



Laguna San Nicolás. Cajamarca

NIVEL DE EUTROFIZACIÓN DE LA LAGUNA SAN NICOLÁS (CAJAMARCA, PERÚ) APLICANDO TELEDETECCIÓN SATELITAL EN UN PERIODO DE 20 AÑOS

Deisy Lisset Carrasco Vela

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo determinar el nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás en el departamento de Cajamarca mediante la teledetección. Con este propósito se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 y 8 para revisar los años 1998, 2008 y 2019. A estas imágenes se les aplicaron correcciones, índices y ecuaciones apoyadas con el software PCI Geomatics y fueron calibradas con pruebas de laboratorio. En este proceso se evaluaron el estado trófico, mediante concentraciones de turbiedad y clorofila "a", así como los parámetros fisicoquímicos y biológicos más representativos de calidad del agua. Hay una correlación significativa entre la turbiedad (UNT) con la turbiedad satelital ($r = 0.98$), la cl-a y la turbiedad satelital ($r = 0.86$), el disco de Secchi (transparencia) y el cl-a satelital ($r = -0.70$). Los resultados determinaron que, según la metodología de Carlson y el Índice de Estado Trófico (TSI), la laguna San Nicolás pasó de estado eutrófico a mesotrófico en un periodo de 20 años.

Por otro lado, los parámetros fisicoquímicos evaluados estaban dentro de los estándares de calidad ambiental para la Categoría 4 (Conservación del Medio Acuático) del DS-004-2017-MINAM. Por lo tanto, el estado mesotrófico de la laguna San Nicolás presenta un nivel intermedio de nutrientes que se deben monitorear continuamente para predecir amenazas de eutrofización.

PALABRAS CLAVES: *teledetección, firma espectral, eutrofización, calidad de agua.*

DATOS DE LA AUTORA

Ingeniera Ambiental, subgerente de Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de San Marcos (Cajamarca)

carrascovelad@gmail.com

© Este artículo es de acceso abierto sujeto a la licencia Reconocimiento 4.0 Internacional de *Creative Commons*. No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas. Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the level of eutrophication of the San Nicolás lake in the department of Cajamarca by remote sensing. For this, Landsat 5 and 8 satellite images were used for the years 1998, 2008, and 2019, to which index corrections and equations supported by the PCI Geomatics software were applied and calibrated with laboratory tests. Trophic status is evaluated by turbidity and chlorophyll "a" concentration, followed by the most representative physicochemical and biological parameters of water quality. A significant correlation was obtained for turbidity (UNT) with satellite turbidity ($r = 0.98$), for cl-a and satellite turbidity ($r = 0.86$) and for the Secchi disk (transparency) and satellite cl-a ($r = 0.70$). The results determined that according to Carlson's methodology and the trophic state index (TSI), the San Nicolás lake changes from eutrophic to mesotrophic status over a period of 20 years. On the other hand, the physicochemical parameters evaluated were found within environmental quality standards for Category 4 (Conservation of the Aquatic Environment) of DS-004.2017-MINAM. Therefore, the mesotrophic state of the San Nicolás lake presents an intermediate level of nutrients that must be continuously monitored to predict eutrophication threats.

KEYWORDS: *remote sensing, spectral signature, eutrophication, water quality.*

© This article is of open access to the public and subject to the Creative Commons Attribution Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. The commercial use of this original work and the production of derived works from this article is not allowed. For more information, please visit: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los cuerpos de agua son vulnerables a los efectos de la contaminación causados principalmente por la actividad antrópica y que traen como consecuencia la alteración de la capacidad de recuperación del ecosistema (Escobar, 2002). A nivel mundial, la carga de nutrientes y la eutrofización de los humedales siguen siendo los mayores problemas en materia de calidad del agua (Ramsar, 2018). El suelo erosionado de las tierras agrícolas tiene mayores efectos negativos sobre la calidad del agua, ya que transporta entre 23 y 42 millones de toneladas de nitrógeno y entre 15 y 26 millones de toneladas de fósforo a nivel global (FAO, 2015).

Conocer el estado trófico del recurso hídrico es una de las necesidades más importantes de una región. Al saber su estado se aprovecha mejor el recurso ya sea para fines agrícolas, de consumo humano, de conservación del ambiente acuático, preservación de la diversidad y como estrategia para potencializar el desarrollo del turismo en la zona. La carga de nutrientes desde las zonas agropecuarias, junto a las urbanizaciones son los factores que en su mayoría alteran el estado trófico de un lago o laguna, cambiando desde un estado “claro” a uno “turbio” altamente eutrófico. (Quiróz et al., 2006).

Gonzales & Mendoza (2019) describen a las tecnologías actuales de teledetección como aquellas que nos muestran datos y herramientas de observación de la Tierra para inspeccionar los cambios de cobertura de suelo y agua, mostrar alertas ante amenazas ecológicas, gestionar el territorio y monitorear la diversidad ecosistémica sin necesidad de estar en la zona de estudio.

Bonanseña, et al., (2012) utilizó imágenes satelitales CBERS - 2B y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para modelar la distribución espacial de la eutrofización a través de las concentraciones de clorofila -a y la transparencia del agua del embalse, también midió parámetros fisicoquímicos y biológicos durante el año 2008. De acuerdo con los valores de reflectancia de las bandas del satélite, fue posible identificar la relación entre la variable clorofila - a y el límite de la zona fótica en todo el reservorio, además, con una combinación de bandas estableció ecuaciones para $Cl-a = 32.71*b2 + 0.45*b3 - 45.02$ y para $z-fot = 0.01*b1 - 1.02*b4 + 40.96$. Todo esto nos llevó a la conclusión de que existe una correlación negativa entre la clorofila-a y la transparencia del agua del embalse en estudio.

El proceso natural de envejecimiento de los lagos se denomina eutrofización. Según Ramalho (2003) esto ocurre por “el enriquecimiento de nutrientes, con presencia de microalgas que terminan consumiendo el oxígeno que otros seres vivos necesitan para subsistir”. La eutrofización está relacionada con la demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno (DQO y DBO) que expresan la cantidad de oxígeno que necesaria para que el ecosistema consuma una cantidad determinada de un contaminante (Vallejo, 2012).

Ramalho (2003) sostiene que el grado de contaminación y la concentración de oxígeno disuelto en el agua (OD) también establecen una relación. Los niveles más altos de oxígeno disuelto indican una mejor calidad del recurso, además, a mayor cantidad de materia orgánica en el agua, mayor oxígeno necesitan los microorganismos para oxidarla. Por otro lado, Ramalho también menciona que la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica biodegradable y la demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación de contaminantes. Según Vallejo (2012), ambos son indicadores en procesos de control de calidad del agua y cuanto mayor sea la DBO y DQO en el agua, mayor será la

cantidad de oxígeno necesario para que los organismos aerobios del agua procesen ese nutriente. Si toman valores muy altos la presencia en exceso de nutrientes provocará la eutrofización consumiendo todo el oxígeno y alterando la cadena trófica de ese ecosistema. Otro indicador de la eutrofización es la medida de la transparencia de las aguas y de su color. Si el agua está verde y la luz solo es capaz de atravesar unos pocos metros de la columna de agua, habrá eutrofización.

La laguna San Nicolás se encuentra en la provincia de Cajamarca y constituye uno de los atractivos turísticos más visitados de la provincia, y uno de los principales destinos para el avistamiento de aves. Por este motivo, es importante determinar el estado trófico de la laguna para su conservación. La existencia de la laguna San Nicolás garantiza el mantenimiento del servicio ecosistémico paisajístico de la zona que se sustenta en la actividad turística.

La ubicación y extensión de la laguna permite el uso de sensores remotos y la aplicación de softwares. Este es el caso de PCI Geomatics, un software usado para estimar los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua (turbiedad y Clorofila a) que permitan clasificar el nivel trófico de la laguna y generar bases para una adecuada gestión de los recursos hídricos con acciones de recuperación y restauración de los ecosistemas.

ÁREA DE ESTUDIO

La laguna San Nicolás está ubicada en el distrito de Namora en la provincia de Cajamarca y a 30 kilómetros de la ciudad de Cajamarca. Las actividades más resaltantes en el área de estudio son el turismo, actividad agrícola y pecuaria. La laguna San Nicolás está a una altitud de 2800 m.s.n.m. y cuenta con 108 hectáreas. Las coordenadas de su punto central son $7^{\circ}14'08''S$ y $78^{\circ}21'14''O$.

FIGURA 1.
Mapa de ubicación



Fuente: Google Earth

TABLA 1.
Coordenadas UTM de los puntos de muestreo

Vértices	Este	Norte	Zona
P1	792516	9199602	17M
P2	793346	9199269	17M
P3	793558	9199508	17M
P4	793860	9199140	17M
P5	796520	9199022	17M

Fuente: Elaboración propia.

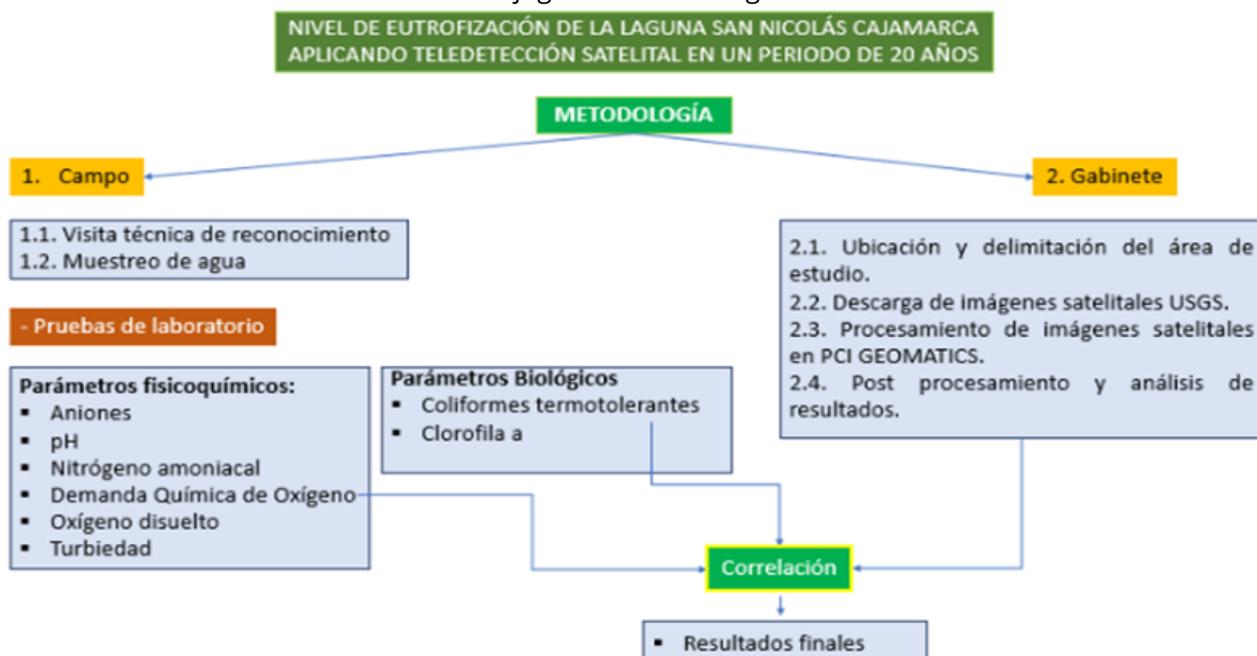
METODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Este trabajo constituye una investigación descriptiva. Según la naturaleza de datos, es cuantitativa y según la manipulación de la variable es experimental.

POBLACIÓN Y MUESTRA

De acuerdo con la delimitación de la laguna San Nicolás, la población tiene un área de 108 hectáreas aproximadamente. La muestra seleccionada comprende 5 puntos del espejo de agua que se determinaron sobre la base de la firma espectral según el índice del estado trófico *IETChl-a* de la laguna.

FIGURA 2.
Flujograma metodológico



Fuente: Elaboración propia

TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Estas fueron las técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos utilizadas:

Materiales: Disco de Secchi, material de muestreo, libreta de apuntes, GPS.

Software: PCI Geomatics y ArcGIS.

TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo se desarrolló en julio y agosto del 2019 con el objetivo de correlacionar los datos obtenidos del muestreo de la fecha realizada con los datos obtenidos de las imágenes de satélite. En las visitas semanales se realizó el reconocimiento de la zona de estudio, la cobertura del suelo y del agua, los cultivos y la población. Durante el recorrido se observó que la laguna San Nicolás no tiene problemas de contaminación por residuos sólidos o descargas de efluentes.

Sin embargo, en la laguna se pudo apreciar la siembra de algunos cultivos y actividad ganadera en el punto 3 de la laguna (Figura 1), también se evidenció presencia de algunas floraciones y un cambio de color que va de "turbio" a "claro" en los puntos 2 y 3. Asimismo, se observó la presencia significativa de matara o totora (*Scirpus californicus*), una especie vegetal que es extraída por los pobladores para construir embarcaciones, elaborar petates, carteras o sombreros, actividades claves que incentivan el turismo local.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Para esta investigación se ha optado por analizar turbiedad y clorofila a para conocer el estado trófico de la laguna. Además, se han analizado parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua para conocer si los resultados se encontraban dentro de los estándares de calidad ambiental que exige la normativa del Ministerio de Ambiente (MINAM). Los parámetros considerados se pueden observar en las tablas 2 y 3.

TABLA 2.
Parámetros fisicoquímicos considerados

Parámetro	Unidad
Fluoruro, Cloruro, Nitrito Bromuro, Nitrato, Sulfato, Fosfato	mg/L
°pH a 25 °C	pH
Dureza Total	mg/L
Nitrógeno Amoniacal	mgN-NH ₃ /L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L
Conductividad	uS/cm
Color Verdadero	UC
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L
Turbiedad	UNT

Fuente: Laboratorio Regional del Agua.

TABLA 3.
Parámetros biológicos considerados

Parámetro	Unidad
Coliformes Termotolerantes	NMP/ mL
Clorofila a	mg/L

Fuente: Laboratorio SGS.

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

En este estudio se utilizaron imágenes Landsat 5 para los años 1998 (7 de julio), 2008 (2 de julio) y Landsat 8 para el 2019 (2 de agosto). La selección de las fechas estuvo relacionada con la escasa nubosidad y con las fechas de muestreo. La descarga se realizó del servidor Earth Explorer de United States Geological Survey (USGS).

Para el procesamiento de las imágenes se realizó una selección o recorte del área de estudio. Después se hizo la conversión a radiancia y luego a reflectancia superficial, considerando la corrección atmosférica, a través del algoritmo ATCOR Ground Reflectance a nivel del terreno procurando eliminar la mayor cantidad de vapor de agua y aerosoles. Una vez corregida la imagen, se calcularon los índices para cada imagen.

Los índices de vegetación son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites. Su labor es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación y el agua. Son imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. El resultado de estas operaciones permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales. En la Tabla 4 podemos revisar cuáles fueron los índices de vegetación utilizados para los cálculos señalados.

TABLA 4.
Índices de vegetación utilizados

Índice	Fórmula	Referencia
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$	Rouse et al., 1974
Índice diferencial de agua normalizado (NDWI)	$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)/(GREEN + NIR)}{(GREEN + NIR)}$	Gao, 1996
Índice de relación de clorofila pigmentada normalizada (NPCRI)	$NPCRI_{L5} = \frac{Band_3 - Band_1}{Band_3 + Band_1} \text{ Landsat 5 TM}$	GU, 2019

Índice	Fórmula	Referencia
Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)	$GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$	Gitelson et al. 1996
Ratio vegetation index (RVI)	$RVI = \frac{NIR}{RED}$	Pearson & Miller, 1972
Green vegetation index (GVI) O GRVI	$GVI = \frac{NIR}{GREEN}$	Sripada, 2005
Índice de diferencia normalizada verde-rojo (NGRDI)	$NGRDI = \frac{(GREEN - RED)}{(GREEN + RED)}$	Gitelson et al., 2002
Green coverage index (GCI)	$GCI = \left(\frac{NIR}{Green} \right) - 1$	EOS, 2019

Nota. Estos contenidos fueron organizados a partir de las referencias citadas en la tabla.

Como se aprecia en la Tabla 5, para determinar los criterios de calidad de agua y eutrofización se utilizaron parámetros de calidad de agua extraídos de la investigación desarrollada por Figueroa et al, (2015).

TABLA 5.
Índices de parámetros de calidad de agua utilizados

Índice	Fórmula
Demanda bioquímica de oxígeno	$DBO L5 = 1.79 - 0.789 * (B1) + 52.36 * (B2) - 3.28 * (B3)$ $DBO L8 = 1.79 - 0.789 * (B2) + 52.36 * (B3) - 3.28 * (B4)$
Demanda química de oxígeno	$DQO L5 = 2.76 - 17.27 * (B1) + 72.15 * (B2) - 12.11 * (B3)$ $DQO L8 = 2.76 - 17.27 * (B2) + 72.15 * (B3) - 12.11 * (B4)$
Índice del estado trófico de clorofila	$IET Chl - a L5 = 43.46 + 142.2 * (B3) + 104.54 * \left(\frac{B5}{B3} \right) - 418.55 * (B5)$ $IET Chl - a L8 = 43.46 + 142.2 * (B4) + 104.54 * \left(\frac{B6}{B4} \right) - 418.55 * (B6)$
Concentración de clorofila	$Chl - a L5 = -1.69996 + 990.717 * (B1 * B1) - 4655.07 * (B1 * B4) + 6363.27 * (B4 * B4)$ $Chl - a L8 = -1.69996 + 990.717 * (B2 * B2) - 4655.07 * (B2 * B5) + 6363.27 * (B5 * B5)$ $Cl - a L5 = 32.71 * B2 + 0.45 * B3 - 45.02$ $Cl - a L8 = 32.71 * B3 + 0.45 * B4 - 45.02$ $z - fot = 0.01 * B1 - 1.02 * B4 + 40.96 \text{ (Parámetro opcional de zona fótica -CBERS2B)}$

Índice	Fórmula
Turbiedad	$T L5 = 6.1437 * (B2) - 2.702 * (B3) + 5.1736 * (B4) - 5.8274 * (B5)$ $T L8 = 6.1437 * (B3) - 2.702 * (B4) + 5.1736 * (B5) - 5.8274 * (B6)$
Índice del estado trófico	$IET L5 = -2.6047 * (B2) + 0.5671 * (B3) + 2.9817 * (B4)$ $IET L8 = -2.6047 * (B3) + 0.5671 * (B4) + 2.9817 * (B5)$

Fuente: Figueroa et al, (2015).

Una vez obtenidos los valores de diferentes índices y ecuaciones de eutrofización de los años 1998 y 2008 se procedió a evaluar el año 2019. Con estos valores se realizó una calibración con los resultados de laboratorio. Posteriormente, se realizaron correlaciones con los índices que más se acercaron a la realidad y que estuvieron más relacionados con eutrofización, los cuales fueron obtenidos por teledetección y que se muestran en los resultados. Esto permitió identificar los índices más adecuados para la distribución del nivel trófico de la laguna San Nicolás.

RESULTADOS

Índices de vegetación

Los valores obtenidos del NDVI (-1 a 1), contrarios al NDWI, describen el contenido de agua en la planta. Los valores negativos están asociados a zonas de agua y los positivos a presencia de vegetación. Esto significa que cuanto más cercano es a 1, la zona de agua es más saludable. En la Tabla 6 se observa que, en su mayoría, los puntos de muestreo para el año 1998 corresponden a presencia de vegetación, excepto el punto 4, que es cobertura de agua (Figura 3 y Figura 4). Morillo, et al., (2018) encontraron que los valores calculados mediante el NDVI son más precisos y permiten observar claramente las zonas de productividad primaria que puedan existir en un lago.

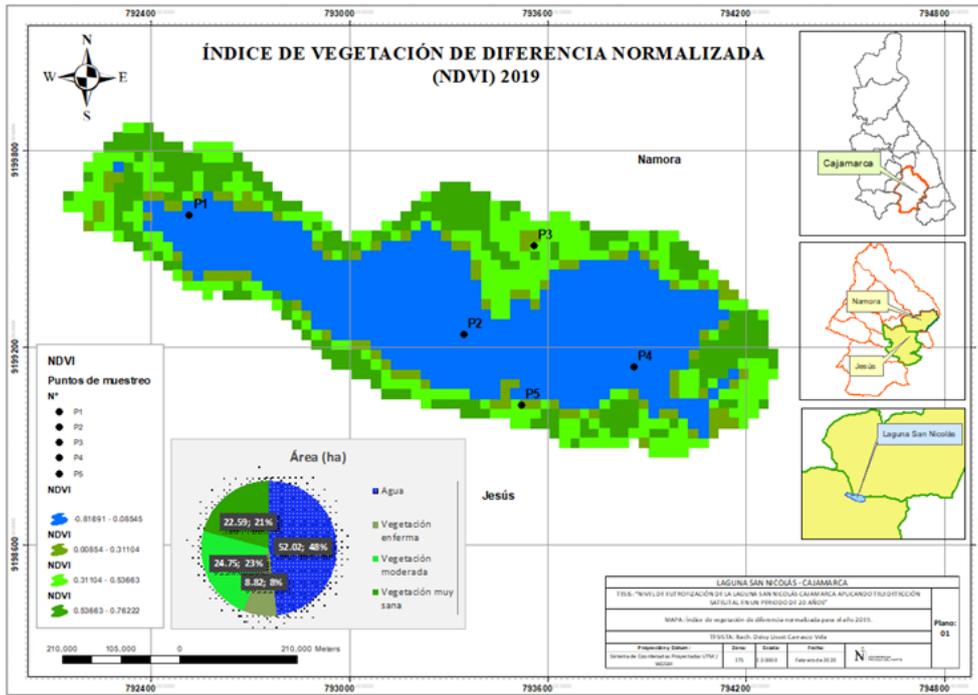
TABLA 6.

Resultados del Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) e Índice de Agua Normalizada (NDWI)

Puntos	AÑO					
	1998		2008		2019	
	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI
P1	0.407	-0.405	-0.081	0.044	-0.265	0.437
P2	0.704	-0.669	-0.081	0.159	-0.466	0.628
P3	0.250	-0.429	0.484	-0.629	0.443	-0.509
P4	-0.128	0.463	0.028	0.044	-0.378	0.568
P5	0.356	-0.288	0.480	-0.321	0.257	-0.255

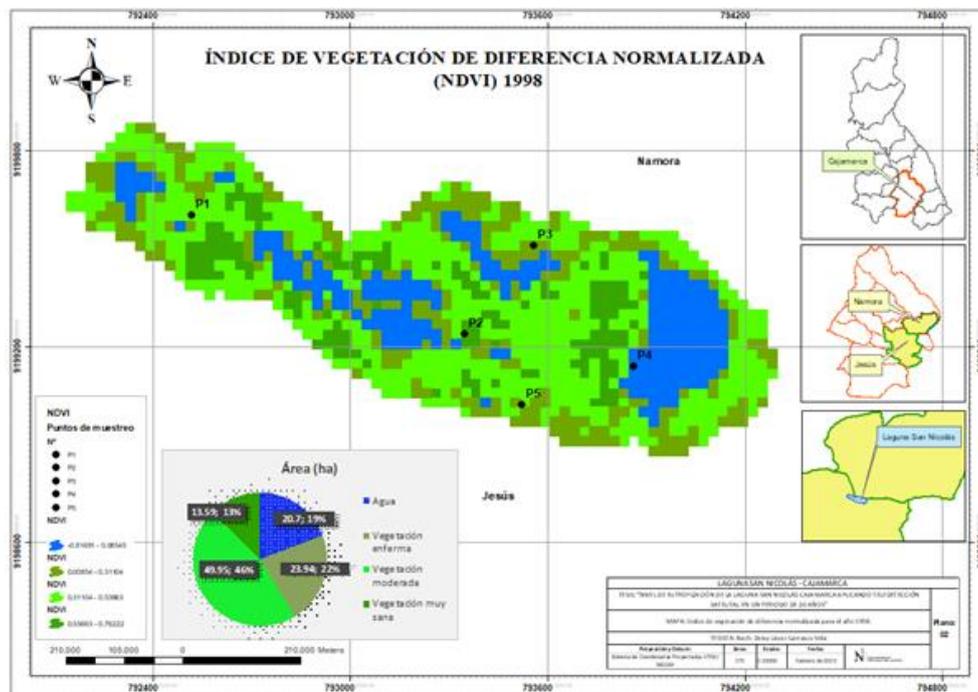
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.
Mapa de distribución del NDVI para el año 2019



Fuente: Imagen satelital obtenida de Earth Explorer-USGS.

FIGURA 4.
Mapa de distribución del NDVI para el año 1998



Fuente: Imagen satelital obtenida de Earth Explorer-USGS.

El coeficiente de correlación de Pearson de los valores de reflectividad del NDVI para los años 1998, 2008 y 2019 indica que existe una correlación negativa muy baja para los años 1998 y 2008 ($r = -0.1873255$), y para los años 1998 al 2019 una hay una correlación negativa casi nula ($r = -0.11233638$). Sin embargo, existe una correlación positiva muy alta para los años 2008 y 2019 ($r = 0.95847378$). Sobre la correlación para el NDWI, hay una correlación positiva muy baja para 1998 y 2008 ($r = 0.12743203$) y es similar para los años 1998 y 2019 ($r = 0.21107045$). Para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi perfecta ($r = 0.98140164$).

El índice de relación del pigmento de clorofila normalizada (NPCRI) tiene una escala de -1 a 1. Los valores de 0.3 en adelante indican la presencia de clorofila. Tal como se muestra en la Tabla 6, en la actualidad solo el punto 4 y el punto 5 están en el límite de cuantificación de clorofila. Mientras que, en el año 1998, la mayor parte del área de la laguna tiene valores mayores a 0.3 evidenciando la presencia de vegetación sobre la superficie de agua. Existe una correlación positiva alta para 1998 y 2008 ($r = 0.72078535$). Sin embargo, para los años de 1998 y 2019 la correlación es moderada ($r = 0.5113861$) y para los años 2008 y 2019 hay una correlación positiva casi nula ($r = 0.01401355$).

TABLA 7.

Resultados del índice de relación del pigmento de clorofila normalizada (NPCRI)

NPCRI	AÑO		
	1998	2008	2019
P1	0.383	0.612	0.108
P2	0.519	0.988	0.149
P3	0.473	0.496	0.346
P4	0.025	0.379	0.106
P5	0.451	0.741	0.336

Fuente: Elaboración propia.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) presenta valores en el rango de -1 y 0. Para el año 2019, tal como se observa en la Tabla 8, la mayoría de los puntos indican zonas con agua, mientras que en 1998 solo se realiza la vegetación. Por otro lado, la Ratio Vegetation Index (RVI) muestra valores -1 a 1; los valores positivos a partir de 1 ayudan a visualizar solo cobertura vegetal. El Green Vegetation Index (GVI) O GRVI enfatiza la vegetación verde con valores positivos.

En cuanto al GNDVI, hay una correlación positiva casi nula para los años 1998 y 2008 ($r = 0.12743287$), mientras que los años 1998 y 2019 tienen una correlación moderada ($r = 0.21107045$). Para los años 2008 y 2019, aparece una correlación positiva casi perfecta ($r = 0.98140174$). En el caso del RVI, existe una correlación negativa moderada para 1998 y 2008 ($r = -0.36837322$), algo similar ocurre para los años de 1998 y 2019 ($r = -0.36325495$); mientras que para los años 2008 y 2019 hay una correlación positiva ($r = 0.94138881$). Para el caso del GVI existe una correlación negativa casi nula para los años 1998 - 2008 y para los años 1988 - 2019 ($r = -0.07867468$, $r = -0.08780681$, respectivamente); mientras que para los años 2008 y 2019 hay una correlación positiva casi perfecta ($r = 0.98118652$).

TABLA 8.
Resultados del GNDVI, RVI y GVI

Puntos	AÑO								
	1998			2008			2019		
	GNDVI	RVI	GVI	GNDVI	RVI	GVI	GNDVI	RVI	GVI
P1	0.405	2.375	2.362	-0.044	0.849	0.915	-0.437	0.580	0.391
P2	0.669	5.779	5.048	-0.159	0.849	0.724	-0.628	0.364	0.228
P3	0.429	1.668	2.507	0.629	2.880	4.39	0.509	2.596	3.078
P4	-0.463	0.771	0.366	-0.044	1.058	0.915	-0.568	0.450	0.275
P5	0.288	2.106	1.809	0.321	2.849	1.949	0.255	1.693	1.687

Fuente: Elaboración propia.

El Índice de Diferencia Normalizada Verde-Rojo (NGRDI), contrario a otros índices, indica presencia de agua cuando el valor es mayor a 0.0. El Green Coverage Index (GCI) muestra masas de agua (valores negativos), contenido de clorofila en vegetación enferma (0 a 1), vegetación moderada (1 a 2.9) y vegetación saludable (2.9 a 9.8). En la Tabla 9 se puede apreciar que hace dos décadas en la mayoría de los puntos de muestreo se encontraba vegetación, especialmente el punto 2, que es el centro de la laguna. Para los años de 1998 y 2019 existe una correlación alta ($r = 0.71043146$).

En el caso del GCI hay una correlación negativa muy baja para 1998 y 2019 ($r = -0.08780647$). Sin embargo, para el 2008 y 2019 existe una correlación positiva casi perfecta ($r = 0.98065284$).

TABLA 9.
Resultados del NGRDI y el GCI

Puntos	1998		2008		2019	
	NGRDI	GCI	NGRDI	GCI	NGRDI	GCI
P1	0.003	1.362	-0.037	-1.137	0.194	-0.608
P2	0.068	4.048	0.079	-1.565	0.230	-0.776
P3	-0.201	1.507	-0.208	5.984	-0.084	2.078
P4	0.355	-0.63	0.072	-1.137	0.241	-0.724
P5	0.076	0.809	0.187	0.951	0.001	0.687

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros de calidad de agua y eutrofización

Los resultados obtenidos muestran variabilidad entre los años 1998 al 2019 (Tabla 10), reduciéndose las concentraciones de DBO, excepto en el punto 5, en el que la concentración ha aumentado. Las concentraciones de DQO han disminuido notablemente en el período de 20 años lo que es un claro indicador de la mejora de calidad de agua de la laguna.

TABLA 10.
Resultados de DBO Y DQO

Puntos	AÑO					
	1998		2008		2019	
	DBO	DQO	DBO	DQO	DBO	DQO
P1	122.728	132.874	80.843	91.585	82.656	91.570
P2	80.239	93.180	103.608	129.598	78.168	89.229
P3	348.196	331.908	98.235	94.739	118.448	119.023
P4	149.354	174.173	81.812	92.121	85.633	97.117
P5	102.159	117.1	104.587	130.365	109.928	117.195
Promedio	175.129	183.034	91.125	102.011	91.227	99.235

Fuente: Elaboración propia.

El índice del estado trófico de la laguna es uno de los principales indicadores de la variabilidad de concentraciones de clorofila a (cl-a) en el agua. En la Tabla 11 se muestran los valores de cl-a obtenidos por teledetección para el período de 20 años con una disminución del contenido del pigmento fotosintético, debido a que en 1998 la vegetación abarcaba la mayor parte de la laguna, superando a los actuales, a excepción del punto 5, que muestra una anomalía en las reflectancias.

La disminución de la cl-a en los años 1998 y 2019 es un claro indicador de recuperación del cuerpo de agua. Los valores obtenidos se aplicaron a las ecuaciones propuestas por Carlson para conocer el estado trófico desde 1998 hasta 2019 obteniendo los resultados del TSI, que evidencian una recuperación en el cuerpo de agua, pasando de estado eutrófico a mesotrófico en un período de 20 años.

TABLA 11.
Resultados del Índice del Estado Trófico (TSI) promedio para el período de 20 años

Puntos de Muestreo	Clorofila - a (Teledetección)								
	1998			2008			2019		
	cl - a	TSI	Estado Trófico	cl - a	TSI	Estado Trófico	cl - a	TSI	Estado Trófico
P1	37.24	66.09	Eutrófico	8.952	52.1	Mesotrófico	8.676	51.6	Mesotrófico
P2	7.68	50.6	Mesotrófico	22.97	61.34	Eutrófico	5.442	47.22	Mesotrófico
P3	201.0	82.63	Eutrófico	23.59	61.61	Eutrófico	35.75	65.68	Eutrófico
P4	51.29	69.23	Eutrófico	8.796	51.93	Mesotrófico	10.33	53.51	Mesotrófico
Promedio	74.31	67.14	Eutrófico	16.08	56.74	Mesotrófico	15.05	54.50	Mesotrófico

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de turbiedad han disminuido con el pasar de los años. Esto indica una mejora en la transparencia del agua, tal como se muestra en la Tabla 12. La zona fótica nos muestra la

profundidad en relación a la turbiedad, indicando que el cuerpo de agua se está recuperando en cuanto a la transparencia. En cuanto a la turbiedad, existe una correlación negativa para los años 1998 y 2019 ($r = -0.9$) y para el caso de z-fot hay una correlación positiva alta para 1998 y 2019 ($r = 0.8$).

TABLA 12.
Resultados de turbiedad y z- fot

Puntos	AÑO					
	1998		2008		2019	
	Turbiedad	z-fot	Turbiedad	z-fot	Turbiedad	z-fot
P1	33.643	34.993	4.658	39.445	7.480	40.319
P2	16.037	32.766	7.291	39.441	6.959	40.610
P3	-35.714	22.147	36.251	31.751	14.44	33.345
P4	14.513	39.878	10.360	39.447	7.895	40.496
P5	16.659	37.208	22.836	36.876	8.732	37.149

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los resultados de laboratorio, los puntos 2 y 3 presentan baja Demanda Química De Oxígeno (DQO) y el punto 4 una demanda moderada. Los puntos 1 y 5 son los que mayor cantidad de oxígeno consumen por la oxidación de contaminantes. En cuanto al Oxígeno Disuelto (OD), los valores muestran que el punto 4 y 5 son los que tienen mayor concentración de oxígeno y presentan menos contaminación, mientras que el punto 3 tiene una concentración crítica de oxígeno, es decir, que es tan baja que no es posible la presencia de organismos.

Las concentraciones de aniones son mínimas y están por debajo del límite de cuantificación del método. El contenido de fluoruro y cloruro también son bajos en todos los puntos de muestreo, lo que es un buen indicador de calidad de agua. Los nitratos y fosfatos en altas concentraciones son indicadores de eutrofización a causa de los aportes de aguas residuales descargadas a los cuerpos de agua (Díaz y Sotomayor, 2013).

Los valores de pH y color son casi constantes en todos los puntos de muestreo, a excepción del punto 3 que muestra un ligero cambio, que no se consideran alarmantes y son aceptables según los Estándares de Calidad Ambiental para la conservación del ambiente acuático categoría 4, subcategoría E1 (lagunas y lagos).

Los valores de coliformes termo-tolerantes indican que el punto 1 es el que tiene mayor concentración. Esto se debe a que esa zona es muy utilizada como bebida de ganado y estos, al eliminar sus heces, aumentan los niveles de las bacterias coliformes en el agua.

Los datos de turbiedad muestran los mayores valores en el punto 3, muy contrario al punto 2, ubicado en el centro de la laguna, donde se encuentra la zona con mayor transparencia. El disco de Secchi determinó que las profundidades tienen relación con los cambios en las concentraciones de clorofila, tal como ocurre con el punto 3 que es el de mayor concentración de cl-a (35.74) para el 2019. Los resultados de las concentraciones de clorofila en laboratorio fueron tan bajas que no se logró evidenciar algún cambio en ninguno de los puntos de muestreo.

La conductividad eléctrica y la dureza tuvieron valores constantes en casi todos los puntos de muestreo, a excepción del punto 3, que es la zona con menor transparencia de toda la laguna, que alcanzó un valor de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para conductividad y 287.3 mg/L para dureza.

Calibración

Para realizar la calibración se utilizaron datos de clorofila A de laboratorio y datos de satélite. Sin embargo, todos los resultados en los 5 puntos de muestreo de campo fueron iguales, por lo que no se pudo realizar la calibración con dicho parámetro. Pero, se optó por utilizar los datos de turbiedad (UNT) y DQO. Con la correlación positiva casi perfecta ($R^2= 0.9702$) se demostró que existe un gran potencial del sensor satelital para obtener datos de turbiedad en la laguna San Nicolás, así como también en el caso de DQO ($R^2= 0.9404$).

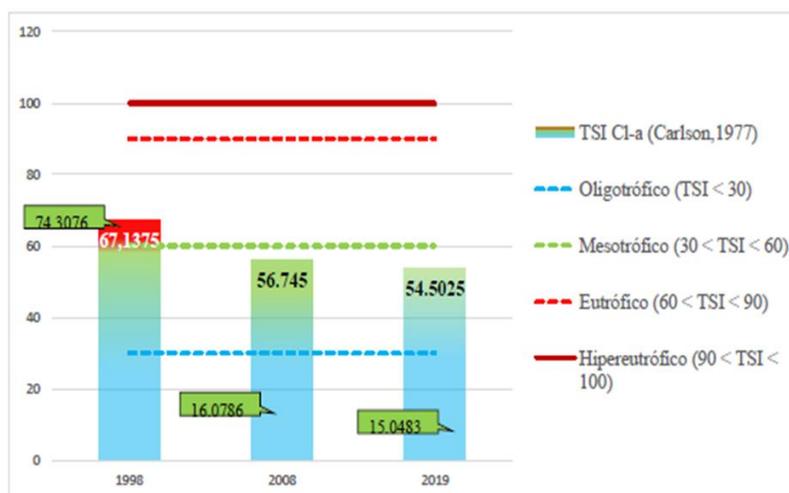
Para relacionar los valores de clorofila A (Cl-a) obtenidos por satélite con los de campo se utilizaron los resultados de laboratorio de Clorofila A y turbiedad (disco de Secchi) en las ecuaciones del índice del estado trófico (TSI), propuesto por Carlson (1977). Luego, se compararon los datos de satélite a la escala de valores del estado trófico de 1 al 100.

Teniendo en cuenta los valores de turbiedad obtenidos por el satélite se realizó la clasificación trófica con el promedio de cada año. Según los resultados obtenidos, la laguna San Nicolás pasa de un estado eutrófico a mesotrófico de acuerdo a la transparencia del disco de Secchi.

Discusión

La interpretación de resultados está centrada en los parámetros de eutrofización, tales como clorofila A, turbiedad, fosfatos y nitratos. Estos dos últimos tuvieron valores mínimos por debajo del límite de cuantificación del método, es decir, el laboratorio no pudo reportar dichos resultados. Los valores de clorofila A obtenidos en laboratorio para los cinco puntos de muestreo fueron iguales (0.003mg/L) y, de acuerdo con la escala del nivel trófico establecido por Carlson (1977), ubican a la laguna en un estado mesotrófico (Figura 5). Así mismo, aplicando la metodología del índice del estado trófico (TSI) para clorofila A se obtuvo como resultado $\text{TSI} = 41.38$, lo que indica que la laguna San Nicolás se encuentra en un estado mesotrófico.

FIGURA 5.
Distribución de clorofila A en el período 1998 - 2019- teledetección



Fuente: Elaborado con información de Carlson (1977).

Las concentraciones de cl-a obtenidas por teledetección y clasificadas según Carlson (1977), así como el TSI cl-a, indican que la laguna San Nicolás ha pasado de estado eutrófico a mesotrófico en un período de 20 años. Esto significa que el cuerpo de agua se está recuperando y actualmente tiene niveles moderados de nutrientes.

El procesamiento en las bandas de las imágenes satelitales para zona fótica (z-fot) relacionó a este indicador de calidad de agua con cl-a y turbiedad. Margalef (2002) citado por Bonansea et al. (2012) define al límite de la zona fótica como la profundidad en la cual la intensidad de la luz está muy por debajo del lugar para los procesos de fotosíntesis. Mientras menor sea el límite de la zona fótica, menor será la transparencia y un lago eutrofizado con crecimientos masivos de algas impiden la penetración de la luz en la superficie dando valores bajos de z-fot.

Bonansea, et al., (2012), a través de modelos de regresión, determinaron la distribución espacial de la eutrofización y concluyeron que existe una correlación negativa entre la concentración de clorofila -a y la transparencia del agua del embalse, similar para la correlación de cl-a y z-fot del presente estudio en la laguna San Nicolás ($r = -0.96$).

En función del TSI para el disco de Secchi, la laguna San Nicolás se encuentra en un nivel mesotrófico para los puntos 1, 2, 4 y 5 con valores de TSI de 54.64, 49.31, 69.42 y 60.29, respectivamente. Sin embargo, el punto 3 tiene un TSI de 77.35, lo que muestra un estado eutrófico debido a la actividad ganadera.

En relación a los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos como pH y conductividad eléctrica, se obtuvo un promedio de 8.052, y 243.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. El incremento de la conductividad eléctrica en el agua, está determinada por la mayor presencia de sólidos suspendidos y la transparencia, lo cual nos indica un mayor nivel de iones en solución producto de los procesos eutróficos que se generan en el ecosistema lagunar (Díaz y Sotomayor, 2013).

En cuanto al oxígeno disuelto, los puntos 4 y 5 fueron los únicos que cumplieron con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aguas. El punto 3 contiene menor OD y esto se debe al aporte de la actividad antrópica, al ganado y a sus heces que son vertidas en la zona en cuestión, y que son descompuestos por bacterias aeróbicas. Sin embargo, el promedio de OD en los puntos de muestreo fue inferior al mínimo exigido.

Los valores de color verdadero no sobrepasaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, lo que considera categoría 4 (Conservación del ecosistema acuático) y subcategoría E1 (Lagos y lagunas). Si estos valores sobrepasan los ECA de color impedirán el paso de luz para el desarrollo de la biodiversidad (DIGESA, 2009).

Las concentraciones de aniones se encuentran por debajo del límite de cuantificación del método (<LCM), a excepción del Fluoruro y Cloruro, que en promedio se obtuvo 0.339 mg/L y 2.084 mg/L, respectivamente, y que al compararse con los ECA para agua resultan aptos para riego de vegetales.

La dureza cumplió con los ECA, lo que determina que es apta para usarse en la producción de agua potable (con desinfección), mientras que los Coliformes Termotolerantes cumplen la categoría 3 (Riego de vegetales y bebida de animales) y 4 (Conservación del ambiente acuático).

Los resultados obtenidos de demanda química de oxígeno (DQO) y turbiedad demuestran que es apta para la Categoría 1, subcategoría B - B1 (aguas superficiales destinadas para la recreación, contacto primario). En función de estos parámetros se concluye que la calidad de agua de la laguna

San Nicolás es aceptable, ya que a mayor DQO y turbiedad, más contaminante es la muestra, lo que no sucede con nuestros resultados.

CONCLUSIONES

- En esta investigación se determinaron parámetros de calidad de agua, tales como DBO, DQO, índice de estado trófico de clorofila (IETChla), turbiedad (T) y clorofila A (cl-a) mediante técnicas de teledetección los años 1998 y 2019, que disminuyeron notablemente sus concentraciones en función del tiempo, hecho que indican la mejora de calidad del agua de la laguna.
- Los resultados obtenidos por teledetección satelital que tuvieron más relación con los valores de cl-a son el DBO ($r = 0.99$), GCI ($r = 0.97$), NGRDI ($r = -0.98$), GVI (0.97), RVI ($r=0.98$), GNDVI (0.99), NPCRI ($r=0.95$), NDWI ($r = -0.99$) y NDVI ($r = 0.98$).
- Es posible contrastar los resultados obtenidos de clorofila A, turbiedad, DQO mediante teledetección con muestreos de campo, a través de una correlación de parámetros, obteniendo ($r= 0.9850$) para turbiedad satelital y turbiedad (UNT) con respecto a las concentraciones de clorofila a satelital (cl-a). Además, se demostró que es el parámetro más confiable para establecer el estado trófico del cuerpo de agua, ya que los resultados constantes de laboratorio $< 3 \text{ ug/L}$ ubicaron a la laguna en estado mesotrófico al igual que los valores satelitales de cl-a (15.048).
- En este estudio se concluye que fue posible determinar el nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás aplicando teledetección satelital en un período de 20 años. Según la clasificación trófica de Carlson, el promedio de clorofila a (cl-a) muestra que la laguna pasa de estado eutrófico (cl-a = 74.3076) a mesotrófico (cl-a = 15.0483) y de acuerdo al promedio de la transparencia del disco de Secchi, también pasa de un estado eutrófico a mesotrófico ($T = 21.3978$ a $T = 9.1941$, respectivamente), evidenciando la disminución en las concentraciones de ambos parámetros. Esto indica la recuperación del cuerpo de agua debido a que la población y las autoridades de Namora han tomado conciencia de la adecuada gestión y conservación del recurso agua reduciendo la actividad ganadera y el vertimiento de desechos orgánicos ricos en fosfatos y nitratos aledaños a la laguna. Esta situación y el uso eficiente de fertilizantes en las actividades agrícolas potencian un turismo responsable y sostenible con el ambiente a través de monitoreos continuos de calidad de agua para identificar la presencia de algas y otros organismos contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Bonansea, M., Ledesma, C., Rodriguez, C. & Sánchez, A. (2012). *Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B*. En *Ambiente & Agua*, 7 (3), pp. 61 – 71. Recuperado de:
<http://www.scielo.br/pdf/ambiagua/v7n3/v7n3a06.pdf>
- Carlson, R. (1977). *A tropic state for lakes*. De Limnological Research Center, University of Minnesota, Minneapolis, 22 (2), pp. 361 -369. Recuperado de:
<https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.4319/lo.1977.22.2.0361>

- Díaz, A. & Sotomayor, L. (2013). *Evaluación de la Eutrofización de la Laguna Conococha – Ancash a agosto de 2012. (Tesis de Pregrado)*. Universidad Nacional Santiago de Antúnez de Mayolo. Ancash, Perú. Recuperado de:
https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis_Diaz_y_Sotomayor_2013.pdf
- Escobar, J. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. En Recursos Naturales e Infraestructura (diciembre, 2002). [En línea]. Recuperado de:
<https://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/LCL1799S.PDF>
- FAO. (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo*. En Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [En línea]. Recuperado en 2016, de: <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Figueroa, E., Márquez, O., Quiñonez, M. & Alatorre, L. (2015). *Estimación de Parámetros Relativos a la Calidad del Agua Mediante Percepción Remota en la Laguna de Bustillos, Chihuahua, México*. De Memorias de resúmenes en extenso SELPER, pp. 1- 6. Recuperado de:
<http://www.selper.org.mx/images/Memorias2015/assets/m008.pdf>
- "Florida LAKEWATCH. (2010). *Trophic State: A Waterbody's Ability To Support Plants, Fish, and Wildlife*. [Folleto]. University of Florida." Recuperado de <http://lakewatch.ifas.ufl.edu/>
- Gao, B. (1996). *NDWI: un índice de agua de diferencia normalizada para la detección remota del agua líquida de la vegetación desde el espacio*. De Teledetección del Medio Ambiente, 58 (3), pp. 257 – 266. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425796000673>
- Gitelson, A., Kaufman Y. & Merzlyak, M. (1996). *Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS*. En Remote Sensing of Environment, 58 (10), pp. 289 – 298. Recuperado de:
<https://nebraska.pure.elsevier.com/en/publications/use-of-a-green-channel-in-remote-sensing-of-global-vegetation-fro>
- Gonzales, M. & Mendoza, E. (2019). *Introducción a la Teledetección*. Recuperado de:
https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/users/A50/EO4LM/EO4IM_Session_2_Espanol.pdf
- Morillo, G., Aldana, G., Pineda, A. & Royero, G. (2018). *Estimación de clorofila "a" en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes LANDSAT 8*. En Revista Mapping, 27 (188), pp. 1131 – 9100. Recuperado de: http://revistamapping.com/wp-content/uploads/2018/07/Revista-MAPPING-188_A1.pdf
- Pearson, R. & Miller, L. (1972). *Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. Estados Unidos*. Recuperado de: <https://www.worldcat.org/title/remote-mapping-of-standing-crop-biomass-for-estimation-of-the-productivity-of-the-shortgrass-prairie-pawnee-national-grasslands-colorado/oclc/32191266>
- Raffo, E. & Ruíz, E. (2014). *Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno*. En Industrial Data, 17 (1), pp. 71-80. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>
- Ramsar. (2018). *Perspectiva Mundial*

Sobre los Humedales. Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas 2018. En Convención de Ramsar sobre los Humedales. Recuperado de: https://static1.squarespace.com/static/5b256c78e17ba335ea89fe1f/t/5b9ffde60e2e7277f629f8df/1537211926308/Ramsar+GWO_SPANISH_WEB.pdf

Sripada P. (2005). Determining In-Season Nitrogen Requirements for Corn Using Aerial Color-Infrared Photography. (Tesis de doctorado). University Libraries, New York, Estados Unidos. Recuperado de: <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/4200>

Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona: España. (Edición Castellana) Recuperado de <https://es.slideshare.net/IngAmbientalMX/tratamiento-de-aguas-residuales-rs-ramalho>

Rouse, J., Haas, H., Schell, A. & Deering, W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. México, Texas. [Versión Electrónica]. Recuperado de: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>

Vallejo, J. (2012). *Eutrofización: causas y efectos*. En Triplenlace. Recuperado el 27 de septiembre de 2012, de: <http://triplenlace.com/2012/09/27/eutrofizacion-causas-y-efectos/>

ANEXO 1.

Resultados de índices y parámetros de calidad de agua y eutrofización para el año 2019

Puntos de Muestreo	Disco S	z- fot	DBO	DQO	Turbiedad Sat	Cl-a	Chl-a	IETChl-a	GCI	NGRDI	GVI	RVI	GNDVI	NPCRI	NDWI	NDVI	Conduct (µS/cm)	(F ⁻) (mg/L)	(C ⁻) (mg/L)	° pH a 25°C (pH)	Dureza Total (mg/L)	DQO (mg O ₂ /L)	Color Verdadero (UC)	Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	Colif. Termot. (NMP/100mL)	Turbiedad (NTU)	Clorofila (mg/L)
P1	145	40.31	82.65	91.57	7.48	8.67	733.31	41.8889	-0.6085	0.19419	0.39148	0.580	-0.43732	0.108	0.437	-0.2657	244	0.314	2.080	8.14	275.9	15.4	7.7	4.6	70	2.25	<0.003
P2	210	40.61	78.16	89.22	6.95916	5.44	119.64	92.0235	-0.77157	0.22914	0.22843	0.364	-0.62809	0.149	0.628	-0.466	241	0.329	2.038	8.23	277.8	10.7	7.7	4.9	23	2.41	<0.003
P3	30	33.34	118.44	119.02	14.4421	35.74	30923	-1606.38	2.0785	-0.0849	3.07855	2.596	0.5096	0.346	-0.509	0.44389	250	0.350	2.120	7.32	287.3	11.7	9.4	3.9	22	25.3	<0.003
P4	52	40.49	85.63	97.11	7.89518	10.32	255.57	78.7621	-0.72457	0.24136	0.27543	0.450	-0.56809	0.106	0.568	-0.3787	240	0.324	2.032	8.35	270.4	13.3	9.4	6.4	33	4.94	<0.003
P5	98	37.14	109.92	117.19	8.73285	28.60	71348.	-808.837	0.6873	0.00181	1.68731	1.693	0.25576	0.336	-0.255	0.25746	242	0.376	2.148	8.22	271.1	15.9	7.7	5.4	17	3.75	<0.003

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2.

Resultados de índices y parámetros de calidad de agua y eutrofización para el año 2019

	Disco S	z- fot	DBO	DQO	Turbiedad d S	Cl-a	Chl-a	IETChla	GCI	NGRDI	GVI	RVI	GNDVI	NPCRI	NDWI	NDVI	Conductividad (µS/cm)	(F ⁻) (mg/L)	(C ⁻) (mg/L)	° pH a 25°C (pH)	Dureza Total (mg/L)	DQO (mg O ₂ /L)	Color Verdadero (UC)	OD (mg O ₂ /L)	Colif. Termot. (NMP/100mL)	Turbiedad (UNT)	
DiscoS	1.0000																										
z- fot	0.6372	1.0000																									
DBO	0.6939	-0.9553	1.0000																								
DQO	0.6981	-0.9056	0.9894	1.0000																							
Turbiedad S	0.7031	-0.9542	0.8506	0.7776	1.0000																						
Cl-a	0.6848	-0.9626	0.9996	0.9853	0.8607	1.0000																					
Chl-a	0.6287	-0.9707	0.8633	0.7894	0.9930	0.8747	1.0000																				
IETChla	0.6279	0.9984	-0.9678	-0.9245	-0.9363	-0.9741	-0.9559	1.0000																			
GCI	0.6335	-0.9994	0.9631	0.9161	0.9442	0.9699	0.9619	-0.9994	1.0000																		
NGRDI	0.5623	0.9697	-0.9792	-0.9491	-0.8558	-0.9835	-0.8856	0.9805	-0.977	1.0000																	
GVI	0.6335	-0.9994	0.9631	0.9161	0.9442	0.9699	0.9619	-0.9994	1.0000	-0.9776	1.0000																
RVI	0.6358	-0.9934	0.9786	0.9393	0.9193	0.9839	0.9380	-0.9973	0.9968	-0.9897	0.9968	1.0000															
GNDVI	0.6062	-0.9606	0.9884	0.9651	0.8442	0.9909	0.8677	-0.9728	0.9699	-0.9969	0.9699	0.9860	1.0000														
NPCRI	0.4559	-0.9046	0.9508	0.9490	0.7412	0.9522	0.7883	-0.9268	0.9152	-0.9638	0.9152	0.9334	0.9580	1.0000													
NDWI	0.6062	0.9606	-0.9884	-0.9651	-0.8442	-0.9909	-0.8677	0.9728	-0.969	0.9969	-0.9699	-0.9860	-1.0000	-0.9580	1.0000												
NDVI	0.6248	-0.9532	0.9877	0.9653	0.8378	0.9894	0.8574	-0.9653	0.9632	-0.9925	0.9632	0.9814	0.9988	0.9465	-0.998	1.0000											
Conductividad (µS/cm)	0.4617	-0.8523	0.6942	0.5827	0.9065	0.7116	0.9123	-0.8273	0.8442	-0.7704	0.8442	0.8180	0.7473	0.5995	-0.747	0.7451	1.0000										
(F ⁻) (mg/L)	0.3256	-0.6507	0.8029	0.8613	0.4148	0.7947	0.4670	-0.6922	0.6699	-0.7780	0.6699	0.7107	0.7872	0.9041	-0.787	0.7777	0.2058	1.0000									
(C ⁻) (mg/L)	0.3662	-0.7504	0.8543	0.8566	0.5445	0.8528	0.5851	-0.7790	0.7734	-0.8857	0.7734	0.8179	0.8984	0.8760	-0.898	0.9059	0.5383	0.8215	1.0000								
°pH a 25°C (pH)	0.4977	0.8879	-0.7188	-0.6135	-0.9550	-0.7359	-0.9623	0.8623	-0.875	0.7789	-0.8753	-0.8402	-0.7503	-0.6381	0.750	-0.7404	-0.9757	-0.2503	-0.4711	1.0000							
Dureza Total (mg/L)	0.1703	-0.6840	0.4396	0.3126	0.7846	0.4636	0.8112	-0.6506	0.6650	-0.5495	0.6650	0.6122	0.4969	0.4238	-0.497	0.4762	0.8886	0.0186	0.2202	-0.9234	1.0000						
DQO (mg O ₂ /L)	0.1343	0.1093	0.1177	0.1796	-0.2657	0.1012	-0.2862	0.0785	-0.078	-0.0786	-0.0779	-0.0055	0.1384	0.0500	-0.138	0.1779	-0.1864	0.2342	0.4816	0.3536	-0.5847	1.0000					
Color Verdadero (UC)	0.8298	-0.4220	0.3587	0.3357	0.6176	0.3565	0.5351	-0.3908	0.3996	-0.2345	0.3996	0.3612	0.2533	0.1297	-0.253	0.2569	0.3675	-0.0591	-0.1372	-0.4762	0.3154	-0.363	1.0000				
OD (mg O ₂ /L)	0.0789	0.5925	-0.3910	-0.2665	-0.5998	-0.4155	-0.6537	0.5726	-0.587	0.5559	-0.5873	-0.5597	-0.5046	-0.4335	0.504	-0.4911	-0.8468	-0.0782	-0.4261	0.7953	-0.8839	0.2604	0.1075	1.0000			
Colif. Termot. (NMP/100mL)	0.2191	0.4578	-0.5076	-0.5621	-0.3482	-0.5031	-0.3930	0.4815	-0.455	0.4549	-0.4550	-0.4507	-0.4383	-0.6381	0.438	-0.4057	-0.0117	-0.7248	-0.2550	0.1913	-0.1157	0.4103	-0.233	0.1009	1.0000		
Turbiedad (UNT)	0.6689	-0.8948	0.7531	0.6696	0.9850	0.7654	0.9727	-0.8691	0.8790	-0.7599	0.8790	0.8417	0.7419	0.6371	-0.742	0.7322	0.8942	0.2848	0.3950	-0.9602	0.8355	-0.404	0.682	0.5984	-0.3287	1.0000	

Fuente: Elaboración propia.