation in northern Chile: new paleontological evidence from the Juan de Morales Formation, and regional paleogeographic implications. J. South American Earth Sciences 13. 511-525.
- ESPILDORA B., BROWN E., CABRERA G., ISENSEE P. 1975. Elementos de Hidrología.
- FERRANDO F., MORALES B. 1991. Clasificación Hidrodinámica de Chile.
- FUENZALIDA, H. 1950. "Capítulo Orografía en Geografía Económica de Chile". Tomo I. Santiago.
- FRANCOU et al, 1985. El Niño y la sequía en los altos Andes centrales (Perú y Bolivia).
- FRÈRE et al, 1975. Estudio agroclimatológico de la zona andina. Informe Técnico.
- FUENZALIDA et al, 1987. Origen del vapor de agua que precipita en el altiplano de Chile.



- GAJARDO, R. 1994. La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria, Santiago, CL.
- GARCÍA, M. 1996. Geología y estructura del borde del Altiplano occidental, en el área de Belén (Chile). Tesis, Departamento de Geol., Universidad de Chile, Santiago.
- GARCÍA, M., et al. 2004. Hoja Arica. Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica de Chile 84.
- GANSSEER, A. 1973. Facts and theories on the Andes. Journal geological Society London 129, 93-131.
- GALLI. 1968. Cuadrángulo Juan de Morales, Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile carta 18, escala 1:50,000, 53 p.
- Google, 2008. Google Earth Plus.
- GP Consultores Ltda. 2006. Recarga Promedio Anual en la Cuenca del Salar del Huasco.
- GUILCHER, A. 1965. Précis D' Hydrologie Marine et Continentale.
- GUTMAN et al, 1965. The role of latent and sensible heat for the development of a high pressure system over the subtropical Andes in summer.
- HARAMBOUR, S. 1990. Geología pre-cenozoica de la Cordillera de los Andes entre las quebradas Aroma y Juan de Morales, I Región. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- HERVÉ, M. 1987. Movimiento sinistral en el Cretácico Inferior de la Zona de Falla de Atacama al norte de Paposo (24°S), Chile. Revista Geológica de Chile, 31, 37-42.
- HERVÉ, M., et al 2007. Metamorphic and plutonic basement complexes. The Geology of Chile, Chapter 2. Spec. Publ. Geological Society, London.
- Instituto Geográfico Militar (Niemeyer, H. & Cereceda, P.), 1984. Geografía de Chile, Tomo VIII, Hidrografía.
- Instituto Geográfico Militar, 1987. Cartografía de Chile, escala 1:250.000.
- Instituto Geográfico Militar. 2005. Atlas de la República de Chile.
- IREN. 1975. Inventario de Recursos Naturales por Método de Percepción del Satélite Landsat. I Región de Tarapacá.
- IREN. 1976. Inventario de Recursos Naturales por Método de Percepción del Satélite Landsat. II Región de Antofagasta.



- ISACKS, B. L. 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian Orocline. *J. Geophys. Res.* 93, 3211 – 3231.
- JARDÍ, M. 1985. Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen.
- JENSEN, A. 1992. Las cuencas aluvio-lacustres Oligoceno-Neogenas de la región del Ante-Arco de Chile Septentrional entre los 19° y 23° Sur. Ph. Tesis Universidad de Barcelona.
- JICA. 1993 – 1994. "Estudio para el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Norte de Chile, I Región.
- JICA. Marzo 1995. Estudio sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la parte Norte de Chile.
- JORDAN, T et al 1983. Andean tectonics related to geometry of the subducted Nazca plate, *Geol. Soc. Am. Bull.* 94, 341-361.
- LAGOS, G. 2000. Minería, minerales y desarrollo sustentable en Chile.
- LAHSEN, A. 1982. Upper Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of northern Chile. *Earth Sci. rev* 18, pp 285-302.
- LLAMBÍAS, E. J. et al. 1995. El batolito de Colangüil: transición entre orogénesis y anorogénesis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50, 111–131.
- LECARPENTIER, C. 1972. "Géomorphologie et eaux souterraines": Présentation de la Carte Geomorphologique de la Pampa del Tamarugal. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*. II.Nº 2 : 29-57.
- LOPEZ – GETA JA, et al. 2001. Las Aguas Subterráneas, Un Recurso Natural en el Subsuelo. 94 p.
- LUEBERT, F. 1999. Caracterización florística y vegetacional del Parque Nacional Lullailaco (II Región, Chile). Tesis Ing. Forestal, Universidad de Chile, Santiago, CL.
- LUEBERT, F. y PLISCOFF P. 2004. Clasificación de pisos de vegetación y análisis de representatividad de áreas propuestas para la protección en Chile. Informe 3. Pisos de vegetación de la Zona Norte de Chile (I-III).
- LUEBERT, F. y R. GAJARDO. 2000. Vegetación de los Andes áridos del norte de Chile. *Lazaroa* 21: 111-130.
- LUZIO, W. 1997. Clasificación de Suelos.
- MARINOVIC, N., et al 1995. Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica de Chile, 70.



- MIERES, G. 1984. Flora y vegetación de la III región En: Análisis de los ecosistemas de la III región de Chile (Corporación de Fomento de la Producción, ed.) Vol. 1: 97-151.
- MOP – DGA. 1984. Balance Hidrológico Nacional, Regiones III y IV. Volumen 1.
- MOP – DGA. 1986. Balance Hidrológico Nacional, II Región.
- MOP – DGA. 1986. Balance Hídrico de Chile.
- MOP – DGA. 1996. Análisis Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile.
- MOP - DGA. 1999. Política Nacional de Recursos Hídricos.
- MORTIMER, C. 1980. "Drainage evolution in the Atacama desert of northernmost Chile". Rev. Geológica Chile. Nº 11 pag 3-28.
- MPODOZIS, C. et al 1990. Provincias magmáticas ácidas y evolución tectónica de Gondwana: Andes chilenos (28–31°S).Revista Geológica de Chile, 17, 153–180.
- MUÑOZ, N. et al 1996. Uplift of the western border of the Altiplano on a westvergent thrust system, northern Chile. J. S. Am. Earth Sci. 9, 171 – 181.
- NASA, 1999. Imágenes Satelitales Landsat ETM+.
- NOVOA, J.E. 2001. Cambio Climático Global y Pedogenesis en Ambientes Áridos.
- PASKOFF, R. 1976. Sobre la evolución geomorfológico del gran acantilado costero del Norte Grande de Chile. Rev. Norte Grande Nº 6. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- PICHLER, H. y ZEIL, W. 1972. The Cenozoic rhyolite-andesite association of the Chilean Andes. Bull. Volcanol., 35.
- RAMIREZ, C. y GARDEWEG, M. 1982. Carta Geológica de Chile Nº 54. Toconao. SERNAGEOMIN.
- RAMOS, V. A. 1994. Terranes of southern Gondwanaland and their control in the Andean structure (30°–33°S latitude). In: REUTTER, K.-J., SCHEUBER, E. & WIGGER, P. (eds) Tectonics of the Southern Central Andes. Springer, Berlin, 249–261.
- REUTTER, K.-J. 2001. Le Ande centrali: elemento di un'orogenesi di margine continentale attivo. Acta Naturalia de l'Ateneo Parmense, 37(1/2), 5–37.
- RISACHER F., et al. 1999. Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones – Chile.
- ROPERCH, P et al. 1987. Rotated oceanic blocks in western Ecuador, Geophys. Res. Lett. 14, 558-561.p



- ROVIRA, A. 1984. Tomo V, Geografía de los Suelos. Colección Geografía de Chile, Instituto Geográfico Militar.
- RUTHSATZ, B. 1995. Vegetation und Ökologie tropischer Hochgebirgsmoore in den Anden Nord-Chiles. *Phytocoenologia* 25: 185-234.
- SALAS, R. et al. 1966. Geología y recursos minerales del departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. *Inst. Invest. Geol.* 114 p.
- SÁNCHEZ SAN ROMÁN, F.J. 2001. Universidad de Salamanca. Apuntes Cátedra Geología.
- SCHRODER, W., et al. 1996. Widespread cenozoic ignimbrites in N-Chile, W-Bolivia and SPeru (17°-20°S/71°-68°E): Stratigraphy, extension, correlation and origin, III ISAG, pp. 17–19.
- SEPÚLVEDA, P. et al 1982. Hoja Carrera Pinto. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, 53, Escala 1:100.000.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- STERN, C., (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting, *Revista Geológica de Chile*, 31, 161–206.
- STIPANICIC, P. N. 2001. Antecedentes geológicos y paleontológicos. In: ARTABE, A. E., MOREL, E. M. & ZAMUNER, A. B. (eds) *El Sistema Triásico en la Argentina*. Fundación Museo de La Plata "Francisco Pascasio Moreno", La Plata, Argentina, 1–21
- STOERTZ, G.E.; ERICKSEN, G.E. 1974. Geology of salars in northern Chile. U.S. Geological Survey, Professional Paper, No. 811, 65 p.
- STRAHLER, A.N, 1957. Quantitative Analysis of Watershed Morphology. *Transactions of the American Geophysical Union*.
- TAHIL, W. 2008. The Trouble with Lithium 2: Under the microscope. Meridian International Research.
- TEILLIER, S. 1998. Flora y vegetación alto-andina del área de Collaguasi - Salar de Coposa, Andes del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 313-329.
- TEILLIER, S. 2004. La vegetación de la cuenca media-alta del río Loa (3100-4150 msnm). Región de Antofagasta (II), Chile. *Chloris Chilensis* 7(2). www.chlorischile.cl.
- THOMPSON et al, 1984. El Niño-southern Oscillation events recorded in stratigraphy of the tropical Quelcaya ice cap.



- TOMLINSON, A. et al. 1997. Structural evolution and displacement history of the West fault System, Precordillera, Chile: Part 1, synmineral history. In: Proceedings 8th Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, 3, 1873–1877.
- TOMLINSON, A. et al. 2004. False $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ plateaus, meaningless inverse isochrons and excess 40Ar from the Late Miocene Sifón and Vilama Ignimbrites, south Central Andes, $21^{\circ}30\text{p}$ – 23°S : Obstacles for an accurate chronology in silicic ignimbrite sequences. IAVCEI General Assembly, Pucón, Chile, Abstracts.
- TRICART, J. 1966. "Un chott dans le desert chilien: la Pampa del Tamarugal". *Révue de Géomorphologie Dynamique* N° 1. Año XVI. Enero: 12-22.
- TRICART, J., R. BÖRGEL. 1971-1972. "La cuenca del Maule". *Revista Informaciones Geográficas*: 37-92.
- USDA. 1999. *Taxonomía de Suelos*.
- USGS, 2007. Digital Elevation Model (DEM), <http://seamless.usgs.gov/>.
- VILA T. 1975. Geología de los Depósitos Salinos Andinos, Provincia de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, N° 2.
- VILLAGRÁN, C., J. ARMESTO y M.T.K. ARROYO. 1981. Vegetation in a high Andean transect between Turi and Cerro Leon in northern Chile. *Vegetatio* 48: 3-16.
- VAN THOURNOUT, F. et al 1992. Allochthonous terranes in northwestern Ecuador. *Tectonophysics* 205, 205-221.
- VIRJI, H, 1981. A preliminary study on summer time tropospheric circulation patterns over South America estimated from clouds winds.
- WÖRNER, G., et al, 2000b. Geochronology ($40\text{Ar}/39\text{Ar}$, K-Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from northern Chile (18°S - 22°S): Implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes, *Rev. Geol. Chile*, 27, 205–240.