

**UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA**

**DEL LAGO TITICACA**

**PRESENTADO POR:**

**MARIA DORIS CHUQUIMIA CARRASCO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PUNO – PERÚ**

**2021**

**UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS****FACULTAD DE INGENIERÍAS****ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL****TESIS****MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA  
DEL LAGO TITICACA****PRESENTADO POR:****MARIA DORIS CHUQUIMIA CARRASCO****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AMBIENTAL**

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

  
: \_\_\_\_\_  
M.Sc. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

PRIMER MIEMBRO

  
: \_\_\_\_\_  
M.Sc. MARLENE CUSI MONTESINOS

SEGUNDO MIEMBRO

  
: \_\_\_\_\_  
Dr. ESTEBAN ISIDRO LEON APAZA

ASESOR DE TESIS

  
: \_\_\_\_\_  
Mg. ELVIRA ANANÍ DURAND GOYZUETA

Área: Ciencias Naturales

Disciplina: Ciencias del Medio Ambiente

Especialidad: Gestión y Planes de Manejo Ambiental

Puno, 22 de diciembre de 2021.

**DEDICATORIA**

Mi tesis la dedico a Dios, por ser mi fuerza a mis hijos que son mis más grandes tesoros por ser mi motor y motivo de vida, a mis padres por ser mi soporte, también a mis grandes amistades que siempre me motivaron a lograr este propósito en mi vida, al universo por abrirme las puertas para alcanzar este sueño, a mí por la perseverancia y tesón para alcanzar este logro, pues sin ello no lo habría logrado. Tú bendición en cada momento de mi existencia es grande mi Dios.

Maria.

### AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Privada San Carlos, por brindarme una formación profesional para el desarrollo de mi región.
- A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.
- A los miembros del jurado calificador, al M.Sc. Julio Wilfredo Cano Ojeda, M. Sc. Marlene Cusi Montesinos y al Dr. Leon Apaza Esteban Isidro, por ser parte de esta investigación.
- A mi asesora Mg. Elvira Ananí Durand Goyzueta por brindarme el apoyo y la orientación para la culminación de esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE ANEXOS	9
GLOSARIO	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>14</b>
1.1.1. Problema principal	15
1.1.2. Problemas específicos	16
<b>1.2. ANTECEDENTES</b>	<b>16</b>
1.2.1. Antecedentes internacionales	16
1.2.2. Antecedentes nacionales	19
1.2.3. Antecedentes locales	21
<b>1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>22</b>
1.3.1. Objetivo general	22
1.3.2. Objetivos específicos	22
	3

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

<b>2.1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.1.1. Principios y fundamentos de teledetección	23
2.1.2. Satélite Landsat 8	28
2.1.3. Métodos de clasificación en percepción remota	37
<b>2.2. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>38</b>
<b>2.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>41</b>
2.3.1 Hipótesis general	41
2.3.2 Hipótesis específicas	41
<b>2.4. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>41</b>

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

<b>3.1. ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>43</b>
3.1.1. Morfometría	45
3.1.2. Clima	45
3.2.3. Importancia	45
<b>3.2. TAMAÑO DE MUESTRA</b>	<b>46</b>
3.2.1. Población	46
3.2.2. Muestra	46
<b>3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS</b>	<b>46</b>
3.3.1. Métodos	46

## CAPÍTULO IV

### EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

<b>4.1. Análisis exploratorio de la variable independiente: Bandas de color</b>	<b>57</b>
<b>4.2. Análisis exploratorio de la variable dependiente: Parámetros fisicoquímicos del agua</b>	<b>59</b>
<b>4.3. Modelos de Regresión Lineal</b>	<b>61</b>
4.3.1. Aplicación del modelo	65
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>71</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>80</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 01: Características de sensores del Satélite Landsat 8	28
Tabla 02. Puntos de monitoreo de la bahía del interior	50
Tabla 03: Puntos de monitoreo de la bahía de Puno	51
Tabla 04: Puntos de monitoreo del lago mayor	52
Tabla 05: Puntos de monitoreo de la laguna Huiñaimarca	54
Tabla 06: Análisis de correlación de Pearson	59
Tabla 07: Análisis de correlación de Pearson con datos reducidos	61
Tabla 08: Análisis de varianza para el modelo de regresión para OD	62
Tabla 09: Análisis de varianza para el modelo de regresión para el pH	63
Tabla 10: Intervalo del área distribuido de temperatura	66
Tabla 11: Intervalo del área Distribuido de oxígeno disuelto	67
Tabla 12: Intervalo del área distribuido de pH	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01:Componentes de un sistema de teledetección (Edison, 2014)	24
Figura 02: Ondas radioeléctricas	27
Figura 03: Vista satelital banda 1	31
Figura 04: Vista satelital banda 2	32
Figura 05: Vista satelital banda 3	33
Figura 06: Vista satelital banda 4	34
Figura 07: Vista satelital banda 5	35
Figura 08: Vista satelital banda 6	36
Figura 09: Vista satelital banda 7	36
Figura 10: Mapa de Ubicación del Lago Titicaca	44
Figura 11: Plataforma de previo registro de la plataforma USGS	47
Figura 12: Descarga de imágenes del área de estudio	48
Figura 13: Imagen satelital L8	49
Figura 14: Landsat 8 con corrección TOA	49
Figura 15: Codificación de los puntos de la bahía del interior	51
Figura 16: Codificación de los puntos de la bahía de Puno	52
Figura 17: Codificación de los puntos en el lago mayor	53
Figura 18: Codificación de los puntos de la laguna Huiñaimarca	54
Figura 19: Interpolación de datos de campo	56

Figura 20: Diagramas de cajas para las siete bandas de color	57
Figura 21: Diagramas de cajas para las siete bandas de color con datos reducidos	58
Figura 22: Diagramas de cajas para los parámetros del agua	59
Figura 23: Diagramas de dispersión para las bandas de colores y parámetros del agua	60
Figura 24: Modelo de regresión lineal para estimar el OD en función de la Banda 4	62
Figura 25: Modelo de regresión lineal para estimar el pH en función de la Banda 5	64
Figura 26: Distribución de temperatura	66
Figura 27: Distribución de oxígeno disuelto	68
Figura 28: Distribución del pH	70

## INDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia	81
Anexo 02: Matriz de datos reducida	82

**GLOSARIO**

- B Banda azul de Landsat 8 OLI.
- C Banda azul costera del Landsat 8 OLI.
- COD : Demanda química de oxígeno.
- ENVI Entorno para visualización de imágenes.
- G : Banda verde de Landsat 8 OLI
- GIS :Sistema de información Geográfica
- GPS :Sistema de Posicionamiento Global
- IR Radiación infrarroja.
- NASA : Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio
- NBR Proporción de quemado normalizada.
- NDMI Índice de humedad de diferencia normalizado.
- NDVI Índice de vegetación de diferencia normalizada.
- NDWI Índice de agua de diferencia normalizada.
- NIR : Banda de infrarrojos cercanos "Sensor de Landsat 8"
- OLI : Landsat Operational Land Imager "Sensor de Landsat 8"
- SPSS : Paquete estadístico para ciencias sociales.
- SWIR 1 : Primera banda de infrarrojos de onda corta "Landsat 8 OLI".
- SWIR 2 : Segunda banda de infrarrojos de onda corta "Landsat 8 OLI"
- TIRS Sensor de infrarrojos térmico.

## RESUMEN

En la presente investigación se realizó un modelo lineal para la observación de oxígeno disuelto, pH del lago Titicaca, realizando también la distribución de la tempera superficial, utilizando como base la información de muestreo de campo generada por la Autoridad Administrativa del Agua del Titicaca del año 2018 durante el mes de Julio, contando con un total de 43 puntos de muestreo. Dentro de los resultados de oxígeno disuelto tomando en consideración el decreto supremo 004-2017-MINAM, más del 90 % del área de estudio contiene valores mayores a 6 mg/l, lo cual cuentan con valores muy aceptables según el ECA para Agua y establecen disposiciones complementarias según el decreto supremo N° 004-2017-MINAM; siendo estos parámetros aceptables para aguas superficiales, que pueden ser potabilizadas con desinfección, con tratamiento convencional y para aguas superficiales destinadas para recreación con contacto primario y cultivos, teniendo el valor de 0.25 se puede decir que el 25% de la variabilidad del oxígeno disuelto es explicado por la B4, encontrándose los valores menores a 6 mg/l dentro de la bahía interior de Puno, como también dentro de la Reserva Nacional del Titicaca. Más del 95 % del área de estudio cuenta con valores normales de pH, teniendo en R2 de 0.225, el 22% de la variabilidad del pH es explicado por la B5 el infrarrojo cercano, presentando valores altos dentro de la bahía interior del lago Titicaca y dentro de los cuerpos de agua que se encuentran alrededor de los totorales. Así como la temperatura alrededor del 90% de la superficie del área de estudio contiene valores normales los cuales se encuentran dentro del promedio, teniendo como temperatura promedio anual 10 °C, también se observaron temperaturas bajas entre 6 – 8 °C, que se encuentra dentro de la Reserva Nacional del Titicaca.

**Palabras clave:** Calidad, agua, percepción, remota, monitoreo.

## ABSTRACT

In the present investigation, a linear model was carried out for the observation of dissolved oxygen, pH of Lake Titicaca, also carrying out the distribution of the surface temperature, using as a basis the field sampling information generated by the Titicaca Water Administrative Authority of the year 2018 during the month of July, with a total of 43 sampling points. Within the results of dissolved oxygen taking into consideration the supreme decree 004-2017-MINAM, more than 90% of the study area contains values greater than 6 mg / l, which have very acceptable values according to the ECA for Water and highlights complementary provisions according to Supreme Decree No. 004-2017-MINAM; These parameters being acceptable for surface waters, which can be made potable with disinfection, with conventional treatment and for surface waters intended for recreation with primary contact and crops, having the value of 0.25 it can be said that 25% of the variability of dissolved oxygen is explained by B4, with values below 6 mg / l found within the interior bay of Puno, as well as within the Titicaca National Reserve. More than 95% of the study area has normal pH values, with R2 of 0.225, 22% of the pH variability is explained by the near infrared B5, presenting high values within the interior bay of Lake Titicaca and within the bodies of water that are around the reeds. Just as the temperature around 90% of the surface of the study area contains normal values which are within the average, having an annual average temperature of 10 ° C, low temperatures between 6 - 8 ° C were also observed, which is found within the Titicaca National Reserve.

**Keywords:** Quality, water, perception, remote control, monitoring.

## INTRODUCCIÓN

El monitoreo y la evaluación es una necesidad fundamental del Programa de Calidad del Agua y un componente integral de la protección de la salud humana y el medio ambiente. Un programa de monitoreo y evaluación bien diseñado define los problemas de calidad del agua, caracteriza los problemas existentes y emergentes, determina la magnitud y extensión geográfica de las condiciones del agua, proporciona la base para diseñar y operar programas de prevención y reducción de la contaminación, evalúa la efectividad y cumplimiento de los programas de calidad del agua e identifica tendencias en la calidad del agua a lo largo del tiempo. Deterioro de la calidad del agua que afecta negativamente al agua del lago en un grado que inhibe o impide algún uso beneficioso del agua. Dado que un problema de calidad del agua normalmente es el resultado de los efectos nocivos de uno o más usos humanos, pueden ocurrir conflictos importantes entre usuarios o usos en los sistemas lacustres sujetos a usos múltiples (Abdullah, 2016).

La importancia de los reservorios de agua dulce que sostienen grandes áreas urbanas como el lago Titicaca, aumenta día a día, por el crecimiento poblacional. El objetivo principal de este documento es enfatizar que el mapeo de la calidad del agua en el lago Titicaca es muy importante no solo para la investigación sino también para los habitantes de la región de Puno. Destacando el método de mapeo, mediante el uso de imágenes satelitales de resolución multiespectral y la correlación con datos de muestreo.

Las propiedades de reflectancia del agua dependen de la concentración y el carácter de los sedimentos en suspensión, el fitoplancton y la materia orgánica disuelta. Los sensores a bordo de los satélites pueden medir la cantidad de radiación solar en varias longitudes de onda reflejada por el agua superficial dependiendo de su resolución espectral, que puede correlacionarse con los parámetros de calidad del agua que si bien no son

estandarizadas sin embargo se puede generar formular previa adaptación de los datos recopilados en campo, constituyendo un medio alternativo para estimar la calidad del agua. Dentro de la investigación se observa que existe relación entre diferentes bandas con respecto al Oxígeno disuelto, pH. Teniendo un R cuadrado no mayor 0.3, observando una distribución espacial de diferentes rangos de los parámetros de OD, pH y temperatura contrastando los resultados con el ECA.

Presenta los siguientes capítulos:

En el Capítulo I, se puntualiza el planteamiento del problema, antecedentes y objetivos de la investigación.

En el Capítulo II, se abordan los aspectos teóricos de la teledetección, el satélite Landsat 8, los métodos de clasificación en percepción remota, el marco conceptual e hipótesis de la investigación.

En el capítulo III, se describe la metodología seguida.

En el capítulo IV, se precisa la exposición y análisis de los resultados obtenidos.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La dinámica de crecimiento poblacional se presenta como la mayor en toda nuestra historia, la población mundial crece a un ritmo de unos 80 millones de personas al año (UNESCO, 2015), el cual repercute de manera importante en el uso de los recursos hídricos y energéticos (PNUD, 2015). El crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización y el aumento de la producción y el consumo han generado una demanda de agua dulce cada vez mayor (UNESCO, 2015). Cada vez es mayor la información sobre el deterioro de la calidad de agua disponible para el consumo.

Esta situación no es ajena al Perú debido a que en las últimas décadas se reportan problemas de contaminación en diferentes fuentes de agua dulce como ríos y lagunas, tan solo en el año 2015 se han dado reporte de 30 ríos y 6 lagunas con alto nivel de contaminación (Federico, 2015). Los departamentos de Madre de Dios, Huancavelica, Puno y Cusco presentan mayores problemas ambientales por productos derivados de la minería (MONGABAY, 2018).

El Departamento de Puno cuenta con una de los mayores atractivos del Perú, el lago Titicaca que por su singularidad y belleza paisajística atrae a una gran cantidad de turistas, por sus características físicas y biológicas presenta grandes cualidades para el desarrollo de la vida, albergando una variedad de especies de flora y fauna. Además presenta uno de los mayores problemas de contaminación en la región por la introducción de aguas residuales, ya que las poblaciones aledañas no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, residuos industriales, mineros por la falta de un control. Sin embargo, según los estudios realizados de monitoreo de calidad de agua en el año 2016, que consistió en 43 puntos, se llegó a la conclusión que en general las aguas del lago Titicaca son de buena calidad a excepción de cinco ecosistemas de la bahía del interior de Puno, la desembocadura de los ríos Coata y Ramis (Agencia Peruana de Noticias Andina, 2016).

Las evaluaciones de calidad de agua realizadas en el lago Titicaca son limitadas a la interpretación de los resultados de monitoreo, dichos monitoreos muestran la concentración de parámetros biológicos, físicos y químicos obviando variabilidad espacial y temporal. A diferencia del método tradicional, las técnicas de percepción remota pueden ser utilizadas como una herramienta complementaria en el monitoreo, dándonos una comprensión y visualización más amplio sobre el tema y área de estudio, focalizando zonas más afectadas por la contaminación, sirviendo como información base para la planificación de estrategias de recuperación y remediación ambiental.

### **1.1.1. Problema principal**

¿Se puede monitorear la calidad de agua del Lago Titicaca mediante percepción remota?

### 1.1.2. Problemas específicos

- ¿La temperatura superficial distribuida en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota es uniforme?
- ¿Cuáles son los niveles de oxígeno disuelto en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota?
- ¿Cuáles son los niveles de pH en mayor proporción en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota?

## 1.2. ANTECEDENTES

### 1.2.1. Antecedentes internacionales

Monitoreo de la calidad del agua mediante teledetección en apoyo de la Directiva marco del agua de la UE (DMA): un estudio de caso en el golfo de Finlandia: es un monitoreo de la calidad de agua en Finlandia según describe que hay pocas discusiones sobre el monitoreo de la calidad del agua utilizando tecnología de teledetección en apoyo de la política y la legislación del agua en Finlandia. En este estudio, se presenta el monitoreo de la calidad del agua utilizando teledetección en el Golfo de Finlandia, y se centra en la distribución espacial de la información sobre la calidad del agua a partir de observaciones satelitales en apoyo de la política del agua mediante un estudio de caso de concentraciones de nitratos en aguas superficiales. Además, se describe brevemente los instrumentos que utilizan un sistema de distritos de cuencas hidrográficas, destacando la importancia de la gestión integrada de los recursos hídricos y las cuencas hidrográficas en la DMA, y discutimos el papel del monitoreo de la calidad del agua mediante sensores remotos en la implementación de la política del agua en Finlandia (Chen, Li, Sun, y Zhang, 2017).

Análisis de datos satelitales Landsat para monitorear los parámetros de calidad del agua en lago Ten Mile, Oregon: Investigación donde se observó que la salud de los lagos Ten Mile del norte y del sur en la costa de Oregón ha disminuido desde la introducción de especies invasoras de peces y plantas en la década de 1920. Los lagos están ahora en la lista de la Ley Federal de Agua Limpia de cuerpos de agua deteriorados debido, en parte, a la falta de oxígeno disuelto y las floraciones de algas peligrosas que ocurren durante junio a septiembre. En el informe se discutió la posibilidad de detectar y monitorear estas floraciones usando satélites, midiendo el color de la superficie del agua. Los resultados muestran una buena correlación lineal entre la turbidez y la luminosidad, que están inversamente relacionadas en los lagos dominados por algas. Además, se obtuvo una correlación entre biovolumen y reflectancia. Se observaron patrones espaciales de turbidez y biovolumen, con grandes concentraciones observadas en áreas lacustres con grandes tiempos de residencia (Waxter, 2014).

Mapeo de la calidad del agua de la laguna Brullus mediante sensores remotos e información geográfica: El estudio tiene como objetivo utilizar la teledetección y un sistema de información geográfica (SIG) para mapear las condiciones de la superficie de la laguna Burullus, Egipto, como un indicador de la contaminación del agua. Se ha aplicado la distribución espacial de materia en suspensión, nitrógeno, fósforo, clorofila, oxígeno disuelto, temperatura del agua, salinidad, profundidad, plomo, cobre, cadmio, arcilla y carbono orgánico sedimentario. Una imagen Landsat del sensor Enhanced Thematic Mapper plus (ETM +) adquirido en junio de 2006 se procesó en función de una banda por banda, así como un racionamiento de banda. Se generaron mapas cartográficos en función de la correlación entre los parámetros medidos y los valores de radiancia de la imagen ETM +. Los parámetros no correlacionados con los datos de la imagen de satélite se han procesado mediante el análisis espacial y la técnica de

interpolación utilizando GIS. Los resultados mostraron que las secciones este y sur de la laguna, que reciben aguas residuales de drenaje, están más contaminadas que las secciones norte y oeste de la laguna. El estudio confirma que la teledetección junto con el SIG podría permitir un esquema integrado para cartografiar la calidad del agua (Hereher, Salem, y Darwish, 2010).

Aplicación de redes profundas a la detección de derrames de petróleo mediante imágenes de radar de apertura sintética polarimétrica: En este estudio se menciona que la teledetección por radar de apertura sintética polarimétrica (SAR) proporciona una herramienta excepcional en la detección y clasificación de derrames de hidrocarburos, por sus ventajas para distinguir entre aceites minerales y biogénicos. En este documento, los algoritmos de aprendizaje profundo como el auto codificador apilado y la red de creencias profundas son aplicados para optimizar los conjuntos de características de polarimetría y reducir la dimensión de la característica a través de un entrenamiento previo no supervisado por capas. Se llevó a cabo un experimento con la imagen SAR tetrapolarimétrica RADARSAT-2 obtenida durante el ejercicio noruego de petróleo sobre agua de 2011, en el que se analizaron minerales verificados, emulsiones y manchas biogénicas. Los resultados muestran que se logró la clasificación de derrames de petróleo por redes profundas superó tanto la máquina de vectores de soporte como las redes neuronales artificiales tradicionales con configuraciones de parámetros similares (Chen et al., 2017).

Detección de contaminación de agua con imagen de cosmovisión 2 de alta resolución en la ciudad de Oruro, Bolivia: La región de Oruro fue uno de los mayores reservorios de estaño del mundo. Esta región aún conserva su potencial minero con la extracción de plomo, plata, zinc y oro al aire libre. Para la minería a cielo abierto se utiliza en el proceso de lixiviación con cianuro de sodio en grandes cantidades de agua. Este proceso ha

contribuido a la salinización y contaminación del agua en la región. Esta región está ubicada en la cuenca endorreica del lago Titicaca en el altiplano boliviano. Con imágenes de alta resolución del satélite WorldView2 ahora es posible detectar estas lagunas pudiendo también estudiar la radiometría de la cobertura de agua en el espectro óptico de 8 bandas. Al estudiar la banda 8 (NIR 2) en los estanques de lixiviación alrededor de la ciudad de Oruro, se pudo detectar el grado de salinidad y abordar el filtrado que puede contaminar el agua dulce. Desde la instalación de la Compañía Minera Inti Raymi, 1980, se han discutido varias hipótesis para evitar la fuga de agua contaminada de las minas a las aguas del endorreico Altiplano. La aplicación de alta resolución de imagen y banda de longitud de onda 8 de WorldView2 está comenzando a dar algunas pautas para detectar y monitorear el grado de contaminación del agua consumida en la ciudad de Oruro (Torrico y Nuñez, 2010)

### **1.2.2. Antecedentes nacionales**

Procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5 Tm, 7 Etm+, 8 Oli y los Índices de vegetación, para la caracterización de las coberturas vegetales en los Distritos de Cajamarca: En este estudio concluyeron que los índices de vegetación procesados en las imágenes satelitales Landsat 5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI presentan diferencias significativas, es decir entre los años 1995-2010 observaron que el NDVI, SAVI y MSI la diferencia es de tipo negativo; mientras que en el periodo 2010-2018 los índices presentan diferencias. Lo cual influye en las diferentes coberturas de los distritos monitoreados. Las imágenes satelitales procesadas confirman las diferencias significativas, de manera especial en los distritos de Cajamarca, Encañada y Los Baños del Inca (Rojas y Gregorio, 2019).

Estudio de la teledetección y caracterización fisicoquímica del humedal "El Cascajo", Santa Rosa, Chancay- Lima, Perú: Así mismo también hicieron estudio de la

teledetección y caracterización fisicoquímica del humedal, donde utilizaron el método mediante la caracterización de parámetros fisicoquímicos y el uso de la técnica de teledetección. Se analizan parámetros de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, sólidos totales, pH, profundidad, transparencia, NO<sub>3</sub> y Nitrógeno total (NT) mediante análisis realizados in situ y de procesamiento en laboratorio según la necesidad; utilizando imágenes satelitales provenientes de los sensores del satélite Landsat de los años 2005, 2011 y 2015. En la cual llegaron a una conclusión, de que el humedal se encuentra en un estado de eutrofización debido a la influencia de la actividad antrópica, vertimiento de alcantarilla y sobrepastoreo en la zona de influencia (Basan, Paniagua, Valero, y Duran, 2017).

Caracterización Ecohidrológica de Humedales Alto Andinos Usando Imágenes de Satélite Multitemporales en la Cabecera de Cuenca del Río Santa, Ancash, Perú: En la investigación se concluyó que en la cuenca alta del río Santa existe una gran extensión, que representa el 25% de la extensión de la cuenca de estudio. De este 25% de Humedales Alto Andinos, el 66% fueron clasificados como perennes y el 34% como temporales. Así mismo los resultados demuestran la utilidad de los datos obtenidos de satélites de observación terrestre como Landsat, MODIS y TRMM, para generar información sobre Humedales Alto Andinos, de manera que contribuya a su conservación y protección. Aunque con esta metodología es posible determinar Humedales Alto Andinos en base al tamaño del píxel, se recomienda usar como mínimo 9 píxeles como MUC, que equivaldría a 0.8 ha y 56 ha para Landsat y MODIS respectivamente (Garcia y Otto, 2015).

Análisis espacio-temporal del comportamiento de la clorofila a mediante imágenes satelitales en la represa aguada blanca para el año 2017: La investigación propuso estudiar la variabilidad y comportamiento de la "Clorofila A" mediante Imágenes Satélite

Sentinel 2A la Represa Aguada Blanca. La metodología aplicada fue basada en la relación de parámetros físico químicos de “clorofila A” que fueron medidos in situ en el embalse en tres zonas (Fluvial, Intermedia, Lacustre) durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre del año 2017 con la sonda Hydrolab DS5; con imágenes satélite Sentinel 2A del portal de datos de la Agencia espacial Europea, estos datos satelitales fueron tomados con mayor cercanía de la fecha de datos del área de estudio, para luego utilizar técnicas estadísticas con el software statgraphics, relacionar información satelital con datos in situ generando algoritmos representantes para cada mes de estudio. Finalmente se analizó estado trófico mediante el índice la clasificación del grado de eutrofización según la organización para la cooperación y el desarrollo económico (OCDE) obteniendo como resultado mapas imagen de la variabilidad espacio-temporal de Clorofila-a (Bellido y Alex, 2019).

### **1.2.3. Antecedentes locales**

Identificación del área afectada por Lemna en la Bahía de Puno utilizando procesamiento digital de imágenes: En el estudio llegaron a la conclusión de que la programación que se utilizó en los cuadros y límites obtenidos para los valores RGB para Lemna y agua del Lago Titicaca utilizando MatLab en su herramienta Image Processing Toolbox y lograr cuantificar la zona afectada por Lemna en la bahía interior de Puno. Esta cuantificación se logra gracias a la escala que nos brinda la imagen guardada de Google Earth primeramente obteniendo en pixeles y luego en área. Así mismo, la identificación se realiza píxel por píxel y se realiza un cambio de color al área afectada de Lemna para que sea mejor visualizada así también como el agua del lago Titicaca es cambiada de color y obteniendo los resultados para cada zona (Torres Mamani, 2016).

Implementación de algoritmos genéticos para la segmentación de imágenes satelitales por conglomerados de la Región Puno – 2013: La investigación llegó a la conclusión de que la prueba estadística realizada con 28 muestras de imágenes satelitales, se observó que el algoritmo AGKM es ligeramente superior al algoritmo K-medias y Al implementarse el AGKM en Matlab, esto permitió encontrar un número de conglomerados adecuado para utilizar como variable de inicialización en el algoritmo K-medias, y así mejorar el proceso de segmentación en las imágenes satelitales. Finalmente, con cualquier otro algoritmo de conglomeración, el resultado de K-medias depende del conjunto de datos para satisfacer las necesidades del algoritmo, también influye la configuración inicial del algoritmo como el especificar adecuadamente el número de conglomerados inicial con el que comienza a trabajar (Apaza Tito, 2014).

### **1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Monitorear la calidad del agua del lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar la distribución de la temperatura superficial del lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota.
- Determinar la distribución de los niveles de oxígeno disuelto en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota.
- Determinar la distribución de los niveles de pH en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1. MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1. Principios y fundamentos de teledetección

La teledetección es una herramienta de aparición relativamente reciente, la cual permite adquirir datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas aeroespaciales como aviones, satélites, radares y naves espaciales, entre otros (Chuvienco, 1995). Con esta técnica se obtiene información de diferentes partes del espectro electromagnético, propiedades de fenómenos, objetos o materiales, a través de un dispositivo tecnológico sensible que permite que ocurra una interacción entre el terreno y un sensor sin contacto físico y bajo vigilancia (OAS, 1998).

**Componentes de un sistema de Teledetección:** Un sistema de teledetección incluye los siguientes elementos:

- **Fuente de energía o iluminación (A):** La fuente de energía que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético

emitido por este, conocido como teledetección activa. La fuente de energía más importante es la energía solar (Bustos, 2021).

- **Radiación y la atmosférica (B):** Es el proceso y el medio en el que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre (Bustos, 2021).
- **Interacción con la superficie terrestre (C):** La cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelo, agua y construcciones, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas (Bustos, 2021).
- **El sistema Sensor (D):** Compuesto por el sensor propiamente dicho y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y enviarla directamente al sistema de su recepción (Bustos, 2021).

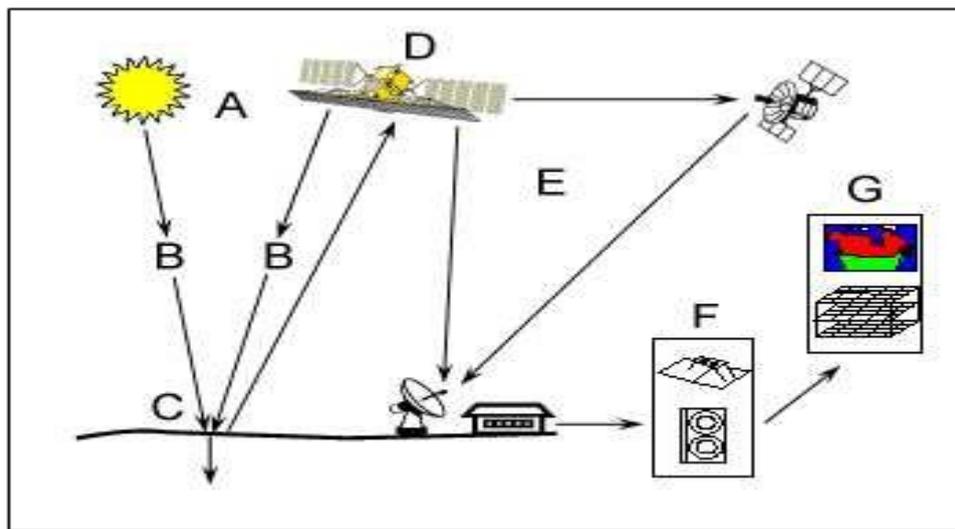


Figura 01:Componentes de un sistema de teledetección (Edison, 2014).

**El espectro electromagnético:** Es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas (Kleiner y C. C., 2018). El espectro electromagnético se puede organizar de acuerdo con la frecuencia correspondiente de las ondas que lo

integran, o análogamente, de acuerdo con sus longitudes de onda. Hacia un extremo del espectro se agrupan las ondas de frecuencias más bajas y longitudes de onda más largas, como las correspondientes a frecuencias de sonidos que puede percibir el oído humano, mientras que en el otro extremo se agrupan las ondas más cortas y de mayor frecuencia en Hertz, como las pertenecientes a las radiaciones gamma y los rayos cósmicos.

**Los rayos gamma:** tienen las longitudes de onda más cortas y las frecuencias más altas conocidas. Son ondas de alta energía capaces de viajar a larga distancia a través del aire y son las más penetrantes (Kleiner y C. C., 2018). Los rayos gamma constituyen un peligro desde el punto de vista de la radiación para todo el cuerpo. Pueden penetrar fácilmente las barreras que detienen a las partículas alfa y beta (OA US EPA, 2017).

**Los rayos X:** tienen longitudes de onda más largas que los rayos gamma, pero menores que la radiación ultravioleta y por lo tanto su energía es mayor que la de estos últimos. Se utilizan en diversas aplicaciones científicas e industriales, pero principalmente se utilizan en la medicina como la radiografía. Consisten en una forma de radiación ionizante y como tal pueden ser peligrosos (Kleiner y C. C., 2018).

Los rayos X y los rayos gamma tienen las mismas propiedades básicas pero provienen de partes diferentes del átomo. Los rayos X son emitidos por procesos externos al núcleo (OA US EPA, 2017).

**La radiación ultravioleta (UV):** se define como la porción del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible (Kleiner y C. C., 2018). Se entiende por radiación ultravioleta la radiación cuya longitud de onda es menor que la de la luz visible pero mayor que la de los rayos x, es decir, varía entre los 400 y 100 nm. La fuente más habitual de radiación ultravioleta es el sol, aunque también se puede conseguir

artificialmente mediante lámparas UV. La radiación ultravioleta se divide en tres rangos: UVA, UVB y UVC. Todos ellos están considerados como probables cancerígenos para el hombre (GreenFacts, 2007).

**La luz visible:** —también espectro visible— La luz es el conjunto de radiaciones electromagnéticas capaces de excitar la retina humana y crear la sensación de visión. Como magnitud física es la energía radiante de longitudes de onda comprendidas entre los 380 nm y los 770 nm del espectro electromagnético (LUCES, 2014).

**La radiación infrarroja (IR):** —también radiación térmica— es la parte del espectro electromagnético que se encuentra entre la luz visible y las microondas. La fuente natural más importante de radiación infrarroja es el Sol (Kleiner y C. C., 2018). Los cuerpos calientes emiten radiación infrarroja, propiedad que tiene muchas aplicaciones en teledetección, medicina y astronomía. La zona infrarroja del espectro, se subdivide en tres regiones: infrarrojo cercano, medio y lejano o térmico (Vivancos y Llastarri, 2005).

**Las ondas radioeléctricas:** tienen longitudes de onda largas que varían unos pocos centímetros a miles de kilómetros de longitud. Sus principales usos son en la televisión, los teléfonos móviles y las comunicaciones por radio (Kleiner y C. C., 2018).

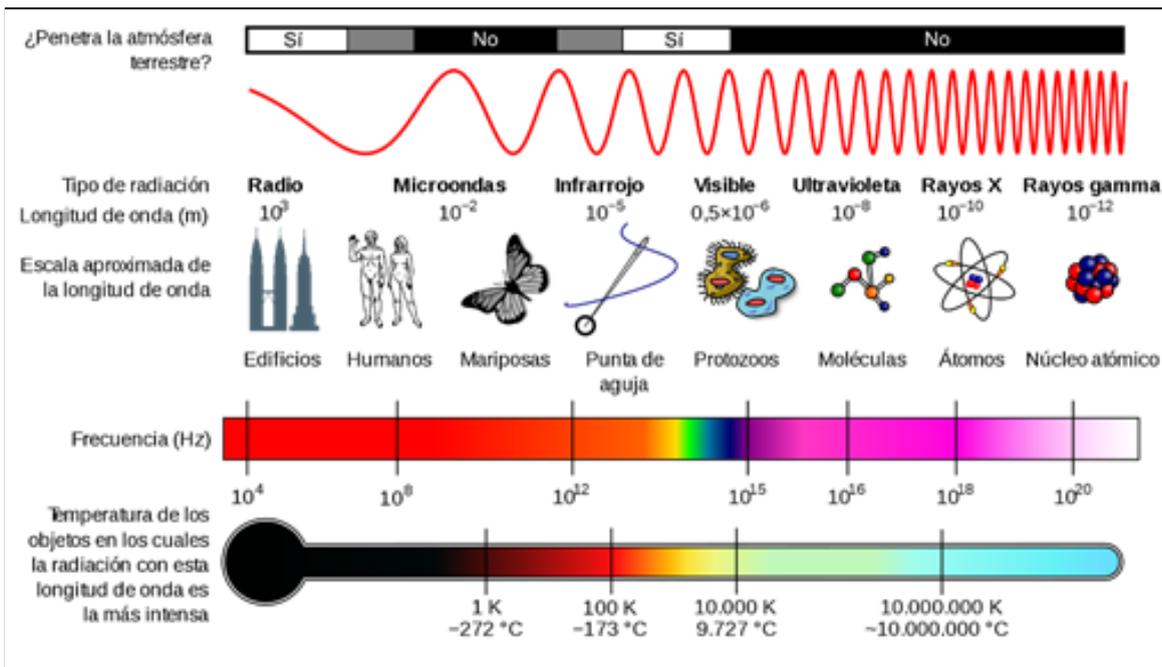


Figura 02: Ondas radioeléctricas (Wikipedia, 2004)

### MISIÓN LANDSAT

Desde 1972, la serie conjunta de satélites de observación de la Tierra Landsat del Servicio Geológico de la NASA y los EE. UU. Ha adquirido continuamente imágenes de la superficie terrestre, proporcionando datos ininterrumpidos para ayudar a los administradores de la tierra y los legisladores a tomar decisiones informadas sobre los recursos naturales y el medio ambiente (Fact Sheet, 2020).

La misión Landsat ofrece diferentes imágenes satélite acotadas a momentos temporales y bajo resoluciones de pixel diferente. Desde la misión Landsat 1, hasta la actual Landsat 8, existe un repertorio histórico de lo más variado. En función de la franja temporal de análisis, dispones de las siguientes misiones Landsat (Gis&Beers, 20220).

- Landsat 1: Julio 1972-enero 1978
- Landsat 2: enero 1975-febrero 1982
- Landsat 3: marzo 1978-marzo 1983

- Landsat 4: Julio 1982-diciembre 1993
- Landsat 5: enero 1984-enero 2013
- Landsat 7: enero 1999-Actualidad
- Landsat 8: abril 2013-Actualidad

### 2.1.2. Satélite Landsat 8

Lanzado el 11 de febrero de 2013, este satélite contiene dos sensores: el Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI) y un sensor infrarrojo térmico (TIRS). Teniendo un total de 11 bandas, conteniendo 7 bandas multiespectrales, un pancromático y dos térmicas, actualmente se encuentra operativo (Barbier, 2018). Las imágenes satelitales de 4, 5, 7 y 8 tienen una resolución de 30 m. lo cual permite una escala de trabajo uniforme de 1: 100,000.

Tabla 01: Características de sensores del Satélite Landsat 8

Sensor	Número de banda	Nombre de banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución (m)	Aplicaciones de banda
OLI	1	Coastal	0.43 - 0.45	30	Estudios costeros y de aerosoles
OLI	2	Blue	0.45 - 0.51	30	Mapeo batimétrico, distinguiendo el suelo de la vegetación y la vegetación caducifolia de la de coníferas
OLI	3	Green	0.53 - 0.59	30	Enfatiza la vegetación máxima, que es útil para evaluar el vigor de la planta
OLI	4	Red	0.63 - 0.67	30	Discrimina las pendientes de la vegetación
OLI	5	NIR	0.85 - 0.88	30	Enfatiza el contenido de biomasa y las costas.

OLI	6	SWIR 1	1.57 - 1.65	30	Discrimina el contenido de humedad del suelo y la vegetación; penetra nubes delgadas
OLI	7	SWIR 2	2.11 - 2.29	30	Capacidad mejorada para rastrear el contenido de humedad del suelo y la vegetación y la penetración de nubes delgadas
OLI	8	Pan	0.50 - 0.68	15	Resolución de 15 metros, definición de imagen más nítida
OLI	9	Cirrus	1.36 - 1.38	30	Detección mejorada de la contaminación por nubes cirrus
TIRS	10	TIRS 1	10.60 - 11.19	30 (100)	Resolución de 100 metros, mapeo térmico y humedad del suelo estimada
TIRS	11	TIRS 2	11.50 - 12.51	30 (100)	Resolución de 100 metros, mapeo térmico y humedad del suelo estimada

FUENTE: (NASA, 2017)

### BANDAS DE LANDSAT 8

Landsat 8 mide diferentes rangos de frecuencias a lo largo del espectro electromagnético, un color, aunque no necesariamente un color visible para el ojo humano. Cada rango se llama banda y Landsat 8 tiene 11 bandas (Landsat 8 Bands, 2015).

**Banda 1:** Siente azules profundos y violetas. La luz azul es difícil de recolectar del espacio porque se dispersa fácilmente por pequeños trozos de polvo y agua en el aire, e incluso por las propias moléculas de aire. Esta es una de las razones por las que las cosas muy distantes (como las montañas en el horizonte) se ven azuladas y el cielo es

azul. Así como vemos mucho azul brumoso cuando miramos hacia el espacio en un día soleado, Landsat 8 ve el cielo debajo de él cuando nos mira a través del mismo aire. Esa parte del espectro es difícil de recopilar con suficiente sensibilidad para ser útil, y la Banda 1 es el único instrumento de este tipo que produce datos abiertos con esta resolución, una de las muchas cosas que hacen que este satélite sea especial. También se le llama banda costera / de aerosoles, por sus dos usos principales: obtener imágenes de aguas poco profundas y rastrear partículas finas como polvo y humo. Por sí mismo, su salida se parece mucho a la de la Banda 2 (azul normal), pero si las contrastamos y resaltamos áreas con un azul más profundo, podemos ver diferencias (Landsat 8 Bands, 2015).

Es útil para obtener imágenes de aguas poco profundas y rastrear partículas atmosféricas finas como polvo y humo. Dado que el agua absorbe y dispersa la luz, los océanos y los lagos tienden a verse oscuros o carecer de detalles en las imágenes de satélite, especialmente en las aguas cargadas de sedimentos cerca de las costas. La banda 1 refleja azules, violetas y muestra sutiles diferencias en el color del agua; estos cambios en la intensidad del color pueden indicar lo que se mezcla en el agua. Los científicos han utilizado la banda costera para monitorear las concentraciones de clorofila y los sedimentos suspendidos en el agua, así como la proliferación de fitoplancton y algas. Esta banda también es útil para rastrear y estimar la concentración de partículas finas de aerosol, como humo y neblina, en la atmósfera (Barbier, 2018).

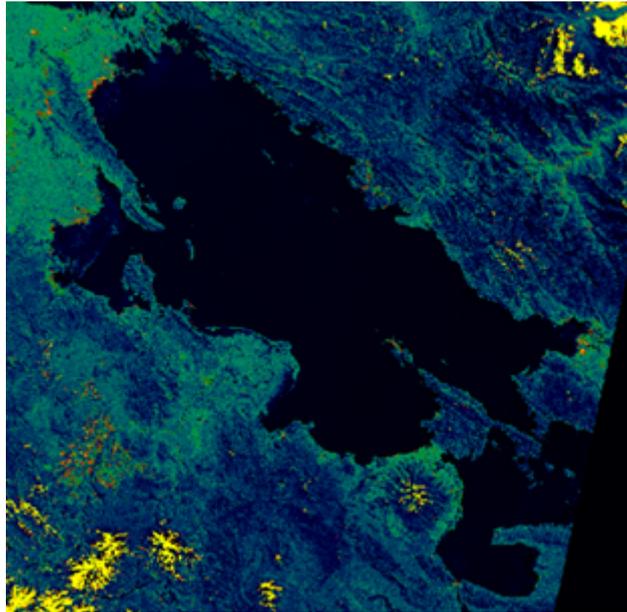


Figura 03: Vista satelital banda 1

Presenta valores bajos en los cuerpos de agua a diferencia de la cobertura terrestre y los nevados presentan los valores más altos. Dentro de los valores de reflectancia en los cuerpos de agua los valores más altos de reflectancia se presentan en la laguna interior de Puno así también en la zona Norte del lago Titicaca.

**Banda 2:** Presenta una gran penetración en cuerpos de agua con elevada transparencia, permitiendo estudios batimétricos. Sufre absorción por la clorofila y los pigmentos fotosintéticos auxiliares (carotenoides). Presenta sensibilidad a plumas de humo originadas por quemaduras o por actividad industrial. Puede presentar atenuación por la atmósfera (Landsat 8 Bands, 2015).

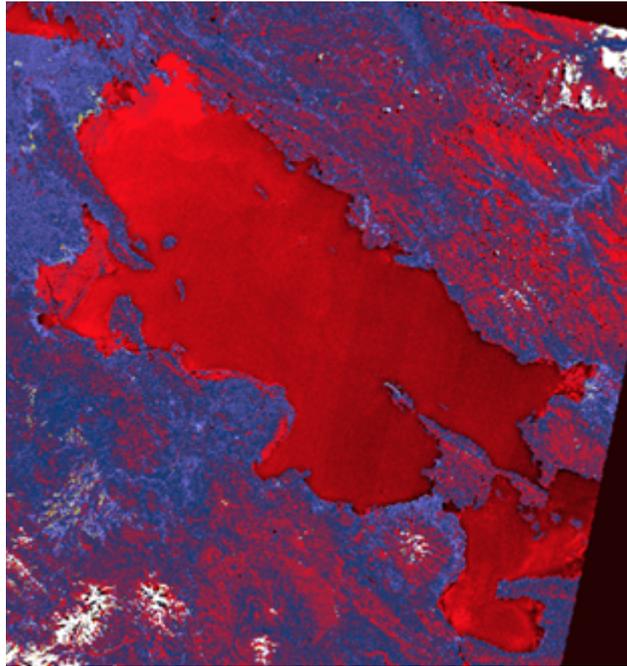


Figura 04: Vista satelital banda 2

Los valores de reflectancia de la banda azul responden de manera directamente proporcional a la banda costal, más tiene propias características. Describiendo el área de estudio, presenta valores altos de reflectancia en la bahía de Puno como también en la zona norte del lago y en algunas partes del litoral.

**Banda 3:** Presenta gran sensibilidad a la presencia de sedimentos en suspensión, posibilitando su análisis en lo que se refiere a cantidad y calidad. Buena penetración en cuerpos de agua (Landsat 8 Bands, 2015).

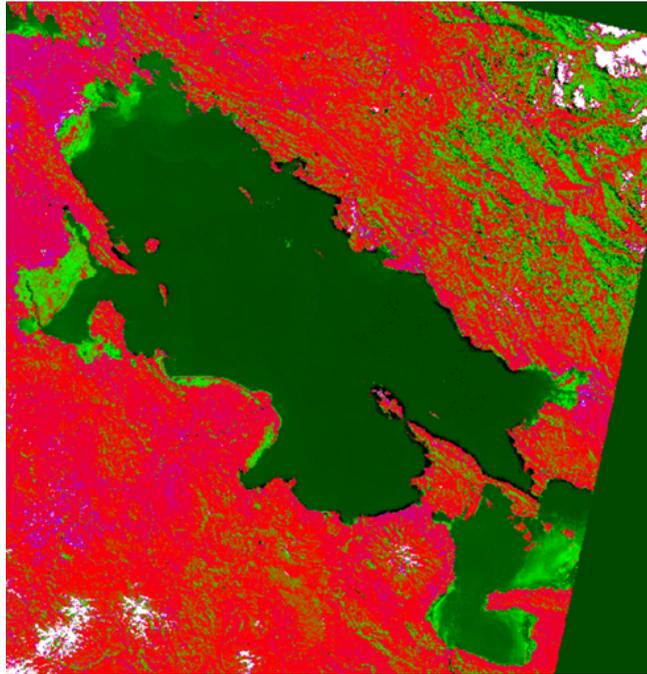


Figura 05: Vista satelital banda 3

Los valores de reflectancia corresponden a la longitud de onda de 0.53 – 0.59 el cual enfatiza el vigor de las plantas, más dentro de cuerpos de agua presentan valores de reflectancia en la bahía de puno como en la zona norte, probablemente sea por la presencia de sólidos suspendidos.

**Banda 4:** La vegetación verde, densa y uniforme presenta una gran absorción, aparece oscura y con buen contraste con las áreas sin vegetación (por ejemplo: suelo expuesto, carreteras y áreas urbanas). Presenta un buen contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (por ejemplo: campo, sabana y bosques). Permite analizar la variación litológica en regiones con poca cobertura vegetal. Permite mapear el drenaje a través de la visualización de los bosques de galería y los cursos de los ríos en regiones con poca cobertura vegetal. Es la banda más utilizada para delimitar las manchas urbanas, incluyendo la identificación de nuevas áreas urbanas. Permite la identificación de áreas agrícolas (Landsat 8 Bands, 2015).

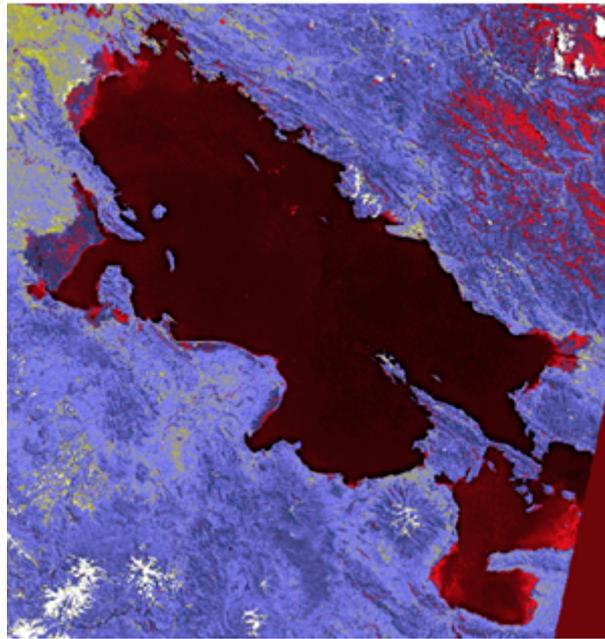


Figura 06: Vista satelital banda 4

A pesar que presenta gran absorción en cuerpos acuáticos, Los valores de reflectancia dentro del lago Titicaca en el centro del lago son mucho menores que la parte del litoral, sobre todo de la parte de la bahía interior del lago Titicaca y la zona sur el cual puede observarse de tonalidad roja.

**Banda 5:** Mide el infrarrojo cercano o NIR. Esta parte del espectro es especialmente importante para la ecología porque las plantas sanas lo reflejan: el agua de sus hojas dispersa las longitudes de onda hacia el cielo. Al compararlo con otras bandas, obtenemos índices como NDVI, que nos permiten medir la salud de las plantas con mayor precisión que si solo observamos el verdor visible (NASA, 2016)

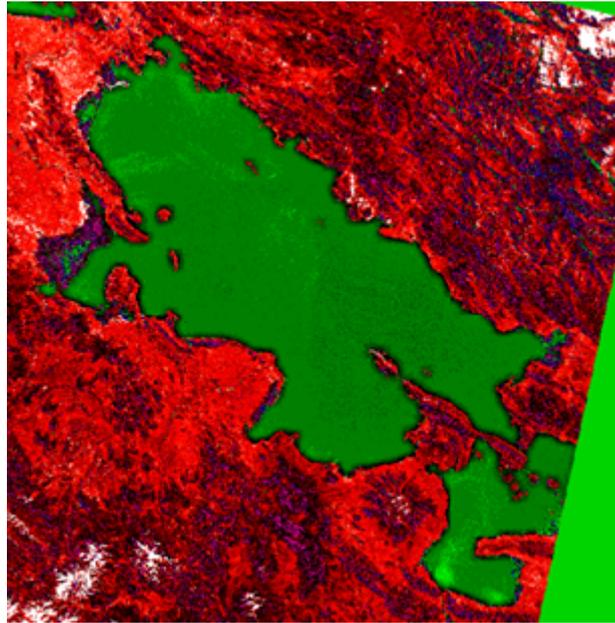


Figura 07: Vista satelital banda 5

Es muy utilizado para la clasificación de vigorosidad de las plantas o cobertura terrestre más su comportamiento en el cuerpo acuático como este caso en el lago Titicaca presenta una uniformidad en la distribución de sus valores de reflectancia en comparación con las anteriores bandas descritas, observando ligeras excepciones.

**Banda 6 Y 7:** Cubre diferentes cortes de infrarrojos de onda corta, o SWIR. Son particularmente útiles para distinguir la tierra húmeda de la tierra seca y para la geología: las rocas y los suelos que se ven similares en otras bandas a menudo tienen fuertes contrastes en SWIR (NASA, 2016).

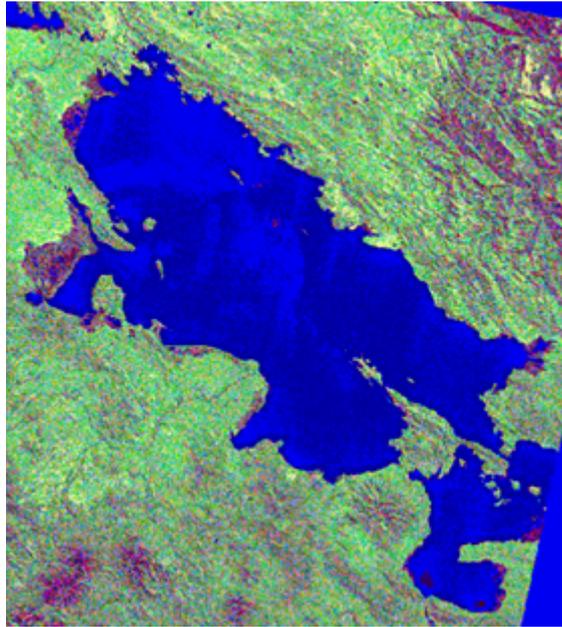


Figura 08: Vista satelital banda 6

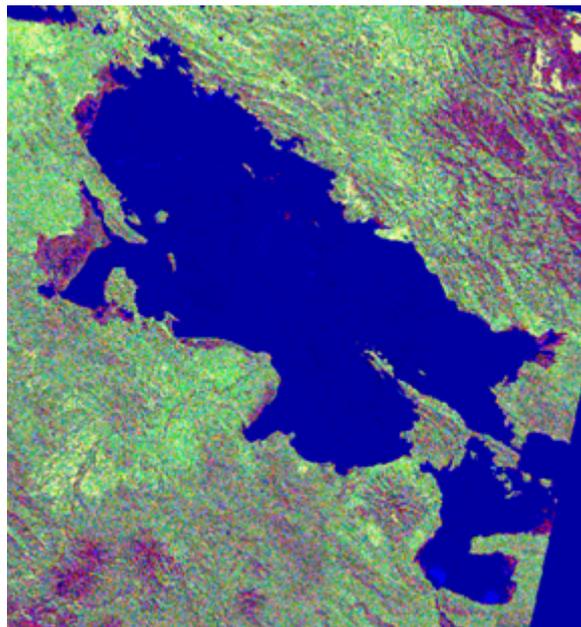


Figura 09: Vista satelital banda 7

La imagen de la derecha pertenece a la reflectancia del SWIR 1 y el de la izquierda a la reflectancia de la banda SWIR 2, como se puede apreciar presenta similares características, mas en los valores de reflectancia contiene algunas diferencias, mas de alguna manera la banda SWIR 1 se observa más sensibilidades en la diferencia de la

reflectancia en cuerpos de agua, lo que haría que sea más sensible en este tipo de investigaciones.

**Banda 8:** Es la pancromática, o simplemente pan-band. Funciona como una película en blanco y negro: en lugar de recopilar los colores visibles por separado, los combina en un solo canal. Debido a que este sensor puede ver más luz a la vez, es la más nítida de todas las bandas, con una resolución de 15 metros (50 pies) (NASA, 2016).

**Banda 9:** Muestra menos, pero es una de las características más interesantes de Landsat 8. Cubre una porción muy delgada de longitudes de onda: solo  $1370 \pm 10$  nanómetros. Pocos instrumentos espaciales recogen esta parte del espectro, porque la atmósfera absorbe casi todo. Landsat 8 convierte esto en una ventaja. Precisamente porque el suelo es apenas visible en esta banda, cualquier cosa que aparezca claramente en ella debe reflejarse de manera muy brillante y/o estar por encima de la mayor parte de la atmósfera, está diseñado especialmente para detectar los cirros: "colas de caballo" altas y delgadas (NASA, 2016).

**Banda 10 Y 11:** Están en el infrarrojo térmico, o TIR, ven calor. En lugar de medir la temperatura del aire, como lo hacen las estaciones meteorológicas, informan sobre el terreno mismo, que a menudo es mucho más caliente (NASA, 2016).

### 2.1.3. Métodos de clasificación en percepción remota

Dentro de las metodologías más utilizadas se encuentra la clasificación supervisada y no supervisada.

**Clasificación supervisada:** Permite clasificar el ráster por medio de cada píxel de una celda, es necesario tener conocimiento previo de las clases del área de estudio.

**Clasificación no supervisada:** No determina ninguna prioridad para obtener las clases, es decir lo realiza en base a probabilidades.

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

**2.2.1 Temperatura:** La temperatura es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, o de un sistema termodinámico en general. Esta propiedad termodinámica únicamente describe un estado macroscópico. La temperatura se define como la medida de la energía cinética media de las moléculas que la forman. Es decir, los movimientos de las partículas en su interior, a mayor movimiento de partículas mayor temperatura y viceversa. Por otro lado, se puede definir según la mecánica estadística, como la derivada de la energía respecto a la entropía a volumen constante (Planas, 2016).

**2.2.2. Importancia de la temperatura en lagunas:** Temperatura actúa como un parámetro que puede en un momento dado acelerar o disminuir la velocidad de las reacciones químicas, incluyendo los ciclos de degradación de materia orgánica que se presenten tanto en la columna de agua como en las zonas bentónicas de los ecosistemas acuáticos, incluyendo en estas últimas los sedimentos (Huancamayo, 2019).

La temperatura es uno de los factores que determinan la cantidad de oxígeno que el agua puede mantener en disolución, como así también afecta la velocidad de reciclado de los nutrientes en un sistema acuático. Afecta a la mayoría de los procesos biológicos que tienen lugar en los ecosistemas acuáticos. Afecta la solubilidad de los gases disueltos en el agua. Las variaciones de temperatura del agua se producen debido a las variaciones de la temperatura ambiente originadas en el ciclo natural de las estaciones (Fernández, 2012).

**2.2.3. Oxígeno disuelto:** El oxígeno disuelto se refiere al nivel de oxígeno libre no compuesto presente en el agua u otros líquidos. Es un parámetro importante en la evaluación de la calidad del agua debido a su influencia en los organismos que viven dentro de una masa de agua. En limnología (el estudio de los lagos), el oxígeno disuelto es un factor esencial solo superado por el agua misma. El oxígeno no compuesto, u oxígeno libre ( $O_2$ ), es oxígeno que no está unido a ningún otro elemento. El oxígeno disuelto es la presencia de estas moléculas de  $O_2$  libres dentro del agua. La molécula de oxígeno enlazada en el agua ( $H_2O$ ) está en un compuesto y no cuenta para los niveles de oxígeno disuelto. Uno puede imaginar que las moléculas de oxígeno libre se disuelven en el agua de la misma forma que lo hace la sal o el azúcar cuando se agita (Fondriest Environmental, 2014).

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno presente en el agua. Los cuerpos de agua reciben oxígeno de la atmósfera y de las plantas acuáticas. El agua corriente, como la de un arroyo en movimiento rápido, disuelve más oxígeno que el agua quieta de un estanque o lago (OW US EPA, 2013).

**2.2.4. Importancia del oxígeno disuelto en cuerpos de agua:** Un nivel de oxígeno disuelto demasiado alto o demasiado bajo puede dañar la vida acuática y afectar la calidad del agua. Todos los animales acuáticos necesitan oxígeno disuelto para respirar. Pueden ocurrir niveles bajos de oxígeno (hipoxia) o niveles nulos de oxígeno (anoxia) cuando los microorganismos descomponen el exceso de materiales orgánicos, como grandes floraciones de algas. Durante este proceso de descomposición, se consume oxígeno disuelto en el agua. Los niveles bajos de oxígeno a menudo ocurren en el fondo de la columna de agua y afectan a los organismos que viven en los sedimentos. En algunos cuerpos de agua, los niveles de oxígeno disuelto fluctúan periódicamente, estacionalmente e incluso como parte de la ecología diaria natural del recurso acuático.

A medida que disminuyen los niveles de oxígeno disuelto, algunos animales sensibles pueden alejarse, perder salud o incluso morir (Fondriest Environmental, 2014).

El agua que se mueve rápidamente, como en un arroyo de montaña o en un río grande, tiende a contener mucho oxígeno disuelto, mientras que el agua estancada contiene menos. Las bacterias en el agua pueden consumir oxígeno a medida que se descompone la materia orgánica. Por lo tanto, el exceso de material orgánico en lagos y ríos puede causar condiciones eutróficas, que es una situación de deficiencia de oxígeno que puede causar la "muerte" de un cuerpo de agua. La vida acuática puede tener dificultades en agua estancada que tiene una gran cantidad de material orgánico en descomposición, especialmente en verano (la concentración de oxígeno disuelto está inversamente relacionada con la temperatura del agua), cuando los niveles de oxígeno disuelto están en un nivel bajo estacional. El agua cerca de la superficie del lago, el epilimnion, es demasiado caliente para ellos, mientras que el agua cerca del fondo, el hipolimnion, tiene muy poco oxígeno. Las condiciones pueden volverse especialmente graves durante un período de clima caluroso y tranquilo, lo que resulta en la pérdida de muchos peces. Es posible que haya oído hablar de la muerte de peces en verano en los lagos locales que probablemente sean el resultado de este problema (OW US EPA, 2013).

## 2.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.3.1 Hipótesis general

Se puede realizar el monitoreo de calidad de agua del lago Titicaca mediante percepción remota.

### 2.3.2 Hipótesis específicas

- La distribución de la temperatura superficial del Lago Titicaca no es uniforme.
- Los niveles de oxígeno disuelto en el lago Titicaca son normales.
- El mayor porcentaje superficial del Lago Titicaca presenta niveles de pH normales.

## 2.4. JUSTIFICACIÓN

La percepción remota es una técnica extraordinariamente desarrollada para estudiar las características de los espacios terrestres, se han venido divulgando los cambios en la superficie terrestre, información valiosa tales como el clima en general, de acuerdo con lo anterior muchos de estos temas son de gran interés para la comprensión del espacio geográfico (Catuna, 1995). La teledetección posee numerosas aplicaciones en el ámbito acuático, su monitoreo es algo primordial para asegurar el buen estado de no solo el agua para el consumo humano sino la buena calidad de las masas de aguas tanto continentales como costeras y marinas (Ramos, 2020).

Se han realizado estudios de monitoreo de calidad de aguas del lago Titicaca hace ya varios años teniendo un análisis biológico y físico en diferentes puntos, si bien estos datos son más específicos y detallistas en cuanto a la evolución de la información ya sea física y biológica no nos da una idea completa en la distribución espacial en toda la superficie del lago. Si bien existen técnicas de percepción remota para visualizar parte de

las características utilizando una serie de algoritmos, para observar parámetros físicas y biológicos en cuerpos de agua que si bien no son ideales para este tipo de estudio son aplicables convirtiéndose en una herramienta muy útil en el monitoreo. El objetivo de este estudio es realizar el monitoreo de las propiedades de oxígeno disuelto y temperatura superficial, clorofila A del lago Titicaca comparándola con estándares internacionales. El cual contribuirá a tener una mejor visualización de la distribución espacial de la calidad de agua del lago Titicaca, como también a una mejor caracterización espacial de esta.

Este proyecto contribuye a la identificación de las zonas afectadas por la contaminación que se ha ido dando en el lago Titicaca, sirviendo como base para la formulación de nuevos proyectos de remediación.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. ZONA DE ESTUDIO

El Lago Titicaca es el centro de una gran altiplanicie, conocida como altiplano o Meseta del Collao ubicado en los Andes centrales. Situado a 3809 m.s.n.m. es el lago navegable más alto del mundo. Tiene una superficie de 8562 km<sup>2</sup> , de los cuales 4772 (el 56%) pertenecen a Perú, 3790 (el 44%) a Bolivia (Ecured, 2019). Sin embargo dentro de la investigación se estudia la bahía del interior de Puno, la bahía de Puno y lago mayor los cuales suman un total de 6826.88 km<sup>2</sup>.

Se encuentra entre las coordenadas UTM:

- Norte: 8315744 - 8165016
- Este: 390280 - 546244

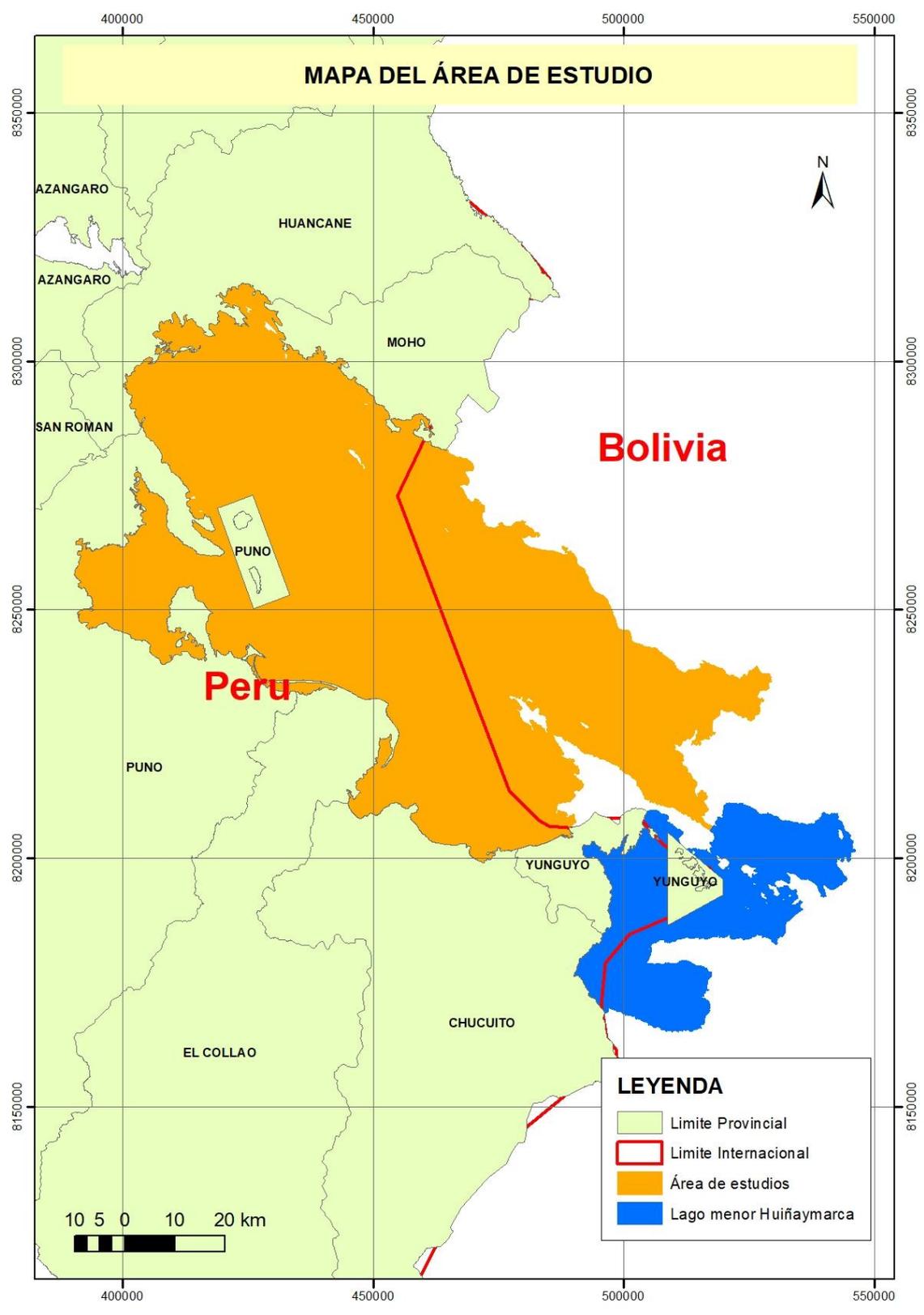


Figura 10: Mapa de Ubicación del Lago Titicaca

### 3.1.1. Morfometría

En la cuenca lacustre coexisten grandes zonas poco profundas (Lago Menor, grandes bahías de Puno, del Ramis y de Achacachi) generalmente mal relacionadas con zonas profundas características de los lagos de tipo altiplano.

### 3.1.2. Clima

El clima de la cuenca del lago Titicaca es templado en el día y fría por la noche, debido a la altitud, es una región de alta montaña sometida por su situación geográfica a un régimen tropical.

- Por su ubicación geográfica, el lago está sometido a condiciones climáticas propias de la zona intertropical, principalmente por la relativa estabilidad de la iluminación durante el año.
- Por su altitud, está influenciado por condiciones características de los climas de montaña (intensidad luminosa elevada, temperaturas bajas, baja humedad relativa) que interfieren con los parámetros ligados con la tropicalidad.

### 3.2.3. Importancia

El lago ha influenciado como factor determinante en la regulación del clima de la Meseta del Collao, convirtiéndose en el mayor centro demográfico de los Andes peruanos y por tanto en el mayor centro agropecuario de esta región andina. Es de igual modo importante ya que tiene una variada fauna silvestre, así como abundantes recursos hidrobiológicos. Constituye sin lugar a dudas una gran reserva acuífera utilizable y un atractivo turístico gracias a la belleza de sus parajes (Ecured, 2019).

### 3.2. TAMAÑO DE MUESTRA

#### 3.2.1. Población

La población de estudio corresponde a la extensión territorial del lago Titicaca.

#### 3.2.2. Muestra

Las muestras están conformadas por 43 puntos de muestreo que se realizaron a través de la Autoridad Administrativa del Agua, estos puntos se encuentran dispersos en diferentes partes del lago Titicaca los cuales serán utilizados en la calibración de los resultados del monitoreo de calidad de agua utilizando imágenes satelitales. El número de muestra es óptimo para este tipo de estudio, debido a que según la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio el número mínimo que se necesita para este tipo de estudio corresponde a un cantidad de 30 puntos.

### 3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

#### 3.3.1. Métodos

##### Descarga de la imagen satelital

Por medio de geo servidores INPE BRASIL, USGS y Alaska Satellite Facility de forma gratuita, previa inscripción. Almacenado cada imagen con su respectiva información.

Se descarga la imagen satelital previa suscripción a la plataforma de la *USGS explore* que tiene una ventanilla única para obtener conjuntos de datos geoespaciales. Los usuarios podemos navegar a través de un mapa interactivo o búsqueda de texto para obtener imágenes de satélite Landsat, datos de radar, datos de UAS, gráficos de líneas digitales, datos de modelos de elevación digitales, fotos aéreas, datos de satélites

Sentinel, algunas imágenes de satélites comerciales, incluidos IKONOS y OrbView3, datos de cobertura terrestre.

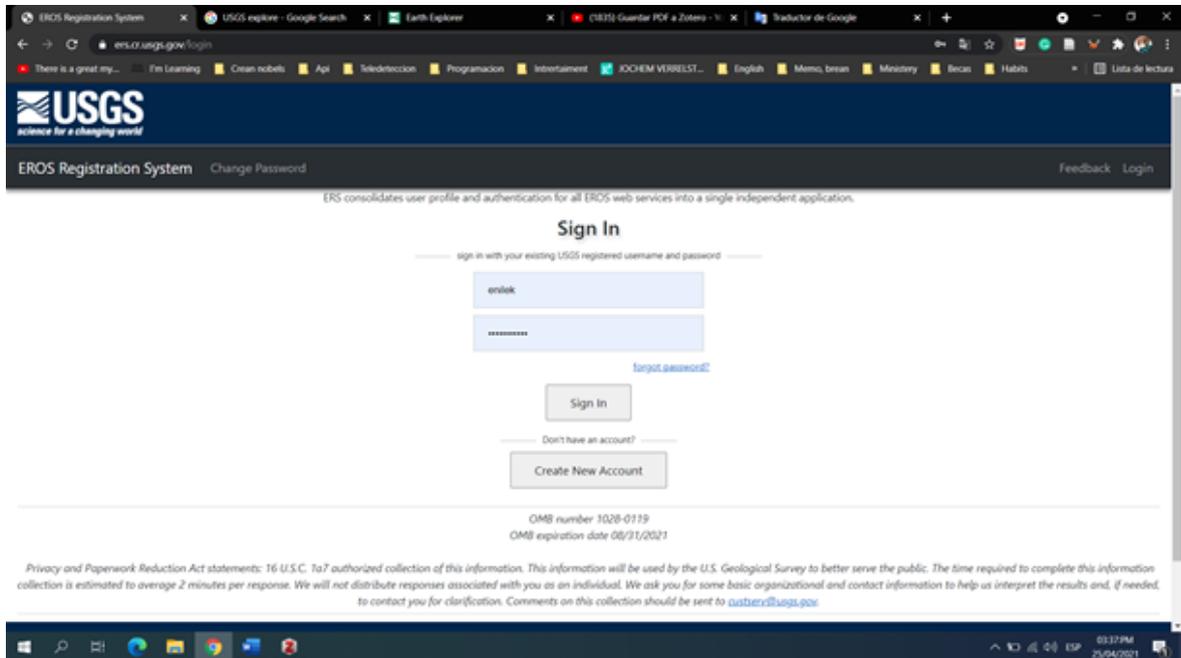


Figura 11: Plataforma de previo registro de la plataforma USGS

Se descarga la imagen satelital de Landsat 8 del año 2018 del mes de julio del 29, debido a que los últimos datos obtenidos de calidad de agua por la Autoridad Nacional del agua está realizado en el mes de Julio, esta imagen tiene una buena visibilidad para realizar el análisis. Teniendo como referencia que los datos para la calibración tienen que ser entre +- 7 días tomando en cuenta los datos de campo.

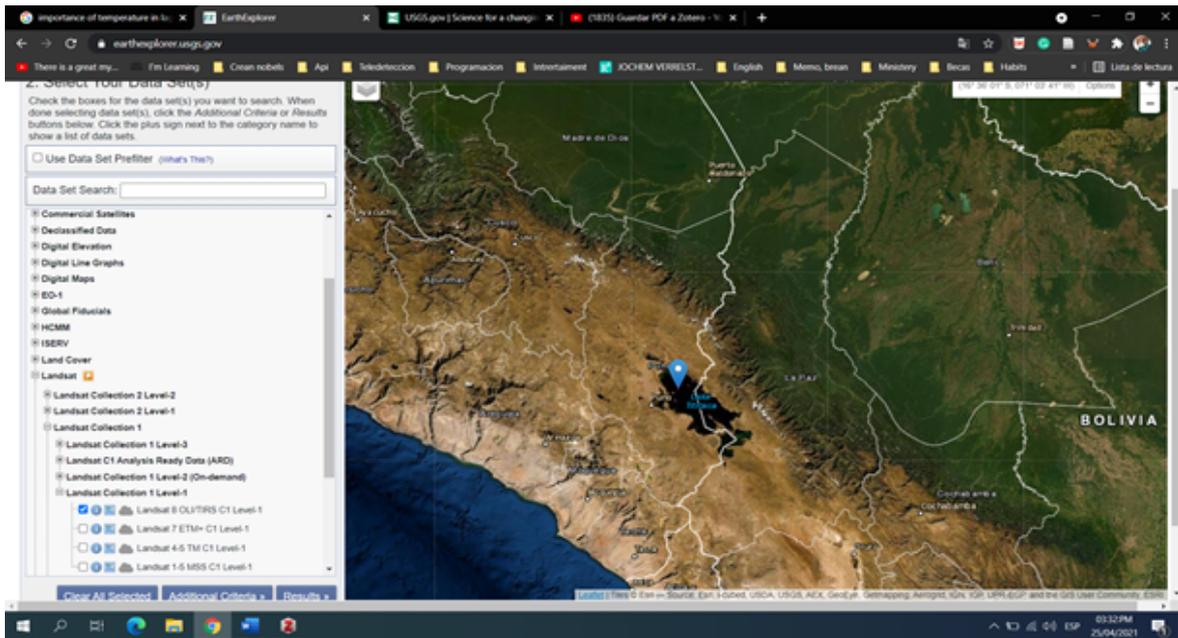


Figura 12: Descarga de imágenes del área de estudio

Características de la imagen descargada: La imagen satelital corresponde a la fecha de 29 de junio del 2018, al satélite Landsat 8, al Path 2 y al row 71.

**Corrección de radiancia de imagen satelital**

Realizando su Georreferenciación y atmosférica utilizando softwares aptos para el manejo de datos. La imagen descargada de la USGS Explore contiene el nivel 1 de procesamiento lo cual incluye la Ortho rectificación de la imagen satelital Landsat 8 OLI. Por lo que se procede a realizar la corrección radiométrica y atmosférica, utilizando el software de ENVI.

La conversión a radiancia en el techo de la atmósfera (TOA) Los productos estándar Landsat 8 LDCM, suministrados por el USGS EROS CENTER consisten en una serie cuantificada, calibrada y escalada de niveles digitales ND, los cuales representan los datos de una imagen multispectral adquirida por ambos sensores: OLI Operational Land Imagen y el TIRS Thermal Infrared Sensor. Los datos de las bandas del sensor TIRS y

OLI están derivados en 16 bits en formato no cifrado y pueden ser reescalados a los valores de reflectancia y o radiancia en el techo de la atmósfera TOA, usando para ello los coeficientes radiométricos provistos en el archivo de metadato MTL.txt, tal y como se describe a continuación (Ariza, 2013).

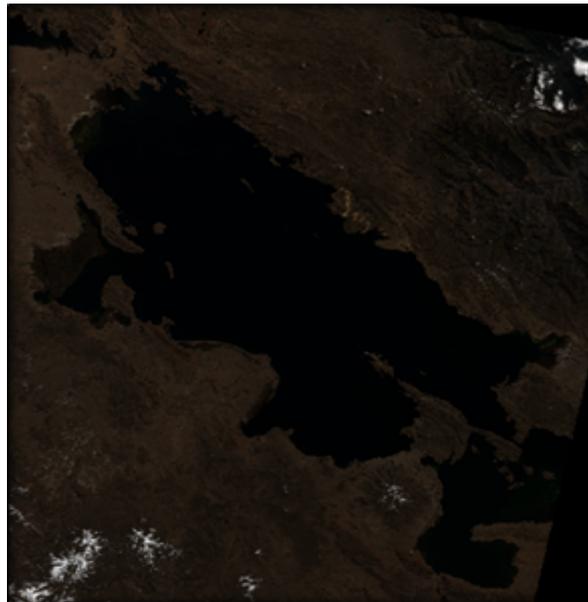


Figura 13: Imagen satelital L8



Figura 14: Landsat 8 con corrección TOA

### Modelo de Kriging

El modelo de la interpolación Kriging se realizó con los datos tomado in situ de la institución del ANA, el cual fue facilitado previa solicitud para esta investigación los cuales se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 02. Puntos de monitoreo de la bahía del interior

N°	ZONA	COD	ESTE	NORTE	OD	PH	T
1		Blante 01	391402	8249013	6.9	9.43	13.56
2		Bln 02	392656	8249544	6.9	8.62	12.44
3		Bln 03	393018	8248669	5.6	10.2	12.79
4		Bln 04	392040	8248425	6.71	8.85	13.12
5		Bln 05	392710	8247780	5	7.81	11.93
6	Bahía Interior de Puno	Bln 06	394477	8249053	6.16	10.26	13.38
7		Bln 07	394623	8248197	6.72	8.53	12.84
8		Bln 08	394132	8247621	6.67	8.4	12.47
9		Bln 09	393377	8247327	5.69	7.92	12.59
10		Bln 10	394641	8246844	6.16	10.21	13.09
11		Bln 11	395452	8247654	6.96	8.34	12.05

Se tiene un total de 11 datos en la bahía interior de Puno, distribuida en diferentes partes.

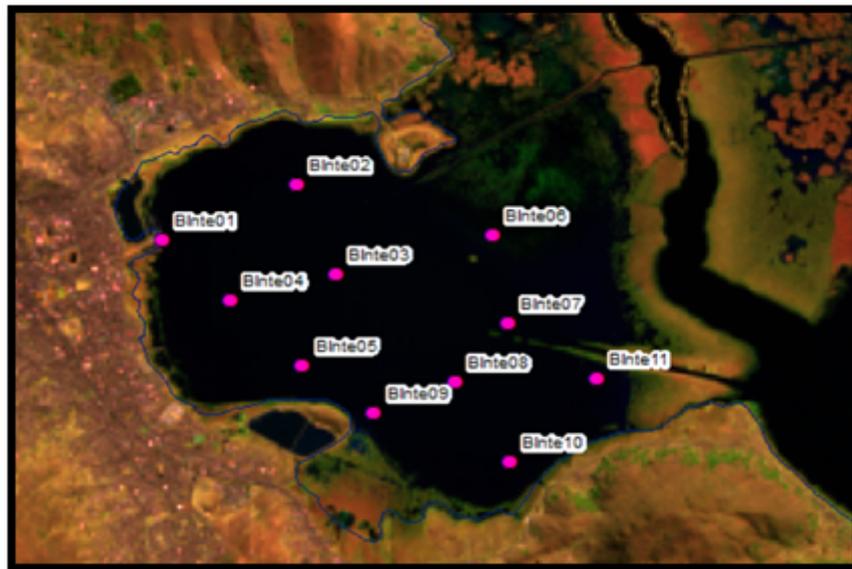


Figura 15: Codificación de los puntos de la bahía del interior

Tabla 03: Puntos de monitoreo de la bahía de Puno

N°	ZONA	COD	ESTE	NORTE	OD	PH	T
1		BPuno 01	397111	8247370	6.72	8.53	13.43
2		RWilly	396052	8250794	5.69	8.8	13.53
3		BPuno02	399882	8246437	6.86	8.79	13.29
4		BPuno03	400715	8248732	6.75	8.79	13.11
5	Bahía de Puno	BPuno04	403189	8245455	6.9	8.77	13.23
6		BPuno04.1	404515	8244926	6.49	8.74	13.33
7		BPuno05	405613	8248638	5.7	8.68	13.48
8		BPuno06	404771	8251796	5.86	8.6	13.51
9		BPuno07	416264	8258045	6.69	8.62	12.5
10		BPuno08	408666	8266084	6.81	8.74	11.67

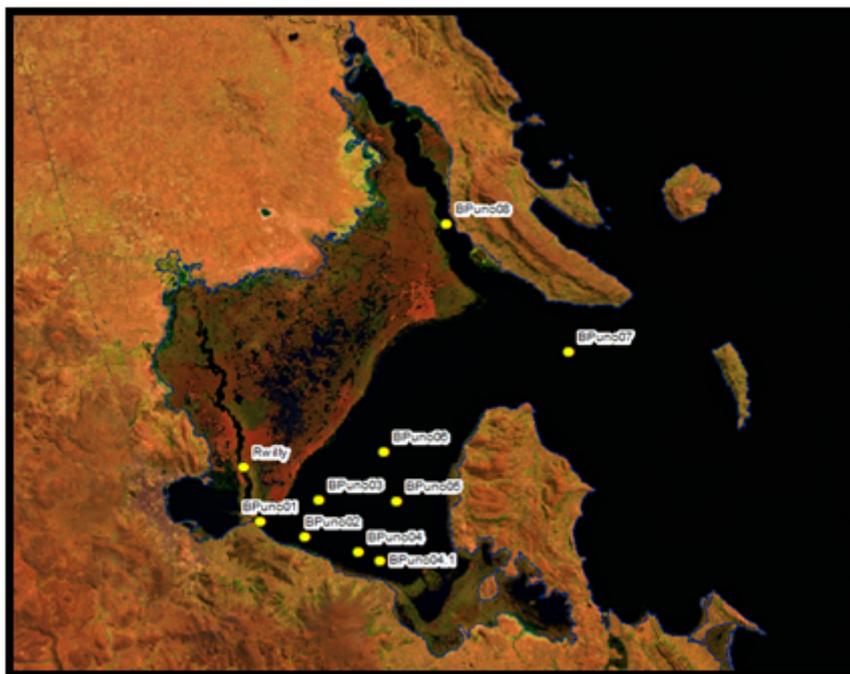


Figura 16: Codificación de los puntos de la bahía de Puno

Tabla 04: Puntos de monitoreo del lago mayor

N°	ZONA	COD	ESTE	NORTE	OD	PH	T
1		LTiti01	411590	8288485	5.67	8.54	13.23
2		LTiti02	421239	8300287	5.88	8.5	13.2
3		LTiti03	418234	8304524	6.15	8.53	12.71
4	Lago	DRami01	418598	8304764	5.65	8.71	12.19
5	mayor-sector	LTiti04	441324	8295062	6.9	8.6	11.72
6	Peruano	LTiti05	438113	8270420	6.46	8.52	13.68
7	(Lago Chucuito)	LTiti06	442034	8240764	6.35	8.67	13.31
8		LTiti07	421981	8241699	7.02	8.62	-
9		LTiti08	454126	8232085	6.75	8.61	-
10		LTiti09	452789	8215059	6.8	8.69	12.46

11	JChoc01	458788	8209314	6.52	8.71	12.47
12	LTiti10	468110	8203415	6.45	8.7	12.46
13	BPoma	468517	8202398	6.53	8.65	12.35
14	LTiti11	472560	8206700	6.6	8.71	11.96
15	BCutu01	480238	8202339	6.74	8.69	12.09
16	LTiti12	488897	8205141	6.21	8.48	12.13

Se encuentra dentro de territorio peruano, distribuidos en diferentes partes.

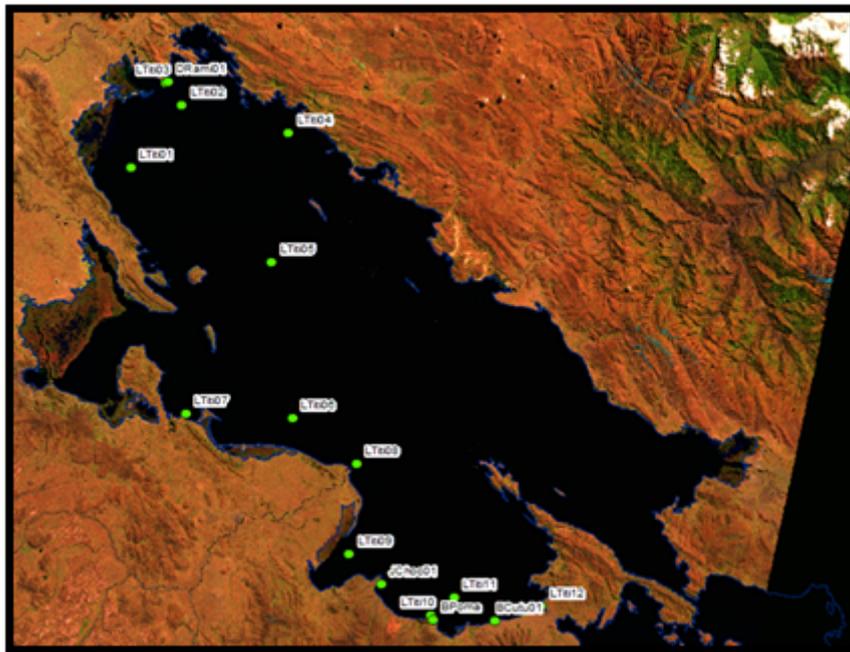


Figura 17: Codificación de los puntos en el lago mayor

Tabla 05: Puntos de monitoreo de la laguna Huiñaymarca

N°	ZONA	COD	ESTE	NORTE	OD	PH	T
1		RDesa	496083	8168712	6.32	8.76	12.56
2		LTiti14	494720	8176866	6.53	8.71	
3	Lago menor	LTiti13	500259	8192639	6.8	8.72	10.39
4	Huiñaymarca	LTiti13.1	516601	8196284	7.52	9	10.7
5		LTiti13.2	506723	8196569	6.73	8.67	10.17
6		LTiti13.3	501015	8184760	6.73	8.85	11.51

Los puntos se encuentran en el lado peruano

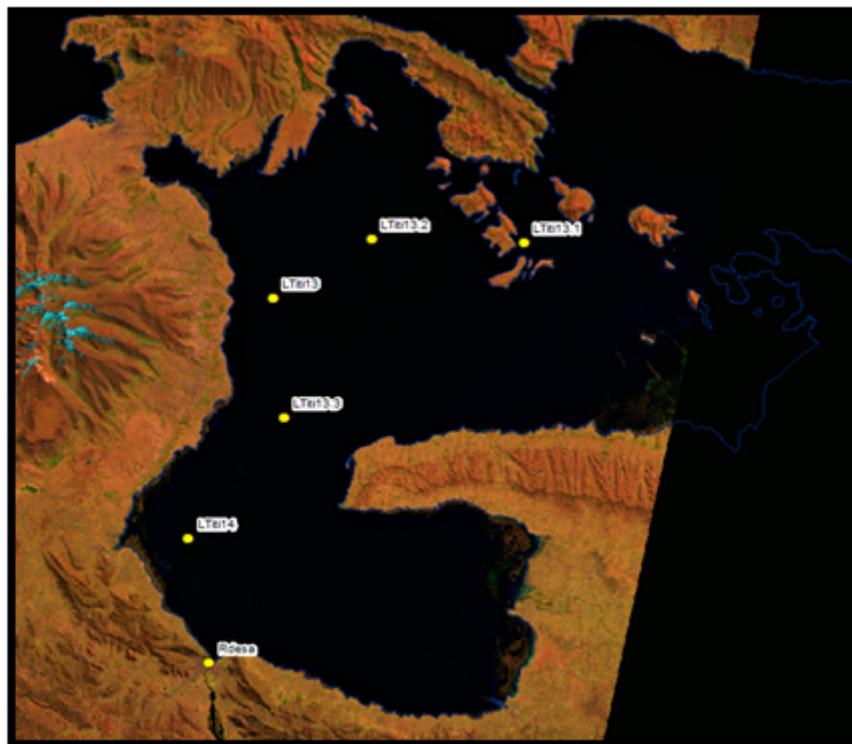


Figura 18: Codificación de los puntos de la laguna Huiñaymarca

Teniendo como datos los siguientes resultados utilizando el modelo de interpolación de ponderación de distancia inversa – IDW el cual consiste en que el valor de salida para una celda que usa ponderación de distancia inversa (IDW) está limitado al rango de los valores usados para interpolar. Debido a que IDW es un promedio de distancia ponderado, el promedio no puede ser mayor que la entrada más alta ni menor que la entrada más baja. Por lo tanto, no puede crear crestas o valles si estos extremos aún no han sido muestreados (Watson, 1985).

Teniendo como resultado la siguientes interpolaciones de oxígeno disuelto, PH y temperatura:

	<p>La distribución del oxígeno disuelto, los valores más bajos se presentan en la parte norte del lago mayor como también en la parte de la bahía interior de Puno, observándose la zona central y la parte sur con valores más altos.</p>
	<p>La distribución de los valores de pH entró en la interpolación, se encuentra valores altos o alcalinos dentro de la bahía interior de Puno como la Bahía de Puno, presentado valores moderados la parte norte del lago mayor y valores medios la parte sur.</p>



Figura 19: Interpolación de datos de campo

### 3.4. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO

La presente investigación es descriptiva no experimental porque no implicó una manipulación de la variable de estudio.

#### 3.4.1. Diseño de investigación transversal

Los estudios transversales son estudios observacionales, descriptivos y simultáneos (no direccionales). Estudian la población total o una muestra significativa en un punto del tiempo o en un periodo corto, buscando la presencia o ausencia de factores de riesgo (exposición) y enfermedad (efecto). También son denominados estudios “de prevalencia”, ya que nos permiten cuantificar esta medida de enfermedad. (Ochoa Sangrador, 2019)

Los estudios transversales son aquellos en los cuales se recolectan datos en un solo momento, es decir, en un instante único en el tiempo, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación. (Ojeda, Diaz, Apodaca, y Trujillo, 2011)

## CAPÍTULO IV

## EXPOSICION Y ANALISIS DE LA INVESTIGACIÓN

## 4.1. Análisis exploratorio de la variable independiente: Bandas de color

Iniciamos el análisis estadístico con la descripción de los datos, calculando los estadísticos de tendencia central y de variación, la primera corrida dio los siguientes resultados:

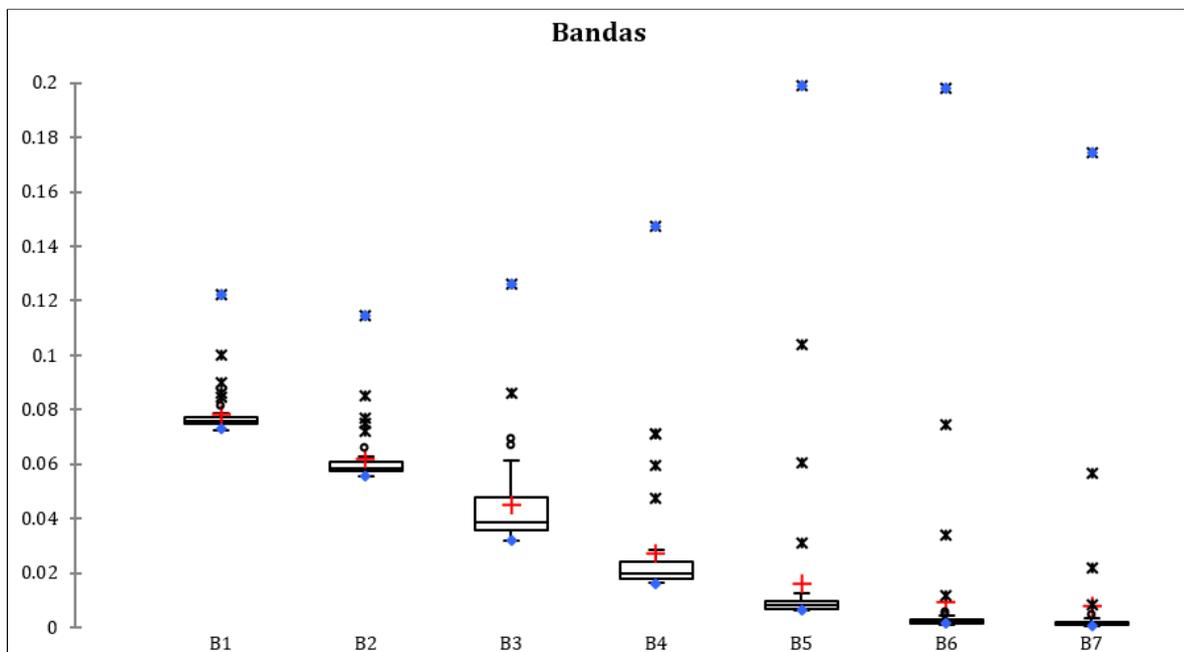


Figura 20: Diagramas de cajas para las siete bandas de color

Se observa que en las bandas 5,6 y 7 existen puntos máximos que se hallan por encima del límite esperado, por lo que se procede a retirar las observaciones que corresponden a dicha medición y se vuelve a realizar el análisis descriptivo con la nueva base de datos reducida.

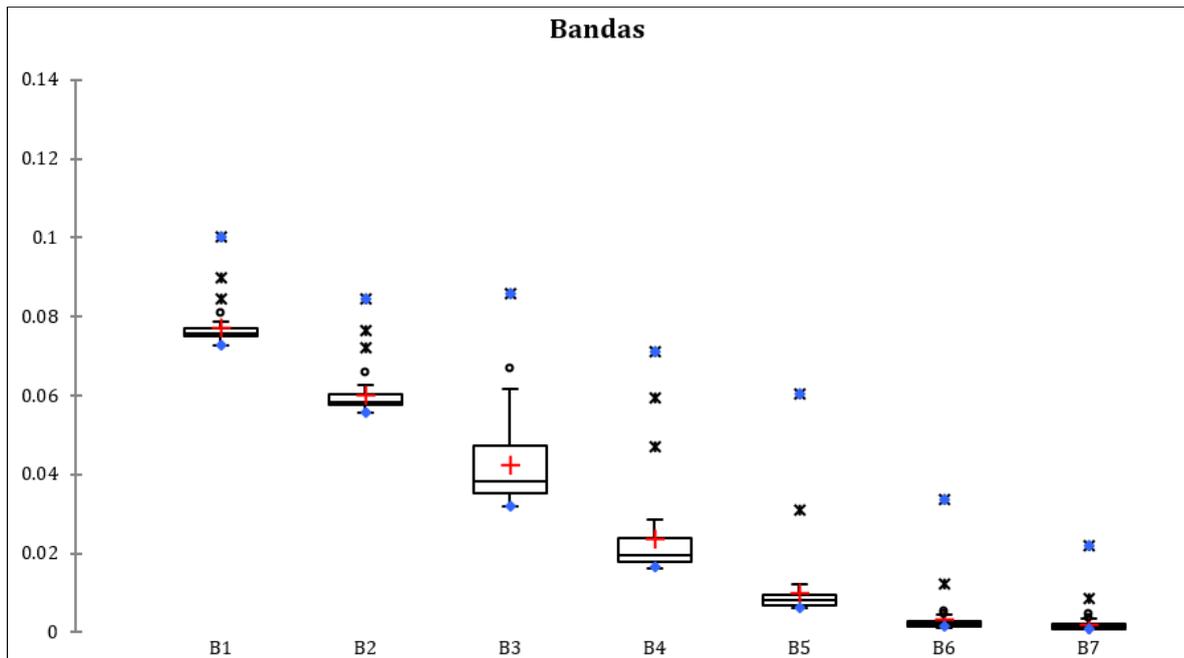


Figura 21: Diagramas de cajas para las siete bandas de color con datos reducidos

Con la nueva base de datos se observa que la distribución muestra una mejor distribución, por lo que se procederá a realizar los análisis con este conjunto de datos.

4.2. Análisis exploratorio de la variable dependiente: Parámetros fisicoquímicos del agua

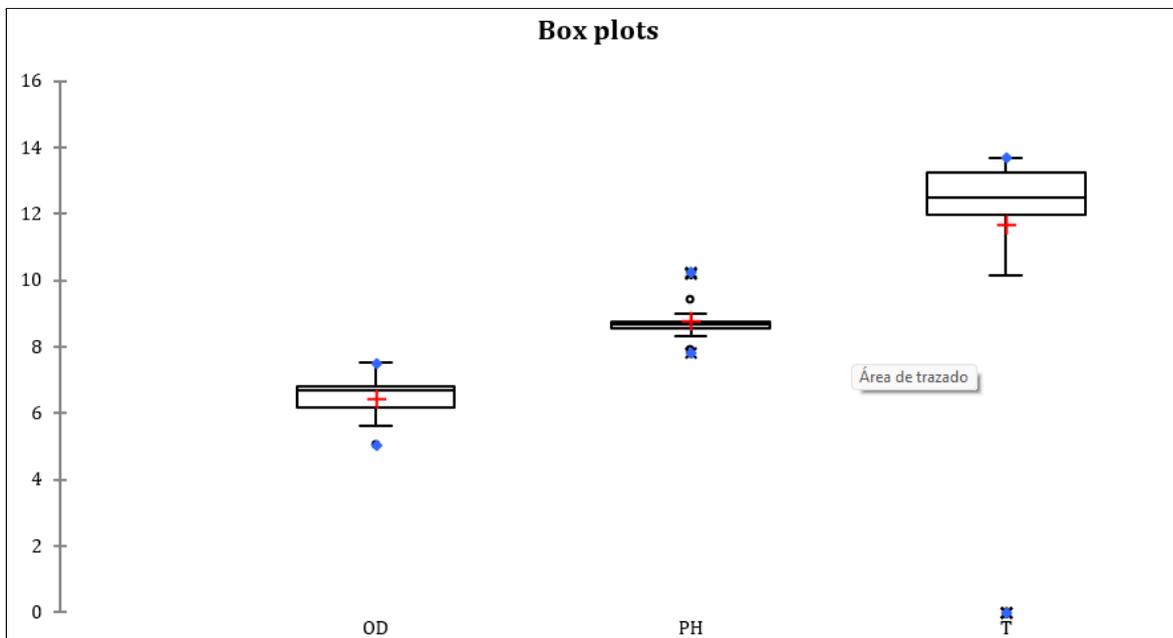


Figura 22: Diagramas de cajas para los parámetros del agua

Los resultados del análisis exploratorio de datos para los parámetros del agua, muestran distribuciones consistentes para el oxígeno disuelto y el pH, sin embargo para la temperatura del agua se presentan valores de cero grados que deberían revisarse.

Se procede a realizar el análisis de correlación para identificar si existen algunos pares de variables que tengan significancia para la realización del posterior análisis de regresión.

Tabla 06: Análisis de correlación de Pearson

Variables	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
OD	-0.074	-0.090	-0.112	-0.103	0.071	0.163	0.174
PH	0.133	0.100	0.157	0.167	0.398	0.223	0.213
T	0.119	0.143	0.142	0.134	0.108	-0.043	-0.049

Nota: correlaciones significativas en negrita ( $p < 0.05$ )

Los resultados indican que solo el pH y la Banda 5 muestran significancia estadística, por lo que es necesario realizar una exploración bivariada de los datos para identificar posibles datos fuera de lo normal que perturben el análisis.

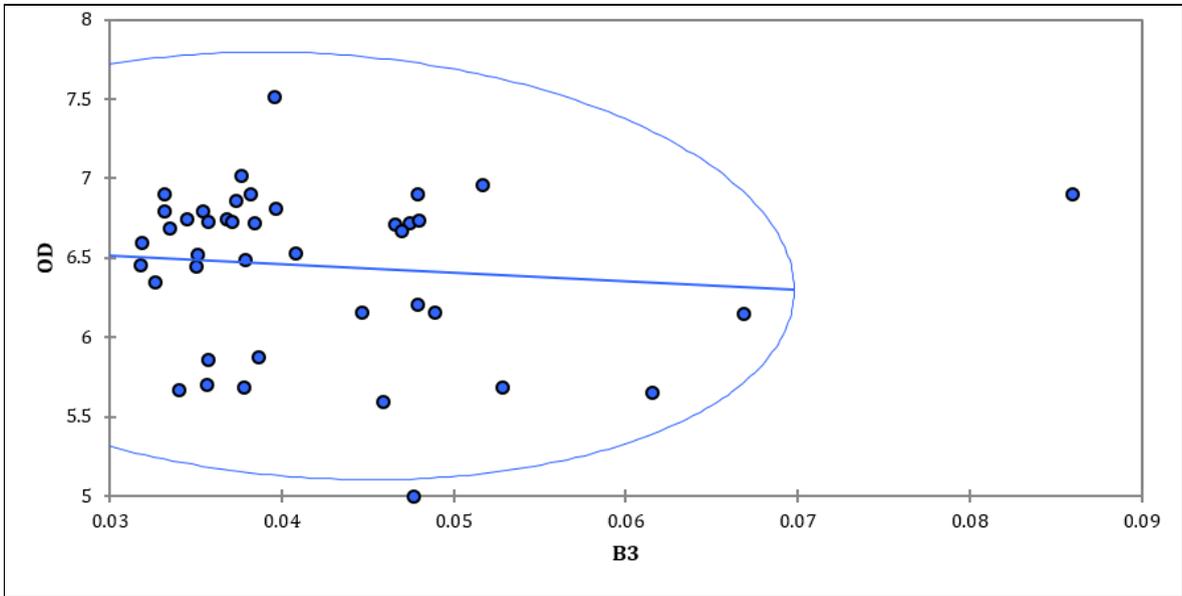


Figura 23: Diagramas de dispersión para las bandas de colores y parámetros del agua

Como ejemplo de la exploración bivariada se muestra el diagrama de dispersión de la Banda 3 y el oxígeno disuelto, se observa que un dato se halla fuera del elipsoide de tendencia, por lo que perturba el análisis de regresión, se procede a eliminar esta observación y se vuelve a realizar la exploración, esto se realiza para todos los casos de combinaciones entre las variables.

Luego de realizar la limpieza de valores atípicos se vuelve a realizar el análisis de correlación de Pearson para identificar la existencia de significancia estadística entre algunas de las combinaciones, se obtuvo.

Tabla 07: Análisis de correlación de Pearson con datos reducidos

Variables	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
OD	-0.324	-0.278	-0.269	-0.327	-0.119	0.090	0.115
pH	-0.021	-0.045	0.057	0.104	0.475	0.040	0.018
T	0.061	0.106	0.099	0.092	0.059	-0.366	-0.336

Nota: correlaciones significativas en negrita ( $p < 0.05$ )

Luego de reducir los valores atípicos, se observa que el análisis de correlación muestra significancia para los tres parámetros del agua, así el Oxígeno disuelto tiene relación con la Banda 1 y 4, mientras el pH se relaciona con la Banda 5, la temperatura se relaciona con las Bandas 6 y 7.

Una vez identificado las bandas que tienen relación estadística con los parámetros se procede a realizar el análisis de regresión lineal, puesto que existen dos parámetros con relación con dos bandas se procederá aplicar un método reduccional, que permita obtener un modelo reducido que estime mejor los parámetros del agua en función de las bandas de color, este métodos es Stepwise donde se realizan regresiones paso a paso hasta encontrar el mejor modelo predictor.

#### 4.3. Modelos de Regresión Lineal

**a. Oxígeno disuelto:** Es responsable de sustentar la vida de las especies acuáticas, los peces al nadar filtran por su aparato respiratorio el oxígeno, moluscos e invertebrados acuáticos lo necesitan para respirar, también a nivel bacteriano es de suma importancia ya que sin su presencia muchos de estos microorganismos que mantienen el equilibrio de estos ecosistemas morirían (Steemit, 2018).

Tabla 08: Análisis de varianza para el modelo de regresión para OD.

Variable	Estimador del parámetro	Error estándar	Tipo II SS	F-Valor	Pr > F
Intercepto	7.11538	0.32806	117.54065	470.42	<.0001
B4	-31.81938	15.09790	1.10982	4.44	0.0419

Fórmula de la regresión lineal para el oxígeno disuelto, que se realizó con el uso de la banda 4 es la siguiente:

$$OD = 7.11538 - 31.81938 (B4)$$

Se observa que el modelo de regresión lineal muestra significancia estadística tanto para el intercepto como para el coeficiente de regresión ( $p < 0.05$ ), por lo que se considera un modelo adecuado para la estimación del oxígeno disuelto en función de la Banda 4.

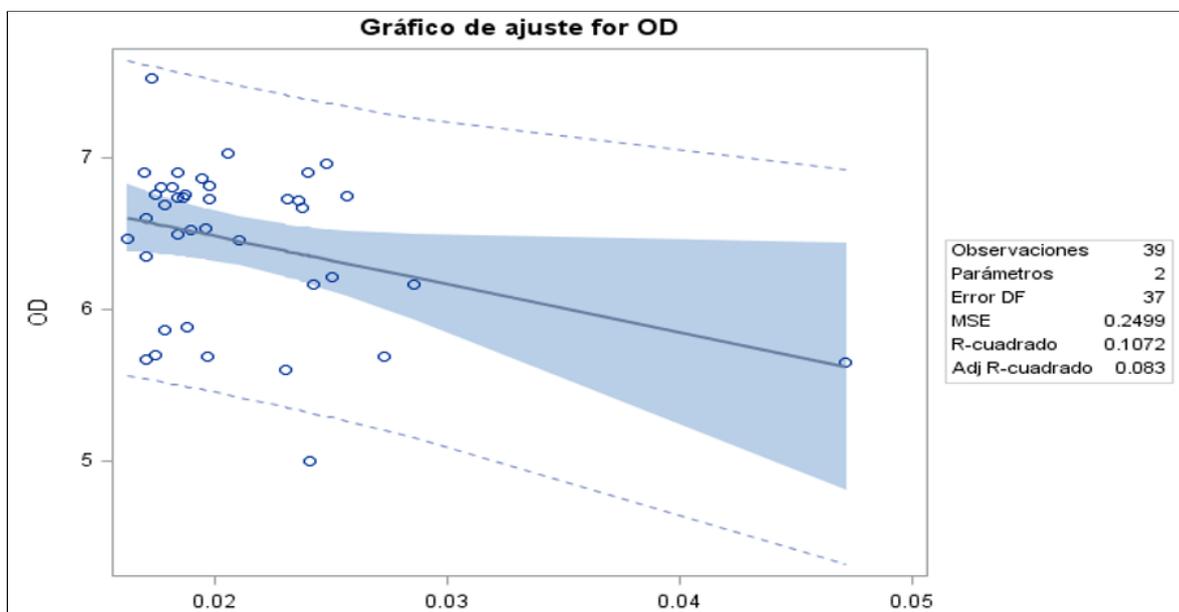


Figura 24: Modelo de regresión lineal para estimar el OD en función de la Banda 4

**b. pH:** Si bien los niveles de pH en una laguna pueden variar según la profundidad o durante el transcurso del día, el pH del afluente es de vital importancia. Un pH alto o bajo en el afluente puede indicar condiciones sépticas o descarga industrial. Residuos industriales, como el del procesamiento de vinos o lácteos, que es muy ácido; o que incluye metales o productos químicos de limpieza, puede interrumpir la actividad biológica en la laguna e inhibir el tratamiento.

Tabla 09: Análisis de varianza para el modelo de regresión para el pH

Variable	Estimador del parámetro	Error estándar	Tipo II SS	F-Valor	Pr > F
Intercepto	8.24578	0.16615	461.19007	2462.96	<.0001
B5	57.24926	17.45667	2.01391	10.76	0.0023

Fórmula de la regresión lineal para el pH, que se realizó con el uso de la banda 5 es la siguiente:

$$\text{pH} = 8.24578 + 57.24926 (B5)$$

Se observa que el modelo de regresión lineal muestra significancia estadística tanto para el intercepto como para el coeficiente de regresión ( $p < 0.05$ ), por lo que se considera un modelo adecuado para la estimación del pH en función de la Banda 5.

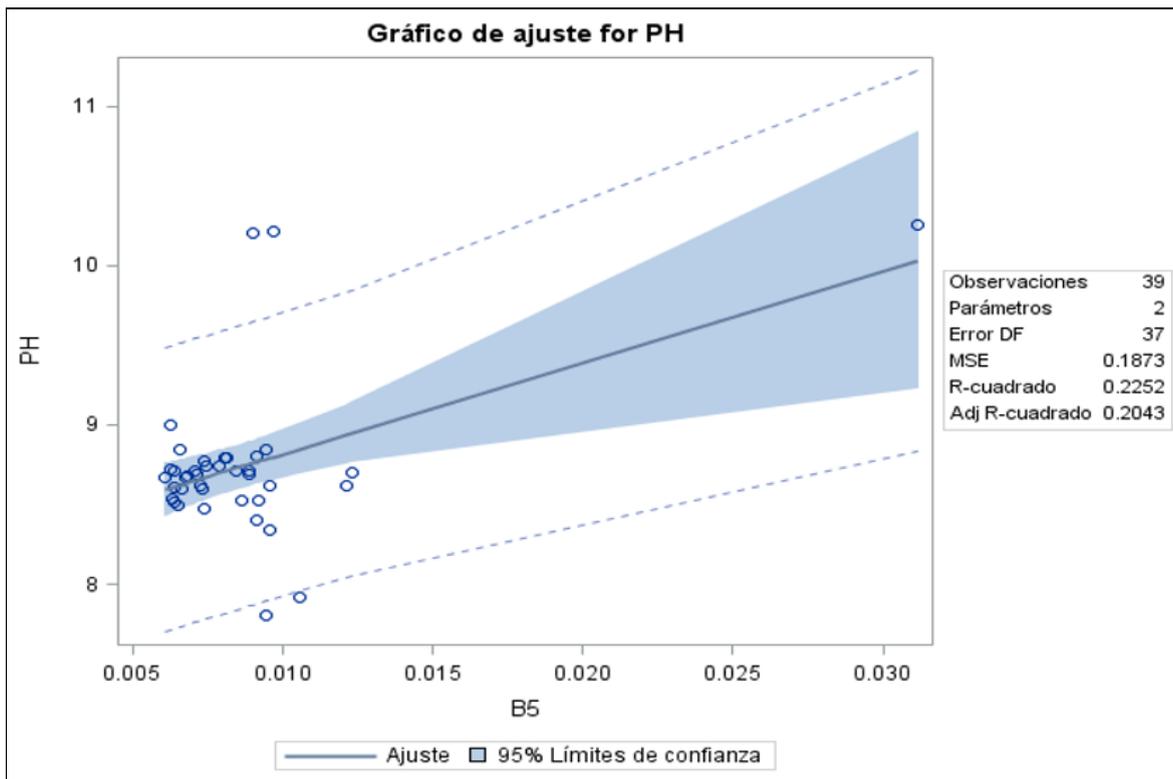


Figura 25: Modelo de regresión lineal para estimar el pH en función de la Banda 5

**c. Temperatura:** Las descargas de aguas a altas temperaturas pueden causar daños a la fauna y flora de las aguas receptoras al intervenir con la reproducción de especies, incrementar el crecimiento de bacterias y otros organismos no autóctonos. La solubilidad del oxígeno en el agua está afectada por la temperatura. Así a mayor temperatura menor solubilidad y viceversa. (Avecillas, 2013)

Para hallar la distribución de la temperatura superficial del Lago Titicaca se utilizó el Algoritmo para el mapeo automatizado de la temperatura de la superficie terrestre utilizando datos satelitales LANDSAT 8, realizado por Ugur Avdan y Gordana Jovanovska. Siendo la Banda 10, primordial para hallar la temperatura. Primeramente se realizó una corrección atmosférica TOA, seguidamente se convirtió los valores de TOA a temperatura de brillo. Por otra parte se calculó el Índice de vegetación normalizada (NDVI), para calcular la proporción de la vegetación con mayor nivel del índice de NDVI y

menor, para posteriormente calcular la proporción de vegetación, con este resultado, calcular la Emisividad  $\epsilon$ . Finalmente teniendo los datos de temperatura de brillo y el índice de emisividad obtener la temperatura superficial.

#### 4.3.1. Aplicación del modelo

**Temperatura:** Para hallar la temperatura superficial del lago Titicaca se aplicó el Algoritmo para el mapeo automatizado de la temperatura de la superficie terrestre utilizando datos satelitales LANDSAT 8, obteniendo el siguiente resultado.

El lago Titicaca presenta valores entre los intervalos de 6 - 13°C, los cuales se distribuyen de la siguiente manera. El 93% de la superficie del lago Titicaca presenta valores entre los rangos 8 - 10 °C grados centígrados, los cuales contemplan valores normales según en el decreto supremo N° 004-2017-MINAM. Sin embargo se observa que dentro de los resultados el color verde oscuro muestra temperaturas de muy bajo valor entre 6 – 8 °C el cual se encuentra dentro de la Reserva Nacional del Titicaca, posiblemente a factores de turbidez, porque los cuerpos de agua presentan una gran absorción de calor más cuando existe la presencia de partículas suspendidas, esto hace que su factor de reflectancia se incremente. Teniendo una temperatura media anual de 10 °C, más del 90% de la superficie del Lago Titicaca se encuentra con valores normales debido a que su temperatura varía alrededor de los 3°C.

Teniendo como hipótesis planteada: que la distribución de la temperatura superficial del Lago Titicaca no es uniforme, se acepta la hipótesis planteada, debido a que la temperatura cambia en diferentes zonas presentando un rango de 6 a 13 °C y se rechaza la  $H_0$ .

Tabla 10: Intervalo del área distribuido de temperatura

N°	INTERVALO	ÁREA (%)
1	6 - 8.6	0.84
2	8.7 - 9.1	2.60
3	9.2 - 9.4	66.52
4	9.5 - 9.9	25.93
5	10 - 11	2.74
6	11 - 12	1.01
7	12 - 13	0.37

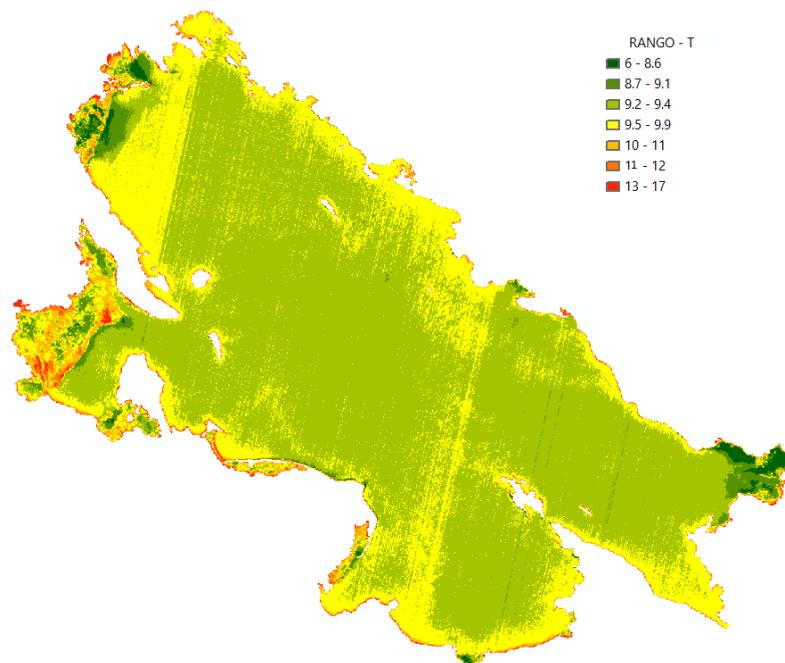


Figura 26: Distribución de temperatura

**Oxígeno disuelto:** Teniendo la fórmula de regresión lineal para el oxígeno disuelto utilizando la banda 4, como se muestra a continuación.

$$OD = 7.11538 - 31.81938 (B4)$$

Se describe que los intervalos de oxígeno disuelto en las aguas superficiales del lago Titicaca están dentro de los intervalos de 4.1 – 7.2 mg/l. Encontrándose los valores más bajos dentro de la reserva nacional del Titicaca, como también en la parte sureste del lago Titicaca. En la bahía del interior se encuentra dentro de los valores de 5.6 – 6 mg/l, que teniendo como referencia los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias según el decreto supremo N° 004-2017-MINAM. Estos parámetros son aceptables para aguas superficiales destinadas a la producción potable, para aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección, aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional y para aguas superficiales destinadas para recreación con contacto primario y cultivos.

Teniendo como hipótesis planteada: que los niveles de oxígeno disuelto del Lago Titicaca son normales, se acepta la hipótesis planteada, tomando en consideración que los niveles permitidos por los Estándares de Calidad de Agua el lago Titicaca presenta valores mayores a 4 mg/l los cuales son considerados aptos en la subcategoría A, aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable, recalcando el debido tratamientos que se debe tener en cuenta dependiendo a los niveles de oxígeno disuelto que presentan.

Tabla 11: Intervalo del área distribuido de oxígeno disuelto

N°	INTERVALO	ÁREA (%)
2	0.01-3.00	0.12
3	3.10-4.00	0.44
4	4.10-5.00	3.04

5	5.10-5.50	1.91
6	5.60-6.00	1.36
7	6.10-6.50	4.49
8	6.6-7.20	88.63

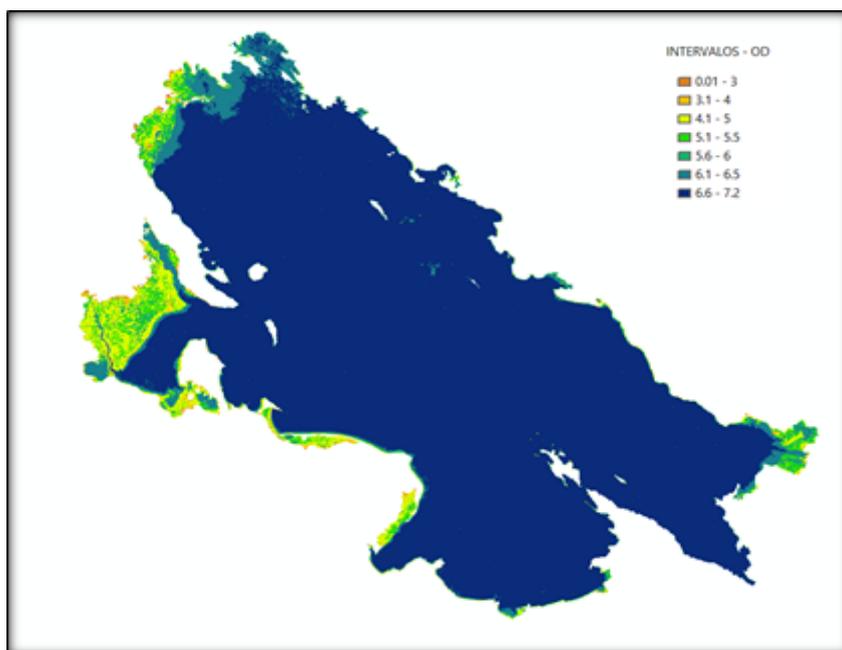


Figura 27: Distribución de oxígeno disuelto

**Potencial de hidrógeno (pH):** Teniendo la fórmula de regresión lineal para el pH utilizando la banda 5, como se muestra a continuación.

$$pH = 8.24578 + 57.24926 (B5)$$

Se describe lo siguiente, los intervalos de pH en las aguas superficiales en el lago Titicaca están dentro de los rangos de 8.5-10.00, pertenecientes netos a cuerpos de agua, encontrándose los valores de 9.01-10 de pH dentro de la bahía del interior de Puno, como también en la parte sureste del lago Titicaca y dentro de los totorales de la reserva nacional del Titicaca. Teniendo como referencia los Estándares de Calidad

Ambiental (ECA) establecen Disposiciones Complementarias según en el decreto supremo N° 004-2017-MINAM. Más del 95 % del área de estudio contiene valores de 8.25-9.00, estos parámetros son aceptables como para aguas superficiales destinadas a la producción potable para aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección y aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional, como para también aguas superficiales destinadas para recreación con contacto primario y cultivos.

Teniendo como hipótesis planteada: El mayor porcentaje superficial del Lago Titicaca presenta niveles de pH normales, se acepta la hipótesis planteada, tomando en consideración que los niveles permitidos por el Estandares de Calidad de Agua, el 93.3 % de la extensión superficial del Lago Titicaca presenta valores entre 8.25 - 9, los cuales son considerados aptos en la subcategoría A, aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable, recalcando el debido tratamientos que se debe tener en cuenta dependiendo a los niveles de pH que presentan.

Tabla 12: Intervalo del área distribuido de pH

N°	INTERVALO	ÁREA (%)
1	8.25-8.50	0.01
2	8.51-8.75	92.03
3	8.76-9.00	1.13
4	9.01-10.0	0.64
5	10.1-11.0	0.39
6	11.1-12.0	0.36
7	12.1-13.0	0.39
8	13.1-14.0	0.58

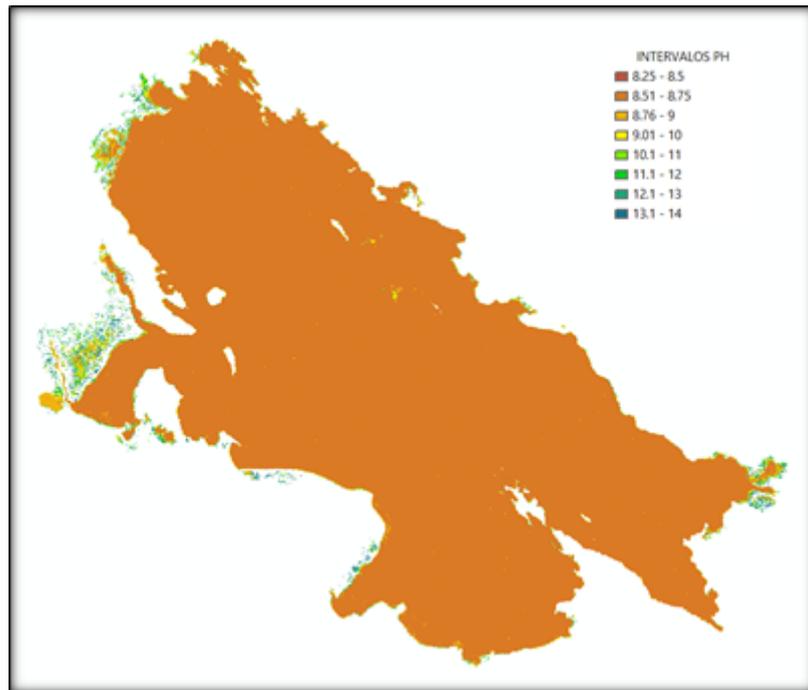


Figura 28: Distribución del pH

## CONCLUSIONES

**PRIMERA:** La distribución de la temperatura superficial del lago Titicaca no es uniforme, alrededor del 90% de la superficie del área de estudio contiene valores normales, teniendo como temperatura media anual del lago Titicaca 10 °C los valores varían entre los  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , que conforme a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, según el decreto supremo N° 004-2017-MINAM, estos parámetros califican dentro de la sub categoría A; encontrándose también temperaturas bajas en la zona norte del lago, dentro de la Reserva Nacional del Titicaca.

**SEGUNDA:** Para el oxígeno disuelto se tiene un coeficiente de determinación de 0.2499, se puede decir que alrededor del 25% de la variabilidad del oxígeno disuelto es explicado por la B4, el cual representa la banda roja. Describiendo que más del 90% del área total de estudio cuenta con un nivel de oxígeno disuelto mayor a 6 mg/l, lo cual cuenta con valores muy aceptables según el decreto supremo N° 004-2017-MINAM, el cual corresponde a aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección, para los valores menores a 6 dentro de la bahía interior Puno, como también dentro de la Reserva Nacional del Titicaca, que según el decreto supremo N° 004-2017-MINAM clasifica como aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional y/o con tratamiento avanzado.

**TERCERA:** Más del 95 % del área de estudio cuenta con valores normales de pH, teniendo en  $R^2$  de 0.225 se puede decir que el 22% de la variabilidad del pH es explicado por la B5, el cual representa a la banda de infrarrojo cercano, presentando valores altos dentro de la bahía interior del lago Titicaca y dentro de los cuerpos de agua que se encuentran alrededor de plantas acuáticas como las totoras; sin embargo estos parámetros son aceptables para aguas superficiales destinadas a la producción potable, que pueden ser potabilizadas con desinfección y tratamiento convencional, también para aguas superficiales destinadas a recreación con contacto primario y cultivos.

## RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** Se recomienda a la Autoridad Administrativa del agua Titicaca que para realizar su monitoreo se tenga en cuenta el clima, para tener una mejor visualización del área de estudio, por tanto, un mejor análisis.

**SEGUNDA:** Se recomienda a la Autoridad Administrativa del Agua Titicaca que para sus muestreos en campo tengan en cuenta el calendario del Día Juliano de la NASA, para que exista una mejor análisis de los datos.

**TERCERA:** Se recomienda mejorar el algoritmo, como también realizar más estudios sobre los parámetros estudiados en esta investigación incluyendo otros parámetros que no fueron tocados en esta investigación por presentarse dificultades en recabar la información necesaria. Con la finalidad de contribuir a la conservación de este recurso hídrico y belleza paisajística del lago Titicaca, que es de importancia regional para nuestro departamento de Puno.

**CUARTA:** Se recomienda a la Universidad Privada San Carlos, que promueva estudios similares para tener un mejor panorama del estado del recurso hídrico en toda la cuenca del Titicaca, como estudios sobre la variación de la temperatura superficial del lago Titicaca a lo largo de los años, integrándose con estudios de cambio climático.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, H. (2016). *Evaluación de la calidad del agua para el lago Dukan utilizando el satélite LANDSAT 8 OLI. Iraq*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31423.10408>
- Agencia Peruana de Noticias Andina. (2016, noviembre 5). Difunden resultados del monitoreo de calidad del agua del lago Titicaca. Recuperado 19 de noviembre de 2021, de <https://andina.pe/agencia/noticia-difunden-resultados-del-monitoreo-calidad-del-agua-del-lago-titicaca-643533.aspx>
- Apaza Tito, M. (2014). Implementación de algoritmos genéticos para la segmentación de imágenes satelitales por conglomerados de la región Puno—2013. *Universidad Nacional del Altiplano*. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4875>
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Recuperado de <https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Avecillas, L. A. (2013). *“Caracterización físico – químico del estero salado entre el puente de la avenida Kennedy y el puente 5 de junio efectuado en el periodo agosto – octubre del año 2012”* (Universidad de Guayaquil). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/3502/1/1093.pdf>
- Barbier, & M. (2018). USGS Y LANDSAT. Recuperado 19 de noviembre de 2021, de <https://docplayer.es/93049038-Usgs-y-landsat-barbieri-andrea-diez-pilar-macedo-gonzalo-minutti-guillermo.html>
- Basan, K. L., Paniagua, K. C., Valero, R. M., y Duran, J. P. J. Q. (2017). Estudio de la

- Teledetección y Caracterización Físicoquímica del Humedal “El Cascajo”, Santa Rosa, Chancay- Lima, Perú. *Infinitum...*, 7(1).  
<https://doi.org/10.51431/infinitum.v7i1.61>
- Bellido, H., y Alex, J. (2019). Análisis espacio-temporal del comportamiento de la clorofila a mediante imágenes satelitales en la Represa Aguada Blanca para el año 2017. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10209>
- Bustos, O. H. (2021). *Introducción a los procesos markovianos en el análisis y procesamiento de imágenes*. 45.
- Catuna, N. (1995). La percepción remota y el análisis del espacio geográfico. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 5(2), 83-106.
- Chen, G., Li, Y., Sun, G., y Zhang, Y. (2017). Application of Deep Networks to Oil Spill Detection Using Polarimetric Synthetic Aperture Radar Images. *Applied Sciences*, 7(10), 968. <https://doi.org/10.3390/app7100968>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección*.
- Ecured. (2019). Lago Titicaca (Bolivia/Perú)—EcuRed. Recuperado 19 de noviembre de 2021, de [https://www.ecured.cu/Lago\\_Titicaca\\_\(Bolivia/Per%C3%BA\)](https://www.ecured.cu/Lago_Titicaca_(Bolivia/Per%C3%BA))
- Edison. (2014). Componentes de un Sistema de Teledetección (Figura tomada del libro *Fundamentos de Teledetección Espacial* de Emilio Chuvieco). Recuperado 29 de noviembre de 2021, de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-I1-Componentes-de-un-Sistema-de-Teledeteccion-Figura-tomada-del-libro\\_fig1\\_320910845](https://www.researchgate.net/figure/Figura-I1-Componentes-de-un-Sistema-de-Teledeteccion-Figura-tomada-del-libro_fig1_320910845)
- Fact Sheet. (2020). Fact Sheet.
- Federico. (2015). 30 ríos y 6 lagunas a nivel nacional con grave contaminación. Recuperado 19 de noviembre de 2021, de Diario Correo website: <https://diariocorreo.pe/peru/30-rios-y-6-lagunas-a-nivel-nacional-con-grave-contam>

inacion-590566/

Fernández, A. (2012). El agua: Un recurso esencial. Recuperado de

<https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>

Fondriest Environmental. (2014). Dissolved Oxygen. Recuperado 30 de noviembre de 2021, de Environmental Measurement Systems website:

<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>

García, E., y Otto, M. (2015). Caracterización eco hidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del Río Santa, Ancash, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(2), 115-125.

Gis&Beers. (2020). Todo lo que deberías saber sobre imágenes Landsat—Gis&Beers.

Recuperado 29 de noviembre de 2021, de

<http://www.gisandbeers.com/lo-deberias-saber-imagenes-landsat/>

GreenFacts. (2007). Glosario: Radiación ultravioleta. Recuperado 29 de noviembre de

2021, de <https://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/radiacion-ultravioleta.htm>

Hereher, M. E., Salem, M. I., y Darwish, D. H. (2010). Mapping water quality of Burullus

Lagoon using remote sensing and geographic information system,. *Journal of American Science*, 7, 138,143.

Huancamayo, G. (2019). Parámetros Físicoquímicos Del Agua De La Laguna De Los

Milagros Del Distrito De Pueblo Nuevo. Recuperado de

<https://portal.unas.edu.pe/sites/default/files/epirnr/PARAMETROS%20FISICOQUIMICOS%20DEL%20AGUA%20DE%20LA%20LAGUNA%20DE%20LOS%20MILAGROS%20DEL%20DISTRITO%20DE%20PUEBLO%20NUEVO.pdf>

Kleiner, L., y C. C. (2018). Glosario: Espectro electromagnético. Recuperado 29 de

noviembre de 2021, de

[https://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/opinions\\_layman/es/lamparas-ba](https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/lamparas-ba)

jo-consumo/glosario/def/espectro-electromagnetico.htm

Landsat 8 Bands. (2015). Landsat información. Recuperado 29 de noviembre de 2021, de

[http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57\\_ES.php](http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_ES.php)

LUCES. (2014). Radiación visible: Luz. Recuperado 29 de noviembre de 2021, de Luces

CEI website:

<https://lucescei.com/estudios-y-eficiencia/extractos-libro-blanco-de-iluminacion/radiacion-visible-luz/>

MONGABAY. (2018, febrero 2). Perú: Madre de Dios, Huancavelica, Puno y Cusco están

expuestas a la contaminación por mercurio. Recuperado 19 de noviembre de

2021, de Noticias ambientales website:

<https://es.mongabay.com/2018/02/peru-mercurio-madre-de-dios-huancavelica-puno-cusco/>

NASA. (2016). Landsat 8 Bands | Landsat Science. Recuperado 30 de noviembre de

2021, de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands>

OAS. (1998). Capitulo 4. Percepción remota en la evaluación de peligros naturales.

Recuperado 19 de noviembre de 2021, de

<https://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea65s/ch09.htm>

Ochoa Sangrador, C. (2019). *Diseño y análisis en investigación*.

Ojeda, M., Díaz, J., Apodaca, V., y Trujillo, I. (2011). *Metodología de Diseño Estadístico*

(Segunda edición). Veracruz, México. Recuperado de

<https://www.uv.mx/personal/mojeda/files/2012/04/Metdisesta2012.pdf>

Planas, O. (2016). ¿Qué es la temperatura? Concepto, definición y unidades. Recuperado

30 de noviembre de 2021, de

<https://solar-energia.net/termodinamica/propiedades-termodinamicas/temperatura>

PNUD. (2015). *Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo*. Recuperado de

[https://www.undp.org/content/dam/undp/library/capacity-development/spanish/SP\\_](https://www.undp.org/content/dam/undp/library/capacity-development/spanish/SP_)

brochure\_Apoyo%20a%20DC\_Enfoque%20del%20PNUD.pdf

Ramos Lopez, B. (2020). Monitoreo de calidad del agua con el uso de la teledetección.

Recuperado 19 de noviembre de 2021, de Cursos de Teledetección, Drones y

LIDAR website:

<https://www.cursosteledeteccion.com/monitoreo-de-la-calidad-del-agua-con-el-uso-de-la-teledeteccion/>

Rojas, C., y Gregorio, H. (2019). Procesamiento de imágenes satelitales landsat 5 tm, 7 etm+, 8 oli y los índices de vegetación, para la caracterización de las coberturas vegetales en los distritos de Cajamarca. *Universidad Nacional Federico Villarreal*.

Recuperado de <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/3740>

Steemit. (2018). Importancia del oxígeno disuelto en aguas y descripción del método de winkler para su determinación. —Steemit. Recuperado 30 de noviembre de 2021, de

<https://steemit.com/stem-espanol/@joseleogon/importancia-del-oxigeno-disuelto-en-aguas-y-descripcion-del-metodo-de-winkler-para-su-determinacion>

Torres Mamani, E. (2016). Identificación del área afectada por Lemna en la bahía de Puno utilizando procesamiento digital de imágenes. *Universidad Nacional del Altiplano*.

Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6246>

Torrico, P., y Nuñez, J. (2010). Detection pollution water with image of high resolution worldview 2 in Oruro City, Bolivia. Recuperado 19 de noviembre de 2021, de

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25720.96005>

UNESCO, W. W. (2015). The United Nations world water development report 2015: Water for a sustainable world—UNESCO Digital Library. Recuperado de

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231823>

US EPA, OA. (2017, noviembre 16). Información básica sobre la radiación [Overviews and Factsheets]. Recuperado 29 de noviembre de 2021, de

<https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-la-radiacion>

US EPA, OW. (2013, noviembre 20). Indicators: Dissolved Oxygen [Overviews and

Factsheets]. Recuperado 30 de noviembre de 2021, de

<https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-dissolved-oxygen>

Vivancos, J., y Llastarri, A. (2005). Espectro electromagnético y Teledetección [Text].

Recuperado 29 de noviembre de 2021, de

<http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/espectro.htm>

Watson, P. (1985). Cómo funciona IDW—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Recuperado 30 de noviembre de 2021, de

<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>

Waxter, M. (2014). Analysis of Landsat Satellite Data to Monitor Water Quality Parameters in Tenmile Lake, Oregon. *Portland State University*.

<https://doi.org/10.15760/CEEMP.35>

**ANEXOS**

**ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA**

TÍTULO: Monitoreo de calidad de agua mediante percepción remota del lago Titicaca

<b>Planteamiento del problema</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>
<b>Interrogante general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>
¿Se puede monitorear la calidad de agua del Lago Titicaca mediante percepción remota?	Monitorear la calidad del agua del lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota.	Se puede realizar el monitoreo de calidad de agua del lago Titicaca mediante percepción remota.
<b>Interrogantes específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específicas</b>
¿La temperatura superficial distribuida en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota es uniforme?	Determinar la distribución de la temperatura superficial del lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota.	La distribución de la temperatura superficial del Lago Titicaca no es uniforme.
¿Cuáles son los niveles de oxígeno disuelto en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota?	Determinar la distribución de los niveles de oxígeno disuelto en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota.	Los niveles de oxígeno disuelto en el lago Titicaca son normales.
¿Cuáles son los niveles de pH en mayor proporción en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota?	Determinar la distribución de los niveles de pH en el lago Titicaca utilizando métodos de percepción remota.	El mayor porcentaje superficial del Lago Titicaca presenta niveles de pH normales.

## ANEXO 02: MATRIZ DE DATOS REDUCIDA

Obs	OD	PH	T	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	6.9	8.62	12.44	0.0750	0.0576	0.0478	0.0240	0.0096	0.0027	0.0020
2	5.6	10.2	12.79	0.0752	0.0575	0.0458	0.0231	0.0090	0.0022	0.0017
3	6.71	8.85	13.12	0.0751	0.0584	0.0465	0.0235	0.0094	0.0025	0.0016
4	5	7.81	11.93	0.0757	0.0586	0.0476	0.0240	0.0094	0.0026	0.0016
5	6.16	10.26	13.38	0.0772	0.0604	0.0446	0.0286	0.0312	0.0036	0.0018
6	6.72	8.53	12.84	0.0751	0.0581	0.0474	0.0231	0.0092	0.0017	0.0016
7	6.67	8.4	12.47	0.0751	0.0579	0.0470	0.0238	0.0091	0.0019	0.0013
8	5.69	7.92	12.59	0.0771	0.0608	0.0528	0.0273	0.0106	0.0027	0.0016
9	6.16	10.21	13.09	0.0757	0.0584	0.0488	0.0242	0.0097	0.0028	0.0020
10	6.96	8.34	12.05	0.0747	0.0581	0.0516	0.0248	0.0096	0.0029	0.0021
11	6.72	8.53	13.43	0.0762	0.0593	0.0384	0.0197	0.0086	0.0027	0.0022
12	5.69	8.8	13.53	0.0747	0.0581	0.0377	0.0197	0.0091	0.0044	0.0034
13	6.86	8.79	13.29	0.0758	0.0592	0.0373	0.0194	0.0081	0.0020	0.0013
14	6.75	8.79	13.11	0.0756	0.0586	0.0367	0.0187	0.0081	0.0021	0.0013
15	6.9	8.77	13.23	0.0776	0.0625	0.0382	0.0184	0.0074	0.0017	0.0011

16	6.49	8.74	13.33	0.0784	0.0626	0.0379	0.0184	0.0074	0.0019	0.0014
17	5.7	8.68	13.48	0.0771	0.0597	0.0356	0.0174	0.0068	0.0013	0.0010
18	5.86	8.6	13.51	0.0762	0.0594	0.0357	0.0178	0.0073	0.0016	0.0007
19	6.69	8.62	12.5	0.0750	0.0577	0.0334	0.0178	0.0073	0.0017	0.0007
20	6.81	8.74	11.67	0.0771	0.0601	0.0396	0.0197	0.0079	0.0025	0.0015
21	5.67	8.54	13.23	0.0766	0.0590	0.0340	0.0170	0.0063	0.0015	0.0007
22	5.88	8.5	13.2	0.0788	0.0623	0.0386	0.0188	0.0065	0.0016	0.0012
23	5.65	8.71	12.19	0.0847	0.0721	0.0615	0.0471	0.0085	0.0022	0.0015
24	6.9	8.6	11.72	0.0751	0.0578	0.0332	0.0169	0.0066	0.0016	0.0011
25	6.46	8.52	13.68	0.0749	0.0569	0.0318	0.0162	0.0064	0.0014	0.0009
26	6.35	8.67	13.31	0.0745	0.0566	0.0326	0.0170	0.0061	0.0015	0.0009
27	7.02	8.62	0	0.0777	0.0607	0.0376	0.0205	0.0121	0.0120	0.0084
28	6.75	8.61	0	0.0758	0.0564	0.0344	0.0174	0.0064	0.0014	0.0009
29	6.8	8.69	12.46	0.0745	0.0561	0.0332	0.0177	0.0071	0.0014	0.0012
30	6.52	8.71	12.47	0.0751	0.0576	0.0351	0.0189	0.0089	0.0042	0.0030
31	6.45	8.7	12.46	0.0752	0.0576	0.0350	0.0210	0.0123	0.0053	0.0036
32	6.6	8.71	11.96	0.0726	0.0556	0.0319	0.0170	0.0064	0.0014	0.0008

33	6.74	8.69	12.09	0.0810	0.0660	0.0480	0.0257	0.0089	0.0049	0.0045
34	6.21	8.48	12.13	0.0764	0.0625	0.0478	0.0250	0.0074	0.0025	0.0022
35	6.53	8.71	0	0.0744	0.0579	0.0408	0.0196	0.0071	0.0017	0.0009
36	6.8	8.72	10.39	0.0728	0.0560	0.0354	0.0182	0.0062	0.0012	0.0010
37	7.52	9	10.7	0.0736	0.0573	0.0396	0.0173	0.0062	0.0018	0.0010
38	6.73	8.67	10.17	0.0732	0.0559	0.0356	0.0186	0.0068	0.0015	0.0009
39	6.73	8.85	11.51	0.0740	0.0574	0.0371	0.0184	0.0066	0.0014	0.0010

---