



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Aplicación de la Teledetección Satelital como herramienta para la determinación del estado trófico de la Laguna de Yambo

Moscuiy Ruales, Bryan Andres

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente

Ing. Sinda González, Izar M.Sc.

10 de diciembre de 2021

URKUND



Document Information

Analyzed document	TESIS Moscuiv Ruales, Bryan.docx (D118961247)
Submitted	2021-11-17 20:42:00
Submitted by	Juan Carlos Altamirano
Submitter email	jc.altamiranoc@uta.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	jc.altamiranoc.uta@analysis.urkund.com



Firmado electrónicamente por:
IZAR SINDE
GONZALEZ

Firma:

**Ing. Sinde González, Izar M.Sc.
DIRECTOR**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: “**Aplicación de la Teledetección Satelital como herramienta para la determinación del estado trófico de La Laguna de Yambo**” fue realizado por el señor **Moscuiy Ruales Bryan Andres**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 10 de diciembre 2021

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**IZAR SINDE
GONZALEZ**

**Ing. Sinde González, Izar M.Sc.
C. C.: 175649127-8
DIRECTOR**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Moscuiy Ruales Bryan Andres, con cédula de ciudadanía n°1723340392, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Aplicación de la Teledetección Satelital como herramienta para la determinación del estado trófico de la Laguna de Yambo”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 10 de diciembre de 2021

Firma:

Moscuiy Ruales, Bryan Andres
C. C.: 172334039-2



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo Moscuíy Ruales Bryan Andres, con cédula de ciudadanía n° 1723340392, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Aplicación de la Teledetección Satelital como herramienta para la determinación del estado trófico de La Laguna de Yambo”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 10 de diciembre 2021

Firma:

Moscuíy Ruales, Bryan Andres
C. C.: 172334039-2

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres Rosario y Jaime, que con su confianza, amor y arduo trabajo han sido el pilar fundamental para cumplir con esta meta.

Agradecimiento

A mis padres por su apoyo incondicional durante mi carrera universitaria y por siempre motivarme a cumplir con todos mis objetivos.

A mi tutor Ing. Izar Sinde por su colaboración y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Oswaldo Padilla, por su orientación y ayuda como docente evaluador.

A mis familiares que me apoyaron y siempre estuvieron al pendiente de mí.

A mis amigas y amigos, quienes estuvieron junto a mí compartiendo momentos inolvidables, por brindarme su amistad y hacer más llevadero este camino.

Índice de contenidos

Contenido	
URKUND	2
CERTIFICACIÓN	3
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de contenidos	8
Resumen	13
Abstract	14
Capítulo I	15
Antecedentes.....	15
Planteamiento del Problema	17
Justificación e Importancia	18
Descripción del Área de Estudio	19
Objetivos.....	21
Objetivo general.....	21
Objetivos específicos	21
Metas	21
Capitulo II	22
Marco Teórico.....	22
Capitulo III	43
Metodología	43
Recopilación de Información	44
Búsqueda de datos in-situ de clorofila-a tomados en estudios previos	44
Búsqueda y descarga de Imágenes Satelitales	45
Procesamiento de Imágenes	47
Generación de la Geodatabase	50
Estimación de la concentración de Clorofila-a	50
Extracción de reflectancias	50
Desarrollo de la Ecuación de Regresión.....	51

Calibración	52
Validación	52
Prueba F de significancia general.....	52
Prueba t de significancia individual	53
Verificación de Supuestos	53
Linealidad	53
Multicolinealidad	53
Independencia	53
Homocedasticidad	54
Generación de Mapas de Clorofila-a	54
Identificación de valores atípicos en la estimación de la concentración de clorofila-a	55
Mapas de concentración de clorofila-a corregidos	58
Estadística Descriptiva de la concentración de Clorofila-a	58
Determinación del Estado trófico	58
Capítulo IV	60
Resultados	60
Información Recopilada	60
Valores de reflectancia	64
Ecuación de Regresión Lineal Múltiple	65
Validación	69
Identificación de Valores atípicos en la estimación de la concentración de clorofila-a años 2017 y 2020	74
Mapas de estimación de clorofila-a años 2017 y 2020	79
Estadística Descriptiva Concentración de clorofila-a años 2017 y 2020.....	82
Determinación del Estado trófico años 2017 y 2020	85
Capítulo V	87
Conclusiones y Recomendaciones	87
Conclusiones	87
Recomendaciones	89
Referencias Bibliográficas	90
Anexos	98

Índice de Tablas

Tabla 1 Características de las bandas de Sentinel-2	32
Tabla 2 Tabla ANOVA	40
Tabla 3 Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua	58
Tabla 4 Valores de clorofila-a 2017	60
Tabla 5 Características de las imágenes Sentinel-2	61
Tabla 6 Valores de las reflectancias extraídas.....	64
Tabla 7 Matriz de Correlación.....	65
Tabla 8 Matriz de Correlación entre las variables explicativas	72
Tabla 9 Resumen estadístico clorofila-a año 2017	82
Tabla 10 Resumen estadístico clorofila-a año 2020	84

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de ubicación de la zona de estudio Laguna de Yambo.....	20
Figura 2 Componentes de un sistema de teledetección	25
Figura 3 El Espectro Electromagnético	27
Figura 4 Respuestas Espectrales del sensor TM	28
Figura 5 Espectro de reflectividad del agua de un lago hipereutrófico.....	29
Figura 6 Esquema de la metodología para el proyecto.....	43
Figura 7 Lista de imágenes obtenida en Google Earth Engine	46
Figura 8 Descarga de Imágenes Satelitales Sentinel-2	47
Figura 9 Corrección Atmosférica realizada en el software SNAP 8.0	48
Figura 10 Recorte espacial al área de estudio	49
Figura 11 Remuestreo a 10 metros.....	49
Figura 12 Estructura de la Geodatabase.....	50
Figura 13 Extracción de los valores de reflectancia.....	51
Figura 14 Estimación de la concentración de clorofila-a.....	54
Figura 15 Extracción de valores estimados de clorofila-a.....	56
Figura 16 Identificación espacial de valores atípicos año 2017	56
Figura 17 Identificación espacial de valores atípicos año 2020	57
Figura 18 Ubicación de los puntos de muestreo.....	60
Figura 19 Imagen Sentinel-2 procesada año 2017	62
Figura 20 Imagen Sentinel-2 procesada año 2020.....	63
Figura 21 Geodatabase.....	64
Figura 22 Matriz Grafica de Correlación.....	66
Figura 23 Resumen del modelo de regresión lineal múltiple	67
Figura 24 Probabilidades para las pruebas de significancia	69
Figura 25 Gráfico de dispersión de valores reflectancias de la banda 2.....	71
Figura 26 Gráfico de dispersión de valores reflectancias de la banda 4.....	71
Figura 27 Determinación del estadístico Durbin-Watson.....	72
Figura 28 Determinación del estadístico de Breusch-Pagan	73
Figura 29 Diagrama de Caja clorofila-a 2017	74
Figura 30 Valores atípicos 2017.....	74

Figura 31 Ubicación de valores atípicos 2017	75
Figura 32 Ubicación de Valores atípicos corregidos 2017	76
Figura 33 Diagrama de Caja clorofila-a año 2020	77
Figura 34 Valores atípicos 2020	77
Figura 35 Ubicación de valores atípicos 2020	78
Figura 36 Ubicación de valores atípicos corregidos 2020.....	79
Figura 37 Mapa de concentración de clorofila-a 2017	80
Figura 38 Mapa de concentración de clorofila-a 2020	81
Figura 39 Histograma de frecuencias 2017	83
Figura 40 Histograma de frecuencias 2020	84

Resumen

La laguna de Yambo ha sido considerada una zona para la aplicación de investigaciones en el ámbito de la evaluación del estado trófico, sin embargo, dentro de la misma no se ha elaborado un estudio que determine estos índices mediante la aplicación de técnicas con teledetección satelital, en este contexto el presente estudio tiene como objetivo estimar la concentración de clorófila-a para determinar el estado trófico de la Laguna de Yambo, para ello se determinó un modelo empírico que relacione los valores de concentración de clorófila-a determinados a partir de muestras tomadas en campo en un estudio anterior y las reflectancias de las bandas obtenidas de las imágenes satelitales Sentinel-2, como resultado se determinó y validó una ecuación de regresión lineal múltiple que utiliza los valores de reflectancia de las bandas 2 y 4 para estimar la concentración de clorófila-a, la cual obtuvo un R^2 ajustado de 0.989, con la misma se determinó una media de 89.78 mg/m³ para el año 2017 y de 40.37 mg/m³ para el año 2020, esta disminución de concentración de clorófila-a se atribuyó al confinamiento por COVID-19 donde se redujo casi por completo las actividades turísticas las cuales son una de las principales fuentes contaminación de la laguna, finalmente se determinaron los índices de estado trófico de Carlson modificado por Aizaki obteniéndose un valor de 73.68 para el año 2017 y de 64.96 para el año 2020 con lo cual se determinó que para los dos años la Laguna se encuentra en un estado eutrófico, demostrando así la aplicabilidad que tiene la teledetección Satelital en la determinación del estado trófico de los cuerpos de agua.

PALABRAS CLAVE:

- **ESTADO TRÓFICO**
- **CLOROFILA-A**
- **TELEDETECCIÓN SATELITAL, SENTINEL-2**

Abstract

The Yambo Lagoon has been considered an area for the application of research in the field of trophic state assessment, however, within the same has not been developed a study to determine these indices through the application of techniques with satellite remote sensing, in this context the present study has the objective of estimating the concentration of chlorophyll-a to determine the trophic state of the Yambo Lagoon, for this purpose, an empirical model was determined that relates the values of chlorophyll-a concentration determined from samples taken in the field in a previous study and the reflectance of the bands obtained from Sentinel-2 satellite images. As a result, a multiple linear regression equation was determined and validated that uses the reflectance values of bands 2 and 4 to estimate the concentration of chlorophyll-a, which obtained an adjusted R^2 of 0.989, with the same it was determined an average 89.78 mg/m³ for the year 2017 and 40.37 mg/m³ for the year 2020, this decrease in chlorophyll-a concentration was attributed to the confinement by COVID-19 where tourist activities were almost completely reduced which are one of the main sources of contamination of the lagoon, finally the trophic state indexes of Carlson modified by Aizaki were determined obtaining a value of 73.68 for the year 2017 and 64.96 for the year 2020 with which it was determined that in for the two years the Lagoon is in a eutrophic state, demonstrating the applicability that Satellite remote sensing has in determining the trophic state of water bodies.

KEY WORDS:

- **TROPHIC STATE**
- **CHLOROPHYLL-A**
- **SATELLITE REMOTE SENSING, SENTINEL-2**

Capítulo I

Aspectos Generales

Antecedentes

La eutrofización es un proceso de origen antrópico que va deteriorando la calidad del agua, ya que genera un aumento en las cantidades de nutrientes, principalmente nitrógeno (N), fósforo (P) y materia orgánica (MO); lo cual enriquece a los sistemas acuáticos, pero a su vez genera una disminución en la concentración de oxígeno, lo que provoca la muerte de los organismos (D. Moreno et al., 2010).

Burgasí & Cayo (2016) mencionan que la mayoría de los ríos y lagos del país que se encuentran cerca de áreas urbanas tienen altos niveles de nitrógeno y fósforo, lo cual indica un alto grado de eutrofización en ellos.

En este contexto, la Laguna de Yambo no es la excepción, ya que como señala el trabajo realizado por (Orquera & Cabrera, 2020), esta Laguna se encuentra en un estado Eutrófico, el cual fue determinado mediante el análisis de muestras tomadas en campo, empleando los modelos de Carlson y Aizaki.

Sin embargo, los métodos utilizados para la evaluación de los parámetros de la calidad del agua como se ha expuesto anteriormente se han basado habitualmente en mediciones tomadas en campo. Y si bien con estos procedimientos pueden proporcionar medidas exactas, su obtención demanda numerosos recursos (Mendoza, 2014).

Es por ello que las técnicas que utilizan teledetección han demostrado su utilidad para proporcionar los medios adecuados en la estimación de los parámetros relacionados con índices de calidad del agua (Feyisa et al., 2014).

García (2017) realizó un estudio sobre la posibilidad de utilizar imágenes Sentinel para detectar procesos de eutrofización de masas de agua, mediante la medida

indirecta de la concentración de clorofila. Para ello, tuvo acceso a las medidas in-situ en diferentes embalses de la cuenca del Duero, con estos valores comparó las medidas obtenidas a partir de las imágenes de satélites mediante un estimador sencillo, basado en los valores del espectro de reflectancia, y en particular en la relación entre bandas significativas, con los valores de clorofila medidos in-situ. Así, al analizar los valores para varias observaciones en dos embalses diferentes, uno con un nivel de clorofila elevado y otro con un nivel de clorofila bajo, determina una clara correlación, con un coeficiente superior a 0,8, y concluye que la aplicación de estos nuevos métodos resulta de un gran interés en el monitoreo de los parámetros de los embalses y en las medidas de vigilancia de la calidad del agua.

Quiroz (2019) evalúa los estados tróficos de la laguna principal del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM). Para ello, la metodología consistió en el análisis de los parámetros físico-químicos del agua en dos campañas de muestreo y en la formulación de modelos matemáticos, basados en estructuras de regresión lineal simple y múltiple; donde las variables independientes fueron representadas por los datos obtenidos de los parámetros físico-químicos y las dependientes, por los valores de las reflectancias de las bandas de Sentinel-2, y posterior al análisis de los resultados que obtuvo, concluye que las predicciones de los parámetros físico-químicos del agua son posibles mediante el uso de la teledetección; dado que obtuvo 5 modelos matemáticos consistentes.

Por otro lado, Vela (2020), determina el nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás en el departamento de Cajamarca mediante teledetección, para ello, utilizó imágenes satelitales Landsat 5 y 8 para los años 1998, 2008 y 2019, a las cuales se le aplicaron correcciones, índices y ecuaciones para posteriormente ser calibradas con pruebas de laboratorio. Continúa con la evaluación del estado trófico mediante las

concentraciones de turbiedad y clorofila a, donde obtuvo una correlación significativa para la turbiedad, la Chl-a y para el disco de Secchi (transparencia). Concluye finalmente que es posible contrastar los resultados obtenidos de clorofila "a", turbiedad, DQO mediante teledetección con muestreos de campo, a través de una correlación de parámetros y determina que según la metodología de Carlson y el Índice de Estado Trófico (TSI), la laguna San Nicolás pasa de estado eutrófico a mesotrófico en un periodo de 20 años.

Con los antecedentes expuestos se observa que la laguna de Yambo ha sido considerada una zona para la aplicación de investigaciones en el ámbito de la evaluación del estado trófico, sin embargo, dentro de la misma no se ha elaborado un estudio que determine estos índices mediante la aplicación de técnicas con teledetección satelital, que permiten un análisis mucho más rápido y con una menor utilización de recursos.

Planteamiento del Problema

El deterioro del estado trófico de las aguas continentales, embalses y lagos, ha sido un problema creciente en los últimos años (Briceño et al., 2018). Según ONU (2014) a nivel global, el principal problema que se relaciona con la calidad del agua lo constituye la eutrofización, que es el resultado de un incremento de los nutrientes (generalmente nitrógeno y fósforo) lo cual afecta a los usos del agua.

En los ecosistemas acuáticos eutrofizados, se comienza a dar una alteración de la biota y de la diversidad biológica, provocando una proliferación de algas, cianobacterias y macrófitos en demasía, lo que provoca opacidad, que impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua.

Lo cual imposibilita el llevar a cabo la fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos y, por lo tanto, genera una disminución en la producción de oxígeno libre;

convirtiendo el fondo del ecosistema acuático de forma gradual en un ambiente anaerobio. Dándose por tanto mortandad masiva de biota en general, bioacumulación de sustancias tóxicas, aumentando la sedimentación en los cuerpos de agua, reduciendo significativamente la calidad del agua (D. Moreno et al., 2010).

Este es el caso de la Laguna de Yambo, que se encuentra en un estado eutrófico, ya que presenta un elevado nivel de clorofila-a, debido a la abundante presencia de algas, como consecuencia del aumento de las actividades antrópicas en esta zona (Toapanta, 2017).

Es por ello, que esta laguna ya ha sido objeto de algunos estudios como los de Orquera & Cabrera (2020) y Toapanta (2017), en los que se determina el grado de eutrofización mediante el análisis de muestras tomadas en campo, sin embargo, estos estudios conllevan el uso de una gran cantidad de recursos.

Además, que imposibilita la capacidad de proporcionar una visión de la distribución espacial de las variables que se están examinando, lo cual no permite un control integral del estado del agua (Brivio et al., 2001).

En este sentido, es necesario la utilización de la teledetección satelital como una alternativa rápida, eficaz y de menor costo para el monitoreo de los procesos de eutrofización en la laguna de Yambo, y de esta manera generar la información necesaria para una adecuada gestión para su preservación, cuidado y manejo.

Justificación e Importancia

Los lagos y lagunas del Ecuador son muy importantes para la preservación de los ecosistemas y la biodiversidad, a pesar de ello son ecosistemas acuáticos vulnerables y frágiles(Rodríguez, 2019), además son de importancia a nivel económico, ecológico y cultural para las personas que habitan en los sectores aledaños (Burgasí & Cayo, 2016).

La Constitución de la República del Ecuador vigente a partir del año 2008, presenta un enfoque sobre los derechos del agua y la naturaleza impulsando su conservación y el uso sustentable de los recursos hídricos (Oña & Tonato, 2017), en este sentido el monitoreo continuo es necesario para la generación de información que permita tomar las decisiones adecuadas para su protección y conservación.

Sin embargo, las técnicas convencionales para la determinación del estado trófico que incluyen un proceso de muestreo y pruebas de laboratorio requieren recursos económicos y un tiempo elevado, así como traslado de recursos humanos al sitio. La búsqueda de métodos más económicos y rápidos para determinar parámetros de calidad es un campo en el que las tecnologías de Percepción Remota tienen una importante aplicación potencial (Sepúlveda, 2011).

En este contexto, el presente proyecto brinda una solución en la generación de información necesaria para el monitoreo del estado trófico de la Laguna de Yambo, que servirá de base para el correcto diagnóstico y gestión de la laguna por parte de los Organismos correspondientes.

Descripción del Área de Estudio

El área de estudio donde se realizó el presente proyecto de investigación fue la laguna de Yambo que se encuentra ubicada en el valle interandino en la región Sierra, en la parroquia Panzaleo del cantón Salcedo, en la provincia de Cotopaxi, a un costado de la carretera que une Ambato y Latacunga.

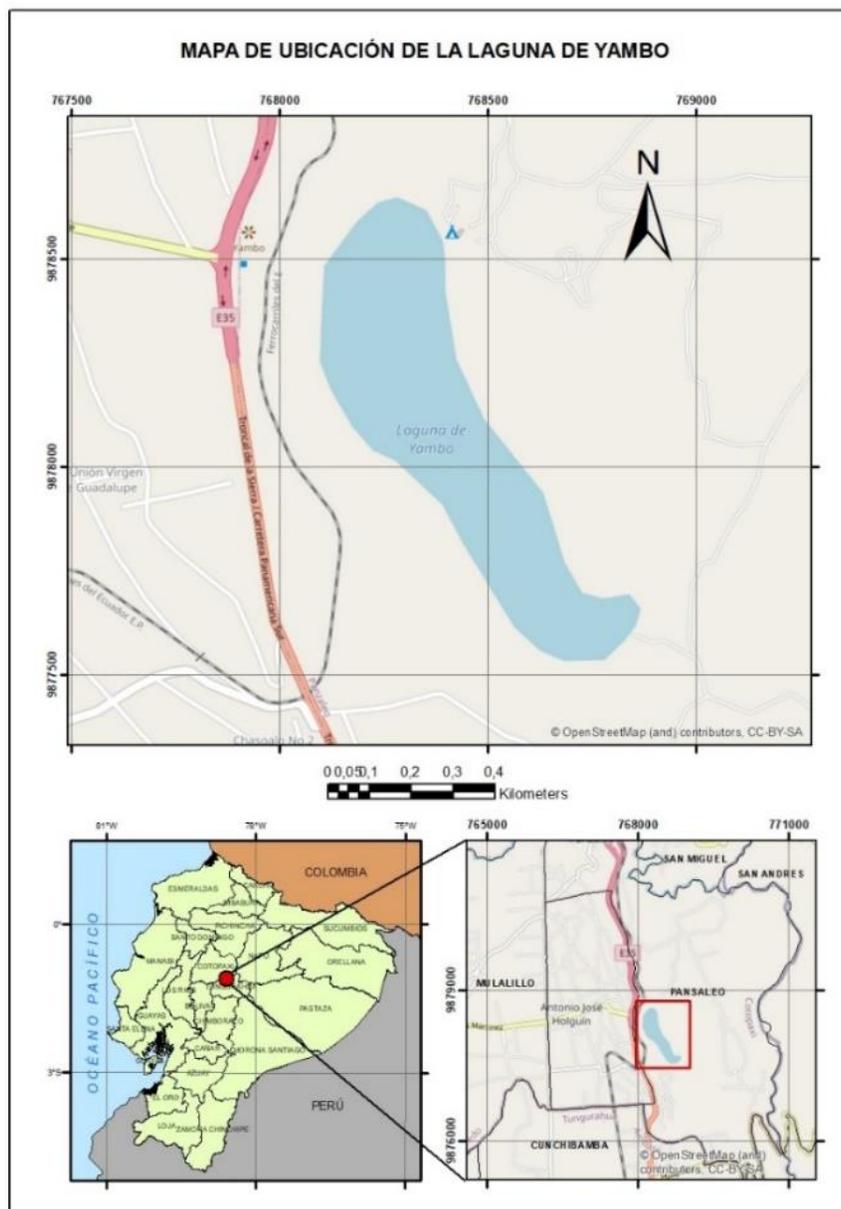
La laguna es de origen tectónico y aluvial, en la que se encuentran vertientes subterráneas, cuyas aguas tienen un alto desarrollo de algas y aguas turbias. (Burgasí & Cayo, 2016)

Las características bioclimáticas de esta zona son similares a las que ocurren en regiones denominadas húmedo temperado o mesotérmico húmedo localizados en las

estribaciones externas de los sistemas montañosos de la Sierra, así como en el interior de las Hoyas del callejón Interandino. (Díaz, 2019)

Figura 1

Mapa de ubicación de la zona de estudio Laguna de Yambo



Nota: El gráfico elaborado representa la ubicación de la Laguna de Yambo.

Objetivos

Objetivo general

Estimar la concentración de clorofila-a utilizando Imágenes Satelitales Sentinel-2 para determinar el estado trófico de la laguna de Yambo.

Objetivos específicos

- Recopilar y estructurar la información de datos de clorofila -a obtenidos con mediciones in-situ e imágenes satelitales.
- Determinar y validar la ecuación de regresión lineal múltiple que permita relacionar los valores de reflectancia de las imágenes satelitales Sentinel-2 con los valores de concentración de clorofila-a
- Modelar la distribución espacial de la concentración de clorofila-a de la laguna de Yambo del año 2017 y 2020
- Determinar el estado trófico de la laguna de Yambo utilizando el índice de Carlson modificado de los años 2017 y 2020

Metas

- 1 base de datos geográfica con información de los puntos de concentración de clorofila-a, y las imágenes satelitales procesadas.
- 1 modelo de regresión lineal múltiple validada que permita estimar la concentración de clorofila-a a partir de las reflectancias obtenidas de Imágenes satelitales Sentinel-2
- 2 mapas resultantes del modelamiento de la concentración de clorofila-a para el año 2017 y 2020
- Reporte estadístico del Estado Trófico de la Laguna de Yambo para el año 2017 y 2020

Capítulo II

Marco Teórico

Sistemas Acuáticos Lénticos y Eutrofización

Los sistemas acuáticos lénticos son generalmente aquellos que contienen aguas quietas que no fluyen o estancadas. Se forman en depresiones grandes o pequeñas en la superficie de la tierra que no tienen salida para que el agua fluya hacia afuera. En este contexto, los sistemas lénticos son, por lo tanto, sistemas cerrados, generalmente lagunas y lagos (Debajni, 2015).

Eutrofización

Este término se utilizó inicialmente para diferenciar los lagos eutróficos de los oligotróficos. Sin embargo, posteriormente este término se utilizó para definir el fenómeno provocado por los vertidos de los desechos derivados de actividades humanas, llamándolo proceso de eutrofización cultural o simplemente eutrofización; en un principio se definió como el abastecimiento excesivo de nutrientes como el nitrógeno y fósforo a los cuerpos de agua, que incluía un crecimiento acelerado de microalgas, lo cual podía producir la muerte de peces al disminuir los niveles del oxígeno que necesitan para vivir. (Moreno et al., 2010)

Proceso de Eutrofización

En el proceso de eutrofización uno de los principales factores que impide que la luz penetre adecuadamente es la proliferación del fitoplancton en la superficie, produciendo turbidez, restringiendo así la productividad en las capas más profundas. Es por ello, que las especies que mueren en este proceso sumado a un incremento de materia orgánica generan mayor cantidad de materia en descomposición, lo cual disminuye la cantidad de oxígeno disuelto, modificando las condiciones del ecosistema acuático lo que reduce la vida acuática (Moreta, 2008).

Categorías de Eutrofización

Los sistemas lénticos se clasifican en oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico según la concentración de nutrientes que existan en el cuerpo de agua, además basados en las manifestaciones ecológicas de la carga nutritiva. Estas categorías tróficas están basadas en concentraciones de fósforo total, concentraciones de la clorofila “a” y visibilidad de disco Secchi (Diaz & Sotomayor, 2013).

El estado oligotrófico es aquel en el que la oxigenación es buena en toda su profundidad al igual que la transparencia del agua y la concentración de materias nutritivas es baja. Por otro lado, el mesotrófico es una fase intermedia donde las materias nutritivas tienen una concentración media y cuenta con una mayor cantidad de organismos acuáticos. El estado eutrófico en cambio, es cuando el medio es rico en materias nutritivas; mientras que el hipereutrófico es cuando existe un exceso de enriquecimiento de materias nutritivas y la concentración del oxígeno disuelto es muy baja (Zouiten, 2012).

Métodos para la evaluación del Estado Trófico

Para determinar el estado trófico de los sistemas acuáticos como lagos y lagunas, se han establecido varios índices que reflejen el nivel de deterioro de la calidad del agua (Prado et al., 2017).

Los métodos para la evaluación del estado trófico de un cuerpo hídrico de acuerdo a (Moreno et al., 2010) se presentan a continuación:

- Análisis de los macrófitos y del fitoplancton en el cual se toman muestras de macrófitos sumergidos y flotantes, se estima la cobertura relativa de sustrato, así como el índice de diversidad de Shannon-Wiener.
- Índice del Estado Trófico (IET o TSI por su abreviatura en inglés) propuesto por (Carlson, 1977) y modificado por (Aizaki et al., 1981).

- Secuencia de categorías tróficas formulado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).
- Índice de eutrofización por nutriente propuesto por (Karydis et al., 1983).
- Estado trófico TRIX planteado por (Vollenweider et al., 1998).

Índice del Estado Trófico de Carlson

El índice de estado trófico propuesto por el Dr. Robert Carlson en 1977, se utiliza para medir la calidad del agua de un lago o embalse; tiene cuatro estados generales: oligotróficos, mesotróficos, eutróficos e hipereutrófico. (Woodruff, 1995) Este índice varía entre 0 y 100 de oligotrófico a hipereutrófico. Se obtiene a través de la transparencia determinada con el disco de Secchi o a partir de otros parámetros, como la concentración de clorofila a y fósforo total, cuya relación con la transparencia se ha deducido previamente (Moreno et al., 2010).

Índice del Estado Trófico de Carlson modificado por Aizaki

Después de publicado el trabajo de Carlson, en el año 1981, Aizaki propuso una modificación a este índice a través de la introducción de coeficientes específicos para cada elemento que complementa la composición del estado (M. López & Palacios, 2015), a continuación, se presenta la fórmula (1) que se utiliza para la determinación de Índice de estado Trófico:

$$TSI (\text{Clorofila} - a) = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln Cl_a}{\ln 2,5} \right) \quad (1)$$

Clorofila "a"

La clorofila es el pigmento verde que poseen las plantas y las algas, es fundamental en el proceso de la fotosíntesis. Este pigmento interviene en la conversión de energía solar a energía química necesaria para el metabolismo de las plantas durante la fotosíntesis. El pigmento más importante es la clorofila "a" (Granizo, 2011).

La concentración de clorofila-a (chl-a) es un indicador representativo para detectar el fitoplancton y monitorear la calidad del agua. La detección de fitoplancton en las capas de agua, a través de los indicadores de clorofila-a a demostrado ser un método eficaz para determinar la eutrofización.

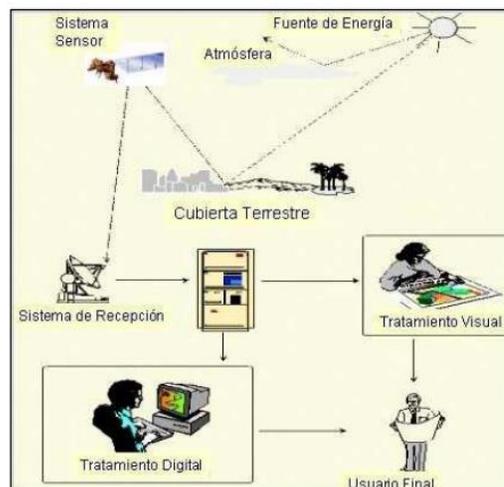
Además, numerosas publicaciones y estudios científicos han demostrado que los datos y las técnicas de teledetección son capaces de monitorizar la distribución y temporal y espacial de este fenómeno. (Peppia et al., 2020)

Teledetección Satelital

La Teledetección espacial es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre con sensores instalados en plataformas espaciales, esto suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia (Chuvienco, 1996). En este sentido un sistema de teledetección debe contar con determinados elementos que permitan interpretar los resultados obtenidos, dichos elementos aparecen representados en la Figura 2.

Figura 2

Componentes de un sistema de teledetección



Nota. Relación de los componentes en un sistema de teledetección. Tomado de TELEDETECCIÓN AMBIENTAL: La observación de la tierra desde el espacio (p.19), por (Chuvienco, 2008)

Imágenes Satelitales

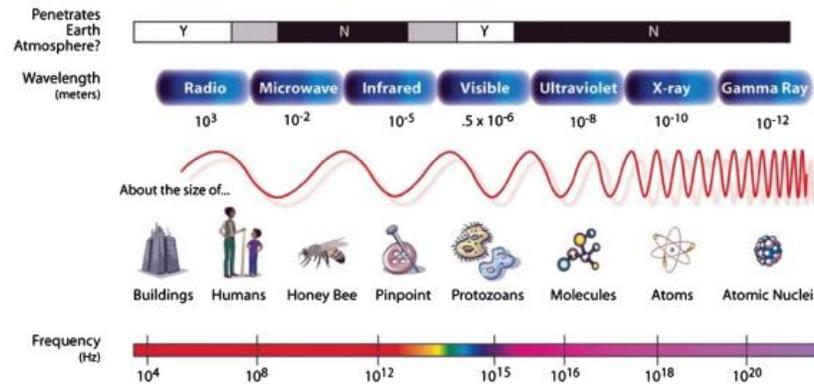
La imagen de satélite consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en la que existen números del 0 al 255. El cero indica que no llega nada de radiación desde ese punto mientras que el 255 que llega el valor más alto de radiación. Estos valores se denominan niveles digitales y es necesario transformarlos en algún tipo de variable física. Esta transformación se la suele realizar a través de una ecuación lineal cuyos parámetros se suministran junto con la imagen (Universidad de Murcia, 2006).

Radiación Electromagnética

El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituyen una forma de radiación electro-magnética (Chuvienco, 1996). La base de los sistemas de percepción remota es el proceso de radiación. En la radiación electro-magnética se desarrollan dos teorías; una que considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero y otra que explica el comportamiento como un haz ondulatorio. (Escobar, 2019).

Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es un continuo de energía, de longitudes de onda que varían desde los nanómetros hasta los metros. Debido a que todos los cuerpos emiten energía electromagnética la máxima intensidad de emisión se asocia a menores longitudes de onda (Hernández, 2011). El conjunto de las longitudes de onda que puede adoptar la radiación se denomina espectro electromagnético (Figura 3).

Figura 3*El Espectro Electromagnético*

Nota: Representación del espectro electromagnético. Tomado de (Cohen & Coffman, 2013)

Interacción de la radiación con los objetos

Todos los objetos (sin importar la radiación que emitan) reciben la radiación emitida por otros cuerpos, fundamentalmente del sol, que, en función del tipo de objeto que se esté considerando, puede seguir tres caminos:

- Reflejarse: la radiación es reenviada de vuelta al espacio
- Absorberse: la radiación incrementa la energía del objeto
- Transmitirse: la radiación se transmite hacia abajo a otros objetos (Chuvienco, 1996)

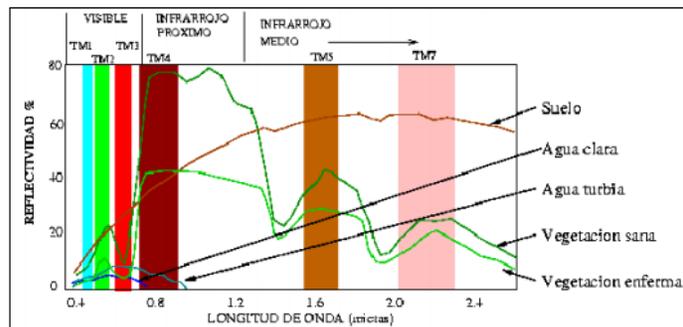
Firmas Espectrales

Se entiende como firma espectral a la interacción de la energía electromagnética con la superficie terrestre, la cual interactúa con cada tipo de material ya sea por absorción, transmisión o reflexión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral particular (Hernández, 2011). Las firmas espectrales son necesarias para identificar cada uno de los objetos de la superficie de la tierra, ya que cada uno 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 (Escobar, 2019). En la figura 4 se puede observar las respuestas espectrales de algunas superficies para el sensor TM.

Figura 4

Respuestas Espectrales del sensor TM



Nota: Representación gráfica de las respuestas del sensor TM en diferentes superficies. Tomado de: (Universidad de Murcia, 2006)

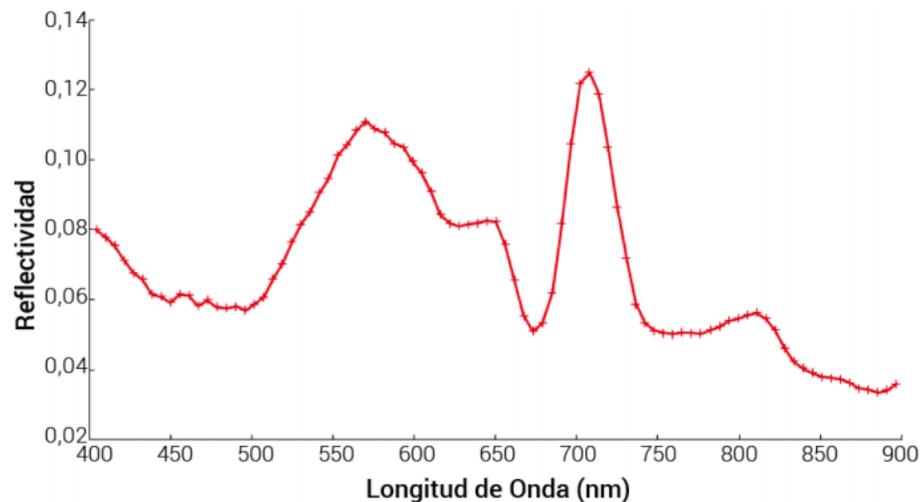
Respuesta Espectral del Agua

Las superficies acuáticas transmiten o absorben la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo mayor su absorptividad cuanto mayor sea la longitud de onda. La mayor reflectividad del agua clara se produce en las bandas del espectro electromagnético: azul y verde, la cual se va reduciendo paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio como se puede observar en la figura 5. La variabilidad del agua se detecta mejor en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), que debe ser relacionada con la profundidad, contenido de materiales en suspensión y rugosidad de la superficie (Chuvieco, 2008).

Cuando el agua presenta turbidez, la respuesta espectral va a depender del tipo de partículas (materia en suspensión, materia orgánica disuelta y fitoplancton), además de la cantidad y de la calidad de estas. Por ejemplo, si se trata de fitoplancton, aparecerán importantes alteraciones en la banda verde, la reflectancia aumenta en esta banda y en la banda azul disminuye. Si se trata de sedimentos inorgánicos, la reflectancia aumenta, especialmente en la banda roja. (Mendoza, 2014).

Figura 5

Espectro de reflectividad del agua de un lago hipereutrófico



Nota: Representación de la firma espectral típica de un lago hipereutrófico Tomado de: (García, 2017)

Sensores y satélites de teledetección

Se entiende por plataforma los satélites (LANDSAT, NOAA, METEOSAT, SPOT, etc.) o aviones que transportan los instrumentos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (sensores).

Un sensor por otro lado, es el instrumento que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado por una plataforma. Este puede

captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda (Bedón & Pinto, 2012).

Tipos de Sensores

Existen varias formas de clasificar los sensores remotos, una de las más habituales considera su procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas coberturas. En este sentido, se habla de dos tipos de sensores:

- Pasivos: cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos (sol).
- Activos: cuando son capaces de emitir su propio haz de energía. Estos últimos son, lógicamente más flexibles, puesto que no depende tanto como los primeros de las condiciones al sistema sensor – Tierra (Chuvieco, 2008).

Resolución de los sensores

De acuerdo con algunos autores, se puede definir la resolución de un sistema sensor como su habilidad para discriminar información de detalle (Chuvieco, 2008). Por un lado, se habla de resolución de un sistema sensor, indicando que este concepto se refiere al conjunto del equipo y no a cada una de sus partes. Dicho de otra forma, la resolución de un sensor depende del efecto combinado de sus distintos componentes (Bedón & Pinto, 2012).

Resolución Espacial

Este término determina el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Se mide en milímetros sobre la foto o metros sobre el terreno, y depende de la distancia focal de la cámara y de su altura sobre la superficie terrestre (Chuvieco, 2008).

Resolución Espectral

Se refiere al número de bandas espectrales del sistema sensor a ser utilizado que comprende el ancho de bandas y la posición de las bandas en el espectro. El sensor recoge la energía que le llega de la superficie en varias bandas del espectro de acuerdo a su resolución espectral. Entonces, esta será mayor cuantas más bandas del espectro sea capaz de manejar (Mendoza, 2014).

Resolución Radiométrica

Determina el detalle de la reflectancia de los objetos que son medidos por el sensor. La cuantificación de las imágenes es la medida de la resolución radiométrica, que mide en números digitales (ND) de (0-255, 0-1023, 0-2047). El número digital es el valor en bits (notación binaria) que presenta el pixel en la imagen. Este puede variar de 6 bits ($2^6 = 64$), 8 bits ($2^8 = 256$) conforme al sistema sensor y se expresa en niveles de gris (Mendoza, 2014).

Resolución Temporal

La resolución temporal determina la frecuencia con la que un satélite es capaz de obtener imágenes de una determinada región, adicionalmente también es denominada como intervalo de revisita (Mendoza, 2014).

Generalmente, a mayor resolución espacial disminuye la espectral y también la temporal. El problema es que cada aumento de resolución multiplica el volumen de datos que el sensor debe pre procesar y enviar a las estaciones de Tierra. El desarrollo de nuevos sensores de orientación modificable ha permitido compatibilizar alta resolución espacial y alta resolución temporal a costa de una toma de imágenes no sistemática (Bedón & Pinto, 2012).

Sentinel 2

La misión Copernicus Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica del sol, en fases a 180 ° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre, y su amplia franja (290 km) y alto tiempo de revisión (10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes, lo que da como resultado 2-3 días en latitudes medias) apoyará el seguimiento de los cambios en la superficie de la Tierra. La cámara multiespectral de Sentinel-2 es de alta resolución, basada en otras misiones como Landsat y SPOT, con la diferencia que posee 13 bandas espectrales (Tabla 1). (ESA, 2020).

Tabla 1

Características de las bandas de Sentinel-2

Bandas	Sentinel -2	Longitud de onda (nm)	Resolución espacial (m)
Banda 1	Coastal aerosol	442,7	60
Banda 2	Blue	492,4	10
Banda 3	Green	559,8	10
Banda 4	Red	664,6	10
Banda 5	Vegetation red edge	704,1	20
Banda 6	Vegetation red edge	740,5	20
Banda 7	Vegetation red edge	782,8	20
Banda 8	NIR	832,8	10
Banda 8a	Vegetation red edge	864,7	20
Banda 9	Water vapour	945,1	60

Banda 10	SWIR-Cirrus	1373,5	60
Banda 11	SWIR	1613,7	20
Banda 12	SWIR	2202,4	20

Nota. La tabla muestra las diferentes longitudes de onda del sensor del satélite Sentinel-2 así como sus respectivas resoluciones espaciales. Tomado de (ESA, 2020)

Nivel de procesamiento

Los productos disponibles para los usuarios se pueden dividir en dos categorías:

Nivel 1C: El Nivel-1C de Sentinel-2 es una ortoimagen, es decir, la imagen adquirida se ha ortorectificado utilizando un modelo digital del terreno para corregir el efecto de la topografía terrestre. Las mediciones radiométricas de píxeles se proporcionan en valores de reflectancia en el techo de la atmósfera (TOA), expresadas en tanto por unidad, valores entre 0 y 1, con una resolución radiométrica de 12 bits. (IGN, 2018)

Nivel 2A: El Nivel-2A de Sentinel-2, es una ortoimagen expresada en valores de reflectancias a nivel de la superficie (BOA), en tanto por unidad, con valores entre 0 y 1, con una resolución radiométrica de 12 bits. (IGN, 2018)

Corrección Atmosférica

La luz recibida por un sensor remoto pasivo atraviesa la atmósfera terrestre dos veces, la primera desde el Sol hasta la superficie de la Tierra y la segunda desde la superficie hasta el sensor. Por lo tanto, la luz recibida en el sensor se ve afectada por la absorción y la dispersión de las moléculas gaseosas y las partículas de la atmósfera. (Moses et al., 2017)

El objetivo de aplicar una corrección atmosférica es determinar los verdaderos valores de reflectancia de la superficie (Bottom-Of-Atmosphere, BOA) a partir de los

valores de reflectancia Top-Of-Atmosphere (TOA) eliminando los efectos atmosféricos.(Copernicus, 2017)

Sen2Cor

La corrección de Sentinel 2 (Sen2Cor) está diseñada exclusivamente para los productos terrestres de Sentinel-2 Nivel 2A y se basa en el método de la vegetación densa y oscura. Este método asume que la vegetación es suficientemente oscura y que la relación entre la reflectancia del fondo de la atmósfera a diferentes longitudes de onda es constante. Este algoritmo requiere que algunos píxeles de la imagen correspondan a una vegetación densa y oscura. Una vez que se establece la presencia de tales píxeles, el algoritmo elige automáticamente estos píxeles, y corrige la imagen. (Pereira-Sandoval et al., 2019)

Teledetección aplicada en la evaluación de la calidad de agua

La teledetección por satélite puede mejorar el control de la calidad del agua y aumentar la detección rápida de amenazas ambientales, como la eutrofización o la proliferación de algas nocivas, debido a su rentabilidad en el tiempo y en los costos en áreas extensas y en ubicaciones remotas. Esto es de especial interés en la región del Caribe y América del Sur, donde existen dificultades para obtener información básica sobre la calidad del agua (M. W. Matthews, 2011).

En este tipo de estudios, se han usado los valores de reflectividad de las bandas del visible e infrarrojo cercano y modelos empíricos predictivos de regresión lineal múltiple (RLM), linealizados a través de la transformación logarítmica, para estimar los valores de calidad de agua a través de la predicción estadística que relaciona los valores de reflectividad seleccionados, con los valores de la concentración de Chl-a, ZSD, entre otros (Lim & Choi, 2015).

Modelos predictivos o de regresión

La representación de la relación entre dos o más variables a través de un modelo requiere contar con una expresión lógico-matemática que permita realizar predicciones de los valores que tomará una de las dos variables, por un lado, aquella que se asuma como variable dependiente, de respuesta, o Y, por otro la que se asuma como variable independiente, explicativa o X. (Molina & Rodrigo, 2010)

Modelos de Regresión Lineal

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. Consiste en generar un modelo de regresión (ecuación de una recta) que permita explicar la relación lineal que existe entre dos variables. (Limeres, 2011)

Regresión Lineal Simple

La modelización estadística más simple es a través de una ecuación lineal en la cual se busca expresar la variable dependiente a través de la utilización de variables independientes (Ferre, 2017) . El modelo de regresión lineal simple se describe de acuerdo a la ecuación:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \quad (2)$$

En donde α es la ordenada en el origen (el valor que toma Y cuando X vale 0), β es la pendiente de la recta (indica cómo cambia Y al incrementar X en una unidad) y ε una variable que incluye un conjunto grande de factores, cada uno de los cuales influye en la respuesta sólo en pequeña magnitud, a la que se conoce como error. X e Y son variables aleatorias. (Limeres, 2011)

Regresión lineal múltiple

Otra de las formas en las que se puede representar una regresión lineal consiste en considerar más de una variable explicativa. Los modelos de regresión múltiple estudian la relación entre una variable de interés Y (variable respuesta o dependiente) y un conjunto de variables explicativas o regresoras X_1, X_2, \dots, X_k . En el modelo de regresión lineal múltiple se considera que la función de regresión que relaciona la variable dependiente con las variables independientes es lineal como se muestra a continuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (3)$$

Los coeficientes $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ denotan la magnitud del efecto que las variables independientes tienen sobre la dependiente Y . El coeficiente β_0 es un término constante del modelo y ε es el error del modelo. (McDonald, 2011)

Estimación de los parámetros en modelos de regresión lineal

El criterio para obtener los coeficientes de regresión B_0, B_1 y B_2 es el de mínimos cuadrados. Este consiste en minimizar la suma de los cuadrados de los residuos de tal manera que la recta de regresión que definamos es la que más se acerca a la nube de puntos observados y, en consecuencia, la que mejor los representa. (Lind et al., 2014)

Sí se cuenta con $n > k$ observaciones de la variable de respuesta, es decir, y_1, y_2, \dots, y_n . Junto con cada respuesta observada y_i , se tendrá una observación de cada una de las variables de regresión; y sea x_{ij} la observación de la variable x_j . Los datos podrían representarse como se muestra a continuación:

y	x_1	x_2	...	y_1
y_1	x_{11}	x_{12}	...	y_1
y_2	x_{21}	x_{22}	...	y_1
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
y_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nk}

La ecuación de regresión se puede escribir en términos de las observaciones como:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

El método de mínimos cuadrados consiste en elegir las β de la ecuación de regresión de tal modo que la suma de los cuadrados de los errores, se minimice. La función de mínimos cuadrados es:

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2 \quad (5)$$

La función L debe minimizarse con respecto a $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$. (Alva, 2010)

Validación del modelo

Supuestos: Los supuestos de un modelo estadístico se refieren a una serie de condiciones que deben darse para garantizar la validez del modelo. (UC3M, s/f)

Linealidad: La linealidad entre la variable dependiente y las variables explicativas se puede evaluar mediante la elaboración de un gráfico de dispersión el cual sirve como una aproximación al estudio de la linealidad del modelo. El incumplimiento del supuesto de linealidad suele denominarse error de especificación. (UC3M, s/f)

Multicolinealidad: No debe existir relación perfecta o exacta entre algunas o todas las variables explicativas de un modelo de regresión (Escalante et al., 2001). Ya que Cuando dos o más variables explicativas guardan una relación

exacta entre ellas, no es posible medir los efectos individuales de estas variables sobre la variable dependiente (Gallego, 2008)

Independencia: Los errores son independientes entre sí, no están relacionados tampoco con las variables predictoras ni con el criterio. Las puntuaciones de X e Y no se influyen unas con otras. (Velarde, s/f) Para verificar este supuesto generalmente se utiliza el estadístico de (Durbin & Watson, 1951) el cual proporciona información sobre el grado de independencia que existe entre los residuos para ello se calcula el estadístico:

$$DW = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i - U_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n U_i^2} \approx 2(1 - \rho) \quad (6)$$

Las hipótesis a contrastar son:

Ho: No existe autocorrelación, y H1: Existe autocorrelación (Lind et al., 2014)

Homocedasticidad: Se emplea para nombrar la propiedad de algunos modelos de regresión lineal donde los errores de estimación son constantes a lo largo de las observaciones. Lo que a su vez nos permite disponer de modelos más fiables. (J. López, 2017) Para ello se utiliza la prueba de **Breusch- Pagan** propuesta por (Breush & Pagan, 1979) y consiste en ajustar un modelo de regresión lineal con variable respuesta dada por residuales del modelo original al cuadrado e_i^2 , y como covariables las variables del modelo original.

El estadístico es:

$$LM = nR^2 \sim \chi^2_k \quad (7)$$

Las hipótesis a contrastar son:

Ho: Existe homocedasticidad, y H1: Existe heterocedasticidad (P. Moreno et al., 2015)

Estadístico F

La prueba de significancia de la regresión nos sirve para determinar si existe una relación lineal entre la respuesta Y y cualquiera de las variables regresoras x_1, x_2, \dots, x_k . Este procedimiento suele considerarse como una prueba general o global del ajuste del modelo. (Aparicio et al., 2013)

En todo modelo de regresión vamos a tener una variabilidad Total (SS_T), una variabilidad explicada por el modelo de Regresión (SS_R) y una variabilidad Residual (SS_{Res}) que no logra ser explicada por el modelo, de modo que:

$$SS_T = SS_R + SS_{Res} \quad (8)$$

Donde:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

La suma de cuadrados total es la suma de la suma de los cuadrados de la regresión y del residuo.

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

La suma de los cuadrados de la regresión es la suma de las diferencias al cuadrado entre los valores estimados o pronosticados, \hat{Y}_i , y la media general de Y.

$$SS_{Res} = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

La suma de los cuadrados del residuo es la suma de las diferencias al cuadrado entre los valores observados de la variable dependiente Y, y sus valores estimados o pronosticados correspondientes \hat{Y}_i . (Lind et al., 2014)

La finalidad de esta prueba es determinar si la variabilidad explicada por la regresión (SS_R) es una parte considerable de la variabilidad total (SS_T) o no. Para ello se

construye la tabla ANOVA (analysis of variance) tal como se muestra en la tabla 2.

(Fernández, 2011)

Tabla 2

Tabla ANOVA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F
Regresión	SS_R	k	$\frac{SS_R}{k}$	$F = \frac{SS_R/k}{SS_R/n - k - 1}$
Residual	SS_{Res}	n-k-1	$\frac{SS_R}{n - k - 1}$	
Total	SS_T	n-1		

Nota. Recuperado de (Fernández, 2011)

La tabla ANOVA proporciona el estadístico F, el cual tiene un valor asociado p que en el caso de ser menor al nivel de significancia se rechaza la hipótesis nula H0: ninguno de los regresores contribuye en forma significativa y se acepta la hipótesis alternativa H1: al menos uno de los regresores contribuye al modelo en forma significativa. (Vilà Baños et al., 2019)

Coefficiente de Determinación

Como ocurre en los modelos lineales simples, R^2 (coeficiente de determinación) es un cuantificador de la bondad de ajuste del modelo. Se define como el porcentaje de varianza que tiene la variable Y la cual se explica mediante el modelo de regresión (Morales, 2011).

En los modelos lineales múltiples, cuantos más predictores se incluyan en el modelo mayor es el valor de R^2 , ya que, por poco que sea, cada predictor va a explicar una parte de la variabilidad observada en Y. Es por esto que R^2 no puede utilizarse para comparar modelos con distinto número de predictores.

R^2 ajustado introduce una penalización al valor de R^2 por cada predictor que se introduce en el modelo. El valor de la penalización depende del número de predictores utilizados y del tamaño de la muestra, es decir, del número de grados de libertad. R^2 ajustado permite encontrar el mejor modelo, aquel que consigue explicar mejor la variabilidad de Y con el menor número de predictores (Amat, 2016).

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\frac{SS_R}{n-k-1}}{\frac{SS_T}{n-1}} \quad (9)$$

Estadístico T

La prueba “t” de student es utilizada para medir la significancia estadística de los parámetros del modelo. Para ello se establece la hipótesis nula H_0 : El coeficiente es igual a cero frente a la hipótesis alternativa H_1 : el coeficiente es diferente de cero, se acepta la hipótesis nula H_0 cuando: (Fernández, 2011)

$$t = \frac{\hat{\beta}_1}{S_r \sqrt{q_{i+1,i+1}}} \leq t_{\frac{\alpha}{2}; n-k-1}$$

Estadístico	Estadístico
experimental	teórico

Base Legal

Constitución de la República del Ecuador

Art. 411.- El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua,

y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

Ley Orgánica De Recursos Hídricos, Usos Y Aprovechamiento Del Agua

Art.-4 Principios de la ley

b) El agua, como recurso natural debe ser conservada y protegida mediante una gestión sostenible y sustentable, que garantice su permanencia y calidad.

Art.-79 Objetivos de prevención y conservación del agua

f) Garantizar la conservación integral y cuidado de las fuentes de agua delimitadas y el equilibrio del ciclo hidrológico.

Art. 84.- Obligaciones de corresponsabilidad

d) Contribuir al análisis y estudio de la calidad y disponibilidad del agua

i) Desarrollar y fomentar la formación, la investigación científica y tecnológica en el ámbito hídrico.

Capítulo III

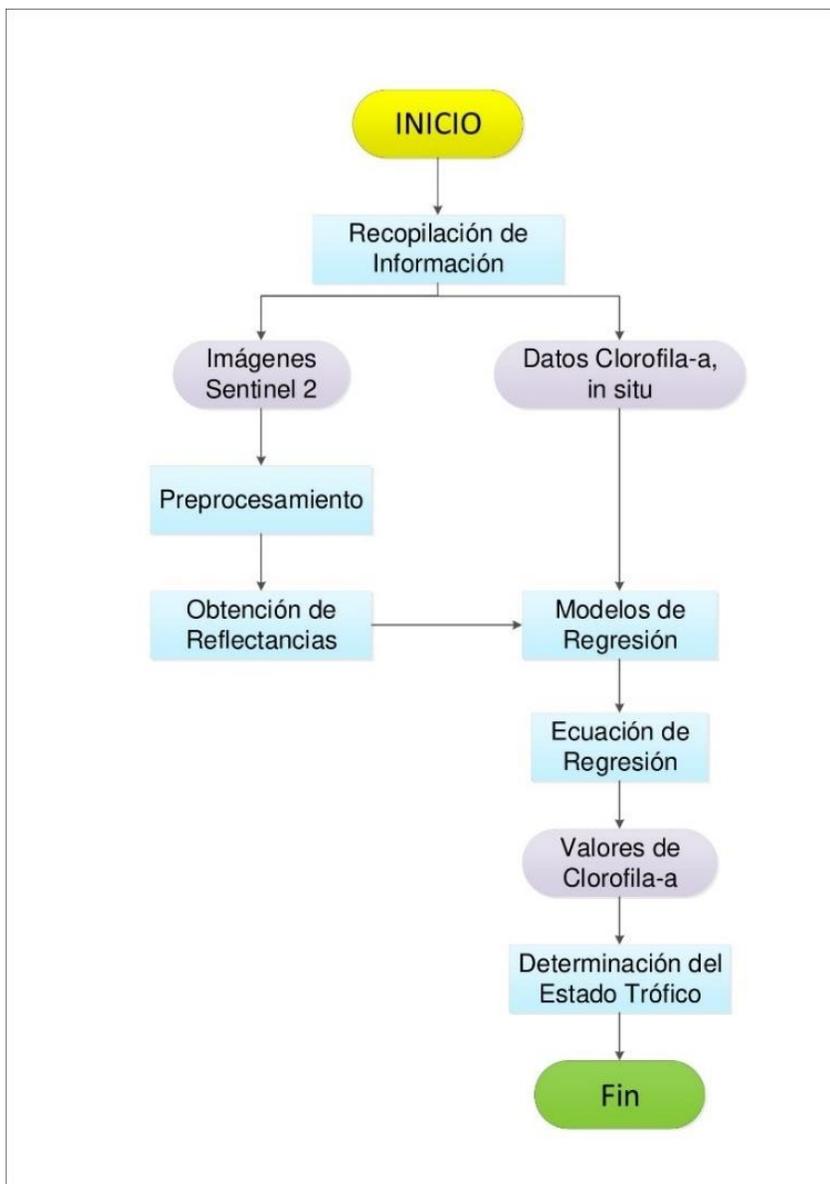
Metodología

El presente capítulo explica la metodología que será empleada para el desarrollo de la investigación, la misma que abarca los métodos utilizados en la recopilación de la información, la elaboración de la base de datos con la información recolectada, el preprocesamiento realizado a las imágenes satelitales, y los recortes espectrales para la extracción de los valores de reflectancia. A continuación, se determinará un modelo de regresión que será posteriormente validado, el cual permitirá determinar los coeficientes con los que se establecerá la ecuación de regresión.

Posteriormente, la ecuación de regresión previamente determinada será utilizada para estimar la concentración de clorofila-a en cada uno de los píxeles que forman las imágenes del satélite Sentinel-2 de la Laguna de Yambo; Finalmente se utilizará la media del valor de concentración de clorofila-a para determinar el Estado Trófico utilizando la ecuación de Carlson modificada por Aizaki para los años 2017 y 2020. En este contexto la metodología para el presente estudio se resume en el siguiente esquema (ver figura 6).

Figura 6

Esquema de la metodología para el proyecto



Nota. En la figura se detalla la metodología seguida para la elaboración del proyecto de investigación

Recopilación de Información

Búsqueda de datos in-situ de clorofila-a tomados en estudios previos

Se realizó la búsqueda de información primaria, principalmente en bases de datos de diferentes Universidades y fuentes científicas certificadas, relacionada con la temática del estudio del estado trófico en la Laguna de Yambo, para ello en primer lugar

se realizó una búsqueda en la plataforma de Google Scholar en la cual se utilizaron como palabras clave para la búsqueda: estado trófico y laguna de Yambo. Se obtuvieron un total de 32 resultados en diferentes bases de datos científicas y repositorios. Posteriormente se procedió a revisar cada uno de los trabajos en los cuales se buscó principalmente que presentaran información de la concentración de clorofila-a en la laguna de Yambo, la cual haya sido determinada mediante el análisis de muestras in-situ con sus respectivas coordenadas en los puntos de muestreo.

Búsqueda y descarga de Imágenes Satelitales

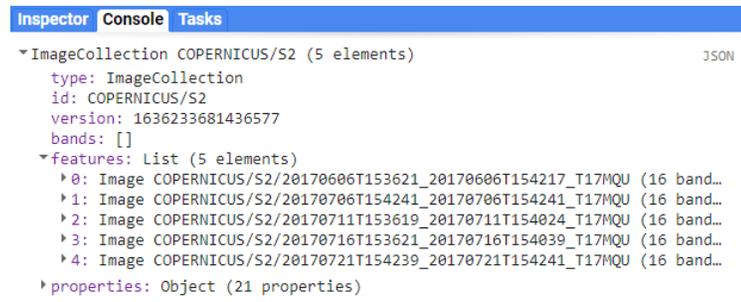
Una vez obtenidos los datos in-situ de clorofila-a, se procede a realizar la búsqueda de las imágenes satelitales tomando como condición la fecha de toma de los datos, para ello la búsqueda se la realiza en la plataforma de Google earth engine a través de un script que permite obtener una lista de imágenes con condiciones de baja nubosidad, que cubran el área de estudio y que sean cercanas a las fechas de toma de datos in-situ, a continuación, se presenta el script utilizado.

```
//Realizamos una llamada a la colección de imágenes de Sentinel 2
var ColeccionSentinel = ee.ImageCollection ('COPERNICUS/S2')
//Filtramos la totalidad de imágenes por fecha
// geometría del área de estudio
//% de nubes máximo
. filterDate ('2017-05-31' , '2017-06-15')
. filterBounds (geometry)
. filterMetadata ('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 50);
//Imprimimos la lista de imágenes disponibles en la pestaña de Console
print (ColeccionSentinel);
```

Al ejecutar el script anterior se obtiene una lista de las imágenes que cumplen con las condiciones que se colocaron (Ver figura 7).

Figura 7

Lista de imágenes obtenida en Google Earth Engine



Nota. Lista de imágenes obtenidas mostradas en la interfaz Google Earth Engine

Sin embargo, es necesario realizar una visualización de cada una de ellas para determinar la imagen adecuada que cubra completamente el área de la laguna y que además sea lo más cercana posible a la fecha de toma de los datos in-situ de clorofila. Para lo cual se utiliza el script que se presenta a continuación.

```
//Llamamos a la imagen satélite específica añadiendo su ID de la colección de imágenes
```

```
var ImagenSentinel = ee.Image
('COPERNICUS/S2/20170527T154241_20170527T154244_T17MQU');
```

```
//Recortamos la totalidad de la imagen al área de estudio
```

```
var SentinelClip = ImagenSentinel.clip (geometry);
```

```
print (SentinelClip);
```

```
//Añadimos la imagen a la vista haciendo una composición de colores y
asignando un nombre de etiqueta en la vista
```

```
Map.addLayer (SentinelClip, {
```

```
max: 4000,
```

```

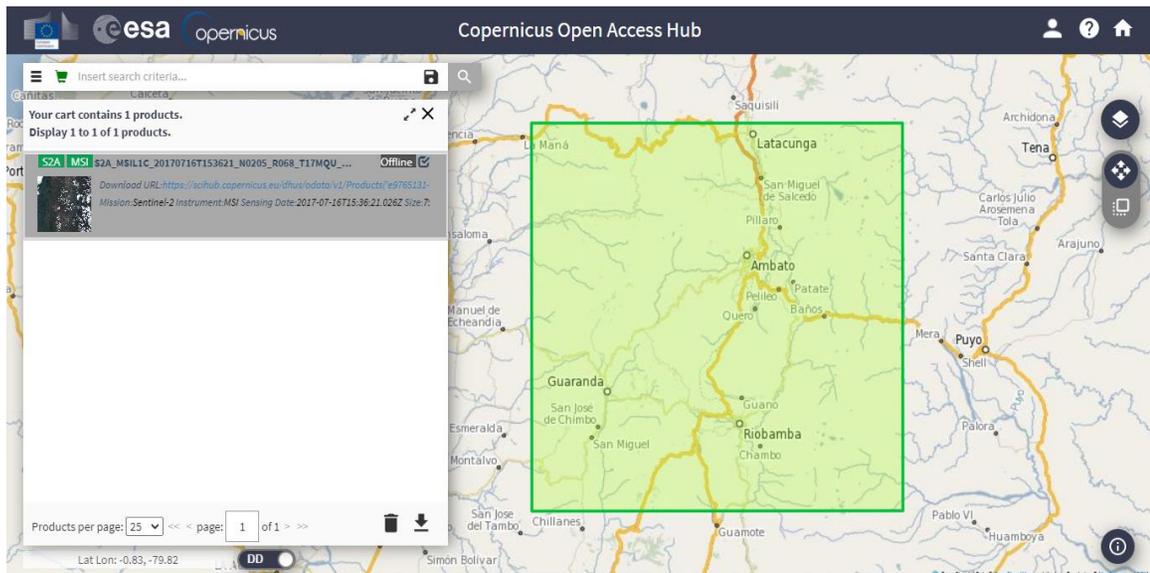
min: 0.0,
gamma: 1.0,
bands: ['B4','B3','B2'],
'Sentinel');

```

Una vez que se ha determinado la imagen a utilizar se toma la fecha de la misma y en la plataforma Copernicus Open Access Hub se realiza la descarga de la imagen satelital Sentinel-2 del año 2017 y 2020 respectivamente, como se observa en la figura 8.

Figura 8

Descarga de Imágenes Satelitales Sentinel-2



Nota. En la figura se muestra interfaz que se genera en la plataforma Copernicus previa la descarga de las imágenes satelitales Sentinel-2

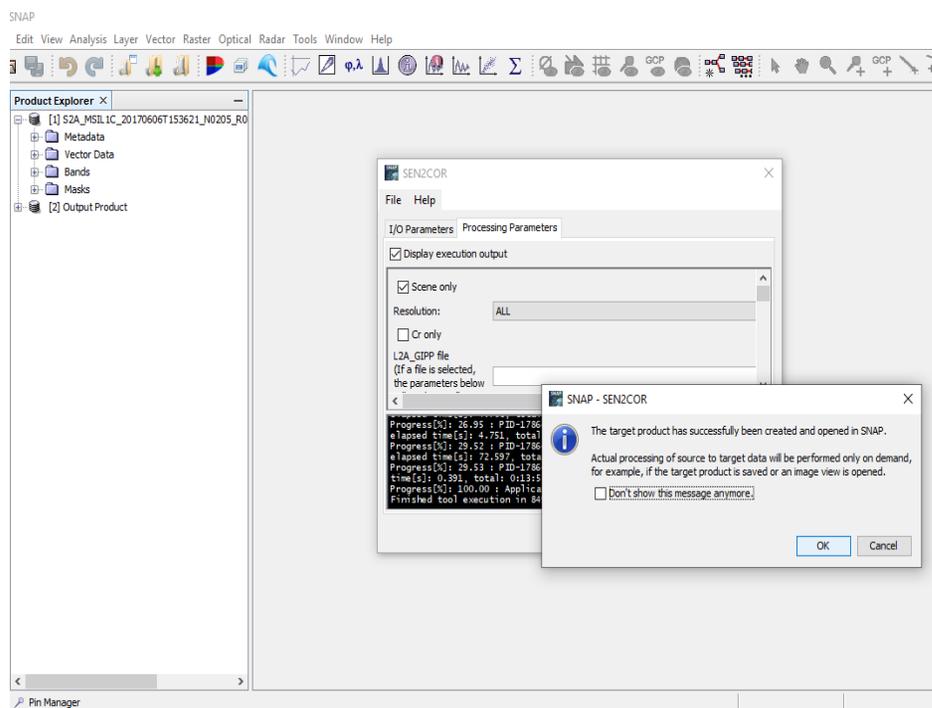
Procesamiento de Imágenes

Los productos de imágenes del satélite S2 a nivel 1C de procesado, tienen datos de reflectancias en el techo de la atmósfera (TOA Top Of Atmosphere). Es necesario

entonces realizar la corrección atmosférica de estas imágenes. Esta corrección se realizó mediante la herramienta Sen2Cor del software SNAP 8.0 como se evidencia en la figura 9.

Figura 9

Corrección Atmosférica realizada en el software SNAP 8.0

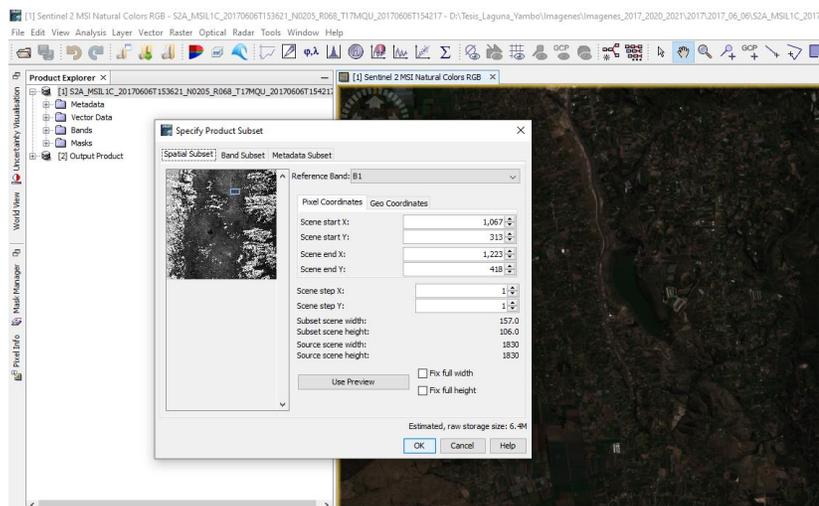


Nota. En la Figura se muestra la interfaz del software Snap 8.0 durante la corrección atmosférica utilizando a la herramienta Sen2Cor.

Una vez realizada la corrección atmosférica se obtiene una imagen satelital Sentinel 2 Nivel 2A, a la cual se le realizó un recorte espacial utilizando la herramienta spatial subset para obtener únicamente al área de estudio, y finalmente se aplicó un remuestreo a 10 m utilizando la herramienta resampling como se muestra en las figuras 10 y 11 para posteriormente realizar la extracción individual de las bandas.

Figura 10

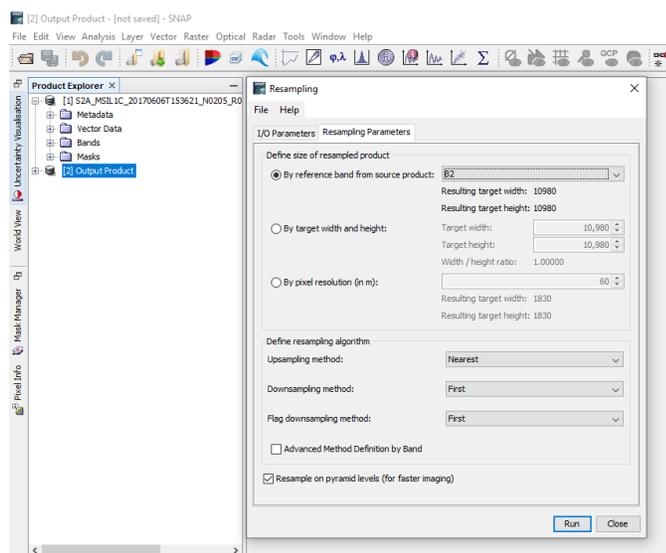
Recorte espacial al área de estudio realizado en el software SNAP 8.0



Nota. En la figura se indica la interfaz del software Snap 8.0 al utilizar la herramienta Spatial Subset

Figura 11

Remuestreo a 10 metros realizado en el software SNAP 8.0



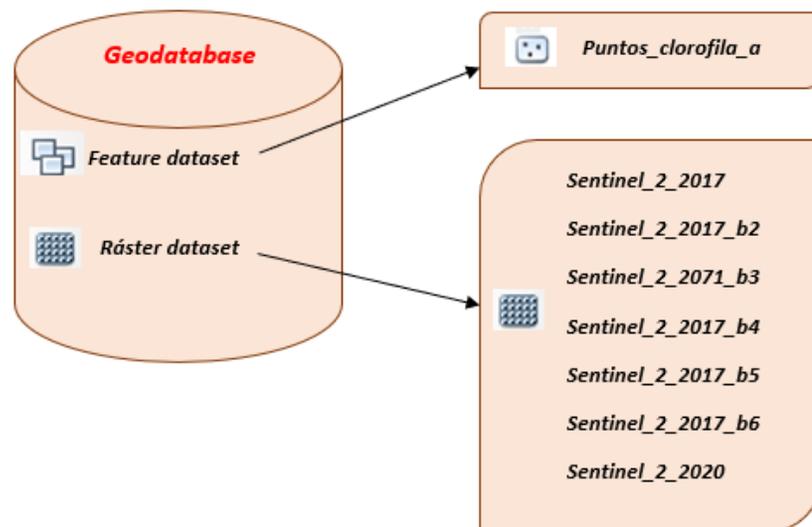
Nota. En la figura se indica la interfaz del software Snap 8.0 al utilizar la herramienta Resampling.

Generación de la Geodatabase

Una vez que se ha finalizado la recopilación de la información se procede a la estructuración de la Geodatabase para facilitar la organización de los datos geográficos recopilados y para su posterior análisis. (Figura 12)

Figura 12

Estructura de la Geodatabase “Datos_Yambo”



Nota. En la figura se muestra la estructura de la Geodatabase generada en el software ArcGIS.

Estimación de la concentración de Clorofila-a

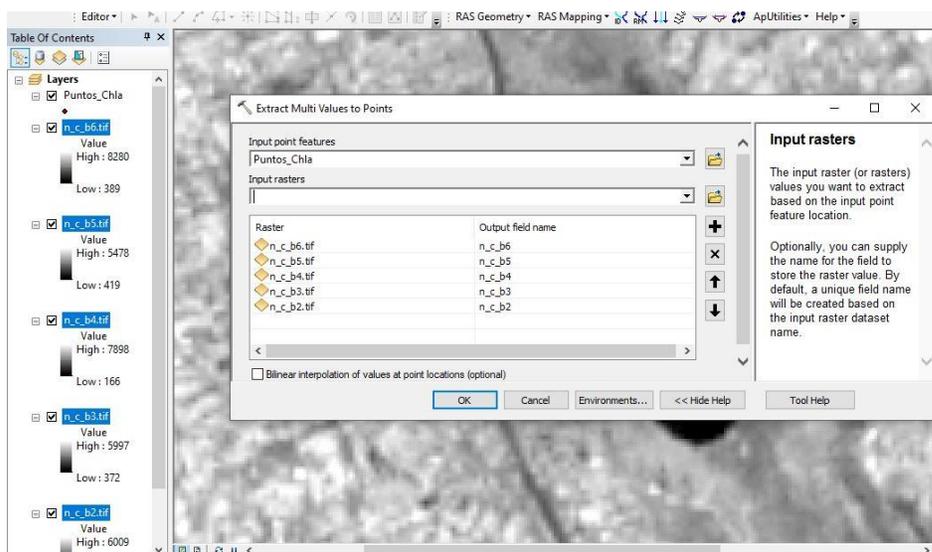
Extracción de reflectancias

Una vez que las imágenes han sido procesadas se realizó un recorte espectral a las bandas b2,b3,b4,b5 y b6 en el software SNAP 8.0 , posteriormente al disponer de todas las bandas separadas individualmente, estas se cargan en el software ArcGIS, en el cual también se cargan los puntos con sus respectivas coordenadas, los cuales se

obtuvieron del estudio realizado por (Toapanta, 2017), a continuación se utilizó la herramienta Extract Multivalues to Point que permite extraer los valores de reflectancias de las bandas espectrales a los puntos georeferenciados (Ver figura 13).

Figura 13

Extracción de los valores de reflectancia



Nota. La figura muestra el uso de la herramienta Extract Multivalues to points para obtener las reflectancias de la imagen satelital en los puntos georeferenciados.

Desarrollo de la Ecuación de Regresión

Al contar con los valores de concentración de clorofila-a georeferenciados, estos se relacionaron con los valores de reflectancia de las bandas de Sentinel-2 que se extrajeron para dichos puntos. En primer lugar se realizó un matriz de correlación para poder evidenciar las bandas que cuentan con una mayor correlación basándose en el cálculo del coeficiente de Pearson, sin embargo es necesario también contar con información teórica antes de escoger las bandas que serán utilizadas en el modelo de regresión ya que las concentraciones de clorofila-a en el agua producen un incremento de absorbancia en las bandas azul y roja (bandas 2 y 4 de Sentinel-2) y un incremento

de la reflectancia en las bandas del verde e infrarrojo que corresponden a las bandas b3, b5 y b6 de Sentinel-2, de acuerdo con (Ogashawara et al., 2017).

Calibración

Los valores de reflectancia de cada banda fueron relacionados con los datos in situ de clorofila-a, y se calibró inicialmente un modelo lineal múltiple general que contenía las bandas seleccionadas en base al coeficiente de correlación y aquellas bandas que se encuentran dentro del espectro de reflectividad de la clorofila-a como variables predictoras.

El siguiente paso consistió en simplificar el modelo general hasta obtener el modelo con el menor número de variables predictoras (bandas) manteniendo o mejorando el grado de explicación de la variabilidad observada en la variable dependiente, mediante el coeficiente de determinación ajustado que se obtuvo para cada modelo, Este coeficiente toma valores entre 0 y 100%, donde 0% indica que las variables exploratorias no explican la variabilidad observada en la variable de respuesta mientras que el 100% indica que las variables independientes explican en su totalidad la variabilidad observada en la variable de respuesta (Perdomo Vanegas, 2015)

Validación

Prueba F de significancia general

Se utilizó la prueba F de la significación general para probar si la regresión lineal múltiple es significativa para ello se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ el modelo no es significativo
- Hipótesis alternativa: $H_1: \text{al menos un } \beta_i \neq 0$ el modelo es significativo

Si el valor P para la prueba F de la prueba de significancia general es menor que el nivel de significancia 0.05, se rechaza la hipótesis nula. (Fernández, 2011)

Prueba t de significancia individual

Para comprobar la funcionalidad predictiva de cada variable explicativa por separado. Al igual que la prueba F, la prueba T analiza si los coeficientes de regresión del modelo son significativamente diferentes a cero. Para ello se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula $H_0: \beta_i = 0$ Xi no influye en Y
- Hipótesis alternativa $H_1: \beta_i \neq 0$ Xi influye en Y

Cada índice estadístico T presenta un valor P asociado, que indica la importancia de la variable explicativa. Al igual que los valores P de la prueba F, el valor P de cada prueba T debería ser menor a 0,05 para rechazar la hipótesis nula (Fernández, 2011).

Verificación de Supuestos

Linealidad

Para comprobar este supuesto se construyó un gráfico donde se relacionan los valores de reflectancia con los valores del parámetro estudiado, con el fin de reconocer la tendencia lineal.

Multicolinealidad

Para verificar este supuesto se realizó una matriz de correlación entre las variables explicativas donde se podrá comprobar si existe una multicolinealidad perfecta donde el coeficiente de correlación entre dos variables es igual a 1, por lo tanto, el sistema de ecuaciones normales tiene infinitas soluciones y no es posible generar un modelo de regresión. (UCM, 2013)

Independencia

Este supuesto se verificó mediante el estadístico de Durbin-Watson para el cual se establecieron las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H_0): No Existe correlación en los residuales de la regresión

- Hipótesis Alternativa (H_1): Existe correlación en los residuales de la regresión

Se comprueba que si $p > 0.05$ se rechaza la hipótesis alternativa y por lo tanto no existe correlación. (Fernández, 2011)

Homocedasticidad

Este supuesto se comprobó por medio de la prueba de Heterocedasticidad de Breusch-Pagan en la cual:

- Hipótesis Nula (H_0): los residuos son homocedásticos
- Hipótesis alternativa (H_1): los residuos son heterocedásticos

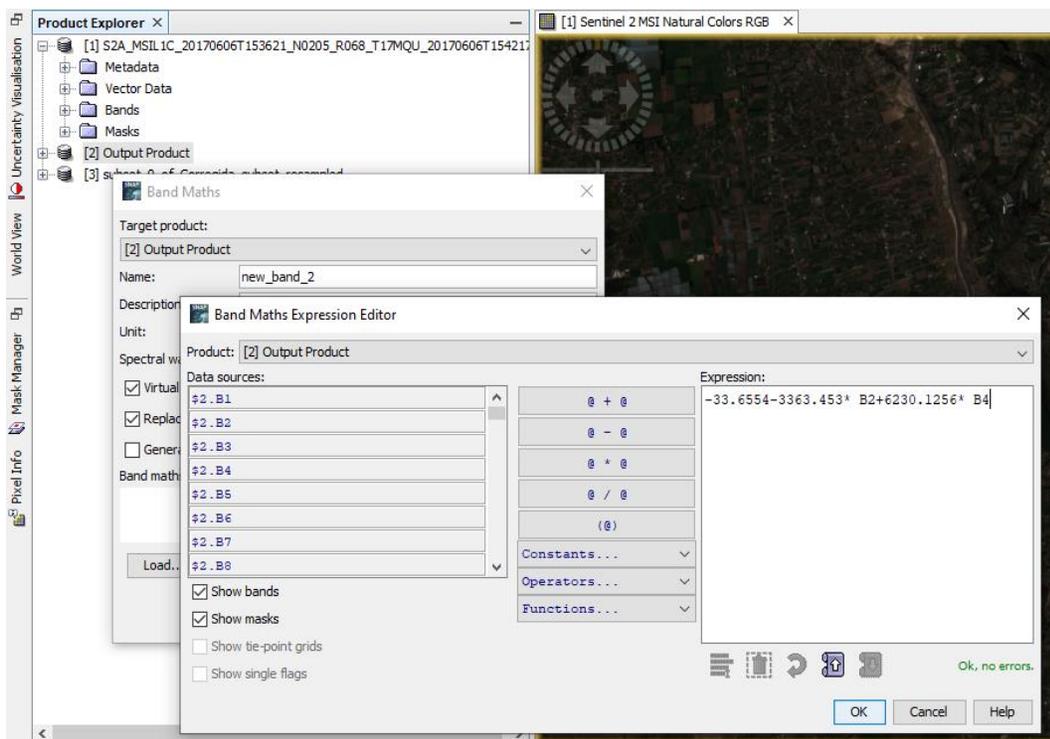
Se comprueba que si $p > 0.05$ se acepta la hipótesis nula y por lo tanto los residuos presentan homocedasticidad. (UVIGO, s/f)

Generación de Mapas de Clorofila-a

Una vez que se ha determinado la ecuación de regresión con sus respectivos coeficientes se realiza la estimación de la concentración de clorofila-a para los años 2017 y 2020 en el software SNAP 8.0 mediante la utilización de la herramienta Band Math, como se puede observar en la figura 14.

Figura 14

Estimación de la concentración de clorofila-a



Nota. En la figura se indica la interfaz del software Snap 8.0 al utilizar la herramienta Band Math para obtener los valores estimados de concentración de clorofila-a, utilizando la ecuación de regresión múltiple previamente determinada.

Identificación de valores atípicos en la estimación de la concentración de clorofila-a

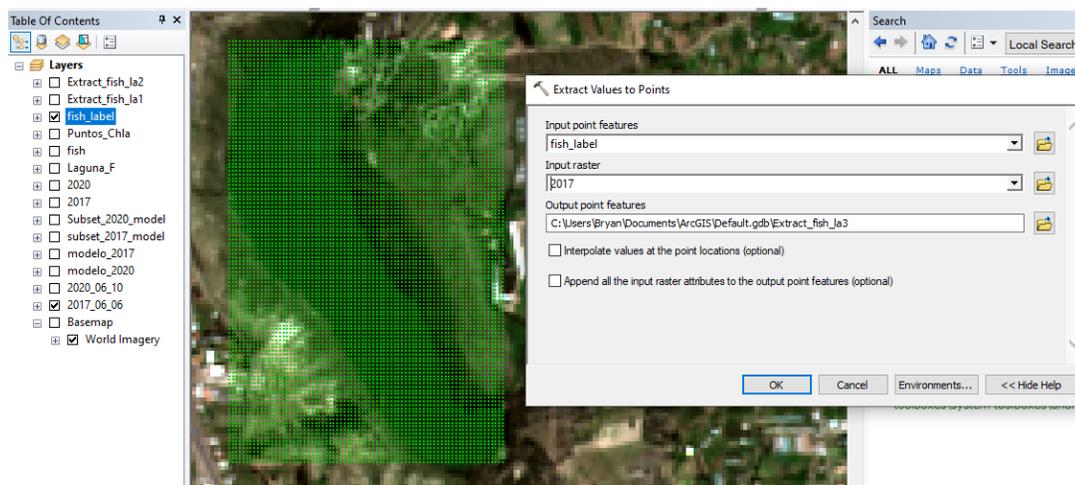
Una vez que se estimaron los valores de concentración de clorofila-a fue necesario identificar los valores atípicos generados en este proceso, para ello se creó una red de puntos cada 10 m utilizando el comando fishnet en el software ArcGIS, y posteriormente se extrajeron los valores de concentración de clorofila-a estimados en estos puntos utilizando la herramienta Extract values to points como se muestra en las figuras 15.

Posteriormente los valores extraídos se trasladaron a una hoja de cálculo de Excel, para generar una tabla que se exportó al software RStudio para la determinación del diagrama de cajas y bigotes y de esa forma lograr la identificación de los valores

atípicos asignando el diagrama de caja a una variable, de la cual se obtiene una lista con los valores.

Figura 15

Extracción de valores estimados de clorofila-a

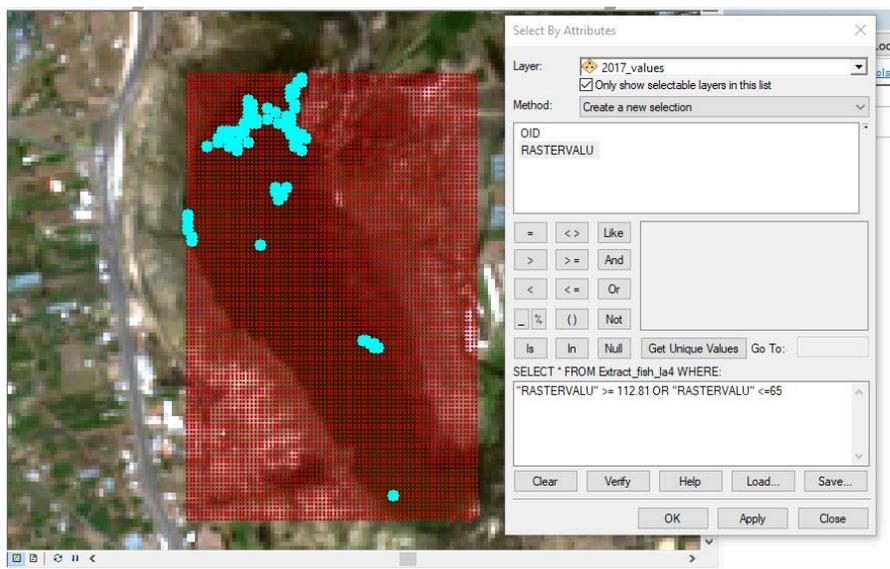


Nota. En la figura muestra la malla de puntos creada para la extracción de los valores de clorofila-a y la utilización del comando Extract values to points.

Con el objeto de visualizar espacialmente los valores atípicos determinados en el software RStudio, estos fueron identificados mediante la utilización de la herramienta Select by Attributes, donde se seleccionaron los valores atípicos tanto para el año 2017 y 2020 como se muestra en las figuras 16 y 17.

Figura 16

Identificación espacial de valores atípicos año 2017



Nota. La figura muestra la utilización de la herramienta Select by Attributes para la identificación espacial de los valores atípicos.

Figura 17

Identificación espacial de valores atípicos año 2020



Nota. La figura muestra la utilización de la herramienta Select by Attributes para la identificación espacial de los valores atípicos.

Mapas de concentración de clorofila-a corregidos

Una vez que se identificaron los valores atípicos de clorófila-a generados durante la estimación, se procedió a colocar estos valores como null mediante la utilización del software SNAP 8.0, y se procedió a generar los mapas corregidos de concentración de clorófila-a.

Estadística Descriptiva de la concentración de Clorofila-a

Luego de estimar la concentración de clorófila-a en la totalidad espacial de la laguna se extrajeron cada uno de los valores para calcular la estadística descriptiva y los histogramas de frecuencia, de la estadística descriptiva previamente determinada se utilizó la media de concentración de clorofila-a para que será posteriormente utilizada para determinar el estado trófico de la laguna de Yambo,

Determinación del Estado trófico

Una vez calculada la estadística descriptiva se utiliza la media de concentración de clorófila-a en la ecuación (1) para determinar el estado trófico de la laguna.

$$TSI (Clorofila - a) = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln Cl_a}{\ln 2,5} \right) \quad (1)$$

Tabla 3

Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua de Carlson modificado por Aizaki.

Estado de eutrofia	TSI	Clorofila-a (mg/m ³)
Oligotrófico (TSI<30)	0	0,04
	10	0,012
	20	0,34
	30	0,94

Mesotrófico (30<TSI<60)	40	2,6
	50	6,4
	60	20
Eutrófico (60<TSI<90)	70	56
	80	154
	90	427
Hipertrófico (90<TSI<100)	100	1183

Nota: La tabla muestra los valores del Índice de estado trófico (TSI) los cuales están asociados a diferentes valores de concentración de clorofila-a y con los que se determina el estado de eutrofia de los cuerpos de agua.

Capítulo IV

Resultados

Información Recopilada

Datos de clorofila-a

Producto del proceso de la búsqueda de información sobre estudios relacionados con el estado trófico de la laguna de Yambo, se determinó que el trabajo realizado por (Toapanta, 2017) era el único que contenía información georreferenciada de muestras tomadas en campo para el parámetro de clorofila-a el cual fue determinado en 5 puntos de la Laguna de Yambo en dos campañas de muestreo, en la tabla 4 se pueden observar los valores de clorofila-a obtenidos en este estudio así como sus coordenadas y las fechas en las que fueron tomadas.

Tabla 4

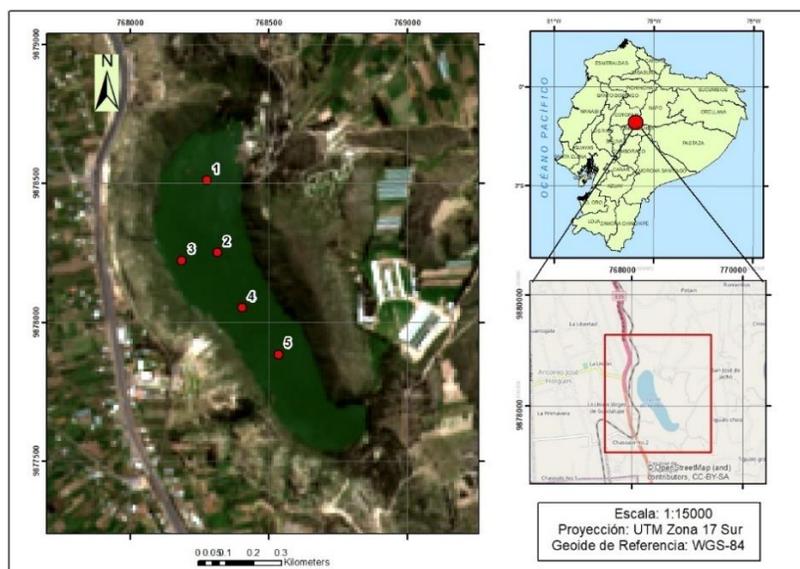
Valores de clorofila-a (mg/m^3) determinados en el estudio de (Toapanta, 2017)

Punto	E	N	10/5/2017	31/5/2017	MEDIA
1	768277	9878511	94,34	97,01	95,68
2	768315	9878250	89	83,66	86,33
3	768187	9878221	93,45	98,79	96,121
4	768405	9878051	88,11	84,55	86,33
5	768536	9877883	84,55	83,66	84,55

Nota. Recuperado de (Toapanta 2017)

Figura 18

Ubicación de los puntos de muestreo



Nota. Puntos de muestreo tomados por (Toapanta, 2017)

Imágenes Satelitales Sentinel-2 utilizadas

Una vez que se determinaron los valores de clorofila-a y sus respectivas fechas de muestreo, se realizó una búsqueda en la plataforma google earth engine, de la cual se determinó que la imagen Sentinel-2 con fecha de toma 6 de junio de 2017 es la más cercana a la fecha de toma de muestras del 31 de mayo de 2017, ya que tiene 6 días de diferencia, además que no presenta nubosidad en la totalidad espacial de la laguna lo cual favorece el posterior análisis; Por otro lado, para la determinación del estado trófico en el año 2020 se utilizó la imagen del 10 de Junio del 2020 ya que no muestra nubosidad y se encuentra en una fecha cercana al muestreo del año 2017. En la tabla 5 se presentan las características y fechas de las imágenes Sentinel-2 que se utilizaron en este trabajo.

Tabla 5

Características de las imágenes Sentinel-2

Fecha de toma	6/6/2017	10/6/2020
ID	COPERNICUS/S2/20170606T1 53621_20170606T154217_T17	COPERNICUS/S2/20200610T15 3631_20200610T154258_T17M
Cobertura de	MQU	QU
Nubes	23,87%	42,12%
Plataforma	Sentinel-2a	Sentinel-2b
Dirección de		
Orbita	Descendente	Descendente

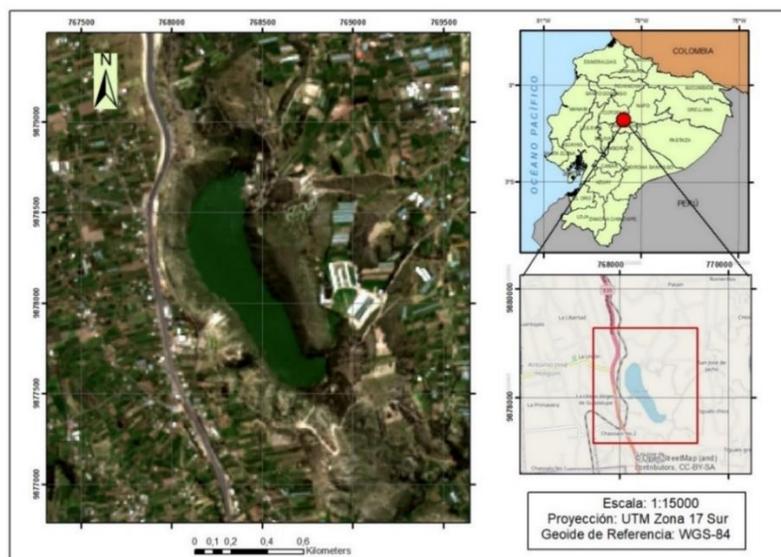
Nota. La tabla muestra las ciertas características de las imágenes Sentinel que se utilizaron para la elaboración de este proyecto de investigación.

Imágenes Sentinel-2 Procesadas

Una vez que se realizó la descarga de las imágenes, se procedió a realizar el corte, resamplado y corrección atmosférica de las mismas, utilizando el software SNAP 8.0, obteniéndose las imágenes procesadas que se muestran en las figuras 19 y 20:

Figura 19

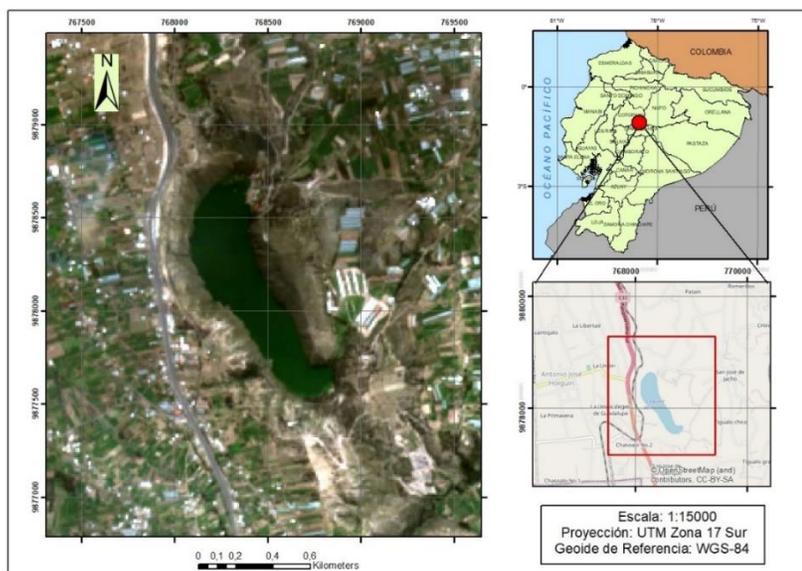
Imagen Sentinel-2 procesada correspondiente a la fecha 6-6-2017



Nota. La figura muestra el resultado de el procesamiento realizado a la imagen satelital sentinel-2 en el software Snap 8.0.

Figura 20

Imagen Sentinel-2 procesada correspondiente a la fecha 10-6-2020



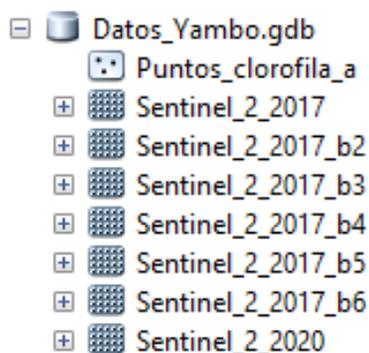
Nota. La figura muestra el resultado de el procesamiento realizado a la imagen satelital sentinel-2 en el software Snap 8.0.

Geodatabase

Luego de determinar las imágenes a utilizar, así como los puntos con sus respectivas coordenadas se elaboró una Geodatabase en el software ArcGIS en donde se añadieron los puntos georeferenciados de clorofila-a dentro de la categoría de feature dataset y las imágenes satelitales procesadas dentro de la categoría de raster dataset al igual que las bandas extraídas, como se muestra en la figura 21:

Figura 21

Geodatabase con información georreferenciada de clorofila-a e imágenes satelitales procesadas de la Laguna de Yambo



Nota. (Autor, 2021)

Valores de reflectancia

Una vez procesadas las imágenes se procedió a extraer las reflectancias de las bandas de la imagen Sentinel 2 correspondientes a la fecha del 6-6-2017, a los puntos georeferenciados que almacenan la concentración de clorofila-a, obteniéndose una tabla que contiene los puntos georeferenciados con la concentración de clorofila-a y los respectivos valores de las reflectancias de las bandas (ver Tabla 6).

Tabla 6

Valores de las reflectancias extraídas a los puntos georeferenciados

Chl-a	b2	b3	b4	b5	b6
97,01	0,0145	0,0579	0,0288	0,0767	0,0321
83,66	0,0084	0,0535	0,0233	0,0762	0,0281
98,79	0,0075	0,0542	0,0253	0,0783	0,0295
84,55	0,0076	0,0514	0,023	0,0769	0,0268
83,66	0,008	0,0546	0,0233	0,0777	0,0305

Nota. En la tabla se detallan los valores de las reflectancias extraídas de las bandas b2,b3,b4,b5 y b6 a los puntos georeferenciados que tienen un determinado valor de concentración de clorofila-a

Ecuación de Regresión Lineal Múltiple

Posteriormente a la extracción de las bandas se realizó una matriz y gráfico de correlación en la cual se calcula el coeficiente de correlación de Pearson en el software RStudio utilizando el comando `cor(x,y)` de la librería (lmtest) (Horthon et al., 2020) , utilizando como datos las reflectancias de las bandas b2, b3, b4, b5 y b6 junto con las concentraciones de clorofila-a, el resultado de este proceso se puede observar en la tabla 7 y la figura 22.

Tabla 7

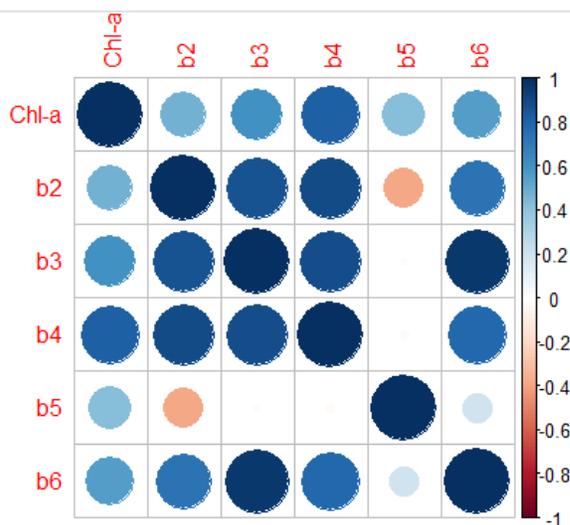
Matriz de Correlación

	Chl-a	b2	b3	b4	b5	b6
Chl-a	1					
b2	0,4762	1				
b3	0,6013	0,8613	1			
b4	0,8137	0,8976	0,8829	1		
b5	0,4242	-0,3851	-0,0109	-0,0210	1	
b6	0,5578	0,7332	0,9616	0,7851	0,2020	1

Nota. La tabla muestra los valores del coeficiente de correlación de Pearson calculados para la concentración de clorofila-a y las bandas espectrales.

Figura 22

Matriz Grafica de Correlación



Nota. En la gráfica de correlación se puede visualizar en tonos azules oscuros los valores del coeficiente de correlación de Pearson más altos y positivos, mientras que aquellos más bajos y negativos se encuentran representados por tonos rojos,

Una vez analizada la matriz y la gráfica de correlación se puede evidenciar que existe una correlación positiva entre las bandas espectrales y la concentración de clorofila-a, además se puede observar que el coeficiente de Pearson entre la banda 4 y la concentración de clorofila-a posee un valor de 0.8137 lo cual indica una relación positiva alta, mientras que el coeficiente de Pearson entre la banda 5 y la concentración de clorofila-a presenta un valor de 0.4253 siendo este el más bajo, además se puede observar que esta banda presenta coeficientes de Pearson negativos y bajos con respecto al resto de bandas, es por ello que no se consideró la banda 5 para la elaboración de la ecuación de regresión múltiple general.

Analizados los coeficientes de Pearson entre las bandas espectrales y la concentración de clorofila-a se procede a determinar una primera ecuación de regresión lineal múltiple general utilizando las bandas 2,3,4 y 6 en el software RStudio utilizando el comando `lm` (linear model) de la librería `lmtest`, la cual posteriormente se fue simplificando hasta encontrar un modelo que presente un coeficiente de correlación ajustado elevado, y con la cual se procede a realizar la validación de la ecuación.

Cabe recalcar que el proceso de validación se realizó con múltiples modelos en los cuales se desarrollaron diferentes tipos de relaciones entre las bandas 2,3,4 y 6 y no únicamente con aquel que presentaba un elevado coeficiente de correlación ajustado, siendo el modelo que se presenta en la figura 23 aquel que cuenta con un coeficiente de correlación ajustado alto, así también cumple con la validación tanto de la prueba de significancia general, como la individual y la verificación de los supuestos.

Figura 23

Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para la estimación de la concentración de clorofila-a.

```

Call:
lm(formula = clorofila ~ b2 + b4)

Residuals:
    1      2      3      4      5 
0.007991  0.406619  0.049260  0.474894 -0.938763

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -33.656      6.769  -4.972  0.03815 *
b2            -3363.453    303.491 -11.083  0.00804 **
b4             6230.126    369.948  16.841  0.00351 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7983 on 2 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9946,    Adjusted R-squared:  0.9892 
F-statistic: 183.7 on 2 and 2 DF,  p-value: 0.005414

```

Nota. La figura muestra el resumen del resultado obtenido al aplicar el comando `lm` para de la librería `lmtest` (Horthon et al., 2020) la generación de la ecuación de regresión lineal múltiple en el software R-studio.

El modelo presentado consta de dos variables explicativas que en este caso son las bandas 2 y 4 de la imagen satelital Sentinel 2, esto debido a que la clorofila-a absorbe la luz fuertemente en longitudes de onda que se encuentran en el azul (cerca de 440 nm) y roja (cerca de 670 nm) (Matthews, 2017), por lo cual estas bandas han sido ampliamente utilizadas en diferentes estudios como en el de (Bellido, 2019), en el cual se utilizan junto con la banda 3 de color verde para establecer modelos de regresión lineal múltiple para el cálculo de la concentración de clorofila-a con imágenes satelitales Sentinel-2, también en trabajos como en el de (Grendaité et al., 2018) se han utilizado junto con las bandas 5 y 6 del sensor Sentinel 2 para desarrollar ecuaciones empíricas que permitan la estimación de la concentración de la clorofila-a en lagos eutróficos de Lituania y en el de (Pantoja et al., 2021) donde igualmente se utilizan ecuaciones empíricas desarrolladas sobre la base de la utilización de la banda 4, para determinar el estado trófico del lago Zirahuén en el Salvador, basado en la estimación de la concentración de clorofila-a.

Es por ello que se puede observar que este modelo tiene un coeficiente de correlación ajustado elevado con un valor de 0.9892 lo cual indica que las variables independientes, en este caso las bandas 2 y 4 tienen un elevado grado de explicación de la variabilidad observada en la variable de respuesta que es la concentración de clorofila-a.

Validación

Para la validación de la ecuación de regresión múltiple se utilizó el software RStudio el cual nos muestra los valores de probabilidad que serán utilizados para la prueba F de significancia general, y para la prueba T de significancia individual, como se puede observar en la 24.

Figura 24

Probabilidades para la prueba de significancia general e individual.

```
Call:
lm(formula = clorofila ~ b2 + b4)

Residuals:
    1      2      3      4      5 
0.007991 0.406619 0.049260 0.474894 -0.938763

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -33.656      6.769  -4.972  0.03815 *
b2           -3363.453    303.491 -11.083  0.00804 **
b4            6230.126    369.948  16.841  0.00351 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7983 on 2 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9946,    Adjusted R-squared:  0.9892 
F-statistic: 183.7 on 2 and 2 DF,    p-value: 0.005414
```

Nota. Resumen del modelo de regresión lineal múltiple, donde se señalan las probabilidades para la prueba de significancia general e individual.

Prueba F de significancia general

Se utilizó la prueba F de la significación general para probar si la regresión lineal múltiple es significativa para ello se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ el modelo no es significativo
- Hipótesis alternativa: $H_1: \text{al menos un } \beta_i \neq 0$ el modelo es significativo

Dado que se obtuvo un valor p de 0.0054 y este es menor que 0.05 considerando un nivel de significancia del 95 %, se rechaza la hipótesis nula y por lo tanto se determinó que existe relación lineal significativa entre la variable dependiente y el conjunto de variables independientes.

Prueba t de significancia individual

Para comprobar la funcionalidad predictiva de cada variable explicativa por separado se utilizó la prueba T la cual analiza si los coeficientes de regresión del modelo son significativamente diferentes a cero. Para ello se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula $H_0: \beta_i = 0$ Xi no influye en Y
- Hipótesis alternativa $H_1: \beta_i \neq 0$ Xi influye en Y

El valor de probabilidad para el intercepto fue de 0.03815, para la variable 1 correspondiente a la banda 2 fue de 0.00804 y para la variable 2 correspondiente a la banda 4 tomo un valor de 0.00351, con lo cual teniendo en cuenta un nivel de significancia del 95% se rechaza la hipótesis nula ya que el valor de probabilidad en los 3 casos es menor que 0.05 y por lo tanto cada una de variables y el intercepto influyen de manera significativa en la variable de respuesta.

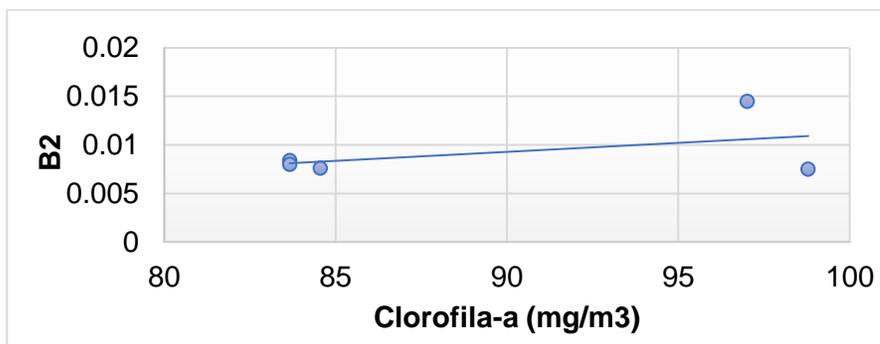
Verificación de Supuestos

Linealidad

Para comprobar este supuesto se construyeron gráficos donde se relacionan los valores de reflectancia de las bandas 2 y 4 que fueron consideradas para el modelo final, con los valores del parámetro estudiado, con el fin de reconocer la tendencia lineal como se puede observar en las figuras 25 y 26.

Figura 25

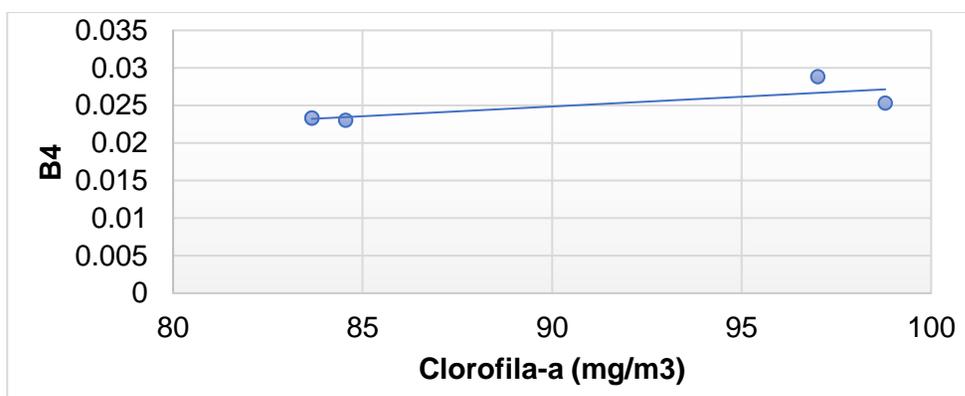
Gráfico de dispersión entre los valores reflectancias de la banda 2 y la concentración de clorófila-a



Nota. La figura muestra el grafico de dispersion y una linea de tendencia lineal.

Figura 26

Gráfico de dispersión entre los valores reflectancias de la banda 4 y la concentración de clorófila-a



Nota. La figura muestra el grafico de dispersion y una linea de tendencia lineal.

Como se puede evidenciar en las figuras 21 y 22 la concentración de clorofila a presenta una relación lineal con las bandas 2 y 4, es por ello que el modelo que se determinó fue basado en estas relaciones previamente establecidas.

Multicolinealidad

Para verificar este supuesto se realizó una matriz de correlación en el software R, mediante la utilización del comando `cor(x,y)` utilizando las variables explicativas donde se podrá comprobar si existe una multicolinealidad perfecta.

Tabla 8

Matriz de Correlación entre las variables explicativas

	Chl-a	b2	b4
Chl-a	1		
b2	0,4762	1	
b4	0,8137	0,8976	1

Como se puede observar en la tabla 8 el valor del coeficiente de correlación de Pearson entre la banda b2 y b4 es de 0.8137 lo cual indica que presenta una relación perfecta o casi perfecta donde es difícil separar el efecto de cada una de las variables independientes sobre la variable dependiente como menciona (Gómez, 2012).

Independencia

Este supuesto se verificó mediante el estadístico de Durbin-Watson el cual fue determinado en el software RStudio mediante la utilización del comando `dwtest` como se puede observar en la figura 27 para el cual se establecieron las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H_0): No Existe correlación en los residuales de la regresión
- Hipótesis Alternativa (H_1): Existe correlación en los residuales de la regresión

Figura 27

Determinación del estadístico Durbin-Watson

```
> dwtest(Reg5)
      Durbin-watson test
data:  Reg5
DW = 1.9348, p-value = 0.4737
```

Nota. La figura muestra el valor de probabilidad obtenido para el estadístico de Durbin-Watson el software RStudio,

Se determino un valor de probabilidad de 0.4737 para la prueba de Durbin Watson, en consecuencia, a un nivel de significancia del 95%, este valor es mayor que 0.05 por ello se acepta la Hipótesis Nula y se establece que no existe correlación en los residuales de la regresión.

Homocedasticidad

Este supuesto se comprobó utilizando la prueba de Heterocedasticidad de Breusch-Pagan, el valor de probabilidad de esta prueba se determinó en el software RStudio utilizando el comando `bptest` como se observa en la figura 28, y se establecieron las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H_0): los residuos son homocedásticos
- Hipótesis alternativa (H_1): los residuos son heterocedásticos

Figura 28

Determinación del valor de probabilidad de la prueba de Breusch-Pagan

```
> bptest(Reg5)
      studentized Breusch-Pagan test
data:  Reg5
BP = 1.7897, df = 2, p-value = 0.4087
```

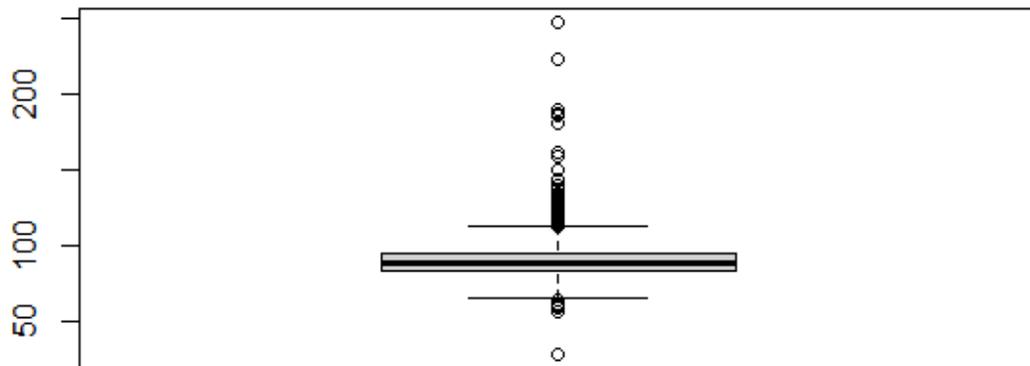
Nota. La figura muestra el valor de probabilidad obtenido para el estadístico de Breusch-Pagan el software RStudio.

Se comprueba que el valor de probabilidad es de 0.4087, por lo tanto, a un nivel de significancia del 95%, este valor es mayor que 0.05, se acepta entonces la hipótesis nula y se determina que los residuos son homocedásticos, es decir que la varianza de los errores es constante (Batista et al., 2016).

Identificación de Valores atípicos en la estimación de la concentración de clorofila-a años 2017 y 2020

Figura 29

Diagrama de Caja de la concentración de clorofila-a año 2017



Nota. La figura muestra el diagrama de caja generado en el software Rstudio a partir de los valores de clorofila-a estimados.

El diagrama de caja nos da muestra de que existen varios valores atípicos. Por un lado, existen valores muy alejados de los límites superior e inferior, mientras que otros se encuentran mucho más cerca, con lo cual se procedió a obtener estos valores en el software RStudio valores que se muestran en la figura 30, para posteriormente identificarlos espacialmente en el software ArcGIS y verificar el comportamiento de estos valores como se indica en la figura 31.

Figura 30

Valores atípicos

```

Sout
[1] 247.05696 223.10313 189.36519 187.61099 186.18091 180.40195 162.04793 158.98337
[9] 150.39800 144.03024 140.39151 137.60139 134.80721 134.28763 133.21343 131.22957
[17] 129.80438 129.62437 129.04373 128.84502 127.72115 126.60870 126.05081 125.84804
[25] 125.78696 125.17944 124.94976 124.90415 124.88135 124.45297 124.26975 124.19319
[33] 124.07835 123.97900 123.91793 123.34460 121.84285 121.71986 121.55209 121.46416
[41] 120.75317 120.66929 120.44372 119.96973 119.88179 119.84349 119.71726 119.52996
[49] 119.50715 119.46970 119.41187 119.27424 118.76931 118.54781 118.49811 118.41017
[57] 118.39875 117.87511 117.77168 117.18286 116.72845 116.49146 116.35789 116.31554
[65] 116.11682 115.90671 115.37164 115.36025 115.11186 114.97015 114.96285 114.79831
[73] 114.65662 114.63381 114.62241 114.61101 114.46931 114.31294 114.25919 113.97660
[81] 113.78521 113.59058 113.30391 113.20047 112.97896 112.90242 112.82993 112.81853
[89] 64.22272 64.09649 61.78036 61.06206 59.18894 56.12356 28.93252

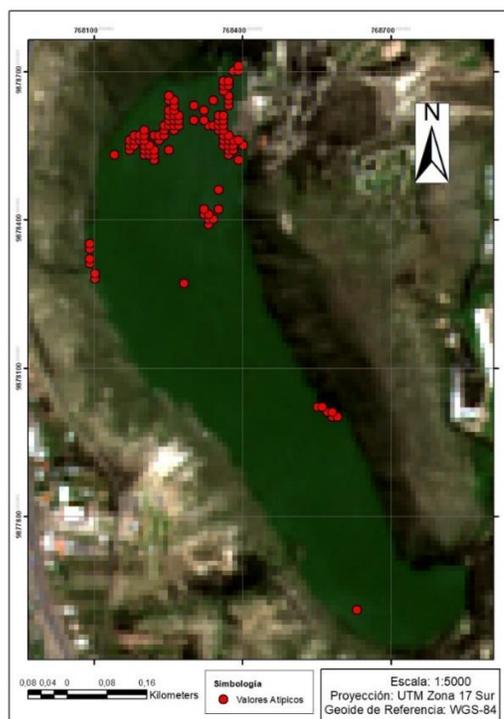
```

Nota. La figura muestra los valores atípicos que se obtuvieron en el software Rstudio

Como se muestra en la figura 30 existen un total de 106 valores atípicos, siendo la mayor cantidad de valores aquellos que se encuentran por encima del límite superior.

Figura 31

Ubicación de valores atípicos 2017



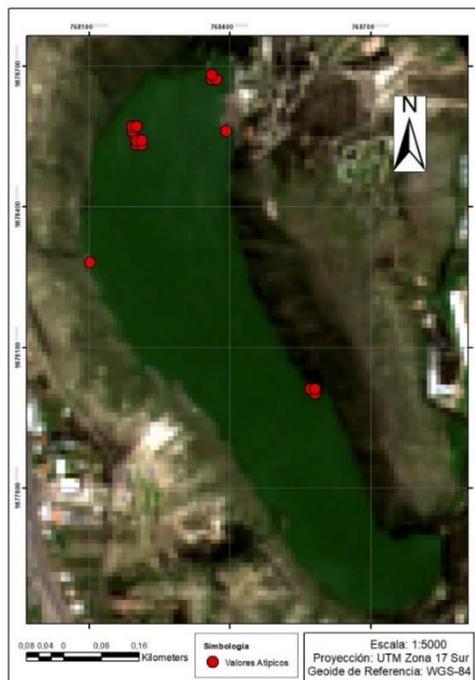
Nota. La figura muestra aquellos valores determinados como atípicos en el software R y su ubicación dentro de la laguna.

El análisis espacial de los valores atípicos determinados en el software RStudio mostró que no todos pueden ser considerados como tal, ya que la mayoría pertenece a

la variabilidad espacial que presenta la concentración de clorofila-a en la laguna, es por ello que estos valores no se encuentran muy alejados del límite inferior o superior en el diagrama de caja, por otro lado aquellos valores muy distanciados de la mediana y que no presentaban una continuidad con los demás valores se identificaron como valores atípicos, considerando aquellos mayores de 138 (mg/m^3) y menores que 61 (mg/m^3), obteniéndose un total de 15 puntos mostrados en la figura 32, los cuales se encuentran distribuidos por lo general en la zona más cercana a donde se desarrolla la actividad antrópica y en los bordes de la laguna donde por lo general existen vegetación acuática, en ambos casos los valores de las reflectancias varían y esto genera valores de concentración de clorofila-a estimados muy elevados o muy bajos.

Figura 32

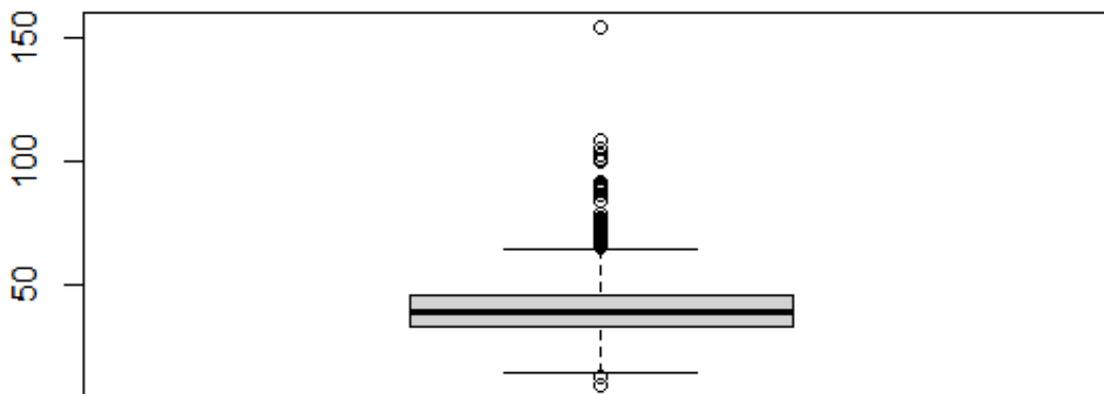
Ubicación de Valores atípicos corregidos 2017



Nota. La figura muestra aquellos valores determinados como atípicos luego del análisis espacial.

Figura 33

Diagrama de Caja de la concentración de clorofila-a año 2020



Nota. La figura muestra el diagrama de caja generado en el software Rstudio a partir de los valores de clorofila-a estimados.

El diagrama de caja muestra la existencia de valores atípicos los cuales tienen que ser analizados espacialmente para verificar su comportamiento, para ello se determinaron estos valores, los cuales se muestran en la figura 34.

Figura 34

Valores atípicos

```

$out
 [1] 154.556290 108.678131 108.429733 105.666504 105.016602 103.124763 100.858307
 [8] 100.269501 99.941307 91.910545 91.264732 90.657196 90.618912 90.064308
[15] 89.185577 88.768600 88.118721 86.341713 84.231613 78.712448 77.493294
[22] 77.432220 76.946838 76.445992 76.400383 76.346634 76.281479 76.010284
[29] 75.547707 75.100609 74.917366 74.852211 74.488991 74.305756 73.931137
[36] 73.556511 73.308128 73.204689 73.159088 72.199730 72.058022 72.008347
[43] 71.687477 71.167892 71.136940 71.087257 70.701248 70.193062 70.127899
[50] 70.051346 70.051346 70.051346 70.028557 69.841240 69.841240 69.680801
[57] 69.608330 68.710052 68.556946 68.522728 68.473061 68.358223 68.258865
[64] 68.109833 67.983597 67.949394 67.861450 67.845970 67.739281 67.727890
[71] 67.613052 67.551979 67.161880 67.150475 67.123596 66.714767 66.703369
[78] 66.516068 66.401230 66.378426 66.317352 66.313278 66.267670 66.091759
[85] 65.690269 65.667465 65.656067 65.556709 65.491554 65.407669 65.384865
[92] 65.384865 65.319725 13.357210 9.772242

```

Nota. La figura muestra los valores atípicos que se obtuvieron en el software Rstudio

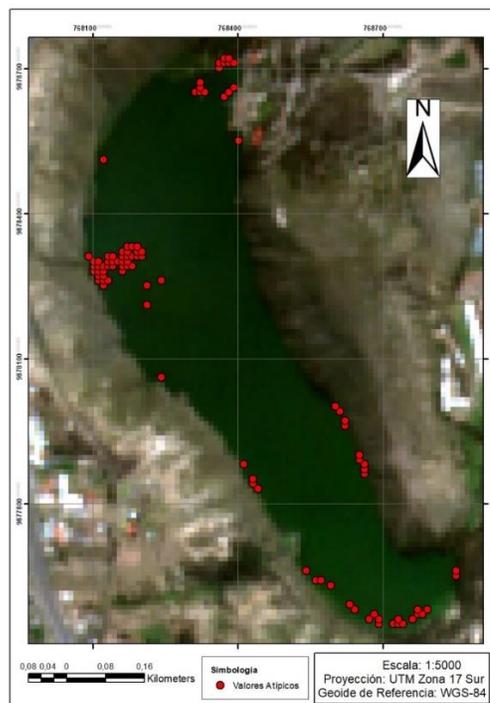
Como se muestra en la figura 34 existen un total de 95 valores atípicos sin embargo se puede identificar que existen valores que no se encuentran muy alejados

de la mediana y otros que si lo estan como el valor de 9.77 (mg/cm³) en el limite inferior y 154.56 (mg/cm³) en el superior.

Una vez obtenidos los valores atípicos en RStudio, se realizó la identificación espacial de los mismos en el software ArcGIS como se muestra en la figura 35.

Figura 35

Ubicación de valores atípicos 2020



Nota. La figura muestra aquellos valores determinados como atípicos en el software R y su ubicación dentro de la laguna.

El análisis espacial de los valores atípicos determinados en el software RStudio mostró que al igual que en el año 2017, no todos pueden ser considerados como tales, ya que la mayoría de estos valores forma parte la variabilidad espacial que presenta la concentración de clorofila-a en la laguna, en consecuencia estos valores no se encuentran muy alejados del límite inferior o superior en el diagrama de caja, por otro lado aquellos valores muy distanciados de la mediana y que no presentan una

continuidad con los demás valores se identificaron como valores atípicos, considerando aquellos mayores de 80 (mg/m^3) y menores que 15 (mg/m^3), obteniéndose un total de 21 puntos mostrados en la figura 36 estos puntos se encuentran distribuidos en la zona lateral izquierda de la laguna y sus bordes, donde existe vegetación acuática que cambia los valores de las reflectancias y esto genera estimaciones de concentración de clorofila-a muy elevadas o muy bajas

Figura 36

Ubicación de valores atípicos corregidos 2020



Nota. La figura muestra aquellos valores determinados como atípicos luego del análisis espacial.

Mapas de estimación de clorofila-a años 2017 y 2020

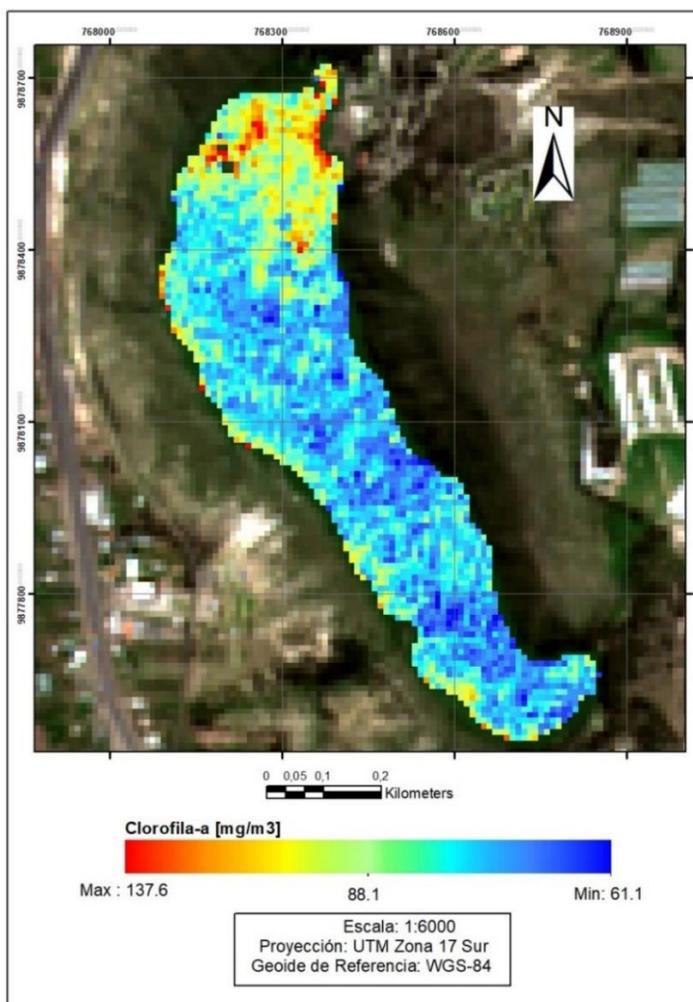
Mapa de la Estimación de concentración de clorofila-a año 2017

Una vez determinados aquellos valores atípicos que pueden distorsionar la interpretación de la distribución de la concentración de clorofila-a en la laguna de

Yambo, se procede generar los mapas para los años 2017 y 2020, los cuales se muestran en las figuras 37 y 38 respectivamente.

Figura 37

Mapa de concentración de clorofila-a corregido año 2017



Nota. La figura muestra la distribución espacial de la concentración de clorofila-a.

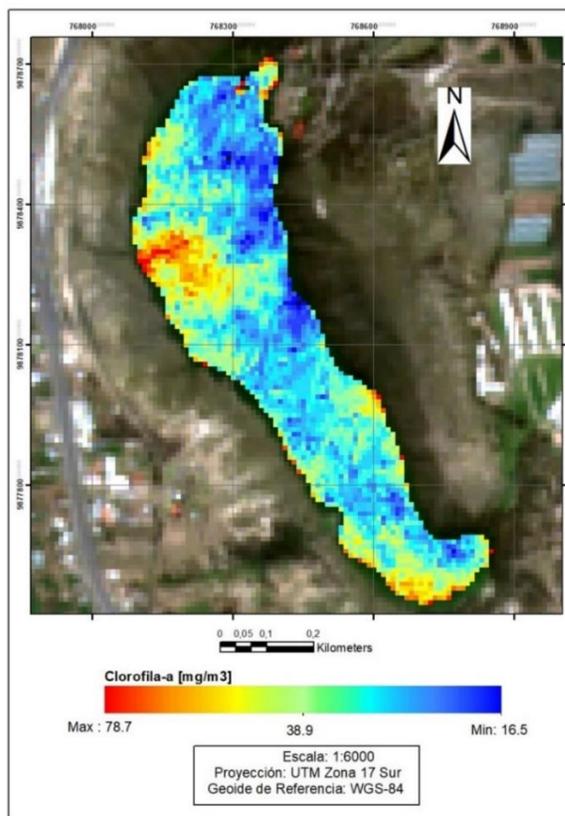
El resultado de la estimación de la concentración de clorofila-a en la totalidad espacial de laguna de Yambo para el año 2017 se puede observar en la figura 37, donde se evidencian una concentración máxima de 137.6 mg/cm^3 y una mínima de 61.1 mg/cm^3 , de igual forma se puede observar que las concentraciones más altas están

especialmente distribuidas en la parte superior de la laguna, donde se desarrollan la mayor cantidad de actividades antrópicas como consecuencia de una elevada actividad turística, además según un estudio realizado por (Burgasí & Cayo, 2016) menciona que una de las fuentes de contaminación de la laguna son las actividades domésticas que se generan en el complejo privado ubicado a un costado de la laguna, ya que los desechos que se generan son arrojados de forma directa hacia la laguna sin ningún tratamiento previo, lo cual eleva el contenido de materia orgánica en la laguna y como consecuencia se evidencian estos valores altos de concentración de clorofila-a.

Mapa de la Estimación de concentración de clorofila-a año 2020

Figura 38

Mapa de concentración de clorofila-a corregido año 2020



Nota. La figura muestra la distribución espacial de la concentración de clorofila-a.

En la figura 38 se muestra el resultado de la estimación de la concentración de clorofila-a del año 2020, donde se puede identificar una concentración máxima de 78.7 mg/cm³ y una mínima de 16.5 mg/cm³, mostrando una clara reducción en la concentración de clorofila-a respecto al año 2017, esto se puede deber a que en el año 2020 como consecuencia de la pandemia del Covid-19, el país implemento medidas que restringían la circulación a partir del primer caso reportado en febrero de 2020 (Guerrero, 2020), llegando incluso a implementarse medidas con toque de queda de 8 hasta 16 horas en marzo del 2020 (Riesgos, 2020) , lo cual redujo la movilidad en todo el país y reduciendo casi totalmente la actividad turística y por ende todas aquellas actividades de carácter antrópico que se realizaban en la laguna de Yambo.

También se puede observar que a diferencia del año 2017 las concentraciones de clorófila-a más elevadas se encuentran en las orillas de la laguna, donde existe la presencia de vegetación acuática y fauna propia de la zona, la cual pudo aumentar por la disminución de actividades antrópicas durante el confinamiento.

Estadística Descriptiva Concentración de clorofila-a años 2017 y 2020

Estadística Descriptiva Concentración de clorofila-a 2017

Tabla 9

Resumen estadístico de la concentración de clorofila-a año 2017

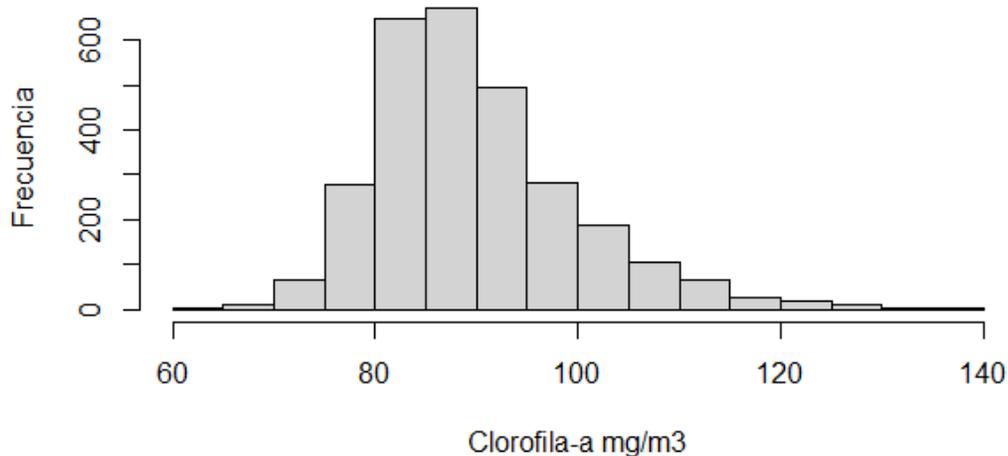
Estadística Descriptiva	
Media	89,78
Mediana	88,11
Desviación estándar	9,91
Mínimo	61,06
Máximo	137,60

Nota. La tabla indica las estadísticas descriptivas principales de la concentración de clorofila-a.

En la tabla 9 podemos ver que la media de concentración de clorofila-a para el año 2017 es de 89.78 mg/m³, el cual es un valor muy cercano al valor obtenido por (Toapanta, 2017) el cual fue de 89.71 mg/m³, además las estimaciones obtenidas con la ecuación de regresión lineal múltiple presentan una desviación estándar de 9.91 con un valor máximo de 137.6 mg/m³ y un valor mínimo de 61.06 mg/m³. Por último se evidencia que los valores de la media y la mediana son muy cercanos, lo cual indicaría que los datos siguen una distribución normal

Figura 39

Histograma de frecuencias Concentración de clorofila-a año 2017



Nota. La figura muestra el gráfico de frecuencias de los valores de concentración de clorofila-a

La figura 39 muestra el histograma de frecuencias para la estimación de clorofila-a del año 2017 donde se muestra que existe una mayor frecuencia de los valores de concentración que varían desde los 80 mg/m³ hasta 100 mg/m³, con una ligera tendencia hacia la izquierda.

Estadística Descriptiva Concentración de clorofila-a 2020

Tabla 10

Resumen estadístico de la concentración de clorofila-a año 2020

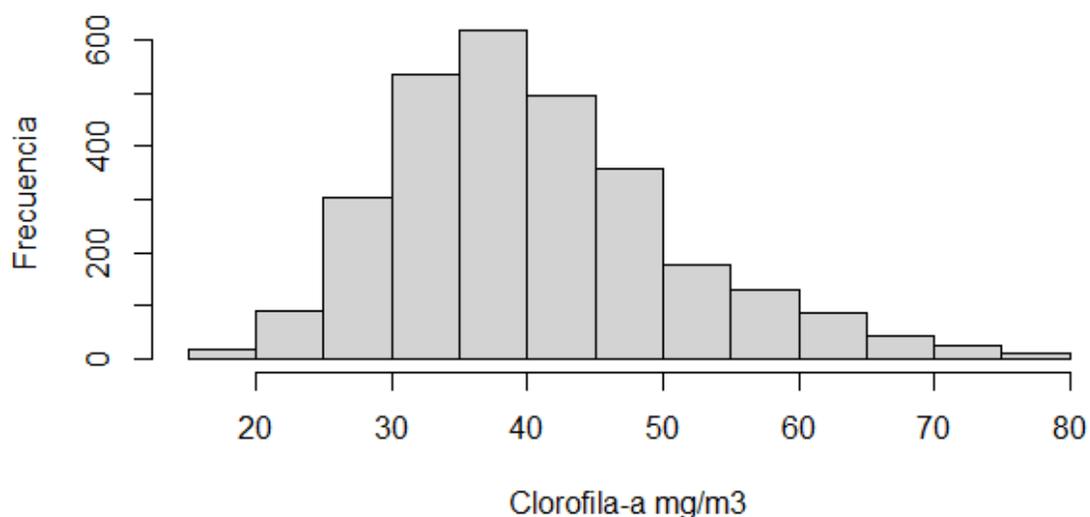
Estadística Descriptiva	
Media	40,37
Mediana	38,90
Desviación estándar	10,45
Mínimo	16,47
Máximo	78,71

Nota. La tabla indica las estadísticas descriptivas principales de la concentración de clorofila-a.

En la tabla 10 podemos ver que la media de concentración de clorofila-a para el año 2020 es de 40.37 mg/m³, además las estimaciones obtenidas con la ecuación de regresión lineal múltiple presentan una desviación estándar de 10.45 con un valor máximo de 137.6 mg/m³ y un valor mínimo de 61.06 mg/m³. Finalmente se evidencia que los valores de la media y la mediana son muy cercanos, lo cual indicaría al igual que las estimaciones del año 2020 que los datos siguen una distribución normal

Figura 40

Histograma de frecuencias Concentración de clorofila-a año 2020



Nota. La figura muestra el grafico de frecuencias de los valores de concentracion de clorofila-a

La figura 40 muestra el histograma de frecuencias para la estimación de clorofila-a del año 2020, donde se observa que existe una mayor frecuencia de los valores de concentración que varían desde los 30 mg/m³ hasta los 50 mg/m³, con una ligera tendencia hacia la izquierda.

Determinación del Estado trófico años 2017 y 2020

Determinación del Estado trófico año 2017

Una vez que se determinó la media de concentración de clorofila-a con un valor de 89.78 mg/m³, este se utiliza en la ecuación (1) para determinar el Índice de estado trófico:

$$TSI (Clorofila - a) = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln Cl_a}{\ln 2,5} \right) \quad (1)$$

$$TSI (Clorofila - a) = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln 89,78}{\ln 2,5} \right)$$

$$TSI (Clorofila - a) = 73,68$$

El valor del índice de estado trófico de 73.38 determinado para el año 2020 concuerda con el valor obtenido por (Toapanta, 2017) de 89.71 mg/m³, este valor determina las aguas de la laguna de Yambo se encuentra en estado eutrófico según la escala de valores del estado trófico en los cuerpo de agua de Carlson modificada por aizaki

Determinación del Estado trófico año 2020

Una vez que se determinó la media de concentración de clorofila-a con un valor de 89.78 mg/m³, este se utiliza en la ecuación (1) para determinar el Índice de estado trófico:

$$TSI (Clorofila - a) = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln Cl_a}{\ln 2,5} \right) \quad (1)$$

$$TSI (Clorofila - a) = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln 40.38}{\ln 2,5} \right)$$

$$TSI (Clorofila - a) = 64.96$$

El valor del índice de estado trófico de 64.96 determinado para el año 2020 es menor que para año 2017, sin embargo, este valor determina igualmente que las aguas de la laguna de Yambo se encuentra en estado eutrófico según la escala de valores del estado trófico en los cuerpo de agua de Carlson modificada por Aizaki, con lo cual se demuestra que a pesar de existir una clara disminución en la concentración de clorofila para el año 2020 esto no influyo para que el estado trófico cambie respecto al año 2017.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

De la estructuración de la información recopilada se generó una Geodatabase que contiene los valores georeferenciados de concentración de clorofila-a determinados en un estudio del año 2017 a partir de muestreo de campo, las reflectancias y las imágenes satelitales sentinel-2A procesadas de nivel 1C a nivel 2A utilizando el software SNAP Desktop, las mismas que corresponden a las fechas 6 de Junio de 2017 y 10 de Junio de 2020.

A partir de la imagen satelital Sentinel-2 del año 2017 y los valores de concentración de clorofila-a se determinó una ecuación de regresión lineal múltiple, en la cual se utilizaron como variables independientes los valores de reflectancia de las bandas 2 y 4 para estimar el valor de concentración de clorofila-a en la laguna, para este modelo se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado elevado con un valor de 0.9892.

Para la validación del modelo se utilizaron las pruebas F de significancia general y t de significancia individual, donde se plantearon las hipótesis nula y alternativa, y se evaluaron utilizando un nivel de significancia del 95%, obteniéndose en ambos casos valores de probabilidad menores a 0.05 demostrando así la validez del modelo.

Se realizó también la validación de los supuestos para un modelo de regresión, en donde se determinó que existe relación lineal de la concentración de clorofila-a y las bandas 2 y 4; Para evidenciar que no exista multicolinealidad se realizó la matriz de correlación entre las variables explicativas, obteniéndose un valor de 0.8137 indicando que no existe relación perfecta o casi perfecta, para el análisis de independencia y homocedasticidad se utilizaron los estadísticos de Durbin-Watson y Breusch-Pagan

respectivamente, se utilizó un nivel de significancia del 95% y se obtuvieron valores de probabilidad mayores a 0.05 en ambos casos con lo cual se determinó que no existe correlación en los residuales de la regresión y que además son homocedásticos.

A partir de la ecuación de regresión lineal múltiple validada, se modeló la distribución espacial de la concentración de clorofila-a para los años 2017 y 2020, para el año 2017 se obtuvo un valor máximo de 137.6 mg/m³ y un mínimo de 61.1 mg/m³, en el mapa generado se evidenció que las mayores concentraciones de clorofila-a se encuentran espacialmente distribuidas en la parte superior de la laguna, como consecuencia de una elevada actividad antrópica que se conforma en su mayoría por una alta actividad turística; Con respecto al año 2020 se registró un valor máximo de concentración de clorofila-a de 78.7 mg/m³ y un valor mínimo de 16.5 mg/m³, claramente estos valores son inferiores al año 2017, esto puede ser consecuencia del confinamiento debido a la pandemia de COVID-19, en donde se implementaron medidas a la restricción de la circulación vehicular y por ende existió una disminución total de las actividades turísticas, en este contexto en el mapa generado para el año 2020 se evidencia que las mayores concentraciones de clorofila se encuentran en las orillas de la laguna donde existe mayor presencia de vegetación y fauna acuática.

En cuanto a la determinación del estado trófico de la laguna de Yambo, se utilizaron las medias de concentración de clorofila-a de los años 2017 y 2020 para ser reemplazados en la ecuación para el cálculo del índice de estado trófico de Carlson modificado por Aizaki, obteniéndose un valor de 73.68 para el año 2017 y de 64.96 para el año 2020, en ambos casos se determina que la Laguna de Yambo se encuentra en un estado eutrófico, llegando a la misma conclusión que el estudio realizado en 2017 por Toapanta, demostrando así la aplicabilidad que tiene la teledetección Satelital en la determinación del estado trófico de los cuerpos de agua.

Recomendaciones

Al momento de trabajar en la determinación de la ecuación de regresión se trabajó con una pequeña cantidad de datos de concentración de clorofila-a, por lo tanto se recomienda realizar un estudio que permita obtener una mayor cantidad de puntos con valores de concentración de clorofila-a tomados en campo en la Laguna de Yambo.

Una vez demostrada la aplicabilidad de la teledetección satelital en la estimación de la concentración de clorofila-a y determinación del estado trófico, se recomienda realizar estudios en los cuales se analicen la estimación de fósforo y transparencia utilizando imágenes satelitales.

Como consecuencia del estado eutrófico que presenta la Laguna de Yambo, se recomienda que se implementen planes de conservación por parte de los organismos correspondientes, que incluyan regulaciones para la correcta gestión de desechos y manejo de descargas, enfocados también en un turismo responsable y sostenible.

Referencias Bibliográficas

- Aizaki, M., Otsuki, A., Fukushima, T., Hosomi, M., & Muraoka, K. (1981). Application of Carlson's trophic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters. *SIL Proceedings, 1922-2010*, 21(1), 675–681.
<https://doi.org/10.1080/03680770.1980.11897067>
- Alva, J. (2010). *ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA RESULTADOS DE CÓDIGOS TERMOHIDRÁULICOS DE MEJOR ESTIMACIÓN*. Instituto Politécnico Nacional.
- Amat, J. (2016). *Introducción a la Regresión Lineal Múltiple*.
https://www.cienciadedatos.net/documentos/25_regresion_lineal_multiple.html
- Aparicio, J., Martínez Mayoral, & Morales, J. (2013). *Modelos Lineales Aplicados en R*.
- Batista, A., Chacón, A., Nuñez, K., Espinoza, O., Valverde, J., & Barrantes, M. (2016). Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal . *Scielo*.
<https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2983>
- Bedón, F., & Pinto, S. (2012). “ *Evaluación De Técnicas De Detección De Análisis Multitemporal De Imágenes Satelitales en el cantón Daule*”.
- Bellido, J. (2019). *ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA CLOROFILA A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA REPRESA AGUADA BLANCA PARA EL AÑO 2017*. UNSA.
- Breush, S., & Pagan, R. (1979). *A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation* . <https://www.jstor.org/stable/1911963>
- Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., & Ramos, S. (2018). *Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/raet.2018.10126>
- Brivio, P. A., Giardino, C., & Zilioli, E. (2001). Validation of satellite data for quality

- assurance in lake monitoring applications. *Science of the Total Environment*, 268(1–3), 3–18. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00693-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00693-8)
- Burgasí, D., & Cayo, T. (2016). *Diagnóstico ambiental del ecosistema de la laguna de yambo, cantón Salcedo, provincia Cotopaxi*.
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13141/1/T-UCE-0012-39.pdf>
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361–369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*.
<http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist. Cart. y Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio - Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=630577>
- Cohen, S., & Coffman, F. (2013). The evolution of anatomic pathology. En *Analytical Cellular Pathology* (Vol. 36, Números 5–6, pp. 117–124). IOS Press.
<https://doi.org/10.3233/ACP-130072>
- Copernicus. (2017). *WATER BODIES MAPPING FROM SPACE*. https://rus-copernicus.eu/portal/wp-content/uploads/library/education/training/HYDR01_WaterBodyMapping.pdf
- Debajni, G. (2015). *Complete information on Lentic and Lotic Aquatic Systems*.
<https://www.preservearticles.com/articles/complete-information-on-lentic-and-lotic-aquatic-systems/21007>
- Díaz, A. (2019). “*CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y BACTERIOLÓGICA DE LAS AGUAS DE LA LAGUNA DE YAMBO DE LA ZONA CENTRAL DEL ECUADOR*”.
- Díaz, A., & Sotomayor, L. (2013). *Evaluación de la eutrofización de la laguna*

Conococha - Ancash a agosto de 2012.

Durbin, J., & Watson, G. S. (1951). Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. II. *Biometrika*, 38(1/2), 159. <https://doi.org/10.2307/2332325>

ESA. (2020). *Sentinel-2 - Missions - Sentinel Online - Sentinel.*

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

Escalante, R., Mayorga, W., & Vergara, J. (2001). *Manual de aplicación del modelo de regresión lineal múltiple con correcciones de especificación, | Libros Eumed.net.*

Escobar, M. (2019). IDENTIFICACION DE REGIONES CONTAMINADAS EN LA SUPERFICIE DEL LAGO VILLARRICA CON BASE EN IMÁGENES SENTINEL EN EL PERIODO 2017-2018. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Número 1).

Fernández, S. (2011). *Regresión Lineal Múltiple Santiago de la Fuente Fernández.*

Ferre, M. (2017). *Modelos de Regresión.* <https://gauss.inf.um.es/feir/40/>

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>

Gallego, L. (2008). *Consecuencias de la multicolinealidad.*

García, I. (2017). *Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota.*

[https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12587/Martinez Garcia Ines.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12587/Martinez%20Garcia%20Ines.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Gómez, R. (2012). *Multicolinealidad.* <https://www.ugr.es/~romansg/material/WebEco/02-Eco/Teoria/tema4.pdf>

Granizo, F. (2011). *El estado trófico de la Laguna de Limoncocha en el período febrero 2010 – enero 2011.* <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/455>

- Grendaitė, D., Stonevičius, E., Karosienė, J., Savadova, K., & Kasperovičienė, J. (2018). Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. *Geologija. Geografija*, 4(1). <https://doi.org/10.6001/GEOL-GEOGR.V4I1.3720>
- Guerrero, S. (2020). CORONAVIRUS IN ECUADOR: AN OPINION FROM THE ACADEMIA. *La Granja* . <https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.10>
- Hernández, J. (2011). *PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES*. <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento Digital de Imágenes - Jaime Hernández 2011.pdf>
- Horthon, T., Zeileis, A., Cummis, C., Millo, G., & Mitchell, D. (2020). *Testing Linear Regression Models*.
- IGN. (2018). *El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial El componente espacio Copernicus Proyecto co-financiado por la Comisión Europea*.
- Karydis, M., Ignatiades, L., & Moschopoulou, N. (1983). An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 16(3), 339–344. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(83\)90151-8](https://doi.org/10.1016/0272-7714(83)90151-8)
- Lim, J., & Choi, M. (2015). Assessment of water quality based on Landsat 8 operational land imager associated with human activities in Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4616-1>
- Limeres, C. (2011). *Regresión lineal simple* .
- Lind, D. A., Marchal, W. G., & Wathen, S. A. (2014). Estadística Aplica a los Negocios Y La Economía. En *Ciencia y Sociedad: Vol. XVI* (15a ed., Número 4).
- López, J. (2017). *Homocedasticidad* . <https://economipedia.com/definiciones/homocedasticidad.html>
- López, M., & Palacios, M. (2015). ESTADO TRÓFICO DE UN LAGO TROPICAL DE

ALTA MONTAÑA: CASO LAGUNA DE LA COCHA. *Ciencia e Ingeniería*

Neogranadina, ISSN-e 0124-8170, Vol. 25, Nº. 2, 2015, 25(2), 3.

<https://doi.org/10.18359/rcin.1430>

Matthews, M. . (2017). Bio-optical Modeling of Phytoplankton Chlorophyll-a. *Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters*, 157–188.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804644-9.00006-9>

Matthews, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in Inland and near-coastal transitional waters. En *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 32, Número 21, pp. 6855–6899). Taylor and Francis Ltd.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>

McDonald, J. (2011). *Regresión Lineal Múltiple*. <http://udel.edu/>

Mendoza, M. (2014). “*Detección por satélite de parámetros limnológicos para evaluar la dinámica espacio-temporal de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía Central Brasileira*”.

Miller, W. (1995). Trophic State Evaluation of Selected Lakes in Grand Teton National Park. *The UW National Parks Service Research Station Annual Reports*, 19, 39–44.

<https://doi.org/10.13001/uwnpsrc.1995.3245>

Molina, G., & Rodrigo, M. (2010). *El modelo de regresión lineal*.

Morales, P. (2011). *Correlación y regresión, simple y múltiple*.

Moreno, D., Quintero, J., & Cuevas, A. (2010). *Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia*.

Moreno, P., Rodríguez, J., & Soberón, A. (2015). *Heterocedasticidad*.

Moreta, J. (2008). *LA EUTROFIZACIÓN DE LOS LAGOS Y SUS CONSECUENCIAS*.

IBARRA 2008. [http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/720/2/06 NUT 099](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/720/2/06%20NUT%20099)

TESIS.pdf

- Moses, W. J., Sterckx, S., Montes, M. J., De Keukelaere, L., & Knaeps, E. (2017). Atmospheric Correction for Inland Waters. *Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters*, 69–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804644-9.00003-3>
- Ogashawara, I., Mishra, D. R., & Gitelson, A. A. (2017). Remote Sensing of Inland Waters: Background and Current State-of-the-Art. *Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters*, 1–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804644-9.00001-X>
- Oña, J., & Tonato, C. (2017). *Determinación Del Estado Trófico De Las Lagunas De Mojanda a Través De La Cuantificación De Clorofila "a"*. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13140/1/T-UCE-0012-38.pdf>
- Orquera, E., & Cabrera, M. (2020). CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE YAMBO MEDIANTE ANÁLISIS DE FÓSFORO. *infoANALÍTICA*, 8(1), 99–111. <https://doi.org/10.26807/ia.v8i1.119>
- Pantoja, D., Vega, N., & Tzitzlali, O. (2021). Trophic state in a tropical lake based on Chlorophyll-a profiler data and Sentinel-2 images: The onset of an algal bloom event. *Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation*. <https://doi.org/10.1002/WER.1590>
- Peppas, M., Vasilakos, C., & Kavrouidakis, D. (2020). Eutrophication Monitoring for Lake Pamvotis, Greece, Using Sentinel-2 Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information 2020, Vol. 9, Page 143*, 9(3), 143. <https://doi.org/10.3390/IJGI9030143>
- Perdomo Vanegas, A. (2015). *PREDICCIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS DE CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS: CASO DE ESTUDIO EMBALSE DEL NEUSA*. Universidad de Bogotá.
- Pereira-Sandoval, M., Ruescas, A., Urrego, P., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Tenjo, C.,

- Soria-Perpinyà, X., Vicente, E., Soria, J., & Moreno, J. (2019). Evaluation of Atmospheric Correction Algorithms over Spanish Inland Waters for Sentinel-2 Multi Spectral Imagery Data. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 1469, 11(12)*, 1469.
<https://doi.org/10.3390/RS11121469>
- Prado, M., Troccoli, L., & Cajas, J. (2017). Análisis del estado trófico y microfitoplancton de la zona costera de la provincia del Guayas, Ecuador. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 46(2), 91–114.
<https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2017.46.2.729>
- Riesgos. (2020). *Informe de Situación COVID-19 Ecuador*.
<https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2020/03/Informe-de-Situación-No008-Casos-Coronavirus-Ecuador-16032020-20h00.pdf>
- Rodriguez, S. (2019). *Determinación del Estado Trófico actual de la laguna de Colta mediante la cuantificación de parámetros químicos (fosfatos, nitratos) y transparencia Secchi*. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18203>
- Sepúlveda, R. (2011). *DISEÑO DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE LA PERCEPCIÓN REMOTA*.
http://132.248.9.195/ptd2012/marzo/0677828/0677828_A1.pdf
- Toapanta, M. (2017). *DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE YAMBO A TRAVÉS DE LA CUANTIFICACIÓN DE CLOROFILA "A"*. .
- UC3M. (s/f). *Análisis de regresión lineal* .
- UCM. (2013). *Cuestiones importantes en el Modelo Lineal General (MLG)*.
- Universidad de Murcia, U. (2006). *SIG y Teledetección*.
<https://www.um.es/geograf/sigmur/index.html>
- UVIGO. (s/f). *Heterocedasticidad: estimadores, test y posibles soluciones factibles*.
- Velarde, Á. (s/f). *Regresión lineal múltiple*. Recuperado el 9 de julio de 2021, de

<https://personal.us.es/avelarde/analisisdos/Regresionmultiple.pdf>

- Vilà Baños, R., Torrado Fonseca, M., & Reguant Alvarez, M. (2019). Análisis de regresión lineal múltiple con SPSS: un ejemplo práctico. *REIRE: revista d'innovació i recerca en educació*, ISSN-e 2013-2255, Vol. 12, Nº. 2, 2019, 12(2), 10.
- Vollenweider, R. A., Giovanardi, F., Montanari, G., & Rinaldi, A. (1998). Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9(3), 329–357. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9)
- Zouiten, H. (2012). *Análisis Mediante Modelado Avanzado de Procesos de Eutrofización en Lagunas Litorales: Aplicación a Masas de Agua Atlánticas y Mediterráneas*.
https://www.researchgate.net/publication/264116733_Analisis_Mediante_Modelado_Avanzado_de_Procesos_de_Eutrofizacion_en_Lagunas_Litorales_Aplicacion_a_Masas_de_Agua_Atlanticas_y_Mediterraneas

Anexos