



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE DOS CUERPOS LACUSTRES CON DISTINTOS USOS DE SUELO EN LA REGIÓN DE ÑUBLE

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera ambiental

AYLEEN ALEJANDRA HERRERA ESPINOZA

Profesor guía: Dr. Roberto Urrutia Pérez

Concepción, Chile

2022

**“Evaluación de la calidad de agua de dos cuerpos con distintos usos de
suelo en la región de Ñuble”**

PROFESOR GUÍA: Dr. ROBERTO URRUTIA PÉREZ



PROFESOR COMISIÓN: Dr. MAURICIO AGUAYO ARIAS



PROFESOR COMISIÓN: Dr. JOSÉ ARUMI RIBERA



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 2022

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
AGRADECIMIENTOS	X
RESUMEN	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Pregunta de investigación.....	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
2. ANTECEDENTES.....	4
3. METODOLOGÍA.....	11
3.1 Área de estudio	11
3.2 Objetivo I: Determinación de los usos de suelo del entorno de cada laguna.....	14
3.3 Objetivo II: Comparar los cuerpos de agua en base a nutrientes, parámetros físicoquímicos y fitoplancton.....	14
3.3.1 Campañas de terreno	14
3.3.2 Parámetros físicos, químicos y nutrientes.....	17
3.3.3 Estado trófico	18
3.3.4 Fitoplancton.....	20
3.4 Elaborar recomendaciones para la conservación de ambos cuerpos de agua... 23	
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1 Usos de suelo.....	24
4.2 Calidad del agua.....	26
4.2.1 Parámetros físicoquímicos.....	26
4.2.2 Clorofila	36
4.2.3 Nutrientes	40
4.2.4 Estado trófico.....	60
4.2.5 Fitoplancton.....	61
4.3 Recomendaciones de conservación.	72

5. CONCLUSIONES 74

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 76



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo donde se realizaron las tomas de muestras.....	15
Tabla 2. Métodos utilizados en el centro EULA para analizar los parámetros de aguas superficiales.....	16
Tabla 3. Resumen de criterios de calidad del agua de acuerdo con requerimientos físicos y químicos relevantes a este estudio, para recreación con contacto directo y riego.	17
Tabla 4. Resumen de criterios de calidad del agua de acuerdo con requerimientos físicos y químicos relevantes a este estudio, para la protección y conservación de comunidades acuáticas.....	17
Tabla 6. Rango de valores del índice de Carlson (TSI) según el estado trófico. ...	19
Tabla 7. Valores límites para la clasificación trófica de la OCDE.....	20
Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos obtenidos durante los cuatro monitoreos donde O.D= oxígeno disuelto, D.S= disco secchi, Prom= promedio y DStd= desviación estándar.	27
Tabla 9. Clorofila obtenida durante los cuatro monitoreos, donde Prom= promedio y DStd= desviación estándar.....	37
Tabla 10. Nutrientes obtenidos durante los cuatro monitoreos, donde Prom= promedio y DStd= desviación estándar.....	40
Tabla 11. Nutrientes obtenidos durante los cuatro monitoreos, donde Prom= promedio y DStd= desviación estándar.....	41
Tabla 12. Estado trófico según la propuesta de Carlson (1977) de las lagunas Santa Elena durante los cuatro monitoreos realizados entre octubre 2021 – enero 2022. Donde, Ft = fósforo total, Chl.a = clorofila α , Ds = disco secchi.	61
Tabla 13. Abundancia de especies de fitoplancton encontradas en las Lagunas Santa Elena 1 y 2 en octubre 2021 y noviembre 2021.....	63

Tabla 14. Abundancia de especies de fitoplancton encontradas en las Lagunas Santa Elena 1 y 2 en diciembre 2021 y enero 2022..... 66

Tabla 15. Índice de diversidad de Shannon (H), dominancia de Simpson (D) e índice de equidad de Pielou (J) para las especies de fitoplancton de ambas lagunas entre octubre de 2021 a enero de 2022..... 70



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Territorio declarado bajo plan de conservación (AAVC) por parte de la empresa Forestal Arauco.	8
Figura 2. Área de estudio humedal Laguna Santa Elena	11
Figura 3. Hidrología superficial laguna Santa Elena y Buena Vista.....	12
Figura 4. a) Mapa batimétrico Laguna Santa Elena, región del Biobío. b) Puntos de muestreo utilizados en el humedal Laguna Santa Elena.....	15
Figura 7. Temperatura registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.	28
Figura 8. Temperatura promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.	29
Figura 9. pH registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.	30
Figura 10. pH promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.	31
Figura 11. Conductividad eléctrica registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.	32
Figura 12. Conductividad eléctrica promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.	33
Figura 13. Oxígeno disuelto registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.	34
Figura 14. Oxígeno disuelto promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.	35
Figura 15. Transparencia del agua registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para la Laguna Santa Elena 1.	36

Figura 16. Clorofila α registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	38
Figura 16. Clorofila α promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	38
Figura 18. Clorofila total registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	39
Figura 19. Clorofila total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	40
Figura 20. Calcio total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	42
Figura 21. Calcio total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	43
Figura 22. Fósforo total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	44
Figura 23. Fósforo total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	45
Figura 24. Magnesio total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	46
Figura 25. Fósforo total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	47
Figura 26. Manganeso total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	48
Figura 27. Manganeso total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	49
Figura 28. Nitrato registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	50

Figura 29. Nitratos promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.	51
Figura 30. Nitrógeno amoniacal registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.	52
Figura 31. Nitrógeno amoniacal promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	53
Figura 32. Nitrógeno total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	54
Figura 33. Nitrógeno total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	55
Figura 34. Potasio total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	56
Figura 35. Potasio total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	57
Figura 36. Sodio total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	58
Figura 37. Sodio total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	59
Figura 38. Sulfato total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.....	59
Figura 39. Sulfato total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.....	60

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expresar mi agradecimiento a mis docentes Mauricio Aguayo, Roberto Urrutia y Jose Luis Arumí por el tiempo dedicado, orientación y apoyo brindado a este trabajo. Así mismo, agradezco a don Alejandro quién me acompañó y ayudó en las extenuantes y complejas salidas a terreno y a la señora Dalba que me brindó sus conocimientos, ayuda y simpatía en el laboratorio de fitoplancton.

Mi agradecimiento al Centro CHRIAM por permitir realizar mi tesis de habilitación profesional como becaria del proyecto ANID/FONDA2P/15130015.

Agradecerle también a mi familia, a mis padres Viviana y Jorge, mis hermanas Nicole y Lisbeth y sobrinos Fernando y Catalina, por acompañarme en este arduo camino y darme ánimo durante los momentos difíciles de este proceso.

A mi pololo Cristián, por estar siempre conmigo, por los ánimos durante los últimos semestres de nuestra carrera universitaria, por ser un apoyo incondicional en todo momento y siempre tener toda la fe puesta en mí.

Finalmente, a mi perro Benito, mi viejito peludo que me acompañó aguantando largas horas recostado en mi cama mientras trabajaba en esta tesis.

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es determinar las diferencias en cuanto a calidad del agua de las dos lagunas que conforman el humedal Laguna Santa Elena ubicada en la comuna de Bulnes, región de Ñuble. Dicho humedal es uno de los principales ecosistemas lacustres del centro de Chile, rico en biodiversidad, destacando las numerosas especies de aves que habitan la zona. Sin embargo, se encuentra amenazado por actividades antrópicas, principalmente agrícolas y forestales.

Se determinó los usos de suelo circundantes en cada laguna a través del software ArcMap y se realizaron campañas de terreno para toma de muestras de parámetros físicoquímicos, nutrientes y comunidades de fitoplancton. Se realizó una comparación de ambas lagunas con los datos obtenidos, complementando con normativa chilena, además se determinó el estado trófico de cada cuerpo de agua junto a un análisis de la composición de microalgas. Finalmente, se elaboraron recomendaciones para la conservación del humedal.

Como resultados se obtuvo que la laguna pequeña tiene una mala calidad de agua, con pH alcalino, estado mesotrófico que tiende a la eutrofización, mayor concentraciones de nutrientes, cationes y clorofila y presenta especies de cianobacterias. En cambio, la laguna grande presenta una buena calidad de agua, siendo esta mesotrófica con tendencia hacia la oligotrofia. Las diferencias entre ambos cuerpos de agua se podrían deber principalmente a las características morfométricas de cada una, además de las entradas y salidas que influyen en los tiempos de residencia.

Al no existir línea de base no es posible determinar si el plan de conservación implementado en la laguna pequeña ha tenido algún efecto. Del mismo modo tampoco es posible atribuir la influencia de los diferentes usos de suelo sobre la calidad del agua de las lagunas.

1. INTRODUCCIÓN

La Laguna Santa Elena es uno de los principales ecosistemas lacustres del centro de Chile, corresponde a un sistema rico en biodiversidad, destacando las numerosas especies de aves que habitan la zona especialmente el cisne de cuello negro. Por otra parte, es un lugar de alto interés para la investigación científica y la preservación. Sin embargo, se encuentra expuesta a múltiples actividades humanas que podrían estar degradando sus aguas, como plantaciones forestales, campos agrícolas, actividades turísticas, además de la presencia de infraestructuras en sus riberas.

Es por ello que, para proteger este humedal y evitar que sea drenado para favorecer actividades humanas, ha sido incluido en el Plan Nacional de Humedales donde se planea proteger aproximadamente 50 ha; pero aun sin especificar su categoría de área protegida, por lo que todavía no se han realizado actividades para su protección. Dicha superficie a preservar corresponde a una de las dos lagunas que conforman el humedal Laguna Santa Elena, la cual también se encuentra bajo protección de Forestal Arauco ya que se encuentra inserta en sus predios. La empresa ha implementado un plan de preservación donde declaran como un área de alto valor de conservación a la laguna y zonas adyacentes, proponiendo una serie de medidas para proteger la biodiversidad y calidad del ecosistema. Sin embargo, existen antecedentes que hasta la fecha no se han realizado monitoreos de calidad de agua en el cuerpo lacustre, por lo que no existe una línea de base de esta información para analizar la respuesta de la laguna a las medidas de conservación aplicadas, desconociendo su estado actual.

Por esto, generar un mayor conocimiento de la calidad del agua de los cuerpos lacustres del humedal Laguna Santa Elena será de utilidad para mejorar la toma de decisiones en torno a la gestión con el fin de preservar este importante ecosistema.

Dado los antecedentes anteriormente descritos, la finalidad de esta investigación es determinar si existen diferencias de calidad de agua entre un cuerpo lacustre que se encuentra bajo protección tanto de la empresa Forestal Arauco como de forma gubernamental y un cuerpo lacustre que no cuenta con medidas de gestión y asociar tales diferencias a los usos de suelo del entorno y/o a las características morfométricas de cada laguna.



1.1. Pregunta de investigación

Considerando que ambos cuerpos de agua pertenecen a un mismo humedal y poseen distintos usos de suelo y medidas de gestión, ¿existen actualmente diferencias en sus calidades de agua?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Establecer las diferencias entre los dos cuerpos de agua que conforman el humedal Laguna Santa Elena y relacionarlas en función de los usos de suelo del entorno y recomendar medidas para la conservación.

1.2.2. Objetivos específicos

- I. Determinar los usos de suelo del entorno de cada laguna.
- II. Analizar comparativamente los cuerpos de agua en base a nutrientes, parámetros fisicoquímicos y fitoplancton.
- III. Elaborar recomendaciones para la conservación de ambos cuerpos de agua.

2. ANTECEDENTES

Las lagunas son humedales de gran importancia que otorgan servicios ecosistémicos tales como proveer un hábitat reproductivo adecuado y alimento a diversas especies, contribuir a la recarga y descarga de acuíferos, mejorar la calidad del agua filtrando sedimentos y metales de las aguas subterráneas gracias a las propiedades químicas y biológicas del suelo. (Greb *et al.*, 2006). Adicionalmente, contribuyen al bienestar humano y a la mitigación de la pobreza generando actividades de pesca y caza, proporcionando actividades recreativas, de turismo, educación e investigación y permitiendo que se desarrollen ocupaciones culturales y religiosas. (Barbier, 2011; UICN, 1992).

Sin embargo, actualmente estos recursos hídricos están directamente amenazados por las actividades humanas, generando alteraciones significativas a través del cambio de uso de suelo, la creciente urbanización e industrialización, además de la ejecución de planes de ingeniería para maximizar el acceso humano al agua como embalses, riego y trasvases entre cuencas. (Vörösmarty *et al.*, 2010).

Particularmente, el cambio de uso de suelo por actividades silvícolas genera una serie de efectos negativos sobre los cuerpos de agua, alterando su hidrología, vegetación y suelos. Es así como la sustitución del terreno por plantaciones exóticas aumenta las pérdidas de agua por intercepción y evapotranspiración. (Iroumé & Huber, 2002). Además, al ser de crecimiento rápido, estas especies consumen mucha agua, por lo que, si no se considera la zona en las que se establecen las plantaciones, pueden generar grandes impactos en el recurso hídrico. (Huber *et al.*, 2007). Por otra parte, en las cuencas forestales se percibe un aumento de los sedimentos en suspensión debido a las perturbaciones ocasionadas por el manejo de las plantaciones, principalmente durante las cosechas (será explotaciones?). (Megahan *et al.* citado en Karwan *et al.*, 2007). En exceso, los sedimentos suspendidos degradan el hábitat acuático y potencian el transporte de contaminantes adsorbidos. (Rehg *et al.*, 2005).

Perison *et al.* (1997) señalan que la eliminación de la vegetación produce un aumento de la temperatura de la superficie del suelo, generando cambios funcionales en la biogeoquímica, calidad del agua y en algunas especies.

Igualmente las actividades agrícolas inciden negativamente en la calidad del agua, generando problemas como eutrofización debido al uso de fertilizantes (nitrógeno y fósforo), lo cual deriva en una modificación de la cadena alimentaria, aumento de los sólidos suspendidos derivados de la erosión del suelo (debido a los métodos de cultivo de la tierra), alteración de los ciclos hidrológicos, introducción de especies exóticas y modificación física del ecosistema (canalización, terraplén, drenaje) (Moss, 2007; Sharpley, 2002).

Es así como, debido al riesgo de contaminación por parte de las actividades antropogénicas, agencias gubernamentales, ambientales y universidades se han encargado de evaluar el impacto antrópico sobre los recursos hídricos a través del análisis de la calidad del agua, realizando estudios de la naturaleza química, física y biológica del agua mediante programas de monitoreo, con el fin de prevenir o aminorar modificaciones graves en los ecosistemas. El término “calidad de agua” depende del uso final que se le otorgue al cuerpo de agua en base a las actividades que se desarrollan en la cuenca hidrográfica. (Molina & Vila, 2006; Samboni *et al.*, 2007).

Agencias gubernamentales, ambientales y universidades se han encargado de evaluar el impacto antrópico sobre los recursos hídricos a través del estudio de la naturaleza química, física y biológica del agua, mediante programas de monitoreo.

El control de la calidad del agua en lagos y lagunas suele consistir en inspecciones en terreno donde se realizan mediciones de parámetros fisicoquímicos, además de tomas de muestras que son trasladadas a laboratorios para analizar nutrientes y organismos. (Wang *et al.*, 2004).

A través de los parámetros fisicoquímicos se puede obtener una amplia información de la naturaleza de las especies químicas, así como de las propiedades físicas del

agua. (González-Dávila *et al.*, 2019). Estos métodos cuentan como ventaja un análisis más rápido y mayor frecuencia de monitoreo, así como también pueden ser utilizados para evaluar distintos tipos de uso. (Samboni *et al.*, 2007). Sin embargo, esta evaluación refleja las condiciones instantáneas del agua, por lo que no es posible determinar la evolución de una carga contaminante y la capacidad resiliente y amortiguadora del ecosistema acuático. Dado esto, se estudia en conjunto con métodos biológicos utilizando indicadores como micro flora y/o microorganismos, obteniendo de esta manera información del presente y pasado del cuerpo de agua. (García-Huamán *et al.*, 2011).

El uso de organismos como indicadores de la calidad del agua se debe a que se encuentran adaptados a las exigencias ambientales de un hábitat, por lo que cualquier cambio en estas condiciones se reflejará en las estructuras de las comunidades que allí habitan. (Forero-Céspedes & Reinoso-Flórez, 2013). El fitoplancton es uno de los componentes más importantes de los sistemas acuáticos, jugando un papel central en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas de agua dulce ya que es el principal productor primario, proporcionando alimento y energía a los niveles tróficos superiores. (Zohary *et al.*, 2014). Las características físicas (ópticas, térmicas, hidrodinámicas) y químicas del agua (nutrientes, concentración de iones) son los factores más relevantes que estimulan o inhiben su desarrollo. (Bonilla *et al.*, 2016).

Algunos métodos de estudio utilizan la abundancia del fitoplancton mientras que otros examinan la estructura de la comunidad, evaluando las especies dominantes e indicadoras (López-Rodríguez *et al.*, 2016). La composición del fitoplancton indica el estado trófico del agua, mientras que las especies se utilizan para determinar el nivel de nutrientes, siendo esta la base para elaborar y dar seguimiento a estrategias de gestión de los lagos. (Bhateria & Jain, 2016). Algunas especies, además de alcanzar altas densidades en aguas eutrofizadas, son muy tolerantes a la contaminación orgánica por lo que pueden utilizarse como indicadores de tales

condiciones, generadas por contaminación de origen urbano o industrial. (Bauer, 2009).

Por otra parte, los nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) son componentes fundamentales de los organismos vivos. Sin embargo, los niveles excesivos de estos alteran negativamente los ecosistemas acuáticos generando floraciones de algas nocivas e hipoxia. (Pellerin *et al.*, 2016).

Es relevante mencionar que la calidad del agua es muy dinámica y cambia con el tiempo (Wyk & Scarpa, 1999) y sus características reflejan los efectos acumulados en la cuenca de drenaje de todos los aportes de agua y materiales procedentes del entorno. (Parra *et al.*, 2003).

Actualmente la protección del medio ambiente es uno de los temas principales de muchos países, siendo relevante la necesidad de estudios que proporcionen nuevos y mayores conocimientos sobre áreas ambientales, como es el caso de los sistemas acuáticos. La evaluación del grado de contaminación de los sistemas lacustres es trascendental para la gestión ambiental territorial, permitiendo establecer restricciones de uso y, si corresponde, implantar medidas de recuperación y mitigación. (Parra *et al.*, 2003).

Chile no es la excepción, por lo que a lo largo de los años se han implementado estrategias de protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales. Es así como en el año 2018 surge el Plan Nacional de Protección de Humedales 2018-2022 que busca contribuir a detener la pérdida y degradación de estos ecosistemas, otorgando una categoría de área protegida a cada humedal junto a normativas e instituciones encargados de la protección. Dentro de este plan se encuentra incluido parte del humedal Laguna Santa Elena, sistema lacustre rico en biodiversidad y servicios ecosistémicos únicos en la zona, que se encuentra vulnerable a múltiples factores antrópicos ya que se ubica entre predios forestales y campos agrícolas, además de existir en sus riberas un crecimiento exponencial de infraestructuras y actividades turísticas.

Dicha zona a proteger se encuentra inserta en predios de Forestal Arauco, específicamente en una superficie declarada como área de alto valor de conservación (AAVC) por lo que requiere un nivel de resguardo y gestión especial por parte de la empresa para asegurar su preservación o mejora en el tiempo.

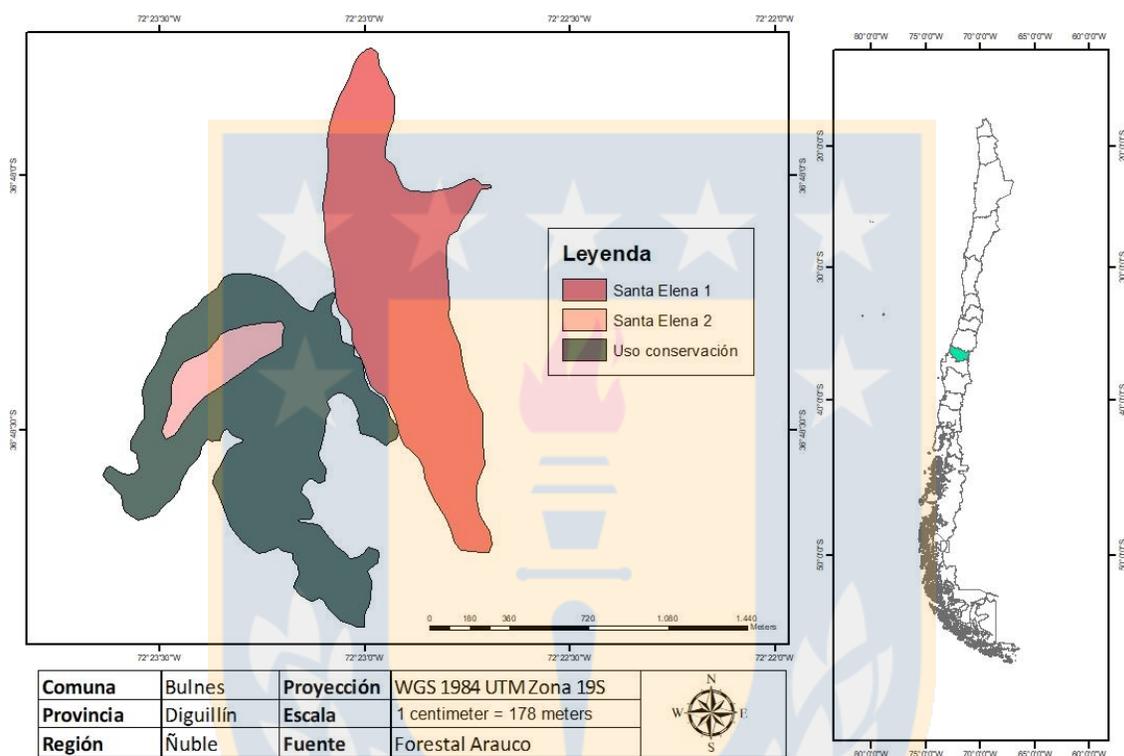


Figura 1. Territorio declarado bajo plan de conservación (AAVC) por parte de la empresa Forestal Arauco.

Fuente: Plan de conservación del área de alto valor de conservación (AAVC) Laguna Santa Elena, Forestal Arauco, 2016.

En el cuerpo de agua se han identificado como amenazas externas el pisoteo y contaminación biológica por ganado de terceros, incendios debido a la quema de pajonales y caza ilegal. En cuanto a amenazas provenientes de las actividades de la empresa se encuentra la contaminación por agroquímicos.

Para el plan de conservación del humedal se han implementado una serie de actividades que tienen como objetivo mejorar los conocimientos de biodiversidad,

mejorar el estado de conservación de la vegetación ribereña, establecer un marco de colaboración con la comunidad local y otras partes interesadas y preferir realizar planificaciones sustentables de las operaciones forestales.

Las actividades a realizar mencionadas en el Plan De Conservación Del Área De Alto Valor De Conservación (AAVC) Laguna Santa Elena (2016) son:

a. Mejorar el estado de conocimiento de la biodiversidad asociada al humedal.

- Elaborar una línea base de información acerca de la flora y fauna del humedal, así como sus amenazas.

b. Mejorar el estado de conservación de la vegetación ribereña en la zona de amortiguación del humedal.

- Identificación y cierre de puntos de acceso de ganado al AAVC
- Elaborar un programa de control de especies invasoras, tras finalizar la evaluación inicial de su condición.
- Implementar programa de control de especies invasoras.
- Se colectarán semillas de las principales especies identificadas en el AAVC, ya sea para su almacenamiento como para la producción de plantas.

c. Establecer un marco de colaboración con la comunidad local y otras partes interesadas

- Elaboración, construcción e instalación de señalética.
- Ejecución de charlas de capacitación impartidas a jefe de área y Guardabosques prediales.
- Ejecución de charlas de inducción a EMSEFOR.
- Ejecución de charla con elaboración y entrega de material de difusión del AAVC.
- Establecimiento de acuerdos de colaboración con organismos regionales y locales.

d. Propender a una planificación sustentable de las operaciones forestales en el área de amortiguación del AAVC.

- Monitoreo de impacto de operaciones.
- Identificación de operaciones con potencial de afectación al AAVC.

e. Revisión del Plan de Conservación y/o modificación según resultados anuales.



3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El humedal Laguna Santa Elena se encuentra conformado por 2 cuerpos de agua, uno de 8 hectáreas y otro de 63 hectáreas, además de un humedal palustre (78 ha), teniendo una superficie total de 149 hectáreas. Se encuentra localizado en el sector de Santa Clara, comuna de Bulnes, provincia de Diguillín, región de Ñuble, Chile. Para facilitar el entendimiento del presente estudio se identificará la laguna grande (63 ha) como Santa Elena 1 y la laguna pequeña (8 ha) como Santa Elena 2.

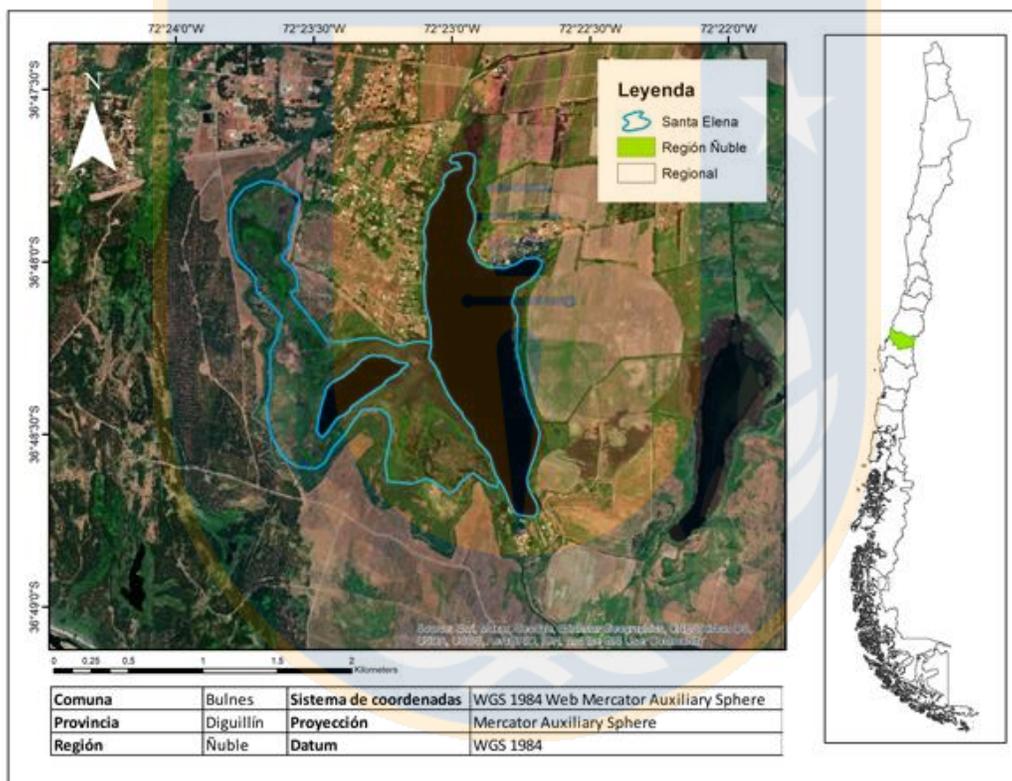


Figura 2. Área de estudio humedal Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

Los principales suministros de agua de la laguna corresponden a tres vertientes subterráneas (Muñoz, 2017). Cuenta además con dos entradas desde el canal de riego El Roble, una de estas está ubicada en la zona sur del lago, mientras que la

otra ingresa al espejo de agua pequeño, el cual descarga a su vez sus aguas al lago. Existe una única salida canalizada de las aguas en el sector sureste del lago, que conduce las aguas hacia la Laguna Buena Vista. Esta última laguna tiene una salida natural de sus aguas hacia el estero Lomavida. (Rivera, 2020; Matta, 2015).

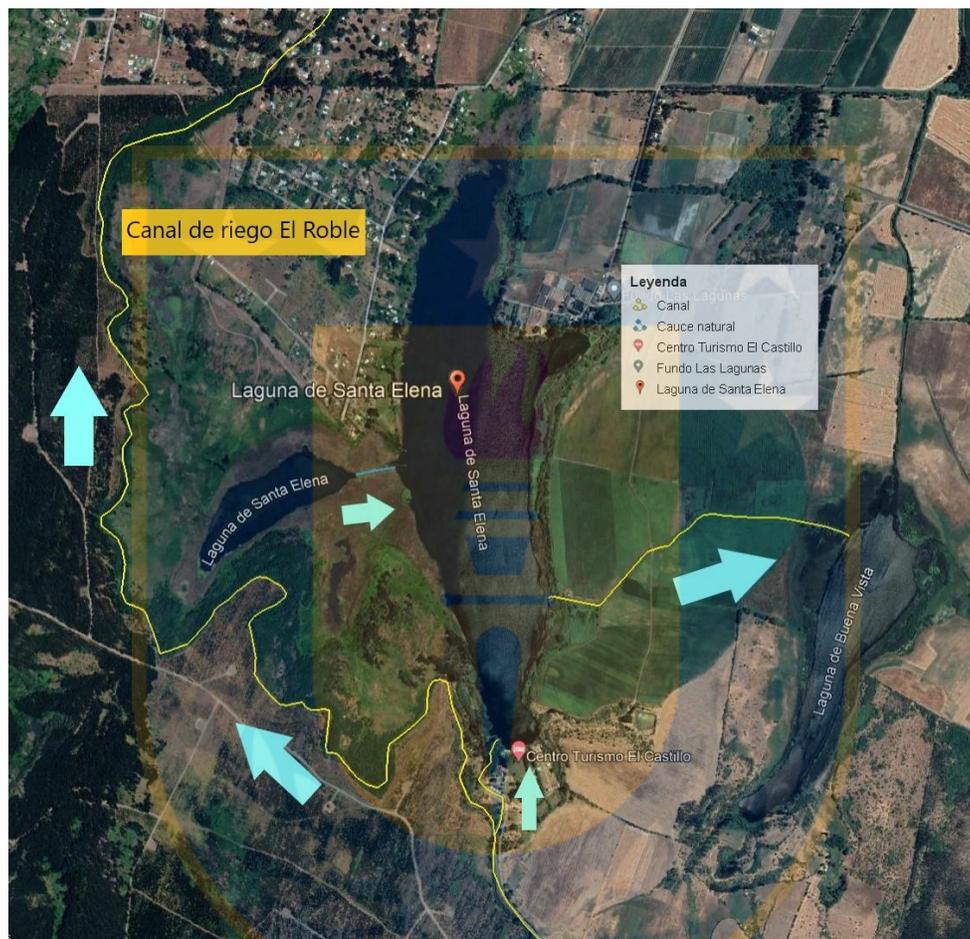


Figura 3. Hidrología superficial laguna Santa Elena y Buena Vista.

Fuente: adaptado de Matta, 2015.

Las principales actividades humanas en la zona son los cultivos agrícolas (remolacha, trigo, frambuesa y arándano) y explotación forestal de especies exóticas como pino (*Pinus spp.*) y eucalipto (*Eucalyptus spp.*) (González-Acuña *et al.*, 2004).

La vegetación acuática en los bordes del humedal corresponde principalmente a juncos (*Juncus spp.*) y a totoras (*Schoenoplectus californicus*) (Biota gestión y consultorías ambientales LTDA., 2009). La vegetación terrestre que rodea al humedal está constituida por pequeños grupos de sauces (*Salix babilonica*) y álamos (*Populus spp.*) (González-Acuña *et al.*, 2004).

Respecto a avifauna, González-Acuña *et al.* (2004) registraron 44 especies de aves. De éstas, el 31,8% corresponden a especies dulceacuícolas, 45,5% a especies terrestres y 22,7% a especies que pueden usar facultativamente ambientes acuáticos y terrestres. Las especies más regulares en el humedal son la tagua común (*Fulica armillata*), tagua de frente roja (*F. rufifrons*) (Silva *et al.*, 2011), pimpollo (*Rollandia rolland*), huala (*Podiceps major*), yeco (*Phalacrocorax brasilianus*), garza cuca (*Ardea cocoi*), cisne de cuello negro (*Cygnus melancoryphus*), tagua chica (*F. leucoptera*) y trabajador (*Phleocryptes melanops*), garza grande (*Casmerodius albus*), garza chica (*Egretta thula*), huairavo (*Nycticorax nycticorax*), pidén (*Rallus sanguinolentus*) y treile (*Vanellus chilensis*) (González-Acuña *et al.*, 2004).

El mamífero que destaca entre los pajonales es el coipo (*Myocastor coypus*) (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).

Respecto a peces, en el Plan de Conservación del Área de Alto Valor de Conservación (AAVC) Laguna Santa Elena realizado por Forestal Arauco (2016) identifican la presencia de pejerrey argentino (*Odontesthes bonariensis*), carpa (*Cyprinus carpa*), pochita (*Cheirodon sp.*).

La laguna fue declarada área protegida por la antigua Comisión Nacional del Medioambiente (CONAMA) en 2002. Actualmente, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) planea aumentar el estándar de conservación de este sistema léntico en 2020 según el Plan Nacional de Humedales donde se planea proteger aproximadamente 50.0 ha; pero aun sin especificar su categoría de área protegida.

3.2 Objetivo I: Determinación de los usos de suelo del entorno de cada laguna

Para determinar los usos de suelo en primer lugar se obtuvo los shapefiles de los cuerpos de agua a través del Inventario Nacional de Humedales proporcionado por el Ministerio del Medio Ambiente. Posteriormente, se creó un buffer para cada laguna de 200 metros, este valor se obtuvo midiendo la distancia entre ambas lagunas.

Ya delimitada la zona de estudio, se obtuvo el archivo shapefile de Catastro de Uso de Suelo y Vegetación realizado por CONAF a través de la plataforma IDE Chile (Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile) y cuya última modificación fue realizada el año 2019. Este archivo fue recortado a los buffer, obteniendo exactamente los usos de suelo dentro de ellos.

3.3 Objetivo II: Comparar los cuerpos de agua en base a nutrientes, parámetros fisicoquímicos y fitoplancton

Mediante los resultados de las muestras de nutrientes, parámetros fisicoquímicos y fitoplancton obtenidos en las salidas a terreno, se realizará una comparación de ambas lagunas analizando cada parámetro y estado trófico, estableciendo además sus diferencias y posibles causas asociadas a los usos de suelo mediante revisión bibliográfica de casos de estudio similares.

3.3.1 Campañas de terreno

En total se realizaron 4 campañas de terreno entre noviembre de 2021 a enero de 2022. Las estaciones de muestreo para Santa Elena 1 corresponden a los puntos más profundos del lago los cuales se obtuvieron mediante un ecosonda manual. Estos puntos fueron corroborados más tarde a través del mapa batimétrico realizado por Matta (2015).

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo donde se realizaron las tomas de muestras.

Laguna	Estación	Latitud	Longitud
Santa Elena 1	E1	36°48'14.90"S	72°22'56.14"O
	E2	36°48'28.00"S	72°22'50.21"O
Santa Elena 2	E3	36°48'19.32"S	72°23'21.66"O

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, Santa Elena 2 es de difícil acceso debido a que cuenta con una gran extensión de totoras (aproximadamente 100 metros), por lo que no fue posible ingresar con bote y las muestras fueron tomadas a orillas de la laguna.

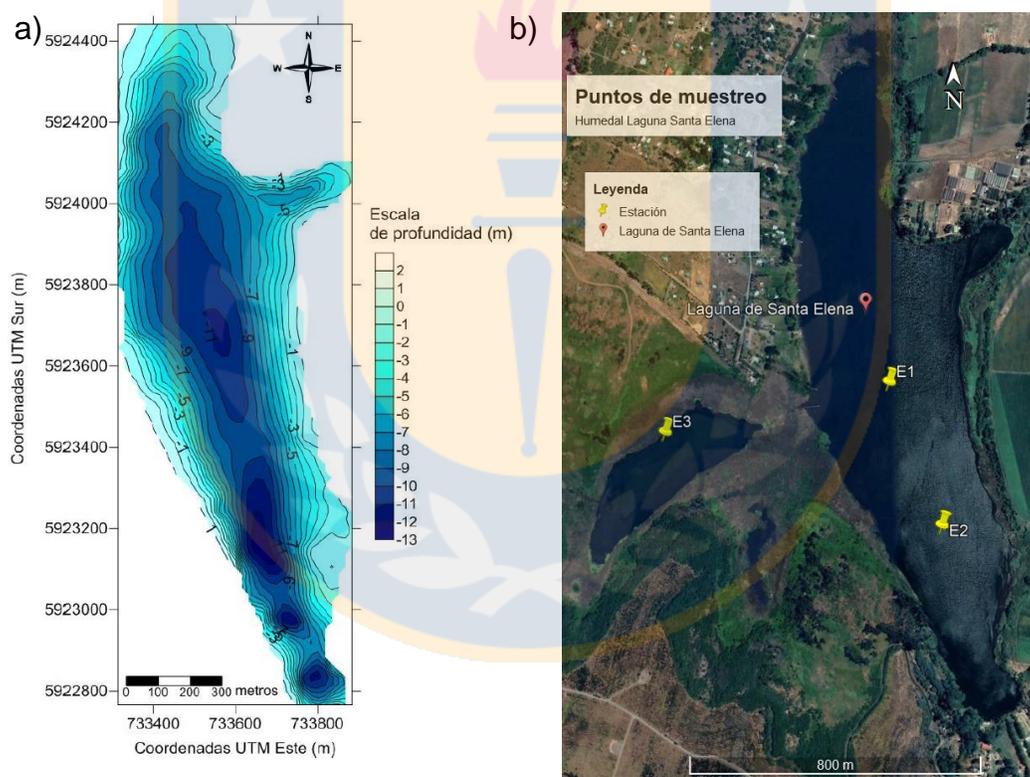


Figura 4. a) Mapa batimétrico Laguna Santa Elena, región del Biobío. b) Puntos de muestreo utilizados en el humedal Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia a partir de mapa batimétrico de Matta, 2015.

Se ingresó a la laguna Santa Elena 1 mediante un bote y se utilizaron remos para no alterar la fauna que habita la laguna. Para la recolección de muestras para

nutrientes, clorofila y fitoplancton se utilizaron recipientes de vidrio y plástico respectivamente, en el caso de la muestra de nutrientes se aplicó previamente ácido sulfúrico en el recipiente para su correcta preservación. Las muestras fueron llevadas posteriormente al laboratorio del Centro EULA-Chile, donde se realizaron los siguientes métodos analíticos:

Tabla 2. Métodos utilizados en el centro EULA para analizar los parámetros de aguas superficiales.

Parámetro	Método analítico
Clorofila	Método 445.0, EPA (1997)
Calcio T, Fósforo T, Magnesio T, Manganeso T, Potasio T, Sodio T, Sulfato.	3120 B Standard Methods for the examination of water and waste water 23th Edition.
Nitratos	4110 B Standard Methods 23th Edition
Nitrógeno amoniacal	4500 – NH ₃ F Standard Methods for the examination of water and waste wáter 23th Edition
Nitrógeno total	4500-N C. Persulfate Method Nitrogen. 23th Edición 2017.

Fuente: elaboración propia a partir de información proporcionada por centro EULA.

Respecto a fitoplancton, se tomaron muestras cuantitativas de la superficie de la laguna. Estos debieron ser almacenados en oscuridad y a baja temperatura, para posteriormente aplicar lugol como fijador. En dos ocasiones se recolectó fitoplancton mediante una Red de Fitoplancton con el fin de realizar un análisis cualitativo de la muestra, facilitando la identificación de especies.

Para determinar los parámetros fisicoquímicos se utilizó un medidor multiparámetro, el cual indica: pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto.

La transparencia del agua de la laguna Santa Elena 1 se midió a través de un disco secchi, el cual se introduce en la laguna y se mide la profundidad que el disco

alcanza hasta que se pierde de vista. Para la laguna Santa Elena 2 fue imposible de determinar debido a que no hubo acceso con bote.

3.3.2 Parámetros físicos, químicos y nutrientes

Se estableció una comparación entre ambas lagunas de los datos obtenidos de parámetros físicos y químicos de las muestras de agua y con revisión bibliográfica se relacionaron estas diferencias con las actividades y usos de suelo adyacentes a cada laguna.

Para complementar información sobre el estado de cada laguna se compararon los datos con la normativa chilena, específicamente con la Norma 1333 Of.78 Requisitos de calidad del agua para diferentes usos y con la Guía para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas.

Tabla 3. Resumen de criterios de calidad del agua de acuerdo con requerimientos físicos y químicos relevantes a este estudio, para recreación con contacto directo y riego.

	Parámetro	Unidad	Límite máximo
Recreación con contacto directo	pH	-	6,5 a 8,3
	Temperatura	°C	30
	Transparencia	m	*mínimo 1,20
Riego	pH	-	5,5 a 9,0
	Manganeso	mg/l	0,20
	Sulfato	mg/l	250

Fuente: NCh 1333 Of.78 Requisitos de calidad del agua para diferentes usos

Tabla 4. Resumen de criterios de calidad del agua de acuerdo con requerimientos físicos y químicos relevantes a este estudio, para la protección y conservación de comunidades acuáticas.

Parámetro	Unidad	Clase excepcional	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Conductividad eléctrica	µS/cm	<600	750	1500	2250
Oxígeno disuelto	mg/l	>7,5	7,5	5,5	5
pH	-	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5
Manganeso	mg/l	<0,04	0,05	0,2	0,2
Sulfato	mg/l	<120	150	500	1000

Fuente: Guía para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas

Clase excepcional: extraordinaria pureza y escasas, forma parte única del patrimonio ambiental.

Clase 1: muy buena calidad, agua adecuada para la protección y conservación de comunidades acuáticas, riego irrestricto, acuicultura, pesca deportiva y recreativa, bebida de animales.

Clase 2: buena calidad, agua para el desarrollo de acuicultura, pesca deportiva y recreativa, bebida de animales y riego restringido.

Clase 3: regular calidad, agua adecuada para bebida de animales y riego restringido.

Las aguas que excedan los límites establecidos para la Clase 3, indicarán un agua de mala calidad (Clase 4), en general no adecuada para la conservación de las comunidades acuáticas o su aprovechamiento para los usos prioritarios sin el tratamiento adecuado.

3.3.3 Estado trófico

Una vez obtenido los resultados del análisis en laboratorio, se evaluó la condición trófica de cada lago. El estado trófico se utiliza para clasificar los ecosistemas

acuáticos en función de la productividad biótica. Se utilizan tres categorías básicas para describir el estado trófico (oligotrófico, mesotrófico y eutrófico), además, estas categorías pueden ampliarse (ultraoligotrófico e hipertrófico), y subdividirse (oligo-mesotrófico, meso-eutrófico) (Dodds & Cole, 2007).

De esta forma, se utilizó la clasificación propuesta por Carlson (1977) el cual consiste en una relación entre la transformación logarítmica de los valores obtenidos de la transparencia del agua (Ds), concentración de clorofila α (clorof α) y el fósforo total (Ft).

Tabla 5. Fórmulas para estimar el indicador trófico de cada variable e índice total.

Parámetro	Unidad	Fórmula
Transparencia del agua (Ds)	m	$TSID_s = 60 - 14.41Ln(Ds)$
Fósforo total (Ft)	mg/m ³	$TSIFt = 14.42Ln(Ft) + 4.15$
Clorofila α (Clorf α)	mg/m ³	$TSIClorf\alpha = 9.81Ln(Clorf\alpha) + 30.6$
Índice		$TSI = (TSID_s + TSIFt + TSIClorf\alpha)/3$

Fuente: Carlson, 1997.

Tabla 6. Rango de valores del índice de Carlson (TSI) según el estado trófico.

Grado de trofía	TSI	Ds	Pt	Chl a
		m	mg/m ³	mg/m ³
Oligotrófico TSI < 30	0	64	0,75	0,04
	10	32	1,5	0,12
	20	16	3	0,34
	30	8	6	0,94
Mesotrófico 30 < TSI < 60	40	4	12	2,6
	50	2	24	6,4
	60	1	48	20
Eutrófico 60 < TSI < 90	70	0,5	96	56
	80	0,25	192	154

	90	0,12	384	427
Hipereutrífico 90 < TSI < 100	100	0,06	768	427

Fuente: Carlson, 1997.

Para complementar la evaluación trófica, se compararán los parámetros indicadores con los propuestos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en 1982. Según esta clasificación se define la categoría trófica en base a la concentración de fósforo total, clorofila α y transparencia del agua, analizando cada parámetro por separado.

Tabla 7. Valores límites para la clasificación trófica de la OCDE.

Estado trófico	Fósforo total ($\mu\text{g/L}$)	Clorofila α ($\mu\text{g/L}$)		Transparencia (m)	
		Media	Máxima	Media	Máxima
Ultra-oligotrófico	< 4,0	< 1,0	< 2,5	> 6,0	> 12,0
Oligotrófico	< 10,0	< 2,5	< 8,0	> 6,0	> 3,0
Mesotrófico	10 – 35	2,5 – 8,0	8,0 – 25	6,0 – 3,0	3,0 – 1,5
Eutrófico	35 – 100	25 – 75	25 – 75	3,0 – 1,5	1,5 – 0,7
Hipertrófico	>100	> 75	> 75	< 1,5	< 0,7

Fuente: OCDE, 1982.

3.3.4 Fitoplancton

El fitoplancton es un elemento de suma importancia en la estructura de los ecosistemas lacustres, es muy flexible en su capacidad de adaptación a las diferentes condiciones ambientales de luz, temperatura y nutrientes. Además, es uno de los indicadores biológicos básicos para evaluar el estado de los lagos ya que reacciona rápidamente a los cambios en las condiciones ambientales.

Para el análisis de fitoplancton se cuantificó el número de células por el método de Utermöhl (1958) a partir de cámaras de sedimentación de 5 y 25 ml de volumen en un microscopio invertido. La cuantificación de células se realizó por transectos de observación, contando como mínimo 400 células por muestra. Se realizó la

identificación taxonómica hasta el nivel de género y/o especie utilizando principalmente la literatura de Parra *et al.* (1982). Posteriormente se procesaron los datos en una tabla Excel donde se utilizó la siguiente fórmula para obtener la abundancia de cada especie (células/litro):

$$X = Ce * \frac{Ac * 1000}{At * Vc * Nt}$$

Donde

X: número de células por litro

Ce: células contadas de la especie

Ac: Área de la cámara (mm²)

At: Área del transecto (mm²)

Vc: volumen de la cámara de sedimentación

Nt: número de transectos realizados

Con los resultados obtenidos se pudo conocer la composición de las comunidades, identificando a aquellas especies indicadoras de la calidad del agua.

Abundancia relativa: Proporción de una especie respecto a todas las especies identificadas en la muestra. Medir la abundancia relativa de cada especie permite identificar aquellas especies que por su escasa representatividad en la comunidad son más sensibles a las perturbaciones ambientales. (Moreno, 2001).

Índice de diversidad de Shannon-Weaver: Corresponde a una forma de medir la diversidad de especies de una comunidad.

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i$$

Donde

H': índice de Shannon-Weaver

S: número de especies (riqueza específica)

p_i : proporción de individuos de cada especie respecto al total: n_i/N (abundancia relativa de la especie i)

n_i : número de individuos de la especie i

N: número de individuos de todas las especies

Sus valores oscilan entre números positivos, siendo el menor 0. Se considera que valores menores a 2 son ecosistemas con una diversidad de especies relativamente baja, mientras que los mayores a 3 son altos.

Índice de dominancia de Simpson: Este índice mide la probabilidad que dos individuos seleccionados al azar de una población de N individuos provengan de la misma especie.

$$D = \sum p_i^2$$

Donde

D: dominancia de Simpson

p_i : proporción de individuos de cada especie respecto al total: n_i/N (abundancia relativa de la especie i)

El índice de dominancia de Simpson muestra resultados entre 0 a 1 en el cual los valores cercanos a 1 explican la dominancia de una especie por sobre las demás.

Índice de equidad de Pielou: Mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada.

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

Donde

J: índice de equidad

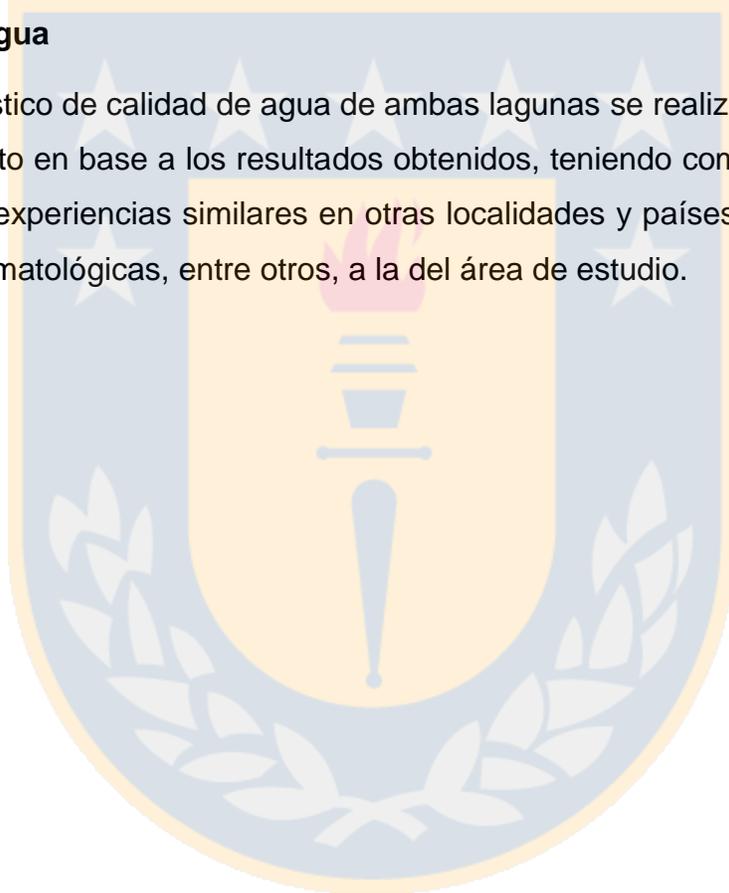
H': índice de Shannon-Weaver

S: número de especies

Su valor va de 0 a 1, de forma que 1 corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes y el 0 señala la ausencia de uniformidad, dominando una especie sobre todas las demás.

3.4 Elaborar recomendaciones para la conservación de ambos cuerpos de agua

Tras el diagnóstico de calidad de agua de ambas lagunas se realizaron propuestas de mejoramiento en base a los resultados obtenidos, teniendo como base revisión bibliográfica y experiencias similares en otras localidades y países con similitudes territoriales, climatológicas, entre otros, a la del área de estudio.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Usos de suelo

En el buffer de 200 metros delimitado alrededor de la Laguna Santa Elena 1 se identificaron 4 usos de suelo diferentes: bosques, humedales, praderas y matorrales y, terrenos agrícolas. Dentro de la categoría “bosques” se encuentran solo especies introducidas, específicamente plantaciones de pinos (*Pinus radiata*), álamos (*Populus nigra*) y sauces (*Salix babylonica*). Este uso de suelo abarca una superficie de 8,3 hectáreas.

Por otra parte, “praderas y matorrales” cuenta con una superficie de 10 hectáreas e incluye las siguientes especies nativas: quillay (*Quillaja saponaria*), huingán (*Schinus polygamus*), espino (*Acacia caven*) y boldo (*Peumus boldus*). Entre las especies introducidas se identifican rosa mosqueta (*Rosa moschata*), zarzamora (*Rubus ulmifolius*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*).

El humedal corresponde a una vega de 9,2 hectáreas, cuya vegetación acuática está conformada por pasto miel (*Holcus lanatus*) y juncos (*Juncus sp.*). Finalmente, las actividades agrícolas son las que ocupan una mayor superficie, alcanzando 59,3 hectáreas. Se trata de rotaciones cultivo-praderas, esta práctica se realiza para frenar la erosión, conservar la materia orgánica y evitar la proliferación de plagas. (Martínez & Letelier, 1978).

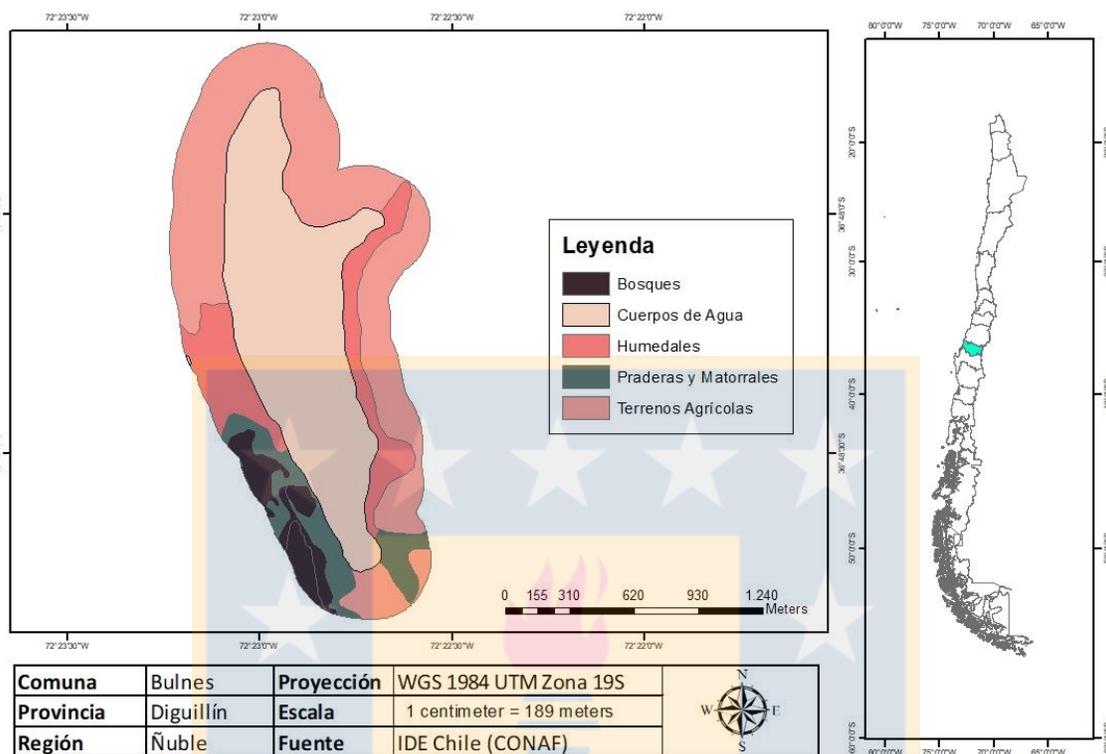


Figura 5. Usos de suelo identificados en un buffer de 200 metros alrededor de la Laguna Santa Elena 1.

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la Laguna Santa Elena 2 cuenta con los mismos 4 usos de suelo dentro del buffer (figura 6), con la diferencia que éstos se encuentran en un AAVC y cuentan con planes de manejo.

Los terrenos agrícolas son los que menor superficie ocupan con un área de 0,7 hectáreas, tratándose también de rotaciones cultivo-praderas. Las praderas y matorrales están compuestas por mimosa (*Acacia dealbata*), boldo (*Peumus boldus*), álamos (*Populus nigra*), zarzamora (*Rubus ulmifolius*), sauce criollo (*Salix humboldtiana*), quillay (*Quillaja saponaria*) y juncos (*Juncus sp.*). Esta categoría cuenta con una superficie total de 8,4 hectáreas.

Los bosques (5 hectáreas) se encuentran conformados por especies exóticas, principalmente por plantaciones de pinos (*Pinus radiata*) y eucaliptos (*Eucalyptus*

globulus), además de identificarse zonas de álamos (*Populus nigra*) y sauces (*Salix babylonica*). Finalmente, el humedal palustre también corresponde a una vega ocupando la mayor superficie del buffer con 14,1 hectáreas. Se encuentra la misma vegetación acuática que en Santa Elena 1, siendo ésta pasto miel (*Holcus lanatus*) y juncos (*Juncus sp.*).

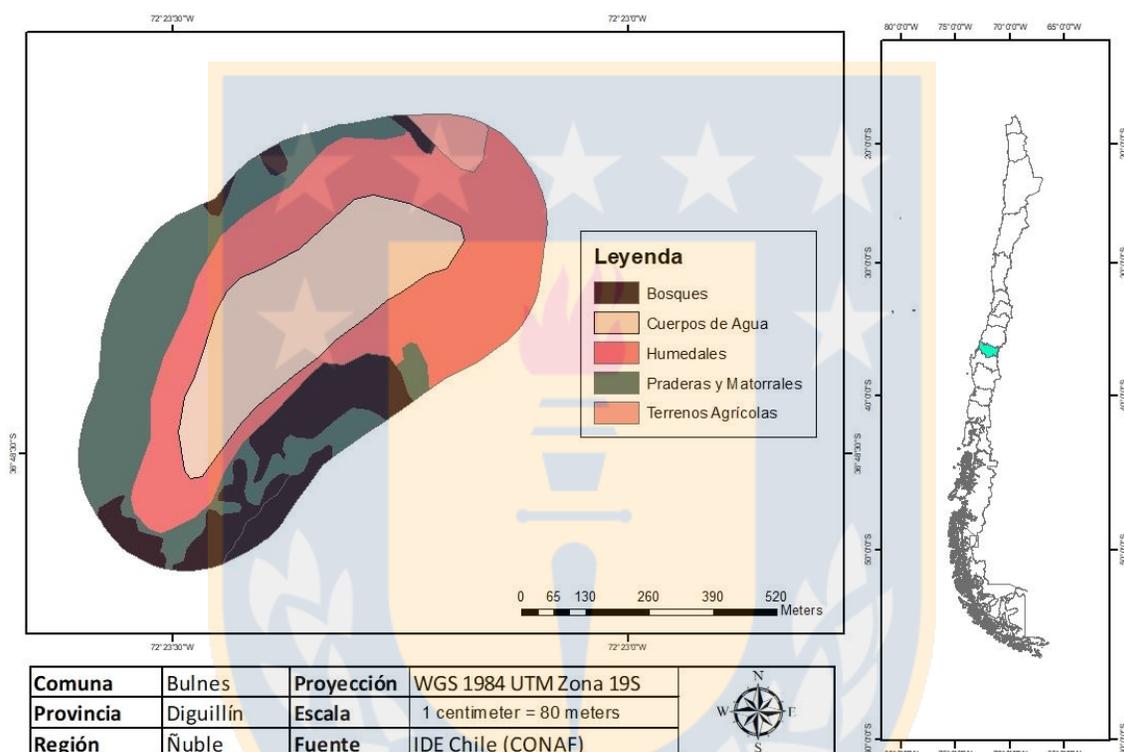


Figura 6. Usos de suelo identificados en un buffer de 200 metros alrededor de la Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

4.2 Calidad del agua

4.2.1 Parámetros fisicoquímicos

En la tabla 8 se presentan los resultados de las mediciones de parámetros fisicoquímicos realizadas en las campañas en terreno en las estaciones primavera

y verano. Para analizar de mejor forma los datos, se promediaron los resultados de las estaciones 1 y 2 de la Laguna Santa Elena 1.

Los valores de cada parámetro no variaron significativamente durante los 4 meses, mostrando ciertas diferencias entre ambos cuerpos de agua.

Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos obtenidos durante los cuatro monitoreos donde O.D= oxígeno disuelto, D.S= disco secchi, Prom= promedio y DStd= desviación estándar.

Campañas		Temperatura	pH	Conductividad	O.D	D.S
		°C		µS/cm	mg/L	m
Oct. 2021	Santa Elena 1	21	8,4	244	8,6	5,6
	Santa Elena 2	23,9	9,3	347	7,6	-
Nov. 2021	Santa Elena 1	22,5	8,2	232	7,8	5,7
	Santa Elena 2	27,6	9,2	249	7,8	-
Dic. 2021	Santa Elena 1	25,6	9,2	252	8,9	5,2
	Santa Elena 2	25,4	9,4	192	9,0	-
Ene. 2022	Santa Elena 1	24,3	8,8	292	6,6	5,7
	Santa Elena 2	22,8	9,6	363	8,6	-
Prom.	Santa Elena 1	23,3	8,5	255	7,9	5,5
	Santa Elena 2	24,9	9,4	286	8,3	-
DStd	Santa Elena 1	2,01	0,47	26,2	1,0	0,25
	Santa Elena 2	2,08	0,17	83,01	0,66	-

Fuente: elaboración propia.

Temperatura

La temperatura superficial de la Laguna Santa Elena 1 presentó algunas variaciones a lo largo de las campañas de muestreo, presentando una desviación estándar de 2,01. La temperatura fluctuó entre 21 °C y 25,6 °C, presentando el mayor registro en

el mes de diciembre. En el caso de la Laguna Santa Elena 2, se obtuvo una desviación estándar levemente superior a Santa Elena 1 (2,08), indicando que la laguna también tiene cierta variabilidad en los meses estudiados. La temperatura osciló entre 22,8 y 27,6 °C, siendo el mayor valor registrado en el mes de noviembre. Ambas lagunas mantienen temperaturas acordes al periodo estudiado (primavera-verano) (Figura 7).

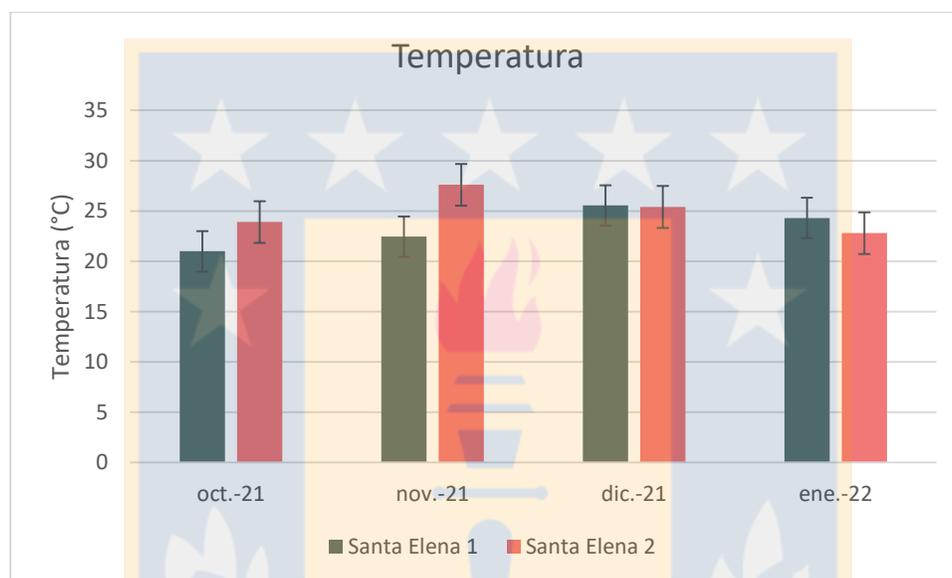


Figura 7. Temperatura registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

Como promedio de temperaturas, la Laguna Santa Elena 2 registra un mayor valor superando a Santa Elena 1 por 1,6 °C (Figura 8). Como ambas lagunas se encuentran separadas por solo 200 m, se ven afectadas por las mismas condiciones de radiación solar, velocidad y dirección del viento, precipitaciones, humedad del aire y cobertura de nubes, por lo que la diferencia de temperatura entre ambas lagunas se debe a las características morfométricas propias de cada cuerpo de agua (tamaño, profundidad), además, la Laguna Santa Elena 1 tiene ingresos de agua que podrían tener menor temperatura.

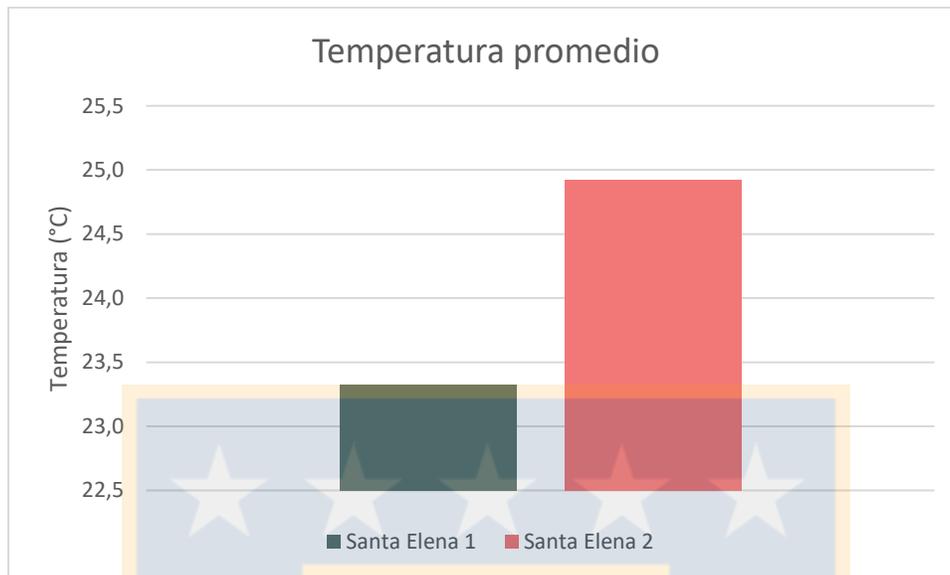


Figura 8. Temperatura promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Respecto a normativas, solo la NCh 1333 contempla como requisito un límite máximo de temperatura para la recreación con contacto directo. Para este parámetro ambas lagunas tienen valores inferiores al límite permitido, por lo que cumplen con la normativa y pueden realizarse estas actividades.

pH

El pH registrado en la Laguna Santa Elena 1 fue alcalino, fluctuando los valores entre 8,2 y 9,2 y teniendo una baja desviación estándar, por lo que el pH se mantiene relativamente estable durante el periodo de muestreo. El mayor pH muestreado fue en el mes diciembre, coincidiendo con el mes de mayor temperatura, lo cual contrasta con la relación pH-temperatura. En Santa Elena 2 el pH igualmente es alcalino, registrándose valores entre 9,2 y 9,6 alcanzando el máximo en enero, lo cual concuerda con las temperaturas más bajas registradas. La desviación estándar en este caso es menor que en Laguna Santa Elena 1, teniendo una muy baja variabilidad de este parámetro. Los altos valores de pH en ambas lagunas pueden deberse a entradas de sustancias sintéticas o naturales que llegan por escorrentía

a los cuerpos de agua a causa del tipo de vegetación o actividades humanas, en este caso sería principalmente la agricultura y silvicultura.

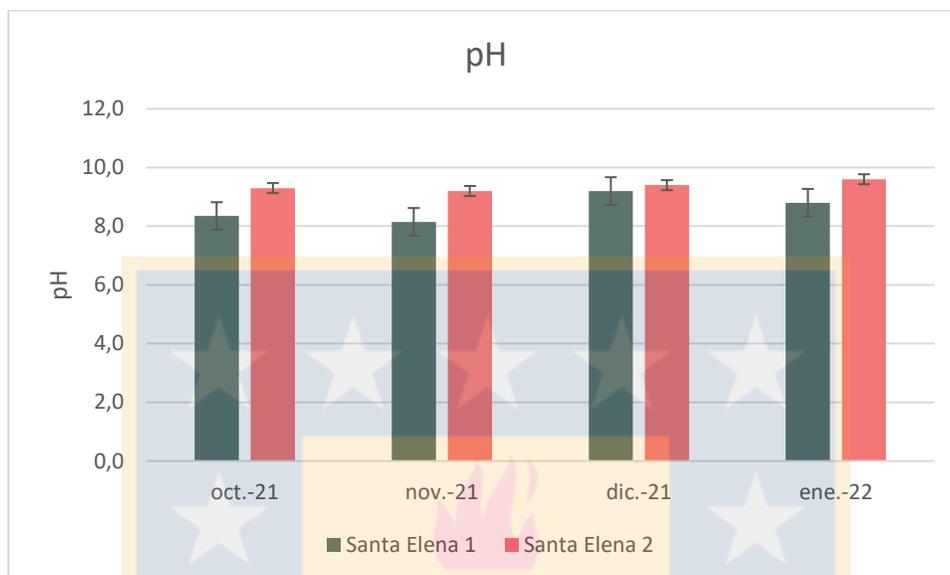


Figura 9. pH registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 10, el pH promedio de la Laguna Santa Elena 2 es mayor que en la Laguna Santa Elena 1 superando a esta por 0,9. Este pH supera el valor determinado para el agua de riego indicado en la norma NCh 1333, lo cual indica que, en caso de utilizarse, puede verse afectada la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, además de afectar el proceso de absorción de estos desde las raíces de las plantas. En la Laguna Santa Elena 1 el valor se encuentra dentro del rango permitido, sin embargo, de acuerdo a Amaya & Cruz (s.f.) las plantas podrían presentar igualmente problemas al absorber nutrientes ya que el rango ideal es de 5,5 a 6,5 para la mayoría de las especies.

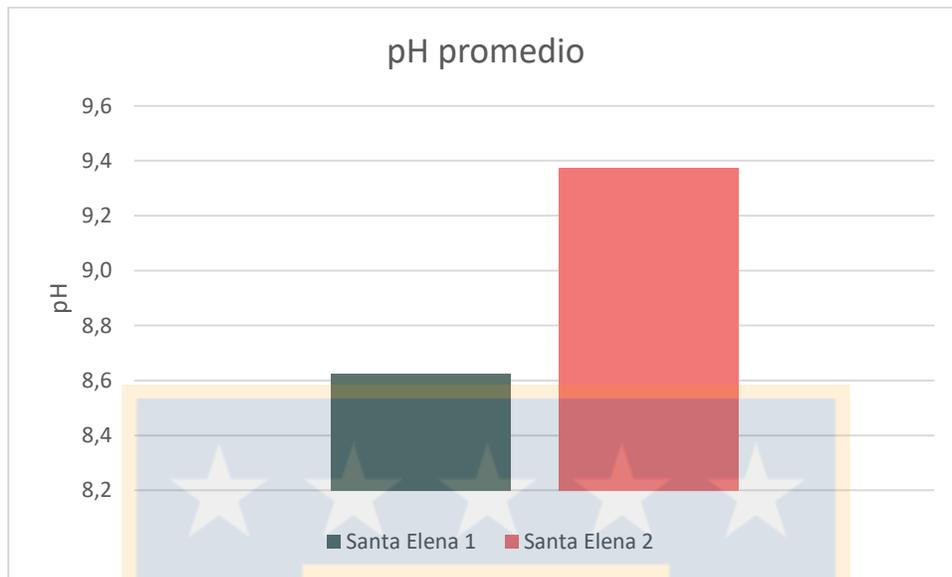


Figura 10. pH promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, para el uso de recreación con contacto directo la NCh 1333 determina un valor máximo de 8,3 por lo que ambas lagunas no cumplen con lo indicado en la norma, generando un potencial daño en las personas. Para la preservación de la vida acuática, Santa Elena 1 cumple con la norma ya que se encuentra en el límite máximo permitido (8,5). Por otra parte, la Laguna Santa Elena 2 no cumple con lo dictaminado en la norma, superando el rango permitido por 0,9. Valores de pH que superen el valor 8,5 aceleran la transformación de amonio en amoniaco, llegando a ser tóxico para las especies dulceacuícolas, generando un crecimiento lento y mortandad. (Boyd, 2018; Rivera, 2020).

Conductividad eléctrica

Los niveles de conductividad eléctrica presentaron altas variabilidades en ambas lagunas, fluctuando los registros en Santa Elena 1 entre 232 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 292 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una desviación estándar de 26,2, mientras que en la Laguna Santa Elena 2 se registró un mínimo de 192 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un máximo de 363 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una desviación

estándar de 83,01 (figura 11). Los mayores valores obtenidos en ambas lagunas corresponden al muestreo realizado en enero.

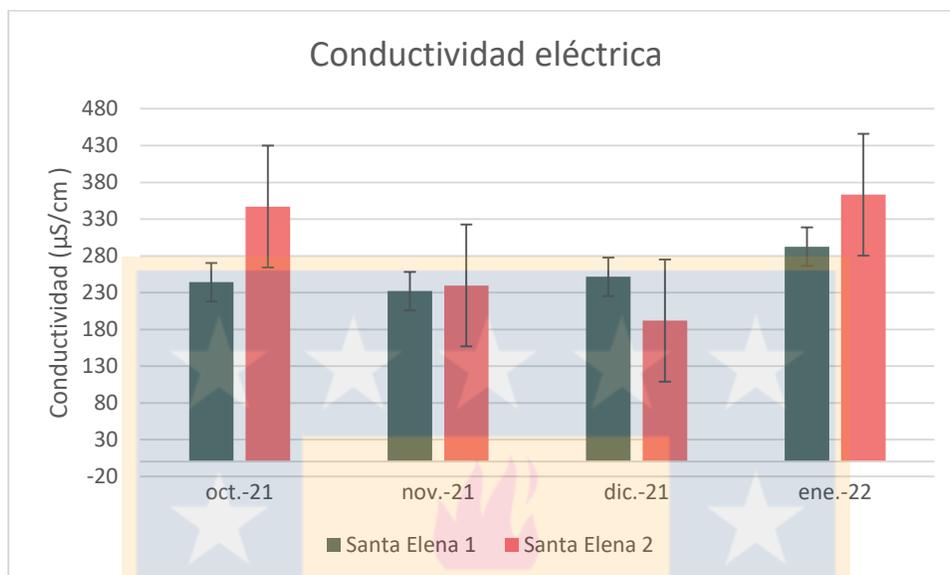


Figura 11. Conductividad eléctrica registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

En promedio, la Laguna Santa Elena 2 es la que registra mayor valor correspondiendo a 285,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, esto puede deberse a características morfométricas de la laguna ya que a mayor volumen menor es la conductividad eléctrica, por lo que, la Laguna Santa Elena 1 al ser de mayor tamaño presenta menor conductividad. Por otra parte, los niveles de conductividad también se relacionan con la temperatura, por lo que, Santa Elena 2 al tener más temperatura tendría un incremento en la conductividad eléctrica.

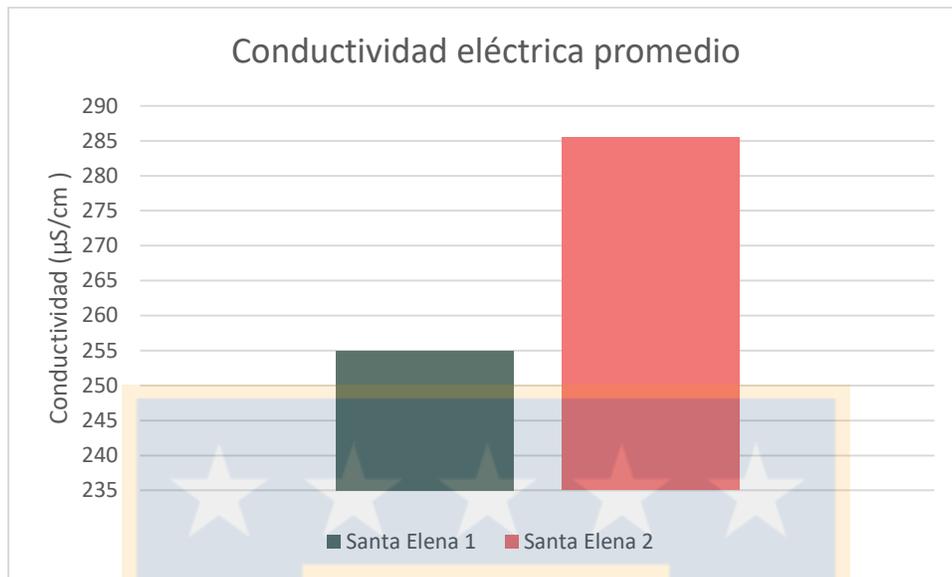


Figura 12. Conductividad eléctrica promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Respecto a normativas, ambas lagunas presentan una conductividad eléctrica menor a 600, lo que, de acuerdo a la Guía para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, indica un agua de excelente calidad, siendo adecuado para la conservación de comunidades acuáticas, riego y pesca, entre otros.

Oxígeno disuelto

Las concentraciones de oxígeno disuelto oscilaron entre 6,6 mg/L y 8,9 mg/L en la laguna Santa Elena 1, teniendo una baja variabilidad con una desviación estándar de 1, y entre 7,6 mg/L y 9 mg/L en la Laguna Santa Elena 2 con una desviación estándar inferior (0,66). Ambas lagunas presentaron sus mayores valores de oxígeno disuelto en diciembre.

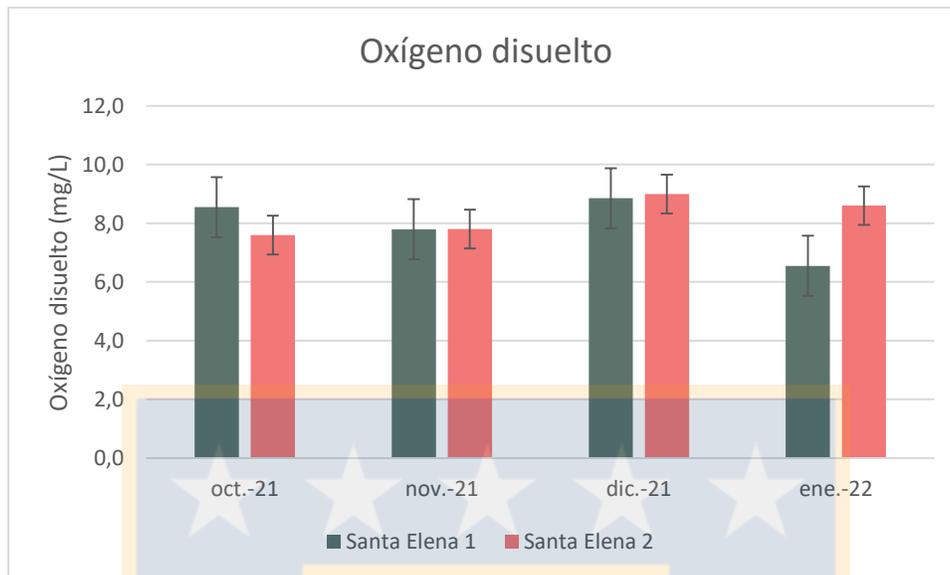


Figura 13. Oxígeno disuelto registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.
Fuente: elaboración propia.

Respecto a los promedios, la Laguna Santa Elena 2 presenta una mayor concentración de oxígeno disuelto de 8,3 mg/L, mientras que Santa Elena 1 tiene una concentración de 7,9 mg/L. Los niveles de O.D. se ven influenciados por la temperatura, poblaciones de plantas acuáticas, materia orgánica en descomposición, entre otros, por lo que estos factores pueden incidir en que una laguna tenga ligeramente mayor concentración de oxígeno disuelto que la otra. Respecto a normativas, ambas lagunas presentan valores superiores a 7,5 mg/L por lo que son clasificadas como clase de excepción en la Guía para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, siendo sus aguas aptas para la preservación de la vida acuática.

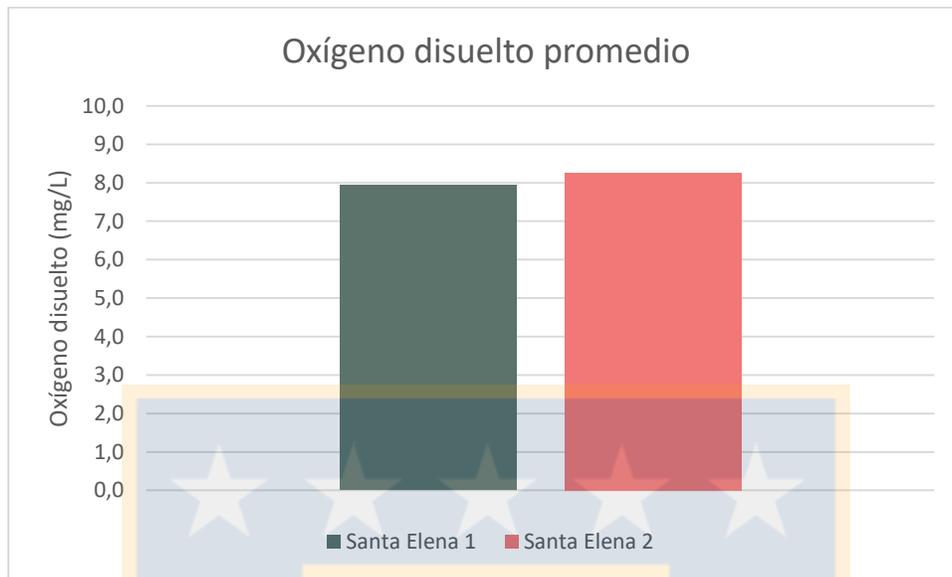


Figura 14. Oxígeno disuelto promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Transparencia

La laguna Santa Elena 1 presentó registros estables de transparencia de agua con una desviación estándar 0,25, teniendo una mínima de 5 m y una máxima de 6,1 m, los mayores registros fueron en los meses octubre y noviembre, coincidiendo con los meses de menor concentración de clorofila. Se obtuvo como promedio de los cuatro monitoreos una transparencia de 5,5 m. La única norma que contempla transparencia de agua es la NCh 1333 por lo que, de acuerdo a esta, la transparencia del agua de la Laguna Santa Elena 1 cumple con los requisitos de uso para la recreación con contacto directo. Por otra parte, de acuerdo a lo establecido por la OCDE (1982), la transparencia del agua registrada en la Laguna Santa Elena 1 indica que el cuerpo de agua presenta un estado trófico mesotrófico, presentando niveles moderados de nutrientes.

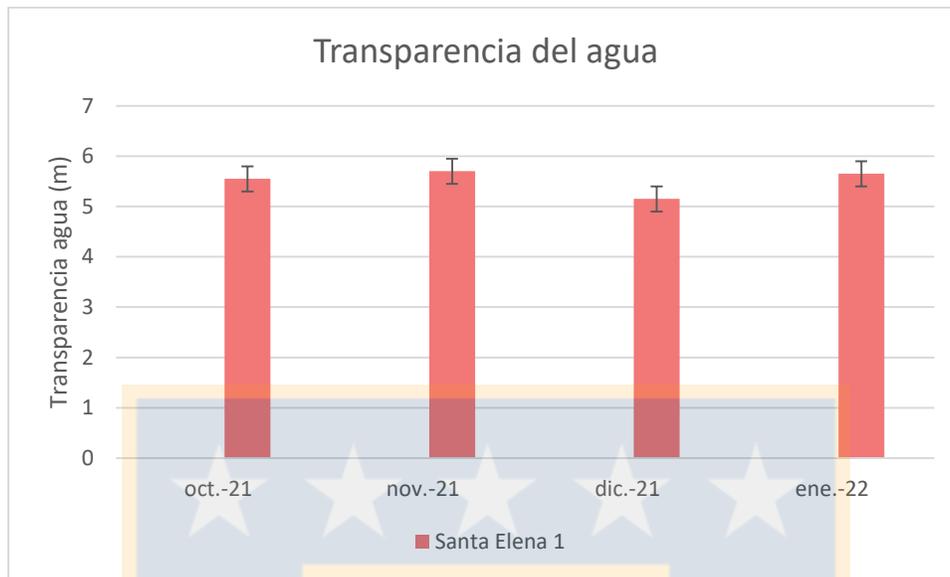


Figura 15. Transparencia del agua registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para la Laguna Santa Elena 1.

Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Clorofila

La clorofila α es el principal pigmento fotosintético presente en algas, por lo que se utiliza para estimar de forma indirecta la biomasa de las comunidades de fitoplancton en un determinado volumen de agua, a su vez, se utiliza como un parámetro para analizar el estado trófico de un cuerpo de agua. En términos generales, conforme aumenta la clorofila empeorará el estado trófico del ecosistema acuático. (Rivera *et al.*, 2005; Rivera, 2020).

Tanto la clorofila α como la clorofila total aumentaron sus concentraciones de forma exponencial en la Laguna Santa Elena 1, teniendo una baja variabilidad con una desviación estándar de 0,71 y 0,67 respectivamente. En la Laguna Santa Elena 2, en cambio, ambos parámetros presentaron los mayores valores en diciembre, coincidiendo con el mes de mayor temperatura registrada, para luego disminuir sus concentraciones en enero, presentando una mayor variabilidad a lo largo de los muestreos.

Tabla 9. Clorofila obtenida durante los cuatro monitoreos, donde Prom= promedio y DStd= desviación estándar.

Campañas		Clorofila a	Clorofila total
		mg/m ³	mg/m ³
Oct. 2021	Santa Elena 1	0,67	1,13
	Santa Elena 2	10,25	10,51
Nov. 2021	Santa Elena 1	0,77	1,29
	Santa Elena 2	10,39	11,26
Dic. 2021	Santa Elena 1	1,15	2,23
	Santa Elena 2	12,84	15,32
Ene. 2022	Santa Elena 1	2,21	2,47
	Santa Elena 2	7,49	11,44
Prom.	Santa Elena 1	1,20	1,78
	Santa Elena 2	10,24	12,13
DStd	Santa Elena 1	0,71	0,67
	Santa Elena 2	2,19	2,16

Fuente: elaboración propia.

En la figura 16 y 17 se puede observar que la Laguna Santa Elena 2 tiene concentraciones mucho más altas de clorofila que Santa Elena 1. Esto puede explicarse considerando que la clorofila depende de la concentración de nutrientes, penetración de la luz y temperatura del agua. Santa Elena 2 cuenta con mayor concentración de fósforo total y nitrógeno total, además de tener una temperatura promedio mayor, sin embargo, el principal factor para estos niveles de clorofila radica en la abundancia de fitoplancton oscilando los valores entre 701×10^3 y 11×10^6 cel/L, siendo considerablemente mayor que en la laguna Santa Elena 1 que tiene valores entre 759×10^3 y 2×10^6 cel/L.

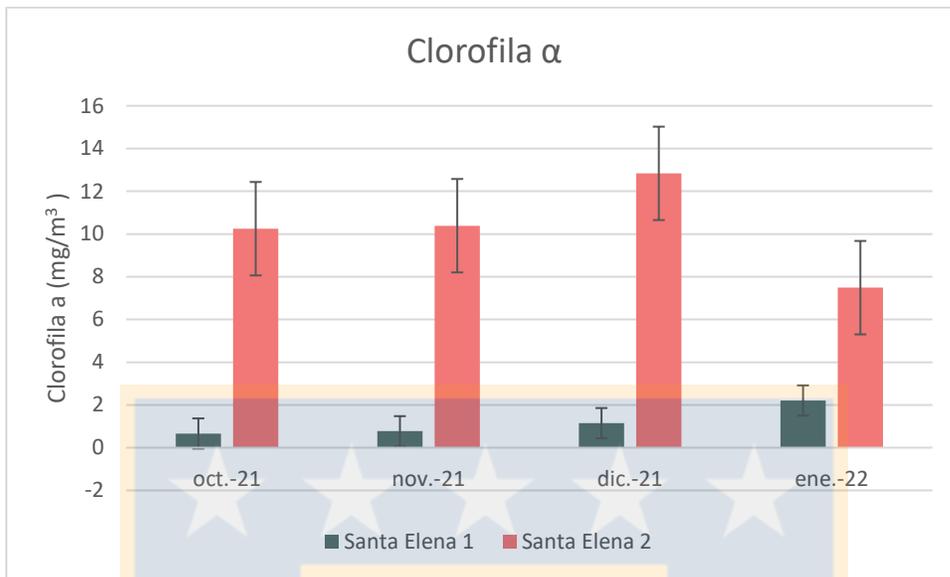


Figura 16. Clorofila α registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

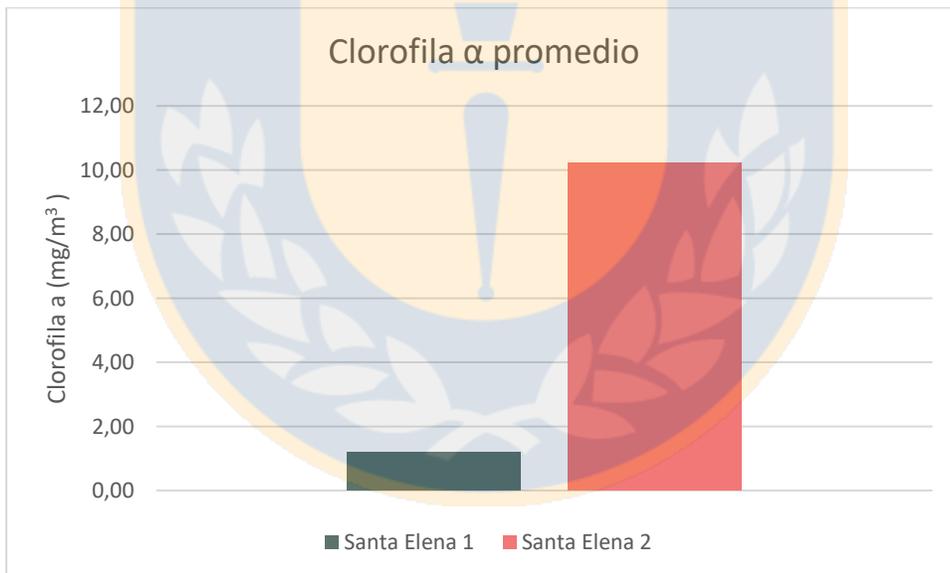


Figura 16. Clorofila α promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

La Laguna Santa Elena 1 registra una concentración máxima de clorofila α de 2,21 mg/m^3 y un promedio de 1,20 mg/m^3 lo que, según lo propuesto por la OCDE (1982), la laguna presenta características de ultra-oligotrofia presentando escasez de nutrientes. La Laguna Santa Elena 2 por su parte tiene una concentración máxima de clorofila α de 12,84 mg/m^3 y un promedio de 10,24 mg/m^3 , situándola en un estado mesotrófico.

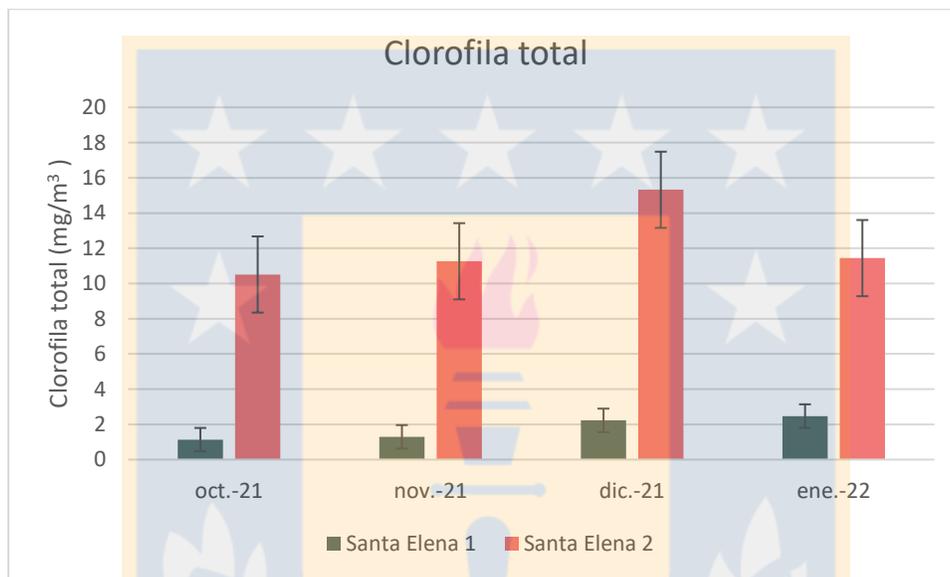


Figura 18. Clorofila total registrada en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

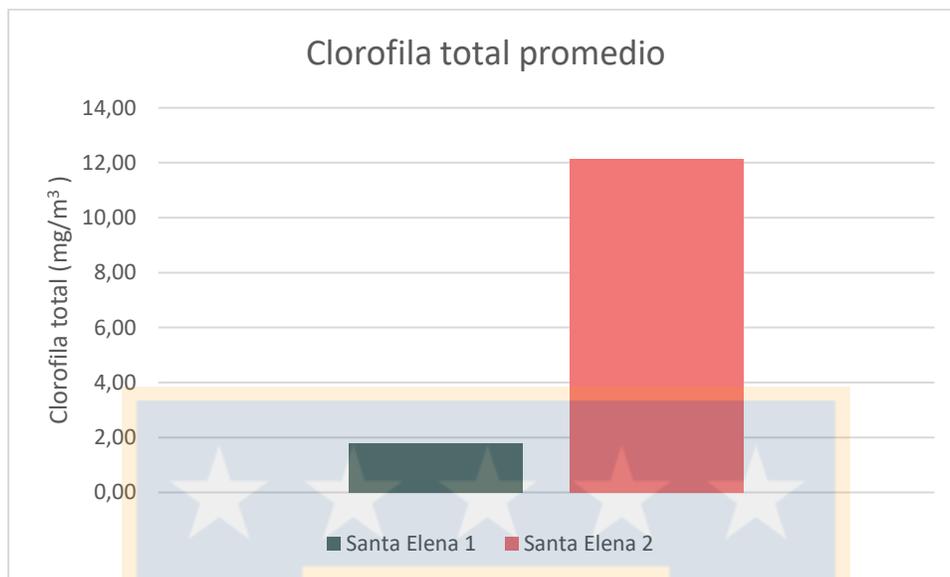


Figura 19. Clorofila total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

4.2.3 Nutrientes

En las tablas 10 y 11 se presentan los resultados del análisis realizado en laboratorio para 10 nutrientes en cada laguna durante los cuatro muestreos junto a sus respectivos promedios y desviaciones estándar.

Tabla 10. Nutrientes obtenidos durante los cuatro monitoreos, donde Prom= promedio y DStd= desviación estándar.

Campañas		Ca total	P total	Mg total	Mn total	Nitratos
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Oct. 2021	Santa Elena 1	15,80	0,09	12,50	0,02	0,02
	Santa Elena 2	14,50	0,16	7,73	0,11	0,02
Nov. 2021	Santa Elena 1	13,30	0,01	10,10	0,02	0,02
	Santa Elena 2	12,10	0,07	6,66	0,06	0,05
Dic.	Santa Elena 1	12,30	0,01	9,67	0,01	0,03

2021	Santa Elena 2	8,20	0,02	4,67	0,24	0,40
Ene.	Santa Elena 1	13,05	0,06	9,90	0,03	0,06
2022	Santa Elena 2	13,40	0,09	5,54	0,23	0,14
Prom.	Santa Elena 1	13,61	0,04	10,54	0,02	0,03
	Santa Elena 2	12,05	0,08	6,15	0,16	0,15
DStd	Santa Elena 1	1,52	0,04	1,32	0,01	0,02
	Santa Elena 2	2,75	0,06	1,33	0,09	0,18

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Nutrientes obtenidos durante los cuatro monitoreos, donde Prom= promedio y DStd= desviación estándar.

Campañas		N	N total	K total	Na total	Sulfato total
		amoniaco				
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Oct.	Santa Elena 1	0,02	0,45	6,48	17,45	10,30
2021	Santa Elena 2	0,04	1,25	7,69	20,00	11,17
Nov.	Santa Elena 1	0,02	0,21	3,47	12,85	10,23
2021	Santa Elena 2	0,04	0,56	3,33	12,10	9,05
Dic.	Santa Elena 1	0,02	0,40	3,33	15,50	10,49
2021	Santa Elena 2	0,02	0,52	1,73	12,90	7,40
Ene.	Santa Elena 1	0,02	0,22	3,29	15,20	9,91
2022	Santa Elena 2	0,03	0,33	1,17	9,32	5,45
Prom.	Santa Elena 1	0,02	0,32	4,14	15,25	10,23
	Santa Elena 2	0,03	0,67	3,48	13,58	8,27
DStd	Santa Elena 1	0	0,12	1,56	1,89	0,24
	Santa Elena 2	0,01	0,40	2,95	4,55	2,43

Fuente: elaboración propia.

Calcio total

El calcio es un metal alcalino térreo y uno de los cationes más abundantes en aguas subterráneas y superficiales. Es fácilmente disuelto de rocas ricas en minerales que lo contienen por agua de escorrentía o lluvia y su presencia en aguas naturales varía de acuerdo a la proximidad a la fuente natural. Normalmente, se encuentra en concentraciones menores a 15 mg/L. (Beita & Barahona, 2011). La Laguna Santa Elena 1 presenta ligeramente más concentraciones de calcio en cada mes, teniendo un decrecimiento de este en los meses más calurosos al igual que la Laguna Santa Elena 2 (figura 20). Esta respuesta puede deberse a que, de acuerdo a Baines *et al.* (2000), los niveles de calcio se correlacionan con los periodos de sequías, ya que el clima influye en la tasa de evaporación y a las vías de las aguas subterráneas.

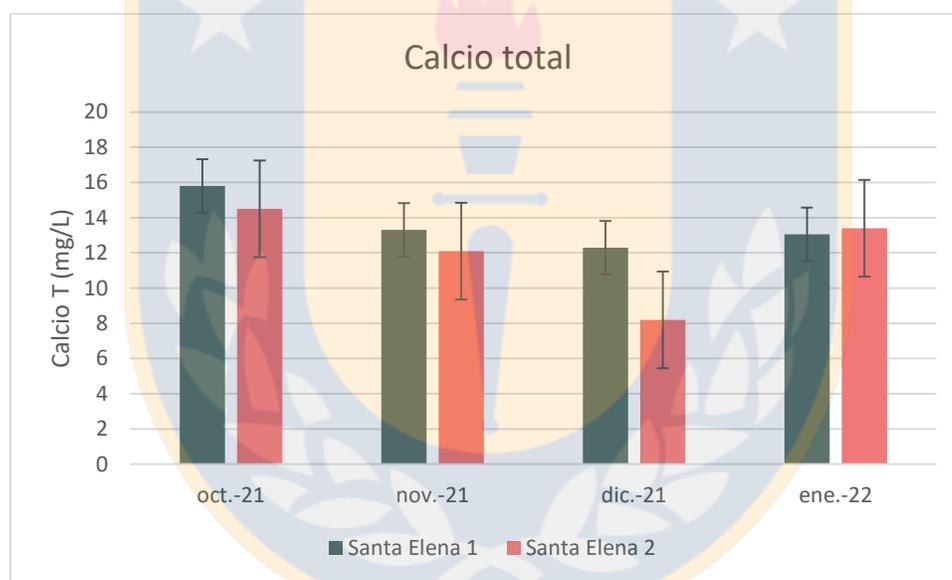


Figura 20. Calcio total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 21, la Laguna Santa Elena 1 presenta un mayor promedio de calcio total con una concentración de 13,61 mg/L, mientras que Santa Elena 2 cuenta con una concentración de 12,05 mg/L.

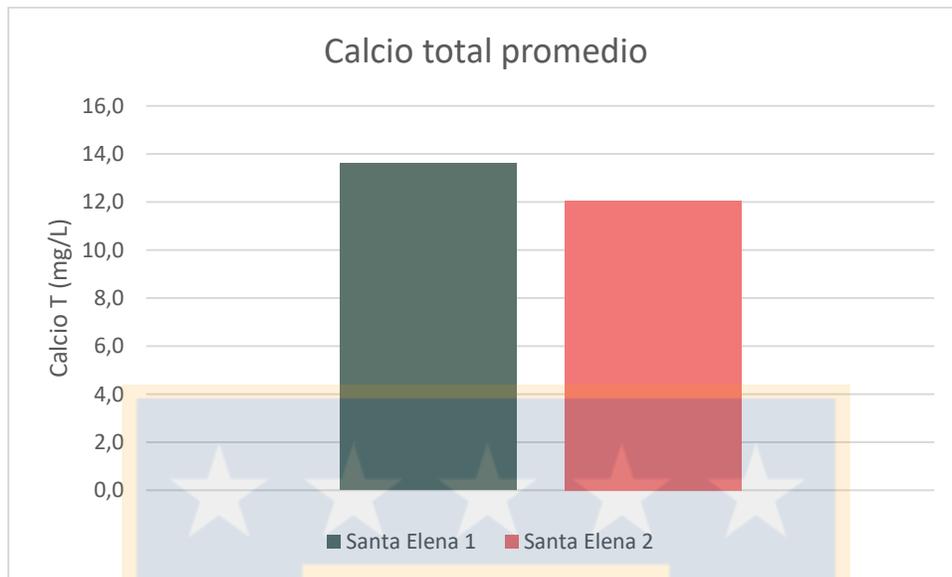


Figura 21. Calcio total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Fósforo total

Ambas lagunas presentaron una alta variabilidad de este nutriente durante los meses de estudio, presentando las mayores concentraciones en octubre y las más bajas en diciembre. La Laguna Santa Elena 1 tuvo fluctuaciones de este compuesto de entre 0,01 mg/L y 0,09 mg/L (DStd=0,04), mientras que Santa Elena 2 presentó concentraciones más altas oscilando entre los 0,07 mg/L y 0,16 mg/L (DStd=0,06). Forestal Arauco realizó mediciones en la Laguna Santa Elena 1 de este parámetro en enero del año 2014, dando como resultado concentraciones de 0,03 mg/L y 0,04 mg/L, por lo que se puede observar que este elemento ha aumentado levemente a lo largo de los años.

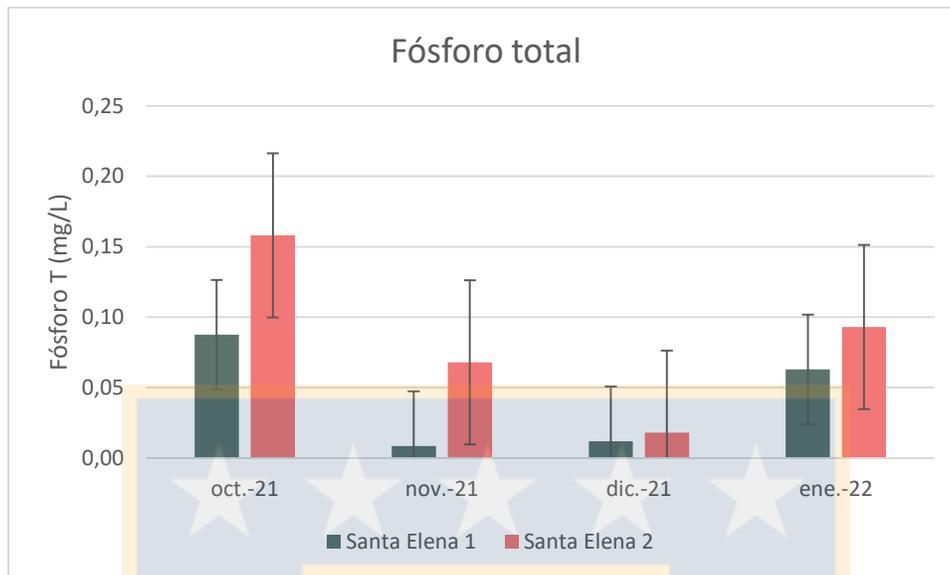


Figura 22. Fósforo total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 23, Santa Elena 2 presenta en promedio una mayor concentración de fósforo total, siendo este 0,08 mg/L, mientras que Santa Elena 1 cuenta con un promedio de 0,04 mg/L. Según lo establecido por la OCDE (1982), los resultados reflejan que ambos cuerpos de agua presentan características eutróficas, indicando que existe un exceso de nutrientes. Los altos niveles de este nutriente pueden deberse al uso de fertilizantes en las actividades agrícolas y silvícolas que llegan al cuerpo de agua por escorrentía o por acción del viento, en el caso de la Laguna Santa Elena 1 la vegetación ribereña es escasa y cuenta con poca diversidad de estratos, lo cual genera que no sea una buena zona de protección y no sea capaz de retener nutrientes y productos químicos. Santa Elena 2 por su parte cuenta con una extensión de vegetación con variedad de estratos, sin embargo, sus características morfométricas podrían influir en la concentración de fósforo y el tiempo de residencia de éste. Por otra parte, en el año 2017 ocurrieron incendios forestales que afectaron considerablemente la Laguna Santa Elena 2, lo cual pudo influir en las concentraciones de este nutriente.

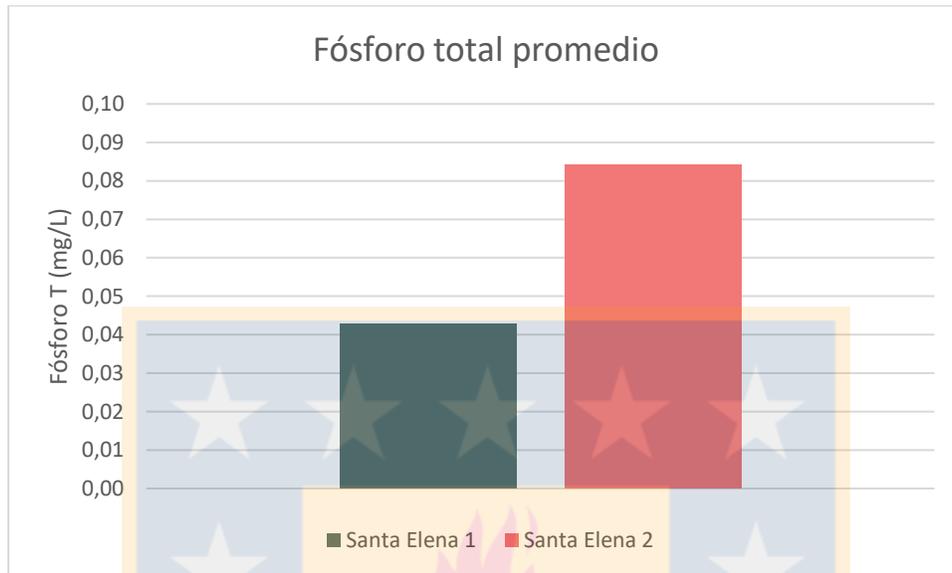


Figura 23. Fósforo total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Magnesio total

Tanto el magnesio como el calcio se encuentra de forma natural y en altas concentraciones en las aguas superficiales, estando su presencia estrechamente relacionada con el tipo de suelos ya que proviene principalmente de minerales, siendo un elemento esencial para los seres vivos. (Potasznik & Szymczyk, 2015). Las concentraciones de magnesio total más altas en ambas lagunas ocurren en octubre, para la Laguna Santa Elena 1 este valor corresponde a 12,5 mg/L mientras que para Laguna Santa Elena 2 es de 7,73 mg/L. En los dos cuerpos de agua las concentraciones disminuyen progresivamente entre octubre y diciembre, para aumentar levemente en enero, presentando una variabilidad similar entre las 2 lagunas.

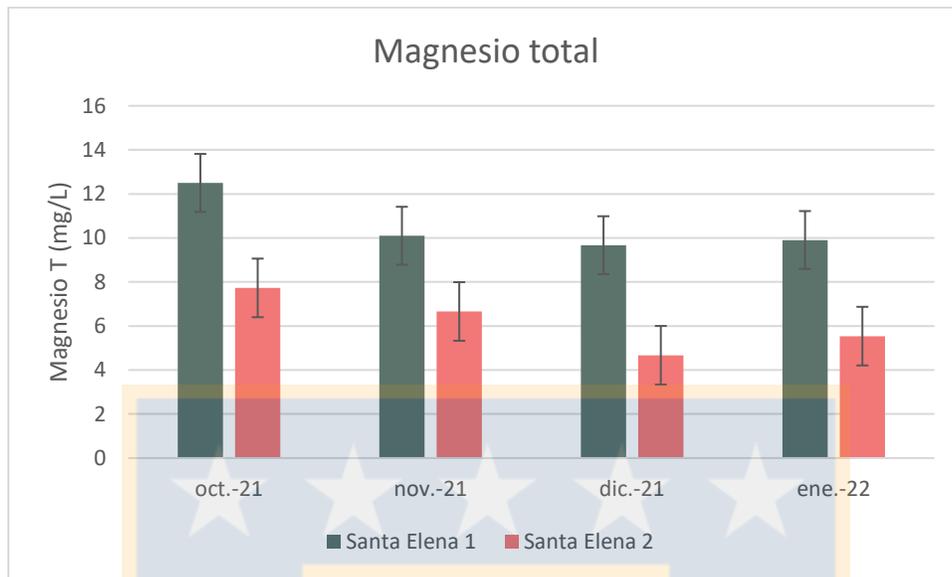


Figura 24. Magnesio total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

En promedio, la Laguna Santa Elena 1 tiene una mayor concentración de magnesio total siendo este 10,54 mg/L, mientras que Santa Elena 2 cuenta con una concentración de 6,15 mg/L. El magnesio suele utilizarse como fertilizante en cultivos agrícolas, por lo que este tipo de uso de suelo podría estar influenciando en los niveles de este nutriente sumado a la escasa vegetación ribereña que permite el flujo de lixiviados hacia el cuerpo de agua.

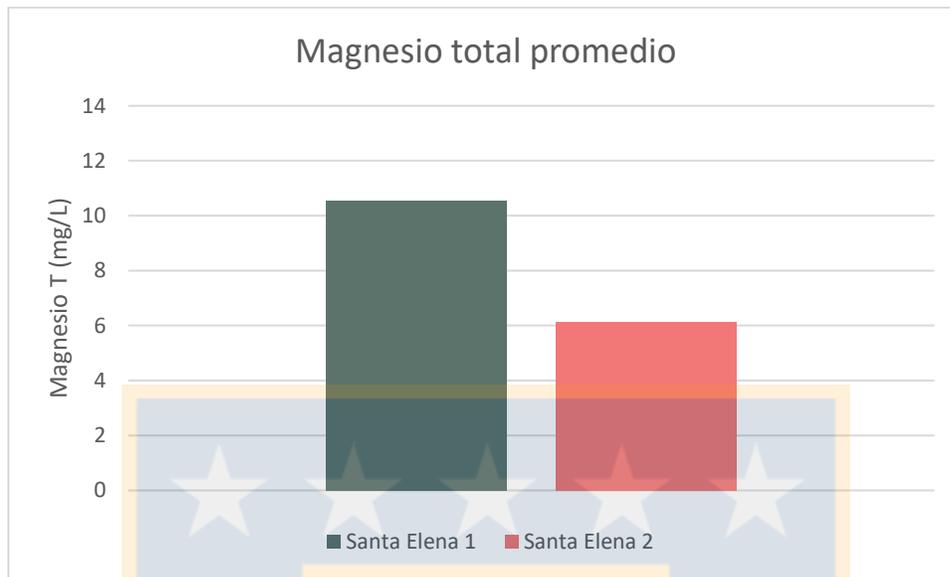


Figura 25. Fósforo total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Manganeso total

La Laguna Santa Elena 1 presenta concentraciones de manganeso estables durante los 4 muestreos, con una desviación estándar de 0,01. En general los valores son bajos, teniendo un máximo de 0,03 mg/L en enero. Como se puede observar en la figura 26, la Laguna Santa Elena 2 tiene una mayor variabilidad de este nutriente, obteniendo una desviación estándar de 0,09. La concentración más alta fue registrada en el mes diciembre con 0,24 mg/L, continuando en enero con un elevado enriquecimiento de este elemento.

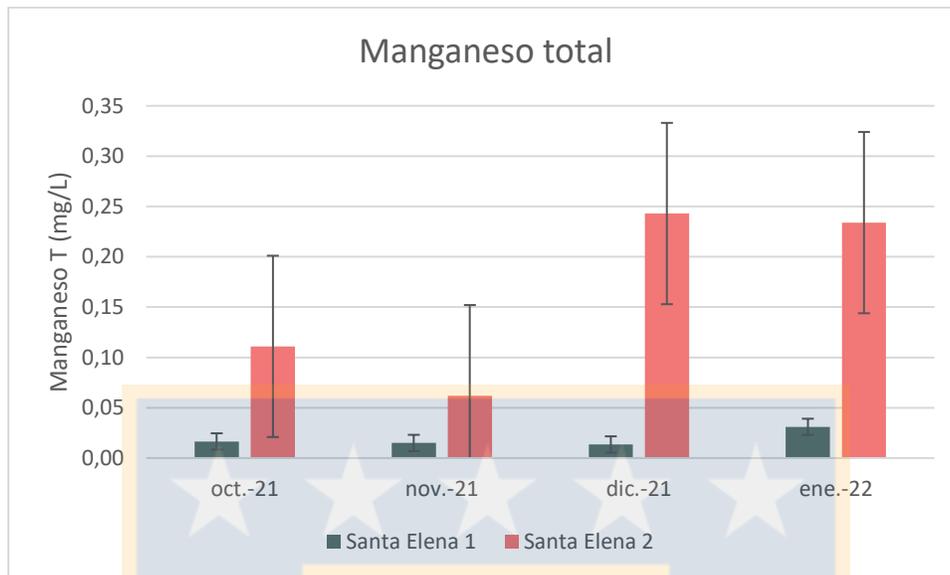


Figura 26. Manganeso total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

La figura 27 muestra una representación gráfica del promedio de concentración de manganeso total en los cuerpos de agua. Puede observarse que Santa Elena 2 presenta una elevada concentración del elemento a comparación de la Laguna Santa Elena 1, estos valores corresponden a 0,16 mg/L y 0,02 mg/L respectivamente. El manganeso es un micronutriente frecuentemente utilizado como fertilizante en zonas silvícolas y agrícolas, en el caso de la Laguna Santa Elena 2 su elevada concentración puede explicarse a que previo a ser declarada AAVC, esta área estaba destinada a actividades forestales intensivas.

El manganeso es uno de los metales incluidos en la Guía para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, de acuerdo a éste, la Laguna Santa Elena 1 se clasifica como Clase 3 indicando que la calidad del agua es regular, mientras que la Laguna Santa Elena 2 se encuentra en la categoría Clase 4 por lo que tendría mala calidad del agua, siendo esta no adecuada para la conservación de especies acuáticas y, en caso de utilizarse para usos prioritarios, debe ser tratada.

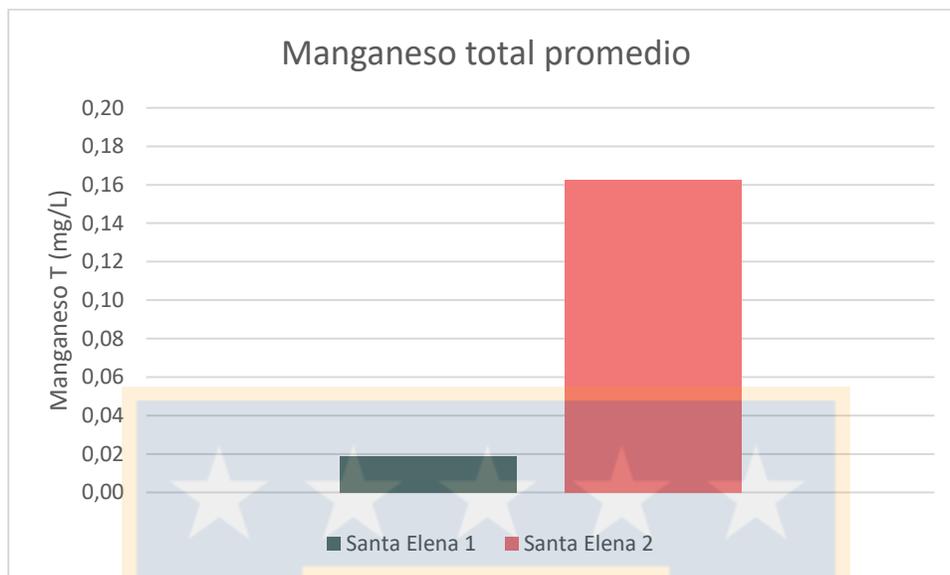


Figura 27. Manganeso total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Nitratos

Los nitratos forman parte natural del ciclo del nitrógeno, sin embargo, los niveles de concentración se ven influenciados por múltiples factores, identificándose presentes en el área de estudio las actividades agrícolas ya que es comúnmente utilizado como fertilizante, además de la contaminación orgánica proveniente de ganado.

Los nitratos en la Laguna Santa Elena 1 se mantienen estables durante los meses octubre y noviembre, para después aumentar de forma exponencial hasta enero, registrando una concentración de 0,06 mg/L. La desviación estándar en esta laguna es baja, por lo que se demuestra poca variabilidad de nitratos. En la Laguna Santa Elena 2 los valores son similares a Santa Elena 1 a excepción del mes diciembre, donde se registra una elevada concentración (0,4 mg/L) lo cual hace que aumente la variabilidad del compuesto teniendo una desviación estándar de 0,18. Forestal Arauco realizó mediciones en la Laguna Santa Elena 1 de este parámetro en enero del año 2014, dando como resultado concentraciones de 0,013 mg/L y 0,012 mg/L,

por lo que se puede observar que este elemento ha ido disminuyendo con el tiempo hasta llegar a la mitad de esos valores en la actualidad.

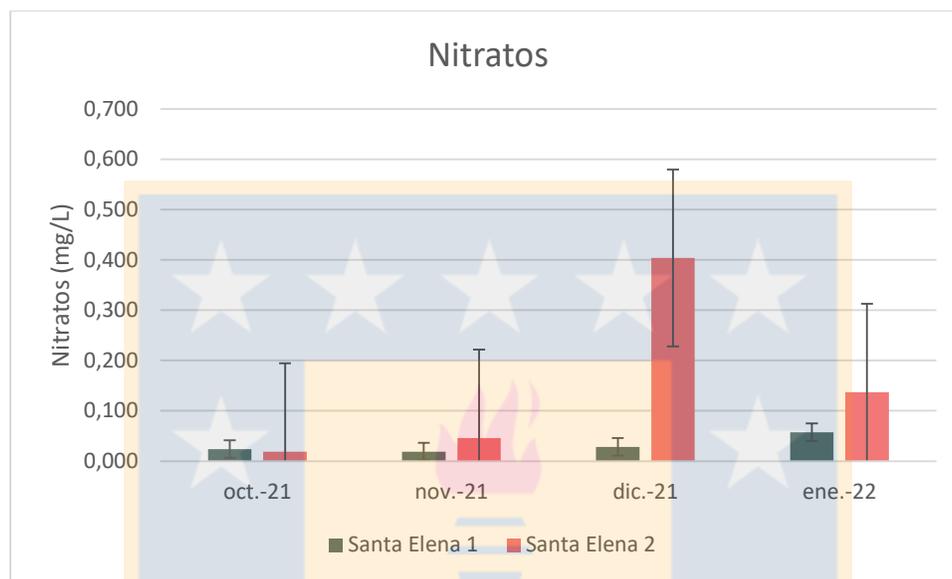


Figura 28. Nitrato registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

En promedio, Santa Elena 2 presenta mayores concentraciones de nitrato con una media de 0,15 mg/L, mientras que Santa Elena 1 tiene una concentración media de 0,02 mg/L. Esto puede deberse a un error asociado a la toma de muestras en el mes diciembre ya que es el único análisis que arroja un valor considerablemente alto en comparación al resto de muestreos.

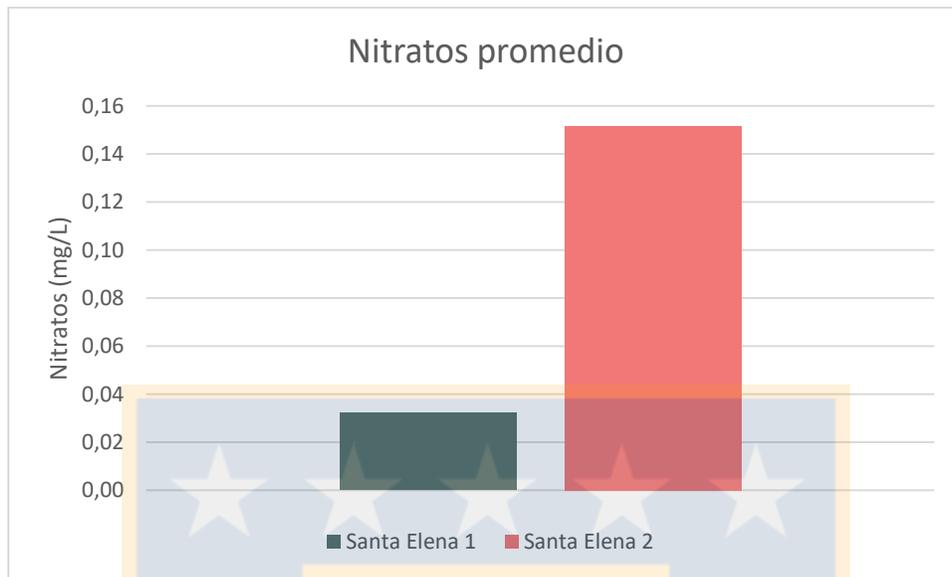


Figura 29. Nitratos promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Nitrógeno amoniacal

La Laguna Santa Elena 1 presenta nitrógeno amoniacal de forma equilibrada, manteniendo la misma concentración de 0,02 mg/L todos los meses (DStd=0). Por su parte, Santa Elena 2 tiene cierta variabilidad del nutriente, alcanzando el máximo valor en los meses octubre y noviembre, para luego decaer a 0,02 mg/L en diciembre.

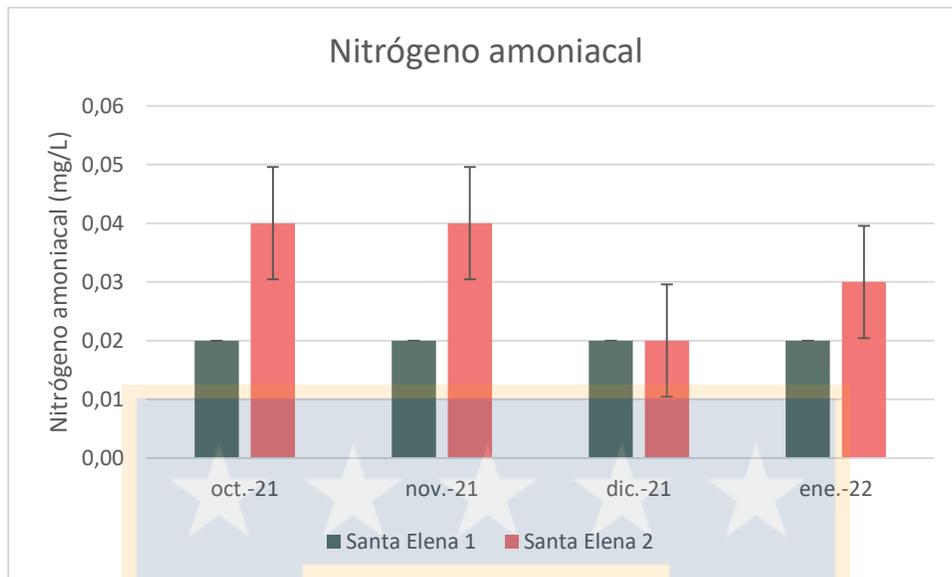


Figura 30. Nitrógeno amoniacal registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

En promedio ambos cuerpos de agua presentan una concentración similar, superando la Laguna Santa Elena 2 a Santa Elena 1 por 0,01 mg/L. En condiciones normales la fuente de nitrógeno amoniacal en aguas superficiales proviene de la degradación natural de la materia orgánica presente en la naturaleza. El comportamiento de este nutriente depende del nivel de pH, como en ambas lagunas se presenta un pH alcalino el compuesto se transforma en gas amoniaco, siendo este susceptible de volatilizarse al ambiente. Altas concentraciones de este gas pueden resultar en mortandad de la vida acuática.

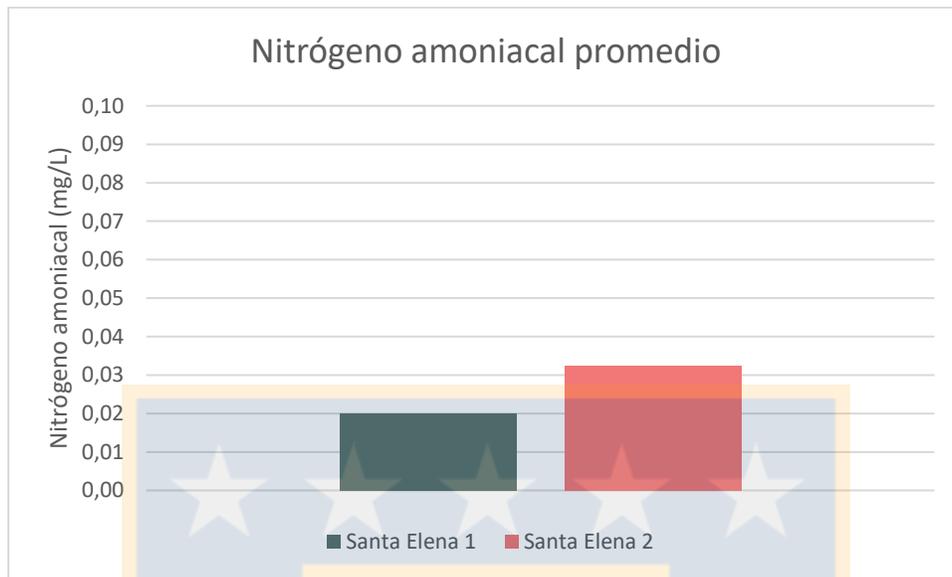


Figura 31. Nitrógeno amoniaco promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Nitrógeno total

Los máximos valores de nitrógeno total en ambos cuerpos de agua fueron registrados en octubre con 0,45 mg/L en Santa Elena 1 y 1,25 mg/L en Santa Elena 2. La laguna Santa Elena 2 fue la que presentó mayor variabilidad de este elemento, teniendo una desviación estándar de 0,4 mientras que la desviación estándar de Santa Elena 1 es 0,12. Forestal Arauco realizó mediciones en la Laguna Santa Elena 1 de este parámetro en enero del año 2014, dando como resultado concentraciones de 0,45 mg/L y 0,36 mg/L, por lo que se puede observar que este elemento ha disminuido su concentración en el cuerpo de agua.

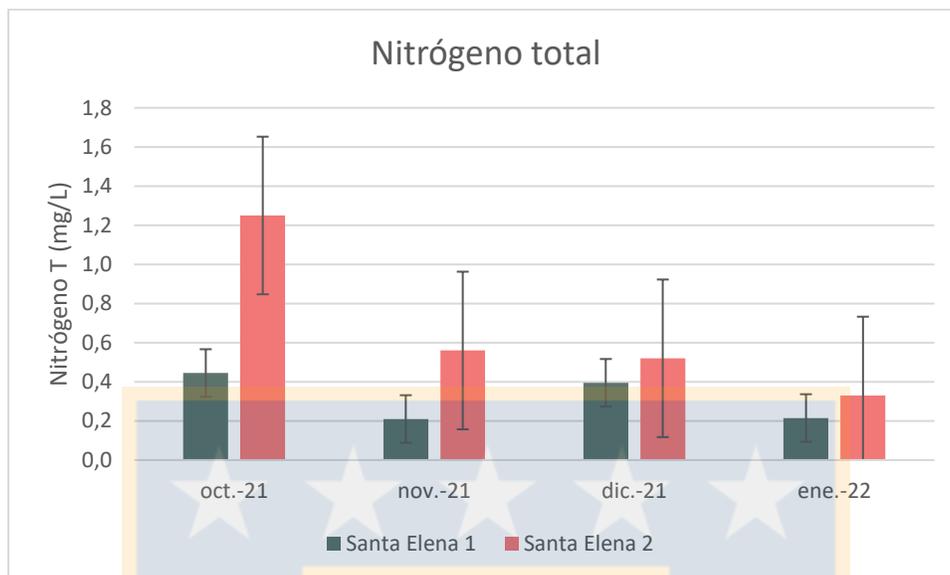


Figura 32. Nitrógeno total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

La Laguna Santa Elena 1 tiene una concentración promedio de 0,32 mg/L, mientras que la Laguna Santa Elena 2 se encuentra más enriquecida teniendo una concentración promedio de 0,67 mg/L. De acuerdo a Zhu *et al.* (2007), esto podría deberse a la tala efectuada en las zonas forestales que existían antes que la zona fuera declarada AAVC, lo cual generaría un aumento en las exportaciones de nutrientes de los suelos hacia el cuerpo de agua. Por otra parte, los incendios forestales que han afectado a la Laguna Santa Elena 2 igualmente influyen en la concentración de nitrógeno presente en el cuerpo de agua.

De acuerdo a la Guía para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, en la cual se establecen parámetros para determinar el estado trófico de lagos chilenos, la Laguna Santa Elena 1 tendría una tendencia a tener un estado ultraoligotrófico, mientras que la Laguna Santa Elena 2 presentaría características de eutrofización.

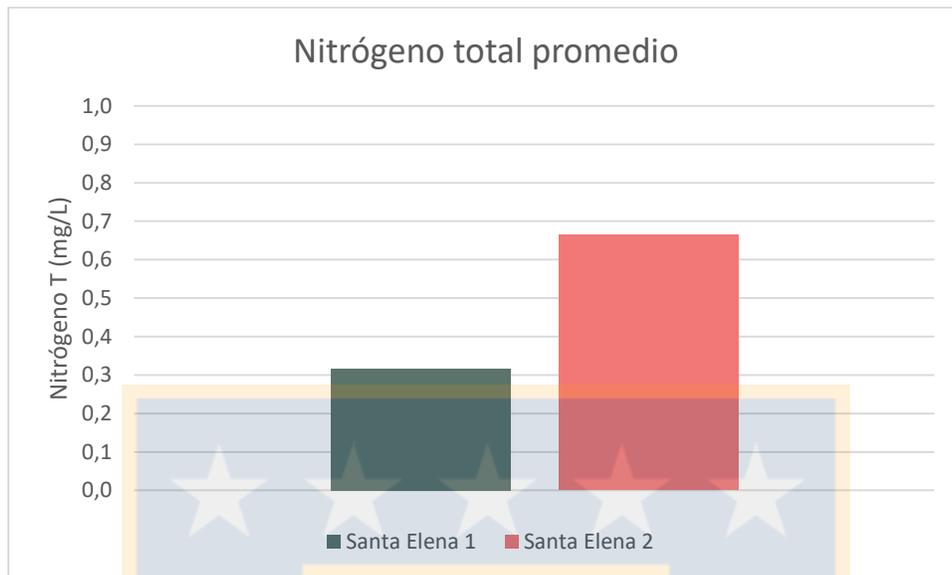


Figura 33. Nitrógeno total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Potasio total

La Laguna Santa Elena 1 tuvo su mayor concentración de potasio en el mes de octubre con 6,48 mg/L, para luego disminuir y mantenerse relativamente estable en los siguientes meses. En la Laguna Santa Elena 2 se presentó un comportamiento similar; pero con mayor variabilidad ($DStd=2,95$), con una concentración máxima de 7,69 mg/L.

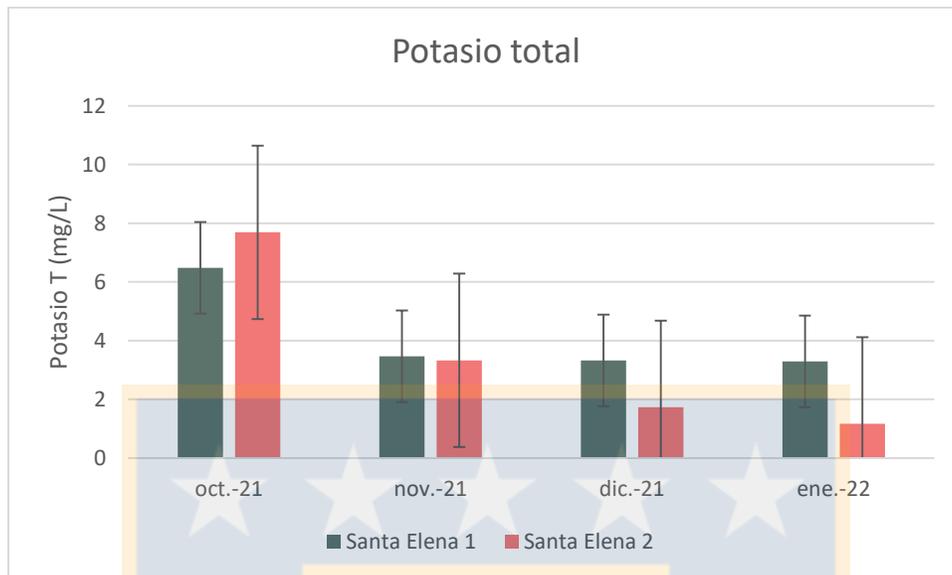


Figura 34. Potasio total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

En promedio, la Laguna Santa Elena 1 presenta una mayor concentración de potasio con una media de 4,14 mg/L mientras que Santa Elena 2 tiene una concentración media de 3,48 mg/L. De acuerdo a Skowron *et al.* (2018), el agua superficial suele tener niveles de potasio debajo de los 5 mg/L, por lo que, a excepción de lo registrado en octubre, ambas lagunas contarían con concentraciones normales de potasio en sus aguas. Los niveles de potasio en un cuerpo de agua pueden verse influenciados por el uso de tierra agrícola debido a la escorrentía y lixiviación de fertilizantes.

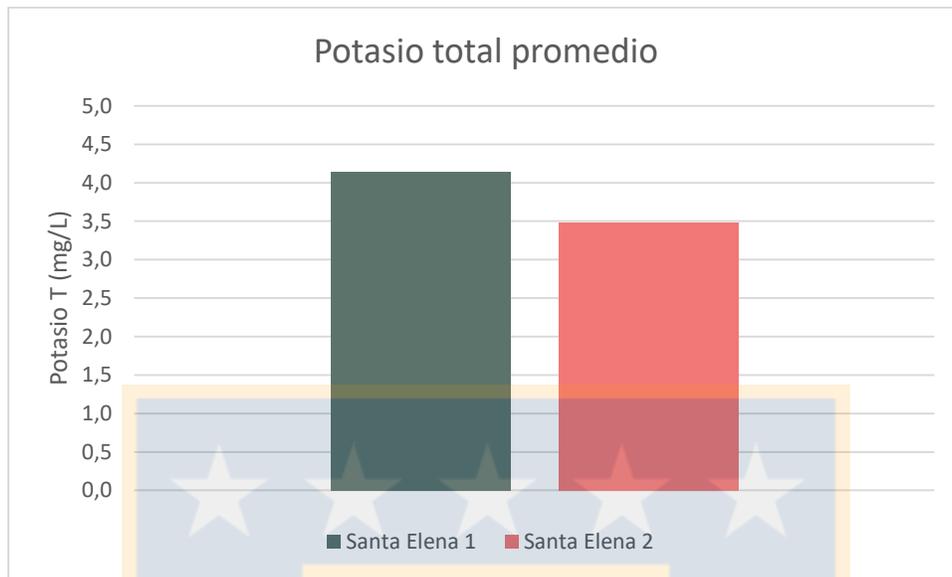


Figura 35. Potasio total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Sodio total

La Laguna Santa Elena 1 presenta su mayor concentración de sodio total en octubre con un valor de 17,45 mg/L, y a lo largo de los cuatro meses presenta una desviación estándar de 1,89. Octubre también es el mes de mayor concentración de sodio para la Laguna Santa Elena 2, cuyo valor es de 20 mg/L. Esta laguna presenta una mayor variabilidad del nutriente, teniendo una desviación estándar de 4,55.

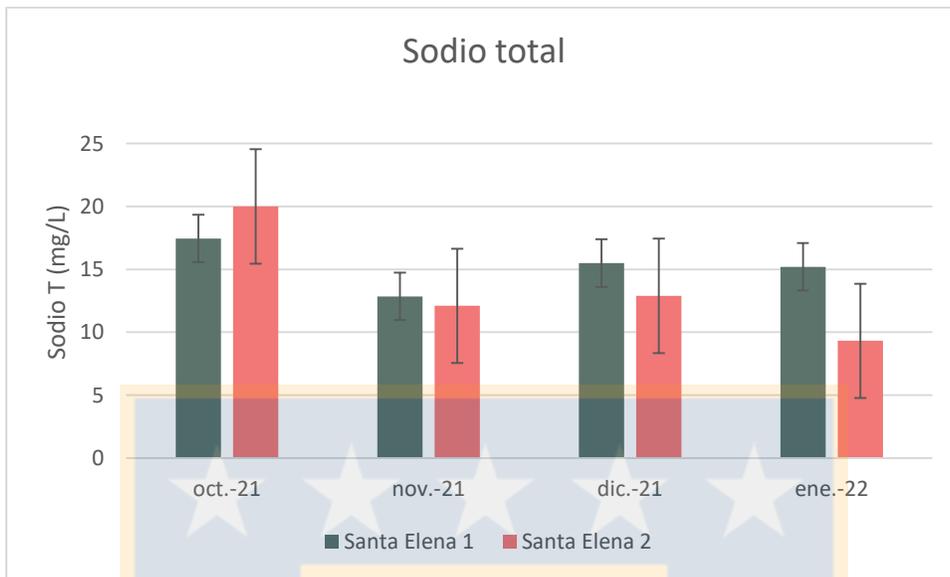


Figura 36. Sodio total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

En promedio, la Laguna Santa Elena 1 tiene una concentración de 1,67 mg/L de sodio más que la Laguna Santa Elena 2.

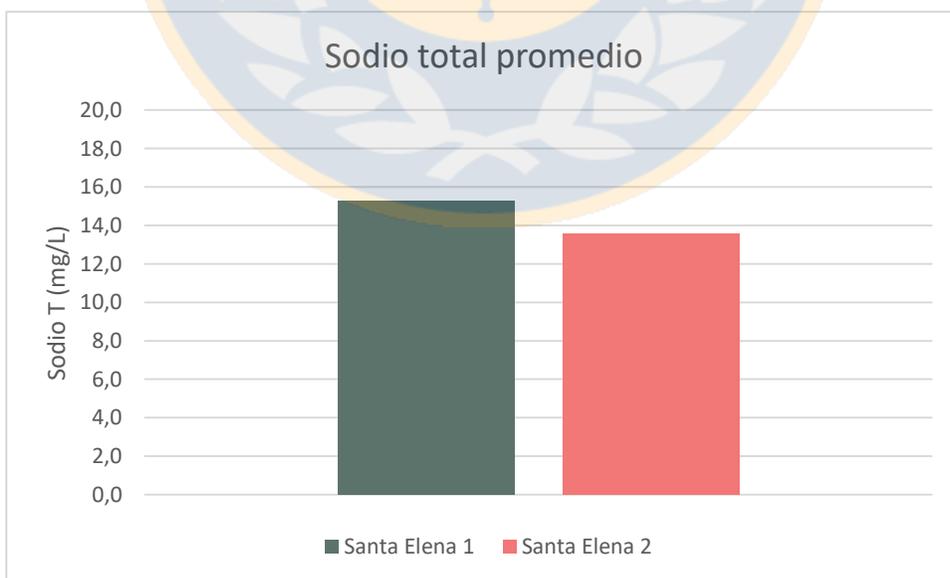


Figura 37. Sodio total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

Sulfato total

Las concentraciones de sulfato se mantuvieron relativamente estables en la Laguna Santa Elena 1 (DStd = 0,24), alcanzando un máximo de 10,49 mg/L en diciembre. Por su parte, en la Laguna Santa Elena 2 este elemento va disminuyendo sus concentraciones cada mes, presentando mayor variabilidad con una desviación estándar de 2,43. La mayor concentración ocurre en octubre con 11,17 mg/L, mientras que en enero se registra el menor valor de 5,45 mg/L.

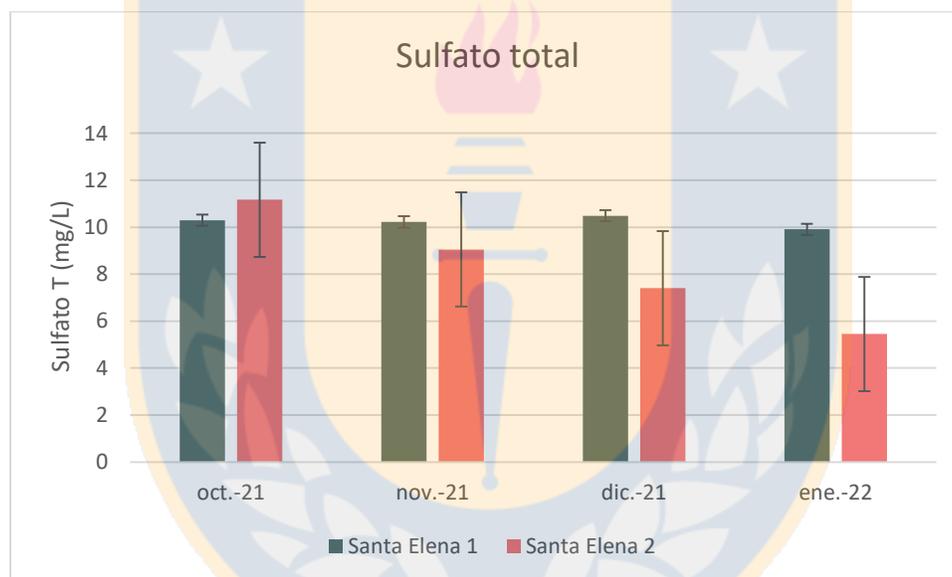


Figura 38. Sulfato total registrado en los cuatro muestreos entre octubre 2021 y enero 2022 para cada Laguna Santa Elena.

Fuente: elaboración propia.

La Laguna Santa Elena 1 es la que presenta mayor concentración de sulfato, con una media de 10,23 mg/L, mientras que la concentración de este nutriente en Santa Elena 2 es de 8,27 mg/L. De acuerdo a Thomas & McCormick (2012), las concentraciones de sulfato se deben principalmente a las escorrentías de tierras agrícolas ya que este nutriente es comúnmente utilizado como fertilizante.

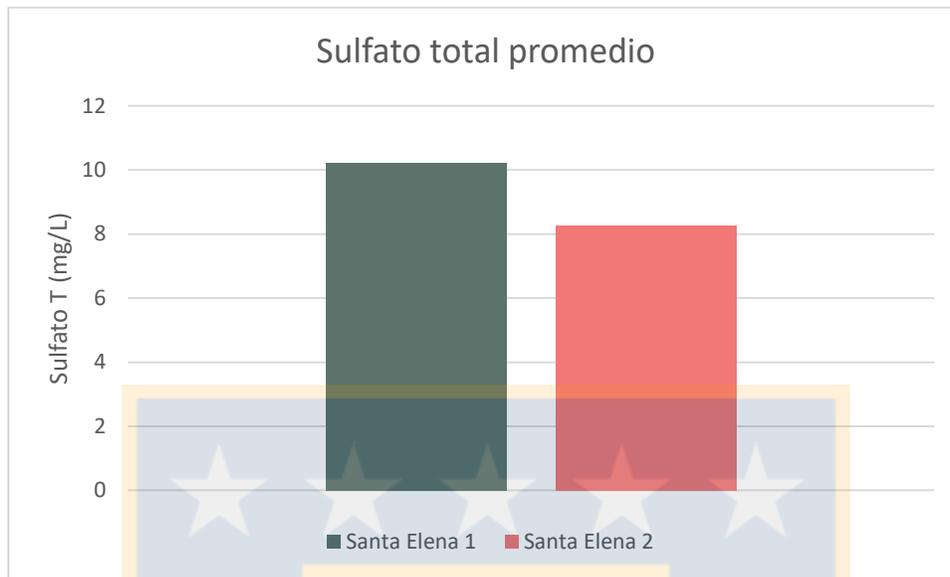


Figura 39. Sulfato total promedio de los cuatro muestreos para la Laguna Santa Elena 1 y Laguna Santa Elena 2.

Fuente: elaboración propia.

4.2.4 Estado trófico

Según la clasificación propuesta por Carlson (1977), la Laguna Santa Elena 1 presenta características mesotróficas con tendencia hacia la oligotrofia, ya que los valores TSI obtenidos se encuentran cercanos a 30, el cual es el límite entre el estado oligotrófico y mesotrófico. Por su parte, la Laguna Santa Elena 2 presenta un estado eutrófico en octubre lo cual indica que presenta un exceso de nutrientes, principalmente de nitrógeno y fósforo, el resto de muestreos muestra que la laguna tiene características mesotróficas con tendencia hacia la eutrofización ya que los valores TSI son cercanos a 60.

Cabe mencionar que, de acuerdo a lo propuesto por la OCDE (1982) la transparencia del agua registrada indica un estado mesotrófico en la Laguna Santa Elena 1, los valores de fósforo total señalan un estado de eutrofización en ambas lagunas, mientras que la concentración de clorofila α indica que la Laguna Santa Elena 1 tiene características ultra-oligotróficas, y Santa Elena 2 mesotróficas.

Tabla 12. Estado trófico según la propuesta de Carlson (1977) de las lagunas Santa Elena durante los cuatro monitoreos realizados entre octubre 2021 – enero 2022. Donde, Ft = fósforo total, Chl.a = clorofila α , Ds = disco secchi.

Campañas		Ft	Chl.a	Ds	TSI _{Ft}	TSI _{Chl.a}	TSI _{Ds}	TSI
		mg/m ³	mg/m ³	m				
Oct 2021	Santa Elena 1	90,0	0,7	5,6	69,0	26,6	35,3	43,6
	Santa Elena 2	160,0	10,3	-	77,3	53,4	-	65,4
Nov 2021	Santa Elena 1	10,0	0,8	5,7	37,4	28,0	34,9	33,4
	Santa Elena 2	70,0	10,4	-	65,4	53,6	-	59,5
Dic 2021	Santa Elena 1	10,0	1,2	5,2	37,4	32,0	36,4	35,2
	Santa Elena 2	20,0	12,8	-	47,4	55,6	-	51,5
Ene 2022	Santa Elena 1	60,0	2,2	5,7	63,2	38,4	35,0	45,5
	Santa Elena 2	90,0	7,5	-	69,0	50,4	-	59,7

4.2.5 Fitoplancton

Composición y abundancia

En la Laguna Santa Elena 1 se registraron durante los 4 muestreos un total de 34 especies de microalgas pertenecientes a los filos Bacillariophyta (diatomeas), Chlorophyta (clorófitas), Miozoa (miozoos), Cyanobacteria (cianobacterias), Cryptophyta (criptófitas) y Euglenophyta (euglenófitas). El grupo de microalgas con mayor representatividad en cuanto a riqueza fueron las criptófitas (41% – 88%),

seguidos de clorofitas (10% - 43%), cianobacterias (0,2 % - 27 %), diatomeas (0,8% - 5%), y por último los miozoos (0,1% - 1%) y euglenófitas con un 0,1%. En cuanto a diversidad de especies, el grupo que cuenta con estas características son las clorofitas, lo cual es lo esperado en aguas dulces.

La especie más abundante en el periodo de estudio corresponde a *Plagioselmis lacustris* con una abundancia relativa que fluctúa entre 39,5% y 84,3%, seguido de *Sphaerocystis schroeteri* con un 4,7% - 41,9%. En octubre y enero la tercera especie más abundante corresponde a *Monoraphidium* spp. (5,6% y 2,6% respectivamente), mientras que en noviembre fue *Pseudanabaena* sp. (14%) y en enero fue *Aphanocapsa* sp. (3,6%).

En la Laguna Santa Elena 2 se encontraron un total de 54 especies de microalgas pertenecientes a los filos Charophyta (carofitas), Bacillariophyta (diatomeas), Chlorophyta (clorofilas), Miozoa (miozoos), Cyanobacteria (cianobacterias), Cryptophyta (criptófitas) y Euglenophyta (euglenófitas), teniendo 23 especies más que la Laguna Santa Elena 1. Las microalgas más representativas durante la época de muestreo fueron las cianobacterias (0,2% - 71 %), seguido de diatomeas (9% - 68%) y clorófitas (10% - 58%), criptófitas (4% - 7%) y por último se encuentran las euglenófitas (0,1% - 0,8%) y miozoos con un 0,4%. La predominancia de especies de cianobacterias es un indicador de lagos con tendencia hacia la eutrofia. (Quiroz *et al.*, 2004). Respecto a diversidad de especies, el grupo con mayor número de especies son las diatomeas.

En este cuerpo de agua se presenta una mayor variabilidad en las abundancias de las especies que en la Laguna Santa Elena 1, indicando que no existe dominancia de una especie en particular.

En octubre y diciembre la especie con mayor abundancia corresponde a *Dolichospermum spiroides* (22% - 64% respectivamente), mientras que en noviembre es más abundante *Cocconeis placentula* (49%) y en enero *Hyalotheca dissiliens* (13%). Otras especies con abundancias considerables son

Johanseninema constrictum (20% en octubre) y *Sphaerocystis schroeteri* (15% y 18% en octubre y noviembre respectivamente).

En las tablas 13 y 14 se presenta un listado con las especies identificadas en cada laguna durante el periodo de estudio, junto a sus respectivas abundancias (células/litro). Se observa que en cada muestra la Laguna Santa Elena 2 presenta mayor abundancia que Santa Elena 1, lo cual se correlaciona con los altos niveles de clorofila que presenta este cuerpo de agua. Noviembre fue el único mes que no presenta la tendencia de tener más abundancia, esto puede deberse a un error al momento de tomar y procesar la muestra.

Tabla 13. Abundancia de especies de fitoplancton encontradas en las Lagunas Santa Elena 1 y 2 en octubre 2021 y noviembre 2021.

Especies	Oct		Nov	
	Santa Elena 1	Santa Elena 2	Santa Elena 1	Santa Elena 2
BACILLARIOPHYCEAE				
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg	0	173.098	5.818	346.196
<i>Cymbella aspera</i> (Ehrenberg) Cleve	0	0	0	1.455
<i>Cymbella tumida</i> (Brébisson) Van Heurck	0	0	0	4.364
<i>Diatoma vulgare</i> Bory	7.273	2.909	20.364	13.091
<i>Epithemia sorex</i> Kützing	0	8.728	0	42.184
<i>Fragilaria</i> sp.	0	14.546	0	0
<i>Fragilaria construens</i> Manguin	0	14.546	0	7.273
<i>Fragilariforma virescens</i> (Ralfs) D.M.Williams & Round	0	59.639	0	23.274
<i>Gogorevia exilis</i> (Kützing) Kulikovskiy & Kociolek	0	0	0	1.455

<i>Gomphonema acuminatum</i> Ehrenberg	0	2.909	0	20.364
<i>Gomphonema truncatum</i> Ehrenberg	0	0	0	1.455
<i>Navicula</i> sp.	5.818	1.455	2.909	5.818
<i>Nitzschia</i> sp.	0	0	0	1.455
<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère	0	0	0	2.909
MEDIOPHYCEAE				
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	0	0	5.818	0
<i>Melosira</i> sp.	0	0	0	7.273
CHLOROPHYCEAE				
<i>Ankyra judayi</i> (G.M.Smith) Fott	7.273	0	1.455	0
<i>Chlamydocapsa</i> sp.	4.364	0	0	0
<i>Célula de Chlamydocapsa</i> sp.	23.274	0	2.909	0
<i>Célula de Ankistrodesmus</i> sp.	0	64.003	0	5.818
<i>Coelastrum microporum</i> Nägeli	0	20.364	0	7.273
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>spinosus</i> (Chodat) E.Hegewald	0	20.364	0	0
<i>Desmodesmus serratus</i> (Corda) S.S.An, Friedl & E.Hegewald	0	11.637	0	0
<i>Desmodesmus affin magnus</i>	0	11.637	0	0
<i>Desmodesmus armatus</i> (Chodat) Chodat	0	29.092	0	0
<i>Messastrum gracile</i> (Reinsch) T.S.Garcia	0	11.637	0	0
<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová	0	18.910	0	0
<i>Monoraphidium minutum</i> (Nägeli) Komárková-Legnerová	0	209.463	1.455	7.273

<i>Monoraphidium</i> spp.	87.276	71.276	10.182	-
<i>Scenedesmus ecornis</i> (Ehrenberg) Chodat	0	45.093	0	37.820
<i>Scenedesmus</i> sp.	0	72.730	5.818	26.183
<i>Sphaerocystis schroeteri</i> Chodat	74.185	433.472	180.371	125.096
<i>Stauridium tetras</i> (Ehrenberg) E.Hegewald	0	11.637	0	5.818
<i>Tetraëdron minimum</i> (A.Braun) Hansgirg	0	7.273	0	4.364
TREBOUXIOPHYCEAE				
<i>Célula de Botryococcus braunii</i> Kützing	0	18.910	0	0
<i>Botryococcus braunii</i> Kützing	0	1.455	0	1.455
<i>Lagerheimia quadriseta</i> (Lemmertmann) G.M.Smith	0	4.364	0	0
DINOPHYCEAE				
<i>Ceratium furcoides</i> (Levander) Langhans	0	0	5.818	0
CYANOPHYCEAE				
<i>Anabaena</i> sp.	0	138.187	0	0
<i>Aphanocapsa</i> sp.	0	1.455	0	1.455
<i>Dolichospermum spiroides</i> (Klebahn) Wacklin, L.Hoffmann & Komárek	0	647.299	0	0
<i>Johanseninema constrictum</i> (Szafer) Hasler, Dvorák & Poulícková	0	593.478	0	0
<i>Pseudanabaena</i> sp.	0	53.820	109.095	0
CRYPTOPHYCEAE				
<i>Cryptomonas</i> sp.	0	5.818	0	0

<i>Cryptomonas ovata</i> Czosnowski	0	0	1.455	0
<i>Chroomonas affin caudata</i>	36.365	0	10.182	0
<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing	0	0	96.004	0
<i>Plagioselmis lacustris</i> (Pascher & Ruttner) Javornicky	1.314.962	167.279	299.648	0
EUGLENOPHYCEAE				
<i>Trachelomonas</i> sp.	1.455	2.909	0	0
TOTAL	1.562.245	2.941.209	759.303	701.119

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Abundancia de especies de fitoplancton encontradas en las Lagunas Santa Elena 1 y 2 en diciembre 2021 y enero 2022.

Especies	Dic		Ene	
	Santa Elena 1	Santa Elena 2	Santa Elena 1	Santa Elena 2
BACILLARIOPHYCEAE				
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg	5.818	625.480	4.364	4.364
<i>Cymbella tumida</i> (Brébisson) Van Heurck	0	0	1.455	2.909
<i>Diatoma vulgare</i> Bory	1.455	7.273	-	14.546
<i>Epithemia sorex</i> Kützing	0	130.914	5.818	0
<i>Fragilaria</i> sp.	0	29.092	2.909	8.728
<i>Fragilaria construens</i> Manguin	0	36.365	0	14.546
<i>Fragilariforma virescens</i> (Ralfs) D.M.Williams & Round	0	574.569	0	x
<i>Gomphonema acuminatum</i> Ehrenberg	0	36.365	1.455	0
<i>Gomphonema truncatum</i> Ehrenberg	0	7.273	0	0

<i>Navicula</i> sp.	2.909	36.365	0	0
<i>Nitzschia</i> sp.	0	7.273	1.455	1.455
<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère		14.546	0	14.546
MEDIOPHYCEAE				
<i>Pantocsekiella ocellata</i> (Pantocsek) K.T.Kiss & Ács	0	0	1.455	0
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	0	29.092	1.455	0
<i>Melosira</i> sp.	0	0	0	0
<i>Melosira varians</i> C.Agardh	0	0	4.364	0
CHLOROPHYCEAE				
<i>Ankistrodesmus spiralis</i> (W.B. Turner) Lemmermann	0	43.638	0	0
<i>Ankyra judayi</i> (G.M.Smith) Fott	0	0	7.273	0
<i>Célula de Chlamydocapsa</i> sp.	5.818	0	0	0
<i>Célula de Ankistrodesmus</i> sp.	0	43.638	0	0
<i>Coelastrum microporum</i> Nägeli	0	0	0	109.095
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>spinosus</i> (Chodat) E.Hegewald	0	29.092	0	29.092
<i>Desmodesmus serratus</i> (Corda) S.S.An, Friedl & E.Hegewald	0	0	0	14.546
<i>Desmodesmus armatus</i> (Chodat) Chodat	0	0	0	58.184
<i>Messastrum gracile</i> (Reinsch) T.S.Garcia	0	29.092	0	0
<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová	8.728	0	0	80.003
<i>Monoraphidium</i> spp.	0	0	50.911	0
<i>Pseudopediastrum boryanum</i> (Turpin) E.Hegewald	0	0	0	116.368

<i>Scenedesmus ecornis</i> (Ehrenberg) Chodat	0	0	0	167.279
<i>Scenedesmus</i> sp.	0	87.276	0	232.737
<i>Sphaerocystis schroeteri</i> Chodat	423.290	261.829	139.642	21.819
<i>Stauridium tetras</i> (Ehrenberg) E.Hegewald	0	0	0	123.641
<i>Tetraëdron minimum</i> (A.Braun) Hansgirg	0	29.092	0	80.003
TREBOUXIOPHYCEAE				
<i>Célula de Botryococcus braunii</i> Kützing	7.273	567.295	2.909	7.273
ZYGNEMATOPHYCEAE				
<i>Hyalotheca dissiliens</i> Brébisson ex Ralfs	0	0	0	421.835
<i>Staurastrum</i> sp.	0	21.819	0	36.365
<i>Ceratium furcoides</i> (Levander) Langhans	7.273	43.638	1.455	0
CYANOPHYCEAE				
<i>Anabaena</i> sp.	0	523.657	0	0
<i>Aphanocapsa</i> sp.	36.365	218.191	4.364	4.364
<i>Dolichospermum spiroides</i> (Klebahn) Wacklin, L.Hoffmann & Komárek	0	7.178.470	0	0
CRYPTOPHYCEAE				
<i>Cryptomonas erosa</i> Ehrenberg	0	0	20.364	0
<i>Cryptomonas ovata</i> Czosnowski	0	14.546	0	0
<i>Chroomonas affin caudata</i>	0	0	2.909	0
<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing	17.455	0	7.273	0

<i>Plagioselmis lacustris</i> (Pascher & Ruttner) Javornicky	498.929	421.835	1.653.885	955.675
<i>Phacus suecicus</i> Lemmerman n	0	7.273	0	0
EUGLENOPHYCEAE				
<i>Trachelomonas</i> sp.	0	87.276	0	14.546
<i>Organismo desconocido</i>	0	0	46.547	0
TOTAL	1.009.495	11.164.084	1.962.261	3.280.132

Fuente: elaboración propia.

Índices de diversidad

La Laguna Santa Elena 1 presentó una baja diversidad de especies respecto a la Laguna Santa Elena 2. A través del índice de dominancia de Simpson se puede observar que en octubre (0,72) y enero (0,72) hay una alta dominancia de *Plagioselmis lacustris*, mientras que en noviembre y diciembre hay una baja dominancia de especies. A pesar de que *Plagioselmis lacustris* es la más abundante en esos meses, hay otras especies como *Sphaerocystis schroeteri* y *Pseudanabaena* sp. que están representadas de la misma forma. Estos resultados se complementan con el índice de equidad de Pielou, el cual indica que en todas las muestras hay heterogeneidad en cuanto a abundancia de especies.

La Laguna Santa Elena 2 una mayor diversidad de especies que la Laguna Santa Elena 1. Como los resultados del índice de dominancia son más cercanos a 0 en todos los muestreos, se tiene que no hay especies dominantes en esta laguna. Esto es importante ya que este cuerpo de agua presenta especies de cianobacterias, las cuales pueden proliferar y formar floraciones de algas degradando aún más la calidad de agua. Respecto al índice de equidad, al obtener valores cercanos a cero indicaría una baja equitatividad, lo que quiere decir que existe heterogeneidad en cuanto a la representación de las abundancias de las especies.

Tabla 15. Índice de diversidad de Shannon (H), dominancia de Simpson (D) e índice de equidad de Pielou (J) para las especies de fitoplancton de ambas lagunas entre octubre de 2021 a enero de 2022.

Campañas		Diversidad (H)	Dominancia (D)	Equidad (J)
Oct 2021	Santa Elena 1	0,30	0,72	0,13
	Santa Elena 2	1,07	0,13	0,30
Nov 2021	Santa Elena 1	0,73	0,25	0,27
	Santa Elena 2	0,81	0,29	0,26
Dic 2021	Santa Elena 1	0,48	0,42	0,20
	Santa Elena 2	0,68	0,43	0,20
Ene 2022	Santa Elena 1	0,31	0,72	0,11
	Santa Elena 2	1,26	0,07	0,40

Fuente: elaboración propia.

Especies indicadoras

Dentro de las especies identificadas en la Laguna Santa Elena 1 se encuentra *Plagioselmis lacustris*, ésta se registra frecuente y abundantemente durante los 4 muestreos, siendo también la especie dominante de este cuerpo de agua. De acuerdo a Nedbalová *et al.* (2006), *P. lacustris* aumenta su población cuando las demás poblaciones de especies disminuyen, prefiere zonas con pH alto, prosperando en ambientes con características oligotróficas, alta incidencia de luz y bajas concentraciones de nutrientes esenciales como el fósforo y nitrógeno (Ferreira *et al.*, 2016). *Pseudanabaena* sp. y *Aphanocapsa* sp. fueron otras de las especies con mayor abundancia en el cuerpo de agua, ambas corresponden a cianobacterias las cuales son organismos cosmopolitas muy comunes en las comunidades de fitoplancton que pueden llegar a formar floraciones de algas degradando la calidad de agua. La proliferación de estas especies se ve influenciado por la temperatura del agua, pH, condiciones de luz, concentración de nutrientes y la depredación por parte de zooplancton y peces (Gao *et al.*, 2018), por lo que en el caso de la Laguna

Santa Elena 1 alguno de estos factores puede estar controlando el crecimiento y dominancia de estas microalgas.

En el caso de la Laguna Santa Elena 2, *Plagioselmis lacustris* se registra escasamente permitiendo la presencia de otras especies, entre ellas la cianobacteria *Dolichospermum spiralis*. Las especies de *Dolichospermum* son cianobacterias de agua dulce y cosmopolitas, toleran bajas cantidades de nitrógeno y luz aprovechando su morfología para regular la flotabilidad y utilizar los nutrientes y luz disponibles, teniendo una ventaja competitiva con otras especies. De acuerdo a Li *et al.* (2016), las floraciones de *Dolichospermum* son propiciadas por una amplia gama de nutrientes, siendo tradicionalmente el fósforo el principal elemento que estimula su proliferación. Otras especies forman floraciones con aumentos de temperatura y/o bajas concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto. Weisbrod *et al.* (2020) añade que las floraciones están correlacionadas con cambios en el CO₂, nutrientes y pH, sin embargo, no se encuentra especificado de qué forma se comporta a estos cambios. Es así como en la Laguna Santa Elena 2, a pesar de que *Dolichospermum spiralis* es una de las especies más abundantes, no se dan las condiciones idóneas para la formación de floraciones. *Cocconeis placentula* es una diatomea común de agua dulce, también hallada en aguas salobres. Se encuentra en sistemas donde el pH es neutro o alcalino y es tolerante a la contaminación orgánica moderada (Abuhatab-Aragón & Donato-Rondón, 2012). Kindt & Small (2002) señalan además que existe una correlación positiva entre la temperatura y la densidad de la población de *Cocconeis placentula*, por lo que esta especie se multiplica rápidamente al aumentar la temperatura. Esto se observa en la Laguna Santa Elena 2, que presenta la mayor abundancia de la especie en noviembre, siendo este el mes más cálido (27,6 °C).

Sphaerocystis schroeteri es una especie hallada en ambas lagunas con una abundancia considerable, de acuerdo a Vahdet *et al.* (2012) es una especie adaptada a ecosistemas mesotróficos y oligotróficos, siendo reportada principalmente en verano y otoño donde suele ser una especie dominante. Las

condiciones adecuadas de crecimiento para esta especie son zonas con alta densidad lumínica y bajas concentraciones de nutrientes. Las especies del género *Monoraphidium* suelen encontrarse en ambientes acuáticos que van de oligotróficos a mesotróficos, lo cual explica que se encuentre presente en ambas lagunas. Específicamente, *Monoraphidium contortum* es una especie cosmopolita que habita aguas alcalinas. (Peixoto *et al.*, 2012).

4.3 Recomendaciones de conservación.

La Laguna Santa Elena 1 presenta en general una calidad de agua buena, mostrando un estado mesotrófico con tendencia hacia la oligotrofia, por lo que las recomendaciones se enfocan en prevenir un deterioro causado por las actividades circundantes, principalmente de los campos agrícolas.

En primera instancia se recomienda evitar y/o prevenir ingresos de sedimentos y nutrientes en el cuerpo de agua a través de la restauración de la vegetación ribereña considerando aproximadamente 10-20 metros, con vegetación autóctona ya que actualmente esta zona se encuentra dominada por pinos y aromos. También se propone realizar un control de especies invasoras a través de un programa en el que se identifiquen aquellas especies que puedan generar un efecto negativo en el cuerpo de agua y controlar mediante técnicas que no impliquen el uso de químicos tales como el anillado de árboles, la extracción manual de hierbas y pequeños arbustos, entre otros.

Se recomienda, además, realizar monitoreos de calidad de agua periódicos considerando: nutrientes, agroquímicos, parámetros fisicoquímicos y nivel del agua ya que en esta laguna se realizan frecuentemente extracciones. Finalmente, es relevante realizar una mesa de trabajo para vincular a las comunidades con el cuidado de la laguna estableciendo además un canal para que vecinos puedan expresar sus inquietudes y denuncias, junto a asambleas comunitarias para el cuidado de la laguna. Las partes interesadas dentro del marco de colaboración serían la municipalidad, comunidades aledañas, agricultores y Forestal Arauco.

La Laguna Santa Elena 2 presenta una mala calidad del agua, por lo que las recomendaciones se enfocan en mejorar su estado.

Es así como se propone retomar el proyecto de reforestación con especies nativas implementado previamente por Forestal Arauco, elaborando un plan donde se consideren las características del sitio tales como el tipo de suelo, que exista una correcta infiltración de agua, entre otras, además de valorar criterios de selección de especies como, por ejemplo, una buena disponibilidad de semillas, que las especies tengan una alta probabilidad de adaptación al sitio, etc. Al igual que en la laguna grande se recomienda realizar un control de especies invasoras y monitoreos periódicos de agua.

Para el control de caza ilegal, se propone realizar monitoreos de esta actividad mediante la identificación de cartuchos y denuncias de vecinos, por lo cual también es relevante implementar un plan de educación ambiental con el fin de prevenir la caza, además de instalar señaléticas que indiquen la prohibición de esta actividad. Finalmente, para el control de ganado es relevante verificar si actualmente hay ingreso de ganados a la zona protegida mediante la identificación de huellas y materia orgánica, y de ser necesario modificar la ubicación y el tipo de cerco.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con la evaluación realizada en el periodo comprendido entre octubre de 2021 y enero de 2022, se determinó a través del estudio de parámetros físicos, químicos, nutrientes y biológicos que las dos lagunas pertenecientes al humedal Laguna Santa Elena presentan diferencias en cuanto a su calidad del agua.

El cuerpo de agua pequeño, a pesar de contar con medidas de protección y un uso de suelo de conservación, es el que presenta peor calidad de agua teniendo un pH alcalino no apto para la preservación de la vida acuática, además de presentar características mesotróficas con tendencia hacia la eutrofia atribuido principalmente a las altas concentraciones de nutrientes y clorofila. Respecto a las concentraciones de nutrientes, esta laguna presenta valores más altos que el cuerpo de agua grande en los siguientes elementos: nitrógeno total y amoniacal, nitratos, manganeso y fósforo. Por otra parte, la composición de microalgas indica la presencia de cianobacterias que podrían llegar a formar floraciones algales con el enriquecimiento de nutrientes y eutrofización, además de otras especies tolerantes a contaminación orgánica moderada. Estos resultados se deben principalmente a sus características morfométricas, principalmente su tamaño y profundidad, y a que posiblemente tiene un tiempo de residencia mayor ya que no cuenta con otros ingresos de agua además de la recarga superficial y filtraciones de los canales.

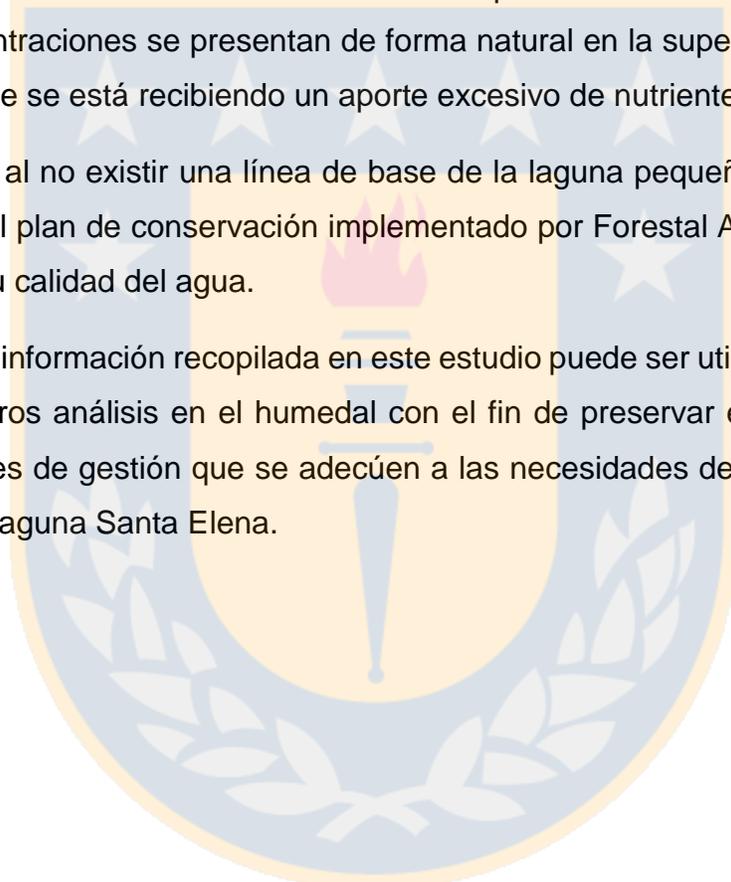
Por su parte, la laguna de mayor tamaño cuenta con mejor calidad de agua, también presenta un estado mesotrófico pero con tendencia hacia la oligotrofia, siendo esto demostrado con la composición de microalgas que indica la dominancia de especies que habitan ambientes oligotróficos. Por otra parte, el parámetro que presenta mayor diferencia con la laguna pequeña es la concentración de clorofila, siendo considerablemente menor en el cuerpo de agua grande, lo cual concuerda con la baja abundancia de fitoplancton. Los resultados de calidad de agua de la laguna se explican por su tamaño y factor de dilución, ya que la laguna cuenta con un ingreso de agua a través del canal El Roble, ingresando agua del sistema de riego Laja-

Diguillín el cual tiene una buena calidad, además recibe aportes de aguas subterráneas, lo cual influye en el tiempo de residencia.

Respecto a las diferencias observadas en las concentraciones de nutrientes, estas podrían atribuirse a las actividades de uso de suelo realizadas en el entorno de las lagunas, ya que al no hallarse una zona de protección con vegetación adecuada llegarían más lixiviados con cargas de nutrientes a los cuerpos de agua. Sin embargo, al no existir una línea de base de estos parámetros no es posible afirmar si estas concentraciones se presentan de forma natural en la superficie de agua, o si efectivamente se está recibiendo un aporte excesivo de nutrientes.

Por otra parte, al no existir una línea de base de la laguna pequeña no es posible determinar si el plan de conservación implementado por Forestal Arauco ha tenido un efecto en su calidad del agua.

Es así como la información recopilada en este estudio puede ser utilizada como una base para futuros análisis en el humedal con el fin de preservar este ecosistema mediante planes de gestión que se adecúen a las necesidades de cada parte que conforman la Laguna Santa Elena.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abuhatab-Aragón, Y., Donato-Rondón, J. 2012. *Cocconeis placentula* y *Achnanthydium minutissimum* especies indicadoras de arroyos oligotróficos andinos. *Cocconeis placentula* and *Achnanthydium minutissimum*, indicator species of oligotrophic Andean streams. *Caldasia*, 34(1), p. 205–212.
- Amaya, A., Cruz, L. s.f. Diseño e implementación de un control de pH, conductividad y monitoreo del nivel de agua para el cuidado cultivos hidropónicos de uso doméstico. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, pp. 14.
- Baines, S. B., Webster, K. E., Kratz, T. K., Carpenter, S. R., Magnuson, J. J. 2000. Synchronous behavior of temperature, calcium, and chlorophyll in lakes of northern Wisconsin. *Ecology*, 81(3), p. 815–825.
- Barbier, E.B. 2011. Wetlands as natural assets, *Hydrological Sciences Journal*, 56:8, p. 1360-1373.
- Bauer, D. E. 2009. Ecología del fitoplancton de arroyos pampeanos y su valor como indicador de la calidad de agua (tesis doctoral). Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Argentina.
- Bhateria, R., Jain, D. 2016. Water quality assessment of lake water: a review. *Sustainable Water Resources Management*, 2(2), p. 161–173.
- Bonilla, S., De León, L., Fabre, A. 2016. Fitoplancton. En R. Arocena (Ed), *Principios y métodos de limnología: ejemplos de Uruguay*, p.129-167.
- Boyd, C. 2018. Cambio constante de pH inevitable, completamente normal. *Global Aquaculture Advocate*, pp. 5.
- DGA (Dirección general de aguas). 2018. 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.

Dodds, W.K., Cole, J.J. 2007. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs. *Aquat. Sci.* 69, pp. 427–439.

Ferreira, E., Tucci, A., Ferreira do Carmo, C., Torres, N., Pereira, H., Mallasen, M. 2016. Changes in phytoplankton spatial and temporal dynamics in a Brazilian tropical oligotrophic reservoir after net cage installation. *Revista Brasileira de Botânica*, 39(2), p. 569–581.

Forero-Céspedes, A., Reinoso-Flórez, G. 2013. Evaluación de la calidad del agua del río Opia (Tolima-Colombia) mediante macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos: Water quality assessment of the Opia River (Tolima-Colombia), using macroinvertebrates and physicochemical parameters. *Caldasias*, 35(2), 371–387.

Forestal Arauco. 2016. Plan de conservación del área de alto valor de conservación (AAVC) Laguna Santa Elena. 21 pp.

Fraire-Pacheco, K., Arancibia-Avila, P., Concha, J., Echeverría, F., Salazar, M. L., Figueroa, C., Espinoza, M., Sepúlveda, J., Jara-Zapata, P., Jeldres-Urra, J., Vega-Román, E. 2017. A new report of *craspedacusta sowerbii* (Lankester, 1880) in southern Chile. *BioInvasions Records*, 6(1), p. 25–31.

Gao, J., Zhu, J., Wang, M., Dong, W. 2018. Dominance and growth factors of *Pseudanabaena* sp. in Drinking Water source reservoirs, Southern China. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11), p. 1–15.

García, S. L., Arguello, A., Parra, R., Pincay Pilay, M. 2019. Factores que influyen en el pH del agua mediante la aplicación de modelos de regresión lineal. *INNOVA Research Journal*, 4(2), p. 59–71.

García-Huamán, F. T., Torres-Delgado, J., Vergara-Medrano, S. E. 2011. Calidad ecológica Del agua Del río Utcubamba en relación a parámetros fisicoquímicos y biológicos. *Amazonas, Peru. Sciéndo*, 14(1-2), p. 7-19.

González-Acuña, D., Benavente, C., Figueroa, R. 2004. Avifauna de la Laguna Santa Elena, región del Bío Bío. *Boletín Chileno de Ornitología* 10, p. 13-18.

González Lourdes. 2013. Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. *Revista Académica UTP: Mente & Materia*, 4, p. 12–13.

González, V., Reyes, C. 2017. Rotación de cultivos forrajeros para la ganadería de Aysén. Instituto de investigaciones agropecuarias. Ficha técnica 13, pp. 2.

González-Dávila, R. P., Ventura-Houle, R., De-la-Garza-Requena, F. R., Heyer-Rodríguez, L. (2019). Caracterización fisicoquímica del agua de la laguna La Vega Escondida, Tampico, Tamaulipas-México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(1), p. 01–29.

Greb, S.F., DiMichele, W.A., Gastaldo, R.A. 2006. Evolution and importance of wetlands in earth history, en Greb, S.F., y DiMichele, W.A., *Wetlands through time: Geological Society of America Special Paper* 399, p. 1-40.

Hakanson, L., Blenckner, T., Bryhn, A. C., Hellström, S. S. 2005. The influence of calcium on the chlorophyll-phosphorus relationship and Lake Secchi depths. *Hydrobiologia*, 537(1–3), p. 111–123.

Huber, A., Iroumé, A., Bathurst, J. 2007. Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes*, p. 2650–2667.

Iroumé, A., Huber, A. 2002. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrological Processes*, 16(12), p. 2347–2361.

Karwan, D. L., Gravelle, J. A., Hubbart, J. A. 2007. Effects of timber harvest on suspended sediment loads in Mica Creek, Idaho. *Forest Science*, 53(2), p. 181–188.

López Rodríguez, M., Leira Campos, M. 2016. El fitoplancton como indicador de calidad de masas de agua muy modificadas en la DMA. El lago artificial de As

Pontes (A Coruña. España). NACC: Nova Acta Científica Compostelana. Biología, 23(23), p. 8.

Martínez, M., Letelier, E. 1978. Comparación entre una rotación intensiva de cultivos y una rotación de cultivos con pradera. Agricultura técnica (Chile), 38, p. 129-143.

Matta, C. 2015. Diseño de una red de instrumentación para el monitoreo hidrológico de la laguna Santa Elena. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillan, Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. 2015. Informe final: Diagnóstico del estado y tendencia de la biodiversidad en las regiones de Chile.

Molina, X., Vila, I. (Eds). 2006. Manual de evaluación de la calidad del agua.

Moreno, C. E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M&T–Manuales y Tesis SEA, vol.1. Zaragoza, 84 pp.

Moss, B. 2008. Water pollution by agriculture. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363(1491), p. 659–666.

Muñoz, F. 2017. Uso de ²²²Rn como trazador ambiental para determinar la existencia de aportes de agua subterránea en la laguna Santa Elena. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillan, Chile.

Nedbalová, L., Stuchlík, E., Strunecký, O. 2006. Phytoplankton of a mountain lake (L'adové pleso, the Tatra Mountains, Slovakia): Seasonal development and first indications of a response to decreased acid deposition. Biologia, 61(S18), p. 91–100.

Parra, O., González, M., Dellarossa, V., Rivera, P., Orellana, M. 1982. Manual taxonómico del fitoplancton de aguas continentales con especial referencia al fitoplancton de Chile. Universidad de Concepción. (Vol. 1-6).

Parra, O., Valdovinos, C., Urrutia, R., Cisternas, M., Habit, E., Mardones, M. 2003. Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central. *Limnetica*, 22(1–2), p. 51–83.

Peixoto, G., De Mattos, C., Góes, A., Nascimento, C. 2012. *Monoraphidium* and *Ankistrodesmus* (Chlorophyceae, Chlorophyta) from Pantanal dos Marimbus, Chapada Diamantina, Bahia State, Brazil. Instituto de Botânica, Núcleo de Pesquisa em Ecologia, Av. Miguel Estéfano, 3687, p. 04301-902.

Pellerin, B. A., Stauffer, B. A., Young, D. A., Sullivan, D. J., Bricker, S. B., Walbridge, M. R., Clyde, G. A., Shaw, D. M. 2016. Emerging Tools for Continuous Nutrient Monitoring Networks: Sensors Advancing Science and Water Resources Protection. *Journal of the American Water Resources Association*, 52(4), p. 993–1008.

Pérez-Castillo, A., Rodríguez, A. 2008. Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología Tropical*, 56(4), 1905-1918

Perison, D., Phelps, J., Pavel, C., Kellison, R. 1997. The effects of timber harvest in a South Carolina blackwater bottomland. *Forest Ecology and Management*, 90(2–3), p. 171–185.

Potasznik, A., Szymczyk, S. 2015. Magnesium and calcium concentrations in the surface water and bottom deposits of a river-lake system. *Journal of Elementology*, 20(3), p. 677–692.

Quiroz, H., Zúñiga, L., Molina, I., García, J. 2004. Variación de los organismos fitoplanctónicos y la calidad del agua en el lago de Chapala, Jalisco, Mexico. *Acta Universitaria*, vol. 14, núm. 1, pp. 47-58.

Rakocevic-Nedovic, J., Hollert, H. 2005. Phytoplankton community and chlorophyll a as trophic state indices of Lake Skadar (Montenegro, Balkan). *Environmental Science and Pollution Research*, 12(3), p. 146–152.

Rehg, K. J., Packman, A. I., Ren, J. 2005. Effects of suspended sediment characteristics and bed sediment transport on streambed clogging. *Hydrological Processes*, 19(2), p. 413–427.

Rivera, D. 2020. Estimación de parámetros de calidad de agua en la Laguna de Santa Elena usando imágenes satelitales. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillan, Chile.

Rivera, C., Zapata, A., Pinilla, G., Donato, J., Chaparro, B., Jiménez, P. 2005. Comparación de la estimación de la clorofila-a mediante los métodos espectrofotométrico y fluorométrico. *Acta Biológica Colombiana*, 10(2), p. 95–103.

Salmerón, A., Geadá, G., Fragilde, M. 2017. Propuesta de un índice de diversidad funcional: Aplicación a un bosque semidecíduo micrófilo de Cuba Oriental. *Bosque (Valdivia)*, 38(3), p. 457-466.

Samboni, N., Carvajal, Y., Escobar, J. 2007. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, vol. 27, núm. 3, diciembre, 2007, p. 172-181.

Sharpley, A.N. 2002. Agriculture, Hydrology and Water Quality. In *Vadose Zone Journal* (Vol. 3, Issue 2), p. 4-5.

Silva, C., Barrientos, C., Figueroa, R. A. R., Martín, N., Contreras, Á., Ardiles, K., Moreno, L., González-Acuña, D. 2011. Biología reproductiva de la tagua común (*Fulica armillata*) y la tagua de frente roja (*F. rufifrons*) en un área agroforestal del centro-sur de Chile. *Gayana*, 75(2), p. 161–169.

Skowron, P., Skowrońska, M., Bronowicka-Mielniczuk, U., Filipek, T., Igras, J., Kowalczyk-Juško, A., Krzepińko, A. 2018. Anthropogenic sources of potassium in surface water: The case study of the Bystrzyca river catchment, Poland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265(March), p. 454–460.

Thomas, J. R., McCormick, P. V. 2012. The sulfate budget of a shallow subtropical lake. *Fundamental and Applied Limnology*, 181(4), p. 253–269.

UICN. 1992. Conservación de Humedales. Un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias. Gland, Suiza, 100 pp.

Vahdet, S., Kivrak, E., Gürbüz, H., Manav, E., Mangit, F., Türkecan, O. 2012. Potential of Cottonseed Oil as Fish Oil Replacer in European Sea Bass Feed Formulation. 797, p. 787–797.

Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Reidy Liermann, C., Davies, P.M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), p. 555–561.

Wang, Y., Xia, H., Fu, J., Sheng, G. 2004. Water quality change in reservoirs of Shenzhen, China: detection using LANDSAT/TM data. *Science of the Total Environment* 328, p. 195–206.

Weisbrod, B., Riehle, E., Helmer, M., Martin-Creuzburg, D., Dietrich, D. R. 2020. Can toxin warfare against fungal parasitism influence short-term *Dolichospermum* bloom dynamics? – A field observation. *Harmful Algae* 99, 101915.

Wetzel, R. G., Likens, G. E. 1991. *Limnological Analyses*. (2° ed.) Springer Science+Business Media New York, pp. 384.

Wyk, P.V., Scarpa, J. 1999. Water quality requirements and management. *Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems*. Florida Department of Agriculture and Consumer Services, p. 141-162.

Zhu, Z., Nordin, R., Mazumder, A. 2008. Soil and vegetation as the determinants of lake nitrogen concentrations in forested watersheds in British Columbia, Canada. *Ecological Indicators*, 8(5), p. 431–441.

Zohary, T., Yacobi, Y. Z., Alster, A., Fishbein, T. 2014. Lake Kinneret, Ecology and Management. *Aquatic Ecology Series* 6, p. 161-190.