



Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción

ANÁLISIS TIPOLOGICO DE LAGOS NORTAPAGÓNICOS CHILENOS PARA LA ELABORACIÓN DE NORMAS DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES

Habilitación profesional presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

CAMILA BENAVIDES ALARCÓN

Docente Guía: Dr. Ricardo Figueroa Jara

Concepción (Chile)

2023

“Análisis tipológicos de los lagos norpatagónicos chilenos para la elaboración de normas de calidad de aguas superficiales”

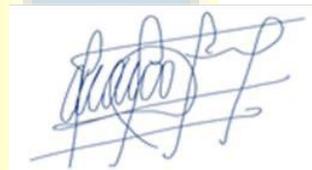
Profesor Guía: Dr. Ricardo Figueroa Jara



Profesor Comisión: Dr. Oscar Parra Barrientos



Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, mayo 2023

Índice de contenido

| | |
|--|-------------|
| Agradecimientos | VI |
| Nomenclatura | VIII |
| Resumen | IX |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Manejo Integrado de Cuencas | 3 |
| 1.2 Tipología de Lagos | 6 |
| 1.3 Contaminación y eutrofización en sistemas acuáticos | 10 |
| 1.4 Legislación Ambiental en el Mundo | 13 |
| 1.4.1 Iniciativas de protección en sistemas lacustres | 14 |
| 1.5 Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) | 18 |
| 1.6 Descripción del Área | 24 |
| 2. Hipótesis | 29 |
| 3. Objetivos | 29 |
| 3.1 Objetivo General | 29 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 29 |
| 4. Metodología | 30 |
| 4.1 Actividades para dar cumplimiento al objetivo 1 | 30 |
| 4.1.1 Reunir información macrozonal y de las cuencas lacustres | 30 |
| 4.1.2 Recopilar la información morfológica, geológica, hidrológica y climática | 31 |
| 4.2.1 Realizar tipología en base a las variables geomorfológicas | 36 |
| 4.2.2 Recopilar los datos de calidad de agua | 36 |
| 4.2.3 Validar la tipología obtenida con los datos de calidad de agua. | 37 |
| 4.3 Actividades para dar cumplimiento al objetivo 3 | 38 |
| 4.3.1 Análisis de los Datos | 38 |
| 4.3.2 Calcular el índice de nivel trófico | 38 |
| 4.3.3 Establecer el lago de referencia por grupo | 41 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| 4.3.4 | Seleccionar los parámetros y valores a normar. | 41 |
| 5. | Resultados y discusión | 43 |
| 5.1 | Espacio geográfico de los Lagos Norpatagónicos | 43 |
| 5.1.2 | Cuencas Hidrográficas..... | 44 |
| 5.1.3 | Cuencas Lacustres | 49 |
| 5.1.4. | Geología | 55 |
| 5.1.5 | Clima | 57 |
| 5.1.6 | Áreas Protegidas | 61 |
| 5.1.7 | Flora | 63 |
| 5.1.8 | Comunidades bióticas..... | 66 |
| 5.1.9 | Usos de Suelo | 68 |
| 5.2 | Tipología de los Lagos | 73 |
| 5.2.1 | Análisis de Componentes principal (ACP)..... | 73 |
| 5.2.2 | Análisis de Conglomerado | 78 |
| 5.2.3 | Escalamiento Multidimensional (MDS) | 79 |
| 5.3 | Validación de la tipología variables de calidad del agua | 82 |
| 5.3.1 | Análisis de Componentes Principal..... | 83 |
| 5.3.2 | Análisis de Conglomerado Jerárquico..... | 87 |
| 5.3.3 | Agrupamiento K-medias | 89 |
| 5.4 | Calidad de los grupos tipológicos..... | 92 |
| 5.4.1 | Estado Trófico de los Lagos..... | 93 |
| 5.4.2 | Lagos de Referencia | 99 |
| 5.4.3 | Variables y valores sugeridos a normar..... | 99 |
| 6. | Conclusiones | 104 |
| 6.1 | Consideraciones Futuras | 106 |
| 7. | Referencias Bibliográficas..... | 107 |
| Anexos | | 118 |

Índice de Tablas

- Tabla 1:** Tipos de lagos de acuerdo a regiones ecológicas. 9
- Tabla 2:** Tipos de lagos de acuerdo a caracterización alternativa. 9
- Tabla 3:** Ubicación geográfica, parámetros morfométricos y abióticos de lagos norpatagónicos. 27
- Tabla 4:** Resumen de la metodología a seguir, según actividades por objetivo. 30
- Tabla 5:** Fórmulas para estimar el indicador trófico de cada variable y el índice final. 39
- Tabla 6:** Rango de valores del índice de Carlson según el estado trófico, color y descripción. 39
- Tabla 7:** Valores establecidos por la OCDE (1982) para determinación del estado trófico. 40
- Tabla 8:** Fórmulas para calcular el Índice de Burns. 41
- Tabla 9:** Estado de los lagos, niveles tróficos y valores de las cuatro variables clave que definen los diferentes tipos de lago. 41
- Tabla 10:** Parámetros morfométricos de los lagos Norpatagónicos. 52
- Tabla 11:** Parámetros morfométricos de los lagos Norpatagónicos (continuación). 53
- Tabla 12:** Tipo de Geología al que corresponden los códigos. 57
- Tabla 13:** Climas clasificados acorde a Köppen-Geiger presentes en el área de estudio. 60
- Tabla 14:** Código ecosistema, nombre, categoría y área en zona de estudio. 65
- Tabla 15:** Lista de taxas de peces reportados en las cuencas de algunos de los lagos norpatagónicos. 67
- Tabla 16:** Simbología de las variables usada en R. 73
- Tabla 17:** Matriz de Correlación de Pearson. 74
- Tabla 18:** Varianza total explicada. 74
- Tabla 19:** Peso de las variables. 76
- Tabla 20:** Puntuaciones de los individuos. 77
- Tabla 21:** Bondad de ajuste 80
- Tabla 22:** Puntuaciones de los lagos. 81
- Tabla 23:** Simbología de las variables usada en R. 82
- Tabla 24:** Varianza explicada. 83
- Tabla 25:** Pesos de las variables. 84
- Tabla 26:** Años de registros, N° de variables y total de datos por lago. 93
- Tabla 27:** Condición trófica según Índice de Carlson y ranking según el valor de TSI. 94
- Tabla 28:** Condición trófica según Índice de Carlson con NT y ranking según el valor de TSI. 95
- Tabla 29:** Condición trófica según Índice de la OCDE. 97
- Tabla 30:** Condición trófica según Índice de Burns y ranking según el valor de TLI. 98
- Tabla 31:** Valores sugeridos a normar por grupo tipológico. 100
- Tabla 32:** Niveles de Calidad por Áreas de Vigilancia en el Lago Llanquihue. 101
- Tabla 33:** Niveles de Calidad por Áreas de Vigilancia en el Lago Villarrica. 102

Índice de Figuras

- Figura 1:** Pilares fundamentales de gestión Integrada de Cuencas de Lagos. 5
- Figura 2:** Etapas y plazos de la elaboración de NSCA. 20
- Figura 3:** Mapa de los Lagos Norpatagónicos. 25
- Figura 4:** Distribución de los Lagos Araucanos en las regiones políticas. 43
- Figura 5:** Distribución de los Lagos Araucanos en las cuencas DGA. 45
- Figura 6:** Cuencas Lacustres Lagos Norpatagónicos. 50
- Figura 7:** Sistemas Lacustres en Lagos Norpatagónicos. 54
- Figura 8:** Geología de las Cuencas de los Lagos Norpatagónicos. 56
- Figura 9:** Clasificación de Köppen-Geiger en cuencas Lagos Norpatagónicos. 59
- Figura 10:** Distribución de Áreas Silvestres Protegidas, Sitios Prioritarios, Bienes Nacionales Protegidos y Reservas de la Biósfera 62
- Figura 11:** Ecosistemas terrestres o pisos vegetacionales presentes en la zona de estudio. 64
- Figura 12:** Subuso de Suelo en zona de Estudio 69
- Figura 13:** Gráfico de sedimentación. 75
- Figura 14:** Representación de los pesos de las variables. 76
- Figura 15:** Biplot del Análisis de Componentes Principales. 78
- Figura 16:** Agrupamiento de disimilitud de Bray-Curtis. 79
- Figura 17:** Agrupamiento Escalamiento Multidimensional. 82
- Figura 18:** Gráfico de sedimentación. 84
- Figura 19:** Representación de los pesos de las variables. 85
- Figura 20:** Biplot del Análisis de Componentes Principales según Temporalidad. 86
- Figura 21:** Biplot del Análisis de Componentes Principales según los lagos. 87
- Figura 22:** Primer dendrograma para los datos de calidad de agua. 88
- Figura 23:** Segundo dendrograma para los datos de calidad de agua. 89
- Figura 24:** Primer agrupamiento mediante el algoritmo K-medias. 90
- Figura 25:** Segundo agrupamiento mediante el algoritmo K-medias. 90

Agradecimientos

Agradezco a cada ser que de una u otra forma me brindo contención, ayuda y motivación en la elaboración de este trabajo de investigación.

Primeramente, doy las gracias a mi familia, el pilar fundamental con el que conté para poder comenzar y culminar toda mi formación académica, en especial la que estoy finalizando ahora, mi carrera de pregrado. Mi padre y mi madre, ambos por confiar y permitirme elegir sin ninguna objeción mis decisiones sobre lo que quería para mi futuro, aún si quiera con tener conocimiento de lo que se trataba, también agradecerles por los valores entregados, ya que eso me ha permitido desempeñarme como una mejor persona que pueda aportar a la sociedad. De igual forma agradecer a mi hermana Francisca, ya que como hermana mayor siempre me aconsejó y motivo en cada proceso universitario y de la vida.

En segundo lugar, agradecer a mis profesores, ya que no solo educaron parte de mi formación profesional, sino que me impulsaron y aconsejaron, con su sabiduría y crítica, para hacer de mi alguien con conocimiento que me permita un buen desempeño en todo ámbito profesional. De manera particular, expresar mi más sincera gratitud a Dr. Ricardo Figueroa por confiar en mi con el desarrollo de esta investigación y por motivarme a lo largo de la elaboración de ésta. Del mismo modo, agradecer también al Dr. Oscar Parra por poner a mi disposición fuentes de información valiosas e importantes para mi tema de trabajo, así como también las sugerencias que me formulaba.

Tercero, agradezco a mi novio y a mis amigos, tanto los que conocí durante el proceso universitario como los de la vida, por su comprensión, compañía, aliento y paciencia a lo largo de mi definición como persona y profesional. Agradecer también a los que me motivaron en la persecución de viajes al sur a descubrir los maravillosos bosques nativos, volcanes y sus cuerpos de agua, que entregan toda

su magia y sabiduría renovando cada perspectiva del como imaginaba que era, transformándome en una persona con energías renovadas y más simples.

En cuarto lugar, agradezco a Amerindia Jaramillo y, en especial, a Avril Bernaldes, ambas profesionales del Departamento de Ecosistemas Acuáticos del Ministerio del Medio Ambiente, las cuales durante mi práctica profesional, en el año 2020, me sugirieron y motivaron a realizar mi trabajo de investigación referente a los lagos norpatagónicos.

Finalmente, agradecer al CRHIAM por financiar esta investigación mediante la Beca de Pregrado Proyecto ANID/FONDAP/15130015.



Nomenclatura

| | |
|------------------|---|
| ACP | Análisis de Componentes Principales |
| ADC | Análisis de Conglomerados |
| AGIES | Análisis General de Impacto Económico y Social |
| ANZECC | Australian and New Zealand Environment and Conservation Council |
| ASPE | Áreas Silvestres Protegidas |
| AV | Área de Vigilancia |
| CDB | Convenio sobre la Diversidad Biológica |
| CMS | Consejo de Ministros para la Sustentabilidad |
| CONAF | Corporación Nacional Forestal |
| DBO ₅ | Demanda Biológica de Oxígeno |
| DEM | Modelo de Elevación Digital |
| DGA | Dirección General de Aguas |
| Directemar | Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante |
| DMA | Directiva Marco Europea del Agua |
| DQO | Demanda Química de Oxígeno |
| DS | Disco Secchi |
| EPA | Agencia de Protección Ambiental de USA |
| ICP | Iniciativas de Conservación Privada |
| ILBM | Integrated Lake Basin Management |
| LAWA | Land Air Water Aotearoa |
| MSD | Escalamiento Multidimensional |
| MMA | Ministerio de Medio Ambiente |
| M.S.N.M | Metros Sobre el Nivel del Mar |
| NPCA | Norma Primaria de Calidad Ambiental |
| NSCA | Norma Secundaria de Calidad Ambiental |
| NWQMS | National Water Quality Management Strategy |
| OCDE | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico |
| ODS | Objetivos del Desarrollo Sustentable |
| RR.HH | Recursos Hídricos |
| SE | Servicios Ecosistémicos |
| SERNAGEOMIN | Servicio Nacional de Geología y Minería |
| SHOA | Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile |
| SIG | Sistema de Información Geográfica |
| SMA | Superintendencia de Medio Ambiente |
| SNASPE | Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado |
| TSI | Índice del Estado Trófico |
| UE | Unión Europea |
| UICN | Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza |

Resumen

Los lagos son uno de los ecosistemas continentales más relevantes del planeta ya que son considerados una de las mayores reservas de agua dulce y, además, por brindar valiosos servicios ecosistémicos, aun cuando no siempre su estado es el adecuado en términos de la calidad de sus aguas. Es por esto que requieren una adecuada gestión; al respecto, el modelo ILBM es uno de los más usado y propone 6 pilares fundamentales entre ellos, las políticas y normativas asociadas. En Chile, las Normas Secundarias de Calidad Ambiental de Aguas Superficiales (NSCA) son una herramienta para proteger estos cuerpos lacustres, lamentablemente, solo dos lagos (Llanquihue y Villarrica) poseen una norma; mientras que los restante lagos patagónicos y norpatagónicos carecen de normativa y de información que permita generarlas.

Este estudio realiza una aproximación a la tipología de los 23 Lagos Norpatagónicos, buscando comprobar si es recomendable realizar una NSCA macrozonal; considerado la metodología B, propuesta por la Directiva Marco Europea del Agua (DMA). Para esto, utilizando 9 características geomorfológicas se realiza un análisis de ordenamiento (ACP, ADC y MSD). Posteriormente, se reúnen datos de calidad de agua disponibles, con estos primero se realiza una validación de la tipología mediante análisis de ordenamiento (ACP, ADC, K-Medias), seguido se identifica, a través de índices tróficos, aquellos que puedan ser definidos como lagos de referencia.

Se identificaron 3 grupos tipológicos para los cuales se proponen (de acuerdo con su bajo nivel trófico) como lagos de referencia Pirihueico (Grupo 1: 9 lagos), Tinquilco (Grupo 2: 4 lagos) y Rupanco (Grupo 3: 10 lagos). Además, para cada grupo se proponen 15 variables de calidad con sus respectivos valores a considerar para una NSCA que permita monitorear estos cuerpos de agua y generar directrices para la planificación del territorio para conservar o recuperar sus características oligotróficas.

1. Introducción

El agua es un recurso indispensable para el sostenimiento de la vida en el planeta; para el desarrollo de los procesos fisiológicos, el bienestar humano y la preservación del medioambiente y sus ecosistemas (MEA, 2005).

Del total de agua presente en la hidrósfera, el 97,5% se encuentra en los océanos. El porcentaje restante (2,5%), corresponde a agua dulce y es considerado el sistema natural que brinda más apoyo al bienestar humano y a la supervivencia de los ecosistemas terrestres. No obstante, de esta porción de agua dulce, el 75% permanece congelada, formando glaciares y casquetes polares; y del 25% restante, sólo el 0,6% se encuentra disponible para uso humano, agrícola, industrial y otros, ya que es la que está presente en ríos y lagos (DGA, 2016). Según Carpenter *et al.*, (2011), el agua dulce superficial provee aproximadamente tres cuartas partes del agua extraída para uso humano.

Por otro lado, la gestión de esta agua dulce superficial se da gracias a las cuencas hidrográficas, que son la unidad morfológica integral en donde el agua converge hacia un cauce o unidad natural delimitada por la divisoria de las aguas, las cuales discurren hacia un único lugar o punto de descarga, comúnmente hacia un cuerpo de agua importante como río, lago u océano (Gaspari *et al.*, 2013). Si bien las cuencas son un espacio territorial, estas son independientes de las fronteras político-administrativas internas de una nación o de los límites internacionales, ya que se dan de forma natural de acuerdo con la geomorfología (Aguirre, 2011). A pesar de ello, los componentes principales que determinan el funcionamiento de una cuenca son los elementos biofísicos y los antrópicos (socioeconómicos-culturales, demográficos y jurídico-institucionales); definiendo así un sistema integral (Gaspari *et al.*, 2013).

Dentro de los elementos biofísicos, los ecosistemas acuáticos continentales tienen un papel fundamental; ya que sustentan comunidades ecológicas únicas y complejas, que por lo general definen la estructura y el funcionamiento de los

ecosistemas terrestres circundantes presentes en las cuencas (Sánchez, 2008). En otras palabras, la dinámica de estos ecosistemas se encuentra controlada por el régimen hidrológico dominante de la cuenta y gracias a ello, son considerados como sistemas indicadores del estado ambiental de las cuencas hidrográficas, ya que reflejan los cambios naturales (terremotos, tsunamis, etcétera) y/o los derivados de actividades humanas (cambios de uso de suelo, extracciones de agua, descarga de residuos, entre otras) (MMA, 2018).

Uno de los componentes más importantes dentro de estos ecosistemas acuáticos son los cuerpos de agua lénticos; ya que presentan funciones ecológicas y económicas críticas; de hecho, lagos y embalses, corresponden a uno de los sistemas continentales más importantes debido a que brindan valiosos servicios ecológicos, como la eliminación de nitrógeno y enterramiento de sedimentos (Kong *et al.*, 2019).

En general, los lagos se caracterizan por suministrar un amplio y variado catálogo de servicios ecosistémicos (SE) para los seres vivos, como lo es el abastecimiento de agua, la regulación climática, la purificación y detoxificación del agua, protección frente a inundaciones, producción de biomasa, alimentos y fibras, comunicación y transporte, hábitats de vida silvestre, regulación de ciclo biogeoquímicos, disfrute paisajístico, etcétera. (Feng *et al.*, 2019). Sin embargo, la variedad y la importancia de este flujo de servicios no es percibida ni reconocida en su justa medida por la sociedad, considerando que los factores responsables de la rápida degradación de los entornos de los ecosistemas lacustres, sobre todo en las últimas décadas, son efectos de un sinnúmero de alteraciones antropogénicas, como los cambios de uso de suelo, la construcción de represas, la eutrofización, la extracción de arena, entre otros; y al cambio climático (Liu *et al.*, 2020; Feng *et al.*, 2019; Dai *et al.*, 2019).

1.1 Manejo Integrado de Cuencas

Con el fin de hacer frente a estas alteraciones antropogénicas se han desarrollado diversos modelos de gestión que consideran como lineamientos a seguir las dinámicas propias de los ecosistemas acuáticos, la conservación de los recursos hídricos y el desarrollo económico sustentable, enfocándose en la singularidad de estos ecosistemas, la variedad de sus usos y la importancia para las actividades antrópicas (ILEC, 2007).

Es en este sentido que la gestión de cuencas lacustres es una tarea compleja, pues requiere la integración de enfoques de gestión en todos los sectores relacionados con sus variados usos y usuarios. Actualmente, es la Gestión Integrada de Cuencas Lacustres, ILBM por sus siglas en inglés (Integrated Lake Basin Management), la que es adoptada como una guía para la gestión sostenible de las cuencas lacustres por los administradores lacustres, específicamente por sus enfoques de gestión basados en la comprensión adecuada de las características biofísicas de los ecosistemas lacustres y las interacciones entre estos y la humanidad (Chidammodzi & Muhandiki, 2016).

La ILBM destaca que los lagos poseen tres características únicamente combinadas en estos sistemas, que son la naturaleza integradora que poseen al recibir todo tipo de aportes de la cuenca en la que se ubica y las circundantes; el largo tiempo de retención con un promedio mundial de 17 años que provoca que el sistema lacustre sea relativamente estable (ILEC,2005), por ejemplo al tardar mucho en detectar o resolver problemas; y , por último, tener dinámicas de respuesta muy complejas ya que frente a los distintos cambios no se comportan de manera lineal (Ballatore & Muhandiki, 2002). Por otro lado, debido al equilibrio entre la integración de la conservación y el uso sostenible para mantener los SE, se destaca la similitud con el enfoque ecosistémico; definido como “una estrategia para la gestión integrada de la tierra, el agua y los recursos vivos que promueve la conservación y el uso sostenible de manera equitativa”, según el Convenio sobre la Diversidad

Biológica (CDB), por lo que se considera que la ILBM posee un enfoque ecosistémico centrado en las cuencas lacustres específicamente (Chidammodzi & Muhandiki, 2016).

En general, los ecosistemas acuáticos que presentan problemas, que en su mayoría, se manejan a través de metodologías tradicionales de control de eutrofización, enfocándose en parte del problema pero sin asegurar un estado trófico perdurable en el tiempo, ya que se aplican directamente sobre el cuerpo de agua, sin considerar la entrada de nutrientes desde la ribera producto de las actividades antrópicas de la cuenca. Por otro lado, tampoco se consideran a los responsables de la administración del recurso hídrico y a las partes interesadas del manejo de los lagos (mundo científico, usuarios, vecinos, entre otros stakeholders).

Adicionalmente, la fragmentación de las políticas actuales sobre los recursos hídricos ha demostrado no ser eficiente en resolver la incrementación de problemas que se presentan con la degradación de los lagos. Es por esta razón, que la aplicación del Manejo de Gestión Integrado de Cuencas de Lacustres ofrece una oportunidad en cuanto a la sostenibilidad de los lagos y sus recursos, así como también, la mantención de la calidad de los SE que provee y sustentan las actividades productivas y turísticas que desarrollan los habitantes de alrededor de los sistemas lacustres (Sharip & Jusoh, 2010).

La ILBM dispone que para conseguir la mejora integral de la gobernanza de la cuenca se debe aplicar bajo seis pilares fundamentales (Figura 1): (1) instituciones encargadas de la administración del lago, cuenca y recursos del sistema acuático; (2) políticas para regular el uso antrópico de la cuenca y establecer sus impactos; (3) colaboración de la comunidad en el manejo de la cuenca del lago y la toma de decisiones; (4) tecnología para la mejora de la gestión del recurso hídrico y para el control de eutrofización del lago teniendo en cuenta sus posibilidades y limitaciones; (5) información y difusión del conocimiento científico permitiendo a los interesados comprender las problemáticas y cumplir con la protección del lago; (6)

financiamiento de las actividades para generar el manejo sostenible y conservación del ecosistema a largo plazo, así como también llevar a cabo las actividades mencionadas anteriormente (ILEC, 2007; RCSE & ILEC, 2014).

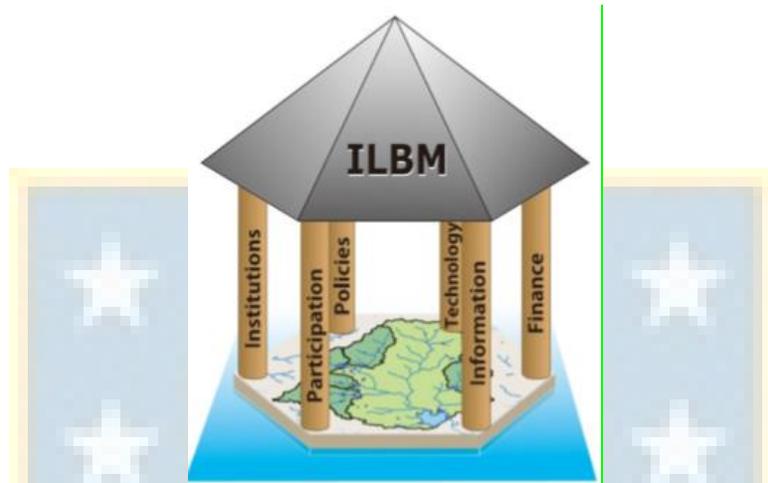


Figura 1: Pilares fundamentales de gestión Integrada de Cuencas de Lagos.
Fuente: ILEC, 2007.

Por otro lado, la ILBM se enfoca bajo tres características intrínsecas de los ecosistemas acuáticos lenticos, que deben considerarse en los planes de gestión (ILEC, 2007). Estas características son las siguientes:

- i. **Integración de la naturaleza:** Los sistemas lacustres reciben contaminantes desde sus cuencas de drenaje, así como también de otras aguas arriba, todas las entradas de estos son difundidas a través de la columna de agua, por lo tanto, la naturaleza integradora de un lago significa que tanto los recursos y como los agentes externos intervienen en el lago, requiriendo medidas de gestión independientes de sus fronteras administrativas.
- ii. **Largo tiempo de retención:** Los lagos tienen la capacidad de retener sustancias por un largo periodo de tiempo, ejerciendo como sumideros de muchos contaminantes, por lo que pueden mantenerse en gran cantidad sin mostrar cambios inmediatos. Esto implica que un lago perturbado, podría tardar mucho en ser restaurado, inclusive superar la escala de tiempo humano. Por lo tanto, las

instituciones involucradas en el manejo de la cuenca lacustre deben tener un compromiso con acciones sostenidas y financiamiento a largo plazo, además, de considerar el enfoque precautorio en sus políticas.

- iii. **Dinámica de respuesta compleja:** Los sistemas lacustres tienen una respuesta no lineal a cambios y/o perturbaciones, la manifestación del lago ante la presión que lo afecta puede no ser evidente hasta que la concentración de nutrientes sea alta y/o cambie su estado trófico. Se requiere la aplicación del principio de precaución e investigaciones científicas que desarrollen soluciones a estos problemas.

Este trabajo de investigación se desarrolla bajo el pilar político que compromete el manejo integrado de cuenca lacustres, debido, principalmente, al carácter normativo que se estudia para regular los cuerpos de agua que componen el área de estudio.

1.2 Tipología de Lagos

Se conoce como tipología a la clasificación u orden de distintas unidades que ayuda a entender e interpretar las diferencias y similitudes de estas. Para entender, cada tipología debe transmitir las características generales de una unidad a las otras, de esta forma se puede aplicar el conocimiento de una unidad a otras unidades del mismo tipo (Miranda *et al.*, 2021).

Es en este contexto, que un tipo de cuerpo de agua puede definirse como un grupo de lagos, que tienen condiciones ecológicas naturales comunes en términos de características geomorfológicas, hidrológicas, físico-químicas y biológicas. En la aplicación del concepto, una tipología puede ser una herramienta en post de la conservación, dividiendo, en este caso, los lagos en clases que se espera que respondan de manera similar a las acciones realizadas y, de esta forma, agilizar, por ejemplo, los programas de monitoreo que faciliten el desarrollo de las estrategias de conservación. Además, una tipología puede utilizarse incluso para

unidades para las que no hay disponibilidad de datos o los hay limitadamente; comúnmente, para cerrar la brecha de datos insuficientes en los ecosistemas lacustres, se “toman datos prestados” de lagos con características similares y de esta manera fortalecer la base de datos, ampliando el tamaño de la muestra en los análisis estadísticos (Mellios *et al.*, 2020; Miranda *et al.*, 2021).

Por lo tanto, un tipo se puede considerar como una entidad homogénea con una variabilidad ambiental natural limitada, permitiendo definir la línea de base, a partir de la cual se puede detectar el impacto antrópico (Thorp *et al.*, 2006). Las condiciones naturales de los lagos se denominan condiciones de referencia, definiéndose como las que presentan alteraciones antropogénicas pequeñas o nulas debido a condiciones casi o totalmente inalteradas. (Solheim *et al.*, 2019). Las condiciones naturales están dadas por las variables ambientales, también conocidas como descriptores de tipo, estas deben ser características permanentes que no respondan a las actividades humanas a las que se exponen los lagos; dicho de otra forma, deben representar las condiciones abióticas fijas, como lo son: la altitud, el tamaño, la profundidad y la geología de la cuenca, que son los descriptores más importantes, ya que explican la variabilidad natural de los componentes biológicos y los componentes abióticos de apoyo, que son, por ejemplo: los nutrientes, transparencia, oxígeno, flujo, estructura de zona ribereña, entre otros (Solheim *et al.*, 2019).

Según Miranda *et al.*, (2021); las características de los lagos como el área, el alargamiento, la profundidad, la conectividad a los ríos y el índice de inundación son determinantes de primer orden; estos determinantes físicos influyen en los determinantes químicos que son de segundo orden, como los nutrientes, transparencia y calidad de agua en general.

La Directiva Marco Europea del Agua, DMA en adelante, plantea que la ecología de las masas de agua varía con el clima y el paisaje, que es lo que a la vez determina las propiedades morfológicas, hidrológicas y químicas. Por lo que, primeramente,

llama a todos los Estados miembros de la Unión Europea a tipificar los cuerpos de agua, incluidos lagos, ríos, aguas costeras y de transición, seguido por identificar el estado ecológico actual de cada uno de estos (Kagalou & Leonardos, 2008). El desarrollo de estas tipologías se basa en un conjunto de descriptores o variables ambientales de tipo con rangos definidos para cada descriptor.

El Anexo II de la DMA, especifica que cada estado debe determinar la situación y los límites de las masas de agua superficial y llevarán a cabo una caracterización que corresponde a:

- i) Las masas de agua se clasificarán en tipo de agua superficial, tal como: ríos, lagos, aguas de transición, aguas costeras o como masas de agua superficial artificiales o como masas de agua superficial muy modificadas.
- ii) Para cada categoría de aguas superficial se clasificarán por tipos según el sistema A o B descritos en la sección 1.2 del instrumento de la DMA. Para el sistema A (Tabla 1), se clasificarán las masas de agua de acuerdo a las regiones ecológicas en correspondencia con las zonas geográficas en que se encuentran, que figuran en el anexo XI del instrumento. Seguidamente, se clasificarán según los descriptores establecidos en el cuadro del sistema A. Si se utiliza el sistema B (Tabla 2), se deben clasificar las aguas en tipos utilizando valores correspondientes a los descriptores obligatorios, y a los descriptores optativos, que se requieran para garantizar las condiciones de referencia específicas del tipo. (DMA, 2000).

Tabla 1: Tipos de lagos de acuerdo a regiones ecológicas.

| Sistema A | | |
|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Tipología Fijada | Descriptor | |
| Región ecológica | Regiones Mapa A del anexo XI DMA | |
| Tipo | En función de Altitud | Alto > 800 m |
| | | Altura media 200 a 800 m |
| | | Tierras bajas < 200 m |
| | Según la Profundidad Media | < 3 m |
| | | 3 m a 15 m |
| | | > 15 m |
| | Según Superficie Lago | 0,5 a 1 km ² |
| | | 1 a 10 km ² |
| | | 10 a 100 km ² |
| | | > 100 km ² |
| | Geología | Calcáreo |
| | | Silíceo |
| Orgánico | | |

Fuente: Extraído de DMA, 2000.

Tabla 2: Tipos de lagos de acuerdo a caracterización alternativa.

| Sistema B | |
|------------------------------------|---|
| Caracterización alternativa | Factores físicos y químicos que determinan las características del lago y, por ende, la estructura y composición de la comunidad biológica. |
| Factores obligatorios | Altitud |
| | Latitud |
| | Longitud |
| | Profundidad |
| | Geología |
| Factores optativos | Profundidad media del agua |
| | Forma del lago |
| | Tiempo de permanencia |
| | Temperatura media del aire |
| | Oscilación de la temperatura del aire |
| | Régimen de mezcla y estratificación del agua |
| | Capacidad de neutralización de ácidos |
| | Estado natural de los nutrientes |
| | Composición media del sustrato |
| Fluctuación del nivel del agua | |

Fuente: Extraído de DMA, 2000.

Finalmente, según Solheim *et al.*, 2019; en caso de requerir el impacto humano en el estado ecológico de ríos y lagos se deben considerar como desviaciones de las condiciones de referencia determinadas del tipo para cada cuerpo de agua particular

(definido como un lago o un tramo de río con condiciones homogéneas en términos de tipo y estado). Para cuantificar el nivel de desviaciones se deben establecer los valores límites de los distintos elementos biológicos y de calidad, que representan un estado ecológico alto, bueno, moderado, pobre o malo.

1.3 Contaminación y eutrofización en sistemas acuáticos

Por otro lado, desde tiempos inmemoriales, se sabe que ríos, lagos y mares recogen los residuos y desechos producidos por las distintas actividades humanas, transformándose en el vertedero habitual en donde llegan a parar pesticidas, químicos, metales pesados, plásticos, residuos radiactivos, etc; en grandes o pequeñas cantidades, pero que al analizar las aguas de hasta los lugares más remotos del mundo ya se encuentran presentes. Según Echarri (2007); muchas de las aguas están contaminadas a tal punto que ya son consideradas peligrosas para la salud humana y dañinas para la vida en general.

Es en este contexto, que uno de los mayores problemas a los que se enfrentan los ecosistemas lacustres corresponde al proceso de eutrofización, el cual es definido como el enriquecimiento descontrolado de nutrientes de forma natural o artificial (Carpenter & Lathrop, 1999). Primeramente, este fenómeno era considerado como un proceso natural, en donde se genera un aumento de productividad debido a las entradas de sedimentos provenientes su cuenca de drenaje, de esta forma se satura progresivamente al lago, transformándolo, finalmente, en un ecosistema terrestre, todo esto atribuido al envejecimiento natural del sistema lacustre (Ryding & Rast, 1992). No obstante, en la actualidad se emplea el concepto de “Eutrofización antrópica” o “Eutrofización cultural” que determina el aumento de nutrientes producido principalmente por las actividades humanas, que conducen a la eutrofización de los sistemas lacustres en tiempos mucho menores en comparación al proceso que se da de manera natural (Parra, 1989).

Actualmente, el proceso de urbanización que provoca un cambio en el uso de suelo, y junto con ello, la descarga de aguas servidas sobre el lago, son uno de los principales responsables del aumento en la carga de nutrientes, generando alteraciones en la hidrología de la cuenca y en el estado trófico del cuerpo receptor (Mazzeo *et al.*, 2002). Por otro lado, la producción agrícola y forestal también son responsables de cambios como la deforestación de las coberturas naturales, aumento del escurrimiento y erosión y el uso de fertilizantes, que representan un fuente importante de contaminación debido a su alto contenido de fósforo y/o nitrógeno, que por lixiviación o arrastre llega a las aguas (Hughes *et al.*, 2014).

El aumento de nutrientes en el sistema lacustre receptor genera distintos efectos biológicos, como la incrementación de biomasa fitoplanctónica que puede traer consigo la aparición de especies tóxicas, reducción de especies y disminución en la concentración de oxígeno en la columna de agua, entre otros (Carpenter *et al.*, 1995). A su vez, la alteración en el componente biológico incide en la calidad de los SE, tales como el cambio en el sabor, olor y color del agua y la disminución de valor estético percibido (Smith & Schindler, 2009).

Los sistemas lacustres se pueden clasificar según la concentración de nutrientes presentes en el cuerpo de agua y/o en base a las respuestas ecológicas frente a la carga que presentan (Moreno *et al.*, 2010). Específicamente, en la evaluación del estado trófico, se implementan técnicas que van desde la observación del color del lago hasta métodos isotópicos radiactivo; no obstante, el método que más se utiliza para evaluar el estado de los lagos es mediante índices que integran más de un criterio en la clasificación. Esta categorización consiste en la medición de la condición trófica de los lagos en base a la concentración de clorofila "a" (Chl "a"), transparencia (Disco Secchi; DS), nitrógeno (N) y fósforo (P). La Chl "a" y el DS son indicadores directos del estado trófico, mientras que el N y P son utilizados para confirmar y explicar el estado del lago, debido a que son los nutrientes inorgánicos que limitan o determinan el crecimiento de algas. Según Smith *et al.*, (1999), la

clasificación del estado trófico de cada lago corresponde a un sistema oligotrófico, mesotrófico, eutrófico o hipereutrófico, definidos como:

- Lagos oligotróficos, se caracterizan por la baja presencia de nutrientes, bajos o moderados niveles de productividad biológica, transparencia del agua relativamente clara y un alto valor de los SE.
- Lagos mesotróficos, tienen un moderado nivel de productividad, claridad de agua y plantas acuáticas.
- Lagos eutróficos, presentan una alta concentración de nutrientes, alta productividad biológica, aguas turbias, pueden presentar anoxia y toxicidad y un reducido valor de los SE.
- Lagos hipereutrófico, presentan altos niveles de productividad biológica, baja transparencia de agua, con abundancia de plantas acuáticas y potencial para soportar la gran cantidad de peces tolerantes a condiciones de perturbación.

Para determinar el nivel de trofia de un cuerpo de agua y realizar comparaciones con otros sistemas, se utilizan índices del estado trófico calculados en base a diferentes criterios, entre ellos destacan a nivel internacional los propuestos por Carlson (1977), la OECD (1982), Smith *et al.*, (1999), y a nivel nacional el criterio establecido por la CONAMA (2004).

Debido al aumento de nutrientes, y, junto con ello, al paso de un estado trófico a otro, , en los últimos años, se ha presentado una creciente conciencia en cuanto a la restauración y rehabilitación de los hábitats de agua dulce, considerando que estos son esenciales para el mantenimiento de los SE que prestan a la sociedad (Pander & Geist, 2013). Específicamente, durante las últimas décadas, se han desarrollado y utilizado distintas técnicas de restauración, con el fin de superar las resistencias químicas y biológicas de estos cuerpos de agua y de ser necesario combatir la eutrofización. Sin embargo, el éxito de estas iniciativas va a depender de muchos factores (Sondergaard *et al.*, 2007). Particularmente, Europa y América del Norte, han establecido de manera eficaz la necesidad de restauración de los ecosistemas acuáticos (Pander & Geist, 2013) a través de limitantes en

concentraciones de compuestos químicos en productos o por contribuciones monetarias ; como por ejemplo, a través de la prohibición de fósforo en detergentes y la inversión masiva en la restauración de lagos llegando a crear una cultura de reoligotrofia (Sabel *et al.*, 2020).

1.4 Legislación Ambiental en el Mundo

La escasez del agua y su importancia determinante en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y dulceacuícolas, originan que este fluido sea uno de los principales objetivos de protección ambiental dentro de la sociedad (Zaror, 2000).

Hay naciones que ya cuentan con bastante experiencia en cuanto a legislación en esta materia, como lo es el ejemplo de Estados Unidos, el cual en 1948 promulgó el Acta de Control del Agua Contaminada para “mejorar la calidad y el valor de los recursos hídricos para establecer una política nacional de prevención, control y disminución de la contaminación del agua”. El acta fue enmendada en 1956 para fortalecer la aplicación de disposiciones y luego en 1965 para establecer estándares de calidad para aguas superficiales, exigibles por autoridades estatales y federales. Actualmente, los estados y agencias federales utilizan un enfoque doble para tratar la calidad del agua: las fuentes puntuales son controladas mediante programas de permisos, límites de efluentes, monitoreo y cumplimiento; y la integridad de los cuerpos de agua está apoyada por estándares de calidad del agua que abordan todas las fuentes de deterioro, incluyendo la contaminación de fuentes puntuales y no puntuales (es decir, las escorrentías contaminadas), la degradación del hábitat causada por los cambios en los patrones de escorrentías y otros factores estresantes (US EPA, 2016).

Por otra parte, La Unión Europea (UE) y sus países miembros han introducido leyes desde los años setenta del pasado siglo, donde la primera norma de calidad ambiental fue establecida el 16 de junio de 1975 y tuvo relación con la calidad

requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable en los Estados miembros (EUR –lex, 2016).

Dentro de los ejemplos latinoamericanos, la ley Aguas del Brasil fue promulgada por el Gobierno Federal en 1997 (Ley N°9433 /1997) y a partir de entonces, cada uno de los 27 estados del Brasil ha promulgado su propia ley de aguas. Esta ley ha promovido el progreso en el manejo integral de los recursos hídricos (ANA, 2002).

1.4.1 Iniciativas de protección en sistemas lacustres

La contaminación del agua, junto a la pérdida y degradación de hábitats en los lagos, a causa de los impactos por perturbaciones humanas y por el calentamiento global, ha originado que un gran número de naciones desarrolle distintas iniciativas para implementar estrategias de gestión destinadas a mitigar la disminución de la calidad del agua y la pérdida de hábitat con el fin de que estos cuerpos de agua sigan caracterizándose por prestar SE a la sociedad. En general, el objetivo principal que presentan estas iniciativas es mejorar la calidad y el estado ecológico de las aguas continentales mediante la identificación de factores estresantes e implementando estrategias de gestión sostenible respaldadas por frecuentes monitoreos (Dörnhöfer & Oppelt, 2016). Algunos ejemplos son la Directiva Marco Europea del Agua (2000), el Acuerdo de la Calidad del Agua de los Grandes Lagos de EE. UU y Canadá (1972), la Red Canadiense de Pulso de Lagos (2016) y la Estrategia Nacional de Gestión del Agua de Australia y Nueva Zelanda (1992).

La DMA, nace tras la creciente preocupación por la calidad de los recursos hídricos en cuanto a problemas de eutrofización, la reacción de la pérdida de biodiversidad y la disminución del bienestar humano en general (Pander & Geist, 2013; da Silva *et al.*, 2019). Esta tiene como propósito cumplir con la implementación de un enfoque integral para proteger la sostenibilidad de los recursos hídricos en toda Europa, teniendo como objetivo principal establecer un marco para la protección de aguas superficiales continentales, aguas de transición, aguas costeras y aguas

subterráneas (da Silva *et al.*, 2019); de modo que alcancen un buen estado ecológico durante el segundo y tercer ciclo de gestión, siendo 2015-2021 y 2021-2027, respectivamente. Para el caso específico de aguas superficiales, cada estado miembro europeo debe, primeramente, tipificar sus masas de agua, incluyendo los lagos, ríos y aguas costeras y de transición; seguido, por identificar el estado ecológico actual siguiendo procedimiento estandarizados. Luego, deben desarrollar planes de gestión de cuencas (Kagalou & Leonardos, 2009; Pander & Geist, 2013; Jeppesen *et al.*, 2011).

Por otro lado, el Acuerdo de la Calidad del Agua de los Grandes Lagos, representa el compromiso binacional, entre EE.UU y Canadá, para proteger el sistema de Los Grandes Lagos Laurentianos (Hartig *et al.*, 2020). Este es uno de los sistemas de agua dulce más grandes del mundo, llegando a representar el 21% del agua dulce superficial a nivel mundial; de hecho, sólo en los Estados Unidos, estos lagos proporcionan el agua potable a 48 millones de personas y respaldan una economía recreativa que se valora en \$52 mil millones de dólares. Sin embargo, a pesar de la importancia ecosistémica crítica y económica; los años de estrés inducidos principalmente por la actividad industrial del hombre dejaron un legado de sedimentos y contaminación del suelo, calidad de agua degradada, contaminantes tóxicos, pérdida de hábitat y la introducción de especies invasoras (Tyner & Boyer, 2020). Este acuerdo nace, específicamente en 1972, tras la gran contaminación de estos lagos que se da por la quema de los ríos Buffalo, Cuyahoga y Rouge; esto produce que en la década de 1960 haya un despertar ambiental estableciendo la Ley de Agua de Canadá de 1970, la Ley de Política Ambiental Nacional de EE.UU. de 1970, la Ley de Agua Limpia EE.UU de 1972 y el acuerdo que se presenta. En este contexto, el fin de este acuerdo es identificar las prioridades binacionales e implementar acciones que permitan mejorar la calidad del agua y la salud de estos ecosistemas que cuentan con un tremendo valor ecológico y económico (Hartig *et al.*, 2020), gestionando los problemas que se encuentren con el fin de restaurar y mantener la integridad química, física y biológica de la gran cuenca de los 5 lagos.

Además, en Canadá, según explica Huot *et al.*, 2019, aproximadamente, el 90% de los suministros de agua potable se toman de las aguas superficiales, de hecho, grandes ciudades como Toronto, Vancouver, Winnipeg y Quebec, dependen de al menos parte del agua proveniente de un lago. Sin embargo, Canadá no cuenta con estándares de agua potable aplicables a nivel nacional como es el caso de EE.UU y la Unión Europea, a través de la implementación de la Ley de Agua Limpia y la DMA, respectivamente; sino que presenta una política de agua dulce altamente fragmentada con aspectos cubiertos por gobiernos federales, provinciales, territoriales, indígenas y municipales. Es por esta razón que se evidencia la necesidad de una iniciativa a nivel nacional que vaya dirigida a los problemas ambientales comunes que afectan un cuerpo de agua lacustre, a fin de proporcionar la información necesaria que permita apoyar políticas informadas por evidencia y comprender, gestionar y proteger eficazmente los recursos de agua dulce; desarrollando finalmente LakePulse (Pulso de los Lagos) en su nombre abreviado. El objetivo general de Lake Pulse es comprender el estado de salud de los lagos y los servicios de los ecosistemas que se ven afectados por las influencias antropogénicas. Este programa reúne distintos conocimientos entre las instituciones académicas y agencias gubernamentales, colaborando en una evaluación nacional de lagos canadienses e investigando los efectos en los lagos tras las presiones humanas. Contiene tres objetivos fundamentales, que se resumen en: i) Evaluar el estado de salud de los lagos, identificando factores de estrés, el funcionamiento biogeoquímico y los SE que prestan; ii) Pronosticar los posibles cambios a futuro en el estado de salud utilizando escenarios climáticos y de uso de tierra; y iii) Desarrollar enfoques observacionales y computacionales para proporcionar herramientas que permitan formular políticas efectivas. En general, con el fin de alcanzar estos objetivos, Lake Pulse utiliza monitoreo limnológico, paleolimnología, modelado espacial, análisis estadístico y teledetección, abordando grandes escalas espaciales pudiendo examinar los lagos por región (Huot *et al.*, 2019).

Por último, la Estrategia Nacional de Gestión de la Calidad del Agua de Australia y Nueva Zelandia (NWQMS, en adelante) tiene por objetivo lograr el uso sostenible

de los recursos hídricos de estas naciones mediante la protección de las aguas para mejorar su calidad, manteniendo al mismo tiempo la economía y el desarrollo de la sociedad. Esta estrategia es desarrollada de forma conjunta por el Consejo de Medio Ambiente y Conservación de Australia y Nueva Zelandia (ANZECC) y Consejo de Administración de Agricultura y Recursos de Australia y Nueva Zelandia (ARMCANZ) proporcionando a los gobiernos y comunidades un conjunto de herramientas para evaluar y gestionar la calidad del agua adecuándola a los valores y usos deseados, considerando las condiciones locales específicas. La NWQMS tiene documentos claves que son la Directrices de Australia y Nueva Zelandia para la calidad del agua dulce y marina y las Directrices de Australia para el monitoreo y la presentación de informes sobre la calidad del agua (Warne *et al.*, 2014). Actualmente, estas guías conforman una pauta de control de calidad del agua detallada y con un amplio respaldo de investigación científica, no obstante, no constituyen una obligación legal dentro de los Estados o jurisdicciones territoriales para el manejo de la calidad del agua, pero, a pesar de ello, como incluyen valores predeterminados que, si se superan, indican que puede ser necesario un análisis adicional para garantizar la protección de los ecosistemas acuáticos.

Para el caso exclusivo de Nueva Zelandia, que se caracteriza por poseer muchos lagos que se han visto afectados por la disminución de la calidad de sus aguas, por la contaminación de nutrientes y sedimentos, debido a la agricultura principalmente (Abell *et al.*, 2020); estas pautas complementan la Declaración de Política Nacional existente para la gestión de agua dulce (publicada en 2011), en ésta los consejos regionales deben implementarla en sus políticas y planes a más tardar hasta el 2025. Además, los Consejos Regionales son los encargados de monitorear la calidad del agua de sus lagos para gestionar los impactos ambientales que se dan en cada región, esta información está disponible en la base de datos Land Air Water Aotearoa (LAWA), que es una plataforma de datos ambientales. Esta plataforma se estableció como una asociación entre los dieciséis consejos regionales de Nueva Zelanda, el Instituto Cawthron y el Ministerio del Medio Ambiente con el objeto de prestar ayuda a las comunidades locales a encontrar el equilibrio entre el uso de los

recursos naturales, el mantenimiento de la calidad y la disponibilidad del agua. Según Abell *et al.* (2020), la cuantificación y el manejo de las influencias humanas en el estado trófico de los lagos requiere el conocimiento de la variación natural del lago, y así cuantificar la eutrofización antropogénica, proporcionando un contexto para establecer objetivos y metas de gestión adecuadas. Las condiciones de referencia y las influencias se deberían desarrollar de forma individual para los lagos, sin embargo, para los lagos similares en tipología y condiciones de referencia es aconsejable agruparlos desarrollando rangos de valores para la categoría de lagos.

1.5 Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA)

En Chile, al igual que en otras naciones, existe la preocupación por los recursos naturales esenciales para vida, como lo es el agua. En este contexto, la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente es la que establece en su título II, los instrumentos de gestión ambiental que aplican en el país, entre los cuales destacan las Normas Primarias y Secundarias de Calidad Ambiental, las Normas de Emisión y los Planes de Prevención y Descontaminación, todos estos, destinados al logro de protección y mejoramiento ambiental. En resumen, las Normas Primarias de Calidad Ambiental (NPCA) tienen por objetivo la protección y salud de la vida humana, mientras que las Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) tiene por objetivo la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza; estableciendo, en ambas, los niveles de contaminación tolerables en un entorno o medio determinado de acuerdo con su objetivo. En cambio, las Normas de Emisión establecen la cantidad máxima permitida para un contaminante medida en el efluente de la fuente emisora. Por último, los Planes de Prevención y Descontaminación contemplan una serie de medidas de control, cuya finalidad es recuperar los niveles establecidos en las Norma de Calidad ambiental que correspondan y, de esta forma, resguardar la salud de la población o la conservación y preservación del medio ambiente (Ley N° 19.300, 1994).

Actualmente, es el DS N° 38/2012, que reemplaza al DS N° 93/1995, el que regula el procedimiento para la dictación de Normas Primarias y Secundarias de Calidad Ambiental, al igual que el modo y los criterios de revisión de éstas. En general, las NSCA se diferencian de las NPCA, en que estas pueden tener un alcance territorial delimitado y definido en función del componente ambiental que se desea proteger. Así, una NSCA puede abarcar divisiones administrativas (ciudades, áreas metropolitanas, provincias, regiones, u otros), como también divisiones territoriales o geográficas (cuencas aéreas o hidrográficas, lagos, lagunas y ríos).

Específicamente, las NSCA sobre el recurso hídrico son aquellas que establecen los valores de las concentraciones y periodos, máximos o mínimos, permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueden constituir un riesgo para la protección o conservación de los recursos hídricos del país, llámense éstos cuencas hidrográficas, cuerpos lacustres, cuerpos fluviales, aguas subterráneas e incluso el mar territorial chileno. Según se establece en la Guía para la elaboración de NSCA en aguas continentales y marinas (2017), el objetivo de estas normas es conservar o preservar los ecosistemas acuáticos a través del mantenimiento o mejoramiento de la calidad de las aguas continentales y marinas.

En la Figura 2, se observa el proceso de elaboración de las normas, el cual comienza con la publicación en el Programa de Regulación Ambiental (que se dicta al menos cada dos años) de la priorización de la NSCA fundado en antecedentes y evidencias de los impactos ambientales nacionales y/o regionales que requieren de la norma.

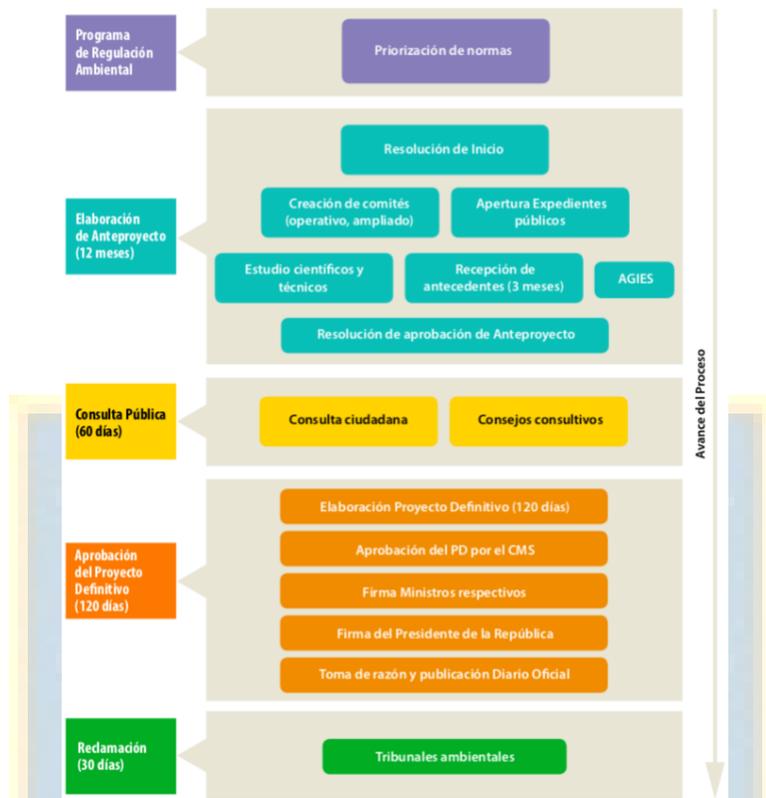


Figura 2: Etapas y plazos de la elaboración de NSCA.

Fuente: Extraído de Guía para la Elaboración de NSCA en aguas continentales y marinas, 2017.

Luego, se encuentra la Elaboración del Anteproyecto de la NSCA, que comienza a partir de la publicación de la resolución y se extiende por un periodo de 12 meses. En esta resolución se ordena la formación del expediente público (el que contiene las resoluciones que se dicten, las consultas evaluadas, las observaciones que se formulen, así como todos los antecedentes, datos y documentos relativos a la dictación de la norma). Dentro del expediente uno de los pasos más relevantes es la realización de un “Análisis integral”, ya que en este se debe considerar la información necesaria que permita evaluar el estado integral de la cuenca propuesta. Para el análisis integral, resulta especialmente relevante levantar información en relación con los siguientes aspectos:

- Datos físico-químicos de la cuenca
- Información biológica y ecotoxicológica
- Revisión de estaciones de monitoreo actuales
- Datos de sedimentos

- Información geoquímica
- Información hidrométrica
- Información hidromorfológica
- Fuentes puntuales
- Fuentes difusas principales
- Otros instrumentos de regulación
- Observaciones de impactos sobre la biota y sobre las personas.
- Aspectos sociales y económicos
- Análisis de los servicios ecosistémicos
- Información hidrogeológica
- Otros aspectos relevantes

Estos datos deben tener un estándar mínimo de validación y luego plantear la pregunta principal de planificación de una norma, ¿Es suficiente la información disponible para iniciar el proceso de las NSCA, o se necesitan realizar más estudios?. Si los estudios y antecedentes son suficientes se elaborará el anteproyecto de la norma, caso contrario, el Ministerio podrá solicitar más plazo de los 12 meses para poder recopilar los antecedentes que hagan falta. Logrado esto, se procede a señalar los contaminantes a normar, las áreas de vigilancia (AV), la evaluación del estado ecológico actual de la cuenca o cuerpo de agua marina, así como también, los valores umbrales del anteproyecto. Además, el Ministerio deberá realizar un análisis técnico que identifique y cuantifique, los riesgos para la población, ecosistemas o especies afectadas o protegidas, y un análisis general del impacto económico y social (AGIES), que considere la situación actual y la situación con anteproyecto de la norma; en general, este último debe evaluar los costos para los privados y para el Estado que implique el cumplimiento de la norma. También se deberán incluir los beneficios de la norma para la población, ecosistemas o especies y para los titulares de las actividades reguladas y para el Estado.

Es importante considerar que las AVIs y sus puntos de control se deben localizar en sectores que representen zonas distinguibles en función de su hidrodinámica, su nivel de contaminación y objetivos de conservación biológica presentes. Por otro lado, la selección de parámetros se debe realizar considerando los criterios de la información disponible, fuentes emisoras en la cuenca o cuerpo de aguas, estado trófico, impacto de los parámetros en los ecosistemas acuáticos. En una siguiente etapa de la elaboración de las NSCA, se debe evaluar el estado actual de las especies en los ecosistemas acuáticos de la cuenca o del cuerpo de agua marina a través de tablas de clases de calidad. Los resultados en esta parte de la elaboración de normas se utilizan para la determinación de los valores umbrales de las normas y de esta manera establecer objetivos para cada parámetro y área de vigilancia para finalizar con la redacción del anteproyecto (MMA, 2017).

Cuando ya está elaborado el anteproyecto de la norma, el Ministerio debe dictar la resolución que lo apruebe y lo someta a consulta pública, así mismo también deberá solicitar la opinión del Consejo Consultivo Nacional y/o Regional según corresponda, remitiendo el anteproyecto y su expediente. Los Consejos y la ciudadanía dispondrán de 60 días para emitir su opinión acompañada de los antecedentes en los que se sustentan.

En cuarto lugar, considerando los antecedentes del expediente y del análisis de las observaciones formuladas en la etapa de consulta, en un plazo de 3 meses, se elaborará el proyecto definitivo de la norma, remitiéndolo al Consejo de Ministros para la Sustentabilidad para su discusión y pronunciamiento; luego, las normas se tramitan y formalizan a través de la dictación de un decreto es sometido a la consideración del Presidente de la República para su decisión. Finalmente, el decreto tomado razón por la Contraloría General de la República, se publica en el Diario Oficial. Tras la publicación, hay un periodo de 30 días, en donde cualquier persona natural que considere que no se ajusta a la ley y a la cual le causen perjuicio, puedan reclamar ante el Tribunal Ambiental competente (DS N° 38/2012, MMA).

Las cuencas del país que ya cuentan con un programa de desarrollo de NSCA, son la cuenca del río Serrano (2010), río Maipo (2014) y río Biobío (2015); y otras se encuentran en proceso de elaboración, como lo es la cuenca del río Rapel, río Valdivia, río Aconcagua, río Huasco, río Mataquito y río Elqui. Sin embargo, en la actualidad existen sólo dos lagos que cuentan con la protección de sus aguas tras la dictación de NSCA, siendo estos el Lago Llanquihue (2010) y el Lago Villarrica (2013).

La NSCA del Lago Llanquihue, que entró en vigencia en el año 2009, tiene como objetivo “Mantener la calidad de las aguas del lago y prevenir la eutrofización antrópica proporcionando instrumentos de gestión para aportar a la mantención de su actual condición oligotrófica”. Según el último informe técnico de cumplimiento disponible, para el periodo de 2017-2018, se demuestra que en cuanto a la evaluación de la norma, en todo el periodo de evaluación analizado por la Superintendencia del Medio Ambiente (2013 -2018), se han medido niveles por sobre lo normado, o cercano a dicho límite, de manera simultánea en todas las áreas de vigilancia, de Transparencia y Clorofila “a”. Además, se presentan situaciones en donde no se podía muestrear por condiciones climáticas adversas, algunos parámetros se invalidan por el tiempo de almacenamiento o la metodología usada no correspondía a la señalada en la norma. Actualmente, según la Resolución Exenta N° 440/2020 en donde se establece el Programa de Regulación Ambiental 2020-2021, se especifica que se hará revisión del DS N° 122/2010 en donde se establece la NSCA para la protección de las aguas del Lago Llanquihue.

En el caso del Lago Villarrica, como antecedente para la formulación de la NSCA consideran los estudios científicos de Campos *et al.* (1983), que indicaban, en ese entonces, que su nivel trófico estaba aumentando de manera acelerada, pasando de un estado oligotrófico a un estado mesotrófico. En el 2013 entra en vigencia la norma, teniendo como objetivo “proteger la calidad de las aguas del lago, de modo de prevenir el aumento acelerado de su estado trófico, provocado por la actividad

antrópica dentro de su cuenca hidrográfica”. Sin embargo, en el 2017, el lago es declarado como zona saturada, tras registrar saturación en los niveles de clorofila “a”, transparencia y fósforo disuelto, en los periodos de 2014-2015 y 2015-2016. Actualmente, el 25 de mayo del 2020 se aprueba el Anteproyecto del Plan de Descontaminación por clorofila “a”, transparencia y fósforo disuelto, para la cuenca del Lago Villarrica.

Ambos sistemas recién mencionados, pertenecen al conjunto macrozonal de lagos norpatagónicos; sin embargo, sólo estos dos cuentan con NSCA porque en Chile aún no se establecen normas que sean aplicables a un distrito de lagos, llevando a cabo un proceso mucho más complejo para que éstas se formulen, dicten y revisen, ya que sólo se norman lago a lago y no se efectúa lo que se evidencia en las otras iniciativas mencionadas anteriormente como la compresión regional de una tipología de lagos.

1.6 Descripción del Área

En la Patagonia de Chile y Argentina, se encuentra la región más importante de lagos templados de Sudamérica (Tuca *et al.*, 2020). Específicamente en Chile, se sitúa un importante distrito de ecosistemas lacustres, entre la Región de la Araucanía y la Región de los Lagos, que se conoce como los lagos norpatagónicos o araucanos de Chile, ubicados en la zona andina y subandina entre las latitudes 39° S y 41°S - 71°O, a alturas que van desde los 115 a 580 metros sobre el nivel del mar (Geller, 1992).

Estos lagos, se caracterizan principalmente por su origen glacial, por la fuerte actividad volcánica que ha influenciado sobre ellos, por su profundidad que varía entre 145 y 374 metros, por ser considerados como oligotróficos debido a su bajo nivel de nutrientes y también por poseer características cálidas y monomícticas que se refiere a que son lagos que nunca se congelan, ya que la temperatura del agua en invierno se encuentra entre los 9 – 10 °C, muy por sobre la temperatura de los lagos del hemisferio norte (4°C), que son templados y comparables con los de esta

región. El clima presente es templado y húmedo, con abundantes precipitaciones medias anuales (Geller, 1992; Villalobos *et al.*, 2003; Woelfl *et al.*, 2003; Woelfl, 2007).

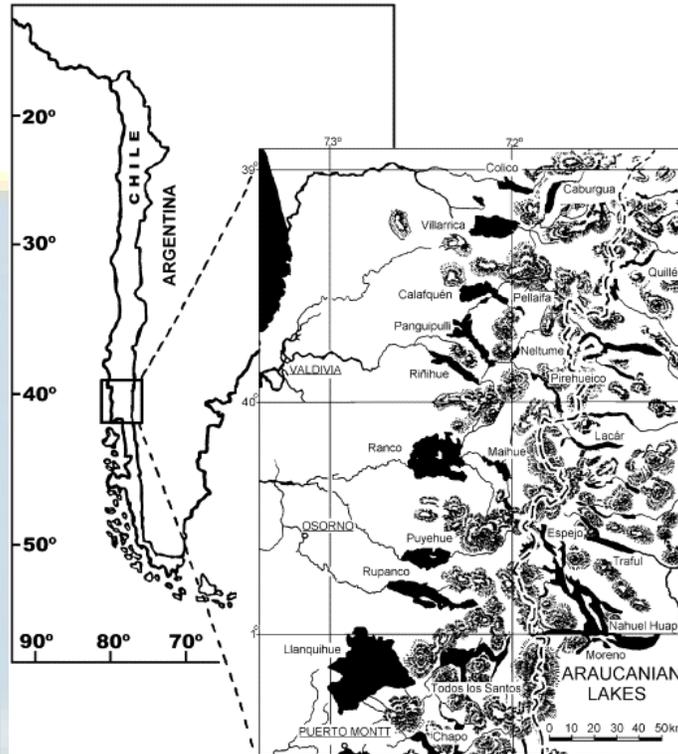


Figura 3: Mapa de los Lagos Norpatagónicos.

Fuente: Extraído de Woelfl, 2007 (modificado del mapa original por Thomasson, 1963).

En la Figura 3, se puede observar el distrito de lagos araucanos, que suman en total 23 ecosistemas lacustres, de norte a sur estos son: Lago Colico, Lago Caburga, Lago Huilipilún, Lago Tinquilco, Lago Villarica, Lago Calafquén, Lago Pullinque, Lago Pellaifa, Lago Panguipulli, Lago Neltume, Lago Riñihue, Lago Pirihueico, Lago Ranco, Lago Maihue, Lago Huishue, Lago Gemelas, Lago Gris, Lago Constancia, Lago Puyehue, Lago Rupanco, Lago Llanquihue, Lago Todos los Santos y Lago Chapo (Chile Lagos Limpios, 2020).

Otra de las características importantes de estos lagos templados y monomícticos es que poseen: i) muy bajas concentraciones de clorofila “a” y con ello bajas cantidades de sal y nutrientes, ii) alta transparencia de sus aguas, iii) una baja productividad,

en donde sus comunidades de fitoplancton y zooplancton presentan una baja diversidad de especies predominando las diatomeas y copépodos calanoides y, iv) aparente resistencia a las perturbaciones como la adición de fósforo; ya que con las concentraciones de fósforo presente se esperarían mayores concentraciones de clorofila "a", como pasa en los lagos del hemisferio norte (Villalobos *et al.*, 2003; Valdovinos & Pedreros, 2007; Woelfl, 2007).

En la Tabla 3, se pueden observar algunos datos físicos y químicos más relevantes de 14 de los 23 lagos araucanos, como la profundidad máxima, la superficie de éstos que va desde los 30 a los 870 km², la profundidad promedio de Secchi (método utilizado para estimar la transparencia del agua, donde se debe medir la profundidad a la que el ojo humano deja de ver un disco metálico de 20 cm de diámetro) que es significativamente mayor en los lagos de mayor superficie, la profundidad eufótica (profundidad en la que la intensidad de la luz no es suficiente para que haya fotosíntesis) presentándose con variabilidad muy parecida a la profundidad de Secchi. El valor de pH en todos los lagos va de 7.3 a 7.8; y las concentraciones de nutrientes y clorofila a presentes ubican a los lagos en un rango que va desde oligotróficos a ultraoligotróficos. En general, no se presentan diferencias significativas entre los lagos, de hecho, presentan características muy similares unos con otros.

Tabla 3: Ubicación geográfica, parámetros morfométricos y abióticos de lagos norpatagónicos.

| Lago | Ubicación | Z _{max} (m) | Área (km ²) | Prof. Secchi (m) | Prof. Eufót. (m) | pH | SRP (P mg L ⁻¹) | Nitrato (N mg L ⁻¹) | Chl a (mg L ⁻¹) |
|------------------|-----------|-------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|-----------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Colico | 39°05' S | 374 | 55,8 | 22,0 | 30,0 | 7,3 | 2,4 | 7,0 | 1,05 |
| | 71°56' O | | | (12,8-26,0) | (23,0-31,5) | (7,1-7,6) | (<1-9,5) | (3,5-26,5) | (0,32-2,2) |
| Carburga | 39°07' S | 327 | 51,9 | 19,0 | 26,0 | 7,5 | 3,3 | 5,9 | 1,10 |
| | 71°45' O | | | (14,0-25,3) | (25,0-40,0) | (7,2-7,9) | (<1-14,5) | (1,5-12,5) | (0,40-2,5) |
| Villarica | 39°32' S | 165 | 175,9 | 13,2 | 18,5 | 7,5 | 1,5 | 7,5 | 1,44 |
| | 72°09' O | | | (8,0-16,0) | (8,7-22,5) | (7,3-7,5) | (<1-3,4) | (6,0-8,5) | (0,95-1,93) |
| Calafquen | 39°32' S | 212 | 120,6 | 14,1 | 30,0 | 7,5 | 3,4 | 5,5 | 0,76 |
| | 72°09' O | | | (12,2-17,2) | (30,0-30,0) | (7,4-7,7) | (1,0-14,2) | (3,0-14,0) | (0,34-2,1) |
| Panguipulli | 39°43' S | 268 | 116,9 | 13,4 | 27,0 | 7,4 | 2,9 | 7,8 | 0,83 |
| | 72°13' O | | | (9,8-17,0) | (12,5-28,0) | (7,3-7,5) | (1,3-4,2) | (4,5-11,5) | (0,63-1,06) |
| Pirehueico* | 39°56' S | 145 | 30,5 | 16,6 | 26,0 | 7,5 | 0,5 | 29,5 | 0,60 |
| | 71°48' O | | | (8,0-21,0) | (25,0-40,0) | (7,4-7,7) | (0-3,0) | (12,0-58,1) | (0,28-1,07) |
| Riñihue | 39°50' S | 323 | 77,5 | 13,9 | 25,3 | 7,4 | 2,2 | 7,5 | 0,66 |
| | 72°20' O | | | (9,8-19,2) | (8,5-33,0) | (7,4-7,5) | (<1-3,8) | (4,0-11,0) | (0,29-1,66) |
| Maihue | 40°20' S | 207 | 47,2 | 7,5 | 17,0 | 7,2 | 5,5 | 11,0 | 1,08 |
| | 72°04' O | | | (3,0-19,5) | (15,0-22,5) | (7,0-7,6) | (1,1-10,3) | (8,0-12,0) | (0,49-1,66) |
| Ranco | 40°12' S | 199 | 442,6 | 18,0 | 29,0 | 7,6 | 2,2 | 5,3 | 0,64 |
| | 72°23' O | | | (15,7-24,0) | (10,0-35,0) | (7,6-7,8) | (<1-10,3) | (4,0-6,5) | (0,44-0,74) |
| Puyehue | 40°40' S | 123 | 165,4 | 15,0 | 14,5 | 7,5 | 1,3 | 7,5 | 0,85 |
| | 72°28' O | | | (10,7-17,3) | (9,0-26,5) | (7,4-7,6) | (<1-9,0) | (6,0-9,5) | (0,14-1,30) |
| Rupanco | 40°50' S | 274 | 247,5 | 19,3 | 34,5 | 7,4 | 3,2 | 5,0 | 0,75 |
| | 72°26' O | | | (18,5-22,8) | (31,0-45,0) | (7,2-7,6) | (<1-9,0) | (1,5-5,5) | (0,42-1,30) |
| Llanquihue | 41°08' S | 317 | 870,5 | 21,8 | 39,5 | 7,6 | 4,3 | 8,5 | 0,64 |
| | 72°47' O | | | (19,0-26,0) | (35,0-46,7) | (7,3-8,3) | (1,0-5,2) | (1,0-16,0) | (0,58-1,07) |
| Todos los Santos | 41°08' S | 337 | 178,5 | 8,3 | 13,0 | 7,0 | <1 | 7,0 | 0,32 |
| | 72°12' O | | | (4,7-15,9) | (12,0-30,0) | (6,8-7,2) | (<1-1,1) | (6,5-8,5) | (0,24-0,52) |
| Chapo | 41°27' S | 298 | 45,3 | 10,5 | 19,0 | 7,4 | 2,7 | 5,5 | 0,74 |
| | 72°30' O | | | (9,6-13,2) | (15,0-20,0) | (7,0-8,2) | (<1-3,3) | (2,0-10,0) | (0,49-1,55) |

Se dan valores medios y mínimos-máximos (). SRP=fósforo reactivo soluble. * Valores de 1992 - Woelfl & Geller ;

Fuente: Extraído de Woelfl, (2007).

Estos lagos, en general, poseen una baja carga de nutrientes provenientes de fuentes puntuales por acción antrópica. Sin embargo, si cuentan con aportes considerables por fuentes difusas debido a los cambios en los usos de suelo que se dan alrededor de los lagos y a las actividades realizadas en ellos, como la silvicultura, la agricultura, la piscicultura, las aguas residuales de la expansión residencial, etc. Según Valdovinos & Pedreros, (2007); el cambio que se origina tras la conversión de territorios vírgenes y las actividades señaladas, provocan una mayor erosión del suelo lo que conlleva a un aumento en las concentraciones de fósforo (P), nitrógeno (N) y sedimentos, que son los agentes de cambio trófico más relevantes en los ecosistemas de agua dulce a nivel mundial.

Por otro lado, León-Muñoz *et al.*, (2013); señala que el incremento en la carga de sedimento puede causar una reducción de la transparencia y cambios en la ecología acuática, como las transiciones de sistemas claro a sistemas turbios que son dominados por fitoplancton. Además, el aumento de la carga de nutrientes adicionado a la piscicultura que se realiza en los lagos puede ocasionar un gran desequilibrio ambiental al acelerar el proceso de eutrofización, pudiendo llegar hasta floraciones de algas nocivas, una reducción o pérdida de la biodiversidad y anoxias en las columnas de agua y sedimentos.

Como se mencionó anteriormente, a la fecha, sólo el Lago Llanquihue y el Lago Villarrica, de este distrito de lagos Norpatagónicos, cuentan con NSCA. Sin embargo, uno de estos ya se encuentra en el proceso de elaboración de un Plan de Descontaminación y el otro, dados los niveles registrados, para al menos dos de sus parámetros, en todas las áreas de vigilancia, debería ser declarado como zona saturada; ya que según se estipula en la Guía para la Elaboración de NSCA en aguas continentales y marinas del 2017, en el caso de incumplimiento de uno o más parámetros normados, en una o más áreas de vigilancias (AV), el MMA debe declarar zona saturada.

2. Hipótesis

Dados los antecedentes mencionados anteriormente, y considerando que los lagos son ecosistemas que sostienen una comunidad especializada de organismos con sus características físicas, químicas y biológicas; y, que prestan una gran variedad de SE a la sociedad, es que se hace indispensable una iniciativa que permita la conservación y/o restauración de estos ecosistemas, manteniendo sus características oligotróficas e integridad ecológica; desarrollando una gestión conjunta, se propone que:

“Si todo el conjunto de lagos Norpatagónicos presentan una misma tipología, con características geomorfológicas y limnológicas similares, ¿Es posible realizar una norma secundaria de calidad ambiental macrozonal para este distrito de lagos?”.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar la factibilidad de realizar una Norma Secundaria de Calidad Ambiental general para el conjunto de lagos Norpatagónicos.

-3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la información disponible de los lagos definidos como Norpatagónicos.
2. Desarrollar una tipología que reúna los lagos en tipos relevantes.
3. Evaluar la trofía de los lagos para definir los lagos de referencia.

4. Metodología

Para lograr los objetivos definidos en la sección anterior, se fijaron una serie de actividades que se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4: Resumen de la metodología a seguir, según actividades por objetivo.

| | |
|-------------------|---|
| <i>Objetivo 1</i> | Reunir información macrozonal y de las cuencas lacustres. |
| | Recopilar la morfología, geología, hidrología, clima y características en general de la zona. |
| <i>Objetivo 2</i> | Realizar tipología en base a las variables geomorfológicas. |
| | Recopilar los datos de calidad de agua y definir su estado basal. |
| | Validar la tipología obtenida con los datos de calidad de agua. |
| <i>Objetivo 3</i> | Obtener el estado trófico de los lagos Norpatagónicos que cuentan con datos. |
| | Establecer un lago de referencia por grupo tipológico. |
| | Fijar las variables y valores sugeridos a normar. |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detalla cómo se llevará a cabo el cumplimiento de cada actividad involucrada en el desarrollo de la investigación.

4.1 Actividades para dar cumplimiento al objetivo 1

4.1.1 Reunir información macrozonal y de las cuencas lacustres

Se realizó una búsqueda sistemática de referencias bibliográficas en relación con la información disponible de los lagos en estudio, con énfasis en datos de las Regiones de la Araucanía, los Ríos y los Lagos. Específicamente, la caracterización general de los lagos en el espacio geográfico determinado y la caracterización de las cuencas hidrográficas. La recopilación de datos se hizo a través de estudios científicos proporcionados por distintas Universidades y privados, así como la información disponible en las plataformas de instituciones gubernamentales. Además, se reunieron los shape de lagos, cuencas, subcuencas, subsubcuencas y

regiones disponibles principalmente en la plataforma de la Dirección General de Aguas (DGA).

Por otro lado, se obtuvo el modelo de elevación digital (DEM), del tipo ASTER, a partir de Nasa Earthdata, con celda de 30,678 x 30,678. Este se trabajó con la herramienta de Sistemas de Información Geográfica, el Software ArcGIS en su versión 10.1, con los programas ArcMap y ArcCatalog. La red hídrica de la cuenca de la zona de estudio se obtuvo de la página web de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, en la sección de información territorial (SIIT-BCN), que corresponden a polilíneas de los drenes de todo Chile.

i. Obtención Red Hídrica

En primer lugar, se añade el DEM, el cual se rellena con la herramienta “relleno” encontrada en hidrología de Spatial Analyst. Posteriormente, se calcula la dirección de flujo en donde cada valor generado indica hacia donde se dirige el agua por cada pixel. Para finalmente, con la dirección de flujo calcular la acumulación que fue utilizada en el cálculo de la red hídrica con la calculadora de ráster aplicando una condicionante de >3000.

ii. Delimitación Cuencas

Por cada lago, se creó un Shapefile de punto en la sección de desagüe del lago (o cierre de la cuenca) aplicando la herramienta “Ajuste de corriente” con el fin de ajustarlo sobre la red hídrica. Luego de tener el punto corregido junto con la dirección de flujos, se aplica la herramienta “Cuenca Hidrográfica”, la cual entrega el área aportante de cada lago.

4.1.2 Recopilar la información morfológica, geológica, hidrológica y climática

i. Información hidrológica

Para el caso de la información hidrológica, se buscó principalmente en estudios científicos proporcionados por universidades, privados y plataformas de

instituciones gubernamentales; esta constó principalmente en caracterizar cada lago con sus afluentes y efluentes principales a través de la plataforma de Información Hidrometeorológica y de Calidad de Agua en línea, a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA) y a través de la plataforma del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)².

ii. Información morfológica

Se recopila información sobre los distintos parámetros morfológicos de los 23 lagos Norpatagónicos, tales como: latitud, longitud, altitud, longitud máxima, ancho máximo, ancho medio, longitud de línea de costa, área superficial, desarrollo de línea de costa, profundidad máxima, profundidad media, profundidad criptodepresión, relación profundidad media/profundidad máxima, volumen, área de drenaje, relación área de drenaje/área lago y tiempo de residencia.

Los parámetros como latitud, longitud y altitud se obtuvieron a través del software Google Earth Pro; mientras que la longitud máxima, ancho máximo, ancho medio, profundidad máxima, profundidad media, profundidad criptodepresión, relación profundidad media/profundidad máxima, volumen, área de drenaje, relación área de drenaje/área lago y tiempo de residencia se obtuvieron mediante literatura de ser posible a través del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) o la Dirección General de Aguas (DGA); o, a través del software ArcMap; exceptuando, la longitud de línea de costa, área superficial, y desarrollo de línea de costa; en donde se priorizaron los datos obtenidos desde el último nombrado. Finalmente, la profundidad criptodepresión, relación profundidad media/profundidad máxima y relación área de drenaje/área lago se obtuvieron a través del cálculo matemático en el software Microsoft Excel.

Tras la recopilación de la información, se debe elaborar una base de datos que permita ordenar de manera cómoda los datos en el software Microsoft Excel.

A continuación, se entrega una definición de los diferentes parámetros morfométricos utilizados en la caracterización de los lagos Norpatagónicos:

- **Longitud máxima (L):** Corresponde a la longitud de la línea que conecta los dos puntos más extremos de un lago. Debe representar lo más fielmente la longitud de las aguas abiertas y no deberá cruzar ninguna porción de tierra a menos que sea una isla.

Es la distancia máxima sobre la superficie del lago entre dos puntos ubicados sobre la línea de costa. Esta longitud es potencialmente el fetch máximo o longitud efectiva por la cual el viento puede actuar sin ninguna interrupción.

- **Ancho máximo (AM):** Es la longitud de la línea transversal que conecta los puntos más extremos de un lago y que no cruza otros terrenos además de islas. Se puede decir que es la medida de la línea recta tomada aproximadamente perpendicular al eje de longitud máxima. Es la distancia máxima entre la costa perpendicular a la línea de longitud máxima.
- **Ancho medio (A_{MD}):** Es igual al área superficial (A_0) dividida por la longitud máxima (L).
- **Profundidad máxima (Z_m):** Es la mayor profundidad del lago.
- **Profundidad media (Z):** Es el volumen dividido por el área superficial del lago.
- **Relación profundidad media / profundidad máxima:** Se expresa dividiendo la profundidad media por la profundidad máxima, indicando su valor la aproximación muy generalizada de la forma de la cubeta a la forma cónica.
- **Profundidad de criptodepresión:** es la parte teórica de un lago que queda por debajo del nivel del mar.
- **Perímetro o Longitud de Línea de costa (P):** Es la longitud del perímetro del lago, que puede ser determinado por mediciones directas o bien a partir de la cartografía (SIG).
- **Desarrollo de Línea de Costa (DL):** Es una medida de la regularidad del contorno del lago, es decir, su mayor o menor semejanza a un círculo. Expresa la relación entre la longitud del perímetro del lago (P) y la longitud de círculo de la misma área del lago (A). Se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$D_L = P / 2 \sqrt{\pi * A}$$

- **Volumen (V):** Corresponde al volumen de agua del lago. El volumen es la suma de los volúmenes de los estratos sucesivos desde la superficie hasta el punto de mayor profundidad.
- **Área (A):** Corresponde a la superficie del espejo de agua del lago.
- **Tiempo de renovación teórico:** Es el tiempo necesario para proporcionar un volumen de agua igual al volumen total de agua de un lago con el caudal medio natural de entrada o de llenado. Es el tiempo promedio requerido para llenar una cuenca lacustre con agua si esta fuera completamente vaciada.

iii. Información geológica

La información geológica se obtuvo gracias al Mapa Geológico de Chile: Versión Digital del 2003 del Servicio Nacional de Geología y Minería (SENAGEOMIN). Se trabajó con el shape, el cual fue trabajado en el software ArcMap. Primeramente, se cortó el shape geológico del país con las áreas aportantes de cada lago, quedando por cada lago un área aportante con la información geológica, que fue descargada y posteriormente trabajada en el software Excel. Se realizó una tabla con todos los códigos que estaban presentes en el área geográfica y se procedió a sacar el porcentaje total de cada uno de ellos.

Dado que los códigos encontrados corresponden a la edad geológica, con ayuda de literatura se categorizaron en si pertenecían a geología: silíceo, calcáreo y/o húmico (orgánico), según lo estipula el sistema A del Anexo II para la realización de la tipología de lagos de la DMA.

iv. Información climática

Para la información del clima se utilizó la Clasificación de Köppen-Geiger implementada en Chile por Sarricolea *et al.*, (2017), para definir las características climáticas del país. Para esto se obtuvo el shape de la clasificación, para posteriormente cortarlo respecto a las áreas de drenaje de los lagos, a partir de la

información se describe la información climática que más destaca en el área de estudio.

v. Áreas Protegidas

Para la descripción de las áreas protegidas de la zona de estudio se descargaron los shape del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), así como también los shape de Reservas de la Biósfera, sitios Ramsar, Sitios del Patrimonio Mundial, los Sitios Prioritarios para la conservación de la Biodiversidad, Los Bienes Nacionales Protegidos y los Paisajes de Conservación. Luego se realizó el corte con las áreas aportantes para luego hacer la descripción de acuerdo a la imagen que arrojaba el software ArcMap.

vi. Flora y comunidades bióticas

Para el ítem de flora, se hace una descripción general en base a los ecosistemas terrestres o pisos vegetacionales establecidos por Luebert y Plissock (2017). Para esto se descarga el shape de ecosistemas terrestres y se hace el recorte por la zona de estudio de los 23 cuencas lacustres; luego, se describe a grandes rasgos según los colores que indican en el mapa creado a partir de la capa.

En el caso de las principales comunidades bióticas, se realizó una búsqueda bibliográfica entre principales estudios realizados a los lagos por parte de la DGA y algunos autores.

vii. Uso de Suelo

En el ítem de uso de suelo, se utilizó el shape de uso de suelo nacional, se consideró utilizar la categoría de subuso de suelo, ya que la categoría de uso no consideraba información relevante para el análisis de la información. Luego, se trabajó con la herramienta de recorte con las cuencas lacustres. Para hacer la descripción se hizo en base a las regiones que abarcan la zona, ya que el espacio geográfico es muy grande y presenta muchos datos. Para el orden de los datos se realizó una tabla

dinámica por región para saber exactamente el porcentaje de cada subuso de suelo regional.

4.2 Actividades para dar cumplimiento al objetivo 2

4.2.1 Realizar tipología en base a las variables geomorfológicas

Para la tipificación de los lagos estudiados, se aplica parte del sistema A y B propuesto por la DMA, para ello se creó una matriz en Microsoft Excel compuesta por 7 variables morfológicas: Altitud, Longitud máxima, Ancho máximo, Área superficial, Desarrollo de línea de costa, Área de drenaje, Relación Área drenaje / Área Lago, además de 2 variables geológicas que son Silíceo y Glaciar/Hielo. El tamaño de muestra n está integrado por los 23 lagos. Se trabajó con el software RStudio en el cual se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con la finalidad de detectar patrones sobre las variables geomorfológicas, luego un Análisis de Conglomerados (ADC) Jerárquico con el propósito de encontrar observaciones parecidas dentro de cada grupo y la técnica de Escalamiento Multidimensional para revelar proximidades entre pares de objetos como distancias en un espacio de baja dimensión.

4.2.2 Recopilar los datos de calidad de agua

Se elabora una base datos con la información histórica de la calidad de agua con todos los parámetros fisicoquímicos y biológicos encontrados de cada lago, obtenidos principalmente a través de la plataforma de Información Hidrometeorológica y de Calidad de Agua en línea, a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA), así como también a través de estudios de universidades y privados. Una vez recopilada la información se reduce promediando los valores de acuerdo con las profundidades y así poder obtener un valor por estación de muestreo, periodo estacional y año. Luego se procede a descartar los datos atípicos (outliers) mediante la utilización de la fórmula:

$$\text{Si } |x_k - \bar{x}| > 3\sigma \Rightarrow x_k \text{ es outliers}$$

Donde: x_k : valor a probar

\bar{x} : media del conjunto de datos

Si el valor se encuentra en el límite de control, se considerará como un valor real, y si esta fuera será considerado como atípico (DGA, 2017).

4.2.3 Validar la tipología obtenida con los datos de calidad de agua.

A partir de las bases de datos del punto anterior, se crea una base de datos con los parámetros de todos los lagos (datos de calidad compilados), esta base de datos incluye los parámetros de temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, turbiedad, transparencia, nitrógeno de nitrato, nitrógeno de nitrito, nitrógeno de amonio, nitrógeno de kjeldahl, nitrógeno total, fósforo de ortofosfato, fósforo total, clorofila a, sílice, demanda química de oxígeno, sólidos totales suspendidos, bicarbonato, calcio disuelto, magnesio disuelto, sodio disuelto, potasio disuelto, cloruro, sulfato, dióxido de carbono, alcalinidad, dureza, productividad primaria, entre otros con muy pocos datos disponibles con un total de 2449 datos para al menos uno de los parámetros para 19 lagos desde el año 1946 hasta el 2021.

Tras el recuento de los datos, se priorizan los parámetros con mayor cantidad de datos disponibles para la validación de la tipología que se realizó con los datos geomorfológicos, siendo estos temperatura, conductividad específica, pH, oxígeno disuelto, nitrógeno de nitrato, nitrógeno de nitrito, nitrógeno de amonio y fósforo de ortofosfato, cabe destacar que algunos parámetros no contaban con información, por lo que en esos casos se utilizó la información disponible por lago, estación y periodo estacional para poder completar la base de datos y así poder trabajar sin problema en el programa, ya que no se puede trabajar con casillas vacías.

La validación de la tipificación de los lagos, se hará mediante el análisis de la última matriz mencionada con 9 parámetros, que además incluye tres variables cualitativas y una cuantitativa; Cuerpo de agua, Estación, Período estacional y año correspondientemente, con un tamaño muestral n igual a 2429. En el software RStudio se aplicó ACP para detectar patrones de comportamiento, luego un ADC Jerárquico y el algoritmo K-medias. El Análisis Clúster para clasificar objetos (lagos y variables), el cual se utiliza como una técnica exploratoria y el K-medias para dividir M observaciones (número de objetos) de N dimensiones (atributos de un objeto) en k grupos (Vintimilla *et al.*, 2017).

4.3 Actividades para dar cumplimiento al objetivo 3

4.3.1 Análisis de los Datos

De la base de datos mencionada en el punto 4.2.3, se analiza de acuerdo a los años con datos disponibles, la cantidad de parámetros y la cantidad de datos por lago.

De la misma forma, se obtienen las medidas de tendencia central (media, mediana y moda) y las medidas de dispersión (valor mín, valor máx, rango, varianza, desviación estándar, percentil 80, 66 y 33). A través de estos últimos se puede obtener el estado basal del agua de cada lago.

4.3.2 Calcular el índice de nivel trófico

En la evaluación del estado trófico, se implementan técnicas que van desde la observación del color del lago hasta métodos isotópicos radiactivo; no obstante, el método que más se utiliza para evaluar el estado de los lagos es mediante índices que manifiesten su condición siendo los más utilizados aquellos que integran más de un criterio en la clasificación. A continuación, se describen tres índices que cumplen con esa condición y serán utilizados en este trabajo de investigación.

i. Índice de Carlson

Este índice corresponde a uno de los más utilizados y emplea el supuesto de que el material particulado suspendido controla la profundidad de Secchi, siendo la concentración algal la principal productora de este material. Se obtiene mediante una transformación logarítmica de los valores correspondientes a Disco Secchi (DS), concentración de clorofila "a" (Chl "a") y el fósforo total (Pt). En la Tabla 5, se presenta la forma de calcular este índice.

Tabla 5: Fórmulas para estimar el indicador trófico de cada variable y el índice final.

| Parámetro | Carlson (1980) |
|--|--|
| Transparencia (DS) (m) | $TSId = 60 - 14,41 \ln (DS)$ |
| Fósforo Total (Pt) (mg/ m ³) | $TSIp = 14,42 \ln (Pt) + 4,15$ |
| Clorofila "a" (Chl a) (mg/m ³) | $TSIc = 9,81 \ln (Chl a) + 30,6$ |
| Índice | $TSI = \frac{(TSId + TSIp + TSIc)}{3}$ |

Fuente: Extraído de DGA, 2018.

Tras calcular el índice de Carlson, este dará un valor entre 0 y 100, abarcando rangos de estado trófico según el número obtenido. En la Tabla 6, se encuentra el rango de estos valores y el estado al que pertenecen.

Tabla 6: Rango de valores del índice de Carlson según el estado trófico, color y descripción.

| Estado | Rango TSI | Descripción |
|-------------------|-----------|---|
| Hipereutrófico | > 70 | Productividad limitada por la disponibilidad de luz, abundantes macrófitas, anoxia en hipolimnion |
| Eutrófico | 50 - 70 | Abundantes algas, con problemas de oxigenación en el hipolimnion, posiblemente dominan algas azules |
| Mesotrófico | 40 - 50 | Disminución de la transparencia, algas aumentan, oxigenación en el hipolimnion puede disminuir en el verano |
| Meso-Oligotrófico | 30 - 40 | Aumenta productividad primaria |
| Oligotrófico | < 30 | Agua transparente, muy buena oxigenación en el hipolimnion |

Fuente: Rangos extraído de DGA, 2018.

En algunos informes también se encuentra la fórmula para agregar el cuarto parámetro sobre trofía, siendo el nitrógeno total (Nt), posteriormente se realiza el promedio entre los cuatro parámetros.

$$TSI_{TN} = 54,45 + 14,43 \ln (Nt)$$

ii. Estado trófico de acuerdo a la OCDE (1982)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), en 1982, estableció el índice de grado de eutrofización en su programa “Cooperación sobre la Eutrofización”, en el cual se analiza la caracterización trófica de sistemas acuáticos mediante la concentración promedio anual de Pt (ug/L), concentración promedio anual de la Chl-a en la zona eufótica (ug/L); concentración máxima anual de Chl-a en la zona eufótica (ug/L), promedio anual de la transparencia del agua (m) y mínimo anual de la transparencia del agua, tal como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7: Valores establecidos por la OCDE (1982) para determinación del estado trófico.

| Categoría trófica | PTOT (ug/L) | Clorofila a (ug/L) | | Transparencia DS (m) | |
|--------------------|-------------|--------------------|---------|----------------------|-----------|
| | | Media | Máxima | Media | Mínimo |
| Ultraoligotróficos | < 4.0 | < 1.0 | < 2.5 | > 12 | >6 |
| Oligotróficos | < 10.0 | < 2.5 | 2.5 - 8 | >6 | >3 |
| Mesotróficos | 10 - 35 | 2.5 - 8 | 8 - 25 | 6-3 | 3 – 1.5 |
| Eutrófico | 35 - 100 | 8 - 25 | 25 - 75 | 3 – 1.5 | 1.5 – 0.7 |
| Hipertrófico | > 100 | > 25 | > 75 | < 1.5 | < 0.7 |

Fuente: Extraído de DGA, 2018.

iii Índice de Burns

En Nueva Zelanda, en el año 2000, el Ministerio del Medio Ambiente aprobó los procedimientos descrito por Burns et al. (1990) para evaluar el estado trófico de sus lagos. Este índice utiliza los valores anuales medidos de clorofila “a” (Chl a), profundidad de Secchi (DS), fósforo total (Pt) y nitrógeno total (Nt) (Burns et al., 2009). En la Tabla 8, se encuentran las fórmulas utilizadas para obtener los valores, que posteriormente en la Tabla 9, describen el estado trófico al que pertenecen según el valor obtenido por las fórmulas.

Tabla 8: Fórmulas para calcular el Índice de Burns.

| Parámetros | Fórmula |
|-------------------------|---|
| Clorofila "a" (Chl a) | $TLc = 2,22 + 2,54 \text{ Log (Chl a)}$ |
| Profundidad Secchi (DS) | $TLd = 5,10 + 2,60 \text{ Log } \left(\frac{1}{DS} - \frac{1}{40}\right)$ |
| Fósforo total (Pt) | $TLp = 0,218 + 2,92 \text{ Log (Pt)}$ |
| Nitrógeno total (Nt) | $TLn = -3,61 + 3,01 \text{ Log (Nt)}$ |
| Índice | $TLI = \frac{(TLc + TLd + TLp + TLn)}{4}$ |

Fuente: Elaboración propia a partir de Burns et al., 2009.

Tabla 9: Estado de los lagos, niveles tróficos y valores de las cuatro variables clave que definen los diferentes tipos de lago.

| Estado | Nivel Trófico | Chl a (mg/m ³) | Disco Secchi (m) | Pt (mg/m ³) | Nt (mg/m ³) |
|-------------------|---------------|----------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| Ultramicrotrófico | 0,0 a 1,0 | 0,13 – 0,33 | 31 - 24 | 0,84 – 1,8 | 16 - 34 |
| Microtrófico | 1,0 a 2,0 | 0,33 – 0,82 | 24 - 15 | 1,8 – 4,1 | 34 - 73 |
| Oligotrófico | 2,0 a 3,0 | 0,82 – 2,0 | 15 – 7,8 | 4,1 – 9,0 | 73 - 157 |
| Mesotrófico | 3,0 a 4,0 | 2,0 – 5,0 | 7,8 – 3,6 | 9,0 - 20 | 157 - 337 |
| Eutrófico | 4,0 a 5,0 | 5,0 - 12 | 3,6 – 1,6 | 20 - 43 | 337 - 725 |
| Supertrófico | 5,0 a 6,0 | 12 - 31 | 1,6 - 0,7 | 43 - 96 | 725 - 1558 |
| Hipertrófico | 6,0 a 7,0 | > 31 | < 0,7 | > 96 | > 1558 |

Fuente: Extraído de Burns et al., 2005.

4.3.3 Establecer el lago de referencia por grupo

Obtenido los tres índices de estado tróficos anteriores, se analizan los lagos respecto a su estado trófico para encontrar el lago que se encuentra en mejores condiciones respecto a la calidad de sus aguas. Una vez encontrado el lago, se utilizará como referencia para los otros lagos, de modo que este lago sea la línea de base, con respecto a calidad deseada, que se quiere obtener para todo el grupo al que pertenezca; en este punto se utilizan los datos obtenidos en la sección 4.3.1.

4.3.4 Seleccionar los parámetros y valores a normar.

Para la selección de parámetros se utiliza principalmente la base de datos de los lagos, considerando las variables que cuentan con referencia histórica, de igual forma se tienen en cuenta las variables consideradas en las NSCA del Lago Llanquihue y el Lago Villarrica, así como también se consideran los parámetros y valores existentes en experiencias internacionales. Además, se usó la guía de la CONAMA elaborada el año 2004 para el establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas.

Con los parámetros a normar ya seleccionados, se establecen las condiciones de excedencia de la norma y Valores Umbrales que buscan determinar el límite máximo y/o mínimo para que las mediciones que se hagan a futuro cumplan con la norma. Estos valores fueron elegidos con el fin de entregar la condición óptima de acuerdo a los datos de calidad históricos de cada grupo de lagos, de tal manera que con estos valores se asegure la conservación de las especies sensibles junto a los SE que brindan estos cuerpos de agua.

Para definir los rangos adecuados para los distintos parámetros que son necesarios de considerar en la elaboración de la NSCA, se utilizará una nueva matriz que contenga las medidas de tendencia central y medidas de dispersión de los lagos separados por grupo tipológico, de forma que nos permita poder obtener el valor óptimo para cada parámetro de acuerdo a su grupo tipológico.

5. Resultados y discusión

5.1 Espacio geográfico de los Lagos Norpatagónicos

Los ecosistemas acuáticos continentales se distinguen por su singularidad, belleza y fragilidad, además, por presentar una biodiversidad con gran valor para la conservación, debiéndose no solo a la composición de especies que alberga, sino también a los procesos ecosistémicos que conllevan a la interacción con los componentes abióticos circundantes (MMA, 2017).

Es en este contexto, que en la zona centro sur de Chile, se encuentran distintos distritos lacustres, entre los cuales destacan los “Lagos Nahuelbutanos”, “Lagos Araucanos” y “Lagos de Chiloé”. Esta zona corresponde a parte del territorio nombrado como *hotspot* chileno, debido a la gran biodiversidad y los altos niveles de endemismo presentes en el extremo sur de Sudamérica (Valdovinos, 2008).

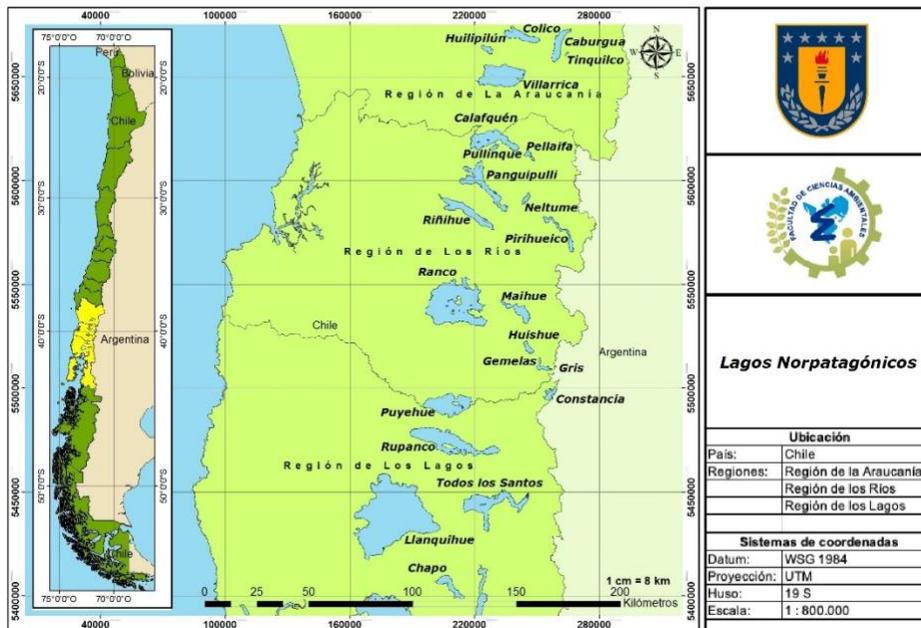


Figura 4: Distribución de los Lagos Araucanos en las regiones políticas.
Fuente: Elaboración propia en software ArcMap.

De ahí es parte de la relevancia que poseen los lagos araucanos o Norpatagónicos ubicados entre las Regiones de La Araucanía y Los Lagos; estos representan una vasta extensión del territorio, con una superficie de 1.600.000 ha aproximadamente, en donde destaca la presencia de una gran y profusa red de reservorios hídricos, suponiendo prácticamente un 16% en un total de 23 cuerpos de agua que suman 265.000 ha. En la Figura 4, se puede apreciar la distribución de los 23 lagos Norpatagónicos en las tres regiones político-administrativas.

En la Región de la Araucanía, se encuentran los lagos Colico, Huilipilún, Caburgua, Tinquilco y Villarrica, todos pertenecientes a la cuenca de Toltén. Los lagos Calafquén, Pullinque, Pellaifa, Panguipulli, Neltume, Riñihue y Pirihueico se posicionan en la cuenca del Río Valdivia y los lagos Ranco, Maihue, Huishue, Gemelas, Gris, Constancia y Puyehue se ubican en la cuenca del Río Bueno; ambas cuencas pertenecen a la Región de Los Ríos, excepto los lagos Calafquén y Puyehue, que son birregionales, con la Región de la Araucanía y la Región de los Lagos, respectivamente. En la Región de los Lagos se encuentran los lagos Rupanco, Todos los Santos, Llanquihue y Chapo, en la cuenca entre el Río Bueno y Río Puelo.

5.1.2 Cuencas Hidrográficas

Dadas sus características geográficas, Chile posee cuencas muy diversas, con distintas particularidades que se generan principalmente debido a su latitud y altura, provocando así una enorme variedad de cuerpos de agua. En términos ambientales, las cuencas y sus causas presentan funciones esenciales para la preservación de los ecosistemas que albergan estos cuerpos y de las relaciones territoriales que se dan con el entorno, pues estos forman parte del paisaje y son fuente de vida (DGA, 2009).

Como se puede apreciar en la Figura 5, de acuerdo con la clasificación de la DGA, los lagos Norpatagónicos se distribuyen en las cuencas del Río Toltén, Río Valdivia, Río Bueno y Entre Río Bueno y Río Puelo.

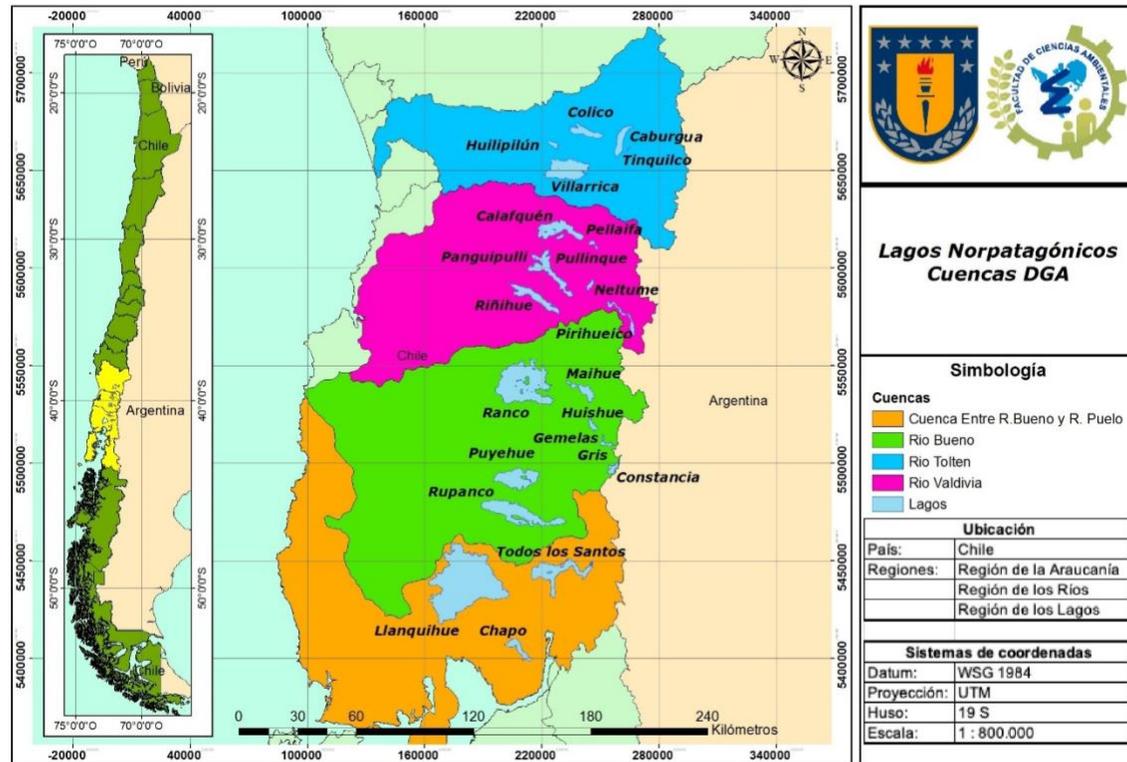


Figura 5: Distribución de los Lagos Araucanos en las cuencas DGA.
Fuente: Elaboración propia en software ArcMap.

i. Cuenca Río Toltén

La hoya andina del Río Toltén tiene una extensión de 8.448 km² aproximadamente, los lagos presentes se encuentran en la parte alta de la cuenca. De Norte a Sur, primeramente, se encuentra el Lago Colico, su principal afluente es el río Trafampulli y su efluente corresponde al Río Curaco, tributario del Río Allipen (DGA, 2004).

Luego, se encuentra el Lago Caburgua, que se alimenta principalmente del Río Blanco y su emisario corresponde al Río Carrileufú (DGA, 1998). Al Sureste, se encuentra el Lago Tinquilco, que se alimenta de los lagos Verde, Toro y Chico y las lagunas Escondida, Seca y Sin Nombre, más algunos esteros; y su efluente

corresponde al Río Quinchol, que es tributario del Río Liucura (Turismo Pucón, 2020).

El Lago Huilpilún, corresponde al lago más al Oeste de la cuenca Toltén, no cuenta con ningún afluente, sólo se alimenta mediante vertientes de temporada invernal ubicadas en los cerros que rodean al lago, y su efluente es el Río Pedregoso (IGM, 2017).

El Lago Villarrica se alimenta principalmente del Río Pucón y, finalmente, el río Toltén nace como efluente de este lago, el cual tras recorrer 123 km desemboca en el mar al Norte de la punta Nilhue (DGA, 2004).

Por otro lado, la cuenca del Río Toltén presenta dos tipos de clima, el Templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (sector centro y bajo de la cuenca) y el Clima templado frío lluvioso con influencia mediterránea (sector precordillerano).

ii. Cuenca Río Valdivia

La cuenca hidrográfica del Río Valdivia tiene una extensión de 10.245 km² y al igual que en la cuenca del Río Toltén, en su curso alto, presenta una cadena de grandes lagos que se disponen en serie a partir del Lago Lacar ubicado en Argentina (DGA, 2000).

De Este a Oeste, se encuentra el Lago Pihueico, el cual recibe las aguas del Lago Lacar a través del Río Huahum, su emisario corresponde al Río Fui. Luego, se encuentra el Lago Neltume, que tiene como afluentes el Río Cua-Cua y Río Chan-Chan y como único efluente al Río Neltume, el cual se une al Río Fui formando el Río Llanquihue (DGA, 2000). El Río Llanquihue corresponde a uno de los afluentes del Lago Panguipulli.

Por el Norte, se encuentra el Lago Pellaifa, que tiene como afluente al estero Blanco y efluente al Río Llancahue, que a su vez corresponde a uno de los tributarios del

Lago Calafquén. El efluente de este último es el Río Hueninca, el cual desemboca en el Lago Pullinque. El emisario de este último es el Río Huanehue que corresponde a otro afluente principal del Lago Panguipulli. El único efluente de este último lago nombrado corresponde al Río Enco, ubicado en la rivera sureste del lago y el cual desemboca en el Lago Riñihue (DGA, 1995). El efluente de este último corresponde al Río San Pedro, el cual se une con el Río Quilchilca para formar el Río Calle-Calle, uno de los principales tributarios del Río Valdivia que desemboca en la Bahía de Corral. (DGA, 2004).

iii. Cuenca Río Bueno

La hoya hidrográfica del Río Bueno tiene una extensión de 15.366 km², siendo la quinta cuenca más grande de Chile. En el tercio oriental de esta cuenca es donde se encuentra una gran densidad de lagos de distintos tamaños (DGA, 2004).

El Lago Maihue, uno de los más al norte de la cuenca, recibe sus aguas principalmente del Río Hueinahue, Río Melipue y al norte del Río Pillanleufú; su efluente corresponde a uno de los afluentes del Lago Ranco, el Río Calcurrupe. Los otros principales afluentes del Ranco son el Río Nilahue y el Río Caunahue.

El Lago Gemelas y el Lago Gris son unos de los lagos que se ubican casi en la línea limítrofe con Argentina, el Gemelas recibe sus aguas de aportes nivales y precipitaciones, su efluente corresponde al Río Chol Chol, que a su vez corresponde al tributario principal del Lago Gris. El efluente de este último, el Río Blanco, es a su vez afluente del Lago Huishue. El emisario del Lago Huishue corresponde al Río Melipue que es a su vez tributario del Lago Maihue, como se hizo mención anteriormente (Flández, s.f.).

El Río Bueno nace como efluente del Lago Ranco y luego de 130 km de recorrido desemboca en el Océano Pacífico al norte de la punta Dehui (DGA, 2004).

Siguiendo hacia el Sur se encuentra el Lago Puyehue, que tiene como emisario al Río Pilmaiquén que a su vez es tributario del Río Bueno. El afluente principal del Lago Puyehue corresponde al Río Golgol, que a través de un subtributario (Río Bonito) desagua el Lago Constancia, que está situado casi en límite entre Chile-Argentina (DGA, 2009).

El último de los lagos Norpatagónicos de la cuenca del Río Bueno corresponde al Lago Rupanco, que al igual que el Lago Puyehue su efluente, el Río Rahue, es tributario del Río Bueno. Por su parte, tiene como afluentes al Río Gaviotas, Bonito y Puleufú (DGA, 2004).

iv. Cuenclas e Islas entre Río Bueno y Río Puelo

Las cuencas e Islas entre el Río Bueno y Río Puelo tienen una extensión de 13.507 km². Así, como su nombre lo dice, no se trata más que de un conjunto de cuencas, entre las que se encuentran las cuencas del Río Maullín (3.971 km²), la del Río Petrohue (2704 km²) y del Río Chamiza (814 km²) como las más relevantes para este trabajo, ya que son en las que se encuentran los lagos en estudio (DGA, 2014).

En la cuenca del Río Maullín es en la cual se encuentra el Lago Llanquihue, este corresponde al segundo lago con mayor superficie del país, su efluente corresponde al río por el cual la cuenca recibe este nombre; además, este lago se caracteriza por tener tributarios cortos, encontrándose como el más relevante el Río Pescado (DGA, 2004).

Por otro lado, la cuenca del Río Petrohué, es la que alberga el Lago Todos los Santos, se alimenta principalmente del Río Negro y el Río Blanco y su único efluente corresponde al Río Petrohué que desemboca en el extremo norte del estuario de Reloncaví, en la ensenada de Ralún en donde forma un amplio delta (DGA, 2009).

Finalmente, el Lago Chapo se alimenta principalmente del Río Negro, Río del Este y Río León; y desagua hacia el océano a través del Río Coihuin, que luego, más abajo, toma el nombre de Río Chamiza (Nakagawa, 1969).

5.1.3 Cuencas Lacustres

Un lago y su cuenca de drenaje constituyen una sola unidad, donde las características del cuerpo de agua están profundamente influenciadas por los procesos que se desarrollan en la cuenca (Tundisi, 1987, Tundisi & Matsumura-Tundisi, 1995). El estudio comparativo de los sistemas acuáticos requiere del conocimiento acabado de las características morfológicas de los lagos, más cuando muchas de las características físicas, químicas y biológicas de la columna de agua, están directamente relacionadas con la morfología de los ambientes lacustres. Por esto es necesario conocer de manera cuantitativa las diversas formas de los cuerpos acuáticos, para analizar y comparar las características de los diferentes lagos de manera integral.

En la Figura 6, se pueden observar las 23 cuencas lacustres junto a sus lagos. Cabe mencionar que primando la caracterización limnológica de cada cuerpo de agua individualmente, es que se considera como área aportante, solo aquel territorio que no está vinculado al área aportante de otro lago aguas arriba.

En la Tabla 10 y 11, se encuentran los parámetros morfométricos de los lagos araucanos considerados en el presente estudio, siendo el Lago Llanquihue el que cuenta con mayor línea de costa y superficie, con valores de 206,05 km y 867,14 km², respectivamente; en comparación con el Lago Tinquilco, el cual posee valores de 6,23 km y 1,04 km², ubicándose como el cuerpo lacustre de menor tamaño. Además, Lago Llanquihue destaca por poseer el mayor volumen, longitud máx., ancho máx. y ancho medio, con valores de 158,6 km³, 42,3 km, 39 km y 20,5 km; respectivamente. Respecto a la profundidad, el Lago Todos los Santos presenta valores de 337 m y 191 m, para valor máximo y medio, por lo que se ubica en primer

lugar en cuanto a este parámetro; por el contrario el lago Pullinque con valores de 25 m y 12,2 m para profundidad máxima y profundidad media, respectivamente. Cabe destacar que la profundidad no está disponible para el total de los lagos en estudio, los lagos sin este dato son el Colico, Huilpilún, Huishue, Gemelas, Gris y Constancia. Por otro lado, el Lago Llanquihue presenta el valor mayor de profundidad de criptodepresión con un valor de 266 m.

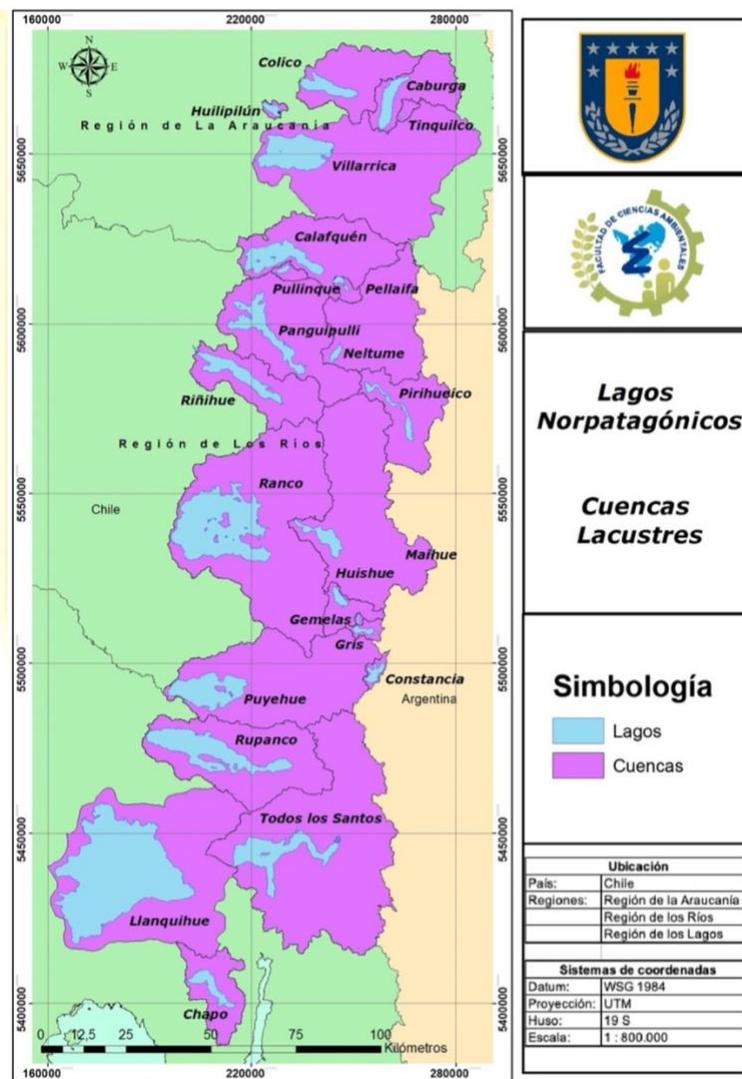


Figura 6: Cuencas Lacustres Lagos Norpatagónicas.
Fuente: Elaboración propia en software ArcMap.

Con respecto al área de drenaje, el mayor valor corresponde a 2187,9 km², correspondiente al Lago Todos los Santos, en contraste con el Lago Gemelas con

un área de 6,9 km². En cuanto al tiempo de residencia de sus aguas, el Lago Llanquihue es el que tiene el mayor valor con 74 años teóricos (Campos, *et al.*, 1988), por lo que se espera cierta capacidad de amortiguación dado que este lago tiene la habilidad de absorber grandes entradas de agua, contaminantes y sedimentos sin que se muestren efectos negativos inmediatos, dificultando la detección de problemas de degradación.

Si bien de los Lagos Huilipilún, Tinquilco, Huishue, Gemelas, Gris y Constanza no se encontraron de profundidad, volumen y tiempo de renovación, se destaca la altitud de este último, ya que es el que presenta mayor elevación, con un valor de 1303 m.s.n.m., por el contrario se encuentra el Lago Llanquihue con 53 m.s.n.m.

Para estudios tipológicos, los parámetros morfológicos corresponden a datos sobre las condiciones naturales de la zona de estudio, ya que son características permanentes. En este caso, según la DMA, la superficie, la profundidad y la geología de la cuenca son los descriptores más relevantes ya que explican la variabilidad natural de los componentes biológicos y abióticos de apoyo (variables fisicoquímicas). Sin embargo, para el caso del presente estudio, la limitante es no contar con las profundidades de todos los lagos a considerar en la tipología.

Tabla 10: Parámetros morfométricos de los lagos Norpatagónicos.

| Parámetros/lagos | Unidad | Colico | Caburgua | Huilipilún | Tinquilco | Villarrica | Calafquén | Pullinque | Pellaifa | Panguipulli | Neltume | Riñihue | Pirihueico |
|-----------------------------------|-----------------|----------|------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|----------|-------------|----------|----------|------------|
| Latitud | - | 39°04' S | 39°07,5' S | 39°08' S | 39°09' S | 39°15' S | 39°32' S | 39°33' S | 39°36' S | 39°43' S | 39°47' S | 39°50' S | 39°57' S |
| Longitud | - | 72°01' O | 71°45,5' O | 72°09' O | 71°43' O | 72°05' O | 72°09' O | 72°08' O | 71°57' O | 72°13' O | 71°59' O | 72°20' O | 71°48' O |
| Altitud | m.s.n.m | 327 | 470 | 344 | 769 | 215 | 204 | 199 | 221 | 131 | 197 | 107 | 603 |
| Longitud máxima | km | 17,4 | 16,5 | 6,1 | 2,6 | 23,1 | 25,1 | 5 | 6,4 | 28,3 | 6,3 | 27 | 23 |
| Ancho máximo | km | 5,3 | 3,7 | 2,7 | 0,6 | 11,2 | 7,8 | 1,73 | 1,9 | 9,7 | 2,4 | 5 | 2,4 |
| Ancho medio | km | 3,2 | 3,1 | 1,8 | 0,4 | 7,6 | 4,7 | 1,2 | 1,1 | 4,1 | 1,5 | 2,9 | 1,3 |
| Perímetro o línea de costa | km | 50,59 | 46,86 | 18,00 | 6,23 | 74,34 | 83,07 | 23,15 | 18,47 | 126,51 | 21,72 | 79,45 | 66,43 |
| Área superficial | km ² | 56,06 | 51,74 | 11,22 | 1,04 | 174,75 | 94,86 | 6,01 | 6,83 | 114,27 | 9,75 | 89,61 | 31,05 |
| Desarrollo de línea de costa | - | 1,91 | 1,04 | 0,86 | 0,97 | 0,90 | 1,36 | 1,50 | 1,12 | 1,88 | 1,11 | 1,34 | 1,90 |
| Profundidad máx. | m | >100 | 327 | >20 | 25 | 165 | 214 | 25 | 93 | 268 | 86 | 323 | 144 |
| Profundidad media | m | S.I. | 180 | S.I. | 17,5 | 120 | 114 | 12,2 | 48,5 | 119,8 | 59,7 | 154,7 | 57 |
| Profundidad criptodepresión | m | S.I. | 0 | S.I. | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 137 | 0 | 216 | 0 |
| Relación prof.media/prof.máx | - | S.I. | 0,52 | S.I. | 0,65 | 0,727 | 0,54 | 0,51 | 0,52 | 0,47 | 0,67 | 0,5 | 0,42 |
| Volumen | km ³ | S.I. | 8,88 | S.I. | 0,02 | 20,99 | 13,33 | 0,07 | 0,34 | 13,66 | 0,58 | 13,84 | 1,80 |
| Área de drenaje | km ² | 458,13 | 328,25 | 25,96 | 24,54 | 1658,27 | 687,12 | 37,05 | 40,85 | 883,43 | 766,16 | 481,47 | 445,08 |
| Relación A.drenaje /A.superficial | - | 8,1 | 6,3 | 2,3 | 24,5 | 9,49 | 5,9 | 6,2 | 6 | 7,7 | 79,1 | 5,4 | 14,1 |
| Tiempo de renovación teórico | años | S.I. | 7,7 | S.I. | S.I. | 4 | 2,9 | S.I. | S.I. | 1,4 | 0,2 | 1,4 | 1 |

Fuente: Elaboración propia a partir de software Google Earth, ArcGis y revisión bibliográfica.

Tabla 11: Parámetros morfométricos de los lagos Norpatagónicos (continuación).

| Parámetros/Lagos | Unidad | Ranco | Maihue | Huishue | Gemelas | Gris | Constancia | Puyehue | Rupanco | Llanquihue | Todos Los Santos | Chapo |
|-----------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|------------------|------------|
| Latitud | - | 40°13' S | 40°17' S | 40°26' S | 40°29' S | 40°31' S | 40°38' S | 40°40' S | 40°40' S | 41°08' S | 41°08' S | 41°27,5' S |
| Longitud | - | 72°23' O | 72°02' O | 71°59' O | 71°55' O | 71°54' O | 71°52' O | 72°28' O | 72°28' O | 72°47' O | 72°12' O | 72°30' O |
| Altitud | m.s.n.m | 64 | 91 | 507 | 1052 | 1052 | 1301 | 187 | 123 | 53 | 189 | 233 |
| Longitud máxima | km | 30,4 | 11,1 | 6,9 | 3 | 6,2 | 7,7 | 23,5 | 39,7 | 42,3 | 35,3 | 15 |
| Ancho máximo | km | 26,2 | 6 | 3 | 0,8 | 2,2 | 4,7 | 11,3 | 9,1 | 39 | 9,5 | 5,6 |
| Ancho medio | km | 14,6 | 4,2 | 2 | 0,6 | 1,4 | 2,3 | 7,1 | 5,9 | 20,5 | 5,1 | 3,02 |
| Perímetro o línea de costa | km | 203,04 | 53,25 | 22,23 | 7,23 | 20,52 | 28,44 | 94,10 | 155,26 | 206,05 | 151,80 | 55,63 |
| Área superficial | km ² | 429,87 | 48,97 | 13,39 | 1,78 | 9,48 | 18,10 | 159,04 | 234,91 | 867,14 | 177,02 | 46,17 |
| Desarrollo de línea de costa | - | 1,56 | 1,21 | 0,97 | 0,86 | 1,06 | 1,06 | 1,19 | 1,61 | 1,11 | 1,82 | 1,30 |
| Profundidad máx. | m | 200 | 220 | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | 121 | 274 | 317 | 337 | 298 |
| Profundidad media | m | 118,7 | 130 | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | 74,5 | 163 | 182 | 191 | 177,2 |
| Profundidad criptodepresión | m | 136 | 129 | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | 0 | 151 | 266 | 148 | 65 |
| Relación prof.media/prof.máx | - | 0,61 | 0,58 | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | 0,62 | 0,59 | 0,57 | 0,56 | 0,61 |
| Volumen | km ³ | 50,96 | 6,34 | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | 11,79 | 38 | 158,6 | 34,4 | 8,06 |
| Área de drenaje | km ² | 2025,3 | 1343 | 135,7 | 6,9 | 44,97 | 38,98 | 1265,02 | 983,67 | 2104,39 | 2187,9 | 321,91 |
| Relación A.drenaje /A.superficial | - | 4,7 | 27,5 | 10,1 | 4 | 4,8 | 2,2 | 8 | 4,2 | 2,43 | 12,4 | 7,1 |
| Tiempo de renovación teórico | años | 4,8 | 1,3 | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | 3,4 | 8,5 | 74 | 4 | 5,5 |

S.I.= sin información.

Fuente: Elaboración propia a partir de software Google Earth, ArcGIS y revisión bibliográfica.

i. Sistemas Lacustres

En el área de estudio existen sistemas lacustres que involucran la inclusión de unidades sucesivas. Como se aprecia en la Figura 7, el caso de los siete lagos es el más representativo, ya que presentan una linealidad de escorrentía. El punto de partida se origina en el Lago Lacar (Argentina), siendo el Río Huahum el efluente que a su vez corresponde al afluente del Lago Pihueico, en donde su efluente se junta con el efluente del Lago Neltume para ser el Río Llanquihue tributario del Lago Panguipulli. Por la parte alta se encuentran los lagos Pellaifa, Calafquén y Pullinque, los que fluyen igualmente al lago Panguipulli que desemboca a través del Río Enco en el Lago Riñihue, siendo este último considerado como el eslabón final de las unidades sucesivas.

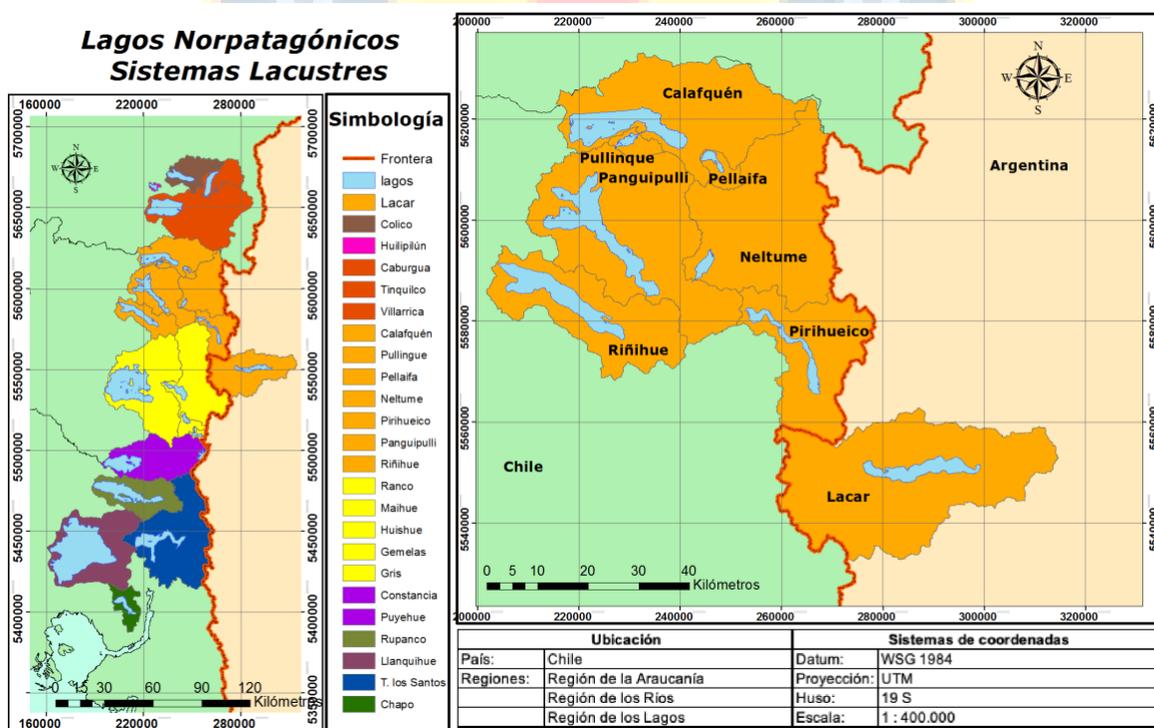


Figura 7: Sistemas Lacustres en Lagos Norpatagónicos.
Fuente: Elaboración propia en software ArcMap.

Por otro lado, considerando al Tratado de 1881 que fijó las fronteras desde el norte hasta el paralelo 52° S: La línea fronteriza correrá en esa extensión por las cumbres

más elevadas de dicha Cordillera que dividan las aguas y pasará por entre las vertientes que se desprenden a un lado y otro (Gonzales, 1970).

Lo que fijó la mayoría de los límites nacionales administrativos que poseen la cuencas, pero para el caso del Lago Lacar derivó en el arbitrio real inglés de 1902, en donde se falla que la frontera está compuesta por la línea divisoria de aguas sobre el Cerro Pirihueico hasta su terminación austral en el Valle del Río Huahum, por lo que la parte más alta correspondiente a la hoya hidrográfica del río Valdivia se encuentra en la República Argentina. (Fallo Límites Chile Argentina. 1902. Art V.21). Esto nos evidencia lo que ocurre en muchos lugares del país en donde la división político-administrativa de los estados nacionales interrumpe la línea divisora de aguas que limitan la cuenca, haciendo de la tarea de la gestión integrada de estas un asunto internacional.

Otros sistemas lacustres que se encuentran son los Lagos Tinquilco y Caburgua que fluyen hacia el Lago Villarrica; así como también el Lago Gemelas, Gris, Huishue, Maihue y Ranco. Lo mismo ocurre con el Lago Constanza y Puyehue, en donde se evidencia que el balance del agua de un lago puede ser significativamente controlado por las corrientes efluentes de un lago ubicado corriente arriba.

5.1.4. Geología

La geología y los entornos tectónicos son factores que influyen en las propiedades del suelo, la morfología del paisaje, los patrones hidrológicos, el tipo de acuíferos y, en consecuencia, la biodiversidad y los hábitats del área de captación de los lagos (Steinbruch, 2010). Es por esta razón que la geología se considera como una de las variables con mayor relevancia en la tipología de lagos.

En la Figura 8, se puede apreciar la distribución según las abreviaturas de las secuencias que describen el intervalo de edad para cada área de drenaje de los

lagos, según el Mapa Geológico de Chile escala 1:1.000.000. (SERNAGEOMIN, 2002). En el anexo 1, se encuentra la descripción de cada abreviatura presente en la zona de estudio.

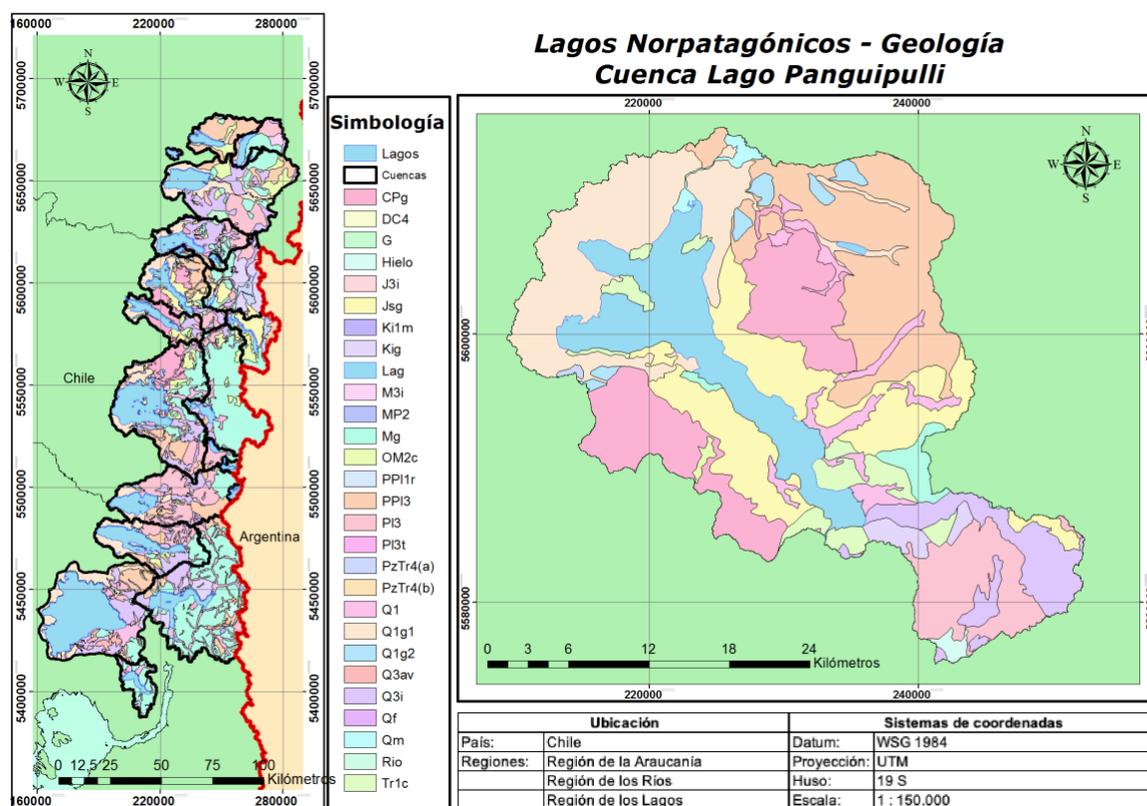


Figura 8: Geología de las Cuencas de los Lagos Norpatagónicos.
Fuente: Elaboración propia en software ArcMap.

La geología, al igual que la superficie y profundidad, corresponden a uno de los descriptores de tipo más relevantes, ya que explican la variabilidad natural de la zona de estudio. Según la DMA, para la realización de la tipología se necesita tener conocimiento si se está presente ante geología Silíceea, Calcárea u Orgánica (DMA, 2000). Lamentablemente, en este caso el mapa geológico de Chile entrega información sobre las edades geológicas, por lo que a través de la descripción de las edades se llegó a la interpretación química de la composición de las rocas que se encuentran en la zona de estudio, despreciando la geología orgánica, ya que no se cuenta con la disponibilidad de información que permita la obtención de estos

datos. En la Tabla 12, se puede observar las abreviaturas que corresponden a geología Silíceo, Calcáreo, Mixto u Otros. Del total de los códigos, sólo uno corresponde a calcáreo, mientras que tres corresponden a Silíceos y Calcáreos. El tipo “otros” corresponde a Glaciar, Hielo, Lago y Río.

Tabla 12: Tipo de Geología al que corresponden los códigos.

| Tipo | Códigos |
|----------|---|
| Silíceo | CPg , Jsg , Kig , M3i , Mg ,MP2 , OM2c , PI3 , PI3t , PPI1r , PPI3 , PzTr4(a) , PzTr4(b) , Q1 , Q1g1 , Q1g2 , Q3av , Q3i , Qf ,Qm |
| Calcáreo | Ki1m |
| Mixto | DC4 , J3i , Tr1c |
| Otros | G , Hielo, Lag , Río |

Fuente: Elaboración propia a partir de descripción códigos..

En el Anexo 2, se puede ver el porcentaje de cada tipo geológico presente en las cuencas lacustres de los lagos Norpatagónicos. Siendo el porcentaje de Geología Silíceo la que se encuentra en mayor cantidad en todas las cuencas, de hecho, en la mayoría de estas con porcentajes sobre el 75%. La cuenca del Lago Todos los Santos es la única que presenta un 0,3% de geología calcárea. Es por esta razón que para el estudio tipológico se desprecia la geología calcárea y sólo se considera la geología silíceo y, la geología de glaciar - hielo para observar la influencia de estos últimos en el ambiente de los lagos.

5.1.5 Clima

Las características climáticas de Chile varían de norte a sur y están relacionadas con distintos factores que son encargados de determinar los rasgos fundamentales del clima del país. Dentro de estos factores se encuentran: la gran extensión en términos de latitud, la presencia de las cordilleras de la Costa y de los Andes, la existencia de la fría corriente de Humboldt, así como también la presencia del Anticiclón del Pacífico y del Frente Polar (BCN, s.f.).

Por otro lado, actualmente, la necesidad de comprender el comportamiento del clima en las distintas zonas del mundo ha cobrado relevancia, debido a que este es un factor decisivo en la planificación de las actividades que se dan en cada localidad. Entre las distintas clasificaciones climáticas, la clasificación de Köppen es la más utilizada debido a su objetividad y simplicidad (Sarricolea *et al.*, 2017).

En Chile, la clasificación de Köppen-Geiger ha sido implementada por Fuenzalida-Villegas (1965), Fuenzalida-Ponce (1971) y actualmente, por Sarricolea *et al.* (2017), siendo esta última la utilizada para definir las características climáticas de los lagos Norpatagónicos. En la imagen 9, se puede apreciar la distribución que se da según la clasificación de Köppen-Geiger en la zona de estudio.

Para comprender, la Clasificación de Köppen, es una estructura jerárquica de al menos tres órdenes: el primero corresponde a cinco tipos de clima que siguen las bandas latitudinales según temperatura y disponibilidad de agua, siendo A (tropical), B (árido), C (templado), D (frío) y E (polar). El segundo criterio es de carácter pluviométrico, en donde los climas tropicales incluyen Af (precipitación del mes más seco superior a 60 mm), Am (sequía monzónica) y Aw (climas de sabana). Para los climas C y D, el segundo orden indica una estación seca de verano con una 's' (Cs y Ds), 'w' en invierno (Cw y Dw), y 'f' para climas sin estación seca (Cf y Df). Para los climas B y E, el segundo orden se escribe con mayúscula (W, S, T y F) y clasifica los climas en desierto (BW), semiárido (BS), tundra (ET) y capa de hielo (EF). El último indica las condiciones térmicas y se utiliza en los climas B, C y D; Los climas B pueden ser 'h' (cálido) (BWh y BSh) o 'k' (frío) (BWk y BSk); para climas templados, el tercer orden indica condiciones de Subtropical (a), Templado (b), y Subpolar en la cual el mes más cálido no supera los 22°C y las temperaturas medias mayores a 10°C se dan por lo menos cuatro meses al año (c); y para climas D, el tercer orden incluye a, b, y c, así como una variante fría (d) (Sarricolea *et al.*, 2017).

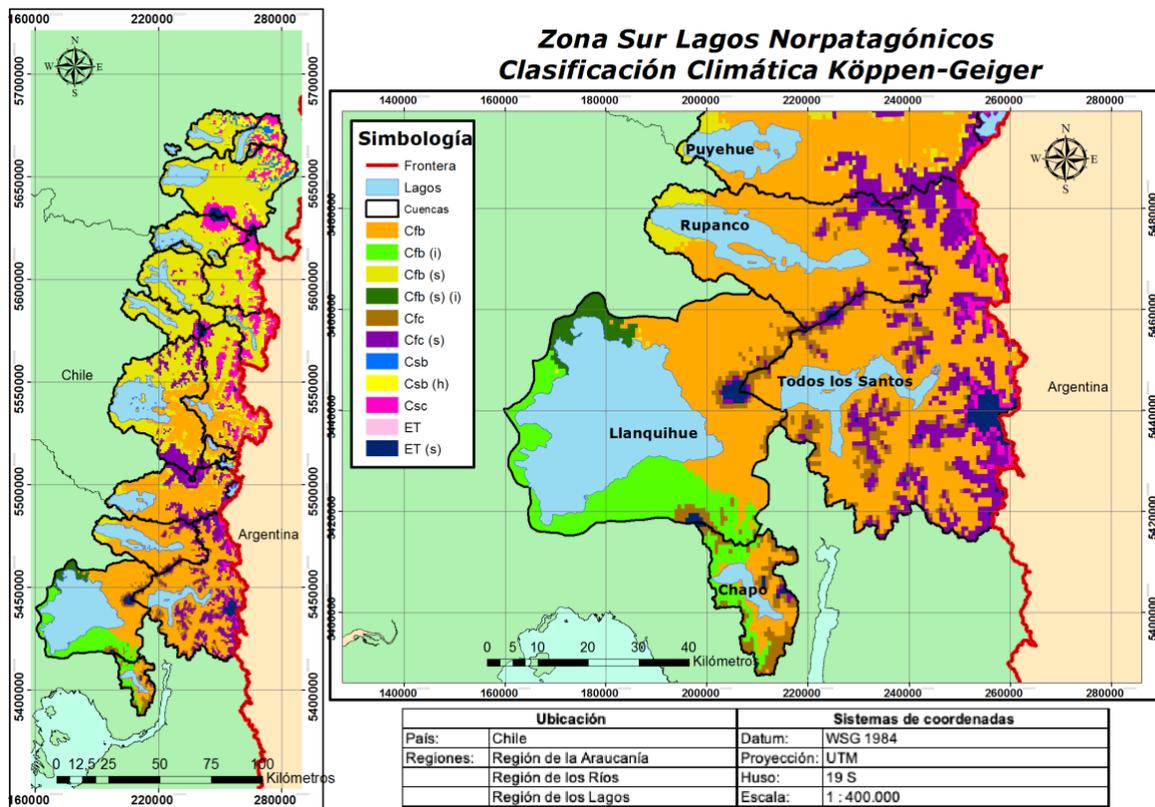


Figura 9: Clasificación de Köppen-Geiger en cuencas Lagos Norpatagónicos.
Fuente: Elaboración propia en software ArcMap.

Dentro del área de estudio, como se aprecia en la Figura 9, se encuentran once órdenes climáticos. En la tabla 13 se encuentra la correspondencia de las abreviaturas al clima y en el anexo 3 se encuentra una breve descripción del comportamiento que presenta cada clima.

Debido a la diversidad climática de Chile, el carácter (h) se añadió a la clasificación en Sarricolea *et al.* (2017) para hacer referencia a aquellas zonas mediterráneas con una elevación superior a los 1000 m.s.n.m., (s) para las zonas con veranos secos, e (i) para la influencia oceánica, que según este autor, asume la variable de BIO7 de Pliscoff *et al.* 2014, para aquellos lugares en donde el rango de temperatura no excede los 16-17°C, de acuerdo a la clasificación Rivas-Martínez *et al.*, (2002), la cual implica un clima con una mayor influencia oceánica (Amigo *et al.*, 2007).

Tabla 13: Climas clasificados acorde a Köppen-Geiger presentes en el área de estudio.

| Clasificación de Köppen | Clima |
|-------------------------|--|
| Cfb | Clima templado lluvioso |
| Cfb (i) | Clima templado lluvioso e influencia costera |
| Cfb (s) | Clima templado lluvioso con leve sequedad estival |
| Cfb (s) (i) | Clima templado lluvioso con leve sequedad estival e influencia costera |
| Cfc | Clima templado lluvioso frío |
| Cfc (s) | Clima templado lluvioso frío con leve sequedad estival |
| Csb | Clima mediterráneo de lluvia invernal |
| Csb (h) | Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura |
| Csc | Clima mediterráneo frío de lluvia invernal |
| ET | Clima de tundra |
| ET (s) | Clima de tundra de lluvia invernal |

Fuente: Elaboración propia a partir de Sarricolea et al. (2017).

Como se aprecia en la Figura 9, casi la totalidad de la zona de estudio presenta clima de primer orden con letra C, que corresponde a clima templado. Desde la mitad del territorio que abarcan las cuencas lacustres hacia el Norte predomina la clasificación Cfb (s) – Clima templado lluvioso con leve sequedad estival, es decir, desde el Lago Ranco hacia arriba el clima corresponde en su mayoría a templado lluvioso pero con veranos secos. En el sector norte, llama la atención que entre el Lago Colico y el Lago Caburgua se tiene la clasificación Csb y Csb (h) que corresponde al clima mediterráneo de lluvia invernal con y sin altura, encontrándose sólo en ese lugar de la zona de estudio. Por otro lado, el clima Csc, que corresponde a clima mediterráneo frío de lluvia invernal, se encuentra presente a lo largo de toda la zona de estudio en pequeñas proporciones en las partes más altas de las cuencas. Desde el Lago Ranco hacia el Sur, el clima templado lluvioso (Cfb) es el que se encuentra en mayor proporción, este se caracteriza por presentar una temperatura promedio del mes más frío menor a 18°C y mayor a 0°C (Peel *et al.* 2007). En las partes altas de las cuencas de la zona sur también se observa el clima Cfc (s), que corresponde a templado lluvioso frío con leve sequedad estival. Al Suroeste de los Lagos Llanquihue y Chapo se aprecia el clima Cfb (i), que pertenece al clima templado lluvioso e influencia costera. Al norte del Lago Llanquihue se aprecia un remanente de la estacionalidad seca marcada dentro de un clima

templado lluvioso de influencia oceánica. Finalmente, al Sur del Lago Chapo se observa el clima templado lluvioso frío (Cfc).

5.1.6 Áreas Protegidas

Las áreas protegidas corresponden a uno de los instrumentos de gestión de la biodiversidad más relevantes y comúnmente utilizadas para asegurar la conservación del patrimonio natural y sus valores asociados. Estas áreas están destinadas a mantener ecosistemas naturales, actuar como protectoras para biodiversidad y mantener los variados procesos ecológicos; asimismo, estas benefician directamente a los seres humanos ya que son proveedoras de bienes y servicios ecosistémicos y conservan su patrimonio cultural (MMA, 2015).

En Chile, la riqueza natural es protegida por el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), el cual es administrado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), a cargo del Ministerio de Agricultura, abarcando una superficie de 18.620.139 ha, sumando un total de 106 Áreas Silvestres Protegidas del Estado (ASPE) (42 Parque Nacionales, 46 Reservas Nacionales y 18 Monumentos Naturales) distribuidas en todas las regiones administrativas del país (CONAF, s.f.). Adicionalmente, se encuentran los Santuarios de la Naturaleza, que son áreas administradas por el Consejo de Monumentos Nacionales a cargo del Ministerio de las Culturas, las Artes y el Patrimonio. En el Anexo 4, se encuentran los objetivos de las 4 de categorías de protección definidas para Chile.

De Norte a Sur, en el área de estudio se presentan las siguientes Áreas Silvestres Protegidas comprendidas dentro del SNASPE: la Reserva Forestal Villarrica (60.005 ha), Parque Nacional Huerquehue (12.500 ha), Parque Nacional Villarrica (53.460 ha), Reserva Nacional Mocho-Choshuenco (7.537 ha), Parque Nacional Puyehue (106.757 ha), Parque Nacional Vicente Pérez Rosales (253.568 ha), Reserva Forestal Llanquihue (33.972 ha) y Parque Nacional Alerce Andino (39.255 ha). En

la Figura 10, se puede apreciar la distribución de estas áreas dentro de la zona de estudio.

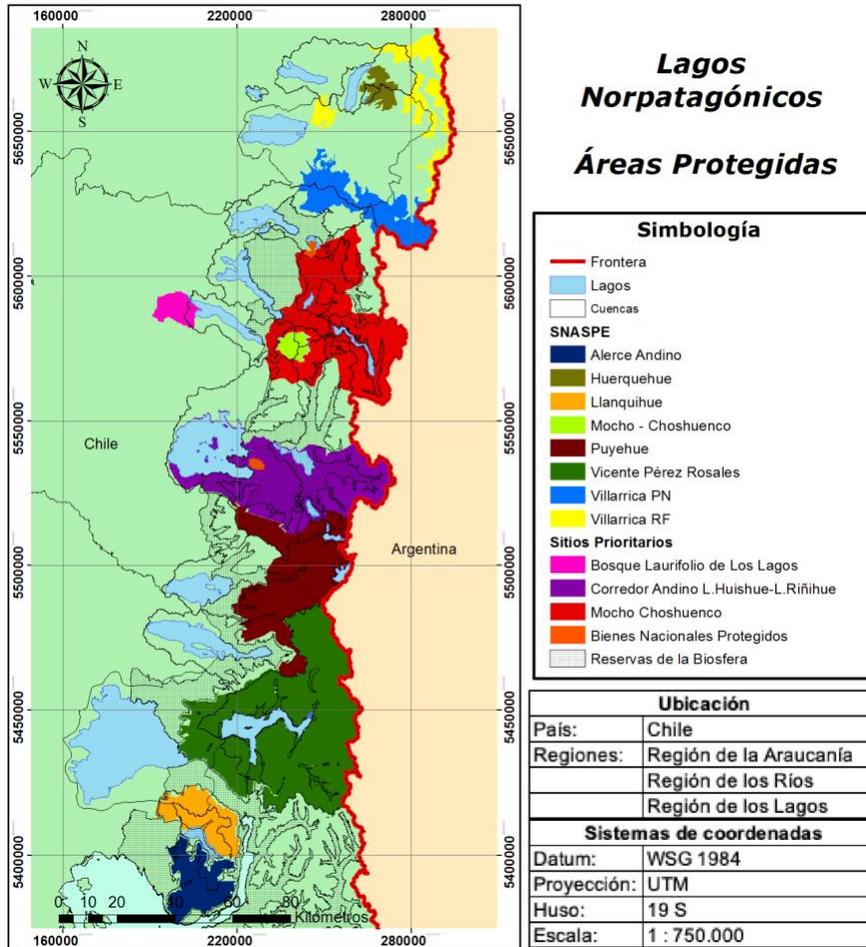


Figura 10: Distribución de Áreas Silvestres Protegidas, Sitios Prioritarios, Bienes Nacionales Protegidos y Reservas de la Biósfera
 Fuente: Elaboración a partir de CONAF (2016), MBIENES (2021), MMA (2015) y MMA (2021).

Además, existen otras iniciativas de protección que no corresponden a la categoría de áreas protegidas oficiales, pero que si las complementan y aportan en lograr sus objetivos como lo son las Reservas de la Biósfera, sitios Ramsar, Sitios del Patrimonio Mundial, los Sitios Prioritarios para la conservación de la Biodiversidad, Los Bienes Nacionales Protegidos y los Paisajes de Conservación. Por otra parte, existen las Iniciativas de Conservación Privada (ICP), las que tienen como tarea

conservar y proteger la biodiversidad. (MMA, 2018). En la zona de estudio existen 2 Reservas de la Biósfera llamados Araucarias (1.142.850 ha) y Bosques Templados Lluviosos de los Andes Australes (2.168.956 ha) (CONAF, s.f.), 3 Sitios Prioritarios para la conservación de la Biodiversidad que son: Bosque Laurifolio de los Lagos (12.933 ha), Mocho-Choshuenco (150.112 ha) y Corredor Andino Lago Huishue y Lago Riñihue (178.247 ha) ; 2 Bienes Nacionales Protegidos: Cerro Illi (1.715 ha) y Pellaifa (1.371 ha) ;y, 1 Paisaje de Conservación llamado Río San Pedro (MBIENES, s.f). De igual forma, también se encuentran sitios de Conservación Privada, correspondientes a un total de 827 unidades (112.000 ha aproximadamente).

5.1.7 Flora

La vegetación, definida como la forma en que los componentes vegetales del ecosistema ocupan el espacio, puede ser usada como un buen sustituto de ecosistema completo porque los componentes vegetales permiten la entrada de energía a los ecosistemas, concentran la mayor proporción de biomasa y productividad de estos, reflejan la influencia ambiental y definen la estructura espacial de los mismos (MMA,2018).

Es por esto, que en Chile, la clasificación de ecosistemas terrestres da cuenta de 127 ecosistemas, (que más bien se refiere a pisos vegetacionales asimilados a ecosistemas), que se agrupan en 19 formaciones vegetacionales, como bosques nativos, desierto absoluto, estepas y pastizales, herbazales, matorrales y turberas, entre otros. La distribución espacial de los ecosistemas terrestres del país está regionalmente modelada por los factores del clima (Luebert & Pliscoff, 2017).

Luebert y Pliscoff, fueron los encargados de representar los ecosistemas terrestres de Chile, y además, analizaron el estado de conservación de estos, el cual se definió según la aplicación de la metodología de la Unión Internacional para la

Conservación de la Naturaleza (UICN). Esta consiste en la evaluación principalmente de cinco criterios basados en los síntomas de riesgo de perder sus características representativas. En orden de mayor a menor riesgo, las categorías son: Ecosistema colapsado (CO), en peligro crítico (CR), en Peligro (EN), vulnerable (VU), Casi amenazado (NT) y Preocupación menos (LC). Dentro de estas categorías se llaman “amenazadas” sólo a tres: CR, EN y VU (ya que CO corresponde a ecosistema extinto y las otras presentan riesgo menor).

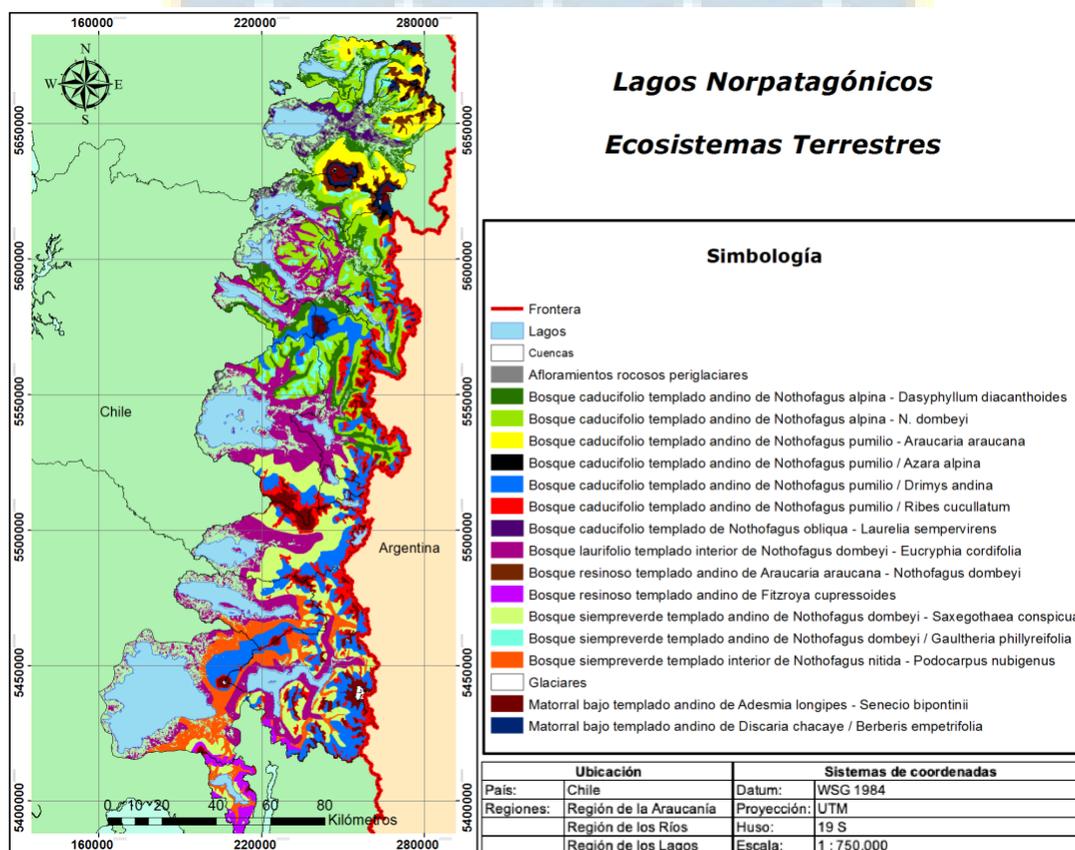


Figura 11: Ecosistemas terrestres o pisos vegetacionales presentes en la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia a partir de Pliscoff (2017).

En la Figura 11, se observa que para la zona de estudio que comprenden las 23 cuencas lacustres se encuentran 17 ecosistemas o pisos vegetacionales, asociados a 5 formaciones vegetacionales (Bosque caducifolio, Bosque laurifolio, Bosque resinoso de coníferas, Bosque siempreverde y Matorral bajo de altitud). En la tabla

14, se aprecia cada uno de los pisos vegetacionales junto a su código, categoría y área en km² presente en la zona de estudio y en el Anexo 5, se presenta una caracterización de los ecosistemas presentes en la zona de estudio en cuanto a su distribución y a la dinámica del ecosistema.

Tabla 14: Código ecosistema, nombre, categoría y área en zona de estudio.

| Código | Nombre | Categoría | Área(km ²) |
|--------|---|-----------|------------------------|
| P54 | Bosque caducifolio templado de <i>Nothofagus obliqua</i> - <i>Laurelia sempervirens</i> | Muy Alta | 296,274 |
| P58 | Bosque caducifolio templado andino de <i>Nothofagus alpina</i> - <i>Dasyphyllum diacanthoides</i> | Muy Alta | 982,089 |
| P59 | Bosque caducifolio templado andino de <i>Nothofagus alpina</i> - <i>N. dombeyi</i> | Media | 1537,08 |
| P61 | Bosque caducifolio templado andino de <i>Nothofagus pumilio</i> - <i>Araucaria araucana</i> | Media | 520,349 |
| P62 | Bosque caducifolio templado andino de <i>Nothofagus pumilio</i> / <i>Drimys andina</i> | Media | 1592,85 |
| P64 | Bosque caducifolio templado andino de <i>Nothofagus pumilio</i> / <i>Azara alpina</i> | Media | 78,6016 |
| P65 | Bosque caducifolio templado andino de <i>Nothofagus pumilio</i> / <i>Ribes cucullatum</i> | Baja | 877,121 |
| P73 | Bosque laurifolio templado interior de <i>Nothofagus dombeyi</i> - <i>Eucryphia cordifolia</i> | Media | 2262,61 |
| P75 | Bosque resinoso templado andino de <i>Araucaria araucana</i> - <i>Nothofagus dombeyi</i> | Baja | 263,929 |
| P78 | Bosque resinoso templado andino de <i>Fitzroya cupressoides</i> | Baja | 201,38 |
| P81 | Bosque siempreverde templado andino de <i>Nothofagus dombeyi</i> / <i>Gaultheria phillyreifolia</i> | Media | 344,364 |
| P82 | Bosque siempreverde templado andino de <i>Nothofagus dombeyi</i> - <i>Saxegothaea conspicua</i> | Baja | 1230,8 |
| P84 | Bosque siempreverde templado interior de <i>Nothofagus nitida</i> - <i>Podocarpus nubigenus</i> | Media | 784,745 |
| P114 | Matorral bajo templado andino de <i>Discaria chacaye</i> / <i>Berberis empetrifolia</i> | Media | 152,294 |
| P115 | Matorral bajo templado andino de <i>Adesmia longipes</i> - <i>Senecio bipontinii</i> | Media | 611,944 |
| P126 | Afloramientos rocosos periglaciares | Alta | 2,88448 |
| P127 | Glaciares | Muy Alta | 18,8063 |

Fuente: Elaboración propia a partir de Pliscoff (2017).

En las cuencas de los lagos presentes en la Región de la Araucanía se puede apreciar en abundancia la presencia de Bosques caducifolios templados junto a matorral bajo templado andino, dentro de estos ecosistemas la mayoría presenta amenaza media, por lo que se infiere se encuentran dentro de las amenazas EN y/o

VU, sin embargo, presentan dos pisos vegetacionales en categoría muy alta, que se refiere a peligro crítico (CR) que son Bosque caducifolio templado de *Nothofagus obliqua* - *Laurelia sempervirens* y Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus alpina* - *Dasyphyllum diacanthoides* ocupando 296 km² y 982 km², respectivamente de la zona de estudio, lo que representa el 7,8% aproximadamente, sin considerar el área sin vegetación que se refiere a áreas rocosas, glaciares o hielos, en donde estos últimos corresponden también a una categoría muy alta pero con sólo 18, 8 km², equivalentes al 0,11% de la zona de estudio.

Los pisos vegetacionales presentes en el área de estudio en la Región de los Ríos, presentan en su mayoría Bosque caudalórico templado andino, presentando, también, gran porcentaje de bosque laurifolio templado interior, y en menor proporción, bosque siempreverde templado andino de *Nothofagus dombeyi*. Cabe destacar que ninguno de estos ecosistemas se encuentra en categoría de amenaza alta, sino media y baja.

En la Región de los Lagos, el sector que compromete a la zona de estudio, presenta pisos vegetacionales de Bosque laurifolio templado interior de *Nothofagus dombeyi*, Bosque siempreverde templado andino de *Nothofagus dombeyi* - *Saxegothaea conspicua*, Bosque siempreverde templado interior de *Nothofagus nitida* - *Podocarpus nubigenus*, Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus pumilio* / *Drimys andina* y en el sector más al sur una pequeña parte de Bosque resinoso templado andino de *Fitzroya cupressoides*; todos en categoría media o baja de amenaza.

5.1.8 Comunidades bióticas

En general, la información correspondiente a las comunidades biológicas presente en estos lagos es escasa y discontinua. El componente fitoplanctónico es el que

presenta la mayor cantidad de información, debido al programa de monitoreo que la DGA dispone de información continua desde el año 2011. Por otro lado, el componente zooplanctónico que se encuentra en este grupo de lagos consiste principalmente de rotíferos, cladóceros y copépodos calanoídeos (Soto & Zúñiga, 1991; Villalobos, 1994) y además de ciliados mixotróficos (*Stentor*, *Ophrydium*) (Woelfl & Geller, 2002; Woelfl, 2007). Cabe destacar, que similares comunidades planctónicas se han reportado en algunos lagos de Australia, Nueva Zelanda y Argentina (Laybourn-Parry *et al*, 1997; Modenutti *et al*. 2005).

Tabla 15: Lista de taxas de peces reportados en las cuencas de algunos de los lagos Norpatagónicos.

| Lago | Peces | Fuente |
|-------------------------|--|--|
| Panguipulli | <i>Diplomystes camposensi</i> - <i>Trichomycterus areolatus</i> - <i>Galaxias platei</i> , <i>Galaxias maculatus</i> - <i>Cheirodon australe</i> - <i>Basilichthys australis</i> - <i>Odontesthes mauleanum</i> - <i>Aplochiton zebra</i> - <i>Percichthys melanops</i> -- <i>Geotria australis</i> - <i>Percichthys trucha</i> - <i>Brachygalaxias bullocki</i> | Vila & Pardo, 2008* |
| Neltume | <i>Diplomystes camposensis</i> - <i>Trichomycterus areolatus</i> - <i>Galaxias - platei</i> - <i>Galaxias maculatus</i> - <i>Brachygalaxias bullocki</i> - <i>Basilichthys australis</i> - <i>Odontesthes mauleanum</i> - <i>Aplochiton zebra</i> - <i>Percichthys trucha</i> - <i>Percichthys melanops</i> - <i>Geotria australis</i> - <i>Cheirodon australe</i> | Vila & Pardo, 2008* |
| Riñihue | <i>Galaxias maculatus</i> - <i>Galaxias platei</i> - <i>Brachygalaxias bullocki</i> - <i>Aplochiton taeniatus</i> - <i>Cheironon australis</i> - <i>Cheirodon galusdae</i> - <i>Diplomystes camposensis</i> - <i>Trichomycterus areolatus</i> - <i>Basilichthys</i> <i>australis</i> <i>Percilia gillisi</i> - <i>Pygidium aerolatum</i> - <i>Dyplomistes chilensis</i> <i>Percichthys trucha</i> - <i>Percichthys melanops</i> - <i>Odontesthes mauleanum</i> - <i>Aplochiton zebra</i> - <i>Salmo gairdnerii gairdnerii</i> - <i>Salmo trutta fario</i> <i>Cyprinus carpio</i> - <i>Tinca tinca</i> - <i>Geotria australis</i> - <i>Odontesthes</i> <i>wiebrichi</i> - <i>Cheirodon australe</i> | Vila & Pardo, 2008* Campos et al, 1974 Arratia, 1981 |
| Pirihueico | <i>Diplomystes camposensis</i> - <i>Trichomycterus areolatus</i> - <i>Galaxias platei</i> <i>Galaxias maculatus</i> - <i>Brachygalaxias bullocki</i> - <i>Cheirodon australe</i> <i>Basilichthys australis</i> - <i>Odontesthes mauleanum</i> - <i>Aplochiton zebra</i> <i>Percichthys trucha</i> - <i>Percichthys melanops</i> - <i>Geotria australis</i> <i>salmonids</i> | Vila & Pardo, 2008* |
| Ranco | <i>Salmonidos</i> - <i>Basilichtys australis</i> - <i>Percichthys trucha</i> | Soto et al., 2006 |
| Puyehue | <i>Salmonidos</i> - <i>Percichthys truch</i> | Soto et al., 2006 |
| Rupanco | <i>Salmonidos</i> - <i>Basilichtys australis</i> - <i>Percichthys trucha</i> | Soto et al., 2006 |
| Todos los Santos | <i>Salmonidos</i> - <i>Basilichtys australis</i> - <i>Percichthys trucha</i> <i>Trichomycterus areolatus</i> - <i>Galaxias platei</i> | Soto et al., 2006 |

*Se considera hoya hidrográfica.

Fuente: Extraído de EULA (2021).

Por otra parte, la mayor parte de la información de la fauna íctica corresponde a estudios realizados en las cuencas de los ríos Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno y Maullín. En la tabla 15, se pueden apreciar algunos de los peces que se encuentran a lo largo de las cuencas lacustres de algunos lagos. Según Campos (1985), las áreas ritrónicas de estos sistemas están compuestas por *A. zebra*, *T. areolatus*, *P. gillissi* y *Galaxias platei*, mientras que en la zona potamal por *G. maculatus*, *B. australis*, *O. mauleanum* y *P. trucha*. En las zonas de humedales se reportan *Ch. australe* y *B. bullocki*. Los peces descritos para la hoya hidrográfica del Valdivia son: Diplomystidae: *Diplomystes camposensis*; Trichomycteridae: *Trichomycterus areolatus*; Galaxiidae: *Galaxias platei*, *G. maculatus*, *B. bullocki*; Characidae: *Cheirodon australe*; Atherinidae: *Basilichthys australis*, *O. mauleanum*; Aplochitonidae: *Aplochiton zebra*; Percichthyidae: *Percichthys trucha*, *P. melanops* y la lamprea Geotriidae: *G. australis*.

5.1.9 Usos de Suelo

El uso de suelo se refiere a la forma en que las personas o la sociedad están usando un terreno en particular. Este está asociado a las actividades que se realizan sobre suelo para obtener algún beneficio, producir algún cambio o mantener su condición (FAO, 2000).

Para simplificar el análisis de la Figura 12, se describe de acuerdo con los subuso de suelo para las tres regiones que componen el espacio geográfico; la razón por la que no se hizo en base al uso de suelo, es porque el subuso presenta más especificaciones, por ejemplo, en cuanto a la diferencia entre bosque nativo y plantaciones, ya que si se hubiese utilizado el uso de suelo se presentaría como bosques, sin diferenciar entre estos.

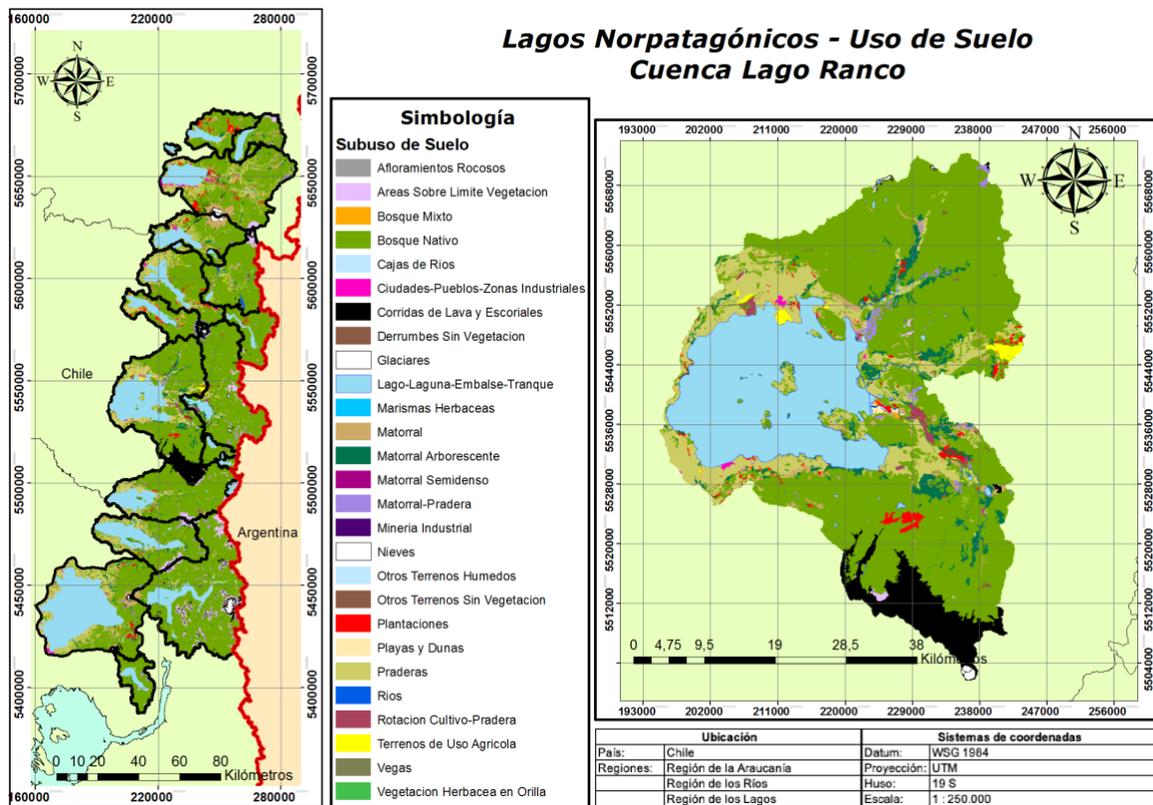


Figura 12: Subuso de Suelo en zona de Estudio
Fuente: Elaboración propia a partir de MMA, 2019.

Del total del área superficial que ocupan las cuencas lacustres de los lagos Norpatagónicos, 9700 km² corresponden a bosque nativo a lo largo de las 3 regiones, es decir, prácticamente el 60% del área en estudio. En la Región de la Araucanía, la categoría de bosque nativo es la que se encuentra en mayor proporción (59,3%), seguido por praderas (13,3%) y lagos-lagunas-embalses-tranques con un 12,2%; las demás categorías presentan porcentajes menores 5%.

En cuanto a la Región de los Ríos, sigue predominando la categoría de bosque nativo, esta vez con un 64,9%, luego se encuentra lagos-lagunas-embalses-tranques (12,6%) y praderas (8,8%). Para el caso de la Región de los Lagos, el bosque nativo sigue predominando el uso de suelo con un porcentaje de 53,7%, seguido por lagos-lagunas-embalses-tranques con un 23,4% y praderas (8,36%).

En la Figura 12, al lado derecho, se puede ver el ejemplo del caso de la cuenca lacustre Lago Panguipulli, el cual cuenta con bosque nativo (51,3%), lagos... (21,6%), praderas (12,3%), corridas de lavas y estoriales (5,5%), matorrales (4%), plantaciones (1,1%), terrenos de uso agrícolas (0,6%), etc; en ella se puede se visualiza el caso de la mayoría de los lagos, los cuales presentan pequeños porcentajes del territorio como zonas urbanas, que han ido incrementando con el paso de los años por expansión debido a que es zona turística en los meses de verano, así como también ocurre con los terrenos agrícolas; a pesar de esto, el bosque nativo sigue distribuido en más de la mitad de la zona en estudio.

Sin embargo, los lagos Norpatagónicos han sido sometidos a un continuo proceso de transformación durante los últimos dos siglos. A la fecha, una significativa sustitución de bosque nativo, factor crítico en la regulación de nutrientes en las cuencas lacustres, ha gatillado una declinación en la calidad de los cuerpos de agua y sus estados tróficos. En este sentido, Oyarzun *et al.* (1997; 2003) evaluó los efectos que el cambio de uso de suelo ocasiona en la exportación de N-total en microcuencas del lago Rupanco, reflejando la importancia que tiene la erosión de los suelos sobre el transporte de N y P, evidenciando la influencia de las actividades forestales sobre las concentraciones y transporte de nutrientes, observándose una estrecha relación entre el transporte de sedimentos en suspensión y la exportación de nutrientes (contaminación difusa). Así mismo, Nahuelhual *et al.* (2012) reconoce que este cambio en la cobertura de uso de suelo por plantaciones forestales en la zona centro sur de Chile traerá muchas implicancias en el paisaje y pérdidas de los Servicios Ecosistémicos.

Asimismo, Soto *et al.* (2006), describe la presencia de numerosas especies invasoras, fundamentalmente salmonídeas en las cuencas de los lagos Ranco, Puyehue, Rupanco y Todos los Santos, donde *Salmo trutta* y *Oncorhynchus mykiss* representaron más de 60 % de la abundancia total de peces y más de 80 % de la biomasa total presumiendo los impactos negativos sobre las especies nativas, lo

cual se verifica en los estudios de Arismendi *et al.* (2011) que demuestran la sobreposición de dietas entre especies nativa e introducidas.

Por otro lado, Campos (1995) reporta la capacidad de carga en términos de stock explotable de especies salmonídeas y balance de fósforo y nitrógeno; evidenciando con esto el deterioro sobre los sedimentos del lago Rupanco. Prado *et al.* (1999) determinó la capacidad de carga y balance de P y N en el lago Chapo, señalando que la deforestación determina un aumento de la carga de nutrientes exportada al lago con la consecuente disminución de transparencia y aumentos de niveles de clorofila. Mientras que Orrego (2002), describe de manera general para las diversas regiones del país las principales fuentes de contaminación que guardan relación con las actividades que se desarrollan en ellas, describiendo descargas de aguas servidas, escurrimiento e infiltración de productos químicos usados en la agricultura y silvicultura, la industria de cosméticos y detergentes, los mataderos, la industria de cecinas y la industria de muebles y útiles para el hogar.

Así también León Muñoz *et al.* (2007) en el documento “*Salmonicultura en los Lagos del Sur de Chile- Ecorregión Valdiviana*”; recalcan como el proceso de eutrofización natural se acelera debido a las actividades productivas, el cambio de uso de suelo y a la falta de tratamiento de aguas servidas, impulsores que modifican las funciones ecosistémicas, principalmente aquellas que implican los procesos ecológicos que sostienen.

Es importante señalar que el desarrollo de algunos informes técnicos, como por ejemplo el desarrollado para el proyecto “*Análisis y formulación red de monitoreo de lagos Región de Los Ríos. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (2017)*”, en su evaluación de servicios ecosistémicos para seis de los lagos en estudio (Calafquén, Neltume, Pirihueico, Panguipulli, Riñihue y Puyehue); considera que las amenazas están ligadas al desarrollo de la actividad forestal y el avance de la frontera agrícola, lo que está generando fragmentación y pérdida de

hábitat para muchas especies que aportan a la diversidad biológica. En este sentido, es alta la diversidad biológica de las regiones que albergan los lagos en estudio, habitando especies con alto endemismo, en peligro de extinción y con un grado importante de vulnerabilidad asociado principalmente a la actividad antrópica.

De acuerdo a lo anteriormente planteado; urge contar con información actualizada, monitoreos constantes y confiables de cada cuerpo de agua, que evite la dualidad y la dispersión de la información, los pocos datos que existen tienen escaso desarrollo temporal y responden a clasificaciones regionales y/o comunales y no de cuenca (e.g. PLADECOS, PROT) existiendo importantes vacíos a la hora de abordar la caracterización ecosistémica de los lagos, por lo que es aconsejable su utilización de un modo prudente y más bien orientativo.



5.2 Tipología de los Lagos

5.2.1 Análisis de Componentes principal (ACP)

El ACP permite representar óptimamente en un espacio de dimensión pequeña, observaciones de un espacio general p-dimensional. En este sentido componentes principales es el primer paso para detectar variables “latentes” o no observadas, que están generando variabilidad en los datos. En la tabla 16, se observa la abreviación del nombre de las variables que se trabajaron en RStudio:

Tabla 16: Simbología de las variables usada en R.

| Simbología | Variable |
|------------|--|
| H | Altitud |
| Lmax | Longitud máxima |
| Amax | Ancho máximo |
| As | Área superficial |
| Dlc | Desarrollo de línea de costa |
| Ad | Área de drenaje |
| Ad/As | Relación área de drenaje y área de lagos |
| Gs | Geología Silíceo |
| Gh | Glaciar hielo |

Fuente: Elaboración propia.

Antes de realizar el ACP, se realiza la correlación de Pearson que es la que nos explica la relación entre las variables continuas. El coeficiente toma valores de +1 a -1, el valor 0 indica que no hay asociación entre dos variables, mayor que 0 indica asociación positiva y por el contrario, menor que cero indica asociación negativa entre variable, es decir a medida que aumenta una variable, la otra disminuye. En la Tabla 17, se puede observar con detalle la correlación de Pearson entre las 9 variables estudiadas.

Tabla 17: Matriz de Correlación de Pearson.

| | H | Lmax | Amax | As | Dlc | Ad | Ad.As | Gs | Gh |
|-------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|------|------|
| H | 1.00 | | | | | | | | |
| Lmax | -0.57** | 1.00 | | | | | | | |
| Amax | -0.44* | 0.72*** | 1.00 | | | | | | |
| As | -0.42* | 0.74*** | 0.98*** | 1.00 | | | | | |
| Dlc | -0.33 | 0.52* | 0.12 | 0.09 | 1.00 | | | | |
| Ad | -0.59** | 0.77*** | 0.78*** | 0.74*** | 0.28 | 1.00 | | | |
| Ad.As | -0.13 | -0.26 | -0.21 | -0.21 | -0.09 | 0.05 | 1.00 | | |
| Gs | -0.19 | -0.20 | -0.38 | -0.39 | 0.20 | 0.03 | 0.55** | 1.00 | |
| Gh | -0.29 | 0.33 | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.46* | -0.01 | 0.15 | 1.00 |

*=p-valor<0.05, **=p-valor<0.01, ***=p-valor<0.001.

Por otro lado, ya con el Análisis de Componentes Principales, se partió de una matriz de datos con 9 variables geomorfológicas y 23 muestras de lagos. La Tabla 18 muestra que la primera dimensión explica un 44,60% con un valor propio (autovalor) asociado igual a 4.01, mientras que la segunda dimensión explica un 21.31% y tiene un autovalor asociado igual a 1.92. Las primeras tres dimensiones explican en conjunto un 77.97%.

Tabla 18: Varianza total explicada.

| Dimensión | eigenvalue | variance percent | cumulative variance percent |
|-----------|------------|------------------|-----------------------------|
| Dim.1 | 4.01 | 44.60 | 44.60 |
| Dim.2 | 1.92 | 21.31 | 65.90 |
| Dim.3 | 1.09 | 12.07 | 77.97 |
| Dim.4 | 0.96 | 10.66 | 88.64 |
| Dim.5 | 0.46 | 5.14 | 93.78 |
| Dim.6 | 0.33 | 3.71 | 97.49 |
| Dim.7 | 0.13 | 1.43 | 98.92 |
| Dim.8 | 0.08 | 0.94 | 99.87 |
| Dim.9 | 0.01 | 0.13 | 100.00 |

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

En cuanto al número de dimensiones a retener existen diferentes criterios, uno de ellos sugiere seleccionar componentes hasta que se forme un "codo", es decir un punto a partir del cual los valores propios tomen un comportamiento similar. La Figura 13 o gráfico de sedimentación revela que el "codo" se forma en la segunda dimensión, por lo tanto, las primeras dos dimensiones resumen la información más relevante de los datos originales. Un segundo criterio sugiere retener el número de componentes que tengan autovalores asociados mayor o igual a la unidad, en este estudio los primeros tres componentes o primeras dimensiones presentan autovalores mayores o igual a 1. Finalmente se aconseja seleccionar componentes que alcancen una proporción como el 80.00% o 90.00%, dicho criterio es arbitrario y se debe aplicar con cuidado. En el área de ecología los investigadores esperan una proporción de varianza explicada que cubra o supere el 30,00%, muy inferior al caso presente que en la primera dimensión ya cubre el 44,60%.

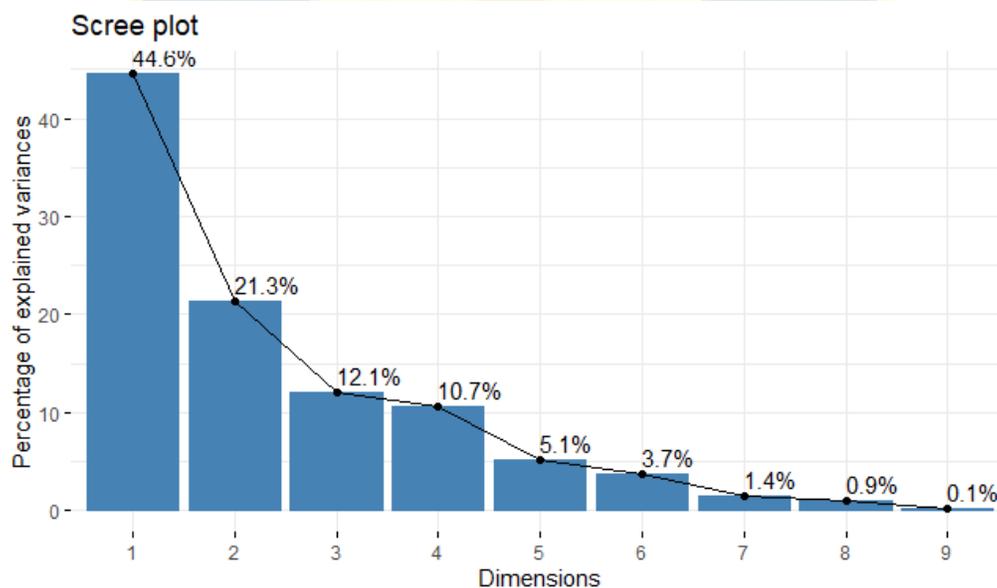


Figura 13: Gráfico de sedimentación.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

En cuanto al peso de las variables, se puede observar en la Tabla 19 y Figura 14, que el primer componente está muy influenciado por las variables Altitud o altura sobre el nivel del mar (H), Longitud máxima (Lmáx), Ancho máximo (Amáx), Área

superficial (As), Desarrollo de línea de costa (Dlc) y Área de drenaje (Ad); es por esto que la primera dimensión está definida por tamaño/altura.

Tabla 19: Peso de las variables.

| Variables | Dim.1 | Dim.2 |
|-----------|-------|-------|
| H | -0.65 | -0.47 |
| Lmax | 0.92 | 0.04 |
| Amax | 0.90 | -0.26 |
| As | 0.89 | -0.29 |
| Dlc | 0.37 | 0.35 |
| Ad | 0.89 | 0.26 |
| Ad.As | -0.22 | 0.66 |
| Gs | -0.24 | 0.86 |
| Gh | 0.32 | 0.42 |

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Por otro lado, el segundo componente está influenciado por las variables Relación área de drenaje-área superficial (Ad.As), Geología Silicio (Gs) y Geología hielo (Gh); indicándonos que está definida principalmente por la geología.

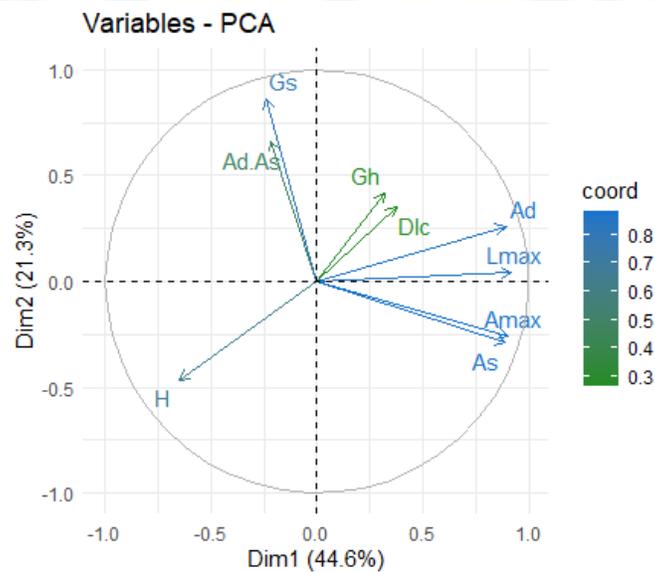


Figura 14: Representación de los pesos de las variables.

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

En las puntuaciones de los individuos se observa que en la primera dimensión destacan los lagos Tinquilco, Villarrica, Pullinque, Pellaifa, Panguipulli, Ranco, Huishue, Gemelas, Gris, Rupanco, Llanquihue y Los Santos (Tabla 20).

Tabla 20: Puntuaciones de los individuos.

| Lagos | Dim.1 | Dim.2 | Lagos | Dim.1 | Dim.2 |
|-------------|-------|--------------|------------|-------|--------------|
| Colico | -0.16 | 0.63 | Ranco | 3.51 | -0.43 |
| Carburgua | -0.96 | -0.46 | Maihue | 0.02 | 1.97 |
| Huilipilún | -1.35 | -1.91 | Huishue | -1.69 | -0.09 |
| Tinquilco | -2.53 | 0.64 | Gemelas | -2.46 | -1.53 |
| Villarrica | 1.41 | 0.90 | Gris | -2.14 | -1.27 |
| Calafquén | 0.88 | 0.79 | Constancia | -1.89 | -2.99 |
| Pullinque | -1.25 | 0.18 | Puyehue | 0.89 | 0.16 |
| Pellaifa | -1.43 | -0.16 | Rupanco | 1.82 | -0.22 |
| Panguipulli | 1.14 | 0.48 | Llanquihue | 5.64 | -2.56 |
| Neltume | -1.56 | 2.99 | Los Santos | 2.60 | 2.07 |
| Riñihue | 0.59 | -0.19 | Chapo | -0.56 | 0.09 |
| Pirihueico | -0.51 | 0.91 | | | |

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

En tanto, en la segunda dimensión los lagos Colico, Huilipilún, Neltume, Pirihueico, Maihue y Constancia (correspondientes a los valores ennegrecidos de la tabla).

Una representación gráfica que permite apreciar en las primeras dos dimensiones las variables geomorfológicas y los lagos es el Biplot (Figura 15), el cual tiene la ventaja de representar de forma conjunta en un plano filas y columnas de una matriz. Se aprecia que las variables de Geología Silíceo y la relación entre área drenaje y área del algo están asociadas al lago Neltume; así como también, la altura se asocia principalmente a los lagos Gemelas, Gris, Carburgua, Chapo. Mientras que la geología Glaciar hielo, Desarrollo línea de costa, Área de drenaje y Área superficial están relacionadas con los lagos Calafquén, Colico, Puyehue, Rupanco, Ranco, Panguipulli, Villarrica y Los Santos.

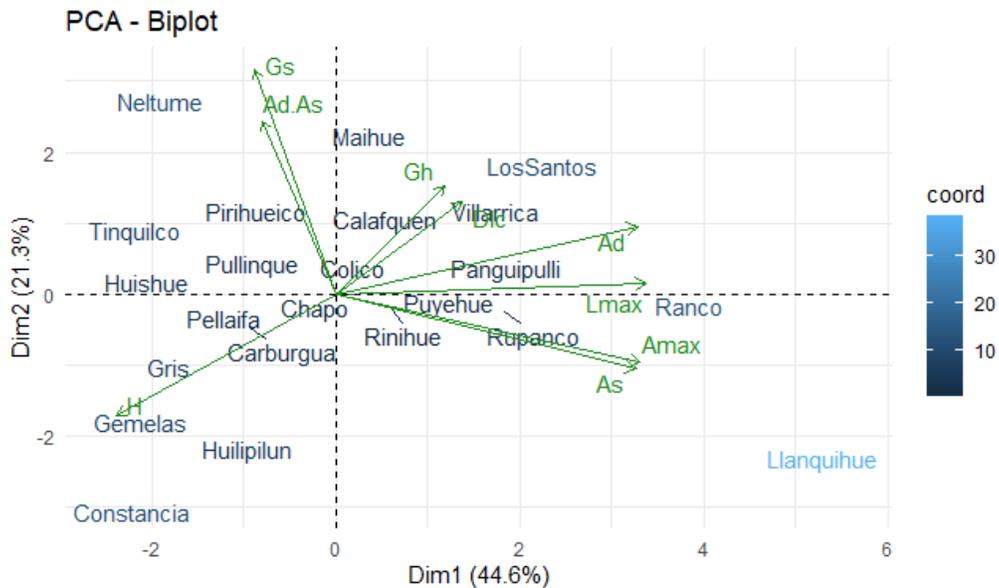


Figura 15: Biplot del Análisis de Componentes Principales.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

5.2.2 Análisis de Conglomerado

El análisis de conglomerado, es una metodología que clasifica observaciones en grupos de tal manera que, cada grupo sea homogéneo con respecto a ciertas particularidades, ejemplo, las observaciones dentro de cada grupo han de ser similares entre sí. También debe suceder que cada grupo debe distinguirse de los otros grupos sobre las mismas singularidades, esto implica que las observaciones de un grupo deben diferir de las observaciones de otros conglomerados (Hair *et al.*, 1999).

i. Análisis de Conglomerado en términos de los lagos

El análisis permite verificar que las variables geomorfológicas Altitud, Longitud máxima, Ancho máximo, Área superficial, Desarrollo de línea de costa, Área de drenaje, Relación área de drenaje y área de lagos, Geología Silíceo y Geología hielo

son relevantes en la determinación de los grupos que se forman. Para el análisis exploratorio en base al índice de Bray-Curtis, se utilizó el paquete “vegan” de RStudio, el cual entrega la disimilaridad entre dos puntos, este estudio reveló tres conglomerados (Figura 16), el primero de ellos reúne a los lagos Chapo, Colico, Pirihueico, Caburgua, Riñihue, Huishue, Pellaifa, Pullinque, y Huilipilún con una similaridad cercana al 65%. El segundo conglomerado está formado por los lagos Gris, Gemelas, Constanacia y Tinquilco, siendo el más parecido en términos porcentuales, ya que tiene menor distancia con un porcentaje igual al 20%, es decir tiene una similaridad del 80%. Finalmente, en el tercer grupo se encuentran los lagos Puyehue, Maihue, Rupanco, Panguipulli, Neltume, Calafquén, Todos Los Santos, Villarrica, Llanquihue y Ranco mostrando una mayor disimilaridad con una vecindad del 50%.

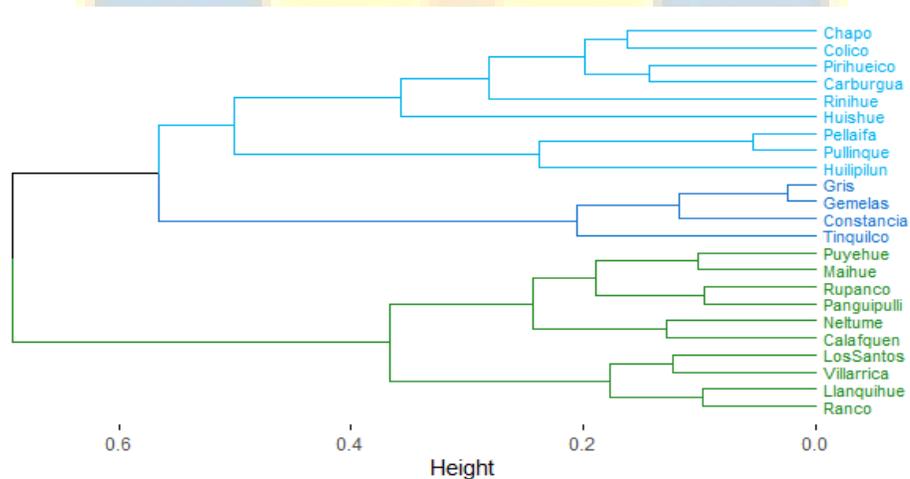


Figura 16: Agrupamiento de disimilitud de Bray-Curtis.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

En relación con el coeficiente de correlación Cofenética con el método del promedio arrojó el mayor valor igual 0.765, indicando que es el que menos distorsiona la matriz de datos original y entrega la mejor clasificación.

5.2.3 Escalamiento Multidimensional (MDS)

El Escalamiento Multidimensional (MDS) o también conocido como Análisis de Proximidades, es un método que permite representar medidas de proximidad (similitudes o disimilitudes) entre pares de objetos como distancias (por lo general euclidianas) en un espacio de baja dimensión. En otras palabras, el MDS nos permite encontrar el patrón del grado de parecido entre los diferentes objetos, así como establecer agrupaciones reconocibles y poder interpretar las dimensiones subyacentes que establecen dichas agrupaciones.

El MDS se aplicó para complementar y comparar la información obtenida por el Análisis de Conglomerado. Existen dos modelos básicos de MDS, el Escalamiento Multidimensional Métrico y el Escalamiento Multidimensional No Métrico, la diferencia está fundamentada en la presencia o ausencia de propiedades métricas en los datos de partida y en su transformación, no en la solución, la cual casi siempre exhibe propiedades métricas. En este estudio se utilizó el procedimiento métrico, el cual consiste en un método algebraico para encontrar la configuración de los puntos a partir de las disimilitudes entre los puntos.

En cuanto a la bondad de ajuste del análisis se consideró la medida del STRESS, el cual fue de 0.019, lo que puede interpretarse acorde a la Tabla 21, es decir el nivel de aceptabilidad está entre perfecto y excelente. Por lo tanto, se verifica que los resultados del análisis representan los datos originales.

Tabla 21: Bondad de ajuste

| <i>STRESS</i> | <i>Bondad del Ajuste</i> |
|----------------------|---------------------------------|
| 0.2 | Pobre |
| 0.1 | Regular |
| 0.05 | Bueno |
| 0.025 | Excelente |
| 0 | “Perfecto” |

Por otro lado, como se observa en la Tabla 22, con respecto a los grupos en cada dimensión, las puntuaciones de los individuos señalan que la segunda dimensión está definida por los lagos Calafquén, Neltume y Riñihue (en negrita).

Tabla 22: Puntuaciones de los lagos.

| Lagos | Dim1 | Dim2 | Lagos | Dim1 | Dim2 |
|-------------|---------|----------------|------------|---------|---------|
| Colico | -229.83 | -125.30 | Ranco | 1383.57 | 119.98 |
| Caburgua | -395.63 | -27.76 | Maihue | 666.72 | -91.09 |
| Huilipilún | -646.79 | -240.10 | Huishue | -593.98 | -52.73 |
| Tinquilco | -780.44 | 162.58 | Gemelas | -883.48 | 426.83 |
| Villarrica | 946.68 | 131.48 | Gris | -846.43 | 438.74 |
| Calafquén | 28.94 | -171.42 | Constancia | -926.71 | 674.68 |
| Pullinque | -592.98 | -375.29 | Puyehue | 585.38 | -11.98 |
| Pellaifa | -596.01 | -353.18 | Rupanco | 357.00 | -148.10 |
| Panguipulli | 238.16 | -181.44 | Llanquihue | 1543.20 | 174.58 |
| Neltume | 88.68 | -163.56 | Los Santos | 1449.33 | 262.23 |
| Riñihue | -134.15 | -324.50 | Chapo | -329.98 | -255.59 |
| Pirihueico | -331.24 | 130.94 | | | |

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Finalmente, al segregar en tres grupos (Figura 17), de acuerdo a la similaridad entre los lagos, éstos se reúnen de la siguiente manera: en primer lugar, los lagos Los Santos, Llanquihue, Ranco, Villarrica, Puyehue, Maihue, Neltume, Rupanco, Panguipulli y Calafquén; en segundo lugar, los lagos Riñihue, Pullinque, Pellaifa, Chapo, Huilipilún, Huishue, Colico, Caburgua y Pirihueico; finalmente, los lagos Constancia, Gris, Gemelas y Tinquilco; lo que corresponde a la misma agrupación arrojada por el análisis de conglomerado, por lo tanto se valida la división de los lagos en tres grupos tipológicos que difieren principalmente en cuanto a su altura y superficie. Cabe mencionar que para que este estudio sea aún más verídico se tendría que incorporar una de las variables más importantes, que se despreció por no contar con el dato para todos los lagos, esta variable es la profundidad.

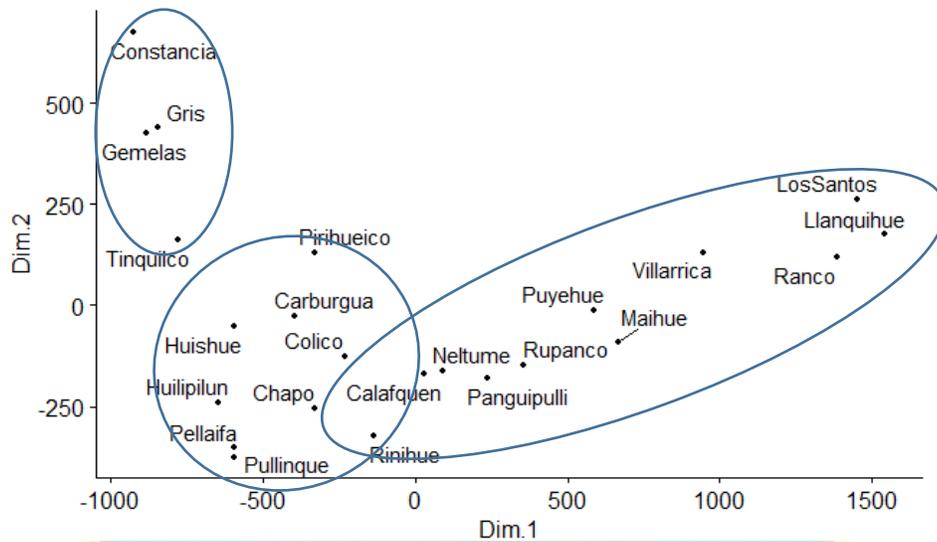


Figura 17: Agrupamiento Escalamiento Multidimensional.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

5.3 Validación de la tipología variables de calidad del agua

Al igual que en el caso de las variables geomorfológicas, también se realiza un estudio estadístico en cuanto a las variables de calidad con el fin de que se pueda validar los grupos tipológicos arrojados anteriormente. En la tabla 23, se observa la abreviación del nombre de las variables que se trabajaron en RStudio:

Tabla 23: Simbología de las variables usada en R.

| Simbología | Variable |
|-----------------|----------------------------|
| Temperatura | Temperatura |
| Conductividad | Conductividad eléctrica |
| pH | pH |
| OD | Oxígeno Disuelto |
| TransparenciaDS | Transparencia Disco Secchi |
| N_NO3 | Nitrógeno de Nitrato |
| N_NO2 | Nitrógeno de Nitrito |
| N_NH4 | Nitrógeno de Amonio |
| P_PO4 | Fósforo de Ortofosfato |

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1 Análisis de Componentes Principal

En el caso de las variables de calidad (Tabla 24), se obtuvo un valor propio igual a 1.798 la primera dimensión explica un 19.984%, la segunda dimensión con un valor propio igual a 1.206, explica un 13.402%, la tercera dimensión explica un 13.229% y tiene un valor propio asociado igual a 1.191.

Tabla 24: Varianza explicada.

| Dimensión | Valores propios | Porcentaje de varianza | Porcentaje de varianza acumulado |
|-----------|-----------------|------------------------|----------------------------------|
| Dim.1 | 1.798 | 19.983 | 19.983 |
| Dim.2 | 1.206 | 13.402 | 33.385 |
| Dim.3 | 1.191 | 13.229 | 46.614 |
| Dim.4 | 1.014 | 11.265 | 57.879 |
| Dim.5 | 0.983 | 10.925 | 68.803 |
| Dim.6 | 0.950 | 10.555 | 79.358 |
| Dim.7 | 0.731 | 8.117 | 87.475 |
| Dim.8 | 0.672 | 7.461 | 94.936 |
| Dim.9 | 0.456 | 5.064 | 100.000 |

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Como se mencionó anteriormente, para el número de dimensiones a retener existen diferentes criterios, uno de ellos sugiere seleccionar componentes hasta que se forme un "codo", es decir un punto a partir del cual los valores propios tomen un comportamiento similar. El gráfico de sedimentación (Figura 18) revela que el "codo" se forma en la segunda dimensión, por lo tanto, las primeras dos dimensiones resumen la información más relevante de los datos originales. Un segundo criterio sugiere retener el número de componentes que tengan autovalores asociados mayor o igual a la unidad, en este caso los primeros cuatro componentes o primeras dimensiones presentan autovalores mayores o igual a 1.

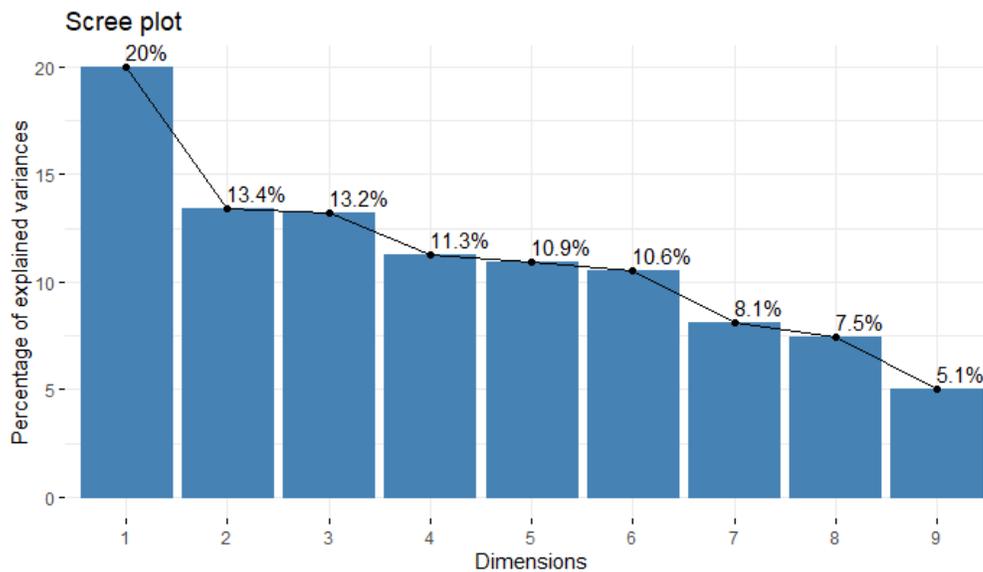


Figura 18: Gráfico de sedimentación.
 Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

En la tabla 25, se observa que las variables Temperatura, Conductividad, pH y Transparencia destacan en la primera dimensión, Oxígeno disuelto determina la segunda dimensión.

Tabla 25: Pesos de las variables.

| Variables | Dim.1 | Dim.2 |
|-----------------|---------------|---------------|
| Temperatura | 0.766 | -0.347 |
| Conductividad | 0.579 | 0.497 |
| pH | 0.663 | 0.150 |
| OD | -0.263 | 0.824 |
| TransparenciaDS | 0.531 | 0.176 |
| N_NO3 | 0.045 | -0.132 |
| N_NO2 | 0.070 | -0.242 |
| N_NH4 | 0.245 | 0.148 |
| P_PO4 | -0.137 | 0.086 |

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

A través de la Figura 19, se puede observar la representación del peso de las variables, en donde se observa de manera detallada como el Oxígeno disuelto determina la segunda dimensión, así como también están presentes en el cuadrante

negativo el nitrógeno de nitrato y nitrógeno de nitrito. En cambio las variables, Temperatura, conductividad eléctrica, pH, Transparencia y Nitrógeno de Amonio se presentan en la primera dimensión positivamente, en comparación con el Fósforo de Ortofosfato que lo hace de forma negativa.

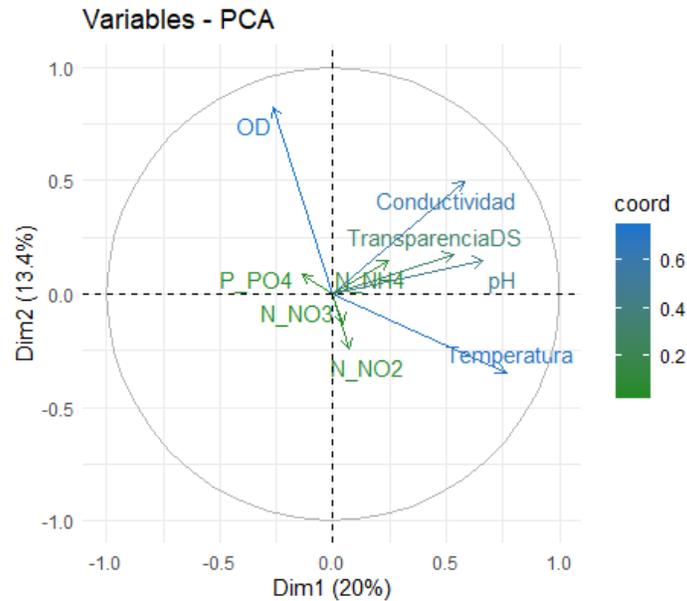


Figura 19: Representación de los pesos de las variables.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Por otro lado, en el Figura 20, se observa la segregación que se produce a partir de la temporalidad estacional en la que se encuentran los datos de calidad, si bien no es muy nítida la segregación, esta permite inferir que el oxígeno disuelto junto al fósforo de ortofosfato influyen notablemente en el periodo de primavera; así como también la temperatura, el nitrógeno de nitrito, el pH y la transparencia del Disco Secchi se ven influenciados en periodo de verano, el último de estos se debe a que se encuentran mayor registros de días soleados o que permite tener una mejor visual del disco. También, en el gráfico PCA-Biplot, se aprecia la presencia de ciertos datos que se alejan más de la distribución en comparación con la mayoría, estos son considerados atípicos porque se presentan con un comportamiento distinto.

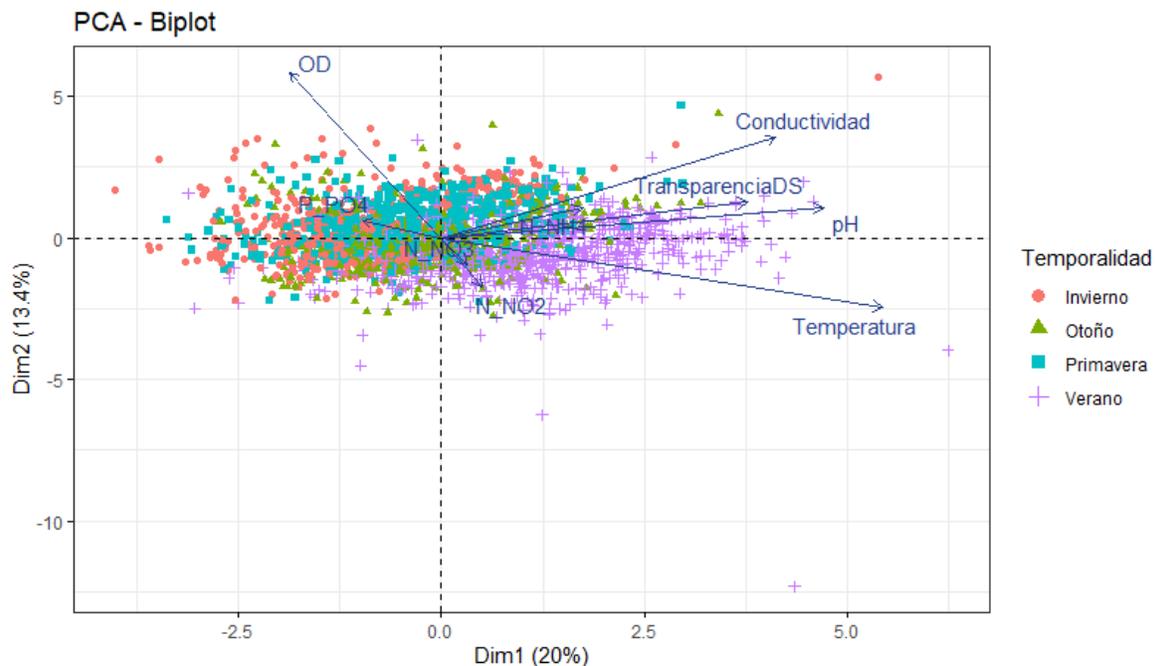


Figura 20: Biplot del Análisis de Componentes Principales según Temporalidad.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Al igual que en el Figura 20, la siguiente figura también corresponde a un PCA-Biplot, pero esta vez se hace en base al comportamiento de los lagos respecto a las variables de calidad. La distribución de las variables sobre los lagos, muestran la relación que se da entre estos, en este se aprecia que los lagos se comportan de manera similar, ya que no se aprecian grandes observaciones respecto al gráfico dada la compleja segregación de las variables. Sin embargo, si se puede apreciar cierta condicionalidad del Lago Villarrica respecto a la variable temperatura, PH y Oxígeno disuelto. Así como también, el Lago Llanquihue presenta cercanía a las variables Conductividad eléctrica y Transparencia de Disco Secchi. El Lago Chapo también sugiere cierta lejanía respecto a sus datos, siendo más cercano a la variable Fósforo de Ortofosfato.

En la Figura 21, así como también en la Figura 20, se aprecia la presencia de ciertos datos que se alejan más de la distribución en comparación con la mayoría, estos son considerados atípicos porque se presentan con un comportamiento distinto.

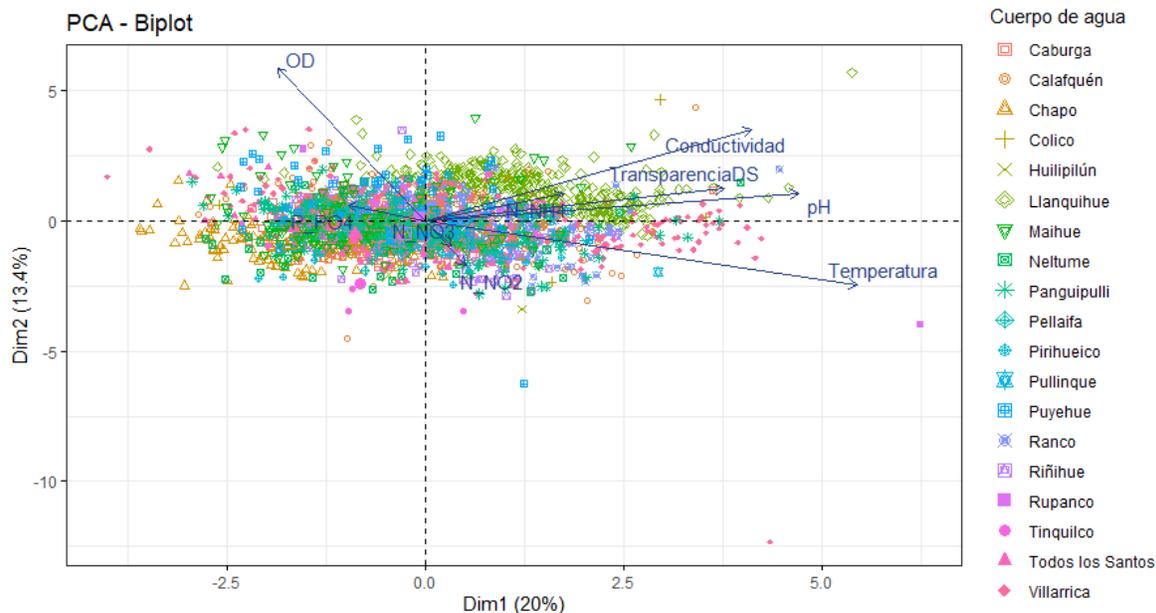


Figura 21: Biplot del Análisis de Componentes Principales según los lagos.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

5.3.2 Análisis de Conglomerado Jerárquico

Como se mencionó anteriormente, el Análisis de Conglomerado, corresponde a una técnica multivariante que clasifica los individuos en grupos, de forma que las observaciones pertenecientes a un grupo sean similares entre si (homogeneidad) y diferentes del resto (heterogeneidad) de las variables. En concreto, realiza una partición de individuos en un conjunto de grupos, de modo que un individuo pertenece solo a un grupo y la unión de dichos grupos contiene a todos los individuos. Los grupos son los denominados conglomerados.

En este caso, se realizó el Análisis de Conglomerado Jerárquico en base al índice Euclidiano, de acuerdo al método del promedio. Como resultado se obtiene que el coeficiente de correlación Cofenética (permite medir la similitud entre las distancias iniciales y las finales con las cuales los individuos se han unido, los valores altos

cercanos o iguales a la unidad indican que es válida la agrupación), es igual a 0.76 y es el que menos distorsiona la matriz de los datos original.

Como se observa en la Figura 22, los resultados muestran que la mayoría de los datos se encuentran en un conglomerado que abarca un 80.074% (celeste), el segundo clúster alcanza 19.844%(azul) y dos valores atípicos corresponden a un 0.082%(verde). En el anexo 6, se puede apreciar las características de los dos valores atípicos, que al analizarlos no sugieren ninguna anomalía que sea relevante discutir.

Hierarchical clustering
Distancia euclídea, Método del promedio

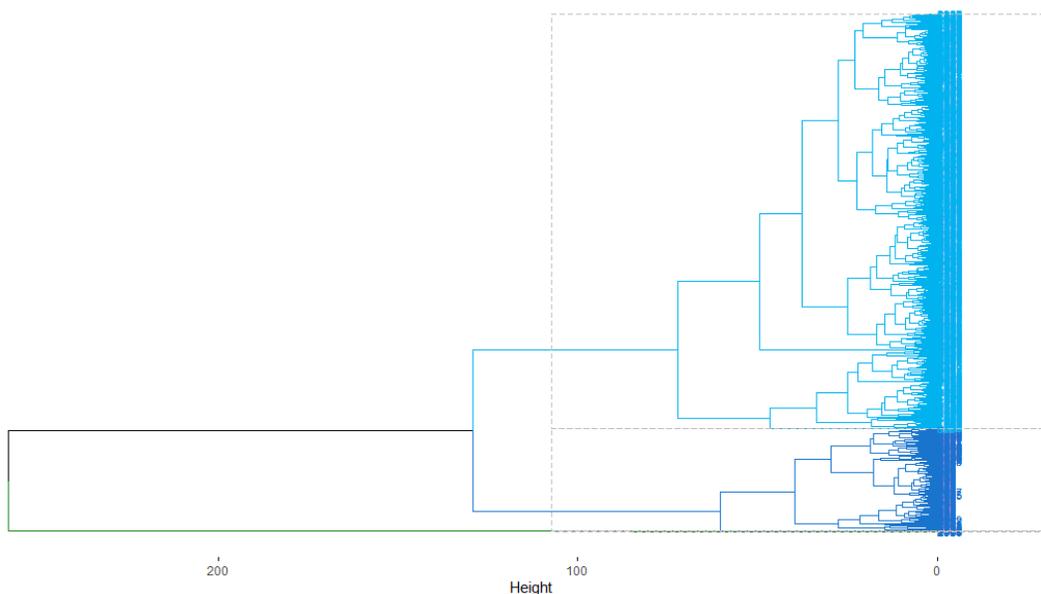


Figura 22: Primer dendrograma para los datos de calidad de agua.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Siguiendo con ello, se realiza un segundo análisis de conglomerados jerárquico (Figura 23) y se ha encontrado que un clúster representa el 99.918% de los datos (azul) y vuelven a aparecer los datos atípicos e independientes representando un 0.082% (verde).

Herarchical clustering

Distancia euclídea, Método del promedio

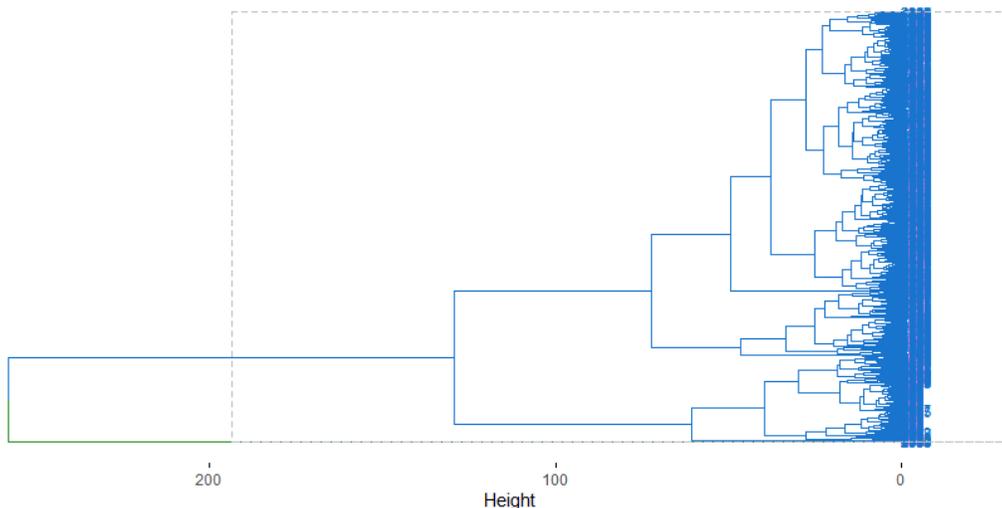


Figura 23: Segundo dendrograma para los datos de calidad de agua.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

5.3.3 Agrupamiento *K-medias*

El algoritmo de *k-medias*, agrupa o predice los datos con un aprendizaje no supervisado. El usuario especifica el número de agrupaciones k . Cada agrupación tiene un vector medio (centroide). La distancia Euclídea se utiliza para encontrar el clúster más cercano al objeto. El agrupamiento se realiza iterativamente para asignar el objeto al clúster más cercano (Vintimilla *et al.*, 2017). Este es uno de los métodos iterativos descendentes más populares entre los métodos de conglomerado. Está destinado a situaciones en las cuales todas las variables son del tipo cuantitativo. Es especialmente útil cuando se cuenta con un gran número de casos (López, 2016).

Se realiza el análisis *K-medias* para tres grupos el cual refleja una similitud (o semejanza) en el comportamiento de los lagos, ya que si bien, según la Figura 24, se aprecian los 3 grupos, estos mezclan los lagos entre las distintas agrupaciones, no permitiendo obtener una separación en base a fundamento notorio.

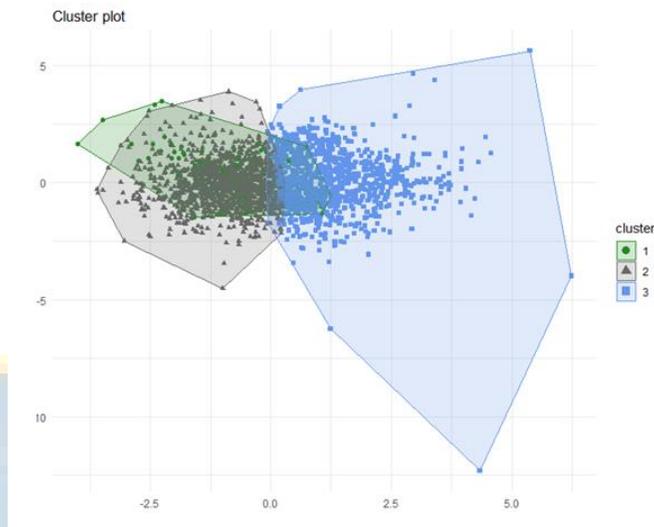


Figura 24: Primer agrupamiento mediante el algoritmo K-medias.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Por otro lado, se realizó el algoritmo K-medias para dos grupos. En la Figura 25, se puede observar que el resultado no muestra diferencias importantes en la distribución de los lagos. Los datos no permiten hacer una segregación entre los grupos, ya que, al igual que en el primer agrupamiento, la diferencia entre los grupos no permite una sustancial inferencia.

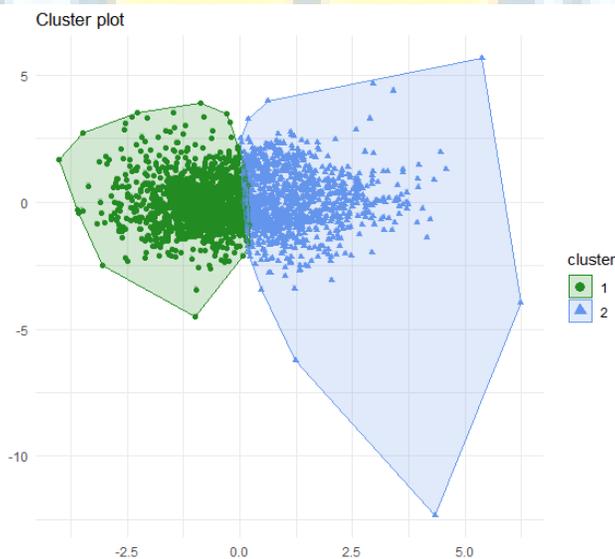


Figura 25: Segundo agrupamiento mediante el algoritmo K-medias.
Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Finalmente, el método jerárquico y K-medias mostraron que los datos de la calidad del agua no generan grandes evidencias para generar una división de grupos, por lo que se valida la primera tipología de lagos en base a las variables geomorfológicas, asumiendo, que en cuanto a calidad de agua, los lagos no presentan una gran variabilidad.



5.4 Calidad de los grupos tipológicos

Para dar comienzo al desarrollo del último objetivo, se trabaja con la totalidad de los datos de calidad de agua de los lagos Norpatagónicos, a excepción de los lagos Huishue, Gris, Gemelas y Constancia que son los lagos para los cuales no se encuentra ningún dato de calidad disponible. En adelante los lagos se presentan en el orden de acuerdo a los grupos tipológicos obtenidos mediante el análisis de conglomerados en la sección 5.2; en color celeste se encuentra el Grupo 1 (Chapo, Colico, Pirihueico, Caburgua, Riñihue, Pellaifa, Pullinque y Huilipilún), seguido por el color azul del Grupo 2 (Tinquilco), para terminar con el Grupo 3 de color verde (Puyehue, Maihue, Rupanco, Panguipulli, Neltume, Calafquén, Todos los Santos, Villarrica, Llanquihue y Ranco).

En la Anexo 7, se puede apreciar los lagos 19 lagos en el orden recién mencionado, el año en que se encuentra el primer registro de los datos y último, al igual que el número de los datos por variables de calidad. La tabla 26, muestra el resumen de esta, donde encontramos los años desde donde comienzan y terminan los registros de datos, el número de variables que cuenta con datos y el número total de datos por lago. Se observa que el Lago Ranco presenta su primer registro en el año 1976, siendo el año de registro más antiguo, seguido por el Lago Caburgua, en el año 1979; mientras que los lagos Pellaifa, Pullinque y Huilipilún sólo cuentan con registros del año 2021. De las 38 variables consideradas dado que al menos contaban con un dato de registro, el Lago Caburgua es el que presenta mayor cantidad de datos por variables reuniendo un total de 37, seguido por el Lago Colico y Todos los Santos, con 36 y 32 variables con datos, respectivamente; los Lagos Huilipilún y Pellaifa son los que presentan menor cantidad de variables con datos con un total de 11 variables. Por otro lado, respecto a la cantidad de datos, el Lago Villarrica es el que presenta mayor número de estos con un total de 5322 datos, seguido por los lagos Llanquihue, Panguipulli y Ranco con un total de 4955, 2907 y

2872, respectivamente; los lagos Pellaifa y Huilipilún nuevamente son nombrados ya que presentan solo 11 datos, y como fueron mencionado anteriormente con 11 variables por dato, quiere decir que sólo cuentan con 1 dato por variable sólo en el año 2021.

Tabla 26: Años de registros, N.º de variables y total de datos por lago.

| Lagos | Años | N.º de Variables | Total de datos |
|------------------|-----------|------------------|----------------|
| Chapo | 1986-2021 | 18 | 1810 |
| Colico | 1994-2021 | 36 | 690 |
| Pirihueico | 2015-2021 | 17 | 238 |
| Caburgua | 1979-2021 | 37 | 1761 |
| Riñihue | 1987-2021 | 17 | 2870 |
| Pellaifa | 2021 | 11 | 11 |
| Pullinque | 2021 | 12 | 12 |
| Huilipilún | 2021 | 11 | 11 |
| Tinquilco | 2015-2021 | 17 | 42 |
| Puyehue | 2012-2021 | 17 | 781 |
| Maihue | 1996-2021 | 19 | 1751 |
| Rupanco | 1980-2021 | 31 | 833 |
| Panguipulli | 1997-2021 | 17 | 2907 |
| Neltume | 2012-2021 | 17 | 512 |
| Calafquén | 1997-2021 | 17 | 2477 |
| Todos los Santos | 1982-2021 | 32 | 1310 |
| Villarrica | 1986-2019 | 25 | 5322 |
| Llanquihue | 1986-2019 | 25 | 4955 |
| Ranco | 1976-2021 | 17 | 2872 |

Fuente: Elaboración propia.

5.4.1 Estado Trófico de los Lagos

Como se mencionó anteriormente, los sistemas lacustres se pueden clasificar según la concentración de nutrientes presentes en el cuerpo de agua y/o en base a las respuestas ecológicas frente a la carga que presentan (Moreno *et al.*, 2010). El método que más se utiliza para evaluar el estado de los lagos es mediante índices que manifiesten su condición siendo los más utilizados aquellos que integran más de un criterio en la clasificación.

i. Índice de Carlson

De acuerdo con el ranking basado en el promedio TSI de los datos registrado para cada lago, se observa a partir de la Tabla 27, que de 19 lagos considerados: 1 se encuentra en un estado hipereutrífico; 1 en situación eutrífica, 0 tienen una condición mesotrófica, 7 están en un rango mesoligotrófico; y 10 en uno oligotrófico. Es decir, un 89% de los lagos analizados está en un rango oligotrófico a mesoligotrófico, y un 11% está en un rango de eutrífico a hipereutrífico. Por otro lado, se percibe que el lago Villarrica tiene el mayor TSI y el lago Piriñueico tiene el TSI más bajo. Además, el lago Llanquihue está más próximo a un estado hipereutrífico, mientras que el lago Riñihue, Calafquén, Panguipulli, Chapo, Puyehue, Neltume y Caburgua se encuentran más cercanos al siguiente estado trófico, que sería Mesotrófico.

Tabla 27: Condición trófica según Índice de Carlson y ranking según el valor de TSI.

| Lagos | TSId | TSIp | TSIc | TSI | Estado | Posición |
|------------------|--------|---------|--------|--------|----------------|----------|
| Chapo | 24,914 | 32,328 | 38,262 | 31,835 | Mesoligotrofia | 14 |
| Colico | 20,420 | 27,863 | 25,957 | 24,746 | Oligotrofia | 3 |
| Piriñueico | 24,017 | 21,672 | 15,383 | 20,357 | Oligotrofia | 1 |
| Caburgua | 22,544 | 36,073 | 31,759 | 30,125 | Mesoligotrofia | 11 |
| Riñihue | 24,934 | 47,244 | 33,725 | 35,301 | Mesoligotrofia | 17 |
| Pellaifa | 20,977 | 29,987 | 20,632 | 23,865 | Oligotrofia | 2 |
| Pullinque | 24,557 | 29,987 | 30,165 | 28,237 | Oligotrofia | 5 |
| Huilipilún | 26,820 | 29,987 | 32,815 | 29,874 | Oligotrofia | 9 |
| Tinquilco | 23,798 | 29,633 | 32,841 | 28,757 | Oligotrofia | 7 |
| Puyehue | 29,853 | 34,830 | 29,984 | 31,556 | Mesoligotrofia | 13 |
| Maihue | 27,423 | 36,748 | 25,686 | 29,952 | Oligotrofia | 10 |
| Rupanco | 20,808 | 33,160 | 28,610 | 27,526 | Oligotrofia | 4 |
| Panguipulli | 26,470 | 36,603 | 34,294 | 32,456 | Mesoligotrofia | 15 |
| Neltume | 30,021 | 31,460 | 29,829 | 30,436 | Mesoligotrofia | 12 |
| Calafquén | 24,495 | 46,282 | 29,924 | 33,567 | Mesoligotrofia | 16 |
| Todos los Santos | 26,915 | 33,653 | 24,887 | 28,485 | Oligotrofia | 6 |
| Villarrica | 29,770 | 135,368 | 45,497 | 70,212 | Hipereutrofia | 19 |
| Llanquihue | 20,232 | 112,394 | 29,488 | 54,038 | Eutrofia | 18 |
| Ranco | 22,196 | 34,622 | 29,876 | 28,898 | Oligotrofia | 8 |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al análisis por grupo, en el grupo 1 se encuentran los lagos en las mejores 3 posiciones que son el lago Pirihueico, Pellaifa y Colico; en el grupo 3 está el lago Rupanco en la posición 4, seguido por los lagos Pullinque (Grupo 1) y Todos los Santos; el lago Tinquilco, único del Grupo 2, se encuentra en la posición 7.

Por otro lado, algunos autores sugieren incorporar la variable de NT en el promedio TSI del Índice de Carlson, en ese caso se obtienen los resultados presentes en la tabla 28 (los lagos Pellaifa y Huilipilún se excluyen por no contar con el dato NT). En este caso, el lago Villarrica se encuentra en estado Eutrófico, seguido por el lago Llanquihue en estado mesotrófico, luego en estado mesoligotrófico se encuentra los lagos Calafquén y Riñihue, para finalmente encontrar 13 lagos en estado oligotrófico, que van, desde el primer lugar, el lago Pirihueico hasta el lago Puyehue en la posición 13.

Tabla 28: Condición trófica según Índice de Carlson con NT y ranking según el valor de TSI.

| Lagos | TSId | TSIp | TSIc | TSIn | TSI+n | Estado | Posición |
|------------------|--------|---------|--------|--------|--------|----------------|----------|
| Chapo | 24,914 | 32,328 | 38,262 | 20,585 | 29,022 | Oligotrofia | 12 |
| Colico | 20,420 | 27,863 | 25,957 | 19,237 | 23,369 | Oligotrofia | 2 |
| Pirihueico | 24,017 | 21,672 | 15,383 | 6,892 | 13,545 | Oligotrofia | 1 |
| Caburgua | 22,544 | 36,073 | 31,759 | 24,998 | 28,843 | Oligotrofia | 11 |
| Riñihue | 24,934 | 47,244 | 33,725 | 18,578 | 31,120 | Mesoligotrofia | 14 |
| Pullinque | 24,557 | 29,987 | 30,165 | 23,448 | 27,040 | Oligotrofia | 9 |
| Tinquilco | 23,798 | 29,633 | 32,841 | 17,777 | 26,012 | Oligotrofia | 6 |
| Puyehue | 29,853 | 34,830 | 29,984 | 23,667 | 29,583 | Oligotrofia | 13 |
| Maihue | 27,423 | 36,748 | 25,686 | 14,141 | 25,999 | Oligotrofia | 5 |
| Rupanco | 20,808 | 33,160 | 28,610 | 12,466 | 23,761 | Oligotrofia | 3 |
| Panguipulli | 26,470 | 36,603 | 34,294 | 17,722 | 28,772 | Oligotrofia | 10 |
| Neltume | 30,021 | 31,460 | 29,829 | 15,460 | 26,692 | Oligotrofia | 7 |
| Calafquén | 24,495 | 46,282 | 29,924 | 24,748 | 31,362 | Mesoligotrofia | 15 |
| Todos los Santos | 26,915 | 33,653 | 24,887 | 21,717 | 26,793 | Oligotrofia | 8 |
| Villarrica | 29,770 | 135,368 | 45,497 | 7,889 | 54,631 | Eutrofia | 17 |
| Llanquihue | 20,232 | 112,394 | 29,488 | 17,516 | 44,907 | Mesotrofia | 16 |
| Ranco | 22,196 | 34,622 | 29,876 | 15,949 | 25,661 | Oligotrofia | 4 |

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, en el análisis por grupo, en el grupo 1 se encuentran sólo las primeras 2 posiciones que son los lagos Pirihueico y Colico; luego se encuentran los lagos del grupo 3 Rupanco, Ranco y Maihue, y el lago Tinquilco, único del Grupo 2, se encuentra en la posición número 6.

Es preciso mencionar que el presente ranking considera el promedio del total de datos encontrados según las variables que dispone el índice de Carlson, en base a esto se comparan lagos cuyo último muestreo corresponde a uno reciente, en 2021, con algunos que presentan datos desde 1976.

ii. Índice OCDE

Según los criterios establecidos por la OCDE (1982), y como se muestra en la tabla 29, el Lago Pirihueico es el único que se encontraría en estado ultraoligotrófico para todas las variables (fósforo total, clorofila a media, clorofila a max, disco secchi medio y disco secchi min), luego se encontrarían los lagos Colico, Pellaifa y Rupanco con una variable oligotrófica y 4 ultraoligotróficas. Seguido se encuentra el lago Pullinque y Tinquilco, con 3 variables en estado ultraoligotrófico y 2 oligotróficas. Los lagos Carburgua, Huilpilún, Neltume y Ranco siguen presentando 2 variables ultraoligotróficas y 3 oligotróficas.

Lago Chapo y Panguipulli presentan todas sus variables en estado oligotrófico, mientras que los lagos Riñihue, Maihue, Calafquén y Todos los Santos presentan una de las cinco variables en estado mesotrófico. El lago Llanquihue presenta 3 variables ultraoligotróficas, 1 oligotrófica y 1 hipertrófica, mientras que el lago Villarrica presenta 1 variable oligotrófica, 2 mesotróficas, 1 eutrófica y 1 hipereutrófica, quedando como el lago de peor condición según el índice de la OCDE.

Tabla 29: Condición trófica según Índice de la OCDE.

| Lagos | Pt | Ch(a) Media | Ch(a) Max | DS Media | DS Min | Pt | Ch(a) Med | Ch(a) Max | DS Med | DS Min |
|---------------|----------|-------------|-----------|----------|--------|----|-----------|-----------|--------|--------|
| Chapo | 7,058 | 2,184 | 6,050 | 11,414 | 5,500 | O | O | O | O | O |
| Colico | 5,178 | 0,623 | 2,329 | 15,592 | 9,500 | O | U | U | U | U |
| Pirihueico | 3,371 | 0,212 | 0,212 | 12,147 | 8,450 | U | U | U | U | U |
| Caburgua | 9,151 | 1,125 | 2,900 | 13,455 | 6,000 | O | O | O | U | U |
| Riñihue | 19,856 | 1,375 | 5,267 | 11,398 | 4,000 | M | O | O | O | O |
| Pellaifa | 6,000 | 0,362 | 0,362 | 15,000 | 15,000 | O | U | U | U | U |
| Pullinque | 6,000 | 0,957 | 0,957 | 11,700 | 11,700 | O | U | U | O | U |
| Huilipilún | 6,000 | 1,253 | 1,253 | 10,000 | 10,000 | O | O | U | O | U |
| Tinquilco | 5,855 | 1,257 | 1,257 | 12,333 | 10,000 | O | O | U | U | U |
| Puyehue | 8,394 | 0,939 | 2,659 | 8,102 | 3,000 | O | U | O | O | O |
| Maihue | 9,589 | 0,606 | 2,358 | 9,590 | 2,560 | O | U | U | O | M |
| Rupanco | 7,477 | 0,816 | 2,000 | 15,176 | 9,500 | O | U | U | U | U |
| Panguipulli | 9,493 | 1,457 | 4,970 | 10,245 | 3,000 | O | O | O | O | O |
| Neltume | 6,645 | 0,924 | 2,365 | 8,008 | 5,000 | O | U | U | O | O |
| Calafquén | 18,574 | 0,933 | 2,667 | 11,751 | 4,000 | M | U | O | O | O |
| T. los Santos | 7,737 | 0,559 | 1,200 | 9,934 | 1,500 | O | U | U | O | M |
| Villarrica | 8952,723 | 4,566 | 30,307 | 8,149 | 2,000 | H | M | E | O | M |
| Llanquihue | 1819,846 | 0,893 | 3,210 | 15,796 | 8,000 | H | U | O | U | U |
| Ranco | 8,274 | 0,929 | 3,733 | 13,784 | 5,500 | O | U | O | U | O |

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar un análisis por grupo, dentro del Grupo 1, el lago Pirihueico es el que se encuentra en mejor condición, seguido por el lago Pellaifa y Colico. El Lago Tinquilco es el único presente en el Grupo 2, y, en el Grupo 3 presenta mejor condición trófica según este índice, el lago Rupanco.

De igual forma que en el índice de la sección 5.4.1.1, el presente índice considera el promedio del total de datos encontrados según las variables que dispone el índice de la OCDE, en base a esto se comparan lagos cuyo último muestreo corresponde a uno reciente, en 2021, con algunos que presentan datos desde 1976.

5.4.1.3 Índice de Burns

Burns, como se mencionó anteriormente, establece 7 clasificaciones según el valor del índice trófico que arroja bajo sus fórmulas. Como se observa en la Tabla 30, de los 19 lagos que se analizaron, 0 lagos están en condición de ultramicrotrofia, 4 lagos se encuentran en condición de microtrofia (Colico, Pirihueico, Pellaifa y Rupanco), en estado oligotrófico se encuentran 12 lagos (Chapo, Caburgia, Riñihue, Pullinque, Huilipilún, Tinquilco, Puyehue, Maihue, Panguipulli, Neltume, Calafquén, Todos los Santos y Ranco), 1 en rango de mesotrofia (Lago Llanquihue), 1 en condición de eutrofia (Lago Villarrica) y 0 en estado de hipereutrofia.

Tabla 30: Condición trófica según Índice de Burns y ranking según el valor de TLI.

| Lagos | TLc | TLs | TLp | TLn | TLI | Estado | Posición |
|------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------------|----------|
| Chapo | 3,082 | 1,971 | 2,696 | 2,352 | 2,525 | Oligotrofia | 14 |
| Colico | 1,698 | 1,441 | 2,303 | 2,230 | 1,918 | Microtrofia | 3 |
| Pirihueico | 0,509 | 1,872 | 1,759 | -0,137 | 1,001 | Microtrofia | 1 |
| Caburgia | 2,350 | 1,702 | 3,025 | 2,752 | 2,457 | Oligotrofia | 12 |
| Riñihue | 2,571 | 1,974 | 4,008 | 2,170 | 2,681 | Oligotrofia | 17 |
| Pellaifa | 1,099 | 1,511 | 2,490 | - | 1,700 | Microtrofia | 2 |
| Pullinque | 2,171 | 1,932 | 2,490 | 2,612 | 2,301 | Oligotrofia | 10 |
| Huilipilún | 2,469 | 2,175 | 2,490 | - | 2,378 | Oligotrofia | 11 |
| Tinquilco | 2,472 | 1,847 | 2,459 | 2,098 | 2,219 | Oligotrofia | 7 |
| Puyehue | 2,151 | 2,482 | 2,916 | 2,631 | 2,545 | Oligotrofia | 15 |
| Maihue | 1,667 | 2,238 | 3,085 | 1,768 | 2,190 | Oligotrofia | 6 |
| Rupanco | 1,996 | 1,490 | 2,769 | 1,617 | 1,968 | Microtrofia | 4 |
| Panguipulli | 2,635 | 2,139 | 3,072 | 2,093 | 2,485 | Oligotrofia | 13 |
| Neltume | 2,133 | 2,499 | 2,620 | 1,888 | 2,285 | Oligotrofia | 9 |
| Calafquén | 2,144 | 1,925 | 3,923 | 2,729 | 2,680 | Oligotrofia | 16 |
| Todos los Santos | 1,578 | 2,185 | 2,813 | 2,455 | 2,258 | Oligotrofia | 8 |
| Villarrica | 3,895 | 2,474 | 11,758 | 1,202 | 4,832 | Eutrofia | 19 |
| Llanquihue | 2,095 | 1,416 | 9,737 | 2,074 | 3,831 | Mesotrofia | 18 |
| Ranco | 2,139 | 1,661 | 2,898 | 1,932 | 2,157 | Oligotrofia | 5 |

Fuente: Elaboración propia.

Tras analizar grupalmente, en el Grupo 1, destaca el Lago Pirihueico con el mejor valor de TLI con 1,001 (estando muy cercano a la condición de Ultramicrotrofía), seguido por el lago Pellaifa y el lago Colico, con valores de 1,700 y 1,918, respectivamente. En el Grupo 2, sólo se encuentra el lago Tinquilco con un valor de 2,219 quedando en la posición 7 según este índice. El Grupo 3, destaca el lago Rupanco con valor de 1,968, estando en la posición 4 respecto a los 19 lagos, mientras que el lago Villarrica con un valor de 4,832 es el que se encuentra en la posición 19.

Al igual que con los índices anteriores, el presente índice considera el promedio del total de datos encontrados según las variables que dispone el índice de Burns, en base a esto se comparan lagos cuyo último muestreo corresponde a uno reciente, en 2021, con algunos que presentan datos desde 1976.

5.4.2 Lagos de Referencia

En consideración al punto anterior, se reconoce que los lagos de referencia utilizados para establecer el estado basal de los grupos tipológicos corresponden a los lagos mejor posicionados en cuando al estado trófico en el que se encuentran. Si analizamos por grupo tipológico, según el Índice de Carlson, Índice OCDE e Índice de Burns, el lago que se encuentra en mejor trofía para el Grupo 1 corresponde al Lago Pirihueico, seguido por el Lago Pellaifa y Lago Colico. Para el Grupo 2, sólo encontramos en Lago Tinquilco; mientras que para el Grupo 3, el que presenta mejor estado trófico según los índices es el Lago Rupanco, seguido por el Lago Maihue y Lago Ranco.

5.4.3 Variables y valores sugeridos a normar

En la Tabla 31, se presentan las variables de calidad de agua con los valores sugeridos a normar. La elección de estas variables se basa en que son aquellas

que presentan mayor cantidad de datos para los lagos; es decir, son las variables que se encuentran en gran número para la totalidad de los lagos con datos disponibles. Los valores que se sugieren en su mayoría corresponden al percentil 80 de la base de la totalidad de los datos encontrados por lago, sin embargo, para el caso de Oxígeno disuelto (OD) y para la Transparencia o Disco Secchi (DS) se consideró el percentil 66. En el caso del pH, se considera un rango, ya que según APHA (2005) este es el rango que debe considerar para los ecosistemas acuáticos oligotróficos; y en el caso de la temperatura y conductividad, se representa mediante el percentil 80 con un delta. Los valores que presentan el signo \geq (mayor o igual) es debido a que se espera incrementen el valor sugerido. Por otro lado, el Lago Tinquilco, no cuenta con datos de sólidos totales suspendidos y alcalinidad, por lo que el Grupo 2 no tiene valor sugerido en cuanto a esas variables.

Tabla 31: Valores sugeridos a normar por grupo tipológico.

| Variable | Unidad | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 |
|---|-----------------|-----------------------------|----------------|-------------------------------|
| | | Pirihueico | Tinquilco | Rupanco |
| Temperatura | ΔT (°C) | 10,8 \pm 8,6 | 15,3 \pm 7,1 | 12,0 \pm 4,3 |
| Conductividad específica | (μ S/cm) | 58,0 \pm 25,9 | 30,6 \pm 2,5 | 52,0 \pm 10,9 |
| pH | Rango (unidad) | 6,5 – 8,5 | 6,5 – 8,5 | 6,5 – 8,5 |
| Oxígeno disuelto | (mg/l) | \geq 7,9. | 8,1 | 10,8 |
| Saturación de oxígeno | (%) | \geq 79,8. | 88,2 | 101,4 |
| Turbiedad | (NTU) | 1,0. | 1,0 | 2,5 |
| Transparencia Disco Secchi | (m) | \geq 12,8 | \geq 12,9 | 16,0 |
| Nitrógeno de Amonio (N-NH ₄) | (mg/l) | 0,020 | 0,009 | 0,020 |
| Nitrógeno Total | (mg/l) | 0,060 | 0,082 | 0,069 |
| Fósforo de Ortofosfato (P-PO ₄) | (mg/l) | 0,004 | 0,002 | 0,003 |
| Fósforo Total | (mg/l) | 0,013 | 0,007 | 0,009 |
| Clorofila a | (μ g/l) | 0,2. | 1,3 | 1,2 |
| Demanda Química de Oxígeno | (mg/l) | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| Sólidos Totales Suspendidos | (mg/l) | 31,8 \pm 3,5 [^] | | 15,2 \pm 17,0 ^{''} |
| Alcalinidad | (mval/l) | 0,37 [*] | | 0,59 |

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos histórica de calidad de agua.

Teniendo en cuenta la Tabla 31, se destaca que de los lagos representativos, dos de estos presentan datos del 2015 y 2021 (Pirihueico y Tinquilco), mientras que sólo el Lago Rupanco tiene mayor representación histórica en la obtención de los valores a sugerir, ya que se consideran datos de 1980 hasta 2021.

Por otro lado, se presentan los niveles de calidad de agua deseados según las NSCA Lago Llanquihue y Villarrica, respectivamente, ambos ubicados en el Grupo Tipológico 3. La primera (Tabla 32), establece como parámetros conductividad, pH, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, turbiedad, sílice, DQO, transparencia, nitrógeno total, fósforo total y clorofila "a"; considerando 10 de las 15 variables sugeridas a normar (el DS N°122 no considera temperatura, N-NH₄, P-PO₄, STS y Alcalinidad; pero si considera sílice). En cuanto a los valores que se consideran, no se establecen diferencias significativas, ya que en la mayoría de los casos los valores sugeridos son más exigentes que los de la norma; sólo en el caso de la conductividad la norma establece un valor bastante alto en comparación al valor sugerido.

Tabla 32: Niveles de Calidad por Áreas de Vigilancia en el Lago Llanquihue.

| Parámetros | Unidad | Llanquihue | | | |
|-----------------------|--------|--------------|-----------|-----------|--------------|
| | | Puerto Octay | Frutillar | Ensenada | Puerto Varas |
| Conductividad | uS/cm | 110 | 110 | 110 | 110 |
| pH | | 6,5 - 8,5 | 6,5 - 8,5 | 6,5 - 8,5 | 6,5 - 8,5 |
| Oxígeno disuelto | mg/l | ≥ 8,5 | ≥ 8,5 | ≥ 8,5 | ≥ 8,5 |
| Saturación de oxígeno | | ≥ 85 | ≥ 85 | ≥ 85 | ≥ 85 |
| Turbiedad | NTU | 2,1 | 2,1 | 2,4 | 2,5 |
| Sílice | mg/l | 1,83 | 1,84 | 1,77 | 1,8 |
| DQO | mg/l | 4,8 | 4,9 | 6 | 5 |
| Transparencia | m | ≥ 13,5 | ≥ 14 | ≥ 16 | ≥ 12,5 |
| Nitrógeno total | mg/l | 0,12 | 0,14 | 0,13 | 0,13 |
| Fósforo total | mg/l | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Clorofila "a" | mg/l | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |

Fuente: Extraído de DS N°122 (NSCA Lago Llanquihue).

La tabla 33, que corresponde a la situación del Lago Villarrica, establece como parámetros la trofía deseada, transparencia, fósforo disuelto, fósforo total,

saturación de oxígeno, nitrógeno disuelto, nitrógeno total y clorofila “a”; considerando 5 de las 15 variables sugeridas a normar (el DS N°19 no considera temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, turbiedad, N-NH₄, P-PO₄, STS y Alcalinidad; pero si considera fósforo disuelto y nitrógeno disuelto). En cuanto a los valores que se consideran, se encuentran diferencias relevantes en los valores propuestos para transparencia, ya que presenta valores muy bajos (promedio de 7-9 m y mínimo de 4-5 m); valores propuestos para nitrógeno total, ya que establece valores promedio anual de 0,15 mg/l, mientras se sugieren valores de 0,082 mg/l; por último, los valores de clorofila, ya que al igual que el nitrógeno presenta valores muy altos, considerando casi 4 veces el valor sugerido a normar para el Grupo 3.

Tabla 33: Niveles de Calidad por Áreas de Vigilancia en el Lago Villarrica.

| Parámetros | Unidad | Villarrica | | | | | | |
|-----------------------|--------|----------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | Criterio | PEL | Poza | Pucón | Norte | Villarrica | Sur |
| Trofia Deseada | | | Oligotrófico | Oligomesotrófico | Oligomesotrófico | Oligomesotrófico | Oligomesotrófico | Oligomesotrófico |
| Transparencia | m | Promedio anual | ≥ 9 | ≥ 7 | ≥ 7 | ≥ 7 | ≥ 7 | ≥ 7 |
| | | Mínimo | ≥ 5 | ≥ 4 | ≥ 4 | ≥ 4 | ≥ 4 | ≥ 4 |
| Fósforo disuelto | mg p/l | Promedio anual | ≤ 0,010 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 |
| | | Máximo | ≤ 0,015 | ≤ 0,025 | ≤ 0,025 | ≤ 0,025 | ≤ 0,025 | ≤ 0,025 |
| Fósforo total | mg P/l | Promedio anual | ≤ 0,010 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 |
| | | Máximo | ≤ 0,015 | ≤ 0,025 | ≤ 0,025 | ≤ 0,025 | ≤ 0,025 | ≤ 0,025 |
| Saturación de oxígeno | % | Mínimo | ≥ 80 | ≥ 70 | ≥ 70 | ≥ 70 | ≥ 70 | ≥ 70 |
| Nitrógeno disuelto* | mg N/l | Promedio anual | ≤ 0,10 | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 |
| | | Máximo | ≤ 0,15 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 |
| Nitrógeno total | mg N/l | Promedio anual | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 | ≤ 0,15 |
| | | Máximo | ≤ 0,20 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 |
| Clorofila | ug/l | Promedio anual | ≥ 4 | ≥ 5 | ≥ 5 | ≥ 5 | ≥ 5 | ≥ 5 |
| | | Máximo | ≥ 6 | ≥ 10 | ≥ 10 | ≥ 10 | ≥ 10 | ≥ 10 |

nota: (*) es la suma de N-nitrato, N-nitrito y N-amonio.

Fuente: Extraído de DS N°19 (NSCA Lago Villarrica).

Como se observa de acuerdo a las tablas 32 y 33, las NSCA Lago Llanquihue y Villarrica, establecen distintos parámetros y valores a considerar en comparación a los propuestos como sugerencia para el grupo 3 de la tipología de los lagos Norpatagónicos, por lo que se sugiere actualizarlos, debido a que ambas normas presentan excedencia, por lo que se requiere actualización de la normas.



6. Conclusiones

- i. Si bien es posible caracterizar los lagos de acuerdo con sus características geomorfológicas, se observa que, de la totalidad de los 23 lagos Norpatagónicos, algunos de ellos cuentan con poca o nula información, tales como Huishue, Gris, Gemelas y Constancia.
- ii. Considerando todos los Lagos Araucanos, mediante el análisis de ordenación, se identifican 3 grupos tipológicos a través del análisis de conglomerado (clúster), validado por escalamiento multidimensional, siendo: Grupo 1 [Chapo, Colico, Pirihueico, Caburgua, Riñihue, Huishue, Pellaifa, Pullinque y Huilipilún], Grupo 2 [Gris, Gemelas, Constancia y Tinquilco] y Grupo 3 [Puyehue, Maihue, Rupanco, Panguipulli, Neltume, Calafquén, Todos los Santos, Villarrica, Llanquihue y Ranco].
- iii. De las variables de calidad de agua, respecto al análisis de ordenación (Análisis de conglomerado y Agrupamiento K-medias), no se observaron diferencias significativas entre los diversos lagos estudiados, sin embargo, existen lagos con muy pocos datos, lo que podría explicar esta similitud.
- iv. Dentro de los grupos tipológicos identificados, se analizó el estado trófico de cada lago que cuenta con información, se obtuvo que los lagos Pirihueico (Grupo 1), Tinquilco (Grupo 2) y Rupanco (Grupo 3), son los representantes por grupo que mejor condición presentan.
- v. Si bien las normas no exigen un mínimo de variable a normar, y los ejemplos de las normas existentes también son diferentes (NSCA Llanquihue y Villarrica, 11 y 7, respectivamente) se sugiere considerar las variables y valores propuestos, ya que se fundamentan sobre una base de datos históricos disponible para cada lago.

vi. Este trabajo de investigación tributa al ODS 6 debido a que se sugiere una norma para realizar una adecuada gestión de los RRHH (meta 6.5) y para proteger los ecosistemas lacustres mencionados (meta 6.6). De igual forma, aporta al ODS 15, ya que se vela por la conservación y uso sostenible de los ecosistemas interiores de agua dulce (meta 15.1).

vii. Finalmente, de acuerdo con la propuesta B de la DMA para definir tipología de lagos, no es posible realizar una NSCA macrozonal para el distrito de lagos Norpatagónicos, ya que se identifican tres grupos relevantes donde las variables tamaño y altura (m.s.n.m.) fueron relevantes.



6.1 Consideraciones Futuras

Para robustecer el ítem del análisis integral para la creación de la NSCA de los Lagos Norpatagónicos de Chile, se sugiere considerar lo siguiente:

- Considerar el estado de conservación de cada una de las especies que componen el ecosistema u objeto a conservar,
- Elaborar las Tablas de Clases de Calidad con el fin de evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos que se quiere normar, para esto se requiere por ejemplo: Evaluación de Riesgo Ecológico (ERE)/Bioensayos, Índices Biológicos, Indicadores de Hábitat, SE, etc.
- Identificar las presiones de uso que puedan tener incidencia en la calidad de agua (fuentes puntuales y difusas) cercanas a los lagos, así como también los contaminantes que se espera recibir en las aguas de estos (contaminantes orgánicos e inorgánicos, metales, contaminantes emergentes [microplásticos, HAPs, pesticidas, herbicidas], etc.. asociados a las distintas actividades que se realicen).
- Seguir realizando monitoreos anuales de las variables físico-químicas sugeridas a normar en al menos dos periodos del año, con la intención de validar y/o afinar la información que ya se encuentra disponible.
- Mantener en observación los indicadores hidromorfológicos, tales como, el volumen e hidrodinámica del lago, tiempo de renovación, la conexión con aguas subterráneas, la variación de profundidad del lago, cantidad, estructura y sustrato del lecho del lago y su estructura ribereña.
- Identificar las partes interesadas (tanto públicas como privadas) que se encuentren territorialmente en las cuencas de los lagos, y coordinar entre estos para implementar las medidas que permitan realizar las acciones del manejo de las cuencas que se requieran (gobernanza local).

7. Referencias Bibliográficas

- Abell, J. M., Ozkundakci, D., Hamilton, D. P., van Dam-Bates, P., & McDowell, R. W. (2019). Quantifying the Extent of Anthropogenic Eutrophication of Lakes at a National Scale in New Zealand [Article]. *Environmental Science & Technology*, 53(16), 9439-9452. <https://doi.org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1021/acs.est.9b03120>
- Abell, J. M., van Dam-Bates, P., Ozkundakci, D., & Hamilton, D. P. Reference and current Trophic Level Index of New Zealand lakes: benchmarks to inform lake management and assessment [Article; Early Access]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 22. <https://doi.org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1080/00288330.2020.1726974>
- Agencia Nacional de Aguas. (2002). ANA. La evolución de la gestión de los recursos hídricos de Brasil.
- Aguirre, M. 2011. La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Redesma*. 2011. 5(1):10-20.
- American Public Health Association (APHA). (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association.
- Amigo, J., Izco, J., de Compostela, S., & Rodríguez Guitián, M. A. (2007). Rasgos bioclimáticos del territorio templado de Chile. *Phytocoenologia*, 37(3-4), 739-751. <https://doi.org/10.1127/0340-269x/2007/0037-0739>
- Arismendi, I., Penaluna, B. & Soto, D. (2011). Body condition indices as a rapid assessment of the abundance of introduced salmonids in oligotrophic lakes of southern Chile. *Lake and Reservoir Management* 27:61-69.
- Arratia, G., 1981 Géneros de peces de aguas continentales de Chile. *Pb.Ocas.Mus.Nac.Hist. Nat.Chile*, 34:3-108
- Australian Government Initiative. *Guidelines for Fresh & Marine Water Quality*. Retrieved 18 de junio de 2020 from <https://www.waterquality.gov.au/anz-guidelines/resources/previous-guidelines/anzecc-armcanz-2000>
- Ballatore, T. J., & Muhandiki, V. S. (2002). The case for a World Lake Vision [Article]. *Hydrological Processes*, 16(11), 2079-2089. <https://doi.org/10.1002/hyp.1142>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2018). *Marco regulatorio en Chile y algunas experiencias internacionales en materia de descarga de residuos líquidos a distintos cuerpos receptores (España, Ecuador, Canadá, Australia y Estados Unidos de América)*. <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUENTA&prmID=82906>
- Biblioteca Del Congreso Nacional (s.f.). BCN. Clima y vegetación. Retrieved August 2, 2022, from <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/clima.htm>

- Burns, N., McIntosh, J., & Scholes, P. (2005). Strategies for managing the lakes of the rotorua district, New Zealand. *Lake and Reservoir Management*, 21(1), 61-72. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1080/07438140509354413>
- Burns, N., McIntosh, J., & Scholes, P. (2009). Managing the lakes of the Rotorua District, New Zealand. *Lake and Reservoir Management*, 25(3), 284-296. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1080/07438140903083815>
- Campos, H., Bucarey, E. y Arenas, J.N. (1974). Estudios limnológicos del lago Riñihue y río Valdivia (Chile). *BoL Soc. BioL de Concepción*. 28:47-67.
- Campos, H., Steffen, W., Román, C, Zúñiga, L. & Agüero, G. (1983). Limnological studies in lake Villarrica, Morphometric, physical, chemical, planktonical factors and primary productivity. *Arch. Hydrobiol.* 4 (65): 371-406.
- Campos, H. (1985). Distribution of the fishes in the andean rivers in the South of Chile. *Arch. Hydrobiol*, 104:169-191.
- Campos, H., Steffen, W., Agüero, G., Parra, O., & Zúñiga, L. (1988) Limnological studies of Lake Llanquihue (Chile), morphometry, physics, chemistry, plankton and primary productivity. *Archivs für Hydrobiologie (Supplement)* 81: 37-67.
- Campos, H. (1995). Determinación de la capacidad de carga (stock explotable) y balance de fósforo y nitrógeno en el Lago Rupanco, X Región. Informe final FIP-IT/93 -27. 376 pp.
- Carlson R. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22(2):361-369.
- Carpenter, S., Christensen, D., Cole, J., Cottingham, K., He, X., Hodgson, J., Pace, M. (1995). Biological control of eutrophication in lakes. *Environmental science & technology* 29(3):784-786.
- Carpenter, S., Lathrop, R. (1999). Lake restoration: capabilities and needs. *The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management. Hydrobiology* 136: 19-28.
- Carpenter, S. R., Stanley, E. H., & Vander Zanden, M. J. (2011). State of the World's Freshwater Ecosystems: Physical, Chemical, and Biological Changes. In A. Gadgil & D. M. Liverman (Eds.), *Annual Review of Environment and Resources, Vol 36* (Vol. 36, pp. 75-99). Annual Reviews. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1146/annurev-environ-021810-094524>
- Chidammodzi, C. L., & Muhandiki, V. S. (2016). An indicator framework for assessing the technology aspect of Integrated Lake Basin Management for Lake Malawi Basin [Article]. *Ecological Indicators*, 60, 789-801. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.021>
- Cuenca del Lago Tinquilco – Pucón. (2020, January 9). Pucón | PuconChile.travel. <https://puconchile.travel/que-hacer-en-pucon/cuenca-del-lago-tinquilco-pucon/>

- Comisión Nacional de Medio Ambiente. (2004). CONAMA. Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales y superficiales y marinas. Gobierno de Chile. 18pp
- Corporación Nacional Forestal. (s.f.). CONAF. Reservas de la Biósfera. Retrieved August 30, 2022, from <https://www.conaf.cl/parques-nacionales/reservas-de-la-biosfera/>
- da Silva, M. B., Goncalves, F., & Pereira, R. (2019). Lagos eutroficados someros portugueses: evaluación bajo la Directiva Marco del Agua y posibles medidas de restauración fisicoquímica [Article]. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 4(1), 10, Article 3. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1007/s41207-018-0090-9>
- Dai, Y. H., Feng, L., Hou, X. J., Choi, C. Y., Liu, J. G., Cai, X. B., Shi, L., Zhang, Y. L., & Gibson, L. (2019). Policy-driven changes in enclosure fisheries of large lakes in the Yangtze Plain: Evidence from satellite imagery [Article]. *Science of the Total Environment*, 688, 1286-1297. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.scitotenv.2019.06.179>
- Decreto 38. Aprueba reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile, 22 de septiembre de 2013.
- Dirección General de Aguas. (1995). DGA. Estudios Limnológicos de los Lagos Calafquén y Panquipulli. ed. Ministerio de Obras Públicas. Valdivia.
- Dirección General de Aguas. (1998). DGA. Estudios Limnológicos de los Lagos Caburgua y Maihue. ed. Ministerio de Obras Públicas, 23. Valdivia. <https://snia.mop.gob.cl/sad/LGO589.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2000). DGA. Estudio Limnológico de los Lagos Pihueico y Neltume. ed. Ministerio de Obras Públicas, 24. Valdivia. <https://snia.mop.gob.cl/sad/LGO2449.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2004). DGA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad Cuenca Río Maullín. ed. Ministerio de Obras Públicas. Santiago. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Maullin.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2004). DGA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad Cuenca Río Toltén. ed. Ministerio de Obras Públicas. Santiago. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Tolten.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2004). DGA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad Cuenca Río Valdivia. ed. Ministerio de Obras Públicas. Santiago. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Valdivia.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2009). DGA. Informe Técnico N° 4: Reserva del Río Petrohué para la conservación ambiental y el desarrollo local de la cuenca. ed. Ministerio de Obras Públicas. Santiago. <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5153.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2009). DGA. Informe Técnico N° 8: Reserva del Río Golgol para la conservación ambiental y el desarrollo local de la

- cuenca. ed. Ministerio de Obras Públicas. Santiago. <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH-5175.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2014). DGA. Informe Técnico Inventario de Cuencas, Subcuencas y Subsubcuencas de Chile. ed. Ministerio de Obras Públicas. Santiago. <https://snia.mop.gob.cl/sad/CUH5690.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2016). DGA. Atlas del Agua Chile 2016. ed. Ministerio de Obras Públicas, 5. Santiago. <https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2017). DGA. Análisis y Reformulación Red de Monitoreo de Lagos Región de los Ríos. ed. Ministerio de Obras Públicas, 418. Santiago. <https://snia.mop.gob.cl/sad/MAN5704.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2018). DGA. Análisis de la relación entre la concentración de clorofila "a" y la transparencia de los lagos monitoreados por la red de calidad de la DGA, y elaboración de un ranking de lagos basado en el estado trófico otorgado por estos parámetros. ed. Ministerio de Obras Públicas, 45. Santiago. <https://snia.mop.gob.cl/sad/LGO5750.pdf>
- Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de agosto de 2013 , por la que se modifican las Directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas Texto pertinente a efectos del EEE OJ L 226, 24.8.2013, p. 1–17 obtenido de: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/39/oj>
- Dornhofer, K., & Oppelt, N. (2016). Remote sensing for lake research and monitoring - Recent advances [Review]. *Ecological Indicators*, 64, 105-122. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.ecolind.2015.12.009>
- Echarri, I. (2007). Población, ecología y ambiente. España: Universidad de Navarra.
- FAO, 2000. Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. On-line: <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.HTM> visitado el 24 de Mayo de 2022.
- Flández, C. (s.f.). De lago Huishue a lago Gris, un paraíso oculto en plena cordillera de Los Andes - fly Fishing www.lavaguada.cl - Región de Los Ríos - Chile- Ricardo Ordoñez D. *La Vaguada*. Retrieved July 27, 2022, from <https://www.lavaguada.cl/reportajes/lago-huishue/lago-huishue.htm>
- Feng, S. L., Liu, S. G., Huang, Z. H., Jing, L., Zhao, M. F., Peng, X., Yan, W. D., Wu, Y. P., Lv, Y. H., Smith, A. R., McDonald, M. A., Patil, S. D., Sarkissian, A. J., Shi, Z. H., Xia, J., & Ogbodo, U. S. (2019). Inland water bodies in China: Features discovered in the long-term satellite data [Article]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(51), 25491-25496. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1073/pnas.1910872116>
- Fundación Chile Lagos Limpios. Retrieved 26 de mayo de 2020 from <https://chilelagoslimpios.cl/>

- Gaspari, F.J, Rodríguez, A.M., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Besteiro, S.I. (2013). Elementos Metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. (6) Buenos Aires, Argentina.
- Geller, W. (1992). The Temperature Stratification and related characteristics of Chilean Lakes in Midsummer. [Article]. *Aquatic Sciences*, 54(1), 37-57. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1007/bf00877263>
- Hair, J.F., Anderson, E., Tatham, R.L. & Black, (1999). *Análisis Multivariante*, Prentice-Hall, Madrid
- Hartig, J. H., Krantzberg, G., & Alsip, P. (2020). Thirty-five years of restoring Great Lakes Areas of Concern: Gradual progress, hopeful future [Review]. *Journal of Great Lakes Research*, 46(3), 429-442. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.jglr.2020.04.004>
- Hughes, R., Dunham S., Maas-Hebner K., Hebner, k., Schreck, C., Harte, M., Molina, N., Shock, C., Kaczynski V., Schaeffer, J. (2014). A review of urban water body challenges and approaches: rehabilitation and remediation. *Fisheries*, 39(1):18-29.
- Huot, Y., Brown, C. A., Potvin, G., Antoniades, D., Baulch, H. M., Beisner, B. E., Belanger, S., Brazeau, S., Cabana, H., Cardille, J. A., del Giorgio, P. A., Gregory-Eaves, I., Fortink, M. J., Lang, A. S., Laurion, I., Maranger, R., Prairie, Y. T., Rusak, J. A., Segura, P. A., Siron, R., Smol, J. P., Vinebrooke, R. D., & Walsh, D. A. (2019). The NSERC Canadian Lake Pulse Network: A national assessment of lake health providing science for water management in a changing climate [Article]. *Science of the Total Environment*, 695, 18, Article Unsp 133668. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.scitotenv.2019.133668>
- International Lake Environment Committee. (2007). ILEC. Integrated lake basin management: an introduction. International lake environment committee foundation: Kusatsu, Japan. 85pp
- Instituto Geográfico Militar. (2017). IGM. Lago Huilipilún [material cartográfico] / Reproducción electrónica. Santiago, Chile.
- Jara, P. (2016). *Fiscalización de Instrumentos de Gestión Ambiental: Relación entre las Normas de Calidad del Componente Hídrico y la Superintendencia del Medio Ambiente*. Universidad de Chile]. Santiago. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137464/Fiscalización-de-instrumentos-de-gestión-ambiental.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jeppesen, E., Noges, P., Davidson, T. A., Haberman, J., Noges, T., Blank, K., Lauridsen, T. L., Sondergaard, M., Sayer, C., Laugaste, R., Johansson, L. S., Bjerring, R., & Amsinck, S. L. (2011). Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive (WFD) [Article]. *Hydrobiologia*, 676(1), 279-297. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1007/s10750-011-0831-0>

- Kagalou, I., & Leonardos, I. (2009). Typology, classification and management issues of Greek lakes: implication of the Water Framework Directive (2000/60/EC) [Article; Proceedings Paper]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 150(1-4), 469-484. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0245-2>
- Kolada, A., Soszka, H., Cydzik, D., & Golub, M. (2005). Abiotic typology of Polish lakes [Article; Proceedings Paper]. *Limnologica*, 35(3), 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2005.04.001>
- Kong, X. Z., Zhan, Q., Boehrer, B., & Rinke, K. (2019). High frequency data provide new insights into evaluating and modeling nitrogen retention in reservoirs [Article]. *Water Research*, 166, 12, Article 115017. <https://doi.org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.watres.2019.115017>
- Lara, L., Moreno, H. (2006) Geología del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle. Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. No. 99, 26p. 1 mapa escala 1:50.000
- Laybourn-Parry, J., Perriss, S. J., Seaton, G. G. R., & Rohozinski, J. (1997). A mixotrophic ciliate as a major contributor to plankton photosynthesis in Australian lakes [Article]. *Limnology and Oceanography*, 42(6), 1463-1467. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.6.1463>
- Leon-Munoz, J., Echeverria, C., Marce, R., Riss, W., Sherman, B., & Iriarte, J. L. (2013). The combined impact of land use change and aquaculture on sediment and water quality in oligotrophic Lake Rupanco (North Patagonia, Chile, 40.8 degrees S) [Article]. *Journal of Environmental Management*, 128, 283-291. <https://doi.org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.jenvman.2013.05.008>
- Ley N° 19.300. Chile. Aprueba Ley sobre Bases Generales de Medio Ambiente. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Santiago, Chile, 09 de marzo de 1994. Modificada por la Ley 20.417.
- Liu, X. J., Lu, Q. F., Zhou, Y., Li, K., Xu, Y., Lv, Q., Qin, J. J., Ouyang, S., & Wu, X. P. (2020). Community characteristics of phytoplankton and management implications in Poyang Lake Basin [Article]. *Limnology*, 21(2), 207-218. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1007/s10201-019-00604-z>
- López, M. (2016). *Caracterización Multivariante del "Sentido de la Vida" en Pacientes sometidos a Hemodiálisis de la Provincia de Ñuble*. Proyecto de Título II. Universidad del Bio-Bio.
- Luebert, F., & Plischoff, P. (2017). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile (Vol. 2). Santiago, Chile: Editorial Universitaria.
- Mellios, N. K., Moe, S. J., & Lapidou, C. (2020). Using Bayesian hierarchical modelling to capture cyanobacteria dynamics in Northern European lakes. *Water Research*, 186, Article 116356. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116356>
- Mazzeo, N., Clemente, J., García-Rodríguez, F., Gorga, J., Kruk, C., Larrea, D., Meerhoff, M., Quintans, F., Rodríguez-Gallego, L. y Scasso, F.,

2002. Eutrofización: causas, consecuencias y manejo. En: Domínguez, A. y Prieto, R.G., eds. Perfil ambiental del Uruguay. Montevideo: Nordan. pp. 39-55.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2003). MEA. Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment. Washington. 2003. 49-70
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). MEA. Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis. Island Press, Washington DC
- Ministerio de Bienes Nacionales. (s.f.) MBIENES. Patrimonio Natural | Bienes Nacionales Protegidos. <https://patrimonio.bienes.cl/categoria-del-patrimonio/patrimonio-natural/bienes-nacionales-protegidos/?reg=los-rios&keyword=>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2012). MMA. Decreto N° 38: Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión, 12. <http://bcn.cl/2ewvv>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). MMA. Conservando el Patrimonio Natural de Chile. El Aporte de las Áreas Protegidas. Santiago, Chile. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/08/undp-cl-medioambiente-libro-patrimonioAP.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). MMA. *Informe Técnico de Antecedentes para Declarar a la Cuenca del Lago Villarrica como Zona Saturada por Clorofila "a", Transparencia y Fósforo Disuelto*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). MMA. Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas 2017. Santiago.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2018). MMA. Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017-2030. Santiago. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/Estrategia_Nac_Biodiv_2017_30.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). MMA. Resolución Exenta N° 437: Anteproyecto del Plan de Descontaminación por clorofila "a", transparencia y fósforo disuelto para la Cuenca del Lago Villarrica, 46 http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2020/proyectos/Folio_1719_17_64_RE_N_437_Aprueba_Anteproyecto_PDLago_Villarrica.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). MMA. Resolución Exenta N° 440: Programa de Regulación Ambiental 2020-2021., 8 <http://bcn.cl/2eww0>
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1994). MINSEGPRES. Ley N° 19300: Ley Sobre las Bases Generales del Medio Ambiente, 48 <http://bcn.cl/2dxy7>
- Ministry for the Environment. *Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality*. Retrieved 13 de junio de 2020 from <https://www.mfe.govt.nz/fresh-water/freshwater-guidance-and-guidelines/australian-and-new-zealand-guidelines-fresh-and>
- Ministry for the Environment and Regional Councils and Unitary Authorities. *LAWA: Land Air Water Aotearoa*. Retrieved 5 de junio de 2020 from <https://www.lawa.org.nz/>

- Miranda, L. E., Rhodes, M. C., Allen, Y., & Killgore, K. J. (2021). An inventory and typology of permanent floodplain lakes in the Mississippi Alluvial Valley: a first step to conservation planning. *Aquatic Sciences*, 83(2), Article 20. <https://doi.org/10.1007/s00027-020-00775-3>
- Modenutti, B.E., Balseiro, E.G., Callieri, C., Bertoni, R., Queimaliños, C.P. (2005) Effect of UV-B and different PAR intensities on the primary production of the mixotrophic planktonic ciliate *Stentor araucanus*. *Limnology and Oceanography*. 50:864–871.
- Moreno, D., Quintero, J., López, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. Universidad Autónoma Metropolitana. La Unidad Iztapalapa. *Contactos* 78:25-33.
- Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C. y González, M.E. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south- central Chile. *Landscape and Urban Planning*, 107 (1), 12-20.
- Nakagawa-Owada, Mamoru. SAG. (1969). Prospección tipológica Cuenca Hidrográfica Lago Chapo (Provincia Llanquihue). SAG. Chile <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/18544>
- OCDE. (1982). Eutrophisation des eaux. Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte. Organisation de Coopération et de Développement Economiques. Paris. pp. 164.
- Orrego, J.P. (2002). El estado de las aguas terrestres en Chile: cursos y aguas subterráneas". Terram Publicaciones.
- Oyarzún CE y A Huber.(2003). Nitrogen export from forested and agricultural watershed of southern Chile. *Gayana Botanica*, 60 (1), 63-68.
- Oyarzún C, H Campos y A Huber. (1997). Exportacion de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en el sur de Chile (Lago Rupanco, X Región). *Revista Chilena de Historia Natural*, 70, 507-519.
- Paisaje de Conservación. (n.d.). Municipalidad de los Lagos. Retrieved August 30, 2022, from <http://www.muniloslagos.cl/index.php/paisajeconservacionriosanpedro>
- Pander, J., & Geist, J. (2013). Ecological indicators for stream restoration success [Review]. *Ecological Indicators*, 30, 106-118. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.ecolind.2013.01.039>
- Parra O. (1989). La eutrofización de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: Un caso de estudio. *Ambiente y Desarrollo* 1: 117-136.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Plissock, P., Luebert, F., Hilger, H. H., & Guisan, A. (2014). Effects of alternative sets of climatic predictors on species distribution models and associated estimates of extinction risk: A test with plants in an arid environment. *Ecological Modelling*, 288, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.06.003>

- Pliscoff, P. (2022). Actualización de las Áreas Protegidas de Chile: análisis de representatividad y riesgo climático. Centro de Estudios Públicos. https://www.cepchile.cl/cep/site/docs/20220630/20220630180141/ddt_39_ppliscoff.pdf
- Prado-Fiedler, R., Leighton, G., Serey, I., Silva, N., Vega, S., Escobar, M. (1999). Determinación de la capacidad de carga y balance de fósforo y nitrógeno de los lagos Chapo, Yelcho, Popetán y laguna San Antonio en la X Región. Fondo de Investigación Pesquera (FIP), FIP-IT/97-40. Universidad de Valparaíso.
- RCSE & ILEC. (2014). Development of ILBM platform process: evolving guidelines through participatory improvement. 2nd edition. 85 pp.
- Rivas-Martínez, S., Rivas-Saenz, S., & Penas, A. (2002). Worldwide bioclimatic classification system. Kerkwerve, The Netherlands: Backhuys Pub..
- Sabel, M., Eckmann, R., Jeppesen, E., Rosch, R., & Straile, D. (2020). Long-term changes in littoral fish community structure and resilience of total catch to re-oligotrophication in a large, peri-alpine European lake [Article; Early Access]. *Freshwater Biology*, 12. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1111/fwb.13501>
- Ryding, S. O., Rast, W. (1992). El control de la eutrofización en lagos y pantanos. UNESCO. Madrid, España. Editorial Pirámide.
- Sánchez, M. (2008). Estado ecológico de los ríos mediterráneos: tipología, condiciones de referencia y establecimiento de clases. Departamento de Ecología e Hidrología. Universidad de Murcia. (3) España.
- Sarricolea P., Herrera MJ., Meseguer-Ruiz O.. (2017). Climatic regionalization of continental Chile. *Journal of Maps* 13 (2) 66-73.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (2003). SENAGEOMIN. Mapa Geológico de Chile: versión digital., *Publicación Geológica Digital*, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.
- Sharip, Z., Jusoh, J. (2010). Integrated lake basin management and its importance for lake chini and other lakes in malaysia. *Lakes & reservoirs: Research and management*. 15: 41-51
- Sistema Nacional de Áreas Silvestres del Estado. (s.f.) SNASPE. *Qué es el SNASPE?* (n.d).. Retrieved August 11, 2022, from <https://www.parquesnacionales.cl/que-es-el-snaspe/#1510943369525-2b6fb60a-30da>
- Smith, V.H. and Schindler, D.W. (2009) Eutrophication Science: Where do We Go from Here? *Trends in Ecology and Evolution*, 24, 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>
- Smith, V., Tilman, G., Nekola, J. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*. 100:179-196.
- Solheim, A. L., Globevnik, L., Austnes, K., Kristensen, P., Moe, S. J., Persson, J., Birk, S. (2019). A new broad typology for rivers and lakes in Europe: Development and application for large-scale environmental assessments

- [Article]. *Science of the Total Environment*, 697, 15, Article 134043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134043>
- Sondergaard, M., Jeppesen, E., Lauridsen, T. L., Skov, C., Van Nes, E. H., Roijackers, R., Lammens, E., & Portielje, R. (2007). Lake restoration: successes, failures and long-term effects [Article]. *Journal of Applied Ecology*, 44(6), 1095-1105. <https://doi.org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1111/j.1365-2664.2007.01363.x>
- Soto, D. (2002). Oligotrophic patterns in southern Chilean lakes: the relevance of nutrients and mixing depth [Article]. *Revista Chilena De Historia Natural*, 75(2), 377-393.
- Soto, D. & L. Zúñiga. (1991). Zooplankton assemblages of Chilean temperate lakes: a comparison with north American counterparts. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 64: 569-581.
- Soto D, Arismendi I, González J, Sanzana J, Jara F, Jara C, Guzman E, Lara A (2006) Southern Chile, trout and salmon country: invasion patterns and threats for native species. *Revista Chilena de Historia Natural* 79: 97–117, <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2006000100009>
- Stachura, M., Wieczorek, D., & Zielinski, A. (2018). An attempt at a typology of karst lakes in the Polaniec Basin (Malopolska Upland) [Article]. *Bulletin of Geography-Physical Geography Series*, 15(1), 63-74. <https://doi.org/10.2478/bgeo-2018-0016>
- Steinbruch, F. (2010). Geology and geomorphology of the Urema Graben with emphasis on the evolution of Lake Urema. [Article]. *Journal of African Earth Sciences*. 272-284. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.03.007>
- Thorp, J. H., Thoms, M. C., & Delong, M. D. (2006). The riverine ecosystem synthesis: Biocomplexity in river networks across space and time [Article; Proceedings Paper]. *River Research and Applications*, 22(2), 123-147. <https://doi.org/10.1002/rra.901>
- Tucca, F., Luarte, T., Nimptsch, J., Woelfl, S., Pozo, K., Casas, G., Dachs, J., Barra, R., Chiang, G., & Galbán-Malagón, C. (2020). Sources and diffusive air–water exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons in an oligotrophic North–Patagonian lake. *Science of The Total Environment*, 738(1), 9
- Tundisi, J.G. (1987). Local community involvement in environmental planning and management: the Lobo-Broa reservoir case study. *Regional Development Dialogue*, vol. 8. United Nations Centre for Regional Development. pp. 135–155.
- Tundisi, J.G., Matsumura-Tundisi, T. (1995). The Lobo-Broa Ecosystem. *In*: J. G. Tundisi, C. E. M. Bicudo & T. Matsumura-Tundisi. *Limnology in Brazil* Brazilian Academy of Sciences, Brazilian Limnological Society, pp. 219-243.
- Tyner, E. H., & Boyer, T. A. (2020). Applying best-worst scaling to rank ecosystem and economic benefits of restoration and conservation in the Great Lakes [Article]. *Journal of Environmental Management*, 255, 10, Article 109888. <https://doi.org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.jenvman.2019.109888>

- United States Environmental Protection Agency. (2016) US EPA. Introducción a la ley de agua de limpia. Watershed Academy Web.
- Valdovino, C. (2008). Invertebrados dulceacuícolas. En *Biodiversidad de Chile: Patrimonio y desafíos* (pp. 202-226). Santiago: Ministerio del Medio Ambiente.
- Valdovinos, C., & Pedreros, P. (2007). Geographic variations in shell growth rates of the mussel *Diplodon chilensis* from temperate lakes of Chile: Implications for biodiversity conservation. *Limnologica*, 37(1), 63-75. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.limno.2006.08.007>
- Vila, I. & Pardo, R. (2008). Peces límnicos. En: *Biodiversidad de Chile, Patrimonio y desafíos*, (Eds. Conama, Ocho Libros. Santiago de Chile, 640 pp.
- Villalobos, L. (1994). Zooplankton of andine temperature lakes in South-America with special emphasis on the *Daphnia* species: taxonomy, geographical distribution, ecology, and functional morphology of the filtering apparatus. Ph. D. Thesis. Univ. Konstanz, Germany, 197 pp.
- Villalobos, L., Woelfl, S., Parra, O., & Campos, H. (2003). Lake Chapo: a baseline study of a deep, oligotrophic North Patagonian lake prior to its use for hydroelectricity generation: II. Biological properties [Article]. *Hydrobiologia*, 510(1-3), 225-237. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1023/B:HYDR.0000008647.51685.4d>
- Vintimilla, C., Astudillo-Salinas, F., Severeyn, E., Encalada, L., Wong, S. (2017). Agrupamiento de K-medias para estimación de insulino-resistencia en adultos mayores de Cuenca. *MASKANA, CEDIA 2017.TIC.EC.* 31-39.
- Warne, M. S., Batley, G. E., Braga, O., Chapman, J. C., Fox, D. R., Hickey, C. W., Stauber, J. L., & Van Dam, R. (2014). Revisions to the derivation of the Australian and New Zealand guidelines for toxicants in fresh and marine waters [Article]. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(1), 51-60. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1007/s11356-013-1779-6>
- Woelfl, S. (2007). The distribution of large mixotrophic ciliates (Stentor) in deep North Patagonian lakes (Chile): First results [Article; Proceedings Paper]. *Limnologica*, 37(1), 28-36. <https://doi-org.ezpbibliotecas.udec.cl/10.1016/j.limno.2006.08.004>
- Woelfl, S., Villalobos, L., & Parra, O. (2003). Trophic parameters and method validation in Lake Rinihue (North Patagonia : Chile) from 1978 through 1997 [Article]. *Revista Chilena De Historia Natural*, 76(3), 459-474.
- Zaror, C. A. (2000). Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos. Chile: (s.n.).

Anexos

Anexo 1: Tabla Código, Ambiente, Resumen, Edad y Descripción de Mapa Geológico de Chile.

| Código | Ambiente | Resumen | Edad | Descripción |
|--------|---------------------|---|--------------------------------------|--|
| CPg | Plutónico | SECUENCIAS VOLCANICAS | Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma) | Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: Batolitos compuestos, 'stocks' y cuerpos hipabisales (Sierra Moreno, Cordillera de Domeyko, Batolito Elqui-Limarí); en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Batolito Panguipulli-Riñihue y 'Stock' Leones. |
| DC4 | Metamórfico | ROCAS METAMORFICAS | | Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange'. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: Formación El Toco, Complejo Epimetamórfico Chañaral; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: Complejo Metamórfico Oriental de Aisén y Magallanes. |
| G | | | | |
| Hielo | | | | |
| J3i | Volcanosedimentario | SECUENCIAS VOLCANOSEDIMENTARIAS | Jurásico | Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. En la Cordillera de la Costa, regiones de la I a III: formaciones Camaraca y La Negra; en la Cordillera Principal, región VIII: Formación Nacientes del Biobío (Miembro Icalma). |
| Jsg | Plutónico | SECUENCIAS VOLCANICAS | Jurásico Medio-Superior (180-142 Ma) | Monzodioritas cuaríferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. En la Cordillera de la Costa, regiones I a VI; en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Plutón Panguipulli y borde oriental del Batolito Norpatagónico; en la península Antártica. |
| Ki1m | | SECUENCIAS SEDIMENTARIAS MARINAS LITORALES PLATAFORMA | Cretácico Inferior (Neocomiano) | Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas. En las regiones I a IV: formaciones Blanco, El Way, Grupo Chañarillo y Río Tascadero. |
| Kig | Plutónico | SECUENCIAS VOLCANICAS | Cretácico Inferior (144-90 Ma) | Granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. En la Cordillera Principal, regiones VIII a XI: Grupo Plutónico Gualletué, archipiélago de los Chonos y borde oriental del Batolito Norpatagónico; en la península Antártica. |
| Lag | | | | |
| M3i | Volcánico | SECUENCIAS VOLCANOSEDIMENTARIAS | Mioceno Inferior-Medio | Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. En la Cordillera Principal, regiones I a VIII: complejos volcánicos Doña Inés y Ojos de Maricunga; formaciones Cerro Las Tórtolas y Farellones. |
| Mg | Plutónico | SECUENCIAS VOLCANICAS | Mioceno (18-6 Ma) | Granodioritas, dioritas y tonalitas. En la Cordillera Principal, regiones VII a X; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: franja central del Batolito Norpatagónico y plutones orientales: plutones Liquiñe, San Lorenzo, Paso Las Llaves y Torres del Paine. |

| | | | | |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|
| MP2 | Volcanosedimentario continental | SECUENCIAS VOLCANOSEDIMENTARIAS | Mioceno Superior-Plioceno | Secuencias volcanosedimentarias: conglomerados, lavas andesíticas, domos y tobas. En la Cordillera Principal, región VIII: Formación Mitrauquén. |
| OM2c | Volcanosedimentario | SECUENCIAS VOLCANOSEDIMENTARIAS | Oligoceno-Mioceno | Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. En la Cordillera Principal, regiones I a IX: formaciones Lupica, Escabroso, Abanico, Coya-Machalí, Cura-Mallín (inferior). |
| PI3 | Volcanico | SECUENCIAS VOLCANOSEDIMENTARIAS | Pleistoceno | Secuencias lávicas y centros volcánicos básicos e intermedios; depósitos piroclásticos andesítico-basálticos. En la Cordillera Principal, regiones Metropolitana a X. |
| PI3t | Volcanico | SECUENCIAS VOLCANOSEDIMENTARIAS | Pleistoceno | Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la Depresión Central y valles de la Cordillera Principal, regiones V a VII: Ignimbrita Pudahuel y Toba Loma Seca. |
| PPI1r | Sedimentario continental | SECUENCIAS SEDIMENTARIAS | Plioceno-Pleistoceno | Depósitos de remoción en masa: brechas polimícticas con matriz de arena/limo en proporción variable, de flujo o deslizamiento gravitacional. En la Cordillera Principal: flujos de detritos de las quebradas Lluta y Camarones (región I); avalancha de detritos de Colón-Coya (región VI). |
| PPI3 | Volcanosedimentario continental | SECUENCIAS VOLCANOSEDIMENTARIAS | Plioceno-Pleistoceno | Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. En la Cordillera Principal, regiones VII a X: formaciones Cola de Zorro y Malleco; en la Cordillera Patagónica, región XII: basaltos de Pali Aike; en las islas oceánicas: volcán Poike (Isla de Pascua), archipiélago Juan Fernández, isla Salas y Gómez; islas San Félix y San Ambrosio. |
| PzTr4(a) | Metamorfico | ROCAS METAMORFICAS | Paleozoico-Triásico | Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. En la Cordillera de la Costa, regiones IX a X: Complejo Metamórfico Bahía Mansa; en la Cordillera Principal, región X: Complejo Metamórfico Liquiñe. Se distinguen esquistos pelíticos (a) y esquistos y anfibolitas, en menor proporción, rocas metamórficas ultramáficas (b) |
| PzTr4(b) | Metamorfico | ROCAS METAMORFICAS | Paleozoico-Triásico | Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. En la Cordillera de la Costa, regiones IX a X: Complejo Metamórfico Bahía Mansa; en la Cordillera Principal, región X: Complejo Metamórfico Liquiñe. Se distinguen esquistos pelíticos (a) y esquistos y anfibolitas, en menor proporción, rocas metamórficas ultramáficas (b) |
| Q1 | Sedimentario continental | SECUENCIAS SEDIMENTARIAS | Pleistoceno-Holoceno | Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos. |

| | | | | |
|------|---------------------------------|--------------------------|----------------------|---|
| Q1g1 | Sedimentario continental | SECUENCIAS SEDIMENTARIAS | Pleistoceno-Holoceno | Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. En la Cordillera Principal, regiones I a IV. En la Depresión Central, regiones IX y X; en regiones XI y XII: lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvio-glaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue (1; 35-14,2 ka); Santa María (2; 262-132 ka); Río Llico (3; 480-338 ka) o Caracol (4; 687-512 ka). |
| Q1g2 | Sedimentario continental | SECUENCIAS SEDIMENTARIAS | Pleistoceno-Holoceno | Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. En la Cordillera Principal, regiones I a IV. En la Depresión Central, regiones IX y X; en regiones XI y XII: lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvio-glaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue (1; 35-14,2 ka); Santa María (2; 262-132 ka); Río Llico (3; 480-338 ka) o Caracol (4; 687-512 ka). |
| Q3av | Volcanosedimentario continental | SECUENCIAS VOLCANICAS | Cuaternario | Depósitos de avalancha volcánica, asociados a colapso parcial de edificios volcánicos. En la Cordillera Principal, regiones I a VI: avalanchas de Parinacota, Ollagüe, Socompa, Colón-Coya y Teno. |
| Q3i | Volcanico | SECUENCIAS VOLCANICAS | Cuaternario | Estratos volcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos; adakíticos al sur de los 47°S. En la Cordillera Principal, regiones I a III: volcanes Taapaca, Parinacota, Láscar y Ojos del Salado. Principalmente holocenos en la Cordillera de Principal, regiones Metropolitana a X: volcanes San José, Peteroa, Antuco, Llaima, Villarrica, Osorno y Calbuco, entre otros; en la Cordillera Patagónica, regiones XI a XII: volcanes Hudson, Lautaro y Monte Burney. En Antártica: isla Decepción. |
| Qf | Sedimentario continental | SECUENCIAS SEDIMENTARIAS | Pleistoceno-Holoceno | Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación. |
| Qm | Sedimentario continental | SECUENCIAS SEDIMENTARIAS | Pleistoceno-Holoceno | Depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales. |
| Rio | | | | |
| Tr1c | Sedimentario continental | SECUENCIAS SEDIMENTARIAS | Triásico Superior | Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres, en parte transicionales: conglomerados, brechas, <u>areniscas</u> , <u>lutitas</u> e <u>intercalaciones calcáreas</u> . En la región II: Formación Sama; en las regiones VIII a X: Estratos de Santa Juana y Lluquentué-Huimpil; formaciones Tralcán y Panguipulli. |

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Resumen geología por área de drenaje de cada Lago Norpatagónico.

| Lagos | Colico | Carburgua | Huilipilún | Tinquilco | Villarrica | Calafquén | Pullinque | Pellaifa |
|----------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| Siliceo | 87,9% | 84,3% | 58,4% | 100,0% | 86,5% | 81,0% | 84,5% | 83,9% |
| Calcareo | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Mixto | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Otros | 12,1% | 15,7% | 41,6% | | 13,5% | 19,0% | 15,5% | 16,1% |
| Lagos | Panguipulli | Neltume | Riñihue | Pirihueico | Ranco | Maihue | Huishue | Gemelas |
| Siliceo | 82,1% | 98,3% | 70,5% | 93,0% | 77,4% | 95,6% | 90,0% | 77,2% |
| Calcareo | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Mixto | 4,2% | 0,0% | 9,7% | 0% | 1,1% | 0% | 0% | 0% |
| Otros | 13,6% | 1,7% | 19,8% | 7,0% | 21,4% | 4,4% | 10,0% | 22,8% |
| Lagos | Gris | Constancia | Puyehue | Rupanco | Llanquihue | Los Santos | Chapo | |
| Siliceo | 78,8% | 53,3% | 87,3% | 75,9% | 58,4% | 89,6% | 85,9% | |
| Calcareo | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0,3% | 0% | |
| Mixto | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | |
| Otros | 21,2% | 46,7% | 12,7% | 24,1% | 41,6% | 10,2% | 14,1% | |

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Descripción de Climas presentes en la zona de estudio.

- Cfb Clima templado lluvioso

Caracterizado por una temperatura media del mes más frío menor a 18°C y superior a 0°C (Peel, M. C. *et al.* 2007). En específico, el promedio de todos los meses debe ser inferior a 22°C, y al menos 4 meses deben estar promediando sobre 10°C. La variación estacional de las precipitaciones no debe ser significativa tampoco.

- Cfb (i) Clima templado lluvioso e influencia costera

Como el anterior, pero además de esto la influencia costera se asume a partir de la clasificación de Rivas-Martínez en la que el Índice de continentalidad es calculado como la diferencia entre las temperaturas medias del mes más

cálido y del mes más frío del año, (Amigo, J. *et al.* 2007). Así, la influencia costera evita oscilaciones mayores a 16-17°C.

- Cfb (s) Clima templado lluvioso con leve sequedad estival
Como el clima templado lluvioso, pero con un verano seco. (Sarricolea *et al.*, 2017)
- Cfb (s) (i) Clima templado lluvioso con leve sequedad estival e influencia costera
Como el clima templado lluvioso, pero con las oscilaciones térmicas establecidas por la influencia oceánica, y una diferencia de precipitaciones estacionales significativa.
- Cfc Clima templado lluvioso frío
El mes más frío debe promediar sobre 0°C, y entre 1 a 3 meses promediando sobre 10°C. Ninguna diferencia significativa de precipitaciones entre estaciones está presente.
- Cfc (s) Clima templado lluvioso frío con leve sequedad estival
Tal como el anterior pero con la decrecimiento de precipitaciones estivales significativa.
- Csb Clima mediterráneo de lluvia invernal
El mes más frío promedia sobre los 0°C, todos los meses con temperaturas promedio inferiores a 22°C, y al menos 4 meses promediando sobre 10°C. Al menos tres veces más precipitación en el mes más húmedo en comparación con el mes más seco del verano, aquel mes recibe menos de 40 mm.
- Csb (h) Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura
Igual que el anterior, con la salvedad de que al presentarse sobre los 1000 m.s.n.m. se asume que la gradiente de temperatura disminuye con la

elevación al menos en 0,65°C/100 m, haciendo de esta variación termal un límite apropiado para clasificar la Cordillera de los Andes.

- Csc Clima mediterráneo frío de lluvia invernal
El mes más frío promedia sobre los 0°C, en donde entre 1 a 3 meses promedian sobre 10°C. Al menos tres veces más precipitaciones ocurren en el mes más húmedo de invierno que en comparación al mes más seco del verano, el cual recibe menos de 40 mm, (Beck *et al.*, 2018).
- ET Clima de tundra
Con todos los meses del año con temperaturas promediando bajo los 10°C, la temperatura promedio del mes más cálido está entre el 0°C y los 10°C, (Peel *et al.*, 2007), (Beck *et al.*, 2018).
- ET (s) Clima de tundra de lluvia invernal
Como el Clima de tundra, pero precipitaciones invernales que generan una diferencia significativa que da como resultado un verano seco en comparación.

Anexo 4: Categorías de protección oficial definidas para Chile (modificado de <http://bdrnap.mma.gob.cl/>).

| Unidad | Objetivos |
|-------------------|--|
| Parque Nacional | Regiones establecidas para la protección y conservación de las bellezas escénicas naturales y de la flora y fauna de importancia nacional, de las que el público pueda disfrutar mejor al ser puestas bajo la vigilancia oficial. |
| Reserva Nacional | Las regiones establecidas para la conservación y utilización, bajo vigilancia oficial, de las riquezas naturales en las cuales se dará a la flora y la fauna toda protección que sea compatible con los fines para los que son creadas estas reservas. |
| Monumento Natural | Regiones, objetos o especies vivas de animales o plantas de interés estético o valor histórico o científico, a los cuales se les da protección absoluta. Se crean con el fin de conservar un objeto específico o una especie determinada de flora o fauna declarándolas, monumento natural inviolable excepto para realizar investigaciones científicas debidamente autorizadas, o inspecciones gubernamentales. |

| | |
|----------------------------|---|
| Santuario de la Naturaleza | Sitios terrestres o marinos que ofrecen posibilidades especiales para estudios e investigaciones geológicas, paleontológicas, zoológicas, botánicas o de ecología, o que posean formaciones naturales, cuya conservación sea de interés para la ciencia o para el Estado. |
|----------------------------|---|

Anexo 5 : Ecosistemas encontrados en el área de estudio basados en Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017) según SIMBIO del MMA.

Bosque caducifolio templado de *Nothofagus obliqua* - *Laurelia sempervirens*

Distribución:

Dinámica del ecosistema:

Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus alpina* - *Dasyphyllum diacanthoides*

Distribución:

Laderas occidentales bajas de la cordillera de los Andes de las regiones del Biobío, de La Araucanía y de Los Ríos, entre 300 y 900 m. Se encuentra en los pisos bioclimáticos mesotemplado superior y supratemplado inferior húmedo superior e hiperhúmedo hiperoceánico y oceánico. Parte de este piso se encuentra dentro de la variante templada submediterránea.

Dinámica del ecosistema:

Presenta una estructura coetánea de *Nothofagus alpina* sin regeneración permanente producto de la cubierta que establecen las especies laurifolias para la penetración de luz al interior del bosque. La regeneración ocurre cuando tienen lugar perturbaciones de pequeña escala (caída de árboles, corta selectiva), lo que permite la regeneración de *Nothofagus alpina* en los claros, conformándose una estructura multietánea, de modo que *N. alpina* participa de las diferentes etapas de la sucesión; la estructura de las poblaciones de *N. alpina* vuelve a ser coetánea después de perturbaciones de mayor escala como volcanismo, incendios o derrumbes. La intervención antrópica del bosque produce la invasión de especies introducidas como *Rubus ulmifolius*, *Rosa moschata* así como de la nativa *Acaena*

ovalifolia y por la expansión de comunidades arbustivas dominadas por *Aristotelia chilensis*, *Rhaphithamnus spinosus* y *Berberis darwinii*.

Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus alpina* - *N. dombeyi*

Distribución:

Laderas medias andinas de las regiones del Biobío, Araucanía y Los Ríos, 700–1.300 m. Piso bioclimático supratemplado inferior hiperhúmedo hiperoceánico y oceánico. Parte de este piso se encuentra dentro de la variante templada submediterránea. También presente en Argentina.

Dinámica del ecosistema:

El estrato caducifolio superior traslúcido favorece la entrada permanente de luz al interior del bosque, lo que por un lado permite un desarrollo importante de *Chusquea culeou* en el sotobosque y por otro la regeneración continua de *Nothofagus alpina* y *N. dombeyi*, por lo que la estructura forestal tiende a ser multietánea. Perturbaciones de gran escala (e.g., incendios, volcanismo) conducen a estructuras coetáneas que luego se vuelven a transformar en multietáneas debido a la regeneración permanente de las especies dominantes y la existencia de perturbaciones de menor escala como caída de árboles o corta selectiva, las que a su vez contribuyen a la mantención de la composición del bosque en el tiempo. La intervención antrópica más profunda y permanente de estos bosques produce la penetración de elementos introducidos como *Rumex acetosella*, *Prunella vulgaris* y *Rubus ulmifolius* y la expansión de elementos arbustivos como *Aristotelia chilensis*, *Berberis darwinii* y *B. microphylla*.

Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus pumilio* - *Araucaria araucana*

Distribución:

Laderas altas de la cordillera de los Andes de las regiones del Biobío y de La Araucanía, entre 600 y 1.400 m, pisos bioclimáticos mesotemplado superior y supratemplado hiperhúmedo hiperoceánico y oceánico. Parte de este ecosistema

se encuentra dentro de la variante templada submediterránea. Se encuentra también en el centronorte de la provincia de Neuquén en Argentina.

Dinámica del ecosistema:

Las evidencias señalan que la sucesión es iniciada con una perturbación masiva en áreas que son invadidas por *Nothofagus pumilio*, la que forma rodales coetáneos a los que posteriormente se integra *Araucaria araucana*. En ausencia de perturbaciones masivas tanto *Araucaria araucana* como *Nothofagus pumilio* siguen una dinámica de regeneración favorecida por la formación de claros, que conduce a estructuras multietáneas de ambas especies. Las perturbaciones antrópicas severas como tala rasa o quema conducen a la formación de una pradera que es luego colonizada por un matorral de *Chusquea culeou* que posteriormente parece ser nuevamente reemplazado por la formación boscosa original. González et al. concluyen que el fuego es el principal agente de disturbios que modela el paisaje vegetal en la zona de los bosques de *Araucaria - Nothofagus*. El efecto del fuego varía según la intensidad, generando dinámicas secundarias con la ocurrencia de incendios de superficie, y dinámicas primarias luego de incendios que producen el reemplazo total de la vegetación; los primeros son más frecuentes que los segundos y favorecen la coexistencia de las especies dominantes.

Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus pumilio* / *Drimys andina*

Distribución:

Laderas altas de la cordillera de los Andes de las regiones de Los Ríos y de Los Lagos, entre 1.000 y 1.500 m, pudiendo llegar a 500 m en algunas áreas. Se encuentra asociado a los pisos bioclimáticos supratemplado hiperhúmedo hiperoceánico y orotemplado inferior ultrahiperhúmedo oceánico. También está presente en el suroeste de Neuquén y oeste de Río Negro en Argentina, 1.100–1.600 m.

Dinámica del ecosistema:

La regeneración está asociada a eventos catastróficos masivos como avalanchas e incendios, así como a perturbaciones de pequeña escala. Los primeros originan

parches coetáneos, bajo los que la regeneración es escasa hasta que los bosques alcanzan edades maduras. Las perturbaciones de pequeña escala, como caída de árboles, permiten formación de claros y la regeneración de algunos individuos de *Nothofagus pumilio*, pero favorecen mayormente a *Nothofagus betuloides* en los sectores donde coexisten, de modo que la estructura de los bosques tiende a conformar un mosaico de parches coetáneos de *Nothofagus pumilio* debido a la acción de perturbaciones de gran escala. Las poblaciones de *Nothofagus betuloides*, en tanto, tienden a mostrar una distribución más homogénea de clases de edades debido a una regeneración más continua. Eventos de muerte masiva de Chusquea generan el despegue simultáneo de plantas juveniles de *Nothofagus* en grandes parches, lo que también resulta en la formación de parches coetáneos.

Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus pumilio* / *Azara alpina*

Distribución:

Laderas elevadas de la cordillera de los Andes de las regiones del Maule, del Biobío y de La Araucanía, 1.400–1.800 m, pisos bioclimáticos supratemplado y orotemplado inferior (submediterráneo) húmedo superior e hiperhúmedo oceánico. En Argentina se distribuye en el noroeste de la provincia de Neuquén, 1.600–1.900 m.

Dinámica del ecosistema:

Solo existen algunos antecedentes generales para las formaciones de bosque de lenga achaparrado. En las áreas donde coexisten *Nothofagus pumilio* y *N. antarctica*, el primero parece reemplazar al segundo en ausencia de perturbaciones, debido a su mayor capacidad para crecer en forma erecta a partir de individuos achaparrados. *Nothofagus antarctica* se mantendría ante la acción de perturbaciones como depositación de escorias volcánicas y avalanchas gracias a su mayor capacidad para tolerar condiciones extremas.

Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus pumilio* / *Ribes cucullatum*

Distribución:

Laderas altas de la cordillera de los Andes de las regiones de Los Ríos, de Los Lagos y de Aisén en Chile entre 1.000 y 1.500 m, pero llegando incluso hasta 200 m en las áreas más australes. También se encuentra en las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut en Argentina, 1.600–1.900 m. Pisos bioclimáticos supratemplado y orotemplado hiperhúmedo a ultrahiperhúmedo hiperoceánico.

Dinámica del ecosistema:

Es propiamente lo ya descrito para el ecosistema 64 (Bosque caducifolio templado andino de *Nothofagus pumilio* y *Azara alpina*) donde las perturbaciones de gran escala propias de los límites de vegetación (volcanismo, avalanchas) producen una mayor disminución de la abundancia de *Nothofagus pumilio* en relación a *N. antarctica*, y favorecen el descenso altitudinal de las formaciones achaparradas debido a las condiciones restrictivas que se generan hacia abajo en la pendiente. La forma achaparrada de los individuos de lenga y ñirre está en parte determinada por el peso de la nieve y la acción del viento sobre los árboles en estas condiciones. La mayor capacidad de *Nothofagus pumilio* para recuperar su forma erecta favorecería el reemplazo de *N. antarctica* por *N. pumilio* en situaciones sin alteración, lo que produciría el ascenso del límite altitudinal inferior de las formaciones achaparradas.

Bosque laurifolio templado interior de *Nothofagus dombeyi* - *Eucryphia cordifolia*

Distribución:

Lomajes y laderas medias de la vertiente oriental de la cordillera de la Costa, algunas zonas de la depresión intermedia y laderas occidentales bajas de la cordillera de los Andes de las regiones de La Araucanía, de Los Ríos y de Los Lagos, desde 0 a 900 m, en los pisos bioclimáticos supratemplado inferior y mesotemplado hiperhúmedo hiperoceánico. Parte de este ecosistema se encuentra dentro de la variante templada submediterránea. Algunos enclaves locales de este tipo de bosque también están presentes en el área de Lago Puelo, Argentina.

Dinámica del ecosistema:

La regeneración de la especie dominante, *Nothofagus dombeyi*, al parecer depende fuertemente de perturbaciones de gran escala ya sean naturales o antrópicas como incendios, aluviones o deslizamientos, comportándose como colonizador de terrenos desprovistos de bosque. Bajo el dosel de *Nothofagus dombeyi* se asocian especies más tolerantes a la sombra que colonizan los claros creados por la caída de uno o pocos árboles y se mantienen bajo el dosel incrementando su dominancia hasta la desaparición definitiva de los individuos más longevos de *N. dombeyi*. *Nothofagus dombeyi* y *Eucryphia cordifolia* son capaces de regenerar ante perturbaciones de pequeña escala provocadas por caídas de árboles, cuando tienen condiciones de sustrato favorables y bajas densidades de plantas en el sotobosque. Perturbaciones de gran escala (e.g., aluviones, arrastres de lava) favorecen la instalación inicial de comunidades de *Racomitrium lanuginosum*, que posteriormente son reemplazadas por herbazales de *Senecio chilensis* y luego por matorrales de *Gaultheria poeppigii* que finalmente dan paso a la formación boscosa. La comunidad pratense *Holcus lanatus* - *Agrostis tenuis* aparece donde ha sido introducido el ganado, las que al abandonarse son reemplazadas por comunidades de *Rubus ulmifolius* - *Ulex europaeus*. Donde el bosque ha sido talado se presentan los matorrales secundarios de *Aristotelia chilensis* - *Rubus ulmifolius*. En el área norte de este ecosistema tanto *Nothofagus alpina* como *N. obliqua* pueden ser dominantes en bosques secundarios.

Bosque resinoso templado andino de *Araucaria araucana* - *Nothofagus dombeyi*

Distribución:

Laderas altas de la cordillera de los Andes de las regiones del Biobío y de La Araucanía, entre 1.200 y 1.600 m. Está asociado al piso bioclimático supratemplado (submediterráneo) hiperhúmedo hiperoceánico y oceánico.

Dinámica del ecosistema:

Los sitios que han sido sometidos a perturbaciones masivas como volcanismo e incendios son colonizados con éxito por *Nothofagus*, bajo cuyo dosel puede regenerar *Araucaria* y permanecer en el sotobosque gracias a su mayor tolerancia a la sombra, lo que también ocurre después de la formación de pequeños claros. Los individuos de *Araucaria* que permanecen bajo dosel, sin embargo, pueden liberarse y acceder al dosel superior después de múltiples episodios de formación de claros. Este patrón conduce a estructuras multietáneas para *Araucaria araucana*, que regenera esporádicamente. La estrategia reproductiva de largo plazo de *Araucaria* como adaptación a condiciones ambientales rigurosas contrasta con la de *Nothofagus*, más oportunista y que depende de la frecuencia de perturbaciones, generando un traslape de escalas temporales asociado a la diferente longevidad de ambas especies.

Bosque resinoso templado andino de *Fitzroya cupressoides*

Distribución:

Dinámica del ecosistema:

Bosque siempreverde templado andino de *Nothofagus dombeyi* / *Gaultheria phillyreifolia*

Distribución:

Laderas altas de la cordillera andina de las regiones del Biobío, de La Araucanía y norte de Los Ríos y muy localmente en el área de Nahuel-Huapi en Argentina, entre 1.100 y 1.600 m, en los pisos bioclimáticos supratemplado y orotemplado hiperhúmedo hiperoceánico y oceánico. La zona norte de este piso de vegetación está bajo la variante bioclimática templada submediterránea.

Dinámica del ecosistema:

Su dinámica podría responder a la que ha sido estudiada en general para los bosques dominados por *Nothofagus dombeyi* (ecosistema 82: Bosque siempreverde templado andino de *Nothofagus dombeyi* - *Saxegothaea conspicua*), en los que la regeneración de la especie está completamente determinada por la

frecuencia de perturbaciones de gran escala, lo que conduce a bosques coetáneos. En ausencia de perturbaciones *Nothofagus dombeyi* tiende a desaparecer en la medida que los individuos mueren por senescencia y la dominancia es asumida por otras especies capaces de regenerar bajo dosel.

Bosque siempreverde templado andino de *Nothofagus dombeyi* - *Saxegothaea conspicua*

Distribución:

Laderas occidentales medias de la cordillera de los Andes de las regiones de Los Ríos y de Los Lagos, penetrando marginalmente en algunos sectores andinos argentinos, entre 0 y 1.300 m, pisos bioclimáticos mesotemplado superior y supratemplado hiperhúmedo y ultrahiperhúmedo hiperoceánico.

Dinámica del ecosistema:

En los bosques estudiados de este tipo no se observa regeneración de *Nothofagus dombeyi*, pero sí de otras especies, en particular *Saxegothaea conspicua* y *Laureliopsis philippiana*, sugiriendo que en ausencia de perturbaciones fuertes estas últimas especies tienden a reemplazar a la primera. El comportamiento general es similar al descrito para el ecosistema 73 (bosque laurifolio templado interior de *Nothofagus dombeyi* - *Eucryphia cordifolia*). Los matorrales de *Berberis* son comunidades antropogénicas de reemplazo en estos bosques.

Bosque siempreverde templado interior de *Nothofagus nitida* - *Podocarpus nubigenus*

Distribución:

Planos inundados de ñadis y laderas de las regiones de Los Lagos y de Aisén, 0–700 m, asociado a los pisos bioclimáticos mesotemplado y supratemplado inferior hiperhúmedo y ultrahiperhúmedo hiperoceánico.

Dinámica del ecosistema:

Los antecedentes sugieren que este bosque presenta una regeneración relativamente continua, en contraste con la mayoría de los bosques dominados por

Nothofagus en Chile. Las zonas que se ven sometidas a perturbaciones de gran escala son generalmente colonizadas por *Nothofagus nitida* y *Embothrium coccineum*, las que permiten la colonización de especies más tolerantes bajo un dosel coetáneo. La formación permanente de claros favorece la regeneración de *Nothofagus nitida*, mientras que la otra especie dominante, *Podocarpus nubigenus*, más tolerante que *N. nitida*, es capaz de regenerar bajo dosel, lo que sugiere una relativa estabilidad del bosque. Después de perturbaciones severas como incendios, el reclutamiento de las especies leñosas se ve favorecido por parches de vegetación ya existentes, en torno a los cuales la vegetación boscosa tiende a reestablecerse y expandirse. El reclutamiento también se ve afectado por factores ambientales, siendo notable el drenaje del suelo.

Matorral bajo templado andino de *Discaria chacaye* / *Berberis empetrifolia*

Distribución:

Partes altas de la cordillera de los Andes de las regiones del Biobío y de La Araucanía, entre 1.600 y 2.300 m. En Argentina, en las zonas altas de la cordillera de los Andes de la provincia de Neuquén, entre 1.600 y 2.200 m. Se asocia a los pisos bioclimáticos supratemplado superior y orotemplado inferior (submediterráneo) hiperhúmedo oceánico.

Dinámica del ecosistema:

El espectro de formas de vida de este piso de vegetación sugiere que la colonización de terrenos desnudos es colonizada principalmente por plantas en cojín que actúan como nodrizas para la colonización de otras especies, con un incremento progresivo de la riqueza específica, tal como ocurre en otros ambientes altoandinos. Es posible que la presión de pastoreo produzca un aumento de la importancia relativa de la forma de vida arbustiva en detrimento de las gramíneas.

Matorral bajo templado andino de *Adesmia longipes* - *Senecio bipontinii*

Distribución:

Sectores altos de los conos volcánicos de las regiones del Biobío, de La Araucanía, de Los Ríos y de Los Lagos, entre 1.300 y 2.500 m y en Argentina en las zonas altas de la cordillera de los Andes de las provincias de Río Negro, Chubut y sur de Neuquén, entre 1.500 y 2.000 m. Pisos bioclimáticos orotemplado hiperhúmedo y ultrahiperhúmedo hiperoceánico.

Dinámica del ecosistema:

El reclutamiento progresivo de las especies resulta en un incremento estable de la riqueza de especies en el tiempo. Las primeras especies en colonizar los terrenos desnudos son algas y luego líquenes que modifican el ambiente edáfico generando las condiciones para la inmigración de las primeras plantas vasculares que corresponden a plantas en cojín o arbustos enanos que nuevamente modifican el suelo y actúan como nodrizas para las otras especies, lo que permite el incremento en la riqueza y cambios en la composición florística.

Anexo 6: Datos Atípicos.

Los datos atípicos tienen las siguientes características:

| <i>Cuerpo de agua</i> | <i>Estación</i> | <i>Período estacional</i> | <i>Año</i> |
|-----------------------|-----------------|---------------------------|------------|
| Calafquén | Centro del Lago | Otoño | 2009 |
| Colico | Río Trafanpulli | Primavera | 2014 |

| <i>Temperatura</i> | <i>Conductividad</i> | <i>pH</i> | <i>OD</i> | <i>TransparenciaDS</i> | <i>N_NO₃</i> | <i>N_NO₂</i> | <i>N_NH₄</i> | <i>P_PO₄</i> |
|--------------------|----------------------|-----------|-----------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 12.717 | 244.933 | 6.977 | 10.017 | 9.000 | 0.010 | 0.001 | 0.010 | 0.003 |
| 8.590 | 164.400 | 8.600 | 11.340 | 14.000 | 0.074 | 0.001 | 0.040 | 0.003 |

Anexo 7-A: Tabla de Años con datos y cantidad de datos por variable por cada lago.

| Lagos | Años | T° | Con. Esp. | pH | Ox. Dst | Satur. Ox. | Turbi dez | Transp Dis. Secchi | (N- NO ₃) | (N- NO ₂) | (N- NH ₄) | N. Kjeldahl | N Total | (P- PO ₄) | P Total | Clor. a | Sílice | DQO | STS |
|---------------|-----------|-----|-----------|-----|---------|------------|-----------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|---------|-----------------------|---------|---------|--------|-----|-----|
| Chapo | 1986-2021 | 122 | 110 | 113 | 121 | 109 | 51 | 124 | 102 | 153 | 150 | 10 | 91 | 155 | 110 | 77 | 107 | 100 | 0 |
| Colico | 1994-2021 | 35 | 35 | 39 | 38 | 30 | 35 | 30 | 37 | 37 | 28 | 32 | 32 | 35 | 29 | 37 | 28 | 21 | |
| Pirihueico | 2015-2021 | 29 | 29 | 29 | 1 | 1 | 1 | 13 | 28 | 28 | 27 | 0 | 8 | 14 | 28 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Caburgua | 1979-2021 | 110 | 117 | 118 | 118 | 110 | 39 | 99 | 106 | 109 | 111 | 21 | 54 | 104 | 81 | 76 | 104 | 89 | 8 |
| Riñihue | 1987-2021 | 229 | 224 | 228 | 208 | 147 | 77 | 199 | 195 | 192 | 199 | 87 | 129 | 198 | 103 | 144 | 177 | 134 | 0 |
| Pellaifa | 2021 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Pullinque | 2021 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Huilipilún | 2021 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Tinquilco | 2015-2021 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Puyehue | 2012-2021 | 63 | 63 | 61 | 29 | 30 | 22 | 31 | 63 | 63 | 75 | 15 | 57 | 49 | 73 | 41 | 37 | 9 | 0 |
| Maihue | 1996-2021 | 122 | 130 | 128 | 127 | 117 | 60 | 91 | 120 | 124 | 130 | 22 | 94 | 129 | 87 | 98 | 82 | 67 | 0 |
| Rupanco | 1980-2021 | 35 | 50 | 53 | 38 | 30 | 36 | 34 | 52 | 48 | 49 | 21 | 42 | 58 | 71 | 55 | 31 | 3 | 0 |
| Panguipulli | 1997-2021 | 226 | 223 | 224 | 198 | 195 | 137 | 176 | 205 | 209 | 204 | 58 | 128 | 175 | 138 | 102 | 163 | 146 | 0 |
| Neltume | 2012-2021 | 50 | 50 | 44 | 17 | 17 | 16 | 21 | 45 | 40 | 39 | 13 | 23 | 43 | 47 | 23 | 12 | 12 | 0 |
| Calafquén | 1997-2021 | 164 | 190 | 193 | 163 | 165 | 110 | 138 | 113 | 189 | 182 | 47 | 135 | 170 | 151 | 100 | 134 | 133 | 0 |
| T. los Santos | 1982-2021 | 92 | 90 | 92 | 91 | 87 | 50 | 85 | 72 | 87 | 87 | 1 | 44 | 84 | 57 | 70 | 74 | 72 | 0 |
| Villarrica | 1986-2019 | 394 | 371 | 388 | 390 | 305 | 196 | 192 | 293 | 332 | 344 | 195 | 362 | 336 | 334 | 322 | 162 | 81 | 13 |
| Llanquihue | 1986-2019 | 324 | 343 | 338 | 343 | 276 | 145 | 160 | 300 | 306 | 327 | 140 | 128 | 346 | 292 | 281 | 330 | 274 | 9 |
| Ranco | 1976-2021 | 253 | 258 | 258 | 242 | 152 | 16 | 209 | 232 | 204 | 237 | 126 | 69 | 230 | 163 | 203 | 8 | 12 | 0 |

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7-B: Tabla de Años con datos y cantidad de datos por variable por cada lago.

| Lagos | Años | HCO ₃ | Ca dis. | Mg dis. | Na dis. | K dis. | Cloruro | SO ₄ | CO ₂ | Alk mval | Dureza | Prod. Prim. | Tot-Seston | Org-ses | Ino-Ses | STD | Pt-Co | Clorf | Feopigmentos | DBO5 | SRP |
|---------------|-----------|------------------|---------|---------|---------|--------|---------|-----------------|-----------------|----------|--------|-------------|------------|---------|---------|-----|-------|-------|--------------|------|-----|
| Chapo | 1986-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Colico | 1994-2021 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 5 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 3 | 3 | 3 | |
| Pirihueico | 2015-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Caburgua | 1979-2021 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 12 | 12 | 4 | 5 | 12 | 12 | 12 | 4 | 12 | 4 | 4 | 12 | 8 |
| Riñihue | 1987-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pellaifa | 2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pullinque | 2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Huilipilún | 2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tinquilco | 2015-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Puyehue | 2012-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maihue | 1996-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rupanco | 1980-2021 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 4 | 9 | 9 | 9 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Panguipulli | 1997-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Neltume | 2012-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Calafquén | 1997-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| T. los Santos | 1982-2021 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| Villarrica | 1986-2019 | 46 | 44 | 46 | 45 | 45 | 46 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Llanquihue | 1986-2019 | 43 | 43 | 42 | 43 | 42 | 42 | 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ranco | 1976-2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: Elaboración propia.