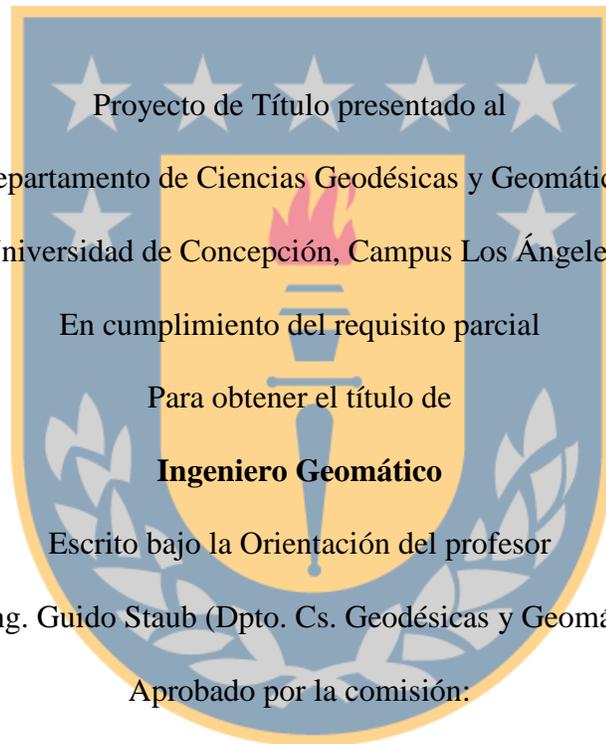


**IDENTIFICACION DE REGIONES CONTAMINADAS EN LA SUPERFICIE
DEL LAGO VILLARRICA CON BASE EN IMÁGENES SENTINEL EN EL
PERIODO 2017-2018**

Miguel Escobar Valdivia



Proyecto de Título presentado al

Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática

Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles

En cumplimiento del requisito parcial

Para obtener el título de

Ingeniero Geomático

Escrito bajo la Orientación del profesor

Dr. Ing. Guido Staub (Dpto. Cs. Geodésicas y Geomática)

Aprobado por la comisión:

Licenciado José Cornejo Morales (Dpto. Cs. Geodésicas y Geomática)

Mg. Gustavo Godoy Uribe (Dpto. Cs. Geodésicas y Geomática)

Los Ángeles

Marzo, 2019

RESUMEN

Actualmente la contaminación del Lago Villarrica; ubicado en la región de La Araucanía (Chile), ha alcanzado niveles alarmantes originando serios problemas de ordenes turísticos, económicos y medio ambientales para las ciudades costeras del lago.

De acuerdo a los últimos estudios publicados por el SEREMI el año 2018 de la Región de La Araucanía, las aguas del lago tendrían un incremento en la carga de nutrientes como Nitrato, Nitrito, Fósforo, entre otros. Tras investigaciones se ha determinado que estos nutrientes son producidos por fuentes puntuales y difusas, que por diversos motivos terminan desembocando en el lago y con ello han ido cambiando su estado.

El cambio en el estado de la naturaleza del lago de oligotrófico a mesotrófico viene hace años preocupando a la comunidad, por lo que desde el año 2004 se han realizado varios estudios hasta la fecha de zonas distintas de muestreo. Lamentablemente estos estudios no se pueden efectuar en plazos de tiempos cortos y tienen altos costos lo que repercute seriamente en el monitoreo de la contaminación del lago.

Por ello se propone la aplicación de la percepción remota a través de la misión SENTINEL-2, del Lago Villarrica para realizar un estudio que permita analizar la totalidad de la cubierta de agua del lago, además de determinar los nutrientes orgánicos de origen vegetal que se encuentran presentes en su superficie y el porcentaje de ocupación que tienen en el lago.

Una de las herramientas que permite la percepción remota es el uso de los índices espectrales orientados a detectar la aparición de sustancias orgánicas de carácter vegetal y que se encuentran en la superficie total del lago. Al aplicar esta modalidad de monitoreo

durante el análisis de imágenes satelitales de un año; se determina que los cambios más relevantes ocurren en los meses de abril, mayo y julio del 2017 donde se detecta una concentración mayor de organismos vegetales que generan un cambio en el estado trófico del lago cubriendo más de un 50 % del área total de la cubierta del agua.

Estos efectos se deben a la acumulación de sustancias vertidas dentro del Lago en los meses anteriores que generan el incremento de nitrógeno y fosforo.

Palabra clave: Percepción Remota, Sentinel, Contaminación Medio Ambiental, Lago, Villarrica, Chile.



DEDICATORIA y AGRADECIMIENTO

A Dios.

Padre Celestial tú que has guiado cada paso que he dado en este camino llamado vida, te agradezco la oportunidad tan maravillosa de poder vivir, disfrutar y ser feliz en este hermoso mundo.

A mi maestro.

Desde el primer día que entre a esta carrera he conocido a todo tipo de profesionales, de los cuales cada uno fue sacando lo mejor de mi persona como alumno y profesional. Cualquiera persona puede ser ingeniero, pero ser parte de la familia de Geomática solo pocos.

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor guía Guido Staub por haber creído en mí. Él fue el primero que creyó en este proyecto, me apoyó de manera personal e institucional y además me alentó para que concluyera esta investigación.

Muchas gracias profesor.

A mi hermana Romina.

Agradezco de todo corazón el apoyo, fuerza y paciencia de mi hermana; por todos estos años que hemos podido compartir tan maravillosamente, además agradezco constantemente tus sabias palabras “cierra los ojos por cinco segundos, solo en ese tiempo puedes tener miedo, después ábrelos con valor para cumplir tus sueños”.

A mis Padres Gloria e Isaac.

Los buenos valores se enseñan en casa, sin ustedes en mi vida no conocería el significado de la palabra unidad y amor familiar.

A mis Abuelos Lucia y Romilio.

Abuela tú que te fuiste temprano, te doy las gracias por todo lo que me enseñaste sobre la vida, la honestidad, perseverancia y además de la valentía necesaria para afrontar las dificultades.

Abuelo gracias por enseñarme el significado de la palabra de un hombre y que las acciones valen más que mil palabras.

A mis tíos (as) Rossana, Aníbal, Norman y Evelyn.

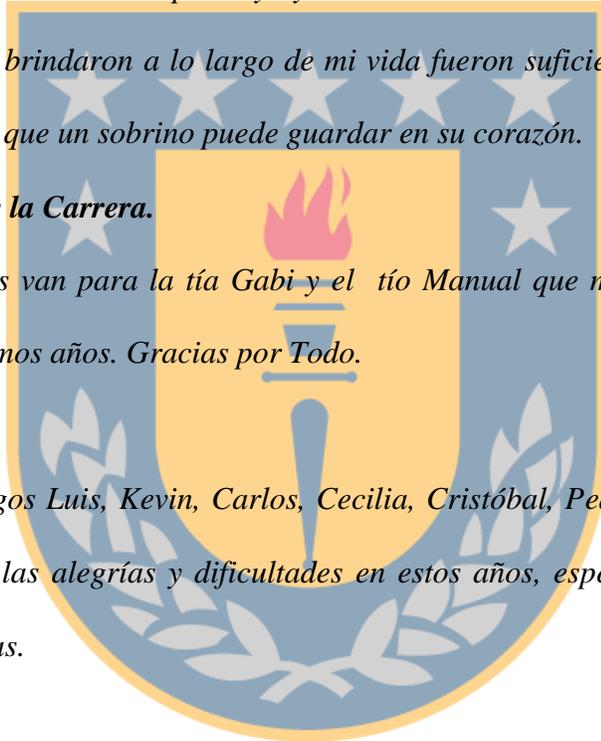
Doy gracias por todo el respaldo y ayuda dada en mi crecimiento como persona. Las palabras que me brindaron a lo largo de mi vida fueron suficientes para darme las más grandes alegrías que un sobrino puede guardar en su corazón.

A los funcionarios de la Carrera.

Estas palabras van para la tía Gabi y el tío Manual que me han aconsejado y ayudado en estos últimos años. Gracias por Todo.

A mis Amigos.

Para mis amigos Luis, Kevin, Carlos, Cecilia, Cristóbal, Pedro y Pablo que han compartido conmigo las alegrías y dificultades en estos años, espero volver encontrar con ellos como colegas.



Índice de Contenidos.

Índice	
1. Introducción	12
1.1. Planteamiento del Problema	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo General	13
1.2.2. Objetivos Específicos.....	13
2. Antecedentes Generales	14
2.1. Lago Villarrica.....	14
2.2. Primeros Antecedentes de contaminación del lago.....	15
2.2.1. Dirección General de Aguas, 2004	15
2.2.2. Universidad Austral de Chile, 2009.....	15
2.2.3. Litoral Austral, 2010.....	16
2.2.4. Departamento de Economía Ambiental, MMA, 2011.....	17
2.2.5. Universidad Católica de Temuco, 2012.....	17
2.2.6. Universidad del Desarrollo, 2016.....	18
2.3. Fuentes Puntuales.....	18
2.3.1. Pisciculturas.....	18
2.3.2. Aguas Servidas.....	19
2.4. Fuentes Difusas.....	19
3. Marco Teórico	21
3.1. Percepción Remota.....	21
3.2. La Radiación Electromagnética	22
3.3. Espectro Electromagnético	23
3.4. Firmas espectrales.....	24
3.4.1. Reflectividad de la vegetación	25
3.4.2. Estructura fisiológica	27
3.5. Índices Espectrales.....	27
3.5.1. Índices de vegetación.....	28
3.5.2. NDVI.....	28
3.5.3. Algoritmo TBDO	30
3.6. Clorofila-A.....	31

3.7.	Modelos de Correlación.....	32
3.7.1.	Regresión lineal simple.....	32
3.7.2.	Error medio Cuadrático.....	36
3.7.3.	Regresión Polinomial.....	36
3.7.4.	El error estándar de la Regresión Polinomial.....	38
3.7.5.	Coefficiente de determinación de la regresión polinomial.....	38
3.8.	Índices de Estados Tróficos.....	39
3.9.	Área de Estudio.....	42
3.10.	Misión SENTINEL-2.....	44
3.10.1.	Desarrollo de la Misión Sentinel-2.....	44
3.10.2.	Satélite.....	45
3.10.3.	Bandas.....	46
3.10.4.	Productos y Algoritmo.....	48
3.11.	Pre-procesamiento.....	48
4.	Desarrollo y Resultados.....	50
4.1.	Desarrollo del Proyecto.....	50
4.1.1.	Selección de Imágenes.....	50
4.1.2.	Corrección Atmosférica.....	51
4.1.3.	Resampling o Remuestreo.....	52
4.1.4.	Delimitación de la Zona de Estudio.....	53
4.1.5.	Cálculo de los índices espectrales.....	54
4.1.6.	Extracciones de los valores de pixel.....	55
4.1.7.	Modelos de Correlación.....	57
4.1.8.	Índice de Estado Trófico.....	58
4.1.9.	Determinación del Área de cada estado Trófico.....	59
4.2.	Resultados.....	60
4.2.1.	Resultados de la Correlación.....	60
4.2.2.	Comparación del índice <i>NDVI</i>	62
4.2.3.	Verano 2017- 2018.....	63
4.2.4.	Primavera 2017-2018.....	64
4.2.5.	Mapas de las áreas contaminación del Lago Villarrica.....	66
5.	Conclusiones.....	77
6.	Bibliografía.....	79



Lista de Tablas

Tabla 1 Clasificación eutrofia OCDE.....	41
Tabla 2 Coordenadas y Concentración de Clorofila de las estaciones.	43
Tabla 3 Especificaciones de las bandas sentinel-2	47
Tabla 4 Imágenes del primer semestre SENTINEL-2A y 2B usadas en el proyecto.	50
Tabla 5 Imágenes del segundo semestre SENTINEL-2A y 2B usadas en el proyecto...	51
Tabla 6 Coordenadas del Rectángulo.	54
Tabla 7 Datos extraídos de las estaciones de control mes de Marzo y Octubre 2017.	57
Tabla 8 Resultados de la Regresión de modelos lineales y Polinomio de grado 2 en meses de Marzo y Octubre	61
Tabla 9 Áreas de las Regiones Tróficas.....	67



Lista de Figuras

Ilustración 1 esquema de causas directa e indirectas	14
Ilustración 2 esquema de las formas de percepción Remota	21
Ilustración 3 Espectro electromagnético.....	23
Ilustración 4 Representación de la firma espectral.....	25
Ilustración 5 Firma de la vegetación.....	26
Ilustración 6 Imagen utilizando el índice NDVI.....	30
Ilustración 7 Recta ajustada a un conjunto de datos	33
Ilustración 8 Distancia de la recta al punto.....	33
Ilustración 9 Escala del Estado trófico.....	40
Ilustración 10 Zona de Estudio	43
Ilustración 11 Sentinel-2	45
Ilustración 12 Banda sin remuestrear (izquierda) y banda remuestreada (derecha)	53
Ilustración 13 Imagen completa e imagen limitada	54
Ilustración 14 Esquema de Cálculo de Índice.....	55
Ilustración 15 Esquema del Cálculo de concentración de clorofila-a estimada.....	58
Ilustración 16 Raster con índice de estado Trófico.....	59
Ilustración 17 Regresión polinómica del mes Marzo 2017	61
Ilustración 18 Regresión Lineal mes de Marzo 2017	62
Ilustración 19 Gráfico de NDVI verano 2017.....	63
Ilustración 20 Gráfico NDVI Verano 2018	63
Ilustración 21 Gráfico NDVI primavera 2017	64
Ilustración 22 Gráfico NDVI de estación primavera 2018	65

Ilustración 23 localidades aledañas a las estaciones de control.....	67
Ilustración 24 Mapa de marzo 2017.....	68
Ilustración 25 Mapa de Abril 2017.....	69
Ilustración 26 Mapa de Mayo 2017.....	70
Ilustración 27 Mapa julio 2017.....	71
Ilustración 28 Mapa de Agosto 2017.....	72
Ilustración 29 Mapa de Septiembre 2017.....	73
Ilustración 30 Mapa de Octubre 2017.....	74
Ilustración 31 Mapa de mes de Noviembre 2017.....	75
Ilustración 32 Mapa de Diciembre 2017.....	76



1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema.

El Lago Villarrica se ubica al Sureste de la Provincia de Cautín y al Norte del Volcán Villarrica, en la Región de la Araucanía, Chile. A una altura de 230 metros nivel medio del mar, es el octavo más grande de Chile y pertenece a los llamados “Lagos Araucanos”.

Se clasifica como un lago oligotrófico y se encuentra en proceso eutrofización debido a la contaminación presentada en sus aguas. (Zambrano, Ortega, Ciudad, Nistal & Martínez, 2018).

El ecologista y ex concejal de Villarrica Víctor Durán expone que la contaminación del Lago Villarrica “se originó hace más de 100 años a causa de la deforestación nativa en la cuenca lacustre y se comenzó a poblar incipientemente los territorios de las localidades de Villarrica y Pucón principalmente” (Depto. Comunicaciones Municipalidad Villarrica, 2018).

En los últimos años la contaminación del lago ha ido en incremento a causa de la concentración de nutrientes desembocados en el lago. (Zambrano et al., 2018) Estos nutrientes se originan principalmente de dos tipos de fuentes:

1. Fuentes puntuales que agrupan a las pisciculturas, plantas de tratamiento de Pucón y descarga directa de aguas servidas.
2. Fuentes difusas reclutan a las escorrentías desde diferentes usos de suelo y fosas sépticas ubicadas en la ribera sur del lago.

Producto de la historia del Lago Villarrica y de los ingresos que se generan al ser una zona turística, se encuentra en un constante monitoreo desde el año 2004 a la fecha.

El último estudio realizado por parte del SEREMI de la Región de la Araucanía y el Centro de Gestión y Tecnologías del Agua de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Frontera en el año 2018, a determinado un aporte total de los nutrientes anual de 128,5t/año del cual un 44.5% provendría de Pisciculturas, PTAS Pucón y AS Curarrehue y un 55,5% de fuentes difusas. Los actuales estudios han tomado la información por medio de zonas de muestreo que están distribuidas en los cauces de los ríos y los puntos que desembocan en el lago.

1.2. Objetivos:

1.2.1. Objetivo General.

- Identificar las regiones contaminadas en la superficie del Lago Villarrica con base en imágenes SENTINEL.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Determinar las sustancias orgánicas vegetales presentes en la cubierta del agua del Lago Villarrica durante 2017-2018.
- Analizar la totalidad de la cubierta de agua, para determinar zonas contaminadas.
- Realizar una comparación de los resultados obtenidos en base a las imágenes de la misión SENTINEL con los estudios anteriores realizados del lago Villarrica a partir de muestreos de agua.

2. Antecedentes Generales

2.1. Lago Villarrica.

De acuerdo a los estudios realizados por la Universidad de la Frontera el lago Villarrica se considera una macroregión de importancia para la conservación de invertebrados acuáticos de agua dulce.

Los últimos antecedentes sugieren una transición del lago, dónde su condición oligotrófica (baja biomasa fitoplanctónica, alta transparencia del agua y limitada concentración de nutrientes) a una condición mesotrófica (nivel intermedio de producción de nutrientes). Esta situación actual ha motivado la implementación de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) para la protección de las aguas continentales superficiales del lago Villarrica (Zambrano, Ortega, Ciudad, Nistal & Martínez, 2018).

La existencia de causas que contaminan al Lago Villarrica se clasifican en causas directas o indirectas. Entre estas destacan las infiltraciones de aguas servidas producto a los sistemas de tratamiento individuales de las viviendas construidas en la orilla sur del lago, el aumento de población durante la temporada de verano (Villarrica y Pucón), la escorrentía superficial proveniente desde la propia cuenca, piscicultura y poblados presentes aguas arriba del Río Trancura.

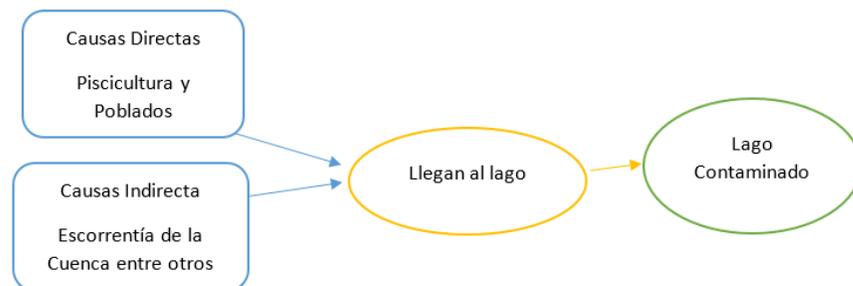


Ilustración 1 esquema de causas directa e indirectas

2.2. Primeros Antecedentes de contaminación del lago.

Con el paso de los años diferentes instituciones como la Dirección General de Aguas, Universidad Austral de Chile, Departamento de Economía Industrial, entre otras. Han realizado estudios medio ambientales para conocer el estado del Lago Villarrica, en donde se han implementado diferentes metodologías, creando normativas reguladoras y desarrollando estaciones de control; con el objetivo de conocer las posibles fuentes emisoras que están involucradas en el proceso de eutrofización del Lago Villarrica.

2.2.1. Dirección General de Aguas, 2004.

En el año 2004, la Dirección General de Aguas (DGA) dio a conocer información asociada al Lago Villarrica donde se dio descripción del nacimiento del río Toltén, el uso de los cursos de agua que aportan al lago (Liucura y Trancura) y la calidad del agua del río Toltén.

La principal conclusión que se desprende de éste estudio es que la subcuenca del Trancura corresponde a la hoya hidrológica del río Pucón (Trancura), desde su nacimiento en la cabecera siguiendo la vertiente occidental de la cordillera, hasta su desembocadura en el Lago Villarrica, incluyendo el río Liucura.

La calidad natural se considera en buen estado, con una preponderancia de metales pesados producto de formaciones geológicas (Zambrano et al., 2018).

2.2.2. Universidad Austral de Chile, 2009

En 2009, la Universidad Austral de Chile (UACH) realizó un diagnóstico de la calidad de las aguas del Lago Villarrica. El objetivo fue proponer un anteproyecto de la norma secundaria de calidad y recomendaciones para el monitoreo del Lago Villarrica.

Los aspectos que abarcó el estudio corresponden a los aportes de las fuentes difusas, las pisciculturas, planta de tratamiento de agua de Pucón y aportes de los suelos.

En el año 2008, la estimación de cargas totales de Fósforo y Nitrógeno fueron de 33,4 t/año y 1103,1 t/año (Zambrano et al., 2018). Con esta información se determinó que el Lago Villarrica no lograba mantener un estado oligotrófico y se encontraba en proceso de eutrofización.

Los mayores aportantes de nutrientes correspondían a los suelos, plantas de tratamiento, las pisciculturas y fuentes difusas.

Los datos entregados por la UACH (2009) plantearon valores promedios anuales como:

1. Profundidad del disco de Secchi entre los 4 y 9 metros,
2. Fósforo disuelto y total entre 0,010 y 0,025 mg/l.
3. Nitrógeno disuelto y total entre los 0,010 y 0,030 mg/l
4. Concentración de clorofila no superior a los 10 µg/l.

Por último, se estimó una carga crítica de fósforo total de 70-120 t/año y de nitrógeno total de 490-840 t/año. De acuerdo a ésta información en el año 2009, la carga de Fósforo se excedía casi tres veces y la de Nitrógeno entre 1,4 y 2,2 veces (Zambrano et al., 2018).

2.2.3. Litoral Austral, 2010.

En 2010, el Litoral Austral realizó estudios que determinan el estado trófico y de conservación del Lago Villarrica. El estudio concluye que es presumible que el Lago

Villarrica se encuentra en un estado hipereutrófico con concentraciones de Fósforo total superiores a los 100 $\mu\text{g/l}$ y de Nitrógeno total superiores a los 1500 $\mu\text{g/l}$.

2.2.4. Departamento de Economía Ambiental, MMA, 2011.

Los estudios presentados por el Departamento de Economía Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente en el año 2011, tuvieron el objetivo de definir los niveles de calidad para prevenir el deterioro o cambio acelerado del estado trófico del Lago Villarrica.

El análisis concluyó que los principales aportantes son la escorrentía afectada por el tipo de uso de suelo, seguido por las pisciculturas. En un segundo orden la Plantas de Aguas Servidas (PTAS) de Pucón, las aguas servidas de Curarrehe y los pozos sépticos ubicados en el borde del Lago Villarrica y las riberas de sus afluentes.

En este mismo análisis, se predijo que entre los periodos 2012-2021 la concentración de Fósforo total en la zona Pelagial podría superar los 10 $\mu\text{g/l}$ mientras que, para el Nitrógeno total, cuyo límite se establece en 150 $\mu\text{g/l}$ se encontraría aún bajo el límite establecido.

2.2.5. Universidad Católica de Temuco, 2012.

En el año 2012 la Universidad Católica de Temuco realizó estudios con la finalidad de analizar la carga de nutrientes de Nitrógeno y Fósforo de las subcuencas aportantes al Lago Villarrica (Zambrano et al., 2018). Se estimó la influencia del manejo y la vegetación asociados a los usos de suelo de las subcuencas, en la producción de agua, sedimentos y nutrientes hacia el lago.

Las recomendaciones que genera éste estudio son de contar con más estaciones de control asociadas a las subcuencas que poseen pisciculturas o con potencial acuícola. También generar los incentivos de forestación del bosque nativo siempre verde en zonas forestales y áreas de mayor exportación de nutrientes a los cauces, con la intención de disminuir los aportes difusos (Zambrano et al., 2018).

2.2.6. Universidad del Desarrollo, 2016.

En 2016, la Universidad del Desarrollo plantea el hecho de que ninguno de los dos estudios (UACH, 2009; UCT, 2012) se hace cargo de un problema que en apariencia es relevante, como son las emisiones generadas por las PTAS rurales y fosas sépticas.

El estudio concluyó que no existe información suficiente que permita dimensionar el real aporte de estas fuentes a la contaminación del Lago (Zambrano et al., 2018).

2.3. Fuentes Puntuales:

2.3.1. Pisciculturas.

En la actualidad, una de las fuentes contaminantes que tienen incidencia en el Lago Villarrica son las pisciculturas salmoacuifas, las cuales presentan un sistema de cultivo en tierra con flujo abierto.

El sistema consiste en instalaciones en las cuales el agua proveniente de cursos de agua adyacentes ingresa hacia tanques donde los peces son mantenidos hasta alcanzar el crecimiento adecuado para su traslado a sitios de esmoltificación y/o directamente engorda.

El impacto que generan estas instalaciones es asociado a la porción de alimento no consumido y a las materias fecales, residuos característicos por un alto contenido de Nitrógeno y Fósforo.

Por otro lado, Nieto et al. (2010) plantea que estos sistemas productivos están considerados como fuentes fijas de contaminación.

2.3.2. Aguas Servidas.

Sólo la ciudad de Pucón posee una planta de tratamiento de aguas servidas, la empresa que gestiona este servicio es Aguas Araucanía. El tipo de planta corresponde a un SBR (*Secuencial Batch Reactor*), el cual descarga al río Claro, afluente del Lago Villarrica.

El sistema cumple la normativa que se estipula en D.S. N°90, la carga de nutriente que recibe el Lago Villarrica no es nula, ya que la remoción de fósforo y nitrógeno es cercana a 60% y 70%, para un caudal promedio de 130 l/s.

Los tipos de aporte de la planta son nitrógeno 80,8 t/año y fósforo 4,9 t/año éstos nutrientes llegan al lago a través de río Claro.

Por otra parte, en Curarrehue el sistema público de alcantarillados no dispone de tratamiento de aguas, éstas son directamente descargadas en siete puntos del río Trancura (Zambrano et al., 2018).

2.4. Fuentes Difusas.

Se consideran como fuentes difusas los aportes por escorrentías desde diferentes usos de suelos en la cuenca. El estudio presentado por la Universidad Católica de Temuco en

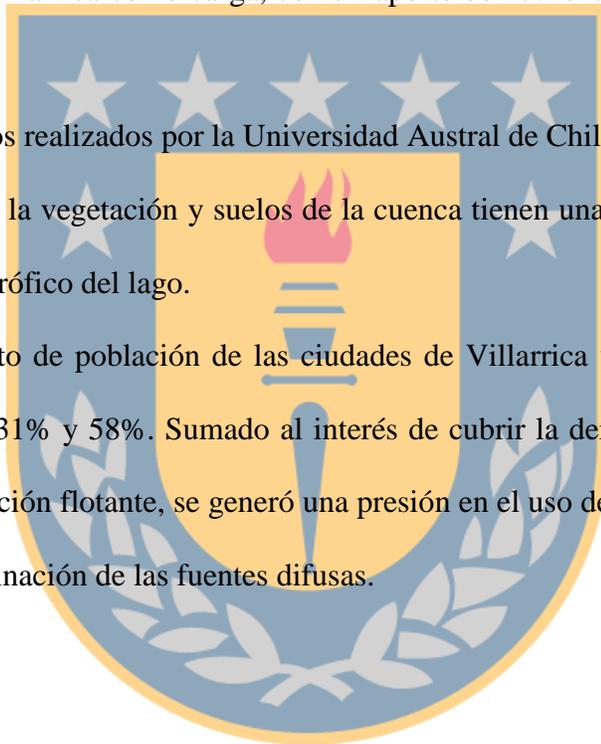
el año 2012 determinó que la influencia del manejo y la vegetación asociada a los usos de suelos de las principales subcuencas del Lago Villarrica.

En los estudios se determina que la concentración de nutrientes aportados en la cuenca por cada uso de suelo, en el cual se observa que la principal actividad aportante de Nitrógeno total es la actividad agrícola con un aporte de 27% y en el caso de Fósforo total el aporte es de 8%.

Otras fuentes difusas corresponden a las casas de verano. Estas están situadas en la ribera sur del Lago Villarrica como carga, con un aporte de nutrientes al cuerpo de agua en estudio.

Según los estudios realizados por la Universidad Austral de Chile en 2009 contemplo que el mal manejo de la vegetación y suelos de la cuenca tienen una gran implicancia en el aumento del nivel trófico del lago.

Con el incremento de población de las ciudades de Villarrica y Pucón en los años 2002 al 2012, en un 31% y 58%. Sumado al interés de cubrir la demanda de lugares de estancia para la población flotante, se generó una presión en el uso de suelo y un aumento en el nivel de contaminación de las fuentes difusas.



3. Marco Teórico.

3.1. Percepción Remota.

La percepción remota se define como la técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre una superficie terrestre. (Chuvieco, 1996).

Se introducen tres principales elementos que se relacionan entre sí.

1. Sensor
2. Objeto observado
3. Flujo energético

La adquisición de información por los sensores puede ser por reflexión (1), por emisión (2) y por emisión-reflexión (3) (Chuvieco,1996). Como se muestra en la Ilustración 2.

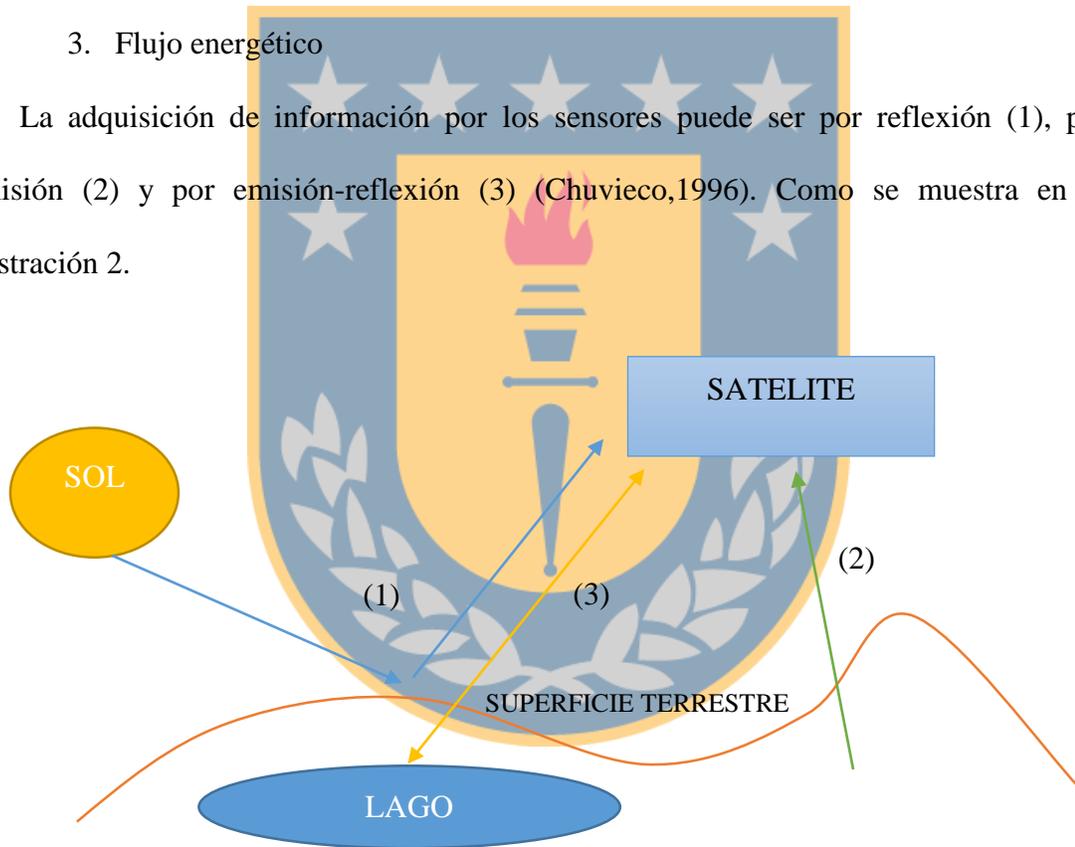


Ilustración 2 esquema de las formas de percepción Remota

Fuente: Elaboración propia

La reflexión es el método más importante, puesto que obtiene la información directamente de la luz solar. (Chuvienco, 1996). Gracias a la acción del sol que ilumina la superficie terrestre, se refleja la energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Este flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite a las estaciones receptoras.

Otro aspecto que se considera entre la superficie y sensor es la interacción de la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original.

3.2. La Radiación Electromagnética.

El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituyen una forma de radiación electro-magnética. Como se conoce la energía se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: Convección, conducción y radiación (Chuvienco, 1996).

El proceso de radiación es la base de los sistemas de percepción remota. En la radiación electro-magnética se desarrollan dos teorías; una que explica el comportamiento como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell). Mientras la otra teoría considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero (Planck, Einstein). Las dos teorías son aceptadas por el comportamiento de la luz.

La teoría ondulatoria establece que cualquier partícula con una temperatura sobre el cero absoluto genera una vibración, que a su vez origina una serie de perturbaciones tipo onda que se desplazan a través del campo eléctrico y campo magnéticos que rodean a las partículas, perpendiculares entre ellos (Hernández, 2011).

Mientras que la teoría cuántica determina que todo cuerpo radiante es capaz de emitir energía electromagnética de forma discreta y no continua, cuya magnitud es un múltiplo entero de un número específico, llamado cuanto.

3.3. Espectro Electromagnético.

El espectro electromagnético es un continuo de energía, de longitudes de onda que varían desde nanómetros hasta metros. Todos los cuerpos emiten energía electromagnética de tal manera que la máxima intensidad de emisión se asocia a menores longitudes de ondas a medidas que la temperatura del cuerpo aumenta (Hernández, 2011).

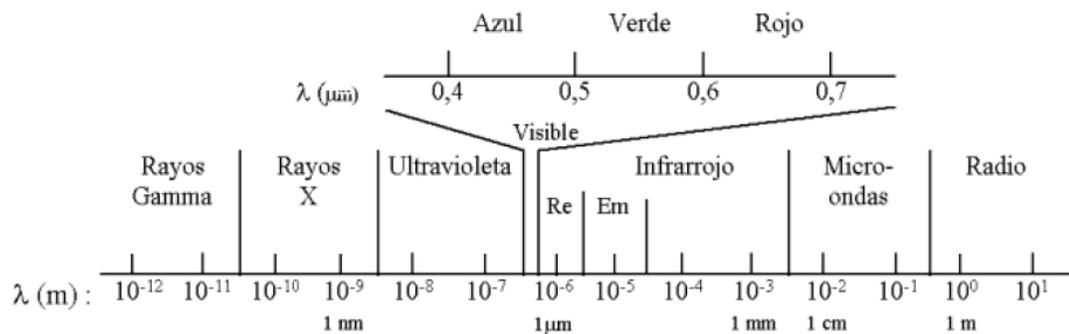


Ilustración 3 Espectro electromagnético.

Fuente: Hernández, 2011.

Todo cuerpo con temperatura sobre el cero absoluto genera y emite a su entorno energía en forma de radiación. En el caso del concepto del cuerpo negro es capaz de absorber toda la energía de la radiación que incide sobre él y de emitir la máxima cantidad de energía de acuerdo a su temperatura (Hernández, 2011). En la naturaleza no existe una sustancia como el cuerpo negro, pero el concepto es útil para la formulación de leyes físicas a través de la comparación de distintas sustancias (Young, H., Freedman, R., 2009).

La energía electromagnética sufre alteraciones cuando entra en contacto con la atmósfera, esto es producto de la interacción de los gases y aerosoles atmosféricos. Las alteraciones corresponden a un cambio de dirección e intensidad de la radiación, longitud y frecuencia de onda, y distribución espectral de la energía radiante (Hernández, 2011). Los procesos que generan estos fenómenos se denominan dispersión, absorción y refracción.

La dispersión es el resultado de múltiples interacciones entre la radiación incidentes y los gases y partículas atmosféricas. (Hernández, 2011).

La energía electromagnética cuando interactúa con la superficie terrestre puede ocurrir procesos de reflejar (reflectancia), absorbida o transmitida. Parte que se refleja suele expresarse en términos de un coeficiente llamado albedo (porcentajes reflejado de la radiación incidente) (Hernández, 2011).

3.4. Firmas espectrales.

Se entiende como firma espectral a la interacción de la energía electromagnética con la superficie terrestre, esta interactúa con cada tipo de material ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral particular (Hernández, 2011).

Las firmas espectrales ayudan a identificar cada uno de los objetos de la superficie de la tierra, cada uno de los objetos tiene una respuesta espectral única.

Se representan mediante la energía reflejada en relación a las longitudes de onda, sin considerar el efecto atmosférico de la trayectoria objeto-sensor, y medida en condiciones ideales de ángulos incidente (Castro, 1999).

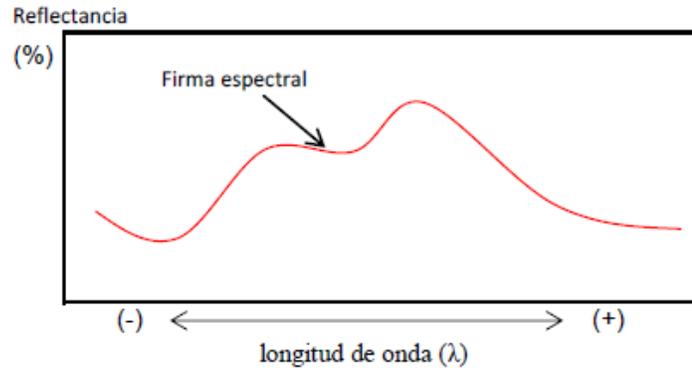


Ilustración 4 Representación de la firma espectral.

Fuente: Hernández, 2011.

La Ilustración 4 representa la relación de la reflectancia y la longitud de onda mientras se observa un objeto de interés.

3.4.1. Reflectividad de la vegetación.

La reflectividad de la vegetación se conforma por un conjunto de hojas que se disponen y agrupan de formas diferentes, lo cual puede ser medida por el LAI (índice de área foliar) que es la superficie total de hojas por superficie de terreno (Castro, 1999). Además, la vegetación tiene un comportamiento dinámico debido a los cambios fenológicos que ocurren estacionalmente. En palabras más simple su firma espectral cambia durante el año (Hernández, 2011).

La reflectancia espectral de la cobertura vegetal varía con las longitudes de onda reflejadas más en ciertas longitudes de onda que en otras. En la Ilustración 5 se representa la firma espectral de la vegetación sana.

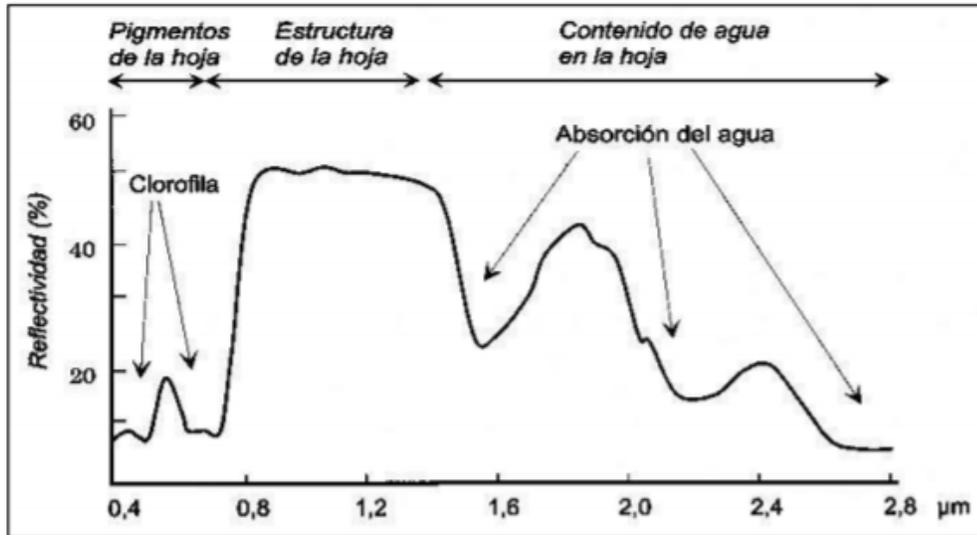


Ilustración 5 Firma de la vegetación.

Fuente: Chuvieco, 1996.

Como se observa en la Ilustración 5 se resumen las diferentes regiones espectrales como:

- Región del visible (0,4 a 0,7 μm) presenta una alta absorción, baja reflectancia y transmitancia debido a los pigmentos.
- Región del infrarrojo cercano (0,7 a 1,3 μm) donde absorción es baja, reflectancia media-alta y transmitancia media. En este rango, la reflectividad crece notablemente debido a la escasa absorción de las plantas por su estructura fisiológica.
- Región del infrarrojo medio (1,3 a 3,0 μm) la absorción en esta región es media-alta, la reflectancia media y transmitancia baja. En esta región, el agua contenida en la hoja es la responsable de la baja reflectividad, dado que en ésta región el agua presenta un máximo de absorción.

Al interior de la planta presentan cuatro pigmentos principales, la clorofila a y b, β -caroteno y xantofila, de los cuales se absorben la energía en el espectro visible para realizar el proceso de fotosíntesis.

En la Ilustración 5 se observa una baja reflectividad de la vegetación en las zonas del espectro visible correspondiente al azul ($0,4 \mu m$) y rojo ($0,7 \mu m$) producto de la presencia de la clorofila a y b, de las cuales son responsables de la absorción en estas longitudes de onda (Castro, 1999).

Mientras los carotenos y xantofilas lo hacen con la longitud verde ($0,55 \mu m$) y algunas longitudes más largas.

3.4.2. Estructura fisiológica.

Los índices de refracción presentan una discontinuidad entre las partes de la hoja que es determinada por la reflectancia en el infrarrojo. Esta discontinuidad ocurre entre membranas y el interior del citoplasma, entre células individuales y espacios del aire del mesófilo esponjoso (Castro, 1999).

Gracias a la combinación de pigmentos y la estructura fisiológica de la hoja se generan propiedades características de la reflectancia, como baja reflectancia en el rojo y en el azul. Una reflectancia media en el verde y alta en el infrarrojo.

3.5. Índices Espectrales.

Los índices espectrales o coeficientes espectrales como su nombre indica es un cociente o ratio que implica efectuar una división, de pixel a pixel, entre los niveles digital (ND) almacenados en dos o más bandas de la misma imagen (Chuvienco, 1996).

Se utilizan ampliamente en dos situaciones. La primera situación es para mejorar la discriminación entre dos cubiertas con comportamiento reflectivo muy distinto en esas dos bandas (Chivieco, 1996). Un ejemplo analizar el suelo y la vegetación en el espectro visible e infrarrojo cercano.

La segunda situación es reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

3.5.1. Índices de vegetación.

Los índices de vegetación (IV) corresponden a una forma indirecta de medir variables biofísicas de la vegetación con base en datos espectrales obtenidos con sensores remotos (Paz Pellat & Romero, 2014).

Estos índices con base en datos captados por sensores remotos explotan el alto contraste entre las bandas del rojo e infrarrojo cercano de la vegetación, para caracterizar y diferenciar de otros objetos terrestres.

Mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias afectan muy poco el infrarrojo cercano. Por ésta razón se producen un notable contraste espectral entre la baja reflectividad de la banda roja del espectro y la del infrarrojo cercano lo que permite separa la vegetación sana de otras cubiertas.

3.5.2. NDVI.

Son diversas las expresiones matemáticas que se han desarrollado para el estudio de cubiertas de vegetación, desde simples restas de las bandas del infrarrojo cercano y la del rojo. Hasta complejas ecuaciones normalizadas.

Sin embargo, el índice más utilizado es el denominado índice de vegetación de diferencia normalizada. El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) se ha perfeccionado por distintos autores, simplificándolo o buscando variaciones que lo ajusten a determinadas condiciones. Los resultados y simplicidad conseguidos han demostrado ser un índice válido y el de mayor aplicación en estudios de vegetación (Castro, 1999).

El índice NDVI corresponde a un cociente y se apoya en la particular propiedad espectral de la vegetación en el rojo e infrarrojo cercano, el cual permite discriminar masas vegetales (Castro, 1999).

Como se hizo mención en párrafos anteriores la actividad fotosintética a causa de los pigmentos presentes en las hojas de las plantas absorbe una cantidad de energía en la banda del rojo (0,6 a 0,7 micrómetros) y refleja en el infrarrojo cercano (0,7 a 1,1 micrómetros). Al realizar la diferencia de estas dos bandas permite separar las clases de vegetación, e inferir sobre su estado fitosanitario.

$$NDVI = \frac{IRc - R}{IRc + R}$$

Ecuación 1 Fórmula del NDVI, Fuente: Elaboración Propia

En la Ecuación 1 muestra la diferencia entre la banda del infrarrojo cercano menos el rojo dividido entre infrarrojo cercano más el rojo. El resultado de esta operación clasifica la vegetación en un rango de valores de -1 a 1. En la investigación que realiza el autor Taipale en 2018 clasifica el rango del índice NDVI en diferentes clases de valores como:

- -1 a 0 como objetos inanimados o muertos de los cuales se pueden encontrar carreteras, edificios, cuerpos de agua o plantas muertas.

- 0 a 0.33 material vegetativo poco saludable o estresado.
- 0.33 a 0.66 moderadamente saludable.
- 0.66 a 1 muy saludable.

En la Ilustración 6 se observa el resultado del *NDVI* mostrando distintas tonalidades de los cuales destacan los tonos claros que corresponden a valores altos en el índice de vegetación (vegetación sana) y tonos oscuros correspondientes a valores más bajos donde la vegetación es más rala o se encuentra enferma.



Ilustración 6 Imagen utilizando el índice *NDVI*

3.5.3. Algoritmo TBDO.

El algoritmo TBDO se basa en la evaluación de la reflectividad de tres bandas entre el rojo e infrarrojo. Este modelo conceptual se utiliza para estimar la concentración de pigmento de vegetación terrestre (Gitelson, 2005). El modelo conceptual muestra Ecuación 2.

$$TBDO = \left(\frac{1}{R(\lambda_1)} - \frac{1}{R(\lambda_2)} \right) \times R(\lambda_3)$$

Ecuación 2 algoritmo de 3 bandas. Fuente: Elaboración propia

Donde $R(\lambda_1)$, $R(\lambda_2)$ y $R(\lambda_3)$ corresponden a reflectancia de la longitudes de ondas

λ_1 , λ_2 y λ_3 .

La longitud de onda (λ_1) corresponde a la región espectral que es más sensible a la absorción por el pigmento de interés, aunque es afectada por la absorción de otros pigmentos.

En la Longitud de onda (λ_2) se interpreta como la región espectral es menos sensibles a la absorción de pigmento y es más sensible a la absorción, por otros constituyentes (Gitelson, 2005).

Finalmente la Longitud de onda (λ_3) se entiende como la región espectral donde la reflectancia es mínimamente afectada por la absorción de pigmentos, y es utilizada para dar cuenta la variabilidad en la dispersión entre la muestras.

3.6. Clorofila-A.

De acuerdo con (Allinger, Johnson & Lebel, 1984) la clorofila-a es el pigmento verde que permite a las plantas incluyendo las algas convertir la luz solar en compuestos orgánicos durante el proceso de fotosíntesis.

Clorofila-a es la clorofila predominante en las algas, además de ser un indicador de contaminación por nutrientes en los lagos. Esto debido al exceso de nutrientes que impulsa el crecimiento de las algas, la clorofila-a permite medir la cantidad de algas presentes en zonas específicas y establecer la cantidad del compuesto, que varían entre 0-1mg/m³ (Rodríguez, N., Preciado, M., 2015).

La presencia de clorofila está relacionada con el fitoplancton, las algas determinan la estructura del ecosistema, los cambios generados por la clorofila pueden ser cambios físicos y químicos que conducen a la contaminación del agua de origen natural y antropogénico.

La calidad del agua oceánica y continental monitoreada, con muestras in-situ puede ser complementada con teledetección espacial, la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (Chievieco, 1996).

Lo cual supone, la existencia de interacción atmosférica entre la tierra y el sensor por reflexión de energía solar y por emisión de cuerpos. Las imágenes empleadas en esta técnica son tomadas con sensores remotos.

3.7. Modelos de Correlación.

3.7.1. Regresión lineal simple.

Los modelos de regresión lineal hacen referencia a la naturaleza de la relación entre distintas variables donde se desea expresar esta relación en forma matemática determinando una ecuación que conecte las variables (Murray & SPIEGEL, 1977).

La modelización estadística más simples es a través de una ecuación lineal donde se busca expresar las variables dependientes a través de variables independiente. La estructura del modelo de la regresión lineal.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Ecuación 3 modelo de regresión lineal. Fuente Elaboración Propia

Donde

- X variable independiente
- Y variable dependiente
- β_0 valor en el origen
- β_1 pendiente de la recta

- ε error

La Ecuación 3 refleja una relación lineal, y en ella figura una única variable explicativa, este caso es más simple para una sola variable donde se representa una recta. Esta recta se ajusta al conjunto de datos y crea una expresión matemática que permite predecir, de forma aproximada, el valor de las variables dependientes cuando se conoce el valor de una variable independiente (Ferre, 2017).

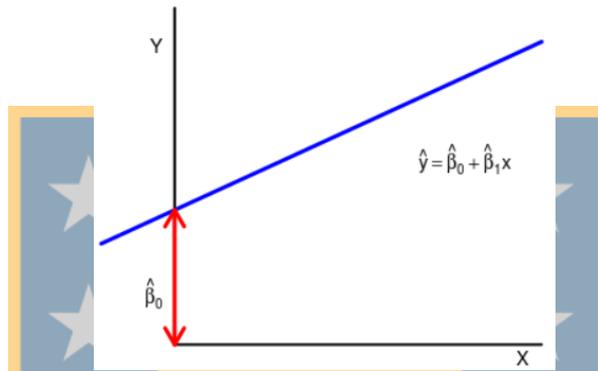


Ilustración 7 Recta ajustada a un conjunto de datos

La comprobación del modelo de regresión se necesita una serie de diagnósticos que informa sobre la estabilidad e idoneidad del modelo de regresión. Uno de estos criterios es encontrar la recta que se ajusta mejor a los datos mediante el criterio de mínimos cuadrados.

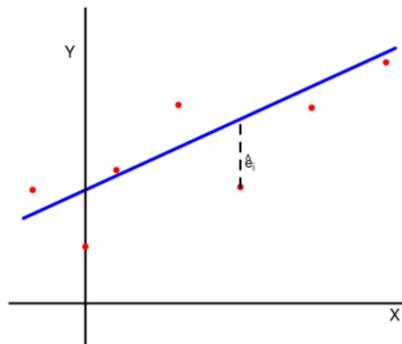


Ilustración 8 Distancia de la recta al punto

La forma para encontrar la recta que se ajusta mejor a la nube de punto se expresa mediante la siguiente Ecuación 4.

$$\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X = a + bX$$

Ecuación 4 recta que se ajusta a la nube de puntos. Fuente: Elaboración Propia

Como se observa anteriormente en la Ecuación 4 los valores de a y b están dados por la Ecuación 5, donde los de \bar{x} e \bar{y} corresponden a los valores medios.

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad b = \frac{S_{xy}}{S_x^2}$$

Ecuación 5 valores de a y b. Fuente: Elaboración Propia

Como se muestra en la Ecuación 5 una de las formas para determinar el valor de b es a través de la varianza y covarianza donde su formulación se representa en la Ecuación 6.

$$S_x^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}, \quad S_y^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n}, \quad S_{xy} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{n}$$

Ecuación 6 Varianza y covarianzas muestrales de x e y. fuente: Elaboración Propia

A partir de estas 3 ecuaciones se pueden determinar la recta que mejor se ajusta a la nube de puntos, esto no significa que el modelo sea correcto, en cambio si pretendemos describir el grado de asociación lineal entre las variables es necesario analizar la correlación de las variables.

El análisis de correlación nos permite cuantificar el grado de asociación lineal entre variables continuas, indicando la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos o más variables (Ferre, 2017). Existen diferentes tipos de correlaciones como correlación simple, múltiple y parcial.

La correlación lineal simple puede ser positiva o negativa. La correlación lineal positiva indica que los valores de las dos variables relacionadas varían de forma parecida, mientras que la correlación lineal negativa la relación de los datos es inversa.

Uno de los más importantes coeficientes de correlación es el coeficiente de correlación de Pearson el cual se diferencia entre los demás coeficientes de correlación por su funcionalidad con variables cuantitativas y que sigan bien la distribución normal (Ferre, 2017). El coeficiente de Pearson se expresa con (r) y se define como en la Ecuación 7

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Ecuación 7 Coeficiente de Correlación de Pearson, Fuente: Ferre, 2017. Fuente: Elaboración Propia.

El coeficiente se interpreta en una magnitud, en otras palabras, toma un valor absoluto. Esto significa que cuando más cerca estemos de los extremos (± 1) hay una mayor relación existe entre las variables.

Un parámetro que mide la bondad del ajuste y que permite decidir si el ajuste lineal es suficiente o se debe buscar un modelo alternativo es el coeficiente de determinación (R^2). El coeficiente de determinación define la proporción de la varianza total de la variable por la regresión.

El resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. El valor cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar y en caso contrario cuanto más cerca del cero menos fiable es el modelo (López, 2018).

El cálculo del coeficiente R^2 se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado, ya que utiliza esta misma ecuación de Pearson (Ferre, 2017). Como se observa en la Ecuación 8 la equivalencia entre el coeficiente de correlación de Pearson y R^2 .

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = \hat{\beta}_1^2 \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = Cor(Y, X)^2 = r^2.$$

Ecuación 8 Demostración del Coeficiente de determinación. Fuente: Elaboración Propia

3.7.2. Error medio Cuadrático.

El error medio cuadrático o RMSE mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos. En otras palabras, compara el valor predicho (valor estimado) de la regresión lineal y un valor observado. Como se observa en la Ecuación 9 la diferencia al cuadrado entre el valor estimado y valor observado dividido por la cantidad de muestras.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{est})^2}{n}}$$

Ecuación 9 RMSE. Fuente: Elaboración Propia

3.7.3. Regresión Polinomial.

Otra alternativa para relacionar dos variables, es a través del ajuste polinomial. En los modelos de regresión polinomial se utiliza el método de mínimos cuadrados, el cual minimiza la varianza de los estimadores no sesgados de los coeficientes, bajo las condiciones del teorema de Gauss-Markov (García & Sánchez, 2016).

En la ingeniería algunos datos exhiben un patrón de comportamiento que se representan a través de una línea recta, pero en algunos casos la representación de una curva se ajusta mucho mejor a los datos. Una alternativa es ajustar un polinomio a los

datos mediante la regresión polinomial. En la Ecuación 10 se representa el modelo polinomial de n grado.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m = \sum_{i=0}^m a_ix^i$$

Ecuación 10 Modelo polinomial. Fuente: Elaboración Propia

Al aplicar el concepto de mínimos cuadrado la curva propuesta se representa en la Ecuación 11

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e$$

Ecuación 11 Modelo Polinomial en función a mínimos cuadrados. Fuente: Elaboración Propia

Donde los valores de a_i son los coeficientes, m grado del polinomio y e es el error, el modelo se guía bajo el mismo concepto que el modelo regresión simple, donde la suma al cuadrado de los residuos es mínima. Para ello se realiza la diferencia entre la medida observada y la estimada por el modelo (García & Sánchez, 2016). se representa en la Ecuación 12 la diferencia medida y estimada.

$$S_r = \sum e_i^2 = \sum (y_{i,medida} - y_{i,estimada}) = \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m)^2$$

Ecuación 12 Sumatoria de los residuos al cuadrado. Fuente: Elaboración Propia

Al realizar el proceso de derivación de la sumatoria de los residuos al cuadrado en función de los coeficientes e igualando a cero el resultado, se genera un sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
a_0(m) + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_m \sum x_i^m &= \sum y_i \\
a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + \dots + a_m \sum x_i^{m+1} &= \sum y_i x_i \\
a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + \dots + a_m \sum x_i^{m+2} &= \sum y_i x_i^2 \\
\vdots & \\
a_0 \sum x_i^m + a_1 \sum x_i^{m+1} + a_2 \sum x_i^{m+2} + \dots + a_m \sum x_i^{2m} &= \sum y_i x_i^m
\end{aligned}$$

Ecuación 13 sistema de ecuaciones normales. Fuente: Elaboración Propia

Al resolver este sistema de ecuaciones se determinan los coeficientes que forman el polígono que representan la curva que mejor se ajusta a los datos.

3.7.4. El error estándar de la Regresión Polinomial.

El error en la regresión polinomial se puede cuantificar mediante el error estándar el cual se expresa como:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{Sr}{n - (m + 1)}}$$

Ecuación 14 error estándar de la regresión. Fuente: Elaboración Propia

Donde

- n corresponde a la cantidad de datos.
- m el grado del polinomio
- Sr la sumatoria de residuos

3.7.5. Coeficiente de determinación de la regresión polinomial.

Igual que en la regresión lineal el coeficiente de determinación mide la bondad del ajuste o como el modelo se adecua a la información. En el caso de la regresión polinómica la formula se presenta en la Ecuación 15.

$$R^2 = \frac{St - Sr}{St}$$

Ecuación 15 Coeficiente de Determinación Polinomial. Fuente: Elaboración Propia

Donde

- St es la diferencia de mediada observada y el valor promedio de las observaciones
- Sr suma de los residuos

3.8. Índices de Estados Tróficos

Un índice de estado trófico o *Trophic State Index* (TSI) es capaz de relacionar biomاسas (Carlson, 1977). La implementación de este índice es muy sencilla, ya que requiere poca información.

El estado trófico se define como el peso total de la vida material biológica (biomasa) en un cuerpo de agua en un lugar y tiempo específico. Además, es la respuesta biológica a factores de forzamiento tales como adiciones de nutrientes (Naumann, 1919). Los efectos de los nutrientes pueden ser modificados por factores tales como las temporadas, la profundidad, entre otros.

De acuerdo a (Carlson, 1977) se usa la biomasa de algas como base para la clasificación del estado trófico de los cuerpos de agua, mediante la utilización de los pigmentos de clorofila, profundidad del disco de Secchi (trasparencia), y fosforo total.

Los rangos del índice van aproximadamente de cero a cien, aunque teóricamente no tiene límites inferiores o superiores. La ventaja del índice es memorizar las unidades de 10 en lugar de las fracciones decimales de valores de fósforos o clorofila (Secchidipin, 2018). En la Ilustración 9 se observa la escala para las tres variables.

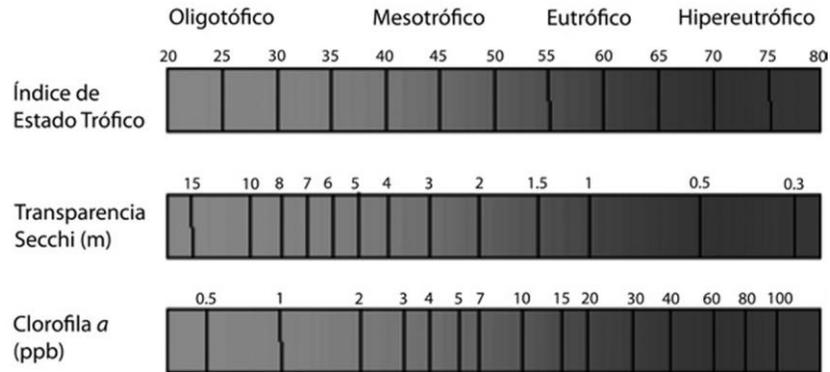


Ilustración 9 Escala del Estado trófico.

Fuente: Gómez, 2013.

El *TSI* es uno de los más usados y se obtiene a partir de la transformación de la transparencia del disco de secchi (DS). Además, cualquiera de las tres variables puede utilizarse para clasificar a un cuerpo de agua. Esto es particularmente útil en los programas de vigilancia de lagos.

En los efectos de la clasificación, la variable de la clorofila es la más precisa de las tres en la predicción de biomasa de algas.

El índice de clorofila se determina mediante la Ecuación 16. Esta ecuación fue propuesta Carlson (1977) donde desarrolla el índice trófico en base a la transparencia, como un indicador relativo de la biomasa de algas. Sin embargo, algunos investigadores como Lorenzen (1980), Megard et al. (1980) y Edmondson (1980) creen que la transparencia es parcialmente influenciada por factores que son independientes de la biomasa de algas.

$$TSI(CHL) = 9,81 \ln(CHL) + 30,6$$

Ecuación 16 Índice trófico a partir de la variable de clorofila propuesto Carlson 1977

El modelo corregido que proponen los autores es en función a la concentración de clorofila, donde el valor del índice de cero corresponde a un concentración clorofila-a de 0.25 mg/m³ y la concentración se duplica por cada aumento de diez unidades de índice (Aizaki, 1981). Además, el modelo modificado por Aizaki conserva algunas propiedades del modelo de Carlson como valor máximo en este modelo es igualmente 100 como el modelo anterior, en la Ecuación 17 se observa el nuevo índice trófico.

$$TSI(CHL) = 10x(2.46 + \frac{\ln(CHL)}{\ln(2.5)})$$

Ecuación 17 Índice trófico de clorofila-a propuesto Aizaki 1981

De acuerdo a los valores que alcanza *TSI* se diferencia en cuatro categorías:

- Oligotrófico ($TSI \leq 30$).
- Mesotrófico ($30 < TSI \leq 60$).
- Eutrófico ($60 < TSI \leq 90$).
- Hipereutrófico ($TSI > 90$).

La clasificación del grado de eutrofia según OCDE se presenta en Tabla 1.

Grado de eutrofia	Clorofila (mg/m ³)	Prof. Secchi (m)	P (mg/m ³)
Ultraoligotrófico	<1	>12	<4
Oligotrófico	1-2.5	12-6	4-10
Mesotrófico	2.5-7.9	6-3	10-35
Eutrófico	8-25	3-1.5	35-100
Hipereutrófico	>25	<1.5	>100

Tabla 1 Clasificación eutrofia OCDE

3.9. Área de Estudio.

El área de estudio correspondiente al Lago Villarrica se ubica en las cercanías del volcán Villarrica, en la novena región de la Araucanía en la cuenca y subcuenca del río Toltén entre Lago Villarrica y el río Allipe.

El lago presenta características exorreicas y de origen pluvial, la superficie del lago aproximadamente de 175 km², una longitud de 23,5 km y un volumen aproximado de 21 km³.

Actualmente el Lago Villarrica cuenta con el Decreto N°19/2013 del Ministerio del Medio Ambiente, donde se establecen normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales del Lago Villarrica.

La Resolución Exenta SMA N°671/2016 dicta el programa de Medición y control de Calidad Ambiental del Agua para las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las Aguas continentales Superficiales del Lago Villarrica (Dirección General de Aguas, 2017).

Se define la masa de agua continental como Lago Villarrica la cual es la zona de estudio, en donde se usa la información *in situ* recolectada de las 7 estaciones de monitoreo de la red de control del lago, Para este estudio se excluyen las estaciones que se encuentran en el río Toltén y Pucón debido a que el objetivo de análisis es el lago y no los ríos que desembocan en el mismo.

La frecuencia de monitoreo de la red de control se rige por el D.S. N°19/2013 MMA que establece la toma de muestras de las estaciones una vez al año, mientras que la normativa PMCCA Lago Villarrica instituye la realización del monitoreo de las estaciones dos veces al año en periodos de primavera y verano.

Como se ve en la Ilustración 10 el área que se estudia está limitada con el color amarillo y se usa la información de clorofila observada de las 7 estaciones para determinar las regiones que sufren una saturación de nutrientes dentro del lago. En la Tabla 2 se muestra las coordenadas de las estaciones y concentración de clorofila de los dos meses muestreado.



Ilustración 10 Zona de Estudio

<i>Estaciones</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>Clo-a (Marzo)</i>	<i>Clo-a (Octubre)</i>
<i>Centro (CV)</i>	-72,094	-39,258	1,5	0,8
<i>Villarrica Pelagial (VP)</i>	-72,186	-39,277	1,2	1
<i>Litoral Villarrica (LV)</i>	-72,206	-39,284	1,4	1
<i>Litoral Sur (LS)</i>	-72,092	-39,294	1,4	1,1
<i>Litoral Pucón (LP)</i>	-71,977	-39,268	3,3	1,2
<i>Bahía La Poza (BLP)</i>	-71,991	-39,279	2,5	1,9
<i>Litoral Norte (LN)</i>	-72,142	-39,210	1,2	0,6

Tabla 2 Coordenadas y Concentración de Clorofila de las estaciones.

Fuente: Dirección General de Aguas, 2017

3.10. Misión SENTINEL-2.

La misión SENTINEL corresponde a la nueva familia de satélites diseñados específicamente para la entrega de gran cantidad de datos e imágenes, que utiliza el programa copernicus de la *European Space Agency* (ESA) (ESA, 2016), con el objetivo de realizar un monitoreo ambiental y continuo.

SENTINEL-2 se basa en una constelación de dos satélites idénticos SENTINEL-2A y 2B. Ambos operan de forma simultánea a una altura media de 786 km, pero separados entre ellos por 180°. La posición de cada satélite se mide por un receptor de doble frecuencia (GNSS) (ESA, 2016). Esta configuración optimiza la cobertura y los tiempos de revisión globales.

La constelación se demora “un periodo de tiempo de cinco días en volar el mismo punto en el ecuador, y en latitudes más altas el periodo de tiempo es menor” (ESA, 2016).

3.10.1. Desarrollo de la Misión Sentinel-2.

El satélite SENTINEL-2A fue lanzado al espacio en el 23 de junio del año 2015 desde la plataforma de espacial Kourou de la Agencia Espacial Europea en Guayana Francesa (Nowakowski, T. 2015). Y un año después fue lanzado al espacio el satélite sentinel-2B el día 7 de marzo del año 2017 (Van oene, J. 2016). Desde la misma plataforma espacial que se utilizó para lanzar el satélite sentinel-2A.

El diseño y construcción de estos satélites se realizó gracias a la participación de 60 compañías lideradas por *Airbus Defence and Space*. Su vida útil como mínimo de

duración es de siete años aproximadamente, pero se tiene la esperanza que su duración sea mucho mayor (ESA, 2016).

3.10.2. Satélite.

La cobertura de los satélites SENTINEL-2 abarca zonas terrestres y costeras con un cubrimiento que se extiende desde la latitud 56° sur a 83° norte. La recolección de datos dentro de esta zona incluye todas las aguas costeras hasta veinte kilómetros de la costa; islas mayores de cien kilómetros cuadrados; mar mediterráneo; entre otros.

El instrumento multiespectral (MSI) trabaja de manera pasiva, mediante la recopilación de la luz solar reflejada desde la tierra. Los datos generados se adquieren a medida que el satélite se mueve a lo largo de su trayectoria orbital (ESA, 2016).

El MSI trabaja mediante un haz de luz entrante que se divide en un filtro que separa dos planos focales uno visible e infrarrojo cercano (VNIR) y otro para las bandas de infrarrojos de onda corta (SWIR). El diseño óptico del telescopio permite un campo de visión de 290 kilómetros.



Ilustración 11 Sentinel-2

Fuente: agencia espacial europea

El MSI establece un escenario de observación y calibración. El primer escenario observa a la tierra y sus fenómenos mediante las técnicas de percepción remota. Mientras el escenario de calibración busca mejorar el rendimiento del instrumento durante la vida de la misión, los satélites SENTINEL-2 se colocan en dos modos de calibración. El primer modo de calibración es la señal oscura, este método se produce cuando el satélite adquiere imágenes cuando está travesando en la fase oscura (noche) de la órbita (ESA, 2016). La calibración se realiza cada dos semanas.

El segundo modo de calibración corresponde a la calibración de la señal sol. El satélite realiza esta calibración al momento de adquirir imágenes en la parte de día de la órbita (ESA, 2016). Esta calibración se realiza cada cuatro semanas.

3.10.3. Bandas.

Las bandas correspondientes a las imágenes MSI de SENTINEL-2 presentan una resolución espacial, espectral y radiométrica. La resolución espacial se entiende como el área de la superficie medida en el suelo y que se representa por un pixel individual.

Mientras la resolución espectral corresponde a la medida de la capacidad para resolver las características en el espectro electromagnético. Por último, la resolución radiométrica se define como la capacidad del instrumento para distinguir las diferencias en la intensidad de la luz o reflectancia (ESA, 2016). Mientras mayor sea la resolución radiométrica, más precisa es la imagen.

Las resoluciones espaciales, espectrales y radiométricas de la misión SENTINEL-2 se muestran en Tabla 3.

Resolución espacial (m)	Numero banda	S2A		S2B	
		Longitud de onda Central (nm)	Ancho de Banda (nm)	Longitud de onda Central (nm)	Ancho de Banda (nm)
10	2	496.6	98	492.1	98
	3	560.0	45	559	46
	4	664.5	38	665	39
	8	835.1	145	833	133
20	5	703.9	19	703.8	20
	6	740.2	18	739.1	18
	7	782.5	28	779.7	28
	8a	864.8	33	864	32
	11	1613.7	143	1610.4	141
	12	2202.4	242	2185.7	238
60	1	443.9	27	442.3	45
	9	945.0	26	943.2	27
	10	1373.5	75	1376.9	76

Tabla 3 Especificaciones de las bandas sentinel-2

Fuente: agencia espacial europea

Como se muestra en la Tabla 3 la resolución espacial de la misión SENTINEL-2 se divide en bandas de:

1. 10 metros: las bandas que se agrupan son de espectros visible y una de infrarrojo cercanos (VNIR).
2. 20 metros: con esta resolución presenta bandas de infrarrojo cercano (VNIR) y onda corta infrarroja (SWIR).
3. 60 metros: en este grupo pertenecen las bandas de onda corta infrarroja (SWIR) y ultra azul (Costa y Aerosol).

La resolución radiométrica habitualmente se expresa como un número de bits entre rangos de 8 a 16 bits, en el caso de la misión Sentinel-2 se expresa en 12 bits (ESA, 2016).

3.10.4. Productos y Algoritmo.

Los productos satelitales de SENTINEL-2 presentan diferentes niveles de procesamiento que se describen como:

1. Nivel-0: la información de las imágenes en este nivel se encuentra en un estado bruto sin procesar.
2. Nivel-1A: a partir del nivel-0 se ejecutan procesos de inicialización y de transformación para que las imágenes cambien de formato y se agregue información como los píxeles SWIR.
3. Nivel-1B: en este nivel las imágenes sufren el proceso de correcciones radiométricas y geométricas.
4. Nivel-1C: el siguiente proceso que sufren las imágenes es de remuestreo y generación de máscaras computacionales de nubes y tierra/agua. Además del cálculo de la reflectancia *Top Of Atmospheric* (TOA).
5. Nivel-2A: Por último las imágenes sufren una clasificación de escena, corrección atmosférica y cálculo de la reflectancia *Bottom Of Atmospheric* (BOA).

3.11. Pre-procesamiento.

Al momento de adquirir las imágenes SENTINEL-2 estas se encuentran en el nivel-1c, en este nivel las imágenes están corregidas radiométricamente y geométricamente, pero no su reflectancia, es necesario realizar una corrección atmosférica.

Esta corrección se divide en dos partes, la primera es una clasificación de escena y la segunda es la corrección atmosférica.

En la clasificación de escena, se agrupan las imágenes en 10 categorías donde se dividen en cuatro clases de nubes, las sombras de nubes, vegetación, suelo/desierto, agua, nieve y una de calidad de nubosidad.

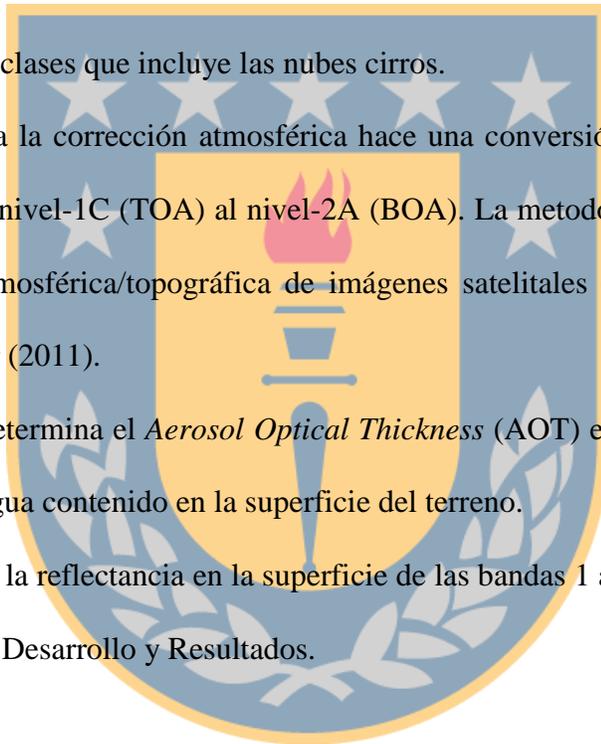
El resultado final son tres coberturas estas son:

1. Índices de calidad de nubosidad.
2. Nieve.
3. Mapa de clases que incluye las nubes cirros.

El algoritmo para la corrección atmosférica hace una conversión de la información de la reflectancia del nivel-1C (TOA) al nivel-2A (BOA). La metodología que se emplea es una corrección atmosférica/topográfica de imágenes satelitales (ATCOR) propuesta por Richer, Schaepfer (2011).

Este algoritmo determina el *Aerosol Optical Thickness* (AOT) en el que se corrige y elimina el vapor de agua contenido en la superficie del terreno.

Finalmente se corrige la reflectancia en la superficie de las bandas 1 a 12 para entregar un producto de nivel-2A. Desarrollo y Resultados.



4. Desarrollo y Resultados.

4.1. Desarrollo del Proyecto.

4.1.1. Selección de Imágenes.

En el desarrollo de este proyecto se utilizan imágenes satelitales proveniente de la misión SENTINEL-2. Estas imágenes fueron adquiridas entre el año 2017-2018.

Se seleccionan las imágenes del Lago Villarrica que presentan una nubosidad menor del 30%.

La descarga de imágenes SENTINEL-2 se hace a través de la página oficial de la ESA utilizando el interfaz de búsqueda online scihub.copernicus.eu. Se descarga un total de 22 imágenes para el desarrollo de este estudio. En la Tabla 4 y 5 se detallan los satélites utilizados y el periodo de adquisición.

Periodo	Satélite	Adquisición	Periodo	Satélite	Adquisición
2017	Sentinel-2A	26-01-2017	2018	Sentinel-2B	16-01-2018
	Sentinel-2A	05-02-2017		Sentinel-2A	13-02-2018
	Sentinel-2A	07-03-2017		Sentinel-2A	05-03-2018
	Sentinel-2A	29-04-2017		Sentinel-2A	01-04-2018
	Sentinel-2A	26-05-2017		Sentinel-2A	31-05-2018
	Sentinel-2A	25-07-2017		Sentinel-2A	03-06-2018

Tabla 4 Imágenes del primer semestre SENTINEL-2A y 2B usadas en el proyecto.

Periodo	Satélite	Adquisición	Periodo	Satélite	Adquisición
2017	Sentinel-2B	02-08-2017	2018	Sentinel-2A	19-08-2018
	Sentinel-2A	16-09-2017		Sentinel-2A	13-09-2018
	Sentinel-2B	21-10-2017		Sentinel-2B	03-10-2018
	Sentinel-2B	27-11-2017		Sentinel-2A	07-11-2018
	Sentinel-2B	27-12-2017		Sentinel-2B	12-12-2018

Tabla 5 Imágenes del segundo semestre SENTINEL-2A y 2B usadas en el proyecto.

4.1.2. Corrección Atmosférica.

El proceso de corrección atmosférica se realiza mediante el complemento sen2cor, esta corrección se realiza antes de la utilización de los índices espectrales. La corrección se lleva a cabo a través del archivo *Look-Up-Tables* (LUT). Este archivo contiene la información de:

- Dos tipos diferentes de aerosoles (rurales y marítimos).
- Dos tipos diferentes de atmósferas (latitud media en verano e invierno).
- Seis tipos diferentes de concentraciones de ozono (dependiendo del verano o invierno).
- Seis o cuatro cantidades diferentes de columna de vapor de agua (dependiendo del verano o invierno).

El uso de LUT es necesario para usar la configuración de usuario contenido en el archivo L2A_GIPP.xml donde se encuentra la información de los tipos de aerosoles, latitud media y contenido de ozono.

En la corrección de todas las imágenes se utiliza la configuración automática, donde el procesador del programa determina los parámetros necesarios en el metadato de la imagen. En el caso del contenido de ozono el programa utiliza el LUT que mejor se adapta a la concentración de ozono; para determinar los tipos de aerosoles se realizan dos pruebas antes de la corrección final, buscando el resultado más óptimo. Finalmente, en la configuración de atmósfera se selecciona el perfil atmosférico de invierno o verano en función a la fecha de adquisición y ubicación geográfica.

Con los parámetros definidos, el proceso de corrección comienza con las bandas de mayor a menor resolución.

4.1.3. Resampling o Remuestreo.

Para poder realizar operaciones entre bandas como cálculos de variables físicas, extracción de valores de píxeles, aplicación de máscaras o análisis de superficies de cultivos entre otros es necesario que todas las bandas posean la misma resolución.

El proceso de remuestreo se realiza con la opción de *resampling* del software SNAP, donde se especifican parámetros como la banda de referencia, método de remuestreo y opciones de guardado.

Para el remuestreo se usa las bandas con mayor precisión, las cuales corresponde a las bandas de diez metros, el resultado que se obtiene se observa en la Ilustración 12. La ilustración muestra la comparación entre una banda de mayor tamaño (imagen de la izquierda) y una banda de remuestreada (imagen de la derecha).

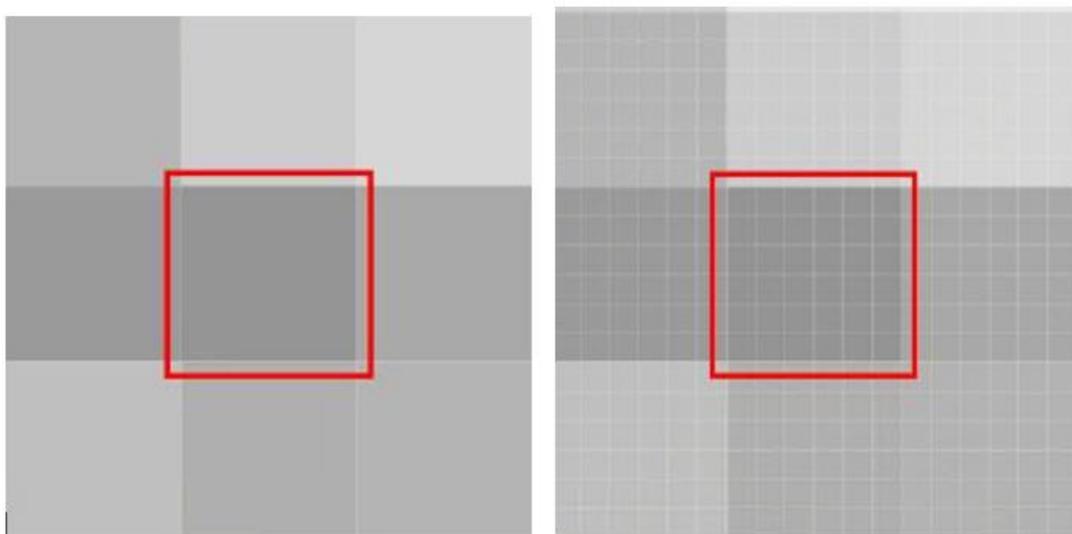


Ilustración 12 Banda sin remuestrear (izquierda) y banda remuestreada (derecha)

Fuente elaboración Propia

4.1.4. Delimitación de la Zona de Estudio.

Las imágenes tienen un barrido de doscientos noventa kilómetros; para poder realizar los análisis de interés se debe delimitar la zona de estudio. Utilizando la herramienta de *subset* de SNAP podemos delimitar la zona de estudio y conservar la información de todas las bandas.

Para poder delimitar la información de la imagen se usa la herramienta para definir un rectángulo, se debe utilizar cuatro coordenadas para la construcción del rectángulo y para cortar las demás imágenes. En la Tabla 6 se presentan las coordenadas del rectángulo y en la Ilustración 13 se observa una imagen delimitada por el rectángulo y otra con imagen completa.

<i>parámetros</i>	<i>Geo Coordenadas</i>
North latitude bound	-39.183
West longitude bound	-72.274
South latitude bound	-39.328
East longitude bound	-71,925

Tabla 6 Coordenadas del Rectángulo.

Fuente: Elaboración Propia

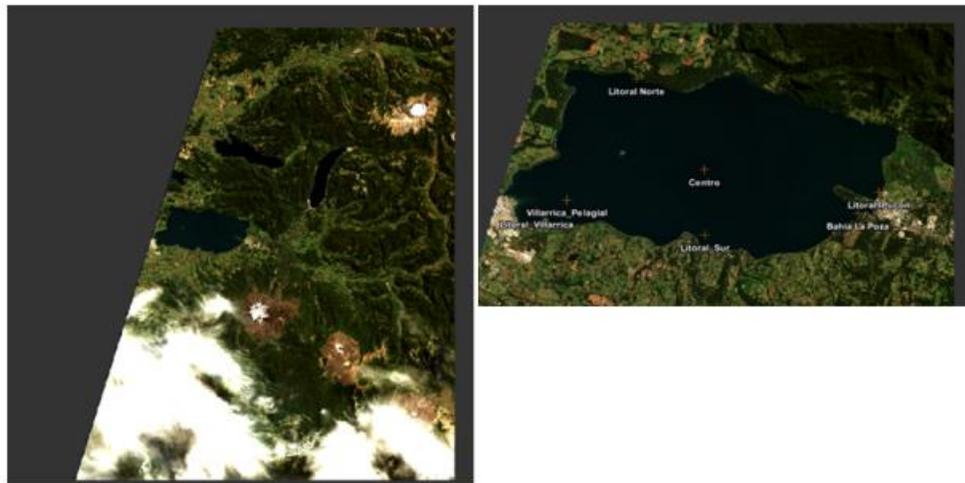


Ilustración 13 Imagen completa e imagen limitada

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Cálculo de los índices espectrales.

A partir de las imágenes corregidas, remuestreadas y delimitadas se calculan los índices espectrales, es necesario utilizar la herramienta de *Band Maths* del software SNAP. En esta herramienta se puede implementar distintas operaciones entre bandas. Las operaciones que se ejecutan son el cálculo del *NDVI* y el algoritmo *TBDO*. Las bandas que se involucran son la banda 4 (rojo), banda 8 (*NIR*), banda 5 (*NIR*) y banda 6 (*NIR*) para los cálculos.

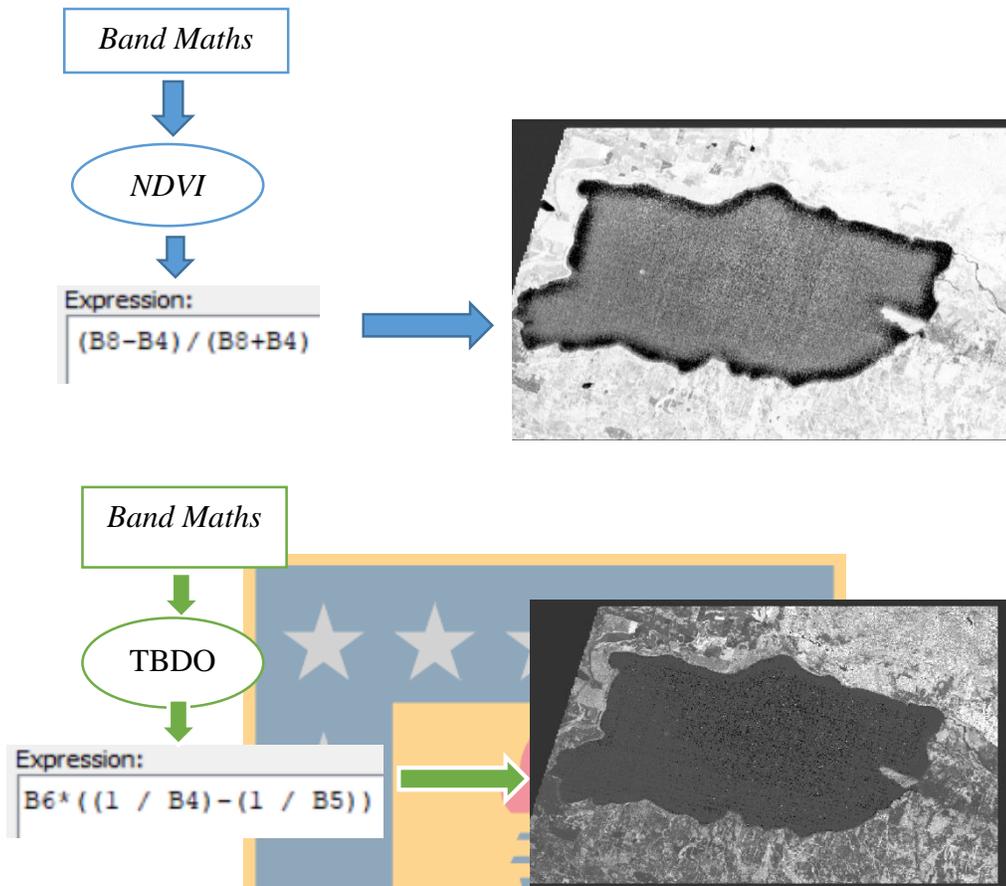


Ilustración 14 Esquema de Cálculo de Índice

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 14 se presenta un esquema del proceso del índice espectral al aplicar las expresiones de *NDVI* y *TBDO*. Los resultados que se obtienen son la reflectancia característica de la vegetación, más precisamente la clorofila presente en las aguas del Lago Villarrica.

4.1.6. Extracciones de los valores de pixel.

Un punto importante en esta investigación es la determinación de la ubicación de las estaciones de control que toman información in situ de concentración de clorofila-a en el lago. El organismo responsable de la toma de muestras y publicación de los resultados es

la Dirección General de Aguas y se realiza dos veces al año en los períodos de 01-03-2017 y 19-10-2017.

Las imágenes seleccionadas son de los intervalos del 07-03-2017 y 21-10-2017 estas fechas son las más cercanas a los meses de muestreo de la información *in situ*. Para extraer la información de los píxeles se carga un archivo con extensión shapefile, este archivo corresponde a una capa puntual y representa la ubicación de las estaciones.

Para no tener problemas de georreferenciación entre la capa puntual y la imagen multiespectral deben estar en el mismo sistema de referencia, en este proyecto se trabaja toda la información en el sistema de referencia *WGS84* cuyas coordenadas son UTM en el huso 18 sur. La Dirección General de Aguas ha puesto a disposición las coordenadas de las estaciones de control, mediante el programa de medición y control de la calidad ambiental.

En el caso de las estaciones Litoral Pucón y Bahía la Poza sus coordenadas están en un sistema diferente al UTM 18 huso sur, por lo que es necesario realizar una re-proyección de la capa puntual al mismo sistema de referencia que se trabaja en este estudio. A continuación, la capa puntual se importa al software SNAP donde los puntos se ubican en los píxeles de interés.

Los valores entregados por el software se presentan en la Tabla 7, estos valores corresponde a valores de los píxeles de las estaciones en función del *NDVI* y *TBDO* de los meses de Marzo y Octubre del 2017. A partir de esta información se busca la mejor correlación entre los datos *in situ* y los observados en el satélite.

<i>Estación</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>NDVI</i> <i>Marzo</i>	<i>NDVI</i> <i>Octubre</i>	<i>TBDO</i> <i>Marzo</i>	<i>TBDO</i> <i>Octubre</i>
<i>Centro</i>	-72,09440	-39,2583	0,21	0,14	-2,9	-0,71
<i>Villarrica Pelagial</i>	-72,18578	-39,2769	0,04	0,41	-0,3	-0,11
<i>Litoral Villarrica</i>	-72,20579	-39,2838	0,00	-0,01	-1,5	-11,82
<i>Litoral Sur</i>	-72,09248	-39,2936	-0,33	-0,04	-0,2	-0,20
<i>Litoral Pucón</i>	-71,97709	-39,2676	-0,90	-0,24	-0,1	-0,08
<i>Bahía La Poza</i>	-71,99072	-39,2794	-0,93	0,01	-0,2	-0,04
<i>Litoral Norte</i>	-72,14167	-39,2102	0,26	0,73	0,1	0,00

Tabla 7 Datos extraídos de las estaciones de control mes de Marzo y Octubre 2017.

Fuente: software SNAP

4.1.7. Modelos de Correlación.

Se monitorea la calidad del agua mediante técnicas de observación remota, se implementa la metodología de varios artículos que modelan diferentes bandas espectrales en función de las observaciones *in situ* que se extraen de las estaciones de monitoreo del lago.

Uno de los primeros pasos es utilizar modelos de correlación para relacionar los valores de los píxeles de los índices de vegetación con las observaciones de las estaciones de control. Esto se lleva a cabo mediante una curva o recta que se ajusta mejor a los datos de las estaciones. En algunas investigaciones realizadas por los autores Dall’Olmo & Gitelson (2003) utiliza una recta y un polinomio de grado dos para ajustar los modelos a los datos, donde se obtienen resultados precisos en la determinación de clorofila-a.

En este estudio se compara los resultados de un modelo lineal y polinomio de grado dos. Estos modelos se comparan en tres aspectos importantes como el coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y RMSE.

4.1.8. Índice de Estado Trófico.

El análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes satélites y datos *in situ*. Por Gomes (2013) se implementó el uso del índice de estado trófico.

A partir del modelo de regresión se determina la ecuación que representa la relación entre los datos remotos y datos de muestreo del lago.

Para el cálculo de la concentración de clorofila-a estimada es necesario el uso de la ecuación de polinomio grado dos donde se usa la banda *NDVI* como variable independiente (x).

El resultado que se obtiene es la predicción de la variable dependiente (y) siendo la concentración de clorofila-a. Esta información se usa en el índice de estado trófico para determinar las áreas dentro de lago que cambiaron su estado.

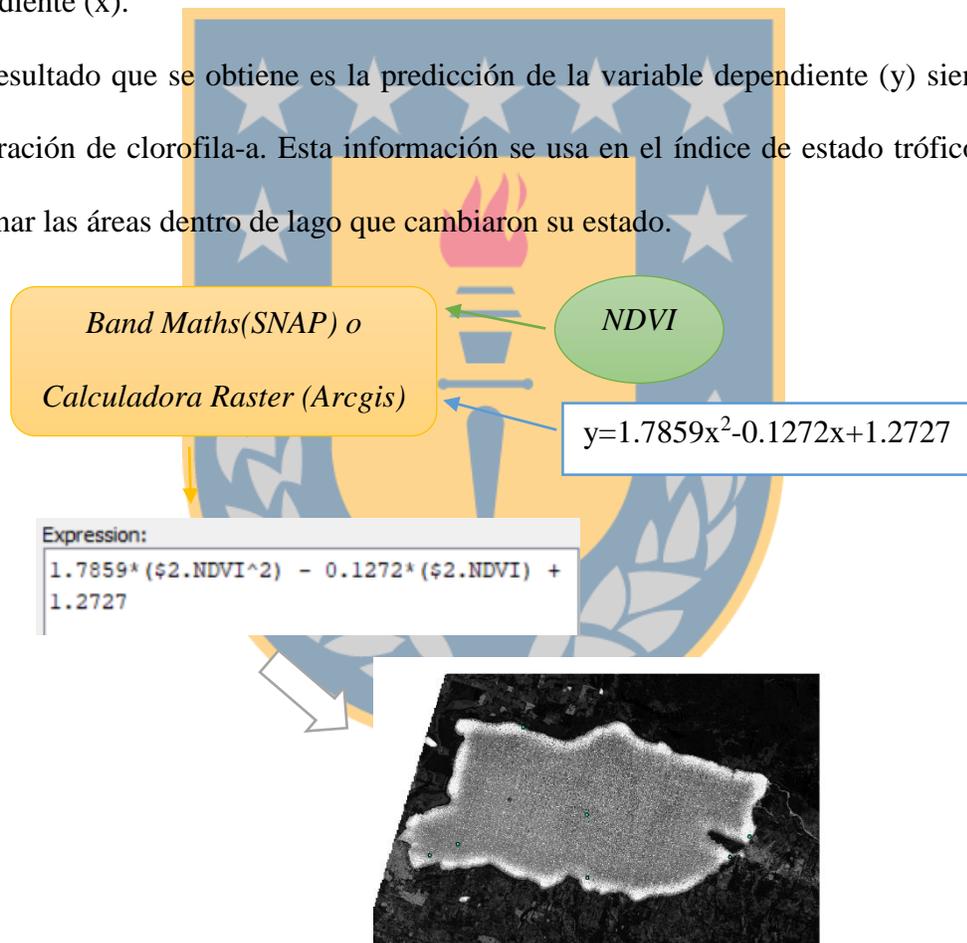


Ilustración 15 Esquema del Cálculo de concentración de clorofila-a estimada

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 15 se presenta un esquema sobre los pasos mencionados en el párrafo anterior. Con la concentración de clorofila-a estimada se aplica el índice de estado trófico para poder escalar la información en intervalos cero a cien, donde el primer estado es de oligotrófico y el último es un estado hipereutrófico.

El resultado de aplicar el índice de estado trófico es un raster con la información del índice trófico que se define en diferentes intervalos los pixeles correspondientes al lago. Para su representación como se observa en la Ilustración 16.

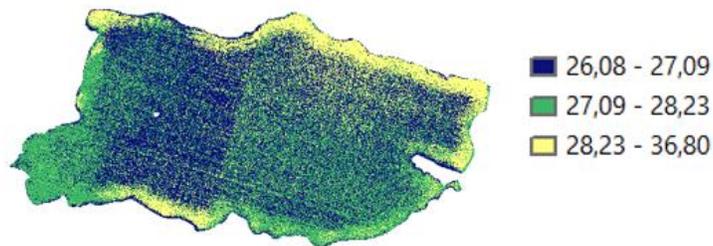


Ilustración 16 Raster con índice de estado Trófico

Fuente: Elaboración propia

4.1.9. Determinación del Área de cada estado Trófico.

La determinación del área se lleva a cabo con el software *Arcgis* 10.3 en los siguientes pasos:

1. Re-clasificación de intervalos del raster.
2. Convertir de raster a polígono.

La herramienta toma el raster re-clasificado y lo convierte en un polígono. El objetivo es calcular el área que ocupa cada pixel que se encuentra en el intervalo nuevo.

3. Disolver.

La conversión de raster a polígono genera un campo llamado *gridcode* donde se almacena la información con el intervalo re-clasificado, al utilizar la herramienta de disolver toma como dato entrada el *gridcode* y los agrupa según el intervalo re-clasificado.

4. Crear campo de área y calcular el área.

Con el nuevo polígono disuelto se crea el campo de área y se calcula en km² el área que ocupa cada intervalo dentro del lago.

4.2. Resultados.

4.2.1. Resultados de la Correlación.

Al determinar la correlación de los índices espectrales y las muestras *in situ* se descubre que el índice *NDVI* presenta una mejor correlación que el algoritmo de tres bandas propuesto por los autores Dall'Olmo & Gitelson (2003) en su investigación.

Al comparar los resultados de los dos modelos, el índice *NDVI* presenta un menor error con un valor de RMSE 0.349.

En el caso del coeficiente de determinación (R^2) el valor que se ajusta mejor a los datos de muestreo es el índice *NDVI* con $R^2 = 0.87$

En la elección del modelo para estimar la concentración de clorofila-a se toma en cuenta los valores del RMSE y el coeficiente de determinación, siendo el modelo de polinomio grado dos del *NDVI* que genera los mejores resultados. Ya que el primer modelo correspondiente a una recta se ajusta en un 78% a las observaciones de muestreo. Mientras el modelo polinomial (pol_2) presenta un ajuste del 87%. En el caso del error medio cuadrático los modelos presentan un error similar de 0.349.

Marzo 2017					Octubre 2017				
	I_E	r	R ²	RMSE		I_E	r	R ²	RMSE
Recta	NDVI	-0.88	0.78	0.349	Recta	NDVI	-0.56	0.31	0,315
Recta	TBDO	0.06	0.25	0.699	Recta	TBDO	0.11	0.01	0.377
Pol_2	NDVI	-	0.87	0.349	Pol_2	NDVI	-	0.34	0.409
Pol_2	TBDO	-	0.07	0.95	Pol_2	TBDO	-	0.11	0.474

Tabla 8 Resultados de la Regresión de modelos lineales y Polinomio de grado 2 en meses de Marzo y Octubre

A continuación se presentan los modelos estudiados en la Ilustración 17 e Ilustración 18. La Ilustración 17 se aplica el modelo polinomial, donde se representa la relación de las observaciones remotas (NDVI) y muestras de terreno a través de una curva. La ecuación se expresa $y = 1.7859x^2 - 0.1272x + 1.2727$ esta ecuación sirve para determinar la concentración de clorofila estimada.

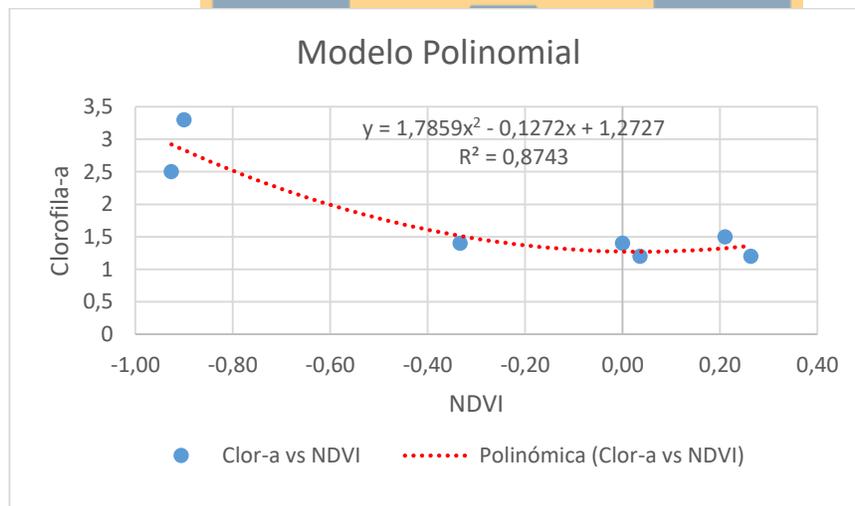


Ilustración 17 Regresión polinómica del mes Marzo 2017

El segundo modelo el cual se representa en la Ilustración 18 muestra el ajuste de una recta a la nube de puntos, la ecuación que muestra la línea de regresión es $y = -1.4164x + 1.4519$.

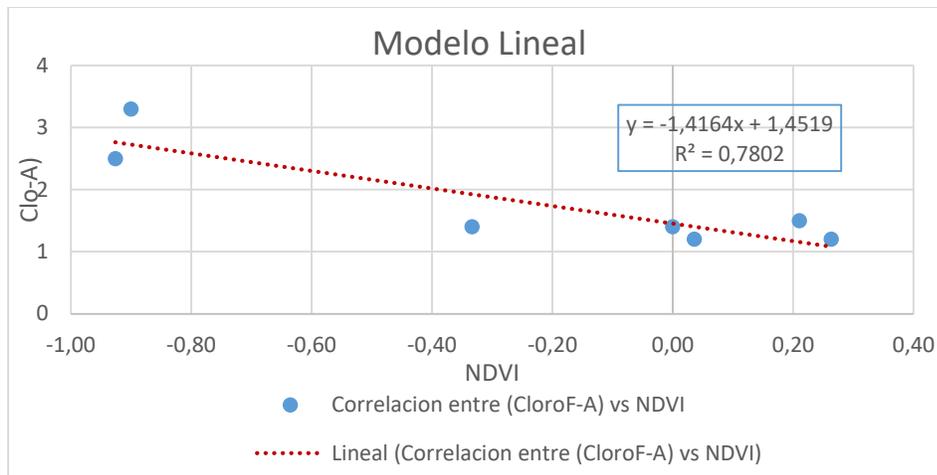


Ilustración 18 Regresión Lineal mes de Marzo 2017

4.2.2. Comparación del índice NDVI.

La comparación del índice *NDVI* se realiza en el período 2017-2018, más específicamente en las temporadas de primavera (los meses de septiembre a diciembre) y verano (meses de enero a marzo). Estas temporadas presentan características más beneficiosas para el estudio como la estratificación de la temperatura y proliferación de algas. Esto no ocurre de igual manera en la temporada de invierno, según lo que se especifica en el informe técnico de cumplimiento de calidad del agua que desarrolla la Superintendencia del Medio Ambiente del Gobierno de Chile. El Lago Villarrica en la temporada de invierno presenta dificultades en su navegación, una mayor circulación de agua, mínimas variaciones en la temperatura de la columna de agua entre la superficie y el fondo.

La comparación entre los periodos 2017-2018 se realiza con el valor del índice *NDVI* de cada estación de monitoreo, se busca la aparición de algas o plantas acuáticas que están dentro del lago. Este índice determina la existencia de vegetación mediante el intervalo de valores entre -1 a 1.

4.2.3. Verano 2017- 2018.

En la temporada de verano se analiza la aparición de algas u organismos vegetales que se encuentran distribuidos dentro del Lago Villarrica en los meses de enero, febrero y marzo.

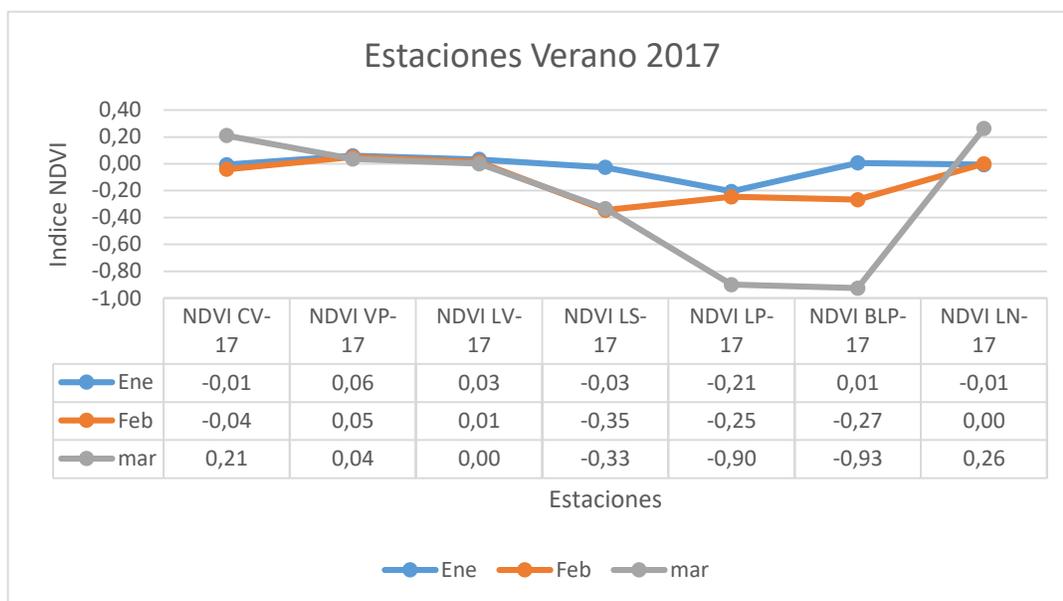


Ilustración 19 Gráfico de NDVI verano 2017

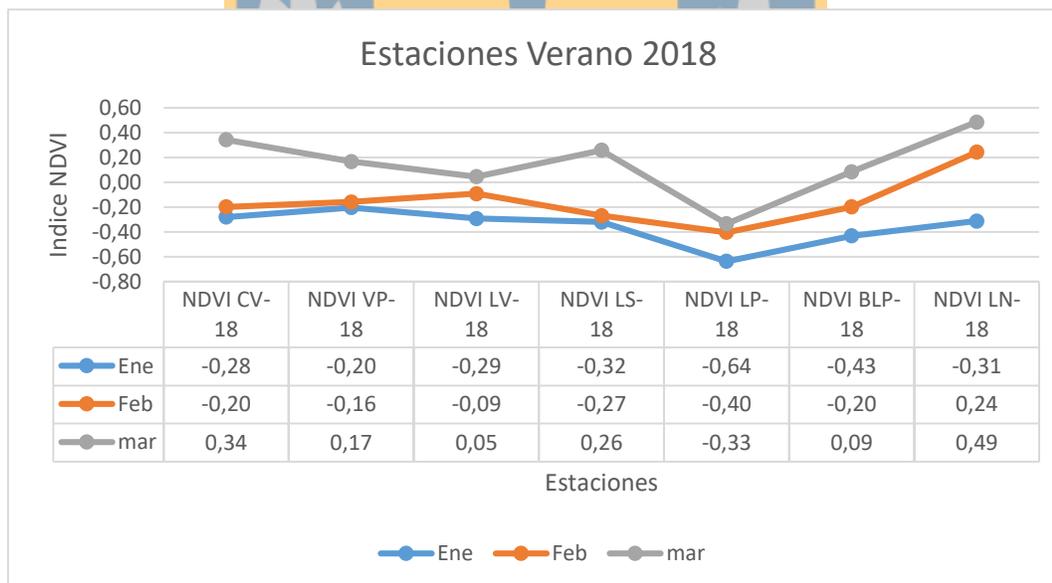


Ilustración 20 Gráfico NDVI Verano 2018

La Ilustración 19 e Ilustración 20 describe el valor del pixel correspondiente a cada estación de monitorio en el verano 2017- 2018.

En las estaciones de verano 2017 y 2018 se presentan cambios significativos para el estudio, dónde en el verano del 2017 su distribución de organismos vegetales o algas se encuentra en el sector de Las Chilcas hasta el sector de Pucón, predominando la vegetación muerta dentro de este sector. En cambio, en el verano del 2018 su distribución es más homogénea abarcando la totalidad del lago, donde casi la mayoría de las estaciones registran apariciones de vegetación enferma y muerta.

4.2.4. Primavera 2017-2018.

La estación de primavera analiza los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre en función al valor del *NDVI* de cada pixel que representan las estación de control dentro del Lago Villarrica, estos resultados se muestran en la Ilustración 21 e Ilustración 22.

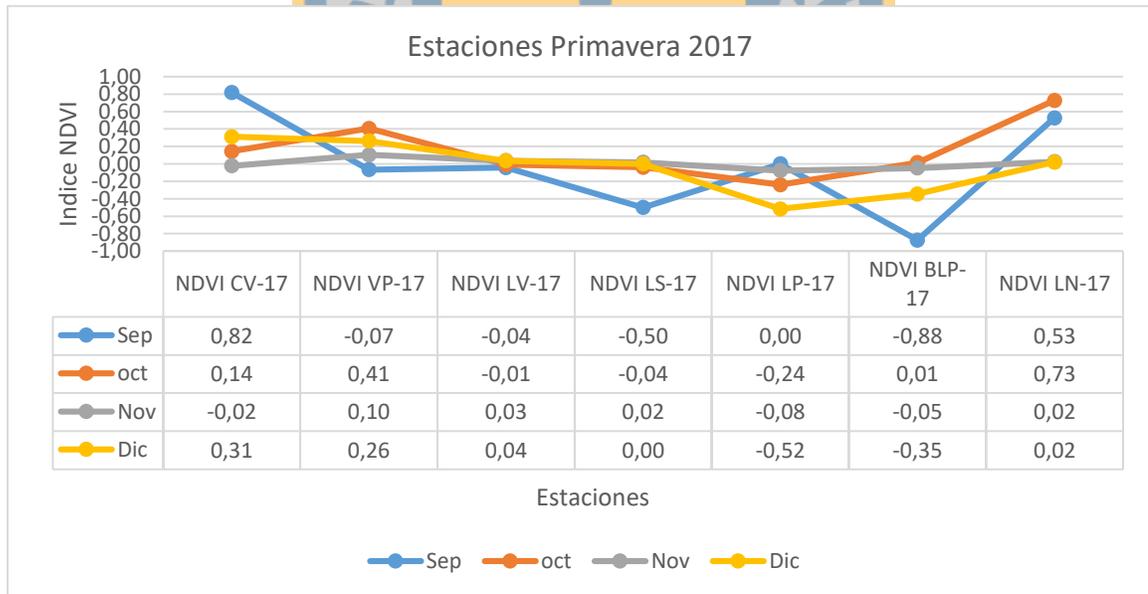


Ilustración 21 Gráfico NDVI primavera 2017

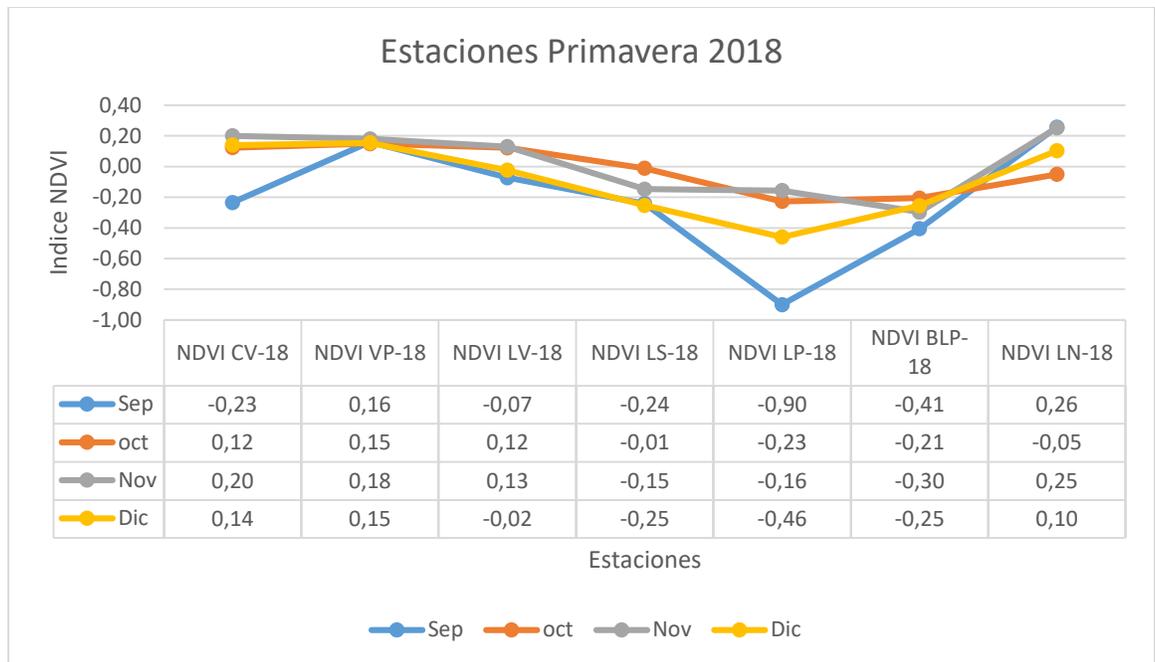


Ilustración 22 Gráfico NDVI de estación primavera 2018

En las estaciones de primavera 2017- 2018 la aparición de organismos vegetales es más frecuente siendo registrada por la mayoría de las estaciones de control. Esto indica una distribución homogénea de los organismos vegetales que se encuentran dentro del Lago Villarrica predominando la vegetación muerta y enferma. Esto ocurre en la primavera 2017 y se mantiene en la primavera 2018.

La zona conformada por el litoral sur, Bahía La Poza y litoral Pucón corresponden a los mayores registros de vegetación muerta encontrados en este período de tiempo. Dando una clara respuesta al cambio que sufre el lago por el exceso de nutrientes que hay en él.

4.2.5. Mapas de las áreas contaminación del Lago Villarrica.

Para la visualización de los mapas se utiliza el índice de estado trófico para la interpretación de las regiones tróficas dentro del lago. En el estudio se determina tres categorías:

1. Categoría 1: En esta categoría describe una disminución en la concentración de clorofila-a en la zona, lo que ocasiona un cambio trófico del lago. Pasando de un estado de mesotrófico a oligotrófico.
2. Categoría 2: El aumento de concentración de clorofila-a ocasiona el cambio de estado oligotrófico a mesotrófico
3. Categoría 3: La concentración de clorofila-a permite que se mantenga el estado mesotrófico.

Estas categorías describen el comportamiento de las zonas que se encuentran dentro del lago desde los meses de marzo a diciembre 2017. Para la identificación de las categorías se utiliza la escala del *TSI*, donde el estado oligotrófico corresponde a todos aquellos valores menores a treinta, mesotrófico mayores a treinta y menores a sesenta. El resultado final es la visualización e interpretación del área que ocupa cada categoría dentro del lago. Esta información se presenta en la Tabla 9.

Mes	Regiones Trófica			Área	Regiones Trófica			Área
	Área Km ²			km ²	Área %			%
	O←M	O → M	M	Total	O←M	O → M	M	Total
Marzo	117.39	50.41	6.91	174.71	67.19	28.85	3.96	100
Abril	17.37	49.55	107.79	174.71	9.94	28.36	61.70	100
Mayo	20.74	17.45	136.52	174.71	11.87	9.99	78.14	100
Julio	14.55	17.45	136.52	174.71	8.33	2.07	89.60	100
Agosto	49.62	121.41	3.67	174.71	28.40	69.49	2.10	100
Septiembre	74.77	69.37	30.56	174.71	42.80	39.71	17.49	100
Octubre	146.26	22.39	6.05	174.71	83.72	12.81	3.46	100
Noviembre	20.74	17.45	136.52	174.71	11.87	9.99	78.14	100
Diciembre	143.64	25.44	5.63	174.71	82.22	14.56	3.22	100

Tabla 9 Áreas de las Regiones Tróficas



Ilustración 23 localidades aledañas a las estaciones de control

Como se observa en la Ilustración 23 se muestran las localidades aledañas a las estaciones de control, estas localidades servirán para poder interpretar y referenciar las área o zonas que cambian su condición trófica.

Marzo 2017.

Al observar la Ilustración 24 correspondiente al mes de marzo se distinguen visualmente dos categorías, La primera muestra que la zona centro del lago pasa de un estado mesotrófico a oligotrófico ocupando un área total de 67.19% del lago, mientras que la segunda categoría se encuentra entre la zona de la costa del lago y ocupa un 28.85% del área.

En el caso de la categoría tres su representación es afectada por el área que ocupa dentro del lago siendo un 3.96% del área total.

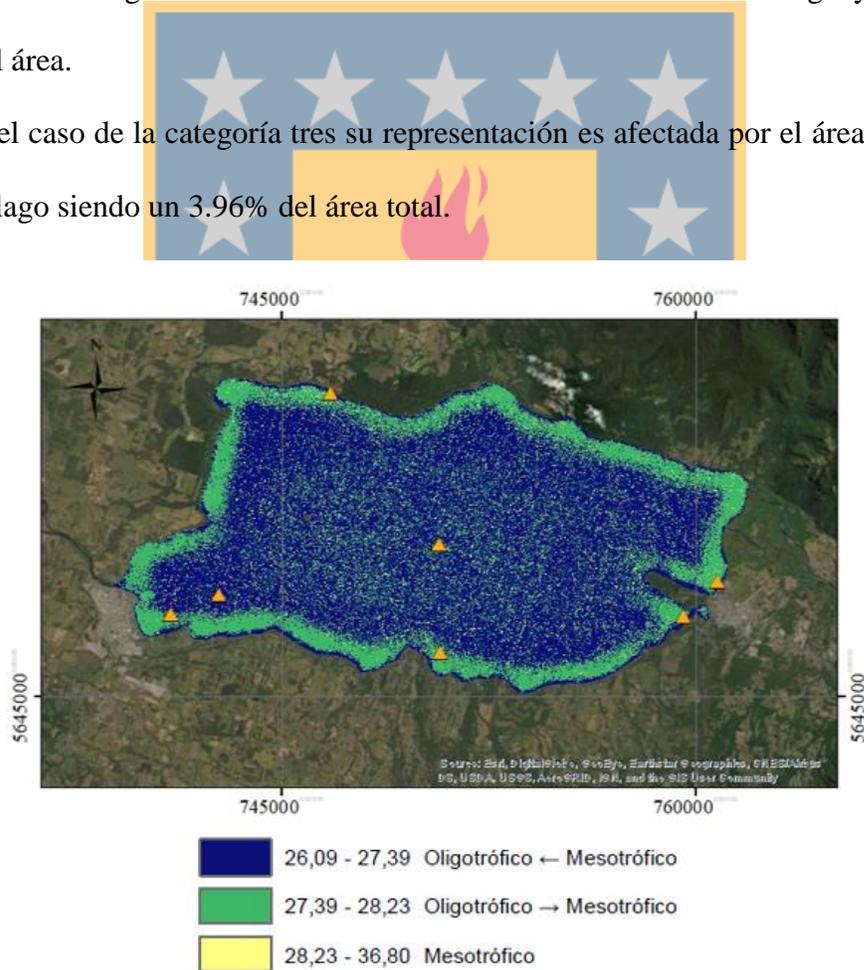


Ilustración 24 Mapa de marzo 2017

Abril 2017.

En el mes de abril se representa visualmente por la Ilustración 25, logrando identificar las tres categorías en comparación del mes de marzo. La primera categoría corresponde al cambio de estado mesotrófico a oligotrófico donde presenta un área de 9.94% y distribuyendo en el sector cercano a la costa de la ciudad Villarrica.

La segunda categoría donde se produce el cambio de estado de oligotrófico a mesotrófico se presenta en las costas de la ciudad de Villarrica y en el centro del lago. Ocupa un área del 28.36%.

Por último, la tercera categoría de estado mesotrófico ocupa un área 61.70% del lago y distribuyéndose desde las costas de la ciudad de Pucón hacia el sector norte del lago entre las cercanías del litoral norte del lago.

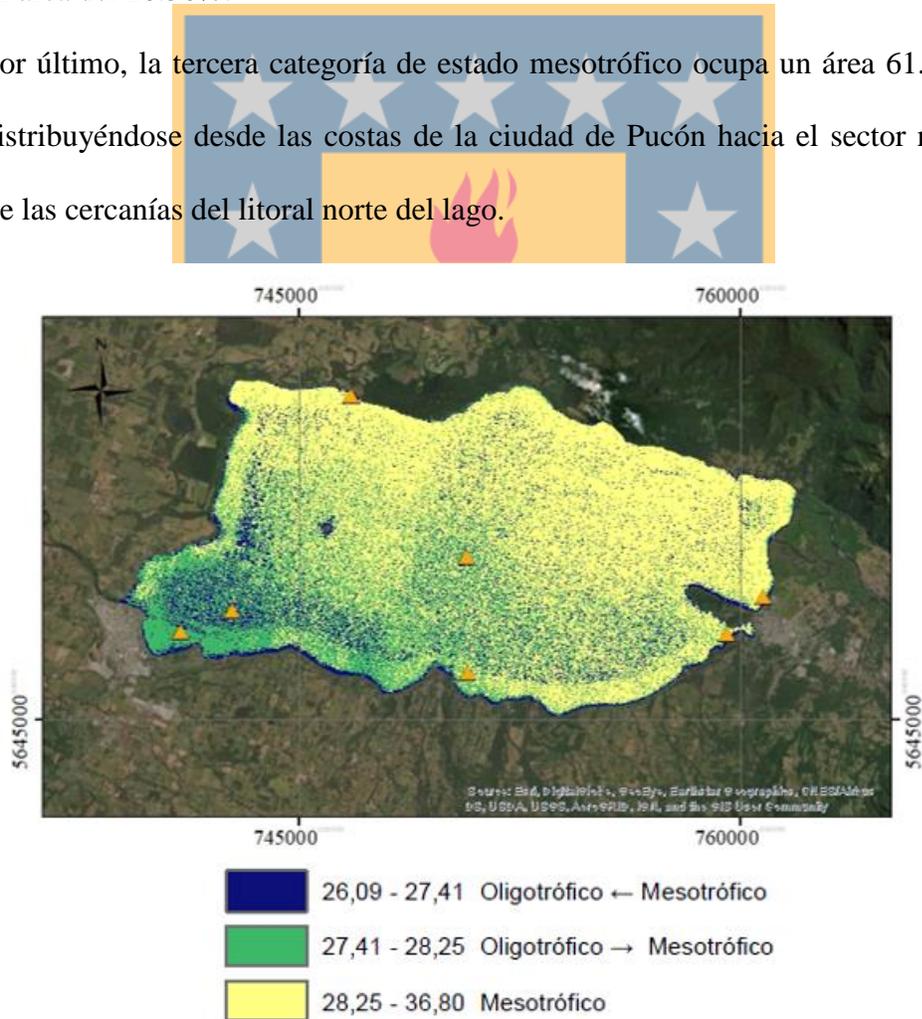


Ilustración 25 Mapa de Abril 2017

Mayo 2017.

Durante el mes de mayo la Ilustración 26 muestra que la categoría predominante al igual que el mes de abril corresponde a la categoría tres donde el estado mesotrófico ocupa un 78.14% del área del Lago. Su distribución es en casi la totalidad del lago.

En el caso de la categoría 2 ocupa un área de 9.99% y distribuyéndose en las costas de la ciudad Villarrica y en menor medida en las costas de la ciudad Pucón.

El área que ocupa la categoría uno corresponde al cambio de estado mesotrófico a oligotrófico es de un 11.87% del área total y se distribuye igual que la categoría dos

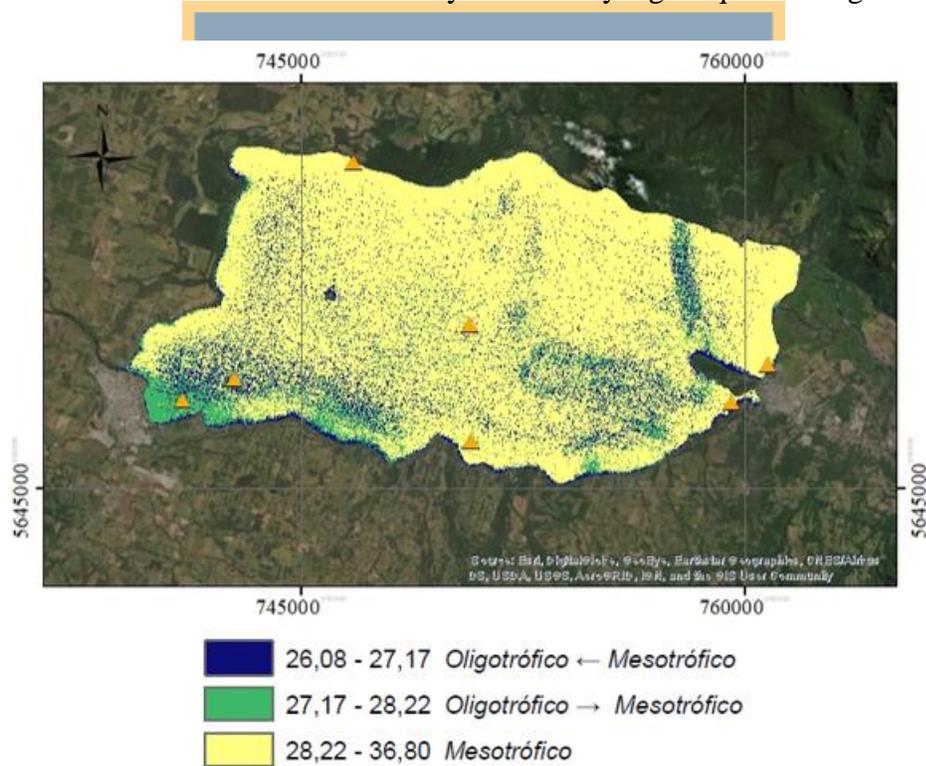


Ilustración 26 Mapa de Mayo 2017

Julio 2017.

La Ilustración 27 visualiza la situación del mes de julio donde sigue siendo dominante la categoría tres que ocupa un área del 89.60% y distribuyéndose en casi la totalidad del lago, mientras la categoría 1 ocupa un 8.33% del área y se distribuye entre las cercanías de las estaciones litoral norte, Villarrica Pelegial y litoral Villarrica. Finalmente, la categoría dos su área es un 2.07% y se ubica en las costas de la ciudad de Villarrica.

Al analizar este resultado se entiende que en la temporada de otoño a invierno hay un crecimiento en la concentración de clorofila-a lo que aumenta el índice trófico. Este hecho ocasiona que el lago pase de un estado oligotrófico a mesotrófico

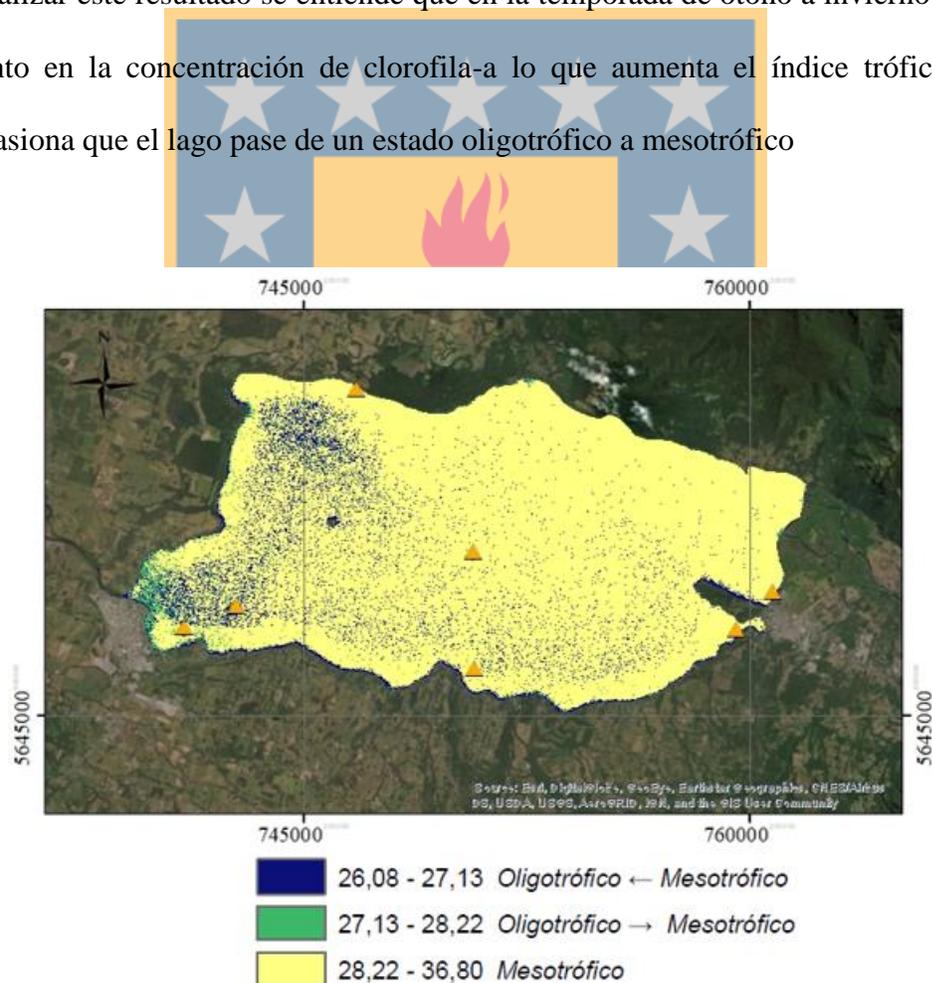


Ilustración 27 Mapa julio 2017

Agosto 2017.

En el mes de agosto el estado trófico del lago ha sufrido un cambio, en donde la categoría dos es la dominante sobre las demás categorías. La categoría dos corresponde al cambio de estado oligotrófico a mesotrófico con un área total 69.49% del lago y distribuyéndose casi en la totalidad del lago. La categoría uno enseña un aumento en comparación del mes de julio donde su área actual es de un 28.40% y se presenta en las cercanías de las costas norte del lago. Por último la categoría tres no se logra visualizar en la Ilustración 28.

Esta categoría presenta 2.10% del área total del lago, en comparación al mes julio hay un notable cambio. Esto se debe a la disminución de en la concentración de clorofila-a ocasionando que el lago no mantenga su condición mesotrófico como en el mes julio.

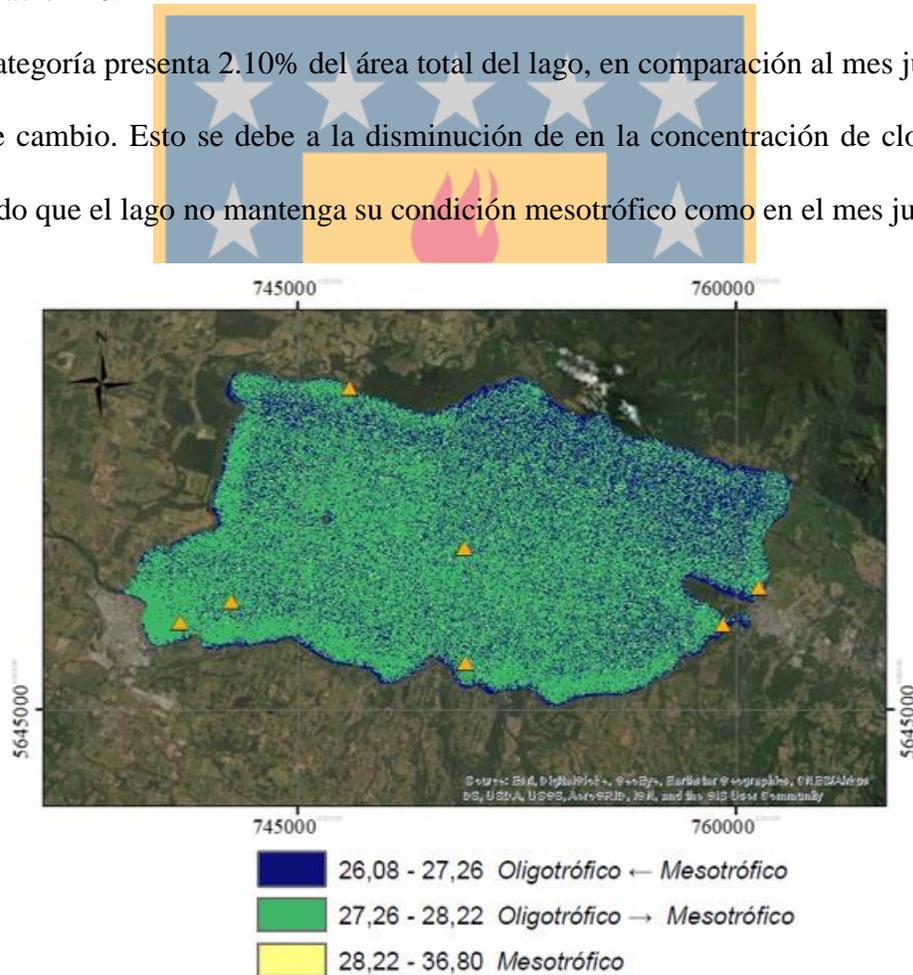


Ilustración 28 Mapa de Agosto 2017

Septiembre 2017.

En el transcurso del mes de septiembre la presencia de las tres categorías se puede visualizar en la Ilustración 29, siendo la más importante la categoría uno con un área de 42.80% y su distribución se encuentra en el centro del lago, pero en mayor medida en las cercanías de la estación centro Villarrica y litoral norte. La categoría tres presenta un área 39.71% y se distribuyen en las costas de Pucón y las costas norte del Lago Villarrica.

Por último, la categoría dos su área es de 17.49, con una localización entre las costas de la ciudad de Villarrica, costa sur del lago y en menor medida en el centro.

Al comparar la categoría tres con el mes de agosto se observa un aumento en la concentración de clorofila-a, lo que ocasiona un aumento en el estado mesotrófico en el lago.

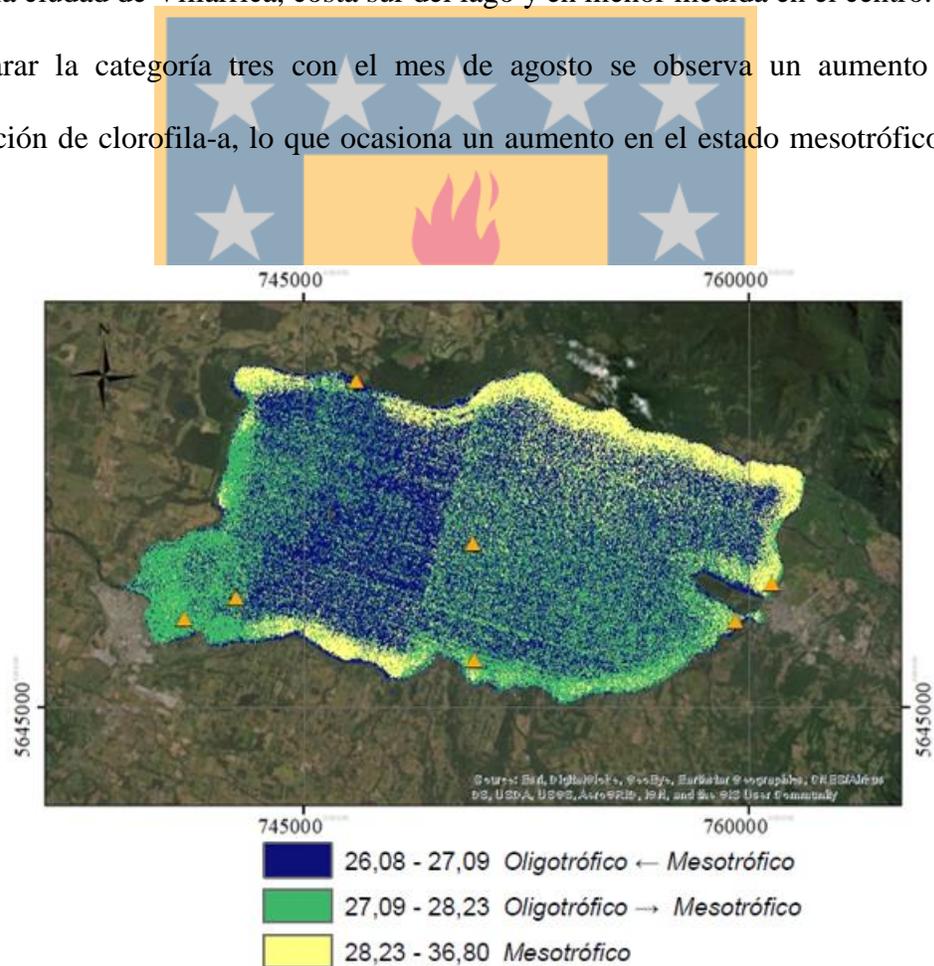


Ilustración 29 Mapa de Septiembre 2017

Octubre 2017.

Los resultados que se determinan para este mes determinan un dominio por, parte de la categoría uno (mesotrófico a oligotrófico) con 83.72% del área que ocupa dentro del lago, mientras que las categorías dos (oligotrófico a mesotrófico) ocupa un 12.81% y la categoría tres (mesotrófico) un 3.46% del área total. Este último dato demuestra una disminución en la concentración de clorofila en el mes de octubre. Al observar la Ilustración 30 la categoría uno se encuentra en la totalidad del lago, mientras la categoría dos en la mayoría del sector costero del lago y por último la categoría tres menor medida en la costa norte y centro del lago.

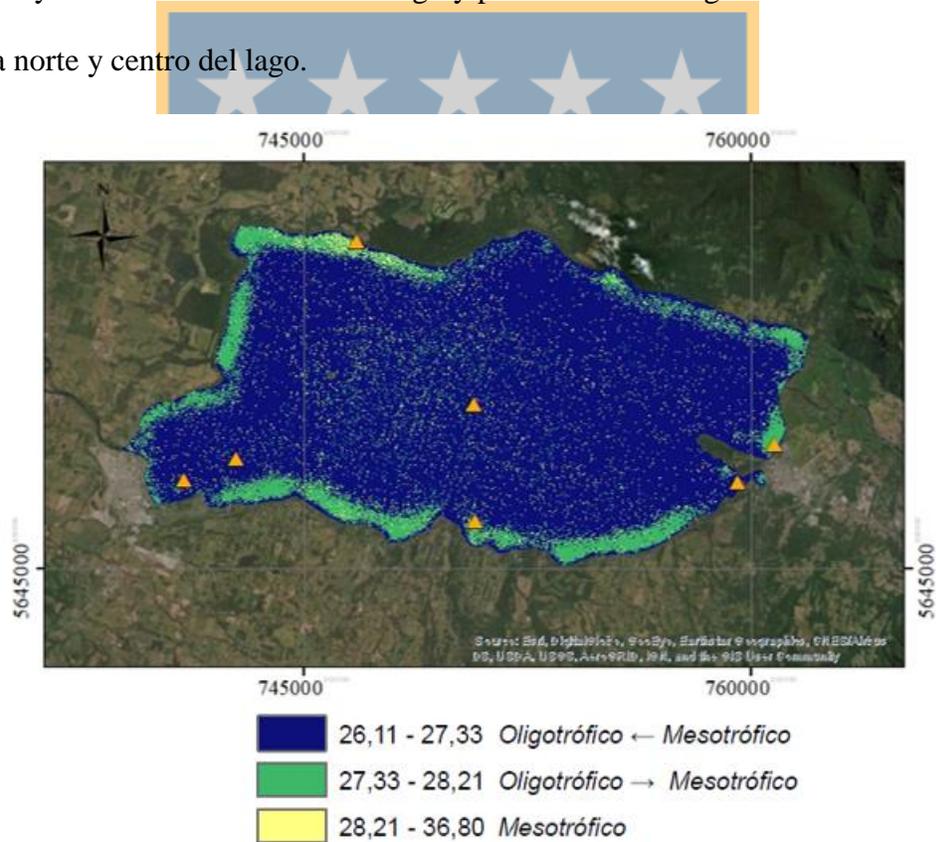


Ilustración 30 Mapa de Octubre 2017

Noviembre 2017.

Al analizar el mes de noviembre los resultados demuestran un aumento en la concentración de clorofila durante el mes, ocasionando un incremento en la categoría tres (mesotrófico) en 78.14% del área del lago, mientras la categoría uno (mesotrófico a oligotrófico) disminuye en este mes quedando en 11.87% en el área. Por último, la categoría dos (oligotrófico a mesotrófico) ocupa un 9.99% del área total. En la Ilustración 31 la categoría de estado mesotrófico se distribuye en la totalidad del lago, a excepción de la costa de Villarrica y sur del lago donde predominan el estado oligotrófico a mesotrófico, mientras el estado de mesotrófico a oligotrófico se observa en forma dispersa en el centro del lago y marcando una mayor presencia en los sectores de las estaciones litoral Villarrica, Villarrica Pelagial y en menor medida entre las estaciones de litoral sur, bahía La Poza y Pucón.

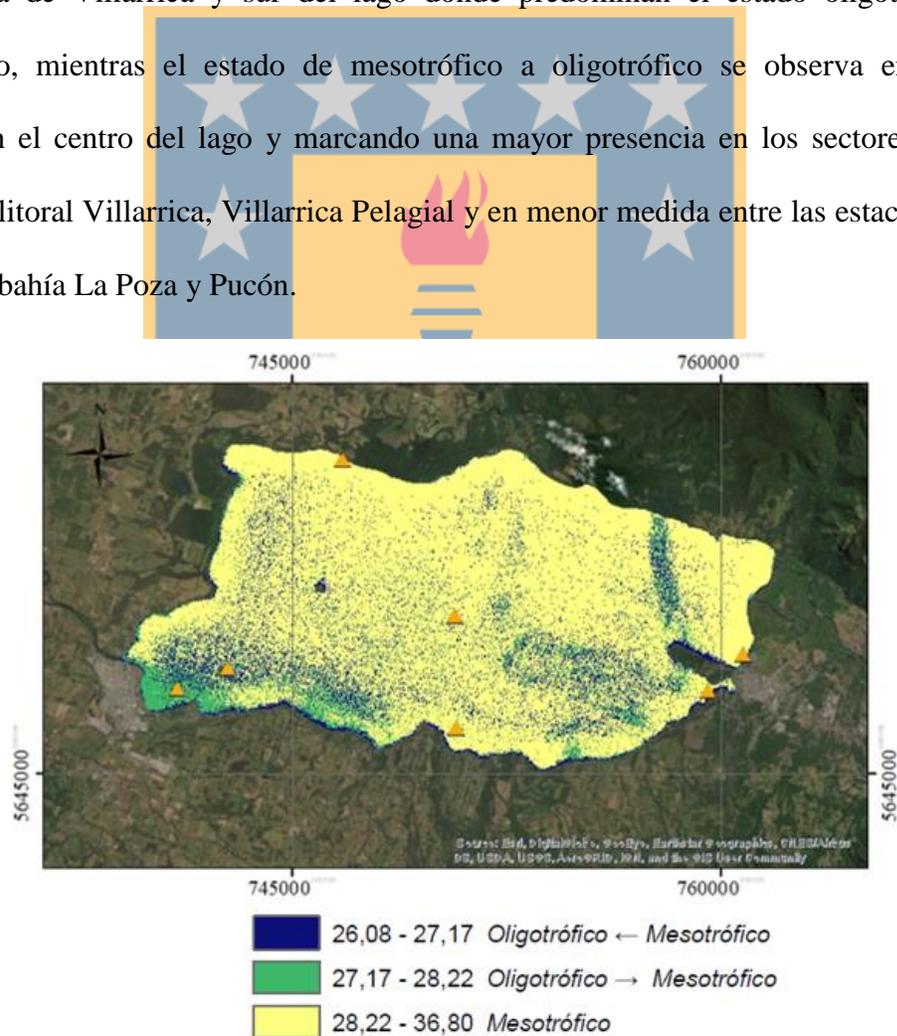


Ilustración 31 Mapa de mes de Noviembre 2017

Diciembre 2017.

A partir de los resultados del mes de diciembre se determina una disminución de la concentración de clorofila-a, lo que ocasiona que la categoría tres (mesotrófico) presente un área 3.22%, mientras la categoría uno (mesotrófico a oligotrófico) presenta un 82.22% del área total y por último categoría dos (oligotrófico a mesotrófico) muestra un área de 14.56% del lago. En la Ilustración 32 predomina la categoría uno en el centro del lago, mientras que la categoría dos se presenta en todas la zona costera del lago y por último la categoría tres ocupa de forma dispersa la zona centro y costa del lago.

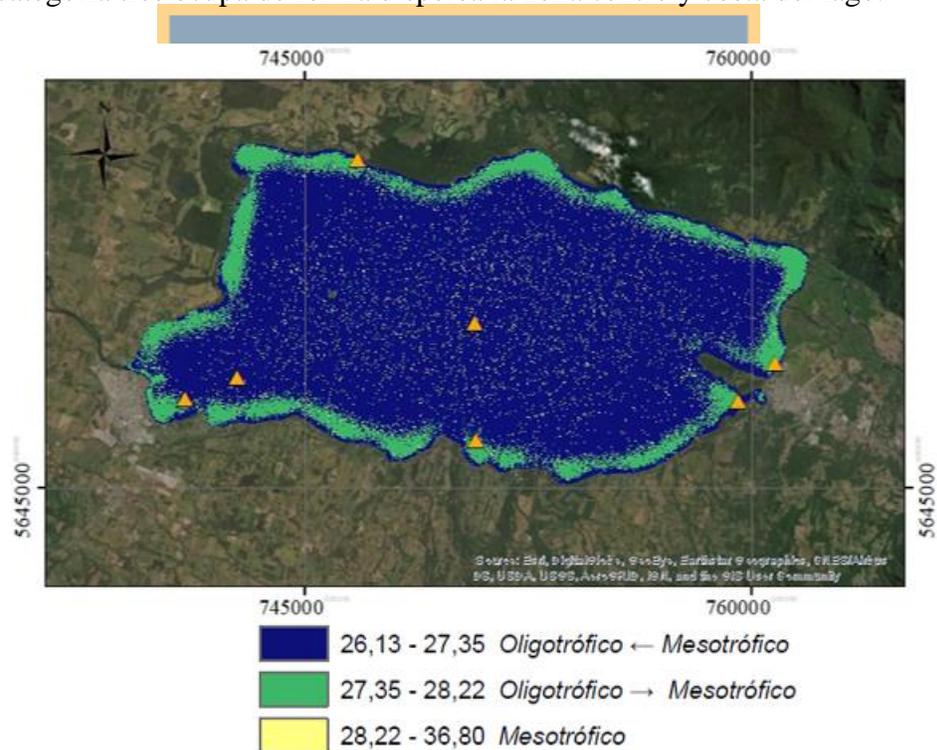


Ilustración 32 Mapa de Diciembre 2017.

5. Conclusiones.

- ✓ En base a esta investigación se concluye que los resultados obtenidos son producto del monitoreo del Lago Villarrica en búsqueda de la aparición de organismos vegetales dentro de éste, de los cuales se ha determinado un incremento en la aparición de algas muertas, enfermas y sanas entre las estaciones de primavera y verano durante el periodo 2017-2018.
- ✓ Productos de la participación de las plantas de aguas servidas y la desembocadura de los residuos a través de los ríos Trancura, ha provocado que la costa de Pucón sean las más afectadas en los cambios tróficos del lago.
- ✓ Se analiza que los mapas tróficos en los meses de marzo a diciembre 2017 en las estaciones de otoño e invierno, aumenta el crecimiento en la concentración de clorofila-a, lo que ocasiona un cambio en el estado trófico del Lago Villarrica pasando de un estado oligotrófico a mesotrófico.
- ✓ Uno de los resultados más importantes al analizar la totalidad de la cubierta del agua, es la zona conformada entre las estaciones de control del litoral Pucón: norte, centro y sur. Que presenta un 89.60% de contaminación aproximada en el mes de julio del año 2017.

- ✓ Al comparar los resultados obtenidos de las imágenes de la misión SENTINEL y el sistema de medición, da como resultado la aparición de algas en la temporada de verano 2017 y un aumento en el año 2018. Esto por causas de las instalaciones de las pisciculturas con sus residuos de materiales fecales de alto contenido de nitrógeno y fósforo, éstas se producen en el río Liucura.
- ✓ La emanación de residuos fecales que son generados, por parte de hoteles, condominios y casas particulares que se encuentran en la costa de Villarrica a Pucón, han generado la proliferación de las algas.
- ✓ Mediante esta investigación se puede contribuir en el monitoreo y control de los contaminantes que se producen en estas zonas de forma periódica, ya que estas afectan progresivamente al ecosistema, a la economía, al turismo, entre otras.



6. Bibliografía.

- Aizaki, M., Otsuki, A., Fukushima, T., Hosomi, M., Muraoka, K. (1981) *Application of Carlson's tropic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters.* Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03680770.1980.11897067>
- Baillarin, S (2012, 01 de septiembre) SENTINEL-2 LEVEL 1 PRODUCTS AND IMAGE PROCESSING PERFORMANCES. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/314842735_SENTINEL-2_LEVEL_1_PRODUCTS_AND_IMAGE_PROCESSING_PERFORMANCES
- Berjon, A. (2007). Determinación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal mediante inversión de modelos de transferencia radiativa. Recuperado de <http://quantalab.ias.csic.es/pdf/Tesis.pdf>
- Castro, B., (1999). Información sobre Tierra Agrícolas y Aguas para un Desarrollo Agrícolas Sostenible. Recuperado de http://biblioteca.inia.cl/medios/transferecia/tallersatelital/bsesteoricasp.remota_rcastro.pdf
- Chuvieco, E (1996) Fundamentos de la teledetección espacial. España: Madrid, Ediciones RIALP, S.A.
- Dall'Olmo, G., Gitelson, A., Rundquist, D. (2003) *Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters.* Recuperado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2003GL018065>

Dirección General de Aguas. (2017) REPORTE DE LA RED DE CONTROL DE LAGOS DE LA DIRECCION GENERAL DE AGUAS AÑOS 2017.

Recuperado de <http://documentos.dga.cl/LGO5740.pdf>

Díaz, J. (2015) Estudios de Índices de Vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Recuperado de

https://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf

ESA, (2015). *sentinel online*. ESA.

Recuperado de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>

Ferre, M. (2017). FEIR: Modelo de Regresión. Recuperado de

<http://gauss.inf.um.es/feir/40/>

García, G., Sánchez, J. (2016) Regresión Polinomial [Métodos Abiertos] recuperado de <https://metodonumerico.wordpress.com/2017/04/06/regresion-polinomial/>

Gitelson, A., Zimba, P. (2006) *Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization*. Recuperado de

<https://pubag.nal.usda.gov/pubag/downloadPDF.xhtml?id=27538&content=PDF>

Gómez, R. (2013) Análisis espectral del Lago de Guadalupe mediante imágenes de satélite y datos *in situ* Recuperado de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0188461115300030>

Hernández, H (2011) Procesamiento Digital de Imágenes. Recuperado de <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento%20Digital%20de%20Imágenes%20-%20Jaime%20Hernández%202011.pdf>

Jara, A. (2008) Regresión Lineal y Regresión Polinomial [ACADEMIA] recuperado de http://www.academia.edu/9434650/Regresión_Lineal_y_Regresión_Polinomial

M&W Ambientales. (2014) Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos de la DGA. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/LGO5518.pdf>

Murray, R., SPIEGEL, Ph. (1977) PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA. México: Naucalpan de Juárez, Ediciones Edo. de México.

Nowakowski, T (2015, 23 de junio) *Arianespace successfully launches europe's sentinel-2A earth observation satellite [Spaceflight insider]*. Recuperado de <https://www.spaceflightinsider.com/missions/earth-science/arianespace-successfully-launches-europes-sentinel-2a-earth-observation-satellite/>

Paz Pellat, F. Romero, M. (2014). Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: Marco Teórico. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792014000300177

Rodríguez, N., Preciado, M. (2015) Estimación de Concentración clorofila-a, con técnicas de teledetección a partir de un derrame de petróleo. Recuperado de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewj8zIWkiorfAhUIx5AKHefjAF0QFjABegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Frevistas.umanizales.edu.co%2Ffojs%2Findex.p>

<http://eventanainformatica.com/article/download/1106/1360&usg=AOvVaw1ZxG87vAZ6CLa0OWtQTV5b>

Secchidipin. (2018) *Trophic State Equations*. North American Lake Management Society. 96pp. Recuperado de <http://www.secchidipin.org/index.php/monitoring-methods/trophic-state-equations/>

Soza, D. (2018). Tutorial Corrección atmosférica para SENTINEL-2 L-1C mediante Sen2cor. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/322303445_Tutorial_Correccion_atmosferica_para_Sentinel2_L-1C_mediante_Sen2cor

Soria, X., Urrego, P., Delegado, J., Pereira-Sandoval, M. (2017) Validación de algoritmo para la estimación de la Clorofila-a en la Albufera de Valencia. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/324862377_Validacion_de_algoritmos_para_la_estimacion_de_la_Clorofila-a_con_Sentinel-2_en_la_Albufera_de_Valencia

Superintendencia del Medio Ambiente Gobierno de Chile. (2018) Norma secundaria de la calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales del Lago Villarrica. Recuperado de

Taipale, E. (2018). *NDVI and your farm: understanding NDVI for plant health insights* [Sentera] Recuperado de <https://sentera.com/understanding-ndvi-plant-health/>

Van oene, J. (2016, 17 noviembre) *Esa's sentinel 2B spacecraft steps into the spotlight [Spaceflight insider]*. Recuperado de

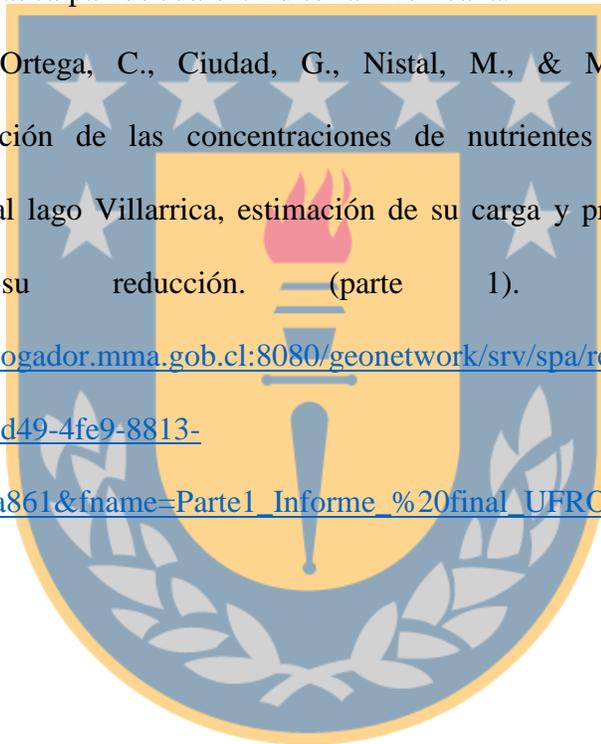
<https://www.spaceflightinsider.com/organizations/esa/esas-sentinel-2b-spacecraft-steps-spotlight/>

Young, H., Freedman, R. (2009). Física Universitaria con Física Moderna VOL2. México: Naucalpan de Juárez. Editorial Mexicana.

Young, H., Freedman, R. (2009). Física Universitaria con Física Moderna VOL1. México: Naucalpan de Juárez. Editorial Mexicana.

Zambrano, M., Ortega, C., Ciudad, G., Nistal, M., & Martínez, J. (2018). Determinación de las concentraciones de nutrientes en los principales afluentes al lago Villarrica, estimación de su carga y propuesta de medidas para su reducción. (parte 1). Recuperado de

http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=c5bbd44-7d49-4fe9-8813-24db24b0a861&fname=Parte1_Informe_%20final_UFRO2018.pdf&access=public



7. Anexos

