

1           **TÍTULO DEL PROYECTO: PREDECIR LA DISTRIBUCIÓN DE LA**  
2           **EUTROFIZACIÓN DEL LAGO TITICACA USANDO LA CLOROFILA-A**  
3           **COMO INDICADOR HASTA EL AÑO 2050.**

4           Línea de investigación: Gestión de recursos hídricos

5           **RESUMEN:**

6           El vertimiento de aguas residuales en el Lago Titicaca es una problemática que esta  
7           provocando la eutrofización del lago que puede ser percibido con el aumento de la  
8           concentración de la clorofila-a, este indicador podría ser detectado con el monitoreo en  
9           campo y también con el uso de imágenes satelitales, cuya data se estima desde el año  
10          2013 y también información obtenida del Instituto del Mar del Perú desde el año 2013.  
11          Por ello la presente investigación tiene por objetivo determinar la distribución temporal  
12          de la concentración de la clorofila-a en el Lago Titicaca a partir de la información  
13          obtenida de imágenes satelitales y los valores de los monitoreos hechos en campo, esto  
14          permitirá un monitoreo remoto de la clorofila-a de todo el lago Titicaca de las fuentes de  
15          información antes descritas. La metodología implica el análisis de las imágenes satelitales  
16          haciendo uso del software R y también un muestreo de la clorofila-a aplicando el  
17          Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos  
18          Superficiales, se desarrollará un modelo de regresión lineal entre los datos  
19          proporcionados por las imágenes satelitales y los valores de los resultados del monitoreo  
20          que nos permitirá obtener datos actuales del año 2021. Este trabajo contribuirá determinar  
21          las zonas del lago que se encuentren amenazados por la eutrofización, además permitirá  
22          su monitoreo constante con imágenes satelitales con menos recursos.

23          **Palabras clave:**

24          Lago Titicaca, clorofila, concentración, distribución.

25          **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

26                **1.1. El problema de investigación**

27                La eutrofización es un fenómeno que afecta muchos cuerpos hídricos en el  
28                mundo por un crecimiento excesivo de plantas y algas debido al aumento de  
29                materia orgánica, dióxido de carbono y nutrientes en el cuerpo de agua (Alba  
30                et al., 2020; Germán et al., 2016) .La eutrofización es un proceso ecológico,  
31                similar al envejecimiento, en el que un cuerpo de agua se enriquece cada vez

32 más con los nutrientes esenciales de las plantas acuáticas (Bhagowati &  
33 Ahamad, 2019). A nivel mundial, la eutrofización es una de las principales  
34 causas de la degradación del estado ecológico en aguas interiores y costeras  
35 (Vinçon-Leite & Casenave, 2019).

36 La clorofila-a es uno de los principales indicadores para el análisis de la  
37 calidad del agua para el monitoreo ambiental de los ecosistemas acuáticos  
38 (Meng et al., 2020). Durante el evento de floración, la distribución espacial y  
39 temporal de la clorofila-a (Chl-a) es difícil de observar utilizando métodos  
40 convencionales de muestreo de agua (Alba et al., 2019). Las floraciones de  
41 algas son generalmente monitoreadas con medición de biomasa in situ,  
42 examinando las especies presentes, y mediante la determinación de  
43 concentración de clorofila-a (Germán et al., 2016). El monitoreo de la calidad  
44 del agua en los ecosistemas acuáticos continentales utilizando el  
45 procesamiento de imágenes satelitales como herramienta puede emplearse  
46 como un sistema de alerta temprana para cambios en la productividad del lago  
47 (Rodríguez-lópez et al., 2020).

48 El Lago Titicaca generalmente no presenta valores de clorofila mayor a 2  
49 mg/m<sup>3</sup> (Paulino-Rojas et al., 2016). Sin embargo el lago Titicaca experimentó  
50 su primera floración de algas entre marzo-abril de 2015 por eventos  
51 climatológicos extremos (Achá et al., 2018). El reciente aumento de la presión  
52 antropogénica alrededor del lago Titicaca resultó en un aumento de la  
53 eutrofización de este ecosistema acuático (Guédron et al., 2017). El lago  
54 Titicaca es un lago de gran altitud y enriquecido con sulfato por lo que tiene  
55 una sensibilidad específica a la eutrofización o la proliferación de algas y, en  
56 consecuencia, su biodiversidad única es más vulnerable (Achá et al., 2018)

57 Se esta detectando e informando que la eutrofización está causando  
58 impactos sobre la salud de las personas con mayor frecuencia (Hilborn &  
59 Beasley, 2015). La exposición a las cianotoxinas de la eutrofización  
60 representa un riesgo para la salud de los organismos acuáticos, la vida  
61 silvestre, los animales domésticos y los seres humanos al beber o ingerir algas  
62 en el agua (Chen et al., 2006). Los datos y productos de la teledetección  
63 proporcionan vistas sinópticas, espacio-temporales y su integración puede  
64 conducir a una mejor comprensión de la ecología del lago y la calidad del agua  
65 (Dörnhöfer & Oppelt, 2016). Por lo anterior expuesto la investigación plantea

66 hacer determinar las zonas del lago que se encuentren amenazados por la  
67 eutrofización.

## 68 **1.2. La pregunta de investigación**

69 ¿Cuál es la distribución temporal de la concentración de la clorofila-a en el  
70 Lago Titicaca-Perú?

## 71 **II. OBJETIVOS**

### 72 **1.1 Objetivo general**

73 Predecir la distribución de la eutrofización del Lago Titicaca usando la clorofila-  
74 a como indicador hasta el año 2050.

### 75 **1.2 Objetivos específicos**

- 76 • Obtener datos de monitoreo de la concentración de la clorofila en campo del  
77 periodo 2013-2021.
- 78 • Obtener datos de la concentración de la clorofila-a usando imágenes satelitales.
- 79 • Comparar los valores de monitoreo de campo de la clorofila y los valores  
80 obtenidos a partir de imágenes satelitales.
- 81 • Evaluar la distribución temporal de la concentración de la clorofila-a en el Lago  
82 Titicaca-Perú hasta el año 2050 usando MaxEnt.

## 83 **III. JUSTIFICACIÓN**

84 La contribución de esta investigación en el lado ambiental permitirá identificar las áreas  
85 con mayor probabilidad de ocurrencia de floraciones algales, la relación entre los valores  
86 de monitoreo en campo y los valores de las imágenes satelitales nos permitirá observar la  
87 evolución de la eutrofización desde el año 2013, esto contribuirá enormemente en  
88 investigaciones relacionadas al comportamiento de la clorofila-a en el Lago Titicaca.  
89 También esta investigación permitirá la alerta temprana de la eutrofización en el Lago  
90 Titicaca.

91 En lo económico esta investigación permitirá monitorear todo el Lago Titicaca de manera  
92 remota, se podrá realizar monitoreos constantes y de bajo costo de cualquier parte del  
93 lago, la identificación de las áreas más vulnerables para la eutrofización permitirá un  
94 menor costo para la descontaminación, ya que al permitir identificar las zonas de  
95 intervención se ahorrará en costos de logística.

96 En lo social la investigación posicionará el valor del recurso hídrico y su conservación,  
97 ya que permitirá hacer una línea base para actividades o planes de descontaminación del  
98 Lago Titicaca.

99

## 100 **IV. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS**

### 101 **4.1 Hipótesis general**

102 La imágenes satelitales permite determinar la distribución temporal de la clorofila-a  
103 en el Lago Titicaca. La distribución de la clorofila-a en el Lago Titicaca se encuentra  
104 en zonas cercanas a lugares de vertimiento de aguas residuales, como la bahía del  
105 Lago Titicaca.

106

### 107 **4.2 Hipótesis específicos**

- 108 • Los valores de concentración de la clorofila-a son mayores cerca de puntos de  
109 vertimiento de aguas residuales.
- 110 • Los valores extraídos para la determinar la concentración de la clorofila-a a  
111 partir de imágenes satelitales son cercanos a los valores del monitoreo en campo.
- 112 • Los valores de monitoreo de campo de la clorofila coinciden con los valores  
113 obtenidos a partir de imágenes satelitales.
- 114 • La bahía del Lago Titicaca es la zona de mayor eutrofización del Lago Titicaca.

115

## 116 **V. REVISIÓN DE LITERATURA O MARCO TEÓRICO**

### 117 **5. Antecedentes**

#### 118 **5.1 Antecedentes Internacionales**

119 Rodríguez-lópez et al., (2020), determinaron experimentalmente las  
120 concentraciones de clorofila-a. Se establecieron correlaciones entre los índices  
121 de vegetación y las concentraciones de clorofila-a en diferentes zonas de  
122 monitoreo. Se utilizó 14 imágenes Landsat tomado durante un período de 6  
123 años, se determino experimentalmente las concentraciones de clorofila , las  
124 correlaciones entre los índices y las concentraciones de clorofila presentan una  
125 buena correlación de NDVI ( $R^2=0.89$ ).

126 Wang et al., (2020), demostraron que la integración de observaciones  
127 satelitales de sensores múltiples a través de Google Earth Engine permite una  
128 predicción Chl-a precisa y rápida a gran escala regional durante varios años.  
129 Se discuten los desafíos y limitaciones de usar y calibrar datos de imágenes  
130 satelitales de sensores múltiples y las soluciones actuales y potenciales.

131 Meng et al., (2020), estudiaron la máquina clásica de aprendizaje extremo  
132 (ELM), el método grupal de manejo de datos (GMDH), el bosque aleatorio  
133 (RF), el árbol de clasificación y regresión (CART) y un novedoso modelo  
134 integrado Bat-ELM (con el algoritmo de optimización de murciélagos) fueron  
135 desarrollados y aplicados para predecir la concentración diaria de clorofila-a  
136 (Chl-a) en ecosistemas de ríos y lagos.

137 Alba et al., (2020), en su trabajo de investigación proponen una metodología  
138 que aprovecha la alta resolución temporal de Sentinel-2 (S2) para el monitoreo  
139 de reservorios eutróficos, se uso 125 imágenes con menos del 30% de  
140 cobertura de nubes, para el periodo de agosto de 2016 a agosto de 2019, el  
141 estudio destaca la importancia del análisis espectral temporal de agua turbia  
142 en comparación con el análisis de una sola fecha.

143 Isenstein et al., (2020), desarrollaron modelos de teledetección por satélite  
144 multitemporales que retratan con precisión la distribución espacial de las  
145 floraciones de cianobacterias de agua dulce, que los métodos tradicionales de  
146 monitoreo no pueden lograr. Los modelos desarrollados con imágenes  
147 satelitales Landsat capturaron con éxito la distribución de las floraciones de  
148 cianobacterias y otras variables ( $R^2=0.6$  entre  $R^2=0.98$ ), el análisis indica el  
149 impacto de las precipitaciones en el crecimiento de la floración de  
150 cianobacterias.

151 Ledesma et al., (2020), generaron una serie de tiempo a partir de un modelo  
152 estadístico basado en datos de campo e información satelital de MODIS, para  
153 determinar y predecir la distribución temporal de la Chl-a en el embalse Río  
154 Tercero. Se obtuvo un modelo de regresión lineal ( $R^2=0.66$ ), el cual tiene en  
155 cuenta la relación entre bandas 1 y 2 del satélite MODIS.

156 Jiang et al., (2020), estimaron las concentraciones de clorofila-a en una amplia  
157 gama de condiciones ópticas basadas en la clasificación del agua a partir de  
158 observaciones VIIRS. Los resultados mostraron que este enfoque específico  
159 de absorción proporcionó buenas estimaciones de Chla en aguas claras a muy

160 turbias con una amplia gama de condiciones ópticas ( $R^2 = 0.76$ ,  $rRMSE =$   
161  $35\%$ ,  $n = 230$ ,  $p < 0.01$ ).

162 Kuhn et al., (2019), se comparó el producto de reflectancia de la superficie  
163 terrestre estándar del USGS con dos productos de reflectancia de detección  
164 remota acuáticos Landsat-8 y Sentinel-2 sobre los ríos Amazonas, Columbia  
165 y Mississippi. La investigación muestra que la rutina de la corrección  
166 atmosférica puede sesgar la recuperación de Landsat 8 de clorofila-a hasta en  
167 un 59%.

168 Ledesma et al., (2019), en este trabajo se monitoreó el estado trófico y la  
169 calidad del agua del embalse Cassaffousth (Córdoba, Argentina) a través del  
170 desarrollo de modelos estadísticos basados en datos de campo e información  
171 satelital. Mediante el uso de técnicas de regresión la información de Landsat  
172 8 se relacionó con datos de campo y se validó un modelo estadístico  
173 determinando la distribución de la clorofila ( $R^2=0.87$ ).

174 Shi et al., (2019) proporcionan una revisión completa sobre la detección  
175 remota de floración de cianobacterias en aguas continentales. Las  
176 características ópticas de las cianobacterias, los algoritmos operativos de  
177 detección remota de las áreas de floración de clorofila, ficocianina y  
178 cianobacterias, y aplicaciones de imágenes por satélite.

179 Blauw et al., (2018) analizaron las fluctuaciones del fitoplancton en cuatro  
180 estaciones de amarre automatizadas en el Mar del Norte, que midieron la  
181 abundancia de fitoplancton (clorofila) y varias variables ambientales con una  
182 resolución temporal de 12-30 minutos durante dos a nueve años.

183 Chu et al., (2018) muestran que los modelos de regresión ponderada  
184 geográfica y temporalmente (GTWR) y regresión ponderada geográficamente  
185 (GWR) son más precisos que la regresión lineal para estimar la calidad de  
186 agua con imágenes de satélite. GTWR mejora la explicación de la varianza  
187 del 44% al 87%.

## 188 **5.2 Antecedentes locales**

189 Achá et al., (2018), determinaron que el lago Titicaca experimentó su primer  
190 florecimiento de algas registrado en marzo-abril de 2015 en la zona sur del  
191 lago. El alga dominante involucrada en el florecimiento fue *Carteria* sp.  
192 Sugieren que los eventos de lluvia inusualmente intensos liberaron grandes  
193 cantidades de nutrientes de la cuenca y provocaron la floración.

194 Paulino-Rojas et al., (2016), se ha demostrado la capacidad de estimar la  
195 concentración de clorofila-a en el lago Titicaca a partir de modelos de razón  
196 de banda MOD2, utilizando información del sensor MERSI recepcionados por  
197 el sistema TERASCAN del IMARPE.

198  
199  
200  
201

## **5.2 MARCO TEÓRICO**

### **5.2.1. Eutrofización**

202 La eutrofización es un proceso ecológico, similar al envejecimiento, en el que  
203 un cuerpo de agua se enriquece cada vez más con los nutrientes esenciales de  
204 las plantas acuáticas (Bhagowati & Ahamad, 2019). La eutrofización conduce  
205 al crecimiento excesivo de las plantas: algas en aguas abiertas, perifiton (algas  
206 bentónicas adheridas) en el fondo del cuerpo de agua y macrófitas (grandes  
207 plantas con raíces vasculares que a menudo se llaman malezas) en aguas poco  
208 profundas (Ji, 2008) .

209

### **5.2.2. Tipos de Eutrofización**

210 En general, el fenómeno de la eutrofización de los lagos se puede clasificar en  
211 dos categorías; natural y cultural. El proceso de eutrofización natural tiene  
212 lugar muy lentamente en el tiempo, pero puede acelerarse en gran medida por  
213 las actividades antropogénicas, lo que generalmente se conoce como  
214 eutrofización cultural o artificial (Serrano et al., 2017).

215 Según su productividad biológica y las condiciones de nutrientes, un cuerpo  
216 de agua generalmente se puede clasificar como oligotrófico, mesotrófico y  
217 eutrófico:

218

#### **5.2.2.1. Oligotrófico.**

219 Describe un cuerpo de agua con baja actividad biológica y excelente calidad  
220 del agua, ya que el agua es baja en nutrientes y algas y la producción primaria  
221 y la biomasa están severamente limitadas (Ji, 2008).

222

#### **5.2.2.2. Mesotrófico.**

223 Describe un cuerpo de agua con actividad biológica media y buena calidad  
224 del agua (Ji, 2008).

225

#### **5.2.2.3. Eutrófico.**

226 Describe un cuerpo de agua con actividad biológica excesiva y mala calidad  
227 del agua. El agua tiene abundantes nutrientes y altas tasas de producción  
228 primaria, lo que con frecuencia resulta en el agotamiento de oxígeno en la capa

229 inferior. trientes excesivos producen más fitoplancton de lo que puede ser  
230 consumido por el cuerpo de agua. Esta sobreproducción puede conducir a una  
231 variedad de problemas, que incluyen: bajo Oxígeno Disuelto, especialmente  
232 cerca del fondo del cuerpo de agua; sólidos altamente suspendidos, a menudo  
233 enriquecidos con material orgánico; altas concentraciones de nutrientes; altas  
234 concentraciones de algas; poca penetración de luz y poca claridad del agua;  
235 olores de algas o lodos anaerobios; y cambios en la composición de especies

#### 236 **5.2.2.4. Tipos de lagos según el estado trófico.**

237 El fósforo y el nitrógeno son nutrientes esenciales para el crecimiento de algas.  
238 De estos dos nutrientes, a menudo se considera que el P (fósforo) es el  
239 nutriente que regula la producción de algas en los lagos y se usa habitualmente  
240 para estimar el estado trófico de los lagos. Vollenweider (1968) clasificó los  
241 lagos como:

- 242 1. Oligotrófico, si  $P < 10 \mu\text{g} / \text{L}$ .
- 243 2. Mesotrófico, si  $10 \mu\text{g} / \text{L} \leq P < 20 \mu\text{g} / \text{L}$ .
- 244 3. Eutrófico, si  $P \geq 20 \mu\text{g} / \text{L}$ .

245 A menudo el estado trófico de un arroyo se basa en las concentraciones de Chl  
246 a (USEPA, 2000)

- 247 1. Oligotrófico: Concentración media de Chl-a  $20 \text{mg}/\text{m}^2$ .
- 248 2. Mesotrófico: Concentración media de Chl-a  $50 \text{mg}/\text{m}^2$ .
- 249 3. Eutrófico : Concentración media de Chl-a  $70 \text{mg}/\text{m}^2$ .

#### 250 **5.2.3. Clorofila-a (Chl-a)**

251 El Chl-a en el agua es un indicador clave de la biomasa del fitoplancton. El  
252 aumento de Chl-a es la primera manifestación de contaminación por  
253 nutrientes, que, luego, cambia la composición de la comunidad de fitoplancton  
254 y aumenta la frecuencia de floraciones molestas y tóxicas (Kiefer et al., 2015).  
255 Se ha detectado Chl-a como un compuesto espectralmente activo en el  
256 fitoplancton que se utiliza como representante de la biomasa del fitoplancton  
257 (Kudela et al., 2015). La clorofila-a está directamente relacionado con la  
258 calidad del agua y el estado trófico de los sistemas acuáticos (Liu et al., 2011).  
259 La biomasa de algas en los ecosistemas acuáticos generalmente se estima  
260 determinando la concentración de clorofila a (Chl-a). La clorofila-a también  
261 se ha utilizado para estimar las floraciones de cianobacterias basándose en su  
262 relación lineal ( $R=6\sim 7$ ) (Isenstein et al., 2020).



263  
264  
265  
266  
267  
268  
269  
270  
271  
272  
273  
274  
275  
276  
277  
278  
279  
280  
281  
282  
283  
284  
285  
286  
287  
288  
289  
290  
291  
292  
293  
294  
295

#### **5.2.4. Monitoreo con satélites.**

Los sensores remotos permiten detectar pigmentos del fitoplancton, como la concentración de Clorofila-a (Chl-a) en agua, el cual es un buen indicador de la biomasa del fitoplancton (M. Ledesma et al., 2020).

##### **5.2.4.1 Datos satelitales.**

Landast 8 lleva dos sensores de observación de la tierra, el Operational Land Imager (OLI) y el Sensor Térmico Infrarrojo (TIR). Las imágenes de este satélite presentan correcciones de terreno, por lo que no es necesario aplicar correcciones geométricas (M. Ledesma et al., 2019).

La corrección atmosférica sobre el agua requiere mayor precisión que sobre la tierra porque se sabe que del 70 al 90% de la parte superior de la señal de la atmósfera proviene desde la superficie del agua (Kuhn et al., 2019).

##### **5.2.4.2 Landsat 8.**

Las imágenes Landsat pueden proporcionar una variación estacional de la composición de las algas y la distribución de las cianobacterias de un lago (Isenstein et al., 2020).

#### **5.2.5. Modelo de Calidad de Agua**

La complejidad de la dinámica y estructura de los sistemas acuáticos impiden la formulación de un modelo dinámico completo de aplicación general, existen diferencias entre los modelos en cuanto a su estructura matemática y complejidad al abordar un mismo problema (Almeida, 1996). El principio básico de los modelos de calidad del agua es el balance de masa (Loucks & Beek, 2017).

Un sistema de agua se puede dividir en diferentes segmentos o elementos de volumen, los componentes del balance de masa de un segmento incluyen: cambios por transporte, cambios por procesos físicos y químicos, cambios por fuente o descarga (Loucks & Beek, 2017). El transporte incluye el transporte advectivo (transporte por agua corriente) y el transporte dispersivo (la que resulta de las diferencias de concentración). Los procesos incluyen procesos físicos (reaeración, sedimentación), procesos bioquímicos (adsorción, transformación, desnitrificación), y procesos biológicos (producción primaria, depredación) (Loucks & Beek, 2017).

#### **5.2.6. Modelos empíricos**

296 Los modelos empíricos se derivan utilizando las relaciones estadísticas entre  
297 los datos de teledetección y los datos recogidos in situ. Estos modelos pueden  
298 describir relaciones complicadas, que pueden ser difíciles de determinar  
299 mediante el uso de ecuaciones analíticas, sin dejar de ser bastantes simples y  
300 fáciles de interpretar. Sin embargo, la precisión de un modelo empírico viene  
301 determinada en gran medida por la disponibilidad de los datos y tiene  
302 limitaciones en cuanto a utilización de los resultados del modelo de  
303 extrapolación (Isenstein et al., 2020).

#### 304 **5.2.7. Principales factores de la distribución de la clorofila-a.**

305 La velocidad del viento fue identificado como principal factor de la  
306 acumulación de clorofila-a (Shi et al., 2019). El aumento de la temperatura  
307 media diaria facilita la eutrofización, en consecuencia la clorofila-a (Lin et al.,  
308 2021), el impacto negativo de las aguas residuales (Mourão et al., 2020).

#### 309 **5.2.8. Factores que influyen en el proceso de eutrofización.**

310 Los estudios de eutrofización requieren el conocimiento de procesos físicos,  
311 químicos, geológicos y biológicos. Los factores importantes para los procesos  
312 de eutrofización en un cuerpo de agua incluyen

- 313 1. Geometría del cuerpo de agua: profundidad, ancho, área de superficie y  
314 volumen.
- 315 2. Velocidad de flujo y mezcla turbulenta.
- 316 3. Temperatura del agua y radiación solar.
- 317 4. Total de sólidos en suspensión.
- 318 5. Algas.
- 319 6. Nutrientes: fósforo, nitrógeno y sílice.
- 320 7. Oxígeno disuelto

321 La dinámica esencial de la eutrofización del lago puede ser modelada por la  
322 ecuación.

$$323 \quad \frac{dP}{dt} = l - sP + \frac{rP^q}{m^q + P^q} \quad (1)$$

324  
325 La variable dinámica, P, es la cantidad de P (masa o concentración) en la  
326 columna de agua. La tasa de entrada de P (masa o concentración por unidad  
327 de tiempo) de la cuenca es l. La tasa de pérdida de P por unidad de tiempo es  
328 s. Los procesos de pérdida incluyen sedimentación, flujo de salida y secuestro

329 en biomasa de consumidores o plantas bentónicas. La tasa máxima de reciclaje  
330 de P (masa o concentración por unidad de tiempo) es r.

### 331 **5.2.9. Formulaciones matemáticas.**

332 El tiempo que permanecen los contaminantes en un cuerpo de agua depende  
333 de la naturaleza del compuesto. La mayoría de los productos químicos sufren  
334 descomposición química o biológica. Algunos productos químicos son  
335 conservadores y no sufren este tipo de reacciones, a pesar de que es muy difícil  
336 encontrar un producto químico verdaderamente conservador en la naturaleza.  
337 Se supone que una sustancia es conservadora cuando la velocidad de reacción  
338 es muy baja. Los humanos, a su vez, pueden sufrir daños al consumir estos  
339 animales acuáticos que están expuestos a sedimentos contaminados. Las  
340 sustancias no conservativas reaccionan química o biológicamente. Estos  
341 procesos de destino y descomposición incluyen volatilización, hidrólisis,  
342 fotólisis y biodegradación.

343 Aunque la cinética de reacción en los sistemas acuáticos se puede describir de  
344 muchas maneras, la forma de un solo reactivo generalmente se expresa como:

$$345 \quad \frac{dC}{dt} = R = -kC^m \quad (2)$$

346 donde m = el orden de reacción y k = constante de velocidad de la reacción de  
347 orden m. En aguas naturales, las formas comúnmente utilizadas de la  
348 ecuación. (2) están con m = 0, 1 y 2.

### 349 **5.2.10. Procesos que afectan el destino y la descomposición.**

350 El destino y la descomposición de las sustancias tóxicas pueden ser el  
351 resultado de reacciones físicas, químicas y / o biológicas. Además de la  
352 sorción y la desorción, los procesos que pueden afectar significativamente el  
353 destino y los procesos de descomposición incluyen: mineralización y  
354 descomposición, hidrólisis, fotólisis, biodegradación, bioconcentración y  
355 volatilización (Ji, 2008).

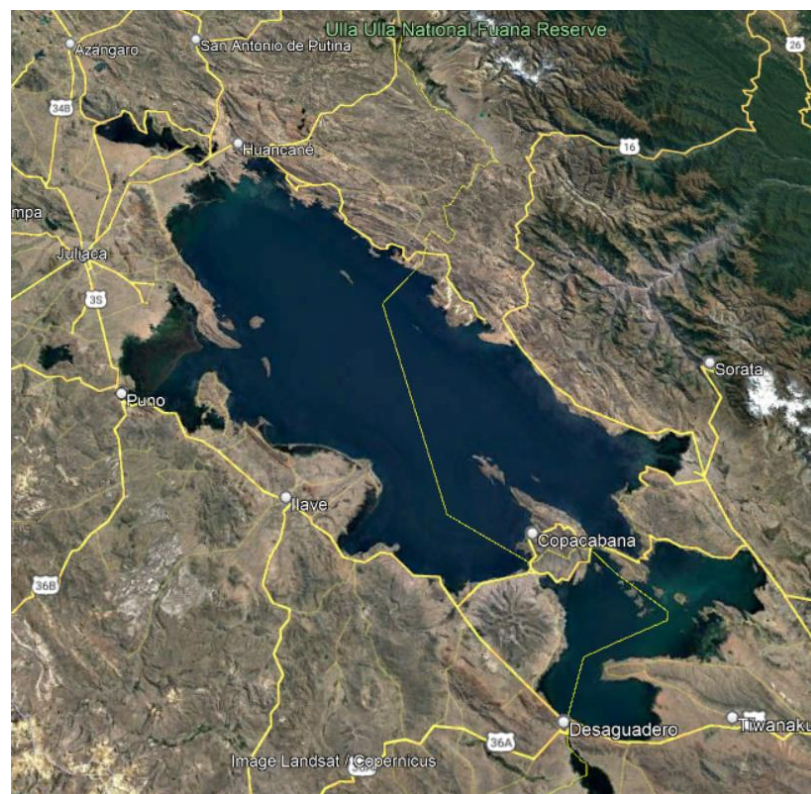
356

## 357 **VI. METODOLOGÍA**

### 358 **6.1 Área de estudio**

359 El lago Titicaca es un lago tropical de gran altitud (alrededor de 3809 m sobre  
360 el nivel del mar) ubicado en los Andes centrales (15° 47 'S, 69° 22' W),  
361 transfronterizo entre Perú y Bolivia. El lago está compuesto por dos

362 subcuencas casi independientes, conectadas por el Estrecho de Tiquina. La  
363 subcuenca más grande (6450 km<sup>2</sup>), denominada "Lago Mayor", es profunda,  
364 con una profundidad media de 135 m una profundidad máxima de 284 m,  
365 mientras que la subcuenca más pequeña (2112 km<sup>2</sup>), denominada "Lago  
366 Menor", es poco profundo, con una profundidad media de 9 m una  
367 profundidad máxima de 40 m. El Lago Mayor es un lago tropical monomítico  
368 (con un período de mezcla cada año) mientras que el Lago Menor es un lago  
369 tropical polimítico (se mezcla casi a diario) (Ruiz-Verd et al., 2016).  
370 El período de estratificación (débil) ocurre durante la estación lluviosa y  
371 relativamente cálida (noviembre-abril). Durante este período, el Lago Mayor  
372 está turbio debido a los sólidos en suspensión provenientes de procesos  
373 erosivos en la cuenca. El período de mezcla ocurre durante la estación más  
374 seca y fría (mayo-octubre), cuando la gradiente vertical de temperatura  
375 desaparece y la columna de agua tiene una temperatura uniforme.



376  
377 **Figura 1. Mapa del área de estudio.**

378  
379 **6.2 Tipo y diseño de investigación**

380 La investigación es de tipo descriptivo.

381

382  
383  
384  
385  
386  
387  
388  
389  
390  
391  
392  
393  
394  
395  
396  
397  
398  
399  
400  
401  
402  
403  
404  
405  
406  
407  
408  
409

### 6.3 Datos

Los datos en esta investigación serán obtenidos a partir de las imágenes satelitales, los datos de la clorofila-a de años anteriores serán obtenidos del Instituto del Mar del Perú (IMARPE), los datos más recientes se obtendrán del monitoreo en campo.

### 6.4 Materiales y equipos

Las imágenes satelitales de Terra-Aqua / MODIS (1 km de resolución espacial) para estudiar las propiedades del agua del lago. Para los datos MODIS, se utilizará el producto estándar MOD09 (reflectancias superficiales). También se utilizarán los productos globales diarios MODIS (resolución espacial de 5 km) para extraer series temporales a lo largo del año 2011-2019. En este caso, se aplicarán umbrales de reflectancia para evitar la contaminación por nubes o destellos solares (Ruiz-Verd et al., 2016)

Se recopilará información del monitoreo de la clorofila-a del periodo 2011-2019 realizada por IMARPE. El método empleado para el análisis de clorofila-a por el IMARPE es Spectrophotometric Determination of Chlorophyll (Jeffrey & Humphrey, 1975).

### 6.5 Muestreo

El trabajo de campo se desarrollará en la bahía del Lago Titicaca, se tomará 11 puntos muestreo a lo largo de la bahía del Lago Titicaca, para la toma de muestras se usará el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, la toma de muestra se realizará de manera superficial porque la clorofila-a tiende a formarse en la superficie de los lagos (Reinart & Kutser, 2006), la toma de muestras se realizará en la estación lluviosa (Enero- Marzo) donde se observo altas concentraciones de clorofila-a (Ruiz-Verd et al., 2016).

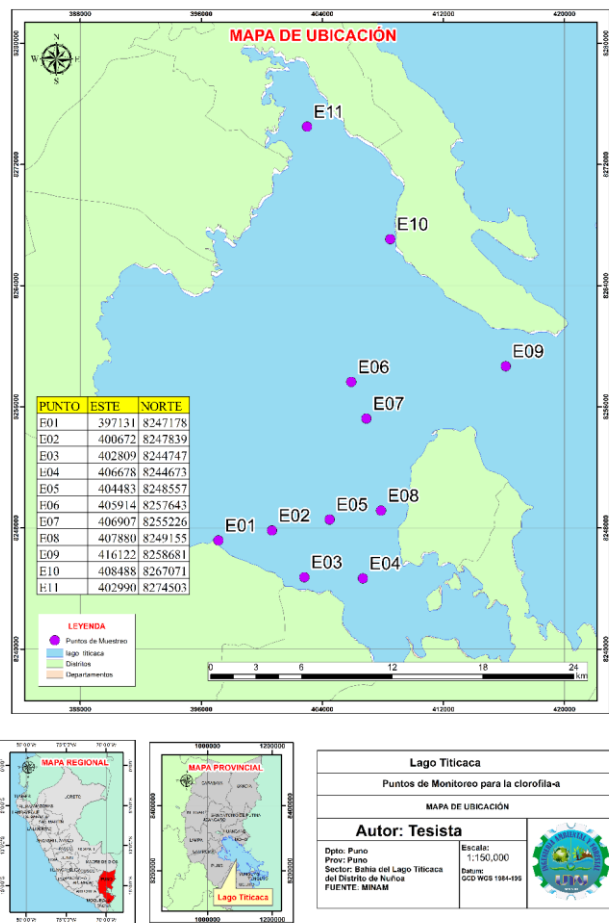
Tabla 1.

*Puntos de muestreo para la clorofila-a en el Lago Titicaca.*

PUNTO	LONGITUD	LATITUD
E01	-69.9607	-15.8522
E02	-69.9276	-15.8464
E03	-69.9078	-15.8744
E04	-69.8717	-15.8752

E05	-69.892	-15.84
E06	-69.8783	-15.758
E07	-69.8691	-15.7798
E08	-69.8603	-15.8348
E09	-69.783	-15.7489
E10	-69.8539	-15.6728
E11	-69.9049	-15.6054

410



411

412

Figura 2. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo para la clorofila-a

413

### 6.5.1 Tipo de muestreo

414

El muestreo es simple (Germán et al., 2016).

415

### 6.6 Métodos

416

6.6.1 Comparar los valores de monitoreo de campo de la clorofila y los valores obtenidos a partir de imágenes satelitales.

417

418

6.6.1.1 Extracción de datos de imágenes satelitales

419 Las imágenes Landsat se obtendrán del Centro de Observación y Ciencia de  
420 los Recursos Terrestres (EROS) del Servicio Geológico de los Estados Unidos  
421 (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Solo se seleccionará imágenes de alta calidad  
422 excluyendo las imágenes cubiertas significativamente por nubes. Las  
423 imágenes se obtendrán utilizando una ventana de tiempo de +1 día. Todas las  
424 imágenes se procesarán en el Software libre R (Isenstein et al., 2020). Los  
425 datos del satélite MODIS se descargarán de la aplicación AppEEARS  
426 (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples) (Neeley,  
427 2018). Se utilizarán los productos MOD09GQ y MOD09GA en conjunto. El  
428 primero provee información de la reflectancia diaria a nivel de superficie de  
429 la banda 1 y 2. El segundo brinda información de la calidad de los datos y  
430 geometría de visión del satélite (German et al., 2017).

#### 431 **6.6.1.2 Análisis de datos.**

432 Con ambos datos, de campo y satelitales, se construirá un modelo estadístico  
433 a partir de una regresión lineal simple la cual se realizará para ver la relación  
434 entre los datos de campo y los datos de satélite (Bonansea et al., 2015; Germán  
435 et al., 2017; Ledesma et al., 2019). Con el software R versión 3.6.1, los valores  
436 de reflectancia de cada banda y sus relaciones serán tabulados para cada fecha  
437 de muestreo en coincidencia con los valores de Chl-a. Con la ayuda del  
438 producto MOD09GA los días con presencia de nubes serán descartados.

#### 439 **6.6.1.3 Extracción de datos de campo.**

440 Se hará un monitoreo de la clorofila-a en el lago Titicaca haciendo uso del  
441 protocolo nacional de la calidad de los recursos hídricos superficiales, la cual  
442 se llevará al laboratorio desconcentrado continental de Puno para el análisis  
443 de la concentración de la clorofila-a por el método Spectrophotometric  
444 Determination of Chlorophyll (Jeffrey & Humphrey, 1975).

#### 445 **6.6.1.4 Método Spectrophotometric Determination of Chlorophyll.**

446 Para estimar la clorofila existen diferentes métodos, procedimientos y  
447 modelos matemáticos, desarrollados con el objeto de minimizar los errores  
448 ocasionados por la presencia de otros pigmentos fotosintéticos y de algunos  
449 compuestos químicos en el agua.

450 a. Equipo y reactivos:

- 451 1) Espectrofotómetro con una banda estrecha (de paso) (0,5 a 2,0 nm)
- 452 porque el pico de absorción de la clorofila es relativamente estrecho.

453 Con una anchura de banda espectral de 20 nm, la concentración de  
454 clorofila a puede subestimarse hasta en un 40 %.

455 2) Cubetas, con longitudes de recorrido de 1,4 y 10 cm.

456 3) Pipas de 0,1 y 5,0 ml.

457 4) Ácido clorhídrico (HCl), 0,1 N.

458 b. Procedimiento espectrofotométrico

459 Transfiera 3 mL de extracto clarificado en una cubeta de 1 cm y lea la  
460 absorbencia a 750 y 664 nm. Acidificar el extracto en la cubeta con 0,1  
461 mL de HCl 0,1 N. Agitar suavemente el extracto acidificado y 90 segundos  
462 después de la acidificación, leer la absorbencia a 750 y 665 nm. Los  
463 volúmenes de extracto y ácido, y el tiempo después de la acidificación son  
464 críticos para obtener los resultados precisos y consistentes.

465 Calculamos la clorofila-a :

$$466 \text{ clorofila} - a(\text{mg} / \text{m}^3) = \frac{26,7(664b - 665a) \times V1}{V2 \times L} \quad (3)$$

467 Donde:

468 664b, 665a = absorbencia del extracto de acetona al 90 % antes y después de  
469 la acidificación.

470 V1 = volumen de extracto ( Litros ),

471 V2 = volumen de muestra (  $\text{m}^3$  ),

472 L = longitud del recorrido de la luz o anchura de la cubeta en cm.

#### 473 **6.6.1.5 Comparación de datos.**

474 Los resultados de los valores obtenidos por las imágenes satelitales y  
475 monitoreo realizadas por el IMPARPE en el periodo 2013-2019, se incluirá  
476 los datos de monitoreo que se realizará el 2022 para tener el periodo 2013-  
477 2022, para así comparar mediante una regresión lineal:

$$478 y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

479 Donde  $y_i$  , es la variable de respuesta,  $\beta_i$  son los coeficientes de regresión,  
480  $x_i$  es la variable explicativa, o sea las bandas MODIS o sus relaciones y  $\varepsilon_i$  es  
481 el error aleatorio (Ledesma et al., 2019).

#### 482 **6.6.1.6 Validar un modelo estadístico para determinar la distribución de** 483 **la clorofila en el Lago Titicaca.**



484 Para validar los resultados de la ecuación (1) se utilizará el 70% de los datos  
485 para la obtención del modelo y el 30% restante para su validación (Li et al.,  
486 2017). Se generará una serie de tiempo para el período bajo estudio (Ferral et  
487 al., 2017).

### 488 **6.6.2 Predecir las zonas con mayor eutrofización del Lago Titicaca.**

489 Se predecirá la distribución de la clorofila en el Lago Titicaca con el método  
490 de máxima entropía de MaxEnt, usaremos el software MaxEnt para estimar la  
491 distribución en el área de estudio tomando en consideración las restricciones  
492 impuestas por las variables ambientales (Merow et al., 2013).

493 Para predecir la distribución de la clorofila se usará 19 variables bioclimáticas  
494 de WorldClim V2 (Fick & Hijmans, 2017) a una resolución de 30  
495 arcossegundos (Mejia & Abad, 2019).

496 Tabla 2.

497 *Listado y significado de las variables bioclimáticas*

498

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Rango diurno medio (media mensual ( $T^{\circ}$ máx - $T^{\circ}$ mín))
BIO3	Isotermalidad (BIO2 / BIO7) ( $\times 100$ )
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$ )
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9	Temperatura media del cuarto más seco
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura media del cuarto más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del cuarto más húmedo
BIO17	Precipitación del cuarto más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO19	Precipitación del cuarto más frío

499 *Fuente:* Fick & Hijmans, 2017; Mejía et al., 2018

500

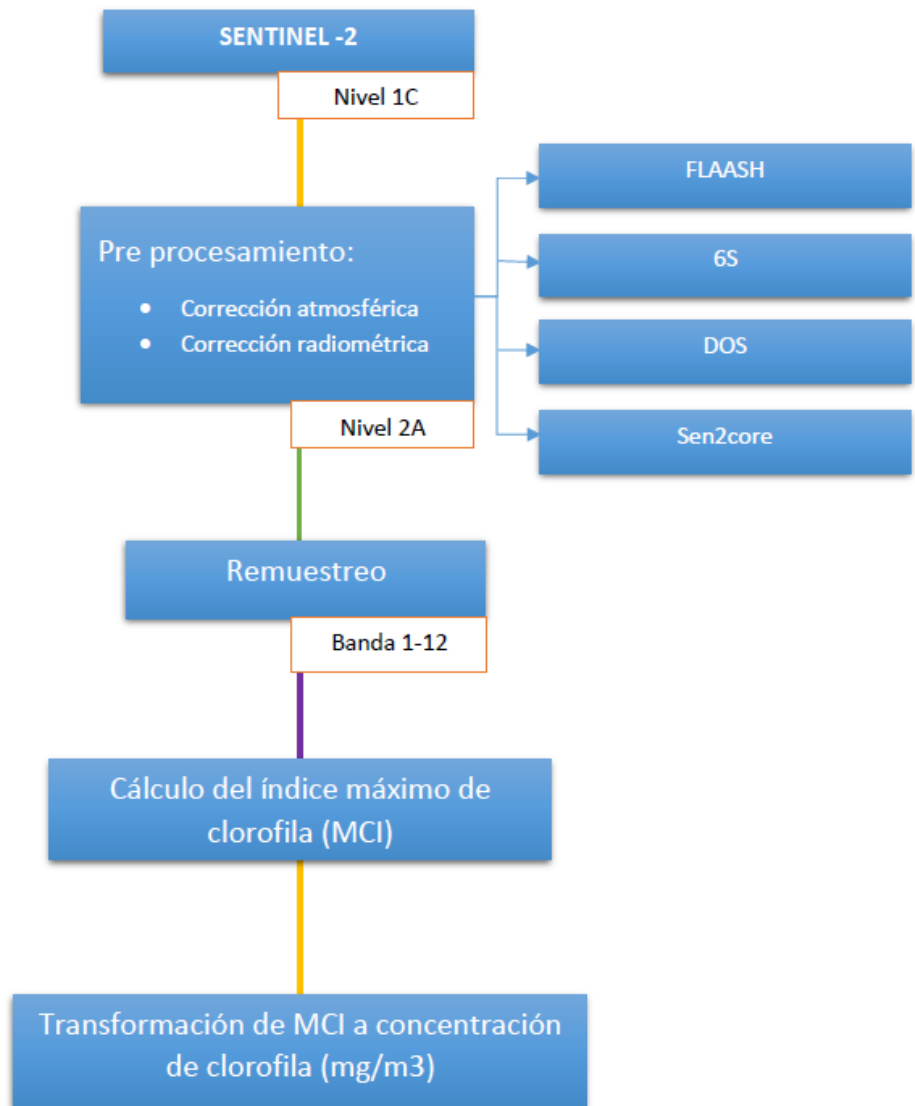
501

502

503

504

**DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE CALCULO DE CONCENTRACION DE CLOROFILA  
MEDIANTE TELEDETECCION**



505

506

507

508

509

510

511

512

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de cálculo de concentración de la clorofila



#### 4. Sustentación de Tesis

517

#### 518 VIII. PRESUPUESTO

519

Tabla 4.

520

*Presupuesto del proyecto de investigación*

Rubros	Descripción	Unidades de medida	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Costo total (S/.)
	Adquisición de datos del IMPARPE	Muestras	1	-	-
	Adquisición de datos del satélite MODIS	Muestras	1	-	-
	Internet	Unidades	1	500.00	500.00
	Laptop	Unidades	1	3,000.00	3,000.00
Transporte	Alquiler de movilidad	Unidades	1	180.00	180.00
	Impresión	Unidades	3	30.00	90.00
Otros	Empastado	Unidades	3	30.00	90.00
	Papel bond A4	Paquete	5	15.00	75.00
SUBTOTAL					3,935.00
Imprevistos 10%					393.50
TOTAL (S/.)					4,328.50

521

522

El presente presupuesto será 100% financiado por el tesista

523

#### IX. COLABORADORES

524

IMARPE (Instituto del Mar del Perú).

525

526

#### X. BIBLIOGRAFÍA

527

Achá, D., Guédron, S., Amouroux, D., Point, D., Lazzaro, X., Fernandez, P. E., &

528

Sarret, G. (2018). Algal bloom exacerbates hydrogen sulfide and methylmercury

529 contamination in the emblematic high-altitude lake titicaca. *Geosciences*  
530 *(Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/geosciences8120438>

531 Alba, G., Anabella, F., Marcelo, S., Andrea, G. A., Ivana, T., Iba, E., Sandra, T., &  
532 Michal, S. (2019). *Spectral Monitoring of algal blooms in an Eutrophic lake using*  
533 *Sentinel-2. July*, 306–309.

534 Alba, G., Anabella, F., Marcelo, S. C., & Michal, S. (2020). Multitemporal Spectral  
535 Analysis for Algae Detection in an Eutrophic Lake using Sentinel 2 Images. *2020*  
536 *IEEE Latin American GRSS and ISPRS Remote Sensing Conference, LAGIRS 2020*  
537 *- Proceedings*, 351–356. <https://doi.org/10.1109/LAGIRS48042.2020.9165633>

538 Bhagowati, B., & Ahamad, K. U. (2019). A review on lake eutrophication dynamics  
539 and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology and Hydrobiology*,  
540 *19(1)*, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002>

541 Blauw, A. N., Benincà, E., Laane, R. W. P. M., Greenwood, N., & Huisman, J. (2018).  
542 Predictability and environmental drivers of chlorophyll fluctuations vary across  
543 different time scales and regions of the North Sea. *Progress in Oceanography*, *161*,  
544 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.01.005>

545 Chen, J., Xie, P., Zhang, D., Ke, Z., & Yang, H. (2006). In situ studies on the  
546 bioaccumulation of microcystins in the phytoplanktivorous silver carp  
547 (*Hypophthalmichthys molitrix*) stocked in Lake Taihu with dense toxic  
548 *Microcystis* blooms. *Aquaculture*, *261(3)*, 1026–1038.  
549 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.08.028>

550 Chu, H. J., Kong, S. J., & Chang, C. H. (2018). Spatio-temporal water quality mapping  
551 from satellite images using geographically and temporally weighted regression.  
552 *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,  
553 *65(August 2017)*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.10.001>

554 Dörnhöfer, K., & Oppelt, N. (2016). Remote sensing for lake research and monitoring -  
555 Recent advances. *Ecological Indicators*, 64, 105–122.  
556 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.009>

557 Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate  
558 surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–  
559 4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

560 Germán, A., Tauro, C., Andreo, V., Bernasconi, I., & Ferral, A. (2016). Análisis de una  
561 serie temporal de clorofila-a a partir de imágenes MODIS de un embalse eutrófico.  
562 *2016 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2016*, 697–704.  
563 <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2016.7585365>

564 Guédron, S., Point, D., Acha, D., Bouchet, S., Baya, P. A., Tessier, E., Monperrus, M.,  
565 Molina, C. I., Groleau, A., Chauvaud, L., Thebault, J., Amice, E., Alanoca, L.,  
566 Duwig, C., Uzu, G., Lazarro, X., Bertrand, A., Bertrand, S., Barbraud, C., ...  
567 Amouroux, D. (2017). Mercury contamination level and speciation inventory in  
568 Lakes Titicaca & Uru-Uru (Bolivia): Current status and future trends.  
569 *Environmental Pollution*, 231, 262–270.  
570 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.009>

571 Hilborn, E. D., & Beasley, V. R. (2015). One health and cyanobacteria in freshwater  
572 systems: Animal illnesses and deaths are sentinel events for human health risks.  
573 *Toxins*, 7(4), 1374–1395. <https://doi.org/10.3390/toxins7041374>

574 Isenstein, E. M., Kim, D., & Park, M. H. (2020). Modeling for multi-temporal  
575 cyanobacterial bloom dominance and distributions using landsat imagery.  
576 *Ecological Informatics*, 59, 101119. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101119>

577 Ji, Z.-G. (2008). *Hydrodynamics and water quality modeling rivers, lakes and estuaries*.  
578 <https://doi.org/10.1071/FP17337>

579 Jiang, G., Loiselle, S. A., Yang, D., Ma, R., Su, W., & Gao, C. (2020). Remote  
580 estimation of chlorophyll a concentrations over a wide range of optical conditions  
581 based on water classification from VIIRS observations. *Remote Sensing of*  
582 *Environment*, 241(February), 111735. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111735>

583 Kiefer, I., Odermatt, D., Anneville, O., Wüest, A., & Bouffard, D. (2015). Application  
584 of remote sensing for the optimization of in-situ sampling for monitoring of  
585 phytoplankton abundance in a large lake. *Science of the Total Environment*, 527–  
586 528, 493–506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.011>

587 Kudela, R. M., Palacios, S. L., Austerberry, D. C., Accorsi, E. K., Guild, L. S., &  
588 Torres-Perez, J. (2015). Application of hyperspectral remote sensing to  
589 cyanobacterial blooms in inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 167,  
590 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.025>

591 Kuhn, C., de Matos Valerio, A., Ward, N., Loken, L., Sawakuchi, H. O., Kampel, M.,  
592 Richey, J., Stadler, P., Crawford, J., Striegl, R., Vermote, E., Pahlevan, N., &  
593 Butman, D. (2019). Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance  
594 products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity. *Remote*  
595 *Sensing of Environment*, 224(January), 104–118.  
596 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.023>

597 Ledesma, M. M., Bonansea, M., Ledesma, C. R., Rodríguez, C., Carreño, J., & Pinotti,  
598 L. (2019). Estimation of chlorophyll-a concentration using Landsat 8 in the  
599 Cassaffouth reservoir. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(7),  
600 2021–2027. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.080>

601 Ledesma, M., Rodríguez, C., Ledesma, C. R., Pinotti, L., Scavuzzo, C. M., & Germán,  
602 A. (2020). Análisis de la distribución temporal de la concentración de Clorofila-a  
603 en el embalse Río Tercero , Córdoba , Argentina. *Revista Científica FAV-UNRC*

604 *Ab Intus*, 5(2), 83–87.

605 Lin, S. S., Shen, S. L., Zhou, A., & Lyu, H. M. (2021). Assessment and management of  
606 lake eutrophication: A case study in Lake Erhai, China. *Science of the Total*  
607 *Environment*, 751, 141618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141618>

608 Liu, X., Lu, X., & Chen, Y. (2011). The effects of temperature and nutrient ratios on  
609 *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation. *Harmful*  
610 *Algae*, 10(3), 337–343. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2010.12.002>

611 Mejía, D., & Abad, L. (2019). Distribución potencial del género *Polylepis* en la Cuenca  
612 del río Paute bajo un escenario de cambio climático Potential distribution of the  
613 genus *Polylepis* in the Paute river. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*,  
614 21–37.

615 Mejía, D., Tonón, M., & Abad, L. (2018). Distribución Potencial del Género *Polylepis*  
616 en la Cuenca del Río Paute bajo un Escenario de Cambio Climático. *Revista de La*  
617 *Facultad de Ciencias Químicas*, December(19), 21–37.

618 Meng, X., Shi, L., Yao, L., Zhang, Y., & Cui, L. (2020). On the implementation of a  
619 novel data-intelligence model based on extreme learning machine optimized by bat  
620 algorithm for estimating daily chlorophyll-a concentration: case studies of river  
621 and lake in USA. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*  
622 *Aspects*, 11, 124658. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124868>

623 Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for  
624 modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter.  
625 *Ecography*, 36(10), 1058–1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>

626 Mourão, F. V., de Sousa, A. C. S. R., da Luz Mendes, R. M., Castro, K. M., da Silva, A.  
627 C., El-Robrini, M., de Oliveira Salomão, U., Pereira, J. A. R., & de Lourdes Souza  
628 Santos, M. (2020). Water quality and eutrophication in the Curuçá estuary in



629 northern Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, 39, 101450.  
630 <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101450>

631 Paulino-Rojas, C., Xu, H., Alburquerque, E., & Velaochaga, G. (2016). Estimación de  
632 concentración de clorofila-a en el lago Titicaca usando imágenes satelitales  
633 MERIS. *Instituto de Mar Del Perú*, 43(3), 242–251.

634 Reinart, A., & Kutser, T. (2006). Comparison of different satellite sensors in detecting  
635 cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment*,  
636 102(1–2), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.013>

637 Rodríguez-lópez, L., Duran-llacer, I., González-, L., Abarca-del-rio, R., Cárdenas, R.,  
638 Martínez-retureta, R., & Urrutia, R. (2020). Spectral analysis using LANDSAT  
639 images to monitor the chlorophyll-a concentration in Lake Laja in Chile.  
640 *Ecological Informatics*, 101183. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101183>

641 Ruiz-Verd, A., Jiménez, J. C., Lazzaro, X., Tenjo, C., Delegido, J., Pereira, M., Sobrino,  
642 J. A., & Moreno, J. (2016). Comparison of MODIS and Landsat-8 retrievals of  
643 Chlorophyll- A and water temperature over Lake Titicaca. *International*  
644 *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016-Novem*, 7643–7646.  
645 <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730993>

646 Serrano, L., Reina, M., Quintana, X. D., Romo, S., Olmo, C., Soria, J. M., Blanco, S.,  
647 Fernández-Aláez, C., Fernández-Aláez, M., Caria, M. C., Bagella, S., Kalettka, T.,  
648 & Pätzig, M. (2017). A new tool for the assessment of severe anthropogenic  
649 eutrophication in small shallow water bodies. *Ecological Indicators*, 76, 324–334.  
650 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.034>

651 Shi, K., Zhang, Y., Qin, B., & Zhou, B. (2019). Remote sensing of cyanobacterial  
652 blooms in inland waters: present knowledge and future challenges. *Science*  
653 *Bulletin*, 64(20), 1540–1556. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.07.002>

654 Vinçon-Leite, B., & Casenave, C. (2019). Modelling eutrophication in lake ecosystems:  
655 A review. *Science of the Total Environment*, 651, 2985–3001.

656 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.320>

657 Wang, L., Xu, M., Liu, Y., Liu, H., Beck, R., Reif, M., Emery, E., Young, J., & Wu, Q.  
658 (2020). Mapping freshwater chlorophyll-a concentrations at a regional scale  
659 integrating multi-sensor satellite observations with google earth engine. *Remote*  
660 *Sensing*, 12(20), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs12203278>

661

## 662 **XI. ANEXOS**

### 663 **Anexo 1.**

664 Operacionalización de variables

665

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Índice</b>
<b>Variables independientes</b>	Parámetros químicos (Eutrofización del lago)	Clorofila-a	mg/L
		Nitratos	mg/L
		Sulfatos	mg/L
<b>Variables dependientes</b>	Serie de tiempo de la Clorofila-a		Modelo de regresión lineal

666

667

668