



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

LOS CAMBIOS EN LA EXPANSIÓN URBANA Y SU
RELACIÓN CON EL ESTADO TRÓFICO DE LAGUNA
GRANDE Y LAGUNA CHICA DE SAN PEDRO DE LA PAZ
EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS

Habilitación presentada para optar al título de:

Ingeniero ambiental

MATÍAS DOMINGO GUZMÁN MÁRQUEZ

Profesor Guía: Roberto Urrutia Pérez

Profesor Co-Guía: Mauricio Aguayo Arias

Concepción, Chile

2021



“LOS CAMBIOS EN LA EXPANSIÓN URBANA Y SU RELACIÓN CON EL ESTADO TRÓFICO DE LAGUNA GRANDE Y LAGUNA CHICA DE SAN PEDRO DE LA PAZ EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS.”

PROFESOR GUÍA: Dr. Roberto Urrutia Pérez

PROFESOR CO-GUÍA: Dr. Mauricio Aguayo Arias

PROFESOR COMISIÓN: Dra. Carolina Baeza Freer

PROFESOR COMISIÓN: Dr. Oscar Parra Barrientos

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

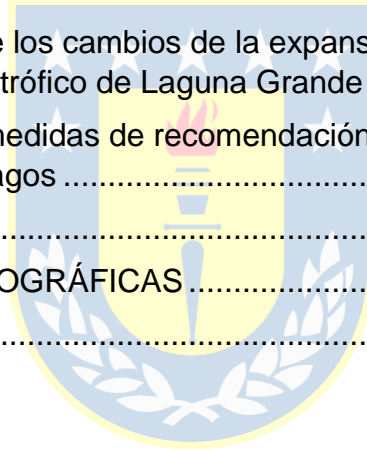
- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, noviembre 2021

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	viii
1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	1
1.1. Expansión urbana en Chile	1
1.1.1. Sus efectos en el medio ambiente	2
1.2. Lagos urbanos	5
1.2.1. Proceso de eutrofización	6
1.3. Comuna de San Pedro de la Paz	8
1.3.1. Uso de suelo de la cuenca lacustre	9
1.3.2. Estudios y medidas aplicadas	12
1.4. Aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible	14
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	15
2.1. Hipótesis	15
2.2. Objetivo general	15
2.3. Objetivos específicos	15
3. METODOLOGÍA	16
3.1. Área de estudio	16
3.2. Supuestos	18
3.3. Objetivo I. Determinar los parámetros del estado trófico en los últimos 30 años	19
3.3.1. Análisis de los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz	19
3.3.2. Determinar el estado trófico actual	20
3.4. Objetivo II. Determinar los cambios de la expansión urbana y su relación con los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica durante los últimos 30 años	25
3.4.1. Relacionar los cambios de la expansión urbana con los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica	27

3.5. Objetivo III: Identificar medidas de recomendación para la protección de la calidad de agua	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1. Determinación de los parámetros del estado trófico en los últimos 30 años	28
4.1.1. Análisis de los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica en los últimos 30 años.....	28
4.1.2. Determinación del estado trófico actual	44
4.2. Determinación de los cambios de la expansión urbana y su relación con los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica durante los últimos 30 años.....	50
4.2.1. Cambios de cobertura urbana en la cuenca lacustre en los últimos 30 años (períodos)	53
4.2.2. Relación entre los cambios de la expansión urbana y los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica	66
4.3. Identificación de medidas de recomendación para la protección de la calidad de agua de los lagos	71
5. CONCLUSIÓN	76
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
7. ANEXOS	87



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Uso de suelo en el territorio chileno al año 2017.	2
Tabla 2. Interrelación entre los efectos ambientales y el proceso de expansión urbana.....	3
Tabla 3. Causas y efectos del proceso de eutrofización.....	7
Tabla 4. Superficies y porcentajes de ocupación de los usos de suelo en la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz.	12
Tabla 5. Estudios y medidas entorno a los lagos de San Pedro de la Paz.	13
Tabla 6. Principales características morfométricas de los lagos Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz.	18
Tabla 7. Monitoreos de calidad de agua para cada lago.	20
Tabla 8. Coordenadas de estaciones de muestreo de Laguna Grande (LG) y Laguna Chica (LCh) de San Pedro de la Paz.	22
Tabla 9. Rango de condición trófica según Smith et al., 1999.	23
Tabla 10. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua.	24
Tabla 11. Períodos de análisis de la dinámica de las coberturas de suelo urbano.....	27
Tabla 12. Recopilación histórica de parámetros de estado trófico en los lagos Laguna Grande (LG) y Laguna Chica. (LCh).	29
Tabla 13. Colectores y canales de aguas lluvias que descargan en Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz.	42
Tabla 14. Clasificación del estado trófico actual de Laguna Grande según Smith et al., (1999) (Campañas 2020-2021).	45
Tabla 15. Clasificación del estado trófico actual de Laguna Grande según Smith et al., (1999) (Estaciones de muestreo).	45
Tabla 16. Clasificación del estado trófico actual de Laguna Chica según Smith et al., (1999) (Campañas 2020-2021).	47
Tabla 17. Clasificación del estado trófico actual de Laguna Chica según Smith, et al., (1999) (Estaciones de muestreo).	47
Tabla 18. Resumen de la variación de superficie urbana en la cuenca lacustre total en los últimos 30 años. (períodos).	62
Tabla 19. Resumen de la variación de superficie urbana en la cuenca de Laguna Grande en los últimos 30 años. (períodos).	64
Tabla 20. Resumen de la variación de superficie urbana en la cuenca de Laguna Chica en los últimos 30 años. (períodos).	65
Tabla 21. Análisis de correlación de Pearson Laguna Grande.	68
Tabla 22. Análisis de correlación de Pearson Laguna Chica.	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución demográfica de San Pedro de la Paz (1952 - 2017).	9
Figura 2. Línea de tiempo del cambio de uso de suelo en la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz en los últimos 500 años.	10
Figura 3. Usos de suelo de la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz.....	11
Figura 4. Localización de Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz.....	17
Figura 5. Estaciones de muestreo Laguna Grande. (LG).	21
Figura 6. Estaciones de muestreo Laguna Chica. (LCh).	21
Figura 7. Promedios anuales de la transparencia en el agua (DS) en los últimos 30 años.	32
Figura 8. Boxplot del parámetro transparencia del disco secchi (DS) en ambos lagos.	32
Figura 9. Promedios anuales de fósforo total (PT) en los últimos 30 años.	34
Figura 10. Boxplot del parámetro fósforo total (PT) en ambos lagos.	34
Figura 11. Promedios anuales de nitrógeno total (NT) en los últimos 30 años.	36
Figura 12. Boxplot del parámetro nitrógeno total (NT) en ambos lagos.	36
Figura 13. Promedios anuales de la clorofila-a (Chl-a) en los últimos 30 años.	37
Figura 14. Boxplot del parámetro clorofila-a (Chl-a) en ambos lagos.	38
Figura 15. Precipitaciones estación meteorológica San Pedro de la Paz.	41
Figura 16. Colectores que descargan en Laguna Grande.	43
Figura 17. Colectores que descargan en Laguna Chica.	43
Figura 18. Variación del índice de estado trófico actual de Laguna Grande.	46
Figura 19. Variación mensual del TSI actual en Laguna Grande. (estaciones).	46
Figura 20. Variación del índice de estado trófico actual de Laguna Chica.	48
Figura 21. Variación mensual del TSI actual en Laguna Chica. (estaciones). ..	48
Figura 22. Cambios del índice de estado trófico de Carlson anual de los lagos de San Pedro de la Paz.	49
Figura 23. Cuencas lacustres San Pedro de la Paz, Biobío, Chile.	51
Figura 24. Ocupación de superficie urbana respecto a las cuencas lacustres. (%) (1985-2021).	52
Figura 25. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (1985-2021).	52
Figura 26. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (1985-1990).	54
Figura 27. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (1990-2000).	56
Figura 28. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (2000-2010).	58
Figura 29. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (2010-2015).	59
Figura 30. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (2015-2021).	61
Figura 31. Variación porcentual parcial de la superficie urbana en la cuenca lacustre en los últimos 30 años.	62

Figura 32. Variación porcentual total de la superficie urbana en la cuenca lacustre en los últimos 30 años..... 63

Figura 33. Variación porcentual parcial de la superficie urbana en la cuenca Laguna Grande en los últimos 30 años. 64

Figura 34. Variación porcentual parcial de la superficie urbana en la cuenca Laguna Chica en los últimos 30 años. 65

Figura 35. Relación grafica entre parámetros de estado trófico y superficie urbana..... 67





A mis padres, abuelos y bisabuelos...

AGRADECIMIENTOS

Particularmente, agradecer a mis padres, a mis abuelos (Jorge, Cristina y Marilú) y bisabuelos (Lillo y Nelly) que siempre me dieron los ánimos, fuerzas y el coraje de seguir adelante en todo este difícil proceso universitario en otra ciudad. A mis amigos que conocí en la universidad: Gustavo, Ronald, Matías, Yayo, Miguel, Peñita, Pauli, Pame, Sofi, Javiera, Karol y Ale, que me ayudaron en adversidades y me compartieron un pedacito de su vida junto a un sinfín de buenos momentos que se vivieron a lo largo de estos 6 años. A mis amigos de mi ciudad natal Talca: Yaninna, Carreño, Mono, Nutria, Timmy, Soto, Aníbal y Andrés, que siempre me llenaron de energías y el poder despejarme en tiempos de alta presión. A mis guías en todo este trabajo que estuvieron presentes para aclarar dudas en tiempos de confusión a pesar de lo complicado en la situación de pandemia. Además, mencionar de manera especial a la Bari que siempre fue mi pilar, mi persona especial, mi cable a tierra y mi compañera en toda la carrera, sobre todo el gran apoyo incondicional en esta investigación. También a mi madre María Paz, que siempre fue la persona que me dio el empujón necesario para tomar las decisiones importantes y enseñarme que nunca debo rendirme a pesar de las dificultades que se presenten, siendo ella la que hizo posible que yo pudiera estudiar una carrera profesional en la Universidad de Concepción.

RESUMEN

La expansión urbana en Chile y el mundo se ha incrementado de manera extensa y errática, provocando grandes transformaciones en zonas naturales, principalmente en sectores cercanos a ecosistemas costeros y cuerpos de agua, generando la aceleración de procesos degradativos como la eutrofización e incitando el desarrollo de futuros problemas ambientales.

En este sentido, este estudio busca evaluar el efecto de la expansión urbana sobre el estado trófico de los lagos Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz en los últimos 30 años. Para ello, se analizaron diferentes estudios que tuvieran los parámetros de estado trófico (fósforo total, nitrógeno total, clorofila-a y transparencia) en el período establecido, los cuales mostraron una mantención y/o disminución en el tiempo, además, se determinaron los parámetros actuales en tres campañas de muestreo, donde el estado trófico demostró una condición de mesotrofia en ambos lagos según el índice de Carlson. Mientras que la clasificación de Smith demostró una condición eutrófica para el fósforo total, el nitrógeno total y la transparencia en Laguna Grande. Por otra parte, se utilizaron imágenes satelitales junto a un análisis de fotointerpretación para la determinación del cambio de superficie urbana (dividida en cinco períodos), evidenciando una expansión del 221% en la cuenca lacustre. Luego, se realizó un análisis estadístico comparativo para obtener la relación entre el cambio de superficie urbana y los parámetros de estado trófico de los lagos. Los resultados indicaron correlaciones negativas y positivas fuertes, sin embargo, no fueron estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Finalmente, se identificaron medidas para la protección de la calidad de agua en base a estudios científicos y el libro "*Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*", sugiriendo un trabajo integrado en la cuenca donde las autoridades, la comunidad e investigadores contribuyan a la elaboración de planes de prevención, mantención y monitoreo de ambos lagos para la protección de estos sistemas de agua dulce para futuras generaciones.

1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

1.1. Expansión urbana en Chile

La disponibilidad del agua se encuentra en una constante presión y enfrentamiento contra la contaminación, la escasez y el cambio climático. (Álvarez, 2020; WAP, 2015). Una de las principales causas es el intenso desarrollo urbano de las últimas décadas, donde un 55% de la población mundial habita en zonas urbanas y se ha estimado que podría aumentar aproximadamente a un 68% al año 2050 (UNDESA, 2019). En efecto América Latina y el Caribe, posee una tasa de ocupación del 80% siendo una de las regiones más urbanizadas del mundo. (United Nations,2014).

En Chile, alrededor de un 90% de la población habita en zonas urbanas. Estas metrópolis chilenas, se han caracterizado por un crecimiento incontrolado, llegando a reemplazar suelos agrícolas y vegetación por superficies construidas. (Molina et al., 2009). Dejando en evidencia un crecimiento urbano errático, mal planificado, con escasa conciencia ambiental y débiles regulaciones ambientales como en la mayoría de las ciudades del país (EULA, 1999). Este modelo se caracteriza por presentar una ocupación espacial extensa, fragmentada, de baja densidad y distante de los núcleos urbanos centrales, siendo denominado como *urban sprawl* (Martínez et al., 2016; Galster et al., 2010; López-Goyburu, 2012).

En la actualidad, es posible analizar la dinámica en la tasa de cambio de uso de suelo y sus consecuencias ecológicas y sociales en una mayor escala de tiempo, esto debido a la existencia y disponibilidad de las imágenes satelitales. (Aguayo et al., 2009). Según los resultados del catastro de vegetación nativa de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), los usos de suelo del país corresponden mayormente a áreas desprovistas de vegetación, praderas-matorrales y bosques (Tabla 1). Un claro ejemplo de estas transformaciones es

la región del Biobío, que está dentro de las regiones que concentra más del 84% de las plantaciones forestales existentes en el país, siendo un sector fundamental para la economía chilena (CONAF, 2013).

Tabla 1. Uso de suelo en el territorio chileno al año 2017.

Uso de suelo	Superficie (HA)
Terrenos agrícolas	3.241.690
Praderas y Matorrales	20.445.358
Bosques	17.665.354
Humedales	3.588.364
Áreas desprovistas de vegetación	24.615.400
Nieves y glaciares	4.098.643
Cuerpos de agua	1.344.690
Áreas no reconocidas	281.190
Áreas urbanas e industriales	387.770

Fuente: Catastro vegetacional, CONAF, 2017.

1.1.1. Sus efectos en el medio ambiente

El crecimiento urbano, es uno de los procesos que genera mayor impacto a la naturaleza (Martínez et al., 2016), sobre todo en una cuenca hidrográfica donde los componentes de sus ecosistemas acuáticos principalmente hidrología, calidad de hábitat, calidad de agua, biodiversidad, procesos ecológicos, entre otros, son alterados o modificados debido a la urbanización. (Almanza et al., 2016a; Chin, 2006; Hughes et al., 2014). En este sentido, gran parte de los impactos se han producido por transformaciones o pérdidas en ecosistemas boscosos y praderas naturales, los cuales han sido reemplazados para el desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas, forestales, urbanas y/o industriales. (Aguayo et al., 2009). A continuación, se presenta la interrelación entre la expansión urbana y sus efectos ambientales. (Tabla 2).

Tabla 2. Interrelación entre los efectos ambientales y el proceso de expansión urbana.

Factores del medio urbano y su expansión	Efectos sobre el medio ambiente
Transporte e infraestructura asociados	
Consumo de combustibles fósiles	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del aire
Número de vehículos	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de gases de efecto invernadero
Largas distancias entre viviendas, lugar de trabajo, escuela, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de recursos no renovables
Tiempo invertido en desplazamientos habituales	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto paisajístico • Pérdida de biodiversidad • Ruido
Edificios y área urbana	
Consumo energético para calefacción, aire acondicionado, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de residuos • Emisión de contaminantes del aire y gases de efecto invernadero
Lugar construcción	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de agua
Calidad de aire interior	<ul style="list-style-type: none"> • Isla de calor
Disponibilidad de áreas verdes	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de biodiversidad • Ruido
Uso de suelo	
Cambio en el uso de suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Deforestación • Contaminación • Presión sobre áreas naturales • Fragmentación de hábitats • Sellado del suelo y cambio en la dinámica hidrográfica (incremento de la escorrentía, disminución de la recarga de acuíferos, etc.)
Consumo del recurso suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de biodiversidad • Especies invasoras

Fuente: Adaptación de OSMAN, 2015.

Distintas investigaciones en el mundo han examinado los efectos del uso de suelo sobre el estado de los lagos. El lago Tangxun en China, debido a su acelerado período de urbanización, se ha visto modificado el proceso de escorrentía, las cargas de contaminantes de fuentes difusas y los volúmenes de aguas residuales industriales y urbanos, lo cual ha representado una grave amenaza para la calidad de agua del lago. (Wei et al., 2020; Zhao et al., 2016).

Un estudio de India, comparó los lagos urbanos con los rurales por medio de un índice denominado “*Water Bodies Protection Index*” (WBPI), el cual consideraba la calidad de agua y diversidad biológica, el uso de cuerpo de agua y los factores sociales y gubernamentales, demostrando que los lagos urbanos estudiados presentaban una mayor vulnerabilidad y contaminación con desechos líquidos y sólidos, además de un evidente descuido de la comunidad a diferencia de los lagos rurales. (Sudha et al., 2013). Por otra parte, una investigación en el lago Municipal de Yaoundé en Camerún, ha concluido que la fuerte eutrofización cultural que está sufriendo el cuerpo de agua es debido a las crecientes cantidades de aguas domésticas vertidos por los edificios aledaños, provocando un enriquecimiento constante del lago y sustentando una alta biomasa de fitoplancton y macrófitas. (Kemka et al., 2006). En síntesis, los diferentes estudios coinciden que la calidad de agua de los lagos se está viendo afectada por la fuerte impermeabilidad de los suelos producto de la urbanización, generando un aumento de las escorrentías pluviales acompañadas de una gran cantidad de contaminantes urbanos (contaminación difusa), así como también, las modificaciones de sus zonas litorales y las altas cargas de nutrientes de aguas residuales domésticas e industriales de los alcantarillados (contaminación puntal) que terminan amenazando estos sistemas lacustres. (Capodaglio et al., 2003; Wei et al., 2020; Yuan et al., 2011; Yang et al., 2020; Francis et al., 2007; Xu et al., 2015). Provocando efectos como la eutrofización, cambios en la distribución espacial de peces, la reducción de flora y fauna ribereña, entre otros. (Francis et al., 2007; Schindler et al., 2000; Lewin et al., 2004; Scheuerell & Schindler, 2004; Woodford & Meyer, 2003). Es importante mencionar, el aporte de la acumulación de nutrientes internos en los sedimentos de un lago (principalmente fósforo) que a lo largo del tiempo contribuye de igual forma al proceso de eutrofización. (Navarrete et al., 2019).

1.2. Lagos urbanos

Los lagos presentes en zonas urbanas son sistemas acuáticos que gran parte de la población conoce, visita y utiliza. (Schueler & Simpson, 2003). Estos sistemas lenticos son denominados lagos urbanos, generalmente de tamaño pequeño (superficie $<10 \text{ km}^2$) y escasa profundidad promedio ($<5\text{m}$), sin embargo, hay casos donde son profundos y de gran tamaño debido a la expansión de ciudades. (Almanza et al., 2016a). Estos sistemas acuáticos son de suma importancia, ya que presentan: un elemento paisajístico en ciudades, mantienen el equilibrio de las aguas superficiales y subterráneas, proveen de hábitat una diversidad de especies de flora y fauna, además de prestar diferentes servicios ecosistémicos como: reguladores de la temperatura, abastecimiento de agua, sumidero de aguas lluvia, usos recreacionales, de emergencias y de pesca e incluso valores culturales. (Almanza et al., 2016a, Verma et al., 2011; Schueler & Simpson, 2003). No obstante, la ubicación y sus características morfométricas los hacen vulnerables a la acción antrópica, debido a los efectos acumulados de distintos eventos a lo largo del tiempo que quedan reflejados en la calidad del agua de estos sistemas (Parra, 1989; Mancini et al., 2012). Cabe destacar, la cantidad de sedimentos provenientes de los alrededores que se depositan en los lagos, producto de aluviones y/o restos de las actividades humanas (basura, restos de fertilizantes y plaguicidas, entre otros), que aportan grandes cantidades de compuestos formados a base de fósforo, nitrógeno y materia orgánica (Rojas, 2018). Por ello, la mayoría se encuentran en un estado eutrofizado. (Almanza et al., 2016a).

1.2.1. Proceso de eutrofización

Actualmente, la eutrofización es una de las problemáticas que afecta principalmente al recurso hídrico (García et al., 2018), según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el número de lagos que han presentado floraciones de algas nocivas aumentaría un 20% a nivel mundial al año 2050, además, ha estimado que gran parte de las zonas costeras y aguas superficiales aumentarán su eutrofización para el año 2030. (WAP, 2015). La eutrofización o eutrofización significa “el proceso de buena nutrición”, no obstante, en contexto de un sistema lacustre se refiere a la fertilización excesiva con nutrientes de una masa de agua. (Parra, 1989). Este lento proceso representa el envejecimiento de los lagos (Vollenweider,1980) y, si bien, sucede de manera natural, puede ser acelerado por la intervención humana. (Parra, 1989). En efecto, el ritmo y la intensidad del aporte de nutrientes por factores antrópicos van aumentando la productividad del ecosistema, es decir, se va desencadenando una serie de cambios en las redes tróficas, que producen una disminución en la diversidad acuática, inclusive provocando cambios en las composiciones taxonómicas y abundancia del fitoplancton (Parra et al., 1986; Giannuzzi,2011; Frumin et al., 2017). Por ello, cada vez que se añaden nutrientes que favorecen el crecimiento de organismos, ya sean nitrógeno (N), fósforo (P), y/o materia orgánica (MO), se va enriqueciendo el sistema acuático; pero limitando el oxígeno. (Moreno et al., 2010). Por lo mismo, los lagos que presentan un bajo contenido de nutrientes poseen bajas tasas de consumo de oxígeno y, por lo tanto, una buena calidad en sus aguas. (Parra et al., 2003).

Las causas y efectos que contribuyen al cambio trófico de un cuerpo de agua en el proceso de eutrofización por actividades antrópicas están dadas por (Tabla 3).

Tabla 3. Causas y efectos del proceso de eutrofización.

Proceso de Eutrofización	
Causas	Efectos
<ul style="list-style-type: none"> • Descargas residuales y aguas lluvias no controladas • Uso excesivo de fertilizantes • Acopio de basuras • Intervención y modificación del área litoral • Modificación de la escorrentía natural, la deforestación y suelos agrícolas • Gases ambientales (NOx, SOx) 	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración en la biota y diversidad biológica • Proliferación de algas, macrófitas y cianobacterias en exceso • Mortandad masiva de la biota y aparición de organismos patógenos • Impedimento de luz a zonas profundas de la columna de agua • Disminución de oxígeno disuelto y anoxia en la columna de agua • Deterioro del paisaje

Fuente: Adaptación de Moreno et al., (2010), Parra (1989), Parra et al., (2015).

Su clasificación está dada por el estado trófico, el cual describe la relación entre el estado de nutrientes y el crecimiento de los productores primarios de un lago. (Moreno et al., 2010). De hecho, corresponde a un concepto importante como instrumento de comunicación al público y una herramienta de gestión interesante, para facilitar y clasificar la eutrofización y el carácter de un lago (Nojavan et al., 2019). En el tiempo, se han formulado varios índices que podrían indicar este estado trófico, el más conocido es el desarrollado por Carlson, denominado Índice de Estado Trófico (TSI, por sus siglas en ingles), clasificando el proceso en: oligotrófico (bajo nivel de productividad biológica), mesotrófico (moderado nivel de productividad biológica), eutrófico (alto nivel de productividad biológica) e hipereutrófico (altísimos niveles de productividad biológica), dependiendo del nivel de productividad biológica del lago (Nojavan et al., 2019; Carlson, 1977; Moreno et al., 2010). Es importante mencionar que, hasta el momento no se ha establecido ningún índice de estado trófico universal

que pueda predecir adecuadamente el carácter productivo de un sistema lacustre. (Gupta, 2014).

1.3. Comuna de San Pedro de la Paz

El Área Metropolitana de Concepción (AMC) está compuesta por 12 comunas, ubicadas en su mayoría en zonas costeras, correspondiente a Tomé, Penco, Talcahuano, Concepción, Chiguayante, Hualqui, Hualpén, Santa Juana, San Pedro de la Paz, Florida, Coronel y Lota. (Rojas, 2018). De hecho, corresponde al segundo centro urbano más importante del país, después de Santiago, alcanzando una población superior al millón de habitantes y representando un alto porcentaje de la población regional. (INE, 2017). La ciudad de Concepción se caracteriza por presentar una gran cantidad de lagos y lagunas, no obstante, su desarrollo urbano demuestra que estos sistemas están siendo poco considerados a nivel de planificación y/o gestión, incluso algunos con riesgo de desaparecer por procesos de eutrofización cultural. (Parra, 1989).

En los últimos 15 años, una de las comunas que lidera con el mayor crecimiento de superficie construida y densidad poblacional, es San Pedro de la Paz. (Rojas, 2018; Martínez et al., 2016). Según los datos entregados por el CENSO 2017 alcanza una población de 131.808 personas, con una tasa de crecimiento anual de 1,7% y 3,3% entre los años 1992- 2002 y 2002- 2017, respectivamente. De igual manera, se observa un crecimiento intercensal del 16% que aumenta a 32% entre los períodos de 1992 al 2002 y de 2002 al 2017, respectivamente (Figura 1) (INE, 2017; EULA, 2018). El origen de esta expansión urbana se da en la década de 1960, cuando se construyó la “Villa San Pedro” en el sector norte de la cuenca. (Parra, 1989).

Esta comuna forma parte de la cuenca del río Biobío, en la cual se encuentra el sistema lacustre de San Pedro conformado por el Estero Los Batros, Laguna Grande y Laguna Chica. Estos dos últimos cuerpos de agua corresponden a

lagos costeros de agua dulce, pertenecientes al sistema denominado lagos “Nahuelbutanos” septentrionales, los cuales se encuentran rodeados de conjuntos urbanos, acompañado de una considerable actividad turística y recreativa. (Parra et al., 2003). Un ejemplo de esto es Laguna Chica, cuyas riberas y laderas han sido ocupadas con balnearios, clubes náuticos, casas particulares y centros recreacionales, no obstante, esta intensa utilización ha contribuido a la contaminación de sus aguas. (Parra, 2013).

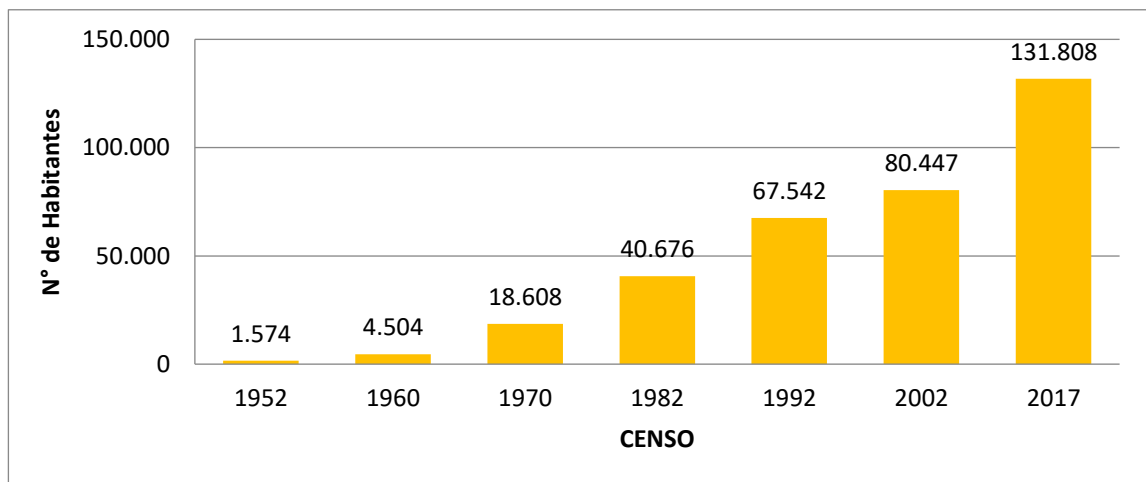


Figura 1. Evolución demográfica de San Pedro de la Paz (1952 - 2017).

Fuente: Adaptación de Secpla, (2018).

1.3.1. Uso de suelo de la cuenca lacustre

Desde un punto de vista histórico, los lagos de San Pedro han experimentado diversos cambios en el uso de suelo durante los últimos 500 años, reflejados en cuatro períodos diferentes, tal como se muestra en la Figura 2. (Cisternas et al., 1999; Urrutia, 2000).

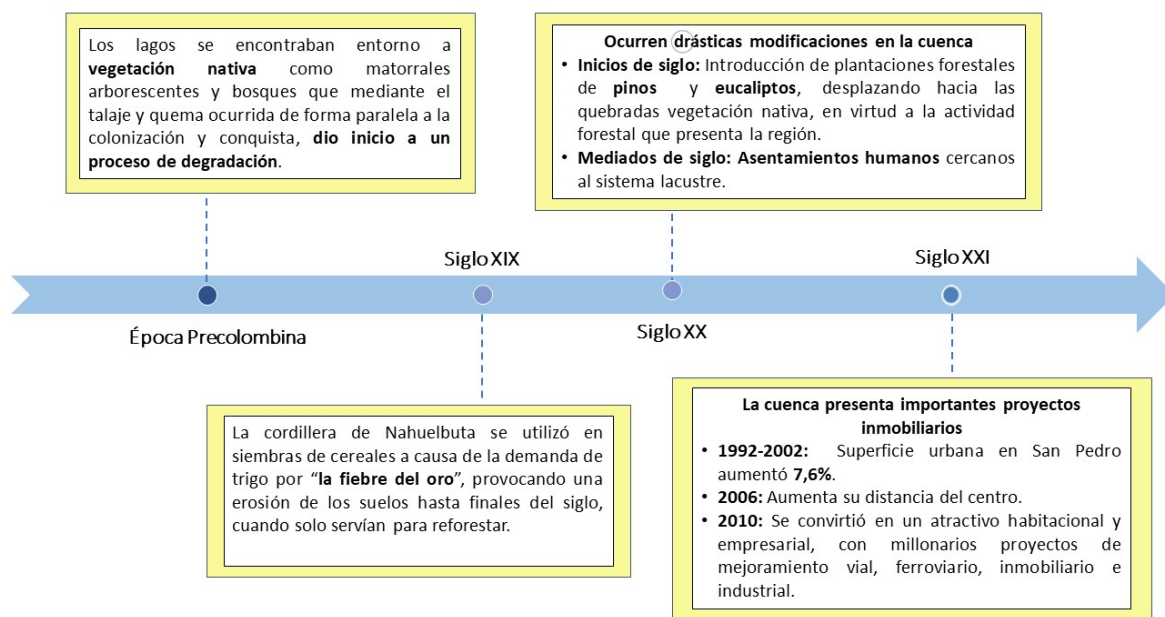


Figura 2. Línea de tiempo del cambio de uso de suelo en la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz en los últimos 500 años.

Fuente: Elaboración propia en base a Cisternas et al., 1999; Cisternas et al., 2001; Urrutia, 2000; Oliver & Zapatta, 1950; Morales, 1989; Campos-Harriet, 1982; Parra et al., 2003; Aztorquiza, 1929; Contesse, 1987; Parra, 1989; EULA, 2018.

Si bien el sistema lacustre de San Pedro ha tenido un impacto antrópico desde la llegada de los españoles al territorio nacional, sus mayores alteraciones en el uso suelo se produjeron en los últimos 70 años. (Cisternas et al., 1999). En la actualidad, San Pedro de la Paz se ha convertido en una de las comunas más importantes del Gran Concepción. (EULA, 2018). Para mayor detalle de la historia de San Pedro de la Paz, véase Anexo 1, extraído del Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) de San Pedro de la Paz 2012 – 2016.

Por otra parte, la Figura 3 muestra los diferentes usos de suelo que presenta la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz en esta última década, evidenciándose

12 usos distintos, de los cuales se observan principalmente el urbano e industrial, bosque mixto, bosque nativo y en su mayoría plantaciones forestales, siendo esta ultima la que habría acorralado a la vegetación nativa hacia las quebradas, en virtud de la intensa actividad forestal que presenta la región del Biobío. (Parra et al., 2003; Urrutia et al., 2000).

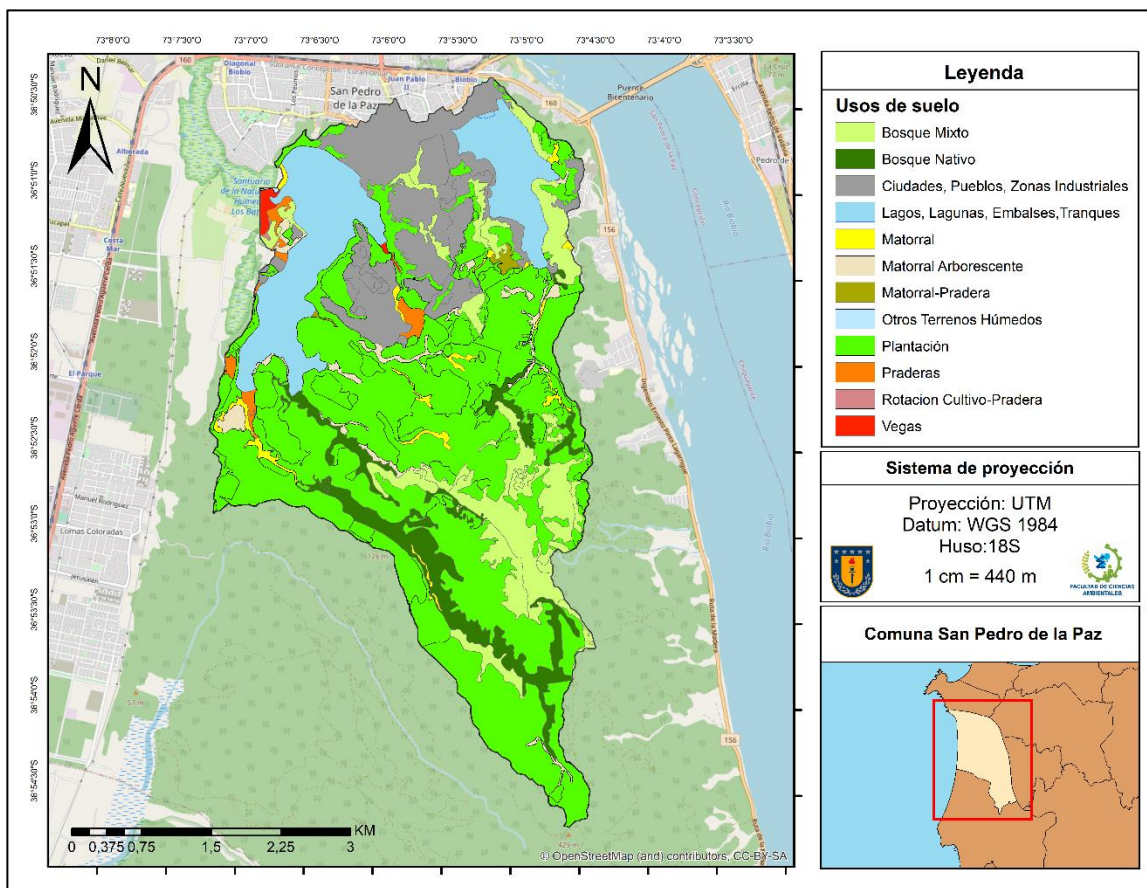


Figura 3. Usos de suelo de la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz.

Fuente: Elaboración propia en base al catastro usos de suelo y vegetación por región, región del Biobío. (CONAF, 2017).

Además, la Tabla 4 muestra la superficie en hectáreas (ha) y el porcentaje de ocupación (%) de cada uno de los usos de suelo. Demostrando que las plantaciones forestales ocupan prácticamente la mitad de la cuenca (50,5%),

seguido por la superficie urbana e industrial (13,7%), ambos cuerpos de agua (12,7%) y el bosque mixto (11,3%).

Tabla 4. Superficies y porcentajes de ocupación de los usos de suelo en la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz.

USO DE SUELO	SUPERFICIE (HA)	% OCUPACIÓN
Bosque mixto	221,01	11,3
Bosque nativo	132,41	6,8
Urbano e industrial	268,21	13,7
Lagos, Lagunas	248,73	12,7
Matorral	25,57	1,3
Matorral arborescente	37,09	1,9
Matorral - Pradera	5,39	0,3
Otros terrenos húmedos	0,41	0,02
Plantaciones	986,55	50,5
Praderas	18,95	0,97
Rotación de cultivos	0,65	0,03
Vegas	6,55	0,3

Fuente: Elaboración propia en base al catastro usos de suelo y vegetación por región, región del Biobío. (CONAF, 2017).

1.3.2. Estudios y medidas aplicadas

Desde aproximadamente 40 años se han realizado numerosos estudios, donde distintas instituciones públicas y privadas han contribuido a entender el estado de los lagos y lagunas de Concepción. Un ejemplo es la Dirección General de Aguas (DGA) que desde el año 1983, comenzó a realizar estudios para establecer una red de calidad de agua en los lagos y embalses de todo Chile, con el fin de determinar sus condiciones tróficas y sus cambios por actividades antrópicas. A continuación, se presentan alguno de los estudios y medidas realizados en el sistema lacustre de San Pedro (Tabla 5):

Tabla 5. Estudios y medidas entorno a los lagos de San Pedro de la Paz.

Estudio	Descripción
Parra (1989)	Señala que las aguas de la Laguna Grande de San Pedro están deterioradas debido al desarrollo urbano que ocasionó una eutrofización cultural provocada por la Villa San Pedro.
Cisternas et al. (2000)	Señala que a través de datos de sedimentos y comunidades de diatomeas (organismos altamente sensibles a los cambios tróficos), han evidenciado una rápida evolución entre las condiciones de ambos lagos de San Pedro de la Paz.
Parra et al. (2003)	Según parámetros físicos y químicos de calidad de agua, se demostraba una buena calidad del agua para Laguna Chica, a diferencia de Laguna Grande, que demostraba una moderada calidad de sus aguas respecto a los mismos parámetros.
DGA, (2018)	Se habría propuesto implementar medidas de control enfocado al fósforo, provocado por descargas superficiales de vertidos domiciliarios e industriales, con el fin de realizar un manejo de la condición trófica por medio de un “análisis de la condición trófica largo plazo” entre los años 2000 al 2013.
Parra et al., (2016) Parra et al., (2015)	El Centro EULA de la Universidad de Concepción el año 2016, presentó un estudio FONIS donde se identifica, monitorea y evalúa el riesgo de la población de Concepción ante la presencia de cianobacterias y cianotoxinas en sus lagos urbanos, incluyendo los de San Pedro de la Paz.
Medidas	Descripción
Informe ambiental del PRMC 2017.	Se han definido criterios de sustentabilidad en donde uno de sus puntos cuenta con la valoración de los recursos naturales, tales como lagunas, ríos, humedales, entre otros (MINVU, 2018). A Diferencia del plan anterior (2003) que presentaba un incorrecto tratamiento de las áreas de valor natural.
Municipalidad de San Pedro de la Paz	Se Solicita una declaratoria de utilidad pública para el humedal Los Batros y Laguna Grande, donde “se declara Parque intercomunal Humedal Los Batros y Borde Laguna Grande de acuerdo con el polígono de sitio prioritario definido por Medio Ambiente” (MINVU, 2018). En efecto, en enero del año 2020, se aprueba la creación de dos Santuarios de la Naturaleza, donde el área que se declara y protege es el humedal Los Batros y la Laguna Grande.

Fuente: Elaboración propia en base a Parra 1989; Cisternas et al., 2000; Parra et al., 2003; DGA, 2018; Parra et al., 2016; Parra et al., 2015; MINVU, 2018.

1.4. Aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) corresponden a una serie de objetivos y metas a nivel global adoptado por los diferentes países miembros de la Organización de Naciones Unidas (ONU) en el año 2015, basado en la Agenda 2030, con el propósito de abordar problemas urgentes en temas económicos, sociales y ambientales como lo son: el fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz y prosperidad a las personas para el año 2030 (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2021). Es por ello, que los 17 objetivos con sus 169 metas se encuentran interrelacionados en busca de una verdadera alianza entre los países participantes, presentando ODS universales, transformadores y civilizatorios, además de una importante herramienta en temas de planificación a nivel local y global, políticas públicas, monitoreos, entre otras, que terminan constituyendo un gran apoyo en sus caminos hacia un desarrollo sostenible, inclusivo y en armonía con el medio ambiente (CEPAL Naciones Unidas, 2021; Ministerio de Medio Ambiente (MMA), 2021).

En este sentido, este estudio busca apoyar el cumplimiento de los ODS y la agenda 2030, enfatizando en el objetivo 6 (Agua limpia y saneamiento) y objetivo 11 (ciudades y comunidades sostenibles), específicamente en el objetivo 6.6 para la protección y restablecimiento de los lagos de San Pedro de la Paz y en el 11.3 y 11.b para que existan políticas y planificaciones urbanas sostenibles en equilibrio con el cuidado ambiental, capaces de mitigar y adaptarse al cambio climático. (ONU, 2021).

De acuerdo a lo anteriormente señalado, en esta investigación se pretende evaluar el efecto en la expansión urbana y su relación con los parámetros de estado trófico de los dos cuerpos lacustres de la comuna de San Pedro de la Paz, Laguna Grande y Laguna Chica, cuyo sector norte e “interlagunal” de su cuenca, ha experimentado un importante desarrollo urbano en las últimas

décadas, ocupado principalmente por la Villa San Pedro, Andalué, El Venado, Idahue, entre otros, lo cual ha contribuido a eutrofizar estos cuerpos de agua a través de aguas servidas, desechos urbanos, aguas lluvias y la fuerte modificación de sus áreas litorales, riberas y laderas. (Parra, 2013).

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. Hipótesis

La expansión urbana en la cuenca de Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz ha provocado un aumento del estado trófico de estos sistemas lacustres durante los últimos 30 años.

2.2. Objetivo general

Evaluar el efecto de la expansión urbana sobre el estado trófico de los lagos Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz en los últimos 30 años.

2.3. Objetivos específicos

- 1) Determinar los cambios en los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz durante los últimos 30 años.
- 2) Determinar los cambios en la expansión urbana y su relación con los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica durante los últimos 30 años.
- 3) Identificar medidas de recomendación para la protección de la calidad de agua de Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca lacustre y a los lagos Laguna Grande ($36^{\circ}50'51''\text{S}$ $73^{\circ}06'36''\text{O}$) y Laguna Chica ($36^{\circ}50'40''\text{S}$ $73^{\circ}05'15''\text{O}$) ubicados en la comuna de San Pedro de la Paz, la cual limita al sur con la comuna de Coronel, al norte con la ribera del río Biobío, al oeste con el Océano Pacífico y al este con la Cordillera de Nahuelbuta, situadas aproximadamente a cinco kilómetros de la ciudad de Concepción. (Figura 4). Este sistema lacustre está insertado en la parte noroccidental de la cordillera de Nahuelbuta, cordón montañoso que alcanza 400 metros de altura del cual se desprenden valles y quebradas. (Cruces et al., 2001; Cisternas et al., 1999). En cuanto a sus morfologías, ambos lagos se encuentran interconectados entre sí, cada uno está conformado por cubetas, con extensas planicies en el fondo teniendo sus mayores profundidades en los sectores centrales (Parra, 2013; Cisternas, 1999). Por una parte, Laguna Chica posee una cuenca de hidrográfica de 4,5 km², tiene una profundidad máxima de 18 m y un espejo de agua de 0,82 km². Mientras que, Laguna Grande posee una cuenca hidrográfica de 12,7 km², una superficie de 1,55 km² de su espejo de agua y una profundidad máxima de 13,5 m (Tabla 6) (Parra et al., 2003; Parra et al., 2005). Los aportes de agua para ambos sistemas lacustres son principalmente pluviales, es decir, por precipitaciones y escorrentías superficiales. (Cisternas et al., 2000; Parra, 2013).

La condición climática en la cuenca se define como templado – cálido, de tipo mediterráneo con presencia de precipitaciones invernales y estación seca prolongada, debido al efecto climático de barrera ejercido por la cordillera de Nahuelbuta. (Fuenzalida, 1971; Parra et al., 2003).

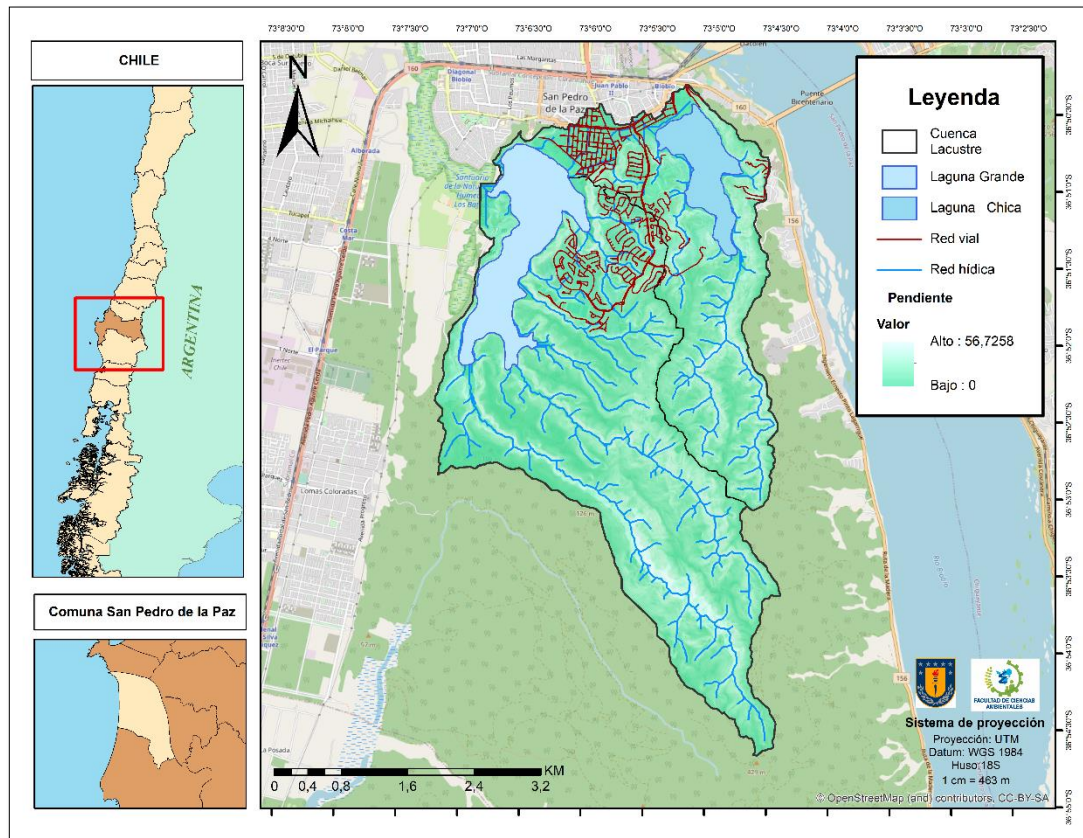


Figura 4. Localización de Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz.

Fuente: Elaboración propia con herramientas de ArcGIS 10.4.1.

Estos sistemas son denominados como “lagunas” ya que los habitantes utilizaban ese nombre para referirse a ellos debido a su pequeño tamaño (Almanza et al., 2016a). Sin embargo, en el presente estudio, este concepto no corresponde a los sistemas estudiados ya que se considera a una laguna como un sistema semi-cerrado, transicional, con ingreso de agua de mar y separado de este por una barrera. Por lo tanto, Laguna Chica y Laguna Grande son consideradas como lagos, un cuerpo de agua que no tiene contacto con el mar, donde su origen y geología determinan sus características a pesar de su pequeño tamaño y profundidad. (Strahler & Strahler, 1989).

En la Tabla 6 se resumen las principales características morfométricas de Laguna Chica y Laguna Grande acompañado de los principales usos de la cuenca y de los cuerpos de agua.

Tabla 6. Principales características morfométricas de los lagos Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz.

Parámetros	L. Chica	L. Grande
Latitud (S)	36° 51'	36° 51'
Longitud (W)	73° 05'	73°06'
Altura (m.s.n.m.)	5.0	4.0
Profundidad máx. (m)	18.0	13.5
Profundidad media (m)	10.3	8.3
Largo máx. (km)	1.9	2.7
Ancho máx. (km)	0.87	1.4
Perímetro (km)	5.7	9.4
Área del lago (km ²)	0.82	1.55
Área cuenca (km ²)	4.5	12.7
Volumen (km ³)	0.0086	0.0128
Principales usos de la cuenca	Recreativo Turismo Residencial Forestal	Recreativo Turismo Residencial Forestal
Principales usos del cuerpo de agua	Recreativo Turismo	Recreativo Turismo Receptor

Fuente: Adaptación de Parra et al., 2003 y Parra et al., 2005.

3.2. Supuestos

Para el desarrollo de la presente investigación se consideraron los siguientes supuestos:

- Las concentraciones de los parámetros de estado trófico con valores bajo al límite de detección se consideraron con los valores límite de 0,01 mg/L (NT) y 0,006 mg/L (PT).

- Las estaciones de muestreo se encontraron siempre en el mismo lugar y se consideraron representativas a toda la columna de agua.
- No se consideran en este estudio, la actividad turística en la zona, otras coberturas de uso de suelo (agrícola o forestal), ni las fases de construcción de las ciudades alrededor de Laguna Grande y Laguna Chica.
- Si se considera en este estudio, los cambios de superficie de la cobertura urbana sobre los parámetros de estado trófico de los lagos en estudio.

3.3. Objetivo I. Determinar los parámetros del estado trófico en los últimos 30 años

Este objetivo se divide en dos partes, la primera en el análisis de los parámetros de estado trófico mediante información histórica en los últimos 30 años y la segunda en la determinación del estado trófico actual de los sistemas lacustres estudiados.

3.3.1. Análisis de los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz

El análisis de los parámetros de estado trófico de estos lagos se llevó a cabo mediante la recopilación de información online y bibliográfica de artículos científicos, fichas técnicas de la DGA y, diversos estudios relacionados con los sistemas lacustres estudiados en los últimos 30 años, utilizando buscadores como: Biblioteca UdeC, Web of Science, SciELO, Google Académico, entre otros. Luego de la recopilación de los estudios (Parra, 1989; Cisternas, 2000; Parra, 2003; Figueroa et al., 2008; Parra et al., 2015; DGA, 2018) que presentaron los parámetros físicos, químicos y biológicos del estado trófico (transparencia, fósforo total, nitrógeno total y clorofila-a) en los diferentes años (1990, 2000, 2010, 2015) se realizó una base de datos en Excel y se observó la evolución de los parámetros de manera gráfica. Además, los estudios que presentaron las bases de datos de los parámetros (Figueroa et al., 2008; Parra

et al., 2015) se reflejaron en un gráfico de caja (*boxplot*) realizado en el *software* Rstudio, con el fin de resumir, describir y analizar los aspectos generales y particulares de los datos.

3.3.2. Determinar el estado trófico actual

Para la determinación del estado trófico actual, se realizaron 3 campañas (oct. 2020, ene. 2021, may. 2021) de monitoreo de calidad de agua para cada lago (Laguna Chica y Laguna Grande) considerando dos (E1, E2) y tres (E1, E2, E3) estaciones de muestreos respectivamente, a tres profundidades distintas, ya sean superficie (S), medio (M) y fondo (F), con la utilización de una botella Niskin de una capacidad de 5 litros (Tabla 7). En terreno, se determinaron las localizaciones definitivas que fueron georreferenciadas por medio de la utilización de un GPS Gamin modelo GPSmap 62sc (Tabla 8). Posteriormente, se elaboró un mapa con los puntos muestreados de cada cuerpo de agua (Figura 5, Figura 6). Además, en cada estación de muestreo se realizaron perfiles limnológicos mediante un CTD marca *Idronaut* modelo *Ocean Seven 305 Plus*, con sensores de pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, clorofila-a, profundidad. En el caso de la transparencia se realizaron mediciones *in situ* por medio de un disco Secchi. Cabe destacar, que el muestreo de calidad de las aguas se efectuó siguiendo los requerimientos de la NCh ISO 5667-6/2015.

Tabla 7. Monitoreos de calidad de agua para cada lago.

Lago	Campaña de muestreo	Número de estaciones	Profundidades
Laguna Chica	3 (oct.2020, ene.2021, may.2021)	2 (E1, E2)	3 (S,M,F)
Laguna Grande	3 (oct.2020, ene.2021, may.2021)	3 (E1, E2, E3)	3 (S,M,F)

*S= Superficie, M= Medio, F= Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

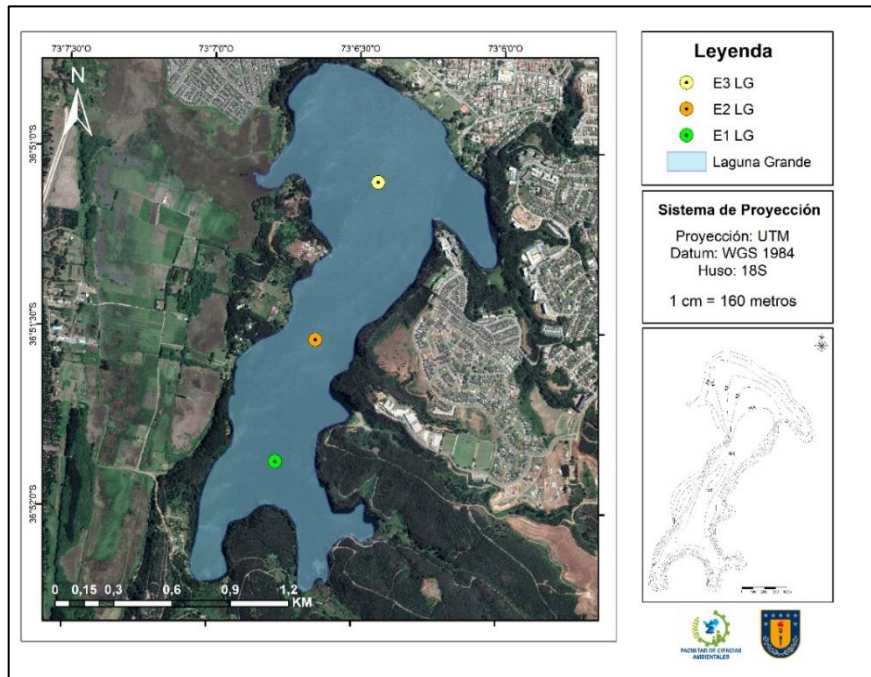


Figura 5. Estaciones de muestreo Laguna Grande. (LG).

Fuente: Elaboración propia con herramientas de ArcGis 10.4.1.

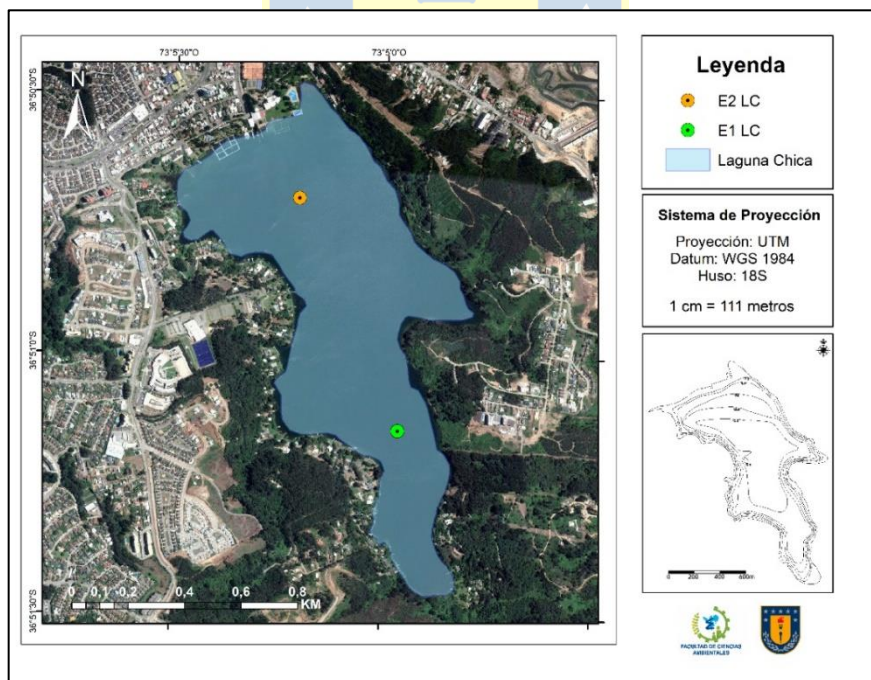


Figura 6. Estaciones de muestreo Laguna Chica. (LCh).

Fuente: Elaboración propia con herramientas de ArcGis 10.4.1.

Tabla 8. Coordenadas de estaciones de muestreo de Laguna Grande (LG) y Laguna Chica (LCh) de San Pedro de la Paz.

Laguna	Estación	Coordenadas UTM (Datum, Huso)
LG	E1	668213 E - 5918499 N (WGS 1984, 18S)
	E2	668420 E - 5919124 N (WGS 1984, 18S)
	E3	668744 E - 5919932 N (WGS 1984, 18S)
LCh	E1	670924 E - 5919790 N (WGS 1984, 18S)
	E2	670579 E - 5920618 N (WGS 1984, 18S)

Fuente: Elaboración propia con herramientas de ArcGis 10.4.1.

Las metodologías y límites de detección para cada uno de los parámetros que se analizaron en la columna de agua se resumen en el Anexo 2, donde se dio principal énfasis en los parámetros de estado trófico como la clorofila-a, fósforo total, nitrógeno total y transparencia del agua. Los análisis químicos se realizaron en el laboratorio de Química Ambiental del Centro EULA- Chile acreditado por el Instituto Nacional de Normalización para la Norma Chilena Nch ISO 17.025/05.

Una vez acabada la etapa de terrenos y análisis de datos, se evaluó la condición trófica de los lagos. A pesar que estas descripciones tróficas no tengan un significado absoluto, es un concepto fundamental para la gestión de los lagos (Moreno et al., 2010). Para efectos de este estudio, se utilizaron las clasificaciones propuestas por Smith et al., (1999) y Carlson (1977) para la determinación del estado trófico de los cuerpos de agua.

En la clasificación de Smith et al., (1999) se utilizaron los valores superficiales actuales de la columna de agua para el nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), clorofila a (Chl-a) y, profundidad de disco secchi (DS) de cada estación de muestreo de las diferentes campañas, con el fin de observar la variación trófica entre estaciones y campaña. (Tabla 9).

Tabla 9. Rango de condición trófica según Smith et al., 1999.

CONDICIÓN TRÓFICA	Fósforo total (mg/m ³)	Nitrógeno total (mg/m ³)	Clorofila a (mg/m ³)	Disco Secchi (m)
Oligotrofia	< 10	< 350	< 3,5	> 4
Mesotrofia	10 – 30	350 – 650	3,5 – 9	2 – 4
Eutrofia	30 – 100	650 – 1.200	9 – 25	1 – 2
Hipereutrofia	>100	>1.200	>25	< 1

Fuente: Smith et al., 1999.

Por su parte, el TSI de Carlson (1977) posee una escala de 0 a 100, en la cual varía la condición trófica de oligotrófico a hipereutrófico, considerando las variables físicas y químicas dentro de los lagos (Nojavan et al., 2019), basándose en el nutriente limitante, siendo la mayoría de las veces, el fósforo. (Moreno et al., 2010). A diferencia de la clasificación de Smith, este índice se basa en la relación entre los parámetros de: transparencia del agua (DS), concentración de clorofila-a (Chl-a) y el fósforo total (PT). De igual manera, este TSI se aplicó a los valores superficiales de los parámetros de la columna de agua de cada estación de muestreo de su respectiva campaña, con el fin de observar la variación trófica entre estaciones y campañas a lo largo del año actual. Además, se determinó el TSI con las medias anuales de los valores superficiales de los años 2015 y 2021, con el fin de observar la variación del estado trófico en los lagos. Para ello, los tres indicadores se calcularon de manera matemática en base a sus ecuaciones, dadas a continuación. (Moreno, 2010) (Carlson, 1977):

- a) Transparencia del agua (Ds) dada por medio de Disco Secchi expresada en (m), mediante la fórmula:

$$TSI_{Ds} = 60 - 14,41 \ln Ds \quad (1)$$

b) La concentración superficial del fósforo total (PT) expresada en ($\mu\text{g/L}$ o mg/m^3), mediante la fórmula:

$$\text{TSI}_{Pt} = 14,42 \ln Pt + 4,15 \quad (2)$$

c) La concentración superficial de clorofila a (Chl-a) expresada en ($\mu\text{g/L}$ o mg/m^3), mediante la fórmula:

$$\text{TSI}_{Chl a} = 9,81 \ln Chl a + 30,6 \quad (3)$$

d) El índice de estado trófico general de Carlson (TSI), mediante la fórmula:

$$\text{TSI} = \frac{\text{TSI}_{Pt} + \text{TSI}_{Ds} + \text{TSI}_{Chl a}}{3} \quad (4)$$

Una vez calculados los valores de trofia en base a los parámetros, se determinó el estado trófico según la clasificación de la Tabla 10:

Tabla 10. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua.

GRADO DE TROFÍA	TSI	DS (m)	PT (mg/m^3)	Chl a (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
Hipereutrófico 90 < TSI < 100	100	0,06	768	427

Fuente: Carlson, 1977.

3.4. Objetivo II. Determinar los cambios de la expansión urbana y su relación con los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica durante los últimos 30 años

Para trabajar el área de estudio, se descargó un Modelo de Elevación Digital (DEM) de la comuna de San Pedro de la Paz, con tamaño de celda de 5 x 5 metros, facilitado por el departamento de planificación territorial y sistemas urbanos de la facultad de ciencias ambientales de la Universidad de Concepción, para ser procesado con las herramientas de análisis espacial del *software* ArcGIS 10.4.1. Con el fin de delimitar y obtener las superficies de las cuencas de los sistemas lacustres de forma computacional desde la perspectiva de un Sistemas de Información Geográfico. (SIG).

Para la identificación espacial y temporal del cambio en el crecimiento urbano en las cuencas de Laguna Grande y Laguna Chica, se utilizaron imágenes satelitales preferentemente de Google Earth y “Landsat” ya que sus imágenes son de variados años con una resolución espacial de 30 x 30 metros, con actualizaciones de 16 días (Chuvienco,1995). Las imágenes de alta resolución fueron seleccionadas de Google Earth (<http://earth.google.com>), por medio de las herramientas temporales del *software*, donde se utilizaron cinco imágenes correspondientes a los años 1985, 2002, 2009, 2014 y 2021. Debido a la ausencia de la imagen satelital del año 1990 en Google Earth, se utilizó una imagen Landsat (*Path* 1, *Row* 86) del satélite Landsat 5/ TM, siendo procesada en el *software* ArcGIS 10.4.1, mediante el uso de falso color con el fin de poder distinguir el uso de suelo urbano, con una combinación de las bandas 5 (banda del rojo), 3 (banda del verde), 2 (banda del azul). Para la selección de las escenas, las imágenes no debían presentar ningún tipo de nubosidad, por lo que las capturas son de estaciones como primavera o verano. De igual forma, debían coincidir (en lo posible) con los años que se encontraron los parámetros de estado trófico en los últimos 30 años.

Para la categorización del uso de suelo urbano, se realizó un análisis de las imágenes satelitales en base a la fotointerpretación en Google Earth, con una latitud 36°51'22.72"S, longitud 73° 5'21.25"O y un alcance de 5,75 km para las cinco imágenes satelitales seleccionadas, es decir, a la misma escala de medida. Cabe destacar, que las imágenes seleccionadas de los años 2009 y 2014, se tomó como referencia de fotointerpretación de las categorías usadas en el “catastro Usos de Suelo y vegetación por región- región del Biobío” realizado por la CONAF en años 2008 y 2015. (CONAF, 2017).

Posteriormente, el área de estudio y las coberturas del uso urbano por fotointerpretación se incorporaron al *software* ArcGIS 10.4.1 donde se digitalizaron y procesaron los datos con las diferentes herramientas de geoprocésamiento, para obtener la superficie de las coberturas urbanas de cada año mencionado anteriormente. Para la imagen satelital del año 1990, se utilizó como referencia el polígono del año 1985, agregando las áreas urbanas adicionales mediante fotointerpretación con las herramientas de ArcGIS 10.4.1. Luego, se exportaron esos valores de superficie de la cuenca total y parcial al *software* Excel, para luego ser calculadas las diferencias superficiales y las variaciones porcentuales parciales y totales entre los períodos asignados siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$Z\% = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{Y_{n-1}} \quad (5)$$

$$Z\%_{TOTAL} = \left(\frac{Y_n}{Y_{n-1}} \right) - 1 \quad (6)$$

Donde:

Z%= Variación porcentual parcial

Yn= Superficie urbana inicial

Y_{n-1} = Superficie urbana final

Z% total = Variación porcentual total

El análisis de los cambios de cobertura urbana se realizó entre los períodos definidos en la Tabla 11.

Tabla 11. Períodos de análisis de la dinámica de las coberturas de suelo urbano.

Períodos	Años
1	1985-1990
2	1990-2000
3	2000-2010
4	2010-2015
5	2015-2021

Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior, fue posible obtener las variables cuantitativas, cualitativas y temporales de las distintas coberturas durante los últimos 30 años en toda la cuenca de estudio. Además del cambio entre cada período, se realizó una comparación entre el año más antiguo (1985) y el más actual (2021). Esta comparación consistió en demostrar como cambió el uso de suelo urbano desde hace 30 años.

3.4.1. Relacionar los cambios de la expansión urbana con los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica

La evaluación del nivel de asociación entre las variables crecimiento urbano y estado trófico para los lagos Laguna Grande y Laguna Chica, se llevó a cabo mediante el *software* Rstudio, donde se incorporaron los promedios anuales de los parámetros de estado trófico (de los años 1990, 2000, 2010, 2015, 2020-2021) acompañado de las superficies, sus variaciones y porcentajes entre períodos de las coberturas urbanas de su cuenca total y parcial (de los años

1990, 2000, 2010, 2015, 2021) para ser analizados por el coeficiente de correlación de Pearson, considerado accesible tanto para calcular como para interpretar. Este coeficiente puede ser utilizado para cualquier conjunto de datos con variables cuantitativas siendo expresado con la letra “r”, cuya escala varía de menos uno (correlación negativa perfecta) a uno (correlación positiva perfecta) y, en el caso de ser cero significa que no existe una relación entre las variables (Mukaka,2012; Chee,2015). De igual manera, se calculó la significancia de la correlación de Pearson (*p-value*) con un grado de confianza del 95%.

3.5. Objetivo III: Identificar medidas de recomendación para la protección de la calidad de agua

La identificación para la mejora y protección de la calidad de agua de los lagos estudiados se realizaron en base a los resultados obtenidos. Sin embargo, se obtuvieron mediante la revisión bibliográfica del libro “*Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*” (Cooke et al., 2005), estudios, revistas científicas y sitios web asociados a los sistemas lacustres.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de los parámetros del estado trófico en los últimos 30 años

4.1.1. Análisis de los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica en los últimos 30 años

A continuación, se muestra la recopilación de los estudios que presentaron los parámetros de estado trófico en Laguna Grande y Laguna Chica en los últimos 30 años.

Tabla 12. Recopilación histórica de parámetros de estado trófico en los lagos Laguna Grande (LG) y Laguna Chica. (LCh).

Estudio	Año	Lago	Parámetros				
			DS (m)	P-Total (mg/L)	N-Total (mg/L)	Cl-a (µg/L)	
Cisternas (2000), Scasso (1996), Parra, O., (1989), Parra et al. (1976).	1990	LCh	Mín	4,0	0,003	0,18	0,90
			Máx	7,0	0,53	0,29	2,08
			X	6,8	0,002	0,22	1,20
		LG	Mín	1,8	0,002	0,016	0,90
			Máx	5,0	0,748	0,664	17,0
			X	4,2	0,04	0,27	6,42
Parra et al., (2003), DGA (2018)	2000	LCh	Mín	4,2	0,0012	0,061	-
			Máx	6,3	0,008	0,320	-
			X	5,2	0,005	0,17	-
		LG	Mín	3,0	0,005	0,084	-
			Máx	4,5	0,026	0,340	-
			X	3,7	0,012	0,23	5,7
Figuerola et al., (2008), DGA (2018)	2010	LCh	Mín	5,5	0,01	0,07	-
			Máx	11,2	0,03	0,17	-
			X	8,1	0,02	0,11	-
		LG	Mín	2,0	0,01	0,08	-
			Máx	8,8	0,04	0,24	-
			X	3,4	0,02	0,16	5,4
Parra et al., (2015) DGA, (2018)	2015	LCh	Mín	1	0,01	0,11	0,37
			Máx	6,5	0,02	0,23	19,66
			X	3,8	0,02	0,17	32,49
		LG	Mín	2	0,01	0,26	0,55
			Máx	4	0,03	0,46	41,42
			X	2,5	0,02	0,34	10,65
Datos Actuales (2020-2021)	2021	LCh	Mín	5,6	0,006	0,07	0,37
			Máx	9,4	0,01	0,21	3,38
			X	7,6	0,01	0,15	1,51
		LG	Mín	1	0,006	0,10	1,63
			Máx	9,2	0,1	0,45	14,49
			X	3,5	0,03	0,28	6,67

En la Tabla 12 se observan los valores promedios, mínimos y máximos durante un año de estudio en los lagos Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz, cuyos valores fueron utilizados por los distintos autores para determinar el estado trófico de cada período. En términos generales, los estudios determinaron diferentes niveles de estado trófico mediante distintos

análisis en el tiempo. A pesar que para el año 2010 no se especifican las condiciones tróficas, Laguna Grande, mantuvo su condición eutrófica en el período estudiado, aumentando ligeramente a hipereutrófica en el año 2015. Mientras que Laguna Chica, si tuvo variaciones en su estado trófico, pasando de oligotrofia a mesotrofia e incluso presentando una ligera eutrofia en el año 2015, sin embargo, esto puede deberse al tipo de índice de estado trófico ocupado en ese estudio, el cual no se especifica. Según Parra, 1989, Laguna Grande se clasificó como eutrófica por medio de los valores límites de Rast y Holland, 1988 y debido a los evidentes síntomas que presentaba el lago, tales como: bolsones anóxicos en el fondo, cordones de vegetación invasora, florecimiento de cianobacterias, turbidez, entre otros. Por su parte, Cisternas et al., 2000 señaló que a través de las comunidades de diatomeas (organismos altamente sensibles a los cambios tróficos), se habría evidenciado una rápida evolución entre las condiciones de ambos lagos, indicando que Laguna Chica habría presentado un cambio en el estado trófico de oligotróficas a mesotróficas, mientras que Laguna Grande se habría mantenido en un estado eutrófico. En efecto, Cruces et al., 2001 señalan que el reemplazo de especies de diatomeas puede ser interpretado como un cambio en el estado trófico. Actualmente, los parámetros de estado trófico fueron analizados por el índice de Carlson y la clasificación de Smith.

A continuación, se observan gráficamente los cambios en las medias anuales y los *boxplot* de los parámetros de cada lago en el transcurso del tiempo.

- Transparencia (DS)

En este parámetro se observa que las medias anuales en Laguna Grande varían entre 2,5 y 4,2 metros, evidenciando la mínima en el año 2015 y la máxima en el año 1990. La variación de transparencia en el lago ha demostrado una tendencia a la disminución en los últimos 30 años (Figura 7). Además, en el *boxplot* se aprecia que en la actualidad (2021) existe una alta variabilidad de los

datos cuya desviación estándar es de 2,8, mientras que los años 2010 y 2015 presentaron una menor dispersión con una desviación estándar de 1,90 y 0,78 respectivamente, siendo este último, el año con la menor variabilidad de sus datos. (Figura 8).

Por su parte, las medias anuales de Laguna Chica varían entre 3,8 y 8,1 metros, evidenciando la máxima en el año 2010 y la mínima en el año 2015, para luego nuevamente aumentar en la actualidad. Esta variación demostró cambios importantes en los años 2000 y 2015 donde se produjeron fuertes disminuciones en la transparencia del lago. (Figura 7). Además, en la Figura 8 se observa una mayor dispersión de los datos en el año 2010 cuya desviación estándar es de 1,75, similar a presentada en la actualidad de 1,50. A pesar que el año 2015 demostró una mayor variabilidad de los datos con una desviación estándar de 3,89, esto es debido a que el número de datos registrados en ese último año es bastante menor.

Al comparar ambos lagos, se aprecia que la transparencia en Laguna Chica es bastante mayor que en su lago vecino, incluso alcanzando un promedio de 8,1 metros el año 2015, teniendo en cuenta que su profundidad promedio es de 10,3 metros (Tabla 12). Además, presentó diversas variaciones en este parámetro, a diferencia de Laguna Grande que muestra una clara disminución en la transparencia de sus aguas en la mayoría del período estudiado.

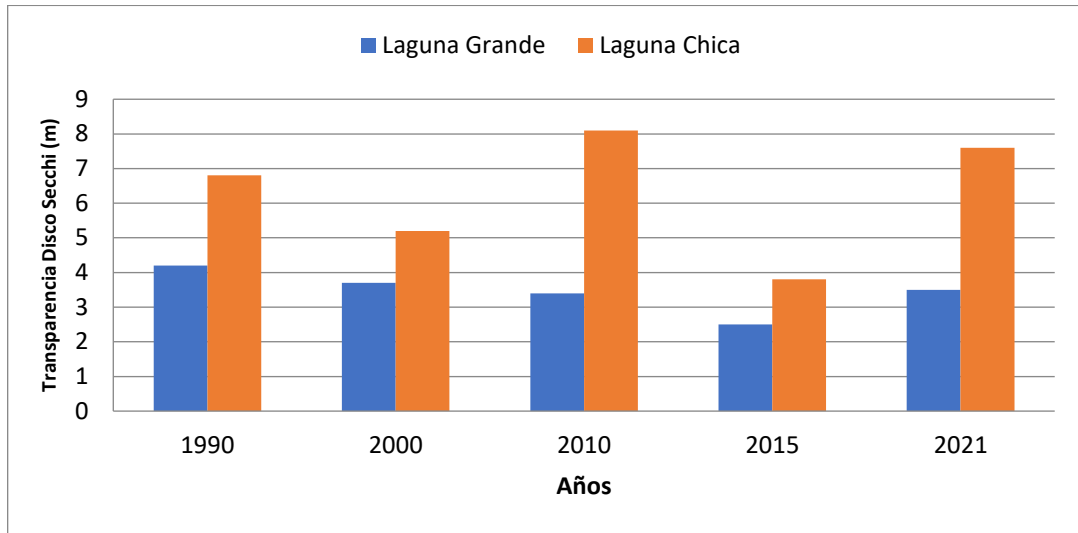


Figura 7. Promedios anuales de la transparencia en el agua (DS) en los últimos

★ ★ ★ 30 años. ★ ★ ★

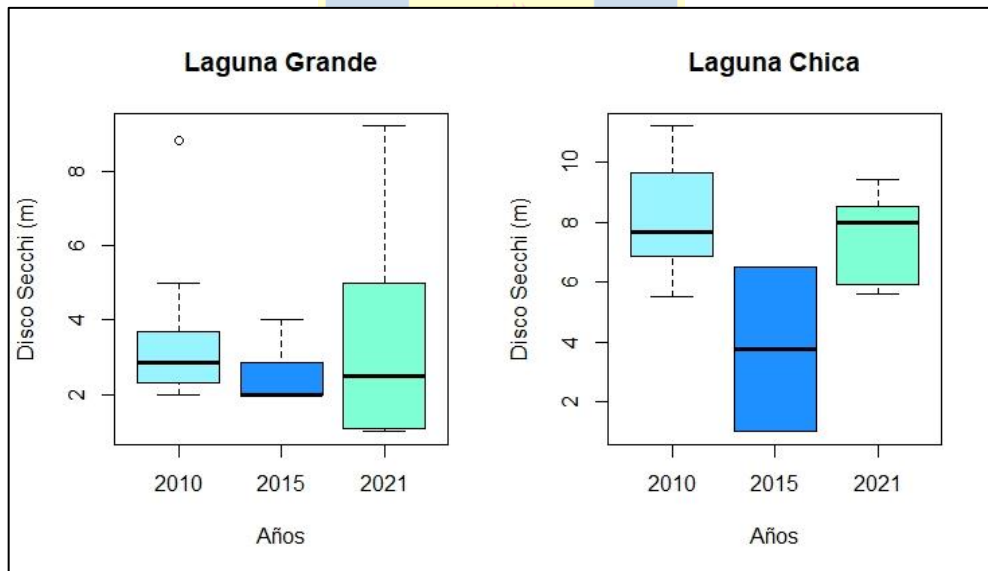


Figura 8. Boxplot del parámetro transparencia del disco secchi (DS) en ambos lagos.

- Fósforo total (PT)

Los promedios anuales de las concentraciones del fósforo total en Laguna Grande tuvieron una variación entre 0,012 y 0,04 (mg/L), evidenciando la máxima en el año 1990 y la mínima en el año 2000, para luego permanecer constante los años 2010 y 2015 en 0,02 (mg/L) y aumentar a 0,03 (mg/L) en la actualidad. Esta variación ha demostrado que hubo un fuerte cambio entre los años 1990 y 2000 que hizo que las concentraciones de fósforo total en el lago disminuyeran considerablemente en comparación con los otros años (Figura 9). Además, en la Figura 10 se aprecia una alta variabilidad en los datos actuales cuya desviación estándar es de 0,03, mientras que los años anteriores muestran los datos más concentrados presentando una desviación estándar de 0,008 y 0,006 en los años 2010 y 2015 respectivamente.

Por otra parte, los promedios anuales de las concentraciones del fósforo total en Laguna Chica tuvieron una variación entre 0,002 y 0,02 (mg/L), evidenciando el mayor en los años 2010 y 2015 y, la mínima en el año 1990. Esta variación demostró que al igual que en Laguna Grande, se produjo un gran cambio que provocó el incremento de este parámetro en el año 2010 y que se mantuvo el año 2015, sin embargo, logra disminuir en la actualidad (Figura 9). Asimismo, los datos actuales presentaron una mayor desviación estándar de 0,975, esto es debido a los valores atípicos que están por sobre la media de este año, ya que la mayoría de los datos se encuentran por debajo del límite de detección. Los años anteriores presentan una variabilidad similar cuya desviación estándar es de 0,0067 y 0,0071 en los años 2010 y 2015 respectivamente, sin embargo, al igual que en el parámetro anterior, esto se debe al número de datos registrados el año 2015. (Figura 10).

Si comparamos estos dos lagos claramente Laguna Chica presenta menores valores promedios de fósforo total en el tiempo estudiado, sin embargo, hubo un período (2010-2015) en el que sus medias anuales estuvieron prácticamente

igualadas con Laguna Grande. Es importante mencionar, las altas concentraciones promedios de fósforo total que presentaba Laguna Grande en el año 1990, siendo posiblemente las más altas en los últimos 30 años. (Figura 9).

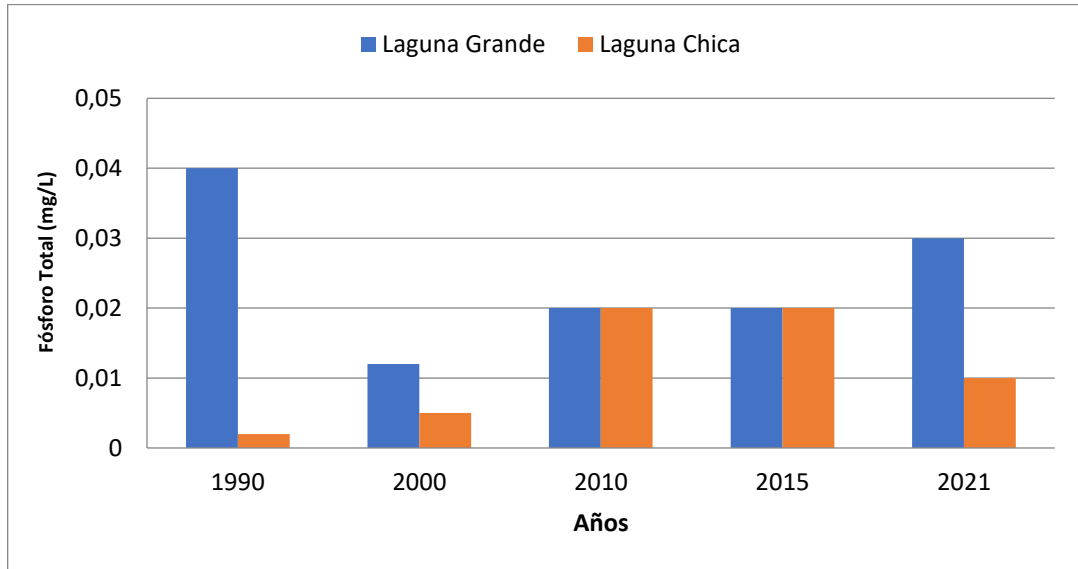


Figura 9. Promedios anuales de fósforo total (PT) en los últimos 30 años.

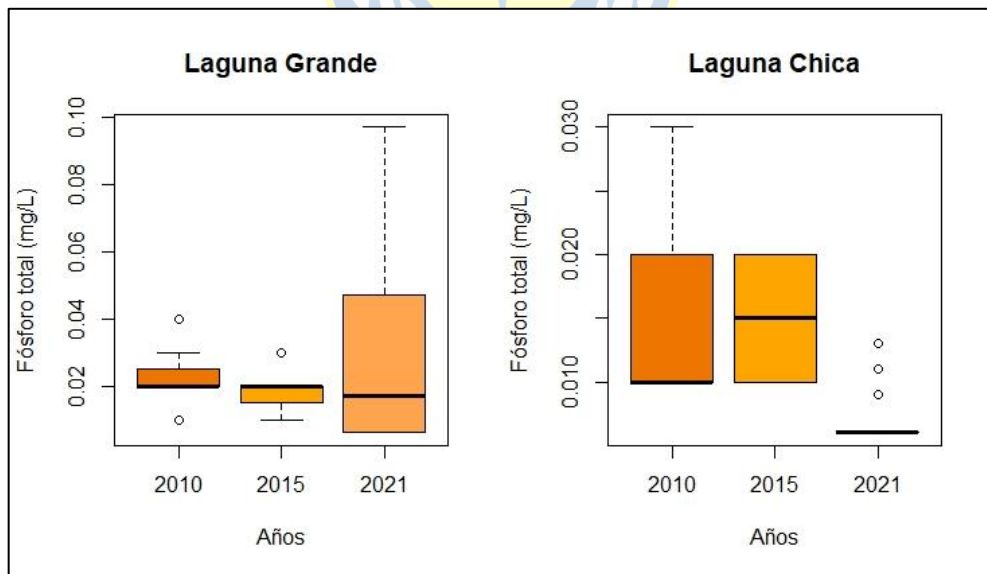


Figura 10. Boxplot del parámetro fósforo total (PT) en ambos lagos.

- Nitrógeno total (NT)

Las medias anuales de las concentraciones del nitrógeno total en Laguna Grande presentaron variación entre 0,16 y 0,34 (mg/L), evidenciándose la menor en el año 2010 y la mayor el año 2015. Este parámetro mostraba una disminución desde el año 1990 hasta 2010, sin embargo, se presentó un notable cambio que provocó su aumento el año 2015, para luego terminar disminuyendo en la actualidad. (Figura 11). Asimismo, en la Figura 12 se observa una mayor variabilidad en los datos actuales con una desviación estándar de 0,15, mientras que los años 2010 y 2015 presentaron una menor dispersión de sus datos con una desviación estándar de 0,045 y 0,066 respectivamente.

En el caso de Laguna Chica, las medias anuales de las concentraciones de nitrógeno total para el período estudiado variaron entre 0,11 y 0,22 (mg/L), evidenciando la máxima en el año 1990 y la mínima en el año 2010. Este parámetro tuvo una disminución entre los años 1990 y 2010, sin embargo, al igual que su lago vecino se ve interrumpido con un cambio en el año 2015, que provocó el incremento del nitrógeno total en Laguna Chica, para luego disminuir en la actualidad (Figura 11). Asimismo, los *boxplot* demuestran una mayor variabilidad de los datos en la actualidad, cuya desviación estándar fue de 0,083, mientras que el año 2010 presentó sus datos más compactos con una desviación estándar de 0,032. Del mismo modo que los parámetros anteriores, el año 2015 presenta una alta variabilidad de sus datos debido al número de sus datos registrados. (Figura 12).

Al comparar ambos lagos, es posible notar un comportamiento similar para este parámetro a lo largo del tiempo, sin embargo, la crecida del año 2015 tuvo una mayor influencia en Laguna Grande la cual presentó la concentración promedio de nitrógeno total más alta en los últimos 30 años. (Figura 11).

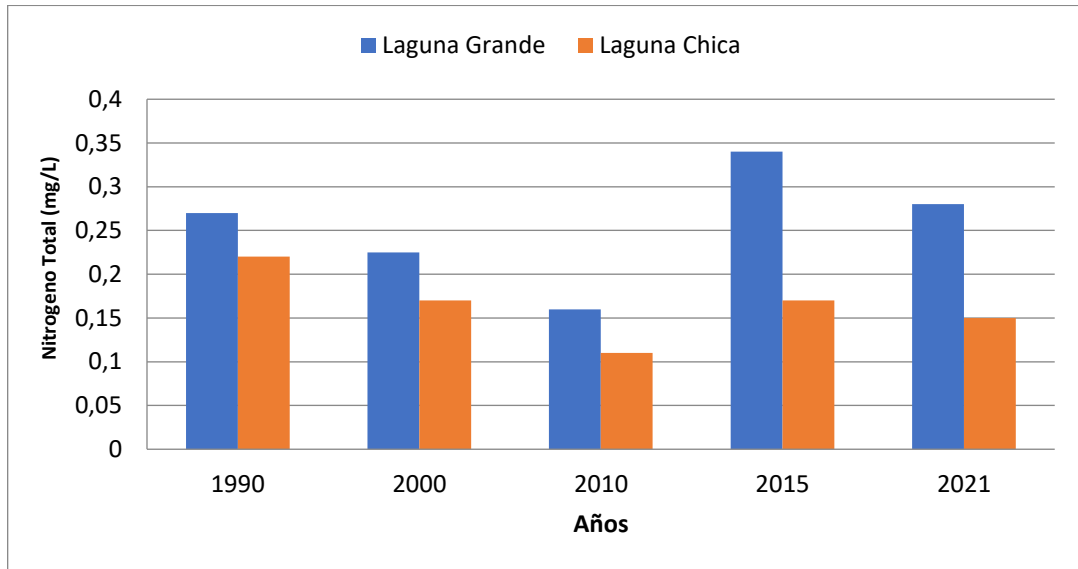


Figura 11. Promedios anuales de nitrógeno total (NT) en los últimos 30 años.

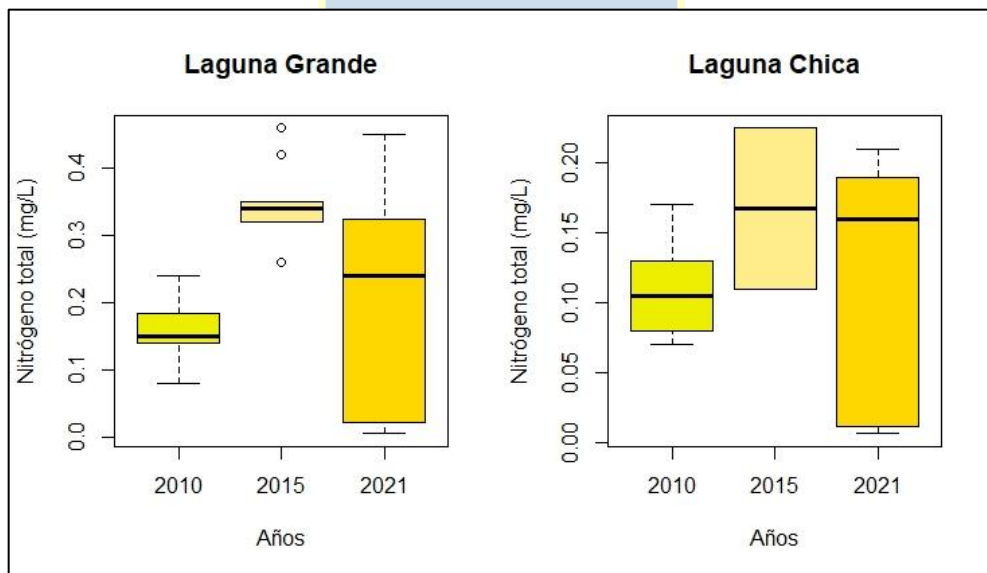


Figura 12. Boxplot del parámetro nitrógeno total (NT) en ambos lagos.

- Clorofila-a (Chl-a)

Las medias anuales de clorofila-a en Laguna Grande varían entre 2,2 y 10,65 ($\mu\text{g/L}$), presentándose el menor en el año 2000 y el mayor en el año 2015. Si

bien, los primeros años hubo una disminución de este parámetro, a partir del año 2000 ha demostrado una tendencia al aumento en el período estudiado, para luego disminuir en la actualidad (Figura 13). Además, sus gráficos de caja demostraron una mayor variabilidad de sus datos en el año 2015 cuya desviación estándar fue de 12,57, esto debido al valor atípico presentado ese año. (Figura 14).

Las medias anuales de clorofila-a en Laguna Chica se mencionaron en menos estudios, por tanto, se presentaron las variaciones en solo tres años debido a la falta de datos de este parámetro, sin embargo, sus valores varían entre 1,2 y 5,43 ($\mu\text{g/L}$), presentándose el menor en el año 1990 y el mayor en el año 2015. Demostrando un considerable aumento el año 2015 para luego disminuir en la actualidad (Figura 13). Asimismo, se muestra una mayor dispersión de los datos en el año 2015 con una desviación estándar de 8,07, esto debido al valor atípico y al igual que los parámetros anteriores, el número de datos registrados ese año. (Figura 14).

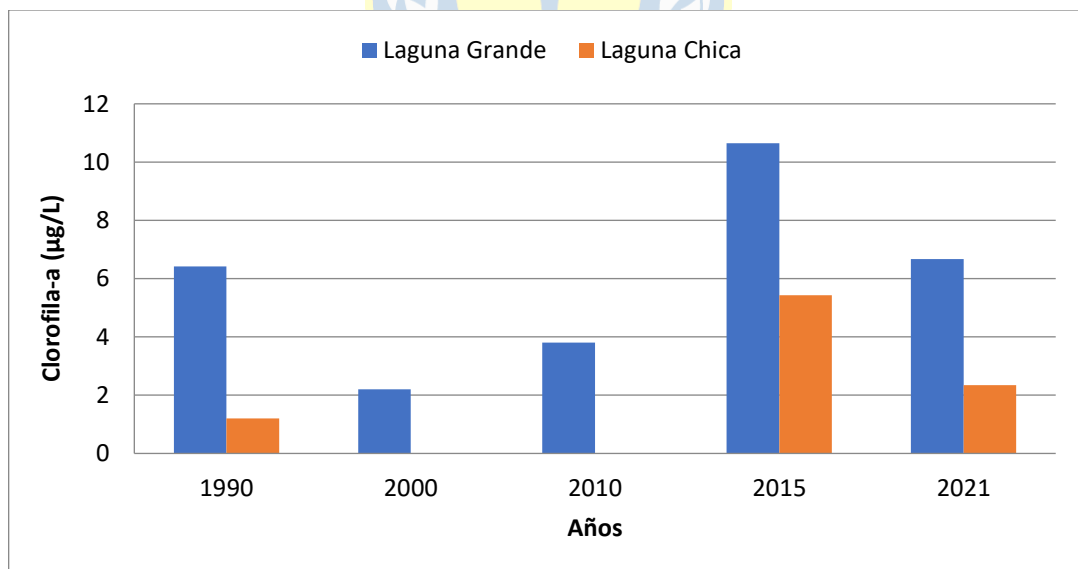


Figura 13. Promedios anuales de la clorofila-a (Chl-a) en los últimos 30 años.

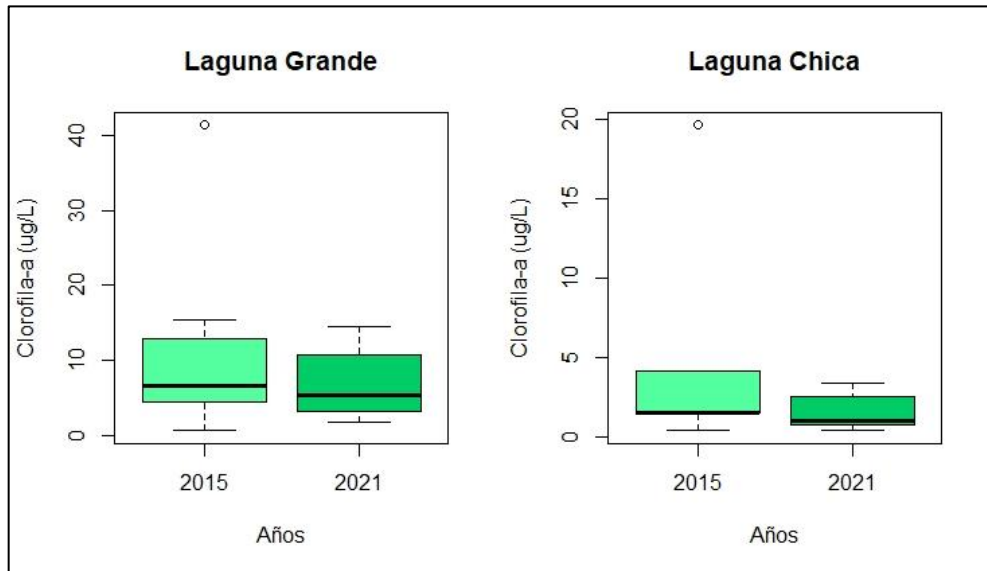


Figura 14. Boxplot del parámetro clorofila-a (Chl-a) en ambos lagos.

En relación con todos los cambios que han sufrido estos dos lagos en el período estudiado, se presentaron eventos particulares que provocaron un incremento o disminución en los parámetros de estado trófico en los diferentes años. Según Parra 1989, durante la época de 1980 y 1990 las aguas de la Laguna Grande estaban deterioradas debido al desarrollo urbano de la Villa San Pedro que ocasionó una eutrofización cultural. Este crecimiento urbano, habría contribuido al aporte de nutrientes por medio de desagües de aguas servidas, evacuaciones de aguas lluvias que transportaban desechos naturales y antrópicos hacia el cuerpo de agua, vertimientos de basura a orillas o dentro del lago y la existencia de posibles conexiones clandestinas de alcantarillado en el emisario de Laguna Chica, que posteriormente evacuaba en Laguna Grande. Por lo cual, estaría relacionado con las elevadas cantidades promedio de nitrógeno total y principalmente fósforo total presentadas en esa época, que habría llevado a Laguna Grande a presentar un estado eutrófico. (Tabla 12). Sin embargo, el año 2000 estos parámetros disminuyeron considerablemente (Figura 9, Figura 11), lo que podría atribuirse a lo indicado en Parra et al., 2003,

donde a principios del año 1990 ambos lagos habrían registrado floraciones acuáticas o “*blooms*” de algas, no obstante, en los años 1992 y 1993, se habrían desviado y controlado los cursos de aguas servidas que llegaban a los cuerpos lacustres, produciendo una evidente disminución de las floraciones algales y un cambio en las condiciones ambientales de los lagos.

De acuerdo con Figueroa et al., 2008, el año 2007- 2008, Laguna Grande habría presentado condiciones óptimas para el desarrollo de *Egeria densa*, la cual es una planta acuática sumergida y enraizada, sin embargo, ésta era consumida por cisnes y taguas que controlaban su crecimiento a la superficie. De acuerdo con Phillips et al., 1978, en la eutrofización los cambios ocurren de forma progresiva dependiendo del gradiente de la concentración de nutrientes, y en lagos someros éstos se evidencian mayormente en la alteración de la competencia de los productores primarios, de tal forma, que el aporte de nutrientes va estimulando el crecimiento de fitoplancton lo cual va disminuyendo la luz en la columna de agua y en los sedimentos, de este modo se limita el crecimiento de macrófitas sumergidas. Si bien, no tiene relación con el objetivo de este estudio, es importante tener en consideración la competencia entre el fitoplancton y las macrófitas al interior de un lago.

Posteriormente el año 2015, se aprecia un notorio crecimiento en las medias anuales de los parámetros con respecto a los años anteriores, un posible evento causal es atribuido a lo ocurrido en los lagos posterior al terremoto y tsunami del año 2010, en el cual cerca del 70% de los habitantes de Concepción utilizaron los lagos urbanos para abastecerse con suministros de agua con el fin de suplir las diversas necesidades básicas en un estado de catástrofe donde se había cortado el servicio de distribución del recurso, poniendo en evidencia la importancia de estos sistemas, sin embargo, también fueron ocupados como lugar de botaderos de basura y escombros post-terremoto (Almanza et al., 2016a). Este importante evento generó la

preocupación del mundo científico, ya que gran parte de los lagos urbanos utilizados por la población para usos turísticos, recreativos e incluso de consumo, habrían reportado la presencia de cianobacterias capaces de producir algún tipo de toxina. De acuerdo con Almanza et al., 2013 y Almanza et al., 2016b, los años posteriores se habrían evidenciado la presencia de diferentes floraciones algales de naturaleza tóxica en los lagos Lo Galindo, Tres Pascualas y Laguna Grande, para luego, Parra et al., 2016 plantear un estudio con el objetivo de identificar, monitorear y evaluar el riesgo de la población del Gran Concepción ante la presencia de cianobacterias y cianotoxinas en las lagunas de la ciudad, de las cuales estaban incluidas en el estudio, Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz. Cabe destacar, que las floraciones de las microalgas son consideradas como indicadores del proceso de eutrofización, dejando al descubierto la cantidad de cambios estructurales y de composición en las comunidades biológicas, que van generando una alteración en el sistema lacustre, que luego se traduce en el crecimiento masivos de microalgas, invasiones de especies, disminución en la transparencia y en las concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua, entre otras, que finalmente van provocando una situación de eutrofización en los cuerpos de agua, los cuales en los últimos años han sido utilizados en situaciones recreacionales, turísticas; pero también en extremas o de emergencia.

Otro factor importante, es el aumento de las precipitaciones presentadas entre los años 2013 y 2015, las cuales pudieron ser otro eventual caso de la variación en los parámetros. (Figura 15). Esto debido a la rápida urbanización, la cual aumentaría las superficies impermeables acelerando la escorrentía superficial que, por consiguiente, arrastraría contaminantes urbanos y nutrientes provocando cambios en las cargas que ingresan al lago. (Hallegatte et al., 2013; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2014).

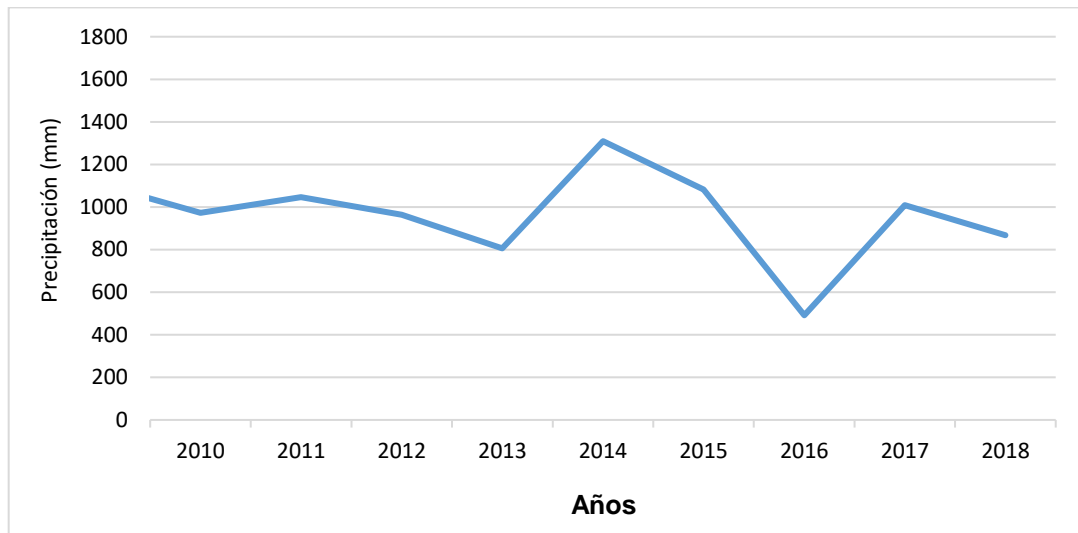


Figura 15. Precipitaciones estación meteorológica San Pedro de la Paz.

Fuente: Adaptación de registros de DGA, 2021.

De hecho, el plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias indica que los principales puntos de descarga de aguas lluvias de San Pedro de la Paz, lo constituyen el río Biobío, Laguna Grande, Laguna Chica y el estero Los Batros, siendo este último la disposición final de las aguas captadas por ambos lagos. (MOP, 2002).

El lago Laguna Grande drena las aguas lluvias de una parte del sector de la Villa San Pedro y la totalidad de Andalué a través de 7 colectores, a esto se le suma el aporte de caudal desde Laguna Chica y el drenaje de los canales Apolonio Benítez (conduce las aguas lluvias del loteo Parque Residencial Miramar) y Michimalonco (recibe la escorrentía de la cuenca de Laguna Chica), teniendo un área aportante total de 11,4 Km². Por su parte, Laguna Chica recibe los aportes de la escorrentía generada por la urbanización de Idahue por medio de sus quebradas, lo cual se traduce en un área aportante de 0,12 Km², sin embargo, este cuerpo de agua drena un área total de 4,4 Km² de tipo urbano y no urbano. (Tabla 13) (MOP, 2002).

Tabla 13. Colectores y canales de aguas lluvias que descargan en Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz.

Sistema	Colector	Área aportante (km²)	
Laguna Grande	Las Encinas	1,44	
	Los Fresnos	0,87	
	Andalúe	0,042	
	Dalcahue	0,12	
	Los Canelos	0,08	
	Nahuelbuta	0,081	
	Ralún	0,029	
	Laguna Chica	5,25	
	Canal		
	Michimalonco	3,43	
Apolonio Benítez	0,039		
TOTAL		11,4	
Laguna Chica	Colector		
	Idahue1	0,075	
	Idahue2	0,045	
TOTAL		0,12	

Fuente: Adaptación de MOP, 2002.

En los diagramas unifilares se muestran de manera esquemática la distribución de la red de colectores, áreas aportantes y el cuerpo de agua receptor de las descargas de cada sistema. (Figura 16, Figura 17).

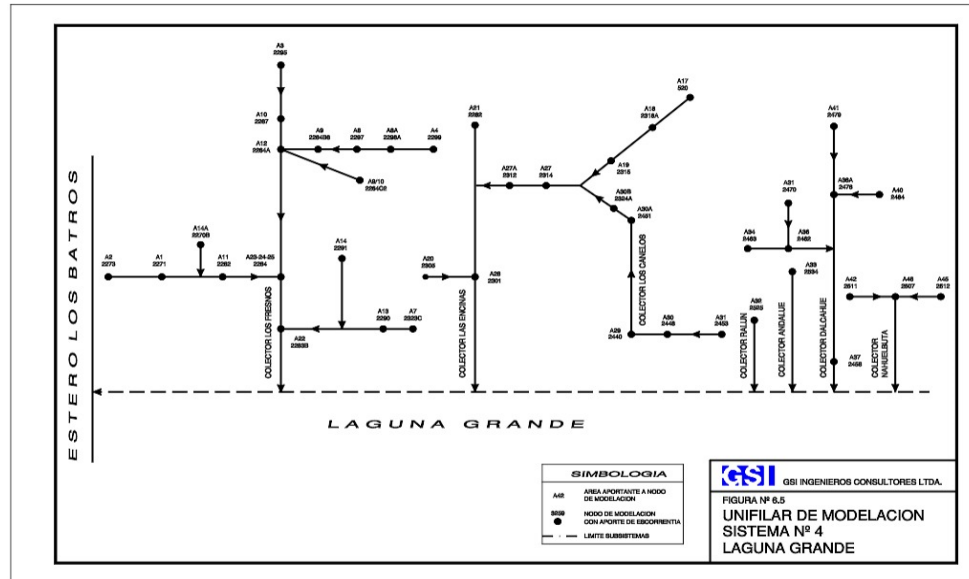


Figura 16. Colectores que descargan en Laguna Grande.

Fuente: Extraída de MOP, 2002.

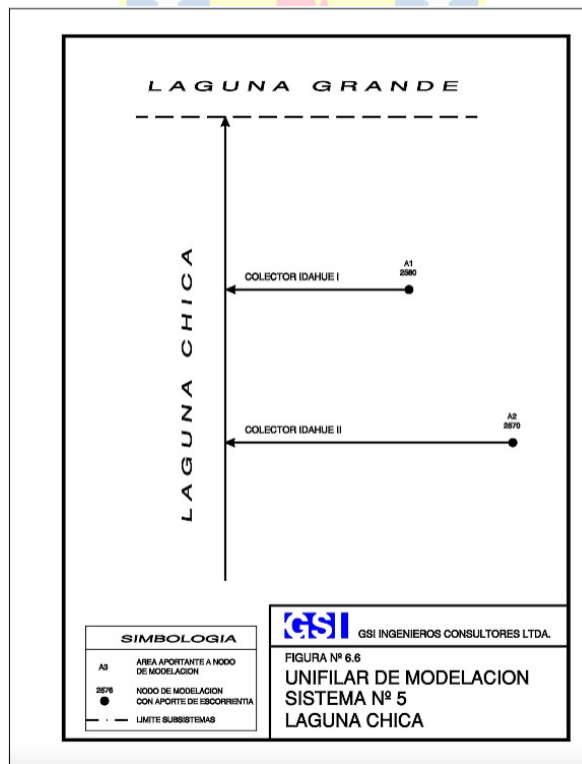


Figura 17. Colectores que descargan en Laguna Chica.

Fuente: Extraída de MOP, 2002.

4.1.2. Determinación del estado trófico actual

Desde el análisis de los datos se demostraron las siguientes clasificaciones del estado trófico actual para cada lago respecto a las campañas realizadas en el año y sus estaciones de muestreos.

- Laguna Grande

Se determinó la condición trófica de Laguna Grande en base a la clasificación de Smith et al., (1999), que se basa en los valores superficiales de fósforo total (PT), nitrógeno total (NT), clorofila-a (Chl-a) y la transparencia del agua (DS). En el análisis de la clasificación se observa que las condiciones tróficas de los parámetros de DS y Chl-a variaron en tres ocasiones entre los niveles de oligotrofia a eutrofia a lo largo del período estudiado, por el contrario el PT demostró una condición eutrófica en el mes de octubre variando a un estado mesotrófico el mes enero y presentando un estado oligotrófico el mes de mayo, mientras que el NT en la primera y segunda campaña presentó una condición de oligotrofia la cual cambiaría en la última a mesotrofia (Tabla 14). Además, en la Tabla 15 se aprecia en detalle la condición trófica respecto a las estaciones de muestreo, donde se observan valores superficiales y condiciones tróficas similares, salvo en la estación E3 del mes de enero el cual presenta concentraciones por debajo del límite de detección ($<0,006$) para el PT y la estación E2 del mes de octubre que presentó un leve aumento en las concentraciones de Chl-a situándola en la condición de mesotrofia. Es importante mencionar que, en el terreno realizado en el mes de mayo se observaron floraciones algales, lo que explicaría las altas concentraciones de clorofila-a y la poca transparencia del agua.

Tabla 14. Clasificación del estado trófico actual de Laguna Grande según Smith et al., (1999) (Campañas 2020-2021).

Mes	DS (m)	PT (mg/m ³)	NT (mg/m ³)	Chl-a (mg/m ³)
Octubre – 2020	6,78	53	207	3,37
Enero – 2021	2,5	18	233	5,95
Mayo – 2021	1,1	6	403	11,94

Tabla 15. Clasificación del estado trófico actual de Laguna Grande según Smith et al., (1999) (Estaciones de muestreo).

Estación	DS (m)	PT (mg/m ³)	NT (mg/m ³)	Chl-a (mg/m ³)
Octubre – 2020				
E1	6,15	39	240	3,03
E2	9,2	55	210	3,95
E3	5	65	170	3,13
Enero – 2021				
E1	2,6	21	290	5,4
E2	2,5	26	220	4,19
E3	2,4	6	190	8,27
Mayo – 2021				
E1	1	6	420	10,74
E2	1,1	6	410	12,39
E3	1,1	6	380	12,69

Además, se determinó la condición trófica propuesta por Carlson (1977), que se basa principalmente en los valores superficiales de la transparencia en la columna de agua (DS), la clorofila-a (Chl-a) y el fósforo total (PT), siendo uno de los índices más utilizados en el mundo debido a la facilidad de su interpretación. El análisis mostró que LG ha mantenido un estado mesotrófico a través del año actual (Figura 18), de hecho, sus valores de TSI estuvieron bastante similares en las estaciones y campañas realizadas. En efecto, la estación E3 presentó unos TSI levemente mayores en las campañas de octubre y mayo, sin embargo, la misma estación el mes enero habría presentado el menor TSI de las campañas realizadas. (Figura 19).

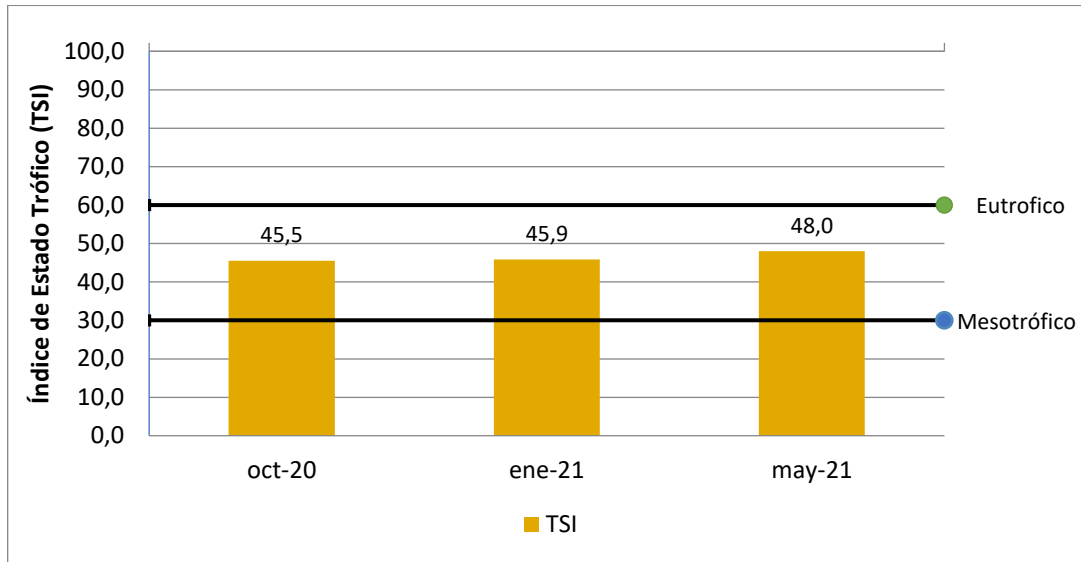


Figura 18. Variación del índice de estado trófico actual de Laguna Grande.

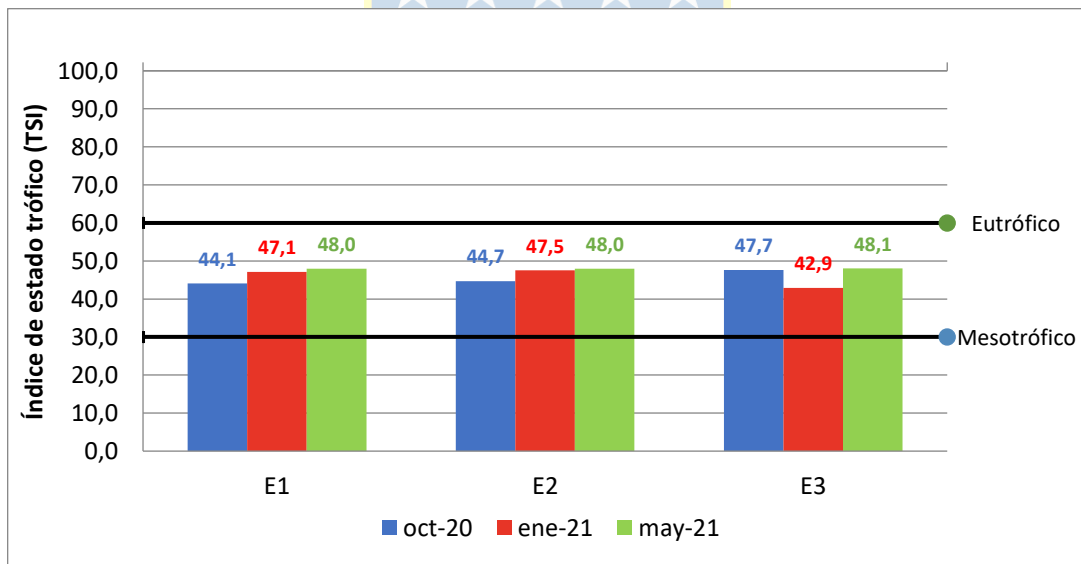


Figura 19. Variación mensual del TSI actual en Laguna Grande. (estaciones).

- Laguna Chica

Se determinó la condición trófica de Laguna Chica en base a la clasificación de Smith et al., (1999), cuyo análisis demostró que sus valores promedios estaban por debajo de los rangos establecidos (Tabla 9), presentando un estado

oligotrófico para cada uno de los parámetros en todo el período de estudio (Tabla 16). En cuanto a sus estaciones de muestreo sus parámetros son bastante similares, generalmente el PT estuvo por debajo de los límites de detección (<0,006), excepto en la estación E2 del mes de enero que aumentó levemente su concentración situándolo en un estado mesotrófico. (Tabla 17).

Tabla 16. Clasificación del estado trófico actual de Laguna Chica según Smith et al., (1999) (Campañas 2020-2021).

Mes	DS (m)	PT (mg/m3)	NT (mg/m3)	Chl-a (mg/m3)
Octubre – 2020	8,95	6	175	0,41
Enero – 2021	8	8,5	255	0,84
Mayo – 2021	5,8	6	185	2,02

Tabla 17. Clasificación del estado trófico actual de Laguna Chica según Smith, et al., (1999) (Estaciones de muestreo).

Estación	DS (m)	PT (mg/m3)	NT (mg/m3)	Chl-a (mg/m3)
Octubre – 2020				
E1	8,5	6	170	0,37
E2	9,4	6	180	0,45
Enero – 2021				
E1	8	6	290	0,78
E2	8	11	220	0,89
Mayo – 2021				
E1	5,9	6	190	2,5
E2	5,6	6	180	1,54

Mientras que la condición trófica propuesta por Carlson (1977), demostró unos TSI que varían entre un estado oligotrófico y mesotrófico durante el año actual. (Figura 20). En la Figura 21 se observa que en la campaña de octubre las estaciones E1 y E2 presentaban un estado oligotrófico, no obstante, en la campaña de enero solo se observa ese estado en la estación E1, ya que en la estación E2, su TSI habría variado a un estado mesotrófico. Por su parte, la

campana de mayo presentó en ambas estaciones de muestreo (E1 y E2) un estado mesotrófico.

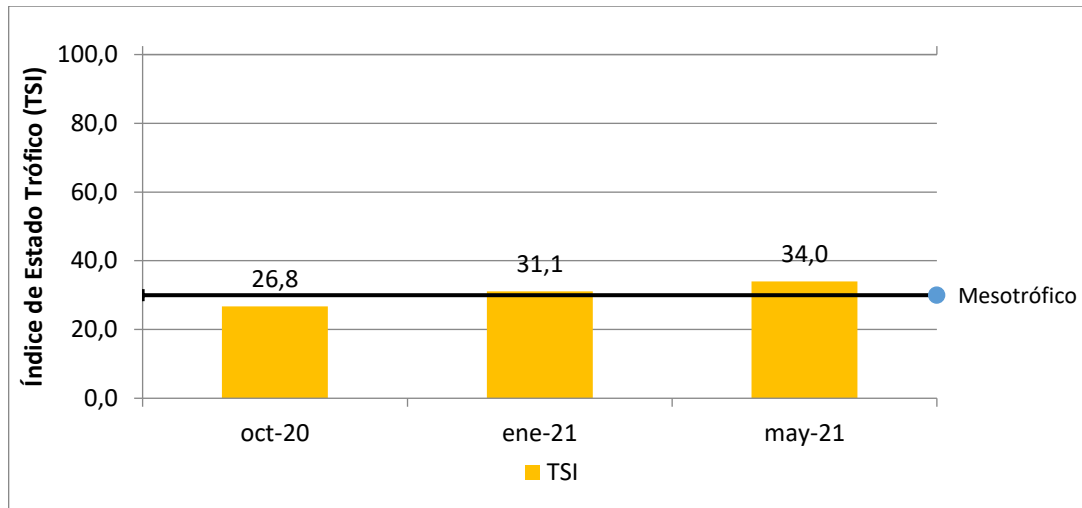


Figura 20. Variación del índice de estado trófico actual de Laguna Chica.

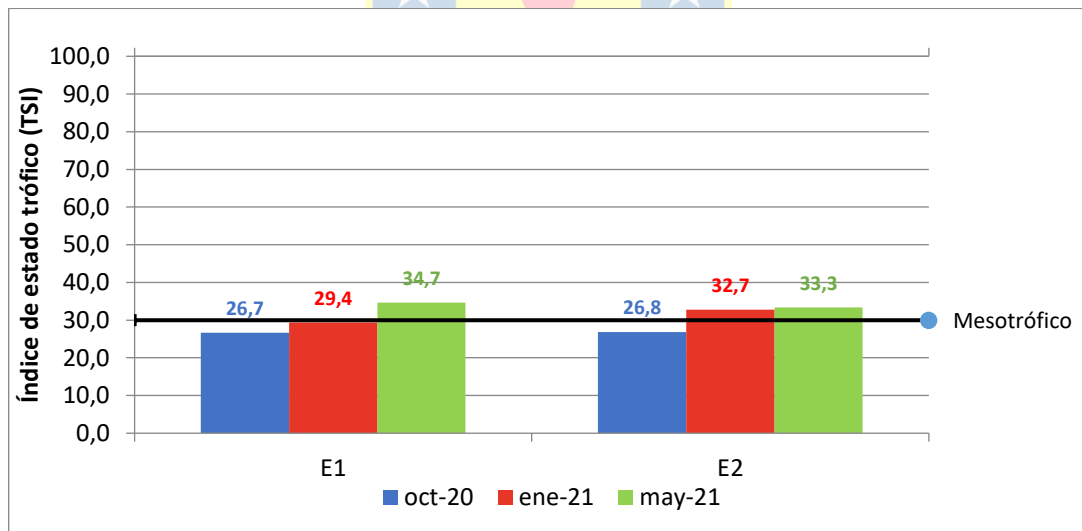


Figura 21. Variación mensual del TSI actual en Laguna Chica. (estaciones).

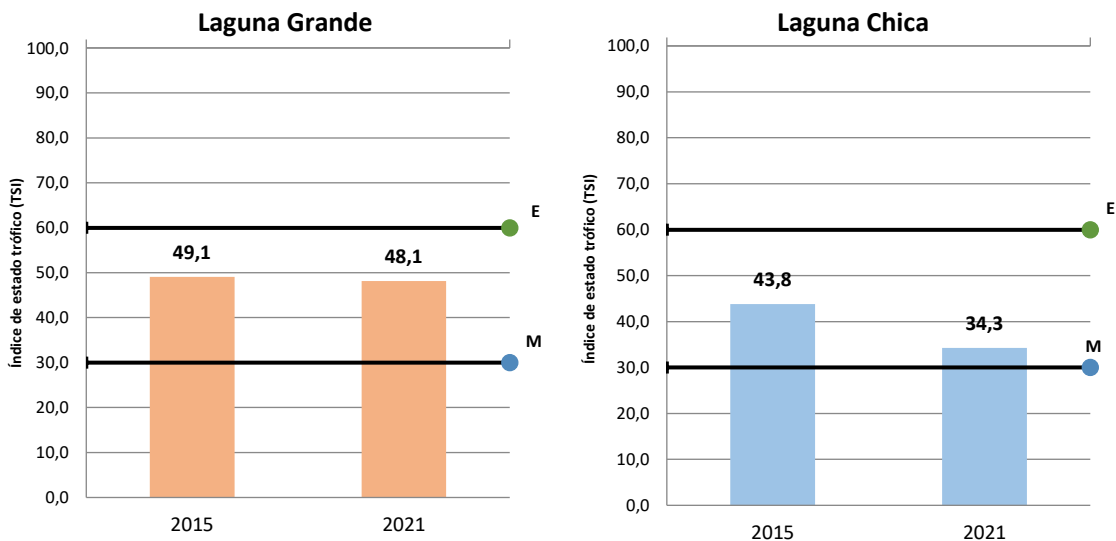


Figura 22. Cambios del índice de estado trófico de Carlson anual de los lagos de San Pedro de la Paz.

La Figura 22 muestra el TSI de Carlson (1977) calculado con las medias superficiales anuales de los lagos en los años 2015 y 2021, donde LG y LCh mantienen un estado mesotrófico en la actualidad a pesar de presentar disminuciones en sus TSI, no obstante, LCh presentó un cambio bastante mayor acercándose a un estado oligotrófico.

La variabilidad de los parámetros de DS, Chl-a y los nutrientes en LG, pudieron ser influidas por los cambios estacionales, afectando sus estados tróficos en el año (Tabla 14) (Almanza et al., 2016a). Esto puede deberse a que se presentaron condiciones óptimas para el crecimiento de microalgas, traduciéndose en floraciones algales, las cuales provocaron la disminución de la transparencia y limitación del fósforo total en lago. Según Almanza et al., 2019, las variaciones estacionales influirían en la abundancia y la estructura del fitoplancton en algunos lagos del hemisferio sur.

El tiempo de renovación de las aguas de un lago es otro factor importante en la regulación de nutrientes en su interior, dado que entre mayor sea su tiempo de retención, mayores serán los efectos de los nutrientes en los distintos procesos biológicos y químicos de la columna de agua, de hecho, LG requiere un tiempo de renovación de 24 meses, mientras que LCh lo hace en 18 meses (Cisternas et al., 2000). Es importante recordar, que ambos sistemas están conectados lo cual podría estar explicando las diferencias entre los TSI en el año, debido a que LG además de recibir todo lo que arrastra la escorrentía de su propia cuenca, recibe las aguas de LCh (Cisternas et al., 2000; Parra, 1989). También, se pueden atribuir estos cambios de TSI a los distintos factores externos ya sean procesos ambientales naturales y/o actividades antrópicas, que hayan alterado la calidad del agua (Álvarez et al., 2020; Balaka et al., 2019).

4.2. Determinación de los cambios de la expansión urbana y su relación con los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica durante los últimos 30 años

En términos generales, con la digitalización de los datos se reveló que la cuenca lacustre total de San Pedro de la Paz cuenta con una superficie de 1951,531 (ha), la cual se divide en 538,591 (ha) y 1413,04 (ha) correspondientes a las cuencas de Laguna Chica y Laguna Grande respectivamente. (Figura 23). Por lo cual, hizo posible conocer la ocupación de superficie urbana para cada año con respecto a la cuenca total y parcial. Por ello, la Figura 24, demuestra que en el año 1985 la superficie urbana solo ocupaba el 4,9% de la totalidad de la cuenca, sin embargo, con el paso del tiempo hasta la actualidad (2021) esta cobertura llegó a ocupar el 15,8%, teniendo un aumento del 10,9% entre los años 1985 y 2021 con respecto a la cuenca total. En el caso de las cuencas parciales, la cuenca de Laguna Grande inicialmente presentaba un 4,5% de superficie urbana, en la actualidad, esta

cobertura ha llegado a ocupar el 15,6% de la cuenca parcial, presentando un aumento del 11,1% durante los años 1985 y 2021. Por su parte, la cuenca de Laguna Chica contaba con una ocupación urbana del 5,9%, actualmente esta cobertura aborda el 16,3% de su cuenca, demostrando un incremento del 10,4% durante los años 1985 y 2021.

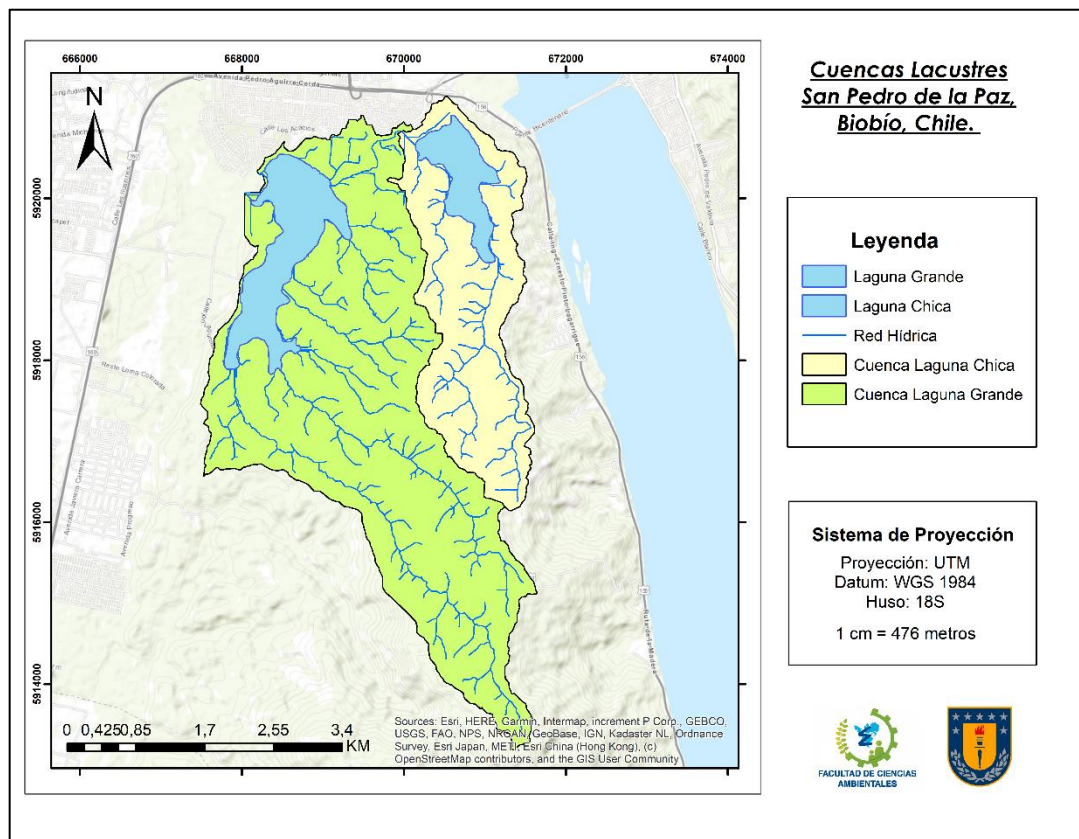


Figura 23. Cuencas lacustres San Pedro de la Paz, Biobío, Chile.

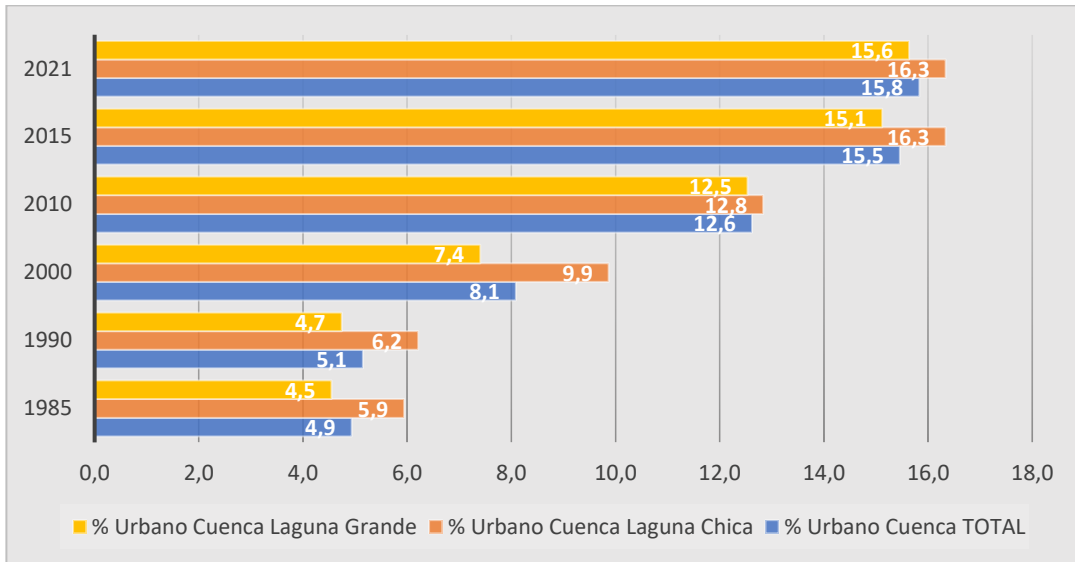


Figura 24. Ocupación de superficie urbana respecto a las cuencas lacustres. (%) (1985-2021).

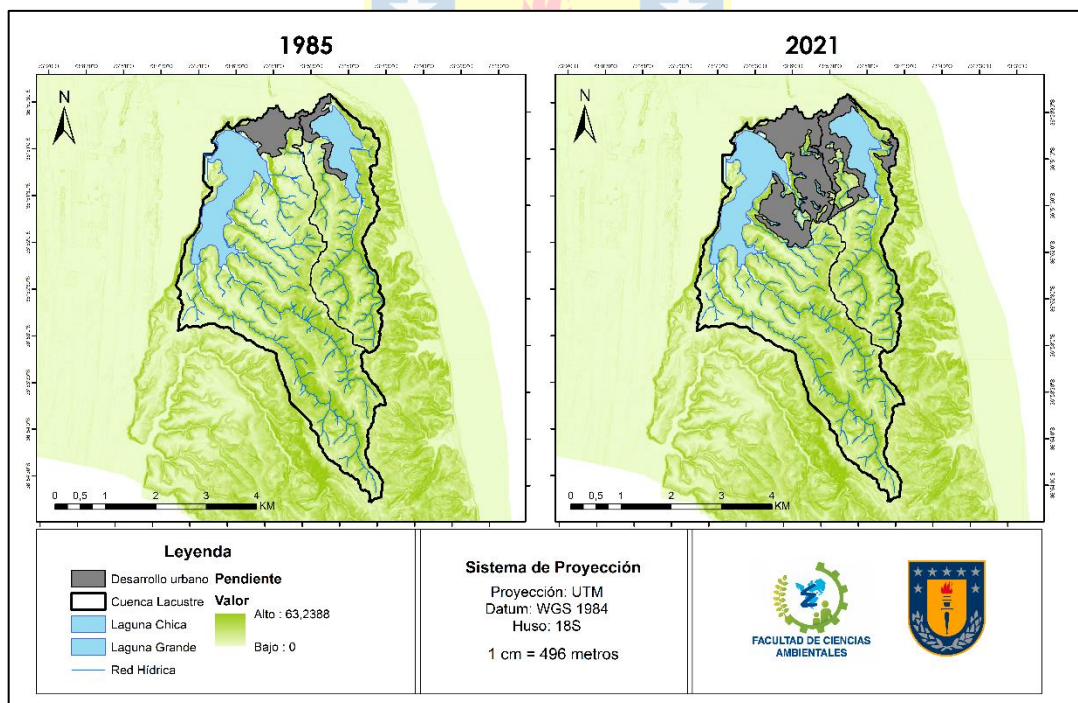


Figura 25. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (1985-2021).

El procesamiento de los datos de manera digital ha permitido reconocer la dinámica de las coberturas del uso de suelo urbano, haciendo posible diferenciar los cambios que sucedieron entre los años 1985 y 2021 en la cuenca de estudio (Figura 25). De igual manera, se obtienen las variaciones de superficie urbana entre los períodos establecidos.

4.2.1. Cambios de cobertura urbana en la cuenca lacustre en los últimos 30 años (períodos)

Desde el geoprocesamiento de los datos por el *software* ArcGIS 10.4.1 y posterior cálculo se revelaron las variaciones superficiales en hectáreas (ha), las variaciones porcentuales parciales (%), para la cuenca lacustre total (Tabla 18) (Figura 31), las parciales. (Tabla 19, Tabla 20) (Figura 33, Figura 34).

- Período 1 (1985-1990)

En el primer período la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz presentó una baja variación en su expansión urbana, en la cual se alcanzan a notar unos pequeños crecimientos en el sector norte de los lagos estudiados. (Figura 26). En efecto, la superficie urbana aumentó de 96,2 (ha) a 100,4 (ha) entre los años 1985 y 1990 respectivamente, alcanzando una variación superficial de 4,2 (ha) (Tabla 18) y representando una variación porcentual de 4,4% de crecimiento urbano para este período. (Figura 31).

Desde el punto de vista de sus cuencas parciales, la cuenca de Laguna Grande presentó una variación superficial de 2,8 (ha), aumentando su superficie urbana de 64,2 (ha) a 67,0 (ha) (Tabla 19) y representando un incremento de 4,3% de expansión en este período (Figura 33). Por su parte, la cuenca de Laguna Chica presentó una variación superficial de 1,4 (ha) un tanto menor que la de su cuenca vecina, expandiendo su superficie urbana de 32,0 (ha) a 33,4 (ha) (Tabla 20), sin embargo, hubo un incremento de 4,5% de la cobertura urbana

durante los años 1985 y 1990, siendo una variación porcentual levemente mayor que la cuenca de Laguna Grande. (Figura 34).

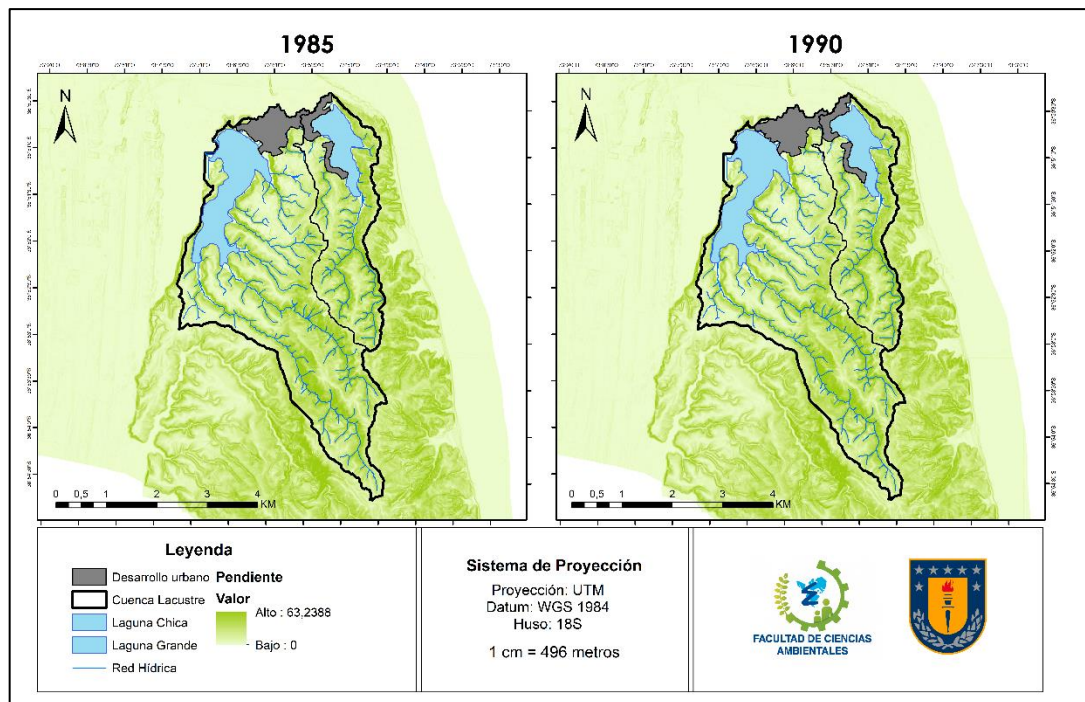


Figura 26. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (1985-1990).

La expansión urbana en la VIII región, proviene de algunos años atrás, en la década de 1950 cuando se presenta el primer gran aumento en la población acompañado de numerosas transformaciones en los procesos de industrialización, migración campo-ciudad y el desarrollo de plantaciones exóticas, que a través del tiempo arrastró al Gran Concepción a un proceso de globalización. (Pérez & Salinas, 2009; Sánchez, 1989; Sanhueza & Azócar, 2000; Hidalgo et al., 2009). Por su parte, el crecimiento urbano en la cuenca lacustre de San Pedro de la Paz relacionado en este período tiene origen en el año 1960, cuando se construyó la “Villa San Pedro” que constaba con unas 2.000 viviendas ubicadas en el sector norte de la cuenca, las cuales se fueron expandiendo poco a poco hacia las riberas de sus lagos. (Parra, 1989).

- Período 2 (1990-2000)

El segundo período presentó una expansión más notoria, sobre todo en la zona intermedia de los lagos en la cual comienza a aparecer una nueva cobertura urbana en el lado este de Laguna Grande. En el caso de Laguna Chica, se observan construcciones urbanas muy cercanas a las riberas del lago, donde su sector oeste habría presentado un tipo de conectividad con la cobertura urbana del sector norte, mientras que su sector este, demostraría un nuevo territorio urbano sobre los cerros y laderas. (Figura 27). En efecto, la superficie cambió de 100,4 (ha) a 157,8 (ha), alcanzando una variación superficial de 57,3 (ha) (Tabla 18) y representando un crecimiento territorial de un 57,1% durante el año 1990 y 2000. (Figura 31).

El visible crecimiento urbano en la cuenca de Laguna Grande tuvo una variación superficial de 37,6 (ha) (Tabla 19), incrementando su cobertura de 67,0 (ha) a 104,6 (ha) y representando un 56,1% de expansión durante este período. (Figura 33). Por su parte la cuenca de Laguna Chica presentó una variación superficial de 19,7 (ha), aumentando su cobertura de 33,4 (ha) a 53,2 (ha) (Tabla 20) y representando un 58,9% de crecimiento urbano durante los años 1990 y 2000. (Figura 34).

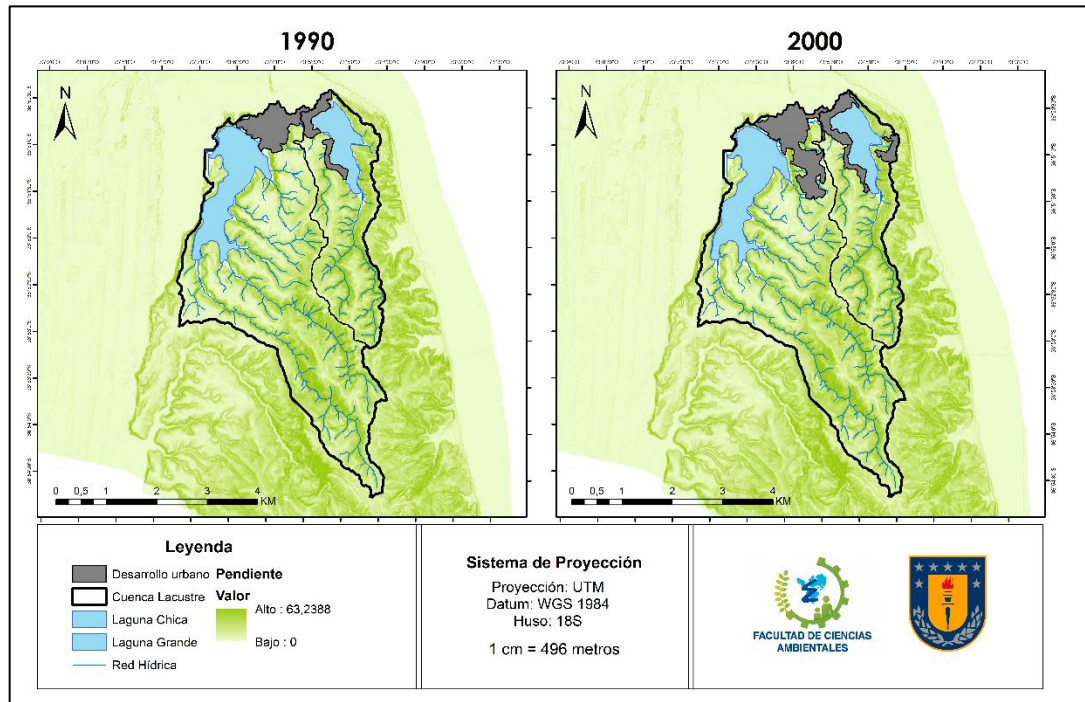


Figura 27. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (1990-2000).

Según Pérez & Salinas (2009) durante el período de 1992 y 2002, se presentaron crecimientos significativos de superficie pavimentada, producto de una expansión hacia las periferias y la urbanización. De las cuales, aparecieron áreas nuevas en la comuna de San Pedro de la Paz como:

- **Idahue:** Correspondiente al sector residencial a un costado de la Laguna Chica, el cual comenzó con una urbanización y parcelación con edificaciones aisladas y de distintas tipologías.
- **Andalué:** En el espacio “interlagunal”, es decir, al medio de ambos lagos.
- **El Venado:** El Fundo el Venado, ubicado en la meseta de la cordillera de Nahuelbuta y en zona interlagunal, correspondió los primeros indicios de la continuación de Andalué.

- Período 3 (2000-2010)

En la Figura 28 se observa la mayor variación de superficie urbana en la cuenca lacustre en los últimos 30 años, ocurrida principalmente en la zona “interlagunal”, donde se fueron conectando los barrios urbanos y apareciendo extensos territorios que rápidamente comenzaron a rodear el sector este de Laguna Grande y el sector oeste de Laguna Chica, el cual comenzó a acoplarse con las demás coberturas urbanas expandiéndose hacia el centro de la zona intermedia. Efectivamente, la superficie urbana se incrementó 88,5 (ha), expandiéndose de 157,8 (ha) a 246,3 (ha) (Tabla 18) y representando una variación porcentual de un 56,1% durante este período. (Figura 31).

En esta etapa, la cuenca de Laguna Grande presentó el mayor crecimiento urbano en los últimos 30 años, donde su superficie urbana avanzó de 104,6 (ha) a 177,2 (ha), teniendo un aumento 72,6 (ha) de territorio cercano al lago (Tabla 19), así mismo, representó una variación porcentual del 69,4% durante los años 2000 y 2010. (Figura 33). Por su parte la cuenca de Laguna Chica tuvo un incremento superficial de 16,0 (ha), donde su cobertura pasó de 53,2 (ha) a 69,1 (ha) (Tabla 20) y representó una variación porcentual del 30% durante este período. (Figura 34).

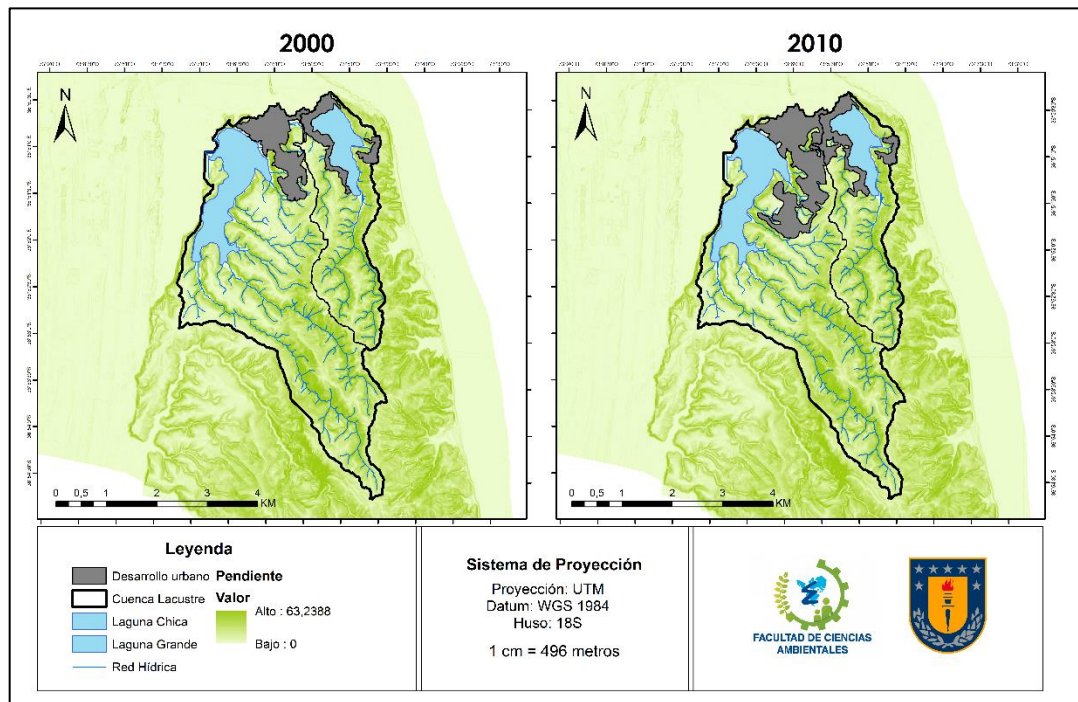


Figura 28. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (2000-2010).

En este período ocurre una ocupación importante en el sector de Andalué y el Venado, donde se continúa aumentando la distancia del centro urbano principal, evidenciando una clara dispersión. De acuerdo con Martínez et al., 2016, para el año 2006 la zona intermedia de San Pedro de la Paz presentaba un fuerte desarrollo inmobiliario solo con viviendas unifamiliares y sin sistema de transporte público. Por su parte, Rojas et al., 2013 señala que el año 2009 la comuna continuaba con su incremento en la superficie de uso residencial llegando a ser la comuna con mayor crecimiento después de Talcahuano y Concepción.

- Período 4 (2010-2015)

En el cuarto período se sigue observando una clara expansión urbana en la zona “interlagunal”, mostrando un tipo de conectividad y grosor entre las coberturas. De esta manera, las áreas urbanas del sector este de Laguna

Grande se han acercado a las riberas del lago y al mismo tiempo expandido hacia el centro de la cuenca lacustre logrando la conexión de las coberturas urbanas. Lo mismo ocurre en Laguna Chica, cuyas riberas del sector oeste están prácticamente ocupadas en su totalidad por el desarrollo urbano. (Figura 29). En efecto, la superficie urbana varió de 246,3 (ha) a 301,6 (ha) (Tabla 18), incrementando su área 55,4 (ha) y representando un aumento del 22,5% para este período. (Figura 31).

La cuenca Laguna Grande tuvo un incremento de 36,5 (ha), cambiando su superficie urbana de 177,2 (ha) a 213,7 (ha) (Tabla 19), su variación porcentual fue del 20,6% en esta etapa. (Figura 33). Por su parte la cuenca de Laguna Chica también tuvo su incremento superficial de 18,8 (ha), pasando de 69,1 (ha) a 87,96 (ha) (Tabla 20), sin embargo, tuvo una variación porcentual de un 27,3% durante los años 2010 y 2015, un tanto mayor que su cuenca vecina. (Figura 34).

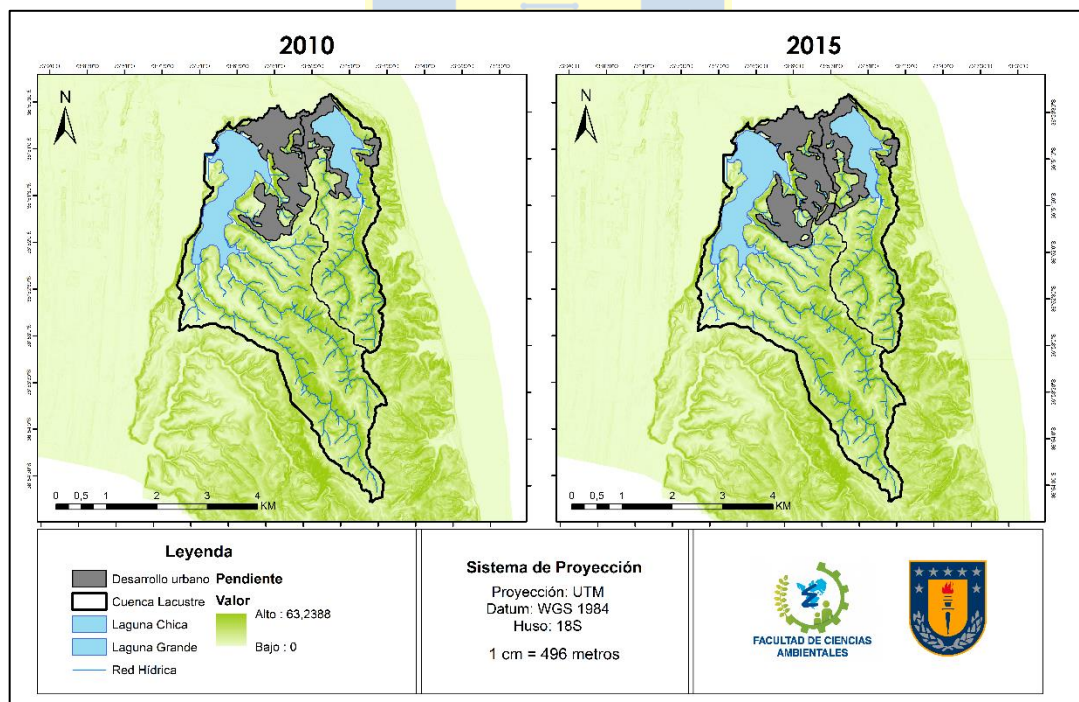


Figura 29. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (2010-2015).

Esta etapa se representa lo ocurrido después del terremoto del 27 de febrero del año 2010, lo cual incentivó a la comuna a realizar millonarios proyectos que contemplaban mejoramientos inmobiliarios, industriales, viales y ferroviarios, convirtiéndose en un atractivo habitacional y empresarial. (EULA, 2018). Esto queda demostrando en el sector sur de El Venado el cual continúa con el aumento de superficie pavimentada acompañado con nuevos caminos de acceso, usos residenciales, comercio, escuelas y sus equipamientos.

- Período 5 (2015-2021)

Este último período se caracterizó por consolidar el crecimiento urbano de las etapas anteriores (Figura 30), por ello se presenta una pequeña expansión en la cuenca lacustre de 7,3 (ha), variando de 301,6 (ha) a 308,9 (ha) (Tabla 18) y representando una variación porcentual de 2,4% durante este período. (Figura 31). El mayor crecimiento ocurrió en la cuenca de Laguna Grande, cuya superficie cambió 7,3 (ha), aumentando su área de 213,7 (ha) a 221,0 (ha) haciendo posible el relleno de las zonas extendidas en el año 2015 (Tabla 19), este incremento representó una variación porcentual de 3,4% en esta etapa. (Figura 33). Por su parte, la cuenca de Laguna Chica presentó una escasa variación superficial de 0,02 (ha), donde su cobertura aumentó de 87,96 (ha) a 87,98 (ha) (Tabla 20), representando un 0,02% de variación porcentual para este período. (Figura 34).

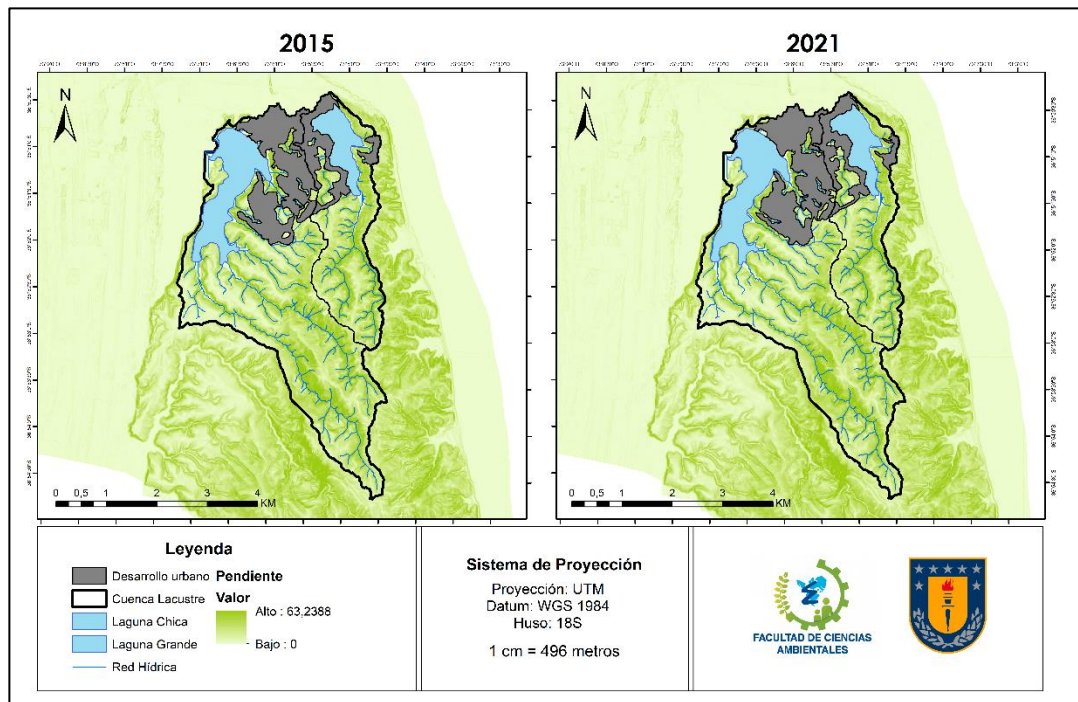


Figura 30. Expansión urbana en la cuenca lacustre. (2015-2021).

El último período está marcado por pequeñas expansiones en el sector sur de El Venado y cercano a las riberas de Laguna Grande, donde se han concluido diferentes barrios y calles, además, de encontrar nuevos colegios, e inclusive canchas de fútbol. De hecho, en las actuales imágenes satelitales se continúan viendo nuevas áreas deforestadas y despejadas para posibles proyectos en la cuenca lacustre. Si bien, este último período demostró una menor expansión en la superficie urbana, ha sido el resultado de todo el proceso de urbanización que ha tenido San Pedro de la Paz hasta la actualidad, convirtiéndola en una de las comunas más importantes del Gran Concepción.

A continuación, se presentan las superficies de cada año acompañado del resumen de sus variaciones superficiales y porcentuales de todos los períodos mencionados anteriormente.

Tabla 18. Resumen de la variación de superficie urbana en la cuenca lacustre total en los últimos 30 años. (períodos).

Período	Año	Superficie urbana (HA)	Variación superficie (HA)
1	1985-1990	96,2 - 100,4	4,2
2	1990-2000	100,4 - 157,8	57,3
3	2000-2010	157,8 - 246,3	88,5
4	2010-2015	246,3 - 301,6	55,4
5	2015-2021	301,6 - 308,9	7,3

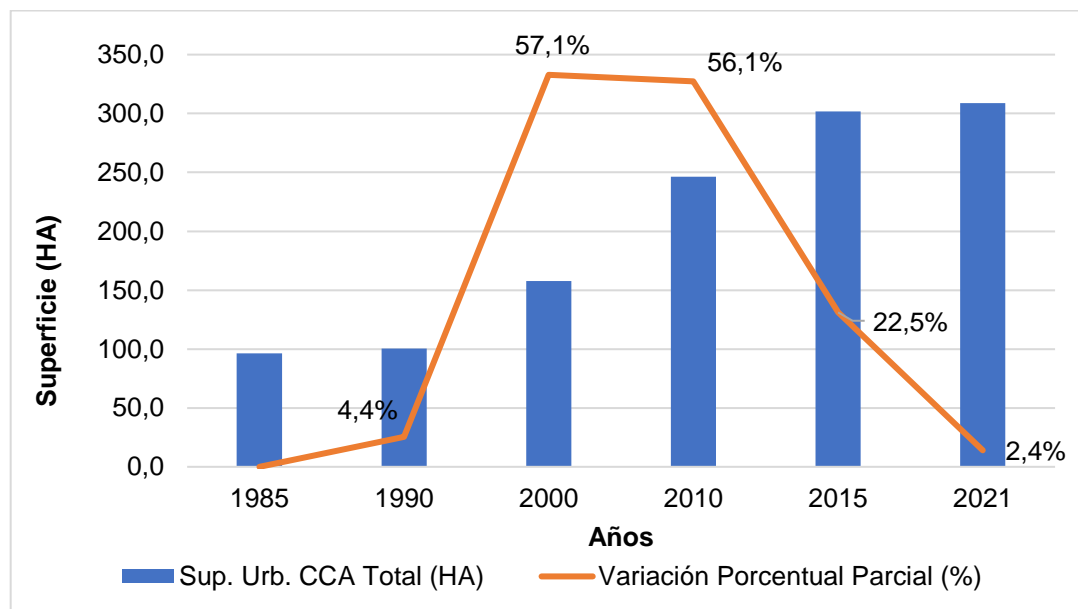


Figura 31. Variación porcentual parcial de la superficie urbana en la cuenca lacustre en los últimos 30 años.

En la Figura 31, se observan las distintas variaciones porcentuales de superficie urbana entre los años. Demostrando que en los períodos 2 y 3 (1990-2000 y 2000-2010 respectivamente) se encuentran las variaciones porcentuales más alta en los últimos 30 años respecto a la cuenca lacustre total, es decir, que en estos períodos hubo un fuerte y constante crecimiento urbano de un 57,1% y 56,1% respectivamente. Por otra parte, durante los años 2015 y 2021 (período

5) se presentó la variación porcentual de 2,4% siendo la más baja en los últimos 30 años con respecto a la cuenca lacustre total.

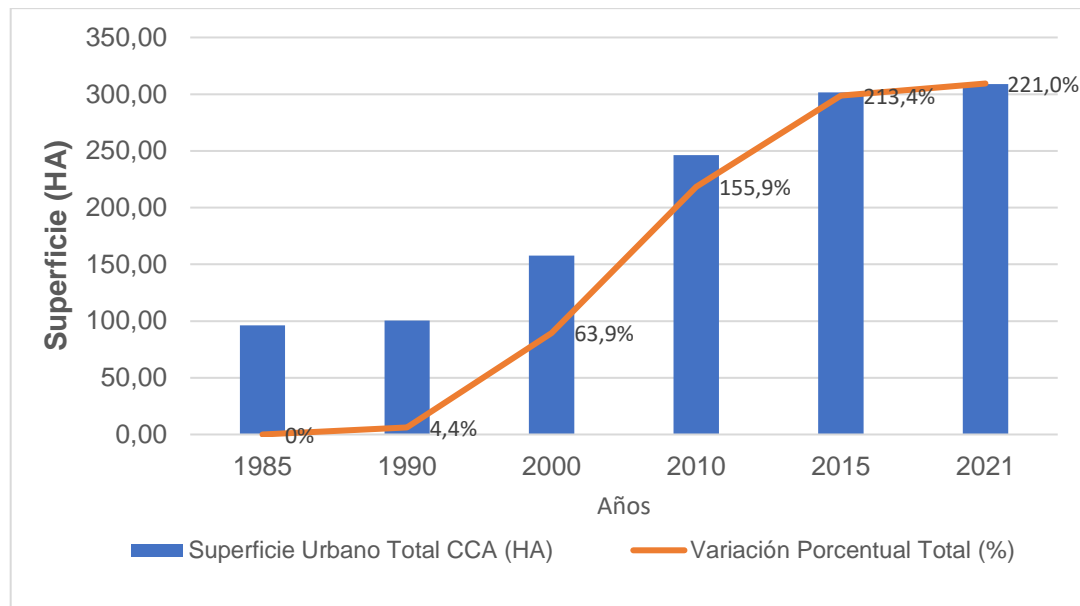


Figura 32. Variación porcentual total de la superficie urbana en la cuenca lacustre en los últimos 30 años.

Desde otra perspectiva, la Figura 32 presenta las variaciones porcentuales totales (%) respecto a la cuenca lacustre, es decir, cuanto variaron las superficies urbanas en los diferentes años con respecto al año inicial. (1985). En efecto, se muestra un comportamiento prácticamente lineal, en el cual ocurren unas pequeñas variaciones en el primer período que con el paso del tiempo fueron en un considerable aumento hasta la actualidad, esto permitió demostrar que entre los años 1985 y 2021 hubo una expansión urbana del 221,0% en su cuenca total.

Tabla 19. Resumen de la variación de superficie urbana en la cuenca de Laguna Grande en los últimos 30 años. (períodos).

Período	Año	Superficie urbana (HA)	Variación superficie (HA)
1	1985-1990	64,2 - 67,0	2,8
2	1990-2000	67,0 - 104,6	37,6
3	2000-2010	104,6 - 177,2	72,6
4	2010-2015	177,2 - 213,7	36,5
5	2015-2021	213,7 - 221,0	7,3

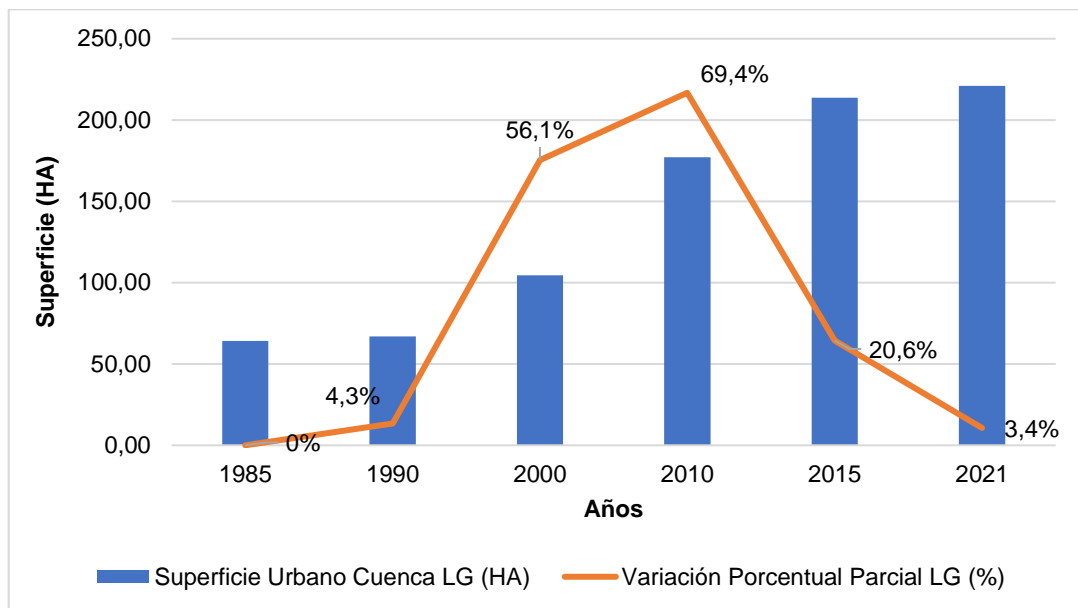


Figura 33. Variación porcentual parcial de la superficie urbana en la cuenca Laguna Grande en los últimos 30 años.

En la Figura 33, se demuestra que entre los 2000 y 2010 (período 3) ocurrió un considerable incremento en la superficie urbana de un 69,4%, siendo el período que presentó el crecimiento urbano más alto en los últimos 30 años con respecto a su cuenca. Por otra parte, la variación porcentual parcial más baja

de tan solo 3,4%, ocurrió en el último período (2015-2021) al igual que con la cuenca total.

Tabla 20. Resumen de la variación de superficie urbana en la cuenca de Laguna Chica en los últimos 30 años. (períodos).

Período	Año	Superficie urbana (HA)	Variación superficie (HA)
1	1985-1990	32,0 - 33,4	1,43
2	1990-2000	33,4 - 53,2	19,71
3	2000-2010	53,2 - 69,1	15,97
4	2010-2015	69,1 - 87,96	18,84
5	2015-2021	87,96 - 87,98	0,02

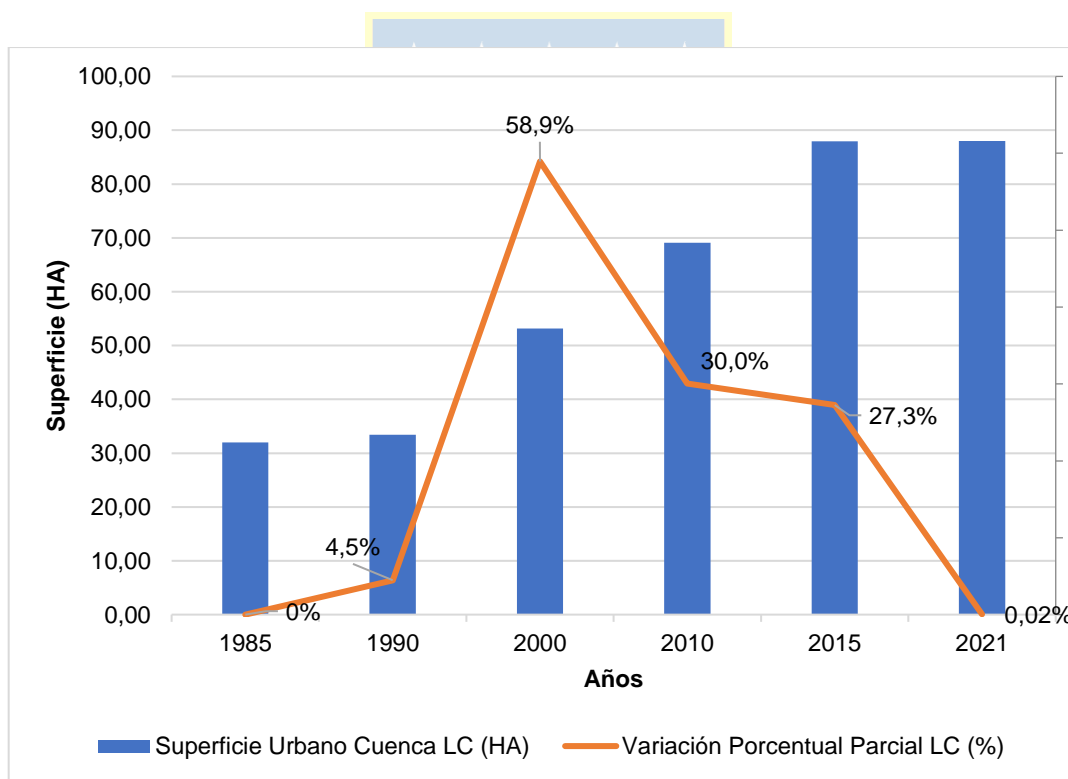


Figura 34. Variación porcentual parcial de la superficie urbana en la cuenca Laguna Chica en los últimos 30 años.

La Figura 34, muestra variaciones porcentuales parciales de la cuenca de Laguna Chica, las cuales son similares a la cuenca total, presentando su mayor variación entre los años 1990 y el 2000 (período 2), con un incremento del 58,9% en la superficie urbana. De la misma manera, su incremento más bajo ocurre entre los años 2015 y 2021 (período 5), con tan solo un 0,02% de crecimiento urbano en esa etapa siendo el más bajo en los últimos 30 años.

4.2.2. Relación entre los cambios de la expansión urbana y los parámetros de estado trófico de Laguna Grande y Laguna Chica

A continuación, se muestran los cambios en los parámetros de estado trófico de los lagos junto con la variación de superficie urbana en la cuenca parcial y total en los últimos 30 años. En términos generales, a medida que fue aumentando la superficie urbana disminuyó el DS (a) en LG y el NT (c) en ambos lagos, mientras que el PT (b) fue aumentando en LCh y disminuyendo en LG, al punto de mantenerse igualados en un período. En cuanto a la Chl-a (d) en LG fue en constante aumento (sobre todo el año 2015), mientras que en LCh se ve una clara disminución, sin embargo, solo se consideraron los datos del año 2015 y el actual, debido a la ausencia de datos de este parámetro en los años anteriores. La transparencia (a) en LCh fue bastante variada, no obstante, siempre tuvo valores elevados. (Figura 35).

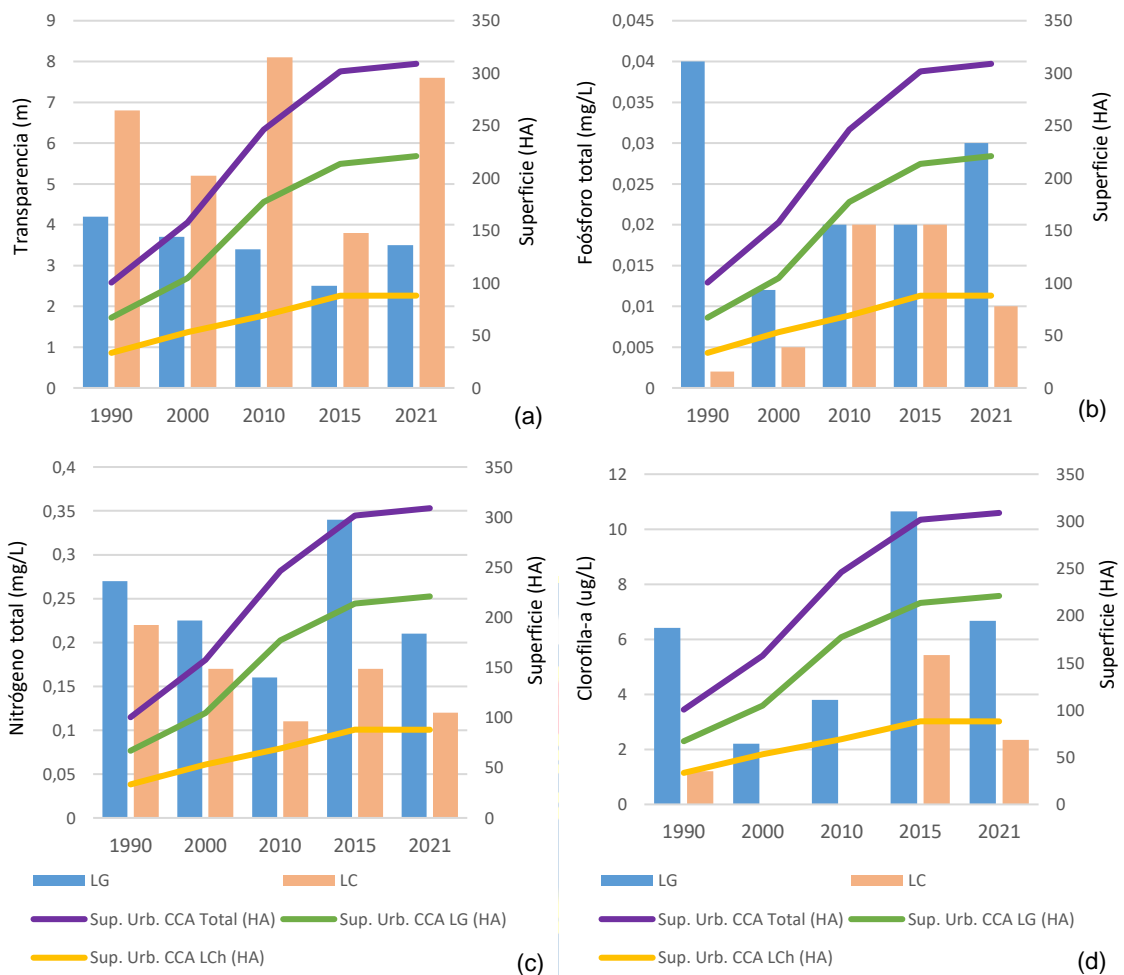


Figura 35. Relación gráfica entre parámetros de estado trófico y superficie urbana.

Además, se presenta la evaluación del nivel de asociación entre las variables crecimiento urbano y estado trófico para LG y LCh por el análisis de correlación de Pearson. La Tabla 21 muestra el análisis de correlación de Pearson de los valores promedios de los parámetros de LG junto con la superficie urbana, sus variaciones entre períodos y sus variaciones porcentuales, demostrando que para la cuenca total y parcial existen correlaciones negativas, es decir, a medida que aumentó la superficie urbana, los parámetros de estado trófico de

LG tendían a disminuir. De tal modo que, las correlaciones más fuertes se dieron entre las variables de DS y superficie urbana y entre el PT y las variaciones de superficie urbana y las variaciones porcentuales, sin embargo, ninguna de las variables resultó ser estadísticamente significativa. ($p < 0,05$).

Tabla 21. Análisis de correlación de Pearson Laguna Grande.

Parámetros de estado trófico	Promedios anuales					
	Cuenca total			Cuenca parcial Laguna Grande		
	t	p-value	corr "r"	t	p-value	corr "r"
Superficie urbana						
DS	-2,28	0,1069	-0,796	-2,201	0,1151	-0,786
NT	-0,00234	0,9983	-0,0014	-0,0325	0,9761	-0,0188
PT	-0,52899	0,6335	-0,292	-0,4794	0,6644	-0,267
Variación de superficie urbana entre períodos						
DS	-0,90345	0,4329	-0,462	-0,7632	0,5009	-0,403
NT	-0,46344	0,6746	-0,258	-0,7138	0,5268	-0,381
PT	-1,9386	0,1479	-0,746	-1,477	0,2361	-0,649
Variación porcentual parcial de superficie urbana						
DS	-0,20782	0,8487	-0,119	-0,1657	0,8789	-0,0952
NT	-0,76419	0,5004	-0,404	-1,038	0,3755	-0,514
PT	-2,2221	0,1128	-0,789	-1,7098	0,1858	-0,703

Asimismo, la Tabla 22 demuestra las correlaciones de Pearson entre las variables de LCh, en las cuales se presenta diferencias con la correlación anterior, ya que existe una correlación negativa para los parámetros de DS y NT y una correlación positiva para el PT. Además, se observan fuertes correlaciones entre el NT y PT con la superficie urbana, y una fuerte correlación entre el PT y la variación de superficie tanto para la cuenca total como parcial. No obstante, al igual que el análisis anterior, no son correlaciones estadísticamente significativas. ($p < 0,05$).

Tabla 22. Análisis de correlación de Pearson Laguna Chica.

Parámetros de estado trófico	Promedios anuales					
	Cuenca total			Cuenca parcial Laguna Chica		
	t	p-value	corr "r"	t	p-value	corr "r"
Superficie urbana						
DS	-0,090846	0,9333	-0,0524	-0,24199	0,8244	-0,138
NT	-1,92	0,1506	-0,743	-1,7465	0,1791	-0,710
PT	1,8008	0,1695	0,721	1,6806	0,1914	0,696
Variación de superficie urbana entre períodos						
DS	-0,20733	0,849	-0,119	-1,2063	0,3142	-0,572
NT	-0,88221	0,4426	-0,454	-0,21813	0,8413	-0,125
PT	1,8986	0,1538	0,739	1,2066	0,3141	0,572
Variación porcentual parcial de superficie urbana						
DS	-0,11614	0,9149	-0,0669	-0,89298	0,4377	-0,458
NT	-0,58265	0,601	-0,319	-0,039489	0,971	-0,0228
PT	0,69178	0,5388	0,371	0,31749	0,7717	0,180

Esto indicaría que los parámetros de estado trófico no se verían afectados por la expansión de superficie urbana. Por ello, a medida que aumentó la superficie urbana en la cuenca lacustre la mayor parte de los parámetros de estado trófico disminuyeron o se mantuvieron, sin embargo, hubo parámetros que fueron afectados negativamente a lo largo del tiempo, como lo son el caso de la transparencia en LG (que presentó una tendencia negativa) y, el fósforo total en LCh (que presentó una tendencia positiva), ya que a medida que la superficie urbana fue aumentando también lo hizo este último parámetro.

A pesar que no se encontró una correlación estadísticamente significativa, se debe considerar que este estudio solo se enfocó en el estado trófico y sus parámetros, no obstante, pudieron verse afectados otros parámetros de los lagos como las concentraciones de coliformes fecales y totales, los sólidos suspendidos totales, hidrocarburos totales, entre otros, los cuales no estuvieron disponibles en algunos estudios o bases de datos anteriores, para poder observar su evolución en el tiempo. Por su parte, otro factor que pudo haber afectado la correlación es la poca disponibilidad de los datos, a causa de no

tener disponible una robusta y continua base de datos de los parámetros de estos lagos, sobre todo en LCh la cual a lo largo del tiempo ha tenido menos estudios que LG, además, la DGA en su red de control de los lagos no la considera en ninguno de sus monitoreos. (DGA, 2018; POCH, 2009).

Si bien, no se encuentra una relación directa de la expansión urbana en los parámetros de estado trófico, estos podrían estar viéndose afectados indirectamente por la urbanización. Tal como se mencionó anteriormente, varios estudios concuerdan que la impermeabilidad de los suelos en las cuencas aumentaría la escorrentía superficial producidas por las intensas lluvias que arrastrarían cantidades de nutrientes y contaminantes de las ciudades a los lagos, los cuales podrían estar afectando la transparencia y otros parámetros, incluso provocando cambios en la dinámica de la cuenca hidrográfica (Hallegatte et al., 2013; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2014; OSMAN, 2015; Wei et al., 2020). A esto hay que agregarle los diversos problemas que enfrentan los lagos urbanos asociados a la urbanización como la llegada de aguas residuales domésticas, extracción del recurso, la alteración de sus canales de entrada y/o salida, la contaminación puntual, la proliferación de cianobacterias tóxicas, impactos paisajísticos, entre otros (Yuan et al., 2011; Yang et al., 2020; OSMAN, 2015; Kemka et al., 2006). Sin embargo, los resultados demostrarían lo contrario, esto puede deberse principalmente al efecto amortiguador que ejercen las macrófitas (plantas acuáticas) en las riberas del lago, las cuales estarían actuando como un filtro sobre la creciente entrada de nutrientes de las escorrentías superficiales. (Balls et al., 1989; Urrutia et al., 2000).

Los resultados presentan que el estado trófico en los lagos se ha mantenido en una condición mesotrófica en los últimos años (Figura 22), donde no se ha presentado una fuerte variación en los parámetros para que ocurriera un cambio de estado, incluso hubieron períodos pasados en los que se

presentaron disminuciones en los parámetros (Figura 35), lo que podría indicar una mayor atención de la ciudadanía y las autoridades para la protección de estos sistemas lacustres. De hecho, el Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC) del año 2003, tenía poco considerado a los humedales y cuerpos de agua de la ciudad, los cuales eran mal vistos para el desarrollo urbano y su población debido a la asociación de posibles riesgos y/o problemas (inundación, basurales, presencia de insectos, etc.). Sin embargo, años más tarde se actualizaría el plan regulador, el cual incluiría un informe ambiental que establece los criterios de sustentabilidad y valoración estos cuerpos de agua (MINVU, 2018). Un ejemplo, es Laguna Chica que a pesar de encontrarse rodeada de balnearios, clubes náuticos, casas particulares y centros recreacionales se ha demostrado la consideración en la calidad de sus aguas para que pueda ofrecer todos sus servicios ecosistémicos, llegando a presentar un estado oligotrófico – mesotrófico en la actualidad. Del mismo modo la propia Municipalidad de San Pedro de la Paz solicitaría una declaración de Santuario de la Naturaleza para el humedal Los Batros y Laguna Grande (Tabla 5), esta última presentando un estado actual de mesotrofia. Por ello es de suma importancia el trabajo conjunto de las instituciones gubernamentales, la participación ciudadana y la comunidad científica en temas de planificación, gestión e importancia de estos sistemas lacustres para la elaboración e implementación de medidas que protejan y conserven estos lagos. (Sudha et al., 2013; Parra, 1989; Parra et al., 2003; Cisternas et al., 2000).

4.3. Identificación de medidas de recomendación para la protección de la calidad de agua de los lagos

En el contexto actual donde la falta de disponibilidad y la mala calidad de las aguas son un problema global, urgen medidas para la protección del recurso. La OCDE recomienda que se establezcan políticas y medidas basadas en

planes a corto y largo plazo de gestión de agua a nivel de cuencas fluviales y acuíferos, donde se fomente la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas con una constante revisión y actualización, teniendo en cuenta las funciones sociales, económicas y medioambientales del agua, a la par, con la preservación del recurso. Además, sugiere que se asignen recursos humanos, científicos, técnicos y financieros para la prevención, reducción y control de la contaminación en las aguas junto con la identificación de las fuentes puntuales y difusas a fin de evaluar la cantidad y calidad del agua para establecer un proceso de seguimiento y control de estándares establecidos basados en los últimos avances científicos y los usos para los cuales fueron designados. (OCDE, 2016).

En base a los resultados anteriores, actualmente ambos lagos presentan un estado mesotrófico, por tanto, posiblemente las medidas aplicadas hasta hoy han sido acertadas, no obstante, hay valores y eventos que afectaron las condiciones tróficas a lo largo del tiempo. Por ello, es importante realizar medidas de protección para futuros escenarios, donde podría ser determinante tener cuerpos lacustres de buena calidad.

A nivel de cuenca, la urbanización en los últimos años ha sido muy acelerada, por tanto, los futuros proyectos inmobiliarios debiesen considerar el funcionamiento y la morfología del complejo ecosistema en el que se están estableciendo, priorizando la planificación con un enfoque en la sustentabilidad ambiental. En la normativa europea, se están realizando publicaciones orientadas a la integración del medio ambiente en políticas urbanas, con enfoques a una gestión medioambiental integrada la cual permitiría una mejor planificación urbana, por su parte, la normativa española posee una ley de suelos y un código técnico para las edificaciones. En Chile los impactos antrópicos sobre ecosistemas naturales son recientes en comparación a Europa, por lo que se encuentran en una condición óptima para la aplicación de

políticas, medidas y planes ambientales. Por ello, es importante promover la planificación territorial sostenible, donde se favorezca el desarrollo de ciudades compactas y no se fomente el crecimiento extenso y fragmentado. Además, se podría monitorear la velocidad de los desarrollos urbanos acompañado de los impactos que puede provocar en los sistemas ambientales aledaños, a fin de poder enfocarse en una planificación territorial que priorice el manejo de la sustentabilidad ambiental- urbano y el equilibrio entre la urbanización y el medio ambiente. (OSMAN, 2015; Martínez et al., 2016; Cisternas et al., 2000).

A nivel de los sistemas lacustre, a pesar de la condición trófica de los lagos estudiados, la eutrofización es un problema que está afectando al recurso hídrico a nivel mundial y en vista que estos sistemas son sumamente vulnerables a las acciones antrópicas, es importante contar con medidas de protección (Mancini et al., 2012; WAP, 2015). Es así como, varios estudios y fichas técnicas concuerdan en la necesidad un trabajo integrado de toda la cuenca hidrográfica y en un programa o plan de monitoreo a largo plazo, en el cual se observen variables específicas (parámetros físicos, químicos y biológicos) para la calidad del agua de manera continua o en frecuencias establecidas en el tiempo, de tal manera, que permita conocer las estaciones o períodos en los que haya ocurrido algún aumento en la carga de nutrientes en los lagos, lo que permitiría identificar dichos períodos críticos, conocer las causas o el evento particular que haya afectado la entrada de nutrientes y poder realizar una rápida medida de control y prevención a futuro. Para ello, se requiere un seguimiento, fiscalización, entrega de información a autoridades y actores involucrados. (servicios públicos, empresas, ciudadanías, etc.). Esta medida de monitoreo continuo o con frecuencias de su calidad ambiental, acompañado de una visión conjunta con un análisis de suelo ayudarían a la identificación de las fuentes de contaminación (puntuales y difusas) que afectan a estos sistemas lacustres, al aporte de una robusta base de datos para futuras investigaciones como ésta y a las autoridades encargadas de la toma de

decisiones para una mejor planificación territorial en la cuenca (Parra et al., 2013; Martínez et al., 2016; DGA, 2018). Por ello, se recomienda un manejo integrado de cuencas de lagos (ILBM por sus siglas en ingles) el cual es un proceso que busca desarrollar formas de manejo de los lagos junto a sus cuencas para lograr un uso sustentable de sus recursos y los servicios ecosistémicos, en base a mejoras continuas en la gobernanza donde se integren las instituciones, políticas, partes interesadas, ciencia, tecnología y el financiamiento. (Nakamura & Rast, 2012).

En cuanto a medidas de control de parámetros, se encontraron condiciones de eutrofia en LG en los parámetros de fósforo total (PT), transparencia (DS) y clorofila- a (Chl-a) en los meses de octubre y mayo respectivamente. Según el libro "*Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*", con la prevención y reducción de la carga externa de nutrientes, traducidas en las entradas directas de aguas residuales, alcantarillado, entre otras, la mayoría de los lagos reaccionan en mejoras en su calidad de agua; pero la respuesta puede ser lenta con una mejoría menor a la esperada y en algunos casos sin cambios en el estado trófico. No obstante, estas fuentes externas por lo general contienen altas concentraciones de N y P, por tanto, si no ocurre una disminución o eliminación de éstas, no se obtendrán los beneficios a largo plazo, por ello resultó ser un método efectivo en la reducción de la eutrofización. A pesar que, en algunos lagos esta medida puede ser suficiente (Lago Washington), en otros, se requieren tratamientos dentro del lago necesarios para mejorar la calidad de agua debido a que la carga interna de nutrientes es significativa. (Lago Trummen). Existen distintas medidas para la disminución de la carga interna de nutrientes una de ellas es la remoción y/o sellado de los sedimentos (Havens et al., 2004; Hilt et al., 2009; Almanza et al., 2016a). Por ende, junto con el monitoreo anterior, se debería tener un control de las cargas internas y externas de nutrientes que ingresan al lago para poder tomar medidas en los períodos que se presentan estos elevados parámetros. (Cooke et al., 2005).

Lo anterior toma mayor importancia al saber que hace un tiempo la Municipalidad de San Pedro de la Paz solicitó una fiscalización en LG debido a eventuales casos de extracciones y vertimientos de aguas servidas a los lagos. Por tanto, esto demuestra lo necesario que es una educación ambiental tanto para la ciudadanía como para las autoridades que alerten de estas malas prácticas para poder realizar un trabajo en conjunto en la protección de estos sistemas lacustres. De acuerdo con Parra et al., 2015 y Urrutia et al. 2014, es necesario la implementación de una mesa técnica para la aplicación de medidas y cuidado de los lagos en la cual participe la ciudadanía, universidades, el municipio y servicios públicos competentes. Además, los encargados en la toma de decisiones deberían definir los diferentes usos de los cuerpos de agua (consumo, recreación, natación, entre otros) y su entorno (observatorios, áreas recreativas). Por otra parte, Almanza et al., 2016b señala que ante la presencia de cianobacterias y cianotoxinas en los cuerpos de agua es fundamental un sistema de alerta acompañado de un control y vigilancia enfocados en el ambiente y la salud de la población.

También, será necesario que tanto para estos lagos de San Pedro de la Paz como a la mayoría a nivel nacional se les considere en la norma secundaria de calidad ambiental (NSCA), ya que solo se encuentran los lagos Villarrica y Llanquihue. Por lo tanto, esto ha impedido que se puedan realizar planes de prevención o descontaminación a diversos sistemas lacustres del país. (Álvarez et al., 2020). Sin embargo, el año 2017 las autoridades aprobaron una “guía para la elaboración de normas secundarias de calidad ambiental en aguas continentales y marinas” cuyo objetivo es la conservación o preservación de ecosistemas acuáticos por medio del mantenimiento y mejoramiento de la calidad de las aguas tanto continentales como marinas, apoyando el control de los impactos producidos por fuentes contaminantes. (puntuales y/o difusas). Además, indica que para lagos esta NSCA se aplicaría para el cuerpo lacustre completo o para toda su cuenca hidrográfica, por lo tanto, incluye sus zonas

litorales y pelágicas. (MMA, 2017). Por ello, sería el comienzo para tener una base de datos robusta de los lagos del país, en los cuales se puedan realizar estudios a largo plazo para la elaboración de planes de manejos y controles ambientales efectivos con el fin de proteger estos sistemas lacustres.

5. CONCLUSIÓN

En el presente estudio, se logró evaluar que el cambio de la superficie urbana no afectaría (por lo menos de manera directa) al estado trófico de los lagos Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro de la Paz en los últimos 30 años. Sin embargo, se tendrían que estudiar otros factores del entorno (además del cambio de superficie) para afirmar que la expansión urbana no estaría afectando la calidad de agua de los lagos.

El análisis de los parámetros de estado trófico mostró que en la mayoría de las ocasiones hubo una tendencia a disminuir o mantenerse en el tiempo, sin embargo, hubo eventos particulares donde se observaron notorios incrementos en sus concentraciones. Los cuales se asociaron principalmente a la contaminación (puntual y difusa), floraciones algales y la intensidad de las precipitaciones. De acuerdo con la clasificación de Smith, los parámetros actuales para Laguna Grande presentaron condiciones de eutrofia para la transparencia, clorofila-a y fósforo total, los cuales se pudieron ver afectados por cambios estacionales que influirían en la abundancia de microalgas. Mientras que Laguna Chica no presentó ningún nivel de eutrofia en sus parámetros, de hecho, demostró condiciones de oligotrofia en la mayoría de ellos. Por su parte el índice de Carlson demostró que ambos lagos se encuentran en un estado mesotrófico, presentando una mejor condición trófica que el año 2015.

Los resultados demostraron que la ocupación de la superficie urbana en la cuenca total aumentó un 10,9% en los últimos 30 años, donde los mayores crecimientos ocurrieron en los períodos 2 y 3 (1990-2000 y 2000-2010) con una expansión del 57,1% y 56,1% respectivamente. Mientras que la variación porcentual total de la cuenca lacustre demostró una expansión del 221% entre los años 1985 y 2021. Por su parte, la cuenca de Laguna Grande fue la que obtuvo el mayor incremento en el porcentaje de expansión urbana en el tiempo estimado (11,1%), mientras que la cuenca de Laguna Chica fue la que presentó el mayor porcentaje de ocupación urbana con respecto a su cuenca. (16,3%). Dejando en evidencia el acelerado desarrollo urbano que se puede realizar en tan solo un período y el grado de apropiación de terrenos naturales por parte de la urbanización.

En la relación de las variables se demostró un constante crecimiento urbano que reflejó un comportamiento prácticamente lineal, sin embargo, no ocurre lo mismo en los parámetros de estado trófico. Si bien, el análisis de correlación de Pearson entre las variables presentó correlaciones negativas y positivas fuertes, ninguna de ellas resultó ser estadísticamente significativa. ($p < 0,05$). Sin embargo, el análisis pudo verse afectado por la cantidad de datos disponibles, además, esta asociación solo contempló los parámetros de estado trófico dejando afuera otros parámetros del lago que pudieron verse alterados por la urbanización.

Para una gestión y manejo de los sistemas lacustres de San Pedro de la Paz urge un programa de monitoreo continuo o con frecuencias establecidas, acompañado de un constante seguimiento y fiscalización, con el fin obtener una base de datos robusta para futuras investigaciones que cooperen de manera conjunta con las autoridades y partes interesadas en la elaboración medidas de control y prevención para estos lagos. Además, se debería considerar la incorporación a la norma secundaria de calidad ambiental (NSCA) junto con un

manejo integrado de cuencas de lagos para la protección y conservación de estos cuerpos de agua dulce para las futuras generaciones.

Finalmente, este estudio demostró que la fuerte expansión urbana en la cuenca de Laguna Grande y Laguna Chica no provocó un aumento del estado trófico en los lagos, por lo tanto, la hipótesis es rechazada.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G. & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(3), 361–374.

Almanza, V., Figueroa, R., Parra, O., Fernández, X., Baeza, C., Yáñez, J. & Urrutia, R. (2016a). Bases limnológicas para la gestión de los lagos urbanos de Concepción, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(2), 313–326.

Almanza, V., Parra, O., Beltrán, J., Becerra, J. & Urrutia, R. (2013). Ocurrencia y monitoreo de floraciones de algas verde azules (Cyanobacteria) en ecosistemas de aguas continentales de Chile. *Reunión Latinoamericana sobre Algas Nocivas*. Florianopolis, Brasil, 23.

Almanza, V., Parra, O., Bicudo, C., Leite Sant'Anna C., Figueroa, R., Urrutia, R., Lara, F., Beltrán, C., Baeza, C. & González, P. (2016b). Guía para el estudio de cianobacterias en el sistema lacustre del Gran Concepción.

Almanza, V., Pedreros, P., Dail Laughinghouse IV, H., Félez, J., Parra, O., Azócar, M. & Urrutia, R. (2019). Association between trophic state, watershed use, and blooms of cyanobacteria in south-central Chile. *Limnológica*, 75, 30-41.

Álvarez, D., Pedreros, P., Delgado, V. & Urrutia, R. (2020). Evaluando el impacto de la contaminación antrópica en los sistemas lacustres. *Serie Comunicacional CRHIAM*.

Aztorquiza, O. (1929). Lota, antecedentes históricos con una monografía de la Compañía Minera e Industrial de Chile. *Sociedad Imprenta y Litografía Concepción*, 44.

Balaka, S., Mochache, A., Morara, L., Shitandi, A. & Mokuia G. (2019). Application of the Carlson's Trophic State Index for the Assessment of Trophic Status of Lake Simbi Ecosystem, a Deep Alkaline-saline Lake in Kenya. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 7(4), 327-333.

Balls, H., Moss, B. & Irvine, K. (1989). The loss of submerged plants with eutrophication. Experimental design, water chemistry, aquatic plant and phytoplankton biomass in experiments carried out in ponds in the Norfolk Broad. *Freshwater Biology*, 22, 71-87.

Campos-Harriet, F. (1982). *Historia de Concepción*. Editorial Jurídica de Chile, Santiago de Chile, 332.

Capodaglio, A., Muraca, A. & Becchi, G. (2003). Accounting for water quality effects of future urbanization: diffuse pollution loads estimates and control in Mantua's Lakes (Italy). *Water Science and Technology*, 47 (7–8), 291–298.

Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361–369.

CEPAL Naciones Unidas. (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*, Static Page, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods>

Chee, J. (2015). *Pearson's Product Moment Correlation: Sample Analysis*.

Chin, A. (2006). Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, 79, 460-487.

Chuvieco., E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Tercera edición. Ediciones RIALP S.A., Madrid, 568.

Cisternas, M. & Araneda, A. (2001). Variaciones isotópicas (^{210}Pb , ^{137}Cs) antropogénicas en el registro estratigráfico de un lago de la cordillera de Nahuelbuta, Chile. *Revista geológica de Chile*, 28(1), 105-115.

Cisternas, M., Martínez, P., Oyarzún, C. & Debels, P. (1999). Caracterización del proceso de reemplazo de vegetación nativa por plantaciones forestales en una cuenca lacustre de la Cordillera de Nahuelbuta, VIII Región, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 72, 661–676.

Cisternas, M., Torres, L., Urrutia, R., Araneda, A. & Parra, O. (2000). Comparación ambiental, mediante registros sedimentarios, entre las

condiciones prehispánicas y actuales de un sistema lacustre. *Revista Chilena de Historia Natural*, 73(1).

Cisternas, M. (1999). Evidencias sedimentarias de intervención antrópica en los suelos de una pequeña cuenca lacustre durante los últimos 50 años (San Pedro de la Paz, VIII Región, Chile). Tesis de Doctorado. Escuela de Graduados, Universidad de Concepción, Concepción, 130.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). (2013). CONAF, por un Chile forestal sustentable, 22.

CONAF. (2017). Catastro vegetacional. Recuperado de <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>

Contesse, D. (1987). Apuntes y consideraciones para la historia del Pino radiata en Chile. *Boletín de la Academia Chilena de la Historia*, 97, 351-373.

Cooke, D., Welch, E., Peterson, S. & Nichols, S. (2005). *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. 3ra edition. 612.

Cruces, F., Urrutia, R., Araneda, A., Torres, L., Cisternas, M. & Vyverman, W. (2001). Evolución trófica de Laguna Grande de San Pedro (VIII Región, Chile) durante el último siglo, mediante el análisis de registros sedimentarios. *Revista Chilena de Historia Natural*, 74(2), 407–418.

Dirección General de Aguas (DGA). (2018). Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos de la DGA. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA). (2021). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas Recuperado de: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>.

EULA. (1999). Estudio de Impacto Ambiental del Plan Regulador Comunal de San Pedro de La Paz. Unidad de Planificación Territorial Centro EULA-Chile. Documento de Trabajo Sistema Natural.

EULA. (2018). Atlas de Riesgos Naturales y Antrópicos Comuna de San Pedro de la Paz.

Figueroa, R., Cruces L., Araneda, A. & Cruces, F. (2008). El problema del “luchecillo” (*Egeria densa*), una maleza en sistemas lenticos del centro-sur de Chile. Congreso Internacional de Gestión Sostenible del Agua/Reutilización, Tratamiento y evaluación de la calidad. Grupo Diagnostico y Control de la Contaminación Antioquia; Red alfa Europa Aid, Cooperation office; Catedra UNESCO de Sostenibilitat, Universidad de Catalunya. Colombia.

Francis, T., Schindler, D., Fox, J. & Seminet-Reneau, E. (2007). Effects of urbanization on the dynamics of organic sediments in temperate lakes. *Ecosystems*, 10(7), 1057-1068.

Frumin, G., Haldna, M., & Tammeorg, O. (2017). Trophic status of Peipus Lake. *Russian Journal of General Chemistry*, 87(13), 3266–3271.

Fuenzalida, H. (1971). *Climatología de Chile*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 73.

Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M., Wolman, H., Coleman, S. & Freihage, J. (2010). Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate*, 12 (4), 681-717.

García, F. & Rosales, V. (2018). Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. *Agenda pública para el desarrollo regional, la metropolización y la sostenibilidad*, 2.

Giannuzzi, L. (2011). *Cianobacterias como determinantes ambientales de la salud*. Buenos Aires: Ministerio de Salud de la Nación, Presidencia de la Nación, 158.

Gupta, M. (2014). A New Trophic State Index for Lagoons. *Journal of Ecosystems*, 1–8.

Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R.J. & CorfeeMorlot, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 3 (9), 802– 806.

Havens, K., Sharfstein, B., Brady, M., Therese, L., Harwell, M., Maki, R. & Rodusky, A. (2004). Recovery of submerged plants from high water stress in a large subtropical lake in Florida, USA. *Aquat. Bot.*, 78, 67- 82.

Hidalgo, R., de Mattos C.A. & Arenas, F. (2009). *Chile: del país urbano al país metropolitano*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Geolibros N°12.

Hilt, S., Weyer K.V., Köhler A. & Chorus, I. (2009). Submerged macrophyte responses to reduced phosphorus concentrations in two peri-urban lakes. *Restor. Ecol.*, 18, 452-46.

Hughes, R., Dunham, S., Mass-Hebner, K., Yeakley, J., Scherck, C., Harte, M., Molina, N., Shock, C., Kaczynski, V. & Shaeffer, J. (2014). A review of urban water body challenges and approaches: rehabilitation and remediation. *Fisheries*, 39(1), 18-29.

Instituto Nacional De Estadísticas (INE). (2017). Censo de Población y Vivienda 2017. Santiago de Chile: INE.

Kemka, N., Njiné, T., Togouet, S., Menbohan, S., Nola, M., Monkiedje, A., Niyitegeka, D. & Compère, P. (2006). Eutrophication of lakes in urbanized areas: The case of Yaounde Municipal Lake in Cameroon, Central Africa. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 11(1), 47-55.

Lewin, W., Okun, N. & Mehner, T. (2004). Determinants of the distribution of juvenile fish in the littoral area of a shallow lake. *Freshw Biol*, 49,410–24.

López-Goyburu, P. (2012). Herramientas urbanísticas utilizadas para contener la dispersión urbana. Estrategias de la planificación territorial boloñesa. *Revista Arquitectura y Urbanismo*, 2, 57-67.

Mancini, M., Crichigno, S., Ortiz, M. & Haro, J. (2012). Lagos urbanos: importancia, dinamismo y multiplicidad de usos. El caso del lago Villa Dalcar (Córdoba, Argentina). *Biología Acuática*, 27, 175–189.

Martínez, C., Rojas, C., Rojas, O., Quezada, J., López, P., & Ruiz, Y. V. (2016). Crecimiento urbano sobre geformas costeras de la llanura de san pedro, área metropolitana de concepción. En *Las Costas Del Neoliberalismo*, 287–312.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2017). Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en aguas continentales y marinas 2017.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2002). Plan Maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias Talcahuano, San Pedro de la Paz, Chiguayante, VIII Región.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2021). ¿Qué son los ODS? <https://ods.mma.gob.cl/queson-los-ods/>

MINVU. (2018). Plan Regulador Metropolitano de Concepción: Informe Ambiental Complementario.

Molina, M., Romero, H & Sarricolea, P. (2009). Características socio ambientales de la expansión urbana de las Áreas metropolitanas de Santiago y Valparaíso. *Eure*, Instituto de Geografía e Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales, Pontificia Universidad Católica de Chile, 12, 187–200.

Morales, J. (1989). El desarrollo forestal en Concepción. Universidad Academia de Humanismo Cristiano (GEA). Serie: "Abriendo Caminos". Editores Grupo de Estudios Agro-Regionales, Chile, 341.

Moreno, D., Quintero, J., & López, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78, 25–33.

Mukaka, M. (2012). A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medicalresearch, 24.

Municipalidad De San Pedro De La Paz. (2012). Plan de desarrollo Comunal (PLADECO) 2012- 2016. San Pedro de la Paz, Chile.

Nakamura, M. & Rast W. (2012). "Guidelines for Lake Brief Preparation", Centro de Investigación para la Sostenibilidad y el MedioAmbiente, Universidad de Shiga (RCSE-SU) y la Fundación del Comité Internacional del Medio Ambiente de Lagos (ILEC), Japón. 17.

Navarrete, I., Dicen, G., Pérez, T., Mendoza, S., Rallos, R., Labides, J., Rivera, C., Hallare, A. & Claveria, R. (2019). Towards integrated management of a shallow tropical lake: assessment of water quality, sediment geochemistry, and phytoplankton diversity in Lake Palakpakin, Philippines. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(8).

Nojavan A., F., Kreakie, B. J., Hollister, J. W., & Qian, S. S. (2019). Rethinking the lake trophic state index. *PeerJ*, 7(11), 7936.

OCDE. (2016). Recomendación del Consejo de la OCDE sobre el Agua.

Oliver, C. & Zapatta, F. (1950). Libro de oro de la historia de Concepción. Litografía Concepción. Vol. I y II, 639.

Organización de Naciones Unidas (ONU). (2021). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

OSMAN. (2015). Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía. Informe Urbanismo, Medio Ambiente y Salud, 61.

Parra, O. (1989). La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio. *Amb. Y Des.*, 5(1), 117–136.

Parra, O. (2013). Memoria y Balance Campos Deportivos Llacolén, 18-19.

Parra, O., Almanza, V., Urrutia, R. & Baeza, C. (2013). Programa de monitoreo de la calidad del agua de las lagunas urbanas de concepción, Chile: análisis de resultados y propuesta.

Parra, O., Avilés, D., Becerra, J., Dellarossa, V. & Montoya, R. (1986). Primer registro de floración de algas verde-azules en Chile: Informe preliminar. *Gayana Botánica*, 43(1-4), 15-17.

Parra, O., Baeza, C., Almanza, V., Urrutia, R., Figueroa, R., Fernández, X., De Oure, P., González, P., Beltrán, J., Becerra, J., Lara, F., Castillo, L. & Muñoz, N. (2016). Una aproximación interdisciplinaria al estudio de floraciones de algas nocivas (fan) en lagos urbanos en Chile.

Parra, O., Baeza, C., Almanza, V., Urrutia, R., Figueroa, R., Fernández, X., De Oure, P., González, P., Beltrán, J., Becerra, J., Lara, F., Castillo, L. & Muñoz, N. (2015). Identificación, monitoreo y evaluación del riesgo de la población del Gran Concepción ante la presencia de cianobacterias y cianotoxinas.

Parra, O., Dellarossa V. & Ugarte, E. (1976). Estudio limnológico de las lagunas "Chica de San Pedro", La Posada" y "Lo Méndez" I. Análisis cuali y cuantitativo del plancton invernal. *Bol. Soc. Biol. Concepción*, 50, 73-86.

Parra, O., Valdovinos, C., Basualto, S., & Urrutia, R. (2005). Diversidad fitoplanctónica de los lagos Nahuelbutanos (Chile central), 147–161.

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), 51-83.

Pérez, L. & Salinas, E. (2009) Fragmentos de ciudad. Formas de crecimiento del Concepción metropolitano. Del país urbano al país metropolitano. Santiago: GEOlibros-Instituto de Geografía Pontificia Universidad Católica de Chile, 269-302.

Phillips, G., Eminson, D. & Moss, B. (1978). A mechanism to account for macrophyte decline in progressively eutrophicated freshwaters. *Aquatic Botany*, 4, 103 – 126.

POCH ambiental S.A (2009). Redefinición de la red mínima de lagos, 184.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2021). Objetivos de Desarrollo Sostenible PNUD. UNDP. <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

Rast, W. & M. Holland. (1988). Eutrophication of lakes and Reservoirs. A framework for making management decisions. *Ambio*, 17 (1), 2-12.

Rojas, A. (2018). Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo sobre las tasas de sedimentación en Laguna Grande de San Pedro de la Paz (Chile) durante los últimos 30 años (tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Rojas, C., Pino, J. & Jaque, E. (2013). Strategic Environmental Assessment in Latin America: a methodological proposal for Urban Planning in the Metropolitan Area of Concepción (Chile). *Land Use Policy*, 30, 519-527

Sánchez, M.A. (1989). La presencia del recurso natural en el proceso de desarrollo regional de la región del Bío-Bío, 47–53

Sanhueza, R. & Azócar, G. (2000). Transformaciones ambientales provocadas por los cambios económicos de la segunda mitad del siglo XIX; Universidad de Concepción. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 45, 181-194.

Scasso, F. (1996). Productividad íctica en lagos de diferente estado trófico: recomendaciones de conservación para pesca deportiva. Tesis de Grado Centro EULA-Chile Universidad de Concepción.

Scheuerell, M. & Schindler, D. (2004). Changes in the spatial distribution of fishes in lakes along a residential development gradient. *Ecosystems*, 7, 98–106.

Schindler, D., Geib, S. & Williams, M. (2000). Patterns of fish growth along a residential development gradient in north temperate lakes. *Ecosystems*, 3, 229-37.

Schueler, T. & J. Simpson. (2003). Why urban Lakes are different. *Watershed Protection Techniques* 1 (2), 747–750.

Secretaría Comunal de Planificación San Pedro de la Paz (SECPLA). (2018). Ficha Comunal San Pedro de la Paz 2018.

Smith, V., Tilman, G. & Nekola J. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental pollution*, 100, 179-196.

Strahler, A. & A.H. Strahler. (1989). *Geografía física*. Omega, Barcelona, 1954.

Sudha, M., Ravichandran, S. & Sakthivadivel, R. (2013). Water Bodies Protection Index for assessing the sustainability status of lakes under the influence of urbanization: A case study of south. *Environment, Development and Sustainability*, 15 (5), 1157-1171.

United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA). (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. UN, 123.

UNITED NATIONS. (2014). World Urbanization Prospects. <http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf>

Urrutia, R., Figueroa, R. & Parra, O. (2014). Caracterización limnológica de las Lagunas de Concepción.

Urrutia, R., Sabbe, K., Cruces, F., Pozo, K., Becerra, J., Araneda, A., Vyverman, W. & Parra, O. (2000). Paleolimnological studies of Laguna Chica of San Pedro (VIII Region): Diatoms, hydrocarbons and fatty acid records. 73, 717-728.

Verma, S. R., Chaudhari, P. R., Singh, R. K., & Wate, S. R. (2011). Studies on the ecology and trophic status of an Urban Lake at Nagpur City, India. *Rasayan Journal of Chemistry*, 4(3), 652–659.

VOLLENWEIDER, R.A. (1980). Control de la eutroficación. La naturaleza y sus recursos, 16 (3), 10-15.

Wang, R., Qin, H. & Zhao, Z. (2015). Control Studies of Peak Flow and Nonpoint Source Pollution for Urbanized Area Based on SWMM. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* 51 (1), 141–150.

WAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO.

Wei, Y., Yuanxi, L., Yu, L., Mingxiang, X., Liping, Z. & Qiuliang, D. (2020). Impacts of rainfall intensity and urbanization on water environment of urban lakes. *Ecology and Hydrobiology*, 20 (4), 513-524.

Woodford, J. & Meyer, M. (2003). Impact of lakeshore development on green frog abundance. *Biol Conserv*, 110, 277–84.

Xu, Z. & Xu, Y. (2015). Determination of Trophic State Changes with Diel Dissolved Oxygen: A Case Study in a Shallow Lake. *Water Environment Research*, 87 (11), 1970-1979.

Yang, H., Zhao, Y., Wang, J., Xiao, W., Jarsjö, J., Huang, Y., Liu, Y., Wu, J. & Wang, H. (2020). Urban closed lakes: Nutrient sources, assimilative capacity and pollutant reduction under different precipitation frequencies. *Science of the Total Environment*, 700.

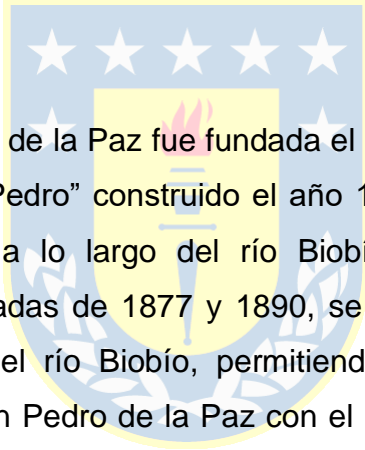
Yuan, H., Shen, J., Liu, E., Wang, J. & Meng, X. (2011). Assessment of nutrients and heavy metals enrichment in surface sediments from Taihu Lake, a eutrophic shallow lake in China. *Environmental Geochemistry and Health*, 33(1), 67-81.

Zhang, J., Song, X., Wang, G., Ruimin, H.E. & Wang, X. (2014). Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: Hydrological response to urbanization. *Advances in Water Science*, 25 686 (4), 594–605.

Zhao, G., Shi, R., Pang, B., Xu, Z. & Chang, X. (2016). Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: Case study for Liangshui River basin. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 35 (5), 698, 55–64.

7. ANEXOS

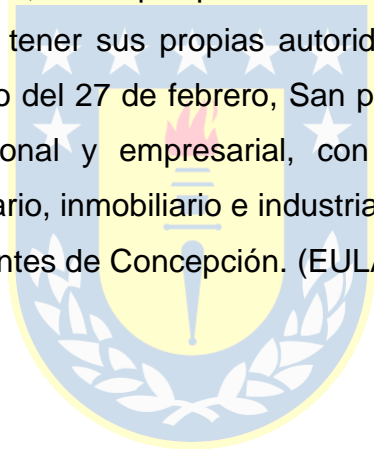
- **ANEXO 1:**



La Comuna de San Pedro de la Paz fue fundada el año 1995, cuyo nombre fue tomado del “Fuerte San Pedro” construido el año 1603, para el reforzamiento de una línea defensiva a lo largo del río Biobío en plena guerra de la Araucanía. Entre las décadas de 1877 y 1890, se realiza la construcción del puente ferroviario sobre el río Biobío, permitiendo la conexión de la zona carbonífera del sur de San Pedro de la Paz con el resto del territorio nacional. En otoño de 1943, con 1.648,5 metros de largo, se inaugura el primer puente carretero sobre el río Biobío llamado “Puente Viejo” o “Puente Biobío”, constituyendo un hito muy importante para la comunidad de San Pedro de la Paz, permitiendo una conexión más rápida y expedita con Concepción impulsando el desarrollo de la comuna.

A partir del año 1970, se produce una importante transformación y expansión en los asentamientos humanos de la comuna, comprendido en el sector norte, entre los lagos Laguna Grande y Laguna Chica. Es importante mencionar, que en este período la población de la comuna aumentó considerablemente, debido a la escasez territorios para construcción y viviendas deshabitadas en el centro

urbano de Concepción producto del terremoto del año 1960. En 1974 se habilita el “Puente Nuevo” con 2.310 metros siendo bautizado como “Juan Pablo II”, mejorando las comunicaciones con la capital regional y con la zona portuaria. A fines de la década de los setenta, debido al proceso de regionalización, San Pedro de la Paz pasó de depender de la comuna de Coronel, a la comuna de Concepción. En la década de los ochenta San Pedro de la Paz se sigue expandiendo a nuevos sectores: Huertos Familiares, Lomas Coloradas, Villa San Pedro, San Pedro Viejo, Michaihue, Boca Sur y Candelaria, para luego aparecer sectores como Andalué, El Venado, Idahue, El Recodo, entre otros. A comienzo de los años noventa, era considerado un barrio más de Concepción, a lo que posteriormente inicia un proceso para convertirse en comuna y tener sus propias autoridades. Actualmente, el año 2010, pasado el terremoto del 27 de febrero, San Pedro de la Paz se convirtió en un atractivo habitacional y empresarial, con millonarios proyectos de mejoramiento vial, ferroviario, inmobiliario e industrial, convirtiéndose en una de las comunas más importantes de Concepción. (EULA, 2018).



- **Anexo 2:**

Tabla AX1. Metodologías y límites de detección para cada uno de los parámetros a analizar en la columna de agua.

PARÁMETROS	METODOLOGÍA	LÍMITE DE DETECCIÓN
Temperatura	2550 B Standard Methods 22 th Edit. Termometría	0,01 °C
pH	4500 H B Standard Methods 22 th Edit. Electrometría	0,1
Conductividad	2510 B Standard Methods 22 th Edit. Electrometría	0,1 µS/cm
Oxígeno Disuelto	4500 O-B-C Standard Methods 22 th Edit. Volumetría Winkler	0,2 mg/L
Transparencia	Disco Secchi	No Aplica
Nitrógeno Total	Standard Methods for the examination of water 22 th Edition. 4500-N C (Pretratamiento), 4500-NO ₃ -E (Reducción), 4500-NO ₂ -B (Cuantificación)	0,01 mg/L
Fósforo Total ICP	Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 23 th Edition. 3120 B	0,006 mg/L
Clorofila a	Método Fluorométrico	0,09 µg/L