

Biotempo (Lima)



<https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo>

ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

EVALUATION OF THE TROPHIC STATES OF MEDIO MUNDO'S MAIN LAGOON OF THE ALBUFERA REGIONAL CONSERVATION AREA, HUAURA-LIMA, PERU

EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS TRÓFICOS DE LA LAGUNA PRINCIPAL DEL ÁREA DE CONSERVACIÓN REGIONAL ALBUFERA DE MEDIO MUNDO, HUAURA-LIMA, PERÚ

Rhoydi Luvick Quiroz-Santos¹ & Wilfredo Mendoza-Caballero^{1,2*}

¹ Facultad de Ingeniería Agraria, Universidad Católica Sedes Sapientiae. Los Olivos - Lima, Perú. rhoydiquir@gmail.com / wmendoza@ucss.edu.pe

² Laboratorio de Florística, departamento de Dicotiledóneas, Museo de Historia Natural, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Jesús María - Lima, Perú.

*Corresponding author: wmendoza@ucss.edu.pe

Rhoydi Luvick Quiroz-Santos: <https://orcid.org/0000-0002-6800-090X>

Wilfredo Mendoza-Caballero: <https://orcid.org/0000-0003-4542-5590>

ABSTRACT

Wetlands provide multiple ecosystem services that multiply the social, economic, and environmental development of the population; However, these problems undergo environmental problems that accelerate the eutrophication process. The purpose of this research was to evaluate the trophic states of Medio Mundo's main lagoon of the Albufera Regional Conservation (ACRAMM). For this, the Carlson Trophic State Index modified by Toledo (IETM) was used and a predictive mathematical model for the total water phosphorus was formulated; where the dependent variable was represented by the parameter and the independent ones, by the reflections of Sentinel-2 images. The ACRAMM, according to the phosphorus model, was eutrophic on the first 5 dates evaluated ($IETM_{PT} > 65.56$) and from oligotrophic to eutrophic with a tendency to increase from south to north on the last date ($IETM_{PT} = 38.29-56.99$). These results lead to the conclusion that the trophic status of the ACRAMM is in the highest classification of the index, mainly by the following polluting sources: agricultural drainage, industrial wastewater dumping, open oxidation ponds at Medio Mundo town, grazing activities, tourist facilities and water pumping stations installed at adjacent areas.

Keywords: eutrophication – mathematical models – prediction – satellite image – trophic status – wetland

RESUMEN

Los humedales proveen múltiples servicios ecosistémicos que garantizan el desarrollo social, económico y ambiental de la población; sin embargo, estos sufren diversos impactos ambientales que aceleran el proceso de la eutrofización. El presente trabajo evalúa los estados tróficos de la laguna principal del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Huaura, Lima, Perú. Para ello, se utilizó el Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (IETM) y se formuló un modelo matemático predictivo para el fósforo total del agua; donde la variable dependiente fue representada por el parámetro, y las independientes, por las reflectancias de imágenes Sentinel-2. El ACRAMM, según el modelo para el fósforo, resultó eutrófico en las cinco primeras fechas evaluadas ($IETM_{PT} > 65,56$) y oligotrófico a eutrófico con tendencia de incremento de sur a norte en la última evaluación ($IETM_{PT} = 38,29-56,99$). Estos resultados permiten concluir que el estado trófico del ACRAMM se encuentra en la clasificación más alta del índice, principalmente por las siguientes fuentes contaminantes: desagüe agrícola, vertimiento de aguas residuales industriales, poza de oxidación del Centro Poblado de Medio Mundo, actividades de pastoreo, instalaciones turísticas y las estaciones de bombeo de agua instaladas en áreas adyacentes.

Palabras clave: estado trófico – eutrofización – humedal – imagen satelital – modelos matemáticos – predicción

INTRODUCCIÓN

Los humedales son considerados como uno de los ecosistemas más importantes del planeta dado que pertenecen a una red de corredores biológicos y brindan diversos servicios ecosistémicos (Clarkson *et al.*, 2004). Estos servicios garantizan la calidad de vida de los pobladores de las áreas vecinas; sin embargo, esta provisión depende del mantenimiento de la integridad ecológica (Kandus *et al.*, 2010) y de las condiciones de fragilidad de estos ecosistemas, tal como se cataloga en el artículo 99.2 de la Ley N° 28611 (Ley General del Ambiente N° 28611, 2005). Por otro lado, estos sufren diferentes impactos ambientales, tales como: contaminación por vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales, destrucción de hábitats, extracción de totorales de manera irracional, entre otros (Pulido *et al.*, 1998). Ante ello, los humedales de la costa central del Perú, no son la excepción (Aponte & Ramírez, 2014).

El Plan Maestro preparado para la gestión del 2015-2019 del ACRAMM (Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo) indica que los problemas ambientales que afectan a este humedal son: la poza de oxidación del Centro Poblado de Medio Mundo que contamina por infiltración, los efluentes de las granjas avícolas ubicadas en las zonas norte y sur, como subproducto de sus procesos, actividades de pastoreo de ganado vacuno y ovino en la zona sur que erosionan el acantilado y, el desagüe agrícola de la Comisión de Regantes de San Felipe en esta misma zona (Gobierno Regional de Lima, 2015). Además, se ha observado la presencia de especies introducidas, como la

“tilapia” *Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758; así como la acumulación de escombros y desmontes. Todos estos factores contaminantes están provocando la eutrofización en el ACRAMM, debido principalmente a la incorporación excesiva de nutrientes (nitrógeno y fósforo), cuyos valores exceden los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el agua (La Chira, 2016).

Desde el punto de vista etimológico, el término eutrofización proviene del griego que significa “bien nutrido”. De manera general, está referida al aumento de nutrientes en exceso, principalmente de nitrógeno y fósforo, que produce un aumento de la biomasa y un empobrecimiento de la diversidad de un sistema acuático (Nixon, 1995; Ministerio del Ambiente [MINAM], 2012). Asimismo, este proceso consiste en una serie de etapas independientes unas de las otras; es decir, pueden estar sucediendo dos o más etapas al mismo tiempo (dependiendo de los factores limitantes y/o favorables) en los sistemas acuáticos. Según Chapa & Guerrero (2010) estas etapas siguen la siguiente secuencia: (a) oxidación de la materia orgánica por bacterias aeróbicas en nutrientes para el desarrollo e incremento de microalgas, algas y plantas, (b) reducción del oxígeno disuelto al igual que el pH y la transparencia debido a la respiración de los heterótrofos, (c) muerte de los organismos aeróbicos provocada por la eliminación del oxígeno disuelto, (d) desprendimiento de gases olorosos como el amonio, sulfuros y metano por la actividad de las bacterias anaeróbicas, y (e) acidificación del medio por la reacción de los sulfuros con el agua para formar ácido sulfhídrico (H_2S), que significa una afectación a nivel estructural de las poblaciones del humedal.

Por otro lado, en numerosas investigaciones la eutrofización ha sido clasificada en niveles, grados y condiciones tróficas. Sin embargo, los investigadores pioneros en este tema, como Carlson (1977) y las organizaciones técnico-científicas dedicadas al estudio de estos procesos, han clasificado en estados tróficos mediante diferentes índices; por esta razón, en la presente publicación consignamos el término de “estado trófico” (oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico) (Orquera & Cabrera, 2020).

El estado oligotrófico es cuando la concentración de materias nutritivas es baja y la oxigenación y la transparencia es buena en toda su profundidad de un cuerpo de agua; en cambio, el mesotrófico es una fase intermedia donde las materias nutritivas son de concentración media y los organismos acuáticos son más numerosos; por otro lado, el eutrófico es cuando el medio es rico en nutrientes; finalmente, el hipereutrófico es cuando ocurre el enriquecimiento de materias nutritivas en exceso y la concentración del oxígeno disuelto es muy baja (Zouiten, 2012).

El proceso de la eutrofización, por esa razón, es uno de los problemas ambientales antrópicos más graves que amenazan la continuidad, productividad y sostenibilidad de los humedales; cuya restauración no es fácil, ni barata, siendo más costosa la recuperación del estado hipereutrófico que el mesotrófico (Quirós *et al.*, 2006). Por lo tanto, la identificación y control de las variables determinantes de este proceso, resultan necesarias en la gestión de recuperación y restauración de estos ecosistemas. El seguimiento se podría realizar mediante el monitoreo de las características físico-químicas del agua, usando “softwares” de modelamiento, con métodos de teledetección e indicadores matemáticos.

Hoy en día se cuenta con softwares de libre acceso para el modelamiento de la calidad de agua a nivel hidrológico e hidrodinámico, entre las que podemos citar: WASP, EFDC, AQUATOX y QUAL2K de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Asimismo, existen una serie de índices que permiten la determinación de los estados tróficos de manera sencilla y rápida; sin embargo, se debe tener en cuenta la aplicabilidad de estos en función a la clasificación climática del área de estudio. Por ejemplo, el índice de estado trófico de Carlson (IET) es aplicable en sistemas acuáticos de climas templados, a diferencia del índice propuesto por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS), que es aplicable en climas cálidos tropicales. Por otro lado, la teledetección es una herramienta muy útil y de bajo costo para la evaluación de la calidad del agua, en diferentes escalas espaciales y temporales.

La finalidad de la presente publicación es dar a conocer los estados tróficos del ACRAMM. Para el estudio se empleó el Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo así como métodos de teledetección para la formulación de modelos matemáticos, basados en regresión lineal simple y múltiple, en los cuales se correlacionaron las reflectancias de las bandas obtenidas de las imágenes Sentinel-2 con los parámetros físico-químicos del agua del humedal. De esta manera, se logró predecir la concentración de estos parámetros del ACRAMM de forma indirecta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La albufera del Centro Poblado de Medio Mundo, se encuentra ubicada en el distrito de Végueta, provincia de Huaura, región Lima, Perú (Figura 1). Siendo uno de los humedales costeros más importantes del país, que fue declarado como Área de Conservación Regional en el año 2007 mediante el D.S. N° 006-2007-AG (Ley ACRAMM, 2007). La que fue establecido con el objetivo de “Conservar la biodiversidad del ecosistema de humedal por la importante influencia que ejerce sobre otros similares que se encuentran ubicados en la zona costera del Perú y sobre el entorno, promoviendo el uso sostenible y la protección del humedal y sus recursos” (Gobierno Regional de Lima, 2015). Este humedal cuenta con una superficie total de 687,71 ha, según el Decreto de su creación. Por otro lado, las imágenes satelitales Sentinel-2 fueron utilizadas de la cuadrícula 17LRH.

Muestreo

Se realizó mediante el uso de bote, siguiendo el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua aprobado mediante R.J. N° 010-2016-ANA por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Perú; en la cual se estandarizan los criterios y procedimientos técnicos para desarrollar el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos, tanto continentales (ríos, quebradas, lagos, lagunas, entre otras), así como marino-costeros (bahías, playas, estuarios, manglares, entre otros) (ANA, 2016).

El muestreo se realizó en el mes de enero de 2019, en 20 puntos distribuidos tal como se muestra en la Figura 1, con el objetivo de conocer la distribución espacial de los estados tróficos del espejo de agua más grande del ACRAMM; evaluándose los siguientes parámetros: transparencia del Disco de Secchi, clorofila-a y fósforo total.

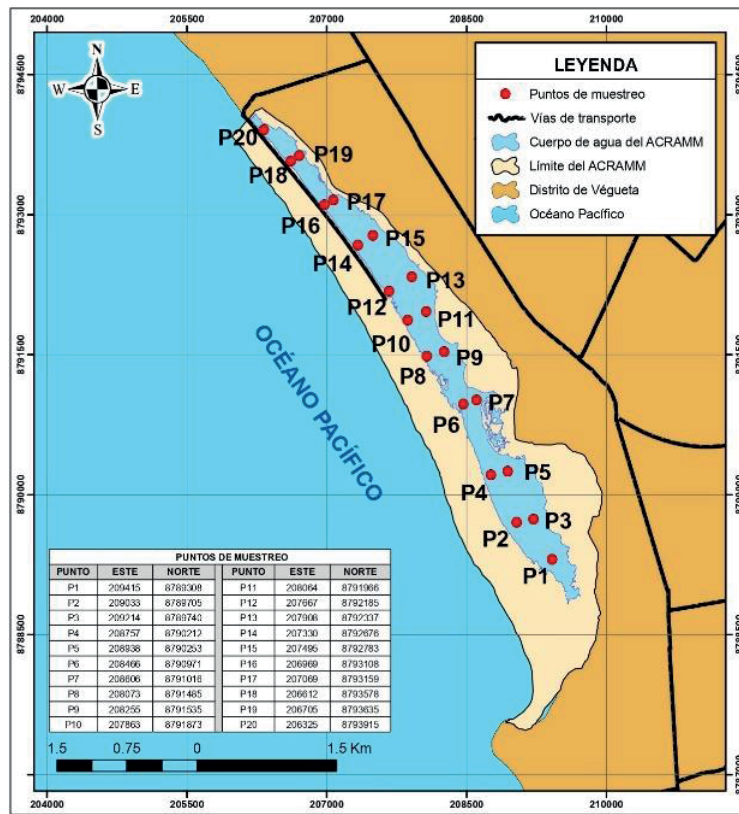


Figura 1. Mapa de puntos de muestreo de agua en el Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú.

Las concentraciones de clorofila-a se determinaron en el Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú; mientras que las del fósforo total, fue anañizado en el Laboratorio de la empresa “Servicios Analíticos Generales SAC”, acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo

Toledo (1990) propuso la modificación del IET de Carlson (Tabla 1). Esta modificación tuvo como propósito darle aplicabilidad el IET de Carlson en sistemas acuáticos de climas cálidos tropicales (Mendoza *et al.*, 2011).

$$IETM_{DS}=10 \left(6 - \frac{0,64 + \ln(DS)}{\ln(2)} \right) \tag{1}$$

$$IETM_{Clorf\ a}=10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,695 \ln(clorf\ a)}{\ln(2)} \right) \tag{2}$$

$$IETM_{Pt}=10 \left(6 - \frac{\ln \left(\frac{80,32}{Pt} \right)}{\ln(2)} \right) \tag{3}$$

Donde:

$IETM_{DS}$: Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo Disco Secchi (m).

$IETM_{Clorf\ a}$: Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo Clorofila-a ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

$IETM_{Pt}$: Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo Fósforo Total ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

Tabla 1. Valor del índice de clasificación trófica de Toledo.

Estado trófico	Índice
Oligotrófico	<45
Mesotrófico	45-55
Eutrófico	>55

(Toledo, 1985, citado por Mendoza *et al.*, 2011)

Obtención de datos satelitales

Para la obtención de los datos satelitales (valores de reflectancias de las bandas) se realizó de la siguiente manera: selección de las imágenes satelitales, corte y extracción de los valores de reflectancia para cada punto de muestreo.

Selección de las imágenes satelitales

La imagen seleccionada fue Sentinel-2B, que fue tomada el 19 de enero de 2019 (Figura 2). Esta fue descargada del Proyecto Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>), de forma libre y gratuita. Por otro lado, la imagen adquirida

fue de un nivel de procesamiento 2-A, es decir, esta ya contaba con corrección radiométrica, corrección geométrica, reflectancia al tope de la atmósfera y detección de nubes (Agencia Espacial Europea [ESA], 2015).

Corte

El corte fue realizado a las 13 bandas de Sentinel-2. Para ello, se creó un shapefile de 10 x 10 Km² cubriendo la laguna principal del ACRAMM, el cual fue usado como marco o área de corte en la herramienta Extract by mask de ArcGis 10.3.



Figura 2. Imagen Sentinel-2 del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú en combinación RGB-432 (color natural).

Obtención de valores de reflectancias

Las imágenes Sentinel-2 ya son proporcionadas en reflectancias en el techo de la atmósfera escalada (TOA, por sus siglas en inglés), para convertir estos valores en reflectancias de TOA se realizó mediante la ecuación 4 propuesta por Bravo (2017). Para ello, se utilizó la herramienta raster calculator de ArcGis 10.3 para introducir la ecuación.

$$p_{\lambda} = ND * 0,0001 \quad (4)$$

Donde: ND: Número digital de las bandas de Sentinel-2.

Extracción de las reflectancias

La extracción de los valores de las reflectancias de las bandas, se realizó para cada punto de muestreo. Para ello, se aplicó la herramienta sample de ArcGis 10.3, la cual necesita como dato de extracción los puntos de muestreo

(shapefile de puntos) georreferenciados. Finalmente, dichos valores fueron exportados a Microsoft Excel 2013 para la formulación de los modelos matemáticos en el software estadístico SPSS versión 19.

Formulación de Modelos Matemáticos

Fueron basados en métodos de regresión lineal simple y múltiple, en concordancia con el procedimiento utilizado por Perdomo (2015) (Figura 3); donde las variables dependientes fueron representadas por las concentraciones/valores de los parámetros (datos *in situ*) y las independientes por las reflectancias de las bandas (datos satelitales). En el análisis exploratorio, algunos modelos preliminares presentaban r^2 muy bajos: para incremen-

tar estos valores se procedió la conversión de las variables en logaritmos naturales. Los modelos de regresión lineal, simple y múltiple, tienen la siguiente estructura:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + E_i \quad (5)$$

Donde:

- Y_i : Variable que se quiere predecir.
- β_0 : Intercepto.
- β_1 : Coeficiente (pendiente).
- x_{i2} : Variable que causa cambio en la Y.
- E_i : Promedio de los residuos (error).

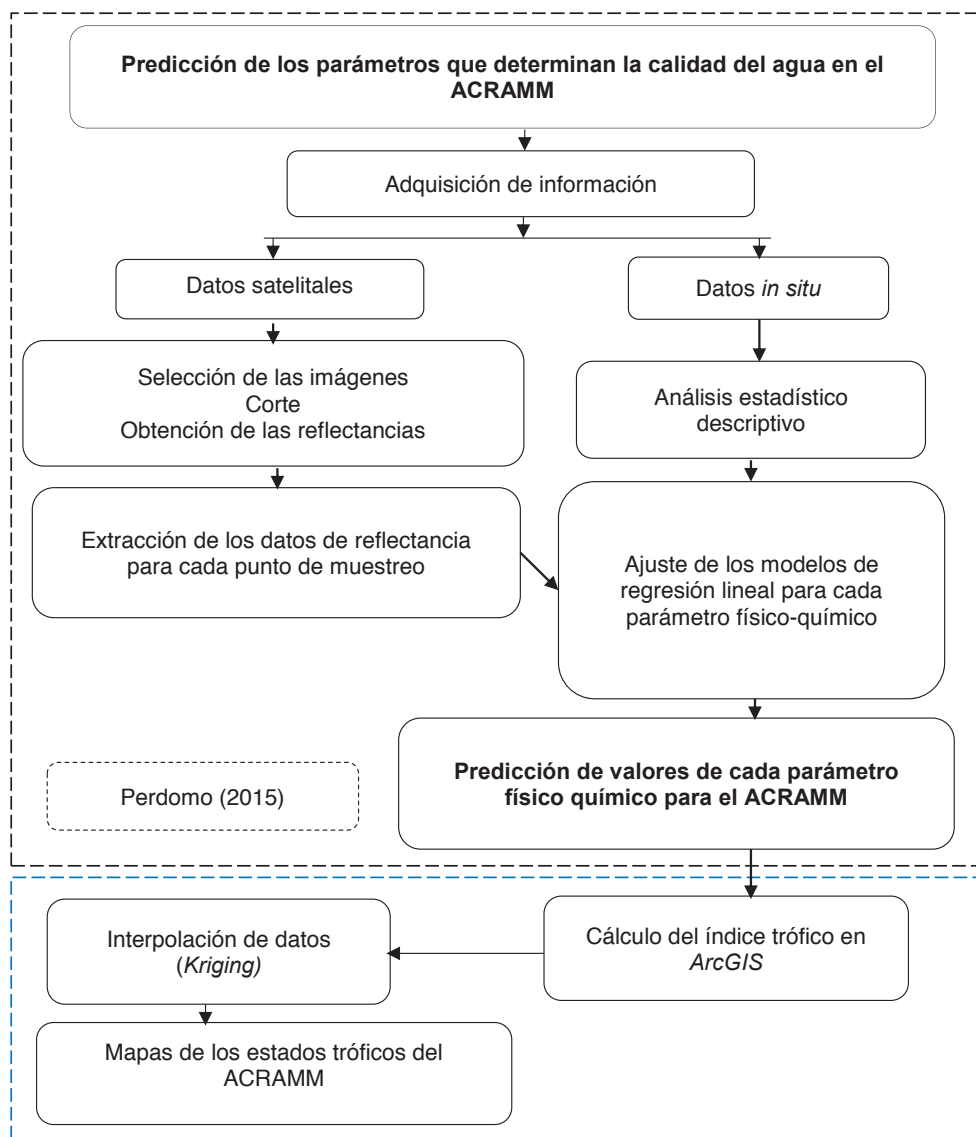


Figura 3. Metodología para la evaluación de los estados tróficos con el método de teledetección en el Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú.

Validación de los Modelos Matemáticos

Los modelos de regresión lineal, para corroborar su validez, deben cumplir una serie de supuestos. En la presente investigación se verificaron cuatro supuestos, los cuales fueron: linealidad, normalidad, independencia y homocedasticidad de los residuos. El primer supuesto fue verificado mediante los coeficientes de determinación (r^2) y gráficos; el segundo, mediante la Prueba de Shapiro-Wilk; el tercero, con la prueba de rachas; y el cuarto, con la gráfica de dispersión de los modelos significativos de los valores pronosticados y los residuos estandarizados.

Aspectos éticos: Los autores señalamos que cumplimos con todos los aspectos éticos a nivel nacional e internacional.

RESULTADOS

Los Estados Tróficos del ACRAMM

El estado trófico del ACRAMM que fue determinada mediante la transparencia del Disco de Secchi (TDS)(m); indica que el espejo de agua del humedal, se encuentra en un estado eutrófico en los 20 puntos de muestreo (Tabla 2).

Tabla 2. Estado trófico del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú mediante transparencia del Disco de Secchi (TDS) (m). IET=Índice del Estado Trófico.

Puntos de Muestreo	TDS	IET _{DS}	Estado	Puntos de Muestreo	TDS	IET _{DS}	Estado
P1	0,16	77,21	Eutrófico	P11	0,16	77,21	Eutrófico
P2	0,15	78,14	Eutrófico	P12	0,14	79,13	Eutrófico
P3	0,14	79,13	Eutrófico	P13	0,17	76,33	Eutrófico
P4	0,15	78,14	Eutrófico	P14	0,16	77,21	Eutrófico
P5	0,19	74,73	Eutrófico	P15	0,19	74,73	Eutrófico
P6	0,13	80,20	Eutrófico	P16	0,15	78,14	Eutrófico
P7	0,18	75,51	Eutrófico	P17	0,16	77,21	Eutrófico
P8	0,14	79,13	Eutrófico	P18	0,16	77,21	Eutrófico
P9	0,17	76,33	Eutrófico	P19	0,17	76,33	Eutrófico
P10	0,16	77,21	Eutrófico	P20	0,18	75,51	Eutrófico

Los mismos resultados se obtienen según las concentraciones de clorofila-a ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), en los 20 puntos de muestreo.

Según este parámetro, el humedal se encuentra en estado eutrófico (Tabla 3).

Tabla 3. Estado trófico del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú mediante Clorofila-a ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). IET=Índice del Estado Trófico.

Puntos de muestreo	Clorf-a	IET Clorf-a	Estado	Puntos de muestreo	Clorf-a	IET Clorf-a	Estado
P1	389,2	90,37	Eutrófico	P11	722,8	96,58	Eutrófico
P2	1112,0	100,90	Eutrófico	P12	1000,8	99,84	Eutrófico
P3	556,0	93,95	Eutrófico	P13	1334,4	102,72	Eutrófico
P4	917,4	98,97	Eutrófico	P14	973,0	99,56	Eutrófico
P5	1139,8	101,14	Eutrófico	P15	889,6	98,66	Eutrófico
P6	945,2	99,27	Eutrófico	P16	1195,4	101,62	Eutrófico
P7	1112,0	100,90	Eutrófico	P17	583,8	94,43	Eutrófico
P8	1112,0	100,90	Eutrófico	P18	611,6	94,90	Eutrófico
P9	2418,6	108,69	Eutrófico	P19	2390,8	108,57	Eutrófico
P10	945,2	99,27	Eutrófico	P20	1139,8	101,14	Eutrófico

En cambio, según los resultados según las concentraciones del fósforo total ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), el espejo de agua del ACRAMM está comprendida desde oligotrófico a eutró-

fico, estos cambios ocurren de los puntos muestreados del sur al norte (Tabla 4).

Tabla 4. Estados tróficos del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú mediante Fósforo total (Pt) ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

Puntos de Muestreo	Pt	IETP _t	Estado	Puntos de Muestreo	Pt	IETP _t	Estado
P1	<13	-	Oligotrófico	P11	16	36,72	Oligotrófico
P2	<13	-	Oligotrófico	P12	72	58,42	Eutrófico
P3	<13	-	Oligotrófico	P13	64	56,72	Eutrófico
P4	<13	-	Oligotrófico	P14	45	51,64	Mesotrófico
P5	<13	-	Oligotrófico	P15	59	55,55	Eutrófico
P6	<13	-	Oligotrófico	P16	57	55,05	Eutrófico
P7	<13	-	Oligotrófico	P17	59	55,55	Eutrófico
P8	24	42,57	Oligotrófico	P18	22	41,32	Oligotrófico
P9	15	35,79	Oligotrófico	P19	100	63,16	Eutrófico
P10	17	37,60	Oligotrófico	P20	60	55,79	Eutrófico

Formulación de Modelos Matemáticos

Los resultados de transparencia de Disco de Secchi y los valores de concentración de Clorofila-a, no fue posible la

formulación de modelos matemáticos, debido a la baja relación que presentaron entre las reflectancias de Sentinel-2 y los valores de estos dos parámetros (Tabla 5).

Tabla 5. Relación entre las reflectancias de las bandas con transparencia de la transparencia, clorofila-a y fósforo total del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú.

Bandas	TDS (m)	Clorf-a	Pt	Ln (Pt)
Banda 1	0,104	0,004	0,119	0,163
Banda 2	0,025	0,034	0,287	0,314
Banda 3	0,007	0,031	0,377	0,447
Banda 4	0,096	0,042	0,305	0,339
Banda 5	0,064	0,032	0,424	0,483
Banda 6	0,007	0,014	0,260	0,288
Banda 7	0,056	0,028	0,262	0,282
Banda 8	0,082	0,028	0,286	0,302
Banda 9	0,040	0	0,000	0,008
Banda 11	0,070	0,021	0,149	0,159

Modelo para Fósforo Total

Los datos analizados, en la formulación del modelo, solo fueron utilizadas las concentraciones registradas de 13 puntos de muestreo (desde el punto 8 al 20), dado que los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, presentaron resultados por debajo del límite de cuantificación (LC) del método utilizado en el Laboratorio de “Servicios Analíticos Generales”.

Análisis exploratorio

Al relacionar los valores de reflectancias de las bandas de las imágenes Sentinel-2 con las concentraciones de Fósforo total ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), se observó que no existe una relación consistente (Tabla 5): en este análisis se obtuvo 0,42 de relación mayor con la banda 5 de Sentinel-2. Por ello, se procedió a ajustar el modelo para la banda 5 mediante la conversión de las concentraciones de este parámetro

en logaritmo natural, mejorándose el valor del coeficiente de determinación ($r^2 = 0,48$). Sin embargo, este nivel de relación tampoco fue significativa. Por esta razón, se optó por buscar un mejor ajuste del r^2 mediante un modelo de regresión lineal múltiple, logrando de esta forma un r^2 máximo de 0,72 (con un error de estimación de 0,39), con las reflectancias de las bandas 2, 8 y 11 relacionadas con el logaritmo natural de las concentraciones del fósforo total. Con esta combinación se formuló el modelo.

Luego de identificar el modelo, se realizó la prueba de ANOVA con el fin de determinar la significancia del modelo resultante. Según este análisis el modelo de regresión era significativo ($p = 0,007$; $F_{(1, 24)} = 7,81$). Por tanto, existe algún tipo de asociación entre la variable dependiente y las independientes; por lo tanto, la formulación del modelo es posible.

La Tabla 6, muestran los coeficientes del modelo generado. Donde se observa que los valores de la interferencia (t) de las bandas 2, 8, 11 y la constante son: -3,63, 2,80, -2,79 y 1,84, respectivamente. Asimismo, se observa que el p resultó menor que 0,050 de estas variables, excepto

con la banda 2. Sin embargo, en la formulación del modelo se ha considerado esta banda dado que el valor de la t es menor de las otras y no es influyente (ecuación 6).

$$\text{Ln}[\text{Pt}] = 65,82 \cdot \text{B2} + 96,98 \cdot \text{B8} - 111,93 \cdot \text{B11} - 6,90 \quad (6)$$

Tabla 6. Coeficientes del modelo del Ln (Pt).

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta		
Constante	-6,90	2,48		-2,79	0,02
Banda 2	65,82	35,80	1,09	1,84	0,09
Banda 8	96,98	34,62	2,22	2,80	0,02
Banda 11	-111,93	30,88	-2,80	-3,63	0,006

Verificación de los supuestos del Modelo

Se verificaron los siguientes supuestos para los modelos significativos: linealidad, normalidad, independencia y homocedasticidad de los residuos estandarizados o tipificados.

Supuesto de Linealidad de los residuos

La gráfica Q-Q normal del residuo estandarizado mostró un alto nivel de ajuste de la nube de puntos en la recta (Figura 4). Por lo tanto, los modelos cumplieron este supuesto. Además, el coeficiente de Pearson fue superior al 0,70.

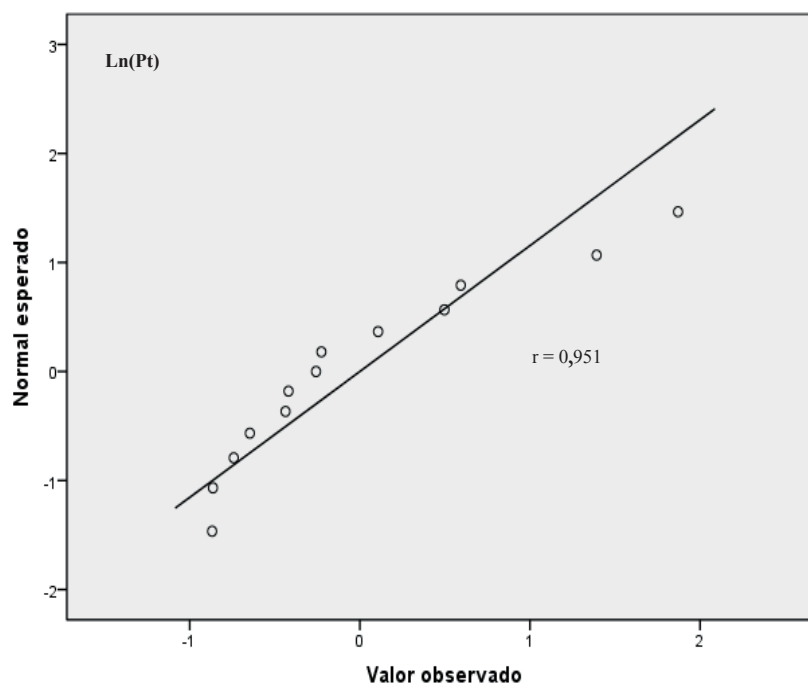


Figura 4. Gráfica Q-Q normal del residuo estandarizado de los modelos significativos.

Supuesto de normalidad de los residuos

El análisis de la normalidad de los datos se realizó con la prueba de Shapiro-Wilk (0,87) con $\alpha = 0,05$. Los p (sig.)

de los modelos significativos resultaron mayor al nivel de significancia (0,06). Podemos afirmar, que los modelos cumplieron con el supuesto: aceptándose la hipótesis nula (los residuos tienen una distribución normal).

Supuesto de independencia de los residuos

La verificación de este supuesto fue realizada con la prueba de rachas utilizando la mediana y la media como puntos de corte con $\alpha = 0,05$, resultando los p mayores que 0,05 ($Z = -0,4$ a $-0,6$; $p = 0,6$ a $0,7$). Por lo tanto, se acepta la hipótesis de independencia y se concluye que los modelos cumplieron este supuesto.

Supuesto de homocedasticidad

Este supuesto se ha analizado mediante la gráfica de dispersión de los modelos significativos de los valores pronosticados y los residuos estandarizados. Al observar la Figura 5, se dedujo que los residuos cumplían con el supuesto de homocedasticidad: mientras aumentaban los valores pronosticados, la variabilidad de los residuos se mantuvieron.

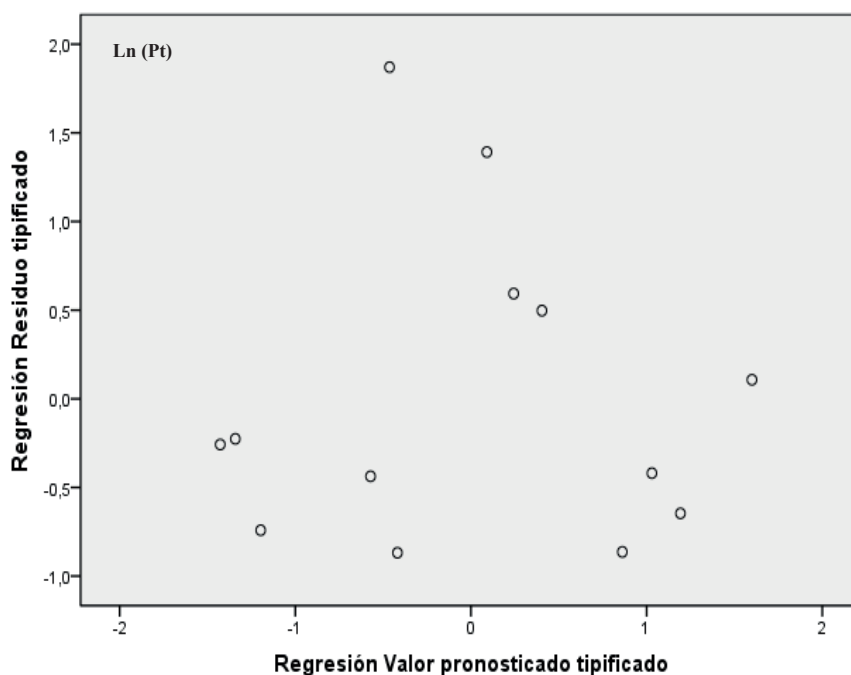


Figura 5. Gráfica de dispersión de los modelos significativos.

Validación del Modelo

La validación se realizó mediante la prueba t, para muestras relacionadas entre los datos *in situ* y los pronosticados: la media del Ln (Pt) fue $3,67 \pm 0,65$ equivalente a $39,29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Mientras que la media del “Ln (Pt) pronosticado” resultó $3,67 \pm 0,55$ equivalente a $39,28 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. La diferencia de medias es mínima ($0,0079 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). Asimismo, el coeficiente de Pearson es 0,85 y significativa ($\text{Sig.} = 0,00$). Estos valores le dieron consistencia al modelo.

Variación espacio-temporal del estado trófico

Los estados tróficos pronosticados utilizando el IET de Carlson modificado por Toledo, desde enero 2016 hasta diciembre de 2018, mediante el parámetro de fósforo total ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) indicaron que el ACRAMM se encuentra en estado eutrófico con valores de mayor impacto en la zona sur del humedal. Mientras que los pronosticados de enero de 2019, desde oligotrófico a eutrófico con una tendencia de incremento de sur a norte (Figura 6).

DISCUSIÓN

Estado Trófico del ACRAMM

Se han realizado múltiples estudios de determinación de índices de estados tróficos a nivel mundial; sin embargo, en algunos de estos trabajos no han utilizado los índices apropiados. Razón por el cual, indicamos que la aplicabilidad de los índices depende de la clasificación climática del área de estudio (climas templados, cálidos tropicales, entre otros). Por ejemplo, los índices de eutrofización propuestos por el CEPIS, son aplicables en sistemas acuáticos de climas cálidos tropicales; mientras que los propuestos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) al igual que el Índice de estado trófico de Carlson, son aplicables en climas templados (Sierra, 2011).

Por otro lado, Ruiz (2008) determinó que la transparencia del Disco de Secchi en el ACRAMM, varía de 0,16 a 0,27 m. Según nuestros resultados el valor mínimo fue 0,13 m.

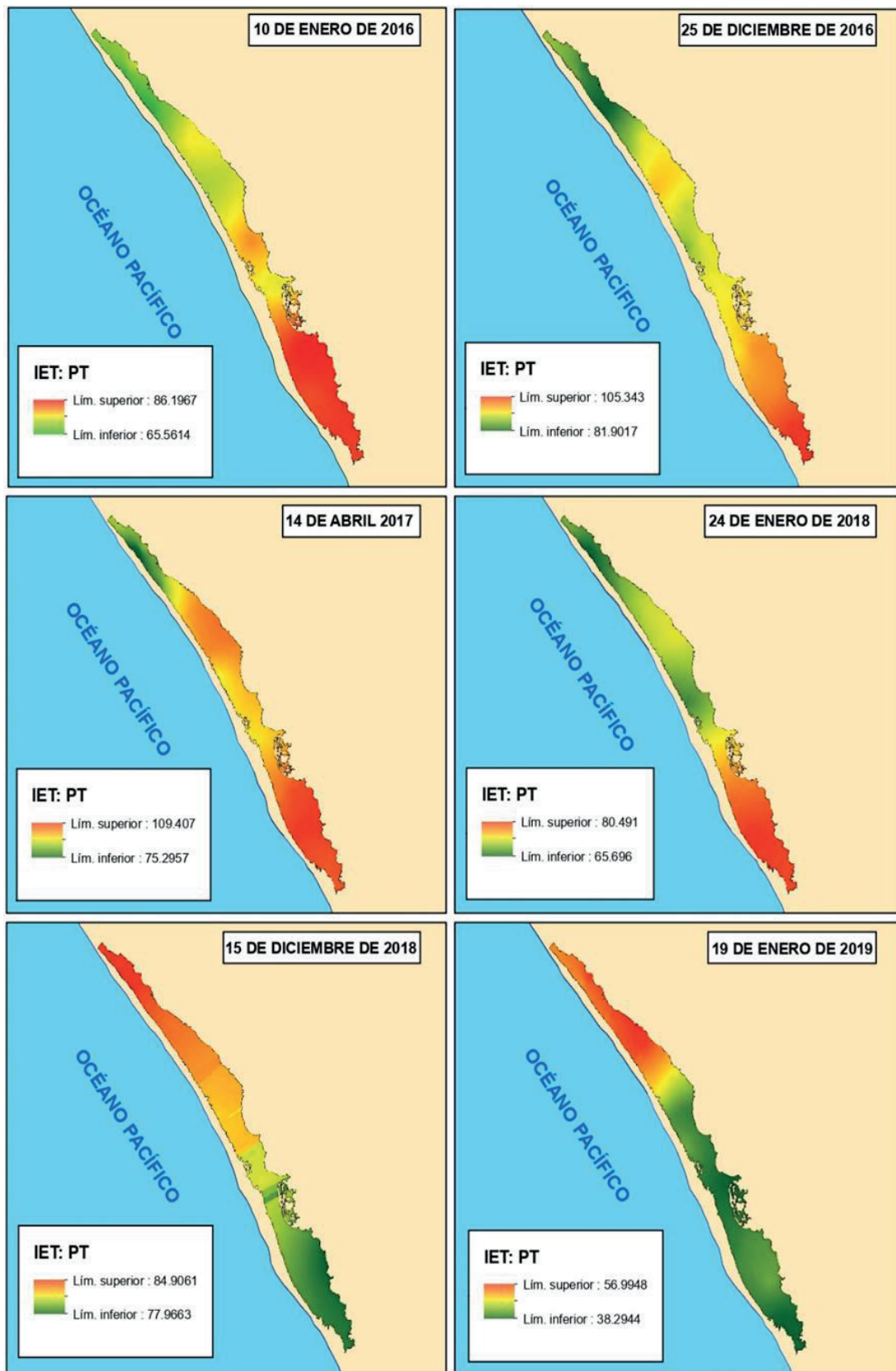


Figura 6. Trophic State Index modified (IET) en serie temporal del fósforo total en el Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú.

y el valor máximo 0,19 m esta variación probablemente esta influenciado por la estacionalidad, estos resultados se encuentran hacia el límite superior de clasificación a eutrófico con transparencias del Disco de Secchi (m) y las concentraciones de la clorofila-a ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); mientras que con los resultados del fósforo total ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) varían desde oligotrófico a eutrófico. Según estos resultados podría estar ocurriendo un agotamiento de oxígeno en el humedal, con alto nivel de productividad y baja claridad del agua (Moreno *et al.*, 2010; Zouiten, 2012). Por eso, Chapa & Guerrero (2010) escribieron en su investigación sobre la abundancia de nutrientes que mata, durante el proceso de la eutrofización. Asimismo, en este estado inicia la proliferación de algas y cianobacterias que producen toxinas que podrían causar enfermedades e incluso la muerte en los organismos vivos. Por ejemplo, *Microcystis aeruginosa* Kützing común en estados eutróficos, produce neurotoxinas y hepatotoxinas como la microcistina (Oberholster *et al.*, 2004).

Es preciso indicar que Martínez (2018) aisló a *M. aeruginosa* en muestras de agua del ACRAMM. Sin embargo, la Dirección General de Salud (2018) clasificó al humedal como un sitio apto para bañistas; dado que esta clasificación solo estaba centrada en los siguientes aspectos: calidad microbiológica, medida en función a la presencia/ausencia de Coliformes fecales (pero no se evalúa la presencia de microorganismos que producen toxinas relacionadas a la eutrofización); calidad de limpieza, en función a temas de residuos sólidos y finalmente, por la presencia de servicios higiénicos.

Por otro lado, Álvarez (2016) clasificó al humedal Los Pantanos de Villa en estado hipereutrófico con el fósforo total (0,29 a 6,78 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) mediante el índice propuesto por Reddy & Delaunde y en eutrófico con el nitrógeno (2,20 a 56,60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) mediante el índice propuesto por Roldán & Ramírez (2008). Si bien los resultados de la clasificación de estas concentraciones con el IETM de Carlson por Toledo podrían ser similares, la aleatorización en el uso de los índices podría conllevar a errores en la interpretación de los resultados. Del mismo modo, Gómez (2018) determinó el estado trófico de la laguna Cube-Ecuador a través de la cuantificación de parámetros químicos (fosfatos, nitratos, clorofila "a") y transparencia del agua; entre sus resultados indica que tanto los nitratos y fosfatos (con $I_E = 0,08$ y 1,06, respectivamente) clasificaron a la laguna en un estado oligotrófico; mientras que la transparencia y clorofila-a, en eutrófico ($\text{TSI}_{\text{DS}} = 60,5$ y $\text{TSI}_{\text{clor-f-a}} = 61$). Asimismo, Pulido & Pinilla (2017) determinaron el estado trófico a partir de la concentración de nutrientes y clorofila-a del humedal El Salitre en

Bogotá-Colombia; quienes indican entre sus resultados que el índice de Nygaard clasificó al humedal en estado mesotrófico para ambos periodos climáticos, el ITP en estado mesotrófico en la época seca y oligotrófico en la temporada lluviosa (ITP = 37,00 y 7,00, respectivamente); mientras que el IET en estado mesotrófico durante la época seca y en eutrófico en la temporada lluviosa ($\text{IET}_{\text{promedio}} = 53,82$ y 68,06, respectivamente). En suma, las diferencias entre los estados tróficos de los ecosistemas acuáticos están influenciados por diversos factores, tanto naturales como antropogénicos.

Formulación de modelos matemáticos

La relación del logaritmo natural de las bandas 2, 8 y 11 de Sentinel-2, con el logaritmo de las concentraciones de fósforo total presentaron un r^2 máximo de 0,72 con un error de estimación de 0,39. La diferencia entre las concentraciones determinadas *in situ* con las pronosticadas mediante el modelo fue mínima (0,0079 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) con un $r = 0,85$ y significativa. Estos valores le dieron consistencia al modelo. Por otro lado, no se han encontrado registros de estudios similares mediante este protocolo para este parámetro.

Por otro lado, considerando que se obtuvo un r^2 máximo de 0,10, correlacionando con las bandas 1 y 4 con la transparencia, y que la correlación entre las concentraciones de clorofila-a ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) y la banda 4 de Sentinel-2, presentaron un r^2 máximo de 0,04, no se formularon modelos matemáticos para medir el nivel de transparencia del agua, ni tampoco el de clorofila-a.

La profundidad del agua de la laguna principal del ACRAMM es mayor en la zona sur en comparación con las zonas centro y norte; esto, debido a que en la zona sur se había consolidado un banco de sal (en 1954 existían dos yacimientos) donde se realizaron excavaciones (Tovar, 1977; Gobierno Regional de Lima, 2009). Por otro lado, la relación entre la profundidad del agua con los valores de la reflectancia de las imágenes satelitales es inversa, es decir, al aumentar la profundidad, la reflectancia disminuye; sin embargo, las mediciones de la transparencia en todo el espejo de agua, fueron muy homogéneas, por ello, no se obtuvieron buenos niveles de correlación (reflectancias dispersas con transparencias homogéneas).

La distribución espacial de la clorofila-a, en todo el espejo de agua, no fue uniforme, en la zona sur se obtuvieron concentraciones más bajas, en cambio, en la zona centro estas formaron un parche de concentraciones altas y en la zona norte las concentraciones disminuyeron (Figura 7). Este comportamiento se deba probablemente a que las

fuentes naturales aportan nutrientes de manera focalizada, toda vez que se ha observado un área de anidación de aves residentes y migratorias en la zona centro, las cuales estarían aportando principalmente nitrógeno y fósforo para el incremento de la producción de biomasa (medida en forma de clorofila-a). Por otro lado, al parecer, la distribución discontinua de la clorofila; así como las condiciones batimétricas de la laguna principal del ACRAMM, no favorecieron la formulación de los modelos matemáticos para este parámetro; sin embargo, ambos parámetros han sido ampliamente estudiados mediante esta metodo-

logía. Por ejemplo, Giardino *et al.* (2001), Ferral (2013) y Larkin (2014), obtuvieron modelos matemáticos para la transparencia del agua con un r^2 de 0,85, 0,32 y 0,62 con imágenes Landsat-5, respectivamente. Por otro lado, Morillo *et al.* (2018) obtuvieron $r^2 = 0,88$ relacionando con las concentraciones de clorofila-a los valores del NDVI calculadas con imágenes Landsat-8. Del mismo modo, Bonansea *et al.* (2012) obtuvieron un $r^2 = 0,73$ relacionando las concentraciones de la clorofila-a con las reflectancias de la banda 2 y 3 de las imágenes CBERS-2B.

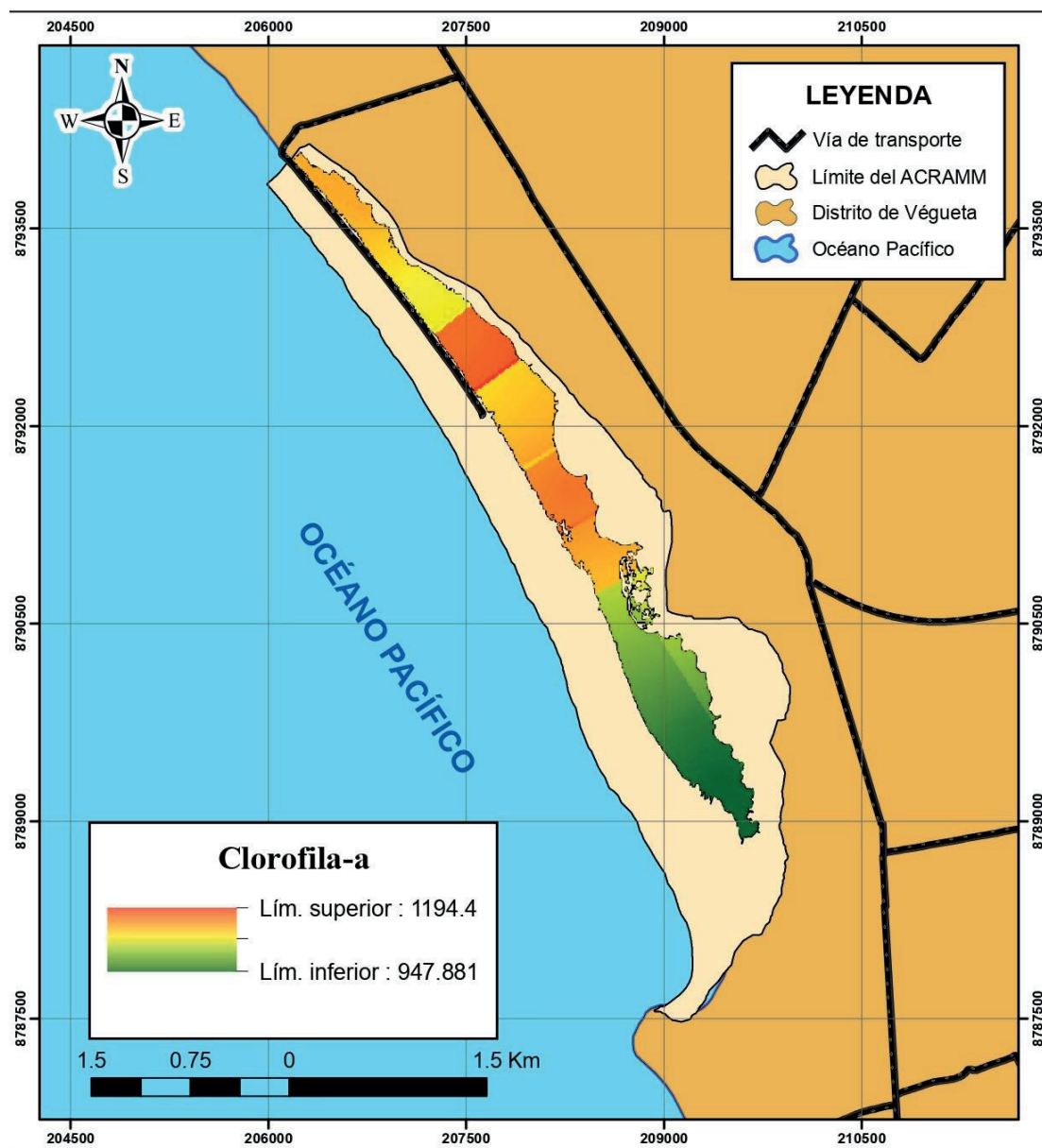


Figura 7. Distribución espacial de clorofila-a en la laguna principal de Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú.

Variación Espacio-Temporal del Estado Trófico del ACRAMM

Los estados tróficos pronosticados utilizando el IET de Carlson modificado por Toledo, desde enero 2016 hasta diciembre de 2018, mediante el parámetro de fósforo total ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) indicaron que el ACRAMM se encuentra en estado eutrófico con valores de mayor impacto en la zona sur del humedal. Mientras que los IET pronosticados de enero de 2019, se encontraban distribuidos desde oligotrófico a eutrófico con una tendencia de incremento de sur a norte. La variabilidad de los resultados de la presente investigación fueron inversos a los reportados por Ledesma *et al.* (2013), quienes evaluaron la calidad del agua del embalse Río Tercero (Argentina) donde mostraron que el IETM determinado con el fósforo total en 2003 y 2004 fueron oligotróficos; mientras que en 2005 y 2006, mesotróficos. La variabilidad de estos niveles depende de muchos factores tanto físicos, químicos y biológicos que interactúan en el sistema acuático. Por ejemplo, la característica batimétrica del ACRAMM; en la zona sur las profundidades medias son mayores que de la zona norte. Este significa que en la zona sur los materiales, como el fósforo, pueden sedimentarse en el fondo y solo liberarse mediante mediante cuatro procesos: (a) reacciones químicas de óxido-reducción bajo condiciones anóxicas, (b) procesos de mezcla por diferencia de gradientes de concentraciones, (c) bioturbación y (d) del burbujeo provocadas por la producción de metano (metanogénesis) (Gunkel, 2003). Mientras que la zona norte por su baja profundidad media favorece que la interacción entre la interfase sedimento-agua sea más dinámica.

Los resultados obtenidos en la presente investigación fueron muy similares en cuanto al comportamiento de los parámetros, con los reportados por Moreno & Ramírez (2010); quienes indicaron que el fósforo total tuvo variaciones temporales significativas en el estado trófico.

Como indica Ordóñez-Delgado *et al.* (2019) con respecto al uso de sistema de información geográfica, imágenes satélites y otros, permiten representar visualmente y de manera simple, las diversas investigaciones como la realizada en el presente estudio logrando que la información pueda ser usada por todo tipo de público, entre ellos, los gestores de las áreas protegidas.

Por lo que se concluye que el espejo de agua de ACRAMM se ha clasificado en estado eutrófico en las 6 fechas evaluadas mediante el modelo obtenido para la transparencia del Disco de Secchi ($\text{IETMTDS} > 76,04$). Mientras que, según el modelo para el fósforo total, las 5 primeras fechas fueron clasificadas en estado eutrófico

($\text{IETMPT} > 65,56$) y la última desde oligotrófico a eutrófico desde la zona sur hacia norte ($\text{IETMPT} = 38,29 - 56,99$).

Agradecimientos

Nuestros agradecimientos a Rosa Vento por su acertada revisión del artículo. El presente estudio es parte de la tesis del título profesional del primer autor de este artículo, que fue desarrollado en la Universidad Católica Sedes Sapientiae, Lima, Perú.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Espacial Europea (ESA). 2015. *Sentinel-2: User Handbook. ESA Standard Document*. Segunda revisión. Aprobado por Bianca Hoersch. https://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- Álvarez, C. 2016. *Determinación de detergentes en las aguas de los Pantanos de Villa*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7570>
- Aponte, H. & Ramírez, D. 2014. Riqueza florística y estado de conservación del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Callao, Perú. *The Biologist* (Lima), 12: 283-295,
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). 2016. *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. R.J. N° 010 - 2016 - ANA. Lima, Perú. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/209>
- Bonanseña, M.; Ledesma, C.; Rodríguez, C. & Sánchez, Á. 2012. Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B. *Revista Ambiente y Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 7: 61-71.
- Bravo, N. 2017. *Teledetección espacial: Landsat, Sentinel 2, Aster L1T y Modis*. (1th ed.) Perú: Geomática Ambiental S.R.L. https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf
- Carlson, R. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, 22: 361-369.
- Clarkson, B.R.; Sorrell, B. K.; Reeves, P.N.; Champion, P. D.; Partridge, T.R. & Clarkson, B.D. 2004.

- Handbook for Monitoring Wetland Conditions*. Coordinated Monitoring of New Zealand Wetlands. A Ministry for the Environment Sustainable Management Fund Project (5105). https://www.landcareresearch.co.nz/publications/researchpubs/handbook_wetland_condition.pdf
- Chapa, C. & Guerrero, R. 2010. Abundancia que mata: la eutrofización. *Revista ¿Cómo Ves?* 134: 22-25,
- Dirección General de Salud. 2018. *Verano saludable. Perú*, <http://veranosaludable.minsa.gob.pe/>
- Ferral, A. 2013. *Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el Embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Córdoba, España, http://ig.conae.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2009_Ferral-Anabella.pdf
- Giardino, C.; Pepe, M.; Brivio, P.; Ghezzi, P. & Zilioli, E. 2001. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *Science of The Total Environment*, 268: 19-29.
- Gobierno Regional de Lima. 2009. *Plan Maestro 2009 - 2013 de Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo, Lima, Perú*, https://www.regionlima.gob.pe/imatemporales/Plan_Maestro_Albufera_de_Medio_Mundo.pdf
- Gobierno Regional de Lima. 2015. *Plan Maestro 2015 - 2019 de Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo, Lima, Perú*, <http://siar.regionlima.gob.pe/download/file/fid/54192>
- Gómez, G. 2018. *Determinación del estado trófico actual de la laguna "Cube" a través de la cuantificación de parámetros químicos (fosfatos, nitratos, clorofila "a") y transparencia secchi*. (Tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/15588/1/T-UCE-0012-FIG-010.pdf>
- Gunkel, G. 2003. Limnología de un Lago Tropical de Alta Montaña, en Ecuador: características de los sedimentos y tasa de sedimentación. *Revista de Biología Tropical*, 51: 381-390.
- Kandus, P.; Morandeira, N. & Schivo, F. 2010. *Bienes y Servicios Ecosistémicos de los Humedales del Delta del Paraná*. Fundación Humedales / Wetlands International. Buenos Aires, Argentina, http://www.produccion-animal.com.ar/regiones_ganaderas/27-Ecosist_del_Delta-2010.pdf
- La Chira, R. 2016. *Valoración económica y ambiental mediante el Método de los Precios Hedónicos. El caso del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo (ACRAMM), Lima, Perú*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, España, <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/89905/MEMORIA%20TFM.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Larkin, J. 2014. *Detecting long-term trends in water quality parameters using remote sensing techniques*. (Tesis de maestría). Senado de la Universidad de Illinois, Estados Unidos. <https://pdfs.semanticscholar.org/4fc3/e28ed0b112eb2f1dff74691ae7ccff7e308a.pdf>
- Ledesma, C.; Bonansea, M.; Rodríguez, C. & Sánchez, Á. 2013. Calidad del agua en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión. *Ambiente y Agua*, 8: 67-76.
- Ley de creación del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo. 2007. D.S. N° 006-2007-AG. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 25 de enero de 2007. <http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normas-legales/decretossupremos/DECRETO%20SUPREMO%20N%20006-2007-AG.pdf>
- Ley General del Ambiente N° 28611. 2005. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 15 de octubre de 2005. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>
- Martínez, P. 2018. *Evaluación del potencial alelopático de la pajilla de arroz en el control de las floraciones algales producidas por Microcystis aeruginosa (Kützting)*. (Tesis de grado). Universidad Católica Sedes Sapientiae, Lima. <http://repositorio.ucss.edu.pe/handle/UCSS/506>
- Mendoza, M.; Martínez, J.; Moreira, P.; Paule, M.; Espinoza, R.; Villagra, A.; Abril, G. & Seyler, P. 2011. Monitoreo espacial y temporal del estado trófico de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía central mediante sensores remotos. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.25.13.27/doc/p1078.pdf>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). 2012. Glosario de términos para la gestión ambiental peruana. Documento trabajado por procesos de consultoría. <http://siar.minam.gob.pe/puno/documentos/glosario-terminos-gestion-ambiental-peruana>

- Moreno, D.; Quintero, J. & López, A. 2010. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78: 25-33.
- Moreno, D. y Ramírez, J. 2010. Variación temporal de la condición trófica del lago del Parque Norte, Medellín (Antioquia), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 32: 75-87.
- Morillo, G.; Aldana, G.; Pineda, Á. & Royero, G. 2018. Estimación de clorofila a en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes LANDSAT 8. *Revista Mapping*, 27: 4-14.
- Nixon, S. 1995. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41: 199-219.
- Oberholster, P.; Botha, A. & Grobbelaar, J. 2004. *Microcystis aeruginosa*: source of toxic microcystins in drinking water. *Revista Africana de Biotecnología*, 3: 159-168.
- Ordóñez-Delgado, L.; Ramón-Vivanco, C. & Ortiz-Chalan, V. 2019. Revisión sistemática del estado del conocimiento de los Vertebrados del Parque Nacional Podocarpus. La Granja: *Revista de Ciencias de la Vida*, 30: 7-18.
- Orquera, E. & Cabrera, M. 2020. Caracterización del estado trófico de la laguna de Yambo mediante análisis de fósforo. *InfoANALÍTICA*, 8: 99-111.
- Perdomo, A. 2015. *Predicción de parámetros físico químicos de calidad del agua mediante el uso de sensores remotos: caso de estudio embalse del Neusa*. (Tesis de maestría). Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Ecuador, <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/1751/T069.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pulido, V.; Castro, G.; Ríos, M.; Suárez de Freitas, G. & Ugaz, J. 1998. *Reporte Humedales 1992 – 1997*. Programa de Conservación y Desarrollo Sostenido de Humedales del Perú. INRENA-UNAM-PRONATURALEZA-WI-WWF.
- Pulido, P. & Pinilla, G. 2017. Evaluación del estado trófico de El Salitre, último humedal urbano de referencia en Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41: 41-50.
- Quiros, R.; Boveri, M.B.; Petracchi, C.A.; Rennella, A.M.; Rosso, J.J.; Sosnovsky, A. & Von, H.T. 2006. *Los efectos de la agriculturización del humedal Pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas*. Galizia-Tundisi, J.; Matsumura-Tundisi, T. & Sidagis-Galli, C. (Eds.). *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gerenciamento e controle*. InterAcademy Panel on International Issues, InterAmerican Network of Academies of Sciences. pp. 1-16.
- Roldán, G. & Ramírez, J. 2008. *Fundamentos de Limnología neotropical*. (2th ed.) Universidad de Antioquia.
- Ruiz, B.B. 2008. *Impacto antrópico sobre los humedales El Paraíso, Medio Mundo y La Encantada, Huara, Lima-Perú, 2007-2008*. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo.
- Sierra, J. 2011. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Medellín: Ediciones de la U. <https://es.slideshare.net/vladyvostok/calidad-del-agua-evaluacin-y-diagnostico>
- Toledo, J. 1990. *Informe preliminar sobre os estudos para obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais*. São Paulo, CETESB, 12 p. (Relatorio Interno).
- Tovar, A. 1977. Sinecología de la Laguna Medio Mundo (Costa Central del Perú). *Revista Forestal del Perú*, 7: 1-25.
- Zouiten, H. 2012. *Análisis mediante modelado avanzado de procesos de eutrofización en lagunas litorales: Aplicación a masas de agua atlántica y mediterránea*. (Tesis de doctorado). Universidad de Cantabria, Santander, España.

Received March 21, 2022.

Accepted May 16, 2022.