



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**GEOMORFOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE AGUAS SUPERFICIALES Y
SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL LAGO BUDI, REGIÓN DE LA
ARAUCANÍA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

MARÍA VICTORIA QUESILLE PALMA

PROFESOR GUÍA:

DR. GABRIEL EASTON VARGAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

DRA. LINDA DANIELE

DRA. ALIDA PERÉZ

Este trabajo ha sido financiado por el Programa de Pueblos Indígenas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

SANTIAGO DE CHILE
2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: María Victoria Quesille Palma
FECHA: 2022
PROFESOR GUÍA: Gabriel Easton Vargas

**GEOMORFOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE AGUAS SUPERFICIALES Y
SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL LAGO BUDI, REGIÓN DE LA
ARAUCANÍA**

El objetivo del presente trabajo consistió en caracterizar y determinar la geomorfología y la geoquímica de las aguas, superficiales, subterráneas y del lago de la cuenca del lago Budi.

Las unidades geomorfológicas reconocidas corresponden a cordón montañoso, cuya litología está conformada principalmente por rocas metamórficas paleozoicas, niveles aterrizados con lomajes, humedales, llanura fluvio-marina, campos dunarios y acantilados. Siendo los niveles aterrizados la unidad que abarca mayor superficie de la cuenca, dotándola de un relieve ondulado con suaves pendientes.

Con respecto a la química de las aguas, es posible diferenciar la composición química de las aguas de la cuenca con respecto a las aguas del lago. Las primeras tienen una química dominada por la precipitación y procesos de interacción agua – roca, mientras que las segundas tienen una marcada influencia marina.

Si bien la precipitación es uno de los mecanismos predominantes en la química de las aguas de la cuenca, también se identificaron procesos ligados a la meteorización de silicatos e influencia marina. A partir del análisis de elementos minoritarios, se reportaron concentraciones relativamente altas de aluminio, hierro y manganeso, las cuales podrían responder a procesos de meteorización asociados a las litologías metamórficas presentes en la cuenca. Por otra parte, no se identificaron concentraciones elevadas de nitrato que puedan asociarse a actividades agrícolas.

En cuanto a las aguas del lago, estas presentan conductividades eléctricas y concentraciones químicas más elevadas con respecto a las aguas de la cuenca, reflejando así la influencia del mar. Además, se identifica un cierto nivel de independencia entre la distancia a la desembocadura con las concentraciones químicas detectadas.

Finalmente, se observan concentraciones de algunos elementos que sobrepasan la Normativa chilena de agua potable NCh. 409 y riego NCh. 1333, sin embargo, las concentraciones detectadas no presentan riesgos para la salud humana, según lo indicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Para Lila y Keny

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue sustentada y patrocinada por el Programa de Pueblos Indígenas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y financiada por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Agradecer a la Asociación Ambiental Budi Anumka por todo el apoyo y colaboración en el desarrollo de esta investigación, en especial a Fernando Quilaqueo por su confianza en nuestro trabajo y por la cooperación brindada en terreno y a lo largo de todo este tiempo. Agradecer también a Allison e Ignacio de la ONG Maple Microdesarrollo, garantes de los acuerdos y compromisos, quienes además mostraron una excelente disposición y cordialidad a lo largo de todo el proyecto.

De manera particular, me gustaría agradecer al Dr. Gabriel Easton por guiar este trabajo y brindar el apoyo necesario para la realización de esta investigación, así como también a la Dr. Linda Daniele y Dra. Alida Pérez, miembros de la comisión. A la Dra. Claudia Rodríguez, por estar presente desde el primer día apoyando de manera constante y a la Dra. Doris Saéz Hueichapan, por su preocupación y buena voluntad.

También quiero agradecer a mi familia: a mis padres, hermanas, tías, tío y primos; quienes a lo largo de toda mi vida me han demostrado su amor y apoyo incondicional, dándome ánimo en los momentos complejos y celebrando junto a mí todas esas pequeñas victorias.

A las primeras amigas que hice en la Universidad, Isidora y Vilma, por su cariño, preocupación, consejos, buenos momentos y apoyo constante.

También me gustaría agradecer a todos mis amigos de bachillerato, en especial a: Franquito, Isi, DiegoPin, Lukitas, Nachito, Pablo, Fele, Flo, Juanjito, Toledo y Coté, por todos su ayuda y apoyo constante y por los buenos momentos, las risas, los almuerzos, los paseos, pero por sobretodo por hacerme sentir muy querida y acompañada durante todos estos años.

A mis amigos de geología: Lukas y Mauricio. A Fock, por las risas e insultos que nunca faltaron, a Paula de quien siempre le estaré agradecida por escucharme y recibirme en los momentos chistosos y en los no tanto y finalmente a Tamara, quien no solo es participante de este proyecto sino que también es una gran amiga, por su atención infinita y por su inmenso apañe a todas, apoyándome, escuchándome y aconsejándome.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1	Introducción y motivación	1
1.2	Planteamiento del problema	2
1.3	Hipótesis	3
1.4	Objetivos	3
1.4.1	Objetivo general.....	3
1.4.2	Objetivos específicos.....	3
1.5	Ubicación y accesos a la zona de estudio	3
1.6	Antecedentes	4
1.6.1	Fisiografía y drenaje	4
1.6.2	Clima y vegetación	6
1.6.3	Geología	8
1.6.4	Origen del Lago	9
1.6.5	Hidrología	11
1.6.6	Hidrodinámica.....	13
1.6.7	Uso de suelo.....	17
2.	Metodología	21
2.1	Recopilación bibliográfica	21
2.2	Caracterización geomorfológica de la zona de estudio	21
2.2.1	Definición de unidades geomorfológicas.....	21
2.2.2	Geomorfometría y caracterización del relieve	22
2.2.3	Variación de la línea de costa del lago	22
2.3	Caracterización hidrológica de la zona de estudio	24
2.3.1	Estimación de precipitación y temperatura.....	24
2.3.2	Red hidrográfica	24
2.3.3	Definición de subcuencas.....	24
2.4	Metodología de muestreo agua	25
2.5	Análisis y procesamiento de datos geoquímica de aguas	29
2.5.1	Elaboración de la base de datos	29

2.5.2	Diagramas de Piper, Schöeller – Berkaloff y Stiff.....	30
2.5.3	Análisis fisicoquímico e hidroquímico	30
2.5.4	Relaciones iónicas de interés	30
2.5.5	Comparación con otros sistemas	31
2.5.6	Análisis con respecto a la normativa chilena.....	31
3.	Caracterización Geomorfológica.....	32
3.1	Unidades geomorfológicas	32
3.2	Hidrografía	38
3.3	Geomorfometría y caracterización del relieve de la cuenca.....	39
3.4	Evolución temporal de la línea de costa del lago.....	42
4.	Geoquímica de aguas.....	46
4.1	Parámetros fisicoquímicos y biológicos	48
4.1.1	Conductividad eléctrica.....	50
4.1.2	Potencial de Hidrógeno pH.....	50
4.1.3	Temperatura	50
4.1.4	Coliformes fecales	51
4.2	Diagrama de Piper	53
4.3	Diagrama de Schöeller – Berkaloff	54
4.4	Diagramas Stiff	58
4.5	Análisis de especies y elementos mayoritarios	59
4.6	Elementos traza	63
4.7	Relaciones iónicas de interés	66
4.7.1	Diagrama de Gibbs.....	66
4.7.2	Na ⁺ /Cl ⁻	67
4.7.3	(Na ⁺ + K ⁺)/(TZ ⁺)	68
4.7.4	CE vs Na/Cl	68
4.7.5	(Ca ⁺² + Mg ⁺²) / (SO ₄ ⁻² + HCO ₃ ⁻²)	69
4.7.6	SO ₄ ⁻² / Cl ⁺²	69
4.7.7	NO ₃ ⁻ / K ⁺	70
4.8	Concentraciones observadas en sistemas similares.....	70

4.9	Normativa chilena	72
4.9.1	Normativa chilena de agua potable	72
4.9.2	Normativa chilena de agua para riego	76
5.	Discusión.....	80
6.	Conclusiones y recomendaciones	84
6.1	Conclusiones	84
6.2	Recomendaciones	85
7.	Bibliografía	86
	ANEXOS	90
	ANEXO A: PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS	91
	ANEXO B: RESULTADOS LABORATORIO	95
	ANEXO C: RAZONES IÓNICAS	98
	ANEXO D: CONCENTRACIONES EN OTROS SISTEMAS.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Mapa de ubicación y accesos.	4
Figura 1-2: Fisiografía y drenaje del área de estudio.	6
Figura 1-3: Mapa geológico de la cuenca del lago Budi.	8
Figura 1-4: Esquema de etapas de formación del Lago Budi. A: Antigua red de drenaje de río Imperial. B: Situación antes del terremoto de 1960. C: Situación actual, luego del terremoto de 1960 donde se formó una laguna en Puerto Saavedra. Modificado de Wallner (2010).	11
Figura 1-5: Precipitación acumulada anual, para el período 1990 - 2019.	12
Figura 1-6: Curvas de variación estacional para una probabilidad de excedencia dada.	12
Figura 1-7: Temperatura media anual, período 1990 - 2019.	13
Figura 1-8: Temperatura media mensual, período 1990 – 2019.	13
Figura 1-9: Clasificación de estuarios según hidrodinámica y geomorfología.	14
Figura 1-10: Distribución espacial de la intrusión salina del Río Budi, obtenida mediante modelación numérica y considerando dos intervalos de tiempo. Extraído de Rodríguez (2005).	16
Figura 1-11: Modelación de la cuña salina considerando la barra de sedimentos. Extraído de Sandoval (2009).	16
Figura 1-12: Modelación de las variaciones en la salinidad del río y lago Budi, producto de la apertura de la barra. Modificado de Sandoval (2009).	17
Figura 1-13: Uso de suelo de la cuenca del Lago Budi. Extraído de Peña-Cortés (2006).	18
Figura 1-14: Cambio de uso de suelo en la cuenca entre los años 2001 – 2019, escala 1:30.000. Departamento de Monitoreo y Ecosistemas Forestales, CONAF.	19
Figura 2-1: Parámetros geomorfológicos calculados a escala de cuenca.	22
Figura 2-2: Parámetros geomorfológicos a escala de subcuenca.	22
Figura 2-3: Puntos de control de la variación de la línea de costa.	23
Figura 2-4: Ubicación de extracción de las muestras.	26
Figura 2-5: Envases utilizados en el muestreo de aguas.	28
Figura 3-1: Mapa geológico-geomorfológico en base a Peña-Cortés (2014) y observaciones de terreno.	33
Figura 3-2: Perfil geológico – geomorfológico AA'.	34
Figura 3-3: Perfil geológico – geomorfológico BB'.	35
Figura 3-4: Red de drenaje y subcuencas generadas a partir de GRASS-GIS. ...	38
Figura 3-5: Mapa de elevaciones.	40
Figura 3-6: Curva hipsométrica cuenca hídrica lago Budi.	41

Figura 3-7: Mapa de pendientes, clasificación según SAG (2011).	42
Figura 3-8: Variación de la línea de costa	45
Figura 4-1: Parámetros fisicoquímicos y biológicos, determinados in situ y en laboratorio. En verde las aguas superficiales, en azul las subterráneas y en amarillo las aguas del lago.	49
Figura 4-2: Mapa de parámetros fisicoquímicos y biológicos.	52
Figura 4-3: Diagrama de Piper.	53
Figura 4-4: Diagrama de Schöeller – Berkloff para aguas superficiales.	55
Figura 4-5: Diagrama de Schöeller – Berkloff para aguas subterráneas.	56
Figura 4-6: Diagrama de Schöeller – Berkloff para aguas subterráneas.	57
Figura 4-7: Mapa diagramas Stiff.	59
Figura 4-8: Mapa de concentraciones aniones mayoritarios.....	61
Figura 4-9: Mapa de concentraciones de cationes mayoritarios.	62
Figura 4-10: Mapa de elementos traza.....	65
Figura 4-11: Diagramas de Gibbs.	67
Figura 4-12: Razones iónicas Na/Cl y (Na+K)/TZ+	68
Figura 4-13: Razones entre Conductividad eléctrica y Na/Cl, y entre (SO ₄ + HCO ₃) / (Ca + Mg).	69
Figura 4-14: Razones iónicas SO ₄ /Cl y NO ₃ /K	70
Figura 4-15: Concentración de Fe en las muestras, en línea azul punteada el valor límite establecido en la Norma de agua potable.	74
Figura 4-16: Concentración de Mn en las muestras, en línea azul punteada el valor límite establecido en la Norma de agua potable.	74
Figura 4-17: Concentración de Mg en las muestras, en línea azul punteada el valor límite establecido en la Norma de agua potable.	75
Figura 4-18: pH de las muestras, en línea azul punteada los valores límites establecidos en la Norma de agua potable.	75
Figura 4-19: Concentración de Cl en las muestras, en línea azul punteada los valores límites establecidos en la Norma de agua potable.	76
Figura 4-20: Concentración de Al en las muestras, en línea azul punteada los valores límites establecidos en la NCh. 1333/78.	77
Figura 4-21: Concentración de Cl en las muestras, en línea azul punteada los valores límite establecidos en la NCh 1333/78.	78
Figura 4-22: Concentración de Mn en las muestras, en línea azul punteada los valores límite establecidos en la NCh 1333/78.	78
Figura 4-23: Concentración de SO ₄ en las muestras, en línea azul punteada los valores límite establecidos en la NCh 1333/78.	79
Figura 4-24: Concentración de Coliformes fecales en las muestras, en línea azul punteada los valores límite establecidos en la NCh 1333/78.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Principales terremotos desde 1535 hasta la actualidad que afectaron la zona del Lago Budi y sus alrededores. Modificado de Wallner (2010).	10
Tabla 1-2: Áreas de usos de suelo en la cuenca del Budi en hectáreas por año. Departamento de Monitoreo y Ecosistemas Forestales, CONAF.	20
Tabla 2-1: Información de muestras recolectadas.....	25
Tabla 2-2: Métodos analíticos utilizados en el laboratorio Bureau Veritas para la medición de concentraciones de elementos mayoritarios, minoritarios, parámetros fisicoquímicos y biológicos.	28
Tabla 3-1: Parámetros geomorfológicos de la cuenca hídrica del Lago Budi.	39
Tabla 3-2: Parámetros geomorfológicos subcuencas.....	39
Tabla 3-3: Clasificación de pendientes de la cuenca del Lago Budi según la Pauta para estudio de suelo (SAG, 2011).	41
Tabla 3-4: Variación de la línea de costa del lago a escala de subcuenca.	43
Tabla 4-1: Simbología y ubicación de las muestras de agua.	46
Tabla 4-2: Parámetros fisicoquímicos medidos in situ y en laboratorio.....	47
Tabla 4-3: Concentración de elementos mayores.	47
Tabla 4-4: Concentración de elementos minoritarios detectados.....	48
Tabla 4-5: Clasificación de temperatura del agua según Bogomolov (1966).	50
Tabla 4-6: Elementos traza indetectables.	63
Tabla 4-7: Sistemas con los cuales se comparó la química de las aguas del lago Budi.	71
Tabla 4-8: Límites establecidos en la NCh. 409/1 para elementos esenciales.	73
Tabla 4-9: Límites establecidos en la NCh. 1333/78, requisitos destinados para aguas de regadío.	76

1. Introducción

1.1 Introducción y motivación

La geomorfología se define como una disciplina que estudia las formas observadas en el paisaje y los procesos que llevan a su formación. Si bien, muchos de estos procesos responden a factores naturales, también existen causas antrópicas responsables de la modificación del paisaje, los cuales son estudiados por la geomorfología aplicada, cuyo propósito es investigar la interacción entre el ser humano y el paisaje (Hugget, 2007). Lo anterior, se puede observar en la transformación antropogénica que sufren las cuencas, de la mano de actividades tales como agricultura y urbanización cuyas consecuencias implican la modificación de su cobertura, hidrología y procesos erosivos (Kangas, 2004).

Los procesos erosivos provocan un impacto ambiental importante que resulta en pérdida de productividad agrícola, contaminación acuática y daños a la propiedad, entre otros problemas. En ambientes húmedos se pueden encontrar principalmente tres tipos de erosión producto de la precipitación: salpicadura, arroyo y laminar (Kangas, 2004). En ambientes húmedos, la geomorfología involucra principalmente procesos de erosión, transporte y depositación de sedimentos.

La cuenca del Lago Budi se encuentra en las comunas de Carahue, Saavedra y Teodoro Schmidt en la provincia de Cautín, región de La Araucanía, ubicada en el sector costero del sur de Chile. Su contexto geodinámico corresponde a un límite convergente asociado a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, encontrándose al oeste de la Cordillera de la Costa; la cuenca contiene un lago salino del mismo nombre, el cual desemboca esporádicamente con el océano Pacífico por medio del río Budi.

El lago Budi es el único lago salado de América del Sur, además sus humedales ribereños constituyen un Sitio Prioritario para la Conservación de la Biodiversidad debido a su avifauna desde 1992. En los humedales del Budi existen 13 comunidades bióticas de las cuales 12 son autóctonas (Salinas *et al.*, 2016). De manera particular, es posible advertir la presencia del pez endémico huaiquil o roncador (*Micropogonias furnierii*) y de cisnes de cuello negro (*Cygnus melancoryphus*, EN) que van a reproducirse al lago. Sin embargo, se ha observado una baja en la población de especies, y por lo tanto una disminución del ecosistema existente.

En torno al lago habitan comunidades mapuche lafkenche, haciendo de la cuenca y principalmente del lago un lugar de importancia ancestral y espiritual. En ese

sentido, este es un trabajo colaborativo con la Asociación Ambiental Budi Anumka y la ONG MAPLE Chile, quienes trabajan en conjunto con los lof Allipén, Llaguepulli y Malalwe – Chanko, el sector sur del Lago Budi, que forma parte del territorio ancestral *Ayllarewe Budi*.

A partir de lo anterior, considerando que las comunidades locales han expresado su inquietud con respecto a las consecuencias que actividades como la agricultura y el reemplazo de bosques nativos por monocultivos están teniendo en la cuenca y en el fondo del Lago, el problema a resolver consiste en dar una respuesta a los cambios que ha tenido tanto el lago como la cuenca mediante un diagnóstico geológico-ambiental para identificar de manera más específica los procesos predominantes en la cuenca, así como también sus posibles gatillantes y/o consecuencias.

1.2 Planteamiento del problema

La transformación de las cuencas hidrográficas es una característica de la civilización humana. Los seres humanos transforman los paisajes naturales en varios tipos de "uso de la tierra" que les proporcionan vivienda y recursos. La hidrología alterada y la erosión del suelo se producen como consecuencia de estas transformaciones, que son problemas que deben abordarse. Los principales tipos de transformaciones incluyen el desarrollo de la agricultura, la urbanización y la alteración de arroyos, ríos y costas. En todos los casos se elimina o cambia la vegetación natural y se simplifican las formas de la tierra (generalmente niveladas). La sociedad generalmente acepta que estos impactos directos deben ocurrir para adaptarse al uso humano de la tierra, pero los impactos indirectos como la erosión no son sostenibles y requieren soluciones de ingeniería y/o manejo (Kangas, 2004).

El presente trabajo aborda el estudio del lago Budi, el cual se encuentra en una cuenca costera de la Región de la Araucanía, en el margen de subducción de las placas de Nazca bajo la Sudamericana, lugar en donde se han registrado dos grandes terremotos en el período histórico reciente (1960 y 2010) que han afectado el territorio. Drena fundamentalmente rocas metamórficas y depósitos no consolidados y está afecta a un clima templado húmedo de verano fresco. Debido a la pendiente irregular y su topografía escarpada, la cuenca es altamente susceptible a erosión de suelo por acción física, lo que conlleva a una colmatación y eutrofización del Lago Budi. Estos procesos pueden haber sido acelerados por actividades agrícolas y forestales. El estudio de la geomorfología junto a los análisis de aguas subterráneas y superficiales, permitirá determinar los factores y cambios que estén influyendo en las variaciones que han advertido las comunidades que habitan en torno al Budi.

1.3 Hipótesis

Producto de la topografía escarpada de la cuenca, las aguas fluyen interactuando con diversas sustancias potencialmente contaminantes provenientes de actividades antrópicas (forestales, agricultura, entre otros). El estudio de la química de las aguas superficiales, subterráneas y del lago, permitirá determinar una línea de base junto potenciales anomalías, para así aportar a la caracterización hidroquímica del lago y sus principales afluentes.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar la geomorfología de la cuenca del lago Budi junto con caracterizar física y geoquímicamente las aguas superficiales y subterráneas de los esteros principales que desembocan en el lago, con el fin de disponer de una línea de base geológica-ambiental del mismo.

1.4.2 Objetivos específicos

- i) Determinar los factores dominantes en la evolución geomorfológica reciente del lago Budi y su cuenca a partir de información bibliográfica, histórica y antecedentes entregados por los habitantes, con énfasis en los procesos de erosión o sedimentación en las costas del mismo.
- ii) Determinar y comparar la concentración de cationes, aniones y elementos traza en las muestras de agua determinando su variación a nivel de microcuenca, cuenca y entre microcuencas.
- iii) Determinar la distribución de los elementos y detectar potenciales anomalías geoquímicas en aguas de los principales esteros que drenan la cuenca, prestando atención a componentes asociados a contaminación.

1.5 Ubicación y accesos a la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en el sector costero entre las comunas de Saavedra y Teodoro Schmidt, provincia de Cautín, región de La Araucanía (Figura 1-1). Se localiza a 103 kilómetros al oeste de Temuco.

Para acceder a la zona de estudio desde Santiago, se debe tomar la ruta 5 (Panamericana Sur) hasta la ciudad de Freire ubicada 28 kilómetros al sur de Temuco, donde se toma la ruta S-60 por 44 km hasta Teodoro Schmidt. Aquí sigue por la ruta S-614 por 14,7 km hasta la ruta S-46, luego de seguir esta ruta por 7 km se puede acceder a la desembocadura del estero Allipén en el Lago Budi. Una ruta alternativa es seguir la ruta S-46 por 35 km desde Carahue.

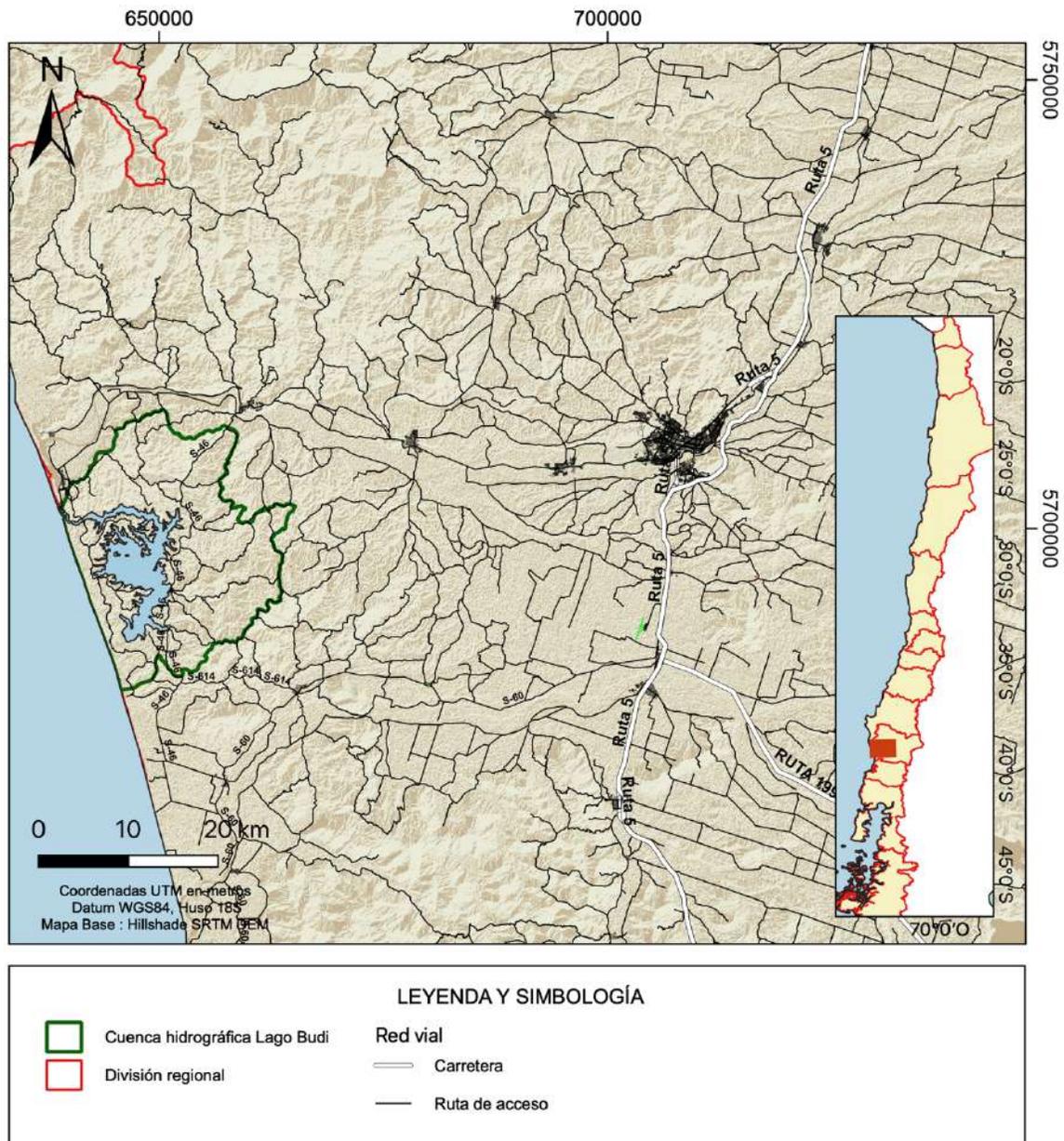


Figura 1-1: Mapa de ubicación y accesos.

1.6 Antecedentes

1.6.1 Fisiografía y drenaje

En la zona de estudio es posible diferenciar dos unidades morfológicas, Cordillera de la Costa y Planicie Fluvio Marina (Figura 1-2). La Cordillera de la Costa, corresponde a una unidad morfoestructural mayor que alcanza elevaciones de superiores a 2800 m snm en la zona de estudio, se compone principalmente de

rocas metamórficas de tres litologías dominantes: esquistos pelíticos, esquistos máficos y cuerpos ultramáficos y además se reconocen estructuras correspondientes a pliegues isoclinales y desarrollo de foliación tipo S_2 (Mella *et al.*, 2010). Por otro lado, la Planicie Fluviomarina corresponde a una franja costera cubierta por depósitos no consolidados, que incluyen pequeños campos dunarios y desarrollo de acantilados (Paskoff, 2010).

La cuenca del lago Budi, limita al norte con la cuenca río Imperial y al sur con la cuenca del río Toltén, ambas tienen sus nacientes en zonas cordilleranas y los tributarios fluyen hacia sus respectivos cauces principales y desembocan permanentemente en el mar. Si bien, en la cuenca del lago Budi la mayoría de las nacientes de los esteros se ubican en las zonas de mayor elevación, los cursos de agua tienden a fluir hacia el lago y solo en la parte norte de la cuenca es posible identificar un curso principal, río Budi, el cual esporádicamente desemboca en el mar.

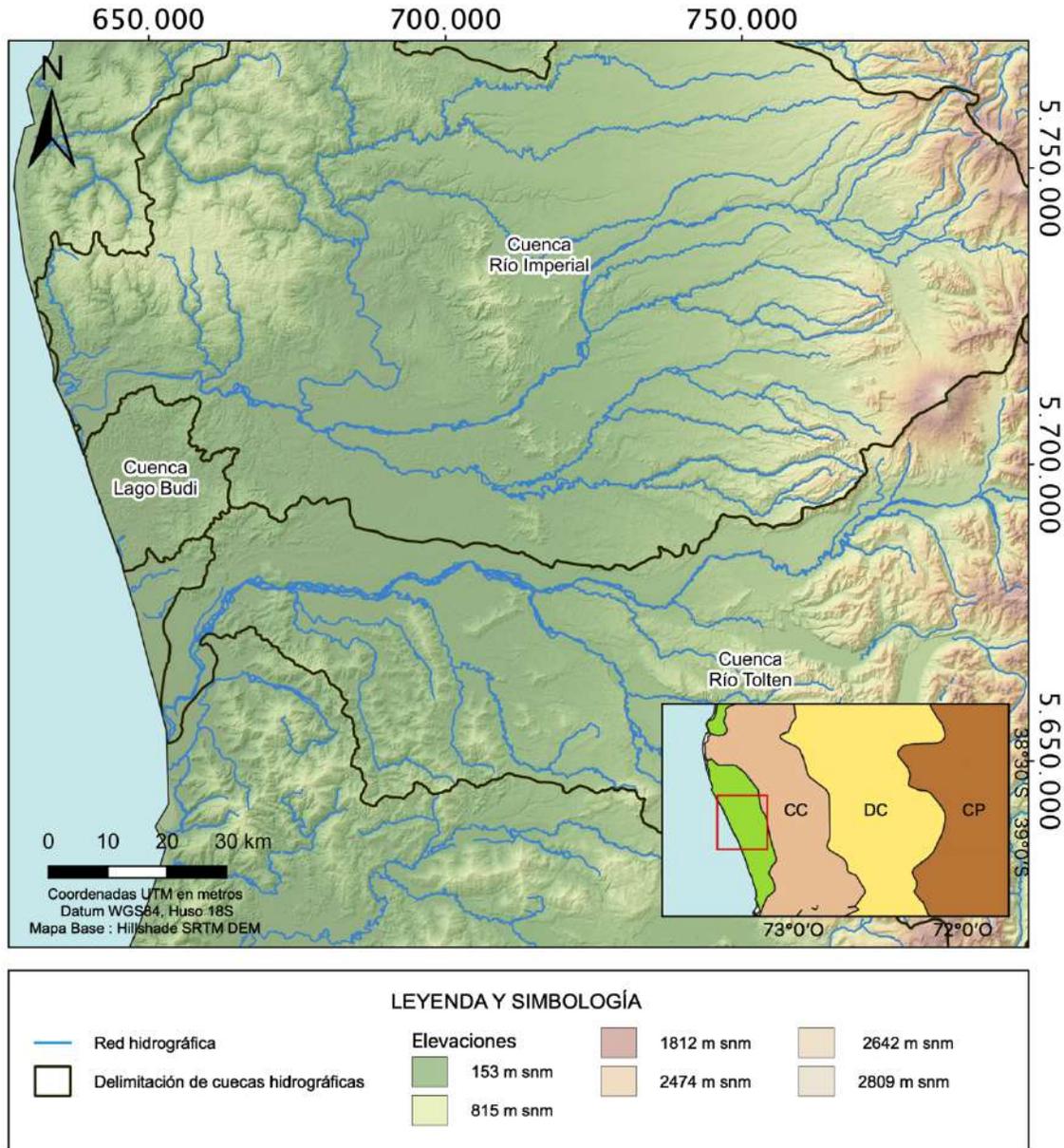


Figura 1-2: Fisiografía y drenaje del área de estudio.

1.6.2 Clima y vegetación

En el área de estudio se presenta el tipo de clima templado húmedo de verano fresco que además pertenece al distrito agroclimático Puerto Domínguez – Puerto Saavedra de la IX Región (Antimán y Martínez, 2005). Producto de la termorregulación marina y el efecto temperante lacustre la amplitud térmica es reducida; los meses de enero a diciembre son los más cálidos con temperaturas máximas que oscilan entre los 18 a 20 °C y mínimas entre 9 a 11 °C, por otra parte, los meses fríos (julio a septiembre) presentan temperaturas máximas entre los 13 a

14 °C y mínimas que fluctúan entre los 0,5 a los 7 °C (Rodríguez, 2005). La flora y fauna del lago Budi es bastante diversa, esto se debe principalmente a la presencia de humedales los cuales se desarrollan en las riberas del lago asociados a quebradas, llanuras y cabeceras de cuenca (Sandoval, 2009).



Imagen 1-1: Humedales cercanos a la desembocadura del estero Boyeco.
21 de septiembre 2021.

En la cuenca, es posible encontrar vegetación de tipo terrestre, acuática y semi acuática, mientras que bordeando los cursos de agua es posible identificar vegetación típica de bosque asociado a humedales (Hauenstein *et al.*, 2002). Si bien la cobertura vegetal se encuentra fuertemente degradada, es posible encontrar especies de árboles tales como: Roble, Laurel, Lingue y Temo; al año 2010 se reportaban aproximadamente 10000 ha de bosque nativo, aunque este se encontraba fragmentado y se ubicaba de manera preferente en las quebradas de la cuenca (LME, 2010).

1.6.3 Geología

Según el mapa geológico de Chile 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003), es posible distinguir dos unidades geológicas en la cuenca hídrica del lago Budi (Figura 1-3):

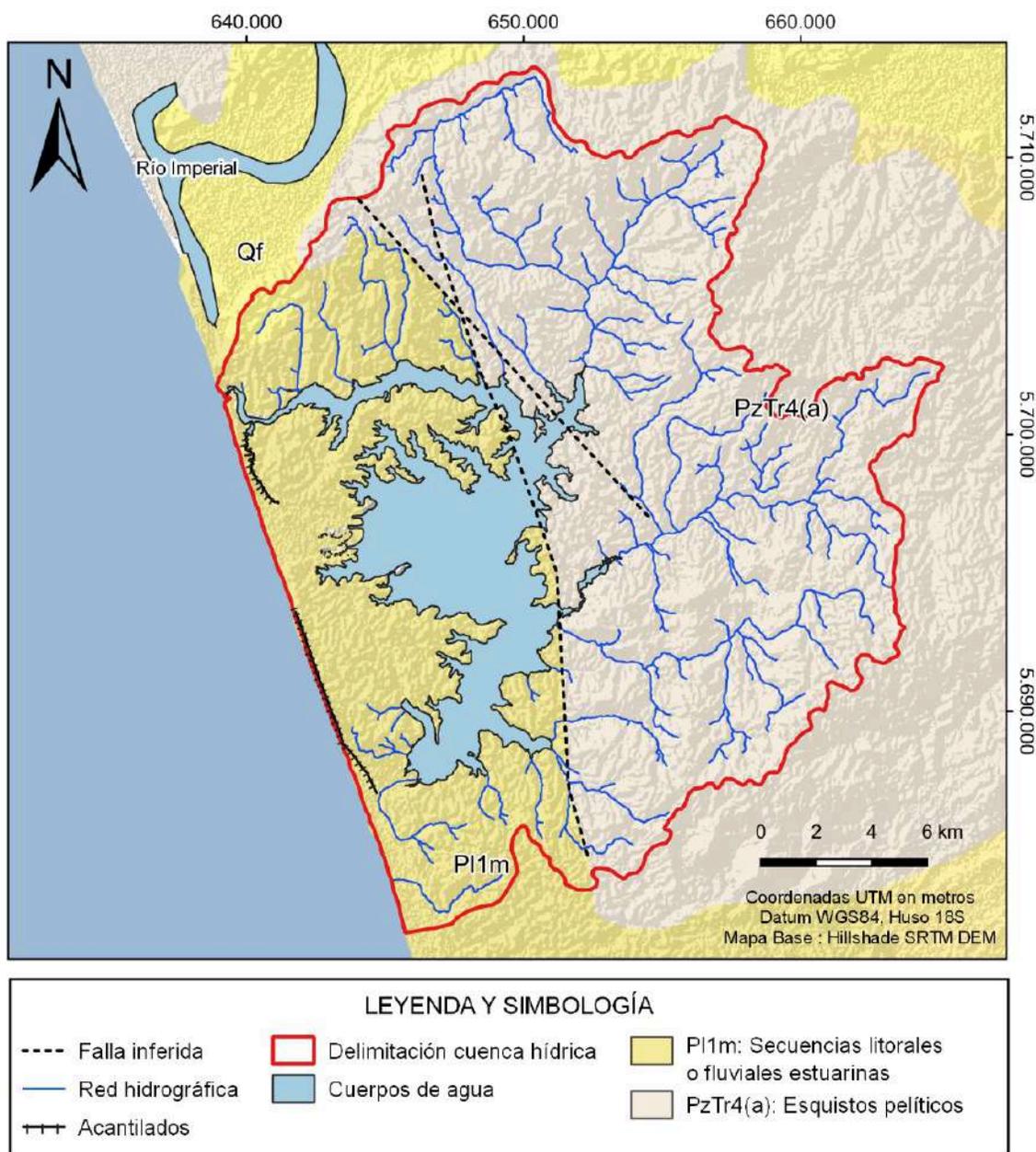


Figura 1-3: Mapa geológico de la cuenca del lago Budi.

Unidad PzTr4 (Paleozoico – Triásico): Esta unidad corresponde a rocas metamórficas dentro de las que se puede distinguir metapelitas, metacherts, metabasitas, gneises y rocas ultramáficas. Estos dos últimos en menor proporción. En la Cordillera de la Costa, entre las regiones IX – X se conoce como Complejo

Metamórfico Bahía Mansa. En la zona de estudio aflora la subunidad superior compuesta por esquistos pelíticos (PzTr4(a)).

Unidad P11m (Pleistoceno): Corresponde a una secuencia sedimentaria marina, litoral o estuarina. Su litología comprende coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos. En la cuenca del Lago Budi se redefinió como “Formación Budi” la cual estaría en contacto de falla con la unidad PzTr4 (a). La Formación Budi consta de capas horizontales de areniscas, limolitas blancas uniformes y fangolitas finamente estratificadas con grietas de desecación (Lomnitz, 1969). Para esta unidad se infiere una depositación lenta e in situ, ya que las cañas de Graminea crecen erguidas en la limolita. En esta Formación se encontraron hojas fósiles de la familia de los laureles, de manera que la flora que se encuentra en la Formación Budi es representativa de los géneros que aún se encuentran creciendo en las colinas bajas y en las orillas de los lagos del sur de Chile (Lomnitz, 1969).

En la zona de estudio se han inferido dos estructuras, la estructura de mayor orden posee una orientación aproximada N-S y pondría en contacto las dos unidades geológicas definidas anteriormente. Una medida de gravedad realizada en 1963 arrojó una anomalía de 20 mgal al este de Puerto Saavedra, lo que implicaría una caída del bloque costero de 0,4 a 0,6 metros (Lomnitz, 1969). La segunda estructura posee orientación NW-SE y fue inferida directamente a partir de los patrones de las redes de drenaje (Lomnitz, 1969).

1.6.4 Origen del Lago

En América del Sur el registro histórico escrito posee alrededor de 500 años, Lomnitz (1969) describe los efectos de 40 terremotos en Chile entre 1535 y 1955 con magnitudes mayores a 7, entre ellos los que afectaron la zona del Budi o sus alrededores se muestran en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Principales terremotos desde 1535 hasta la actualidad que afectaron la zona del Lago Budi y sus alrededores. Modificado de Wallner (2010).

Principales terremotos	16-12-1575 Valdivia M=8,5	24-12-1737 Valdivia M=7,5 - 8	20-02-1835 Concepción M=8 – 8,25	7-11-1837 Valdivia M=8	22-05-1960 Valdivia M=8,75 – 9,5	27-02-2010 Maule M=8,8
Concepción (36°46'S)	◆ (~)		◆ ≈ ▲ (+1,5 m)	◆ ~	◆ ~ ▲ (+0,3 m)	◆ ≈
Puerto Saavedra (38°49'S)	◆ ≈ ▽		~		◆ ≈ ▽ (-1,4 m)	◆ ≈ ▲
Valdivia (39°49'S)	◆ ≈ ▽	◆	◆ ~	◆ ~	◆ ≈ ▽ (-2,7 m)	◆ ≈
◆ Movimiento ~ Tsunami ≈ Gran Tsunami ▽ Subsistencia ▲ Alzamiento						

De las pocas reconstrucciones tras terremotos que se han realizado en el sur de Chile, la gran mayoría de los terremotos históricos han generado un tsunami (Cisternas *et al.*, 2005), con estas reconstrucciones se reportan un total de 29 tsunamis en el sur de Chile, los cuales han quedado registrados en depósitos costeros y en fondos de lagos debido a los movimientos asociados a los terremotos (Wallner, 2010).

Producto de estos movimientos tectónicos se han producido cambios radicales en el sector, entre ellos destaca el desplazamiento de la desembocadura de río Imperial 6 km hacia el norte, posterior al terremoto de 1960 debido a que varias olas del tsunami golpearon la barra de arena paralela a la playa, rompiéndola y desplazando el río el cual antes del terremoto desembocaba junto al río Budi (Lomnitz, 1969).

La principal hipótesis que se maneja sobre el origen del lago sugiere que este pudo ser parte del sistema fluvial del río Imperial y habría desembocado al mar en la zona de Puaucho (Lomnitz 1968,1969). Posteriormente, terremotos y tsunamis podrían haber modificado las morfologías, en particular las barras de arenas y dunas, cerrando la desembocadura de río Imperial en Puaucho e invirtiendo la dirección del flujo, desembocando en lo que actualmente es el río Budi (Figura 1-4B). Previo al terremoto de 1960 ambos ríos (Imperial y Budi) desembocaban juntos, sin embargo, luego de este terremoto se formó una barra de arena, desplazando 10 km al norte la desembocadura de río Imperial (Wallner, 2010).

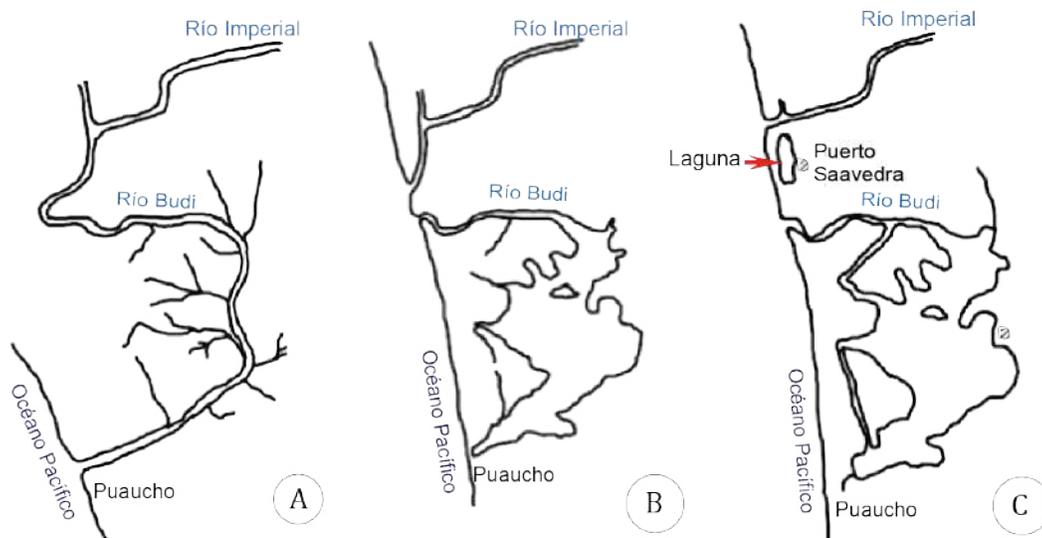


Figura 1-4: Esquema de etapas de formación del Lago Budi. A: Antigua red de drenaje de río Imperial. B: Situación antes del terremoto de 1960. C: Situación actual, luego del terremoto de 1960 donde se formó una laguna en Puerto Saavedra. Modificado de Wallner (2010).

1.6.5 Hidrología

El análisis hidrológico consideró el estudio de las precipitaciones y temperatura en la cuenca a escala anual y mensual. Es importante mencionar que no se incluyen datos de caudales, pues no se encontraron mediciones de estos en la cuenca.

Con respecto a la precipitación, entre los años 1990 y 2019 se registra un promedio de 1181,94 mm, en el período analizado se alcanzaron precipitaciones por sobre los 1400 mm los años 1993, 1997, 2002 y 2006, mientras que los años con precipitación acumulada mas baja corresponde a 1998, cuyo monto fue inferior a 800 mm (Ver Figura 1-5).

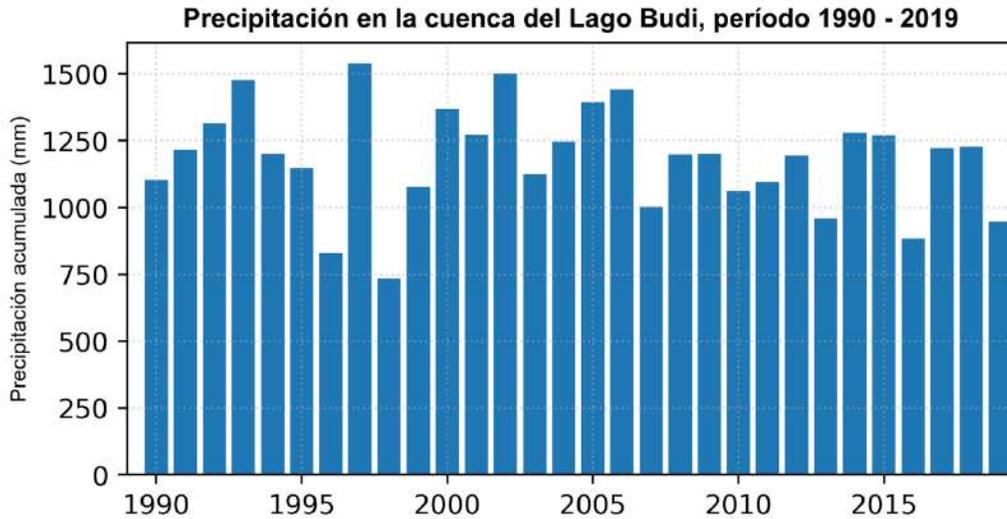


Figura 1-5: Precipitación acumulada anual, para el período 1990 - 2019.

Considerando el mismo período de análisis, pero a escala mensual, es posible identificar un aumento de la precipitación en los meses de invierno, las cuales entre mayo y agosto superan los 160 mm en promedio. Este análisis de precipitación, puede complementarse determinando el monto de precipitación asociado a una probabilidad de excedencia conocida. En ese sentido, a partir de la Figura 1-6 se observan los intervalos de probabilidad de precipitación para cada mes.

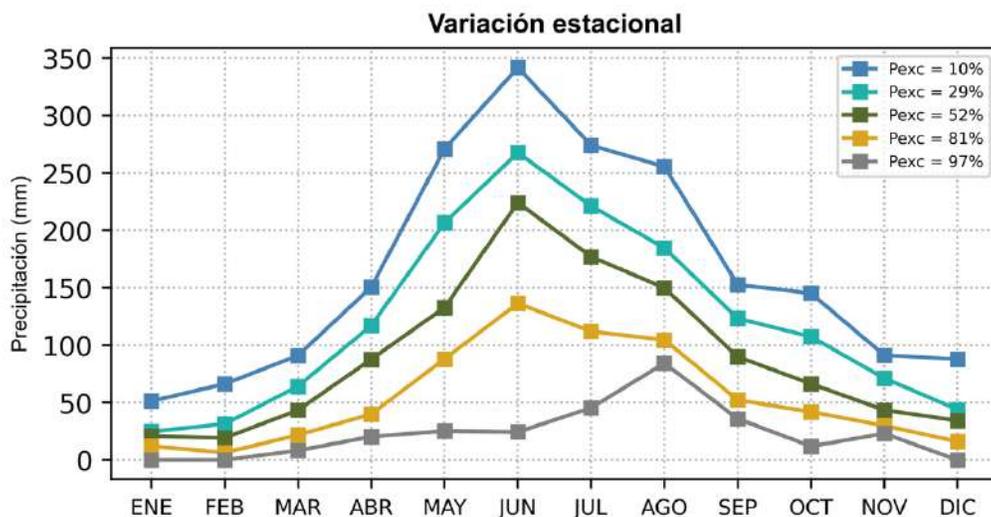


Figura 1-6: Curvas de variación estacional para una probabilidad de excedencia dada.

En cuanto a las temperaturas, estas son cercanas a los 12 °C en donde la temperatura mínima media anual fue de 11,33 °C el año 2007 y la máxima de 12,53 °C el año 2008, como se observa en la Figura 1-7.

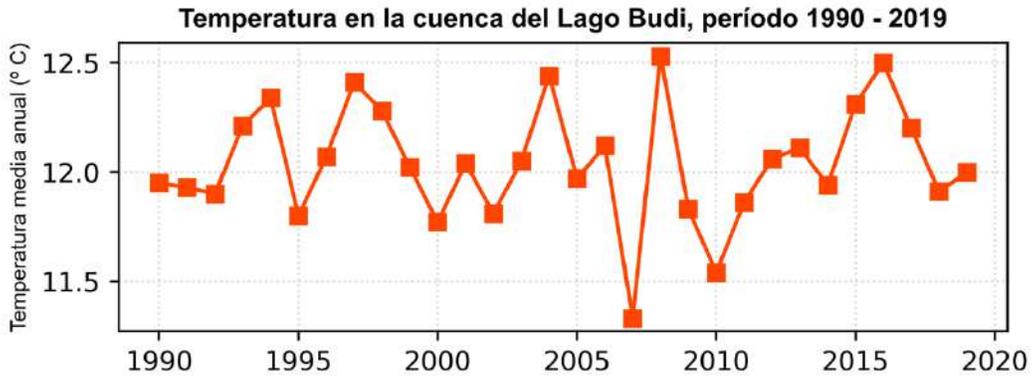


Figura 1-7: Temperatura media anual, período 1990 - 2019.

Considerando una escala mensual, las temperaturas mas elevadas se observan en los meses de enero y febrero, con una media de 16,07 y 15,90 °C, respectivamente; mientras que los meses más fríos corresponden a junio, julio y agosto con valores cercanos a los 8 °C.

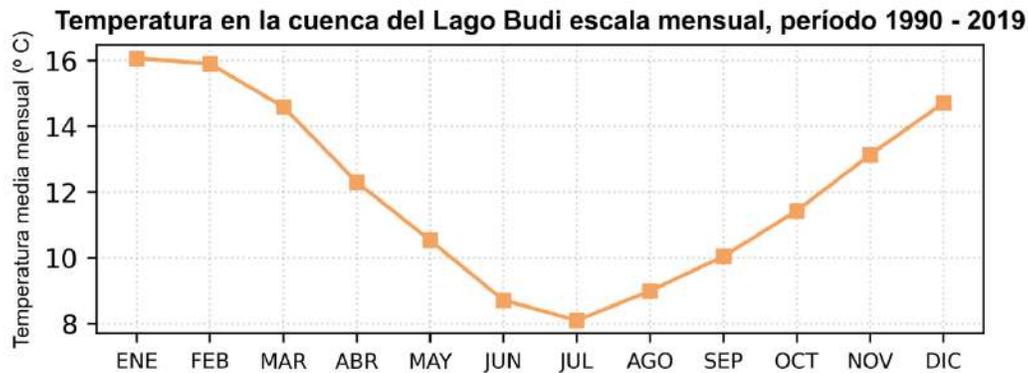


Figura 1-8: Temperatura media mensual, período 1990 – 2019.

1.6.6 Hidrodinámica

Existen diversas definiciones de estuario, Pritchard (1967) define un estuario como un cuerpo de agua donde el agua salina del mar se mezcla con agua dulce que proviene del drenado de una cuenca en donde la salinidad varía de 0,1‰ a 30-35‰, por otro lado, Fairbridge (1968) lo define como un cuerpo de agua marino semi-cerrado en el cual la salinidad es diluida por descargas fluviales y Krone (1977) indica que los estuarios son regiones de transición desde los flujos unidireccionales de agua dulce de los ríos hasta el océano. A pesar de las distintas definiciones de estuario, es posible realizar una clasificación en base a dos criterios: hidrodinámico y geomorfológico, como es posible observar en la Figura 1-9.

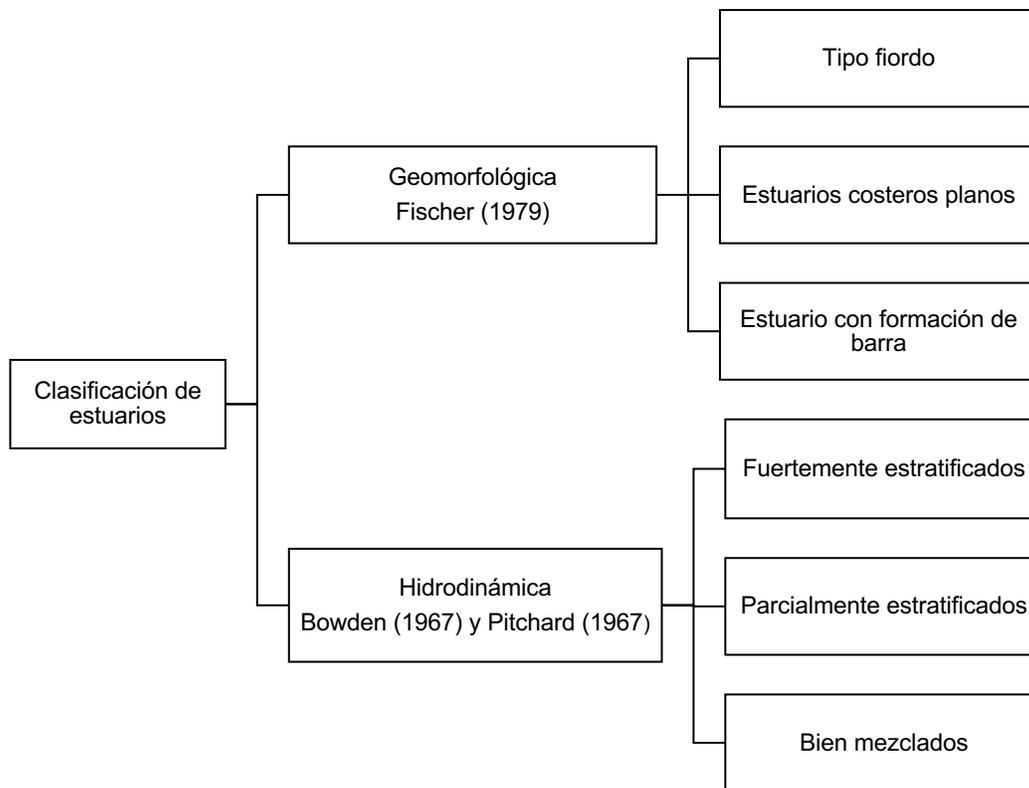


Figura 1-9: Clasificación de estuarios según hidrodinámica y geomorfología.

Geomorfológicamente, la cuenca posee una barra de sedimentos en la desembocadura, la cual se remueve durante los meses lluviosos para evitar inundaciones en los terrenos ribereños de baja elevación. La remoción de la barra de sedimentos se realiza, en primera instancia, empleando maquinaria pesada la cual remueve la arena hasta que el río Budi pueda comenzar a erosionarla por sí mismo.



Imagen 1-2: Desembocadura río Budi abierta.
21 de septiembre 2021.



Imagen 1-3: Remoción de la barra de sedimentos. Extraído de Sandoval (2009).

Con respecto a la clasificación hidrodinámica del lago, distintos trabajos han identificado la presencia de una cuña salina, la cual es un indicador de estuarios fuertemente estratificados ya que corresponde a un frente de agua salada que se introduce en las zonas más profundas del estuario (Bowden, 1967; Pitchard, 1667). Además, existe un efluente de agua dulce el cual sigue su curso hacia el mar sobre la cuña, dando paso a una estratificación de dos capas donde no hay presencia de interfaz o zona de mezcla.

Rodríguez (2005), realizó dos modelaciones numéricas de la cuña salina considerando variables como el caudal que ingresa desde el mar, velocidad del viento, fluctuación de nivel del lago, entre otros. Los resultados obtenidos permiten visualizar la evolución de la cuña salina en el tiempo (Figura 1-10).

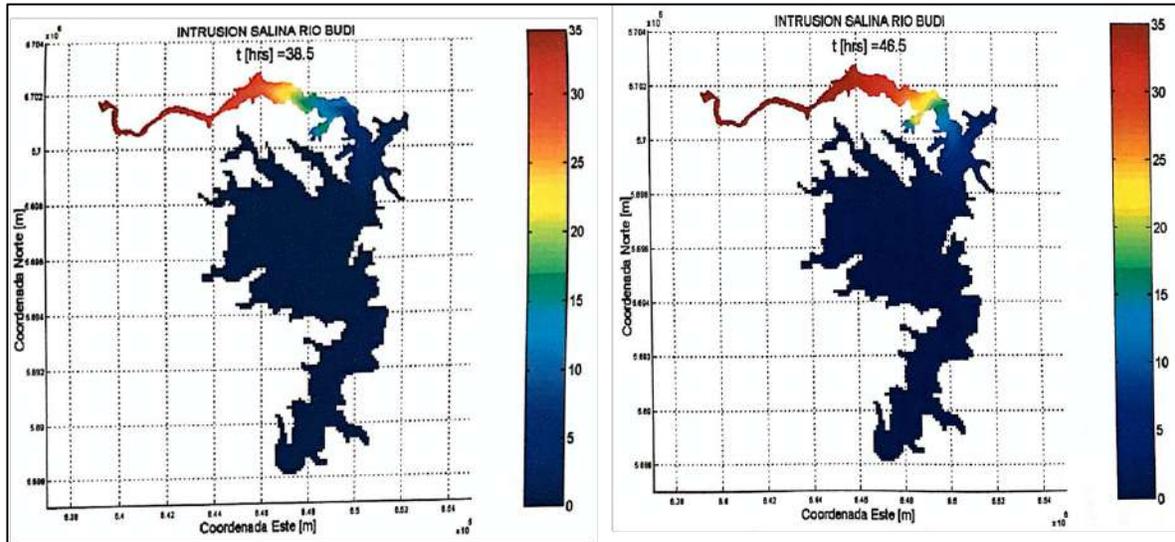


Figura 1-10: Distribución espacial de la intrusión salina del Río Budi, obtenida mediante modelación numérica y considerando dos intervalos de tiempo. Extraído de Rodríguez (2005).

Por otra parte, la modelación numérica elaborada por Sandoval (2009), advierte la presencia de la cuña salina aún cuando se encuentra presente la barrera de sedimentos, teniendo un alcance aproximado de 3,5 km desde la costa.

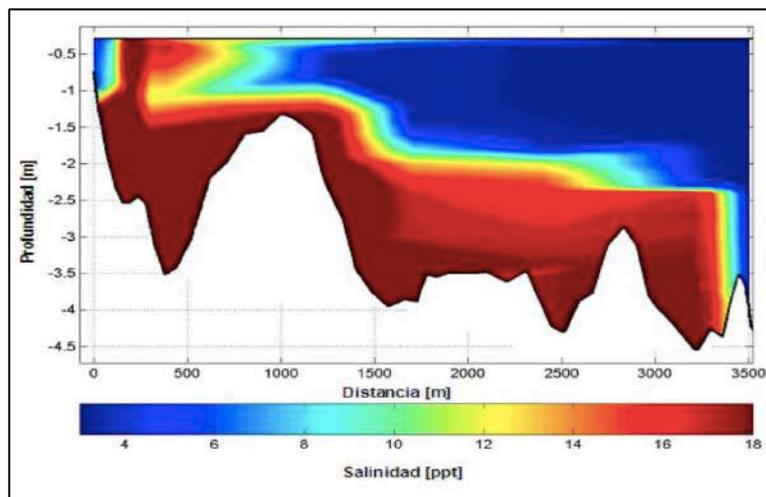


Figura 1-11: Modelación de la cuña salina considerando la barra de sedimentos. Extraído de Sandoval (2009).

Otros escenarios de modelación propuestos por Sandoval (2009), muestran la variación de la salinidad en el río y lago Budi al remover la barra de sedimentos, donde destacan el incremento en la salinidad, el aumento de espesor de la capa salina y por ende el fortalecimiento de la estratificación del lago Budi.

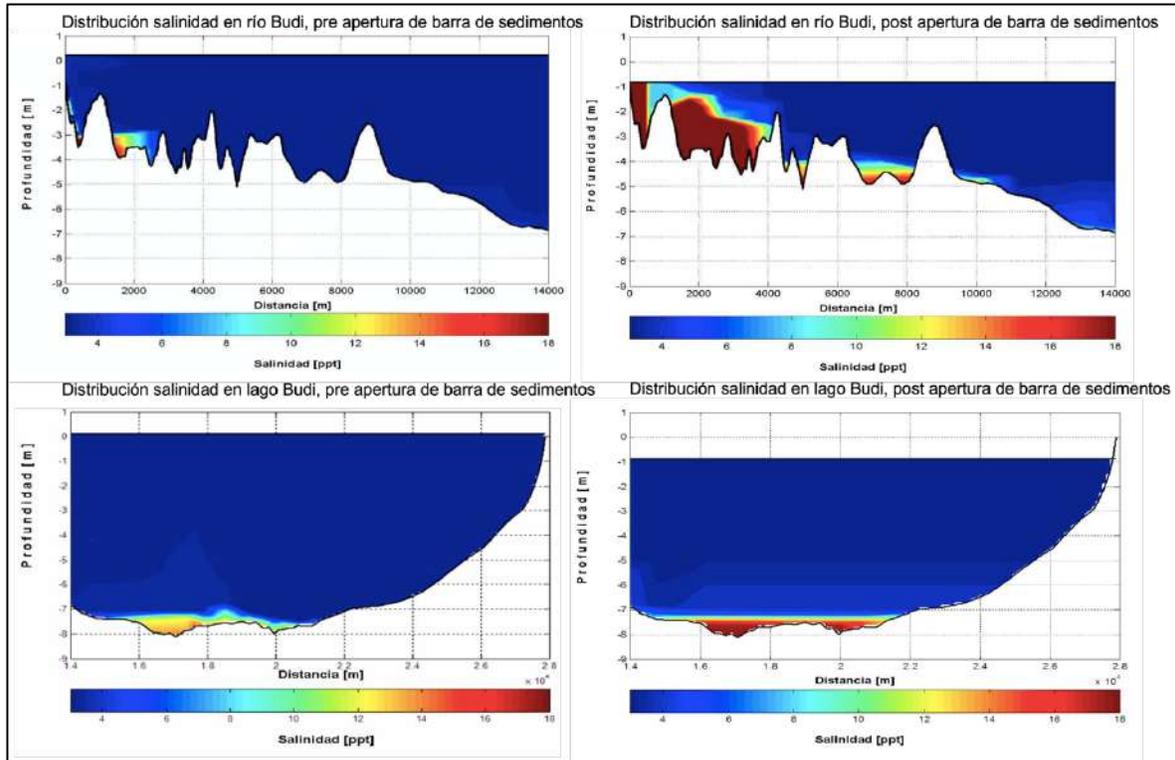


Figura 1-12: Modelación de las variaciones en la salinidad del río y lago Budi, producto de la apertura de la barra. Modificado de Sandoval (2009).

1.6.7 Uso de suelo

Existen actividades tales como las plantaciones forestales y agropecuarias que tienen directa vinculación con el uso del suelo de la cuenca estudiada. De manera particular, a partir de los años 80 se ha visto un aumento lineal de las plantaciones forestales, lo que va en desmedro del bosque nativo y matorrales en la cuenca que han ido disminuyendo su superficie (LME, 2010).

En base a lo estudiado por Peña-Cortés (2006), se observa que hay predominancia de la actividad agropecuaria, acaparando un poco más de 54,9% de la superficie de la cuenca al año 2004, seguido por aproximadamente 19,64% de bosque nativo y por la matriz forestal que utiliza un poco menos de 6%. En ese contexto, es importante notar el rápido descenso de la superficie utilizada por los matorrales, y

una leve disminución de los cuerpos de agua y ríos, tal como se puede observar en la Figura 1-13.

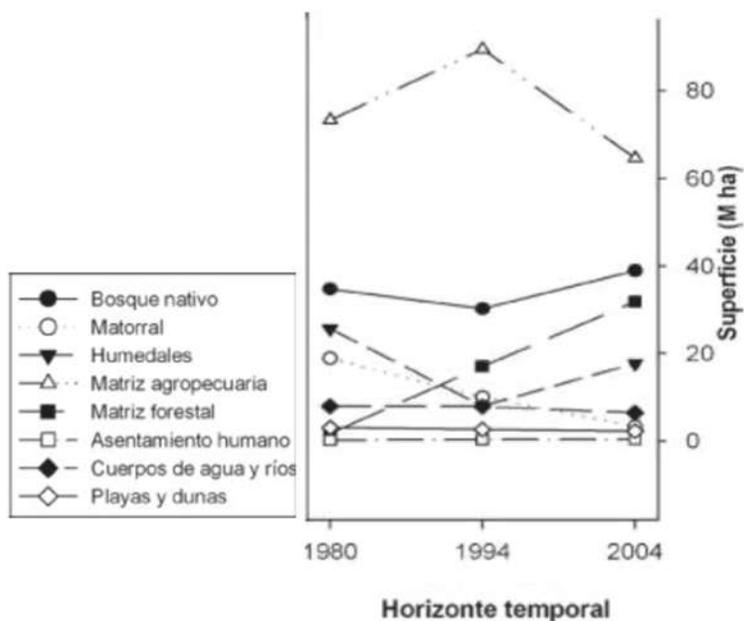


Figura 1-13: Uso de suelo de la cuenca del Lago Budi. Extraído de Peña-Cortés (2006).

Según lo reportado por el Laboratorio de Modelación Ecológica (2010), la superficie utilizada por los cultivos al año 2010, alcanzaría un 86,7% del total del área terrestre de la cuenca, lo que podría desencadenar procesos tales como, erosión de laderas, acidificación del suelo y arrastre de materia orgánica hacia los cuerpos de agua lo que a su vez provocaría acumulación de sedimentos a las orillas del lago y cambios en la calidad del agua trayendo consecuencias negativas para los ecosistemas nativos del sector.

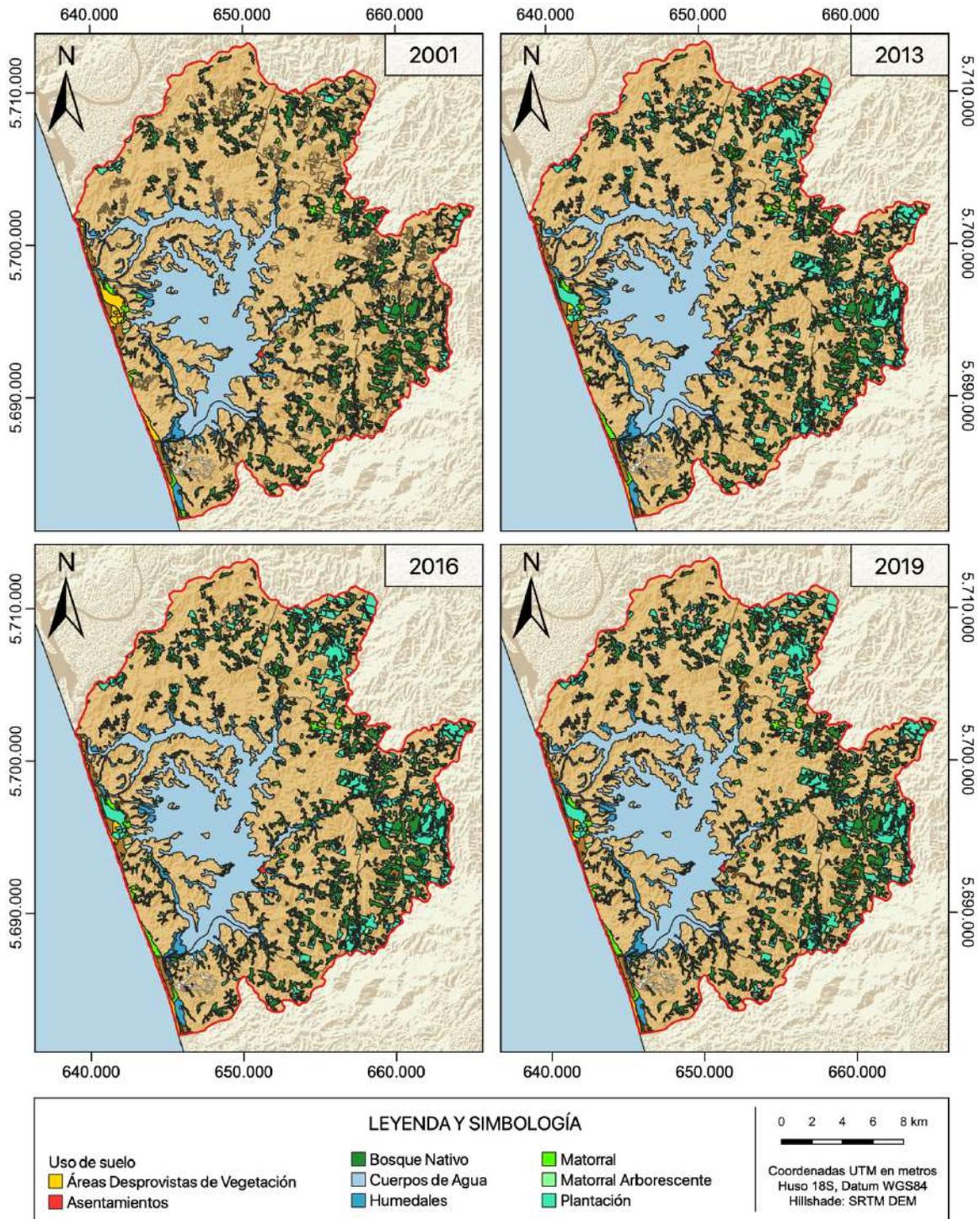


Figura 1-14: Cambio de uso de suelo en la cuenca entre los años 2001 – 2019, escala 1:30.000. Departamento de Monitoreo y Ecosistemas Forestales, CONAF.

Según la cartografía temática de cambio de uso de suelo para la región de La Araucanía entre el año 2001 al 2019 que se observa en la Figura 1-14 se tiene que el cambio más significativo es la disminución de tierras de cultivos en 3700 Ha y el aumento de la superficie cubierta por plantaciones forestales en 3649 Ha (Tabla 1-2).

Tabla 1-2: Áreas de usos de suelo en la cuenca del Budi en hectáreas por año.
Departamento de Monitoreo y Ecosistemas Forestales, CONAF.

	2001	2013	2016	2019	Variación 2001-2019
Áreas Desprovistas de Vegetación	465	223	223	223	-243
Asentamientos	27	28	28	28	1
Bosque Nativo	4830	5036	5054	4918	88
Cuerpos de Agua	6593	6608	6607	6607	15
Humedales	1164	1101	1100	1058	-107
Matorral	304	464	468	473	169
Matorral Arborescente	152	234	217	220	68
Plantación	804	4238	4232	4453	3649
Praderas	357	413	411	469	112
Tierras de Cultivo	34712	31064	31067	30959	-3753

2. Metodología

El presente trabajo corresponde a una investigación en colaboración con Tamara Peñaloza Santis, estudiante de sexto año de la carrera de Geología en la Universidad de Chile. La revisión de antecedentes y caracterización geomorfológica fueron trabajadas en conjunto, de manera que están presentes en ambas memorias de título.

2.1 Recopilación bibliográfica

En la primera etapa de este trabajo se recopiló material bibliográfico con una perspectiva multidisciplinaria. En ese sentido, se reunió información referente a la geología, geomorfología, hidrología, meteorología, flora y fauna acotada a la zona de estudio y alrededores, disponible en memorias de título, artículos científicos, instituciones públicas, entre otros.

Posteriormente, se realizó un contraste de la bibliografía recopilada con el objetivo de obtener información actualizada de la cuenca estudiada. Para esto, se conversó de manera telemática y durante la visita de terreno, con habitantes del territorio pertenecientes a la Asociación Ambiental Budi Anumka.

2.2 Caracterización geomorfológica de la zona de estudio

2.2.1 Definición de unidades geomorfológicas

En una primera etapa, se analizó la geomorfología de la cuenca hídrica del lago Budi mediante fotointerpretación de imágenes satelitales obtenidas desde Google Earth CNES/Airbus. Se realizó un mapeo geomorfológico de la zona de estudio a escala 1:10.000, considerando las geomorfologías identificadas por Peña-Cortés (2014) y reinterpretándolas en base a criterios geológicos.

Durante la campaña de terreno que se llevó a cabo entre los días 20 al 24 de septiembre del 2021, se recorrió el área de estudio los días 21 y 23 de septiembre, para reconocer las morfologías presentes y contrastarlas con el mapeo realizado previamente. El reconocimiento de geomorfologías se acompañó de anotaciones en la libreta de terreno, medición de puntos GPS y fotografías.

Finalmente, la definición de unidades geomorfológicas contempló la elaboración de un mapa final y secciones geológicas – geomorfológicas que incorporaron las observaciones y correcciones producto de la visita a terreno, junto con la descripción de cada unidad definida acompañada de su respectiva fotografía.

2.2.2 Geomorfometría y caracterización del relieve

La determinación de la geomorfometría de la cuenca se basó en el cálculo de parámetros geomorfológicos, para esto, se utilizaron los datos de elevación proporcionados por SRTM DEM, red de drenaje mapeada por fotointerpretación y una superficie estimada a partir de la delimitación de cuenca registrada en la DGA.

Los parámetros geomorfológicos determinados a escala de cuenca se dividen en tres grupos y se muestran en la Figura 2-1:

Parámetros de Forma	Parámetros de Relieve	Parámetros de Drenaje
<ul style="list-style-type: none"> • Perímetro • Longitud Axial • Longitud total del drenaje • Área • Ancho promedio • Factor de forma • Coeficiente de compacidad de Gravellius 	<ul style="list-style-type: none"> • Curva hipsométrica • Pendiente media • Orientación de laderas • Coeficiente de rugosidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de drenaje

Figura 2-1: Parámetros geomorfológicos calculados a escala de cuenca.

Debido a que en la cuenca no se identifica un cauce principal, algunos parámetros geomorfológicos se determinaron a escala de subcuenca, los cuales se observan en la Figura 2-2.

Parámetros de Forma	Parámetros de Drenaje
<ul style="list-style-type: none"> • Longitud del curso principal • Longitud axial • Coeficiente de sinuosidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Pendiente media del cauce • Tiempo de concentración

Figura 2-2: Parámetros geomorfológicos a escala de subcuenca

Las definiciones, fórmulas y criterios de los parámetros geomorfológicos se detallan en el Anexo A.

2.2.3 Variación de la línea de costa del lago

El estudio de la variación de la línea de costa del lago se realizó a través de fotointerpretación de imágenes satelitales de los años 2013 y 2020. Las imágenes fueron obtenidas de Google Earth CNES / Airbus y la elección de los años a analizar responde a la disponibilidad de las imágenes en la plataforma.

Una vez obtenidas las imágenes, se realizó un mapeo a escala 1:5.000, donde se identificó la línea de costa del lago para cada uno de los años estudiados, a partir de la cual fue posible calcular la superficie del espejo de agua para cada período. Posteriormente, se trazaron puntos de control cada 200 m sobre la línea de costa del lago obtenida para el año 2013, los cuales sirvieron para determinar las variaciones con respecto a la línea de costa del año 2020.

Habiendo determinado si la línea de costa avanza (expansión del espejo de agua) o retrocede (reducción del espejo de agua), se calculó su longitud. Algunos puntos de control utilizados pueden verse en la Figura 2-3.

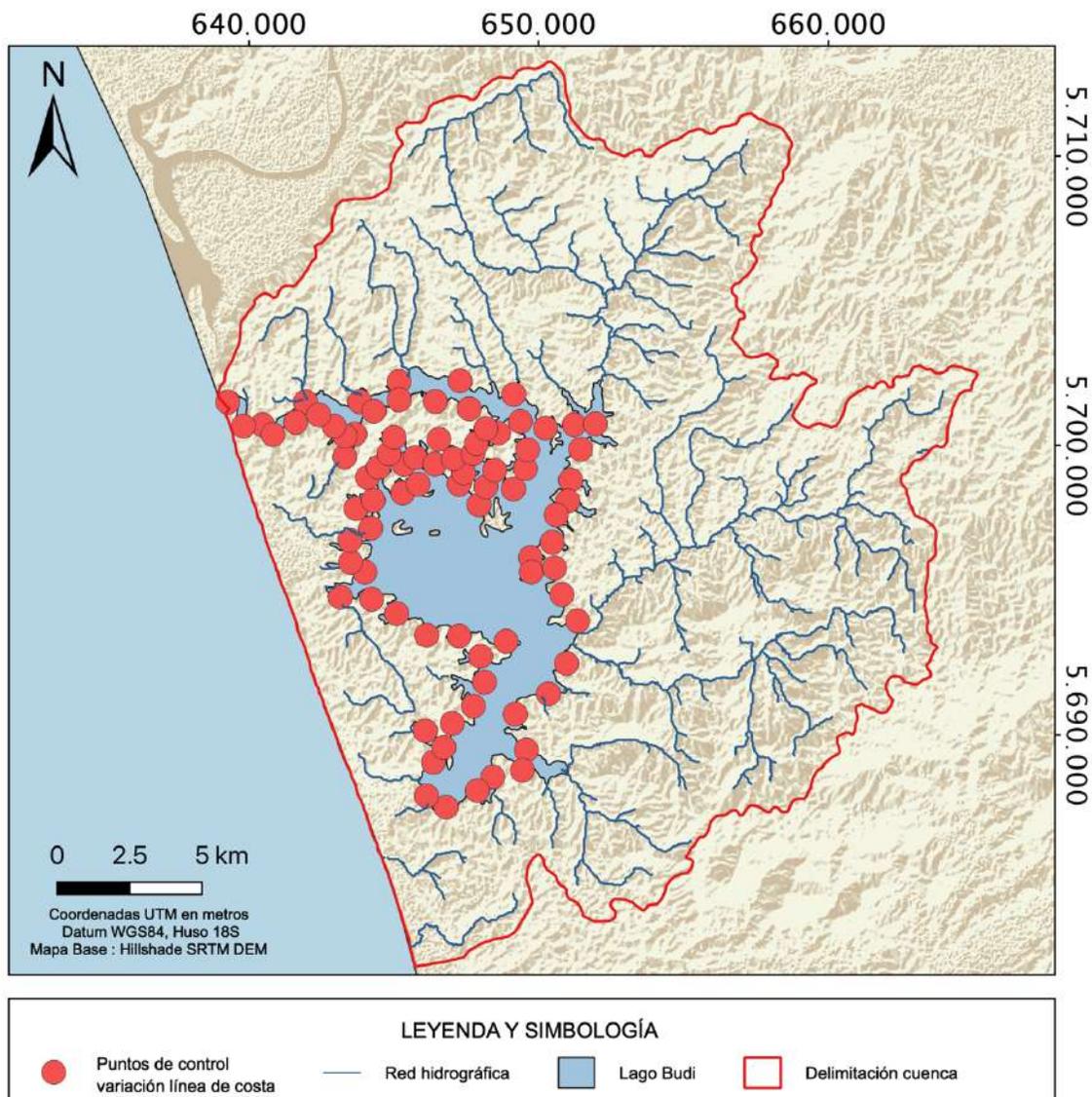


Figura 2-3: Puntos de control de la variación de la línea de costa.

De manera análoga, se identificaron las variaciones de superficie causadas por el desplazamiento de la línea de costa, determinando si correspondían a un área de avance o retroceso.

2.3 Caracterización hidrológica de la zona de estudio

2.3.1 Estimación de precipitación y temperatura

La estimación de la precipitación acumulada y de la temperatura promedio de la cuenca, se realizó a escala anual y mensual, considerando el período de tiempo comprendido entre los años 1990 y 2019, el cual corresponde a los 30 años hidrológicos más recientes de los cuales se tiene información.

Los datos utilizados, se obtuvieron del producto grillado del CR2MET, el cual contiene la información en una grilla de 5 km de resolución y se encuentra disponible en la página del Center for Climate and Resilience Research (CR)².

El procesamiento de la información se realizó con el software R Studio. En una primera instancia se extrajeron los datos que pertenecían a la cuenca por medio de una capa de máscara, correspondiente al archivo shapefile de delimitación de cuenca. Posteriormente, se exportaron las series de precipitación y temperatura obtenidas, de manera de presentar de forma gráfica los resultados obtenidos.

2.3.2 Red hidrográfica

La obtención de la red hidrográfica se realizó utilizando el Modelo de Elevación Digital (DEM) de la cuenca estudiada, en conjunto con el software QGIS con GRASS – GIS.

Empleando el DEM del área de estudio y la herramienta para análisis de cuenca, se consiguió una red de drenaje para toda el área de interés. Luego, se interpretó dicha red de drenaje mediante fotointerpretación, ajustando y corrigiendo los cursos de agua hasta conseguir una red de drenaje adaptada a lo indicado por la topografía y a lo observado en las imágenes.

2.3.3 Definición de subcuencas

La definición de subcuencas se basó en la digitalización y reinterpretación del mapa de subcuencas presentado en Rodríguez (2005), a partir del DEM empleando el software QGIS con GRASS – GIS.

Utilizando la herramienta para análisis de cuenca junto con el DEM, se obtuvieron microcuencas las cuales se agruparon según criterios morfológicos e hidrológicos, de manera que los resultados obtenidos se asemejaran a las subcuencas mostradas en Rodríguez (2005) y fueran acordes a la red hidrográfica.

2.4 Metodología de muestreo agua

La toma de muestras de agua se realizó el día 22 de septiembre de 2021, en los puntos señalados en la Tabla 2-1, enfatizando el muestreo en los esteros principales de la cuenca, ya que son los que drenan la mayor parte del agua hacia el lago (ver Figura 2-4).

Se priorizó la ubicación de los puntos de muestreo en la zona sur de la cuenca, ya que allí habitan las comunidades con las cuales se está trabajando actualmente. Se obtuvo un total de 16 muestras, de las cuales 10 se ubican en los esteros principales, 3 en aguas del lago (donde una de ellas corresponde a la desembocadura en río Budi) y 3 de afloramientos de aguas subterráneas en las subcuencas de Allipén y Malalhue.

Tabla 2-1: Información de muestras recolectadas

Muestra	Coordenadas WGS84 18S		Hora de muestreo
	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	
B01	649042	5687120	12:10
B02	651100	5688723	13:10
B03	651580	5686327	9:00
B04	651100	5689237	15:24
B05	651344	5693106	16:00
B06	655021	5692073	16:39
B08	654482	5696150	17:26
B09	652346	5703013	19:05
B10	652079	5705406	18:15
B11	649198	5702827	20:30
B12	649761	5686982	10:33
B13	651079	5687319	9:30
B14	649963	5693317	11:56
B15	648002	5690003	10:06
B17	639360	5701580	21:05
B19	651123	5687075	14:12

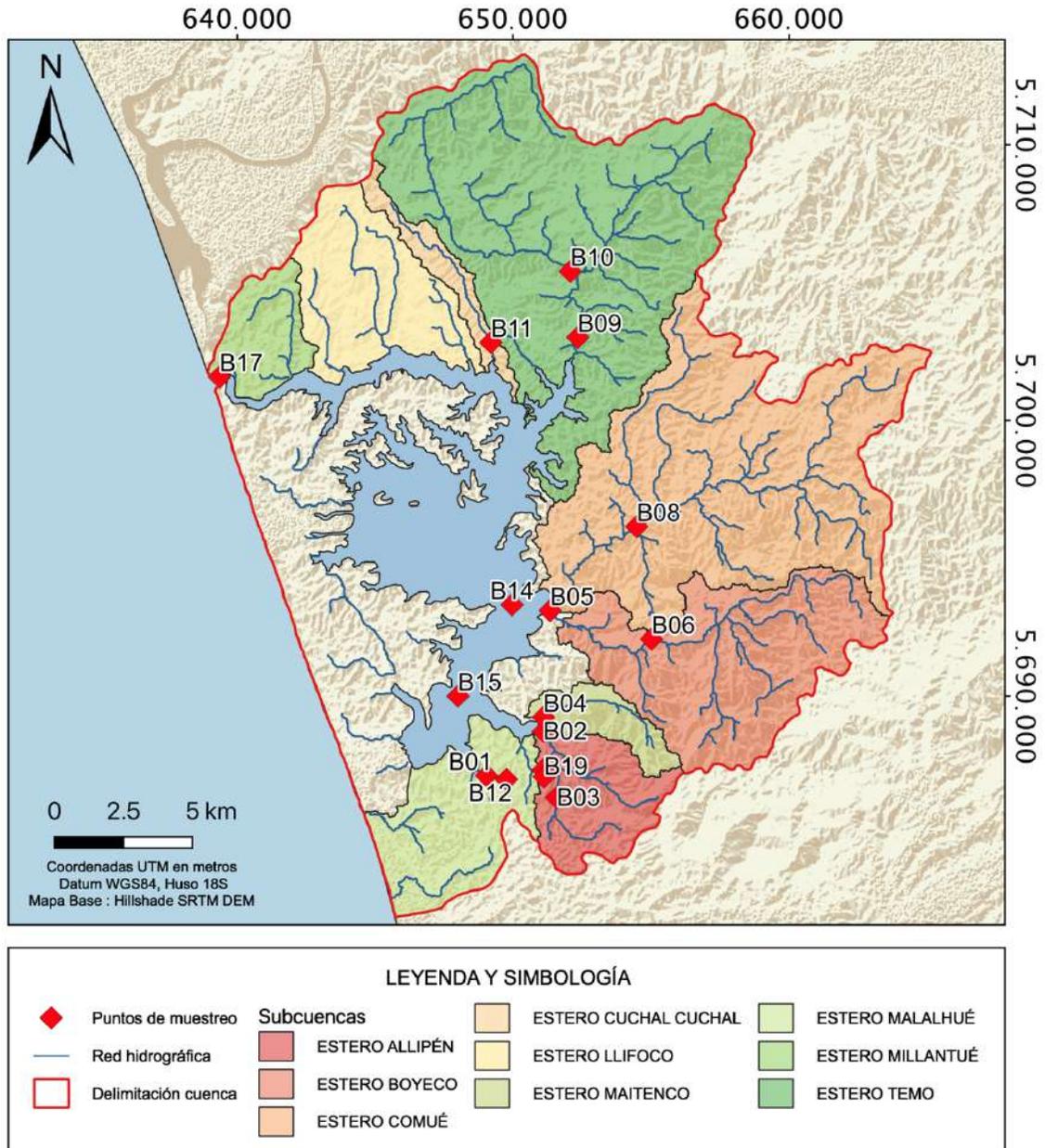


Figura 2-4: Ubicación de extracción de las muestras.

Los parámetros fisicoquímicos que se midieron *in situ* fueron: pH, conductividad eléctrica y temperatura, para lo cual se empleó un multiparámetro portátil HQ40d, con sondas de medición de conductividad eléctrica (HACH CDC40101) y pH (HACH PHC10101).

Las muestras se conservaron en recipientes de polietileno y vidrio, los cuales se pueden observar en la Figura 2-5. El primer paso consistió en rotularlos indicando el nombre, fecha y hora de la toma de muestra. Para su llenado se siguieron las

instrucciones dadas por el laboratorio Bureau Veritas, las cuales se detallan brevemente a continuación:

- Envases sin preservantes
 1. Ambientación: Se realizó llenando de manera parcial el envase, tapándolo y agitándolo, asegurándose que el agua entrara en contacto con la totalidad del recipiente. El procedimiento se repitió 3 veces por envase.
 2. Llenado: Se llenó la totalidad del envase con agua obtenida directamente de la fuente.
 3. Almacenamiento: Se guardó el envase en la caja térmica.

- Envases con preservantes
 1. Ambientación de botella auxiliar: Se realizó el proceso de ambientación descrito previamente en una botella auxiliar, la cual no formó parte de los envases de muestreo.
 2. Llenado: Se llenó la botella auxiliar con agua directamente de la fuente, la cual se vertió en los envases llenándolos a su capacidad máxima, sin excedentes que generaran escurrimientos.
 3. Almacenamiento: Se guardó el envase en la caja térmica.

Las muestras fueron almacenadas manteniendo una temperatura menor a 12°C y se entregaron en la sucursal del Laboratorio en Concepción, en menos de 24 horas desde el procedimiento de muestreo.



Figura 2-5: Envases utilizados en el muestreo de aguas.

Los métodos empleados en el laboratorio se muestran en la Tabla 2-2 donde se señala el código de Standard Methods, el nombre oficial, los analitos asociados y su nivel de detección, a partir de la información disponible en “National Environmental Methods Index”.

Tabla 2-2: Métodos analíticos utilizados en el laboratorio Bureau Veritas para la medición de concentraciones de elementos mayoritarios, minoritarios, parámetros fisicoquímicos y biológicos.

Código Standard Method	Nombre oficial del procedimiento	Analitos	Nivel de detección
2320 B	Titration Method	Bicarbonato	No aplica
2510 B	Conductivity – Laboratory Method	Conductividad	No aplica
3111 B	Direct Air – Acetylene Flame	Cadmio	0,002 mg/l
		Calcio	0,003 mg/l
		Cobre	0,010 mg/l
		Cromo	0,020 mg/l
		Estaño	0,800 mg/l
		Hierro	0,020 mg/l
		Litio	0,002 mg/l
		Magnesio	0,001 mg/l
		Manganeso	0,010 mg/l

Código Standard Method	Nombre oficial del procedimiento	Analitos	Nivel de detección
		Níquel	0,020 mg/l
		Plata	0,010 mg/l
		Plomo	0,050 mg/l
		Potasio	0,005 mg/l
		Sodio	0,002 mg/l
		Zinc	0,005 mg/l
3111 D	Direct Nitrous Oxide – Acetylene Flame Method	Aluminio	No aplica
		Bario	No aplica
		Berilio	No aplica
		Molibdeno	No aplica
		Vanadio	No aplica
3112 B	Metals in water by CV-AAS	Mercurio	No aplica
3114 B	Arsenic and Selenium by Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometry	Arsénico	No aplica
		Selenio	No aplica
3120 B	Metals in water by plasma emission spectrometry	Boro	0,005 mg/l
4110 B	Ion chromatography with chemical suppression of effluent conductivity	Fosfato	0,014 mg/l
4500 CN E	Cyanide: Colorimetric Method	Cianuro	0,020 mg/l
4500 Cl B	Argentometric method	Cloruro	No aplica
4500 F C	Ion selective electrode method	Fluoruro	0,100 mg/l
4500 SO4 D	Sulfate in water	Sulfato	No aplica
9221 E	Multiple-tube fermentation technique for members of the coliform group	Coliformes fecales	2 NMP/100 ml

2.5 Análisis y procesamiento de datos geoquímica de aguas

El tratamiento de los datos se llevó a cabo en distintas etapas, las cuales serán descritas a continuación:

2.5.1 Elaboración de la base de datos

A partir del reporte entregado por el laboratorio, se generó una base de datos la cual indica el tipo de agua muestreada y contiene los valores de concentraciones química, ubicación y parámetros medidos *in situ*.

2.5.2 Diagramas de Piper, Schöeller – Berkaloff y Stiff

Para la elaboración de los diagramas de Piper y Schöeller – Berkaloff se empleó el software EasyQuim.

En cuanto a los diagramas Stiff, estos se generaron con el software Stiff, una vez elaborados, de manera manual, fueron ubicados sobre el mapa de la cuenca de acuerdo con la ubicación de cada punto muestreado.

2.5.3 Análisis fisicoquímico e hidroquímico

Utilizando el software QGIS, se elaboraron mapas de concentración para cada una de las especies analizadas. A partir de la visualización espacial de la concentración, se analizó la distribución en la cuenca del elemento o sustancia química en cuestión, poniendo especial atención en la dependencia de la concentración con respecto al tipo de agua o si se observan patrones relacionados con la distribución espacial del ion.

Es importante notar que los parámetros medidos *in situ* no se midieron en el agua del lago, dadas las características técnicas de los equipos empleados.

2.5.4 Relaciones iónicas de interés

Para determinar distintas relaciones iónicas a partir de las concentraciones de elementos mayoritarios, fue necesario transformar las unidades de concentración de mg/l a meq/l y mmol/l. De manera complementaria, para la elaboración del diagrama de Gibbs, fue necesario determinar la concentración de total de sólidos disueltos (TSD), la cual se calculó según la siguiente fórmula:

$$TSD \left[\frac{mg}{l} \right] = A \cdot CE_{25^{\circ}C} \left(\frac{\mu S}{cm} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

A : valor constante, que varía entre 0,55 y 0,75.

$CE_{25^{\circ}C}$: Conductividad eléctrica a 25 ° C

En el presente estudio, se utilizará $A = 0,65$ (Giovanetti, 2018)

Exceptuando el diagrama de Gibbs, las relaciones iónicas se determinaron para las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca.

2.5.5 Comparación con otros sistemas

Los resultados de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de iones mayoritarios y minoritarios obtenidas en el presente estudio, se compararon con los valores de concentraciones de un sistema similar, correspondiente al complejo de Humedales El Yali y con las cuencas vecinas: río Toltén y río Imperial.

La comparación se realizó considerando los valores de concentraciones medias obtenidas en el muestreo, con los valores de concentraciones medias reportadas en estudios previos realizados en cada uno de los sistemas.

2.5.6 Análisis con respecto a la normativa chilena

Las aguas muestreadas fueron sometidas a los parámetros establecidos en las siguientes normativas:

Norma Chilena Oficial NCh.409/1. Of 2005

Se compararon los valores de las concentraciones de distintos elementos químicos, con los límites correspondientes a los criterios para elementos o sustancias químicas de importancia para la salud (Tipo II), específicamente: elementos esenciales, elementos o sustancias no esenciales y parámetros relativos a características organolépticas.

Norma Chilena Oficial NCh.1333

La Norma Chilena NCh.1333 establece distintos límites dependiendo del uso que se le quiera dar al agua. En el presente estudio, se compararon los valores de concentración iónica medidos en las aguas, con los requisitos para agua destinada a regadío.

3. Caracterización Geomorfológica

3.1 Unidades geomorfológicas

Según Peña-Cortés *et al.* (2014), la geomorfología de la costa de la región de la Araucanía puede dividirse en dos grandes grupos. Por un lado, se pueden diferenciar relieves de erosión, donde se observan morfologías tales como: cordones montañosos, terrazas y plataformas; mientras que el otro conjunto de geoformas se asocia a relieves de acumulación como: depósitos aluviales, llanuras y terrazas.

De manera particular, en la cuenca del lago Budi es posible identificar 6 unidades morfológicas, correspondientes a cordón montañoso, niveles aterrizados, humedales, llanura fluvio marina, campos dunarios y acantilados, las cuales pueden observarse en la Figura 3-1 en conjunto con la geología e hidrografía de la zona de estudio.

De manera particular, la Figura 3-2 muestra la sección AA' cuya altura máxima se encuentra en el extremo NE y es de 250 m snm, en ese mismo punto se nota la presencia del cordón montañoso y es posible observar como la totalidad de esta unidad se encuentra sobre la unidad geológica correspondiente a roca metamórfica. Avanzando hacia el oeste, es posible notar la extensión de los niveles aterrizados, caracterizados por sus pendientes onduladas, los cuales se ubican sobre las unidades de roca metamórfica y secuencias sedimentarias, precisamente en el contacto litológico observado en esta unidad se encontraría la falla inferida por Lomnitz (1969). Siguiendo hacia el oeste, se observan las unidades asociadas a procesos de depositación tales como humedales, llanura fluvio marina y campos dunarios, las cuales se encuentran a nivel del mar.

La Figura 3-3 muestra la sección BB', donde de inmediato es posible advertir un aumento en las elevaciones con respecto al perfil anterior. La unidad de cordón montañoso sigue localizándose hacia el NE, pero su elevación asciende a 400 m snm. Avanzando en dirección a la costa, nuevamente se observan los niveles aterrizados con sus pendientes onduladas, esta unidad alcanza una elevación entre 100 y 50 m snm, diferenciándola del cordón montañoso producto de la pronunciada baja en la topografía. En esta traza no se encuentran morfologías asociadas a la depositación y finaliza en los acantilados costeros.

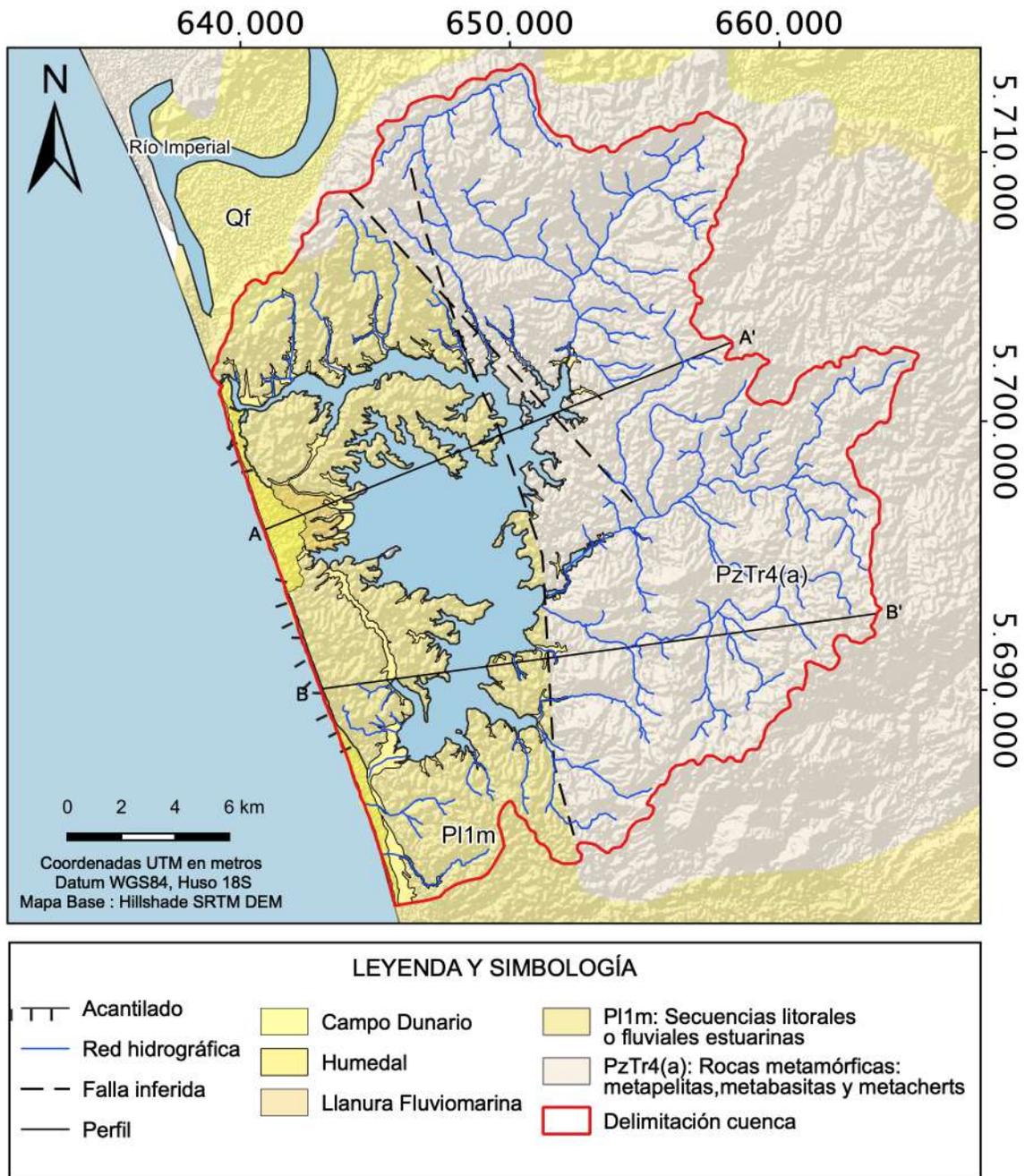


Figura 3-1: Mapa geológico-geomorfológico en base a Peña-Cortés (2014) y observaciones de terreno.

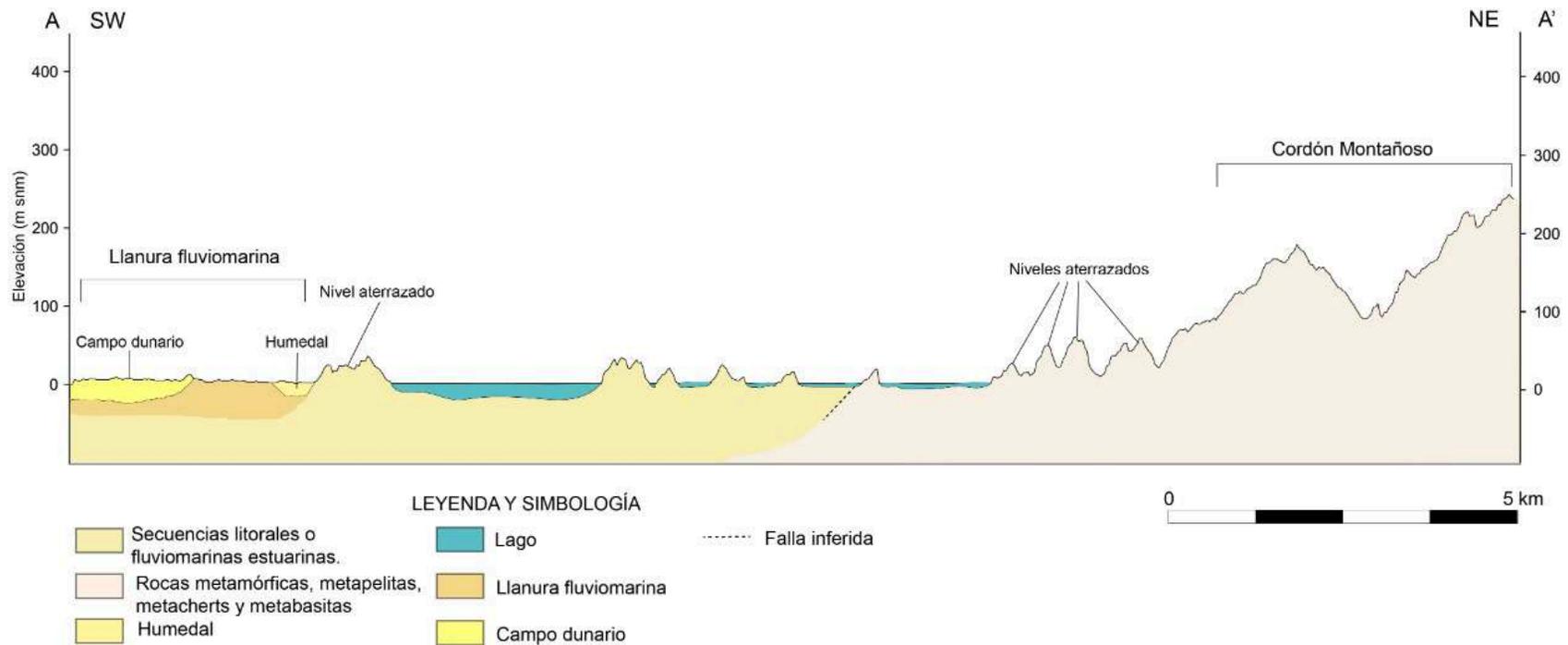


Figura 3-2: Perfil geológico – geomorfológico AA'.

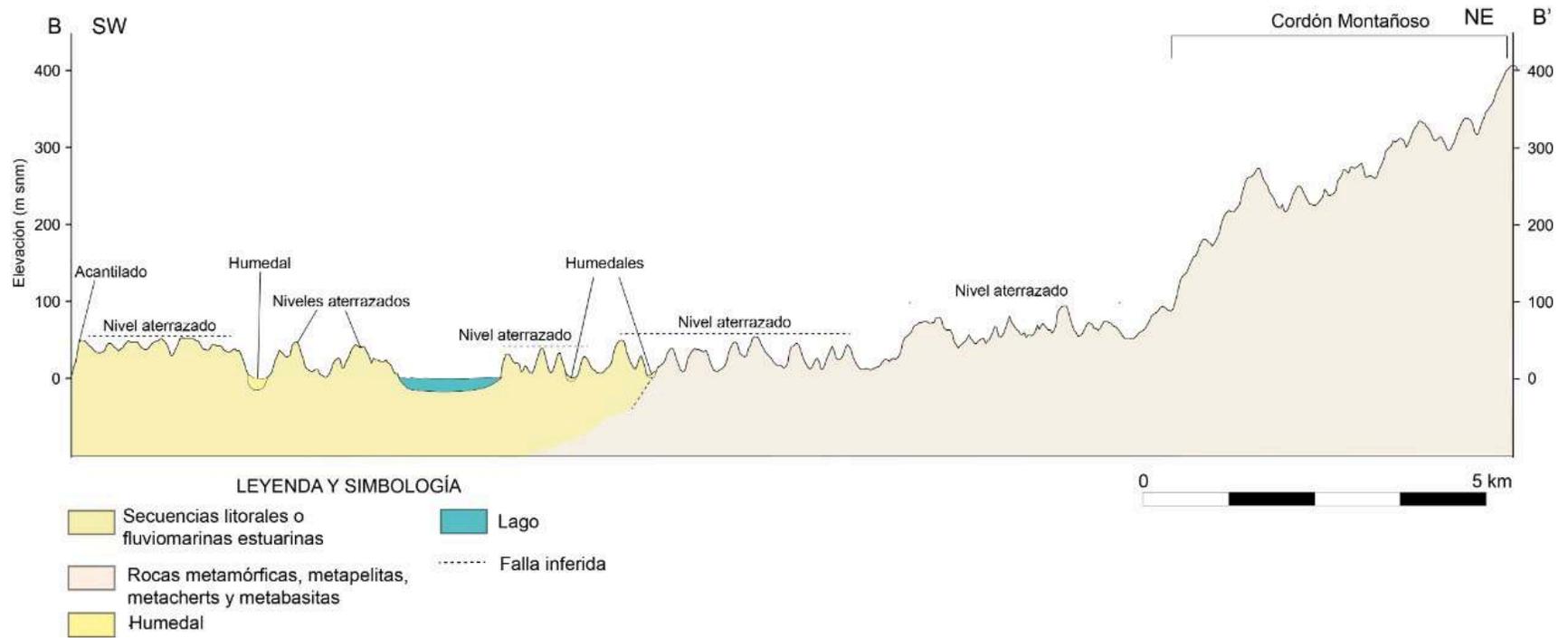


Figura 3-3: Perfil geológico – geomorfológico BB'.

De las unidades identificadas en el mapa geológico – geomorfológico es importante destacar los Niveles aterrizados. De manera general, sus elevaciones bordean los 125 m snm y corresponden a la unidad que abarca mayor superficie en toda la cuenca, se forman en roca metamórfica y secuencias sedimentarias producto de la incisión fluvial, lo que da paso a lomajes con pendientes que varían entre suave y pronunciada.



Imagen 3-1: Niveles aterrizados con suaves lomajes vistos hacia el este desde el sector de Deume.

23 de septiembre de 2021

Otra morfología relevante corresponde a los humedales, los cuales se ubican en las desembocaduras de los esteros presentando abundante vegetación. Su formación se asocia a procesos de anegamiento e inundación estacional.



Imagen 3-2: Humedal en la desembocadura del estero Allipén.

22 de septiembre 2021.

Hacia la parte este de la cuenca, se identifica la unidad de cordón montañoso que corresponde principalmente a roca metamórfica y se correlaciona con la Cordillera de la costa. Por otro lado, hacia el sector oeste de la cuenca, se distinguen morfologías asociadas a ambientes litorales tales como los campos dunarios, acantilados y llanura fluvio marina, donde es preciso destacar que esta última se formó producto de depositación de sedimentos provenientes del continente.



Imagen 3-3: Campo dunario visto hacia el sur en la zona de Puacho.
23 de septiembre 2021



Imagen 3-4: Acantilado costero activo visto hacia el sur, en el sector de Boca Budi.
21 de septiembre 2021

3.2 Hidrografía

La cuenca hídrica del lago Budi está compuesta por nueve subcuencas que drenan hacia el lago y toman el nombre del estero principal. Las subcuencas de mayor extensión son las de Estero Temo, Comué y Boyeco, mientras que las de menor extensión son las de Estero Millantué, Cuchal-Cuchal y Maitenco.

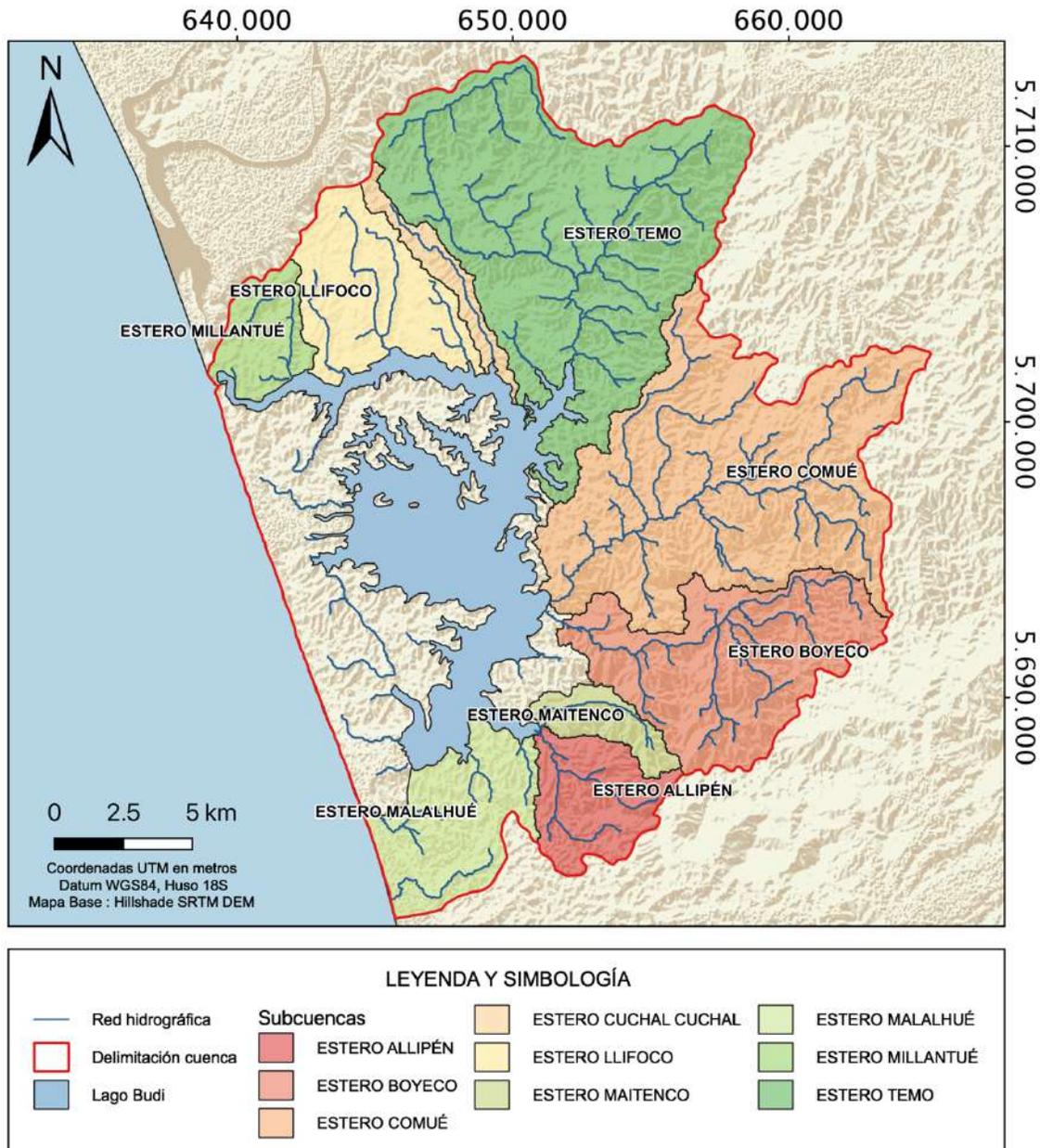


Figura 3-4: Red de drenaje y subcuencas generadas a partir de GRASS-GIS.

Como se observa en la Figura 3-4, la red de drenaje presenta un patrón dendrítico-rectangular, en donde la mayoría de los tributarios presentes son intermitentes. Los

cursos de aguas permanentes corresponden a los esteros, quienes entre ellos presentan diferencias en la velocidad de flujo. Además, algunas de las nacientes de los tributarios corresponden a manantiales sagrados o menokos, como son conocidos por los habitantes de la zona y corresponden a afloramientos de aguas subterráneas que se encuentran distribuidos en la cuenca.

3.3 Geomorfometría y caracterización del relieve de la cuenca

Los parámetros geomorfológicos calculados para la cuenca del lago Budi se muestran en la Tabla 3-1, mientras que para las subcuencas se observan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-1: Parámetros geomorfológicos de la cuenca hídrica del Lago Budi.

Parámetro geomorfológico	Valor
Perímetro de la cuenca (km)	116,93
Longitud axial (km)	26,17
Longitud total del drenaje (km)	316,04
Área (km ²)	497,25
Ancho promedio (km)	19
Factor de forma	0,73
Coef. de compacidad de Gravelius (Kc)	1,48
Integral hipsométrica (%)	17,5
Pendiente media (%)	12,9
Coef. de rugosidad	0,56
Densidad de drenaje	0,64

Tabla 3-2: Parámetros geomorfológicos subcuencas.

Subcuenca	Longitud del curso principal (km)	Longitud axial (km)	Coef. de sinuosidad	Pendiente media del cauce	Tiempo de concentración (hr)
Estero Millantué	4,8	3,98	1,81	0,009	1,37
Estero Llifoco	7,05	6,26	1,28	0,007	2,02
Estero Cuchal Cuchal	7,58	8,43	1,11	0,011	1,80
Estero Temo	21,67	10,92	1,15	0,008	4,56
Estero Comué	20,32	16,43	1,28	0,007	4,47
Estero Boyeco	16,57	11,71	1,45	0,018	2,72
Estero Maitenco	6,02	5,25	1,37	0,028	1,04
Estero Allipén	5,93	5,37	1,24	0,009	1,03
Estero Malahue	3,16	7,83	1,08	0,014	0,83

En la Figura 3-5 es posible observar que la elevación de la cuenca va desde los 0 hasta los 358 m snm, registrando una altura media de 49 m snm, la cual se obtiene a partir de la curva hipsométrica de la cuenca (Figura 3-6).

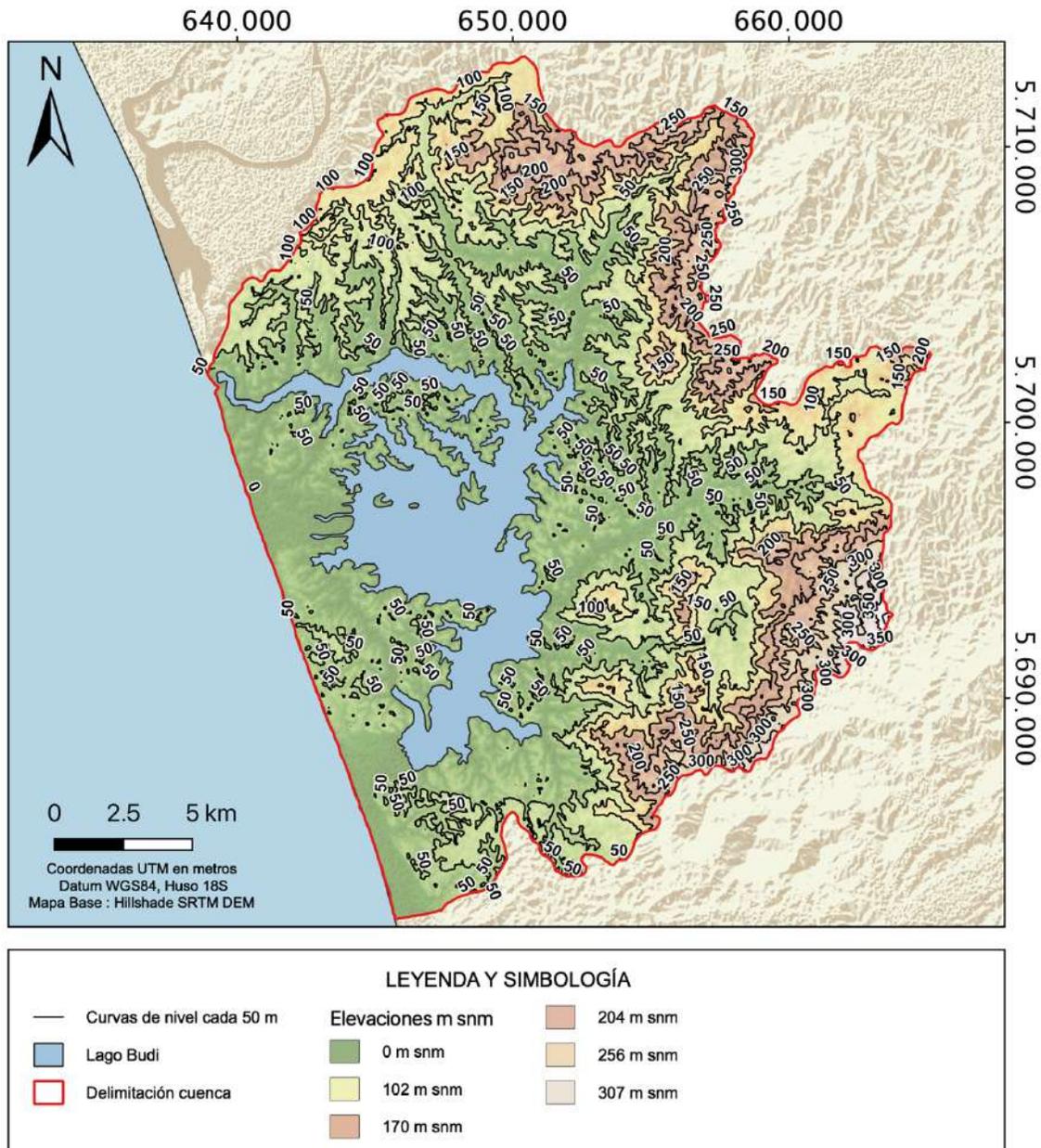


Figura 3-5: Mapa de elevaciones.

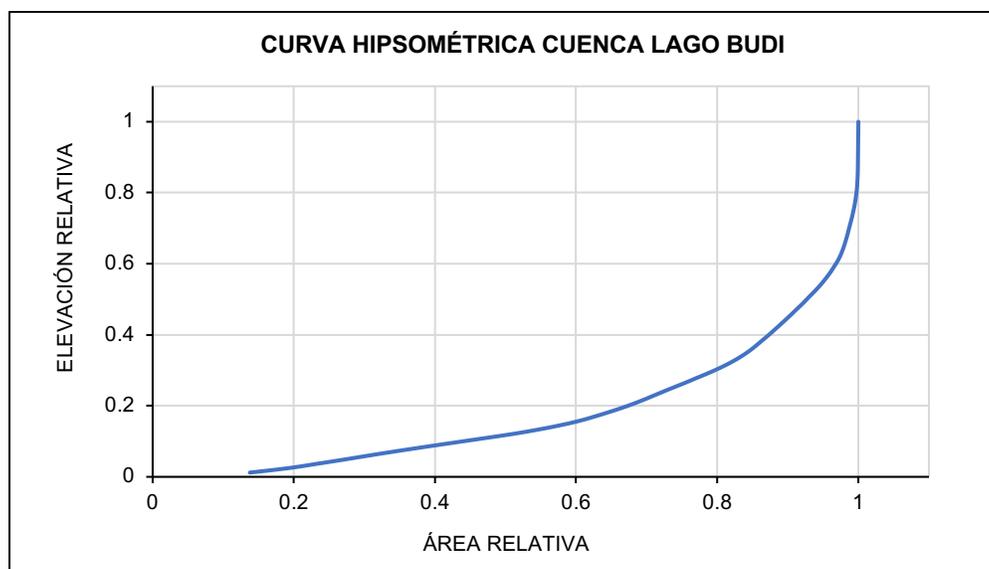


Figura 3-6: Curva hipsométrica cuenca hídrica lago Budi.

La pendiente de la zona de estudio fue clasificada según la Pauta Para Estudio de Suelo (SAG, 2011). A partir de lo anterior, es posible identificar que la pendiente dominante en la cuenca es la de tipo fuertemente ondulada, seguida por la pendiente moderadamente ondulada. Los tipos de pendiente junto con la superficie que abarcan pueden verse en la Tabla 3-3 y su distribución en la cuenca, en la Figura 3-7.

Tabla 3-3: Clasificación de pendientes de la cuenca del Lago Budi según la Pauta para estudio de suelo (SAG, 2011).

Tipo de pendiente	Superficie (km²)	Porcentaje de superficie (%)
Casi plano (1% < 3%)	24,12	5,53
Ligeramente ondulado (3%<5%)	29,17	6,69
Suavemente ondulado (5%<8%)	44,24	10,14
Moderadamente ondulado (8%<15%)	115,28	26,43
Fuertemente ondulado (15%<30%)	182,12	41,75
Lomajes (30%<45%)	38,10	8,74
Cerros (45%<60%)	3,02	0,69
Montañas (>60%)	0,12	0,03

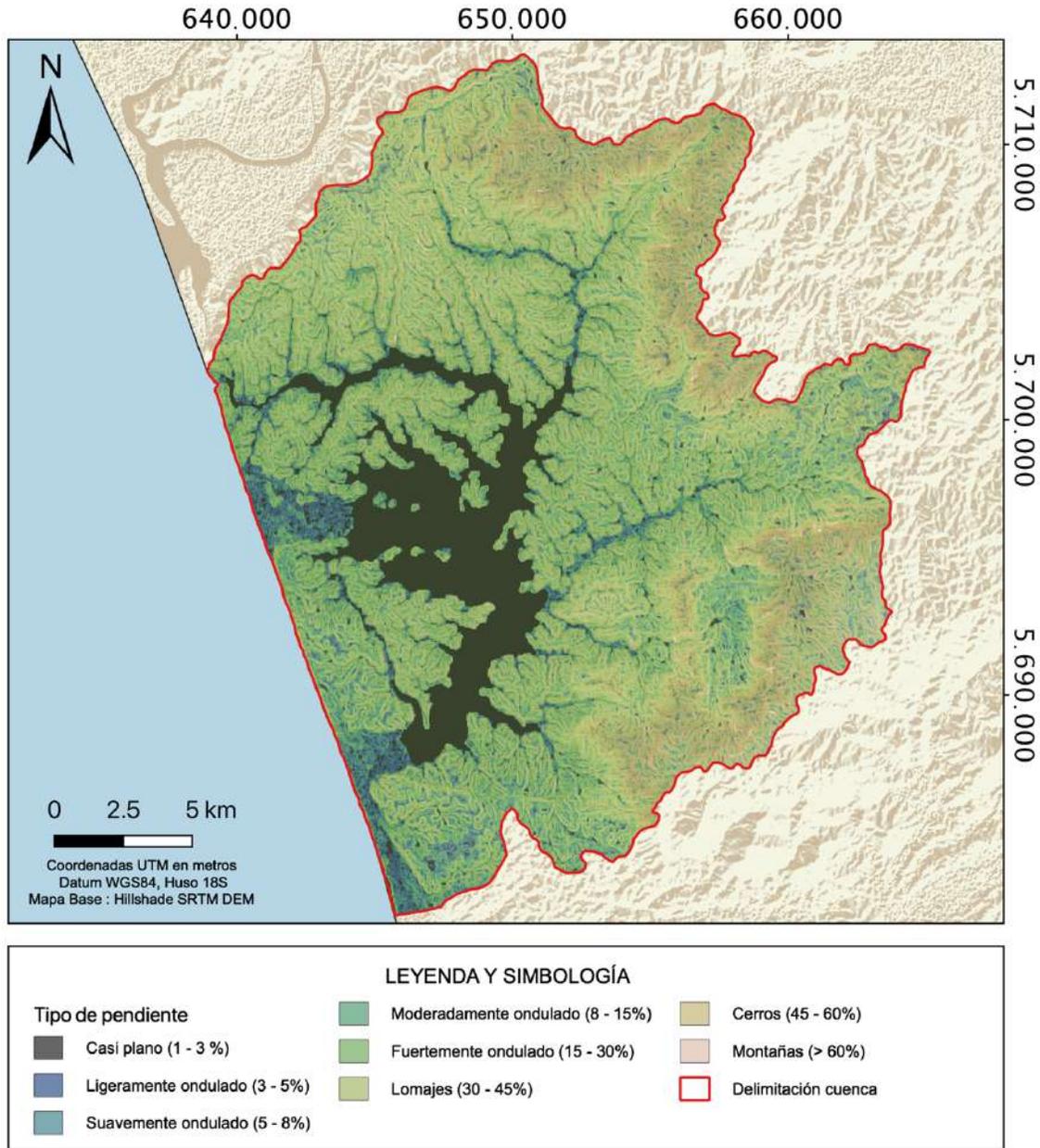


Figura 3-7: Mapa de pendientes, clasificación según SAG (2011).

3.4 Evolución temporal de la línea de costa del lago

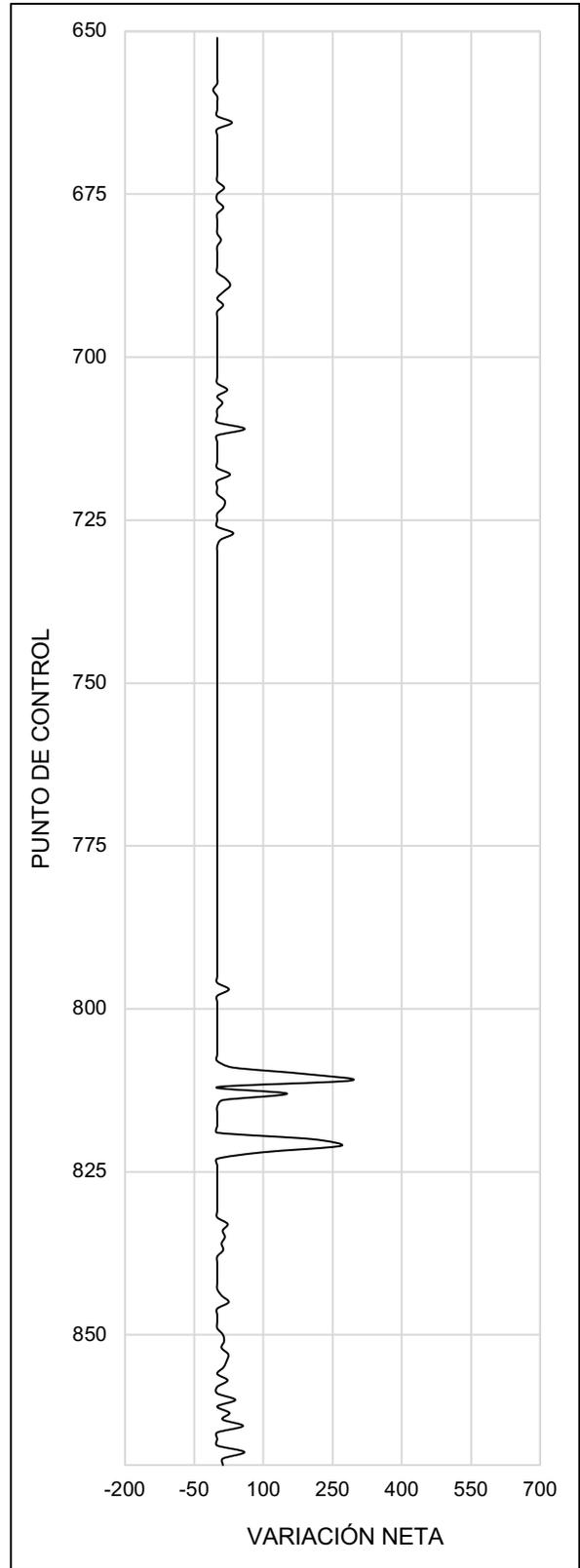
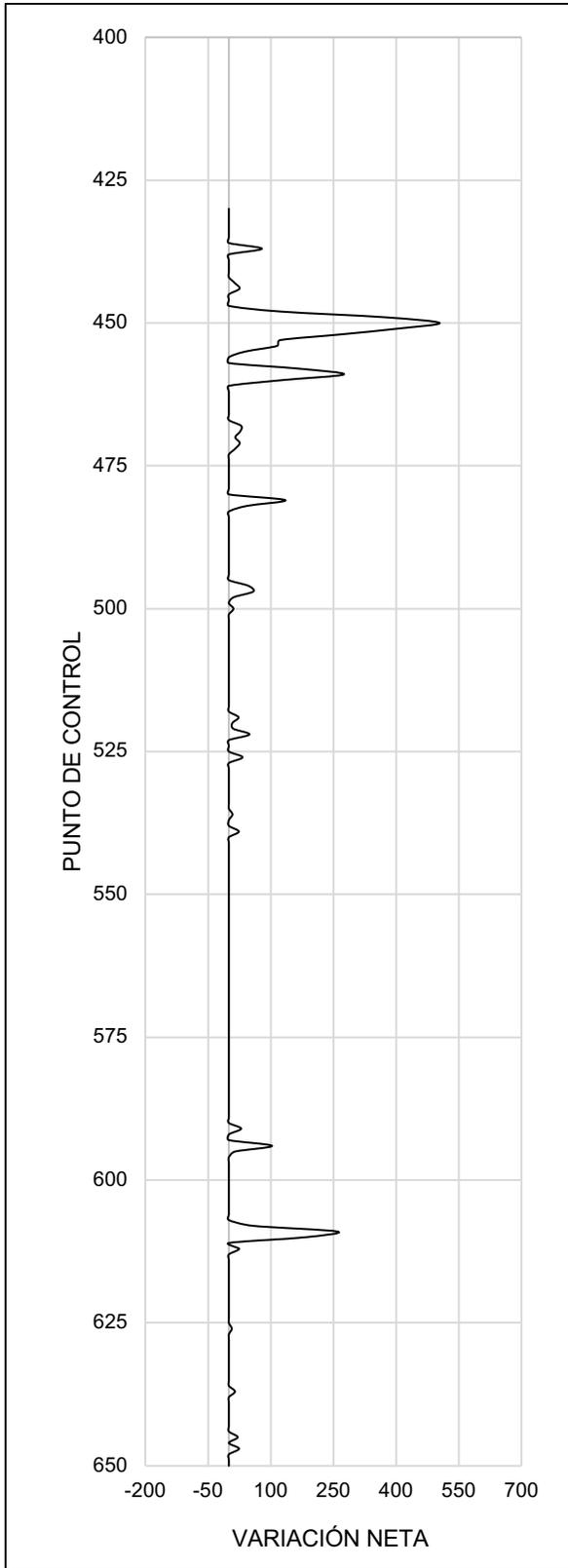
La evolución temporal de la línea de costa del lago se realizó considerando los años 2013 y 2020. Es importante notar que las variaciones de límites y superficie del espejo de agua y de los humedales observados en el presente estudio no representan más del 0,3% de la superficie de la cuenca.

La superficie en la que se registró avance de la línea de costa corresponde a 1,48 km², mientras que el retroceso corresponde a 0,11 km². Con respecto a la ubicación y distribución de las variaciones observadas, la Figura 3-8 muestra que, de manera general, están distribuidas de manera uniforme a lo largo de la línea de costa del lago. Con respecto a las distancias de avance, estas no superan los 700 m, mientras que los retrocesos no son mayores a 300 m.

Finalmente, las variaciones registradas a escala de subcuenca se observan en la Tabla 3-4, donde es posible advertir la poca significancia de la superficie sujeta a variaciones, pues esta no supera los 0,2 km² en ninguna de las subcuencas analizadas.

Tabla 3-4: Variación de la línea de costa del lago a escala de subcuenca.

Subcuenca	Avance (km²)	Retroceso (km²)
Millantué	0,110	0,005
Boyeco	0,010	0,000
Maitenco	0,127	0,000
Allipén	0,000	0,000
Malalhue	0,045	0,001
Temo	0,017	0,000



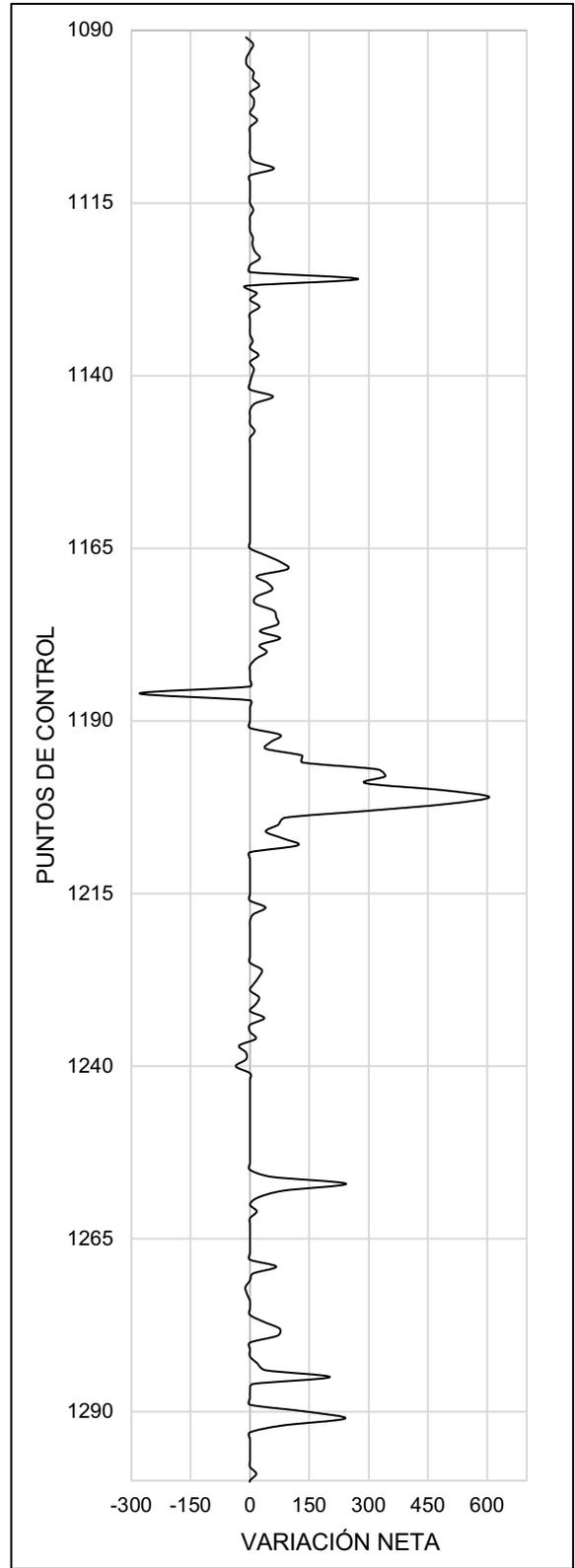
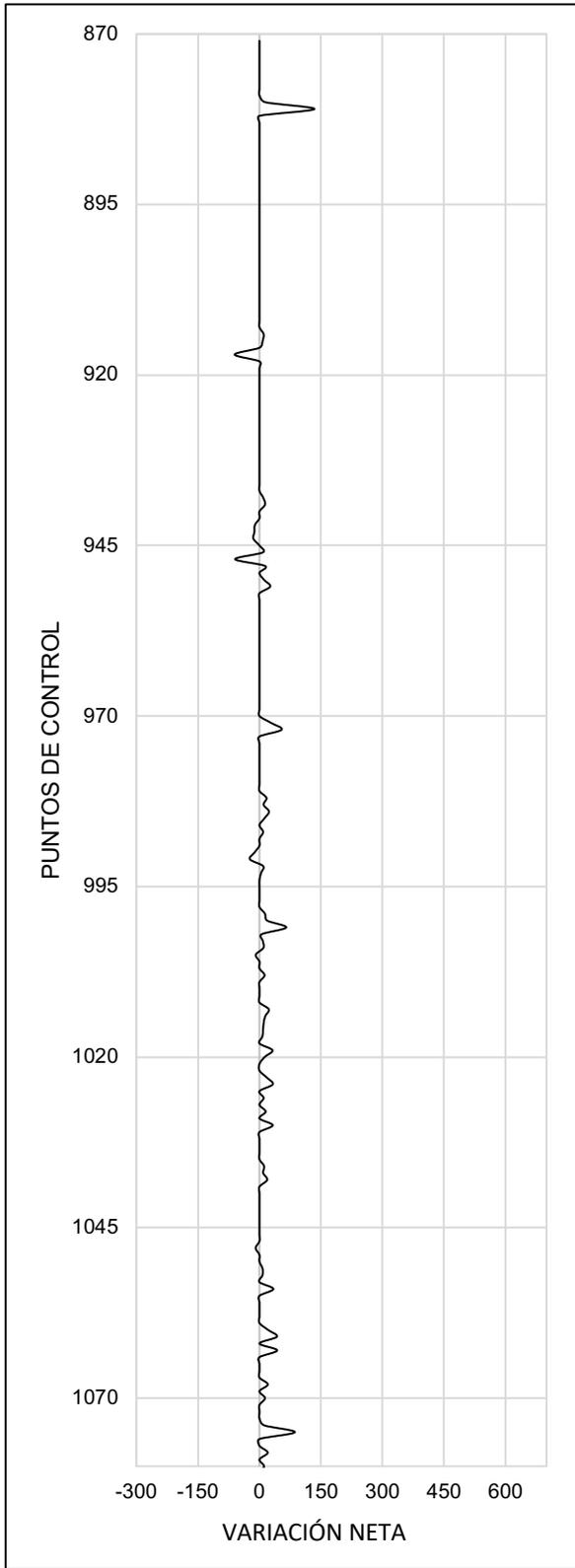


Figura 3-8: Variación de la línea de costa

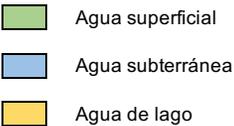
4. Geoquímica de aguas

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos respecto a la geoquímica de las aguas, en una primera instancia se mostrarán los valores de las distintas concentraciones obtenidas para los elementos, luego se presentarán clasificaciones, comparaciones, relaciones entre concentraciones de elementos.

En primer lugar, se hace necesario precisar la naturaleza de las aguas estudiadas ya que estas pueden ser superficiales, subterráneas o del lago. Del total de 16 muestras, 10 corresponden a aguas superficiales, 3 a afloramientos de aguas subterráneas y 3 a muestras de lago. Para facilitar su identificación en el presente capítulo, se utilizará el código de colores que se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Simbología y ubicación de las muestras de agua.

MUESTRAS	Referencia	Ubicación	Tipo de agua
B01	Estero Pololo	Subcuenca estero Malalhue	Superficial
B02	Desembocadura Allipén	Subcuenca estero Allipen	Superficial
B03	APR	Subcuenca estero Allipen	Superficial
B04	Estero Maitenco	Subcuenca estero Maitenco	Superficial
B05	Desembocadura Boyeco	Subcuenca estero Boyeco	Superficial
B06	Boyeco Aguas Arriba	Subcuenca estero Boyeco	Superficial
B08	Puente los Mellizos	Subcuenca estero Comué	Superficial
B09	Desembocadura Temo	Subcuenca estero Temo	Superficial
B10	Temo Aguas Arriba	Subcuenca estero Temo	Superficial
B11	Desembocadura Cuchal	Subcuenca estero Cuchal - Cuchal	Superficial
B12	Menoko Don Oscar	Subcuenca estero Malalhue	Subterránea
B13	Vivero (Menoko)	Subcuenca estero Allipen	Subterránea
B14	Lago Frente a Comué	Lago	Lago
B15	Lago frente Allipén	Lago	Lago
B17	Desembocadura río Budi	Lago	Lago
B19	Nacimiento Menoko	Subcuenca estero Allipen	Subterránea



■ Agua superficial
■ Agua subterránea
■ Agua de lago

La Tabla 4-2 muestra el valor de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* y en laboratorio, mientras que en la Tabla 4-3 se indican las concentraciones de los elementos mayoritarios y en la Tabla 4-4 se señalan las concentraciones de los elementos minoritarios detectados. En el Anexo B se presenta el análisis de laboratorio completo, incluyendo aquellos elementos que, de acuerdo con la metodología empleada, presentan concentraciones indetectables.

Tabla 4-2: Parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* y en laboratorio.

MUESTRAS	<i>In situ</i>			Laboratorio
	pH	Temperatura °C	Conductividad eléctrica µS/cm	Conductividad eléctrica µS/cm
B01	6,73	11,4	82,9	74,7
B02	6,74	12,7	62,8	57,5
B03	7,30	10,6	58,5	57,2
B04	6,76	14,0	56,4	54,7
B05	6,90	14,1	53,2	48,8
B06	7,12	13,0	48,4	44,7
B08	6,64	12,1	58,5	54,8
B09	6,64	11,5	76,7	70,0
B10	6,88	11,7	74,2	71,1
B11	6,56	11,7	94,4	91,3
B14	-	-	-	50,9
B15	-	-	-	49,2
B17	-	-	-	6.650,0
B12	5,89	13,6	52,4	6.800,0
B13	6,21	11,8	49,8	7.840,0
B19	6,47	14,8	51,7	50,4

Tabla 4-3: Concentración de elementos mayores.

MUESTRAS	ANIONES				CATIONES			
	HCO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻² mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ⁺² mg/l	Mg ⁺² mg/l
B01	20,81	37,00	14,30	0,23	9,05	0,93	2,29	2,12
B02	18,50	27,20	10,60	0,26	7,23	0,58	1,57	1,74
B03	18,50	18,50	11,60	<0,20	16,89	0,71	1,66	1,88
B04	20,81	18,10	10,00	<0,20	6,67	0,57	1,67	1,83
B05	20,81	21,00	8,40	0,44	5,31	0,44	1,59	1,83
B06	18,50	17,30	7,70	0,34	4,81	0,40	1,60	1,83
B08	25,44	14,40	8,80	<0,20	5,50	0,45	1,66	1,92
B09	20,81	16,10	10,50	0,44	7,44	0,67	2,56	2,48
B10	20,81	17,30	12,30	0,30	8,35	0,67	2,49	2,59
B11	30,06	17,70	10,90	0,33	10,64	0,94	4,35	3,45
B12	13,88	30,90	11,10	1,90	6,99	0,33	0,77	1,33
B13	16,19	18,10	9,50	<0,20	6,83	0,32	0,91	1,12
B14	55,50	302,10	2326,80	<0,20	1423,06	46,44	20,61	146,41
B15	57,81	307,50	2337,00	<0,20	1373,40	45,46	20,09	139,71
B17	57,81	366,70	2671,50	<0,20	1660,90	51,07	20,09	168,36
B19	16,19	18,90	20,30	<0,20	7,44	0,33	1,37	1,35

Tabla 4-4: Concentración de elementos minoritarios detectados.

MUESTRAS	Al mg/l	B mg/l	Sr mg/l	F mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Mo mg/l
B01	1,690	<0,007	<0,100	<0,200	2,390	0,110	<0,010
B02	1,150	0,430	<0,100	<0,200	1,880	0,100	<0,010
B03	0,810	<0,007	<0,100	<0,200	1,570	0,060	<0,010
B04	1,720	<0,007	<0,100	<0,200	2,180	0,090	<0,010
B05	1,760	<0,007	<0,100	<0,200	2,240	0,150	<0,010
B06	1,180	<0,007	<0,100	<0,200	1,650	0,150	<0,010
B08	0,510	<0,007	<0,100	<0,200	1,450	0,120	<0,010
B09	1,930	<0,007	<0,100	<0,200	3,220	0,190	<0,010
B10	1,800	<0,007	<0,100	<0,200	2,380	0,110	<0,010
B11	11,940	<0,007	<0,100	<0,200	4,500	0,450	<0,010
B12	<0,050	<0,007	<0,100	<0,200	<0,050	<0,010	<0,010
B13	<0,050	<0,007	<0,100	<0,200	0,370	0,030	<0,010
B14	<0,050	0,447	0,672	<0,200	<0,050	0,040	0,010
B15	<0,050	0,459	0,682	0,200	0,050	0,050	0,010
B17	1,130	0,526	0,789	0,200	0,050	0,060	0,010
B19	1,580	<0,007	<0,100	<0,200	1,790	0,060	<0,010

4.1 Parámetros fisicoquímicos y biológicos

Los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* corresponden a: temperatura, conductividad eléctrica y pH, los cuales fueron se registraron en las muestras de aguas superficiales y subterráneas durante la campaña de terreno.

Por otro lado, en laboratorio se midió nuevamente la conductividad eléctrica a 25°C y se determino la concentración de coliformes fecales.

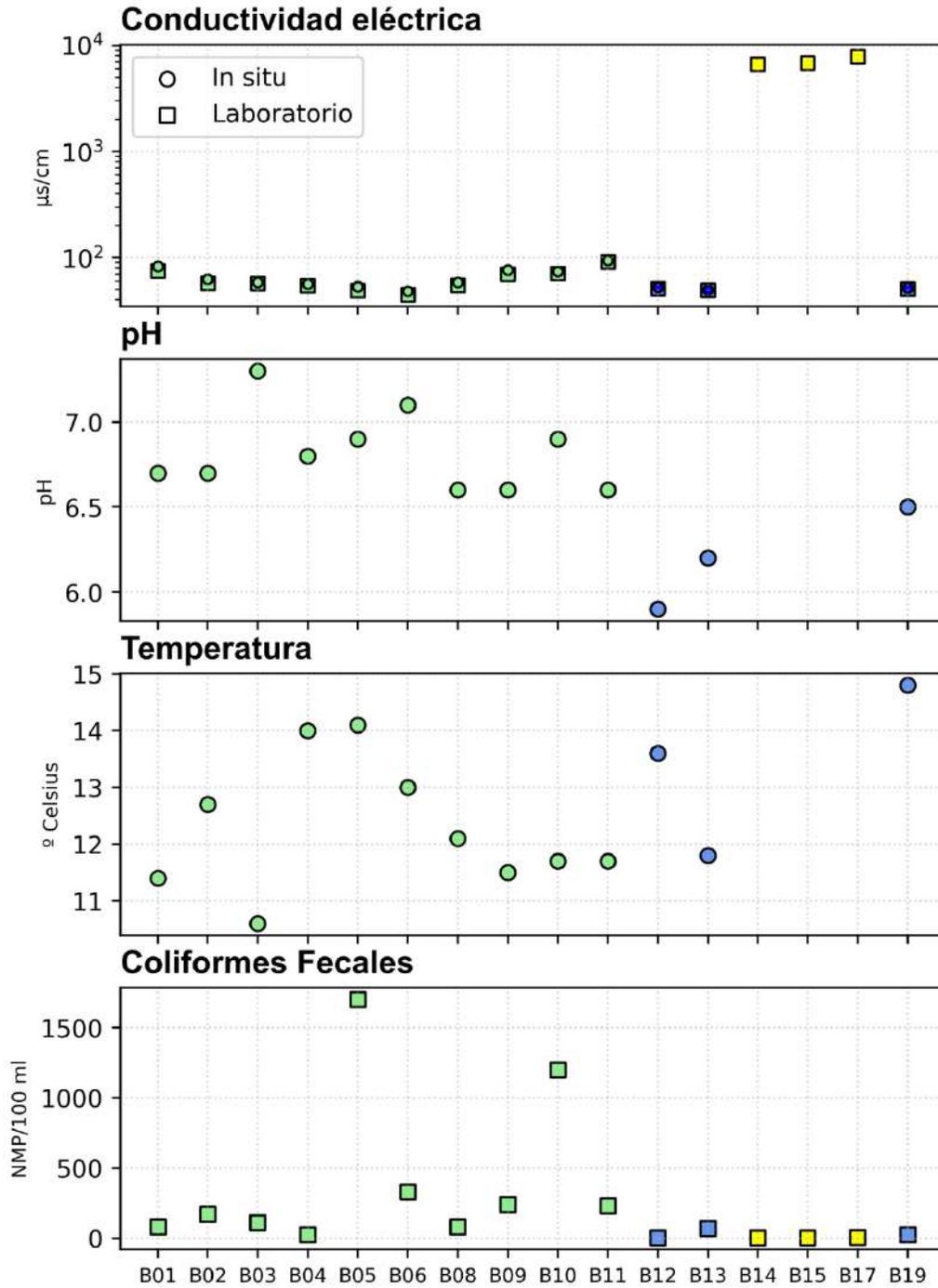


Figura 4-1: Parámetros fisicoquímicos y biológicos, determinados in situ y en laboratorio. En verde las aguas superficiales, en azul las subterráneas y en amarillo las aguas del lago.

4.1.1 Conductividad eléctrica

Custodio y Llamas (1996) definen la conductividad eléctrica como la capacidad que tiene el agua para conducir la electricidad, se caracteriza por aumentar junto con la temperatura y con el contenido y tipo de iones disueltos.

A partir de los valores observados en la Figura 4-1, es posible notar la diferencia de magnitud entre las conductividades eléctricas medidas en el lago, con respecto a las registradas en aguas superficiales y subterráneas. Si bien estos valores fueron medidos en laboratorio, la Figura 4-1 muestra la poca variación que existe entre los registros *in situ* con los de laboratorio.

Por otro lado, en la Figura 4-2 se muestra la distribución espacial de la conductividad eléctrica medida *in situ*, donde es posible observar una leve disminución hacia el centro de la cuenca.

4.1.2 Potencial de Hidrógeno pH

El potencial de hidrógeno, pH, se define según la siguiente ecuación:

$$pH = -\log [H^+] \quad (4.1)$$

En base a lo que se señala en la Tabla 4-2, es posible notar valores de pH en un rango entre 5,89 y 7,30, además en la Figura 4-1 se observa que los valores de pH mas bajos se asocian a los puntos de aguas subterráneas. La Figura 4-2 muestra la distribución espacial de pH en las aguas muestreadas, donde es posible notar la predominancia de valores de pH entre 6,5 a 7,0.

4.1.3 Temperatura

Corresponde al potencial calorífico del agua y depende de factores tales como la temperatura atmosférica y gradiente geotérmico de la zona a la cual pertenecen las aguas, por lo que se espera que tengan una baja variabilidad espacial (Custodio y Llamas, 1996).

Tabla 4-5: Clasificación de temperatura del agua según Bogomolov (1966).

Tipo de agua	Rango de temperatura
Muy fría	< 5°C
Fría	5 a 10°C
Moderadamente fría	10 a 18°C
Tibia	18 a 25°C
Moderadamente tibia	25 a 37°C
Caliente	37 a 42°C
Muy caliente	> 42°C

Los valores obtenidos indican temperaturas entre 10,6 y 14,8 °C y presentan una variación menor a 5 °C. En la Figura 4-1, puede observarse que las muestras B04 y B05 corresponden a las aguas con temperatura mas elevada, mientras que su distribución espacial se observa en la Figura 4-2, donde no es posible identificar relaciones entre los valores obtenidos y la ubicación.

4.1.4 Coliformes fecales

Corresponden al único parámetro biológico, se mide en NMP/100 ml (Número Mas Probable en 100 ml) y son un subgrupo de bacterias que están presentes en el tracto gastrointestinal humano y de mamíferos. Su presencia en el agua es mas prolongada que otras bacterias patógenas, además son termo tolerantes y tienen la capacidad para reproducirse fuera del intestino dadas ciertas condiciones dependientes de la cantidad de materia orgánica, pH, humedad, entre otros (Díaz et. al, 2003).

Díaz et. al (2003) plantean que los coliformes deben interpretarse según el tipo y uso de agua, de manera que se espera que estén ausentes en el 85% de las muestras de agua potable tratada y que en caso de estar presentes, el número mas probable en 100 ml (NMP/100 ml) debiera ser inferior a 3 coliformes.

En la Figura 4-1 se observa que, de manera general, la concentración de coliformes es bajo 500 NMP/100ml, exceptuando dos puntos de muestreo que presentan valores mas elevados. Mientras que en la Figura 4-2 se puede ver la distribución de coliformes en la cuenca, donde es posible distinguir los focos de concentraciones mas elevadas correspondientes a los puntos B05 y B11.

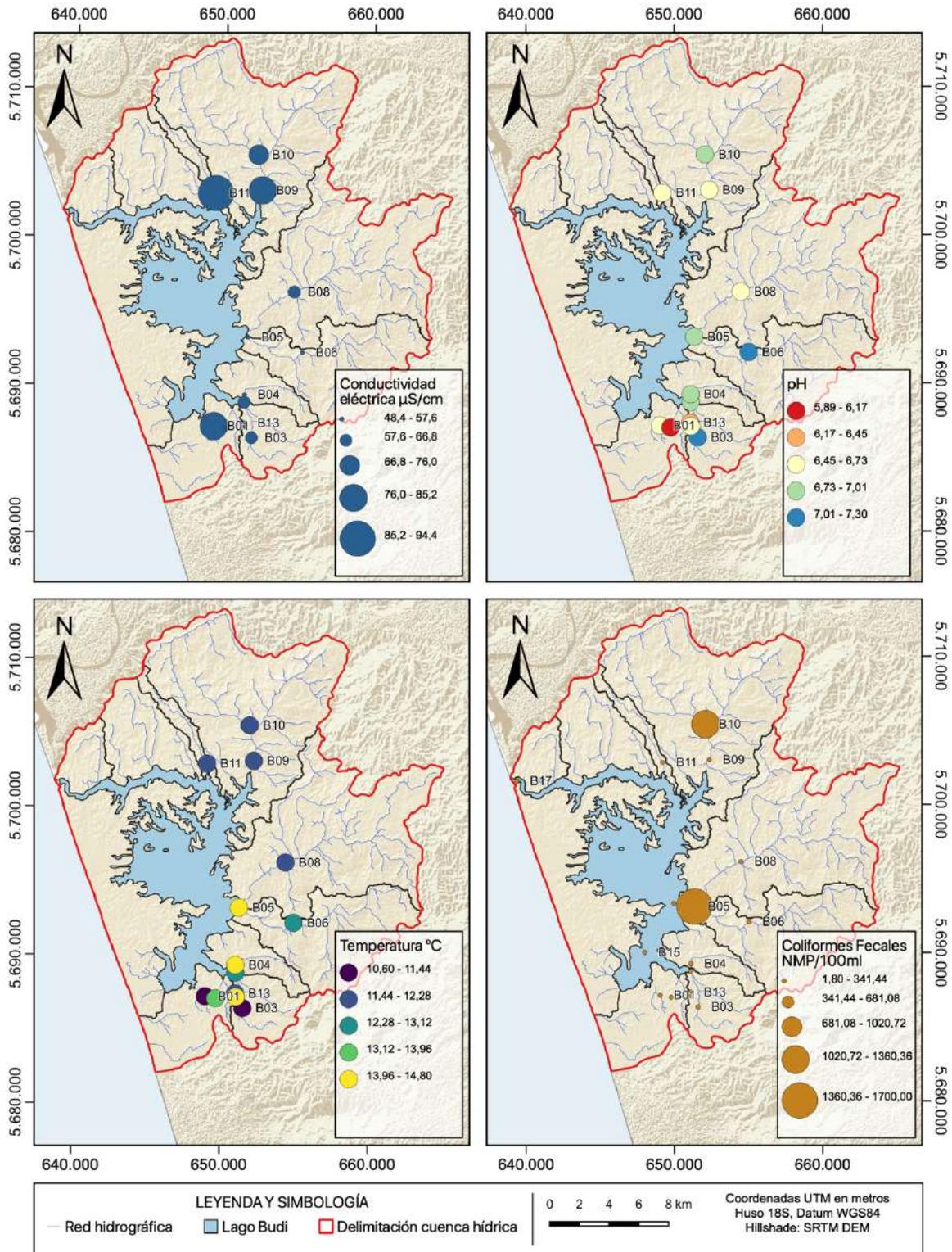


Figura 4-2: Mapa de parámetros fisicoquímicos y biológicos.

4.2 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es una herramienta gráfica que utiliza las concentraciones de elementos mayoritarios, con el objetivo de clasificar aguas y/o identificar procesos o fenómenos que modifiquen la química de las aguas, tales como mezclas, precipitaciones, disoluciones, intercambios iónicos, reducciones, entre otros (Piper, 1944).

Diagrama de Piper

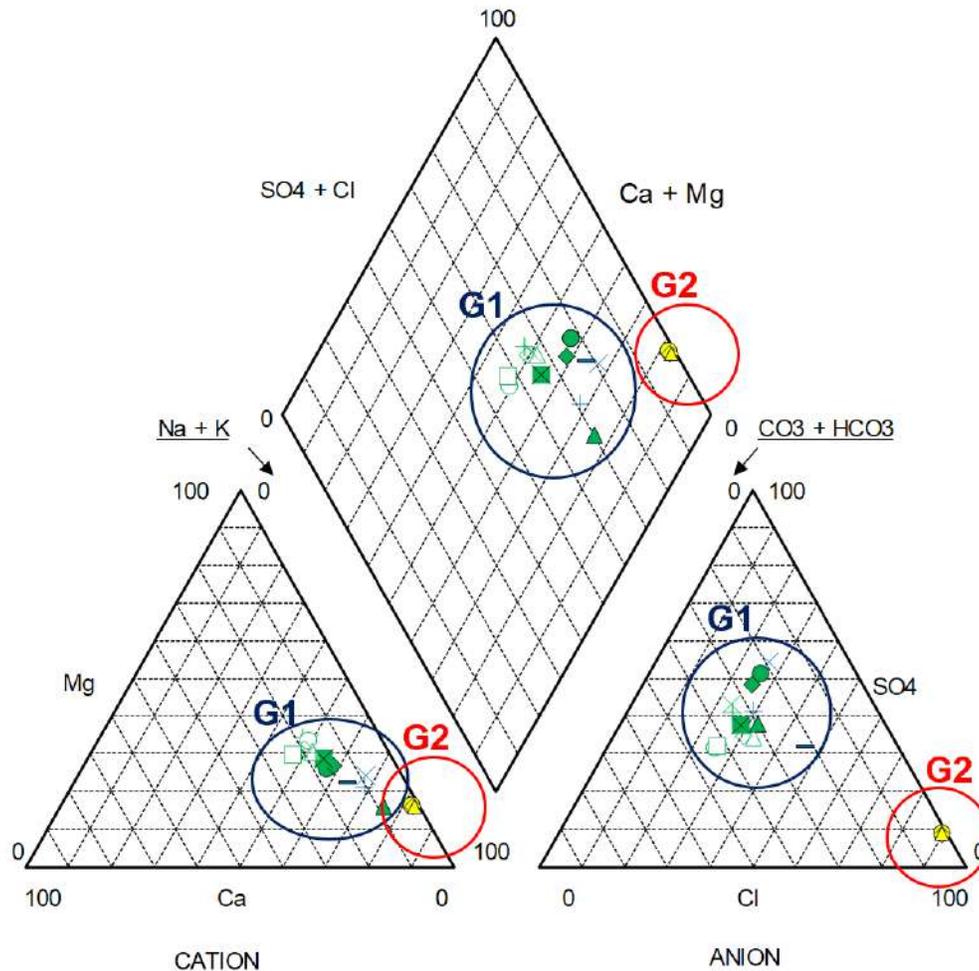


Figura 4-3: Diagrama de Piper.

La Figura 4-3 muestra el Diagrama de Piper en el cual están representadas las muestras de este estudio y donde es posible diferenciar dos grupos, que si bien corresponden al mismo tipo de aguas, presentan diferencias en los valores de concentraciones de sus elementos.

El Grupo 1 (G1) está conformado por las muestras de aguas superficiales y subterráneas, las cuales, por su ubicación en el diagrama corresponden a aguas cloruradas sódicas, con una concentración media – alta de Na^+ y media de Cl^- . Por otro lado el Grupo 2 (G2) está compuesto por las muestras tomadas en el lago y también corresponden a aguas cloruradas sódicas, sin embargo, presentan una mayor concentración de Na^+ y Cl^- con respecto a las muestras de G1.

4.3 Diagrama de Schöeller – Berkaloff

Para estudiar la carga iónica de las distintas muestras de aguas, se realizaron diagramas de Schöeller – Berkaloff, los cuales permiten visualizar tendencias, valores máximos y mínimos de cada especie iónica en cada una de las muestras tomadas.

Con respecto a la concentración de especies iónicas en las aguas superficiales (Figura 4-4) es posible notar que las muestras tienen una concentración iónica menor a 1 meq/l para todos los iones mayoritarios estudiados. Por otro lado, es posible notar un patrón similar en las concentraciones de los iones de las muestras estudiadas, donde es posible advertir un aumento relativo de la concentración de SO_4^{-2} en todas las muestras y una concentración levemente mayor de Na^+ y Cl^- , los cuales se observan en proporciones similares. Los iones mayoritarios que tienen una menor concentración corresponden al Ca^{+2} , seguido de Mg^{+2} .

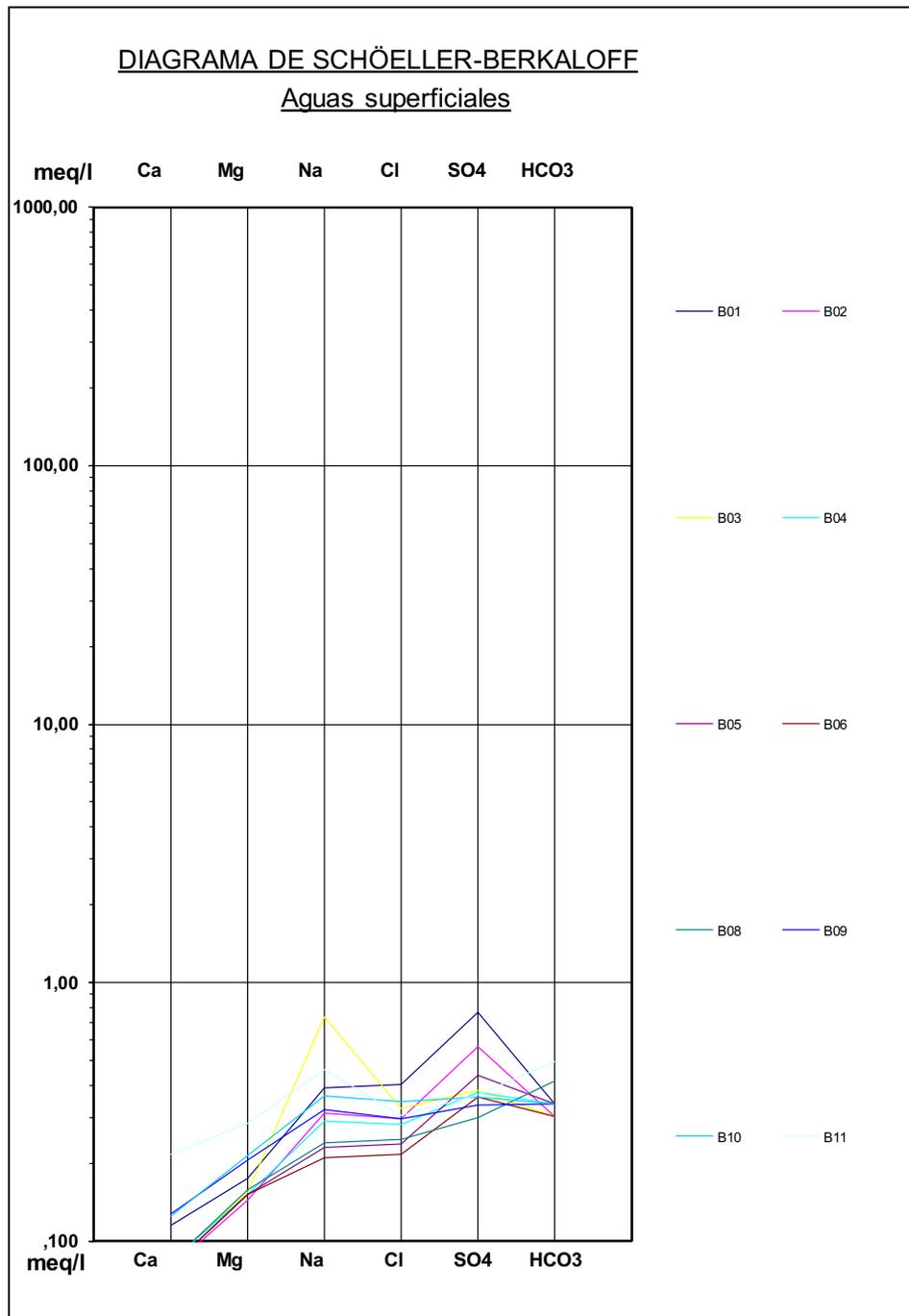


Figura 4-4: Diagrama de Schöeller – Berkaloff para aguas superficiales.

La Figura 4-5 muestra que las aguas subterráneas tienen patrones de concentración distintos entre sí, donde solo es posible notar enriquecimientos en algunas especies iónicas de manera particular. De todas formas, se observan concentraciones elevadas en Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} , mientras que el Ca^{+2} y Mg^{+2} se encuentran en bajas cantidades en todas las muestras de aguas subterráneas estudiadas.

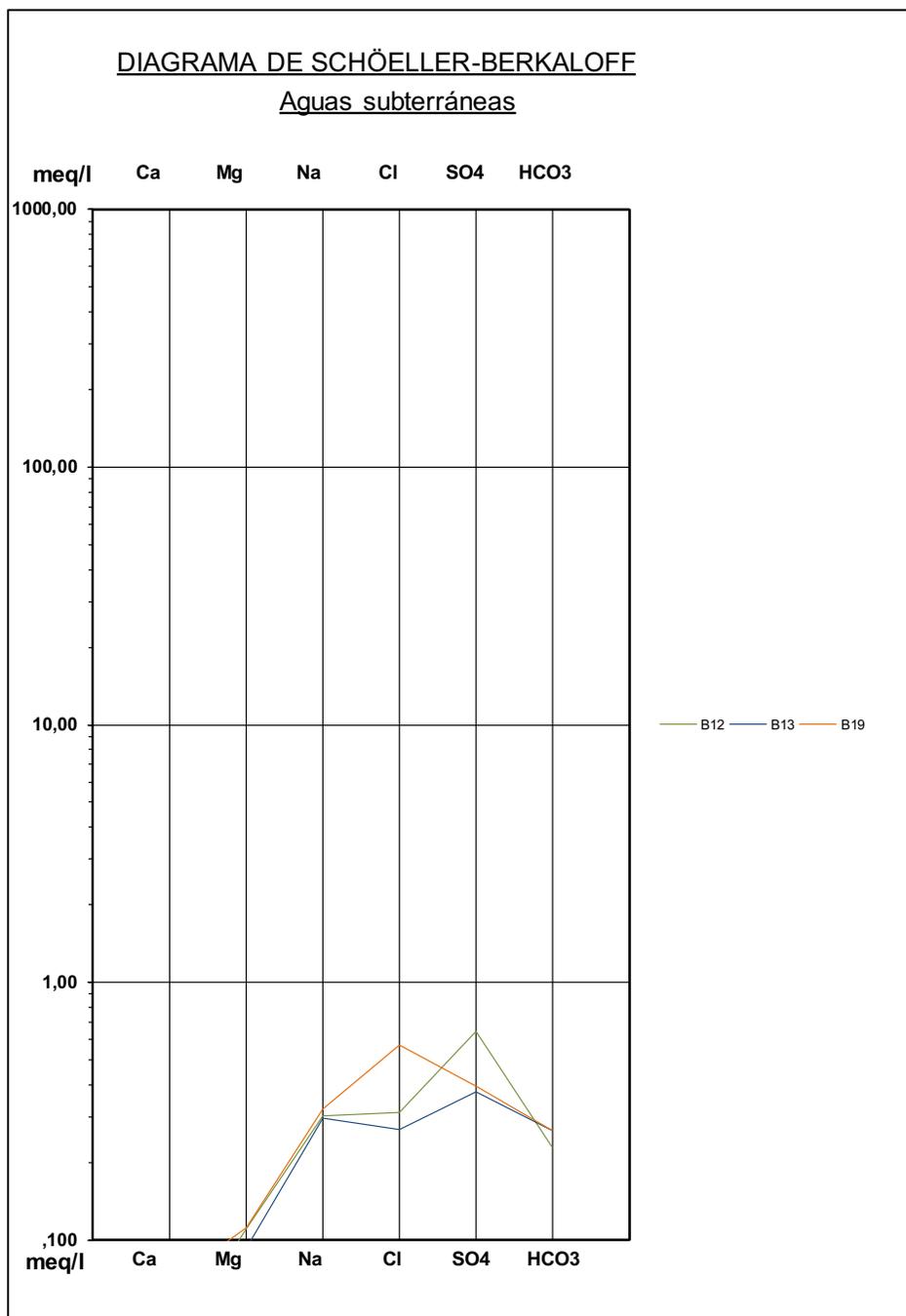


Figura 4-5: Diagrama de Schöeller – Berkaloff para aguas subterráneas.

Finalmente, el diagrama de la Figura 4-6 muestra las concentraciones iónicas de las aguas del lago, donde es evidente el aumento de la concentración de las especies iónicas con respecto a los otros tipos de aguas. Las especies dominantes para las aguas del lago corresponden a Na^+ y Cl^- , mientras que se encuentra empobrecido en iones tales como Ca^{+2} y HCO_3^- .

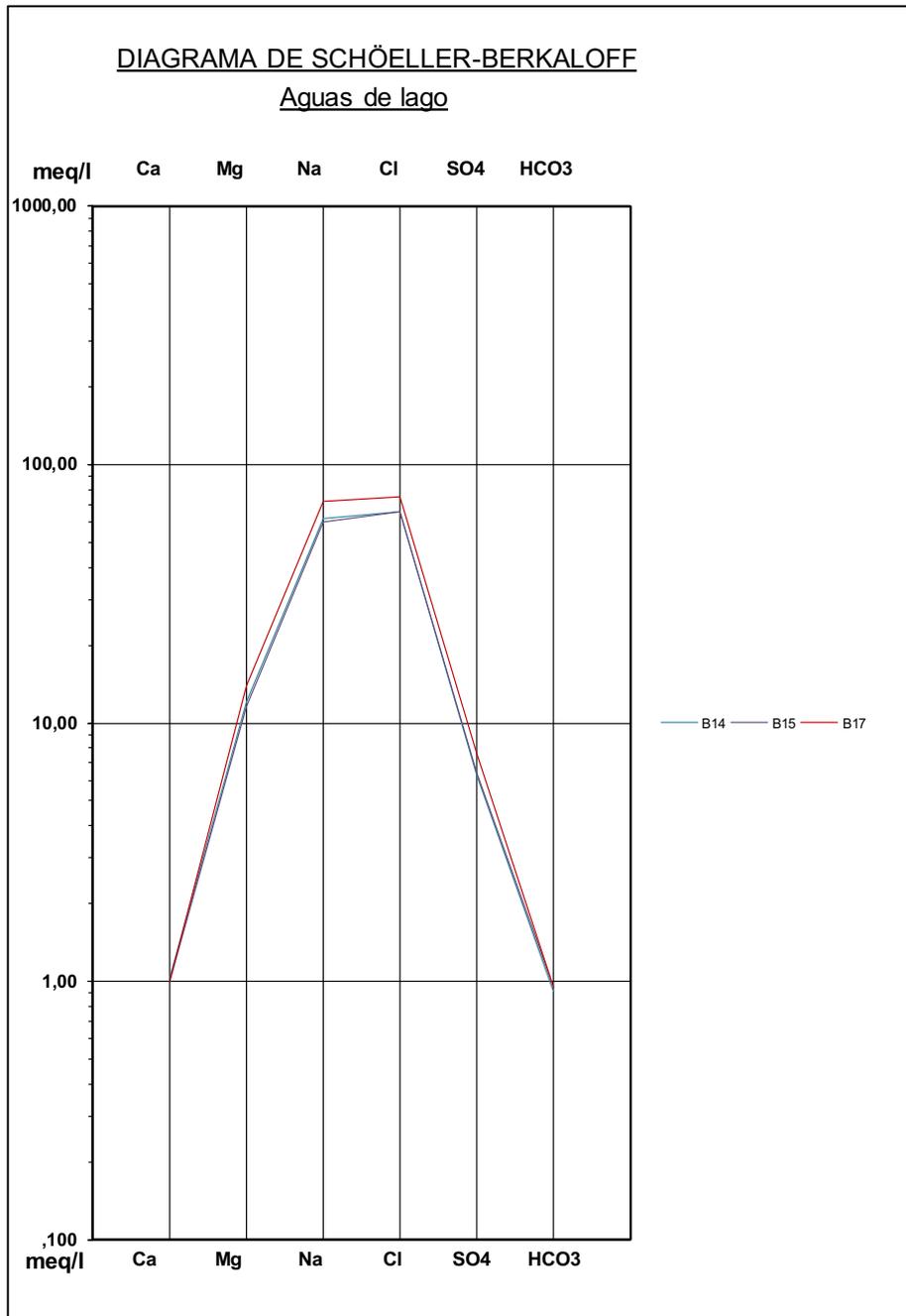


Figura 4-6: Diagrama de Schöeller – Berkaloff para aguas subterráneas.

4.4 Diagramas Stiff

Con el propósito de representar la distribución espacial de composición química de las aguas muestreadas se presenta el mapa de la Figura 4-7, donde se ubican los diagramas Stiff para cada una de las muestras recolectadas. Dadas las diferencias de magnitud entre las concentraciones de las muestras de aguas superficiales y subterráneas con las muestras del lago, se utilizaron dos escalas las que se diferencian por color y se señalan en el mapa.

De manera general, la característica común que tienen las aguas superficiales y subterráneas son el empobrecimiento de Ca^{+2} . Específicamente, es importante notar que entre subcuencas se observan composiciones químicas levemente distintas donde los iones que presentan algún nivel de variación son SO_4^{-2} y HCO_3^- . Finalmente, no se observan variaciones en la química de las aguas dentro de cada subcuenca, pues en cada una de ellas, los polígonos mantienen una única forma.

Por su parte, las muestras de agua del lago presentan un comportamiento químico semejante, independiente de la ubicación, donde predominan las altas concentraciones de Na^+ y Cl^- .

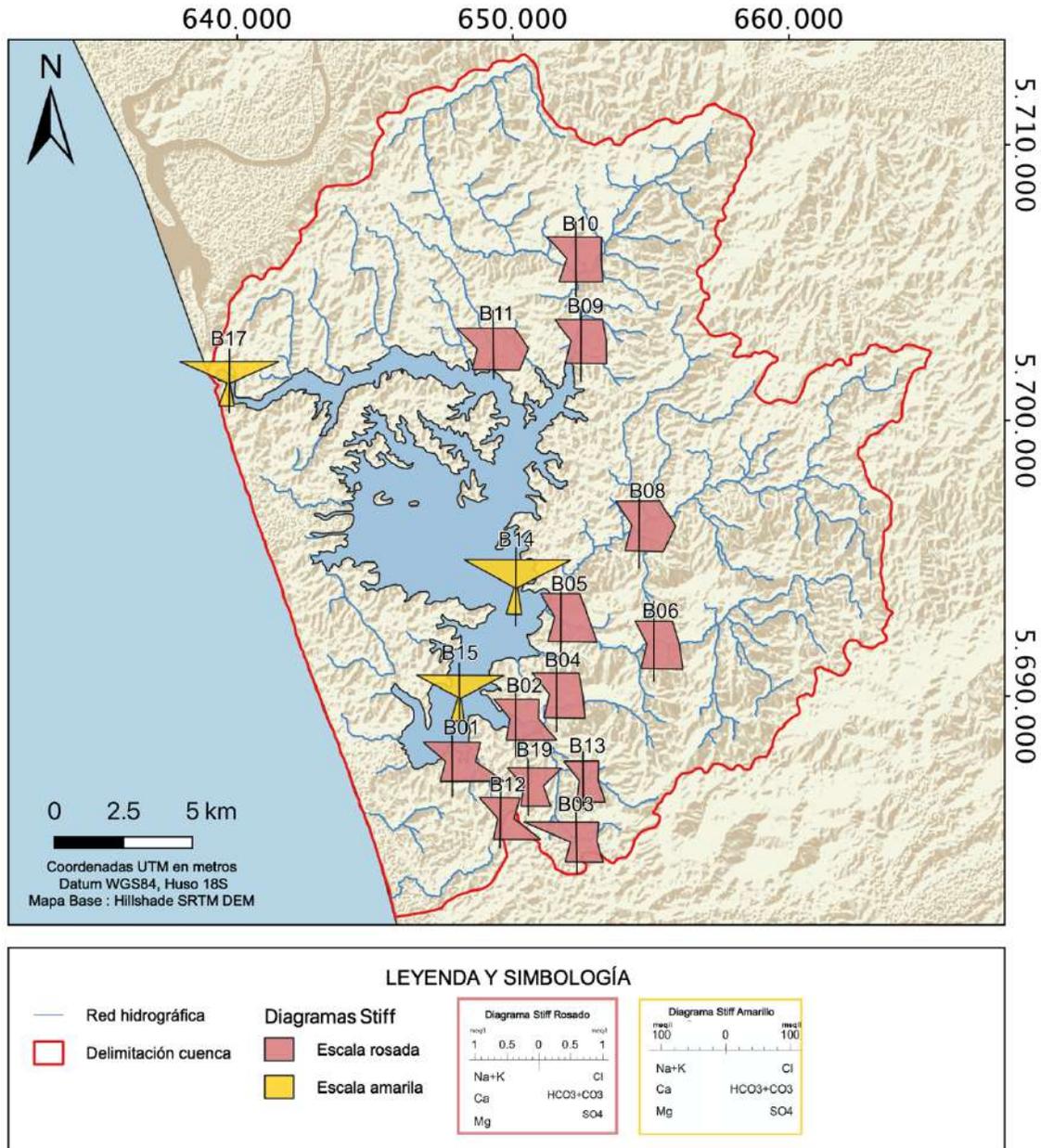


Figura 4-7: Mapa diagramas Stiff.

4.5 Análisis de especies y elementos mayoritarios

Los elementos y especies mayoritarias analizadas en el presente estudio, corresponden a: bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-), nitrato (NO_3^-), sodio (Na^+), magnesio (Mg^{+2}), potasio (K^+) y calcio (Ca^{+2}).

Con respecto a su distribución espacial, la Figura 4-8 muestra las concentraciones de los aniones en sus respectivos puntos de muestreo y los rangos entre los que se

encuentran sus concentraciones. A partir de los mapas, es posible determinar la poca variabilidad que existen en las concentraciones de los elementos para aguas de un mismo tipo, otra generalidad que se puede observar en todos los aniones, excepto en el nitrato, corresponde a las elevadas concentraciones observadas en las aguas del lago, en comparación a aguas subterráneas y superficiales de la cuenca, por otra parte, el nitrato corresponde al único anión donde las concentraciones mas elevadas se encuentran en la cuenca y no en el lago, aunque esta no supera los 2 mg/l. Particularmente, en el bicarbonato se observan concentraciones levemente mas altas en las aguas superficiales con respecto a las subterráneas, mientras que el sulfato tiende a aumentar su concentración hacia el sector sur aunque de manera de manera leve, finalmente, el cloruro corresponde al anión que presenta menor variabilidad en su concentración, mostrando valores similares en un mismo tipo de agua y entre ellas.

De manera análoga, la Figura 4-9 muestra los mapas de concentración de los cationes, donde nuevamente es posible identificar la baja variabilidad existente entre las concentraciones de los elementos en aguas de un mismo tipo. También se observa en todos los mapas, que las concentraciones mas elevadas se encuentran en las muestras ubicadas en el lago, mientras que aguas superficiales y subterráneas de la cuenca presentan, de manera general, concentraciones semejantes entre ellas en todos los puntos de muestreo.

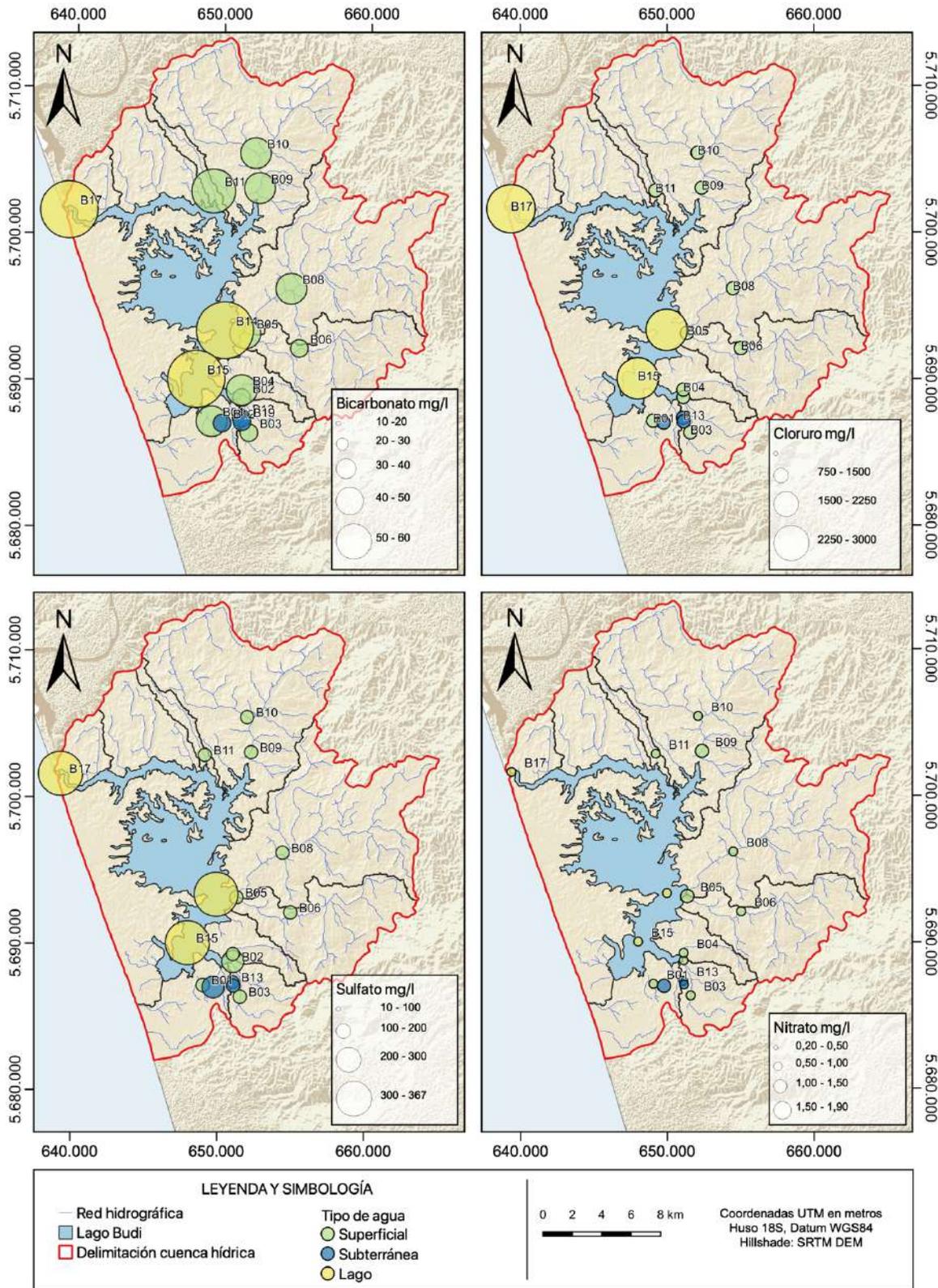


Figura 4-8: Mapa de concentraciones aniones mayoritarios.

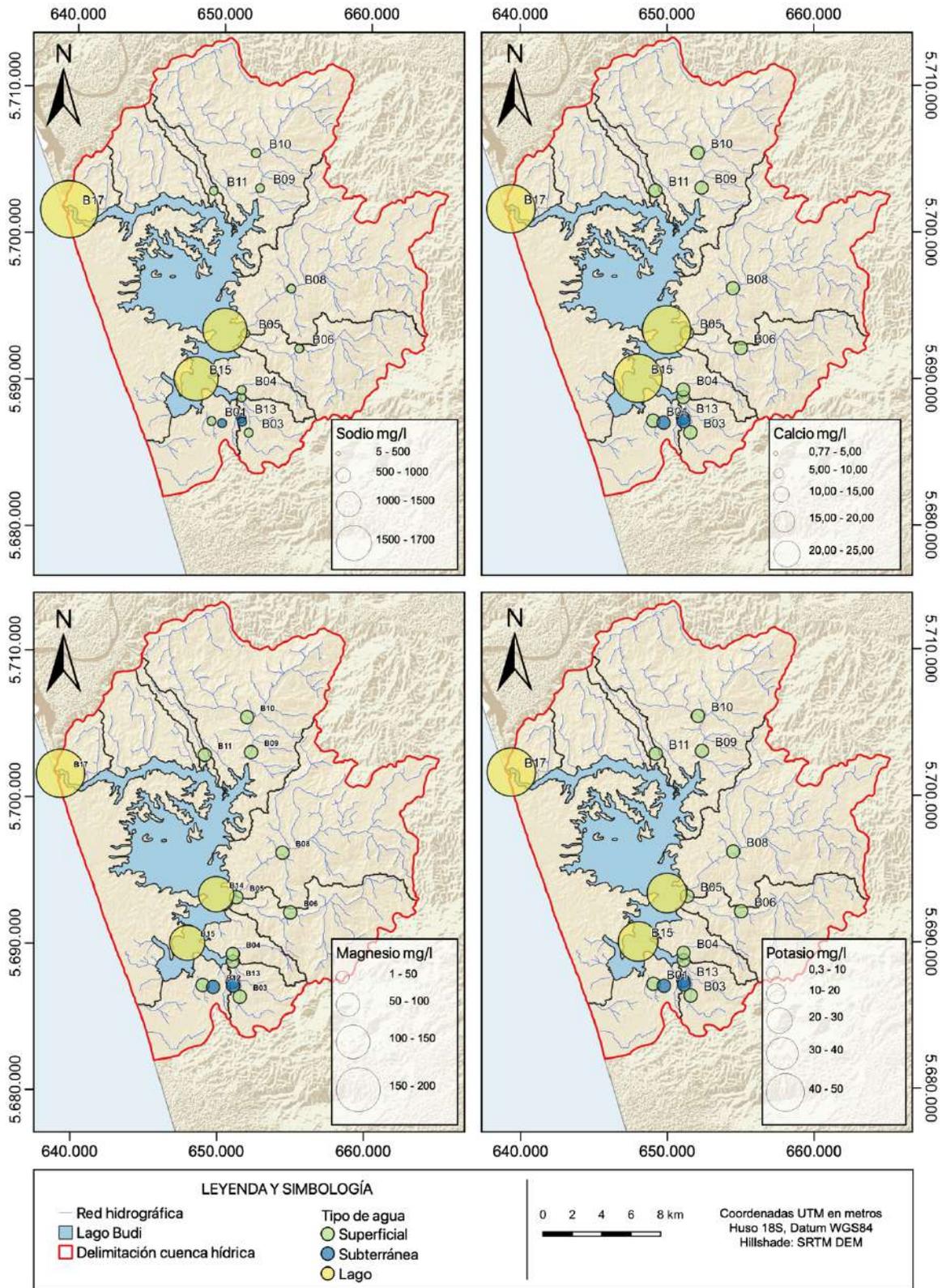


Figura 4-9: Mapa de concentraciones de cationes mayoritarios.

4.6 Elementos traza

Los elementos y especies trazas analizados en este estudio corresponden a: aluminio, arsénico, bario, berilio, boro, cadmio, cianuro, cobre, cromo, estaño, estroncio, fluoruro, fosfato, hierro, litio, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, nitrito, plata, plomo, selenio, vanadio y zinc.

De los elementos y especies químicas mencionadas, la Tabla 4-6 muestra aquellos calificados como indetectables, junto con su límite de detección acorde a las metodologías detalladas previamente.

Tabla 4-6: Elementos traza indetectables.

Especie química	Límite de detección (mg/l)
Arsénico	0,001
Bario	0,05
Berilio	0,05
Cadmio	0,01
Cianuro	0,05
Cobre	0,05
Cromo	0,05
Cromo	0,05
Estaño	0,15
Fluoruro	0,2
Fosfato	0,3
Litio	0,05
Mercurio	0,001
Molibdeno	0,01
Níquel	0,05
Nitrito	0,05
Plata	0,05
Plomo	0,05
Selenio	0,005
Vanadio	0,05
Zinc	0,05

Por otro lado, los elementos que arrojaron concentraciones detectables fueron: aluminio, boro, estroncio, hierro y manganeso. En cuanto al aluminio, la concentración mas alta se encuentra en el sector norte de la cuenca (Figura 4-10) y corresponde a una muestra de agua superficial, el resto de muestras de la cuenca y la desembocadura del lago, presentan valores relativamente semejantes, es

importante destacar que en el lago no se detectó aluminio. Por otra parte, el boro se registra en las aguas del lago y en solo una muestra de agua superficial ubicada hacia el sur de la cuenca (Figura 4-10), los valores de las concentraciones presentan baja variabilidad entre ellos y la concentración mayor se sitúa en la desembocadura. En cuanto al estroncio, este solo fue detectado en las aguas del lago y su concentración aumenta en la desembocadura.

Otro elemento minoritario detectado corresponde al hierro, cuyas concentraciones mas altas se encuentran en las desembocaduras de los esteros ubicados en la zona norte de la cuenca, mientras que en la zona central la concentración disminuye (Figura 4-10), es importante destacar que en el lago no se reportaron concentraciones. Finalmente, otro de los elementos minoritarios detectados corresponde al manganeso, el cual se distribuye de manera semejante al hierro, presentando concentraciones elevadas en el norte, disminuyendo hacia el centro e indetectable en el lago (Figura 4-10).

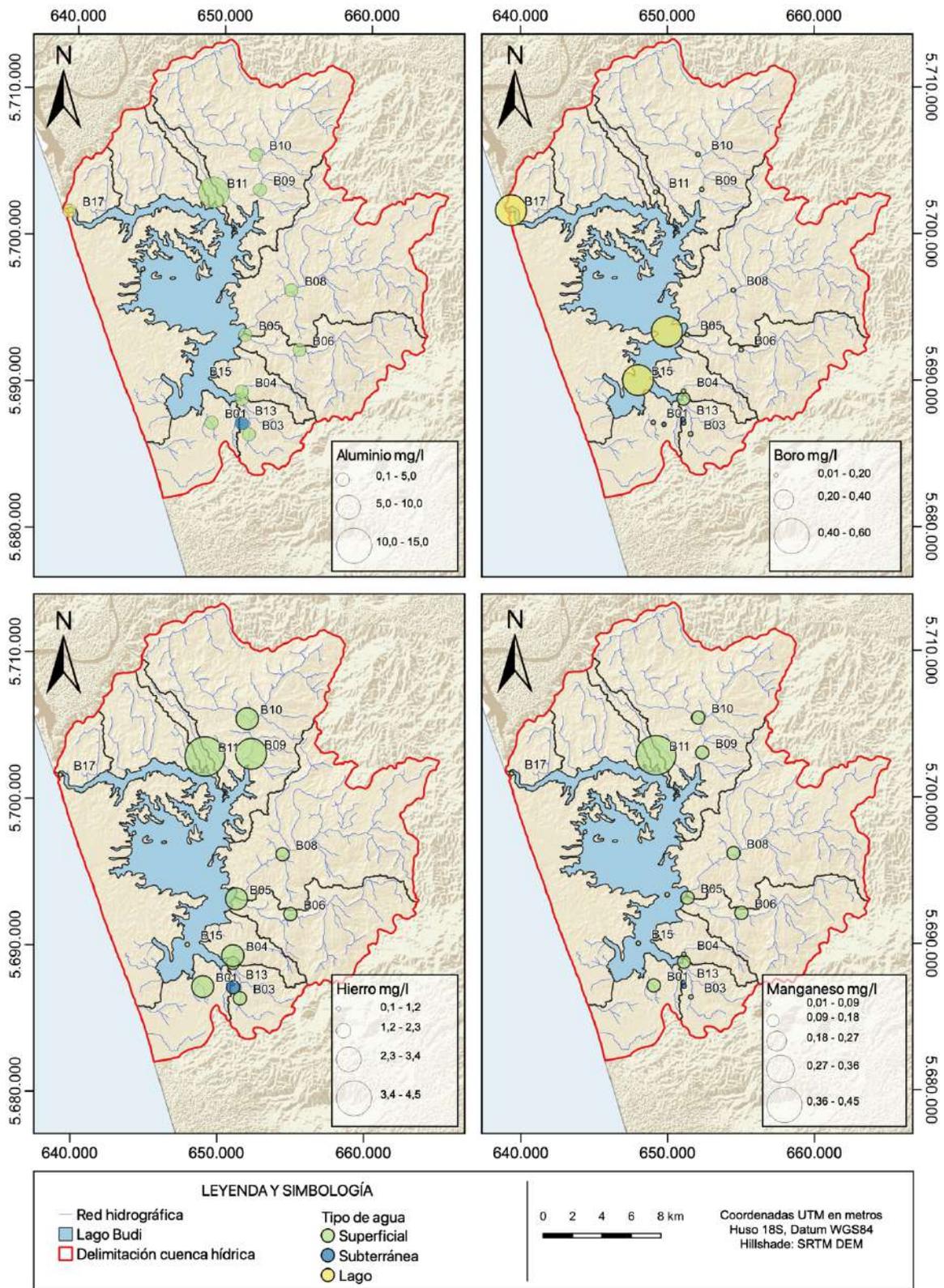


Figura 4-10: Mapa de elementos traza.

4.7 Relaciones iónicas de interés

A partir de las razones y proporciones que se pueden calcular con las concentraciones de los elementos y especies químicas, es posible identificar los posibles procesos y mecanismos que controlan la química de las aguas. Las variables que pueden controlar dichos procesos y mecanismos son: estado físico del acuífero, mineralogía de la roca huésped y condiciones climáticas o atmosféricas (San Juan, 2015).

A continuación se muestran distintas razones iónicas, es importante precisar que para su determinación se requiere una transformación de unidades de concentración, pues las unidades típicamente utilizadas corresponden a miliequivalentes / litro (meq/l) y milimol / litro (mmol/l), las concentraciones convertidas se muestran en el Anexo C.

4.7.1 Diagrama de Gibbs

Una primera aproximación al entendimiento de la química de las aguas y sus procesos corresponde al diagrama de Gibbs. Esta herramienta gráfica propone tres mecanismos controladores de la química de las aguas: precipitación atmosférica, dominancia de la roca y procesos de evaporación – cristalización (Gibbs, 1970).

La Figura 4-11 muestra los puntos en el diagrama de Gibbs, los valores de las razones iónicas calculadas se encuentran disponibles en el Anexo C.1.

A partir de los diagramas, se distingue que la química de las aguas del lago y de la cuenca son influenciadas por distintos mecanismos. Por un lado, se encuentran las aguas del lago las cuales están en el área de influencia del agua marina, mientras que las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca se encuentran entre los mecanismos dominados por interacción agua - roca y precipitación.

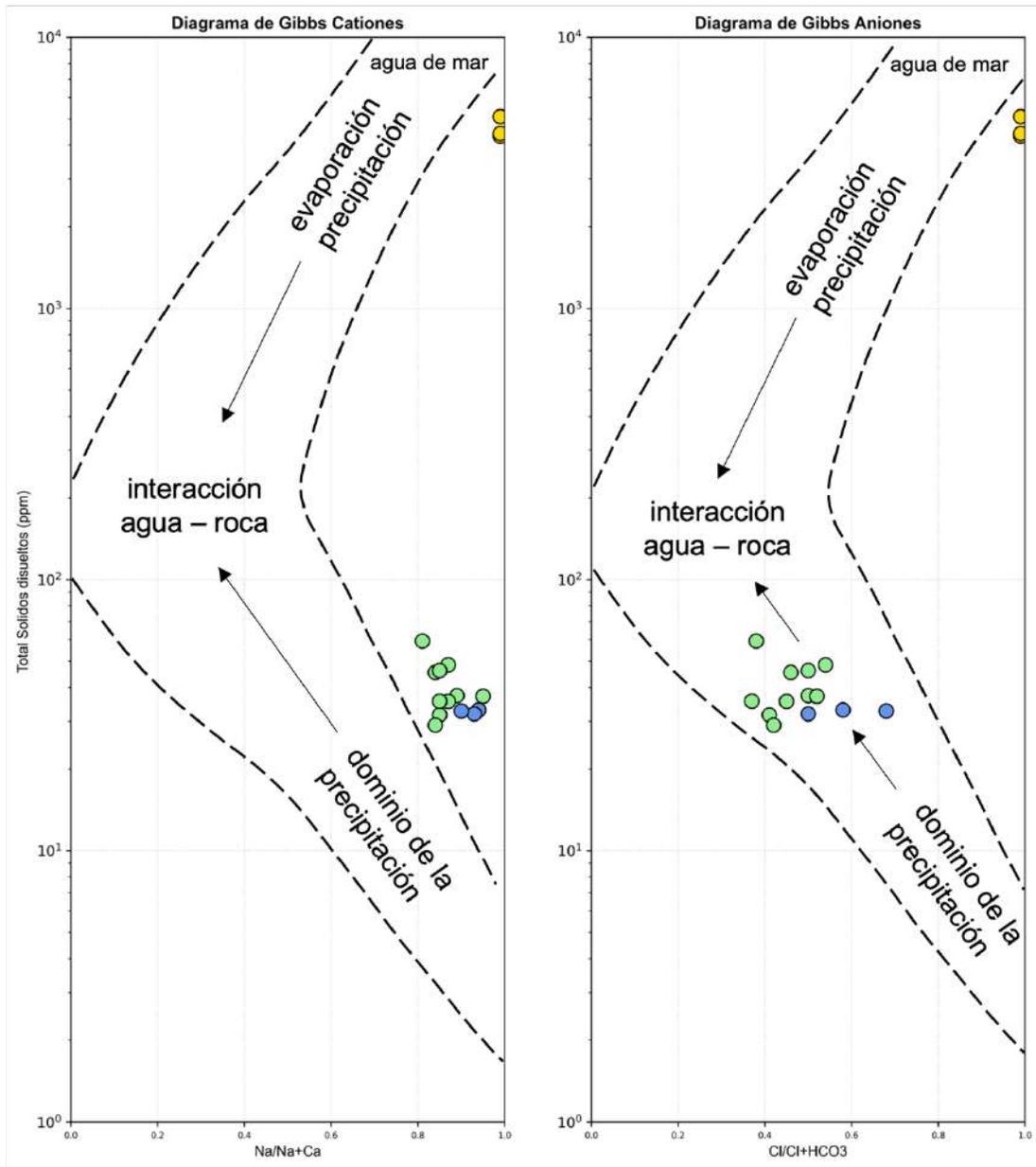


Figura 4-11: Diagramas de Gibbs.

4.7.2 Na⁺/Cl⁻

Esta relación se utiliza principalmente para identificar los mecanismos mediante los cuales el agua adquiere salinidad (Jalali y Khanlari, 2008). Correlaciones con tendencia 1:1 indican disolución de sales cloruradas, aguas lluvias o procesos de evaporación, por el contrario una mayor cantidad de Na con respecto al Cl, se interpreta como Na proveniente de la meteorización de silicatos (Ghassemi *et al.* 2011).

Las razones de Na^+/Cl^- obtenidas para en este estudio, se observan en la Figura 4-12 y muestran una tendencia cercana a la proporción 1:1, excepto las muestras B03 y B11 que presentan mayor contenido de Na y la muestra B19 que presenta mayor concentración de Cl.

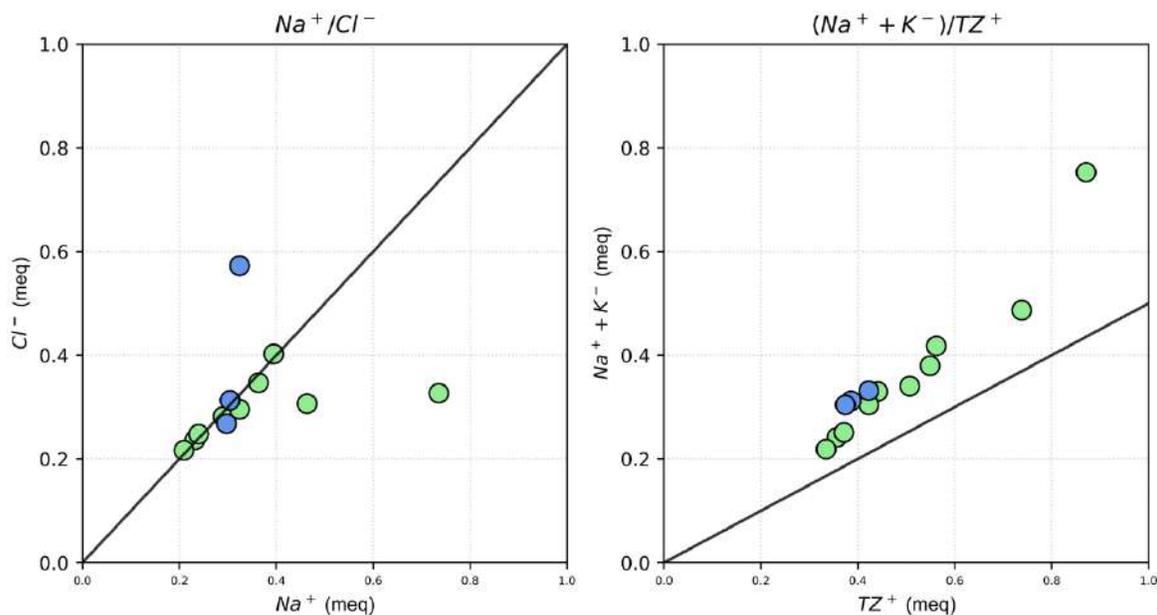


Figura 4-12: Razones iónicas Na/Cl y (Na+K)/TZ+

4.7.3 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{TZ}^+)$

Datta y Tyagi (1996) proponen otra forma de determinar la procedencia de cationes, la cual corresponde a razón de la suma entre las concentraciones de Na^+ y K^+ con el total de las concentraciones de cationes (TZ^+). En ese sentido, los autores indican que existiendo una relación $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) = 0,5 (\text{TZ}^+)$ puede considerarse la meteorización de silicatos como una posible fuente de proveniencia de Na^+ y de cationes en general.

Los resultados obtenidos aplicando dicha razón, indican valores superiores a 0,5 en todas las muestras consideradas (Figura 4-12).

4.7.4 CE vs Na/Cl

El diagrama de conductividad eléctrica versus la razón de Na^+/Cl^- permite identificar procesos de evaporación en las aguas (Subramani *et al.*, 2009). Si la razón Na^+/Cl^- no varía con el aumento de la conductividad eléctrica, se sugiere que un aumento en el valor de la razón Na/Cl será producto de procesos de evaporación (Lakshmanan *et al.* 2003).

Lakshmanan *et al.* (2003) también indica que si la razón Na^+/Cl^- se mantiene constante, puede ser indicador de influencia de agua marina, la cual probablemente se presenta como gotas de aerosol ricas en cloro y sodio, aumentando la concentración y cantidad de especies disueltas en las aguas.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que en la gran mayoría de las muestras, la razón Na^+/Cl^- permanece relativamente constante, a pesar del aumento de conductividad eléctrica (Figura 4-13).

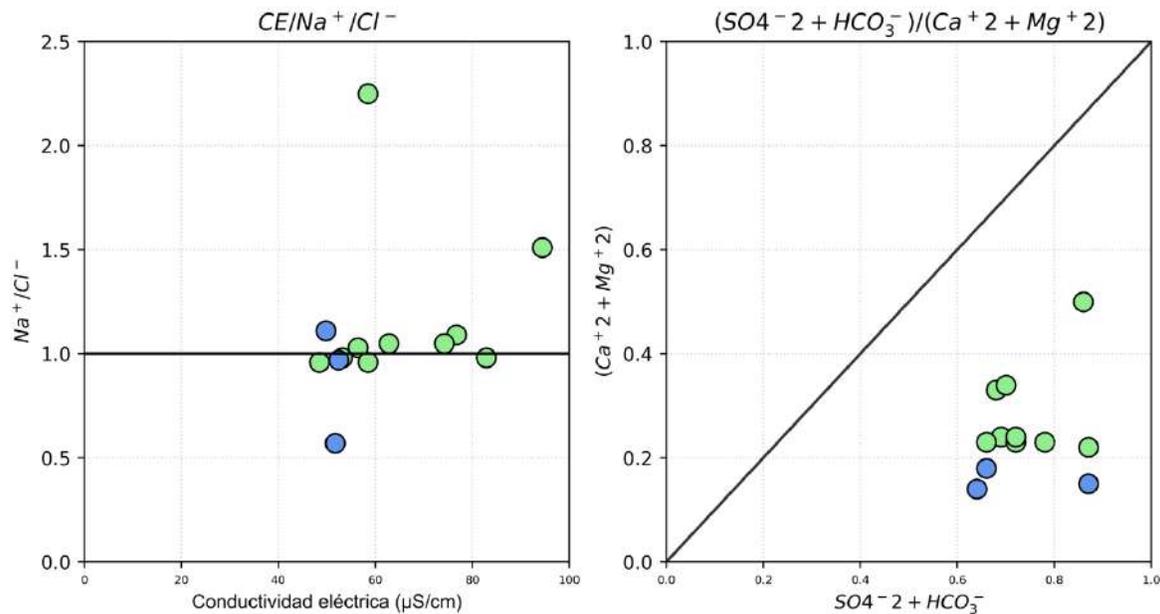


Figura 4-13: Razones entre Conductividad eléctrica y Na/Cl , y entre $(\text{SO}_4 + \text{HCO}_3) / (\text{Ca} + \text{Mg})$.

4.7.5 $(\text{Ca}+2 + \text{Mg}+2) / (\text{SO}_4-2 + \text{HCO}_3-2)$

Esta razón es útil para determinar el mecanismo de origen de los iones en las aguas, para valores de razones que superen la proporción 1:1 se puede inferir que los iones provienen de litologías carbonatadas, mientras que si es menor corresponde a meteorización de silicatos, si se encuentran sobre la línea, coexisten ambos procesos (Lakshmanan *et al.* 2003).

En este estudio, y tal como se puede observar en la Figura 4-13, la totalidad de las razones calculadas se encuentran bajo la razón 1:1.

4.7.6 $\text{SO}_4^{-2} / \text{Cl}^{-2}$

Bajas razones indican un empobrecimiento de sulfato, el cual podría ser producto de una reacciones de reducción. De esta manera, altos valores de cloro asociados a bajas concentraciones de sulfato, pueden ser indicador de reducción del sulfato, proceso que además podría generar H_2S (Lavitt *et al.*, 1997)

Las razón entre el sulfato y el cloro arroja valores mayores a 1 en todas las muestras estudiadas, lo cual se observa en la Figura 4-14.

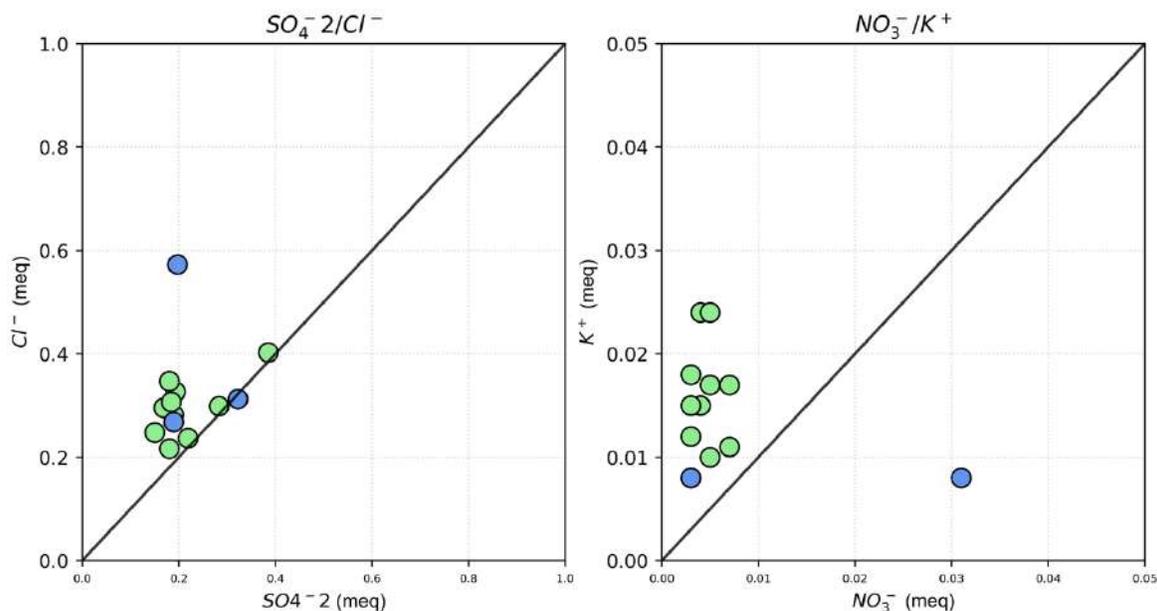


Figura 4-14: Razones iónicas SO_4/Cl y NO_3/K

4.7.7 NO_3^- / K^+

La presencia de NO_3^- en aguas, puede asociarse a actividades agrícolas, esparcimiento de estiércol animal, entre otros (Saka, 2013). Si la agricultura, forma parte de un factor predominante en la contaminación de las aguas, se espera una relación positiva entre nitrato y potasio (Saka, 2013).

Las razones graficadas no indican, de manera general, una tendencia lineal entre las concentraciones de nitrato y potasio. De todas formas destaca el valor mas elevado obtenido en la muestra B19 (Figura 4-14).

4.8 Concentraciones observadas en sistemas similares

El objetivo de comparar parámetros y concentraciones entre las muestras tomadas en cuenca del lago Budi y sistemas similares o cercanos, es determinar la posible influencia de factores ligados a las características propias de un sistema de estuario o a características relacionadas con la ubicación de la zona de estudio.

Sobre esa base, se escogió el Complejo de Humedales El Yali que corresponde al Complejo de humedales más importante de Chile Central, declarado sitio Ramsar en 1996. El agua del sistema proviene de ambientes marinos, estuarinos, lacustres, ribereños y salinas artificiales, de manera general se observa un mal drenaje y un nivel freático cercano a la superficie (Vidal – Abarca *et al.*, 2011).

También se realizaron comparaciones con la química de las aguas de la cuenca Río Imperial, ubicada al norte de la cuenca del lago Budi. Su litología comprende rocas sedimentarias marinas, rocas metamórficas tales como metapelitas, metabasitas y metacherts y secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados (DGA, 2004a).

Finalmente, el último sistema considerado corresponde a la cuenca Río Toltén que se encuentra al sur de la cuenca del lago Budi. De manera general, su litología corresponde a depósitos aluviales y coluviales, secuencias sedimentarias marinas fluviales estuarinas, secuencias volcanosedimentarias y rocas intrusivas (DGA, 2004b).

La Tabla 4-7 muestra los resultados obtenidos al considerar los valores medios de pH y de concentraciones de elementos mayoritarios y minoritarios. Es importante precisar que la comparación está limitada a los parámetros medidos en los trabajos previos, realizados en cada uno de los sistemas.

Tabla 4-7: Sistemas con los cuales se comparó la química de las aguas del lago Budi.

Sistema	Valores medios										
	pH	CE μS/cm	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Al mg/l
El Yali agua dulce	8,01		49,86	16,02	21,87	9,01	44,16	122,30			
El Yali agua subsalina	8,01		412,72	19,15	70,95	17,02	80,17	810,38			
Río Imperial	8,13	95,47							1,61	0,04	0,49
Río Toltén	7,28	68,70							0,35	0,03	0,51
Lago Budi	6,68	63,06	285,03	9,39	29,99	5,33	78,05	467,58	1,61	0,11	1,71

Comparativamente, las aguas muestreadas en el lago Budi presentan un pH en torno a los 6,6 el cual es mas bajo que el de sus cuencas vecinas Imperial y Toltén, cuyos valores medios corresponden a 7,89 y 7,28 y también es mas bajo que el registrado en El Yali. En la cuenca del río Imperial, el pH es naturalmente alcalino y su valor se asocia a la existencia de rocas alcalinas (DGA, 2004). Por otra parte, en la cuenca río Toltén el registro de pH destaca por su baja variabilidad espacial y temporal (DGA, 2004).

Con respecto a la conductividad eléctrica, se observan valores menores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en todas las cuencas analizadas, donde destaca de manera particular la similitud entre los valores medidos en la cuenca de río Toltén y del Lago Budi.

En cuanto a la comparación con elementos mayoritarios, es importante mencionar de manera previa, que las aguas del complejo El Yali se clasifican en dulces ($< 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$) y subsalinas ($1500 - 5000 \mu\text{S}/\text{cm}$), entre otras categorías. En este caso solo se consideraran las mencionadas previamente, pues se encuentran dentro del rango de conductividad de las aguas de la cuenca del Lago Budi (dulces) y del lago (subsalinas) (Vidal – Abarca *et al.*, 2011). Al observar las concentraciones, es posible notar que en la gran mayoría de los elementos, se ubican entre los valores de concentración de aguas dulces y subsalinas de El Yali.

Los elementos minoritarios comparados corresponden a Al, Fe y Mn. Con respecto al aluminio, este se encuentra en una concentración media que equivale aproximadamente al triple del registrado en las cuencas vecinas río Toltén e Imperial.

Al comparar las concentraciones de hierro, se observan concentraciones mas elevadas en la cuenca del lago Budi con respecto a la cuenca río Toltén, no así en la cuenca río Imperial donde las concentraciones medias son similares a las registradas en la cuenca del lago Budi. Finalmente, el manganeso se encuentra en concentraciones mas elevadas en la cuenca del lago Budi, presentando una media tres veces mayor con respecto a los valores registrados en la cuenca del río Imperial y Toltén.

4.9 Normativa chilena

La norma que regula la calidad de las aguas según sus usos corresponde a la Norma Chilena Oficial N°1.333 Aprobada por Decreto Supremo del MOP. Dicha norma define los límites máximos para distintos parámetros considerados como requisito de calidad y contiene la normativa que regula el agua potable y los límites de aguas de riego, los cuales serán detallados a continuación.

4.9.1 Normativa chilena de agua potable

El agua potable se rige según la Norma de Calidad de Agua para Uso Potable, N.Ch. 409/1.Of2005. En ella se establecen los criterios y límites aceptables en especies químicas y microbiológicas para que se cumplan los requisitos de calidad de agua potable para el consumo humano según los estándares del MINSAL (Ministerio de Salud).

La Tabla 4-8 indica algunos de los límites establecidos en la Norma para elementos esenciales, elementos o sustancias no esenciales y características organolépticas (características físicas).

Tabla 4-8: Límites establecidos en la NCh. 409/1 para elementos esenciales.

Tipo de parámetro	Elemento	Unidad de medida	Límite máximo (mg/l)
Elementos esenciales	Cobre	mg/l	2
	Cromo total	mg/l	0,05
	Fluoruro	mg/l	1,5
	Hierro	mg/l	0,3
	Manganeso	mg/l	0,1
	Magnesio	mg/l	125,0
	Selenio	mg/l	0,01
	Zinc	mg/l	3,0
Elementos o sustancias no esenciales	Arsénico	mg/l	0,01
	Cadmio	mg/l	0,01
	Cianuro	mg/l	0,05
	Mercurio	mg/l	0,001
	Nitrato	mg/l	50
	Nitrito	mg/l	3
	Plomo	mg/l	0,05
Características organolépticas	Cloruro	mg/l	400
	pH	-	6,5 < pH < 8,5
	SO ₄	mg/l	500

Con respecto a los coliformes, la Norma solo hace referencia a los coliformes totales los cuales contienen a los coliformes fecales, pero no entrega detalles sobre este último de manera específica.

4.9.1.1 Hierro

En la Figura 4-15, se observa que la mayoría de las muestras supera el límite establecido, alcanzando concentraciones de hasta 4,5 mg/l. A pesar de esto, la OMS, no propone valores de referencia límites basados en efectos sobre salud e indica que no es preocupación para la salud en niveles que causan problemas de aceptabilidad en aguas de consumo humano (OMS, 2018)

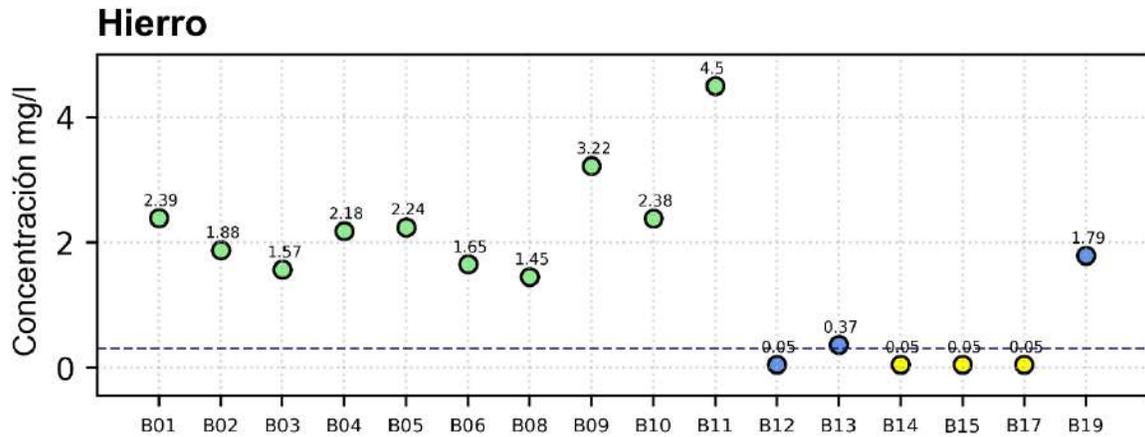


Figura 4-15: Concentración de Fe en las muestras, en línea azul punteada el valor límite establecido en la Norma de agua potable.

4.9.1.2 Manganeseo

Con respecto al Mn, la Figura 4-16 indica que las muestras B01, B05, B06, B08, B09, B10 y B11 sobrepasan el límite establecido en la normativa de agua potable. De manera análoga a lo que ocurre con el Hierro, la OMS no tiene valores límite asociados a efectos adversos sobre la salud y nuevamente indica que si no hay preocupación para la salud en niveles que causan problemas de aceptabilidad en aguas de consumo humano (OMS, 2018)

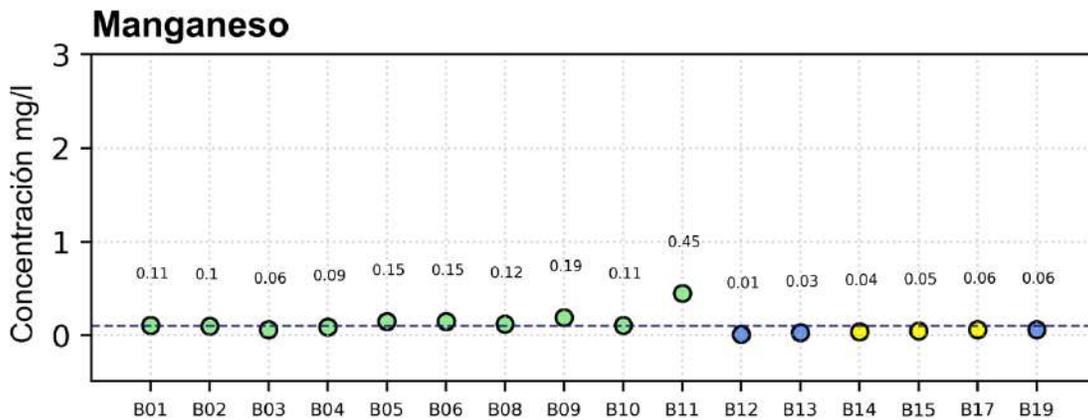


Figura 4-16: Concentración de Mn en las muestras, en línea azul punteada el valor límite establecido en la Norma de agua potable.

4.9.1.3 Magnesio

La Figura 4-17 muestra que el Magnesio se encuentra en concentraciones bajo los límites de la Norma de agua potable en todas las muestras, a excepción de las recolectadas en el lago, donde superan en un promedio del 20% el límite establecido, siendo la muestra de la desembocadura aquella la de mayor concentración excediendo la normativa en un 34,6%.

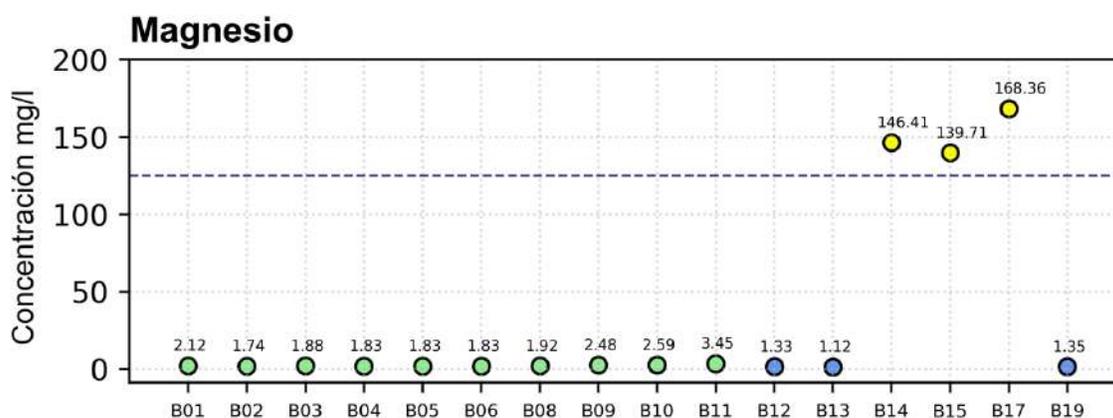


Figura 4-17: Concentración de Mg en las muestras, en línea azul punteada el valor límite establecido en la Norma de agua potable.

4.9.1.4 pH

El único parámetro fisicoquímico considerado en la norma corresponde al pH. En este caso existen 3 muestras que no están dentro del rango establecido en la norma, correspondientes a las muestras B12, B13 y B19, todas ellas correspondientes a aguas subterráneas.

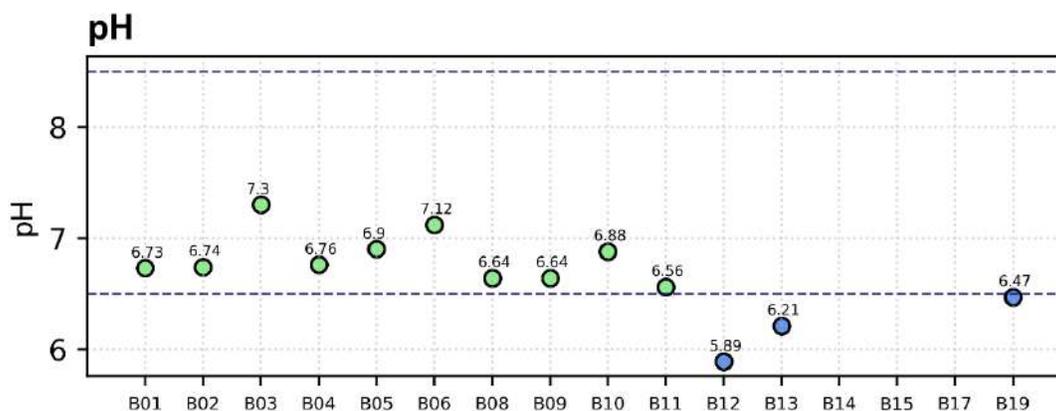


Figura 4-18: pH de las muestras, en línea azul punteada los valores límites establecidos en la Norma de agua potable.

4.9.1.5 Cloruro

Finalmente, el cloruro muestra valores sobre la norma únicamente para las muestras del lago, las cuales presentan en promedio una concentración 511% por sobre lo establecido en la norma.

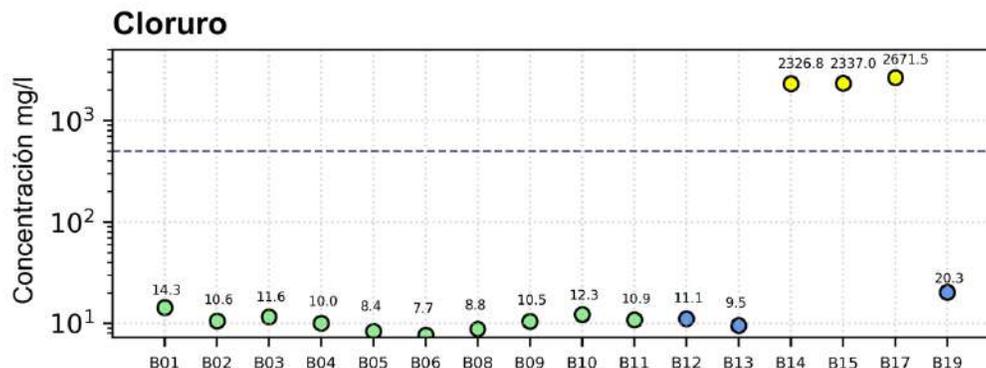


Figura 4-19: Concentración de Cl en las muestras, en línea azul punteada los valores límites establecidos en la Norma de agua potable.

4.9.2 Normativa chilena de agua para riego

Los límites de concentración de elementos y especies químicas y microbiológicas para el agua destinada a regadío se encuentra establecido en la NCh. 1333/78 donde se indican los estándares nacionales de calidad ambiental según el uso dado al recurso.

Considerando los límites que se indican en la Tabla 4-9, los parámetros sobrepasados por algunas de las muestras son: aluminio, cloruro, manganeso, sulfatos y coliformes fecales. A continuación se presenta un análisis en detalle de cada uno de los parámetros.

Tabla 4-9: Límites establecidos en la NCh. 1333/78, requisitos destinados para aguas de regadío.

Indicador	Unidad	Requisito
pH	-	5,5 < pH < 9,0
Aluminio	mg/l	5,0
Arsénico	mg/l	0,10
Bario	mg/l	4,00
Berilio	mg/l	0,10
Boro	mg/l	0,75
Cadmio	mg/l	0,01
Cianuro	mg/l	0,20
Cloruros	mg/l	200
Cobre	mg/l	0,20

Indicador	Unidad	Requisito
Cromo	mg/l	0,10
Fierro	mg/l	5,00
Fluoruro	mg/l	1,00
Litio	mg/l	2,50
Manganeso	mg/l	0,20
Mercurio	mg/l	0,001
Molibdeno	mg/l	0,01
Níquel	mg/l	0,20
Plata	mg/l	0,20
Plomo	mg/l	5,00
Selenio	mg/l	0,02
Sodio	%	35,00
Vanadio	mg/l	0,10
Zinc	mg/l	2,00
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1000

4.9.2.1 Aluminio

La Figura 4-20 muestra que la gran mayoría de las muestras de agua presenta valores bajo el límite establecido para las aguas de regadío, a excepción de la muestra B11 (desembocadura Cuchal Cuchal), la cual supera en un 138,8% el límite. Sin embargo, la OMS no establece valores de referencia que puedan asociarse a efectos adversos para la salud (OMS, 2018).

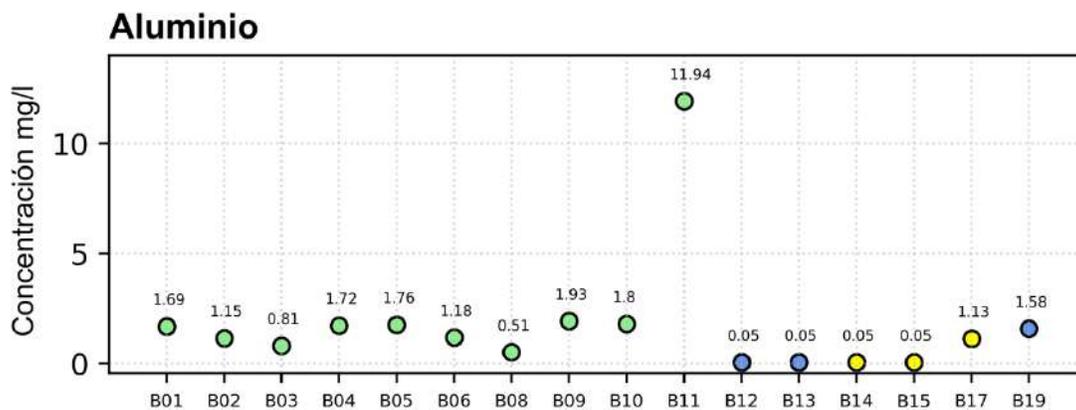


Figura 4-20: Concentración de Al en las muestras, en línea azul punteada los valores límites establecidos en la NCh. 1333/78.

4.9.2.2 Cloruro

En la Figura 4-21, se observa que la concentración de cloruro excede los límites de la Norma para agua de regadío únicamente en las aguas del lago: B14, B15, B17, las cuales superan en un promedio de 1122,55% los valores establecidos en la Norma.

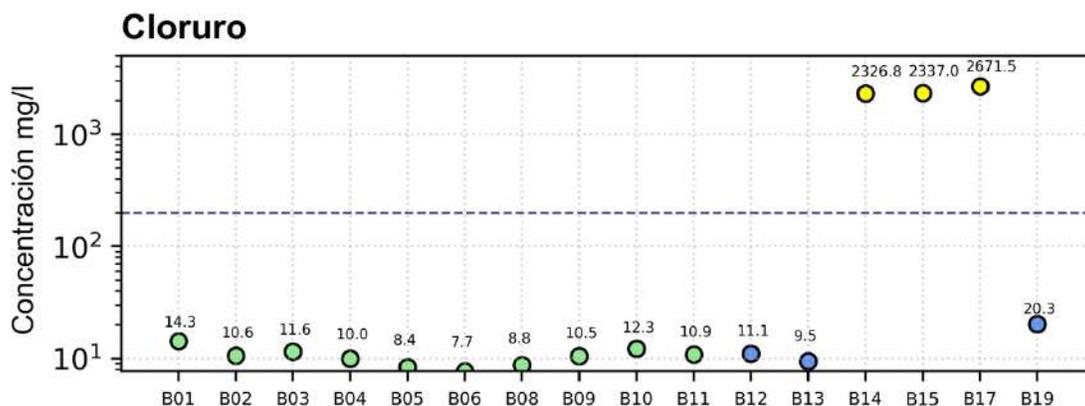


Figura 4-21: Concentración de Cl en las muestras, en línea azul punteada los valores límite establecidos en la NCh 1333/78.

4.9.2.3 Manganeso

Con respecto a la concentración de manganeso, se observa que solo la muestra B11 ubicada en la desembocadura del estero Cuchal Cuchal, no cumple con el límite establecido en la Norma superando en un 125% la concentración permitida.

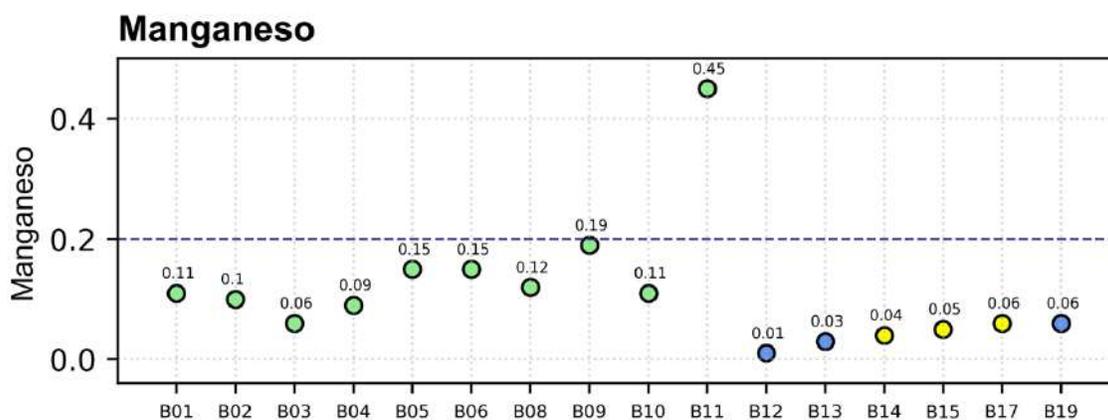


Figura 4-22: Concentración de Mn en las muestras, en línea azul punteada los valores límite establecidos en la NCh 1333/78.

4.9.2.4 Sulfato

En la Figura 4-23 se observa que solo en las aguas del lago se supera el límite establecido en la concentración de sulfato. Las muestras tomadas frente a las desembocaduras de los esteros Comué y Allipén (B14 y B15) indican un exceso del orden del 20% mientras que la muestra de la desembocadura del lago (B17) se excede en un 46,68%.

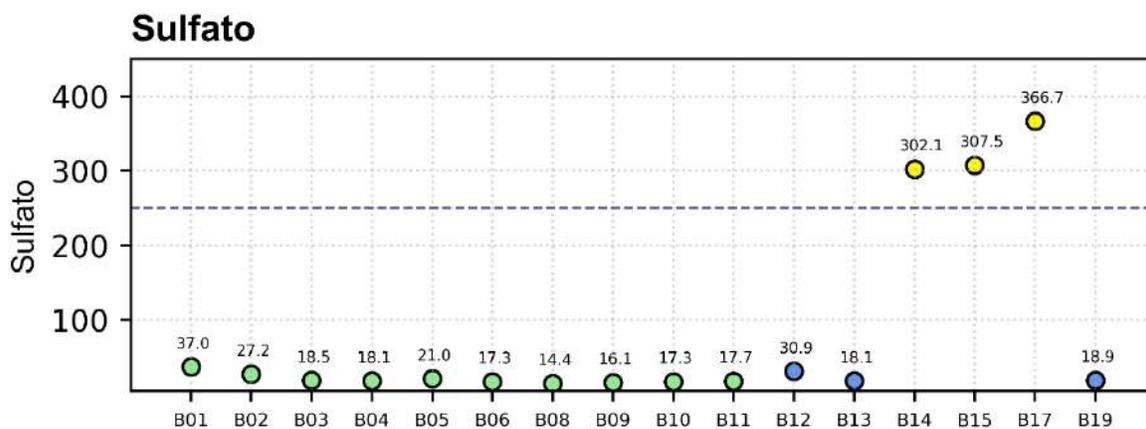


Figura 4-23: Concentración de SO_4 en las muestras, en línea azul punteada los valores límite establecidos en la NCh 1333/78.

4.9.2.5 Coliformes fecales

Finalmente, los coliformes fecales están permitidos hasta en un máximo de 1000 NMP/100 ml, como es posible observar en la Figura 4-24 existen dos puntos de muestreo que sobrepasan el límite. Uno de esos puntos es B05 correspondiente a la desembocadura del estero Boyeco con 1700 NMP/100 ml de coliformes y el otro de los puntos es B10 registrando 1200 NMP/100 ml, ubicado aguas arriba del estero Temo.

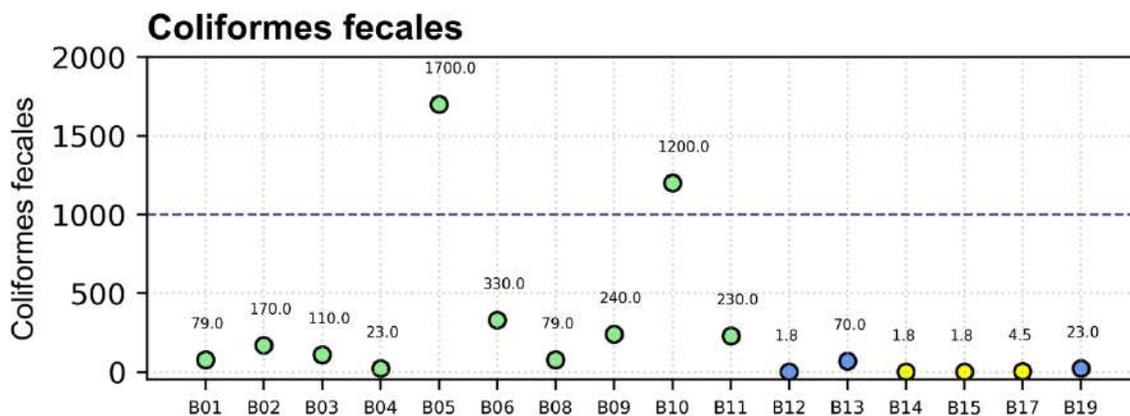


Figura 4-24: Concentración de Coliformes fecales en las muestras, en línea azul punteada los valores límite establecidos en la NCh 1333/78.

5. Discusión

Para comprender la relación que existe entre la química de las aguas de la cuenca del lago Budi y su geomorfología, es fundamental entender que existen tres procesos de primer orden que controlan la química de las aguas (Gibbs, 1970). Estos procesos corresponden a: precipitación, interacción agua - roca y evaporación (Gibbs, 1970), de manera particular, las química de aguas superficiales y subterráneas de la cuenca se encuentran dominadas por precipitación e interacción agua – roca, mientras que las aguas del lago se ubican cercanas al campo de evaporación, específicamente sobre el agua de mar.

Si bien el tipo de agua observado en el diagrama de Piper es igual en todas las muestras, los dos grupos observados refuerzan los resultados obtenidos en el diagrama de Gibbs. De manera complementaria, los diagramas de Schöeller – Berkaloff y Stiff también muestran la disparidad en las composiciones químicas de las aguas observadas en el lago con respecto a las de la cuenca.

A pesar de que las aguas del lago y de la cuenca se encuentran constantemente en contacto, se hace mas óptimo separar el análisis de la hidroquímico entre ellas, pues como se ha mencionado anteriormente, se encuentran influenciadas por distintos mecanismos, los cuales generan diferencias relevantes en las concentraciones de las distintas especies y elementos químicos, de manera que si se analizan juntos se podría ver dificultado el reconocimiento e interpretación de mecanismos de origen, contaminantes u otros.

En cuanto a las aguas de la cuenca, en ellas se agrupan las muestras de aguas superficiales y subterráneas, ambas dominadas por la precipitación e interacción con las rocas. Lo anterior se comprueba y refuerza al analizar la precipitación de la zona de estudio y los valores de conductividad eléctrica de las aguas muestreadas.

La pluviometría de la zona de estudio se caracteriza por episodios de precipitación que ocurren entre los meses de mayo y septiembre (Ávila, 2013), esto se ve reflejado de manera clara en las curvas de variación estacional, donde los mayores valores de precipitación se encuentran en dicho período. El hecho que el muestreo se haya realizado durante uno de los meses en los que se registran episodios de precipitación relevante, puede ser una variable que influencia las concentraciones obtenidas, pues algunos elementos estudiados podrían tener dependencia con la escorrentía de la cuenca, la cual guarda relación con la precipitación (Palleiro, 2016)

Otro de los elementos que reflejan la influencia de la pluviosidad, corresponde a los bajos valores de conductividad eléctrica obtenidos, los cuales se encuentran cercanos al intervalo de conductividades esperadas en aguas lluvias (Custodio,

1996). De este modo, antes de realizar cualquier análisis de concentración de elementos químicos, ya es esperable encontrar concentraciones diluidas, advertidas por la baja conductividad producto de las precipitaciones en la cuenca.

Si bien a partir del diagrama de Piper se observan aguas de tipo cloruradas sódicas, los diagramas de Schöeller – Berkaloff y Stiff permiten observar variaciones de menor escala en las concentraciones, este comportamiento queda en evidencia al analizar los polígonos del diagrama de Stiff, pues presentan formas levemente distintas a escala de cuenca, sin embargo, a nivel de subcuenca se mantienen relativamente constantes. El hecho que los polígonos del diagrama de Stiff presenten tendencias semejantes a escala de subcuenca, es decir, concentraciones iónicas semejantes, podría ser un primer indicio de una fuente o mecanismo de concentración común (Toumi *et al.*, 2014).

Los valores obtenidos en el cálculo de razones iónicas permiten inferir proveniencia y procesos de origen de los elementos mayoritarios presentes en las aguas de la cuenca (Toumi *et al.*, 2014). En primer lugar, a partir de la relación Na^+/Cl^- fue posible establecer y nuevamente corroborar la influencia de la precipitación en la química de las aguas de la cuenca, por otro lado, las muestras que se ubican fuera de la línea de tendencia podrían ser indicadores de procesos de meteorización de silicatos o indicar la presencia de otros mecanismos proveedores de iones (Saleem *et al.*, 2015). Considerando que la influencia de la precipitación coexiste con procesos de meteorización, la razón iónica $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/(\text{SO}_4^{-2} + \text{HCO}_3^-)$ permite inferir que aquellos iones que provienen de procesos de meteorización de rocas, lo hacen principalmente de rocas silicatadas, en desmedro de litologías mas ricas en carbonatos (Lakshmanana, 2003), esto guarda relación con las litologías observadas en la cuenca según SERNAGEOMIN (2003), donde predominan rocas silicatadas sobre las carbonatadas. Finalmente, es posible observar la influencia marina en las aguas de la cuenca mediante la razón $\text{CE}/\text{Na}^+/\text{Cl}^-$, el gráfico de puntos refleja un comportamiento relativamente constante frente al aumento de conductividad, lo cual puede asociarse a la influencia del mar mediante aerosoles que aumentan la concentración de Na^+ y Cl^- en las aguas, aumentando la conductividad eléctrica (Lakshmanana, 2003), lo que dada la ubicación de la cuenca se considera esperable.

Las razones iónicas no solo sirven para determinar proveniencia o mecanismos que influyen naturalmente sobre la química de las aguas. En esa línea, la razón entre sulfato (SO_4^{-2}) y cloro (Cl^-) puede entregar información sobre posibles procesos en los cuales se pueden generar condiciones propicias para la reducción de sulfato y, en consecuencia, una posible formación de H_2S en trazas (Lavitt *et al.*, 1997), a partir

de los resultados obtenidos no se observan condiciones favorables para la reducción de sulfato. Siguiendo con el análisis de posibles procesos ligados a contaminación, específicamente a procesos ligados a la agricultura, dado que no se observa una tendencia lineal entre las concentraciones de K^+ y NO_3^- , no se establece una influencia de procesos agrícolas, que deriven en la contaminación de las aguas muestreadas (Saka, 2013).

La interpretación de las razones iónicas puede complementarse con la distribución espacial de las concentraciones de los iones mayoritarios en la cuenca, en ellos se observa que, de manera general, su comportamiento es semejante, presentando baja variabilidad en las concentraciones, la cual puede atribuirse a un origen común o a mecanismos que afecten de manera general a las aguas de la cuenca, que en este caso podría ser la precipitación y/o interacción agua roca, mecanismos que se han identificado como dominantes.

Por otra parte, los elementos minoritarios de la cuenca también responden al dominio de la precipitación y a los procesos de meteorización identificados previamente. Tanto el aluminio, como el hierro y el manganeso se asocian a procesos de meteorización de las rocas de la zona de estudio (DGA, 2014a), en ese sentido la precipitación juega un rol fundamental en el proceso de meteorización de minerales. En las cuencas vecinas, la presencia de aluminio se asocia a arcillas y micas, mientras que las concentraciones de hierro y manganeso se relacionan con rocas de minerales máficos (DGA, 2014a). Considerando los mecanismos que se han observado en cuencas vecinas y obteniendo concentraciones medias semejantes en las aguas muestreadas, es posible asociar el hierro y el manganeso a la meteorización de la unidad metamórfica de la cuenca; además, esta posible fuente común de proveniencia se correlaciona con las tendencias similares en la distribución espacial de las concentraciones de estos elementos.

Pese a que Gibbs (1970) establece que elementos morfológicos tales como el relieve y las pendientes del terreno juegan un rol secundario en el control de la química de las aguas, es importante considerar todas las componentes del sistema e integrar en el análisis aquellas características geomorfológicas de la cuenca que podrían influir en el comportamiento hidroquímico, aunque sea de manera secundaria. A partir del reconocimiento y definición de unidades geomorfológicas, fue posible identificar la predominancia de los niveles aterrizados con lomajes, los cuales dotan a la cuenca de pendientes onduladas que contribuyen a procesos erosivos (González, 1998). Considerando los resultados obtenidos, se puede establecer una relación inversa entre las pendientes onduladas identificadas y los tiempos de concentración de las distintas subcuencas, pues la pendiente contribuye

al rápido escurrimiento de las aguas, implicando menores tiempos de concentración (Méndez *et al*, 2007). A su vez, el rápido escurrimiento de las aguas limita la interacción estas con el medio, acotando el tiempo de interacción y de permanencia y/o tránsito, lo cual podría ser un factor de segundo orden en las concentraciones diluidas y de baja conductividad eléctrica vistas en las aguas de la cuenca (Palleiro, 2016).

Con respecto a las aguas del lago, a partir del diagrama de Gibbs se observa el dominio del mar sobre su química, esto se ve reflejado en las elevadas conductividades eléctricas de las aguas, las cuales se asocian a mayores concentraciones de iones con respecto a las aguas de la cuenca. Es relevante destacar la semejanza de las concentraciones obtenidas, la cual se observa en la gran mayoría de diagramas y mapas, que por un lado corrobora la influencia de una misma fuente, pero, por otra parte, descarta una relación entre la distancia de a la desembocadura con las concentraciones observadas, por lo que abre la interrogante sobre el mecanismo específico mediante el cual actúa la influencia marina.

A partir de las comparaciones realizadas con la hidroquímica de otros sistemas, es posible inferir que las concentraciones de los elementos minoritarios de las aguas de la cuenca del lago Budi responden a factores relacionados con su ubicación, contexto geológico e hidrológico. Por otro lado, las concentraciones de elementos mayoritarios se encuentran dentro del rango de valores observados en otros sistemas de humedales donde conviven aguas saladas y dulces.

Finalmente, la comparación de las aguas con la normativa chilena, arroja algunas muestras de agua que superan el límite de concentración establecido para hierro, manganeso, magnesio, cloro, aluminio, sodio, sulfatos y coliformes fecales. Es muy importante destacar que los metales que han sobrepasado la Norma no presentan efectos adversos para la salud y sus límites no responden a recomendaciones sanitarias (OMS, 2018) y tal como se mencionó previamente, su presencia se atribuye, en primer instancia, a factores litológicos naturales de la cuenca.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El objetivo del este trabajo consistió en describir y analizar la geomorfología de la cuenca hídrica del lago Budi junto con la caracterizar la geoquímica de las aguas superficiales y del lago, determinando posibles procesos de origen y de modificación.

Con respecto a la geomorfología, en la cuenca se distinguen cordón montañoso, niveles terrazados con lomajes, humedales, llanura fluvio-marina, campos dunarios y acantilados, como las unidades geomorfológicas principales. De ellas, se considera que la más relevante corresponde a los niveles terrazados, pues sus pendientes onduladas son un rasgo característico de la cuenca. Por otra parte, la morfometría de la cuenca indica bajos tiempos de concentración en todos los esteros principales, influenciados por el relieve accidentado predominante.

En cuanto a la hidrología, se observa una tendencia a la baja en la precipitación acumulada a escala anual, la cual se ve acentuada a partir del año 2017. Además, se identifica una cuenca con régimen pluvial, cuyo período más lluvioso corresponde a los meses entre mayo y septiembre. Por otro lado, la temperatura presenta un bajo rango de variación a escala anual, mientras que los meses más helados coinciden con los más lluviosos.

En relación a su comportamiento químico, las aguas del lago Budi pueden dividirse en dos grupos: aguas de la cuenca y aguas del lago. Las aguas de la cuenca, incluyen aguas superficiales y subterráneas, y se caracterizan por tener una baja conductividad eléctrica y concentraciones iónicas diluidas, mientras que las aguas del lago presentan concentraciones más elevadas en la gran mayoría de especies químicas analizadas.

La química de las aguas de la cuenca se encuentra dominada por factores de primer orden, como son la precipitación e interacción agua roca, específicamente meteorización de minerales y rocas silicatadas, en conjunto con una leve influencia del mar mediante gotas de aerosol. La influencia de procesos de meteorización también se observa en las concentraciones de algunos elementos minoritarios, específicamente hierro, aluminio y manganeso, los cuales se relacionan con procesos de interacción con la litología de la cuenca. Por otra parte, no se observan mecanismos que eleven las concentraciones de nitrato en las aguas, ni tampoco fue posible asociar una relación directa a procesos de contaminación ligados a la agricultura.

La morfología de la cuenca corresponde a un factor de segundo orden y menos relevante en la composición química de las aguas. En ese sentido, la unidad correspondiente a niveles aterrizados y sus pendientes onduladas asociadas, influyen en una baja permanencia del agua en la cuenca dado por el bajo tiempo de concentración, el cual reduce el tiempo de interacción con el medio y por lo tanto limita los procesos de interacción entre el agua y las rocas y/o suelos de la cuenca.

Por otro lado, las aguas del lago tienen una química dominada por el agua de mar y presentan una mayor concentración de iones, sin embargo, tienen una variabilidad baja entre los distintos puntos de muestreo, lo que sugiere cierto nivel de independencia de la química de las aguas con la distancia al punto de desembocadura.

Finalmente, al comparar la química de las aguas del lago Budi con las normativas chilenas de agua potable y riego, se encuentran parámetros tales como hierro, manganeso, magnesio, cloro, aluminio, sulfato y coliformes fecales, que presentan concentraciones elevadas en algunas muestras, con respecto a lo estipulado en las normativas. A pesar de esto, según la Organización Mundial de la Salud (2018), los metales pesados que exceden la normativa no presentan riesgos asociados a la salud.

6.2 Recomendaciones

- Realizar un estudio en detalle de calidad química de las aguas utilizadas en la cuenca del lago Budi, con el objetivo de conocer en detalle la composición química de las aguas a las que se les da uso de manera cotidiana, para distintas actividades.
- Muestrear de manera sistemática las aguas de la cuenca, considerando aforo de caudales y temporalidad, con el propósito de establecer cómo las variaciones de precipitación y escorrentía pueden incidir sobre la química de las aguas de la cuenca.
- Estudiar el mecanismo específico mediante el cual el mar controla la química de las aguas del lago, con el objeto de caracterizar y cuantificar la componente superficial y subterránea.
- Llevar a cabo un muestreo hidroquímico de aguas subterráneas de mayor profundidad y permanencia en la cuenca, con el objetivo de caracterizar el acuífero de la zona de estudio y así poder definir con mayor claridad la procedencia de las especies químicas y existencia de procesos contaminantes, en aguas cuya química esté dominada mayoritariamente por la interacción agua roca.

7. Bibliografía

Aiello, A., Canora, F., Pasquariello, G., & Spilotro, G. (2013). Shoreline variations and coastal dynamics: A space–time data analysis of the Jonian littoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 124-135.

Antimán, M., y Martínez, C. (2005). Grado de antropización, evaluación y modelación matemática del nivel trófico del lago Budi como base para determinar su comportamiento ambiental. Tesis para optar al grado de Licenciado en Recursos Naturales y Licenciado en Ciencias. Universidad Católica de Temuco.

ATSDR (2004). Resumen de salud pública: estroncio. DEPARTAMENTO DE SALUD Y SERVICIOS HUMANOS de los EE.UU., Servicio de Salud Pública Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades

Ávila, K., Vide, M. (2013). Análisis estadístico de los eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile continental. *Cuadernos geográficos* 52(1) 69 – 83.

Bogomolov, G. V. (1966). Hydrogeologie et notions de géologie d'ingénieur. Ed. de la Paix, Moscú, cap. IV. 67-86.

Cisternas, M., Atwater, B.F., Torrejón, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T., Shishikura, M., Rajendran, C.P., Malik, J.M., Rizal, Y. & Husni, M. (2005): Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake: –*Nature* 437, S. 404-407.

Custodio, E., Llamas, M.R. (1996). Hidrología subterránea. 2da edición. Tomo I y II. Editores Omega, Barcelona.

Díaz, C., Fall, C., Quentin, E., Jiménez, M., Esteller, M., Garrido, S. López, C., García, D. (2003). Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. RIPDA – CYTED.

Datta, P., Tyagi, S. (1996). Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: chemical weathering process and groundwater flow regime. *Journal of geological society of India* (47) 179 – 188.

Dirección General de Aguas (DGA). (2004a). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca Río Imperial.

Dirección General de Aguas (DGA). (2004b). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca Río Toltén.

Gascón, J. L. G. (1984). La correlacion lineal: precisiones prácticas y su funcionalidad en la determinación de las similitudes y diferencias de los espacios geográficos. Norba: *Revista de geografía*, (5), 79-92.

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS* 4:143-158. Asociación de Universidades Grupo Montevideo.

Ghassemi, A., Sarikhani, R., Nagaraju, D. (2011). Hydro geochemical and rock wáter interaction studies in East of Kurdistan, N – W of Iran. *International Journal of Enviornmental Sciences and Research*, 1(1) 16 – 22.

Gibbs, R.J. (1970). Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science, New Series*, (170) 1088 – 1090.

Giovanetti, V. (2018). Calidad fisicoquímica de agua potable en la Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al título de geóloga. Universidad de Chile.

González, J. (1998). Los procesos de erosión del suelo: hechos, mitos y paradojas. *Geographicalia* (36), 47 – 65.

Hauenstein, E., González, M., Peña, F., y Muñoz, A. 2002. Clasificación y caracterización florístico - vegetal de los humedales de la costa de Toltén (IX región, Chile). *Revista Gayana Botánica* (59) 87-100.

Huggett, R. (2007). *Fundamentals of geomorphology*. Second Edition, Routledge Fundamentals of Physical Geography.

Jalali, M., Khanlari, Z. (2008). Major ion chemistry of groundwaters in the Damagh area, Hamadan, Western Iran. *Enviornmental Geology*. 54 – 87.

Kangas, P. (2004). *Ecological engineering: principles and practice*.

Krone, R. (1977). Estuarine Processes: Circulation, Sediments, and Transfer of Material in the Estuary. Effects of physical alterations.

Laboratorio de Modelación Ecológica. (2010). Análisis del impacto económico y social y objetivos de calidad ambiental del lago Budi. Informe Final. Departamento de Ciencias Ecológicas. Universidad de Chile.

Lakshmanan, E., Kannan, R., Kumar, M. (2003). Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of ground water in a part of Kancheepuram district, Tamil Nadu, India. *Enviornmental Geosciences*, 10(4), 157 – 166.

Lavitt, N., Acworth, R., Jankowski, J. (1997). Vertical Hydrochemical zonation in a coastal section of the botany sands aquifer, Sydney, Australia. *Hydrogeology Journal* 5(2).

Lomnitz, C. (1968): Acerca de una curiosidad geológica chilena: Los orígenes del Lago Budi. –Bol. de la Univ. de Chile 82, S. 37-42.

Lomnitz, C. (1969). Sea floor spreading as a factor of tectonic evolution in Southern Chile.

Manhan, S. E. (2007). *Introducción a la química Ambiental*.

Mella, M., Quiroz, D. (2010). Geología del área Temuco – Nueva Imperial, Región de la Araucanía. Carta geológica de Chile. Serie geología básica. 122.

Méndez, W., Córdova, J., Cartaya, S., Pacheco, H., (2007). Geomorfología y respuesta hidrológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, Estado de Vargas, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.* 22(1), 5 – 20.

Organización Mundial de la Salud (2018). Guías para la calidad de agua en el consumo humano.

Palleiro, L. (2016). Influencia de la escorrentía rural sobre el aporte de metales pesados y sedimentos al sistema fluvial: análisis a escala de cuenca. Tesis de Doctorado. Universidad Da Coruña.

Peña-Cortés, F. Gutiérrez, P., Rebolledo, G., Escalona, M., Hauenstein, E., Bertrán, C., Schlatter, R., Tapia, J. (2006). Determinación del nivel de antropización de humedales como criterio para la planificación ecológica de la cuenca del lago Budi, IX Región de La Araucanía, Chile, *Revista de Geografía Norte Grande*, (36)75-91.

Peñaloza, T., Quesille, M. V. (2021). Caracterización geomorfológica de la cuenca del lago Budi. Informe de práctica profesional II. Universidad de Chile.

Piper, A.M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.

Rodríguez, C. (2005). Estudio del comportamiento hidrodinámico y aspectos de calidad de aguas del lago Budi. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Saka, D., Akiti, T., Osae, H., Appenteng, M., Gibrilla, A. (2013). Hydrogeochemistry and isotope studies of groundwater in the Ga West Municipal Area, Ghana. *Applied Water Science*. (3) 577 – 588.

SAG (2011). Pauta para estudio de suelos.

Salas, N. (2017). Prospección geoquímica en Chañaral después del aluvión de marzo de 2015, Región de Atacama, Chile. Memoria para optar al título de geóloga. Universidad de Chile.

Salazar, P. (2017). Tendencias climáticas y sus efectos en el golfo de Ancud por medio de las series de precipitación y temperatura más largas. Memoria para optar al título profesional de Geógrafa. Universidad de Chile.

Salinas, R., & Ministerio de Medio Ambiente. (2016). Diagnóstico del estado y tendencias de la biodiversidad: Región de la Araucanía.

Sánchez, F. J. (2017). Hidrología superficial y subterránea. *Createspace Independent Pub.*, 414.

Sandoval, L. (2009). Intrusión salina en el lago Budi. Análisis hidrodinámico y estudio de la corriente de densidad. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

San Juan, A. (2015). Caracterización hidrogeoquímica de recursos hídricos de la cuenca de Santiago. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile.

SERNAGEOMIN (2003). Mapa Geológico de Chile. Versión digital. Publicación geológica digital, No. 4, 2003. Base Geológica escala 1:1.000.000.

Subramani, T., Rajmohan, N., Elango, N. (2010). Groundwater geochemistry and identification of hydrogeological processes in a hard rock region, Southern India. *Environmental Monit Assess.* 123 – 137.

Toumi, N., Hussein B. H. M., Rafrafi S., y El Kassas N. (2014). Groundwater quality and hydrochemical properties of Al-Ula Region, Saudi Arabia. *Environmental Monitoring and Assessment Journal*, 187.

Vidal-Abarca, M., Suarez, M., Figueroa, R., Enríquez M., García, V., Domínguez, C., Arce., M. (2011). Caracterización hidroquímica del complejo de humedales El Yali, Chile Central. *Limnetica* 30(1). 43 – 58.

Wallner, J. (2010). Holozäne Landschaftsentwicklung am Lago Budi, Chile (38,9°S) -Paläolimnologisch/paläoseismische Untersuchungen an Lagunensedimenten- zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium.

ANEXOS

ANEXO A: PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

A.1 PARÁMETROS DE FORMA

Perímetro de la cuenca (km):

Se define como la longitud de la línea que envuelve la cuenca hídrica, a lo largo de la divisoria de aguas.

Longitud axial (km):

Longitud de la línea recta que une la desembocadura y el punto mas lejano y que corresponde al eje de la cuenca.

Longitud del curso principal (km):

Corresponde a la longitud de la recta que va desde el punto mas distante de la cuenca hasta la desembocadura.

Longitud total del drenaje (km):

Suma de todas las longitudes de los cursos de agua que son drenados por la cuenca.

Área (km²):

Superficie delimitada por la divisoria de aguas.

Ancho promedio (km):

Relación entre la superficie de la cuenca y su longitud axial.

$$\text{Ancho promedio} = \frac{\text{Superficie de la cuenca (km}^2\text{)}}{\text{Longitud axial (km)}}$$

Factor de forma:

Parámetro adimensional correspondiente a la razón entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud axial. Un factor de forma semejante a 1 indica una cuenca redondeada, si el factor de forma la cuenca será alargada y menos propensa a generar crecidas.

$$\text{Factor de forma} = \frac{\text{Ancho promedio (km)}}{\text{Longitud axial (km)}}$$

Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc):

Parámetro adimensional que se calcula como la división entre el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de igual área:

$$Kc = \frac{\text{Perímetro de la cuenca (km)}}{2 \pi \cdot \text{Área de la cuenca (km)}}$$

Kc indica la forma aproximada de la cuenca, según la siguiente tabla:

Valor de Kc	Forma aproximada
Kc = 1,00	Cuenca redonda
Kc = 1,25	Ovalada redonda
Kc = 1,50	Oblonga
Kc > 1,75	Rectangular oblonga

En la medida que Kc tienda a 1, mayor será la susceptibilidad de la cuenca a generar crecidas, ya que la distancia entre la divisoria de aguas y el curso principal será similar en toda la cuenca, aumentando la probabilidad de ondas de crecida continua.

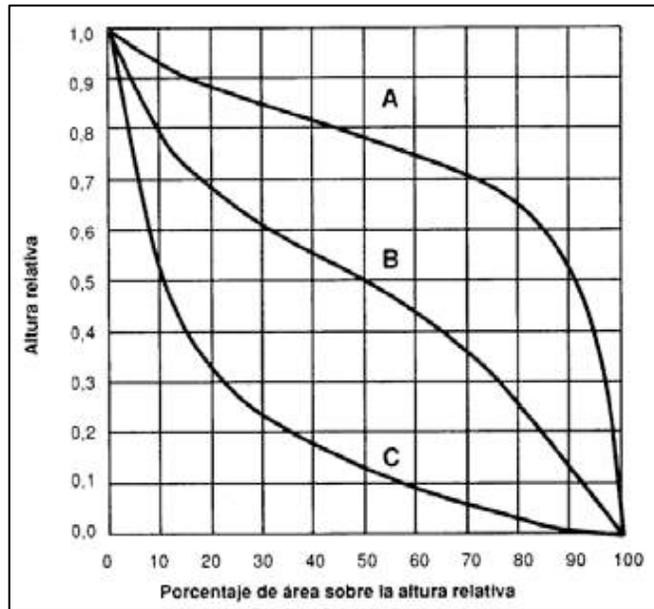
A.2 PARÁMETROS DE RELIEVE**Curva hipsométrica:**

Corresponde a un gráfico cuyo eje de las abscisas representa el área relativa y las ordenadas la altura relativa. Su grado de sinuosidad y su pendiente son variables y en determinados casos pueden asociarse a controles tectónicos o litológicos particulares. Gaspari *et al.* (2012) asocia la sinuosidad y concavidad de la curva a procesos evolutivos:

A: Cuenca con gran potencial erosivo

B: Cuenca en equilibrio

C: Cuenca de bajo poder erosivo, predominantemente sedimentaria.



Tipos de curvas hipsométricas. Extraído de Plata *et al.* (2008).

A partir de la curva hipsométrica puede calcularse la integral hipsométrica, la cual indica cuantitativamente el área bajo la curva.

Pendiente media de la cuenca:

Se define a partir de la siguiente ecuación matemática:

$$Pendiente\ media = 100 \cdot \frac{H \cdot L}{A}$$

Donde:

H = distancia vertical entre curvas de nivel medidas

L = longitud total de las curvas de nivel

A = Superficie medida en km²

Coficiente de rugosidad (Ra):

Parámetro adimensional que indica la relación entre el desnivel de la cuenca y su densidad de drenaje.

$$Ra = \frac{Desnivel\ de\ la\ cuenca}{Densidad\ de\ drenaje}$$

Orientación de ladera:

Dirección con respecto al norte geográfico, en base a la pendiente general de las laderas de la cuenca.

A.3 PARÁMETROS DE DRENAJE

Densidad de drenaje (Dd):

Relación entre la sumatoria de las longitudes de todos los cauces que drenan la cuenca y la superficie de esta.

$$Dd = \frac{\Sigma \text{ longitud de los cauces de la cuenca}}{\text{Superficie de la cuenca}}$$

En una primera aproximación, sin considerar otros aspectos físicos de la cuenca, a mayor densidad de drenaje menor probabilidad de crecidas existe en una cuenca, esto porque al existir una alta densidad de drenaje el flujo de agua debe recorrer una mayor trayectoria, distanciando las ondas de crecida.

Pendiente media del cauce (J):

Razón entre el desnivel del cauce principal y la longitud de este.

$$J = \frac{\text{desnivel del cauce principal}}{\text{longitud del cauce principal}}$$

Tiempo de concentración (Tc):

Se define como el tiempo que demora el flujo superficial en aportar al caudal de salida de la cuenca. Es decir, corresponde al tiempo que demora el recorrido de una gota de agua entre el punto mas alejado hasta la desembocadura.

Es posible determinar el Tc a partir de la siguiente ecuación empírica desarrollada por Kirpich (1960):

$$Tc = \frac{0,0078 \cdot L^{0,77}}{J^{0,385}}$$

Donde:

L = longitud del canal

J = pendiente media del cauce

ANEXO B: RESULTADOS LABORATORIO

ENSAYOS	Aluminio mg/l	Arsénico mg/l	Bario mg/l	Berilio mg/l	Bicarbonato mg/l	Boro mg/l	Cadmio mg/l	Calcio mg/l
B01	1,69	0,001	0,05	0,05	20,81	0,007	0,01	2,29
B02	1,15	0,001	0,05	0,05	18,5	0,043	0,01	1,57
B03	0,81	0,001	0,05	0,05	18,5	0,007	0,01	1,66
B04	1,72	0,001	0,05	0,05	20,81	0,007	0,01	1,67
B05	1,76	0,001	0,05	0,05	20,81	0,007	0,01	1,59
B06	1,18	0,001	0,05	0,05	18,5	0,007	0,01	1,6
B08	0,51	0,001	0,05	0,05	25,44	0,007	0,01	1,66
B09	1,93	0,001	0,05	0,05	20,81	0,007	0,01	2,56
B10	1,8	0,001	0,05	0,05	20,81	0,007	0,01	2,49
B11	11,94	0,001	0,05	0,05	30,06	0,007	0,01	4,35
B12	0,05	0,001	0,05	0,05	13,88	0,007	0,01	0,77
B13	0,05	0,001	0,05	0,05	16,19	0,007	0,01	0,91
B14	0,05	0,001	0,05	0,05	55,5	0,447	0,01	20,61
B15	0,05	0,001	0,05	0,05	57,81	0,459	0,01	20,09
B17	1,13	0,001	0,05	0,05	57,81	0,526	0,01	20,09
B19	1,58	0,001	0,05	0,05	16,19	0,007	0,01	1,37

ENSAYOS	Carbonato mg/l	Cianuro mg/l	Cloruro mg/l	Cobre mg/l	Conductividad mS/cm a 25°C	Conductividad μS/cm a 25°C	Cromo, mg/l	Estaño, mg/l
B01	0	0,05	14,3	0,05	-	74,7	0,05	0,15
B02	0	0,05	10,6	0,05	-	57,5	0,05	0,15
B03	0	0,05	11,6	0,05	-	57,2	0,05	0,15
B04	0	0,05	10,0	0,05	-	54,7	0,05	0,15
B05	0	0,05	8,4	0,05	-	48,8	0,05	0,15
B06	0	0,05	7,7	0,05	-	44,7	0,05	0,15
B08	0	0,05	8,8	0,05	-	54,8	0,05	0,15
B09	0	0,05	10,5	0,05	-	70,0	0,05	0,15
B10	0	0,05	12,3	0,05	-	71,1	0,05	0,15
B11	0	0,05	10,9	0,05	-	91,3	0,05	0,15
B12	0	0,05	11,1	0,05	-	50,9	0,05	0,15
B13	0	0,05	9,5	0,05	-	49,2	0,05	0,15
B14	0	0,05	2326,8	0,05	6,65	6650	0,05	0,15
B15	0	0,05	2337,0	0,05	6,8	6800	0,05	0,15
B17	0	0,05	2671,5	0,05	-	7840,00	0,05	0,15
B19	0	0,05	20,3	0,05	-	50,4	0,05	0,15

ENSAYOS	Estroncio, mg/l	Fluoruro, mg/l	Fosfato, mg/l	Hierro, mg/l	Litio, mg/l	Magnesio, mg/l	Manganeso, mg/l	Mercurio, mg/l
B01	0,1	0,2	0,3	2,39	0,05	2,12	0,11	0,001
B02	0,1	0,2	0,3	1,88	0,05	1,74	0,1	0,001
B03	0,1	0,2	0,3	1,57	0,05	1,88	0,06	0,001
B04	0,1	0,2	0,3	2,18	0,05	1,83	0,09	0,001
B05	0,1	0,2	0,3	2,24	0,05	1,83	0,15	0,001
B06	0,1	0,2	0,3	1,65	0,05	1,83	0,15	0,001
B08	0,1	0,2	0,3	1,45	0,05	1,92	0,12	0,001
B09	0,1	0,2	0,3	3,22	0,05	2,48	0,19	0,001
B10	0,1	0,2	0,3	2,38	0,05	2,59	0,11	0,001
B11	0,1	0,2	0,3	4,5	0,05	3,45	0,45	0,001
B12	0,1	0,2	0,3	0,05	0,05	1,33	0,01	0,001
B13	0,1	0,2	0,3	0,37	0,05	1,12	0,03	0,001
B14	0,672	0,2	0,3	0,05	0,05	146,41	0,04	0,001
B15	0,682	0,2	0,3	0,05	0,05	139,71	0,05	0,001
B17	0,789	0,2	0,3	0,05	0,05	168,36	0,06	0,001
B19	0,1	0,2	0,3	1,79	0,05	1,35	0,06	0,001

ENSAYOS	Molibdeno, mg/l	Niquel, mg/l	Nitrato, mg/l	Nitrito, mg/l	Plata, mg/l	Plomo, mg/l	Potasio, mg/l	Selenio, mg/l
B01	0,01	0,05	0,23	0,05	0,05	0,05	0,93	0,005
B02	0,01	0,05	0,26	0,05	0,05	0,05	0,58	0,005
B03	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,71	0,005
B04	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,57	0,005
B05	0,01	0,05	0,44	0,05	0,05	0,05	0,44	0,005
B06	0,01	0,05	0,34	0,05	0,05	0,05	0,4	0,005
B08	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,45	0,005
B09	0,01	0,05	0,44	0,05	0,05	0,05	0,67	0,005
B10	0,01	0,05	0,3	0,05	0,05	0,05	0,67	0,005
B11	0,01	0,05	0,33	0,05	0,05	0,05	0,94	0,005
B12	0,01	0,05	1,9	0,05	0,05	0,05	0,33	0,005
B13	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,32	0,005
B14	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	46,44	0,005
B15	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	45,46	0,005
B17	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	51,07	0,005
B19	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,33	0,005

ENSAYOS	Sodio, mg/l	Sulfatos, mg/l	Vanadio, mg/l	Zinc, mg/l	Coliformes Fecales NMP/100ml
B01	9,05	37	0,05	0,05	79
B02	7,23	27,2	0,05	0,05	170
B03	16,89	18,5	0,05	0,05	110
B04	6,67	18,1	0,05	0,05	23
B05	5,31	21	0,05	0,05	1700
B06	4,81	17,3	0,05	0,05	330
B08	5,5	14,4	0,05	0,05	79
B09	7,44	16,1	0,05	0,05	240
B10	8,35	17,3	0,05	0,05	1200
B11	10,64	17,7	0,05	0,05	230
B12	6,99	30,9	0,05	0,05	1,8
B13	6,83	18,1	0,05	0,05	70
B14	1423,06	302,1	0,05	0,05	1,8
B15	1373,4	307,5	0,05	0,05	1,8
B17	1660,9	366,7	0,05	0,05	4,5
B19	7,44	18,9	0,05	0,05	23

ANEXO C: RAZONES IÓNICAS

C.1 VALORES DE LAS RAZONES EMPLEADAS EN EL DIAGRAMA DE GIBBS

Muestra	Total de sólidos disueltos (ppm)	$\frac{rNa^+}{(rNa^+ + rCa^+)}$	$\frac{rCl^-}{(rCl^- + rHCO_3^-)}$
B01	48,56	0,87	0,54
B02	37,38	0,89	0,50
B03	37,18	0,95	0,52
B04	35,56	0,87	0,45
B05	31,72	0,85	0,41
B06	29,06	0,84	0,42
B08	35,62	0,85	0,37
B09	45,50	0,84	0,46
B10	46,22	0,85	0,50
B11	59,35	0,81	0,38
B12	33,09	0,94	0,58
B13	31,98	0,93	0,50
B14	4322,50	0,99	0,99
B15	4420,00	0,99	0,99
B17	5096,00	0,99	0,99
B19	32,76	0,90	0,68

C.2 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS MAYORITARIOS EN MILIEQUIVALENTES

MUESTRAS	ANIONES				CATIONES			
	HCO ₃ ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻² meq/l	Cl ⁻ meq/l	NO ₃ ⁻ meq/l	Na ⁺ meq/l	K ⁺ meq/l	Ca ⁺² meq/l	Mg ⁺² meq/l
B01	0,341	0,771	0,403	0,004	0,394	0,024	0,114	0,174
B02	0,303	0,567	0,299	0,004	0,315	0,015	0,078	0,143
B03	0,303	0,385	0,327	0,003	0,735	0,018	0,083	0,155
B04	0,341	0,377	0,282	0,003	0,290	0,015	0,083	0,151
B05	0,341	0,437	0,237	0,007	0,231	0,011	0,079	0,151
B06	0,303	0,360	0,217	0,005	0,209	0,010	0,080	0,151
B08	0,417	0,300	0,248	0,003	0,239	0,012	0,083	0,158
B09	0,341	0,335	0,296	0,007	0,324	0,017	0,128	0,204
B10	0,341	0,360	0,347	0,005	0,363	0,017	0,124	0,213
B11	0,493	0,369	0,307	0,005	0,463	0,024	0,217	0,284
B12	0,228	0,644	0,313	0,031	0,304	0,008	0,038	0,109
B13	0,265	0,377	0,268	0,003	0,297	0,008	0,045	0,092
B14	0,910	6,292	65,636	0,003	61,926	1,188	1,029	12,050
B15	0,948	6,405	65,924	0,003	59,765	1,163	1,003	11,499
B17	0,948	7,638	75,360	0,003	72,276	1,306	1,003	13,857
B19	0,265	0,394	0,573	0,003	0,324	0,008	0,068	0,111

C.3 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS MAYORITARIOS EN MILIMOLES

MUESTRAS	ANIONES				CATIONES			
	HCO ₃ ⁻ mmol/l	SO ₄ ⁻² mmol/l	Cl ⁻ mmol/l	NO ₃ ⁻ mmol/l	Na ⁺ mmol/l	K ⁺ mmol/l	Ca ⁺² mmol/l	Mg ⁺² mmol/l
B01	0,341	0,385	0,403	0,004	0,394	0,024	0,057	0,087
B02	0,303	0,283	0,299	0,004	0,315	0,015	0,039	0,072
B03	0,303	0,193	0,327	0,003	0,735	0,018	0,041	0,077
B04	0,341	0,189	0,282	0,003	0,290	0,015	0,042	0,075
B05	0,341	0,219	0,237	0,007	0,231	0,011	0,040	0,075
B06	0,303	0,180	0,217	0,005	0,209	0,010	0,040	0,075
B08	0,417	0,150	0,248	0,003	0,239	0,012	0,041	0,079
B09	0,341	0,168	0,296	0,007	0,324	0,017	0,064	0,102
B10	0,341	0,180	0,347	0,005	0,363	0,017	0,062	0,107
B11	0,493	0,184	0,307	0,005	0,463	0,024	0,109	0,142
B12	0,228	0,322	0,313	0,031	0,304	0,008	0,019	0,055
B13	0,265	0,189	0,268	0,003	0,297	0,008	0,023	0,046
B14	0,910	3,146	65,636	0,003	61,926	1,188	0,514	6,025
B15	0,948	3,202	65,924	0,003	59,765	1,163	0,501	5,749
B17	0,948	3,819	75,360	0,003	72,276	1,306	0,501	6,928
B19	0,265	0,197	0,573	0,003	0,324	0,008	0,034	0,056

ANEXO D: CONCENTRACIONES EN OTROS SISTEMAS

D.1 CUENCA RÍO IMPERIAL (DGA, 2004)

Estación	RÍO CAUTIN EN RARI-RUCA				RIO CAUTIN BAJO TEMUCO				RÍO CHOL CHOL EN CHOL CHOL			
	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano
pH	8,6	7,8	8,4	8,8	8,6	8,6	8,3	8,8	8,1	7,4	7,2	8,7
Conductividad Eléctrica (uS/cm)	131,5	140	110	130,3	139	120	95,7	122,1	150	94	82,8	76,5
Hierro (mg/l)	1,49	0,73	1,55	3,04	1,29	1,01	2,8	0,54	1,75	1,22	1,32	0,72
Manganeso (mg/l)	0,04	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03	0,03
Aluminio (mg/l)	0,45	0,41	0,45	0,42	0,67	0,45	0,68	0,45	0,4	0,43	0,45	0,37

Estación	RIO IMPERIAL EN ALMAGRO				RIO IMPERIAL EN CARAHUE				RIO LUMACO EN LUMACO			
	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano
pH	7,2	7,1	7,6	7,2	8,2	8,1	8,4	9,4	8,5	7,6	7,3	8,1
Conductividad Eléctrica (uS/cm)	68,2	84,7	68,8	87,7	119,4	180	81	101	91,1	70	75,7	70,1
Hierro (mg/l)	0,48	0,37	0,3	0,22	2,34	1,16	0,99	1,74	5,74	1,26	2,86	3,3
Manganeso (mg/l)	0,03	0,01	0,01	0,02	0,05	0,04	0,02	0,03	0,07	0,04	0,04	0,05
Aluminio (mg/l)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,53	0,47	0,5	0,48	0,47	0,58	1,17	0,62

Estación	RIO MUCHO EN PUENTE MUCHO				RIO QUEPE EN VILCUN				RIO QUEPE EN QUEPE			
	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano
pH	7,7	8	8,5	9,7	8,1	7,8	8,1	8,5	7,7	8,4	7,8	9,6
Conductividad Eléctrica (uS/cm)	73,3	66,1	93	115	89,2	182,5	97	83,7	78,4	95,4	85,8	85,2
Hierro (mg/l)	1,22	1,03	2,1	1,01	5,44	1,47	1,88	0,93	1,91	0,9	3,68	0,55
Manganeso (mg/l)	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,1	0,3	0,05	0,02	0,02	0,02
Aluminio (mg/l)	0,58	0,06	0,38	0,16	0,5	0,42	0,47	0,6	0,6	0,44	0,88	0,37

Estación	RIO QUILLIN EN VOCALHUE				RIO QUINO EN LONGITUDINAL				RIO TRAIGUEN EN TRAIGUEN			
	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano
pH	8	7,9	7,9	8,7	8,3	7,5	7,8	8,6	7,9	7,2	7,1	9,5
Conductividad Eléctrica (uS/cm)	104,3	93	88,9	128	72,4	57	55,6	89	87,6	106	67,5	97,1
Hierro (mg/l)	1,35	1,12	1,14	1,79	0,59	1,21	1,5	0,26	1,7	0,83	4,8	0,94
Manganeso (mg/l)	0,06	0,08	0,05	0,07	0,02	0,02	0,01	0,02	0,08	0,05	0,04	0,04
Aluminio (mg/l)	0,3	0,41	0,55	0,37	0,6	0,54	0,53	0,37	0,5	0,5	0,5	0,5

D.2 CUENCA RÍO TOLTÉN (DGA, 2004)

Muestra	RIO ALLIPEN EN MELIPEUCO				RIO ALLIPEN EN LOS LAURELES				RIO DONGUIL EN GORBEA			
	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano
pH	7,5	7,5	7,3	7,3	7,4	7,6	7,3	7,3	6,9	7,2	6,8	7,1
Conductividad Eléctrica (uS/cm)	89,8	100,00	85,00	84,8	79,1	103,1	83,00	92,9	34,6	45,2	35,9	41,2
Hierro (mg/l)	0,48	0,27	0,19	0,26	0,83	0,25	0,35	0,25	0,57	0,61	0,66	0,67
Manganeso (mg/l)	0,03	<0,01	<0,02	<0,03	0,04	<0,01	<0,02	<0,03	0,04	0,07	0,03	0,04
Aluminio (mg/l)	0,33	0,36	0,48	0,46	0,87	0,89	0,7	0,41	0,45	0,69	0,88	0,34

Muestra	RIO PUCON EN PUCON				RIO TOLTEN EN VILLARICA				RIO TOLTEN EN LONGITUDINAL			
	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano	Invierno	Otoño	Primavera	Verano
pH	7,4	7,3	7,1	7,4	7,5	7,5	7,5	7,6	6,9	7,2	7,0	6,9
Conductividad Eléctrica (uS/cm)	63,00	72,7	60,9	70,00	68,4	59,6	61,7	63,8	60,4	74,3	60,9	68,7
Hierro (mg/l)	0,42	0,35	0,21	0,17	0,05	0,06	0,05	0,05	1,08	0,17	0,27	0,22
Manganeso (mg/l)	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01	<0,01
Aluminio (mg/l)	0,5	0,54	0,5	0,4	0,48	0,45	0,54	0,3				

Muestra	RIO TOLTEN EN TEODORO SCHMIDT			
	Invierno	Otoño	Primavera	Verano
pH	7,3	7,4	7,3	7,3
Conductividad Eléctrica (µS/cm)	60,2	74,2	60,00	70,2
Hierro (mg/l)	0,61	0,18	0,32	0,3
Manganeso (mg/l)	0,02	0,02	0,02	<0,01
Aluminio (mg/l)	0,4	0,46	0,53	0,37

D.3 COMPLEJO DE HUMEDALES EL YALI (VIDAL – ABARCA, 2011)

Puntos de muestreo	pH		Conductividad eléctrica µS/cm	
	2007	2008	2007	2008
Laguna Colejuda	8,4	8,72	52200	42700
Laguna Matanzas	7,58	8,62	1286	4890
Tranque los Molles	8,00	8,84	2160	12700
Debajo tranque de Molles		8,4		4030
Laguna Las Salinas	7,64	7,66	32100	2800
Laguna Seca		7,82		700
Laguna Guairao	7,3	7,79	1350	1170
Laguna Cabildo	7,6	9,31	12360	14400
Laguna del Rey	7,1	7,44	6780	15300

		Alcalinidad	Cl ⁻	SO ⁻⁴	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
		(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)
	Media	0,42	3,45	0,92	0,45	1,8	2,17	0,41
Aguas dulces	Max	0,66	8,93	3,02	1,32	3,36	6,22	0,9
(<1500 µS/cm)	Min	0,21	0,92	0,25	0,08	0,64	0,2	0,12
n = 7	SD	0,18	2,76	0,97	0,43	1,27	2,19	0,26
	CV (%)	43,82	79,92	105,1	93,83	70,52	100,86	63,24
	Media	0,56	22,86	1,67	0,85	5,84	17,96	0,49
Aguas subsalinas	Max	1,2	33,7	3,61	1,27	9,17	29,56	0,67
(1500-5000 µS/cm)	Min	0,27	17,37	0,03	0,59	2,94	11,36	0,33
n = 4	SD	0,44	7,36	1,49	0,33	2,66	7,98	0,14
	CV (%)	77,68	32,19	89,17	38,73	45,56	44,44	28,18
	Media	0,69	148,05	17,23	4,25	30,58	129,41	2,61
Aguas hiposalinas	Max	1,31	492,25	48,58	12,23	93,91	429,3	9,23
(5000-35 000 µS/cm)	Min	0,39	36,04	1,21	1,06	5,91	31,15	0,56
n = 6	SD	0,35	174,94	20,89	4,26	33,2	152,15	3,32
	CV (%)	50,00	118,16	121,21	100,19	108,58	117,57	127,3
	Media	0,5	435,21	38,43	9,5	77,38	382,13	7,85
Aguas mesosalinas	Max	0,69	540,56	54,56	13,03	103,86	472,23	10,15
(35 000-70 000 µS/cm)	Min	0,39	369,87	22,48	3,16	30,56	318,71	4,77
n = 3	SD	0,17	92,11	16,04	5,5	40,67	80,16	2,77
	CV (%)	34,33	21,17	41,73	57,92	52,55	20,98	35,35

