

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efectos de la actividad agrícola ribereña en el
proceso de eutrofización de la laguna Pucush Uclo en
Chupaca 2010-2020**

Lesly Xiomara Diaz Valentin
Jhober Miguel Perez Condor

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darnos salud y sabiduría en el proceso para terminar nuestro trabajo de investigación.

A nuestras familias, por apoyarnos y motivarnos a terminar nuestra carrera universitaria y el presente estudio.

A nuestro asesor, por su apoyo constante y esmero en la revisión del avance y corrección de nuestro proyecto.

A nuestros docentes, presentes durante el desarrollo de nuestra carrera, por habernos enseñado a usar las herramientas que nos sirvieron en la realización de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, a mis padres y familia para demostrarles que su apoyo no fue en vano.

Lesly Xiomara Diaz Valentin

Dedico este trabajo de investigación a mi padre, a mi madre y hermanos por guiarme y estar siempre presentes en lo que me proponga.

Jhober Miguel Perez Condor

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	2
DEDICATORIA.....	3
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	14
1.1. Planteamiento y formulación del problema	14
1.1.1 Planteamiento del problema	14
1.1.2. Formulación del Problema	15
1.1.2.1. Problema general.....	15
1.1.2.2. Problemas específicos	15
1.2. Objetivos	16
1.2.1. Objetivo general	16
1.2.2. Objetivos específicos	16
1.3. Justificación.....	16
1.3.1. Ambiental.....	16
1.3.2. Social.....	16
1.3.3. Económico.....	17
1.3.4. Tecnológico	17
1.4. Hipótesis y descripción de variables.....	17
1.4.1. Hipótesis	17
1.4.1.1. Hipótesis general	17
1.4.2. Descripción de variables.....	17
1.4.2.1. Variable 1	17
1.4.2.2. Variable 2.....	18
1.4.3. Operacionalización de variables	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	20

2.1.	Antecedentes de la Investigación	20
2.1.1.	Antecedentes internacionales	20
2.1.2.	Antecedentes nacionales	22
2.1.3.	Antecedentes locales	24
2.2.	Bases teóricas.....	26
2.2.1.	Eutrofización en lagunas.....	26
2.2.2.	Procesos de Eutrofización	27
2.2.3.	Indicadores de Eutrofización	27
2.2.4.	Efectos de la Eutrofización en lagunas.....	31
2.2.5.	Agricultura	31
2.2.6.	Procesamiento de imágenes satelitales.....	34
2.2.7.	Imágenes Landsat	38
2.3.	Definición de términos	39
2.3.1.	Eutrofización	39
2.3.2.	Imágenes satelitales	40
2.3.3.	Teledetección	40
2.3.4.	Landsat	40
2.3.5.	NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada)	41
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		42
3.1.	Método y alcance de la investigación	42
3.2.	Diseño de la investigación	42
3.3.	Población y muestra	42
3.3.1.	Población.....	42
3.3.2.	Muestra	43
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		52
4.1.	Presentación de Resultados	52
4.1.1.	Variabilidad del Índice de vegetación de diferencia normalizada en Pucush Uclo .	52
4.1.1.1.	Comportamiento de los niveles del NDVI en la Subcuenca de la Laguna de Pucush Uclo	54
4.1.2.	Variabilidad del Índice de estado trófico de la laguna Pucush Uclo	56
4.1.2.1.	Índice del Estado Trófico con respecto al NDVI de la Subcuenca	58
4.1.3.	Variabilidad de la Turbiedad en la laguna Pucush Uclo	60
4.1.3.1.	Turbiedad con respecto a la actividad agrícola.....	62
4.1.4.	Variabilidad de DBO, DQO y Clorofila-a en la laguna de Pucush Uclo	63

4.1.5.	Efectos de la actividad agrícola en el proceso de eutrofización	64
4.1.5.1.	Clorofila - a con respecto a la actividad agrícola.....	66
4.2.	Prueba de Hipótesis	68
4.3.	Discusión.....	70
CONCLUSIONES		72
RECOMENDACIONES		74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		75
ANEXOS.....		81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de Valores del Estado Tráfico en lagunas (10).....	28
Tabla 2. Descripción de Bandas espectrales (28).....	38
Tabla 3. Valor de los indicadores y sus fórmulas.	45
Tabla 4. Estadísticas de fiabilidad en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-IET).....	68
Tabla 5. Correlación entre elementos en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-IET).....	68
Tabla 6. Prueba de Chi cuadrado en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-IET).....	68
Tabla 7. Estadísticas de fiabilidad en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-Turbiedad).....	69
Tabla 8. Correlación entre elementos en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-Turbiedad).....	69
Tabla 9. Prueba de Chi Cuadrado (NDVI-Turbiedad)	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imagen satelital importada en ENVI 5.3	46
Figura 2: Corrección radiométrica en ENVI 5.3	47
<i>Figura 3.</i> Corrección atmosférica en ENVI 5.3.....	48
<i>Figura 4.</i> Imagen satelital corregida en ENVI 5.3	48
Figura 5. Recorte de imagen satelital en ArcGis 10.5.....	49
Figura 6: Cálculo de indicadores o parámetros en ArcGis 10.5	50
<i>Figura 7.</i> Reclasificación de datos en ArcGis 10.5	50
Figura 8. Exportación de datos desde ArcGis 10.5	51
Figura 9. Mapas de los niveles de NDVI en épocas de lluvia, periodo 2010-2020	52
Figura 10. Mapas de los niveles de NDVI en épocas de estiaje, periodo 2010-2020.....	53
Figura 11. Niveles del NDVI en la subcuenca de la laguna de Pucush Uclo en épocas de lluvia, periodo 2010-2020.....	54
Figura 12. Niveles del NDVI en la subcuenca de la laguna de Pucush Uclo en épocas de estiaje, periodo 2010-2020.....	54
<i>Figura 13.</i> Mapa del IET en época de lluvias, periodo 2010-2020.....	56
Figura 14. Mapa del IET en época de estiaje, periodo 2010-2020.....	57
Figura 15. Representación de los porcentajes de nivel bajo, medio y alto de IET de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de lluvia en el periodo 2010-2020.	58
Figura 16. Representación de los porcentajes de nivel bajo, medio y alto de IET de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de estiaje en el periodo 2010-2020	58
Figura 17. Turbiedad en época de lluvia, periodo 2010-2020.....	60
Figura 18. Turbiedad en época de estiaje, periodo 2010-2020.....	61
Figura 19. Representación de los porcentajes de nivel bajo, medio y alto de la turbiedad de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de lluvia en el periodo 2010-2020.	62
<i>Figura 20.</i> Representación de los porcentajes de nivel bajo, medio y alto de turbiedad de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de estiaje en el periodo 2010-2020.....	62
Figura 21. Concentración promedio de la Clorofila-a, DBO y DQO en la laguna de Pucush Uclo, en épocas de lluvia	63
Figura 22. Concentración promedio de la Clorofila-a, DBO y DQO en la laguna de Pucush Uclo, en épocas de estiaje	64

Figura 23. Relación de los parámetros de la laguna y de la subcuenca de Pucush Uclo, épocas de lluvia.....	65
Figura 24. Relación de los parámetros de la laguna y de la subcuenca de Pucush Uclo, épocas de estiaje.....	65
Figura 25. Representación de los porcentajes de nivel alto de la Clorofila-a de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de lluvia en el periodo 2010-2020.....	66
Figura 26. Representación de los porcentajes de nivel medio de la Clorofila- a de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en época de estiaje en el periodo 2010-2020.	67

RESUMEN

Los agroquímicos incrementaron el aporte de nutrientes en los cuerpos de agua, alterando el proceso natural de eutrofización con efectos adversos en los ecosistemas. El objetivo de esta investigación es determinar los efectos de la actividad agrícola ribereña en el proceso de eutrofización de la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020, mediante el uso de imágenes satelitales, en épocas de lluvia y estiaje. La investigación es de tipo básico, de diseño no experimental, longitudinal descriptivo; la población y muestra ha sido determinada de forma no probabilística o dirigida. La evaluación de eutrofización se desarrolló mediante el análisis del IET (Índice de Estado Trófico) y turbiedad. Para conocer el comportamiento del estado de los cultivos se utilizó el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada).

Se clasificó los indicadores en nivel bajo, medio y alto que representan al estado oligotrófico, mesotrófico y eutrófico e hipertrófico respectivamente. En época de lluvia el porcentaje de nivel alto del NDVI aumento de 30 % a 50 %, del IET desde 10 % a 30 % y la turbiedad de 9 % a 19 %; en época de estiaje el aumento es mínimo. Complementariamente, se calculó la concentración de Clorofila-a, DBO y DQO, resultando que el porcentaje de nivel alto no presenta variación significativa en ambas épocas.

Se concluyó que el proceso de eutrofización está siendo afectado por las actividades agrícolas al observar que el incremento y el descenso del NDVI condiciona directamente el estado eutrófico e hipertrófico de la laguna; sin embargo, los indicadores de Clorofila-a, DBO y DQO no han sido alterados.

Palabras clave: Eutrofización, agricultura, imágenes satelitales, indicadores de eutrofización.

ABSTRACT

Agrochemicals increased the supply of nutrients in water bodies, altering the natural process of eutrophication with adverse effects on ecosystems. The objective of this research is to determine the effects of riverside agricultural activity on the eutrophication process of the Pucush Uclo lagoon in Chupaca 2010-2020, through the use of satellite images, in rainy and dry seasons. The research is of a basic type of descriptive longitudinal non-experimental design, the population and sample have been determined in a non-probabilistic or directed way. The evaluation of eutrophication will be developed through the analysis of the IET (Index of Trophic State) and Turbidity. To know the behavior of the state of the crops, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was obtained.

The indicators were classified in low, medium and high level that represent the oligotrophic, mesotrophic and eutrophic and hypertrophic state respectively. In the rainy season, the percentage of high level of NDVI increased from 30% to 50%, of IET from 10% to 30% and turbidity from 9% to 19%; in the dry season the increase is minimal, in addition the concentration of Chlorophyll-a, BOD and COD were calculated where the percentage of high level does not present significant variation in both seasons.

Concluding that the eutrophication process is being affected by agricultural activities, observing that the increase and decrease of NDVI directly conditions the eutrophic and hypertrophic state of the lagoon, however, the indicators of Chlorophyll-a, BOD and COD do not they are altered.

Keywords: Eutrophication, agriculture, satellite images, eutrophication indicators.

INTRODUCCIÓN

Según la FAO, el consumo de compuestos agroquímicos seguirá siendo indispensable para la producción, pese a su menor uso en comparación con años anteriores, sabiendo que estos constituyen uno de los problemas más resaltantes tanto en países desarrollados como en países en desarrollo, debido a su mal manejo, siendo usados en mayor cantidad de lo que los cultivos requieren; por ejemplo, en China se desperdicia el 50 % de fertilizantes nitrogenados por volatilización y 60 % por infiltración aproximadamente; estas acciones pueden aumentar la contaminación de diferentes cuerpos de agua mediante la eutrofización. En el transcurso de los años se ha ido multiplicando el número de lagos y lagunas expuestos a un envejecimiento acelerado debido a la injerencia humana. Entre las actividades más intervinientes se encuentra la agricultura, de la cual se desprenden nutrientes como fertilizantes y agroquímicos en los cuerpos de agua cercanos a estas áreas, por medio de escorrentías o el vertimiento directo de residuos orgánicos.

Esta problemática también se evidencia en las zonas agrícolas de los alrededores de la provincia de Chupaca-Junín, que cuentan con lagunas cercanas a la zona agrícola, siendo una de estas la laguna de Pucush Uclo ubicada a una altitud de 3230 m. s. n. m, por ende, es probable que sufra el incremento de eutrofización influenciada por la agricultura. Esta laguna es considerada como un albergue para muchas especies de avifauna y flora, también se desarrollan actividades de agroturismo por sus valores naturales y culturales; en esta zona la agricultura es la principal fuente de ingresos económicos que se desarrolla en diferentes épocas según la disponibilidad de riego y lluvias, la producción agrícola es variada y se destina al comercio local y autoconsumo.

La incidencia de la agricultura en el impacto ambiental (proceso de eutrofización) sobre el agua es posible de determinar al hacer uso de diversos indicadores. Normalmente la variación de estos indicadores de un año en comparación a un año anterior puede demostrar el deterioro o la mejoría del estado de un cuerpo de agua; la eutrofización como parte del problema tiende a desarrollarse con mayor facilidad en las lagunas con menores profundidades, que consiste en el incremento de vegetación debido al exceso de nutrientes. Para conocer el nivel de eutrofización se analizan indicadores como la turbiedad, la clorofila-a, índice de estado trófico, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno,

entre otros. Estos pueden ser calculados por diferentes métodos, uno de ellas es el análisis de imágenes satelitales o teledetección; estos son importantes ya que simplifican el trabajo, además de ser una herramienta indispensable en la actualidad para el monitoreo de procesos ambientales como por ejemplo la deforestación, cambios de biomasa o coberturas de suelo y la misma eutrofización.

Con el propósito de conocer las alteraciones medioambientales en las zonas destinadas a la agricultura, se desarrolla el presente estudio que aporta conocimiento a la comunidad científica y demás interesados acerca de la problemática ambiental de la laguna Pucush Uclo, debido a las actividades agrícolas que se desarrollan en las riberas o subcuentas de esta, además de ser un medio para ayudar a la gestión de recursos naturales por medio de propuestas de alternativas de solución a posibles problemas ambientales e incentivar inversiones en la conservación de la laguna.

El presente informe de investigación consta de cinco capítulos; Primero, el planteamiento del estudio, que abarca la problemática, objetivos, justificación y descripción de variables; el segundo capítulo es el marco teórico, contiene los antecedentes, bases teóricas y definición de términos; en el tercer capítulo se explica la metodología de la investigación; en el cuarto capítulo se presenta los resultados y la discusión; por último, se encuentran las conclusiones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

El agua, fuente importante para la vida en la tierra, es un recurso que se ha estado viendo afectado en gran manera por los residuos que se generan a partir de las actividades humanas, ya que estos aceleran la degradación de la calidad del agua. Uno de los principales efectos, la eutrofización, que implica la presencia de una alta cantidad de nutrientes en la laguna, ha provocado el crecimiento de algas y la disminución de oxígeno, lo cual afecta la vida acuática, llegando en algunos casos a generar un desequilibrio ecológico con efectos irreversibles (1). Entre todos los cuerpos de agua, las más afectadas por la eutrofización son las lagunas, las cuales son muy importantes ya que son uno de los principales recursos de agua dulce, que favorece a distintas especies acuáticas y plantas, sirve para consumo humano e incluso forman parte de los centros de atracción turística de un lugar, permitiendo el crecimiento económico de la zona.

En el Perú, algunos de los lagos más conocidos como el lago Titicaca y la laguna de Junín se han visto afectados por la eutrofización, siendo las principales causas la actividad agrícola y ganadera, el vertimiento de aguas residuales domésticas y la disposición de residuos sólidos alrededor de los lagos (2). El incremento poblacional y el interés de estas personas por generar mayores ganancias a base de sus sembríos los motiva a instalarse cerca de lagos y lagunas para facilitar sus actividades, es así que la agricultura se convierte en un principal causante de la eutrofización, debido al uso desmesurado de agroquímicos en el proceso de desarrollo de las plantas o cultivos. Cierta porcentaje de estos nutrientes como el fósforo o nitrógenos usados para acelerar estos procesos son arrastrados por lluvias o escorrentías llegando a lagos y lagunas.

La laguna de Ñahuinpuquio ubicada en Chupaca presenta el mismo problema de un enriquecimiento forzado de nutrientes. Esto debido a la actividad

turística, agrícola y pecuaria ribereña, sumado a tener como efluentes al lago Chaquipuquio y Ajospuquio, los cuales contienen altas cantidades de fertilizantes como urea y nitrato que provienen del lavamiento de tierras destinadas a la agricultura, además del vertimiento de residuos sólidos por los pobladores que se encuentran durante el recorrido de estos dos efluentes (3).

La laguna de Pucush Uclo, un lugar no solo considerado como recurso para el ecoturismo sino también como el hábitat de la avifauna y flora existente en la zona, es punto importante para mantener el equilibrio del ecosistema. Esta laguna se está viendo amenazada por el uso inadecuado de sus alrededores, generando problemas de eutrofización, lo cual podrían generar la pérdida parcial o total de especies que habitan en el lago, así como la disminución del ecoturismo, puesto que la atracción principal son las aves que forman parte del lago, disminuir la calidad de agua de la laguna y por ende la disminución de la superficie acuática, las aves que se albergan comenzarían a migrar y no volver a la laguna (4).

1.1.2. Formulación del Problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es el efecto de la actividad agrícola ribereña en el proceso de eutrofización de la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el incremento del índice diferencial normalizado de vegetación en el área destinada a la actividad agrícola ribereña alrededor de la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020?
- ¿Cuál es el incremento del índice de estado trófico de la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020?
- ¿Cuál es el incremento de turbiedad en la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020?
- ¿Cuál es el incremento de la DBO, DQO y clorofila-a en la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la actividad agrícola ribereña en el proceso de eutrofización de la laguna Pucush Uclo en Chupaca usando imágenes satelitales, 2010-2020

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la variabilidad del índice de vegetación de diferencia normalizada en el área destinada a la actividad agrícola ribereña alrededor de la laguna Pucush Uclo en Chupaca, 2010-2020
- Determinar la variabilidad del índice de estado trófico de la laguna Pucush Uclo en Chupaca, 2010-2020
- Determinar la variabilidad de la turbiedad en la laguna Pucush Uclo en Chupaca, 2010-2020
- Determinar la variabilidad de DBO, DQO y Clorofila-a en la laguna Pucush Uclo en Chupaca, 2010-2020

1.3. Justificación

1.3.1. Ambiental

El medio natural que nos rodea define y condiciona la forma de vida de los seres humanos, una pequeña alteración o contaminación provocaría un cambio en el bienestar de los lugareños tanto como en la biota de la laguna. Los resultados del estudio permitirán conocer el efecto de la agricultura que existe en el proceso de eutrofización de la laguna Pucush Uclo en Chupaca, así como la variabilidad porcentual de los niveles de eutrofización en el cuerpo de agua. Estos datos servirán para estudios posteriores donde se busque minimizar los impactos que se están dando sobre el recurso hídrico y así lograr que el hábitat sea adecuado para la avifauna y otras especies que vivan dentro de ella.

1.3.2. Social

La laguna de Pucush Uclo es un lugar turístico donde se puede observar diferentes especies de avifauna, por lo que es una zona de estudio e interés por esta característica. La laguna se presta para investigaciones futuras por la misma importancia que tiene para los pobladores del lugar. Por ello es

importante conocer el comportamiento o variabilidad que presenta la laguna en los últimos años y su relación con actividades humanas como la agricultura.

1.3.3. Económico

Esta investigación es importante ya que motivaría a los interesados en esta área a invertir en el cuidado de la laguna, lo cual beneficiaría a los lugareños incrementando el agroturismo en la zona y el consumo de sus productos debido a las visitas turísticas que se darán a la laguna, ya que esta, al recibir el cuidado apropiado para evitar un proceso de eutrofización, se verá más atractiva.

1.3.4. Tecnológico

Este estudio ayudará en el incremento de la propuesta de soluciones para disminuir la eutrofización y mejorar la calidad de la laguna Pucush Uclo, así como de otros cuerpos de agua. Con el aporte de información de esta investigación, será posible definir un panorama real de la salud de la laguna y crear propuestas específicas de restauración y preservación de funciones ecológicas y económicas.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis

1.4.1.1. Hipótesis general

H_0 = El efecto de la actividad agrícola ribereña no influye en el proceso de eutrofización en la laguna Pucush Uclo en Chupaca.

H_a = El efecto de la actividad agrícola ribereña influye en el proceso de eutrofización en la laguna Pucush Uclo en Chupaca.

1.4.2. Descripción de variables

1.4.2.1. Variable 1

La variable 1 está constituida por las actividades agrícolas ribereñas. Entre sus dimensiones se encuentra la producción agrícola anual

alrededor del lago, la cantidad de fertilizantes que se han usado y la extensión que se destina a estas actividades agrícolas.

1.4.2.2. Variable 2

La variable 2 es la eutrofización, sus dimensiones son la cantidad de nutrientes, que permitirá conocer si hay un incremento o disminución de estos y la cantidad de especies acuáticas que existe en el lago.

1.4.3. Operacionalización de variables

Tipo de Variable		Dimensión	Definición	Indicador	Unidad	Tipo Variable de	Escala
Variable interviniente	Actividades agrícolas ribereñas	Índice diferencial normalizado de vegetación (NDVI)	Indicador de cantidad, calidad y desarrollo de vegetación que permite estimar la cantidad y extensión de cultivos alrededor de la laguna Pucush Uclo.	Porcentaje del NDVI en nivel alto	%	Cuantitativa continua	Razón
Variable dependiente	Eutrofización	Índice de estado trófico (IET)	Indicador que clasifica a los cuerpos de agua de acuerdo con su estado trófico, relación entre el estado de nutrientes y crecimiento de la materia orgánica en la laguna.	Porcentaje del IET en nivel alto	%	Cuantitativa continua	Razón
		Turbiedad	Medida del grado en el que el agua pierde transparencia	Porcentaje de turbiedad	%	Cuantitativa continua	Razón

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

La tesis «Análisis comparativo de índices de eutrofización en lagunas costeras del estado de Sonora, México» realizada en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste S.C consistió en la evaluación del nivel de eutrofización de los lagos Guaymas, Lobos y el Tobarí. Estos presentan un incremento de nutrientes en sus aguas y presencia de macroalgas. Al ser evaluados los niveles de eutrofización fueron mesotrófico para Guaymas, oligotrófica para Lobos y mesotrófico para Tobarí (1).

En el artículo «Determinación de calidad de agua en el lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile», realizado en la Universidad Mayor de Chile, se estudió la calidad del agua del Lago Vichuquén en dos temporadas del 2016 usando imágenes satelitales de Landsat 8 y datos de laboratorio. Resultando un nivel eutrófico en verano con valores de clorofila de 14.1 ug/L y transparencia 3.7 m, mesotrófico en otoño con valores de clorofila de 5.5 ug/L y una transparencia de 2.5 m. Siendo las principales influencias la estacionalidad y el uso de suelo destinadas a actividades agrícolas alrededor del lago (5).

El artículo «Utilización de imágenes satelitales para comprender la dinámica lagunar en la Región Pampaneá» realizado en el Instituto de Oceanografía y el Departamento de Geografía y Turismo de Argentina, tuvo como objetivo el monitoreo de seis lagunas en la Región Pampaneá que pertenecen a diferentes regímenes pluviométricos puesto que son importantes para el hábitat de la flora y fauna. Concluyendo en que las Imágenes Spot y Landsat son muy útiles para visualizar el comportamiento tanto como la variabilidad de los lagos midiendo su reflectividad (6).

En el artículo «Análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos in-situ», realizado en el Instituto de Geografía, se busca medir parámetros como pH, temperatura, transparencia Secchi y clorofila-a.

Como resultado de las imágenes SPOT, se obtuvieron valores bajos de transparencia Secchi, pH entre 6.8 – 11.3 y concentraciones de clorofila-a entre 6.9 – 11.4 ug/L (7).

La tesis titulada «La eutrofización de los lagos y sus consecuencias, Ibarra 2008», realizada en Ecuador tuvo como objetivo reconocer y sistematizar los agentes contaminantes principales vinculados a la eutrofización de los lagos y sus respectivas consecuencias, mediante la búsqueda de diferentes fuentes bibliográficas; encontrándose que la causa más importante de eutrofización de los cuerpos de agua es la desmesurada entrada de nutrientes derivados de pesticidas y fertilizantes utilizados en la actividad agrícola e industrial que son arrasados por precipitaciones, infiltración de aguas residuales domésticas con un elevado contenido de nitrógeno y fósforo, sedimentos que producen turbiedad en los cuerpos de agua, la descomposición de materia orgánica y la contribución natural de nutrientes. Concluyendo en la descripción del desequilibrio ecológico y pérdida de calidad del agua en los lagos, incluyendo medidas preventivas y mejoras que se deben adaptar para dirigir a la población a tomar acciones de control y prevención frente a los efectos de eutrofización (8).

En la tesis titulada «Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota», realizado en la Universidad de Cantabria-España, se estudió las diferentes técnicas para observar de manera remota la calidad del agua en embalses y lagos, usando imágenes multiespectrales de los últimos satélites como Landsat 8 y Sentinel 2; siendo la variable de investigación principal la concentración de clorofila que indica los posibles problemas de eutrofización que afectan la calidad del lago. Para ello, analizaron las bandas relacionadas al espectro de reflectancia que califica la presencia de clorofila y así luego comparar con los datos *in situ* en los últimos años; concluyendo en que este tipo de métodos son de bastante utilidad al realizar monitoreo de cuerpos de agua que presentan indicios de eutrofización (9).

En el artículo «Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna Fuquene», realizado en la Universidad Jorge Tadeo Lozano con el objetivo de analizar la dinámica de la cubierta vegetal entre los años 1984 y 2003; se usaron herramientas de sistemas de información geográfica y sensorización remota, con lo cual se logró hallar que la superficie de espejo de agua se redujo en un 78.7 %, resultado bastante preciso debido al análisis multiespectral de imágenes satelitales que comprobó la pérdida del espejo de agua y desecación de la laguna como un fenómeno que afectó a la laguna Fuquene (10).

El artículo «Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico», realizado en la Universidad Autónoma del Estado de México, consistió en adentrarse en los conceptos de la eutrofización y la vulnerabilidad que sufren los recursos hídricos apuntando esta investigación a explicar las causas y consecuencias de la eutrofización. El estudio concluye que es de vital importancia desarrollar un monitoreo sistemático de la calidad de las lagunas con el fin de comprender su comportamiento de la tendencia hacia la eutrofización y formular acciones preventivas para esquivar la desaparición y deterioro de las lagunas u otros cuerpos de agua (11).

El artículo «Determinación de indicadores de eutrofización en el Embalse Río Tercero, Córdoba en Argentina», consistió en hallar el estado trófico del embalse Río Tercero entre los años 2003 al 2006. Para lo cual se hizo un análisis multivariado, se generó una matriz de correlación y se analizaron los componentes principales, como resultado se pudo contemplar el cambio de estado mesotrófico a eutrófico en el embalse para lo cual las variables más importantes que demuestran la variabilidad de los resultados fueron la clorofila-a, fósforo total y temperatura; además se comprobó que hay mayor florecimiento algal en épocas de lluvia (12).

2.1.2. Antecedentes nacionales

La tesis «Nivel de Eutrofización de la Laguna San Nicolás Cajamarca aplicando teledetección satelital en un periodo de 20 años» realizada en la Universidad Privada del Norte, tuvo como objetivo principal determinar el

nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás, en Cajamarca - Perú, utilizando imágenes satelitales desde 1998 hasta 2019, donde se logró evaluar el estado trófico mediante las concentraciones de turbidez y clorofila «a», y otros parámetros representativos, fisicoquímicos y biológicos; llegando a obtener que la laguna San Nicolás pasa de estado eutrófico a mesotrófico en un periodo de 20 años; con 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 ($r = -0.70$); concluyendo que el estado mesotrófico de la laguna San Nicolás presenta un nivel intermedio de nutrientes que se deben monitorear continuamente para predecir amenazas de eutrofización (13).

En la tesis titulada «Evaluación de la eutrofización de la Laguna Conococha-Ancash, Perú», se evaluó el nivel de eutrofización en agosto de 2012; aplicando metodologías para la determinación de fósforo total, nitrógeno en forma de nitrato, la transparencia y la clorofila-a; cada variable de manera individual (Organization for Economic Cooperation and Development, 1982, American Public Health Association, 1981 y Carlson-1977), determinando para temporadas de lluvia tanto como para estiaje; para el nitrato, 201,7 $\mu\text{g/l}$ y 230,0 $\mu\text{g/l}$, que se encuentra en un nivel trófico alto (eutrófico); para la clorofila-a, 46 $\mu\text{g/l}$ promedio anual, el nivel trófico es muy alto (hipertrófico), y para el disco de Secchi, transparencia con 0,69 m y 0,62 m, la laguna Conococha se encuentra en un nivel trófico muy alto (hipertrófico) en temporada de lluvia y estiaje respectivamente; concluyendo que el nivel de eutrofización de la laguna Conococha es de eutrófico a hipertrófico (2).

En el artículo «Análisis comparativo entre clorofila-a satelital e *in situ* en el ecosistema de afloramiento peruano, entre 1998-2007», se buscó conocer la relación entre clorofila-a *in situ* y satelital mediante un modelo de regresión lineal simple en diferentes estaciones del año utilizando el SeaWiFS, con el cual se obtuvo como resultado que estas variables tienen mejor ajuste en verano y mínimo ajuste en otoño. Este estudio ayuda a interpretar los datos

obtenidos por estaciones, siendo en el presente estudio, los datos de las épocas de lluvia más confiables que las de estiaje.

El artículo «Tratamiento de aguas eutrofizadas de la bahía interior de Puno, Perú, con el uso de dos macrófitas», tuvo como objetivo hallar los niveles de nitrógeno total y fósforo en las aguas que se encuentran en la bahía interior de Puno y evaluar cuán eficientes son las macrófitas *Elodea Canadensis* Michx (llacho) y la *Myriophyllum Quitensis* Kkuntz (hinojo), por lo que se usó el método *Kjedahl* para determinar el nitrógeno total y el método del ácido ascórbico para cuantificar el fósforo total. Se obtuvieron valores altos sobre el nivel aceptable de 2.21 mg NT/L de Nitrógeno total y 1.36 mg PT/L de Fósforo total, lo cual demuestra que las aguas de la bahía están eutrofizadas y comprobándose que es mayor la eficiencia de *Myriophyllum quitensis* en la remoción de Nitrógeno total y la eficiencia de la *Canadensis Michx* en la remoción de Fósforo total (14).

En la tesis «Estado del arte sobre los índices que determinan el nivel de eutrofización en lagunas altoandinas», se identificaron los índices que permiten reconocer el estado trófico en cuerpos de agua de las zonas alto andinas, para ello se utilizaron fuentes bibliográficas de diferentes investigaciones desarrolladas en estas zonas, considerando que sean mayores de 2300 msnm de altitud. Encontrando que en su mayoría los investigadores usaron el índice de OCDE-1982 debido a su uso simplificado y adaptable. También el índice de TSI, sin embargo, este presenta algunos cambios en las diversas investigaciones, concluyéndose que los indicadores dependen mucho de la zona por lo que no se puede determinar con exactitud cuál es el mejor o adecuado para indicar el nivel de eutrofización en las lagunas (15).

2.1.3. Antecedentes locales

En la tesis «Análisis del estado trófico mediante teledetección y datos “in situ” en la laguna de Paca, Jauja – Junín 2019», se tuvo como objetivo analizar el estado trófico mediante de teledetección y datos *in situ* en la laguna de Paca; para ello se evaluó el grado de eutrofización mediante 3 indicadores que son la clorofila A, fosfato y transparencia en días diferentes (24/04/2019

– 30/05/2019 y 14/11/2019), los datos se analizaron en laboratorio, tanto con teledetección con imágenes satelitales del Sentinel 1. En esta investigación se concluye que el estado trófico de la laguna de Paca Jauja - Junín, 2019, va de eutrófico a hipertrófico, la transparencia es el único indicador que señala que la laguna de Paca se encuentra en estado mesotrófico, teniendo en cuenta que la correlación entre las variables no fue mayor a 0.70, a diferencia de la Cl-A y el PO₄ que tienen correlaciones mayores o iguales a 0.90 (16).

En la tesis titulada «Estudio de los efectos de las actividades ribereñas de la Población en el Comportamiento de la laguna de Ñahuinpuquio – Chupaca», se tuvo como objetivo determinar los efectos de las actividades antropogénicas ribereñas en el comportamiento de la laguna de Ñahuinpuquio, teniendo como indicadores la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), nitratos (NO₃), amonio (NH₄), fósforo total, oxígeno disuelto, nitrógeno total como nitrato (N-NO₃); apoyándose en el método de investigación no experimental y de nivel de investigación descriptiva/explicativa, resultando la presencia de coliformes totales 689.3 NMP/100ML y E.coli 378 4 NMP/100ML, sobrepasando los límites máximos permisibles según la DS-002 2008 MINAM; y el análisis de fósforo total, nitrógeno total y nitrato indican que el nivel de eutrofización de la laguna de Ñahuinpuquio se encuentra en un estado trófico-mesotrófico (3).

En el artículo «Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad de la reserva nacional Lago Junín, Perú», el objetivo fue estudiar el impacto del agua residual a la calidad de los ecosistemas y su zona de influencia entre los años 2015-2017 de manera descriptiva. Encontrándose que la presión antrópica basada en actividades extractivas, pecuarias y agrícolas está por encima de la conservación y sostenibilidad del ecosistema, comprobándose la mala calidad del agua, con valores de DBO que superan el límite máximo permisible siendo este problema mayor en épocas de estiaje. Se concluyó que la causa principal es la descarga de aguas residuales, la cual afecta la vida acuática del lago (17).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Eutrofización en lagunas

Un lago o laguna es afectado por eutrofización cuando sus aguas se encuentran en condiciones no saludables debido a las altas cantidades de vegetación dentro del lago como algas y otros organismos, los cuales luego de pasar su etapa de muerte se desintegran dando a la laguna un olor y aspecto nauseabundo. El lago, al atravesar por este proceso de descomposición de nutrientes, desgasta el oxígeno disuelto y se convierte en un ecosistema menos capaz de sostener la vida acuática del lago (8).

Eutrofización se origina del griego «eu» que significa «bien» y «trophein» que viene a ser «nutrido». La eutrofización de lagunas consiste en el enriquecimiento por nutrientes del cuerpo de agua, el exceso de estos nutrientes provoca el crecimiento de algas y la muerte de estas genera malos olores en el lago, por lo tanto, la pérdida de la calidad del agua (15).

La forma en que se comporta la eutrofización en lagos puede variar un poco; sin embargo, el resultado es el mismo, las lagunas tienen por lo general entre 1m o menos de altitud, por lo que las plantas crecen y se desarrollan hasta llegar a la superficie y cubrirla por completo imposibilitando así el remar, nadar y pescar en el lago. El problema de la eutrofización ha afectado al 54 % de lagos asiáticos, 53 % de lagos europeos, 48 % en lagos de América del norte, 41 % de lagos sudamericanos y 28% de lagos africanos en el 2008 (8).

La eutrofización es el desarrollo natural de envejecimiento de un lago que se da de forma lenta hasta su propia desaparición, sin embargo, las actividades humanas han intervenido y apresurado este proceso (11).

2.2.2. Procesos de Eutrofización

El proceso de eutrofización se divide en 4 niveles, los cuales describen las características que ha alcanzado el agua a ese nivel.

2.2.2.1. Oligotrófico

Se ven algunas plantas acuáticas, el agua es clara y existe poca flora y fauna en el cuerpo de agua. El nivel de producción biológica es bajo, además de tener menos de 3ug/L de clorofila-a, menos de 15 ug/L de fósforo, menos de 400 ug/L de nitrógeno total y 4m de claridad del agua (18).

2.2.2.2. Mesotrófico

Tiene un nivel moderado de productividad biológica, hay claridad del agua y presencia de plantas. Las consideraciones son entre 3-7 ug/L de clorofila-a, fósforo entre 15-25 ug/L, nitrógeno entre 400-600 ug/L y claridad de agua entre 2.5-4 m (18).

2.2.2.3. Eutrófico

Hay un alto nivel de productividad biológica, poca claridad de agua, plantas en abundancia. Con valores de clorofila-a entre 7-40 ug/L, fósforo entre 25-100 ug/L, nitrógeno entre 600-1500 ug/L y claridad de agua entre 0.9-2.5 m (18).

2.2.2.4. Hipertrófico

Se ve alta productividad biológica, alta cantidad de plantas y bajo nivel de agua. Con valores mayores a 40 ug/L para clorofila-a, mayor a 100 ug/L para fósforo, mayor a 1500 ug/L para nitrógeno y menor a 0.9 m para claridad del agua (18).

2.2.3. Indicadores de Eutrofización

2.2.3.1. Índice de estado Trófico (IET o TSI)

El índice de estado trófico cataloga los cuerpos de agua en diferentes estados tróficos, más usado en lagos y reservorios. Las variables que esta usa son la profundidad de visión del disco de Secchi, la clorofila-a y concentraciones de fósforo total. El valor de este índice en un lago se encuentra en una escala de 0 a 100. Este índice fue uno de los primeros en ser propuesto y utiliza básicamente el disco de Secchi para medir la transparencia del agua (18).

Tabla 1. *Escala de Valores del Estado Trófico en lagunas* (18)

TSI	Transparencia D (m)	P (mg/m3)	Clorofila- a (mg/m3)	Estado trófico y características
0	64	0.75	0.04	Oligotrófico: buena
10	32	1.5	0.12	oxygenación en
20	16	3	0.34	todo el año en el
30	8	6	0.94	hipolimnion, aguas claras.
40	4	12	2.6	Oligotróficos: con periodos de
50	2	24	6.4	anoxia en el fondo.
				Mesotrófico: mayor probabilidad de anoxia, aguas moderadamente claras, turbidez y problemas de olores.

60	1	48	20	Eutrófico: cianobacterias, proliferación de microfitos y espuma de algas
70	0.50	96	56	Hipertrófico:
80	0.25	192	154	mayor densidad de algas y macrófitas.
90	0.12	384	427	Espuma de algas y
100	0.06	768	1183	reducción de diversidad de macrófitas
		TSI ps/Z	2xTSI	

2.2.3.2. Clorofila-a

Esta molécula pertenece al 75% de pigmentos verdes que se ven en la naturaleza (19). La concentración de clorofila-a permite estimar la biomasa de las comunidades Fitoplanctónicas, el cual es el pigmento principal fotosintético presente en las algas. Esta permite conocer el grado de contaminación de los cuerpos de agua y el índice del estado fisiológico del fitoplancton (20).

Existen diferentes métodos para cuantificar la clorofila, los métodos cromatográficos modernos permiten que la cuantificación de clorofila-a sea más exacta. Sin embargo, es limitado el acceso a este tipo de tecnologías debido a su alto costo. En cambio, el método espectrofotométrico es más utilizado ya que el equipo es de fácil acceso (20).

2.2.3.3. Turbidez y transparencia del Agua

Es una medida que permite conocer la calidad y el estado trófico del agua a simple vista de las personas. Para su respectiva medición se usa el Disco de Secchi, el cual es el método que más se utiliza (21). La transparencia del agua es conocida como el límite de la zona fótica (5).

La presencia de materia suspendidas desde coloidales hasta macroscópicas en estado gaseoso, sólido y líquido reduce la claridad del agua, así también es una herramienta que permite conocer hasta qué punto, como cuándo se debe aplicar determinados tratamientos en los cuerpos de agua y cumplir especificaciones requeridas (8). Cuando cierta masa de agua tiene escasa cantidad de nutrientes, el agua es muy transparente lo cual es bueno porque permite la penetración de rayos solares permitiendo la coexistencia entre algas y otros seres vivos dentro del agua (11).

2.2.3.4. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y Demanda química de oxígeno (DQO)

La DBO es la cantidad de oxígeno necesario o lo que se requiere para oxidar la materia orgánica biodegradable o contaminantes orgánicos y la DQO representa al oxígeno requerido y consumido para oxidar los contaminantes inorgánicos; siendo ambos indicadores de la calidad de agua, a mayor concentración de estos parámetros mayor será la disponibilidad o cantidad de oxígeno que servirá para procesar nutrientes por los organismos aerobios. El aumento de DBO es una consecuencia de la eutrofización en las lagunas debido a la presencia de materia orgánica, plantas o flora acuática (algas) que libera más oxígeno del que usa y absorbe más dióxido de carbono del que libera y, de forma contraria,

durante la noche puede causar la muerte de peces y/o especies acuáticas (3).

2.2.4. Efectos de la Eutrofización en lagunas

Al haber eutrofización en un lago, se puede percibir el incremento de producción de fitoplancton y macrófitas, también la variación de la calidad del agua por una menor. La pérdida de oxígeno en el agua que se da por este incremento, extiende la tasa de mortandad de peces y especies dentro del lago. Además, se puede experimentar la presencia de mal olor y sabor en el agua, la disminución de posibilidades de usar el agua con propósitos recreacionales (8).

El crecimiento de plantas en el fondo de la laguna desaparece mientras crecen otras en la superficie, permitiendo el incremento de fitoplancton. Otros cambios que se dan son los químicos que consisten en la disminución de oxígeno disuelto a 9 mg/L o hasta 4 mg/L, el cual tiene un efecto inmediato en los organismos. Si el valor llega a disminuir hasta 2 mg/L, significaría el fin de todos los animales dentro del lago. También hay un incremento de la DBO, compuestos nitrogenados, fosfatos entre otros elementos químicos (8).

2.2.5. Agricultura

La agricultura es la actividad agraria de labranza o cultivo de la tierra e incluye todos los trabajos relacionados al tratamiento del suelo y a la plantación de vegetales, comprende todo un conjunto de acciones humanas que transforma el medio ambiente natural, con el fin de hacerlo más apto para el crecimiento de las siembras. Las actividades agrícolas suelen estar destinadas a la producción de alimentos y a la obtención de verduras, frutas, hortalizas y cereales. La agricultura implica la transformación del medio ambiente para satisfacer las necesidades del hombre (19).

2.2.5.1. Efectos de la Agricultura

La agricultura realiza, más allá de su función convencional de producir alimentos y materias primas, importantes funciones relacionadas con la provisión de bienes públicos que, por lo general, tienen el carácter de externalidad vinculada a la actividad agraria. Estos bienes pueden tener un carácter predominantemente económico y social desarrollo rural o medioambiental protección de la biodiversidad o de valores paisajísticos (22). Sin embargo, la agricultura ejerce una presión sobre el medio ambiente, que ha aumentado desde 1990. En gran medida esto se debe al acelerado crecimiento de la producción agraria y al mayor consumo de insumos como fertilizantes, plaguicidas, agua y energía sobre una superficie agrícola cada vez menor. En general, la agricultura se está intensificando, con ello genera problemas medioambientales como la erosión del suelo, y la escasez y contaminación del agua, principalmente la eutrofización (23). Es considerada una de las actividades antropogénicas más peligrosas que afectan la calidad de agua o la contaminan, la agricultura aporta fertilizantes y restos orgánicos (Fósforo, nitrógeno, metales, agentes, patógenos, sedimentos, plaguicidas, sales y oligoelementos) (18).

Según la Dirección Regional de Agricultura, Junín, en la Provincia de Chupaca el rendimiento de la producción de papa y maíz, los principales productos que a mayor escala se fructifican, ha aumentado de 13 502 Kg/ha a 18 347 Kg/ha y de 1 556 Kg/ha a 2592 Kg/ha, respectivamente, desde el 2006 hasta el 2013, lo cual perdura hasta los últimos años con rendimiento similar (24).

2.2.5.2. Indicador NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada)

El NDVI es el índice de vegetación más conocido y usado para determinar la vigorosidad de las plantas en función de la energía reflejada o absorbida, basado en el comportamiento radiométrico de la vegetación, en la respuesta espectral suscitada por la fotosíntesis y estructura foliar de la planta. Son medidas cuantitativas con valores digitales, calculadas mediante la operación de bandas espectrales, generando un valor para cada píxel que indica el vigor o la cantidad de vegetación, las plantas reflejan o emiten determinada radiación dependiendo de su estado de salud (25).

El uso del NDVI en la agricultura se ha vuelto fundamental para el monitoreo, vigilancia y estudio de los cultivos relacionados a su desarrollo, vigorosidad, afectación de plagas y otros riesgos; las observaciones mediante estos índices ayudan en la toma de decisiones respecto a la intensidad de producción agrícola, inventariado de áreas cultivadas en grandes superficies y la evolución de los cultivos. En las riberas de la Laguna Pucush Uclo o la subcuenca se desarrolla de manera continua e intensa la agricultura con productos de papa y maíz; con insumos indispensables como fertilizantes y plaguicidas, los cuales son principales causas de posibles eutrofizaciones en dicho lugar.

2.2.5.3. Uso de fertilizantes

Es difícil estimar exactamente la contribución de los fertilizantes minerales al aumento de la producción agrícola, debido a la interacción de muchos otros factores importantes. No obstante, los fertilizantes continuarán jugando un papel decisivo, y esto sin tener en cuenta cuáles tecnologías nuevas pueden aún surgir; la contribución de los fertilizantes en el incremento de las producciones agrícolas, y en consecuencia en la producción de alimentos, fibra e incluso de energía,

contrasta severamente con el carácter negativo de la información que se ha dado en algún momento. Cuando los fertilizantes se utilizan de forma racional, principio intensamente fomentado por la industria de fertilizantes, sus efectos son favorables y esenciales para la fertilidad del suelo, para el rendimiento y calidad de las cosechas, para la salud humana, aportando los elementos esenciales al metabolismo, y el medio ambiente; en un período de 25 años en 40 países, mostró que el aumento promedio ponderado del mejor tratamiento de fertilizantes para ensayos de trigo era alrededor del 60 por ciento (26). Sin embargo, el manejo inadecuado de estos fertilizantes ha generado muchos problemas en el medio local como exterior, una de las dificultades más resaltantes es la eutrofización, desarrollada en cuerpos de agua que interactúan o colindan con la agricultura.

2.2.6. Procesamiento de imágenes satelitales

Para el desarrollo del presente estudio, se utilizaron imágenes satelitales tomadas por los sensores equipados en satélites *Landsat*. El ojo humano es el sensor natural que percibe la información de la superficie terrestre, no obstante lo anterior, el ojo posee limitaciones, una de ellas es que solo se puede ver a través de una región espectral visible, la otra limitación es que en la oscuridad el ojo humano no es capaz de percibir objetos y si lo hace es con mucha dificultad. Al contrario de esto, los sensores que se encuentran en los satélites artificiales son multiespaciales e hiperespectrales, esto permite registrar diferentes longitudes de onda o lo que se denomina *bandas del espectro electromagnético*, para tal efecto el estudio se vale de una serie de programas especializados y una vez obtenidos los datos se procede a realizar el estudio. Lo que se intenta es que, con el insumo de grandes cantidades de datos, se descubran cúmulos de información a partir de las bases que posee esta investigación, es decir, se realizará minería de datos y se va a utilizar para ello el aprendizaje supervisado que es el análisis discriminante en el que

un patrón de entrada está asignado para una clase predefinida. Para realizar la minería de datos se va a utilizar una red neuronal (27).

2.2.6.1. Selección y descarga de imágenes

Las imágenes Landsat pueden ser seleccionadas y descargadas de manera gratuita del servidor de EROS (Earth Resources Observation and Science Center), de la misma forma se pueden obtener datos Landsat del programa Global Land Cover Facility de la Universidad de Maryland. Para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales se debe descargar la mayor cantidad de escenas disponibles, preferentemente con menor cobertura de nubes para los años en los que se va a determinar o analizar los cambios (28).

2.2.6.2. Apilamiento de las bandas

Una vez descargados los datos es necesario reconstruir cada imagen mediante la unión de todas las bandas, descartando las que corresponden a la longitud de onda del Infrarrojo térmico; en el caso de Landsat 8 OLI las capas de Aerosoles y Cirrus pueden también ser excluidas (29).

2.2.6.3. Corrección Geométrica

Corregir las distorsiones en las imágenes recibidas relacionadas con la curvatura y la rotación de la Tierra, la exploración del sensor y de las variaciones de la plataforma (29).

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada píxel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento

digital de imágenes. El proceso de georreferenciación consiste en dar a cada píxel su localización en un sistema de coordenadas estándar (UTM, Lambert, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud. En caso de que la imagen no hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo, sin embargo una imagen puede sufrir diversos tipos de distorsiones (30).

2.2.6.4. Conversión de los datos a Superficie de reflectancia

Los valores de los píxeles de las imágenes se encuentran generalmente en unidades de niveles digitales y se deben transformar en unidades de energía reflejada, lo que se conoce como calibración radiométrica. Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información tanto de la superficie terrestre como de la atmósfera, se requiere aplicar una corrección que minimice los efectos atmosféricos en los valores de cada píxel, obteniendo una imagen de superficie de reflectancia. Esta superficie tiene una mayor consistencia en las respuestas radiométricas dentro y entre imágenes, permitiendo la aplicación de procesos y modelos estándar para todas las escenas y fechas analizadas (31).

2.2.6.5. Enmascaramiento de nubes y agua

Las imágenes de superficie de reflectancia deben ser depuradas de tal forma que cada escena conserve únicamente los píxeles que contienen información de la cobertura de la Tierra, enmascarando y eliminando las áreas de nubes, bandeamiento, sombras o bruma. Para garantizar la

eliminación de estos píxeles, resulta apropiado combinar los resultados de las máscaras producidas con diferentes herramientas. También puede ser conveniente remover los píxeles de los cuerpos de agua para evitar las falsas detecciones de cambio debidas a las variaciones estacionales del nivel del agua en bosques inundables (29).

2.2.6.6. Normalización radiométrica

El análisis y la detección de cambios en la cubierta del terreno mediante imágenes multitemporales puede complicarse debido a la presencia de diferencias radiométricas entre las diferentes imágenes. Estas pueden originarse debido a variaciones en las condiciones atmosféricas y al ángulo de iluminación del sol, así como a variaciones en la sensibilidad de los sistemas de detección o en el procesado de los datos en los centros de acopio. La normalización radiométrica entre las imágenes de los dos años de análisis ajusta las señales radiométricas de un año respecto al otro, de forma que sean consistentes y se reduzca la variabilidad debida a diferencias atmosféricas, de iluminación, calibración del sensor, distorsiones geométricas, etc.; permitiendo así que las imágenes sean realmente comparables y los cambios detectados no se deban a este tipo de factores (32). Una forma de normalizar es ajustando la media y desviación estándar de cada banda de la imagen del segundo año a los valores de la banda respectiva del compuesto de referencia de la primera fecha, para lo cual se recomienda generar códigos de programación o modelos en los programas de procesamiento de imágenes.

2.2.7. Imágenes Landsat

Las imágenes LANDSAT poseen en general 11 bandas, pero para efectos de este estudio solo se van a utilizar bandas seleccionadas, las cuales conforman una sola imagen, pero cada una de estas bandas tiene información muy grande que permite diferenciar unos atributos específicos; para analizar las imágenes se debe separar bandas y extraer sus características. Los satélites LANDSAT fueron lanzados desde el año de 1972, hasta la fecha se han realizado 8 lanzamientos, de los cuales, cinco han finalizado, Landsat 6 no pudo llegar a órbita, pero Landsat 7 alcanzó el objetivo desde 2003 con la línea del corrector de exploración defectuosa y Landsat 8 se mantiene actualmente operativo (33).

Tabla 2. Descripción de Bandas espectrales (28)

Bandas	Descripción
Banda 1: (0,45 a 0,52 micrones – también llamada Banda azul, debido a que es la porción correspondiente al color azul del espectro electromagnético)	Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo, coníferas y latifoliadas. También es utilizada para realizar índices que sirven para diferenciar los diversos tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.
Banda 2: (0,52 a 0,60 micrones correspondiente al color verde)	Diseñada para evaluar el vigor de la vegetación - sana. Esto se debe a que existe un pico relativo de reflectancia (o radiancia) en la vegetación con buen estado o vigorosa. Útil también para diferenciar tipos de rocas, que al igual que la banda 1 utilizada con índices minerales, puede detectar, como, por ejemplo, la existencia de limonita.

Banda 3: (0,63 a 0,69 micrones - color rojo)	Es una banda que exhibe un pico relativo de absorción de la clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. Al igual que las anteriores dos, sirve en la diferenciación de los distintos materiales del suelo.
Banda 4: (0,76 a 0,90 micrones - infrarrojo cercano)	Para el caso de análisis de la vegetación, puede ser muy útil para determinar el contenido de biomasa, a su vez también puede ser utilizado para la delimitación de cuerpos de agua debido a la absorción de esta porción del espectro por el agua. Al igual que las anteriores bandas es muy útil para la discriminación de las rocas.
Banda 5: (1,55 a 1,75 micrones - infrarrojo medio)	Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.
Banda 6: (10,40 a 12,50 micrones - infrarrojo termal)	El infrarrojo termal es útil en el análisis del estrés de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo termal.
Banda 7: (2,08 a 2,35 micrones - infrarrojo medio)	Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidroxilos (OH) y la absorción de agua.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Eutrofización

Degradación ambiental natural de los lagos y lagunas, generado por el aumento de la concentración de nutrientes, principalmente de nitrógeno y fósforo, lo que ocasiona una proliferación y posterior acumulación de algas y plantas acuáticas (34). La eutrofización es una de las principales problemáticas que actualmente afecta al recurso hídrico, este fenómeno se ha

expandido a nivel mundial y se está convirtiendo en uno de los temas prioritarios para atender por parte de los investigadores, ya que en la actualidad este problema ha afectado a numerosos cuerpos de agua (11).

2.3.2. Imágenes satelitales

Una imagen satelital es el resultado que se obtiene de capturar la radiación emitida o reflejada por la superficie de la tierra mediante un sensor colocado a bordo de un satélite artificial. Existen diferentes tipos de imágenes satelitales, las cuales poseen varias características como colores, resolución, elevación, etc. En sí, la calidad de la fotografía tomada depende del instrumento utilizado y de la altitud. La desventaja de las imágenes satelitales es que, cuando la imagen a cubrir es extensa, el procesamiento es bastante largo, además la imagen depende notablemente de la calidad de sensor que se esté utilizando, la imagen siempre se ve influenciada por las condiciones meteorológicas al momento de realizar la toma (33).

2.3.3. Teledetección

La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra (27). Es la recopilación de información de la superficie terrestre sin entrar en contacto con ella, actualmente se realiza mediante sensores a bordo de satélites aerotransportados, dichos sensores miden la cantidad de radiación electromagnética que refleja la superficie de la tierra y los objetos que hay en ella (33). Hoy en día, gracias a la disponibilidad de imágenes y al desarrollo de nuevas tecnologías, son cada vez más las empresas y organismos públicos que incorporan el uso sistemático de imágenes en sus distintos proyectos, ya que pueden resultar muy ventajosas para un gran número de aplicaciones: extracción de información, detección de cambios, agricultura (rendimiento de cultivos), vulcanología, monitorización de desastres naturales, etc.

2.3.4. Landsat

La misión Landsat, es la misión vigente más extensa y exitosa desarrollada para la observación de la Tierra. Data del año 1972 cuando se lanzó el primer satélite Landsat 1, y actualmente se encuentran en vigencia los sensores Landsat 7 y 8. Las más de cuatro décadas de información colectada por los diferentes satélites que ha tenido la misión convierten a Landsat en una excelente herramienta para estudios asociados al cambio climático, geología o a los cambios en el uso de la tierra. La información colectada por los satélites Landsat, específicamente de los satélites Landsat 7 y 8, puede ser utilizada para obtener cobertura, nivel y de temperatura de suelos. Como todos los sensores ópticos, su mayor limitante es la cobertura de nubes, que puede afectar en mayor medida la línea temporal de los datos, dada la revisita de estos sensores (16 días aproximadamente) (4).

2.3.5. NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada)

El NDVI es un indicador del estado de salud de las plantas, resultante del procesamiento y análisis de imágenes satelitales, es decir, la respuesta espectral entre el espectro visible (Banda roja e Infrarrojo cercano-NIR). En el NIR, la energía es reflejada en mayor cantidad por las paredes de las células llenas de agua y en el visible la mayor parte de la energía lo absorbe el pigmento; por lo tanto, cuando las plantas presentan estrés por plagas o sequías, las paredes celulares carecen de agua por lo que reflejan menor cantidad de energía, esto hace que la reflectancia espectral del NIR disminuya y aumente el rojo al tener menor absorción en la clorofila, existe una relación inversa entre los valores que reflejan en las dos bandas, interpretándose la salud de la cubierta vegetal de acuerdo a la respuesta espectral (25).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

El presente estudio es una investigación de tipo básico, siendo el alcance de la investigación mixta de nivel descriptivo y correlacional. Se pretende recoger información de manera independiente o conjunta sobre las variables, mediante el análisis e interpretación de imágenes satelitales, además, se busca conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular (35). En este caso se busca evaluar los efectos que tiene la agricultura ribereña en el proceso de eutrofización de la laguna Pucush Uclo, como también se busca conocer el comportamiento que presenta la laguna a efectos de la eutrofización, mediante un análisis, a través del uso de imágenes satelitales.

3.2. Diseño de la investigación

La investigación es de diseño no experimental longitudinal descriptivo, por tanto, no hay la manipulación de variables, lo que hace es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para analizarlos y se desarrollará en un determinado tiempo con el propósito de describir variables, analizar e indagar la incidencia de las modalidades o niveles de una o más variables en una población (35). En este estudio se analizará los efectos que pudiese tener la actividad agrícola en la laguna de Pucush Uclo, en los últimos años.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población está constituida por la superficie territorial de la provincia de Chupaca donde está situada la laguna de Pucush Uclo. En esta investigación, se utilizará una muestra característica de la población, determinada de forma no probabilística, con muestreo por conveniencia, debido a que el lugar de trabajo determinado es una sección o territorio, específicamente las riberas de la laguna (3,1 Km²) y la laguna en sí (0,15 Km²), que se encuentra ubicada en la jurisdicción de Chupaca, entre los distritos de San Juan de Iscos, Chupaca y Chongos bajo a 3263 m s. n. m. con las siguientes coordenadas 470434mE y 8662123.64mS.

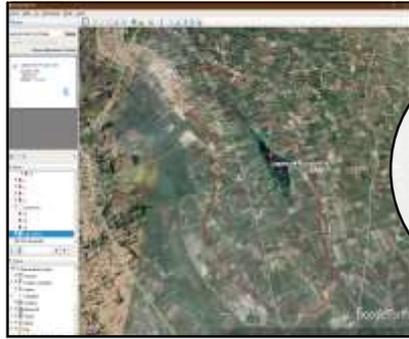
3.3.2. Muestra

Para Hernández (2010) la muestra es un subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de esta, además se puede optar por un muestreo no probabilístico o dirigido, en el que la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de las características de la investigación (35). Por lo tanto, la muestra para la investigación es la misma que la población (las riberas de la laguna Pucush Uclo y la laguna en sí) ya que para analizar o procesar las imágenes satelitales es necesario trabajar en toda el área de la laguna y subcuenca según cada indicador.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos se ha utilizado portales satelitales y software de sistema de información geográfica.

- **Google Earth**
Es una aplicación gratuita creada inicialmente por Keyhole Inc. y adquirida por Google en 2004, dispone de múltiples características como imágenes de todo el mundo, datos sobre una localización geográfica, búsqueda de lugares y direcciones, edificios en tres dimensiones, etc. (36)
- **ArcGIS 10.5**
Esta aplicación fue diseñada por la empresa ESRI (Environmental Systems Research Institute). Es un aplicativo no gratuito pues se paga por las licencias que se comercializan, como Arcinfo, ArcEditor y ArcView. Estas se encuentran bajo el nombre ArcGIS Desktop (37).
- **ENVI 5.3**
Es un programa creado sobre el lenguaje IDL (Interactive data language), sirve para la visualización, análisis y presentación de todo tipo de imágenes satelitales. para realizar análisis espectral, corrección geométrica, clasificación multiespectral, georreferenciación de imágenes y capacidad GIS para raster y vector (38).
En el siguiente esquema se muestra el proceso de recolección y análisis de datos.



Ubicación y delimitación del área de estudio

Realizado mediante Google Earth.

Área de la Laguna:
0.15 Km²

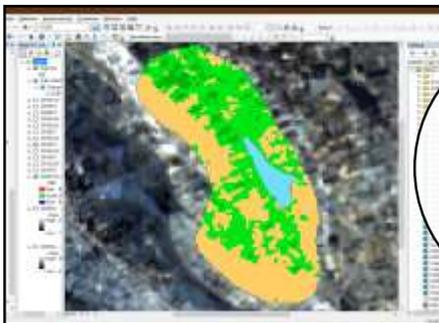
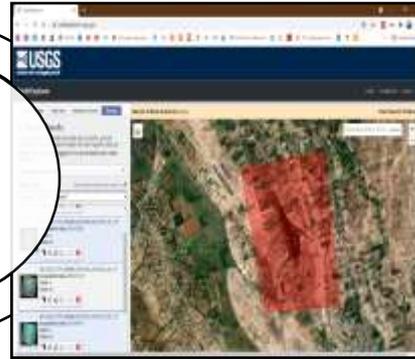
Área de la ribera o subcuenca Pucush Uclo:
3.12 Km²

Mediante la plataforma satelital de USGS Earth Explorer.

Periodo 2010 -20112:
Landsat 7

Periodo 2014-2020:
Landsat 8

Descarga de imágenes satelitales



Procesamiento de imágenes satelitales

Correcciones radiométricas y geométricas:
ENVI 5.3

Análisis de los parámetros con la operación de Bandas:
ArcGis 10.5

El análisis complementario, generación gráficos e interpretación de los resultados, se desarrolló en Excel.

Presentación de resultados



- Las imágenes satelitales fueron analizadas en los años pares del periodo 2010-2020, en las épocas de lluvia (enero –junio) y estiaje (julio-diciembre).
- Se trabajó con imágenes satelitales de Landsat 7 para los años 2010 y 2012, y de Landsat 8 para los años 2014, 2016, 2018 y 2020.

3.4.1. Indicadores

- Para la interpretación de los datos se han clasificado o agrupado en tres niveles para cada parámetro, como se muestra en la Tabla 3. Para realizar el análisis de los resultados se trabajó con el nivel alto de cada indicador, puesto que este incluye el estado de eutrofización eutrófico e hipertrófico.

Se ha trabajado con las bandas:

- B2: Banda color azul
- B3: Banda color verde
- B4: Banda color rojo
- B5: Banda del infrarrojo cercano
- B6: Banda del infrarrojo medio (SWIR 1)

Tabla 3. Valor de los indicadores y sus fórmulas

Indicador	Nivel	Valor	Cálculos en ArcGIS
NDVI	Bajo	<0	$\text{NDVI L8} = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$
	Medio	0 - 0.6	
	Alto	>0.6	
IET o TSI	Bajo	<30	$\text{IET L8} = -2.6047 * (B3) + 0.5671 * (B4) + 2.9817 * (B5)$
	Medio	30 – 60	
	Alto	>60	
Turbiedad	Bajo	<0.9 m	$\text{T L8} = 6.1437 * (B3) - 2.702 * (B4) + 5.1736 * (B5) - 5.8274 * (B6)$
	Medio	0.9 – 4	
	Alto	> 4 m	
Clorofila-a	Bajo	<3	$\text{Cl - a L8} = 32.71 * B3 + 0.45 * B4 - 45.02$
	Medio	3-7 ug/L	
	Alto	>7	

DBO	Bajo	<5 mg/L	$DBO\ L8 = 1.79 - 0.789 * (B2) + 52.36 * (B3) - 3.28 * (B4)$
	Medio	5-10	
	Alto	>10 mg/L	
DQO	Bajo	<20 mg/L	$DQO\ L8 = 2.76 - 17.27 * (B2) + 72.15 * (B3) - 12.11 * (B4)$
	Medio	20-50	
	Alto	>50 mg/L	

Fuente: Tesis «Nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás Cajamarca aplicando teledetección satelital en un periodo de 20 años»

El nivel alto representa al estado eutrófico e hipertrófico, el nivel medio representa al estado mesotrófico y el nivel bajo al estado oligotrófico de una laguna.

3.4.2. Corrección radiométrica y atmosférica en ENVI 5.3

- Se importa la imagen satelital y selecciona el área o región de interés.

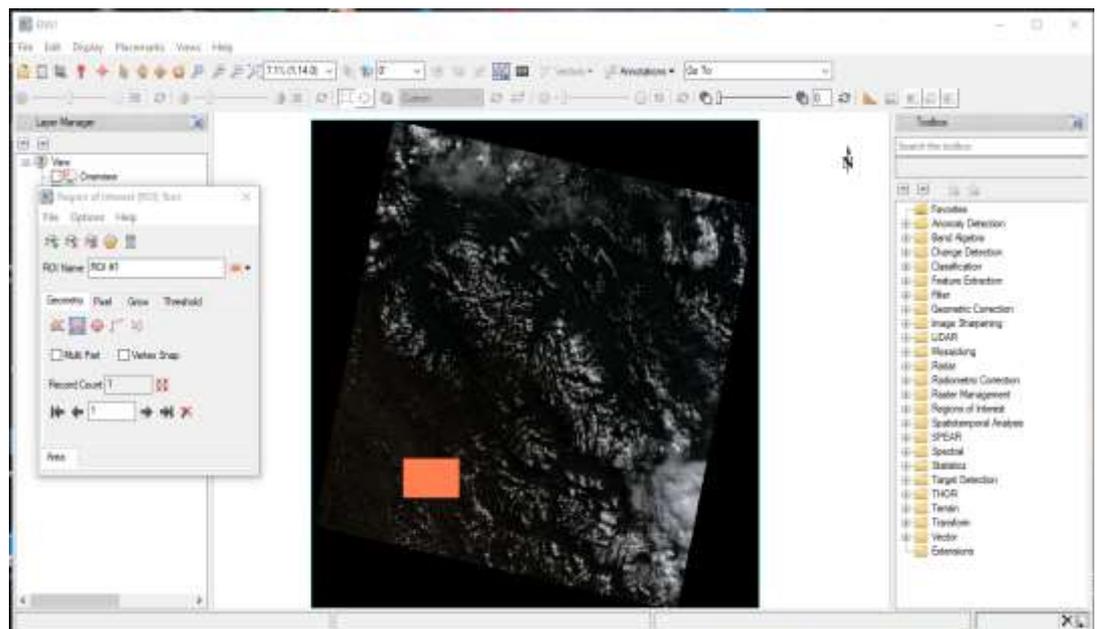


Figura 1: Imagen satelital importada en ENVI 5.3

- Se realiza la corrección radiométrica de la banda multiespectral con la herramienta Radiometric Calibration. Esta herramienta ajusta las señales radiométricas de un año con respecto a otro para así reducir las distorsiones geométricas, diferencias atmosféricas, calibración del sensor, de iluminación,

entre otros. Permitiendo que las imágenes puedan compararse y los cambios detectados no sean por este tipo de factores.

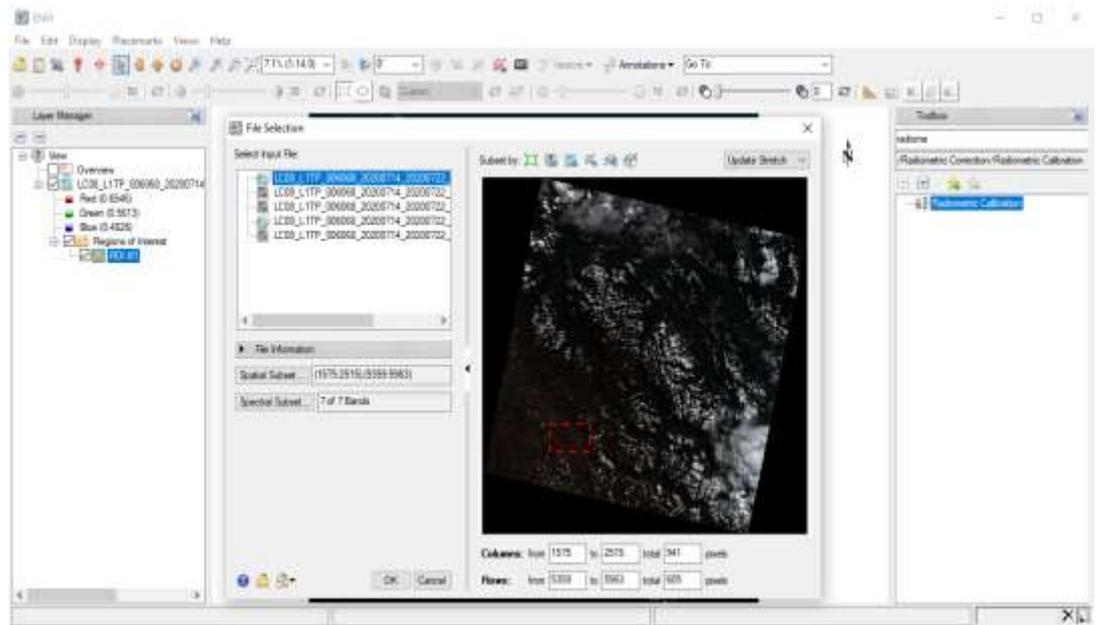


Figura 2: Corrección radiométrica en ENVI 5.3

- Se realiza la corrección atmosférica de la imagen corregida en paso anterior, con la herramienta FLAASH Atmospheric Correction. La herramienta depura elementos que nos sean necesarios para el análisis de las imágenes satelitales, como áreas nubosas, sombras, o brumas para así evitar las detecciones falsas de cambio debido a variaciones estacionales, conservando pixeles con información de la cobertura terrestre.

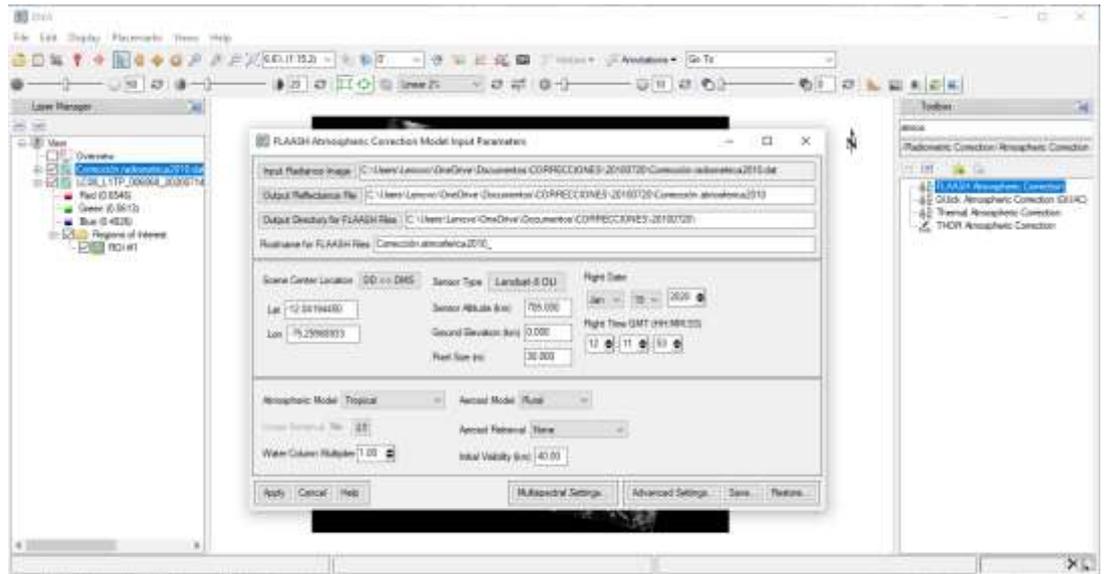


Figura 3. Corrección atmosférica en ENVI 5.3

- Exportar y guardar el archivo en formato TIFF, para su posterior análisis.

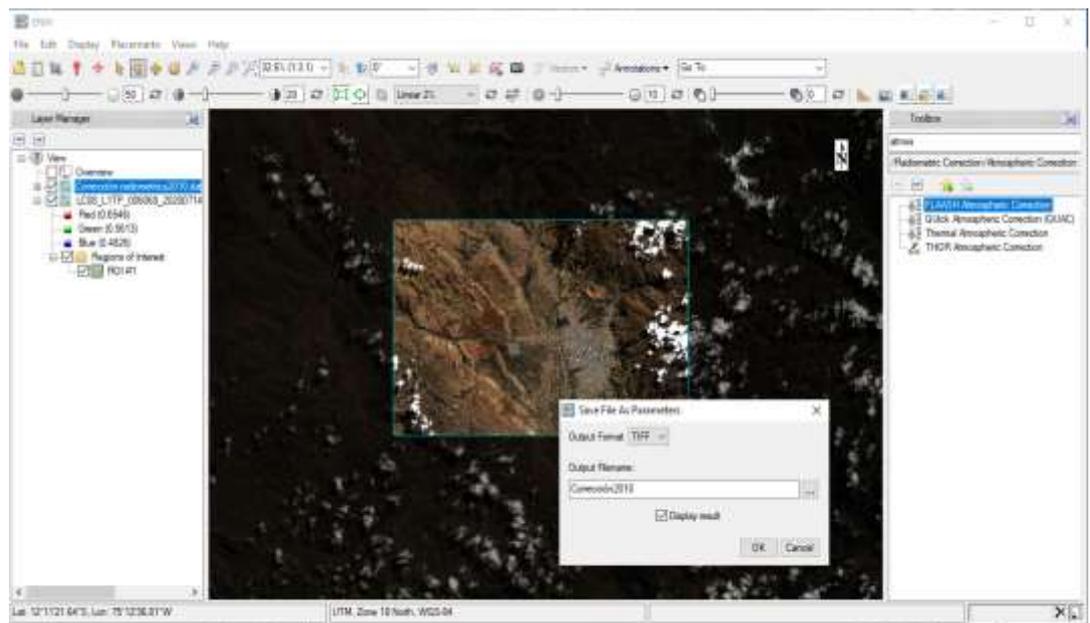


Figura 4. Imagen satelital corregida en ENVI 5.3

3.4.3. Procesamiento de imágenes satelitales en ArcGIS

- Se recortó las imágenes satelitales utilizando la herramienta Clip de Raster Processing. Esta herramienta extrae el área específica de una zona que desea analizar.

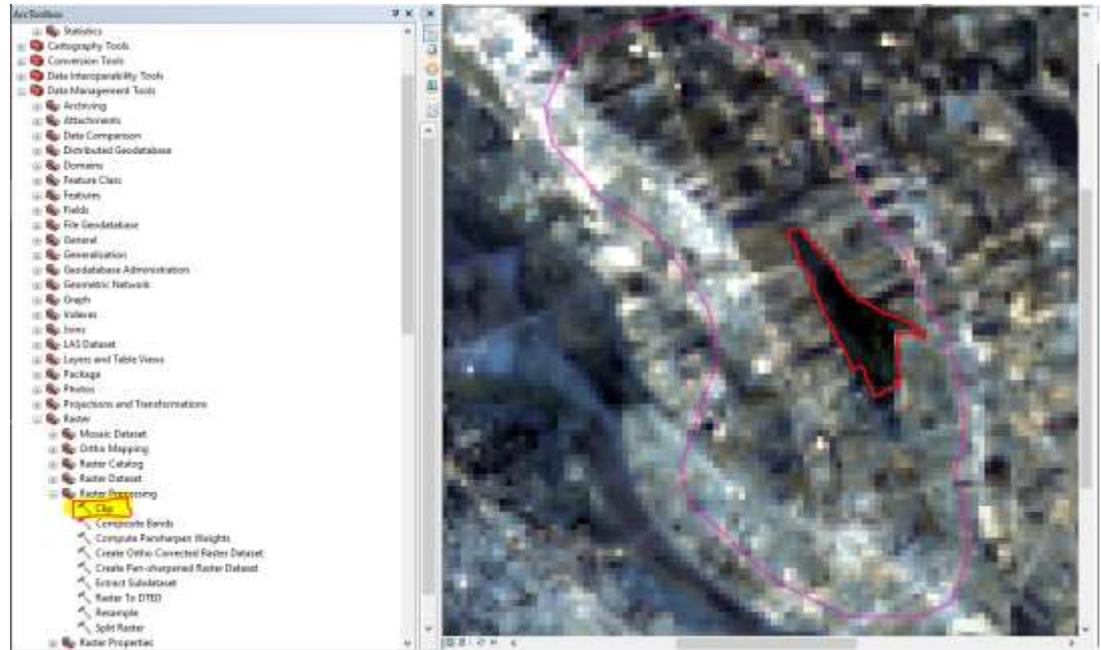


Figura 5. Recorte de imagen satelital en ArcGis 10.5

- Se calculó los parámetros de estudio con las distintas bandas, utilizando la herramienta Raster Calculator de Spatial Analyst Tools (Map Algebra). Esta se usó para crear y ejecutar una expresión de algebra de mapas la cual da como resultado un ráster, además de realizar diferentes operaciones matemáticas entre archivos ráster.

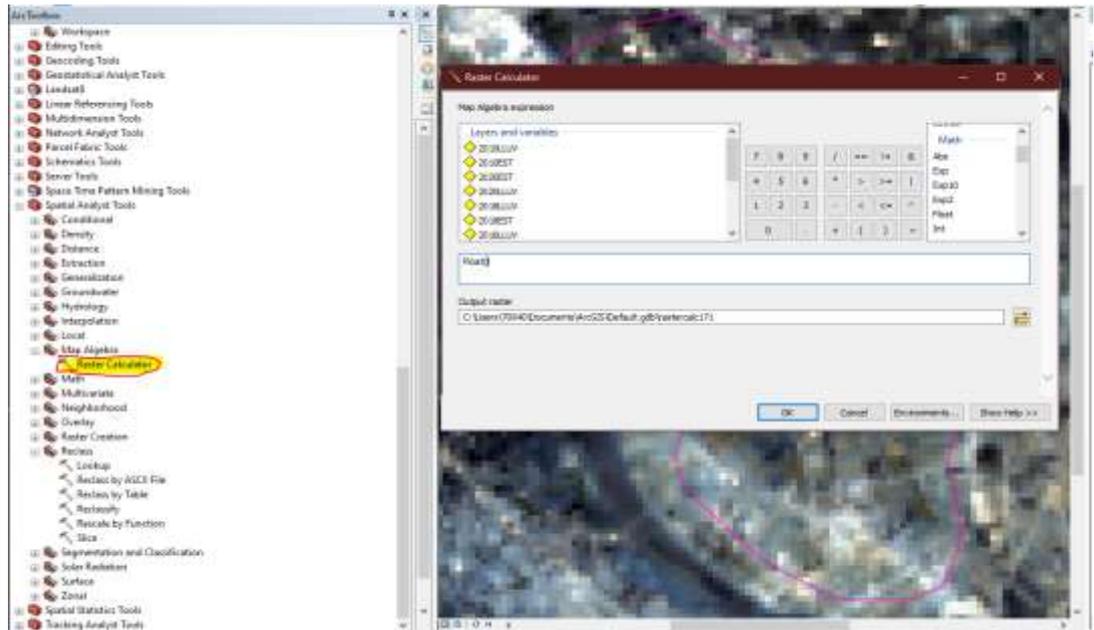


Figura 6: Cálculo de indicadores o parámetros en ArcGis 10.5

- Se reclasificó los datos para su fácil y mejor manejo, mediante la herramienta Reclassify de Spatial Analyst Tools (Reclass). Con esta herramienta se cambió y reemplazó los valores en un ráster basándose en información nueva, agrupando determinados valores en intervalos, para facilitar el manejo e interpretación de datos.

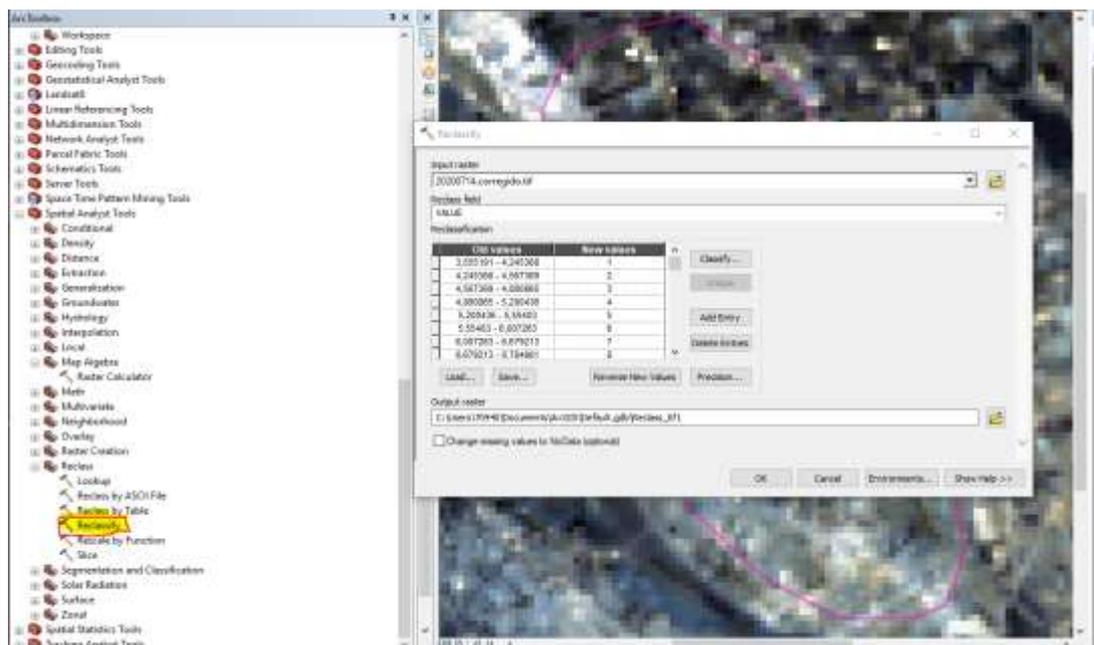


Figura 7. Reclasificación de datos en ArcGis 10.5

- Se exportó los datos en formato txt, para luego pasar a Excel. Los valores ya reclasificados o agrupados según los niveles bajo, medio y alto se interpretaron en porcentajes, de acuerdo al área o pixeles que representa cada nivel. Por ejemplo, los valores de la NDVI en nivel alto son mayores a 0.6, lo cual representa el 30 % del área de la subcuenca de la laguna Pucush Uelo; siguiendo el mismo procedimiento para todos los parámetros estudiados.

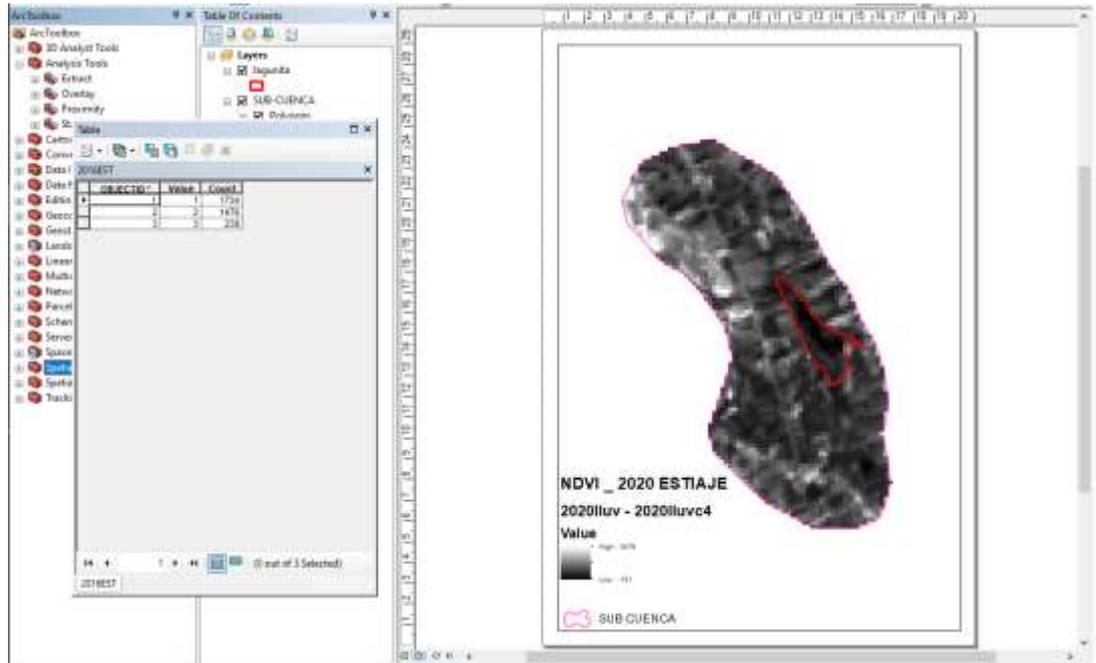


Figura 8. Exportación de datos desde ArcGis 10.5

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de Resultados

4.1.1. Variabilidad del Índice de vegetación de diferencia normalizada en Pucush Uclo



Figura 9. Mapas de los niveles de NDVI en épocas de lluvia, periodo 2010-2020

El gráfico anterior es la representación longitudinal (2010-2020) del incremento del NDVI en épocas de lluvia, analizados en la ribera o subcuenca de la laguna Pucush Uclo, siendo el de nivel alto (>0.6), que indica el incremento de vigorosidad de la vegetación en los dos últimos años, relacionada a la agricultura, representando menos del 30 % del nivel alto en 2010 y 50 % en el año 2020 aproximadamente; mientras que el de nivel medio (0.3 a 0.6) se mantiene por encima de los 50 %. Esta subcuenca es una zona destinada a la agricultura que se mantiene constante e incluso aumentó la actividad agrícola en los últimos años según el NDVI, que es una clara evidencia del desarrollo de las plantas o cultivos.

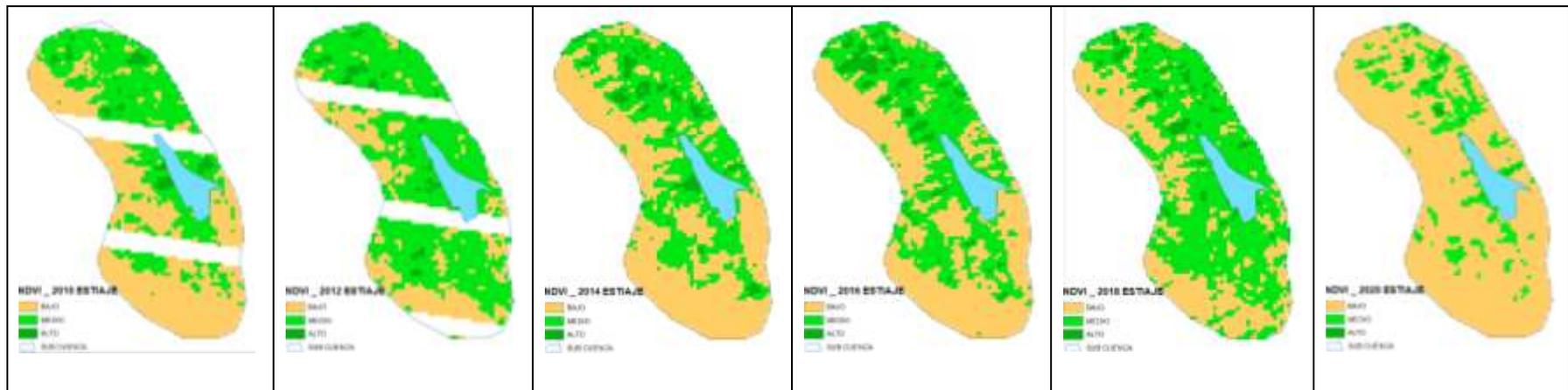


Figura 10. Mapas de los niveles de NDVI en épocas de estiaje, periodo 2010-2020

En el gráfico anterior se muestra la representación longitudinal (2010-2020) del NDVI en épocas de estiaje, analizados en la ribera o subcuenca de la laguna Pucush Uclo, siendo de nivel medio (0.3 - 0.6), lo que indica que hubo un ligero aumento de la vigorosidad de las plantas o cultivos hasta el año 2018; relacionado a la agricultura, tomando en cuenta que en estas épocas no hay siembras o cultivos debido a las escasas lluvias, que representa menos del 6 % del nivel alto en todos los años; mientras que el de nivel medio (0.3 a 0.6) se mantiene por encima del 40 % en 2010 y 58 % en 2018. Sobre la disminución en el año 2020, se puede atribuir a las sequías presentadas en las zonas altoandinas del Perú; siendo esta subcuenca una zona destinada a la agricultura, se mantiene constante la actividad agrícola en los periodos estudiados según el NDVI, que es una clara evidencia del desarrollo de las plantas o cultivos.

4.1.1.1. Comportamiento de los niveles del NDVI en la Subcuenca de la Laguna de Pucush Uclo

Los siguientes gráficos muestran el análisis del comportamiento de los niveles del NDVI, con datos extraídos de los Gráficos 9 y 10, respectivamente.

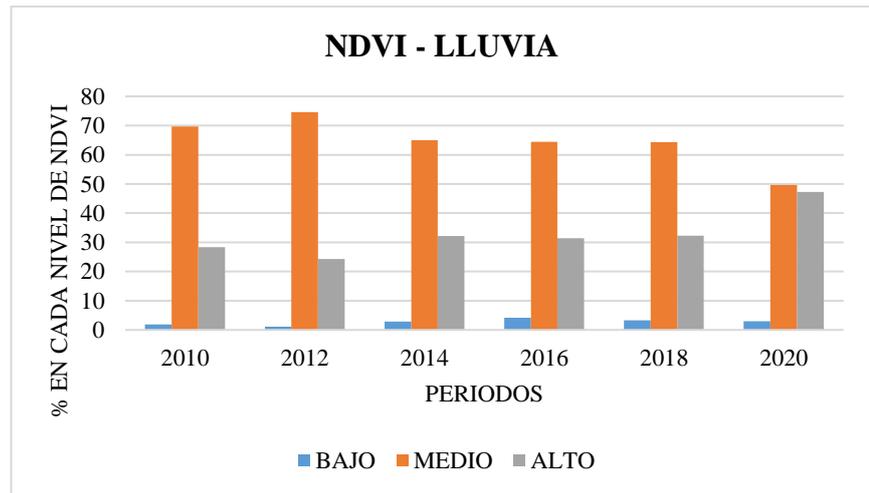


Figura 11. Niveles del NDVI en la subcuenca de la laguna de Pucush Uclo en épocas de lluvia, periodo 2010-2020

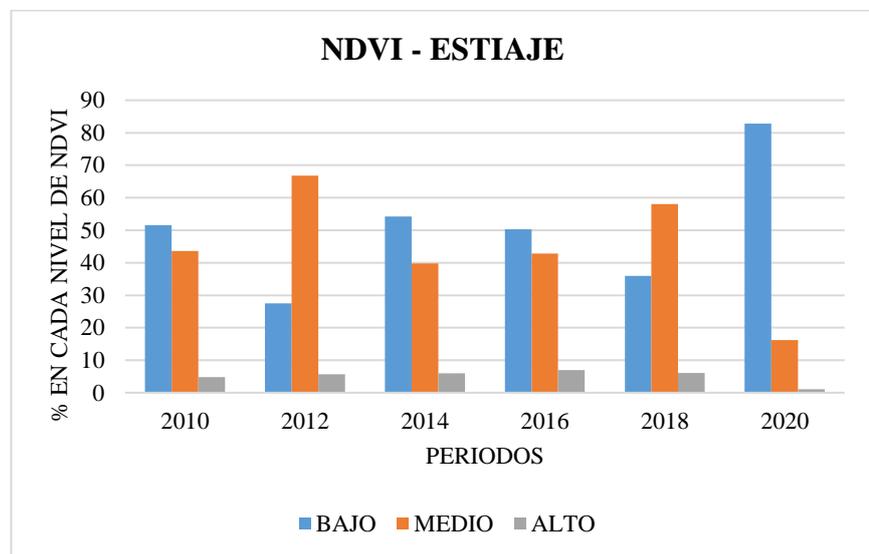


Figura 12. Niveles del NDVI en la subcuenca de la laguna de Pucush Uclo en épocas de estiaje, periodo 2010-2020

Según los niveles del NDVI, se muestra que en las épocas de estiaje no se ha presentado mucha variación de los cambios de la vigorosidad de la biomasa que se relaciona a la agricultura, mientras en las épocas de lluvia el nivel alto (>6) aumentó desde el 30 % a más de 50 % en los periodos estudiados, lo que explica el aumento de la presencia de vegetación o cultivos, mientras en la época de estiaje se observa la poca presencia de estos.

4.1.2. Variabilidad del Índice de estado trófico de la laguna Pucush Uclo

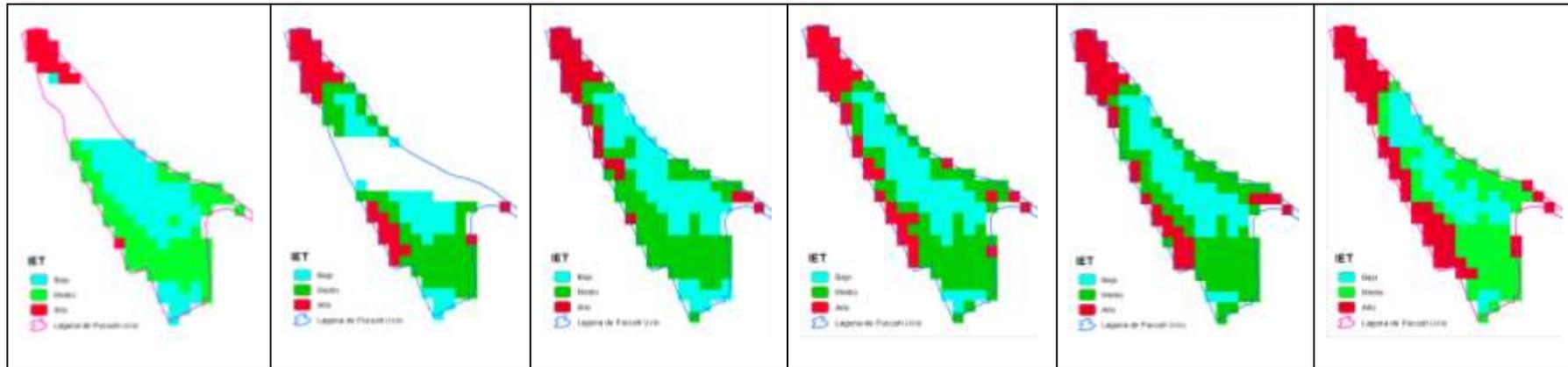


Figura 13. Mapa del IET en época de lluvias, periodo 2010-2020

Los anteriores mapas representan los resultados de los análisis de imágenes satelitales del IET de los años 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 y 2020 respectivamente, donde se demuestra que el índice de estado trófico en el nivel alto se ha incrementado en los últimos años, representado solo 10 % en el año 2010 y más del 30 % en 2020, mientras en el nivel medio se ha mantenido en 45 % aproximadamente durante el periodo 2010-2020.

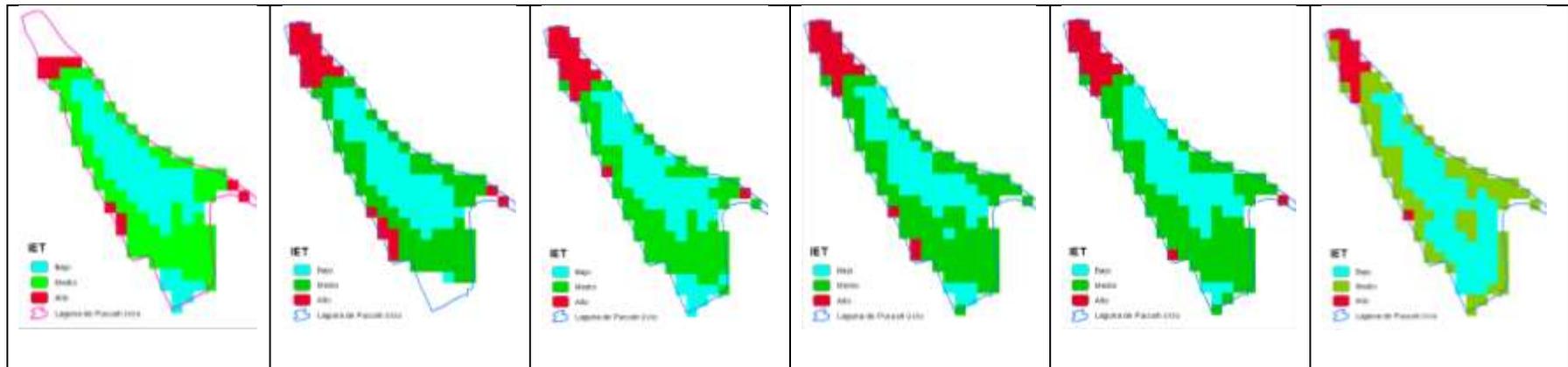


Figura 14. Mapa del IET en época de estiaje, periodo 2010-2020

En el gráfico anterior se observa la evolución de los índices de estado trófico en los tres niveles estudiados, en la época de estiaje durante los años 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 y 2020 respectivamente. Presenta mínima variación en el nivel alto, sin embargo, en el nivel medio se muestra un ligero aumento, disminuyendo en el último año.

4.1.2.1. Índice del Estado Tráfico con respecto al NDVI de la Subcuenca

A continuación, se muestra el análisis de los niveles de IET mostrados en los gráficos 13 y 14 respectivamente, relacionado al nivel alto del NDVI de la ribera o subcuenca de Pucush Uclo.

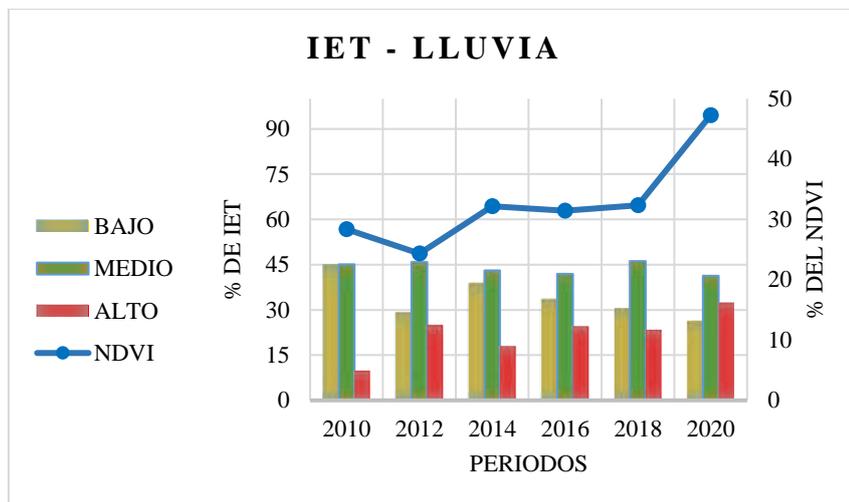


Figura 15. Representación de los porcentajes de nivel bajo, medio y alto de IET de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de lluvia en el periodo 2010-2020.

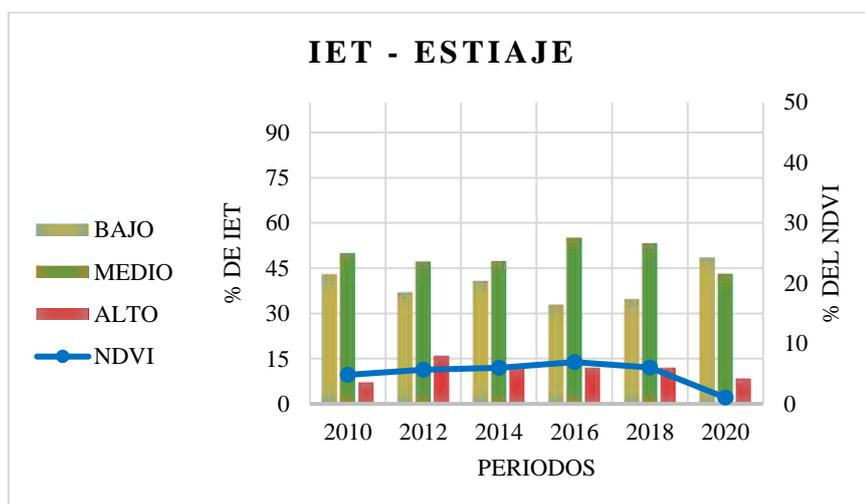


Figura 16. Representación de los porcentajes de nivel bajo, medio y alto de IET de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de estiaje en el periodo 2010-2020.

En las épocas de lluvia se observa el aumento de los niveles altos de IET, de 10 % en 2010 hasta más de 30 % en el 2020, mientras en las épocas de estiaje un ligero aumento en el nivel alto de IET, de 7 % en 2010 hasta 12 % en 2018 y 8 % en 2020, que guarda relación con el incremento de nivel alto de NDVI, tanto en épocas de lluvia como de estiaje, durante el periodo 2010-2020.

4.1.3. Variabilidad de la Turbiedad en la laguna Pucush Uclo

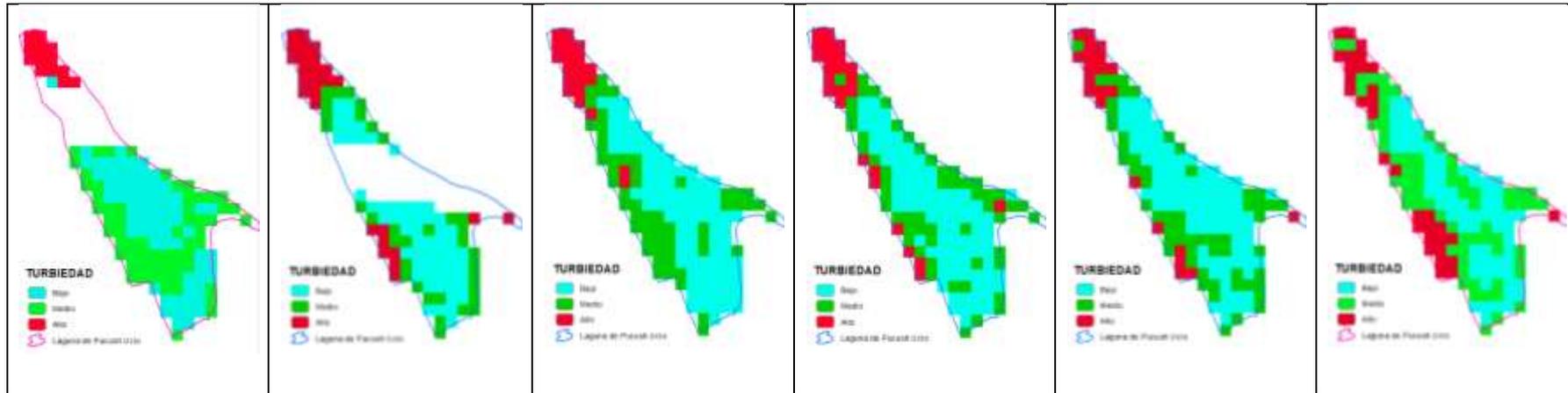


Figura 17. Turbiedad en época de lluvia, periodo 2010-2020

El Gráfico anterior es la representación longitudinal de la *turbiedad* en los años 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 y 2020 respectivamente, en épocas de lluvia, analizados en la laguna Pucush Uclo, siendo el de nivel medio de 0.9 a 4 m. y de nivel alto superior a 4 m. Se ve un mínimo aumento en el nivel alto y mayor es la ascendencia en el nivel medio, llegando al 2020 con más de 19 % en nivel alto y 40 % en el nivel medio.

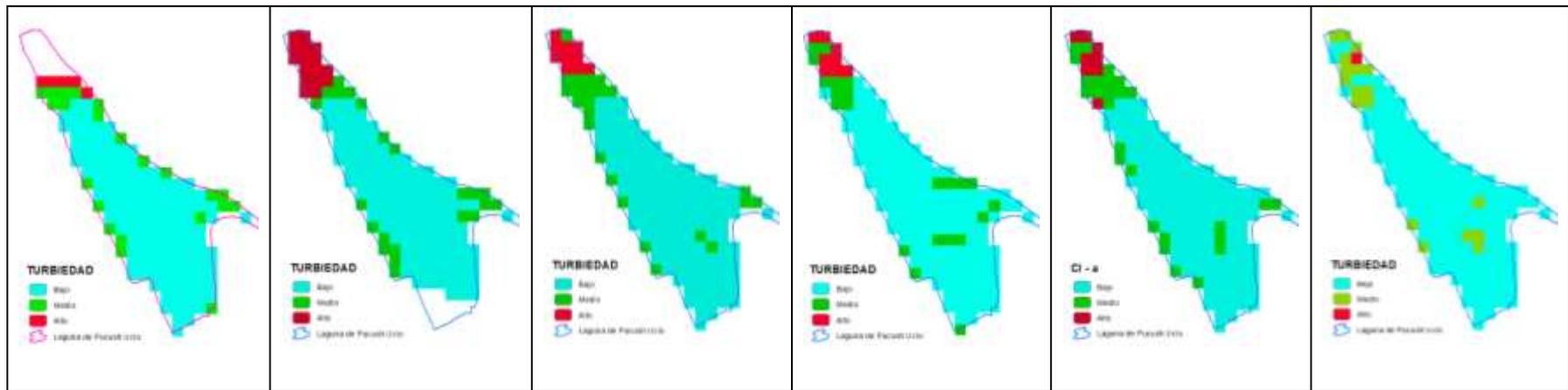


Figura 18. Turbiedad en época de estiaje, periodo 2010-2020

El Gráfico 18 muestra la representación longitudinal de la *turbiedad* en los años 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 y 2020 respectivamente, en épocas de estiaje, analizados en la laguna Pucush Uclo, siendo el de nivel bajo < 0.9 m. Se ve que se mantienen constantes los niveles de *turbiedad*, con pocas variaciones: en el nivel bajo se mantiene por encima de 70 % en todos los años, excepto el 2020 que se encuentra por encima del 90 % y en el nivel medio incrementa del 14 % en 2010 al 16 % en 2018.

4.1.3.1. Turbiedad con respecto a la actividad agrícola

Los siguientes gráficos muestran el análisis de los niveles de turbiedad de la laguna relacionados al NDVI de las riberas o subcuenca de Pucush Uclo, tanto en la época de lluvia y estiaje.

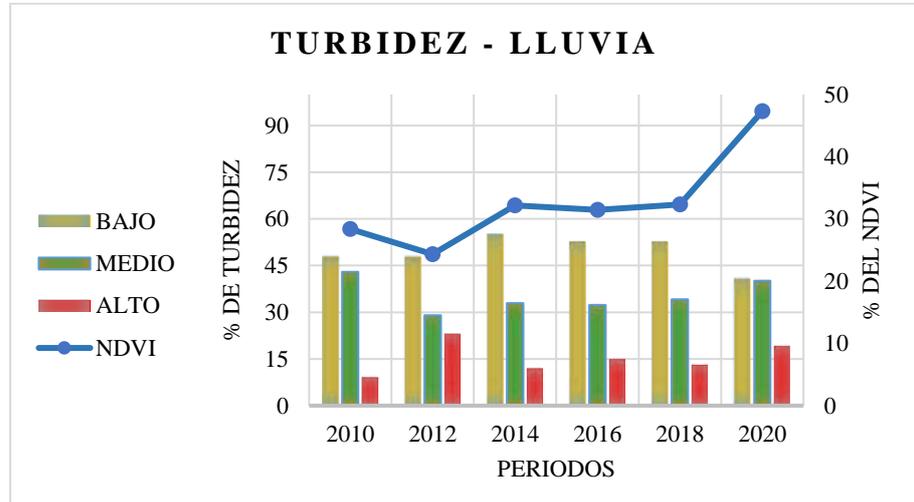


Figura 19. Representación de los porcentajes de nivel bajo, medio y alto de la turbiedad de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de lluvia en el periodo 2010-2020.

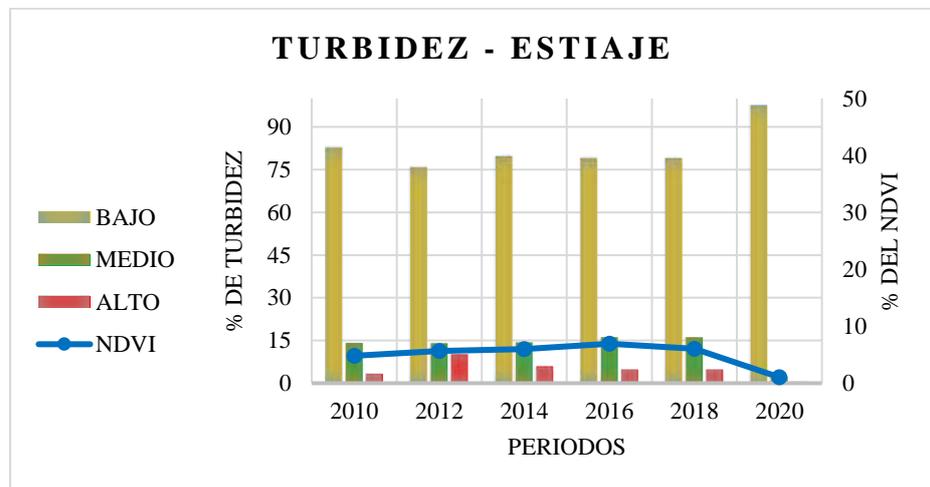


Figura 20. Representación de los porcentajes de nivel bajo, medio y alto de turbiedad de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de estiaje en el periodo 2010-2020.

Según los gráficos, en la época de lluvia se muestra el aumento del nivel alto de la turbiedad, del 9 % al 19 % desde el 2010 al

2020 respectivamente, demostrando una relación directa con el aumento de nivel alto del NDVI; de la misma forma, en la época de estiaje muestra un ligero aumento tanto en nivel medio (de 14 % a 16 %) y alto (de 3 % a 5 % en el 2018 y 0 % en 2020), también descendieron los valores de nivel alto del NDVI a 1 % en el último año.

4.1.4. Variabilidad de DBO, DQO y Clorofila-a en la laguna de Pucush Uclo

En los siguientes gráficos se muestra el comportamiento de otros parámetros relacionados a la eutrofización, como del DBO, DQO y Clorofila-a, en el periodo 2010-2020, en épocas de lluvia y estiaje.

Los valores de la Clorofila-a muestran la concentración de algas fitoplanctónicas y de forma indirecta indican el desarrollo de procesos de eutrofización. Del mismo modo, la alta concentración de DBO y DQO indica mayor demanda de oxígeno que restringe la vida acuática por asfixia. Por lo tanto, la presencia de clorofila-a se da según la variación de la concentración de DBO y DQO.

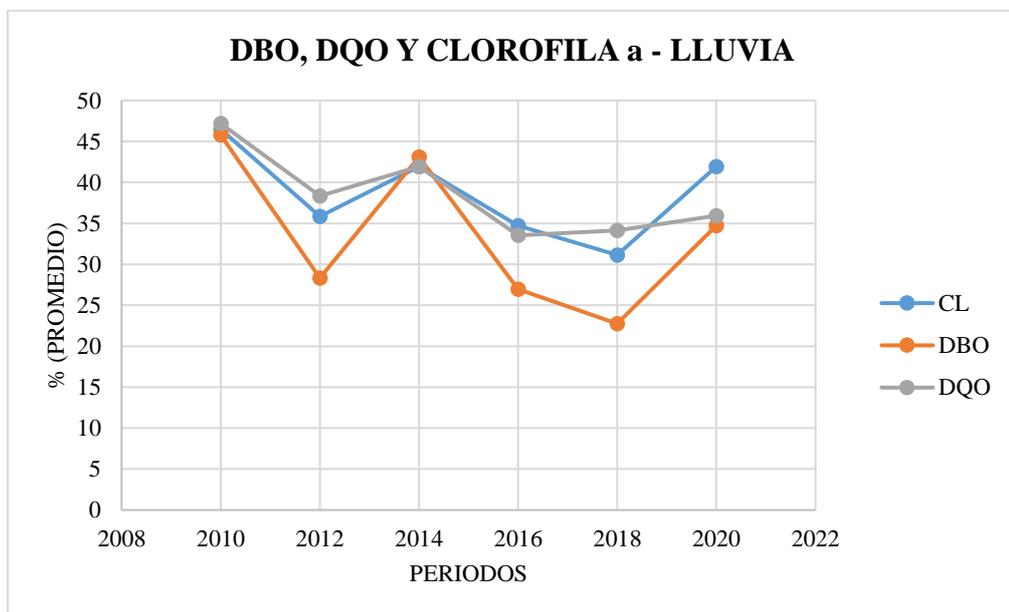


Figura 21. Concentración promedio de la Clorofila-a, DBO y DQO en la laguna de Pucush Uclo, en épocas de lluvia

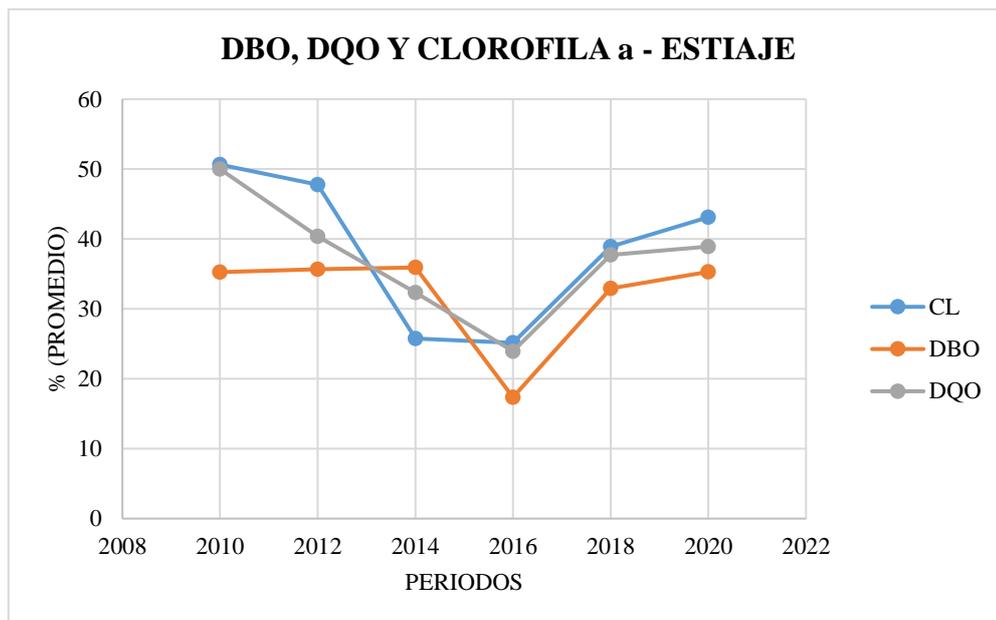


Figura 22. Concentración promedio de la Clorofila-a, DBO y DQO en la laguna de Pucush Uclo, en épocas de estiaje

Los datos del gráfico representan el porcentaje en que se encuentran en el nivel medio de cada uno de los parámetros en la laguna, DBO (5 a 10 mg/L), DQO (20 a 50 mg/L) y Clorofila – a (3 a 7 ug/L). Se observa que mantienen la misma tendencia en ambas épocas.

4.1.5. Efectos de la actividad agrícola en el proceso de eutrofización

En los siguientes gráficos se puede observar la relación de los porcentajes de nivel alto, NDVI de la ribera o subcuenca de Pucush Uclo, turbiedad e IET de la laguna. El incremento de la actividad agrícola a los alrededores de la laguna, ha da lugar al proceso de eutrofización por la mayor demanda de fertilizantes y restos orgánicos. Como se observa en el siguiente gráfico, el aumento o disminución de la presencia de cultivos se relaciona directamente con los indicadores de la eutrofización (IET y turbiedad), siendo entonces la agricultura un factor causante de la degradación de la laguna Pucush Uclo.

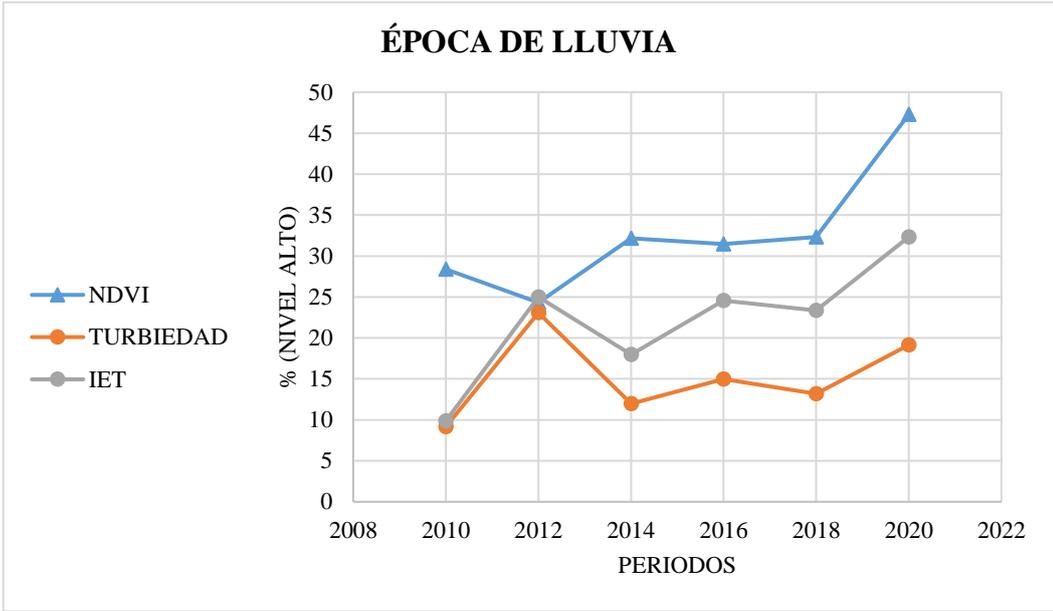


Figura 23. Relación de los parámetros de la laguna y de la subcuenca de Pucush Uclo, épocas de lluvia

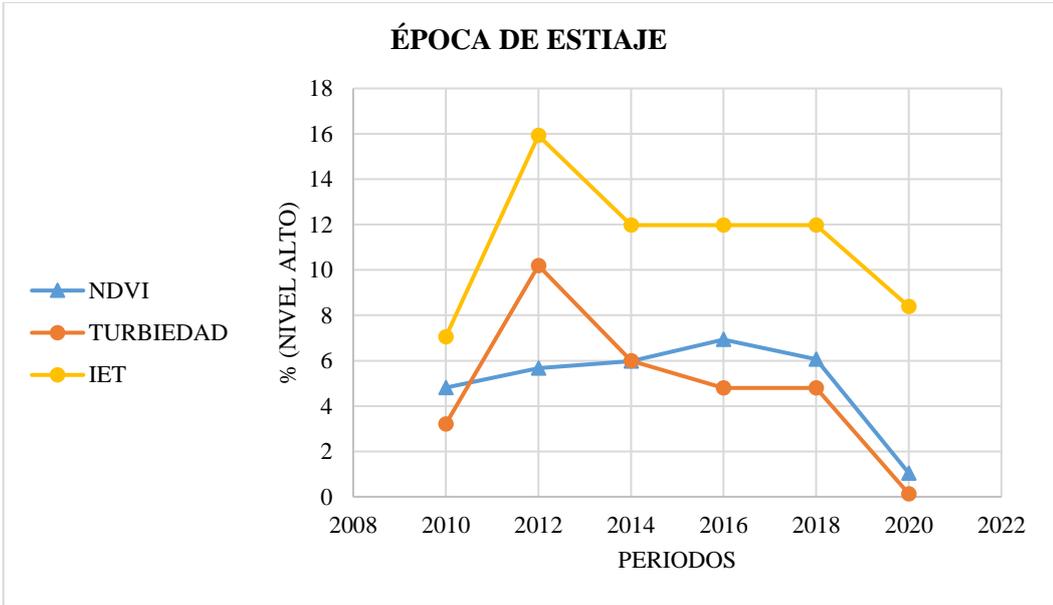


Figura 24. Relación de los parámetros de la laguna y de la subcuenca de Pucush Uclo, épocas de estiaje

Se demuestra que existe una relación subjetiva en ambas épocas, del desarrollo agrícola (NDVI de la subcuenca), con los indicadores de la eutrofización, que mantienen la misma tendencia durante los periodos

analizados, sin embargo, la correlación entre el NDVI y turbiedad, tanto como el NDVI e IET no superan el 60 % por la variación que presenta el año 2012. En la época de lluvia los valores de los indicadores incrementan, siendo NDVI una causa para el aumento de la turbiedad e IET, de la misma forma en la época de estiaje, el descenso del NDVI provoca la disminución de los indicadores de eutrofización.

4.1.5.1. Clorofila - a con respecto a la actividad agrícola

Los gráficos posteriores muestran la relación entre la clorofila-a de la laguna con el NDVI de la ribera o subcuenca de Pucush Uclo, el nivel considerado de clorofila está entre 3 y 7 ug/L, mientras los del NDVI el porcentaje de los valores mayores a 0.6, que indican mayor vigorosidad de plantas o cultivos en la zona.

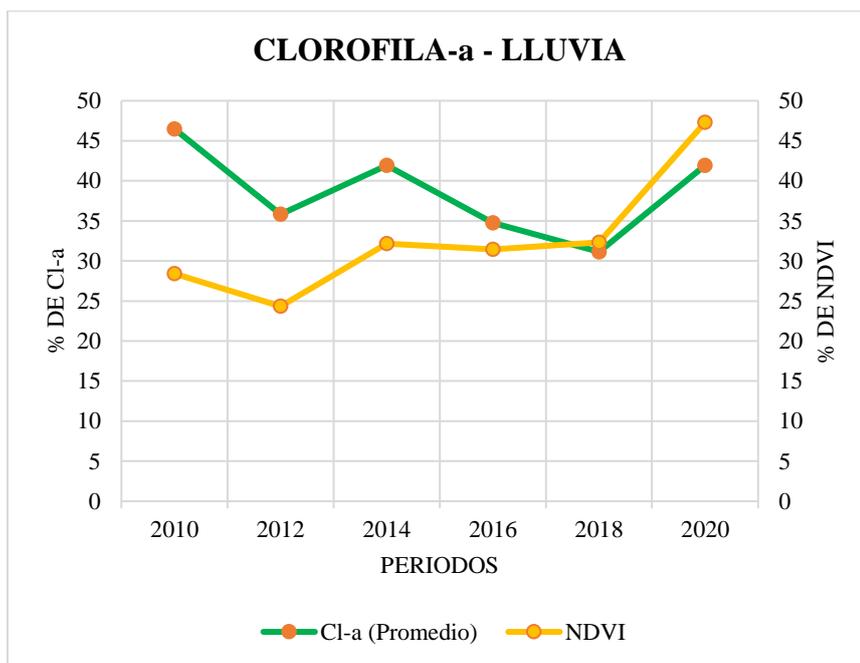


Figura 25. Representación de los porcentajes de nivel alto de la Clorofila-a de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en las épocas de lluvia en el periodo 2010-2020

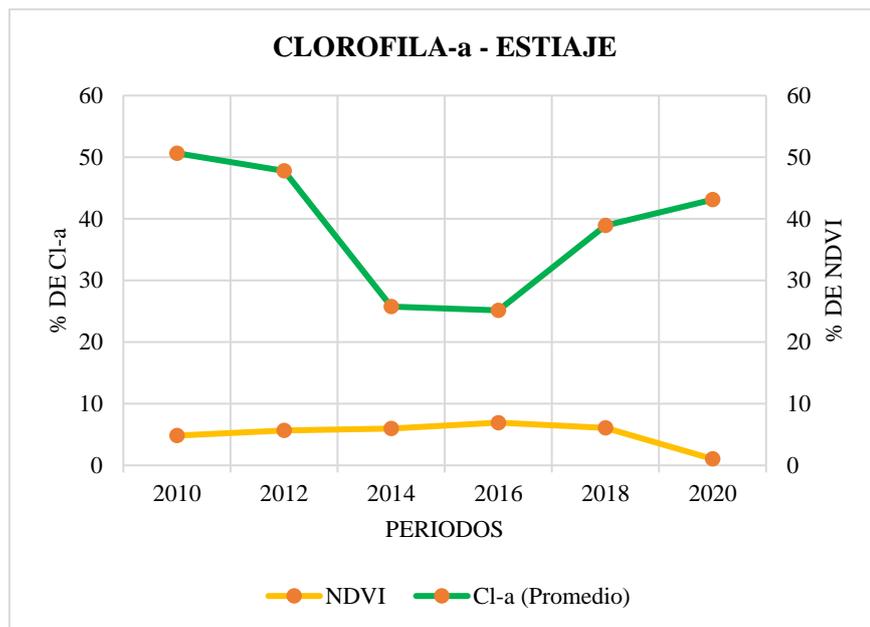


Figura 26. Representación de los porcentajes de nivel medio de la Clorofila- a de la laguna Pucush Uclo con respecto al NDVI de la subcuenca, en época de estiaje en el periodo 2010-2020.

La relación de indicadores presentados demuestra que el NDVI no influye en el comportamiento de la Clorofila-a durante los periodos analizados, en ambos gráficos.

4.2. Prueba de Hipótesis

4.2.1. Prueba de Hipótesis (NDVI-IET)

Ho: El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada no influye en el Índice de Estado Tráfico en la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020

Ha: El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada influye en el Índice de Estado Tráfico en la Laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020

- Estadísticas de fiabilidad y correlación entre elementos

Tabla 4. *Estadísticas de fiabilidad en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-IET)*

Alfa de Cronbach	Alfa de Cronbach basada en elementos estandarizados	n.º de elementos
.677	.713	2

Tabla 5. *Correlación entre elementos en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-IET)*

	NDVI de la subcuenca de Pucush Uclo, época de ESTIAJE	Índice de estado tráfico de la laguna Pucush Uclo, época de ESTIAJE
NDVI de la subcuenca de Pucush Uclo, época de ESTIAJE	1.000	.554
Índice de estado tráfico de la laguna Pucush Uclo, época de ESTIAJE	.554	1.000

- Prueba de hipótesis - Chi cuadrado

Tabla 6. *Prueba de Chi cuadrado en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-IET)*

	Valor	gl	Sig. asintótica (2 caras)

Chi-cuadrado de Pearson	18.000 ^a	15	.263
Razón de verosimilitud	14.909	15	.458
Asociación lineal por lineal	1.533	1	.216
n.º de casos válidos	6		

a. 24 casillas (100,0 %) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es ,17.

- Valor crítico de la tabla de distribución de chi- cuadrado: 24,9958

Se rechaza la H_0 con un nivel de significancia de 0.05, por lo tanto, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada influye en el Índice de Estado Tráfico en la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020.

4.2.2. Prueba de Hipótesis (NDVI-Turbiedad)

H_0 : El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada no influye en la turbiedad en la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020.

H_a : El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada influye en la turbiedad en la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020.

- Estadísticas de fiabilidad y correlación entre elementos

Tabla 7. *Estadísticas de fiabilidad en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-Turbiedad)*

	Alfa de Cronbach basada en elementos estandarizados	n.º de elementos
Alfa de Cronbach	.760	2

Tabla 8. *Correlación entre elementos en IBM SPSS Statistics 22 (NDVI-Turbiedad)*

	NDVI de la subcuenca de Pucush Uclo, época de ESTIAJE	Turbiedad de la laguna Pucush Uclo, época de ESTIAJE
NDVI de la subcuenca de Pucush Uclo, época de ESTIAJE	1.000	.678

Turbiedad de la laguna Pucush Uclo, época de ESTIAJE	.678	1.000
--	------	-------

- Prueba de hipótesis - Chi cuadrado

Tabla 9. Prueba de Chi Cuadrado (NDVI-Turbiedad)

	Valor	gl	Sig. asintótica (2 caras)
Chi-cuadrado de Pearson	24.000 ^a	20	.242
Razón de verosimilitud	18.729	20	.540
Asociación lineal por lineal	2.301	1	.129
n.º de casos válidos	6		

a. 30 casillas (100,0 %) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es ,17.

- Valor crítico de la tabla de distribución de chi- cuadrado: 31,4104
Se rechaza la H_0 con un nivel de significancia de 0.05, por lo tanto, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada influye en la turbiedad en la laguna Pucush Uclo en Chupaca 2010-2020.

4.3. Discusión

Según el análisis de los indicadores de eutrofización, turbiedad e IET, la laguna de Pucush Uclo presenta indicios de eutrofización e incremento durante el periodo 2010-2020, analizado tanto en épocas de lluvia como en épocas de estiaje, esto a causa del avance en el desarrollo de la agricultura (aumento del NDVI); según el uso excesivo y constante de agroquímicos en las zonas ribereñas de la laguna Pucush Uclo, las cuales son causantes de la eutrofización. Ibarra (2018) explica que la infiltración de nutrientes como nitrógeno, fósforo y sedimentos generan turbiedad en los cuerpos de agua.

Sin embargo, el análisis de la clorofila-a, DBO y DQO, demuestra que la agricultura no afecta en el proceso de eutrofización de la laguna, ya que se mantiene constante durante los periodos y épocas analizadas. Esto debido a que la afectación hacia estos

parámetros no se da de manera directa e inmediata y, por lo tanto, si la agricultura incrementa o disminuye su volumen, el incremento en los valores de estos parámetros no es notable, a menos que se determine en cuánto tiempo se llega a afectar de manera significativa la DBO, DQO y CLa. Sin embargo, Martínez (2017) afirma que la clorofila-a es de utilidad y confiable para evaluar indicios de eutrofización.

En las épocas de estiaje el porcentaje del nivel alto tanto en la turbidez (>4m) como en el IET (>30), presenta una disminución el último año, pese al incremento longitudinal hasta el 2018, esto debido al descenso también del NDVI o la baja actividad agrícola en la zona, evidenciando que la agricultura desarrollada en las riberas o la subcuenca de la laguna Pucush Uclo influye en el proceso de eutrofización.

Los antecedentes que estudiaron la eutrofización en dos épocas o temporadas de lluvia y estiaje explican que en la época de lluvias se presenta eutrofización de nivel eutrófico con valores de clorofila mayores a 7 ug/L y turbiedad mayor que 4 m, mientras que, en épocas de estiaje, estos valores no superan el de nivel mesotrófico; lo cual concuerda con la presente investigación acerca de que los niveles altos de los indicadores disminuyen en la época de estiaje. Según Briceño *et al* (2018), los resultados de los indicadores estudiados son influenciados por la estacionalidad y el uso de suelo destinadas a actividades agrícolas alrededor de los cuerpos de agua, siendo el caso en el lugar de estudio, que presenta variabilidad climática anualmente y se practica la rotación de cultivos para optimizar el rendimiento y fertilidad del suelo. Así mismo, los datos obtenidos en épocas de lluvia son más confiables que los de estiaje según Quispe *et al* (2010), entonces la laguna de Pucush Uclo sí estaría siendo afectada por la agricultura.

CONCLUSIONES

En esta tesis, se concluye que la actividad agrícola ribereña afectó el proceso de eutrofización de la laguna Pucush Uclo en Chupaca, hecho comprobado por medio del análisis de las imágenes satelitales en el periodo 2010-2020. De acuerdo a los resultados del análisis de IET (Índice de estado trófico), este incrementó el porcentaje de nivel alto (>70) desde 10 % a 30 % en épocas de lluvia; esto debido al aumento del porcentaje de nivel alto (>6) del NDVI, desde 30 % a más de 50 %. Con respecto a los resultados de la turbiedad, el nivel alto (>4 m), en época de lluvia, se incrementa de 9 % a 19 %, en relación al incremento de la vigorosidad de las plantas o cultivos en esta zona agrícola.

En este estudio se determinó la variabilidad del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) en el área destinada a la actividad agrícola ribereña alrededor de la laguna Pucush Uclo en Chupaca en el periodo 2010-2020, analizada en tres niveles: Bajo (<0), medio (0-0.6) y alto (>0.6), mediante imágenes satelitales. Obteniendo en la época de lluvia el aumento del porcentaje de nivel alto desde 30 % a 50 %, la disminución de 70 % a 50 % en el nivel medio y el nivel bajo se mantuvo constante, demostrando que hubo un incremento de la actividad agrícola en los periodos estudiados. Así también, en época de estiaje se observó el aumento de porcentaje de nivel medio de 44 % a 58 % hasta 2018, y se mantuvo constante el nivel alto en un rango de 5 % a 6 %.

En esta investigación se determinó la variabilidad del índice de estado trófico de la laguna Pucush Uclo en Chupaca en el periodo 2010-2020, en los porcentajes de los tres niveles: alto (>60), medio (30-60) y bajo (<30), obteniendo como resultado un incremento en el nivel alto de 10 % a 30 % en época de lluvia. Mientras que en época de estiaje el porcentaje del nivel alto se incrementó de 5 % a 12 % hasta el 2018., presentando una relación subjetiva directa con el NDVI de la ribera de la laguna Pucush Uclo, con un nivel de significancia de 0.05. Se concluye que el IET de dicha laguna es influido por el NDVI o en relación al incremento de la vigorosidad de las plantas o cultivos en esta zona agrícola.

En el presente estudio se determinó la variabilidad de la turbiedad en la laguna Pucush Uclo en Chupaca en el periodo 2010-2020 analizada en los tres niveles: nivel alto (>4 m), nivel medio (0.9-4m) y bajo (<0.9 m). Demostrándose que hubo un aumento en época de lluvia en el porcentaje del nivel alto de 9 % a 19 %, un porcentaje constante en el nivel medio. Sin

embargo, en la época de estiaje, los porcentajes de nivel alto aumentaron de 3 % a 5 % hasta el 2018; en cambio, el nivel medio se mantuvo constante hasta el 2018, disminuyendo en el último año de 16 % a 2 %, este resultado guarda relación con los porcentajes de los tres niveles de NDVI, en el cual hubo una afectación de la agricultura en el proceso de eutrofización de la laguna, con un nivel de significancia de 0.05. Se concluye que la turbiedad de esta laguna es influida por el NDVI o en relación al incremento de la vigorosidad de las plantas o cultivos en esta zona agrícola.

En la investigación presente se determinó la variabilidad de DBO, DQO y Clorofila-a en la laguna Pucush Uclo en Chupaca en el periodo 2010-2020, analizada en los tres niveles: en el nivel medio de los parámetros de DBO (5 a 10 mg/L), DQO (20 a 50 mg/L) y Clorofila-a (3 a 7 ug/L). Se observa que se mantiene la misma tendencia épocas de lluvia y estiaje.

Finalmente, en el estudio se determinó el efecto de la actividad agrícola en el proceso de eutrofización obteniendo como resultado que el NDVI se mantiene durante ambos periodos, sin embargo, la diferencia entre la correlación de NDVI y turbiedad, así como NDVI e IET no sobrepasa el 60 %. Además, se pudo observar que el causante del incremento de turbiedad e IET en época de lluvia es el NDVI como también es el causante de la disminución de los indicadores de eutrofización en época de estiaje.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda conseguir imágenes con la mayor resolución posible, y al escoger las imágenes con las que se va a trabajar, se debe tener en cuenta que en estas el área de trabajo esté despejada y que haya un mínimo porcentaje de nubosidad.
- Se debe considerar el tipo de satélite que se está utilizando, priorizando que este sea el mismo para los periodos en que se van a emplear en la investigación, ya que eso simplificará el proceso de corrección y análisis de imágenes debido a su uniformidad.
- Para corroborar el resultado del análisis, se debería usar diferentes tipos de software que tengan el mismo propósito, por ejemplo, para las correcciones radiométricas y atmosféricas considerar como otra opción el ArcGIS o PCI Geomatics.
- Se recomienda también comparar estos resultados de gabinete con los que se obtengan in-situ mediante equipos de laboratorio para disminuir el porcentaje de error.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **RUIZ-RUIZ, T.** Análisis comparativo de índices de eutrofización en lagunas costeras del estado de Sonora, México. Tesis (Doctor en Ciencias). Sonora: Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste S.C, 2017. p. 120.
2. **DIAZ, A. and SOTOMAYOR, L.** Evaluación de la eutrofización de la laguna Conococha - Ancash a agosto de 2012 . Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Ancash: Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, 2013. pp. 114.
3. **CAMPOS SOLIS, E.** Estudio de los Efectos de las actividades ribereñas de la población en el comportamiento de la laguna de Ñahuimpuquio Chupaca. Tesis (Magíster scientiae en Ingeniería Ambiental). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2015.
4. **MARTINEZ, J. and PEÑA, W.** Laguna de Pucush Uclo como recurso potencial para el desarrollo del ecoturismo en el distrito de San Juan de Iscos [en línea]. Tesis (Título Profesional de Licenciado en Antropología). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2010. Available from: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/66>
5. **BRICEÑO, I., PÉREZ, W., SAN MIGUEL, D. and RAMOS, S.** Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile. *Revista de Teledetección*. 2018. n.º 52, p. 67. DOI 10.4995/raet.2018.10126.
6. **ALIAGA, V. S., FERRELLI, F., BOHN, V. Y. and PICCOLO, M. C.** Utilización de imágenes satelitales para comprender la dinámica lagunar en la Región Pampeana. *Revista de Teledetección*. 2016. n.º 46, pp. 133. DOI 10.4995/raet.2016.5196.
7. **AGUIRRE GÓMEZ, R.** Análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos in situ. *Investigaciones Geograficas* [en línea]. 2015. n.º 86, pp. 15 - 24 [Accessed 1 March 2021]. Available from: <chrome-extension://dagcmkpagjlhakfdhnbomgmjdpkdklff/enhanced-reader.html?pdf=https%3A%2F%2Fbrxt.mendeley.com%2Fdocument%2Fcontent%2Fed83b0f8-478f-3fb6-9e27-b6ad37b6e1cc>

8. **MORETA, J.** La Eutrofización de los lagos y sus consecuencias. Ibarra 2008. *Universidad Técnica del Norte* [en línea]. 2008. Vol. 52, n.º 4, p. 93. Available from: http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2377/2/ResumenEjecutivo.pdf%0Ahttps://www.academia.edu/1439928/La_eutrofización_de_los_lagos_y_sus_consecuencias._Ibarra_2008%0Ahttp://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2637/1/TESIS.pdf

9. **MARTÍNEZ, I.** Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota. [en línea] Tesis (Licenciado en Física). Cantabria: Universidad de Cantabria, 2017. Available from: [https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12587/Martinez Garcia Ines.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12587/Martinez_Garcia_Ines.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

10. **CASTILLO, I. and RODRÍGUEZ, M.** Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene. *Revista Mutis*. 2017. Vol. 7, no. 1, p. 20–33. DOI 10.21789/22561498.1183.

11. **GARCÍA, F. and MIRANDA, V.** Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. *Volumen II de la Colección: Agenda pública para el desarrollo regional, la metropolización y la sostenibilidad* [en línea]. 2018. P. 35–367. Available from: http://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2_Parte1_Eje3_Cap5-177-García-Miranda.pdf

12. **LEDESMA C., BONANSEA M., RODRIGUEZ, C. and SÁNCHEZ, A.** Determination of trophic indicators in Rio Tercero reservoir, Cordoba (Argentina). *Ciência Agronômica* [en línea]. 2013. No. 3, p. 419–425. [Accessed 12 June 2021]. Available from: www.ccarevista.ufc.br

13. **CARRASCO, D.** Nivel de eutrofización de la laguna San Nicolás Cajamarca aplicando teledetección satelital en un periodo de 20 Años [en línea]. Tesis (Título Profesional de Ingeniera Ambiental). Cajamarca: Universidad Privada del Norte, 2020. pp. 147. Available from: <http://hdl.handle.net/11537/23804>

14. **QUISPE D., CALIENES, R., TAM J., GRACO M., LEDESMA J., FLORES G., CORREA, D. and QUISPE, C.** Análisis comparativo entre clorofila-a satelital e in situ en el ecosistema de afloramiento peruano, entre 1998 – 2007. *Ecología Aplicada*.

2010. Vol. 9, no. 1–2, pp. 151. DOI 10.21704/rea.v9i1-2.405.
15. **SONCCO, R. and ALVAREZ, D.** Estado del arte sobre los índices que determinan el nivel de eutrofización en lagunas altoandina [en línea]. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Ambiental). Juliaca : Universidad Peruana Unión, 2020. [Accessed 13 June 2021]. Available from: https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/3326/Rocio_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 16. **GONZALES, P. and SOLANO, R.** Análisis del estado trófico mediante teledetección y datos “in situ” en la laguna de Paca, Jauja – Junín 2019 [en línea]. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Ambiental). Lima : Universidad Cesar Vallejo, 2019. [Accessed 1 March 2021]. Available from: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/49682/Gonzales_CPP-Solano_SRP-SD.pdf?sequence=1
 17. **CUSICHE, L. and AMPARO MIRANDA, G.** Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la reserva nacional ‘Lago Junín’, Perú. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* [en línea]. 2019. Vol. 201, no. 2. [Accessed 13 June 2021]. Available from: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v10n6/2007-0934-remexca-10-06-1433.pdf>
 18. **MATEU, A.** *Problems of eutrophication of surface waters in relation to agriculture* Tesis [online] (Trabajo de grado en Ciencias Ambientales). Gandía: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA, 2016. [Accessed 1 March 2021]. Available from: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78548/MATEU - Los problemas de eutrofización de las aguas superficiales en relación con la agricultura.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78548/MATEU-Los-problemas-de-eutrofizacion-de-las-aguas-superficiales-en-relacion-con-la-agricultura.pdf?sequence=1)
 19. **STREIT, N.; QUEIROZ M., JACOB-LOPES, E., RAMÍREZ, L. and QUEIROZ, L.** Producción de pigmentos naturales (clorofila-). *Revista Ciencia y Tecnología*. 2015. Vol. 8, n.º. 2, p. 27–34. DOI <https://doi.org/10.18779/cyt.v8i2.149>
 20. **RIVERA C., ZAPATA A., PINILLA G., DONATO J., CHAPARRO, B. and JIMÉNEZ, P.** Comparación de la estimación de la clorofila-a mediante los métodos espectrofotométrico y flujométrico. *Acta Biológica Colombiana*. 2005. Vol. 10, n.º 2.

- [Accessed 13 June 2021]. Available from:
<http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v10n2/v10n2a07.pdf>
21. **ORDÓÑEZ SALINAS, Jaime.** LIMNOLOGÍA DEL EMBALSE DE SAU Relaciones del zooplancton, la clorofila y los sólidos en suspensión con el clima lumínico del agua. Tesis (Doctor en Ecología) Barcelona: Programa de doctorado: Ecología.Universidad de Barcelona, 2010. pp. 272
 22. **GÓMEZ-LIMÓN, J., PICAZO-TADEO, A. and REIG, E.** Agricultura, desarrollo rural y sostenibilidad medioambiental. *CIRIEC - España. Revista de economía pública, social y cooperativa.* 2008. No. 61, p. 103–126.
 23. **ORGANIZACIÓN de Cooperación y Desarrollo Económico.** Comportamiento medioambiental de la agricultura en la OCDE desde 1990: Sección por país de España [en línea]. Paris, Francia, 2008. [Accessed 1 March 2021]. Available from: <https://www.oecd.org/spain/40806965.pdf>
 24. **DIRECCIÓN Regional de Agricultura Junín.** Serie Histórica [online]. 2018. [Accessed 1 March 2021]. Available from: https://www.agrojunin.gob.pe/?page_id=663
 25. **DÍAZ GARCÍA-CERVIGÓN, J.** Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión [en línea]. Tesis (Máster en Tecnologías de la Investigación Geográfica) Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2015. [Accessed 13 June 2021]. Available from: https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
 26. **ORGANIZACIÓN de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** *Los fertilizantes y su uso.* Paris, 2002.
 27. **MARTÍNEZ, J. and MARTÍN, I. (Eds.)** *Teledetección y Medio Ambiente* [en línea]. Madrid, Red Nacional de Teledetección Ambiental, 2010. [Accessed 1 March 2021]. Available from: http://www.aet.org.es/files/guia_teledeteccion_medio_ambiente.pdf
 28. **SCHOMWANDT, D.** *Teledetección aplicada a las ciencias agronómicas y recursos*

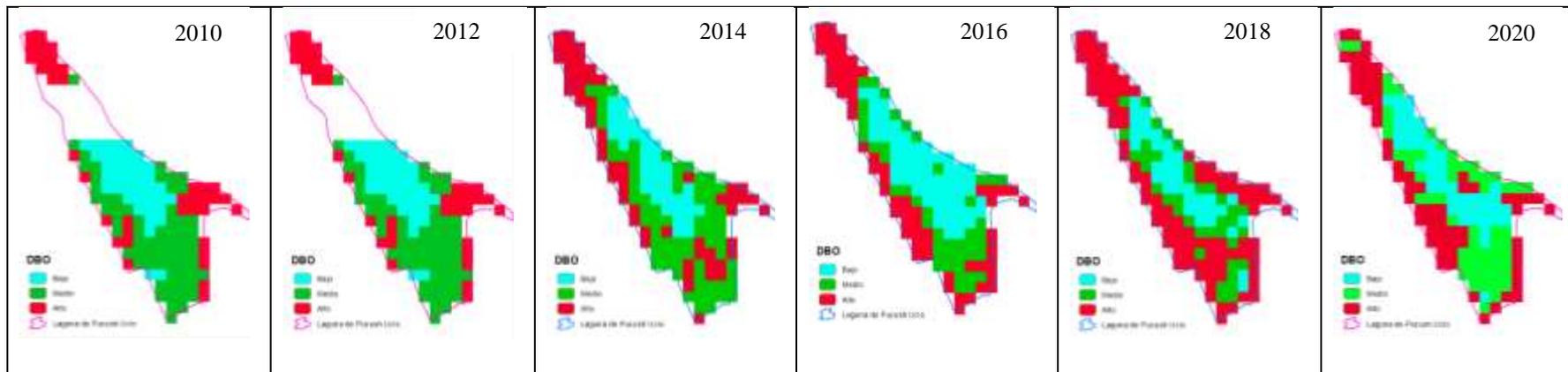
- naturales*. Sistema Integrado de Información Agropecuaria [online]. 2015. [Accessed 1 March 2021]. Available from: http://www.siiia.gob.ar/joomla_files/images/mapas/ManualSensores.pdf
29. **GALINDO G., ESPEJO O., RUBIANO J., VERGARA L., and CABRERA, E.** *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia* V. 2 [online]. Bogotá: IDEAM, 2014. [Accessed 1 March 2021]. ISBN 9789588067636. Available from: <http://www.scripto.com.co>
30. **UNIVERSIDAD de Murcia.** Correcciones a las imágenes de satélites. In: *Teledetección* [online]. Murcia, [no date]. [Accessed 1 March 2021]. Available from: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf>
31. **AGUILAR, H., MORA, R. and VARGAS, C.** Metodología para la corrección atmosférica de imágenes aster, rapideye, spot 2 y landsat 8 con el módulo flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central* [en línea]. 2014. Vol. 2, n.º 53. [Accessed 1 March 2021]. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/4517/451744544002.pdf>
32. **MORAN, A.** Algoritmos para la corrección radiométrica de imágenes de satélite [en línea]. Tesis (Maestro en Ciencias) Ensenada: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, 2014. [Accessed 1 March 2021]. Available from: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/436/1/236291.pdf>
33. **SÁNCHEZ, P.** La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales [en línea]. Tesis (Título de Ingeniero Civil) Cuenca: Universidad de Cuenca, 2012. [Accessed 1 March 2021]. Available from: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/779/1/ti839.pdf>
34. **URRUTIA, R.** *Eutrofización y floraciones algales* [en línea]. Chile, 2014. [Accessed 1 March 2021]. Available from: http://www.eula.cl/fonis/wp-content/uploads/2014/06/PP-Clase-1-RUrrutia-Eutrofizacion_2014.pdf
35. **HERNÁNDEZ, R.** *Metodología de Investigación*. México: McGraw-Hill/

Interamericana Editores, S. A. de C. V., [no date]. ISBN 978-1-4562-2396-0.

36. **ZURDO, D.** *Google Earth: el sistema de información geográfica global de Google.* [en línea]. ACTA, 2007. pp. 67–77. Available from: <https://www.acta.es/medios/articulos/internet/044067.pdf>
37. **PUERTA, R., RENGIFO, J. and BRAVO, N.** *ARCGIS BÁSICO 10* [en línea]. Tingo Maria, Universidad Agraria de la Selva. 2011. Available from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://actswithscience.com/Descargas/ManualArcGis.pdf>
38. **MINISTERIO de Agricultura y Riego.** *Metodología para clasificación de coberturas a partir del procesamiento de imágenes satelitales* [online]. 1ra. Edición. Perú, 2018. Available from: <https://uegps.gob.pe>

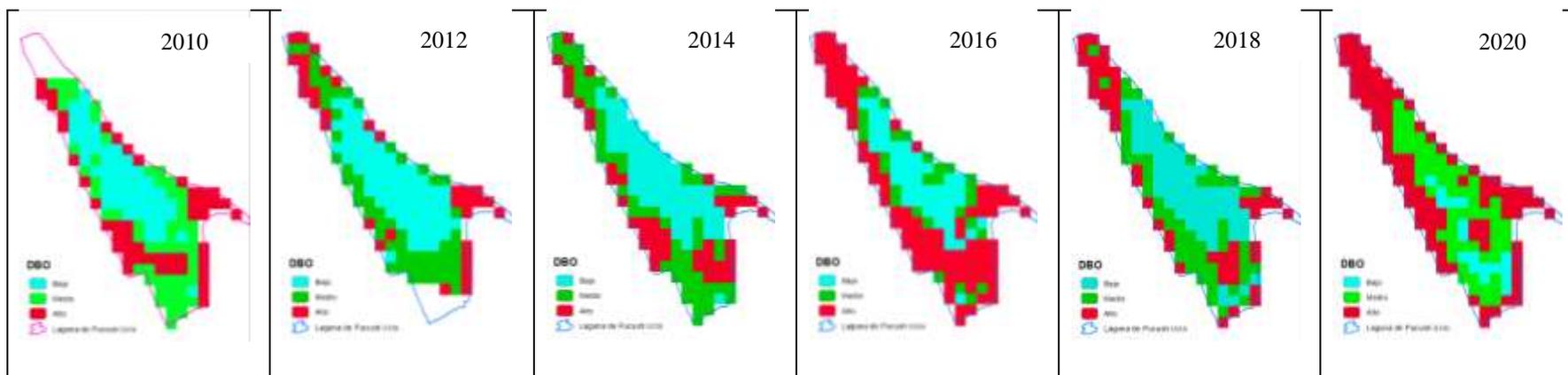
ANEXOS

Anexo 1. Variabilidad de la DBO en época de lluvia, periodo 2010-2020



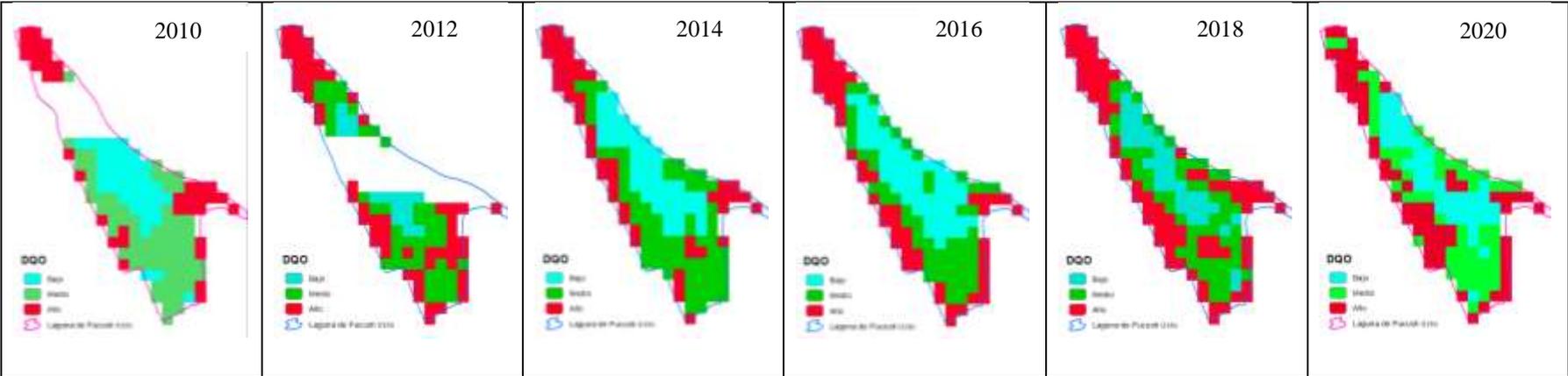
Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.5

Anexo 2. DBO en época de estiaje, periodo 2010-2020



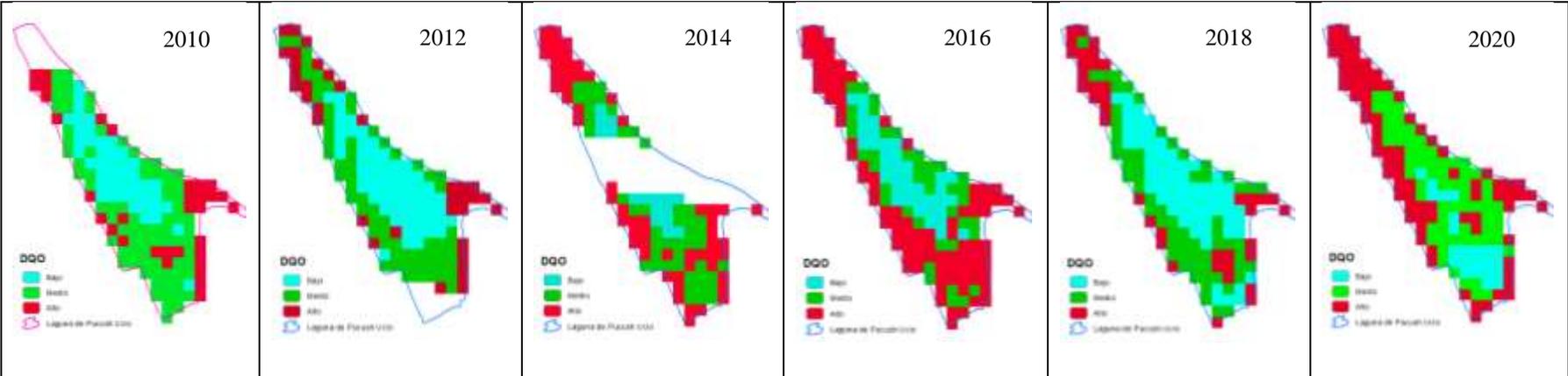
Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.5

Anexo 3. DQO en época de lluvia, periodo 2010-2020



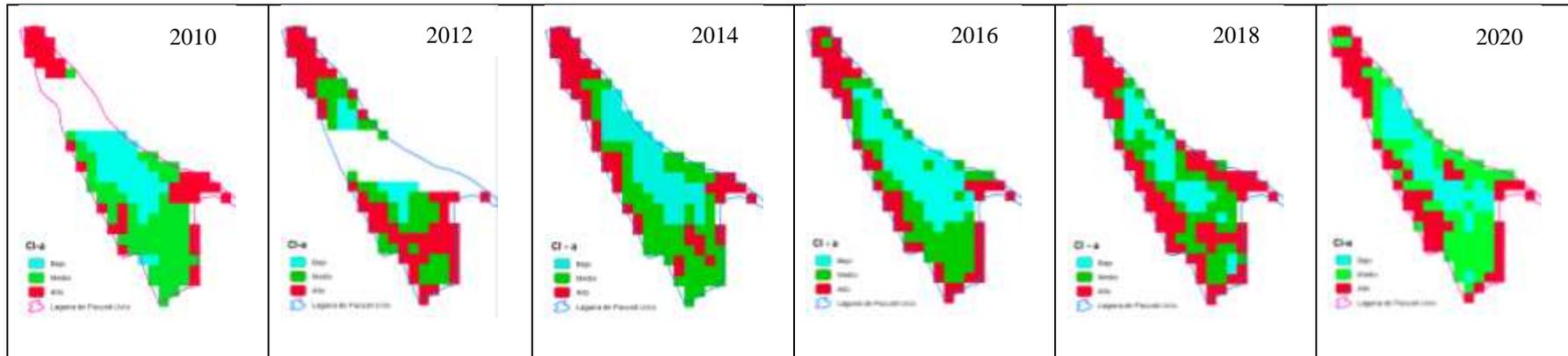
Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.5

Anexo 4. DQO en época de estiaje, periodo 2010-2020



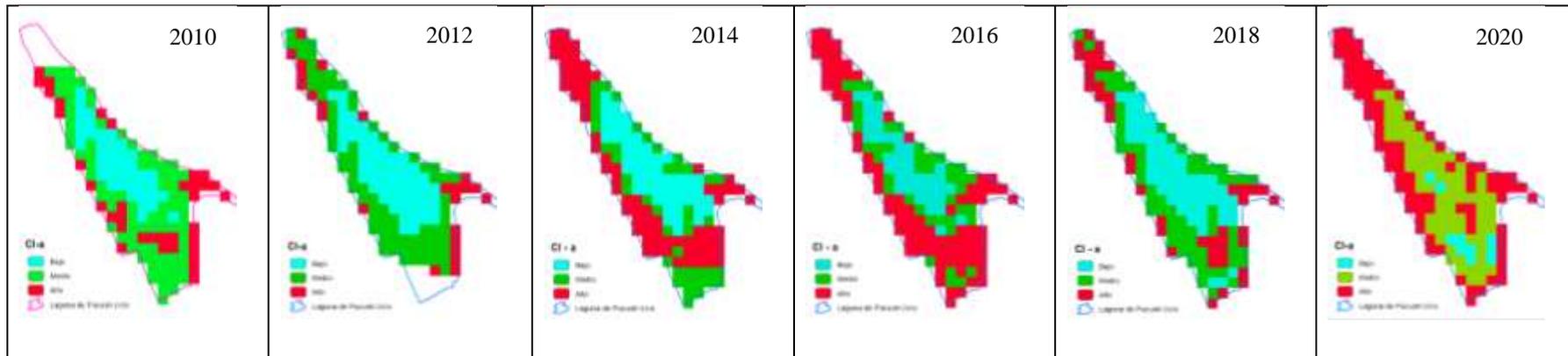
Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.5

Anexo 5. Clorofila-a en época de lluvia, periodo 2010-2020



Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.5

Anexo 6. Clorofila-a en época de estiaje, periodo 2010-2020



Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.5