

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“NIVEL DE EUTROFIZACIÓN DE LA LAGUNA SAN
NICOLÁS CAJAMARCA APLICANDO TELEDETECCIÓN
SATELITAL EN UN PERIODO DE 20 AÑOS”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autor:

Deisy Lisset Carrasco Vela

Asesor:

Dra. Irma Geralda Horna Hernández

Cajamarca - Perú

2020



DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza necesaria para avanzar con cada meta trazada, por su bondad y amor. A mi familia, que en todo momento me han mostrado apoyo, especialmente a mi madre y a mi hermana, quienes son mi mayor motor.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por guiar mis pasos. A mi madre y hermana, quienes han estado conmigo de manera incondicional, gracias por los ánimos y la fuerza brindada.

Quiero expresar mi agradecimiento al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo PRONABEC, por otorgarme una beca para mi formación universitaria.

Manifiesto mi gratitud a todo el equipo de Geomática Soluciones por instruirme los conocimientos necesarios para el manejo y procesamiento de imágenes en el software PCI Geomatics, así también como el otorgamiento de la licencia del mismo.

Agradezco a la Dra.Sc. Irma Geralda Horna Hernández, asesora del presente trabajo, quien siempre me ha apoyado y ha estado pendiente de cada paso.

Y gracias a todas las personas que han contribuido con mi formación, les agradezco infinitamente por todo su apoyo y amistad.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	11
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	16
I.1. Realidad problemática	16
3.5. Formulación del problema.....	45
3.6. Objetivos.....	45
3.6.1. Objetivo general	45
3.6.2. Objetivos específicos.....	45
3.7. Hipótesis	45
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	47
2.1. Tipo de investigación.....	47
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos).....	47
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	49
2.4. Procedimiento	51

2.4.1. Trabajo en campo	51
2.4.1.1. Visita técnica de reconocimiento	51
2.4.1.2. Muestreo de agua	52
2.4.2. Trabajo de gabinete	53
2.4.2.1. Ubicación y delimitación del área de estudio	53
2.4.2.2. Descarga de imágenes satelitales del portal USGS.....	54
2.4.2.3. Procesamiento de imágenes satelitales	59
CAPÍTULO III. RESULTADOS.....	82
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	116
4.1 Discusión.....	116
4.2 Conclusiones.....	130
REFERENCIAS.....	132
ANEXOS	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las imágenes Landsat 8.....	30
Tabla 2. Características de las imágenes Landsat 5.....	31
Tabla 3. Criterios de aplicación del IET U-H.....	40
Tabla 4. Escala de valores del estado trófico y parámetros asociados.....	41
Tabla 5. Fórmulas para estimar el TSI.....	42
Tabla 6. Resumen de valores límites de la OCDE para la clasificación trófica	43
Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos.....	52
Tabla 8. Parámetros biológicos	53
Tabla 9. Coordenadas UTM de puntos de muestreo.....	54
Tabla 10. Resultados del índice de vegetación normalizada (NDVI) e índice de agua normalizada (NDWI).....	82
Tabla 11. Matriz de correlación para el NDVI en el periodo 1998 - 2019.....	83
Tabla 12. Matriz de correlación para el NDWI en el periodo 1998 - 2019.....	83
Tabla 13. Resultados del índice de relación del pigmento de clorofila normalizada (NPCRI).....	84
Tabla 14. Matriz de correlación para el NPCRI en el periodo 1998 - 2019.....	84
Tabla 15. Resultados del índice de absorción de clorofila modificada en la reflectancia (MCARIs) y (MCARIE).....	85
Tabla 16. Matriz de correlación para el MCARIs en el periodo 1998 - 2019.....	86
Tabla 17. Matriz de correlación para el MCARIE en el periodo 1998 - 2019.....	86
Tabla 18. Resultados del GNDVI, RVI y GVI.....	87
Tabla 19. Matriz de correlación para el GNDVI en el periodo 1998 - 2019.....	88

Tabla 20. Matriz de correlación para el RVI en el periodo 1998 - 2019.	88
Tabla 21. Matriz de correlación para el GVI en el periodo 1998 - 2019.	89
Tabla 22. Resultados del NGRDI y el GCI.	89
Tabla 23. Matriz de correlación para el NGRDI en el periodo 1998 - 2019.	90
Tabla 24. Matriz de correlación para el GCI en el periodo 1998 - 2019.	90
Tabla 25. Resultados de DBO Y DQO en software PCI Geomatics.	93
Tabla 26. Matriz de correlación para el DBO en el periodo 1998 - 2019.	94
Tabla 27. Resultados de la demanda química de oxígeno en software PCI Geomatics.	94
Tabla 28. Matriz de correlación para el DQO en el periodo 1998 - 2019.	94
Tabla 29. Resultados del IETChla y chla en software PCI Geomatics.	95
Tabla 30. Matriz de correlación para el IETChla en el periodo 1998 - 2019.	96
Tabla 31. Resultados de cl-a en software PCI Geomatics.	96
Tabla 32. Matriz de correlación para cl-a en el periodo 1998 - 2019.	97
Tabla 33. Resultados de turbiedad y z- fot en software PCI Geomatics.	97
Tabla 34. Matriz de correlación para turbiedad en el periodo 1998 - 2019.	98
Tabla 35. Matriz de correlación para z-fot en el periodo 1998 - 2019.	98
Tabla 36. Resultados de demanda química de oxígeno en laboratorio.	99
Tabla 37. Resultados de oxígeno disuelto en laboratorio.	99
Tabla 38. Resultados de aniones en laboratorio	100
Tabla 39. Resultados de pH en laboratorio	101
Tabla 40. Resultados de color verdadero en laboratorio.	101
Tabla 41. Resultados de coliformes termotolerantes en laboratorio.	102
Tabla 42. Resultados de turbiedad en laboratorio	102

Tabla 43. Resultados de turbiedad con el disco de Secchi.	103
Tabla 44. Resultados de clorofila a en laboratorio	103
Tabla 45. Resultados de conductividad en laboratorio	104
Tabla 46. Resultados de dureza en laboratorio.....	104
Tabla 47. Resultados de índices y parámetros de calidad de agua y eutrofización para el año 2019.	105
Tabla 48. Matriz de correlación de índices y parámetros de calidad de agua y eutrofización para el año 2019.	106
Tabla 49. Clasificación trófica Carlson y OCDE con clorofila A y disco de Secchi.	110
Tabla 50. Rangos para la clasificación trófica para el periodo 1998 - 2019.con turbiedad – teledetección.....	110
Tabla 51. Clasificación trófica para el periodo 1998 – 2019 con turbiedad – teledetección.	111
Tabla 52. Clasificación trófica Carlson y OCDE para el periodo 1998 – 2019 con cl-a – teledetección.....	112
Tabla 53. Índice del estado trófico (TSI) para clorofila A – laboratorio.	113
Tabla 54. Índice del estado trófico (TSI) para turbiedad- disco de Secchi.	113
Tabla 55. Índice del estado trófico (TSI) para cl-a en el periodo 1998 - 2019- teledetección.	114
Tabla 56. Índice del estado trófico clorofila A y Ds (IET) U-H.	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos de radiación en sensores remotos: (i) reflexión, (ii), y (iii) emisión – reflexión	24
Figura 2. Sensor pasivo y activo	25
Figura 3. Criterio para definir los cuatro estados tróficos	34
Figura 4. Características del disco de Secchi	38
Figura 5. Firma espectral transversal de la laguna San Nicolás	48
Figura 6. Ubicación y puntos de muestreo para la laguna San Nicolás	53
Figura 7. Captura de pantalla de la página de sitio web Earth Explorer indicando la fecha y zona de estudio.	55
Figura 8. Captura de pantalla de la página de sitio web Earth Explorer indicando el sensor de descarga.	55
Figura 9. Captura de pantalla de la página de sitio web Earth Explorer indicando las imágenes disponibles.	56
Figura 10. Captura de pantalla de la página de sitio web Earth Explorer indicando la descarga de la imagen.	56
Figura 11. Imagen satelital Landsat 5 para el año 1998.....	57
Figura 12. Imagen satelital Landsat 5 para el año 2008.....	57
Figura 13. Imagen satelital Landsat 5 para el año 2018.....	58
Figura 14. Imagen satelital Landsat 5 para el año 2019.....	58
Figura 15. Imagen satelital Sentinel 2 para el año 2019	59
Figura 16. Software PCI Geomatics	59

Figura 17. Corte de área de estudio en PCI Geomatics	60
Figura 18. Corrección de imágenes satelitales en PCI Geomatics.	62
Figura 19. Corrección ATCOR	62
Figura 20. Calculadora ráster de ecuaciones en PCI Geomatics	79
Figura 21. Visualización de índices y ecuaciones en PCI Geomatics.	80
Figura 22. Rangos de índices en PCI Geomatics.....	80
Figura 23. Resultados de índices (GCI) para el 07-07-1998.....	91
Figura 24. Resultados de índices (GCI) el 02-08-2019	92
Figura 25. Correlación de turbiedad	108
Figura 26. Correlación de demanda química de oxígeno.....	109
Figura 27. Distribución de clorofila "a" en el periodo 1998 - 2019- teledetección.....	117
Figura 28. Relación entre la zona fótica (z-fot) y la turbiedad - teledetección	119
Figura 29. Comparación de los resultados de conductividad con los ECA - Agua.....	123
Figura 30. Comparación de los resultados de pH con los ECA - Agua.....	124
Figura 31. Comparación de los resultados de OD con los ECA - Agua.....	124
Figura 32. Comparación de los resultados de clorofila A con los ECA - Agua.....	125
Figura 33. Comparación de los resultados de color con los ECA - Agua.....	126
Figura 34. Comparación de los resultados de dureza con los ECA - Agua.	127
Figura 35. Comparación de los resultados de coliformes termotolerantes con los ECA - Agua.....	128
Figura 36. Comparación de los resultados de DQO con los ECA - Agua.	128
Figura 37. Comparación de los resultados de turbiedad con los ECA - Agua.	129

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuaciones del IET	39
Ecuación 2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).	63
Ecuación 3. NDVI para Landsat 5	64
Ecuación 4. NDVI para Landsat 8	64
Ecuación 5. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)	64
Ecuación 6. NDWI para Landsat 5	65
Ecuación 7. NDWI para Landsat 8	65
Ecuación 8. NPCRI para Landsat 5	65
Ecuación 9. NPCRI para Landsat 8	66
Ecuación 10. NPCRI para sentinel 2.....	66
Ecuación 11. Índice de absorción de clorofila modificada en la reflectancia (MCARI)s ...	66
Ecuación 12. MCARI para Landsat 5	67
Ecuación 13. MCARI para Landsat 8	67
Ecuación 14. Índice de absorción de clorofila modificada en la reflectancia (MCARI)e ...	67
Ecuación 15. MCARIE para Landsat 5	67
Ecuación 16. MCARIE para Landsat 8	67
Ecuación 17. Vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)	68
<i>Ecuación 18.</i> GNDVI para Landsat 5	68
Ecuación 19. GNDVI para Landsat 8	68
Ecuación 20. Ratio vegetation index (RVI)	68
Ecuación 21. RVI para Landsat 5	69

Ecuación 22. RVI para Landsat 8.....	69
Ecuación 23. Green vegetation index (GVI)	69
Ecuación 24. GVI para Landsat 5.....	69
Ecuación 25. GVI para Landsat 8.....	70
Ecuación 26. Índice de diferencia normalizada verde-rojo (NGRDI)	70
Ecuación 27. NGRDI para Landsat 5	70
Ecuación 28. NGRDI para Landsat 8	70
Ecuación 29. Green coverage Index (GCI)	71
Ecuación 30. GCI para Landsat 5	71
Ecuación 31. GCI para Landsat 8.....	71
Ecuación 32. Demanda bioquímica de oxígeno para Landsat 5.....	72
Ecuación 33. Demanda bioquímica de oxígeno para Landsat 8.....	72
Ecuación 34. Demanda química de oxígeno para Landsat 5.....	73
Ecuación 35. Demanda química de oxígeno para Landsat 8.....	73
Ecuación 36. Índice del estado trófico de clorofila (IET Chla) para Landsat 5	74
Ecuación 37. Índice del estado trófico de clorofila (IET Chla) para Landsat 8	74
Ecuación 38. Concentración de clorofila a para Landsat 5	74
Ecuación 39. Concentración de clorofila a para Landsat 8	75
Ecuación 40. Concentración de clorofila a - CBERS2B.....	75
Ecuación 41. Concentración de clorofila a para Landsat 5	76
Ecuación 42. Concentración de clorofila a para Landsat 8	76
Ecuación 43. Parámetro zona fótica - CBERS2B.....	76
Ecuación 44. Turbiedad para Landsat 5.....	76

Ecuación 45. Turbiedad para Landsat 8	77
Ecuación 46. Índice del estado trófico para Landsat 5	77
Ecuación 47. Índice del estado trófico para Landsat 8	78

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar el nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás en el departamento de Cajamarca mediante teledetección, para ello, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 y 8 para los años 1998, 2008 y 2019, a las cuales se le aplicaron correcciones, índices y ecuaciones apoyadas en el software PCI Geomatics y calibradas con pruebas de laboratorio. Se evaluó el estado trófico mediante las concentraciones de turbiedad y clorofila “a”, seguido de los parámetros fisicoquímicos y biológicos más representativos de calidad de agua. Se obtuvo una correlación significativa para la turbiedad (UNT) con la turbiedad satelital ($r = 0.98$), para la cl-a y turbiedad satelital ($r = 0.86$) y para el disco de Secchi (transparencia) y 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 pasa de estado eutrófico a mesotrófico en un periodo de 20 años. Asimismo, la clasificación del IET, para el disco de Secchi (m) y cl-a (mg/L) ubican a la laguna San Nicolás en un estado mesotrófico para el 2019. Por otro lado, los parámetros fisicoquímicos evaluados se encontraron 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 clave: Teledetección, firma espectral, eutrofización, calidad de agua.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the level of eutrophication of the San Nicolás lagoon 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” concentrations, 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 chl-a and satellite turbidity ($r = 0.86$) and for the Secchi disk (transparency) and satellite chl-a ($r = -0.70$). The results determined that according to Carlson's methodology and the trophic state index (TSI), the San Nicolás lagoon changes from eutrophic to mesotrophic status over a period of 20 years. Likewise, the classification of the EIT, for the Secchi disk (m) and chl-a (mg / L), places the San Nicolás lagoon in a mesotrophic state for 2019. 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 lagoon presents an intermediate level of nutrients that must be continuously monitored to predict eutrophication threats.

Keywords: Remote sensing, signature spectral, eutrophication, water quality.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

I.1. Realidad problemática

Hoy en día los cuerpos de agua se encuentran vulnerables a los efectos de la contaminación, causados principalmente por la actividad antrópica y que traen como consecuencia la alteración más allá 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 que es 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, porque en base a ello se aprovecha el recurso para fines agrícolas, de consumo humano, de conservación del ambiente acuático, preservación de la diversidad y como estrategias 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 y la restauración no es fácil ni barata. (Quirós et al., 2006).

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

Es por ello que la presente tesis mediante el uso de sensores remotos determinará el estado trófico de la laguna, utilizando imágenes gratuitas del portal del USGS y aplicando metodologías en el software PCI para la estimación de parámetros fisicoquímicos de calidad de agua, tales como turbiedad y Clorofila a, los principales para clasificar el nivel trófico de la laguna y de esta manera generar bases para una adecuada gestión de los recursos hídricos, recuperación y restauración de los ecosistemas.

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

Ledesma, et al., (2013) en su investigación “Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina) midió parámetros de calidad de agua durante los años 2003 – 2006 y determinó el estado trófico del embalse generando una matriz de correlación entre las variables estudiadas. Como resultado el embalse obtuvo valores de clorofila de 4,5 $\mu\text{g/L}$ para el año 2003 y 10.4 $\mu\text{g/L}$ para el 2006 pasando de un estado mesotrófico a eutrófico según los valores límites de la OCDE, la medición con el disco de Secchi determinó valores de 2,3 y 2,6 m para los años 2003 y 2006, respectivamente, indicando que el embalse adquirió alta productividad con el pasar de los años y un avance progresivo hacia un estado elevado de eutrofia. Se demostró que la correlación positiva más significativa fue entre la clorofila – a y PT ($r=0.83$), y para el oxígeno disuelto una correlación moderada ($r= 0.51$), de esta manera, concluyó que el embalse sufrió un cambio de calidad del agua, demostrándose su deterioro y recomendando la necesidad de tomar medidas de gestión tanto en la cuenca como en el reservorio, además de utilizar los datos obtenidos para generar un programa preliminar de monitoreo y gestión extrapolable a otros recursos acuáticos.

Díaz & Sotomayor (2013) en su investigación Evaluación de la Eutrofización de la Laguna Conococha – Ancash a agosto de 2012 determinó el nivel de eutrofización aplicando metodologías para calcular el fósforo total, nitrógeno en forma de nitrato, la transparencia y la clorofila “a” realizando una distribución de la laguna en seis puntos de monitoreo mediante el método de cuadrantes y

teniendo en cuenta aspectos como: ubicación de ingresos y salidas de efluentes, ubicación de fuentes contaminantes y/o vertimientos de aguas residuales. Como resultado obtuvieron que según la OCDE (1982), la laguna Conococha se encuentra en un nivel trófico muy alto (hipereutrófico) con 132.0 $\mu\text{g/L}$ para el fósforo, para el nitrato un nivel eutrófico con 230.0 $\mu\text{g/L}$, para la clorofila “a”, un nivel hipereutrófico con 46 $\mu\text{g/L}$ y para el disco de Secchi hipereutrófico con 0.62 m. Según la clasificación de Carlson, el fósforo ubica a la laguna en un estado hipereutrófico (TSI = 74.3), la clorofila “a” en un estado eutrófico con TSI = 67.9 y el disco de Secchi en un estado eutrófico con TSI = 67.1, concluyendo que la laguna presenta estado eutrófico a hipereutrófico, donde las principales causas de la eutrofización son la actividad ganadera, vertimiento directo de las aguas residuales domésticas y la disposición de los residuos sólidos hacia la laguna.

Callisaya (2018) en su investigación Análisis de la clorofila – a en el agua con técnicas de teledetección en el lago Titicaca (Lago menor) localizó puntos de muestreo del norte del lago del lado boliviano, realizando una clasificación de las concentraciones de clorofila- a en la imagen satelital Landsat 8, mediante firmas espectrales y datos de campo para el análisis de agua propuesto por Carlson 1977 con lo que identificó el estado trófico de los cuerpos de agua. Como resultado indicó que las concentraciones de clorofila a (2,79 -7,63 mg/m^3) (2,18 – 3,93 mg/m^3) (1,82 – 3,63 mg/m^3) tienen relación con la profundidad y transparencia ya que a menores concentraciones de fitoplancton corresponden

mayores profundidades debido a la falta de penetrabilidad de radiación solar para realizar la fotosíntesis. La concentración promedio de clorofila a fue de $2,23 \text{ mg/m}^3$ y la mayor de $5,43 \text{ mg/m}^3$ ubicando al lago en un estado mesotrófico. Respecto a las concentraciones de fósforo total excepto de un punto mostró un estado eutrófico con un valor de 35 mg/m^3 .

Morillo, et al., (2018) en su investigación Estimación de clorofila a en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes Landsat 8 estableció la distribución espacial y temporal de clorofila a, para lo cual analizó imágenes satelitales disponibles de la zona y calculó los índices de vegetación NDVI, RVI y NRVI durante el periodo 2011 y 2016, además calculó las concentraciones de clorofila a. Los resultados obtenidos sirvieron para correlacionar los índices de vegetación con cl-a, se generó ecuaciones que mostró la productividad primaria en el lago a partir de teledetección. La mayor concentración de cl-a fue de 12,159 a 20,281 $\mu\text{g/L}$ que de acuerdo a la escala del nivel trófico establecido por Carlson (1977) el lago se encuentra en un estado mesotrófico. Además, se demostró que la teledetección permite realizar un monitoreo rápido y eficiente de la concentración de clorofila-a, a partir del valor del NDVI, con una certeza del 94 %, siendo la ecuación $\text{C}_{\text{lof}}_{(a)} = 13.053 (\text{NDVI}) + 12.756$

López & Madroñero, (2015) en su investigación Estado Trófico de un Lago Tropical de Alta Montaña: Caso Laguna de la Cocha determinó el estado trófico mediante los índices de Carlson, el índice desarrollado por la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) y el índice de Carlson modificado por Toledo (IETM). El disco de Secchi determinó la transparencia del agua y clasificó al lago como estado mesotrófico. Sin embargo, las concentraciones de clorofila “a” ($0.53 \mu\text{g/L} - 2.34 \mu\text{g/L}$) según la OCDE, Carlson y el IETM lo clasificaron como ultraoligotrófico y oligotrófico, característica típica de lagos de alta montaña con bajos procesos de contaminación. Finalmente, se recalcó trabajar con la propuesta de Carlson, y priorizar la biomasa a partir de la medición de la clorofila “a” como mejor parámetro en cuanto a eutrofización, porque sus datos son más confiables y tienen menos errores que los datos de transparencia.

Quiroz (2019) en su tesis Evaluación de los estados tróficos de la laguna principal del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo, Huaura-Lima (ACRAMM) evaluó los estados tróficos de la laguna principal ACRAMM, analizando los parámetros físico-químicos del agua en dos campañas de muestreo y obteniendo valores de las reflectancias de las bandas de Sentinel-2. Los resultados clasificaron al ACRAMM en estado eutrófico mediante según la transparencia del Disco de Secchi que registró un valor mínimo de 0.10 m con un índice de estado trófico (IETMTDS) > 76.04 , similar al del fósforo (IETMTPt > 65.56). Sumado a ello, la mayoría de los parámetros

de calidad de agua estudiados no cumplieron con el límite establecido en el ECA. Concluyendo que el estado eutrófico del ACRAMM esta causado por desagües agrícolas, vertimiento de aguas residuales industriales, infiltración de la poza de oxidación del Centro Poblado de Medio Mundo y actividades de pastoreo.

Tito, et al., (2019) en su investigación Índice de estado Trófico de las aguas de la Reserva Natural protegida Pantanos de Villa, Chorrillos 2019, analizaron la concentración de fósforo total, nitratos, sólidos suspendidos y clorofila “a”, a fin de determinar el índice de estado trófico de la laguna Génesis, acompañado de la evaluación de parámetros fisicoquímicos de agua. Realizó tres puntos de muestreo y encontró que los valores de conductividad eléctrica y OD sobrepasaron lo establecido por los Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua de categoría 4 (Conservación del ecosistema acuático) sub categoría E1 (Lagos y lagunas). En cuanto al estado trófico, de acuerdo a Carlson (TSI), el determinaron que la laguna Génesis se encontraba en un estado mesotrófico según el parámetro de clorofila A, un estado eutrófico según el parámetro “nivel de transparencia” y estado hipereutrófico según el parámetro de fósforo total.

I.1.1. Fundamentos de la teledetección.

Según la Agencia Espacial Europea - ESA Agencia Espacial Europea - ESA (2018) la teledetección está definida como un modo de obtener información de un objeto sin estar en contacto con él. (Soriano et al., 1996)

La utilización de esta técnica va a facilitar el estudio de la ubicación y referenciación de las superficies de agua, así como el de la evolución temporal. (Soriano et al., 1996)

Las primeras experiencias de teledetección se remontan a 1859 cuando Gaspar Félix de Thournachon obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo. (Chuvienco, 2008).

En la década de los 70 continúa el programa Landsat, el más fructífero hasta la actualidad por sus aplicaciones, ya en la década de los 90 se pone en órbita satélites que llevan radar o sensores que trabajan en el rango espectral de las microondas como el primer satélite de recursos europeos El European Remote Sensing Satellite (ERS), que se convirtió en el primer satélite de observación. (Sobrino, 2000)

Su aplicación de los recursos naturales se fundamenta en que los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina *signatura espectral*. (Chuvieco, 2002)

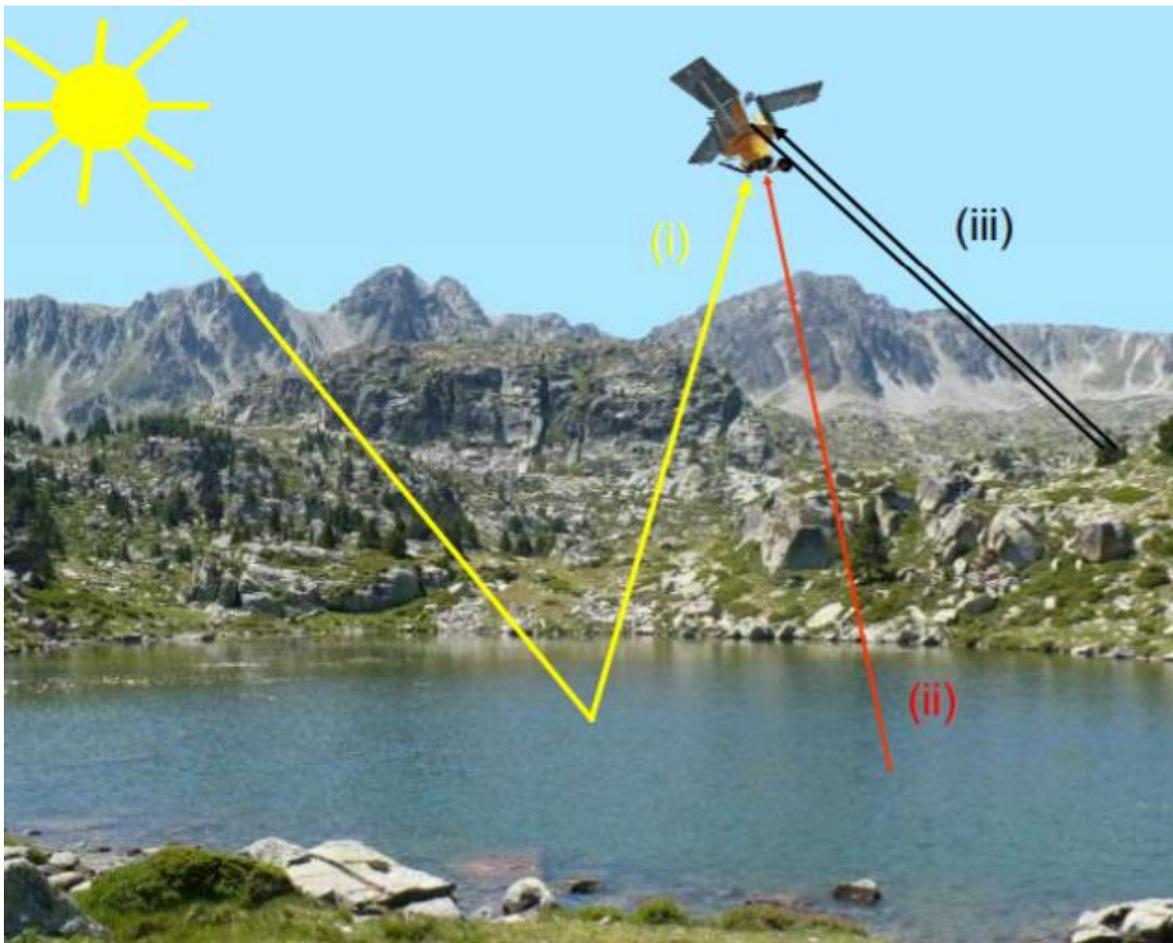


Figura 1. Procesos de radiación en sensores remotos: (i) reflexión, (ii), y (iii) emisión – reflexión

Fuente: Chuvieco (2002)

- 1. Métodos pasivos:** Están basados en la detección de las características radiactivas o reflectantes a partir de los rayos solares o de su propia temperatura, siendo su misión captar la señal que le llega mediante la luz que refleja, tal como se observa en la figura 2. (Chuvieco, 2008)
- 2. Métodos activos:** El sensor activo es independiente de fuentes de luz, es capaz de emitir un haz energético generado por sí mismo. El sistema más conocido es el radar que trabaja en cualquier condición atmosférica. (Chuvieco, 2008)

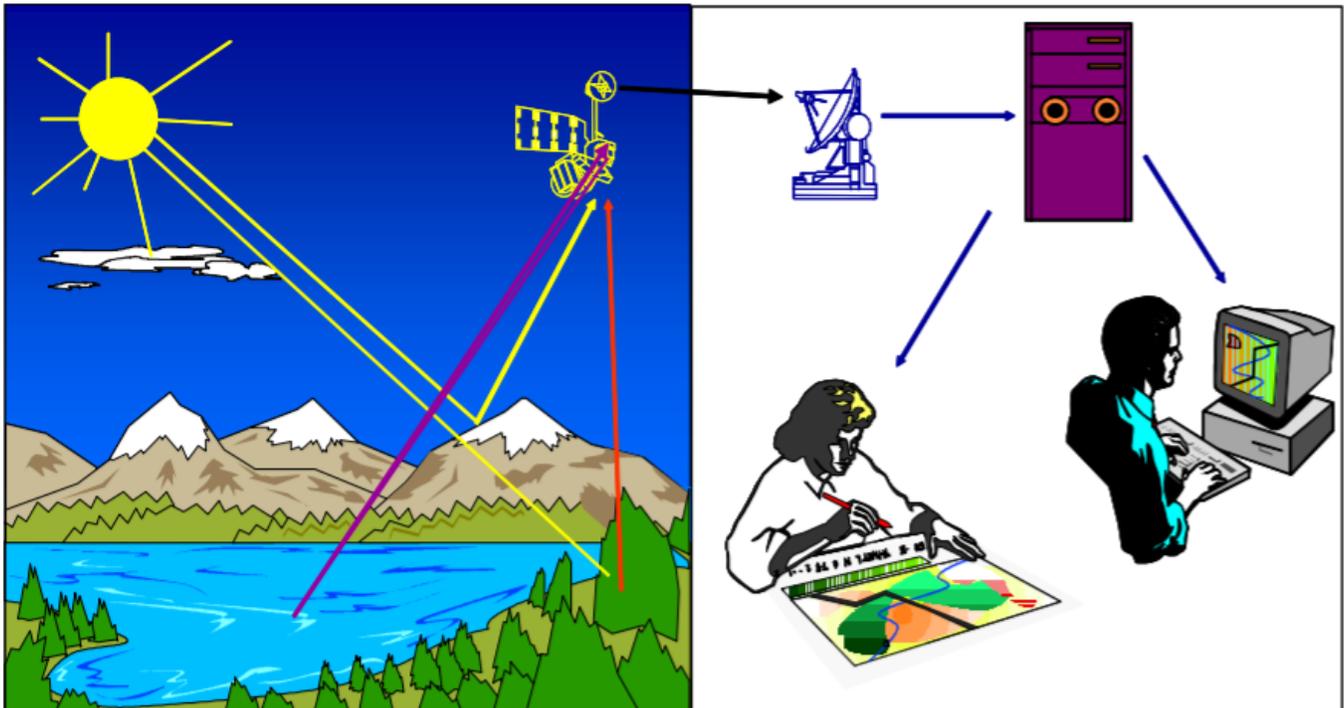


Figura 2. Sensor pasivo y activo

Fuente: Chuvieco, (2008)

3. Espectro electromagnético.

- **Longitud de Onda:** Es la distancia entre crestas, algunas de estas se miden en metros y otras se miden en millonésimas de metro (micrómetros) (Chuvieco, 2002)

4. Frecuencia:

Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo; en este caso el número de crestas que pasan por un punto determinado en un segundo y su unidad es Hertz. (Chuvieco, 2002)

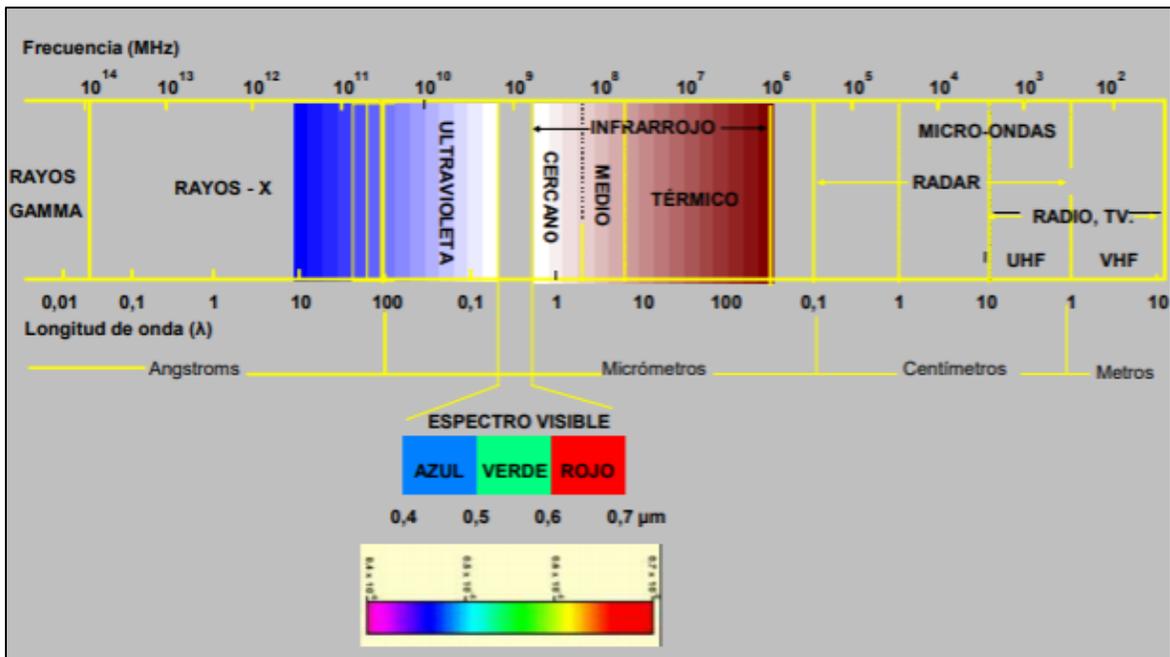


Figura 3. Espectro electro - magnético

Fuente: Chuvieco (2002)

I.1.2. Adquisición de imágenes satelitales.

El elemento fundamental para adquirir una imagen adecuada es la resolución que presenta el sensor (Chuvieco, 2002).

Los sensores son instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética que les llega de la tierra y la atmósfera, en un determinado intervalo de longitud de onda, y convertirla en una magnitud física que pueda ser tratada y grabada (Meijerink et al., 2007)

- Resolución de los sensores remotos:

- Resolución Espacial
 - Resolución Espectral
 - Resolución Radiométrica
 - Resolución Temporal
-
- **Píxel**

Es la unidad mínima de información de la imagen y se puede identificar como cada uno de los pequeños cuadrados que forman una imagen, visibles cuando esta se amplía. El valor número que codifica cada píxel se denomina nivel digital (ND). (Chuvieco, 2002).

- **El programa Landsat**

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). (Ariza, 2013).

El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inició en 1972, es la más larga de la historia y continúa registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general cada píxel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol. (Ariza, 2013).

En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multiespectrales, manteniendo la misma calidad de sus siete predecesores (Ariza, 2013).

- **Landsat 5:**

El satélite LANDSAT-5 fue lanzado el 1 de marzo de 1984 y se ha convertido en el satélite de Observación de la Tierra que más tiempo ha estado operativo. Sus aplicaciones se extienden a campos como la detección de cambios globales, agricultura, calidad del agua y administración de recursos. El satélite tiene dos sensores: Escaner Multi-Espectral (MSS) que tiene una distancia Terráquea de Muestreo (GSD) de 60m y el Mapeo Telemático (TM) que tiene una GSD de 30m, ambas con un tiempo de revisita de 16 días. (Geocento earth imaging, 2019.)

- **Landsat 8:**

El satélite LANDSAT-8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es proporcionar información para actividades relacionadas con la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y también en el ámbito estatal. Incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). Es un satélite con funciones mejoradas para monitorizar la calidad del agua y nubes atmosféricas altas. (Ariza, 2013).

Tabla 1. *Características de las imágenes Landsat 8.*

Banda	Nombre	Ancho de banda (μm)	Resolución espacial (m)
1	Costal aerosol	0.43 – 0.45	30
2	Azul	0.45 – 0.51	30
3	Verde	0.53 – 0.59	30
4	Rojo	0.64 – 0.67	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.57 – 1.65	30
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.11 – 2.29	30
8	Pancromática	0.50 – 0.68	15
9	Cirrus	1.36 – 1.38	30
10	Infrarrojo Térmico 1 (TIR 1)	10.60 – 11.19	100
11	Infrarrojo Térmico 2 (TIR 2)	11.50 – 12.51	100

Fuente: (Ariza, 2013).

Tabla 2. *Características de las imágenes Landsat 5.*

Banda	Nombre	Ancho de banda (μm)	Resolución espacial (m)
1	Azul	0.45 – 0.52	30
2	Verde	0.52 – 0.60	30
3	Rojo	0.63 – 0.69	30
4	Infrarrojo Cercano	0.76 – 0.90	30
5	Infrarrojo Lejano	1.55 – 1.75	30
6	Térmico Lejano	10.4 – 12.5	30
7	Térmico Próximo	2.08 – 2.35	30

Fuente: (Ariza, 2013).

La resolución espacial es el aspecto más interesante de una imagen de satélite que pueden identificarse gracias a la respuesta espectral relativa (RSR) de cada banda.

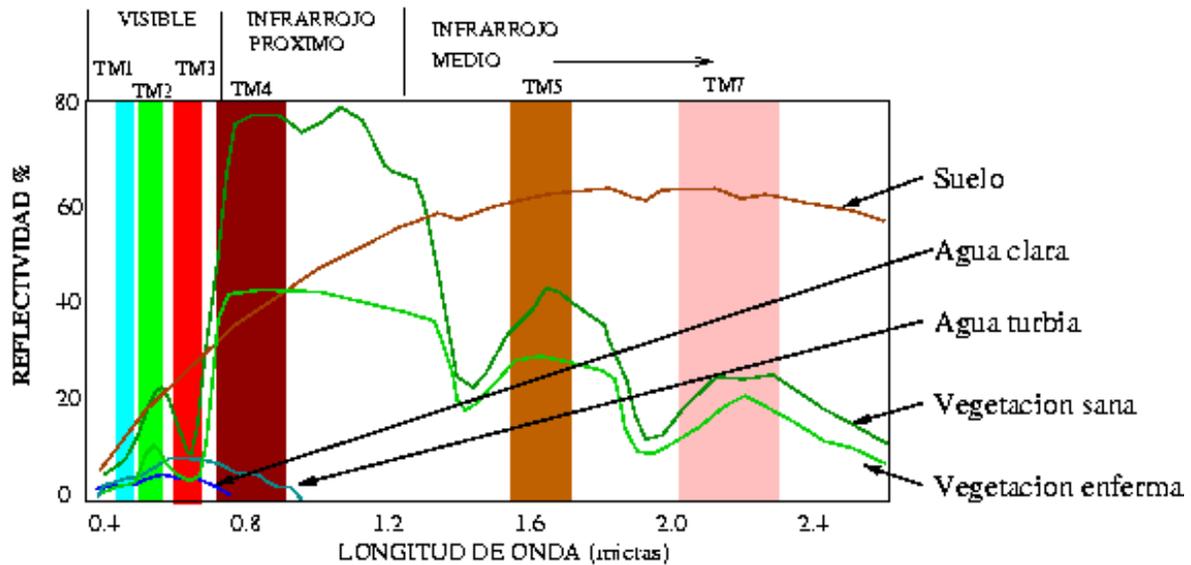


Figura 4. Respuestas espectrales

Fuente: (Alonso, 2006).

I.1.3. Eutrofización

1. Definición

Según Ramalho (2003): “La eutrofización es el proceso natural de envejecimiento de los lagos por el enriquecimiento de nutrientes, con presencia de microalgas que terminan consumiendo el oxígeno que otros seres vivos necesitan para subsistir”.

2. Niveles Eutróficos de lagos y lagunas.

- Nivel Oligotrófico

Este es el estado normal y saludable del ecosistema, pobre en nutrientes, el agua tiene una transparencia considerable y hay presencia de peces. Las concentraciones que ubican a un cuerpo de agua en este nivel dependen

del valor de clorofila a $< 3\text{ug/L}$ y la claridad del agua determinada por el disco de Secchi, 4m. (Moreno et al., 2010).

- Nivel Mesotrófico

Moderado nivel de productividad, hay claridad de agua y presencia de plantas acuáticas. Los valores de Clorofila a son entre 3 a 7 ug/L y la transparencia entre 2.5 y 4 m. (Moreno et al., 2010).

- Nivel Eutrófico

Alto nivel de productividad, poca claridad del agua, los valores de Clorofila a entre 7 y 40 ug/L y la transparencia del disco de Secchi entre 0.9 y 2.5 m. (Moreno et al., 2010).

- Nivel Hipereutrófico

Excesivo contenido de nutrientes, muy poca claridad de agua, abundancia de plantas acuáticas. La vegetación situada por debajo del nuevo umbral fótico muere, y muchas de las algas flotantes van hasta el fondo debido al agotamiento de los nutrientes causado por el crecimiento exponencial y los valores de clorofila a se encuentran a más de 40 ug/L y el Disco de Secchi menor a 0.9 m. (Moreno et al., 2010).

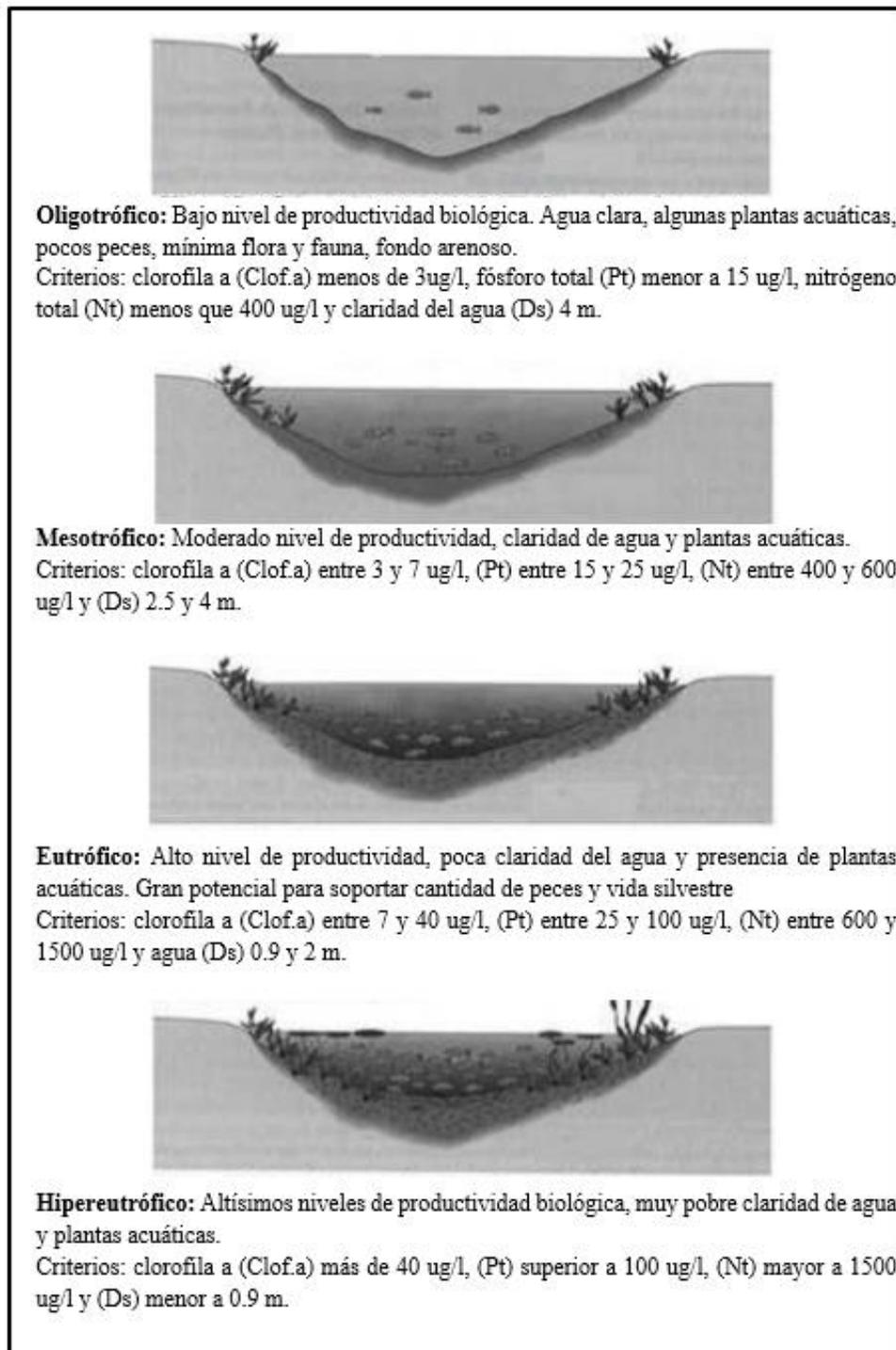


Figura 3. Criterio para definir los cuatro estados tróficos

Fuente: LAKEWATCH (2010), citado por Moreno, et al., (2010).

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 es necesario para que el ecosistema consuma una cantidad determinada de un contaminante. (Vallejo, 2012)

El grado de contaminación y la concentración de oxígeno disuelto en el agua (OD) también se relacionan, los niveles más altos de oxígeno disuelto indica mejor calidad del recurso, además a mayor cantidad de materia orgánica en el agua, mayor oxígeno necesitan los microorganismos para oxidarla. (Raffo & Ruíz, 2014)

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno requerido o 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. (Ramalho, 2003).

Ambos son indicadores en procesos de control de calidad del agua y cuanto mayor sean 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, alterando la cadena trófica de ese ecosistema. Otro indicador claro de la eutrofización es la medida de la transparencia de las aguas y de su color. Si el agua está verde y la luz es incapaz de atravesar más que unos pocos metros de la columna de agua, habrá eutrofización. (Vallejo, 2012).

3. Causas de la eutrofización

3.1. Descarga de aguas residuales, las cuales son ricas en nutrientes y alteran el cambio trófico del cuerpo de agua. (Moreno et al., 2010).

3.2. El uso excesivo de fertilizantes en los cultivos, tales como el nitrógeno y fósforo que por escorrentía alimentan la eutrofización causando malos olores y el crecimiento de las algas que a su vez reducen el oxígeno disuelto en el agua aumentando la mortandad de peces. (Escobar, 2002).

3.3. La deforestación y la erosión de los suelos utilizados en la agricultura, escurren sus nutrientes a la laguna aumentando los niveles de turbiedad en las aguas superficiales. (Escobar, 2002).

3.4. La ganadería que a través de los excrementos de los animales aportan nutrientes de carácter nitrogenado (amonio). (Vallejo, 2012).

4. Consecuencias de la eutrofización

Las fuentes de contaminación orgánica al descomponerse alimentan a las bacterias, las cuales utilizan el oxígeno disuelto en agua y oxidan la materia orgánica produciendo dióxido de carbono, nitrato y fosfato. Dichos elementos son los responsables del excesivo crecimiento de algas que impiden que la luz penetre hasta el fondo del lago, impidiendo la fotosíntesis y provocando mortandad en la fauna. (Moreno et al. 2010).

En el peor de los casos la desecación de lagunas es otro de los efectos de eutrofización por el depósito durante largas temporadas de sedimentos y restos orgánicos sobre los que crece la vegetación, transformándose la laguna en pantano y luego en bosque o pradera. Este proceso se lleva a cabo durante largos periodos de tiempo a menudo de forma natural y se denomina colmatación. (Vallejo, 2012).

La calidad de las aguas se ve afectada ya que al aumentar la podredumbre y agotarse el oxígeno, las aguas adquieren un olor nauseabundo ocasionando grandes pérdidas económicas (turismo, áreas con potencialidades de biodiversidad o servicios ecosistémicos), problemas respiratorios y problemas sanitarios por su consumo a las personas de la zona. (iagua, 2018)



Figura 5. Río Riquel en el Bayo (Zagaroza) con eutrofización

Fuente: (Moreno et al., 2010)

Los autores Gregor y Marsálek, (2004), citados por Callisaya (2018) definen que la concentración de clorofila a se estudia para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, porque es el principal pigmento fotosintético presente en las algas.

El monitoreo del plancton con el disco de Secchi es una gran alternativa, ya que existe una gran relación entre profundidad y transparencia, mientras mayor sea la turbiedad del agua, menor será la visibilidad del disco. La concentración de clorofila α aumenta en la medida en que la abundancia de fitoplancton crece. (Boyd, E. & Tucker, C. 1998).

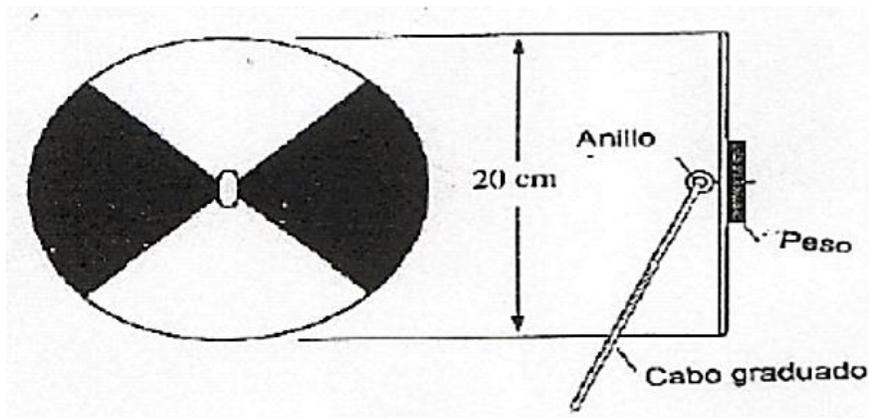


Figura 4. Características del disco de Secchi

Fuente: (Boyd & Tucker, 1998)

a. Métodos para la evaluación del estado trófico

1. Índice del estado trófico de Carlson

El índice de estado trófico se calcula a partir de la transparencia del disco Secchi, la clorofila o el fósforo total. (Carlson, R. 1977).

La escala completa y sus parámetros asociados se muestran en la Tabla 4.

Ecuación 1. Ecuaciones del IET

$$IETDS = 10 \left(6 - \frac{\ln(DS)}{\ln(2)} \right)$$
$$IETCl. "a" = 10 \left(6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln(Cl. "a")}{\ln(2)} \right)$$

$$IETPromedio = \frac{IETDS + IETCl. "a"}{2}$$

Donde:

IETDS: Índice de estado trófico de Carlson disco de Secchi

IETCl. "a": Índice de estado trófico de Carlson clorofila "a"

IET Promedio: Índice de estado trófico de Carlson promedio.

Los valores obtenidos al aplicar las ecuaciones varían en una escala de cero a cien, la aplicación para su interpretación se resume en la tabla 3.

Tabla 3. *Criterios de aplicación del IET U-H*

Valor Índice	Categoría Trófica
< 30	Ultraoligotrófico
30 – 44	Oligotrófico
44 – 54	Mesotrófico
54 – 74	Eutrófico
> 74	Hipereutrófico

Fuente: (López & Madroño, 2015)

El trabajo publicado de Carlson, nos muestra las ecuaciones y la escala de valores del estado trófico en cuerpos de agua. Se puede trabajar con las primeras ecuaciones ya citadas del año 1977 o con las fórmulas modificadas para 1980. (López & Madroño, 2015)

Tabla 4. *Escala de valores del estado trófico y parámetros asociados.*

Estado de eutrofia	TSI	D_s (m)	P_t (mg/m³)	Clorf α (mg/m³)
	0	64	0.75	0.04
Oligotrófico (TSI < 30)	10	32	1.5	0.12
	20	16	3	0.34
	30	8	6	0.94
Mesotrófico (30 < TSI < 60)	40	4	12	2.6
	50	2	24	6.4
	60	1	48	20
Eutrófico (60 < TSI < 90)	70	0.5	96	56
	80	0.25	192	154
	90	0.12	384	427
Hipereutrófico (90 < TSI < 100)	100	0.06	768	1183

Fuente: (Carlson, 1997)

Tabla 5. Fórmulas para estimar el TSI.

Parámetro de eutrofización	Carlson (1977; 1980)	Aizaki et al. (1981)
Claridad de agua (D_8) (m)	$TSI_{D_8} = 60 - 14.41Ln(D_8)$	$TSI_{D_8} = 10 \times \left(2.46 + \frac{3.76 - 1.57Ln(D_8)}{Ln2.5} \right)$
Fósforo total (P_t) (mg/l)	$TSI_{P_t} = 14.42Ln(P_t) + 4.15$	$TSI_{D_{P_t}} = 10 \times \left(2.46 + \frac{6.68 - 1.15Ln(P_t)}{Ln2.5} \right)$
Clorofila a (Clorf a) (mg/m^3)	$TSI_{Clorf a} = 9.81Ln(Clorf a) + 30.6$	$TSI_{Clorf a} = 10 \times \left(2.46 + \frac{Ln(Clorf a)}{Ln2.5} \right)$

Fuente: (Moreno et al., 2010)

2. Índice propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)

El estudio realizado en 22 países de Europa occidental, Estados Unidos, Japón y Australia durante 5 años por el Comité de Eutrofización de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en 1982, propuso una clasificación del grado de eutrofia de lagos y embalses. La OCDE proporciona categorías de estado trófico a partir del análisis de nutrientes (concentración de fósforo), de la capacidad de generar biomasa (clorofila “a”) y de la disponibilidad de espectro fotosintético en la vertical de la columna de agua (transparencia de la columna de agua). (López & Madroñero, 2015)

Tabla 6. Resumen de valores límites de la OCDE para la clasificación trófica

Categoría trófica	Clorofila “a” ($\mu\text{g/L}$)	Profundidad Secchi (metros)	Fósforo ($\mu\text{g/L}$)
Ultraoligotrófico	< 1	> 12	< 4
Oligotrófico	1 – 2.5	6 – 12	4 a 10
Mesotrófico	2.5 a 7.9	3 – 6	10 a 35
Eutrófico	8 a 25	1.5 – 3	35 a 100
Hipereutrófico	> 25	< 1.5	> 100

Fuente: (López & Madroñero, 2015)

3. Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Nuevas tecnologías se han ido desarrollando para estudiar la distribución espacial de las condiciones de eutrofia en lagos y lagunas, uno de los más importantes es utilizar softwares como PCI y SIG. La metodología es considerar el TSI formado por seis indicadores fisicoquímicos y biológicos; fósforo total (TSIPt), nitrógeno total (TSINt), Demanda Química de Oxígeno (TSIDQO), profundidad del Disco de Secchi (TSIDs) y concentración de clorofila a (TSIClorf a); lo que describe la eutrofización del medio ambiente del lago permitiendo fusionar los datos de Clorofila a con los indicadores a fin de obtener el grado de eutrofia en una escala de 0-100. Finalmente, se realizan mapas temáticos para clasificar los valores interpolados de acuerdo a los resultados obtenidos. (Moreno et al., 2010).

Las imágenes satelitales provistas por sensores remotos representan una herramienta importante en el monitoreo, control y gestión de los recursos hídricos; por lo que se puede modelar la distribución espacial de la concentración de clorofila “a” y el límite de la zona fótica en un embalse utilizando imágenes satelitales y un sistema de información geográfica (SIG). (Bonansea et al., 2012)

3.5. Formulación del problema

¿Cuál es el nivel de eutrofización de la Laguna San Nicolás Cajamarca aplicando teledetección satelital en un periodo de 20 años?

3.6. Objetivos

3.6.1. Objetivo general.

Determinar el nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás aplicando teledetección satelital en un periodo de 20 años.

3.6.2. Objetivos específicos.

Determinar parámetros de calidad de agua, tales como DBO, DQO, índice de estado trófico de clorofila, turbiedad y clorofila a mediante técnicas de teledetección para el periodo 1998 - 2019.

Contrastar resultados de clorofila a obtenidos mediante teledetección con muestreos de campo.

Determinar los parámetros que tengan más relación con los valores de clorofila a (chl-a) obtenidos por teledetección satelital.

Determinar los índices espectrales y ecuaciones que permitan identificar y analizar con mayor precisión la vegetación, el recurso hídrico y la actividad fotosintética en la laguna san Nicolás en Cajamarca.

3.7. Hipótesis

3.7.1. Hipótesis General

La laguna San Nicolás disminuye su nivel de eutrofización con el pasar de los años en el periodo 1998 - 2019 mejorando de esta manera su calidad de agua.

3.7.2. Hipótesis Específicas

Mediante el análisis multiespectral de las imágenes satelitales se puede estimar parámetros fisicoquímicos de calidad de agua como DBO, DQO y turbiedad.

Mediante los índices espectrales se pueden identificar y analizar diversos aspectos como la vegetación y el recurso hídrico de la laguna san Nicolás en Cajamarca.

Existe una alta correlación entre los valores de clorofila obtenidos de ecuaciones mediante percepción remota y los resultados de laboratorio.

Existe una alta correlación entre los valores de clorofila y turbiedad en la laguna San Nicolás.

El contenido de clorofila en función del área de la laguna será menor, conforme más actual sea el año.

Los valores de turbiedad en función de área de la laguna serán menor, conforme más actual sea el año.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

El presente trabajo según su profundidad el diseño de la investigación es descriptiva.

Según la naturaleza de datos, es cuantitativa, y según la manipulación de la variable es experimental

2.2. Población y muestra

2.2.1. Población: De acuerdo a la delimitación de la laguna San Nicolás, el área es de 108 hectáreas aproximadamente, por lo que se ha considerado trabajar con una imagen satelital de 30x30 m de resolución espacial que abarca toda la laguna y alrededores.

2.2.2. Muestra: El muestreo estuvo determinado por la firma espectral del índice de estado trófico IET_{chl-a} de la laguna, dividido en 5 puntos: parte inicial, parte media y final, además de 2 puntos en los bordes del espejo de agua.

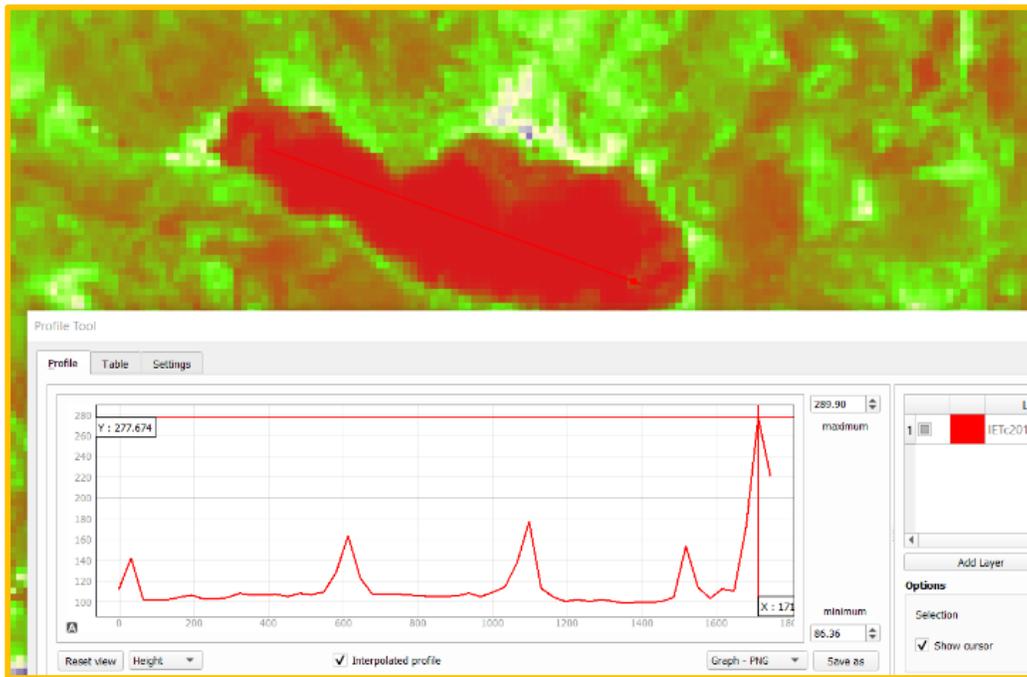


Figura 6. Firma espectral longitudinal de la laguna San Nicolás.

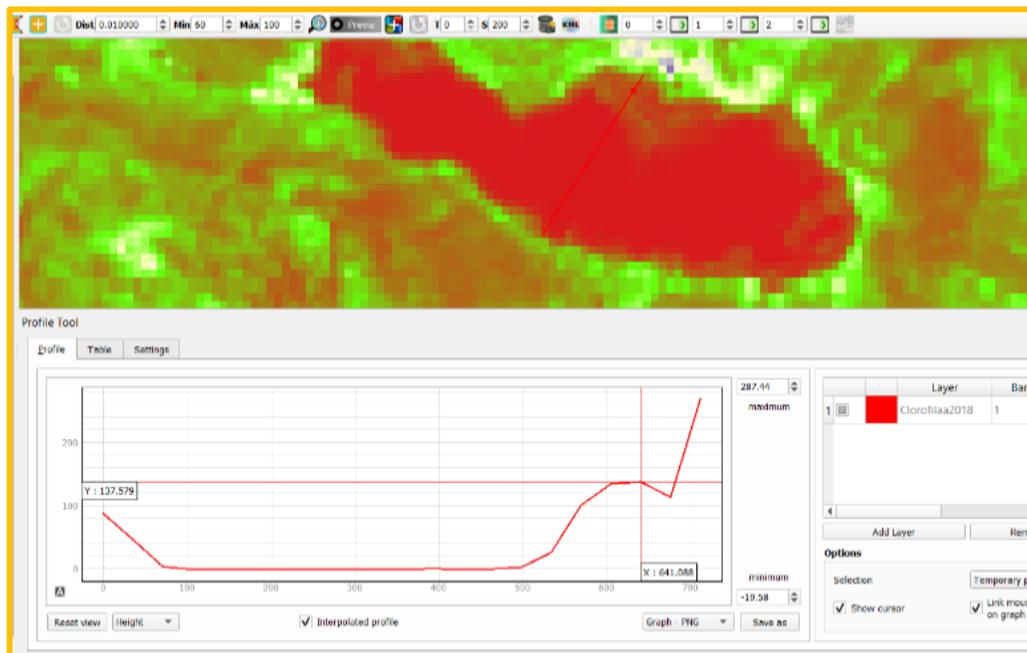


Figura 5. Firma espectral transversal de la laguna San Nicolás

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1. Materiales:

- Disco de Secchi
- Material de Laboratorio para muestrear
- Libreta de apuntes
- GPS

2.3.2. Instrumentos:

- Portales satelitales
- Softwares de procesamiento y análisis (PCI Geomatics)

2.3.3. Métodos:

- Teledetección Satelital

**NIVEL DE EUTROFIZACIÓN DE LA LAGUNA SAN NICOLÁS CAJAMARCA
APLICANDO TELEDETECCIÓN SATELITAL EN UN PERIODO DE 20 AÑOS**

METODOLOGÍA

1. Campo

- 1.1. Visita técnica de reconocimiento
- 1.2. Muestreo de agua

- Pruebas de laboratorio

Parámetros fisicoquímicos:

- Aniones
- pH
- Nitrógeno amoniacal
- Demanda Química de Oxígeno
- Oxígeno disuelto
- Turbiedad

Parámetros Biológicos

- Coliformes termotolerantes
- Clorofila a

2. Gabinete

- 2.1. Ubicación y delimitación del área de estudio.
- 2.2. Descarga de imágenes satelitales USGS.
- 2.3. Procesamiento de imágenes satelitales en PCI GEOMATICS.
- 2.4. Post procesamiento y análisis de resultados.

Correlación

- Resultados finales

2.4. Procedimiento

2.4.1. Trabajo en campo

El trabajo de campo se desarrolló con la intención de correlacionar los datos obtenidos del muestreo de la fecha realizada con los datos obtenidos del proceso en el software.

2.4.1.1. Visita técnica de reconocimiento

Las visitas fueron consecutivas, con el objetivo de “realizar un reconocimiento de la zona de estudio, la cobertura del suelo y agua, los cultivos y la población”.

Para el desarrollo de la visita se hicieron las coordinaciones respectivas con el encargado del distrito de Namora, el Sr. Joel Villar Cerquín, dueño del restaurante “El Aventurero”.

Durante el recorrido se observó que la laguna San Nicolás no tiene problemas de contaminación por residuos sólidos o descargas de efluentes, sin embargo, se puede apreciar la siembra de algunos cultivos y actividad ganadera en el Punto 3 de la laguna. En el agua también se evidenció presencia de algunas floraciones y el color cambiaba de “turbio” a “claro” en el punto 3 al 2. Asimismo, se observó la presencia significativa de matara, una planta flotante está ubicada alrededor de la laguna y que es extraída por los mismos pobladores para construir un nuevo puerto y embarcaciones, además de elaborar petates, carteras o sombreros, y así incentivar el turismo.

2.4.1.2. Muestreo de agua

- Pruebas de laboratorio:

Se optó por analizar turbiedad y clorofila a para conocer el estado trófico de la laguna, además de analizar 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 MINAM.

Tabla 7. *Parámetros fisicoquímicos*

Parámetro	Unidad
Fluoruro (F ⁻)	mg/L
Cloruro (Cl ⁻)	mg/L
Nitrito (NO ₂ ⁻)	mg/L
Bromuro (Br ⁻)	mg/L
Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L
Sulfato (SO ₄ ⁼)	mg/L
Fosfato (PO ₄ ⁼)	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

Tabla 8. *Parámetros biológicos*

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

2.4.2. Trabajo de gabinete

2.4.2.1. Ubicación y delimitación del área de estudio

Usando Google Earth se delimitó mediante un polígono el área de estudio de la Laguna San Nicolás, ubicada en el distrito de Namora, a 30 kilómetros de la ciudad de Cajamarca.



Figura 6. Ubicación y puntos de muestreo para la laguna San Nicolás

Fuente: Descarga Google Earth

Tabla 9. *Coordenadas UTM de 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

2.4.2.2. Descarga de imágenes satelitales del portal USGS.

- Se recopiló información cartográfica (imágenes satelitales) del sitio web: <https://earthexplorer.usgs.gov/> del Centro Geológico de los Estados Unidos (USGS).
- Se utilizaron imágenes Landsat 5 y Landsat 8, para los años 1998, 2008 y 2019 respectivamente.
- Se seleccionaron estas fechas porque las imágenes no presentaban muchos problemas de nubosidad, además que coincidían con las de muestreo.
- Se descargó en la opción Level – 1 GeoTIFF Data Producto. (la imagen de mayor tamaño).

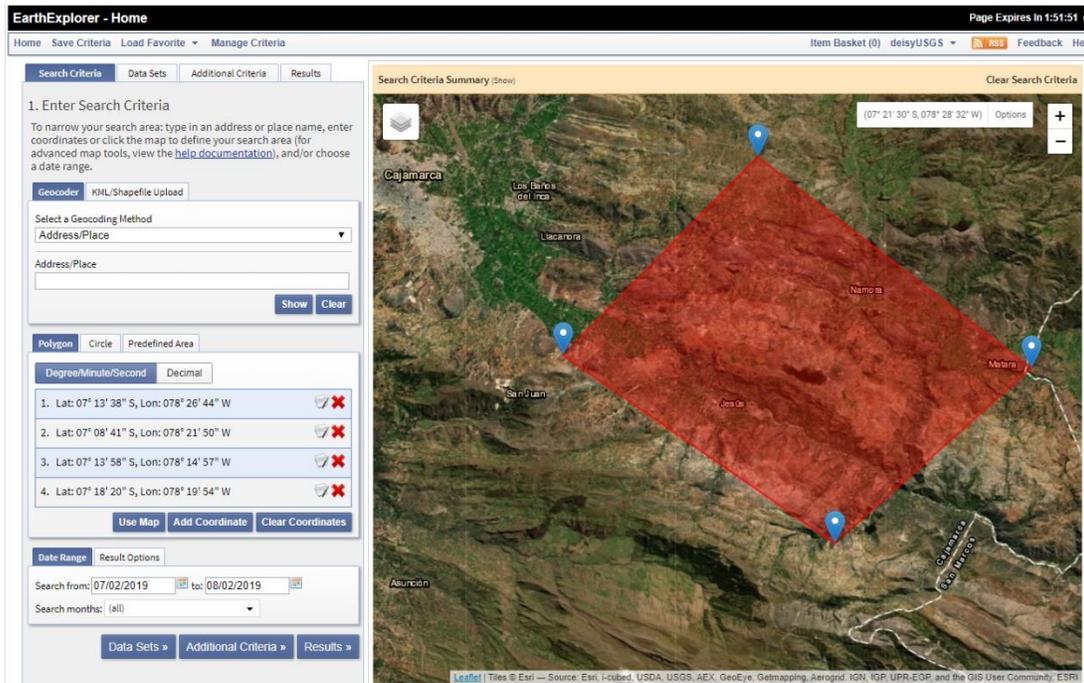


Figura 7. Captura de pantalla de la página de sitio web Earth Explorer indicando la fecha y zona de estudio.

Fuente: USGS

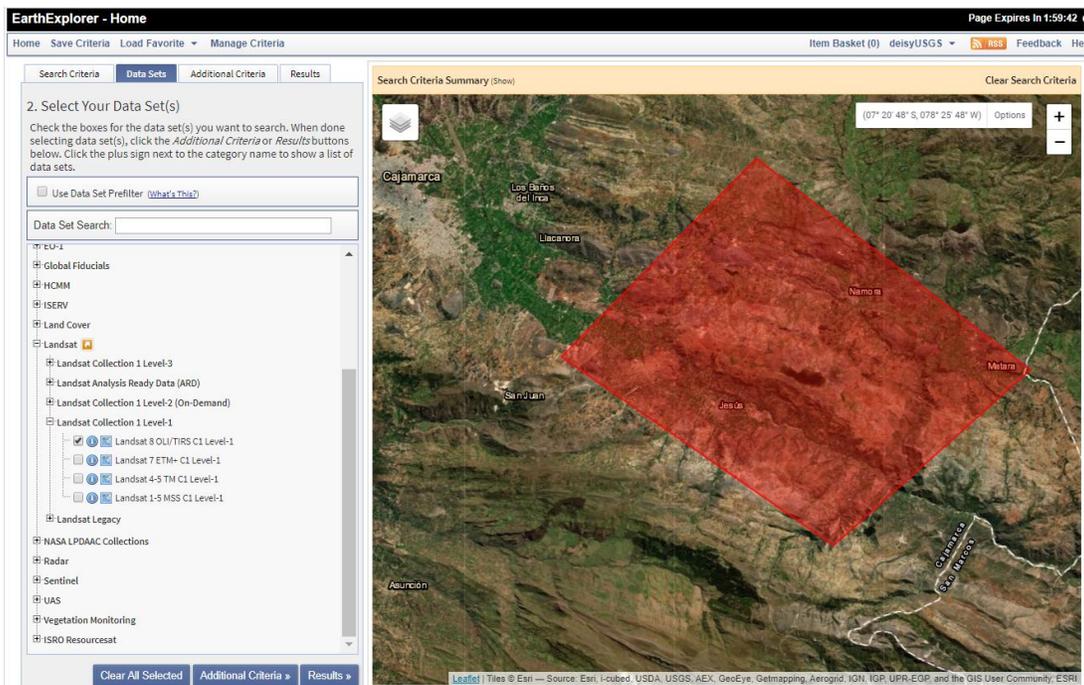


Figura 8. Captura de pantalla de la página de sitio web Earth Explorer indicando el sensor de descarga.

Fuente: USGS

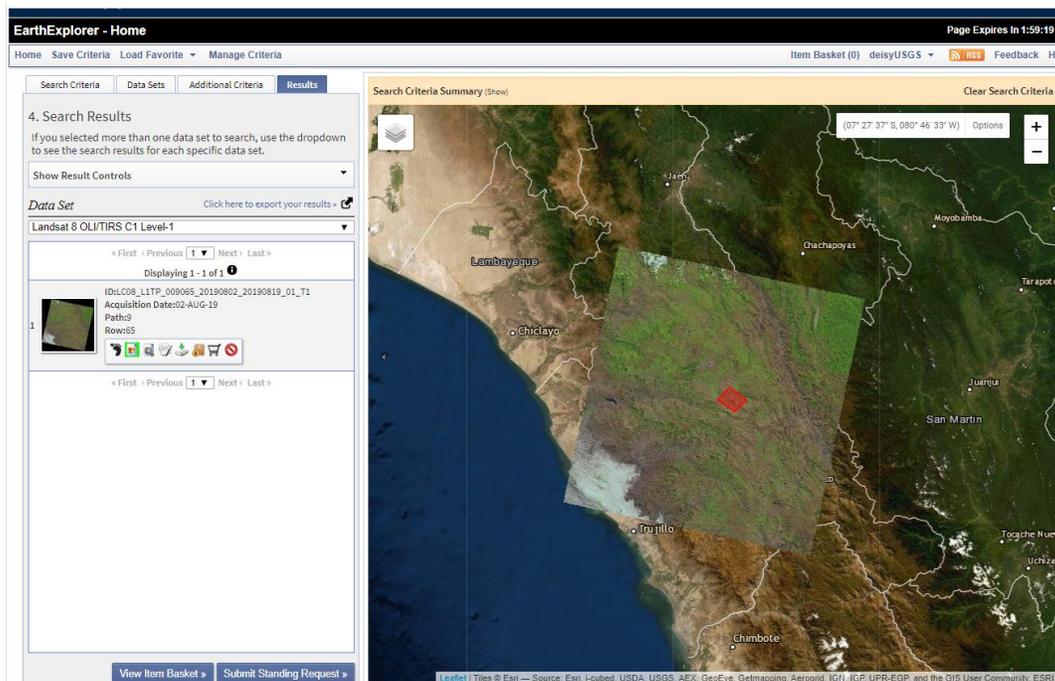


Figura 9. Captura de pantalla de la página de sitio web Earth Explorer indicando las imágenes disponibles.

Fuente: USGS

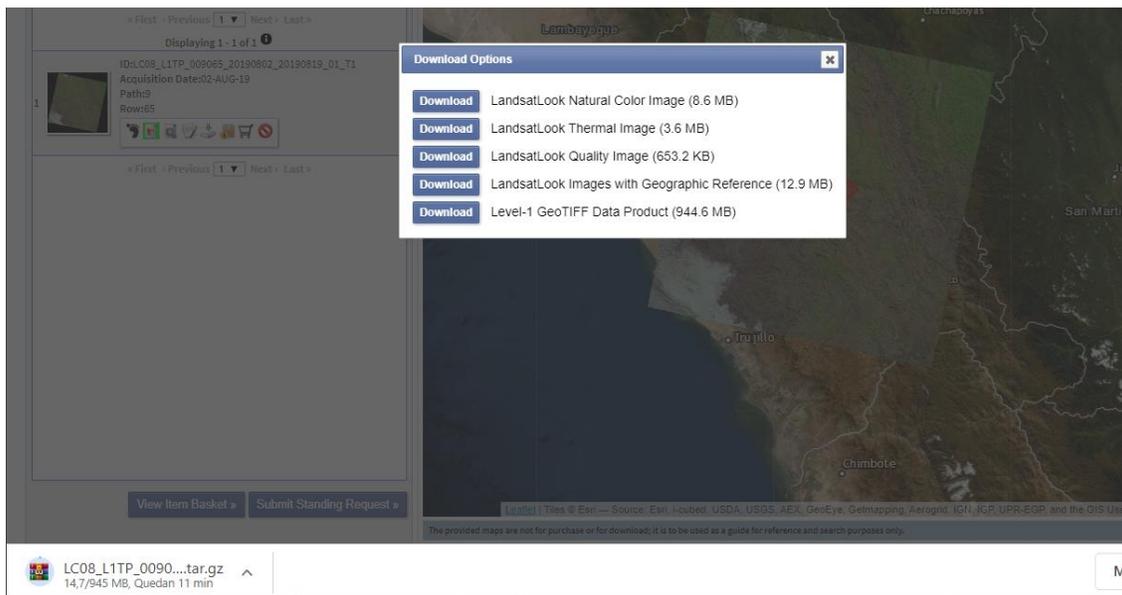


Figura 10. Captura de pantalla de la página de sitio web Earth Explorer indicando la descarga de la imagen.

Fuente: USGS

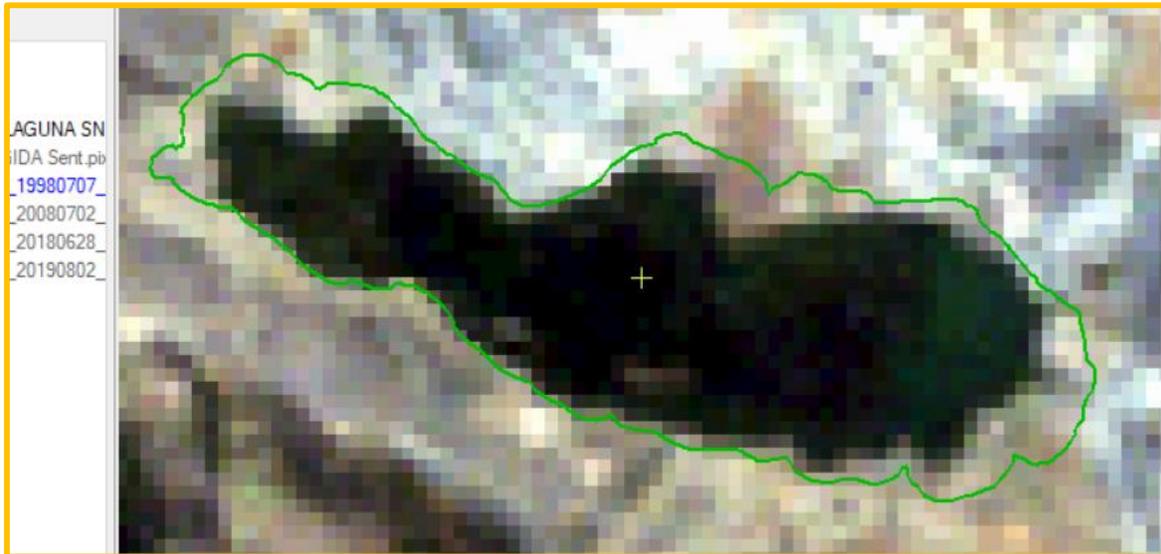


Figura 11. Imagen satelital Landsat 5 para el año 1998

Fuente: Descarga y procesamiento propio USGS



Figura 12. Imagen satelital Landsat 5 para el año 2008

Fuente: Descarga y procesamiento propio USGS

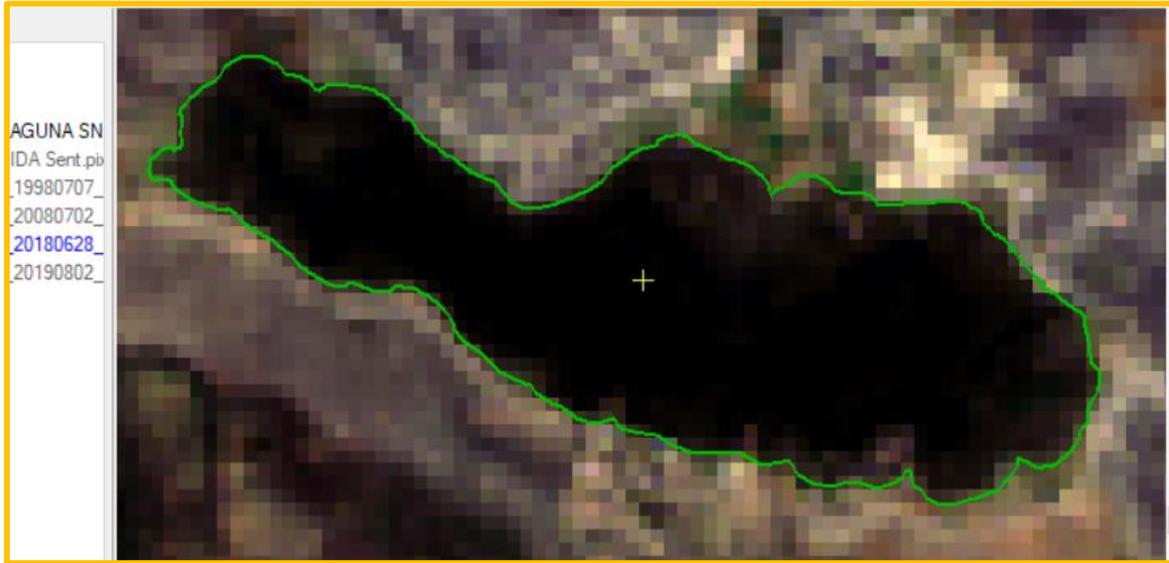


Figura 13. Imagen satelital Landsat 5 para el año 2018

Fuente: Descarga y procesamiento propio USGS

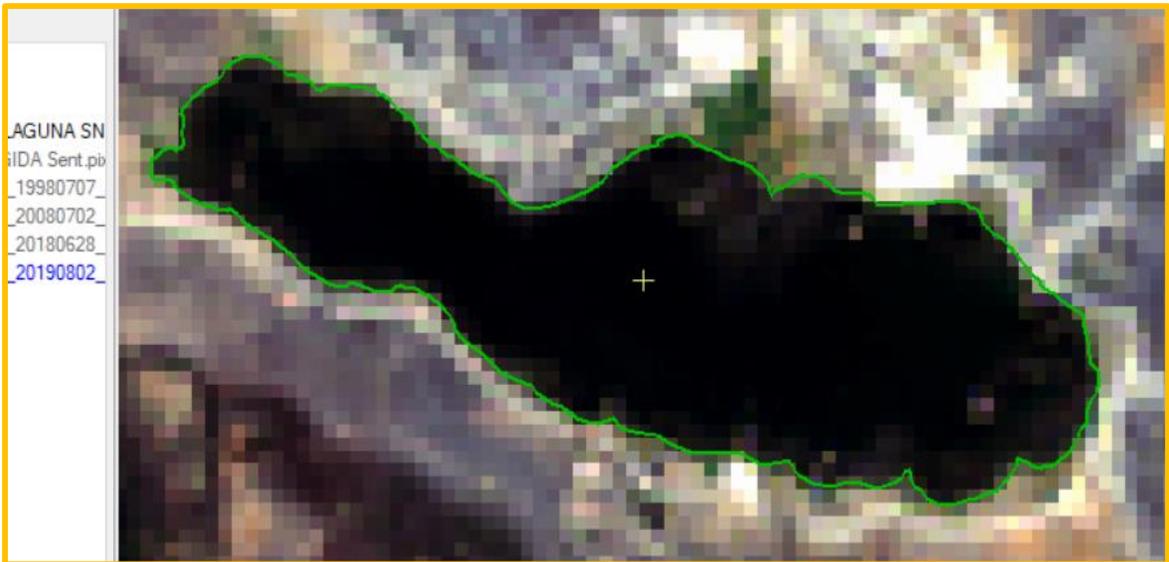


Figura 14. Imagen satelital Landsat 5 para el año 2019

Fuente: Descarga y procesamiento propio USGS



Fuente: Descarga y procesamiento propio USGS

Figura 15. Imagen satelital Sentinel 2 para el año 2019

2.4.2.3. Procesamiento de imágenes satelitales

Se utilizó el Software PCI Geomatics, empezando por realizar las diferentes composiciones de las imágenes satelitales descargadas para una mejor visualización del área de estudio. Combinando las bandas 4, 3 y 2 que son de color natural, o la 7, 6 y 4 análisis del falso color. Este proceso realiza coberturas que el ojo humano no puede discriminar a simple vista.



Figura 16. Software PCI Geomatics

- **PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES EN PCI GEOMATICS**

1. Corte del área de estudio y zonificación

- Cargar el archivo metadata de la imagen satelital y crear un polígono en “New Área” / “New Vector Layer” / “Whole Polygon” / “Use Layer Georeferencing”.
- Seleccionar el área de interés de los diferentes años para realizar las correcciones.



Figura 17. Corte de área de estudio en PCI Geomatics

2. Corrección de imágenes satelitales

Para estudiar la eutrofización de las lagunas y cartografiar la superficie afectada por la misma, se efectuaron tratamientos visuales y digitales, con mejoras espectrales, espaciales y radiométricas, que son fundamentales para una adecuada interpretación de las imágenes satelitales, ya que los contrastes en la iluminación y la geometría deben ser minimizados en estudios multi-temporales mediante el uso de valores constantes o coeficientes de corrección de factores tales como la distancia entre la tierra y el sol. (Alexakis et al., 2014).

En la antigüedad se optaba por realizar ecuaciones, sin embargo, ahora el software reconoce los números digitales (ND) y los convierte a unidades de radiancia y reflectancia percibida por el sensor del satélite. Después de la conversión a radiancia, cada imagen fue convertida a reflectancia superficial considerando la corrección atmosférica.

- Acceder al software PCI Geomatics.
- Al hacer clic en Analysis, muestra las opciones de corrección de imágenes.
- Seguidamente seleccionar Atmosphere Correction / ATCOR Ground Reflectance y cargar la imagen a corregir.
- Llenar los campos y ejecutar la corrección

PCI Geomatics no solo realiza el Atmosphere Reflectance (TOA), sino que hace una corrección más rigurosa, que es el ATCOR Ground Reflectance, a nivel del terreno procurando eliminar la mayor cantidad de vapor de agua y aerosoles

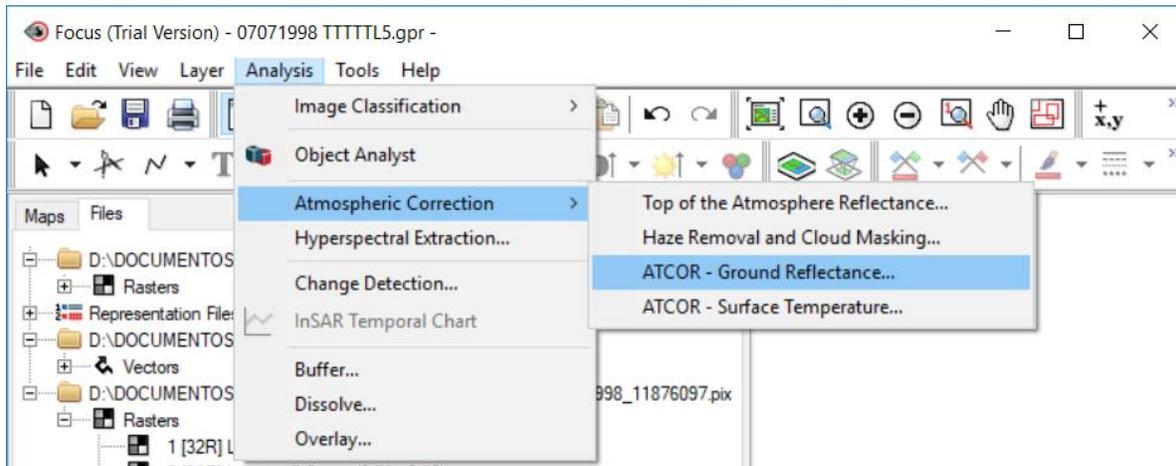


Figura 18. Corrección de imágenes satelitales en PCI Geomatics.

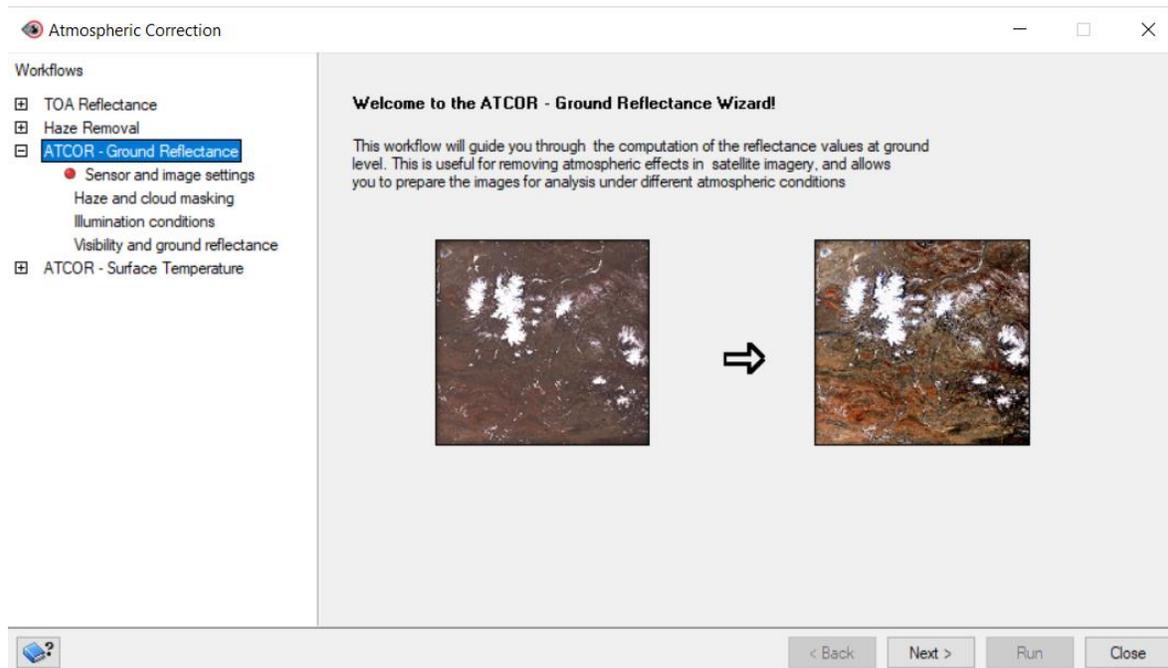


Figura 19. Corrección ATCOR

3. Cálculo de índices de vegetación y agua

Una vez corregida la imagen, se procede a calcular los índices para cada imagen, según la ecuación que le corresponda a cada año.

Los índices de vegetación son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección, cuya función 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. Se trata de imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales y el resultado de estas operaciones permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales. (GU, 2019).

3.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Este índice es un indicador numérico que utiliza las bandas espectrales rojas y de infrarrojo cercano para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas reflejan. (GU, 2019).

Presenta una escala de -1 a 1, los valores negativos están asociados a zonas de agua y nieve, continuando con los que se aproximan a cero donde empieza la ausencia de vegetación y cuanto más cercano a 1, la vegetación es más saludable. (Rouse et al., 1974)

Ecuación 2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{RED})}{(\text{NIR} + \text{RED})}$$

Ecuación 3. NDVI para Landsat 5

$$\text{NDVI}_{L5} = \frac{\text{Band}_4 - \text{Band}_3}{\text{Band}_4 + \text{Band}_3} \text{ Landsat 5 TM}$$

Ecuación 4. NDVI para Landsat 8

$$\text{NDVI}_{L8} = \frac{\text{Band}_5 - \text{Band}_4}{\text{Band}_5 + \text{Band}_4} \text{ Landsat 8 OLI}$$

3.2. Índice diferencial de agua normalizado (NDWI)

El Índice de Diferencia de Agua Normalizada (NDWI, por su inglés) es un indicador para el análisis de cuerpos de agua que utiliza las bandas espectrales de infrarrojo verde y el cercano. Este índice es muy útil en el monitoreo de la salud de los cultivos, el estrés hídrico en vegetación, el mapeo de los embarques de la tierra y el agua permitiendo medir la cantidad de agua que posee una vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. (GU, 2019).

Al igual que en el caso del índice de vegetación NDVI, los potenciales valores obtenidos a partir del NDWI, oscilan entre -1 y 1 cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o zonas terrestres y con ausencia de humedad. (Gao, 1996)

Ecuación 5. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

$$\text{NDWI} = \frac{(\text{GREEN} - \text{NIR})}{(\text{GREEN} + \text{NIR})}$$

Ecuación 6. NDWI para Landsat 5

$$\text{NDWI}_{L5} = \frac{\text{Band}_2 - \text{Band}_4}{\text{Band}_2 + \text{Band}_4} \text{ Landsat 5 TM}$$

Ecuación 7. NDWI para Landsat 8

$$\text{NDWI}_{L8} = \frac{\text{Band}_3 - \text{Band}_5}{\text{Band}_3 + \text{Band}_5} \text{ Landsat 8 OLI}$$

3.3. Índice de relación de clorofila pigmentada normalizada (NPCRI)

El contenido de clorofila del cultivo / vegetación es uno de los parámetros necesarios para determinar varios parámetros fisiológicos de las plantas, dichos parámetros pueden alterar la respuesta espectral de las plantas, lo que hace posible cuantificarlos utilizando índices espectrales. El índice de relación de clorofila de pigmento normalizado (NPCRI) es un indicador numérico que se asocia con el contenido de clorofila y puede encontrar aplicaciones en la precesión agrícola. (GU, 2019).

Usando las bandas espectrales rojo y azul, el NPCRI puede capturar la información necesaria para cuantificar la clorofila y el nitrógeno. Para calcular el NPCRI se utilizó la siguiente fórmula:

Ecuación 8. NPCRI para Landsat 5

$$\text{NPCRI}_{L5} = \frac{\text{Band}_3 - \text{Band}_1}{\text{Band}_3 + \text{Band}_1} \text{ Landsat 5 TM}$$

Ecuación 9. NPCRI para Landsat 8

$$\text{NPCRI}_{L8} = \frac{\text{Band}_4 - \text{Band}_2}{\text{Band}_4 + \text{Band}_2} \text{ Landsat 8 OLI}$$

Ecuación 10. NPCRI para sentinel 2

$$\text{NPCRI}_{S2} = \frac{\text{Band}_4 - \text{Band}_2}{\text{Band}_4 + \text{Band}_2} \text{ Sentinel 2 MSI}$$

3.4. Índice de absorción de clorofila modificada en la reflectancia (MCARI)

El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas y con frecuencia es el principal nutriente limitante en la mayoría de los suelos agrícolas, pero en exceso de las necesidades nutricionales de un cultivo puede pasar a las aguas superficiales y subterráneas y contribuir a la eutrofización de lagos y arroyos (Daughtry et al., 2000)

Los valores de MCARI no se ven afectados por las condiciones de iluminación la reflectancia del fondo del suelo y otros materiales no fotosintéticos observados.

Ecuación 11. Índice de absorción de clorofila modificada en la reflectancia (MCARI)s

$$\text{MCARI}s = ((\rho_{850} - \rho_{710}) - 0.2 \times (\rho_{850} - \rho_{570})) / \rho_{710}$$

Ecuación 12. MCARI para Landsat 5

$$MCARIsL5 = ((B4 NIR - B3 RED) - 0.2 \times (B4 NIR - B2 VERDE)) / B3RED$$

Ecuación 13. MCARI para Landsat 8

$$MCARIsL8 = ((B5 NIR - B4 RED) - 0.2 \times (B5 NIR - B3 VERDE)) / B4RED$$

- **MCARIE** Modified chlorophyll absorption in reflectance index (MCARIE),

Ecuación 14. Índice de absorción de clorofila modificada en la reflectancia (MCARIE)

$$MCARIE = ((R700 - R670) - 0.2 \times (R700 - R550)) R700 / R670$$

Ecuación 15. MCARIE para Landsat 5

$$MCARIEsL5 = ((B4 NIR - B3 RED) - 0.2 \times (B4 NIR - B2 VERDE)) * B4 NIR / B3RED$$

Ecuación 16. MCARIE para Landsat 8

$$MCARIEsL8 = ((B5 NIR - B4 RED) - 0.2 \times (B5 NIR - B3 VERDE)) * B5NIR / B4RED$$

3.5. Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)

Es un índice que nos muestra el rango de verdor de las hojas de la planta o actividad fotosintética. Es uno de los índices más utilizado en la vegetación para determinar la captación de agua y nitrógeno en la capa de ramas y hojas de un cultivo. Se ha comprobado que el GNDVI resulta más efectivo que el NDVI para identificar diferentes tasas de concentración de clorofila, ya que está altamente correlacionada con el nitrógeno en las plantas. (Gitelson et al. 1996)

El índice nos muestra valores que oscilan entre -1 y 1, los de -1 y 0 están asociados a la presencia de agua o suelo desnudo, resultado de utilizar la banda infrarrojo cercano (NIR) y la banda verde (GREEN) del espectro electromagnético.

Ecuación 17. Vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)

$$\text{GNDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{GREEN})}{(\text{NIR} + \text{GREEN})}$$

Ecuación 18. GNDVI para Landsat 5

$$\text{NPCRI}_{L5} = \frac{\text{Band}_4 - \text{Band}_2}{\text{Band}_4 + \text{Band}_2} \text{ Landsat 5 TM}$$

Ecuación 19. GNDVI para Landsat 8

$$\text{GNDVI}_{L8} = \frac{\text{Band}_5 - \text{Band}_3}{\text{Band}_5 + \text{Band}_3} \text{ Landsat 8 OLI}$$

3.6. Ratio vegetation index (RVI)

Pearson & Miller (1972), quienes proponen este índice, Ratio Vegetation Index, siendo el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, explotan las diferencias espectrales que ofrecen las bandas situadas en el infrarrojo cercano y el rojo para visualizar la cobertura vegetal y las masas de agua.

Ecuación 20. Ratio vegetation index (RVI)

$$\text{RVI} = \frac{\text{NIR}}{\text{RED}}$$

Ecuación 21. RVI para Landsat 5

$$RVI_{L5} = \frac{Band_4}{Band_3}$$

Ecuación 22. RVI para Landsat 8

$$RVI_{L8} = \frac{Band_5}{Band_4}$$

3.7. Green vegetation index (GVI) O GRVI

Sripada (2005) propone el índice de Índice de vegetación verde, es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del verde:

Los productos del Índice Global de Vegetación (GVI) polar de tercera generación se utilizan para controlar la densidad y el vigor de la vegetación verde. Las aplicaciones útiles de los productos GVI incluyen la clasificación de la cobertura del suelo, la estimación de la superficie de cultivo y la detección del estrés de las plantas. (NOAA, 2019)

Ecuación 23. Green vegetation index (GVI)

$$GVI = \frac{NIR}{GREEN}$$

Ecuación 24. GVI para Landsat 5

$$RVI_{L5} = \frac{Band_4}{Band_2}$$

Ecuación 25. GVI para Landsat 8

$$RVI_{L8} = \frac{Band_5}{Band_3}$$

3.8. Índice de diferencia normalizada verde-rojo (NGRDI)

El índice de diferencia normalizada verde - rojo es también llamado VIgreen. (Gitelson et al.,2002)

El NGRDI reflectancia de la zona verde y roja del espectro electromagnético y es empleado para el monitoreo fenológico de un cultivo que permita determinar la biomasa aérea y el estado de nutrientes para el manejo de malezas de una zona de estudio. (Gidahatari, 2018)

Ecuación 26. Índice de diferencia normalizada verde-rojo (NGRDI)

$$NGRDI = \frac{(GREEN - RED)}{(GREEN + RED)}$$

Ecuación 27. NGRDI para Landsat 5

$$NGRDI_{L5} = \frac{Band_2 - Band_3}{Band_2 + Band_3}$$

Ecuación 28. NGRDI para Landsat 8

$$NGRDI_{L8} = \frac{Band_3 - Band_4}{Band_3 + Band_4}$$

3.9. Green coverage index (GCI)

El índice de clorofila (**GCI**) ayuda a evaluar el estado sanitario de la vegetación y realzar, únicamente, aquellos elementos formados por estructura vegetal y a diferencia del índice de vegetación (NDVI), el GCI se centra únicamente en las masas vegetales para calcular el contenido total de clorofila a través de las bandas del verde visible y el infrarrojo (o red edge para mayor sensibilidad). Estas particulares bandas son sensibles a variaciones de contenido de clorofila en vegetación y estudian la reflectancia de las masas vegetales en función de su contenido para aplicaciones basadas en agricultura de precisión. (Gis & Beers, 2016)

Frente al índice NDVI, destinado a analizar entornos territoriales con presencia o ausencia de vegetación en crecimiento, el índice GCI puede precisarte el estado sanitario de la vegetación. (Gis & Beers, 2016)

Ecuación 29. Green coverage Index (GCI)

$$GCI = \left(\frac{NIR}{Green} \right) - 1$$

Ecuación 30. GCI para Landsat 5

$$GCI_{L5} = \left(\frac{B4}{B2} \right) - 1$$

Ecuación 31. GCI para Landsat 8

$$GCI_{L8} = \left(\frac{B5}{B3} \right) - 1$$

4. Ecuaciones - cálculo de parámetros de calidad de agua y eutrofización

Se utilizaron los siguientes parámetros de calidad de agua extraídos de la investigación desarrollada por Figueroa et al, (2015).

4.1. Demanda bioquímica de oxígeno

Ecuación 32. Demanda bioquímica de oxígeno para Landsat 5

$$DBO L5 = 1.79 - 0.789 * (B1) + 52.36 * (B2) - 3.28 * (B3)$$

Dónde:

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

B1: Banda color azul

B2: Banda color verde

B3: Banda color rojo

Nota:

La ecuación aplica para las imágenes Landsat 5, es decir, las de 1998 y 2008 respectivamente. Sin embargo, para las imágenes Landsat 8, del 2019 se debe adecuar la ecuación según el color de las bandas.

Ecuación 33. Demanda bioquímica de oxígeno para Landsat 8

$$DBO L8 = 1.79 - 0.789 * (B2) + 52.36 * (B3) - 3.28 * (B4)$$

Dónde:

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

B2: Banda de color azul

B3: Banda de color verde

B4: Banda de color rojo

4.2. Demanda química de oxígeno

Ecuación 34. Demanda química de oxígeno para Landsat 5

$$DQO L5 = 2.76 - 17.27 * (B1) + 72.15 * (B2) - 12.11 * (B3)$$

Dónde:

DQO: Demanda Química de Oxígeno

B1: Banda color azul

B2: Banda color verde

B3: Banda color rojo

Ecuación 35. Demanda química de oxígeno para Landsat 8

$$DQO L8 = 2.76 - 17.27 * (B2) + 72.15 * (B3) - 12.11 * (B4)$$

Dónde:

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

B2: Banda de color azul

B3: Banda de color verde

B4: Banda de color rojo

4.3. Índice del estado trófico de clorofila

Ecuación 36. Índice del estado trófico de clorofila (IET Chl_a) para Landsat 5

$$IET\ Chl - a\ L5 = 43.46 + 142.2 * (B3) + 104.54 * \left(\frac{B5}{B3}\right) - 418.55 * (B5)$$

Dónde:

IET_{Chl-a}: Índice de Estado Trófico de Clorofila

B3: Banda de color rojo

B5: Banda del infrarrojo medio. **(1.55 - 1.75)**

Ecuación 37. Índice del estado trófico de clorofila (IET Chl_a) para Landsat 8

$$IET\ Chl - a\ L8 = 43.46 + 142.2 * (B4) + 104.54 * \left(\frac{B6}{B4}\right) - 418.55 * (B6)$$

Dónde:

IET_{Chl-a}: índice de Estado Trófico de Clorofila

B4: Banda de color rojo

B6: Banda del infrarrojo medio (**SWIR 1**) **(1.57 – 1.65)**

4.4. Concentración de clorofila

Ecuación 38. Concentración de clorofila a para Landsat 5

$$Chl - a\ L5 = -1.69996 + 990.717 * (B1 * B1) - 4655.07 * (B1 * B4) + 6363.27 * (B4 * B4)$$

Dónde:

Chl-a: Concentración de Clorofila

B1: Banda color azul

B4: Banda del infrarrojo cercano

Ecuación 39. Concentración de clorofila a para Landsat 8

$$\text{Chl} - a \text{ L8} = -1.69996 + 990.717 * (B2 * B2) - 4655.07 \\ * (B2 * B5) + 6363.27 * (B5 * B5)$$

Dónde:

Chl-a: Concentración de Clorofila

B2: Banda color azul

B5: Banda del infrarrojo cercano

El estudio realizado por Ledesma, et al (2012). Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B nos muestra otra opción para determinar los valores de Cl-a, relacionando las características espectrales de dicho parámetro y una combinación de las bandas 2 (b2) (0,52-0,59 μm) y 3 (b3) (0,63-0,69 μm) del satélite CBERS2B, generando la siguiente ecuación:

Ecuación 40. Concentración de clorofila a - CBERS2B

$$\text{Cl} - a = 32.71 * b2 + 0,45 * b3 - 45.02$$

Ecuación 41. Concentración de clorofila a para Landsat 5

$$Cl - a L5 = 32.71 * B2 + 0.45 * B3 - 45.02$$

Dónde:

Cl-a: Concentración de clorofila

B2: Banda color verde

B3: Banda de color roja

Ecuación 42. Concentración de clorofila a para Landsat 8

$$Cl - a L8 = 32.71 * B3 + 0.45 * B4 - 45.02$$

Dónde:

Cl-a: Concentración de clorofila

B3: Banda color verde

B4: Banda de color roja

Ecuación 43. Parámetro zona fótica - CBERS2B

$$z - fot = 0.01 * B1 - 1.02 * B4 + 40.96$$

4.5. Turbiedad

Ecuación 44. Turbiedad para Landsat 5

$$T L5 = 6.1437 * (B2) - 2.702 * (B3) + 5.1736 * (B4) - 5.8274 \\ * (B5)$$

Dónde:

T: Turbiedad del agua

B2: Banda color verde

B3: Banda color rojo

B4: Banda del infrarrojo cercano

B5: Banda del infrarrojo medio

Ecuación 45. Turbiedad para Landsat 8

$$T_{L8} = 6.1437 * (B3) - 2.702 * (B4) + 5.1736 * (B5) - 5.8274 * (B6)$$

Dónde:

T: Turbiedad del agua

B3: Banda color verde

B4: Banda color rojo

B5: Banda del infrarrojo cercano

B6: Banda del infrarrojo medio (SWIR 1)

4.6. Índice del estado trófico

Ecuación 46. Índice del estado trófico para Landsat 5

$$IET_{L5} = -2.6047 * (B2) + 0.5671 * (B3) + 2.9817 * (B4)$$

Dónde:

IET: Índice de estado trófico

B2: Banda color verde

B3: Banda color rojo

B4: Banda del infrarrojo cercano

Ecuación 47. Índice del estado trófico para Landsat 8

$$IET_{L8} = -2.6047 * (B3) + 0.5671 * (B4) + 2.9817 * (B5)$$

Dónde:

IET: Índice de estado trófico

B3: Banda color verde

B4: Banda color rojo

B5: Banda del infrarrojo cercano

5. Procedimiento para el cálculo de ecuaciones e índices en PCI Geomatics.

1. Abrir el software PCI y cargar las imágenes satelitales de cada año.
2. Con la herramienta Calculadora Ráster se trabajará todas las operaciones y algoritmos.
3. Clic en *Tools > Raster Calculator > (Insertar ecuación)*
4. Guardar la ecuación y el nombre del archivo dando clic en Save
5. Ejecutar el Raster Calculator haciendo clic en “Run”.
6. Para la visualización del resultado, hacer anti clic y seleccionar “Pseudocolor”.
7. Categorizar los resultados mediante rangos de acuerdo a los años estudiados.

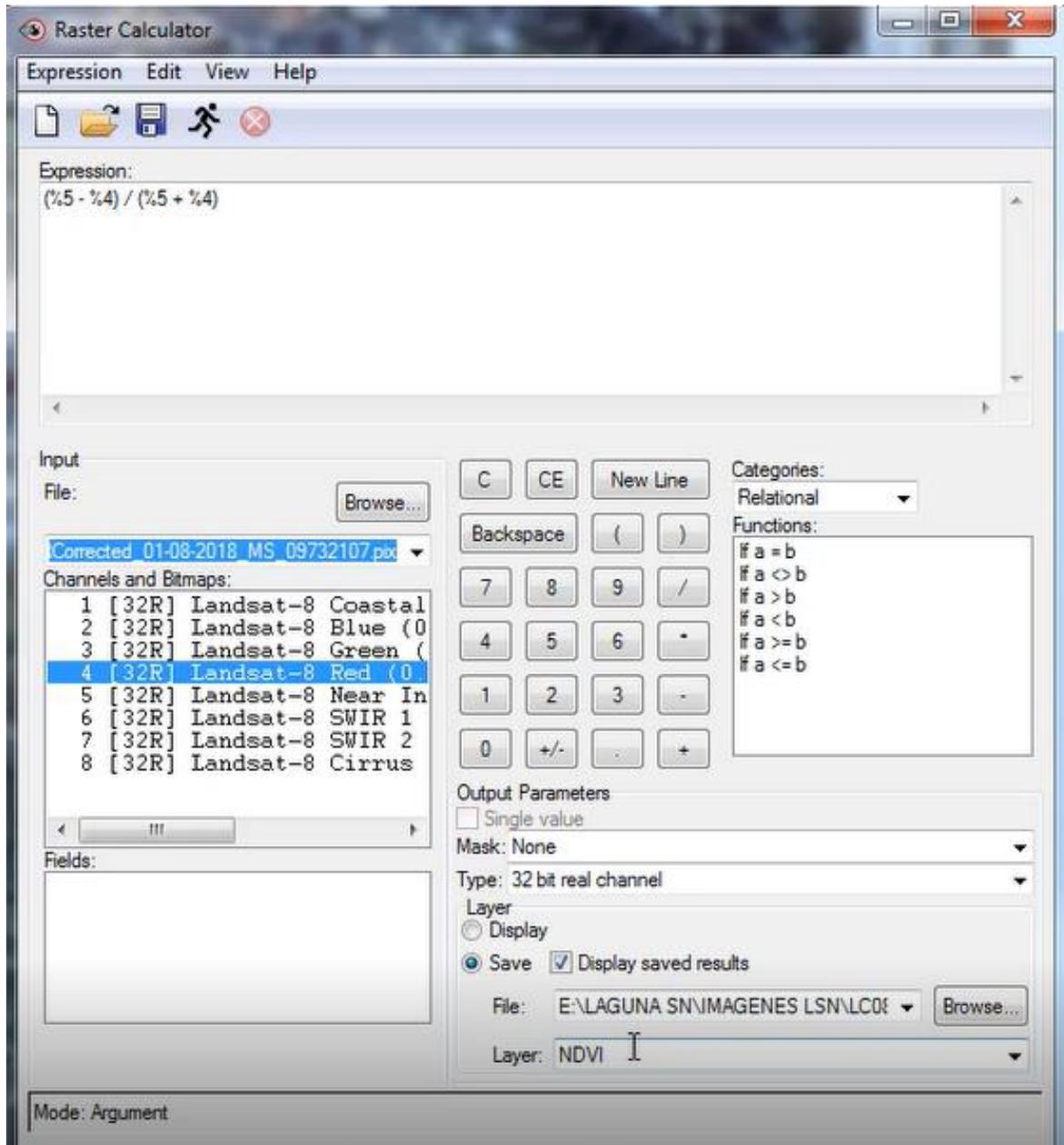


Figura 20. Calculadora ráster de ecuaciones en PCI Geomatics

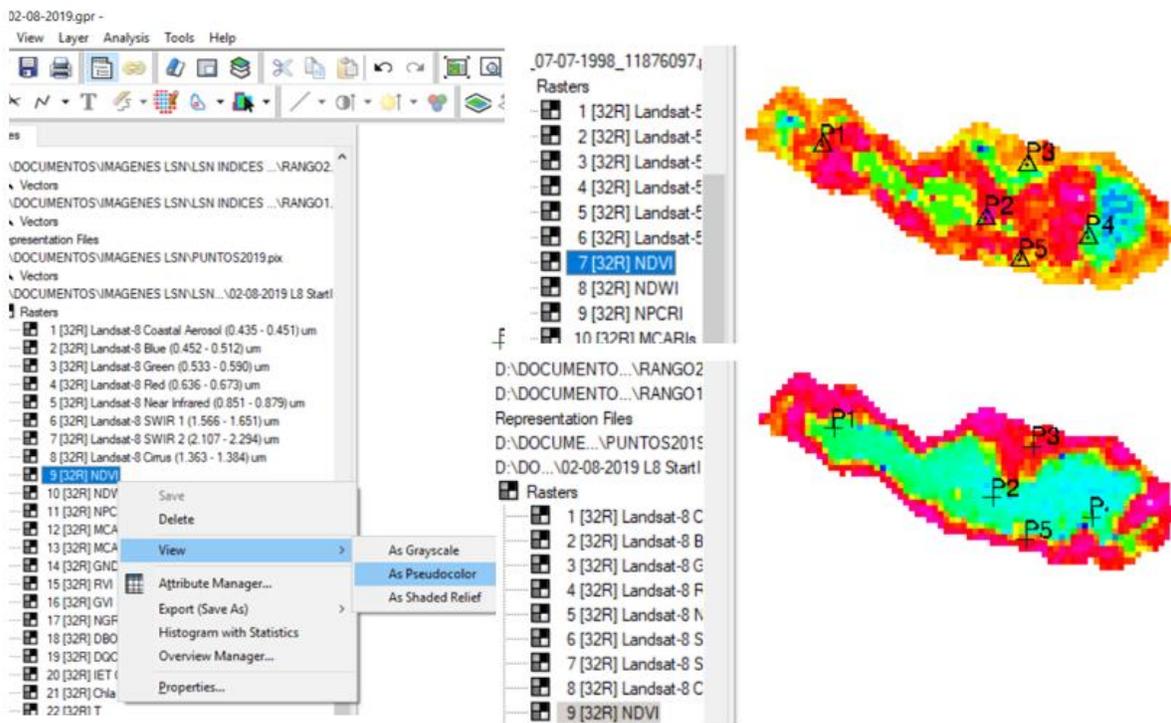


Figura 21. Visualización de índices y ecuaciones en PCI Geomatics.

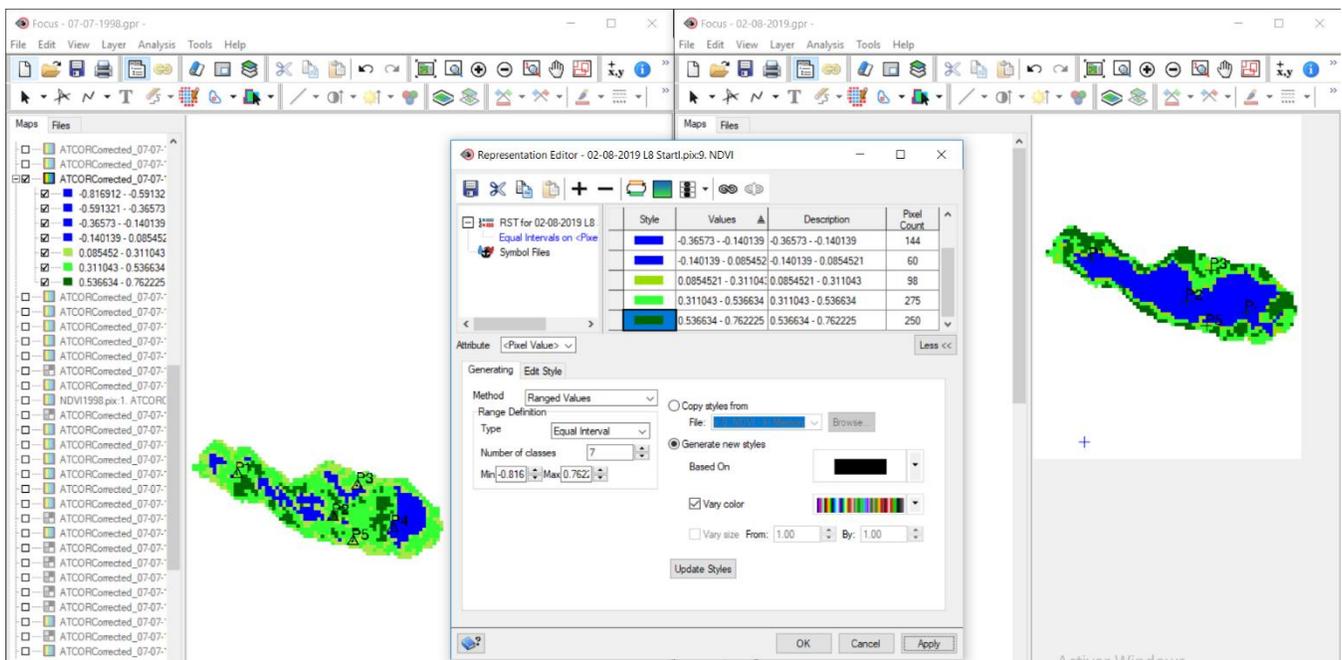


Figura 22. Rangos de índices en PCI Geomatics.

6. Procedimiento para el cálculo de turbiedad con el disco de Secchi.

- Sumergir el disco de Secchi dentro del agua hasta que ya no sea visible.
- Anotar la profundidad en cada punto de muestreo
- Se recomienda medir 2 veces y calcular el promedio.

7. Exportar Resultados

Una vez obtenidos los valores de los diferentes índices y ecuaciones de eutrofización para los años 1998 y 2008 se procedió a evaluar el 2019 para realizar una calibración con los resultados de laboratorio.

Asimismo, se realizó 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 se muestran en los resultados.

La edición final de los mapas se ha desarrollado luego de haber calculado todos los índices y las ecuaciones de los parámetros de calidad de agua, así determinar qué índice es el adecuado para la distribución del nivel trófico de la laguna San Nicolás.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Tabla 10. *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	0.407537	-0.405183	-0.0813265	0.0440264	-0.26569	0.437321
P2	0.704988	-0.669324	-0.0813265	0.159655	-0.46602	0.628096
P3	0.25051	-0.429865	0.484541	-0.629595	0.443885	-0.50963
P4	-0.128806	0.463178	0.0286434	0.0440264	-0.378653	0.568095
P5	0.356134	-0.288088	0.480394	-0.321942	0.25746	-0.255761

Los valores obtenidos del NDVI contrarios al NDWI (-1 a 1) describen el contenido de agua en la planta, los valores negativos están asociados a zonas de agua, los positivos a presencia de vegetación y cuanto más cercano a 1, ésta es más saludable. De la tabla se aprecia que en su mayoría los puntos de muestreo para 1998 corresponden a presencia de vegetación, excepto el punto 4, que es cobertura de agua. (Ver anexo8 y 9). Morillo, et al., (2018) encontró 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 11. *Matriz de correlación para el NDVI en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	-0.1873255	1	
2019	-0.11233638	0.95847378	1

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 1998 y 2008 siendo ($r = -0.1873255$) y para 1998 al 2019 una correlación negativa casi nula, siendo ($r = -0.11233638$). Sin embargo, existe una correlación positiva muy alta para los años 2008 y 2019 ($r = 0.95847378$).

Tabla 12. *Matriz de correlación para el NDWI en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	0.12743203	1	
2019	0.21107045	0.98140164	1

Existe una correlación positiva muy baja para 1998 y 2008 siendo ($r = 0.12743203$), similar para los años de 1998 y 2019 con ($r = 0.21107045$). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi perfecta con ($r = 0.98140164$).

Tabla 13. *Resultados del índice de relación del pigmento de clorofila normalizada (NPCRI).*

NPCRI	AÑO		
	1998	2008	2019
P1	0.383042	0.612923	0.108282
P2	0.51909	0.988652	0.149019
P3	0.47317	0.496292	0.346578
P4	0.0258489	0.379386	0.106812
P5	0.451954	0.741633	0.336293

El índice de relación del pigmento de clorofila normalizada muestra una escala de -1 a 1, los valores de 0.3 en adelante indican la presencia de clorofila en el cultivo. Como se muestra en la tabla en la actualidad solo el punto 4 y el punto 5 están en el límite de cuantificación de clorofila, mientras que en 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.

Tabla 14. *Matriz de correlación para el NPCRI en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	0.72078535	1	
2019	0.5113861	0.01401355	1

Existe una correlación positiva alta para 1998 y 2008 siendo ($r = 0.72078535$), sin embargo, para los años de 1998 y 2019 la correlación es moderada con ($r = 0.5113861$). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi nula con (0.01401355).

Tabla 15. Resultados del índice de absorción de clorofila modificada en la reflectancia (MCARIs) y (MCARIE).

MCARIs	AÑO					
	1998		2008		2019	
	MCARIs	MCARIE	MCARIs	MCARIE	MCARIs	MCARIE
P1	1.10172	6.45686	-0.134769	-0.200643	-0.239469	-0.152479
P2	3.85247	30.9616	-0.0858559	-0.127821	-0.389703	-0.136157
P3	0.46784	8.64672	1.43496	12.9702	1.24578	9.31764
P4	0.0381459	0.0409399	0.0784841	0.116846	-0.312186	-0.144286
P5	0.917809	3.38174	1.57153	6.29466	0.555496	2.08119

El índice de absorción de clorofila modificada en la reflectancia (MCARIs) estimó la biomasa con presencia de nitrógeno con valores positivos >0.18 , los valores negativos indican presencia de agua sin vegetación. Los resultados para el 2019 muestran un solo valor positivo, siendo el punto 3, el único con presencia de nitrógeno en bajas cantidades, a diferencia de 1998 este índice es muy útil como indicador de eutrofización. El MCARIE con valores a partir de 3 estima la biomasa con presencia de nitrógeno, menores a este número son superficies con agua sin vegetación.

Tabla 16. *Matriz de correlación para el MCARIs en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	-0.39373089	1	
2019	-0.4182544	0.90986207	1

Existe una correlación negativa baja para 1998 y 2008 siendo ($r = -0.39373089$), sin embargo, para los años de 1998 y 2019 la correlación es moderada con ($r = -0.4182544$). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi perfecta con ($r = 0.90986207$).

Tabla 17. *Matriz de correlación para el MCARle en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	-0.21253573	1	
2019	-0.13056036	0.96711568	1

Existe una correlación negativa baja para 1998 y 2008 siendo ($r = -0.21253573$), sin embargo, para los años de 1998 y 2019 la correlación es casi nula con ($r = -0.13056036$). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi perfecta con ($r = 0.96711568$).

Tabla 18. *Resultados del GNDVI, RVI y GVI.*

Puntos	AÑO								
	1998			2008			2019		
	GNDVI	RVI	GVI	GNDVI	RVI	GVI	GNDVI	RVI	GVI
P1	0.405183	2.37574	2.36238	-0.04402364	0.84958	0.91566	-0.437321	0.580166	0.391478
P2	0.669324	5.77937	5.04822	-0.159655	0.84958	0.72465	-0.628096	0.364238	0.228429
P3	0.429865	1.66848	2.50794	0.629595	2.88004	4.3995	0.50963	2.59638	3.07855
P4	-0.463178	0.771783	0.366887	-0.0440264	1.05898	0.91566	-0.568095	0.450692	0.275433
P5	0.288088	2.10624	1.80934	0.321942	2.84907	1.9496	0.255761	1.69346	1.68731

El índice de vegetación de diferencia normalizada (GNDVI) verde identificó las concentraciones de clorofila en las plantas con valores positivos, el rango de -1 y 0 están asociados a la presencia de agua, tal como se observa en la tabla para el 2019, la mayoría de los puntos indican zonas con agua, mientras que, en 1998, solo se realiza la vegetación, mientras más cercanos a 1 vegetación más saludable.

Por otro lado, el ratio vegetation index (RVI) muestra valores -1 a 1 para indicar presencia de agua, tal es el punto 4 para 1998, los más positivos a partir de 1 ayudan a visualizar solo cobertura vegetal. EL green vegetation index (GVI) O GRVI enaftiza la vegetación verde con valores positivos, los <1, superficies con agua.

Tabla 19. *Matriz de correlación para el GNDVI en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	0.12743287	1	
2019	0.21107045	0.98140174	1

Existe una correlación positiva casi nula para 1998 y 2008 siendo ($r = 0.12743287$), para los años de 1998 y 2019 tiene una correlación moderada con ($r = 0.21107045$). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi perfecta con ($r = 0.98140174$).

Tabla 20. *Matriz de correlación para el RVI en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	-0.36837322	1	
2019	-0.36325495	0.94138881	1

Existe una correlación negativa moderada para 1998 y 2008 siendo ($r = -0.36837322$), similar para los años de 1998 y 2019 con ($r = -0.36325495$). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi perfecta con ($r = 0.94138881$).

Tabla 21. *Matriz de correlación para el GVI en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	-0.07867468	1	
2019	-0.08780681	0.98118652	1

Existe una correlación negativa casi nula para los años 1998 – 2008, 1998 – 2019 siendo ($r = -0.07867468$, $r = -0.08780681$, respectivamente). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi perfecta con ($r = 0.98118652$).

Tabla 22. *Resultados del NGRDI y el GCI.*

Puntos	1998		2008		2019	
	NGRDI	GCI	NGRDI	GCI	NGRDI	GCI
P1	0.002820	1.36238	-0.037434	-1.13713	0.194195	-0.60852
P2	0.067527	4.04822	0.0793593	-1.5657	0.229148	-0.77157
P3	-0.201	1.50794	-0.20873	5.98425	-0.084965	2.07855
P4	0.355586	-0.63311	0.072578	-1.13713	0.241362	-0.72456
P5	0.075826	0.809335	0.187442	0.950946	0.00181945	0.6873

El índice de diferencia normalizada verde – rojo (NGRDI) contrario a otros índices, >0.05 es presencia de agua. 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), vegetación saludable (2.9 a 9.8). De la tabla se puede apreciar que hace dos décadas en

la mayoría de puntos de muestreo se encontraba estructura vegetal, especialmente el punto 2, que es el centro de la laguna, siendo para el 2019 cobertura de agua. (Ver figura 23 y 24).

Tabla 23. Matriz de correlación para el NGRDI en el periodo 1998 - 2019.

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	0.68242885	1	
2019	0.71043146	0.4008008	1

Existe una correlación positiva moderada para 1998 y 2008 siendo ($r = 0.68242885$), en cambio, para los años de 1998 y 2019 la correlación es alta con ($r = 0.71043146$). Para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva moderada con ($r = 0.4008008$).

Tabla 24. Matriz de correlación para el GCI en el periodo 1998 - 2019.

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	-0.08248596	1	
2019	-0.08780647	0.98065284	1

Existe una correlación negativa muy baja para 1998 y 2008 siendo ($r = -0.08248596$), similar para los años de 1998 y 2019 con ($r = -0.08780647$). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva casi perfecta con ($r = 0.98065284$).

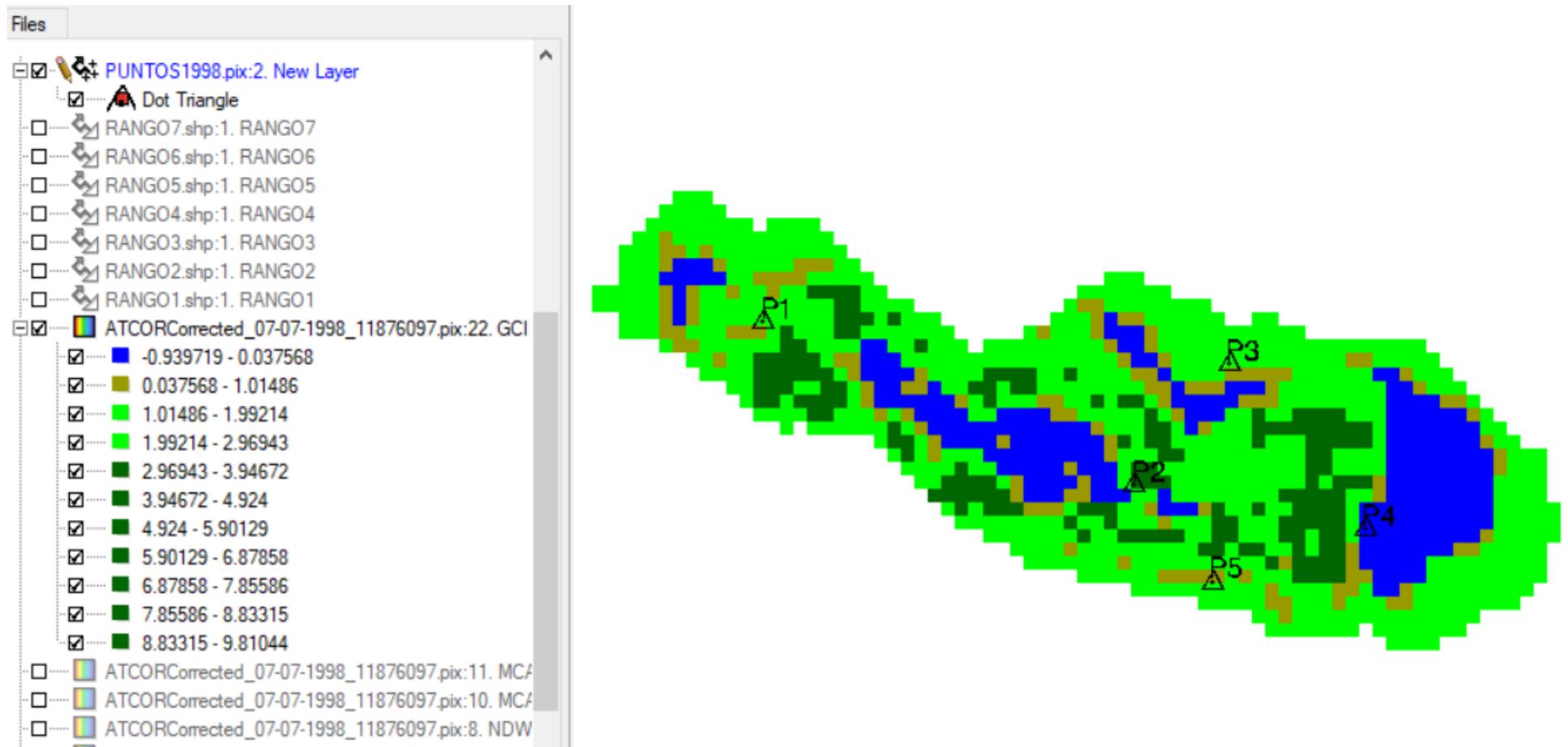


Figura 23. Resultados de índices (GCI) para el 07-07-1998

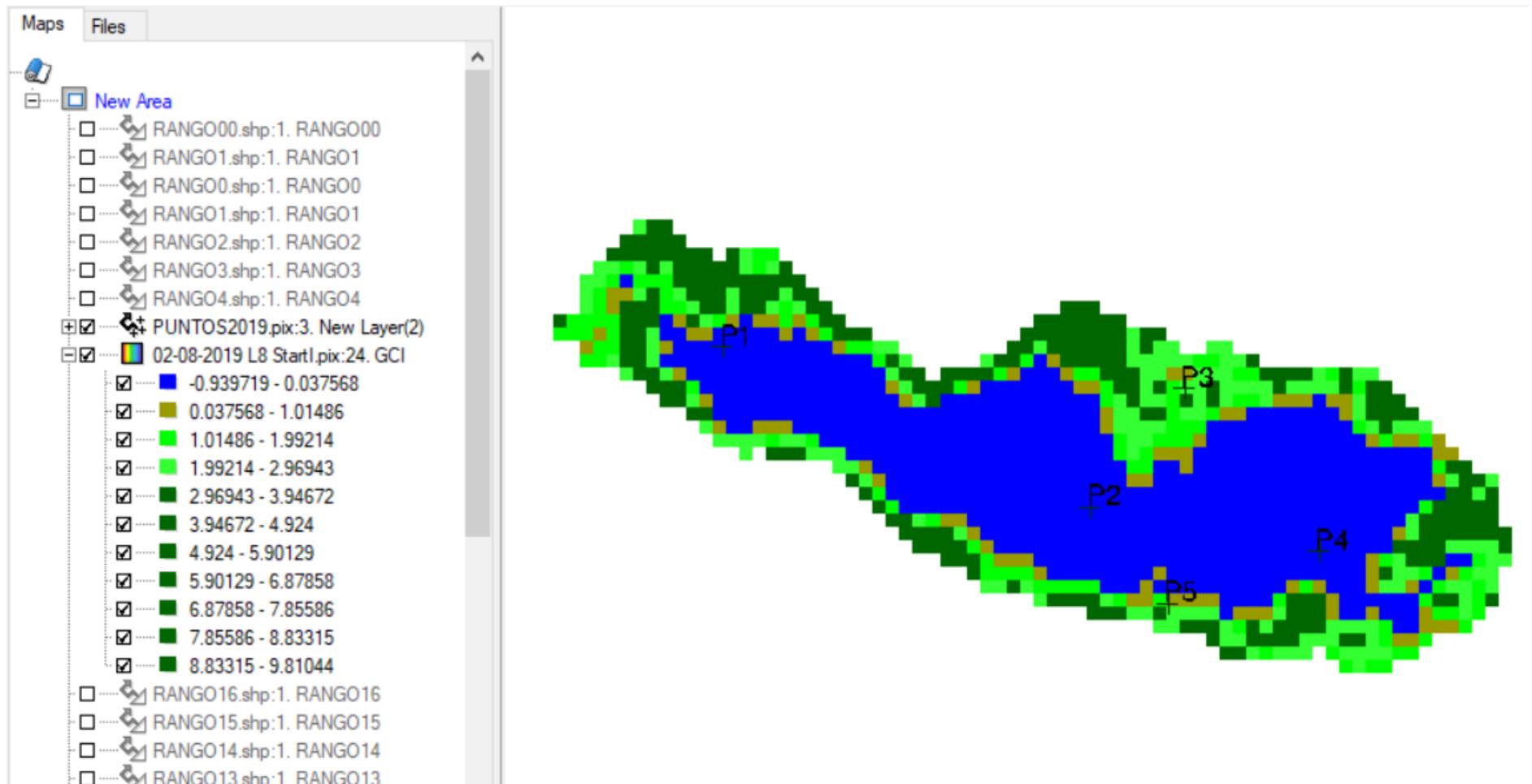


Figura 24. Resultados de índices (GCI) el 02-08-2019

Tabla 25. Resultados de DBO Y DQO en software PCI Geomatics.

Puntos	AÑO					
	1998		2008		2019	
	DBO	DQO	DBO	DQO	DBO	DQO
P1	122.728	132.874	80.8435	91.5859	82.6565	91.5703
P2	80.2392	93.1805	103.608	129.598	78.1689	89.2298
P3	348.196	331.908	98.2357	94.7397	118.448	119.023
P4	149.354	174.173	81.8128	92.1211	85.6338	97.1175
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

Los resultados obtenidos muestran la variabilidad entre los años 1998 al 2019, reduciendo las concentraciones de DBO, excepto en el punto 5 que la concentración ha aumentado y es debido a la reflectancia de las bandas del satélite.

Las concentraciones de DQO han disminuido notablemente en el periodo de 20 años, siendo un claro indicador de la mejora de calidad de agua de la laguna.

Tabla 26. *Matriz de correlación para el DBO en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	0.00775315	1	
2019	0.70131096	0.44331247	1

Existe una correlación positiva casi nula para 1998 y 2008 siendo ($r = 0.00775315$), sin embargo, para los años de 1998 y 2019 la correlación es positiva y alta con ($r = 0.70131096$). Mientras que para los años 2008 y 2019, existe una correlación positiva moderada ($r = 0.44331247$).

Tabla 27. *Resultados de la demanda química de oxígeno en software PCI Geomatics.*

Tabla 28. *Matriz de correlación para el DQO en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	-0.57209965	1	
2019	0.60754791	0.07595842	1

Existe una correlación negativa moderada para 1998 y 2008 siendo ($r = -0.57209965$), similar para los años de 1998 y 2019 con ($r = 0.60754791$). Mientras que para los años 2008 y 2019, la correlación positiva es casi nula ($r = 0.07595842$).

Tabla 29. Resultados del IETChla y chla en software PCI Geomatics.

Puntos	AÑO					
	1998		2008		2019	
	IETChla	chla	IETChla	chla	IETChla	chla
P1	55.0995	189740	-218.441	11363.1	41.8889	733.312
P2	-1618.76	394727	-218.441	14033.2	92.0235	119.642
P3	-8678.94	1.84836e+0.6	-478.992	476522	-1606.38	309233
P4	-68.3783	2458.08	34.7441	10115.1	78.7621	255.576
P5	-335.012	75493.5	-152.935	98242.1	-808.837	71348.8
Promedio	-335.012	-	-220.935	-	-348.426	-

El índice del estado trófico de la laguna es uno de los principales indicadores de la variabilidad de concentraciones de clorofila en el agua. Se muestran valores diferentes para el periodo 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. Los resultados en la tabla muestran la disminución de las concentraciones de clorofila, ya que para el año 1998 los valores en los puntos de muestreo estudiados superan a los actuales.

Tabla 30. Matriz de correlación para el IETChla en el periodo 1998 - 2019.

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	0.85589148	1	
2019	0.83366508	0.73922135	1

Existe una correlación positiva alta para 1998 y 2008, 1998 y 2019, 2008 y 2019 siendo ($r = 0.85589148$), ($r = 0.83366508$), ($r = 0.98140164$), respectivamente.

Tabla 31. Resultados de cl-a en software PCI Geomatics.

cl-a	AÑO		
	1998	2008	2019
P1	37.2387	8.95238	8.67636
P2	7.68043	22.9711	5.44229
P3	201.02	23.5948	35.7457
P4	51.2913	8.79645	10.329
P5	22.3788	22.8151	28.6056

Las concentraciones de clorofila en el periodo de 20 años han disminuido notoriamente, a excepción del punto 5, que por segunda vez 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 deben aplicarse a las ecuaciones propuestas por Carlson para conocer el estado trófico desde 1998 hasta el 2019.

Tabla 32. *Matriz de correlación para cl-a en el periodo 1998 - 2019.*

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	0.2634739	1	
2019	0.71873258	0.57349804	1

Existe una correlación positiva muy baja para 1998 y 2008 siendo ($r = 0.2634739$), una correlación alta para los años de 1998 y 2019 con ($r = 0.71873258$). Mientras que para los años 2008 y 2019 la correlación positiva es moderada ($r = 0.57349804$).

Tabla 33. *Resultados de turbiedad y z- fot en software PCI Geomatics.*

Puntos	AÑO					
	1998		2008		2019	
	Turbiedad	z-fot	Turbiedad	z-fot	Turbiedad	z-fot
P1	33.643	34.9931	4.65801	39.4456	7.48005	40.3194
P2	16.0372	32.7668	7.29104	39.4415	6.95916	40.6107
P3	-35.7144	22.1478	36.2513	31.751	14.4421	33.345
P4	14.5132	39.8785	10.3606	39.4478	7.89518	40.4969
P5	16.6596	37.2083	22.8362	36.8765	8.73285	37.1495

Los datos de turbiedad han disminuido con el pasar de los años, indicando una mejora en la transparencia del agua. 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.

Tabla 34. Matriz de correlación para turbiedad en el periodo 1998 - 2019.

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	-0.8883551	1	
2019	-0.94745044	0.92954076	1

Los resultados de la matriz muestran una correlación negativa alta para los años 1998 y 2008 ($r = -0.8883551$), una correlación negativa casi perfecta para los años 1998 y 2019 ($r = -0.94745044$) y una correlación positiva casi perfecta para el 2008 – 2019 ($r = 0.92954076$).

Tabla 35. Matriz de correlación para z-fot en el periodo 1998 - 2019.

	1998	2008	2019
1998	1		
2008	0.84195506	1	
2019	0.78006979	0.99054632	1

Existe una correlación positiva alta para 1998 y 2008 siendo ($r = 0.84195506$), similar para los años de 1998 y 2019 ($r = 0.78006979$) y para los años 2008 y 2019 una correlación positiva casi perfecta ($r = 0.99054632$)

Tabla 36. *Resultados de demanda química de oxígeno en laboratorio.*

Parámetro	2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
DQO (mg/L)	15.4	10.7	10.7	13.3	15.9

De acuerdo a los resultados los puntos 2 y 3 presentan baja demanda química de oxígeno, el punto 4 una demanda moderada, pero los puntos 1 y 5 son en los que mayor cantidad de oxígeno consumen consumido en la oxidación de contaminantes.

Tabla 37. *Resultados de oxígeno disuelto en laboratorio.*

Parámetro	2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
Oxígeno Disuelto (mg O₂/L)	4.56	4.95	3.95	6.41	5.37

Los valores muestran que el punto 4 y 5 son los que tienen mayor concentración de oxígeno, siendo los que menos contaminación presentan, mientras que el punto 3 es el que tiene una concentración crítica en la que los organismos no pueden sobrevivir.

Tabla 38. *Resultados de aniones en laboratorio*

Parámetro	2019					Promedio
	P1	P2	P3	P4	P5	
Fluoruro (mg/L)	0.314	0.329	0.350	0.324	0.376	0.339
Cloruro (mg/L)	2.080	2.038	2.120	2.032	2.148	2.084
Nitrito (mg/L)	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Bromuro (mg/L)	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Nitrato (mg/L)	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	0.181	-
Sulfato (mg/L)	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Fosfato (mg/L)	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-

Las concentraciones de aniones son mínimas, se encuentran 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)

Tabla 39. *Resultados de pH en laboratorio*

Parámetro	2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
pH (pH)	8.14	8.23	7.82	8.35	8.22

Tabla 40. *Resultados de color verdadero en laboratorio*

Parámetro	2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
Color Verdadero (UC)	7.72	7.72	9.41	9.41	7.72

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 considera alarmante, ambos son indicadores de calidad de agua, aceptables según los Estándares de Calidad Ambiental, para la conservación del ambiente acuático categoría 4, subcategoría E1 (lagunas y lagos).

Tabla 41. *Resultados de coliformes termotolerantes en laboratorio*

Parámetro	2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	70	23	22	33	17

Los valores de coliformes termotolerantes indican que el punto 1 es que mayor concentración tiene porque es una zona en la que los pobladores recurren para la bebida de animales, y éstos al eliminar sus heces es que alteran la concentración tal como se muestra en la tabla. (Olsen et al., 2012; Valenzuela et al., 2012) afirman que los valores de coliformes fecales señalan la presencia de ganado y cuando eliminan sus heces al agua, aumentan los niveles de las bacterias coliformes en el agua.

 Tabla 42. *Resultados de turbiedad en laboratorio*

Parámetro	2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
Turbiedad (UNT)	2.25	2.41	25.3	4.94	3.75

Los datos de turbiedad muestran la variabilidad en el punto 3, siendo el “más turbio”, y el punto 2, ubicado en el centro de la laguna, la zona con mayor transparencia.

Tabla 43. *Resultados de turbiedad con el disco de Secchi.*

Parámetro	2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
Turbiedad (m)	1.45	2.10	0.30	0.52	0.98

Los resultados obtenidos indican que el punto 3 es el que mayor turbiedad presenta, mientras que el punto 2 es el que tiene mayor profundidad, por ende, es el de menor turbiedad. El disco de Secchi determinó que las profundidades tienen relación con los cambios en las concentraciones de clorofila, siendo el punto 3 el de mayor concentración de cl-a (35.74) para el 2019, (Ver tabla 31).

Tabla 44. *Resultados de clorofila a en laboratorio*

Parámetro	Resultados (mg/L)				
	P1	P2	P3	P4	P5
Clorofila a	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003

Las concentraciones de clorofila fueron tan bajas que no se logró evidenciar algún cambio en ninguno de los puntos de muestreo.

Tabla 45. *Resultados de conductividad en laboratorio*

Parámetro	Resultados ($\mu\text{S/cm}$)				
	P1	P2	P3	P4	P5
Conductividad	244	241	250	240	242

Tabla 46. *Resultados de dureza en laboratorio.*

Parámetro	2019				
	P1	P2	P3	P4	P5
Dureza Total (mg/L)	275.9	277.8	287.3	270.4	271.1

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 $\mu\text{S/cm}$ para conductividad y 287.3 mg/L para dureza.

Tabla 47. Resultados de índices y parámetros de calidad de agua y eutrofización para el año 2019.

Puntos de Muestreo	Discos	z- fot	DBO	DQO	Turbiedad S	Cl-a	Chl-a	IETChl-a	GCI	NGRDI	GVI	RVI	GNDVI	MCARIs	MCARle	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 (UNT)
P1	145	40.3194	82.6565	91.5703	7.48	8.67636	733.312	41.8889	-0.6085	0.19419	0.39148	0.580166	-0.43732	-0.23947	-0.15247	0.10828	0.43732	-0.2657	244	0.314	2.080	8.14	275.9	15.4	7.7	4.6	70	2.25
P2	210	40.6107	78.1689	89.2298	6.95916	5.44229	119.642	92.0235	-0.77157	0.22914	0.22843	0.364238	-0.62809	-0.3897	-0.13615	0.14902	0.6281	-0.466	241	0.329	2.038	8.23	277.8	10.7	7.7	4.9	23	2.41
P3	30	33.345	118.448	119.023	14.4421	35.7457	309233	-1606.38	2.0785	-0.0849	3.07855	2.59638	0.5096	1.2457	9.3176	0.34658	-0.5096	0.44389	250	0.350	2.120	7.32	287.3	11.7	9.4	3.9	22	25.3
P4	52	40.4969	85.6338	97.1175	7.89518	10.329	255.576	78.7621	-0.72457	0.24136	0.27543	0.450692	-0.56809	-0.31219	-0.14428	0.10681	0.5681	-0.3787	240	0.324	2.032	8.35	270.4	13.3	9.4	6.4	33	4.94
P5	98	37.1495	109.928	117.195	8.73285	28.6056	71348.8	-808.837	0.6873	0.00181	1.68731	1.69346	0.25576	0.55549	2.08119	0.33629	-0.2558	0.25746	242	0.376	2.148	8.22	271.1	15.9	7.7	5.4	17	3.75

Tabla 48. Matriz de correlación de índices y parámetros de calidad de agua y eutrofización para el año 2019.

	DiscoS	z- fot	DBO	DQO	Turbiedad S	Cl-a	Chl-a	IETChla	GCI	NGRDI	GVI	RVI	GNDVI	MCARIs	MCARle	NPCRI	NDWI	NDVI	Conductividad (µS/cm)	(F) (mg/L)	(C) (mg/L)	°pH a 25°C	Dureza Total (mg/L)	DQO (mg Os/L)	Color Verda dero (UC)	OD (mg Os/L)	Colif. Termot. (NMP/100 mL)	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																
MCARIs	-0.6445	-0.9953	0.9768	0.9363	0.9269	0.9822	0.9441	-0.9982	0.9980	-0.9866	0.9980	0.9998	0.9827	1.0000															
MCARle	-0.6286	-0.9719	0.8658	0.7926	0.9926	0.8771	1.0000	-0.9575	0.9633	-0.8878	0.9633	0.9396	0.8699	0.9456	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	0.928	0.7920	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	-0.983	-0.8699	-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	0.977	0.8596	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	0.8230	0.9103	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	0.7006	0.4724	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	0.8062	0.5881	0.8760	-0.898	0.9059	0.5383	0.8215	1.0000								

- 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, tal como se muestra en la tabla 44, por lo que no se pudo realizar la calibración con dicho parámetro. Sin embargo, se optó por utilizar los datos de turbiedad (UNT) y DQO (ver tabla 42 y 36 para el año 2019).

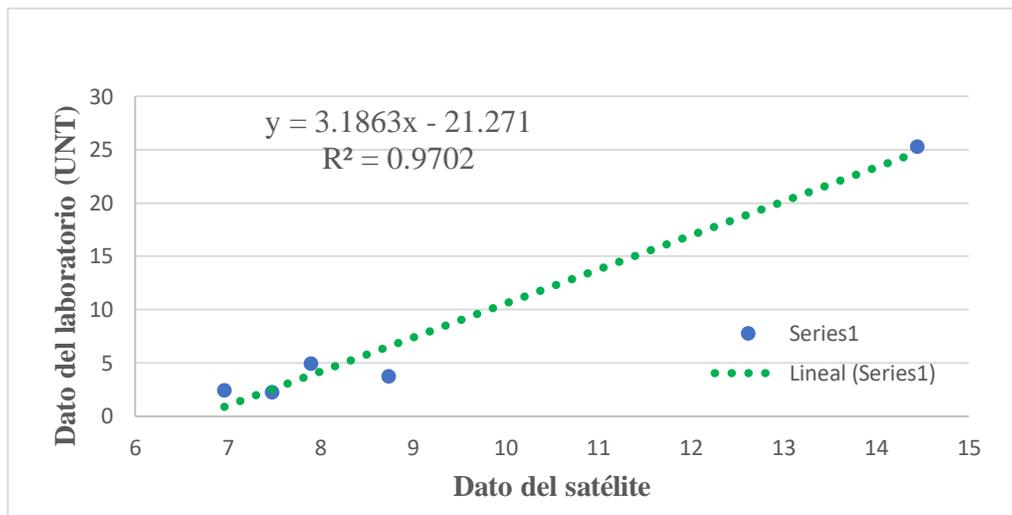


Figura 25. Correlación de turbiedad

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.

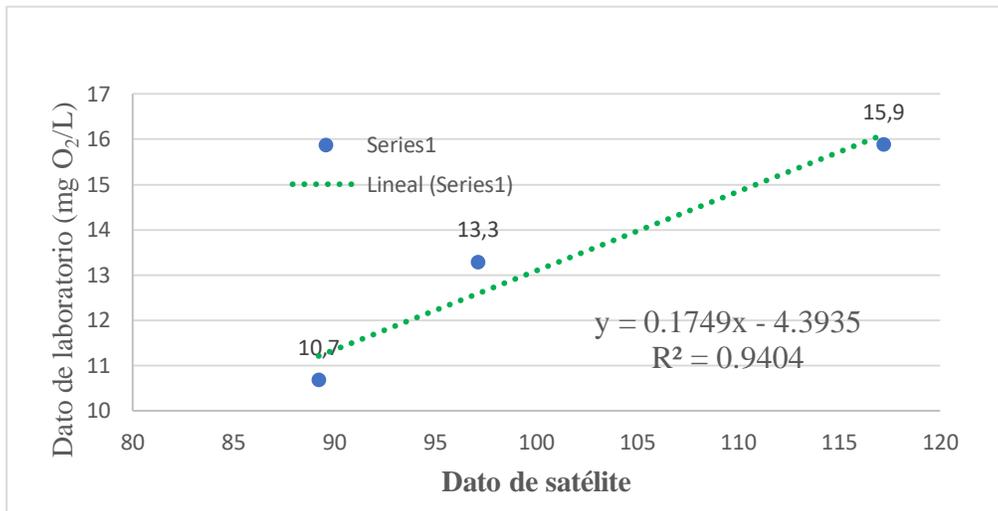


Figura 26. Correlación de demanda química de oxígeno

Con la correlación positiva muy alta ($R^2 = 0.9404$) se demostró que existe un gran potencial del sensor satelital para obtener datos de DQO en la laguna San Nicolás, muy útiles en el estudio de calidad de agua.

Para relacionar los valores de clorofila a (Cl-a) obtenidos por satélite con los de campo, se optó por utilizar 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). Seguido a ello se comparó los datos de satélite a la escala de valores del estado trófico de 1 al 100 que se muestra en (Tabla 4).

Tabla 49. Clasificación trófica Carlson y OCDE con clorofila A y disco de Secchi.

Puntos de muestreo	2019			
	Clorofila A		Disco de Secchi (Ds)	
	Carlson	OCDE	Carlson	OCDE
P1	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Hipereutrófico
P2	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
P3	Mesotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
P4	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Hipereutrófico
P5	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Hipereutrófico
Promedio	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Hipereutrófico

Con los valores obtenidos en función a los resultados del disco de Secchi (Ver tabla 43 y 44), se relacionó la clasificación del año actual mediante Carlson. Con la clasificación de trófica de turbiedad (Ds) en los cinco puntos de muestreo se calibra a los resultados de turbiedad obtenidos por teledetección (Ver tabla 33), determinando nuevos rangos del nivel trófico de la laguna para los años anteriores.

Tabla 50. Rangos para la clasificación trófica para el periodo 1998 - 2019.con turbiedad – teledetección

Turbiedad Ds (Carlson)	
Eutrófico	14.44
Mesotrófico	6.90 - 14.43

Tabla 51. Clasificación trófica para el periodo 1998 – 2019 con turbiedad – teledetección.

Puntos de Muestreo	Turbiedad (Teledetección)					
	1988		2008		2019	
	T	TCarlson	T	TCarlson	T	Carlson
P1	33.643	Eutrófico	4.65801	Mesotrófico	7.48005	Mesotrófico
P2	16.0372	Eutrófico	7.29104	Mesotrófico	6.95916	Mesotrófico
P3	-	-	36.2513	Mesotrófico	14.4421	Mesotrófico
P4	14.5132	Eutrófico	10.3606	Mesotrófico	7.89518	Mesotrófico
Promedio	21.3978	Eutrófico	14.6402	Eutrófico	9.194122	Mesotrófico

De acuerdo a los rangos de la tabla 50, teniendo en cuenta los valores de turbiedad obtenidos por satélite (Ver tabla 33) se realizó la clasificación trófica con el promedio de cada año, y según los resultados obtenidos la laguna San Nicolás pasa de un estado eutrófico a mesotrófico según la transparencia del disco de Secchi.

Tabla 52. Clasificación trófica Carlson y OCDE para el periodo 1998 – 2019 con cl-a – teledetección.

Puntos de	Clorofila - a (Teledetección)								
	1998			2008			2019		
Muestreo	cl - a	TCarlson	OCDE	cl - a	TCarlson	OCDE	cl - a	TCarlson	OCDE
P1	37.2387	Mesotrófico	Eutrófico	8.95238	Mesotrófico	Mesotrófico	8.67636	Mesotrófico	Mesotrófico
P2	7.68043	Mesotrófico	Mesotrófico	22.9711	Mesotrófico	Eutrófico	5.44229	Mesotrófico	Mesotrófico
P3	201.02	Eutrófico	Hipereutrófico	23.5948	Mesotrófico	Eutrófico	35.7457	Mesotrófico	Eutrófico
P4	51.2913	Mesotrófico	Eutrófico	8.79645	Mesotrófico	Mesotrófico	10.329	Mesotrófico	Mesotrófico
Promedio	74.3076	Eutrófico	Hipereutrófico	16.0787	Mesotrófico	Eutrófico	15.0483	Mesotrófico	Eutrófico

A excepción del punto 5 que refleja algunas anomalías en las bandas, se calculó el promedio para los datos de clorofila “a” obtenidos de satélite (cl-a) (Ver tabla 31) y según la clasificación trófica de Carlson muestra que la laguna San Nicolás pasa de un estado eutrófico a mesotrófico en un periodo de 20 años.

Tabla 53. Índice del estado trófico (TSI) para clorofila A – laboratorio.

Puntos de Muestreo	Clorofila-a (mg/m ³)		
	clorf-a (mg/m ³)	TSI	Estado Trófico
P1	3	41.38	Mesotrófico
P2	3	41.38	Mesotrófico
P3	3	41.38	Mesotrófico
P4	3	41.38	Mesotrófico
P5	3	41.38	Mesotrófico

Según la tabla para clorofila A, el resultado de 3 mg/m³, ubican a la laguna San Nicolás en un estado mesotrófico.

Tabla 54. Índice del estado trófico (TSI) para turbiedad- disco de Secchi.

Puntos de Muestreo	Transparencia del disco de Secchi		
	Ds (m)	TSI	Estado Trófico
P1	1.45	54.65	Mesotrófico
P2	2.1	49.31	Mesotrófico
P3	0.3	77.35	Eutrófico
P4	0.52	69.42	Mesotrófico
P5	0.98	60.29	Mesotrófico
Promedio	1.07	59.03	Mesotrófico

El resultado del TSI (59.03) para el disco de Secchi, según Carlson indica que la laguna San Nicolás se encuentra en un estado mesotrófico.

Tabla 55. Índice del estado trófico (TSI) para cl-a en el periodo 1998 - 2019- teledetección.

Clorofila - a (Teledetección)									
Puntos de	1998			2008			2019		
Muestreo	cl - a	TSI	Estado Trófico	cl - a	TSI	Estado Trófico	cl - a	TSI	Estado Trófico
P1	37.2387	66.09	Eutrófico	8.95238	52.1	Mesotrófico	8.67636	51.6	Mesotrófico
P2	7.68043	50.6	Mesotrófico	22.9711	61.34	Eutrófico	5.44229	47.22	Mesotrófico
P3	201.02	82.63	Eutrófico	23.5948	61.61	Eutrófico	35.7457	65.68	Eutrófico
P4	51.2913	69.23	Eutrófico	8.79645	51.93	Mesotrófico	10.329	53.51	Mesotrófico
Promedio	74.307608	67.1375	Eutrófico	16.078683	56.745	Mesotrófico	15.048338	54.5025	Mesotrófico

Con los valores satelitales de clorofila “a” (cl-a) (Ver tabla 31) se obtuvo el TSI promedio para el periodo de 20 años, siendo eutrófico para 1998, mesotrófico para el 2008 al 2019.

Tabla 56. *Índice del estado trófico clorofila A y Ds (IET) U-H.*

Puntos de Muestreo	Índice de Estado Trófico (IET U-H)					
	Ds (m)	IET Ds	clorf-a (mg/m ³)	IET Clorf-a	IET Promedio	IET U-H
P1	1.45	54.64	3	41.35	47.995	Mesotrófico
P2	2.1	49.30	3	41.35	45.325	Mesotrófico
P3	0.3	77.37	3	41.35	59.36	Eutrófico
P4	0.52	69.43	3	41.35	55.39	Eutrófico
P5	0.98	60.29	3	41.35	50.82	Mesotrófico
Promedio	1.07	59.02	3	41.35	50.6	Mesotrófico

Con los valores de clorofila A obtenidos en laboratorio y disco de Secchi (Ver tabla 43 y 44) se obtuvo el índice del estado trófico de acuerdo a los criterios de aplicación del IET U-H (ultraoligotrófico a hipereutrófico) (Ver tabla 3), clasificando a la laguna San Nicolás como estado mesotrófico (IET =50.6).

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 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 a la escala del nivel trófico establecido por Carlson (1977) ubican a la laguna en un estado mesotrófico. Al igual que aplicando la metodología del índice del estado trófico (TSI) para clorofila A, se obtuvo como resultado $TSI = 41.38$, lo que indica que la laguna San Nicolás se encuentra en un estado mesotrófico. Este resultado obtenido fue similar al obtenido por Tito, et al., (2019) en su investigación “Índice de estado Trófico de las aguas de la Reserva Natural protegida Pantanos de Villa, Chorrillos 2019 que determinó la concentración de clorofila A con valores de 0.007 mg/L, 0.008 mg/L y de 0.004 mg/L para los puntos 1, 2 y 3, el promedio de estos valores se aplicó a la fórmula del índice de estado trófico de Carlson con $TSI = 48.28$, el cual también determinó que la laguna Génesis se encuentra en un estado mesotrófico.

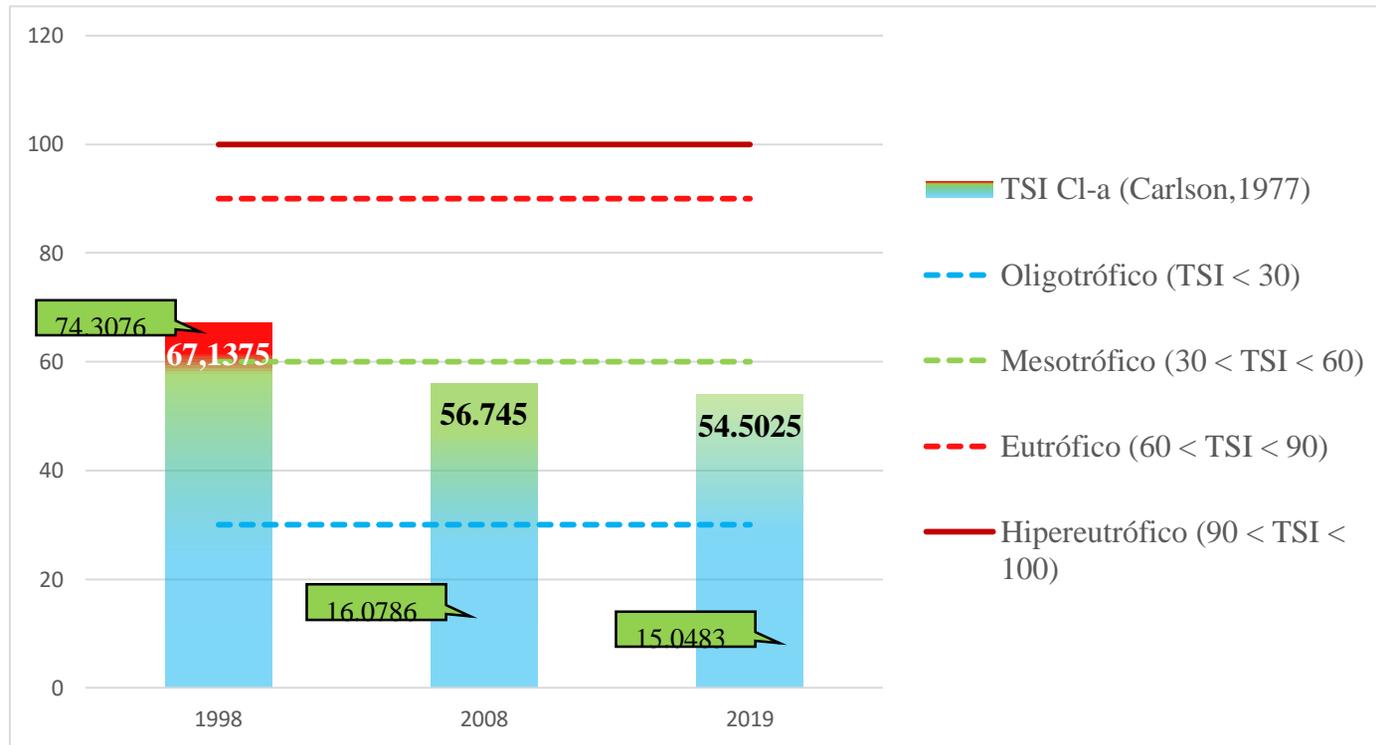


Figura 27. Distribución de clorofila "a" en el periodo 1998 - 2019- teledetección

Las concentraciones de cl-a obtenidos por teledetección y clasificados según Carlson (1977) y el TSI cl-a del mismo autor, indican que la laguna San Nicolás pasa de estado eutrófico a mesotrófico en un periodo de 20 años, eso significa que el cuerpo de agua se está recuperando y actualmente se encuentra con niveles moderados de nutrientes. Contrastando con el estudio presentado por Ledesma, et al., (2013) quienes reportaron las concentraciones de clorofila a del

embalse Río Tercero, Argentina para los años 2003 y 2006, consideraron que el embalse está experimentando un deterioro en la calidad del agua, adquiriendo alta productividad y un avance progresivo hacia un estado elevado de eutrofia, pasando de mesotrófico a eutrófico según lo valores de la OCDE, contrario a la laguna San Nicolás, que se ha recuperado en la última década. (ver tabla 49)

Callisaya, D. (2018) determinó las concentraciones de clorofila-a en el lago Titicaca (Lago menor) mediante técnicas de teledetección y los resultados obtenidos ubicaron al lago en un estado mesotrófico, categoría en la que se ubica la laguna San Nicolás para el 2019. Este estado indica un intermedio nivel de productividad, en el que existe claridad del agua y presencia de algunas plantas acuáticas. (Moreno, et al., 2010).

Del mismo modo, Díaz & Sotomayor (2013) evaluaron la eutrofización de la laguna Conococha – Ancash y obtuvieron 46 $\mu\text{g/L}$ para la clorofila “a” calificándola como hipereutrófica según la OCDE (1982). Contrastando con la investigación señalada, la laguna San Nicolás presenta concentraciones menores de clorofila a (3 $\mu\text{g/L}$) lo que la mantiene en un estado mesotrófico según la OCDE, con tendencia muy lejana a eutrófico, a menos que el cuerpo de agua sea alterado por la actividad antrópica, la creciente urbanización, el vertimiento de aguas residuales, el excesivo incremento de nutrientes por parte de actividades agrícolas y ganaderas. Allí radica la importancia de conocer el estado trófico de nuestros lagos, monitorear la distribución de parámetros como cl-a, detectar fuentes de nutrientes que ingresan al sistema, analizar, gestionar y planificar esfuerzos futuros para mantener la calidad del agua. (Bonansea et al., 2012)

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. Algunos autores como Margalef, (2002) citados 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 cual no queda 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. (Ver figura 28)

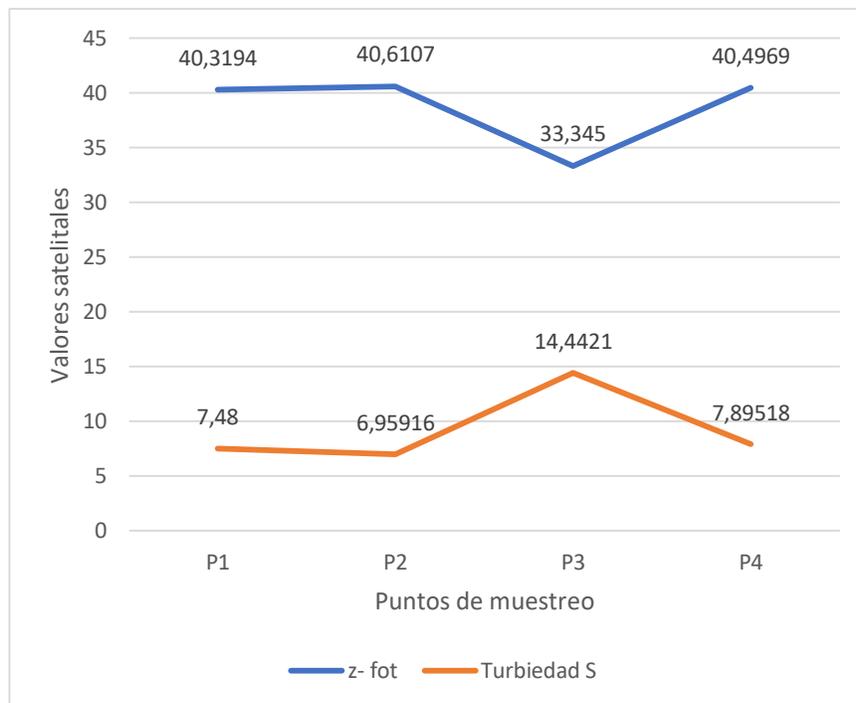


Figura 28. Relación entre la zona fótica (z-fot) y la turbiedad - teledetección

Bonanseña, 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, siendo ($r = -0.96$) (Ver tabla 47)

Las profundidades del disco de Secchi (Ds) fueron variables para los 5 puntos de muestreo (1.45 m, 2.10m, 0.30m, 0.52m, 0.98m, respectivamente) y según la clasificación del Estado Trófico propuesto por Carlson (1977) para el Ds, la laguna San Nicolás se encuentra en un estado mesotrófico, a excepción del punto 3 que la clasifica como estado eutrófico, siendo su valor menor que el límite (0.5m). (Ver tabla 51).

Teniendo en cuenta a Carlson 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 TSI = 54.64, 49.31, 69.42, 60.29, respectivamente. Sin embargo, el punto 3 tiene un TSI = 77.35 mostrando un estado eutrófico (Ver tabla 54). La actividad antrópica y ganadera es una de las principales causas del incremento de un estado mesotrófico a un eutrófico en el punto 3, porque esa zona de la laguna sufre pequeñas alteraciones por la presencia de pastoreo y bebida de animales en algunas ocasiones. Díaz & Sotomayor (2013) mencionan que es importante tener en cuenta la sectorización de las áreas de pastoreo con el objetivo de controlar la presión del ganado en la zona, promover buenas

prácticas ambientales, pero sobre todo el compromiso formal de los organismos competentes para crear y aplicar políticas protectoras del ambiente natural, comprometiendo a la participación ciudadana en la conservación del ecosistema. Contrastando con su investigación “Evaluación de la Eutrofización de la Laguna Conococha – Ancash a agosto de 2012” en función a los resultados de la transparencia con el disco de Secchi determinaron que la laguna Conococha se encuentra en nivel eutrófico con $TSI = 67.1$ y concluyeron que la poca visibilidad en la laguna es debido al crecimiento abundante de algas causado por la actividad antrópica, ganadera, vertimiento directo de las aguas residuales domésticas y la disposición de los residuos sólidos hacia la laguna.

Por otro lado, Tito, et al., (2019) en su investigación, obtuvieron que 0.6 m fue el promedio total de transparencia con el disco de Secchi. Se calculó el TSI para ese parámetro y de acuerdo al índice de Carlson (TSI), el promedio fue de 66.1 TSI, indicando que Laguna Génesis se encuentra en un nivel Eutrófico ($60 < TSI < 90$). Mientras que, la laguna San Nicolás se mantuvo en el estado mesotrófico de acuerdo al promedio total de transparencia con el disco de Secchi, siendo 1.07 m con $TSI = 59.03$.

Los resultados de clorofila A obtenidos en laboratorio y disco de Secchi (transparencia- turbiedad) para la laguna San Nicolás fueron sometidos a la clasificación trófica según el IET Carlson (1977) y la OCDE (1982). Se obtuvo que la clasificación trófica con clorofila A ($< 3 \mu\text{g/L}$) según el IET promedio de los puntos de muestreo (50.6) ubicó a la laguna en estado mesotrófico al igual

que la OCDE. (Ver tabla 49). Concentraciones de clorofila “a” con valores menores a 3 ug/L se deben a una baja concentración de nutrientes, característica de lagos ubicados en territorios atravesados por la cordillera occidental de los Andes, así informa Díaz et al, (2007), citados por López & Madroñero, (2015). Asimismo, el IET promedio para el disco de Secchi y clorofila A, ubicó a la laguna San Nicolás en estado mesotrófico. Sin embargo, la clasificación trófica promedio según la OCDE para el disco de Secchi tuvo grandes cambios, ubicando a la laguna San Nicolás en estado hipereutrófico.

Similar sucede con el estudio presentado por López & Madroñero, (2015) quienes determinaron el estado trófico de la laguna de la Cocha, Colombia, según la OCDE para la concentración de clorofila “a” (0.53 ug/L y 2.34 ug/L) como ultraoligotrófico y oligotrófico. Sin embargo, para la transparencia de los diez puntos de muestreo, se obtuvo clasificación mesotrófica y eutrófica, a pesar que informaron que el lago se encuentra en óptimas condiciones en cuanto a eutrofización. Seguido a ello, se aplicó el IET promedio propuesto por Carlson para clorofila a y transparencia, el cual calificó a la laguna Cocha como oligotrófica.

De ambos estudios se concluye que la interpretación del índice OCDE es algo compleja, porque se analiza cada parámetro por separado sin que pueda haber integración alguna, es por ello que se recomienda trabajar con la metodología de Carlson y priorizar el parámetro clorofila “a”. (López & Madroñero, 2015)

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), los cuales se encontraron por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental para agua, al igual que en el estudio realizado por Tito, et al., (2019), el pH se encontró dentro del ECA para agua, a excepción de la conductividad eléctrica que se obtuvo un resultado de 4325 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sobrepasando el valor establecido de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para lagos y lagunas. Este último resultado también coincide con los obtenidos por Quiroz (2019) en su investigación, quien obtuvo que los valores de conductividad no cumplieron con el límite establecido en el ECA.

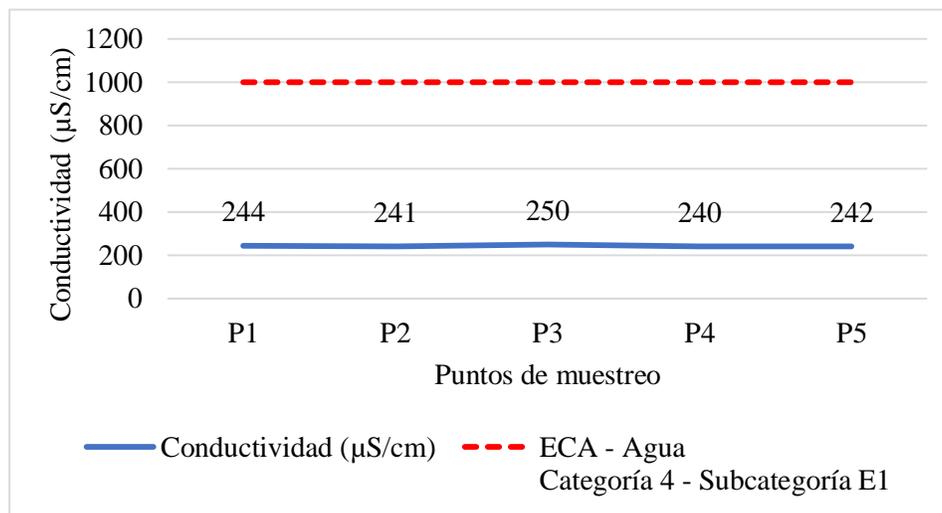


Figura 29. Comparación de los resultados de conductividad con los ECA - Agua.

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)

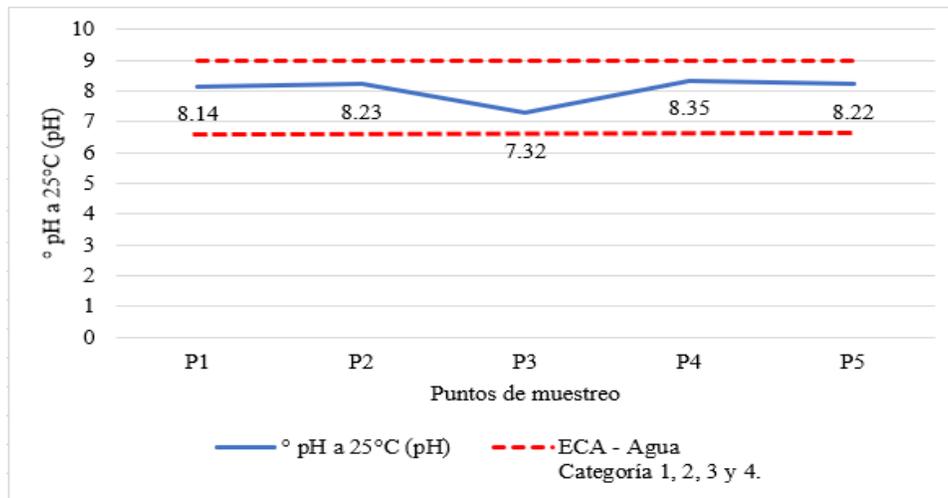


Figura 30. Comparación de los resultados de pH con los ECA - Agua

En cuanto al oxígeno disuelto, los puntos 4 y 5 fueron los únicos que cumplieron con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aguas, de la figura 35, se observa que 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. DIGESA. (2009). Sin embargo, el promedio de OD en los puntos de muestreo fue inferior al mínimo exigido.

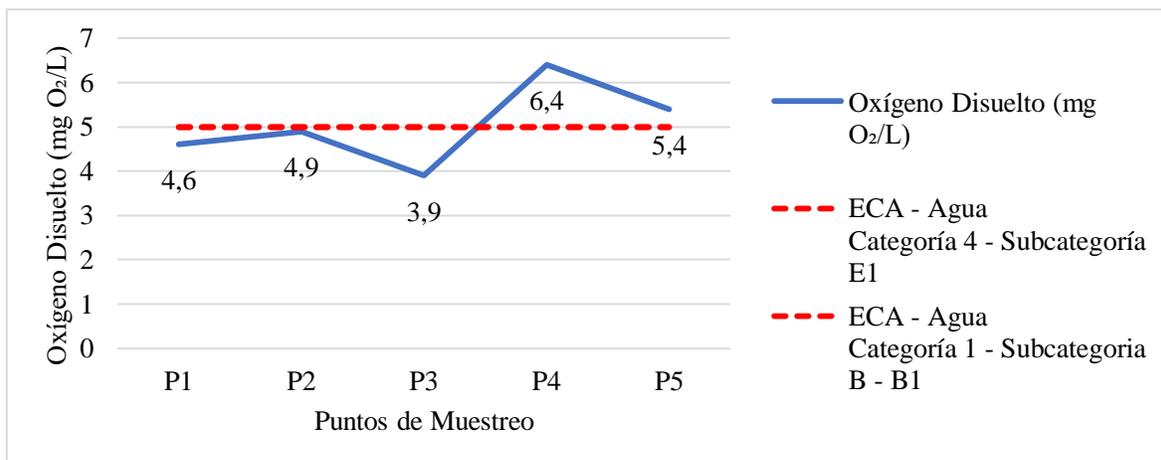


Figura 31. Comparación de los resultados de OD con los ECA - Agua.

Quiroz (2019) en su investigación, obtuvo que el promedio de oxígeno disuelto fue de 4.90 mg O₂/L con una concentración mínima de 3.60, lo que indicó que dichos valores no cumplieron con el límite establecido en el D.S. N° 004 – 2017 – MINAM (ECA – Agua).

En relación a las concentraciones de clorofila A, el resultado obtenido fue de 0.003 mg/L en los cinco puntos de muestreo, similar a los resultados presentados por Tito, et al., (2019) que obtuvo 0,007 mg/L; 0,008 mg/L; 0,004 mg/L para tres puntos de muestreo, lo que demuestra que en ambos estudios el valor de clorofila A no sobrepasa lo establecido en el ECA siendo 0,008 mg/L para lagos y lagunas.

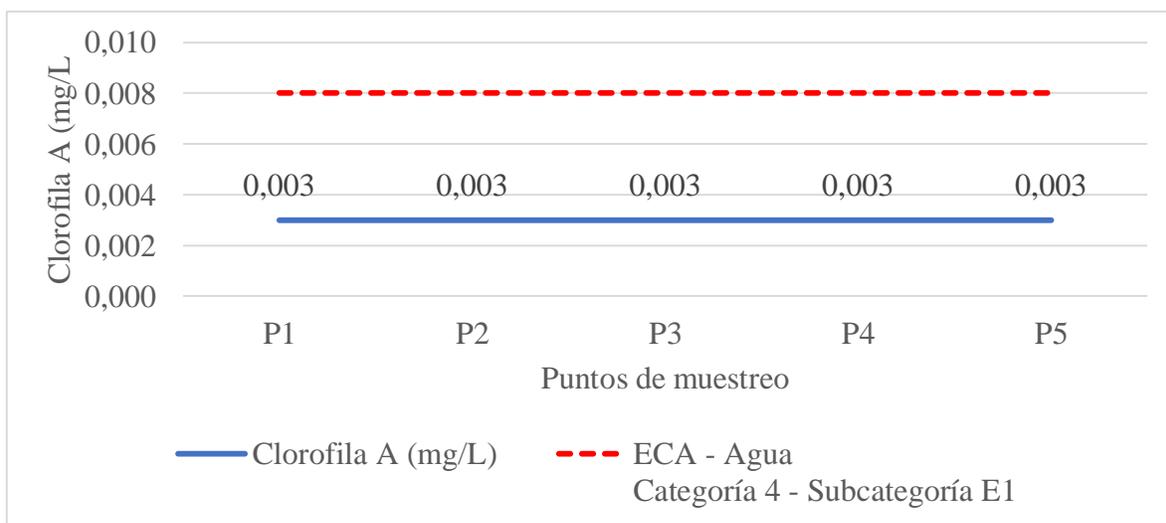


Figura 32. Comparación de los resultados de clorofila A con los ECA - Agua.

Del mismo modo, los valores de color verdadero no sobrepasaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, considerando la categoría 4 (Conservación del ecosistema acuático), sub categoría E1 (Lagos y lagunas) (Ver figura 33). La relación de estos parámetros radica en que, si los valores sobrepasan los ECA de color, impide el paso de la luz para el desarrollo de la biodiversidad. (DIGESA, 2009).

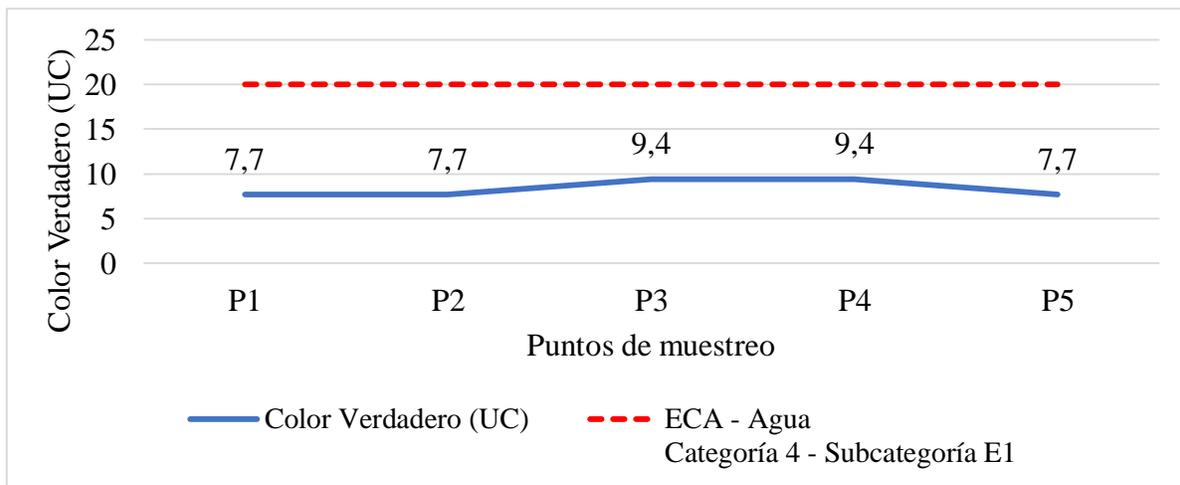


Figura 33. Comparación de los resultados de color con los ECA - Agua.

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, (Ver tabla 38) y que al compararse con los ECA para agua resultan aptos para riego de vegetales.

Las bajas concentraciones de aniones y nitrógeno amoniacal (<LCM) 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)

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

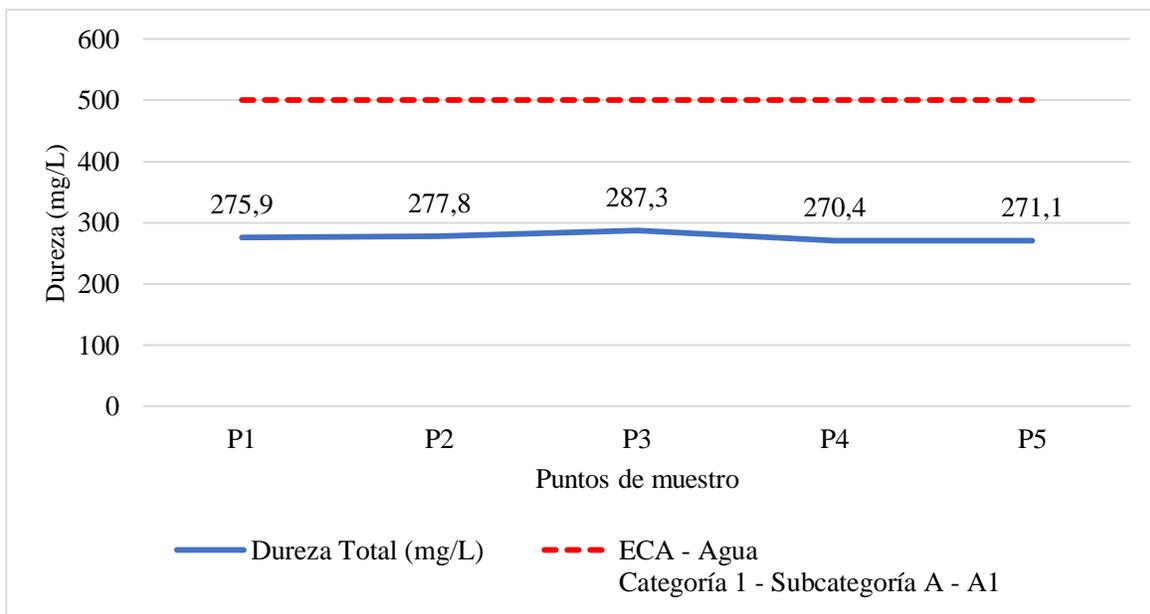


Figura 34. Comparación de los resultados de dureza con los ECA - Agua.

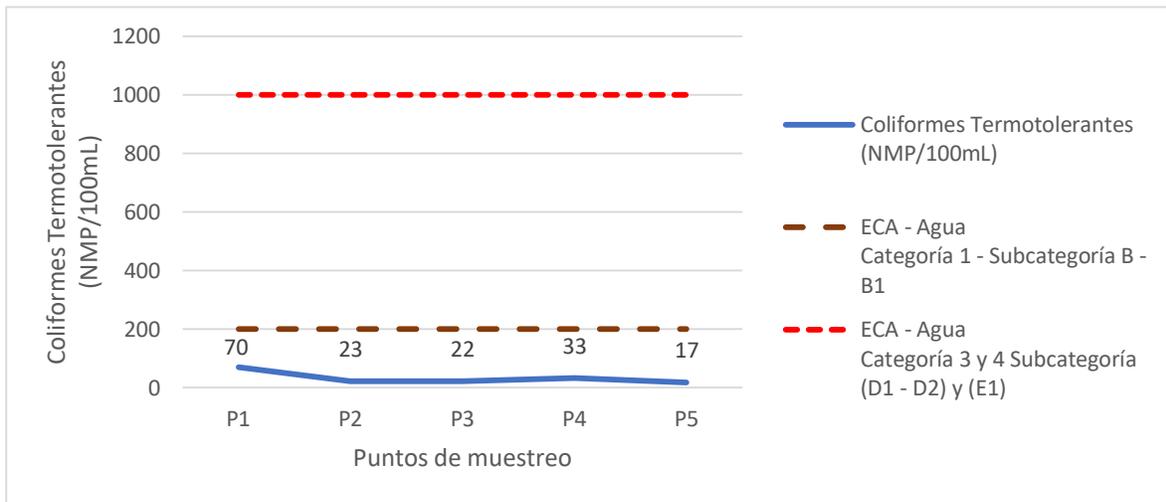


Figura 35. Comparación de los resultados de coliformes termotolerantes con los ECA - Agua.

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 esos 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.

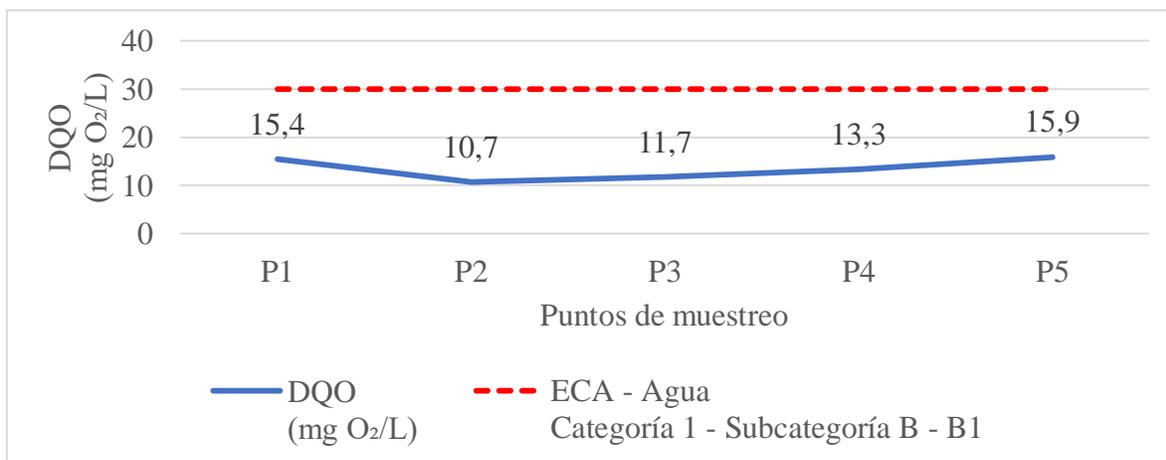


Figura 36. Comparación de los resultados de DQO con los ECA - Agua.

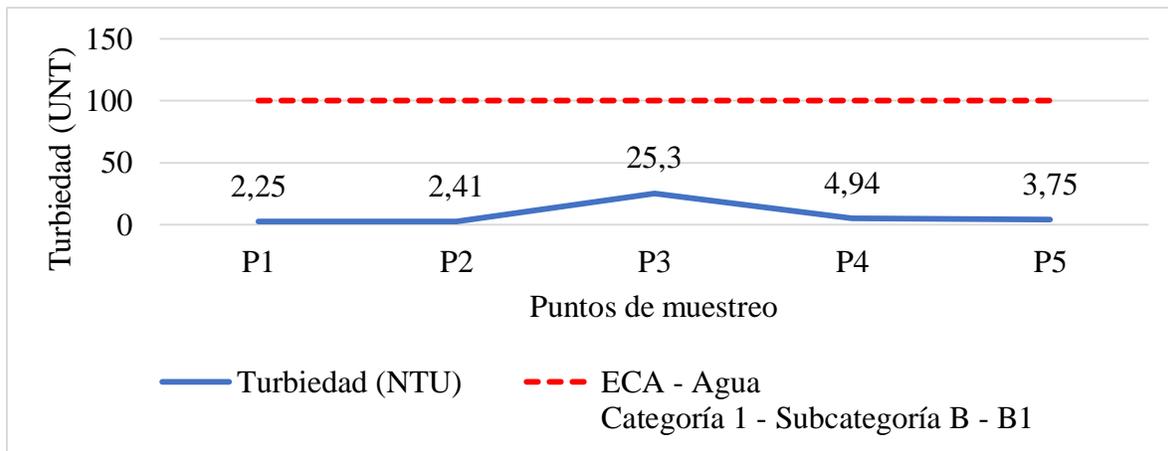


Figura 37. Comparación de los resultados de turbiedad con los ECA - Agua.

4.2 Conclusiones

Del presente estudio, se concluye que fue posible determinar el nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás aplicando teledetección satelital en un periodo 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 lo que indica la recuperación del cuerpo de agua.

Se determinó 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 para periodos 1998 y 2019, siendo sus promedios DBO (175.129 y 91.227), DQO (183.034 y 99.235), IETChla (-25577.7 y -348.4), T (21.3978 y 9.1941), Cl-a (74.3076 y 15.0483), disminuyendo notablemente sus concentraciones en función del tiempo, indicando la mejora de calidad de agua de la laguna.

Del estudio se concluye que es posible contrastar los resultados obtenidos de clorofila “a”, turbiedad, DQO mediante teledetección con muestreos de campo, a través de una correlación de parámetros, obteniéndose ($r= 0.9850$) para turbiedad satelital y turbiedad (UNT), con respecto a las concentraciones de clorofila a satelital (cl-a), se demostró que es el parámetro más confiable para establecer el estado trófico del cuerpo de agua, ya que los resultados constantes de laboratorio $< 3 \text{ ug/L}$ ubicó a la laguna en estado mesotrófico al igual que los valores satelitales de cl-a (15.048).

Se determinó los resultados obtenidos por teledetección satelital que tuvieron más relación con los valores de cl-a, siendo el DBO ($r = 0.99$), GCI ($r = 0.97$), NGRDI ($r = -0.98$), GVI (0.97), RVI ($r=0.98$), GNDVI (0.99), MCARIs ($r = 0.98$), NPCRI ($r = -0.95$), NDWI ($r = -0.99$) y NDVI ($r = 0.98$).

Los índices favorables para discriminar con mayor precisión la vegetación y el recurso hídrico fueron el NDVI y NDWI, encontrándose una correlación negativa casi perfecta ($r = -0.99$), un rango de NDVI = $-0.816 - 0.085$ para agua, ocupando el 19 % del área de la laguna en 1998 y 48% para el 2019, NDVI = $0.085 - 0.311$ para vegetación enferma, ocupando el 22% en 1998 y 8% en el 2019, NDVI = $0.31104 - 0.53663$ para vegetación medianamente sana, con 46 % para 1998 y 23 % para el 2019, NDVI = $0.53663 - 0.76222$ para vegetación muy sana, con 13% para 1998 y 21 % para el 2019, demostrando que para 1998, la laguna presentó un estado crítico en función de la respuesta del infrarrojo cercano, que indica vegetación enferma y en cuanto al área, plantas verdes con porcentaje elevado de productividad primaria. Respecto a la actividad fotosintética, la ecuación para cl-a fue la más confiable ya que fue calibrada con valores de campo y clasificada con la metodología de Carlson indicando que la laguna San Nicolás se encuentra en estado mesotrófico, con niveles bajos e intermedios de nutrientes, lo que explica las bajas concentraciones de cl-a.

REFERENCIAS

Alexakis, D., Grillakis, M., Koutroulis, A., Agapiou, A., Themistocleous, K., Tsanis, I., Michaelides, S., Pashiardis, S., Demetriou, C., Aristeidou, K. Retalis, A., Tymvios, F. & Hadjimitsis, D. (2014). GIS and remote sensing techniques for the assessment of land use change impact on flood hydrology: the case study of Yialias basin in Cyprus. En *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14 pp. 413 – 426.

Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/307819425_GIS_and_remote_sensing_techniques_for_the_assessment_of_land_use_change_impact_on_flood_hydrology_the_case_study_of_Yialias_basin_in_Cyprus

Alonso. (2006). Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación. [En línea]. Recuperado de:

https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node70_ct.html

Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*. [En línea].

Recuperado de: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

Bonansa, 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>

Boyd, E. & Tucker, C. (1998). El disco de Secchi en la Interpretación de la turbidez del agua. En *Nicovita*, 3, pp. 183. Recuperado de:

https://www.nicovita.com.pe/extranet/boletines/nov_98_02.pdf

Callisaya, D. (2018). Análisis de la clorofila-a en el agua con técnicas de teledetección en lago Titicaca (Lago Menor). En *Revistas Bolivianas*, 4 (3), pp. 1250-1262. Recuperado de:

http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-03042018000300002&lng=es&nrm=iso

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>

Chuvieco, E. (2002). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. España: Madrid. (Segunda Edición). Recuperado de:

<https://search.proquest.com/openview/fa0851b2def4bc35d8ac1287bd08d7d0/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1818083>

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental*. España: Barcelona. (Tercera Edición). Recuperado de:

<https://books.google.com.pe/books?id=aKsNXCVCtQC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Daughtry, T., Walthall, L., Kim, S., Brown De Colstoun, E. & McMurtreylll, E. (2000). Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. En *Remote Sens Environ*, 74 (2), pp. 229–239. Recuperado de:

<https://pubag.nal.usda.gov/catalog/26536>

Díaz, A. & Sotomayor, L. (2013). *Evaluación de la Eutrofización de la Laguna Conocoha – 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

DIGESA. (2009). *Parámetros Organolépticos*. En Gesta Agua. Recuperado de: http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.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>

Geocento earth imaging. (2019). Satélite de imágenes LANDSAT-5. Recuperado de:

<http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-landsat-5/>

Geo University. (2019). Spectral Indices with multispectral satellite data. Obtenido de: <https://www.geo.university/pages/spectral-indices-with-multispectral-satellite-data>

Gidahatari. (2018). Tutorial de Estimación de los Índices de Vegetación y Biomasa con QGIS 3. Recuperado de: <http://gidahatari.com/ih-es/tutorial-de-estimacion-de-los-indices-de-vegetacion-y-biomasa-con-qgis-3>

Gis & Beers. (2016). Cálculo del índice de clorofila GCI. Recuperado el 8 de marzo de 2019, de: <http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-de-clorofila-gci/>

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>

Gitelson, A., Kaufman, Y., Stark, K. & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. De *Remote Sensing of Environment*, 80 (12), pp. 76 – 87. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425701002899?via%3>

Dihub

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

iagua. (2018). *Eutrofización: Causas, consecuencias y soluciones*. En [línea]. Recuperado de: <https://www.iagua.es/noticias/sewervac-iberica/eutrofizacion-causas-consecuencias-y-soluciones>

Ledesma, C., Bonansea, M., Rodriguez, C. & Sánchez, A. (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). En *Ciencia Agronómica*, 44 (3), pp. 419 – 425. Recuperado de:

http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-66902013000300002&script=sci_abstract&tlng=es

López, M & Madroño, S. (2015). Estado Trófico de un Lago Tropical de Alta Montaña: Caso Laguna de la Cocha. En *Ciencia e Ingeniería Neograndina*, 25 (2), pp. 21 – 42. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91142868002>

Meijerink, A., Banner, D., Batelaan, O., Lubczynski, M. & Pointet, T. (2007). Remote sensing applications to groundwater. En *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, no. 016. Francia. Recuperado de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000156300>

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

<https://studylib.es/doc/4987995/m%C3%A9todos-para-identificar--diagnosticar-y-evaluar-el-grado>.

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

NOAA. (2020). Productos de Índice Global de Vegetación. Obtenido de: <https://www.ospo.noaa.gov/Products/land/gvi/>

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>

Quiros, R., Boveri, M., Boveri, M., Rennella, A., Rosso, J., Sosnovsky, A. & von Bernard, H. (2006.). Los Efectos de la Agriculturización del Humedal Pampeano Sobre la Eutrofización de sus Lagunas. En *Instituto Internacional de Ecología*, pp. 1 – 6. Recuperado de:

<https://www.agro.uba.ar/users/quiros/Eutrofizacion/Quirosetal2006EUTROSUL.pdf>

Quiroz, R. (2019). *EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS TRÓFICOS DE LA LAGUNA PRINCIPAL DEL ÁREA DE CONSERVACIÓN REGIONAL ALBUFERA DE MEDIO MUNDO, HUAURA-LIMA*. (Tesis de Pregrado). Universidad Católica Sedes Sapientiae, Huaura, Perú. Recuperado de:

http://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/UCSS/649/Quiroz_Rhoydi_tesis_bac_hiller_2019.pdf?sequence=5&isAllowed=y

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

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

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>

Servicio Geológico De Estados Unidos (2018), Descarga de imágenes Landsat. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Sobrino, A. (2000). *Teledetección*. España: Valencia. (Ilustrada). Recuperado de:

https://books.google.es/books?id=Yb6xIldfoT0C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Soriano, J., Fernández, F., García, E., Allende, F. & García, M. A. (1996). Utilización conjunta de la teledetección y de los sistemas de información geográfica en la detección de superficies de agua en la cuenca del Guadiana. En *Cedex*, (104), pp. 5 – 11. Recuperado de:

<http://193.145.71.12/index.php/ingenieria-civil/article/view/1149>

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>

Tito, Z., Jave, J. & Gonzales. (2019). Índice de estado Trófico de las aguas de la Reserva Natural protegida Pantanos de Villa, Chorrillos 2019. En *Revista ECIPerú*. 1 (1), pp.1 – 6.

USGS. (2020). *EarthExplorer* – Home. Obtenido de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

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/>

ANEXOS

Anexo N°1. Visita técnica y toma de coordenadas de la zona de estudio.



Anexo N°2. Toma de muestra de agua (Clorofila A para el punto N°3)



Anexo N°3. Medición con el disco de Secchi en el punto N° 5.



Anexo N°4. Presencia de matara alrededor de la laguna



Anexo N°5. Resultados de las concentraciones de Clorofila a para los puntos de muestreo.



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1916024 Rev. 0**

DEISY LISSET CARRASCO VELA

PROLONGACIÓN REVILLA PÉREZ N° 151-CAJAMARCA-PERU

ENV / LB-345877-002

PROCEDENCIA : FISCAL

Fecha de Recepción SGS : 02-07-2019

Fecha de Ejecución : Del 02-07-2019 al 04-07-2019

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
P1
P2
P3
P4
P5

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 04/07/2019

Jade C. Huarcaya Soto
C.B.P. 8471
Jefe de Oficina



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1916024 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P1	P2	P3
FECHA DE MUESTREO					9199602N /	9199232N /	9199459N /
HORA DE MUESTREO					792470E	793323E	793365E
CATEGORIA					02/07/2019	02/07/2019	02/07/2019
SUB CATEGORIA					07:30:00	08:10:00	08:50:00
					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE LAGUNA	AGUA DE LAGUNA	AGUA DE LAGUNA
					AGUA DE LAGUNA	AGUA DE LAGUNA	AGUA DE LAGUNA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Físicoquímicos							
Clorofila A	EW_APHA10200H	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					P4	P5
FECHA DE MUESTREO					9199144N /	9199907N /
HORA DE MUESTREO					793050E	793907E
CATEGORIA					02/07/2019	02/07/2019
SUB CATEGORIA					09:35:00	09:50:00
					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE LAGUNA	AGUA DE LAGUNA
					AGUA DE LAGUNA	AGUA DE LAGUNA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado
Análisis Físicoquímicos						
Clorofila A	EW_APHA10200H	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003

Notas:
El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

Anexo N°6. Análisis con el multiparámetro



Anexo N°7. Resultados de los parámetros fisicoquímicos y biológicos para los puntos de muestreo

ENSAYOS			QUIMICOS					
Código Cliente			P1	P2	P3	P4	P5	-
Código Laboratorio			0719422-01	0719422-02	0719422-03	0719422-04	0719422-05	-
Matriz			NATURAL	NATURAL	NATURAL	NATURAL	NATURAL	-
Descripción			Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	-
Localización de la Muestra			E.792476 N.9199502	E.793323 N.9199232	E.793365 N.9199489	E.793850 N.9199144	E.793497 N.9198987	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					-
Fluoruro (F ⁻)	mg/L	0.038	0.314	0.329	0.350	0.324	0.376	-
Cloruro (Cl ⁻)	mg/L	0.065	2.080	2.038	2.120	2.032	2.148	-
Nitró (NO ₂ ⁻)	mg/L	0.050	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Bromuro (Br ⁻)	mg/L	0.035	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L	0.064	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	0.181	-
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/L	0.070	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Fosfato (PO ₄ ³⁻)	mg/L	0.032	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
pH a 25°C	pH	NA	8.14	8.23	7.82	8.35	8.22	-
(*) Dureza Total	mg/L	0.5	275.9	277.8	287.3	270.4	271.1	-
Nitrógeno Amoniacal	mgN-NH ₃ /L	0.017	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	8.3	15.4	10.7	10.7	13.3	15.9	-
(*) Color Verdadero	UC	4.0	7.7	7.7	9.4	9.4	7.7	-
(*) Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	0.5	4.5	4.9	3.9	6.4	5.4	-

Legenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

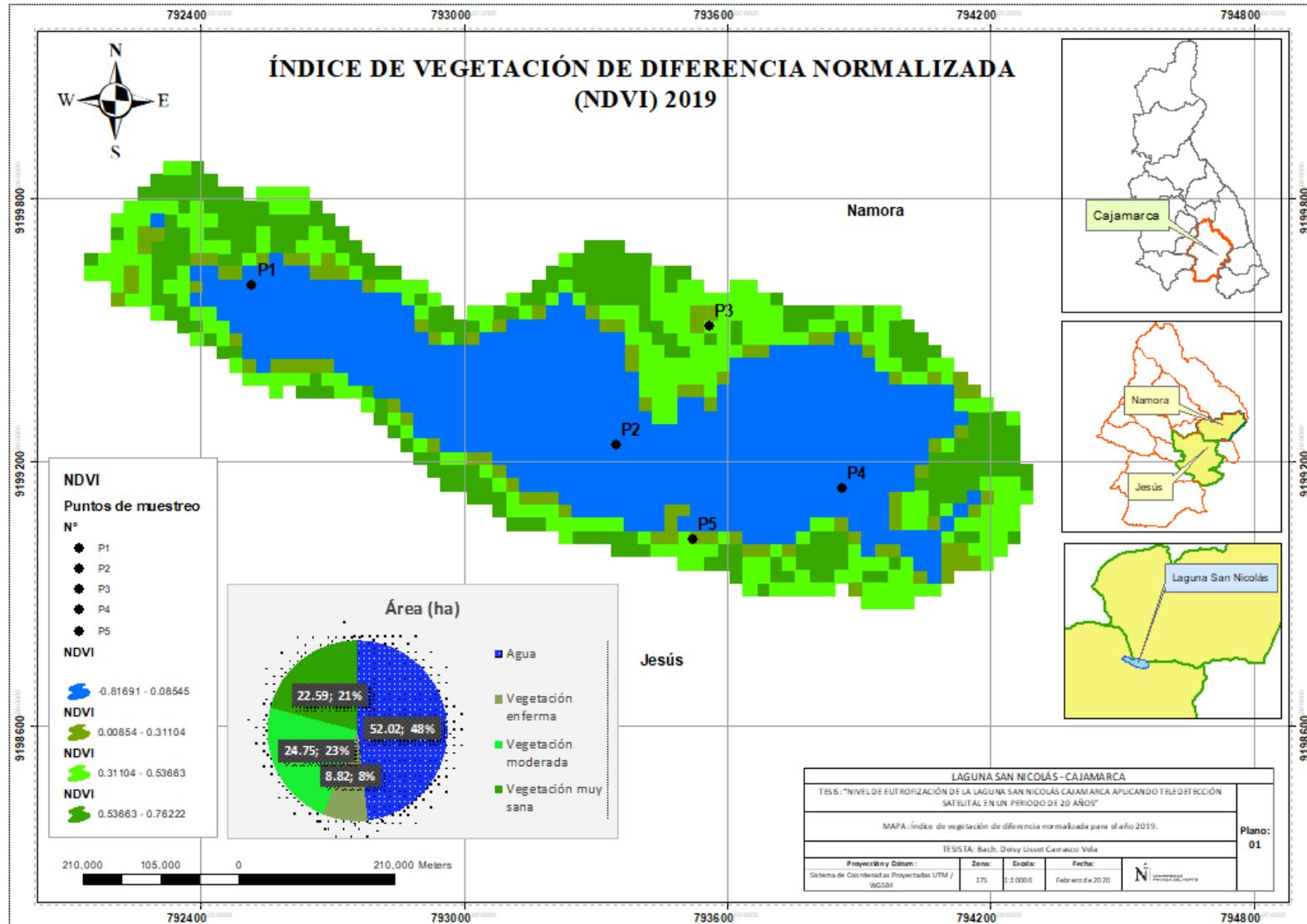
ENSAYOS			BIOLÓGICOS					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					-
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	1.8	70	23	22	33	17	-

Nota: Los Resultados >1.0, <1.8 y <1 significa que el resultado es equivalente a cero, no se aprecian estructuras biológicas en la muestra. VE, valor estimado

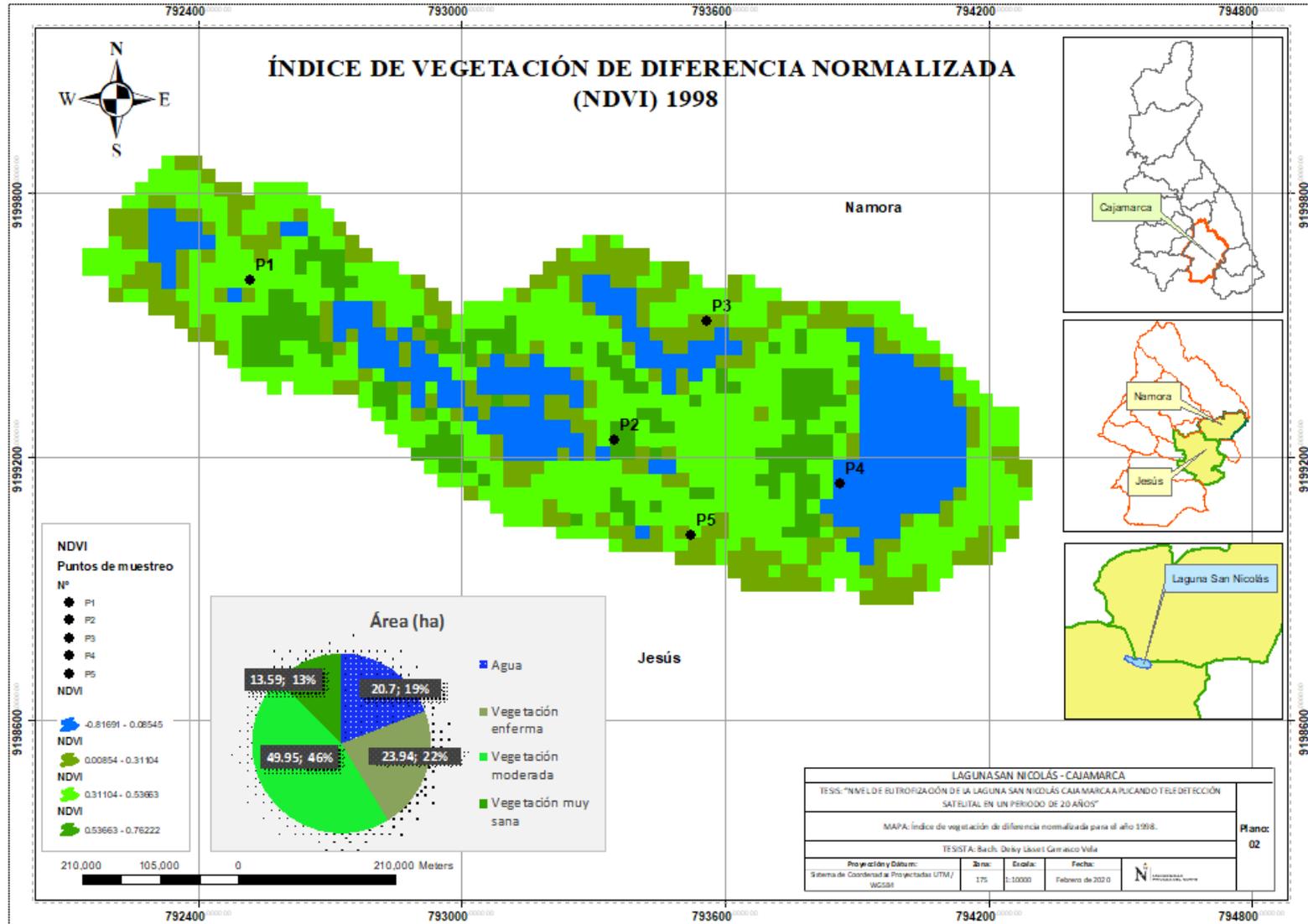
LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA

Cajamarca, 12 de Julio de 2019.

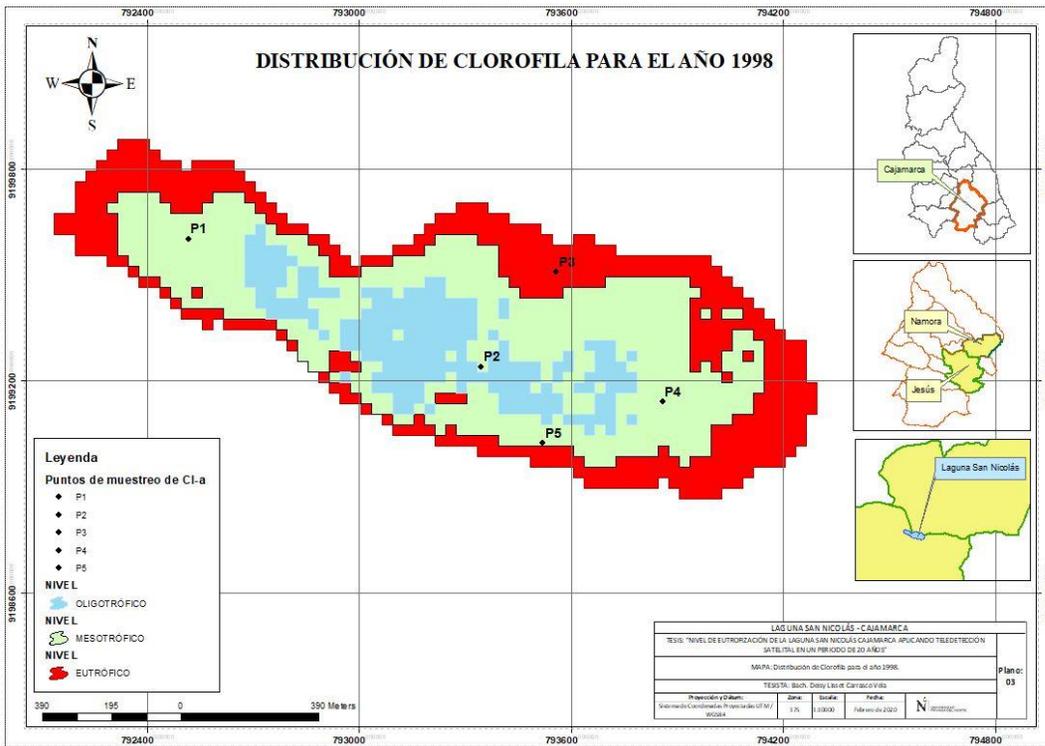
Anexo N°8. Mapa de distribución del NDVI para el año 2019.



Anexo N°9. Mapa de distribución del NDVI para el año 1998.



Anexo N°10. Mapa de distribución de cl-a para el año 1998.



Anexo N°10. Mapa de distribución de cl-a para el año 2019.

