



| POSGRADOS |

Maestría en **RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

RPC-SO-17-NO.363-2020

Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Tema:

Aplicación de técnicas de teledetección para evaluar los cambios en el uso del suelo y la calidad del agua en la Laguna de Yahuarcocha, periodo 2011-2019

Autor

Gabriela Fernanda Acosta Preciado

Director:

Marco Fernando Cerna Cevallos

QUITO – Ecuador
2024



Autor:



Gabriela Fernanda Acosta Preciado

Ingeniera Agrónoma

Candidata a Magíster en Recursos Naturales Renovables con
Mención en Remediación y Restauración por la Universidad
Politécnica Salesiana – Sede Quito.

gabrielaacostap2812@gmail.com

Dirigido por:



Marco Fernando Cerna Cevallos

Licenciado en ciencias de la educación, Profesor de Enseñanza
Media en la Especialización de Biología y Química

Especialista en Fotoquímica y Biología Molecular; Doctor en
Biología; PhD in Genetics Molecular and Cellular Biology

mcerna@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2024 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Gabriela Fernanda Acosta Preciado

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN PARA EVALUAR LOS CAMBIOS EN EL
USO DEL SUELO Y LA CALIDAD DEL AGUA EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA,
PERIODO 2011-2019**

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Rodrigo y Kelly, quienes siempre han sido mi mayor apoyo y fuente de inspiración. A mi esposo Santiago, por su amor incondicional y su constante aliento, quien me ha motivado a seguir adelante en cada paso de este camino. Y a mi hija Anahí, que ilumina mis días y me recuerda la importancia de luchar por un futuro mejor. También agradezco a mis profesores y mentores, cuyas enseñanzas han sido fundamentales en mi formación. A todos ustedes, gracias por creer en mí y por contribuir a mi crecimiento.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer profundamente a todas las personas que han sido parte de este proceso. A mis profesores, por su dedicación y por compartir su conocimiento, ustedes han jugado un papel clave en mi crecimiento tanto académico como profesional. Su orientación ha sido fundamental en cada paso de este camino.

A mis compañeros de estudio, por su apoyo y por los valiosos intercambios de ideas que enriquecieron mi aprendizaje.

Y, por último, a todas las personas que, de alguna manera, han influido en mi formación y en la culminación de este proyecto.

¡Gracias a todos!

Tabla de Contenido

Resumen	11
Abstract	13
1. Introducción	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo General.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Determinación del Problema	15
3. Marco teórico referencial.....	18
3.1 Laguna de Yahuarcocha	18
3.1.1 Ubicación y Características	18
3.1.2 Geografía y Topografía del área de influencia de la Laguna de Yahuarcocha	19
3.1.3 Condiciones de la calidad del agua en la laguna de Yahuarcocha.	20
3.1.4 Peligrosidad de contaminación de la laguna de Yahuarcocha	22
3.2 Cuencas Hidrográficas	23
3.2.1 Caracterización de una cuenca hidrográfica de Yahuarcocha.....	24
3.2.2 Análisis multitemporal de una cuenca hidrográfica	25
3.2.3 Calidad del agua	26
3.2.3.1 Parámetros microbiológicos	26
3.2.3.2 Parámetros físico-químicos	27
3.2.4 Carga contaminante potencial de una cuenca hidrográfica.....	29
3.2.4.1 Tipos de contaminación.....	30
3.2.4.2 Tipos de Contaminantes	30
3.2.5 Prevención y control del agua de consumo humano	31
3.3 Los sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de evaluación multicriterio	34
3.4 La Teledetección y su uso en estudio ambiental	35
3.4.1 Aplicaciones de la teledetección en los cambios del uso de suelo.	35
3.4.2 Matriz de cambio	36
3.4.3 Procesamiento de las imágenes satelitales.	36
3.4.3.1 Landsat	36
3.4.3.2 ARGIS	36
3.4.3.3 MapBiomass	37

3.4.4	Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI).....	38
3.4.5	Índice de Turbidez Normalizada (NDTI).....	38
3.4.6	Índice de Calidad del Agua	38
4.	Materiales y Metodología	40
4.1.	Materiales	40
4.2.	Metodología.....	40
4.2.1.	Delimitación del área de influencia	40
4.2.2.	Técnica e instrumentos de recolección de datos.....	43
4.2.3.	Procesamiento de datos digitales para los cambios de usos de suelo y cobertura vegetal	43
4.2.3.1.	MapBiomass	43
4.2.3.2.	Matriz de Cambio del 2011 al 2019	63
4.2.3.3.	Matriz de transición del 2011 al 2019	64
4.2.3.4.	Imágenes Landsat	65
4.2.3.5.	Calidad del Agua.....	66
5.	Resultados y discusión	72
5.1.	Cobertura y uso de suelo de los años 2011 al 2019	72
5.2.1	Matriz de cambio de la Cobertura vegetal y suelo de los años del 2011 al 2019.	90
5.2.2	Indicador NDWI.....	98
5.2.3	Indicador NDTI.....	101
5.2.4	Calidad del agua.....	103
5.2.5	Análisis de los parámetros de calidad del agua	103
5.2.6	Índice de calidad del Agua (ICA)	105
5.3	Correlación entre los índices de cobertura y uso de suelo y la calidad del agua	106
5.3.1	Correlación entre el Índice NDWI y el Índice de Calidad del Agua	106
5.3.2	Correlación entre el Índice NDTI y el Índice de Calidad del Agua	108
6.	Conclusiones	111
	Referencias	113
	Anexos.....	124

Índice de Tablas

Tabla 1. Categorías de Uso del Suelo de Ecuador agrupados según las clases de cobertura y uso de suelo equivalentes de la leyenda MapBiomás Ecuador.	44
Tabla 2 Calidad del mosaico en el área de influencia de la laguna Yahuarcocha	61
Tabla 3. Rango del índice NDWI	66
Tabla 4. Rango del índice NDTI.....	66
Tabla 5. Información de Puntos de calidad del agua de la Laguna de Yahuarcocha del año 2018.....	68
Tabla 6. Factor de ponderación de parámetros en el ICA-NSF.....	70
Tabla 7. Rangos de clasificación de calidad del Agua	71
Tabla 8. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2011.....	74
Tabla 9. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2012.....	74
Tabla 10. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2013.....	77
Tabla 11. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2014.....	77
Tabla 12. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2015.....	80
Tabla 13. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2016.....	80
Tabla 14. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2017.....	83
Tabla 15. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2018.....	83
Tabla 16. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2019.....	86
Tabla 17. Porcentaje de variación de los años 2011 al 2019	87
Tabla 18. Matriz de cambio del periodo del 2011 al 2019.....	90
Tabla 19. Matriz de cambio del 2011 al 2019	93
Tabla 20. Matriz de transición del 2011 al 2019	96
Tabla 22. Matriz de NDWI de los puntos de monitoreo del año 2018	99
Tabla 23. Matriz de NDTI de los puntos de monitoreo del año 2018	101
Tabla 24. Comparación de los parámetros con la Tabla 2: criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces con el propósito de evaluar su estado y obtener información esencial para el diseño de estrategias de conservación y gestión sostenible del TULSMA 097A.	104
Tabla 25. Cálculo del índice de calidad del agua (ICA), método propuesto por la NSF (Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU.)	105

Tabla 26. Cálculo del NDWI de cada punto de monitoreo del año 2018	107
Tabla 27. Cálculo del NDTI de cada punto de monitoreo del año 2018.....	109

Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de las imágenes satelitales para cobertura y uso de suelo.	37
Figura 2: Model builder con las herramientas de análisis espacial para la delimitación del área de influencia.	41
Figura 3. Calidad del mosaico en referencia a la cantidad de observaciones	61
Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento del raster descargado en MapBiomias Ecuador.....	63
Figura 5. Imagen del área de estudio para descarga de la página: https://earthexplorer.usgs.gov/	65
Figura 6. Porcentaje de variación de los años 2011 al 2019	88
Figura 7 Transición de cobertura y uso de suelo de 2011 al 2019	97
Figura 8. Correlación de Pearson entre NDWI e ICA para el año 2018.....	108
Figura 9. Correlación de Pearson entre NDTI e ICA para el año 2018	110

Índice de Mapas

Mapa 1. Ubicación hidrográfica de la zona de estudio	42
Mapa 2. Distribución de los puntos de monitoreo de calidad del agua en el área de estudio.	69
Mapa 3. Categorías de cobertura uso de suelo 2011 -2012.....	73
Mapa 4. Categorías de cobertura y uso de suelo 2013-2014.....	76
Mapa 5. Categorías de cobertura y uso de suelo 2015-2016.....	79
Mapa 6. Categorías de cobertura y uso de suelo 2017-2018 Elaborado por el Autor ...	82
Mapa 7. Categorías de uso y cobertura vegetal 2019 Elaborado por el Autor	85
Mapa 8. Categorías de uso y cobertura vegetal año de 2011 al 2019	95
Mapa 9. Resultado del cálculo del índice de NDWI para el año 2018	100
Mapa 10. Resultado del cálculo del índice de NDTI para el año 2018.....	102
Mapa 11. Ubicación territorial de la zona de estudio. Elaborado por el Autor	124

Aplicación de técnicas de teledetección para evaluar los cambios en el uso del suelo y la calidad de agua en la laguna de Yahuarcocha, periodo de 2011-2019

Autora:

Gabriela Fernanda Acosta Preciado

Resumen

Este estudio analiza los cambios en el uso del suelo y su impacto en la calidad del agua a los aportantes de la Laguna de Yahuarcocha entre los años de 2011 al 2019 en que se utilizaron técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), y se realiza la relación entre las actividades antrópicas y las condiciones del ecosistema acuático.

Se observaron cambios significativos en el uso del suelo, con una reducción del 12 % en áreas de vegetación arbustiva (equivalente a 295 hectáreas) y un incremento del 18 % en áreas dedicadas a la agricultura, lo que representa 443 hectáreas adicionales. Estas transformaciones han intensificado la presión sobre la laguna, incrementando la carga de nutrientes derivados del uso de fertilizantes y pesticidas.

Los resultados de calidad del agua, de los puntos de monitoreo del año 2018, revelaron niveles de porcentaje de Oxígeno Disuelto (OD) de 42.5 % a 88.7 %, superan los criterios de calidad del agua del TULSMA 097-A, tabla 2 para la preservación de la vida acuática y silvestre y que el Índice de Calidad del Agua va de Buena a Regular indicado la presencia de actividades antropogénica alrededor de la laguna.

En cuanto a la metodología, se utilizaron imágenes de cobertura de MapBiomas y Landsat 8, procesados mediante herramientas de ArcGIS, para evaluar los cambios en la cobertura del suelo y calcular el Índice de Calidad del Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). La calidad del agua se analizó utilizando el Índice de Calidad del Agua (ICA) de la NSF, considerando parámetros clave como coliformes fecales, pH, turbidez, fósforo y nitritos.

De los hallazgos encontrados está la necesidad de implementar estrategias de gestión sostenibles y monitoreo constante para mitigar el deterioro de la calidad del agua y la pérdida de biodiversidad en la laguna y el potencial de utilizar la teledetección como herramienta fundamental para la conservación de recursos hídricos y la planificación territorial.

Palabras clave: Teledetección, SIG, Cambio de uso del suelo, Calidad del agua, Eutrofización.

Abstract

This study analyzes land use changes and their impact on the water quality of Yahuarcocha Lagoon between 2011 and 2019, utilizing remote sensing techniques and Geographic Information Systems (GIS). The study establishes a relationship between anthropogenic activities and the conditions of the aquatic ecosystem.

Significant changes in land use were observed, including a 12% reduction in shrub vegetation areas (equivalent to 295 hectares) and an 18% increase in areas dedicated to agriculture, representing an additional 443 hectares. These transformations have intensified the pressure on the lagoon, increasing nutrient loads derived from the use of fertilizers and pesticides.

Water quality results from the 2018 monitoring points reveal dissolved oxygen (DO) percentage levels ranging from 42.5% to 88.7%, exceeding the water quality criteria of TULSMA 097A, Table 2, for the preservation of aquatic and wildlife. The Water Quality Index (WQI) ranges from Good to Fair, indicating the presence of anthropogenic activities around the lagoon.

Regarding methodology, MapBiomas and Landsat 8 land cover images were processed using ArcGIS tools to evaluate land cover changes and calculate the Normalized Difference Water Index (NDWI). Water quality was analyzed using the NSF Water Quality Index (WQI), considering key parameters such as fecal coliforms, pH, turbidity, and nutrients.

Findings highlight the need to implement sustainable management strategies and continuous monitoring to mitigate the deterioration of water quality and biodiversity loss in the lagoon. They also emphasize the potential of remote sensing as a fundamental tool for water resource conservation and territorial planning.

Palabras clave:

Remote Sensing, GIS, Land Use Change, Water Quality, Eutrophication..

1. Introducción

En la ciudad de Ibarra, capital de la provincia de Imbabura, se encuentra a 5 kilómetros al sur de la Laguna de Yahuarcocha, un cuerpo de agua ubicado a una altitud de 2.180 metros sobre el nivel del mar, la cual abarca una superficie de 2,65 kilómetros cuadrados (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal San Miguel de Ibarra, 2015).

Funciona como un punto hídrico en la cuenca hidrográfica circundante, con un amplio rango altitudinal, que se extiende desde los 3200 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en el páramo de Yuracruz hasta los 1925 metros en el valle del Chota (Chamorro, 2021).

Los cambios en la cobertura y el uso del suelo han sido ampliamente identificados en numerosos estudios como una de las principales causas de la degradación ambiental (Pérez & García, 2013). En el caso de la cuenca de la Laguna de Yahuarcocha, estas alteraciones se ven reflejadas en diversas actividades humanas, tales como la expansión residencial, el turismo, la agricultura y la ganadería, las cuales tienen un impacto directo en el equilibrio ecológico de la zona. La vegetación circundante se ve influenciada por la presencia de pendientes pronunciadas y drenajes intermitentes. Es relevante resaltar que el recurso hídrico en esta región se emplea exclusivamente para atender las necesidades de los habitantes locales y para respaldar las actividades relacionadas a la agricultura, la ganadería y turismo (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra, 2021).

En estudios realizados por la Universidad Técnica del Norte (UTN) y la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra (EMAPA-I) del 2021 y 2023, señalan que la laguna Yahuarcocha a observación directa, evidencia una mala calidad de agua por su coloración verde turquesa, también el Índice de Calidad del Agua (ICA) presentado en el estudio de Rivera (2021), corrobora ya que los valores de pH se encuentran en un rango de 8.60 a 8.92, y los niveles de Oxígeno Disuelto

(OD), con porcentajes entre el 89 % y el 109 % para los años 2020 y 2021, respectivamente.

Con este estudio, la teledetección y el Índice de calidad del agua nos proporcionarán datos de gran valor al elaborar mapas de la cobertura de la tierra desde 2011 hasta 2019, con la finalidad de recopilar información que apoye la toma de decisiones en relación con la gestión de los recursos naturales.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar los cambios en el uso del suelo y la calidad del agua en el área de influencia de la laguna de Yahuarcocha mediante el uso de sistemas de información geográfica, durante 2011 hasta 2019 con el fin de conservar la salud ambiental de la laguna y sus alrededores.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar los cambios en el uso del suelo en la laguna de Yahuarcocha durante en el período del 2011 al 2019, con el fin de comprender su evolución y sus implicaciones en la calidad del agua.
- Analizar la calidad del agua en la laguna de Yahuarcocha mediante el análisis de parámetros físico-químicos y microbiológicos, según AM tabla 2: criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces con el propósito de evaluar su estado y obtener información esencial para el diseño de estrategias de conservación y gestión sostenible.
- Establecer la relación entre las modificaciones en el uso del suelo y la calidad del agua en la laguna de Yahuarcocha, con la finalidad de comprender las interacciones subyacentes y así proporcionar datos relevantes que respalden la toma de decisiones en la conservación y gestión efectiva de este recurso hídrico.

2. Determinación del Problema

El aumento de las actividades agrícolas, particularmente el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas en monocultivos ha provocado un incremento en la concentración de nutrientes en la laguna Yahuarcocha. Esta laguna, además, enfrenta una explotación insostenible de sus recursos naturales, lo que ha generado un impacto negativo en su calidad ambiental y recurso hídrico (McLaughlin et al., 2019) A su vez, el cambio en el uso del suelo, impulsado por la expansión agrícola y la urbanización, ha intensificado la contaminación de los cuerpos de agua en las inmediaciones.

Por lo tanto, la teledetección, mediante el uso de imágenes satelitales, emerge como una herramienta para monitorear tanto la calidad del agua como los cambios en el uso del suelo (McLaughlin et al., 2019) Esta tecnología permite obtener datos precisos y actualizados que facilitan un análisis detallado de las transformaciones en el entorno.

A partir de este panorama, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cómo ha variado la calidad del agua en el área de influencia de la laguna Yahuarcocha entre 2011 y 2019?
- ¿Qué transformaciones se han producido en la cobertura vegetal y en el uso del suelo en la zona circundante a la laguna durante el mismo período?
- ¿De qué manera influye el cambio en el uso del suelo sobre la calidad del agua de la laguna?
- ¿Cómo impacta el uso de fertilizantes y pesticidas en la concentración de nutrientes en la laguna a lo largo del período de estudio?

Este trabajo es importante porque busca entender cómo ha cambiado la cobertura y el uso del suelo en la laguna Yahuarcocha entre los años 2011 al 2019, utilizando imágenes satelitales para obtener información detallada, también analiza la calidad del agua, enfocándose en la concentración de parámetros físicos, químicos y

microbiológicos como indicadores de afectación causada por actividades antropogénicas. Estos resultados no solo ayudarán a comprender estos cambios, sino que también serán una herramienta clave para desarrollar políticas y estrategias que protejan y conserven la laguna, garantizando así su sostenibilidad en el futuro.

3. Marco teórico referencial

3.1 Laguna de Yahuarcocha

3.1.1 Ubicación y Características

El significado del nombre de la laguna de Yahuarcocha se deriva de YawarKucha, yawar=sangre y kucha= lago (Kichwa), fue declarada la tercera laguna sagrada del Ecuador por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel de Ibarra, 2020).

La cuenca de Yahuarcocha, se encuentra entre los 3827 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en sus puntos más altos y los 2210 m.s.n.m. en las áreas más bajas, generando un gradiente altitudinal considerable, con una pendiente media de la cuenca de 98.27 %, Pendiente media del río principal de 177.96 %, reflejando una topografía bastante accidentada (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Ibarra 2021).

La laguna tiene una profundidad máxima de aproximadamente 7 metros y una profundidad mínima de alrededor de 4 metros (Méndez, 2022).

Además, forma parte de la Cuenca del río Mira y de la microcuenca del río Tahuando (Cuarán & Burbano, 2018). Ocupa una depresión volcánica de la cordillera andina, siendo el punto hídrico más importante en la cuenca presenta un máximo de profundidad de 6.9 m y profundidad media de 4.9 m. Además, tiene una superficie de 2.41 km² y presenta una forma alargada (Quimbiamba & Sánchez, 2023). El área de influencia de este estudio comprende un total de 2,465.24 hectáreas e incluye la unidad hídrica 154823, la cual está vinculada al río Tahuando, este río juega un papel de abastecimiento de agua de la laguna Yahuarcocha (Anexo 1).

En el área de influencia la actividad económica está ligada primordialmente a la producción agrícola, agropecuaria y turismo ocupando la mayor parte de superficie de la microcuenca, las actividades antrópicas que se desarrollan son: el comercio, recreación, hospedaje y actividades acuáticas, mismas que permiten un

movimiento económico dentro de la zona (Gobierno Autónomo Descentralizado de Imbabura, 2023).

La creciente demanda de producción ha generado una presión antrópica sin precedentes, manifestándose en la expansión agrícola, la urbanización y el desarrollo de infraestructura. Como consecuencia, la laguna se encuentra en un estado crítico de eutrofización, avanzando hacia condiciones hipertróficas que ponen en riesgo su ecosistema. La agricultura se destaca como una de las principales causantes de la contaminación de los ecosistemas acuáticos, debido al incremento de nutrientes, ya que estas descargas contaminantes son transportadas y depositadas en el cuerpo de agua a través de la escorrentía, exacerbando así el deterioro de la calidad del agua (Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel de Ibarra, 2020).

Mollocana Lara et al. (2024), mencionan que el estado trófico es un indicador de la productividad biológica y la calidad de sus aguas, influenciado por presencia de nutrientes como fósforo y nitrógeno. Según el Índice de Estado Trófico (IET) utilizado en la investigación, los resultados reflejan que la laguna se encuentra en estado hipereutrófico, con un ecosistema impactado.

3.1.2 Geografía y Topografía del área de influencia de la Laguna de Yahuarcocha

Según el Gobierno Autónomo Descentralizado de Imbabura (2023), la información geológica de la Laguna de Yahuarcocha se basa en mapas geológicos de Ibarra y Otavalo, que datan de 1978 y 1979 - 1980, respectivamente. Se identifican varias formaciones geológicas en la zona:

- **Terrazas:** Son formaciones localizadas en las proximidades del borde de la laguna, presentando pendientes suaves y una rica vegetación palustre. Con un espesor aproximado de 1 metro, estas terrazas se datan en el período Plioceno, lo que indica su antigüedad y su importancia geológica en la configuración del paisaje local.

- **Depósitos coluviales:** Ubicados detrás de las terrazas, estos depósitos coluviales se extienden por las partes medias de la laguna y alcanzan un espesor de hasta 3 metros. Al igual que las terrazas, también se datan en el Plioceno, lo que sugiere que han sido formados por procesos de erosión y sedimentación a lo largo de millones de años, contribuyendo a la dinámica geológica de la región.
- **Formaciones volcánicas:** La formación volcánica de Angochagua representa una característica geológica significativa en la microcuenca, abarcando una extensión de 18.97 km². Esta área no solo destaca por su origen volcánico, sino que también juega un papel en la biodiversidad y en la regulación de los recursos hídricos de la región, al influir en la topografía y en los ecosistemas circundantes.

Según el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal San Miguel de Ibarra (2015), la topografía de la microcuenca de la Laguna de Yahuarcocha es variada, con la presencia de diferentes ecosistemas que conforman el paisaje. Se destacan:

- **Herbazal y arbustal montano alto:** Incluye áreas de páramo y bosques muy húmedos montanos.
- **Bosque siempreverde montano alto:** Ubicado en el norte y centro de la cordillera occidental.
- **Arbustal húmedo y xérico montano:** Se encuentra en los valles del norte.

La geomorfología de la región está influenciada por la dinámica fluvial y la remoción en masa, con geoformas volcánicas que incluyen lomas, mesetas y depresiones, lo que contribuye a la diversidad del paisaje y los ecosistemas presentes en la cuenca (Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel de Ibarra, 2020).

3.1.3 Condiciones de la calidad del agua en la laguna de Yahuarcocha.

Las condiciones de calidad del agua en la laguna Yahuarcocha refleja los impactos naturales y antropogénicos, por esta razón, la evaluación constante de su estado es fundamental para garantizar la conservación de la biodiversidad y la salud de las

comunidades aledañas. Es imperativo mantener la laguna libre de contaminantes orgánicos, inorgánicos y radiactivos que puedan comprometer su sostenibilidad a largo plazo (Navoni et al., 2012).

En el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón San Miguel de Ibarra (2021), la laguna enfrenta serios problemas de contaminación asociados a diversos factores:

- **Fosfatos y Nitratos:** Provenientes de aguas residuales urbanas, actividades agrícolas y domésticas, que favorecen la eutrofización, generando un crecimiento excesivo de algas y cianobacterias.
- **Metales pesados:** Por actividades urbanas, industriales y naturales como la lixiviación de depósitos minerales, afectando gravemente a la fauna acuática.
- **Ácidos, álcalis y sales:** Alteran el pH del agua, impactando los procesos biológicos y químicos.
- **Sedimentos y Materiales suspendidos:** Por erosión y escorrentía, que arrastran grandes cantidades de partículas, causando turbidez y pérdida de hábitats

El análisis de la calidad del agua en las lagunas se realiza mediante la medición de parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, conductividad eléctrica, DQO, DBO₅, nitritos, nitratos, fosfatos) y bacteriológicos (coliformes fecales), y su comparación con tablas de valores establecidos en normativas vigentes. En caso de no contener concentraciones nocivas de productos químicos o microorganismos patógenos, debe ser estéticamente agradable en términos de apariencia, sabor y olor (Ávila, 2008; Borrero, 2018).

Mollocana Lara et al. (2024), indica que en su estudio evaluaron el estado trófico de la Laguna Yahuarcocha utilizando el software AQUATOX, los resultados revelaron que la laguna se encuentra en un estado hipereutrófico debido a altas concentraciones de fósforo total, mientras que la clorofila y la transparencia del

agua indicaron un estado eutrófico. Este nivel de eutrofización se atribuye al vertido no regulado de aguas residuales domésticas y agrícolas.

Como resultado de su estudio, se probó la introducción de *Myriophyllum spicatum* como agente de biorremediación, logrando mejoras significativas en la calidad del agua, el fósforo total y la clorofila a disminuyeron, pasando de un estado hipereutrófico a eutrófico, y la transparencia mejoró a un estado mesotrófico. El modelo AQUATOX permitió simular los cambios, no alcanzó una validación completamente satisfactoria debido a la falta de datos sobre cargas contaminantes entrantes y la caracterización de especies en la laguna.

Lo que permitió lograr una mejor comprensión del estado ambiental e hídrico en el que se encuentra el cuerpo de agua, tener un conocimiento preciso acerca de su estado actual y de esta manera se podrá tomar mejores decisiones en torno la gestión y manejo de este recurso (Romero & Santos, 2018).

3.1.4 Peligrosidad de contaminación de la laguna de Yahuarcocha

La presencia de sustancias dañinas en los cuerpos hídricos altera la calidad del agua, convirtiéndola en un peligro tanto para el ambiente como para la salud humana (Ochoa-Mendoza et al., 2022). Las principales causas de esta contaminación incluyen los vertidos urbanos y domésticos, los desechos industriales, el calentamiento global, la deforestación, así como las actividades agrícolas, ganaderas e industriales, y la acumulación de basura y aguas fecales (Escobar, 2002).

En el caso de la laguna, los contaminantes más comunes son los metales pesados, compuestos orgánicos complejos como los derivados del petróleo o productos farmacéuticos, isótopos radiactivos y elementos traza (Ochoa-Mendoza et al., 2022). La dispersión de estos contaminantes en el medio acuático depende de su solubilidad en agua y de su capacidad para unirse a partículas finas. Esta interacción permite que los contaminantes se desplacen grandes distancias desde su fuente y se combinen rápidamente con otros elementos (Barceló & López, 2008).

En los alrededores de la laguna, uno de los principales problemas ambientales es la fragmentación de la cobertura vegetal, consecuencia del cambio en el uso del suelo, especialmente por la expansión de asentamientos humanos (Jiménez & Rodríguez, 2023). Este fenómeno ha provocado una notable disminución de la flora y fauna autóctona. Además, la contaminación de los afluentes permanentes y estacionales que alimentan la laguna genera alteraciones en las características organolépticas del agua. Este deterioro se ve agravado por las prácticas agrícolas inadecuadas en las zonas altas de la región. La disposición inadecuada de desechos sólidos provenientes de los hogares situados en las zonas bajas, junto con las actividades turísticas, agrícolas y ganaderas mal gestionadas, también contribuye significativamente a la contaminación del ecosistema acuático (Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel de Ibarra, 2020).

3.2 Cuencas Hidrográficas

Según la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, (2014), es la unidad territorial delimitada por la línea divisoria de sus aguas que drenan superficialmente hacia un cauce común. Incluyen en este espacio, poblaciones, infraestructura, áreas de conservación, de protección y zonas productivas (Aguirre, 2011).

Cuando los límites de las aguas subterráneas no coincidan con la línea divisoria de aguas superficiales, dicha delimitación incluirá la proyección de las aguas de recarga subterráneas que fluyen hacia la cuenca delimitada superficialmente. La cuenca hidrográfica es el área del territorio donde convergen todas las aguas provenientes de precipitaciones, deshielos y acuíferos, que fluyen hacia un punto de descarga, como un río, laguna o mar (Sáenz-Arias et al., 2023).

El análisis de una cuenca hidrográfica es un proceso integral que permite el monitoreo de una fuente hídrica, sus características físicas, hídricas y ecológicas (Rodríguez & Ramón-Alarcón, 2021).

Las cuencas hidrográficas son fundamentales para la gestión de los recursos hídricos, el estudio de la misma permite desarrollar planes de conservación de ecosistemas, control de contaminación de suelos y fuentes hídricas, gestión de riesgos, uso sostenible de los recursos naturales, entre otros (Vargas, Pérez, & García, 2011).

3.2.1 Caracterización de una cuenca hidrográfica de Yahuarcocha

a) Topografía y Morfología de la cuenca

Está situada en un área montañosa de la provincia de Imbabura, Ecuador, la laguna es un cuerpo de agua endorreico, lo que significa que su agua no tiene salida hacia el océano, esta característica geomorfológica afecta la acumulación de nutrientes, recibe agua de varios afluentes, incluyendo pequeños canales y ríos como el río Tahuando y quebradas circundantes, que transportan materia orgánica hacia la laguna, lo que puede contribuir a la eutrofización (Méndez, 2022).

b) Uso del suelo y Cobertura vegetal

La cobertura vegetal natural se ha reducido significativamente debido a las actividades humanas, los bosques nativos ocupan solo el 6.41% del área total de la cuenca (166.33 ha), mientras que los páramos representan un 2.42% (62.79 ha), la vegetación herbácea cubre el 22.47% (582.70 ha) y la arbustiva un 14.66% (380.12 ha). Los remanentes naturales están concentrados en las zonas altas y áreas de difícil acceso, siendo fundamentales para la regulación hídrica y la biodiversidad de la cuenca (Equipo Consultor, 2022).

El uso del suelo en Yahuarcocha está dominado por actividades humanas, los cultivos representan el 18.84% del área (488.69 ha), principalmente en las zonas medias y bajas, mientras que los pastos ocupan un 10.02% (259.97 ha), Además, el mosaico agropecuario, que combina cultivos y pastoreo, cubre un 4.98% (129.13 ha). Las áreas urbanas, incluidas infraestructuras y asentamientos, abarcan un 8.40% (217.92 ha), concentrándose cerca de la laguna, la cuales han intensificado

la erosión, el uso de agroquímicos, sedimentos y nutrientes en la laguna (Equipo Consultor, 2022).

c) Geología de la cuenca

Presenta una geología dominada por formaciones volcánicas y depósitos sedimentarios como los volcánicos de Angochahua, volcánicos Imbabura, depósitos Fluvio-lacustres, depósitos Coluviales (Equipo Consultor, 2022).

Las características geológicas y los sedimentos en la laguna han llevado a la formación de condiciones de anoxia en ciertas áreas, ya que esta se genera por la acumulación de lodos y sedimentos, creando así un ambiente favorable para ciertos organismos, pero perjudicando a otros contribuyendo al deterioro de la calidad del agua (Méndez, 2022).

La geomorfología, de la cuenca de Yahuarcocha es un factor determinante para el comportamiento hidrológico de la zona, estas características permiten la acumulación de agua en la laguna y afectan la circulación del agua subterránea, La geología también afecta la calidad del agua de la laguna, ya que el tipo de suelo puede influir en la acumulación de sedimentos y nutrientes que contribuyen al proceso de eutrofización. La presencia de suelos de baja plasticidad puede restringir la circulación de agua subterránea, lo que puede resultar en la acumulación de contaminantes (Méndez, 2022).

3.2.2 Análisis multitemporal de una cuenca hidrográfica

El estudio multitemporal de una cuenca hidrográfica hace referencia a un proceso en el que se realiza un análisis comparativo de la variación en la cobertura y uso del suelo en un periodo de tiempo, permitiendo identificar, cuantificar y monitorear los impactos que se generan en la misma (Cárdenas & Zamora, 2019). Este estudio, a través de herramientas satelitales permite generar proyecciones para evaluar la calidad de los recursos naturales.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), es una herramienta fundamental en el análisis multitemporal en una cuenca hidrográfica para comprender la relación entre el uso del suelo y la calidad del agua (Poma & Usca, 2020), que permite integrar datos espaciales y atributos del suelo, como la cobertura vegetal, la topografía y la erosión del suelo, con información sobre la calidad del agua, como la presencia de contaminantes y de los ecosistemas acuáticos (Duarte et al., 2021). Al combinar estos datos, los SIG pueden ayudar a identificar áreas críticas donde el uso del suelo está afectando a la calidad del agua, lo que a su vez puede guiar la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales y la planificación del uso del suelo (Trujillo-Jiménez, Liberoff, Pessacg, Pacheco, & Flaherty, 2021).

3.2.3 Calidad del agua

La calidad del agua hace referencia a un conjunto de características fisicoquímicas y microbiológicas, cuyos parámetros se encuentran dentro de los límites permisibles en la normativa ecuatoriana determinando un óptimo estado del recurso hídrico (Villena, 2018).

La calidad del agua, influye en el uso agrícola; ya que puede resultar en la acumulación de contaminantes en los cultivos, afectando la producción y la salud, por lo que se destaca la necesidad de monitoreo de la calidad del agua y la implementación de estrategias para mejorarla, asegurando que cumpla con los estándares requeridos, estos contaminantes microbiológicos (patógenos), químicos (metales pesados, pesticidas) y físicos (turbidez, temperatura, pH) afectan ambiente por lo que existen normativas que establecen límites esenciales para proteger al ambiente (Libro Blanco del Agua en España, 2000).

3.2.3.1 Parámetros microbiológicos

Los parámetros microbiológicos son indicadores de la presencia de microorganismos patógenos (bacterias, virus y parásitos), causantes de riesgos sanitarios. Su detección es fundamental para evaluar la calidad y seguridad del agua (Bastidas, 2024).

a) Coliformes Totales

Son un grupo de bacterias que se encuentran en el suelo y su vegetación, estas a través de la digestión pueden llegar al intestino de las personas y animales. La presencia de esta bacteria en el agua denota contaminación orgánica (Chavarría et al., 2023).

b) Coliformes Fecales

Son un grupo de especies bacterianas, subgrupo de Coliformes totales, como la *Escherichia coli* (Chavarría et al., 2023). La presencia de esta bacteria indica una contaminación por materia fecal, por lo que esa agua no es apta para el consumo (Menocal & Caraballo, 2014).

c) Parásitos

Generalmente son parásitos de *Giardia* y *Cryptosporidium* que sobreviven en medios acuáticos. Los parásitos son generadores de enfermedades, por lo que resulta un riesgo a la salud pública (Menocal & Caraballo, 2014).

d) Bacterias Heterótrofas

Estas bacterias sobreviven en ambientes acuáticos y se alimentan de materia orgánica. Son indicadores de la calidad del agua, puesto que, una alta concentración de estas bacterias puede significar una alta contaminación de los cuerpos hídricos (Andueza et al., 2019).

3.2.3.2 Parámetros físico-químicos

a) pH

El pH es un indicador clave en la calidad del agua, mide la acidez y alcalinidad del agua. El pH del agua potable suele variar entre 6.5 y 9.5 (Vázquez-Blanco et al., 2018).

b) Oxígeno Disuelto (OD)

El OD es clave para evaluar la calidad del agua, puesto que, contribuye a la supervivencia de organismos aeróbicos. Una baja concentración de OD, puede ser indicio de contaminación orgánica y eutrofización (Muñoz et al., 2017).

c) Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es una medida que indica si el agua puede conducir electricidad, está relacionado con la cantidad de iones disueltos en ella, cuando es alta, esto puede señalar que el agua tiene una dureza elevada, lo que significa que contiene una gran cantidad de minerales como calcio y magnesio. Aunque estos minerales son necesarios en ciertas cantidades, su presencia en exceso puede afectar la calidad del agua, haciéndola menos adecuada para el consumo humano y el uso agrícola (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

d) Sólidos Disueltos Totales (TDS)

Los TDS representan la cantidad total de materia orgánica e inorgánica disuelta en el agua. La presencia de TDS en el agua de consumo puede provocar enfermedades, como también degradación en los ecosistemas (Vera et al., 2021).

e) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La DBO₅ hace referencia a la cantidad de oxígeno necesario para la degradación de materia orgánica en el agua, es decir, que una concentración elevada de DBO₅ indica la presencia de contaminantes orgánicos en las fuentes hídricas (Méndez, 2023).

f) Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es la cantidad de compuestos que pueden ser oxidados a través de un oxidante químico. Una alta concentración de este parámetro puede indicar una contaminación por contaminantes químicos y materia orgánica en el agua (Méndez, 2023).

g) Metales Pesados

Son metales que en concentraciones elevadas suelen ser perjudiciales para el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y, en agua de consumo generar riesgos de toxicidad en la salud (Andueza et al., 2019).

h) Fosfatos

Los fosfatos son compuestos que indican la concentración de fósforo en el agua, provenientes principalmente de detergentes, fertilizantes y desechos orgánicos, su exceso puede causar eutrofización, promoviendo el crecimiento descontrolado de algas que reduce el oxígeno en el agua y afecta la vida acuática (Andueza et al., 2019).

i) Nitritos y Nitratos

Los nitritos y nitratos son compuestos de nitrógeno que se forman principalmente a partir del uso excesivo e inadecuado de fertilizantes en la agricultura; La presencia elevada de nitritos y nitratos en el agua puede tener efectos perjudiciales tanto para los ecosistemas acuáticos como para la salud humana, ya que pueden contribuir a la contaminación del agua potable (Bernal et al., 2023; Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

3.2.4 Carga contaminante potencial de una cuenca hidrográfica

La carga contaminante potencial de una laguna se refiere a la cantidad de contaminantes que pueden ser liberados en el ambiente en un determinado período de tiempo (Guangasig & Loor, 2023). Para estimar la carga contaminante de una laguna, se pueden utilizar parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el Nitrógeno (N), el Fósforo (P), y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) (De Marco et al., 2014).

3.2.4.1 Tipos de contaminación

a) Contaminación difusa

La contaminación difusa de las aguas se genera por diversas fuentes no puntuales, que genera una alteración en los cuerpos de agua y en sus ecosistemas. Esta contaminación es de difícil monitoreo debido a que no se conoce su origen (González, 2021). Esta contaminación suele provocar efectos adversos como la eutrofización, pérdida de la biodiversidad, contaminación microbiológica, entre otros (Muyón, 2022; Ongley, 1997).

b) Contaminación puntual

La contaminación puntual de las aguas se da por una fuente específica, suele generarse debido a actividades humanas específicas, su concentración es elevada y pueden provocar toxicidad para la fauna acuática, eutrofización, incluso riesgos para la salud humana (Massone et al., 2022).

c) Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica ocurre cuando contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, entre otros, se depositan directamente en los cuerpos de agua (Argota & Doroteo, 2021).

3.2.4.2 Tipos de Contaminantes

a) Nutrientes

Nutrientes como el fósforo y nitrógeno, generalmente provienen de fertilizantes agrícolas, aguas residuales y escorrentía urbana (Villena, 2018).

b) Sólidos suspendidos

Son partículas suspendidas en los cuerpos de aguas como materia orgánica, sedimentos, entre otros, que obstruyen el paso de luz y generan turbiedad en los

cuerpos de agua, esto puede llegar a afectar la biodiversidad en los mismos (Guangasig & Loor, 2023; Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

c) Contaminantes orgánicos e inorgánicos

Estos contaminantes suelen ser pesticidas, productos químicos industriales y metales pesados, que suelen presentar efectos adversos en la fauna acuática y generar daños en la salud humana (Manuel et al., 2021).

d) Bacterias y microorganismos patógenos

Las bacterias y otros microorganismos patógenos son organismos microscópicos que pueden provocar enfermedades en humanos, animales y plantas. Aunque muchas de estas bacterias son unicelulares y desempeñan funciones beneficiosas, como en la digestión, otras pueden ser perjudiciales y causar infecciones. Los patógenos abarcan no solo bacterias, sino también virus, hongos y protozoos, todos capaces de invadir organismos y desencadenar enfermedades (Maridueña-Zavala et al., 2021).

En relación con el agua, la detección de estos microorganismos permite evaluar la calidad del agua potable, por esta razón, es esencial llevar a cabo análisis microbiológicos que permitan identificar la presencia de estos organismos y asegurar que el agua sea segura para el consumo humano (Larrea-Murrell et al., 2015).

e) Temperatura del agua

Estas variaciones de temperatura generalmente se producen por descargas de actividades industriales, ocasionando alteraciones en el equilibrio ecológico (Bastidas, 2024).

3.2.5 Prevención y control del agua de consumo humano

La contaminación del agua destinada al consumo humano puede originarse a partir de diversas fuentes, las cuales, en su conjunto, comprometen tanto la calidad del

agua como la salud pública (Dueñas & Hinojosa, 2021; Impactos en la salud humana relacionados con el agua, saneamiento y cambio climático, 2024). Una de las principales causas es la escorrentía agrícola, la cual arrastra fertilizantes y pesticidas que son utilizados en los cultivos. Estos compuestos químicos, al ser arrastrados por las lluvias, se infiltran en las fuentes en los cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento, elevando la concentración de sustancias tóxicas en el agua (Castillo Blanco et al., 2024). A su vez, la contaminación por aguas no tratadas, provenientes de actividades domésticas o agrícolas, constituye una fuente significativa de contaminación. Estas aguas residuales pueden contener microorganismos patógenos, lo que incrementa el riesgo de enfermedades. Adicionalmente, los residuos de productos químicos industriales, al ser vertidos en cuerpos de agua sin regulación adecuada, contribuyen a la degradación de la misma (Méndez, 2023). Otro factor importante es la contaminación por desechos sólidos, cuya acumulación en los cuerpos de agua favorece la proliferación de bacterias y la liberación de toxinas, lo que agrava aún más el impacto en la salud humana y en el equilibrio ecológico de la zona. Estos procesos, en conjunto, requieren una gestión efectiva para mitigar los riesgos asociados con la contaminación y a la calidad del agua de calidad (Bastidas, 2024).

En la mayoría de los casos la falta de tratamiento de las aguas residuales limita a los pobladores el consumo de agua potable, esta situación preocupa a los consumidores, puesto que, representa un riesgo en la salud pública y de los ecosistemas presentes (Coloquio Ciencia y Sociedad, 2021).

a) Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales a través de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), previo a ser vertidas en los cuerpos de agua para evitar la contaminación e impedir la propagación de enfermedades transmitidas por el agua (Romero-Aguilar et al., 2019).

b) Control de escorrentía agrícola

La escorrentía se refiere al flujo de agua que se desplaza sobre la superficie terrestre, especialmente después de eventos de precipitación, como la lluvia o el deshielo de la nieve (Lozano-Rivas, 2018; Martínez et al., 2017).

Este fenómeno ocurre cuando la cantidad de agua que cae excede la capacidad del suelo para absorberla, lo que provoca un desbordamiento que dirige el agua hacia ríos, arroyos, lagos y, finalmente, hacia los océanos, este proceso, es un componente esencial del ciclo hidrológico, ya que no solo ayuda a recargar los cuerpos de agua, sino que también juega un papel importante en la erosión del suelo y en la distribución de nutrientes en los ecosistemas (Martínez et al., 2017).

El control de escorrentía de productos químicos utilizados en la agricultura como pesticidas y fertilizantes, mediante la promoción de prácticas agrícolas sostenibles permite prevenir la contaminación a los cuerpos de agua (Velázquez-Chávez et al., 2022) y evita la degradación de los ecosistemas acuáticos.

c) Monitoreo de la calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua es un proceso estructurado que comienza con la definición de objetivos y la identificación del área de estudio, seguido de la selección de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, determinación de la frecuencia de muestreo y el plan de monitoreo de calidad del agua, en el que se recolectan muestras en puntos específicos (Ayala & Herrera, 2019).

Las muestras recolectadas se analizan en laboratorios y los resultados se interpretan para elaborar un informe que resume los hallazgos y ofrece recomendaciones para la gestión del agua, contribuyendo así a la protección de los ecosistemas y a la salvaguarda de la salud pública (Méndez, 2023).

El control y monitoreo periódico de la calidad del agua, puede ayudar a detectar alteraciones en los cuerpos de agua y prevenir su contaminación (Conejeros et al., 2021).

d) Desinfección del agua

Existen diversas técnicas de desinfección del agua para consumo humano, como la cloración, irradiación ultravioleta o desinfección con ozono, que permiten la eliminación de contaminantes biológicos (Hernández-Navarrete et al., 2014).

e) Educación y concientización

La educación ambiental juega un papel fundamental en el control de la contaminación de las fuentes de agua (Delgado et al., 2021), educar a las comunidades sobre la importancia de promover prácticas responsables para evitar degradación de los cuerpos de agua (Villena, 2018).

La contaminación de los cuerpos hídricos representa una amenaza significativa para la salud de las poblaciones vulnerables, incluyendo a los niños, adultos mayores y personas con enfermedades inmunodepresoras. Los niños son especialmente susceptibles, ya que su ingesta de agua y alimentos contaminados puede ser desproporcionadamente alta en relación con su peso corporal, lo que aumenta el riesgo de enfermedades gastrointestinales y trastornos del desarrollo, ya que su capacidad para combatir infecciones se ve reducida (Ayala-Esparza et al., 2024). Por lo tanto, es fundamental implementar programas de educación y concientización que informen a estas comunidades sobre los riesgos de la contaminación del agua y promuevan prácticas responsables para su manejo, empoderándolas para adoptar medidas preventivas que protejan su salud y bienestar (Grondona et al., 2015).

3.3 Los sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de evaluación multicriterio

La combinación de SIG y técnicas de evaluación multicriterio es útil en la ordenación del territorio, ya que permite una evaluación cuantitativa detallada de las alternativas disponibles y la formulación de planes coherentes en un periodo de tiempo determinado; esta combinación es una tendencia importante que facilita la

toma de decisiones fundamentadas en un planeamiento ambiental más viable y desarrollado (Rodríguez & Alonso, 2022).

3.4 La Teledetección y su uso en estudio ambiental

Esta técnica se utiliza para obtener datos sobre la superficie terrestre, como la cobertura del suelo, la vegetación, la humedad del suelo, la temperatura, entre otros, y se aplica en una amplia gama de campos, incluidos los estudios ecológicos, la gestión de recursos naturales, agricultura, climatología y cartografía (Trujillo-Jiménez et al., 2021).

La teledetección ambiental se fundamenta en la recolección de datos espaciales sobre la biosfera a través de radiación electromagnética (Veneros et al., 2020; Romero-Valdivieso, 2006). La información satelital es utilizada generalmente para dar seguimiento a las dinámicas de fenómenos ambientales (López-Montecinos, 2019), tales como, cambio de cobertura del suelo, variaciones en la temperatura de la superficie terrestre o acuática, comportamiento de glaciares, detección de gases de efecto invernadero, detección de áreas inundadas, avance de la deforestación y desertificación, calidad del agua, entre otros (Romero, 2017). Los datos proporcionados por teledetección se integran a sistemas de información geográfica a distintos niveles de resolución espacial con una naturaleza geográfica y radiométrica (Gómez & Vizcarra, 2023).

3.4.1 Aplicaciones de la teledetección en los cambios del uso de suelo.

Más allá de su función en la creación de mapas, su aplicación radica en proporcionar una visión integral de la evolución de la cobertura vegetal y los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo y el espacio, lo que permiten comprender de manera holística la interacción entre los factores físicos, naturales y humanos (Pérez & García, 2013).

Para los estudios relacionados con el territorio y el paisaje, la integración de los SIG se ha convertido en una herramienta esencial y excepcional, gracias a su creciente

utilidad para analizar y cuantificar las coberturas y los cambios en el uso del suelo, así como para identificar áreas con potencial para su recuperación y preservación de la biodiversidad (Hernández, Ellis, & Gallo, 2013).

3.4.2 Matriz de cambio

Es una herramienta utilizada en el análisis espacial, principalmente en estudios de uso de suelo y cobertura vegetal, para identificar y cuantificar los cambios que ocurren entre diferentes categorías en dos períodos de tiempo (Quezada & Sevilla 2021).

3.4.3 Procesamiento de las imágenes satelitales.

3.4.3.1 Landsat

Landsat es un programa de satélites de observación de la Tierra gestionado por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Desde su lanzamiento en 1972, los satélites Landsat han proporcionado imágenes de alta resolución de la superficie terrestre, que se utilizan para monitorear y analizar cambios en el uso del suelo, la deforestación, la agricultura, la gestión del agua, y otros aspectos ambientales y geográficos (Valeriano, 2024).

3.4.3.2 ARGIS

ArcGIS es una plataforma geoespacial muy completa integra y conecta datos a través del contexto geográfico, para crear, administrar, analizar, representar cartográficamente y compartir todo tipo de datos.

El software ArcGis Desktop contiene las aplicaciones de ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, las cuales se usan para cualquier trabajo de SIG. La aplicación ArcMap se utiliza para las actividades que tienen que ver con la composición, edición y análisis de mapas resultantes. ArcToolBox es una ventana de herramientas que contiene todo lo necesario para el geoprocésamiento y ArcCatalog es la aplicación que ayuda a administrar y organizar los datos SIG (Quezada & Sevilla, 2021).

3.4.3.3 MapBiomás

MapBiomás, es una iniciativa colaborativa que utiliza imágenes satelitales y tecnologías de procesamiento de datos para mapear y monitorear los cambios en la cobertura y uso del suelo en diferentes regiones, principalmente en América Latina, su objetivo es proporcionar información detallada y actualizada sobre la deforestación, la expansión agrícola, la urbanización y otros cambios en el uso del suelo, facilitando la toma de decisiones para la conservación y gestión sostenible de los recursos naturales. La plataforma ofrece acceso a mapas y datos históricos que permiten analizar las tendencias y dinámicas de la cobertura terrestre a lo largo del tiempo (MapBiomás, 2024).

Los mapas anuales de cobertura y uso del suelo de MapBiomás Ecuador fueron producidos a partir de la clasificación píxel a píxel de imágenes del satélite Landsat. Todo el proceso es realizado con algoritmos de machine learning a través de la plataforma Google Earth Engine. Para facilitar la parametrización de los algoritmos y la organización de todas las etapas de procesamiento se utilizan un total de 107 cartas. Cada carta tiene dimensiones de 1 x 1,5 grados (lat/long) (Mapbiomas, 2024).



Figura 1. Clasificación de las imágenes satelitales para cobertura y uso de suelo.

Autor: <https://ecuador.mapbiomas.org/descripcion-general-de-la-metodologia/>

La leyenda que emplea MapBiomás de las clases mapeadas en Ecuador: Bosque (ID = 3), Bosque abierto (ID= 4), Manglar (ID = 5), Bosque inundable (ID = 6), Formaciones naturales no forestales inundables (ID = 11), Herbazal (ID = 12), Otra formación natural no forestal (ID = 13), Afloramiento rocoso (ID = 29), Mosaico de agricultura y pasto (ID =

21), Silvicultura (ID = 9), Minería (ID = 30), Otra área sin vegetación (ID = 25), Ríos, lagos u océano (ID = 33), Acuicultura (ID = 31), Glaciares (ID = 34) y No observado (ID = 27) (Mapbiomas, 2024).

3.4.4 Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI)

Mamani Vargas (2021), indica el índice de agua de diferencia normalizado “NDWI” diseñado por McFeeters (1996) es ampliamente utilizado para maximizar la presencia del agua. Para su cálculo se utiliza las banda verde e infrarrojo cercano de una imagen satelital, los valores positivos muestran las cubiertas del agua, mientras que los valores cero o negativos muestran la vegetación, el suelo, rocas o coral (Ariza et al., 2018). La ecuación 2 ilustra el índice de agua de diferencia normaliza.

$$\frac{NDWI=GREEN-NIR}{GREEN+NIR}$$

Donde:

GREEN : Valores de banda verde visible

NIR : Valores de banda infrarrojo cercano

3.4.5 Índice de Turbidez Normalizada (NDTI)

Vanesa Vargas (2023) indica que se basa en el fenómeno de que la reflectancia electromagnética es mayor en el espectro verde que en el espectro rojo para el agua clara. Por lo tanto, con el aumento de la turbidez también aumenta la reflectancia del espectro rojo. En el estudio actual, se utilizan las bandas verdes (banda 3) y roja (banda 4).

$$NDTI = (Red\ band - Green\ band)/(Redband + Greenband)$$

$$NDTI = (B4 - B3)/(B4 + B3)$$

3.4.6 Índice de Calidad del Agua

El Índice de Calidad del Agua (ICA), consiste básicamente en una expresión simple de una combinación compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de la calidad del agua, que permite evaluar el estado de calidad de las fuentes

hídricas con fines de preservación de la flora y la fauna, basado en parámetros físico químicos y contaminantes, el resultado de la ecuación es un número adimensional que representa la calidad del agua que puede ser: excelente (90-100), buena (70-90), regular (50-70), mala (25-50) y pésima (0-25) (Salas, 2022).

Para el cálculo del ICA se utilizó el método propuesto por la NSF (Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU.) en la que intervienen nueve parámetros: coliformes fecales (en NMP/100mL), pH (en unidades de pH), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO5 en mg/L), nitratos (NO3 en mg/L), fosfatos (PO4 en mg/L), cambio de temperatura (en °C), turbidez (en FAU), sólidos disueltos totales (en mg/L) y oxígeno disuelto (OD en % saturación) (Salas, 2022).

4. Materiales y Metodología

4.1. Materiales

a) Materiales de laboratorio

- Software ArcGis
- Mapas de cobertura y uso de suelo Mapbiomas
- Imágenes satelitales Landsat 8
- Cartografía base de IGM 1: 50 000
- Puntos georreferenciado del monitoreo de calidad del agua del año 2018 otorgado por INAMHI y el Gobierno Descentralizada de Ibarra.

b) Materiales de Oficina

- Ordenador
- Impresora
- Disco externo

c) Insumos de información

- Cartografía base a escala 1:50000 (lo que refiere a ríos, vías, curvas de nivel)
- División político administrativa de Consejo nacional de límites -CONALI (provincias, parroquia y cantones)
- Cobertura vegetal y Uso de suelo de los años 2011 al 2019 -Mapbiomas
- Los resultados de calidad del agua del año 2018 proporcionados por el INAMHI y Gobierno Descentralizado del cantón de Ibarra.
- Landsat 8, bandas: 3, 4 y 5.

4.2. Metodología

4.2.1. Delimitación del área de influencia

La Laguna de Yahuarcocha, que pertenece a la cuenca del río Ambi, con la que se tomó como referencia para la delimitación de área de influencia con enfoque de cuenca hidrográfica a nivel 6, utilizando la metodología Pfafstetter que es la División Hidrográfica del Ecuador, para los Niveles 5 y 6 a nivel nacional y nivel 7 para la vertiente

del Amazonas a la Escala 1: 50 000, además se realizó un análisis geoespacial con la herramienta de “análisis espacial” de ArcGIS, dentro de la cual se seleccionó la categoría de “hidrología”. Se procedió con un “relleno” al modelo digital de elevación de 12.5m; una vez realizado esto se obtiene el flujo de dirección, con esto se realizó también un flujo de acumulación y con esto se estableció el punto desde el cual se va a realizar el área de influencia. Así se delimitó con un “Watershed”.

En la figura 1, se aprecia el model builder con las herramientas de análisis espacial que permitieron realizar la delimitación del área de influencia tomando un punto de la cuenca previo a la confluencia con el río principal, dando un área de influencia de 2465,25 hectáreas.

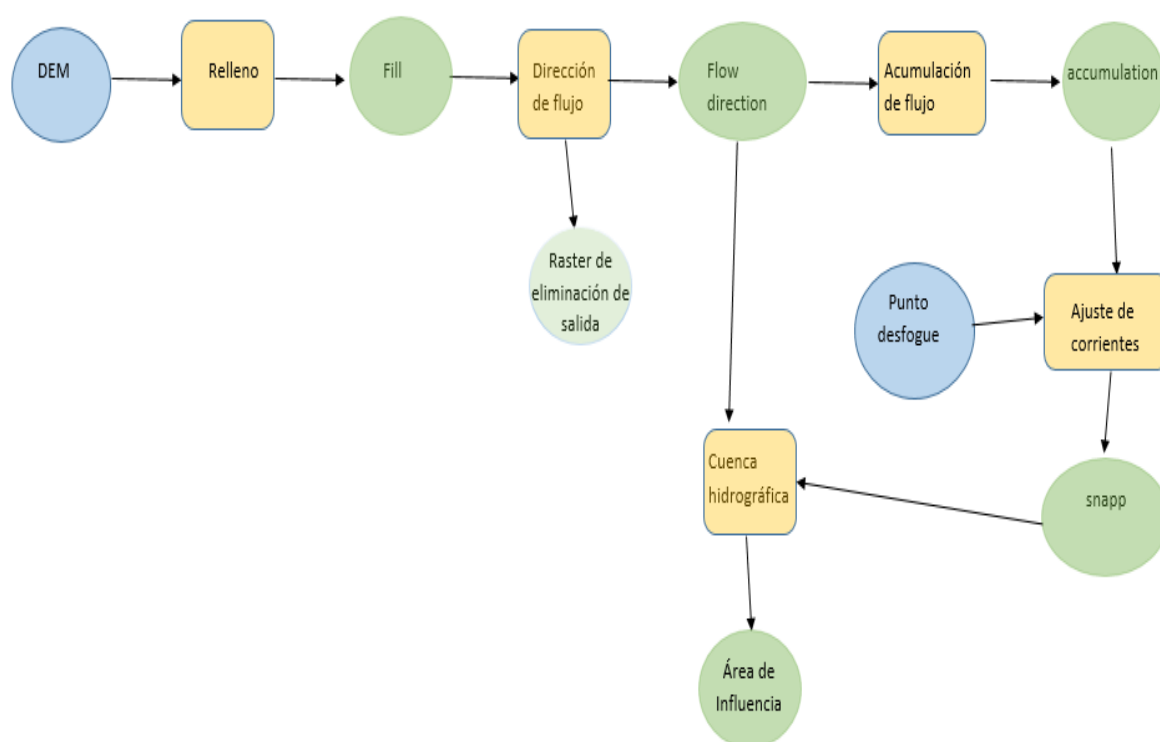
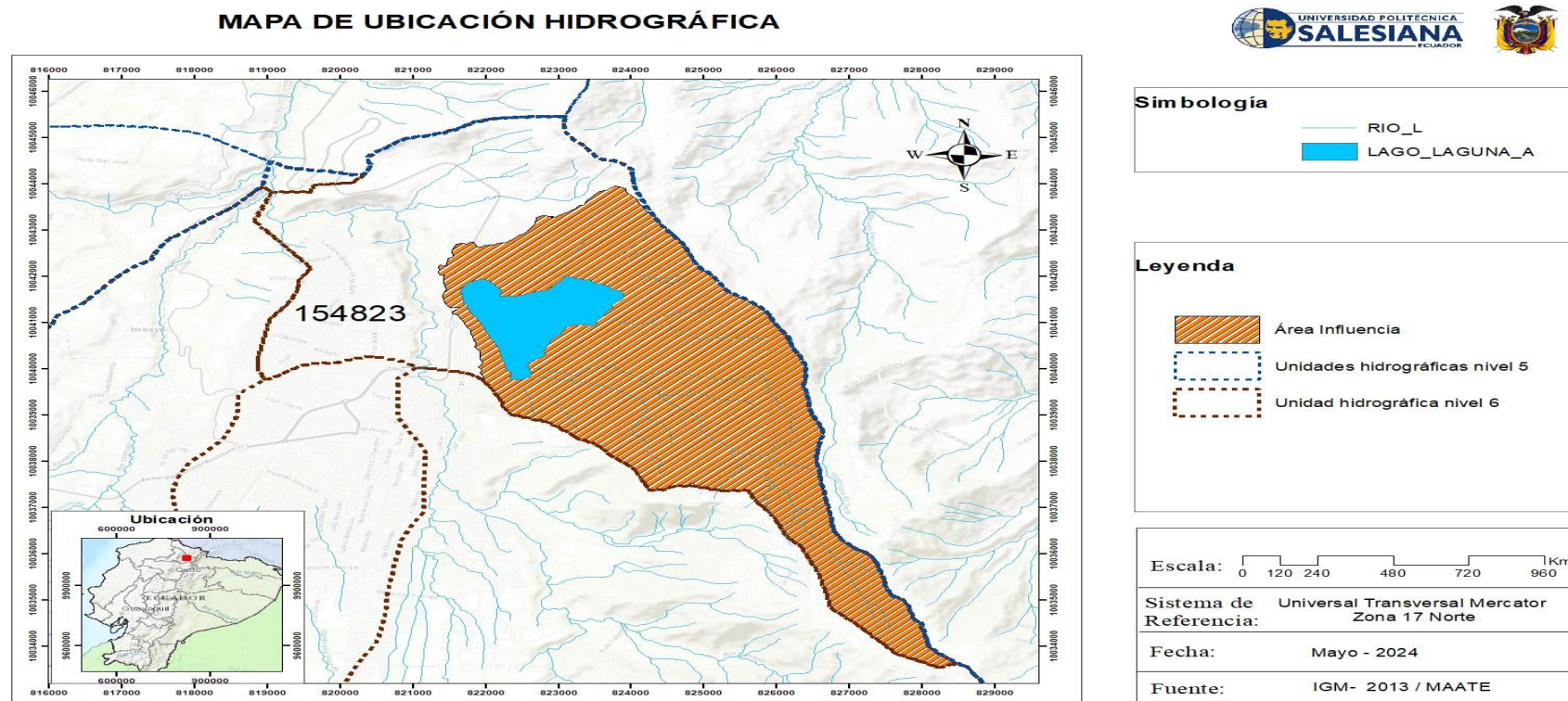


Figura 2: Model builder con las herramientas de análisis espacial para la delimitación del área de influencia.

Elaborado por el Autor



Mapa 1. Ubicación hidrográfica de la zona de estudio

Elaborado por el Autor

4.2.2. Técnica e instrumentos de recolección de datos

Se realizó mediante descargas de imágenes satelitales del MapBiomias y Landsat 8 (bandas 3 y 5) y para calidad del agua información que proporcionó el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y el GAD Municipal de Ibarra del año 2018.

4.2.3. Procesamiento de datos digitales para los cambios de usos de suelo y cobertura vegetal

4.2.3.1. MapBiomias

Para el análisis de cambio de usos de suelo y cobertura vegetal de la Laguna de Yahuarcocha, se realizó descarga en la página web de MapBiomias Ecuador del mapa anual de 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, en formato GeoTiff, se utilizó el nivel de la categoría de Uso del Suelo de Ecuador agrupados según las clases de cobertura y uso de suelo equivalentes de la leyenda MapBiomias Ecuador, de acuerdo a la tabla 2.

Tabla 1. Categorías de Uso del Suelo de Ecuador agrupados según las clases de cobertura y uso de suelo equivalentes de la leyenda MapBiomass Ecuador.

Clase Nivel 1	Clase Nivel 2	Bioma	Descripción
1.Formación forestal	1.1 Bosque	Amazonía	En la región Amazonía Baja, áreas con cobertura arbórea densa, primaria o secundaria y de regeneración por sucesión natural, mayor a media hectárea. Es considerado uno de los bosques más diversos del mundo en especies arbóreas. Bosques siempreverdes de hasta 40 m de altura, multiestratificados, con abundantes lianas y epífitas, que crecen en diferentes formas de relieve, desde bancos de río y terrazas más altas, hasta llanuras de tierra firme y colinas bajas. Incluye áreas con presencia de bambú y palmas nativas. Puede incluir plantaciones forestales de origen antrópico.
		Andes	En la región Amazonía Alta, áreas con cobertura arbórea densa, primaria o secundaria y de regeneración por sucesión natural, mayor a media hectárea. Es considerado uno de los bosques más diversos del mundo en especies arbóreas. Bosques siempreverdes de hasta 40 m de altura, multiestratificados, con abundantes lianas y epífitas, que crecen en diferentes formas de relieve, predominantemente en zonas de relieve

			escarpado de las laderas hiper húmedas de las cordilleras sub-andinas. Puede incluir: pequeñas áreas de Bosque semideciduo piemontano en la parte sur, además de plantaciones forestales de origen antrópico.
			Áreas con cobertura forestal densa de bosques multiestratificados, siempreverdes, de hasta 20-25 m de altura, que crecen entre los 2200 y los 3800 m de altitud en las montañas Andinas de Ecuador en zonas húmedas a hiperhúmedas y de relieve muy accidentado. Poseen una gran biomasa de epífitas. Los bosques en el cinturón inferior del rango son más altos y pueden mostrar una alta frecuencia de palmeras, mientras que los bosques en el cinturón superior tienden a ser más bajos y tienen una gran proporción de árboles con hojas esclerófilas y / o pequeñas. En las zonas de páramo incluyen especies de los géneros Polylepis. Pueden incluir bosques plantados de especies introducidas como Eucalipto que en su mayoría han sido plantados con fines de protección, como barreras rompevientos, para evitar el arrastre de sedimentos por la influencia eólica y control de deslaves en terrenos con mucha pendiente, especialmente en zonas cercanas a asentamientos humanos

		Bosque seco ecuatorial	Áreas con cobertura forestal donde reúne comunidades de bosques siempreverde estacionales que crecen en las estribaciones altas y húmedas de la Cordillera de la Costa en Manabí y Guayas en Ecuador. Generalmente ocurren desde los 400 m de altitud y avanzan hasta los 800 m que es la cima de esta cadena de cerros costeros. Pueden aparecer más abajo, si la orientación de la pendiente favorece la captación de mucha neblina proveniente del océano. Son bosques de estatura relativamente baja y dosel irregular. El estrato arbóreo bajo está entre 10 y 14 m y el superior tiene entre 15 y 18 m de alto. Árboles de 25 m se consideran emergentes. Una de las razones es el alto número de palmas de especies de baja estatura. Al igual que otros bosques tropicales húmedos, estos bosque tienen alta densidad de árboles, los troncos no tienen ramificaciones bajas y el sotobosque es relativamente abierto. En términos de diversidad estos bosques son intermedios entre los bosques húmedos (del Chocó) y los bosques secos estacionales. Entre las especies características se pueden encontrar <i>Carapa guianensis</i>, <i>Matisia grandifolia</i>, <i>Aegiphyla alba</i>, <i>Beilschmiedia</i> sp., <i>Phytelephas aequatorialis</i>, <i>Pleurothyrium</i> sp., <i>Dussia ecuadoriensis</i>, <i>Rheedia edulis</i>, entre muchas otras.
--	--	-----------------------------------	---

		Bosque húmedo tropical del Pacífico	Áreas con cobertura forestal dominada por especies arbóreas de las familias Myristicaceae, Moraceae, Fabaceae y Meliaceae. El dosel es aproximadamente de 40 m de alto, más o menos continuo con pocos claros. La ausencia de claros y la abundancia relativa de árboles grandes ($DAP \geq 70$) son características que los diferencian de los bosques amazónicos. Ocasionalmente hay árboles emergentes de más de 60 m, en el subdosel la especie dominante es Wettinia quinara, otras palmas son menos abundantes. El sotobosque es denso y está compuesto por varias especies de Rubiaceae y palmas pequeñas, Las epífitas son comunes y se encuentran cubriendo la parte baja de los troncos de la mayoría de árboles; en cambio, las lianas son poco frecuentes y en su lugar hay una rica variedad de hemiepífitas arbustivas y arborescentes
		Galápagos	Áreas de bosque siempreverde y de bosque húmedo de playas. Zonas con cobertura forestal dominada por especies arbóreas de género endémico Scalesia, de la familia Asteraceae que incluye 15 especies y Miconia. Sólo se desarrollan en las partes más altas y húmedas de las islas, típicamente entre 400 y 700 m sobre el nivel del mar, y pueden crecer hasta 20 m de altura, con un tronco de 60 cm de circunferencia. Tiene una cubierta de dosel uniforme sobre el suelo del bosque.

	1.2. Bosque abierto	Áreas con cobertura vegetal que se caracteriza por bosques estacionalmente deciduos distribuidos en el occidente del país desde el sur de la línea ecuatorial hasta el norte de Perú. Según la humedad disponible los ecosistemas incluidos varían en la composición y estructura y la fisonomía general, desde bosques bajos, abiertos y espinosos con muchas cactáceas hasta bosques altos (15 – 20m) de cobertura densa. Comparten una afinidad florística conocida como del bosque seco Ecuatorial o Tumbesino. Crecen en la planicie costera del Ecuador debido a la estación seca de más de 4 meses que se produce. Avanzan hasta los 300 m de altitud aproximadamente en los cerros de la cordillera costera que se encuentra en esta región y hasta unos 700 m en el piedemonte de la cordillera de los Andes más al sur, en el límite con Perú. Para el bioma Galápagos se extiende a altitudes de aproximadamente 100 a 300 metros. Su composición florística es muy variada y cuenta con un alto número de especies de las familias Bombacaceae, Fabaceae, Burseraceae, Rubiaceae, Bignoniaceae, entre otras. Abarcan un rango altitudinal amplio en una región fisiográfica heterogénea, lo que genera diferentes fisionomías de la vegetación y también variaciones en la composición. Los rasgos comunes son un clima claramente estacional (6-
--	----------------------------	--

		8 meses de sequía) debidos al paso de la corriente fría de Humboldt entre mayo y diciembre y ciclos multianuales de sequía debido al fenómeno ENSO. Ocurre en planicies aluviales antiguas, desde arenosas hasta arcillosas, en terrenos suavemente colinados o en pendientes inclinadas de cerros y base de montañas. Se trata de suelos generalmente fértiles. Clima marcadamente estacional con precipitación media anual entre 500 – 900 mm y temperatura media anual de 22 – 25°C. Debido a la intensa alteración que han sufrido, actualmente su fisonomía y composición están claramente empobrecidas y queda muy poco de su extensión original con remanentes en buen estado. En el bioma Galápagos incluye bosques decíduos, bosque siempreverde estacional (zonas de transición) y puede incluir zonas de especies invasoras. Entre las especies características se pueden encontrar <i>Chatocarpus pubescens</i>, <i>Loxopterygium huasango</i>, <i>Spondias purpurea</i>, <i>Fulcaldea laurifolia</i>, <i>Tabebuia chrysantha</i>, <i>Tabebuia billbergii</i>, <i>Ceiba trischistandra</i>, <i>Eriotheca ruizii</i>, <i>Cordia alliodora</i>, <i>Cassia oxyphylla</i>, entre muchas más.
--	--	---

	1.3. Manglar		Área con una cobertura forestal densa y siempreverde dominada por especies de mangle que ocurren en zonas intermareales, desembocaduras y estuarios de ríos, adaptadas a aguas salobres no muy profundas, con adaptaciones para crecer sobre suelos planos y fangosos. Predominan los mangles de géneros: Rhizophora, Avicennia, Conocarpus y Laguncularia.
	1.4 Bosque inundabl		Área con cobertura natural predominantemente arbórea inundada estacional o permanentemente que se encuentra localizada en las franjas adyacentes a los cuerpos de agua y llanuras de desborde con periodos de inundación
2. Formación natural no forestal	2.1. Formación natural no	Amazonía	Cobertura natural predominantemente herbácea que debido a los suelos y la topografía, están sujetas a inundaciones periódicas o permanentes en las cuales sus suelos se saturan de agua durante largos períodos

	forestal inundable	Andes	Áreas de cobertura vegetal compuesta por especies nativas herbáceas andinas, que se forman en áreas donde el suelo mantiene condiciones de anoxia de modo perenne que limitan la descomposición de la materia orgánica y promueven la acumulación de suelos orgánicos profundos. Pueden o no estar cubiertos por una lámina de agua. En algunas localidades están dominadas por especies que forman cojines o almohadillas que no superan alturas de 50 cm (<i>Distichia</i> spp., <i>Plantago rigida</i>, <i>Disterigma empetrifolium</i>, <i>Oreobus ecuadoriensis</i>), o por mosaicos de especies herbáceas y musgos. Estas formaciones ocurren a elevadas altitudes (3000-3500 m de elevación). Esta cobertura está constituida principalmente por los llamados páramos inundados, humedales, turberas higrófilas o bofedales.
--	-------------------------------	--------------	--

		Bosque seco ecuatorial	Formación de aguas someras y pantanosas de poca profundidad y la cual se constituye en una zona de transición entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. Área con terrenos permanentemente húmedos y condiciones ecológicas especiales de vegetación propia de ambientes húmedos, suelos muy pobremente drenados y fauna permanente o de paso. Según RAMSAR, un humedal es una zona de la superficie terrestre que está temporal ó permanentemente inundada, regulada por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan.
		Bosque húmedo tropical del Pacífico	Formación de aguas someras y pantanosas de poca profundidad y la cual se constituye en una zona de transición entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. Área con terrenos permanentemente húmedos y condiciones ecológicas especiales de vegetación propia de ambientes húmedos, suelos muy pobremente drenados y fauna permanente o de paso. Según RAMSAR, un humedal es una zona de la superficie terrestre que está temporal o permanentemente inundada, regulada por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan.

	2.2. Herbazal	Andes	Áreas de cobertura vegetal compuesta en su mayoría por especies nativas herbáceas (gramíneas) o pastizales naturales tropicales andinos que crecen sobre la línea de bosques (ca. 3000-3500 m de elevación) y se vuelven más dispersos conforme se asciende altitudinalmente y no están sujetos a periodos de inundación. Esta cobertura está constituida principalmente por los llamados páramos de pajonal, cuya altura no supera los 2 metros, en mosaicos de especies cuyo componente principal son gramíneas de los géneros Festuca y Calamagrostis, y hierbas de los géneros Gentianella, Senecio, Huperzia y Oritophium. Pueden presentar elementos arbóreos o arbustivos dispersos.
		Galápagos	Masa geológica que emerge a la superficie terrestre y que ocupa extensiones considerables de materiales pétreos de diferentes tamaños. Esta categoría incluye cicatrices dejadas por procesos eruptivos, lahares y arenales. En el bioma Galápagos incluye extensiones de lava antigua y lava reciente. En el bioma Andes, esta clase por lo general se encuentra a partir de los 4000 metros sobre el nivel del mar, en donde encontramos los pisos altitudinales subalpino, alpino, y nival que se caracterizan por su baja o nula vegetación

	2.3. Afloramiento rocoso		Masa geológica que emerge a la superficie terrestre y que ocupa extensiones considerables de materiales pétreos de diferentes tamaños. Esta categoría incluye cicatrices dejadas por procesos eruptivos, lahares y arenas. En el bioma Galápagos incluye extensiones de lava antigua y lava reciente. En el bioma Andes, esta clase por lo general se encuentra a partir de los 4000 metros sobre el nivel del mar, en donde encontramos los pisos altitudinales subalpino, alpino, y nival que se caracterizan por su baja o nula vegetación
	2.4. Otra formación natural no foresta	Amazonía	En la región Amazonía Baja corresponde a áreas con vegetación natural con predominio de formaciones arbustivas y herbazales que ocurren en áreas de poca extensión en lugares donde debido a condiciones del ambiente no predominan las coberturas arbóreas. Se incluye en esta clase áreas con flora altamente especializada, no mapeada en otras clases, como son las áreas dominadas por bambú de la Amazonía.

		Andes	En Amazonía Alta corresponde a la cobertura natural no forestal cuya vegetación es una mezcla de herbazales y arbustales que ocurren en áreas de poca extensión con flora altamente especializada, como en el caso del páramo del Volcán Sumaco y en las mesetas y laderas de afloramientos de arenisca en cordilleras subandinas (2000-2400 m de altitud). Estos últimos presentan una mezcla de plantas herbáceas esclerófilas como bromelias y orquídeas que crecen en el suelo, y matorrales esclerófilos con abundantes epífitas y hemi-epífitas. Entre ellos se encuentra una diversidad de helechos y especies herbáceas. También puede incluir: Bosque siempreverde montano bajo sobre mesetas de arenisca de la Cordillera del Cóndor.
			Áreas de cobertura vegetal compuesta por especies nativas de predominancia leñosa no arbóreas que no superan los 6 metros de altura. Esta cobertura está constituida principalmente por matorrales tropicales andinos que crecen sobre la línea de bosques (ca. 3000-3500 m de elevación) y se vuelven más abiertos y de cobertura más dispersa conforme ascienden altitudinalmente. Arbustales de páramos presentes especialmente en los páramos que no se queman con frecuencia. La cobertura puede incluir también matorrales semidecíduos de los valles

			secos y vegetación pionera y sucesional que ocurre en las quebradas de ríos en zonas antropizadas.
		Bosque seco ecuatorial	Áreas de cobertura vegetal compuesta principalmente por especies arbustales deciduos y matorrales desérticos. Se caracteriza por una combinación de condiciones cálidas y extremadamente secas, el promedio de precipitación anual puede sobrepasar los 60 mm y está restringido al margen de la costa ecuatoriana. Incluye principalmente arbustales bajos espinosos con árboles bajos muy espaciados, de géneros característicos de la costa del Pacífico tropical como Bursera, Acacia, Prosopis, Capparis, Parkinsonia. Cuando los períodos de sequía son más extendidos y hay mayor estrés hídrico, especies de cactus columnares de las especies Armatocereus cartwrightianus, Neoraimondia spp representan al estrato más alto. Los suelos son arenosos-arcillosos y secos.
		Galápagos	Zonas de arbustales decíduos con presencia de abundantes especies cactáceas, generalmente distribuidos en las partes bajas de las islas.

3. Agropecuaria y silvicultura	3.3. Silvicultura	Masa boscosa formada antrópicamente con una o diferentes especies madereras nativas o introducidas, que tienen los mismos años de vida, presentan una separación homogénea, con manejos silviculturales y dedicada a varios fines como: producción maderera, protección, recuperación del suelo o recreación. Los bosques de pino de las especies Pátula spp y Radiata spp, se han establecido con fines de reforestación y explotación maderera.
	3.5. Mosaico agropecuario	Áreas donde la cobertura natural ha sido modificada, eliminada o reemplazada por otros tipos de coberturas vegetales para uso agropecuario y donde ocurren agrupaciones de especies cultivadas para la producción de alimentos, fibras o pastos y que se encuentran en mosaico y por lo tanto no pueden ser individualizadas; y excepcionalmente pueden estar asociadas con áreas en descanso o vegetación natural.
4. Área sin vegetación	4.1. Minería	Áreas superficiales de extracción de materiales pétreos o minerales, con clara exposición del suelo. No se diferencia si es industrial o artesanal, legal o ilegal, metálica o pétrea. La mayoría es aluvial, no es actividad que se pueda estar realizando en minas subterráneas

	4.2. Otra área antrópica sin vegetación	Áreas con poca o nula vegetación, de origen antrópico, no mapeadas en otras clases. Puede incluir áreas de transición de cultivos, caminos y carreteras, pistas de aterrizaje, patios industriales y zonas de reciente deforestación.
	4.3. Infraestructura	Área de asentamiento humano asociada a grandes y pequeños centros urbanos (pueblos) con infraestructura de entorno construido como redes viales, ferroviarias y terrenos asociados, además de otras zonas artificializadas como obras de explotación de hidrocarburos, hidroeléctricas, bases militares, aeropuertos, zonas portuarias y pistas de aterrizaje no convencionales en zonas rurales. También se consideran áreas periféricas que están siendo incluidas en un proceso gradual de urbanización hacia fines residenciales y/o zonas industriales.
	4.4. Otra área natural sin vegetación	Áreas con suelos poco desarrollados y vegetación escasa o inexistente, formadas por procesos geológicos y climáticos naturales. Esto incluye desiertos de altitud, zonas áridas y áreas afectadas por deslizamientos, caracterizadas por suelos arenosos o pedregosos. Estas áreas pueden presentar vegetación muy dispersa adaptada a las condiciones edáficas y climáticas extremas.

	4.5. Playa, duna o banco de arena	Áreas costeras y ribereñas formadas por la acción de olas y corrientes, donde el suelo varía desde arenas finas y gruesas hasta guijarros o grava, y puede albergar poca vegetación adaptada a la salinidad y humedad. Incluye dunas, bancos de arena y playas de cuerpos de agua, caracterizadas por suelos arenosos sueltos y poca vegetación.
5. Cuerpo de Agua	5.1. Río, lago u océano	Extensión de agua superficial natural o artificial. Comprende ríos, lagos, embalse y otros cuerpos de agua.
	5.2. Glaciar	Área de cobertura o masa de hielo permanente, localizados en las cumbres andinas, producto de la acumulación, compactación y recristalización de la nieve.
	5.3 Acuicultura	Extensión de agua superficial de origen artificial dedicado a actividades productivas como piscinas de agua salada para cría de camarón en cautiverio; o piscinas de agua dulce destinadas a la cría de peces.
6. No observado		Áreas que no han podido ser identificadas en sus clases por presencia de nubes, sombra de nubes, ruido atmosférico o calidad de las imágenes de satélite.

Fuente:MapBiomass

La calidad del mosaico es una composición de varias imágenes Landsat a lo largo de un período definido, estas imágenes pueden presentar píxeles con nubes u otras interferencias que son excluidos del mosaico final. Así, cada píxel del mosaico final de cada año fue calificado de acuerdo a la cantidad disponible de observaciones libres de interferencias, pudiendo tener de 0 a 23 observaciones por año. La calidad del píxel se obtiene con el número de observaciones disponibles en cada año: Rojo: sin observaciones; Naranja: de 1 a 3 observaciones; Amarillo: de 4 a 6 observaciones; Verde: más de 6 observaciones (MapBiomass, 2024).

En la Tabla 2 y figura 3, se puede observar la calidad del mosaico de los años 2013, 2015, 2017 y 2019 en el área de influencia de la laguna de Yahuarcocha, en los años 2013-2017, tiene mayor disponibilidad de datos e indica que todos los píxeles del área de estudio tuvieron al menos una observación en ese año, el aumento de la categoría amarillo, con más áreas de datos suficientes para representar el paisaje con mayor precisión y mayor disponibilidad de imágenes Landsat sin nubes o una mejor selección y procesamiento de datos en ArcGIS.

En el año 2019, las áreas sin observaciones en rojo, significa que algunas zonas no fueron detectadas en los datos de ese año, existe un aumento en la categoría naranja, indicando que más áreas tuvieron baja calidad de datos, lo que genera mayor incertidumbre en los mapas.

La reducción de la categoría amarillo indica que menos áreas tuvieron suficientes observaciones para garantizar una buena calidad del mosaico, esto puede deberse a factores como mayor nubosidad en ese año, menor cantidad de imágenes Landsat disponibles o cambios en la metodología de selección y procesamiento de datos.

Tabla 2 Calidad del mosaico en el área de influencia de la laguna Yahuarcocha

Año	Observaciones (ha)
2013	Rojo: : 478,55; Naranja: 1628,74 Amarillo: 357,96
2015	Rojo: : 136,98; Naranja: 382,88; Amarillo: 1945,39
2017	Rojo: 0; Naranja: 478,55; Amarillo: 1986,70
2019	Rojo: 524,98; Naranja: 1018,1; Amarillo: 922,17

Elaborado por el Autor

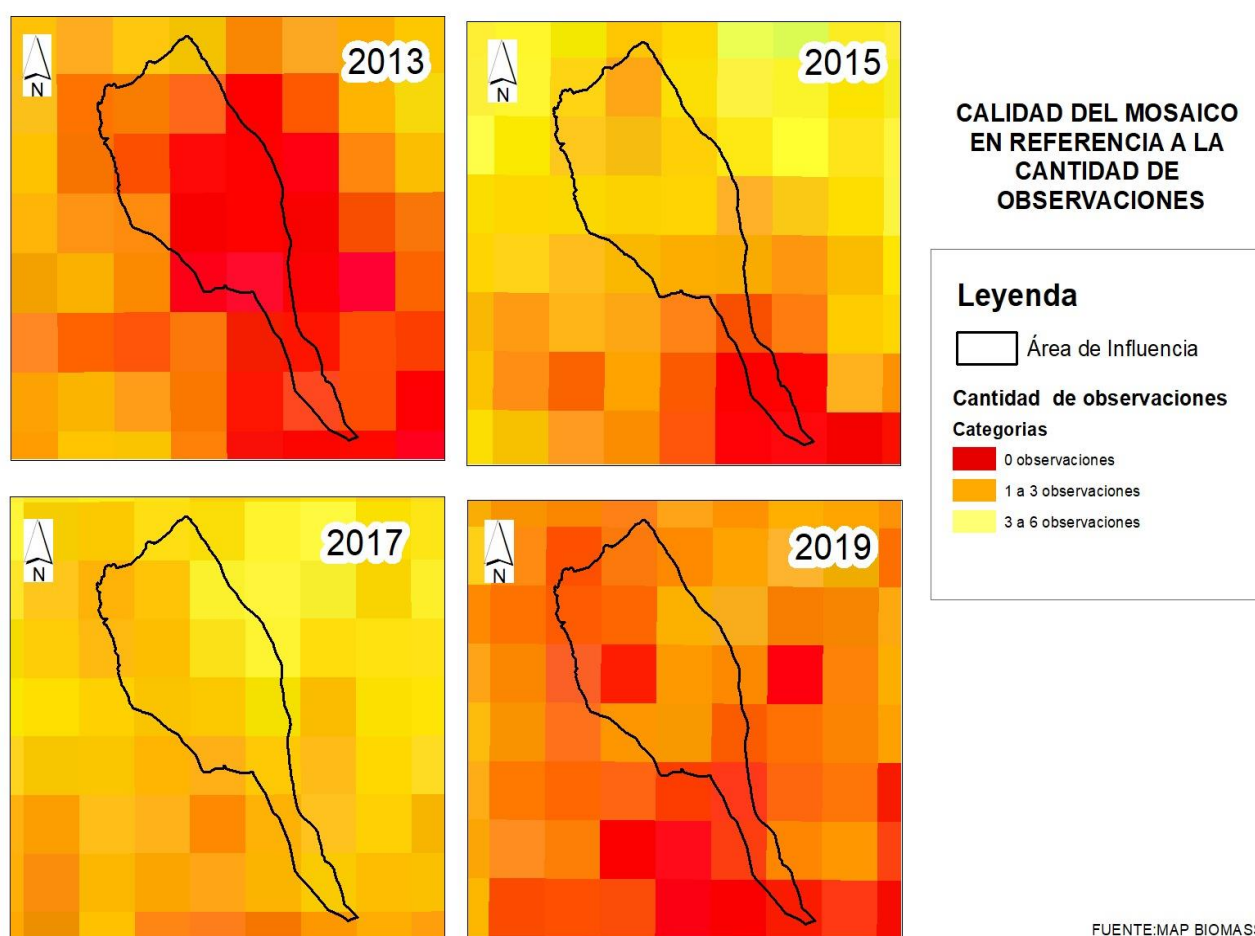


Figura 3. Calidad del mosaico en referencia a la cantidad de observaciones

Elaborado por el Autor

En la figura 4, se observa el diagrama de flujo que se utilizó para el procesamiento de la capa raster inicial contiene información base, posiblemente de cobertura de suelo o datos categorizados por año.

Se aplica *“Extract by Mask”*, en este paso se extrae porciones del raster original para cada año en específico. Las máscaras de extracción son capas que contienen las áreas de interés por cada año (2011-2019).

Se convierte el Raster a Polígono, esto permite trabajar con los datos de una manera más adecuada para análisis posteriores.

Después de convertir a polígonos, se aplica el proceso de disolución *“Dissolve”*, este paso unifica las áreas contiguas que comparten atributos comunes, simplificando la capa vectorial resultante.

El resultado es una capa de salida vectorial (2012.shp, 2013.shp, 2014.shp, 2015.shp, 2016.shp, 2017.shp, 2018.shp 2019.shp) que representa los datos procesados para cada año.

Al finalizar, se obtienen capas vectoriales independientes (shapefiles) para cada año procesado para el análisis de datos de cobertura vegetal y uso de suelo.



Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento del raster descargado en MapBiomás Ecuador.

Elaborado por el Autor

4.2.3.2. Matriz de Cambio del 2011 al 2019

A través de ArcGIS, se añaden las imágenes clasificadas de los años 2011 al 2019, se convierten las imágenes de raster a vectorial, usando la herramienta de “*Conversión de raster a polígono*”, para transformar las imágenes clasificadas en datos vectoriales.

Se añaden los archivos vectoriales resultantes de los periodos al “*Table of Contents*”, se selecciona abrir tabla de atributos y se puede ver el ID de clase, según establecido en la leyenda de MapBiomás se realiza una pertinencia entre el número y la categoría que pertenece, 3 igual a bosque.

Con la herramienta “Dissolve” para combinar los polígonos que pertenecen a la misma clase en cada capa de los años 2011 al 2019, en la tabla de atributos, crea un nuevo campo.

Se utiliza el “*calculador de campos*” para calcular el área de cada clase (la proyección de la capa debe estar en un sistema).

Con la herramienta “*Intersect*” (Geoprocesamiento > Análisis de superposición (Intersect)) para combinar las dos capas vectoriales (2011 – 2019), esto generará una nueva capa que contiene las áreas de intersección entre ambas imágenes, mostrando las clases antiguas y nuevas, con la nueva capa de intersección, se abre la tabla de atributo, Crea un nuevo campo llamado “Cambio de Área” calculando los campos para identificar las áreas donde la clase cambió entre 2011 al 2019.

Se aplica simbología a la capa de intersección para visualizar los cambios.

Una vez teniendo la información se utiliza la opción “*Clasificar valores únicos*” en el menú de simbología para diferenciar las transiciones entre clases.

4.2.3.3. Matriz de transición del 2011 al 2019

Con ArcGIS se obtuvo los mapas en la que se proporcionó las hectáreas que cambiaron de una categoría y uso de suelo a otra.

Con áreas (ha) obtenidas se organiza los datos en una tabla con las categorías de t1 como filas y t2 como columnas, se llena las celdas con los valores del área calculada para cada transición.

Se calcula las pérdidas y ganancias realizando la diferencia entre el total en t1 y las transiciones hacia otras categorías, se aplicó la siguiente fórmula:

$$q = 100\left(\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{1/(t_2-t_1)} - 1\right)$$

q = Tasa anual de cambio en la cobertura de bosques nativos (%/año)

t_2 Fecha final del periodo de referencia

t_1 = Fecha inicial del periodo de referencia

A_2 = Área de bosques nativo en la fecha t_2 (ha)

A_1 = Área de bosque nativo en la fecha t_1 (ha)

Fuente: Puyraud, J.P, 2003 Standardizing the calculation of annual rate of deforestation

4.2.3.4. Imágenes Landsat

Para la obtención de imágenes satelitales del satélite Landsat, del área de estudio, se descargo de la página de Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) de su aplicación Earth Explorer, en la que se aplicaron criterios de búsqueda, como la ubicación del área de estudio, fechas de las fotografía áreas, porcentaje de coberturas de nubes, conjunto de datos de Landsat 8, en la que vamos utilizar las bandas 3 y 5, para el cálculo de NDWI, y para el NDTI bandas 3 y 4, la cuales se descargaron imágenes del año 2018, las que cuentan con la siguiente información: fecha del 07 de septiembre de 2018, con una nubosidad del 47,30%.

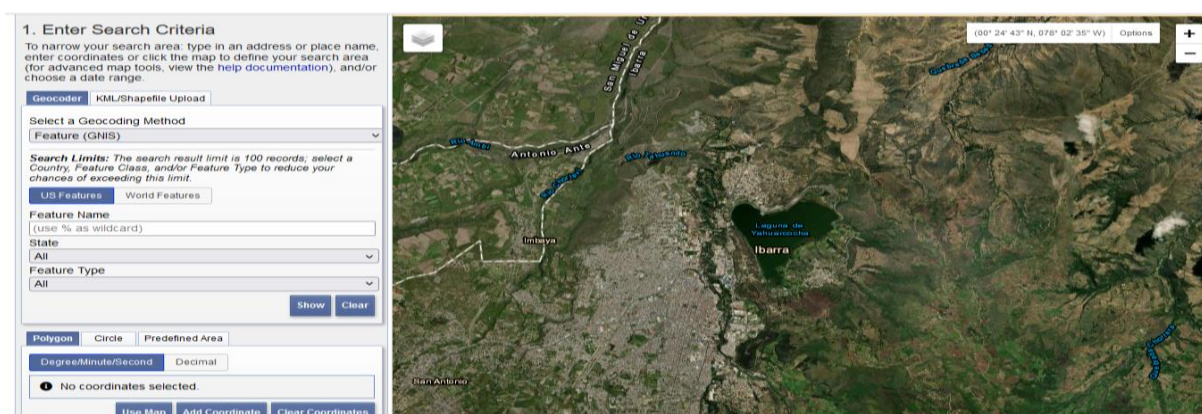


Figura 5. Imagen del área de estudio para descarga de la página: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Para el cálculo del Índice de agua de Diferencia Normalizada (NDWI), compara la diferencia entre la banda del verde y la del infrarrojo cercano. El índice es apropiado

para mapear cuerpos de agua y zonas anegadas, ya que el agua tiene una alta absorción y baja irradiación en el rango visible del infrarrojo, los valores de NDWI pueden variar de -1 a 1.

Tabla 3. Rango del índice NDWI

Rango	interpretación
0,2 a 1	Superficie del agua
0,0 -0,2	Inundación, humedad
- 0.3-0,0	Sequia moderada, superficies sin agua
-1 –0,3	Sequia de agua, superficies sin agua

Fuente: Eos data analytics, <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>

Para el cálculo del Índice de agua de Diferencia Normalizada (NDTI), se utiliza las bandas roja y verde de las imágenes satelitales el rango puede variar de -1 a 1.

Tabla 4. Rango del índice NDTI

Rango	interpretación
-1 - -0.1	Agua muy clara
-0.1 - 0.1	Agua con poca turbidez
0.1 -0.3	Agua moderadamente turbia
0.3 - 0.5	Agua turbia
0.5 a 1	Agua muy turbia o con sedimentos en suspensión

Fuente: Navarro Oronoz, V. (2023).

4.2.3.5. Calidad del Agua

Para la calidad del agua se solicitó información al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón San Miguel de Ibarra y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI de Laguna de Yahuarcocha, en la que solo proporcionaron información del año 2018.

A continuación en la Tabla 5, se puede observar la información proporcionada por el INAMHI, y el GAD Municipal del Cantón San Miguel de Ibarra, con sus

coordenadas de puntos de monitoreo y sus respectivas concentraciones de los parámetros.

En el Mapa 2, se observa cómo se encuentra distribuido los puntos de monitoreo alrededor de la Laguna de Yahuarcocha, estos puntos están en afluentes que drenan a la Laguna.

.

Tabla 5. Información de Puntos de calidad del agua de la Laguna de Yahuarcocha del año 2018.

Nro.	CÓDIGO	Año	Coordenadas		ph	Turbidez	OD	Nitratos	DBO5	Fosfatos	Coliformes fecales
			X	Y	UpH	NTU	%	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100 ml
1	INAMHI (drena a la laguna)	2018	822582	10042056	9,02	47,57	75	0	16,26	ND	33
2	P4-0	2018	823099	10040742	8,8	ND	76,3	0,25	8	ND	30
3	P5-0	2018	822680	10039698	8,77	ND	76,8	0,25	8	ND	40
4	P10-0	2018	825911	10040826	8,85	ND	61,2	0,25	12	ND	30
5	P11	2018	824042	10038173	8,71	ND	88,7	0,25	14	ND	30
6	P6	2018	822761	10039395	6,07	ND	ND	0,28	ND	0,5	ND
7	P7	2018	823193	10039744	7,91	ND	ND	4,9	ND	0,6	30
8	P1	2018	828012	10034050	8,32	ND	ND	0,78	ND	0,7	3400
9	P2	2018	825911	10040826	8,25	ND	ND	0,05	ND	0,5	2 400
10	P8	2018	823009	10040481	ND	ND	ND	0,25	ND	21	1100

*ND: no dispone de información.

Elaborado por el Autor

MAPA DE PUNTOS DE MONITOREO DE LA ZONA DE ESTUDIO



Simbología

VIA
RIO_L

Leyenda

Área Influencia

Punto Monitoreo

INAMHI (drena a la laguna)
P1
P10-0
P11
P2
P4-0
P5-0
P6
P7
P8

Escala: 0 120 240 480 720 960 Km

Sistema de Referencia: Universal Transversal Mercator
Zona 17 Norte

Fecha: Mayo - 2024

Fuente: IGM- 2013 / MAATE / INAMHI/GAD

Mapa 2. Distribución de los puntos de monitoreo de calidad del agua en el área de estudio.

Elaborado por el Autor

Para la calidad del agua, se realizó el procesamiento y análisis de datos comparando los resultados de calidad del agua de los años 2018, con la Tabla 2: Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios del TULSMA 097A.

Para el cálculo del ICA se utilizó el método propuesto por la NSF (Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU.) en la que intervienen nueve parámetros: coliformes fecales (en NMP/100mL), pH (en unidades de pH), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅ en mg/L), nitratos (NO₃ en mg/L), fosfatos (PO₄ en mg/L), cambio de temperatura (en °C), turbidez (en FAU), sólidos disueltos totales (en mg/L) y oxígeno disuelto (OD en % saturación).

Tabla 6. Factor de ponderación de parámetros en el ICA-NSF

Parámetros	Factor de ponderación
Coliformes fecales	0,16
Potencial de hidrogeno	0,11
Demanda Bioquímica del Oxígeno	0,11
Nitratos	0,10
Fosfatos	0,10
Temperatura	0,10
Turbidez	0,08
Sólidos totales disueltos	0,07
Oxígeno disuelto	0,17

Fuente: Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Índice de calidad del agua general "ICA".

Los resultados de los parámetros de calidad del agua proporcionados por el INAMHI y el GAD Municipal del Cantón San Miguel de Ibarra, corresponde a 7 parámetros: coliformes fecales (en NMP/100mL), pH (en unidades de pH), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅ en mg/L), nitratos (NO₃ en mg/L), fosfatos (PO₄ en mg/L), turbidez (en FAU), sólidos y oxígeno disuelto (OD en % saturación).

Cálculo del ICA: Usa la fórmula:

$$ICA = \sum (Q_i \cdot W_i)$$

Donde:

- Q_i : Valor de calidad para cada parámetro (convertido mediante la curva).
- W_i : Peso relativo del parámetro.

Como se cuenta con 7 parámetros en los diferentes puntos que se encuentran en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, se redistribuyó los pesos (W_i) y el cálculo del valor de calidad de cada parámetro (Q_i) utilizando las curvas de calidad del método NSF.

La información otorgada se clasifica en la siguiente tabla 7.

Tabla 7. Rangos de clasificación de calidad del Agua

Calidad del Agua	Valor
Excelente	91 a 10
Buena	71 a 90
Regular	51 a 70
Mala	26 a 50
Pésima	0 a 20

Fuente: Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Índice de calidad del agua general "ICA".

5. Resultados y discusión

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la cobertura de suelo la zona de estudio de la Laguna de Yahuarcocha durante el período de estudio (2011-2019) y calidad del agua del año 2018. Los hallazgos se centran en los cambios en el uso del suelo y cómo estos impactan la calidad del agua, proporcionando una visión integral sobre las dinámicas ambientales del área de estudio y sus posibles implicaciones ecológicas.

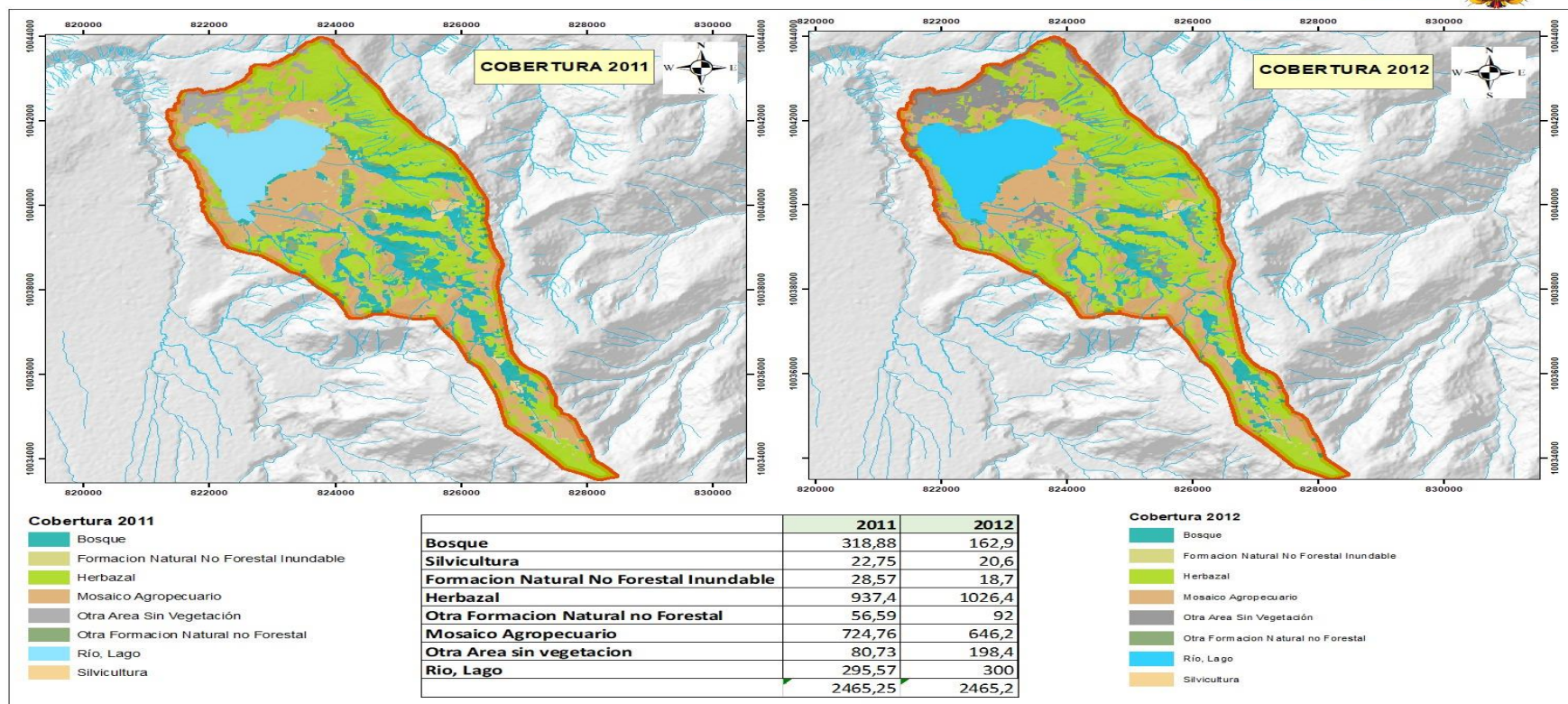
Primero, se analizó la variación en la cobertura de suelo en distintos años (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019), destacando los patrones de cambio en áreas agrícolas, vegetación natural y cuerpos de agua. Posteriormente, se comparó con la Tabla 2: Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios del TULSMA 097A. con los parámetros de calidad del agua del año 2018 y se calculó el ICA.

5.1. Cobertura y uso de suelo de los años 2011 al 2019

Utilizando imágenes MapBiomass –Ecuador y ArcGIS, se llevó a cabo un análisis temporal de la cobertura vegetal en la zona de estudio de la Laguna de Yahuarcocha. Los resultados obtenidos revelaron cambios significativos en la vegetación y el uso del suelo entre los años del 2011 al 2019, permitiendo identificar la disminución de la cobertura vegetal en el tiempo.

El proceso implicó la clasificación de la cobertura terrestre mediante capas temáticas y cartografía de base proporcionada por el MapBiomass el, Mapa 3. Se observa los resultados del año 2011 y 2012.

MAPA DE COBERTURA VEGETAL 2011 - 2012



Mapa 3. Categorías de cobertura uso de suelo 2011 -2012

Elaborado por el Autor

Tabla 8. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2011.

COBERTURA 2011		
CATEGORÍA (Nivel 2)	HECTAREAS	PORCENTAJE (%)
Bosque	318,88	12,94
Silvicultura	22,75	0,92
Formación Natural No Forestal Inundable	28,57	1,16
Herbazal	937,4	38,02
Otra Formación Natural no Forestal	56,59	2,30
Mosaico Agropecuario	724,76	29,40
Otra Área sin vegetación	80,73	3,27
Rio, Lago	295,57	11,99
Total	2465,25	100,00

Elaborado por el Autor

De acuerdo con la Tabla 8, la cobertura y uso del suelo “herbazal” es la predominante en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 38,02% del total. Le siguen las categorías “mosaico agropecuario”, “bosque”, “río, lago”, “otra área sin vegetación”, “otra formación natural no forestal”, “formación natural no forestal Indudable” y “selvicultura” con porcentajes de cobertura decrecientes.

Tabla 9. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2012.

COBERTURA 2012		
CATEGORÍA (Nivel 2)	HECTAREAS	PORCENTAJE (%)
Bosque	162,9	6,60
Silvicultura	20,6	0,84
Formación Natural No Forestal Inundable	18,7	0,76
Herbazal	1026,4	41,63
Otra Formación Natural no Forestal	92	3,73
Mosaico Agropecuario	646,2	26,21
Otra Área sin vegetación	198,4	8,05
Rio, Lago	300	12,17
Total	2465,25	100,00

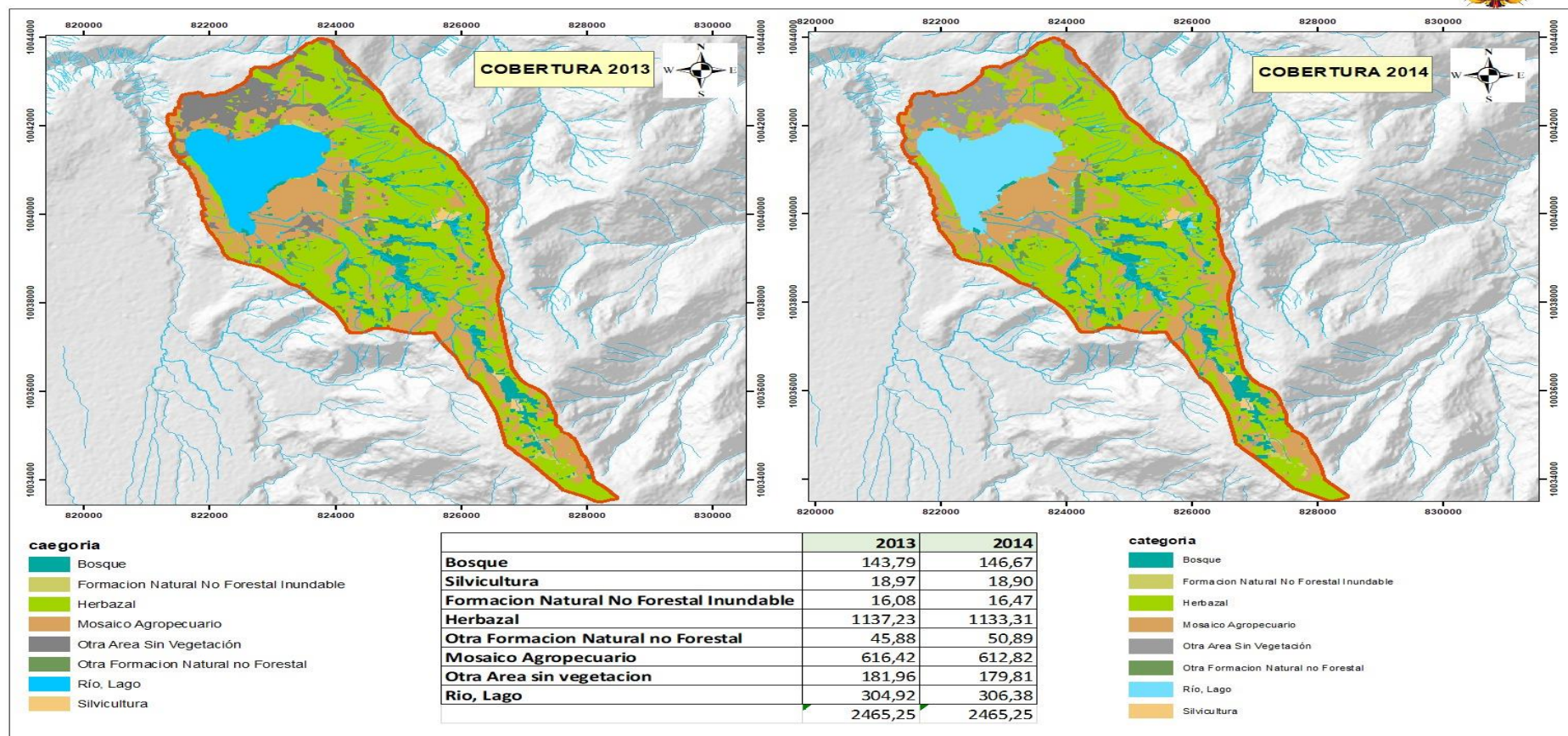
Elaborado por el Autor

De acuerdo con la Tabla 9, cobertura y uso del suelo "herbazal" es la predominante en el área de influencia de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 41,63% del total. Le siguen las categorías "mosaico agropecuario", "río, lago", "otra área sin vegetación", "bosque", "otra formación natural no forestal", "selvicultura" e "formación natural no forestas inundable", con porcentajes de cobertura decrecientes.

Entre los años de 2011 al 2012 la cobertura vegetal que ha ido incrementado es la "herbazal"

A continuación, se puede observar el mapa de cobertura vegetal de los años 2013-2014, Mapa 4.

MAPA DE COBERTURA VEGETAL 2013 - 2014



Mapa 4. Categorías de cobertura y uso de suelo 2013-2014

Elaborado por el Autor

Tabla 10. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2013.

COBERTURA 2013		
CATEGORÍA (Nivel 2)	HECTAREAS	PORCENTAJE (%)
Bosque	143,79	5,84
Silvicultura	18,97	0,77
Formación Natural No Forestal Inundable	16,08	0,65
Herbazal	1137,23	46,13
Otra Formación Natural no Forestal	45,88	1,86
Mosaico Agropecuario	616,42	25,00
Otra Área sin vegetación	181,96	7,38
Rio, Lago	304,92	12,37
TOTAL	2465,24	100%

Elaborado por el Autor

De acuerdo con la Tabla 10, la cobertura y uso del suelo “herbazal” es la predominante en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 46,13% del total. Le siguen las categorías “mosaico agropecuario”, “río, lago”, “otra área sin vegetación”, “bosque”, “otra formación natural no forestal”, “silvicultura” y “formación natural no forestal indudable” con porcentajes de cobertura decrecientes.

Tabla 11. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2014

COBERTURA 2014		
CATEGORÍA (Nivel 2)	HECTAREAS	PORCENTAJE (%)
Bosque	146,67	5,95
Silvicultura	18,90	0,77
Formación Natural No Forestal Inundable	16,47	0,67
Herbazal	1133,31	45,97
Otra Formación Natural no Forestal	50,89	2,06
Mosaico Agropecuario	612,82	24,86
Otra Área sin vegetación	179,81	7,29
Rio, Lago	306,38	12,43
TOTAL	2465,24	100

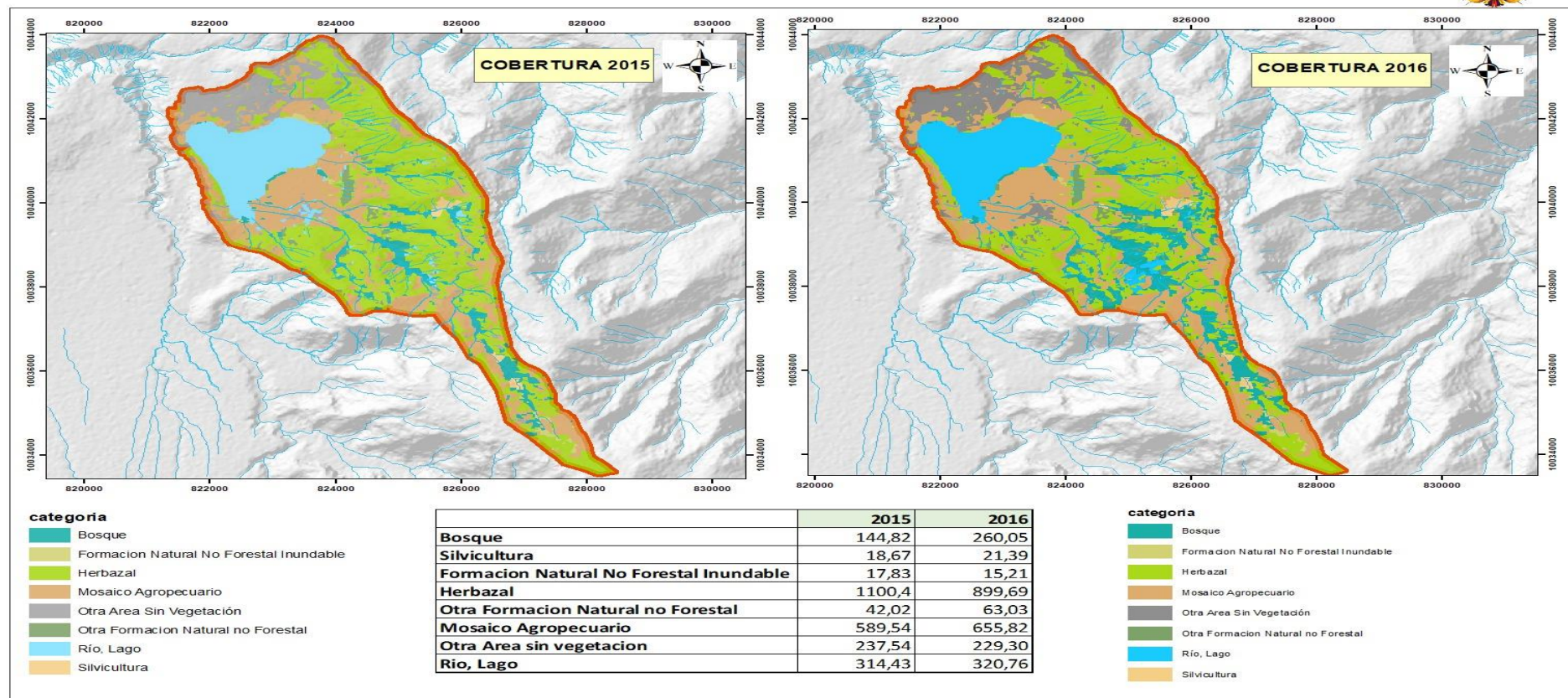
Elaborado por el Autor

De acuerdo con la Tabla 11, la cobertura y uso del suelo “herbazal” es la predominante en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 45,97% del total. Le siguen las categorías “mosaico agropecuario”, “río, lago”, “otra área sin vegetación”, “bosque”, “otra formación natural no forestal”, “silvicultura” y “formación natural no forestal indudable” con porcentajes de cobertura decrecientes.

Entre los años de 2013 al 2014 la cobertura vegetal “herbazal” que ha disminuido en un 0,16%

A continuación, se puede observar la cobertura vegetal de los años 2015 a 2016, Mapa 5.

MAPA DE COBERTURA VEGETAL 2015 - 2016



Mapa 5. Categorías de cobertura y uso de suelo 2015-2016

Elaborado por el Autor

Tabla 12. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2015

COBERTURA 2015		
CATEGORÍA (Nivel 2)	HECTÁREAS	PORCENTAJE (%)
Bosque	144,82	5,88
Silvicultura	18,67	0,76
Formación Natural No Forestal Inundable	17,83	0,72
Herbazal	1100,4	44,64
Otra Formación Natural no Forestal	42,02	1,70
Mosaico Agropecuario	589,54	23,91
Otra Área sin vegetación	237,54	9,64
Rio, Lago	314,43	12,75
TOTAL	2465,24	100

Elaborado por el Autor

De acuerdo con la Tabla 12, la categoría de cobertura y uso del suelo “herbazal” es la predominante en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 44,64% del total. Le siguen las categorías “mosaico agropecuario”, “río, lago”, “otra área sin vegetación”, “bosque”, “otra formación natural no forestal”, “silvicultura” y “formación natural no forestal indudable” con porcentajes de cobertura decrecientes.

Tabla 13. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2016

COBERTURA 2016		
CATEGORÍA (Nivel 2)	HECTÁREAS	PORCENTAJE (%)
Bosque	260,05	10,55
Silvicultura	21,39	0,87
Formación Natural No Forestal Inundable	15,21	0,62
Herbazal	899,69	36,49
Otra Formación Natural no Forestal	63,03	2,60
Mosaico Agropecuario	655,82	26,60
Otra Área sin vegetación	229,30	9,30

Rio, Lago	320,76	13,01
TOTAL	2465,24	100

Elaborado por el Autor

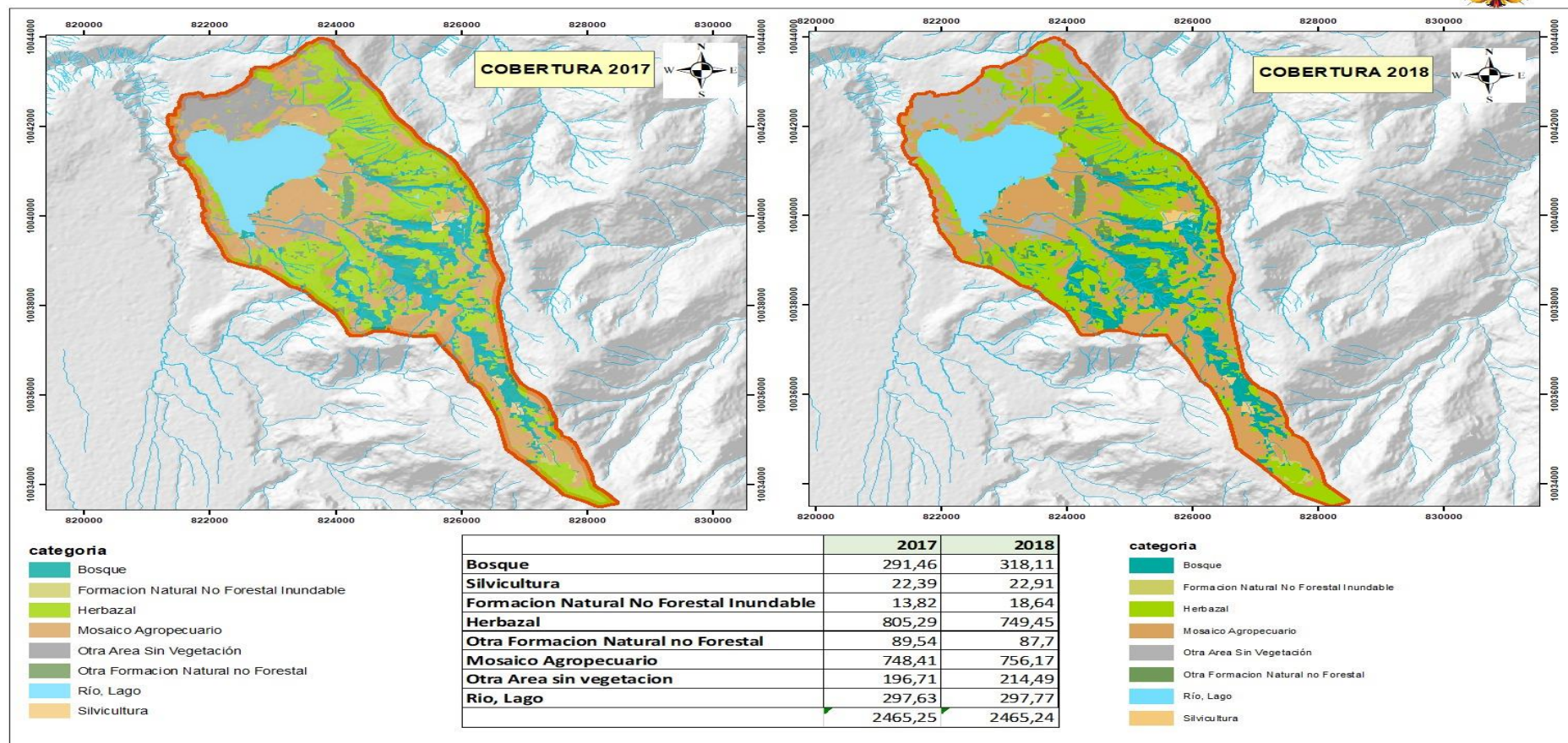
De acuerdo con la Tabla 13, la categoría de cobertura y uso del suelo “herbazal” es la predominante en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 36,49% del total. Le siguen las categorías “mosaico agropecuario”, “río, lago”, “bosque”, “otra área sin vegetación”, “otra formación natural no forestal”, “silvicultura” y “formación natural no forestal indudable” con porcentajes de cobertura decrecientes.

Entre los años de 2015 al 2016 la cobertura vegetal “herbazal” que ha disminuido en un 8,5%

A continuación, se puede observar la cobertura vegetal de los años 2017 a 2018, Mapa 6.

.

MAPA DE COBERTURA VEGETAL 2017 - 2018



Mapa 6. Categorías de cobertura y uso de suelo 2017-2018

Elaborado por el Autor

Tabla 14. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2017

COBERTURA 2017		
CATEGORÍA (Nivel 2)	HECTÁREAS	PORCENTAJE (%)
Bosque	291,46	11,82
Silvicultura	22,39	0,91
Formación Natural No Forestal Inundable	13,82	0,56
Herbazal	805,29	32,67
Otra Formación Natural no Forestal	89,54	3,63
Mosaico Agropecuario	748,41	30,36
Otra Área sin vegetación	196,71	7,98
Rio, Lago	297,63	12,07
TOTAL	2465,24	100

Elaborado por el Autor

De acuerdo con la Tabla 14, la categoría de cobertura y uso del suelo “herbazal” es la predominante en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 32,67% del total. Le siguen las categorías “mosaico agropecuario”, “río, lago”, “bosque”, “otra área sin vegetación”, “otra formación natural no forestal”, “silvicultura” y “formación natural no forestal indudable” con porcentajes de cobertura decrecientes.

Tabla 15. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2018

COBERTURA 2018		
CATEGORÍA	HECTÁREA	PORCENTAJE (%)
Bosque	318,11	12,90
Silvicultura	22,91	0,93
Formación Natural No Forestal Inundable	18,64	0,76
Herbazal	749,45	30,40
Otra Formación Natural no Forestal	87,7	3,56
Mosaico Agropecuario	756,17	30,67
Otra Área sin vegetación	214,49	8,70

Rio, Lago	297,78	12,08
TOTAL	2465,24	100

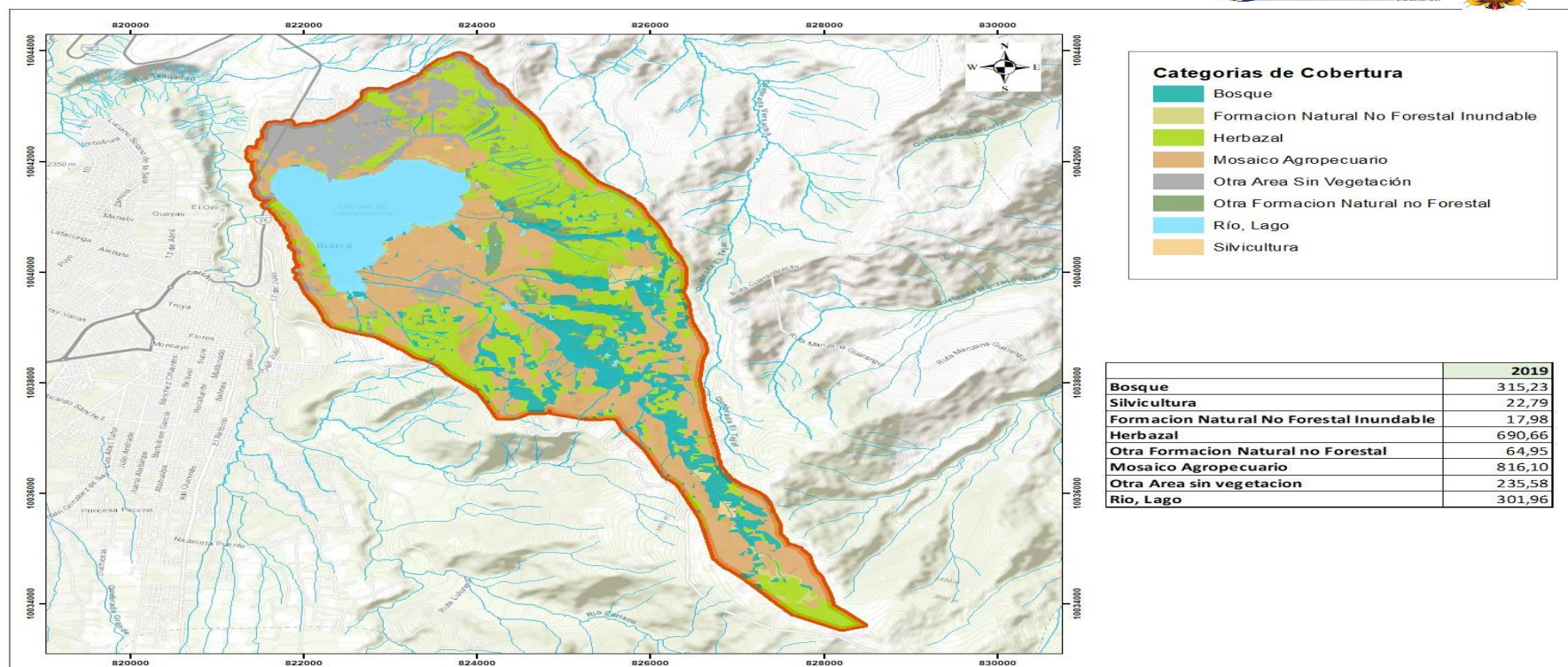
Elaborado por el Autor

De acuerdo con la Tabla 15, la categoría de cobertura y uso de suelo “mosaico agropecuario” es la predominante en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 30,67% del total. Le siguen las categorías “herbazal”, “río, lago”, “bosque”, “otra área sin vegetación”, “otra formación natural no forestal”, “silvicultura” y “formación natural no forestal indudable” con porcentajes de cobertura decrecientes.

Entre los años de 2017 al 2018 la cobertura vegetal “herbazal” ha disminuido con un 2,27 % y la cobertura vegetal de “mosaico agropecuario” ha aumentado en un 0,31%

A continuación, se puede observar la cobertura vegetal del año 2019, Mapa 7

MAPA DE COBERTURA VEGETAL 2019



Mapa 7. Categorías de uso y cobertura vegetal 2019

Elaborado por el Autor

Tabla 16. Áreas y porcentajes de las categorías de cobertura y uso de suelo 2019

COBERTURA 2019		
CATEGORÍA (Nivel 2)	HECTÁREAS	PORCENTAJE (%)
Bosque	315,23	12,79
Silvicultura	22,79	0,92
Formación Natural No Forestal Inundable	17,98	0,73
Herbazal	690,66	28,02
Otra Formación Natural no Forestal	64,95	2,63
Mosaico Agropecuario	816,10	33,10
Otra Área sin vegetación	235,58	9,56
Rio, Lago	301,96	12,25
TOTAL	2465,24	100

Elaborado por el Autor

De acuerdo con la Tabla 16, la categoría de cobertura y uso de suelo “mosaico agropecuario” es la predominante en el área de estudio de la Laguna de Yahuarcocha, representando el 33,10% del total. Le siguen las categorías “herbazal”, “bosque”, “río, lago”, “otra área sin vegetación”, “otra formación natural no forestal”, “silvicultura” y “formación natural no forestal indudable” con porcentajes de cobertura decrecientes.

En el año 2019 la cobertura vegetal “mosaico agropecuario” ha aumentado en un 2,43%, con respecto al año 2018.

En la siguiente tabla se puede observar la variación de cobertura en los diferentes años analizados.

Tabla 17. Porcentaje de variación de los años 2011 al 2019

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Bosque	12,94%	6,60%	5,84%	5,95%	5,88%	10,55%	11,82%	12,90%	12,79%
Silvicultura	0,92%	0,84%	0,77%	0,77%	0,76%	0,87%	0,91%	0,93%	0,92%
Formación Natural No Forestal Inundable	1,16%	0,76%	0,65%	0,67%	0,72%	0,62%	0,56%	0,76%	0,73%
Herbazal	38,02%	41,64%	46,13%	45,97%	44,64%	36,49%	32,67%	30,40%	28,02%
Otra Formación Natural no Forestal	2,30%	3,73%	1,86%	2,06%	1,70%	2,56%	3,63%	3,56%	2,63%
Mosaico Agropecuario	29,40%	26,21%	25,00%	24,86%	23,91%	26,60%	30,36%	30,67%	33,10%
Otra Área sin vegetación	3,27%	8,05%	7,38%	7,29%	9,64%	9,30%	7,98%	8,70%	9,56%
Rio, Lago	11,99%	12,17%	12,37%	12,43%	12,75%	13,01%	12,07%	12,08%	12,25%
	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Elaborado por el Autor

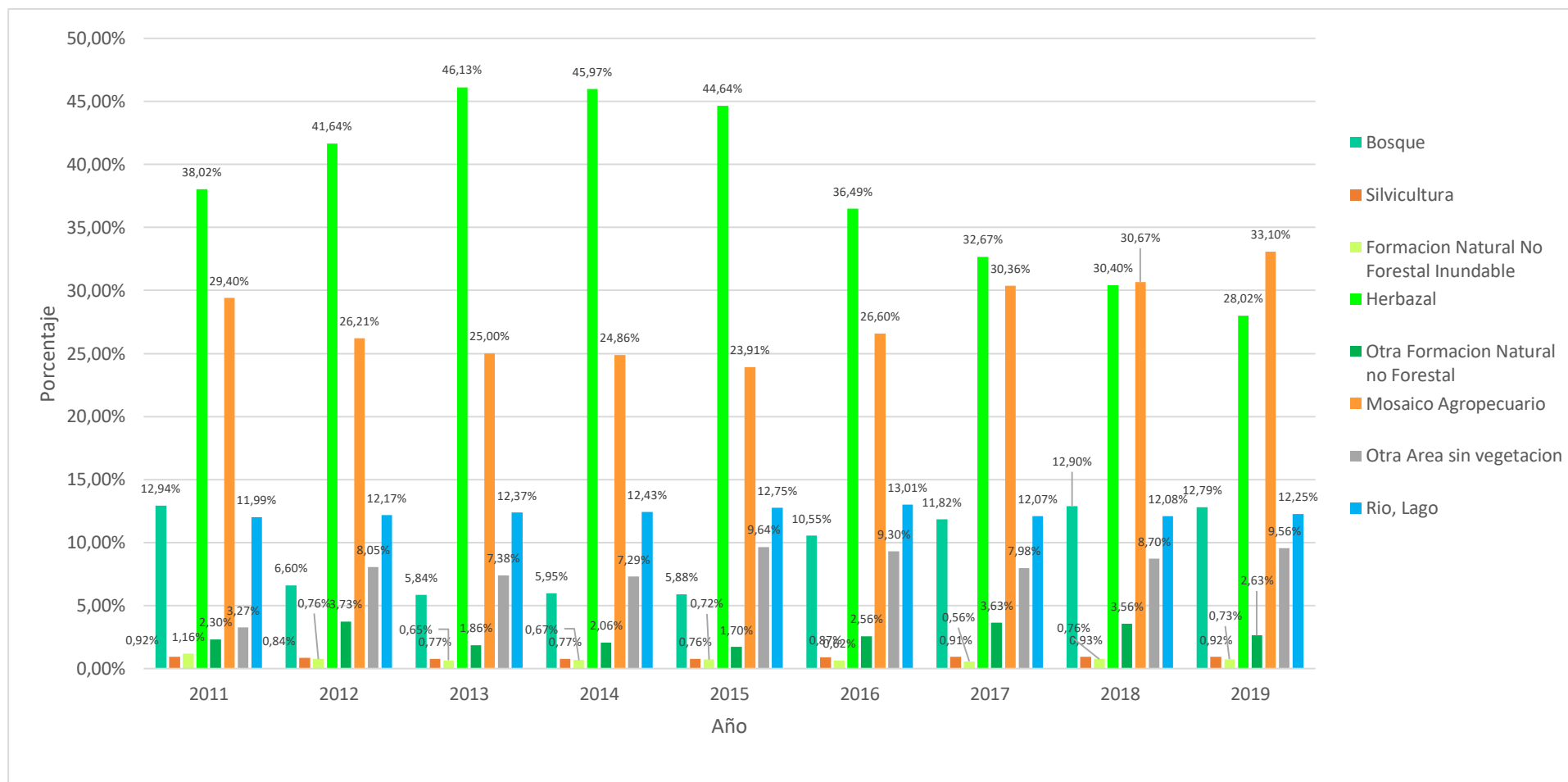


Figura 6. Porcentaje de variación de los años 2011 al 2019

Elaborado por el Autor

Como se puede observar en la tabla 17 y figura 6, se muestran los cambios en la cobertura del uso de suelo y vegetación en cuatro años diferentes del 2011 al 2019:

- **Bosque:** La cobertura ha disminuido, pasando de 12,94 % en 2011 a 12,79% en 2019, esto indica una reducción en áreas de vegetación nativa o la conversión a otros usos de suelo.
- **Silvicultura:** Se ha mantenido en el periodo 2011 al 2019.
- **Formación Natural No Forestal Inundable:** Se observa una disminución de 1,16% en 2011 a 0,73% en 2019. Esta reducción puede estar relacionada con la disminución de plantaciones
- **Herbazal:** Existe una disminución significativa, del 38,02% en 2011 a 28,02% en 2019, aunque vuelve al 10% en 2019. Esto podría indicar fluctuaciones en la conservación de áreas de bosque nativo.
- **Otra Formación Natural no Forestal:** Se observa un aumento de 2,30% en 2011 a 2,63% en 2019.
- **Mosaico Agropecuario:** Se observa un crecimiento notablemente, pasando de 29,40% en 2011 a 33,10% en 2019. Este aumento significativo sugiere una expansión de la frontera agrícola.
- **Otra Área sin vegetación:** Esta cobertura ha fluctuado ligeramente de 3,27% en 2011 a 9,56% en 2019.
- **Rio, Lago:** Esta cobertura ha aumentado de 11,99% en 2011 a 12,25% en 2019, lo cual puede ser una señal de aumento en el volumen o la extensión del área de influencia de la Laguna de Yahuarcocha.

5.2.1 Matriz de cambio de la Cobertura vegetal y suelo de los años del 2011 al 2019.

Con la información proceda en el ArcGIS, procede a realizar la matriz de cambio de cobertura vegetal en el periodo del 2011 al 2019, en la cual se puede visualizar en la siguiente tabla 14.

Tabla 18. Matriz de cambio del periodo del 2011 al 2019

categoría 2011	categoría 2019	area_1	cambio
Mosaico Agropecuario	Mosaico Agropecuario	570,32	-
Herbazal	Herbazal	558,83	-
Río, Lago	Río, Lago	287,98	-
Bosque	Bosque	204,01	-
Herbazal	Mosaico Agropecuario	184,68	cambio
Herbazal	Otra Área Sin Vegetación	105,26	cambio
Otra Área Sin Vegetación	Otra Área Sin Vegetación	77,21	-
Herbazal	Bosque	61,29	cambio
Mosaico Agropecuario	Herbazal	56,65	cambio
Mosaico Agropecuario	Otra Área Sin Vegetación	50,19	cambio
Bosque	Herbazal	47,36	cambio
Bosque	Mosaico Agropecuario	39,48	cambio
Mosaico Agropecuario	Bosque	38,08	cambio
Otra Formación Natural no Forestal	Otra Formación Natural no Forestal	24,72	-
Bosque	Otra Formación Natural no Forestal	20,40	cambio
Otra Formación Natural no Forestal	Herbazal	19,89	cambio
Silvicultura	Silvicultura	19,54	-
Herbazal	Otra Formación Natural no Forestal	18,65	cambio

Formación Natural No Forestal Inundable	Mosaico Agropecuario	13,01	cambio
Otra Formación Natural no Forestal	Bosque	8,48	cambio
Formación Natural No Forestal Inundable	Formación Natural No Forestal Inundable	8,22	-
Bosque	Río, Lago	5,03	cambio
Herbazal	Formación Natural No Forestal Inundable	4,55	cambio
Formación Natural No Forestal Inundable	Herbazal	4,08	cambio
Mosaico Agropecuario	Formación Natural No Forestal Inundable	3,82	cambio
Mosaico Agropecuario	Río, Lago	3,69	cambio
Río, Lago	Mosaico Agropecuario	3,07	cambio
Herbazal	Río, Lago	3,04	cambio
Río, Lago	Herbazal	2,42	cambio
Silvicultura	Mosaico Agropecuario	2,40	cambio
Otra Área Sin Vegetación	Mosaico Agropecuario	2,12	cambio
Formación Natural No Forestal Inundable	Bosque	1,76	cambio
Bosque	Formación Natural No Forestal Inundable	1,28	cambio
Herbazal	Silvicultura	1,10	cambio
Mosaico Agropecuario	Silvicultura	1,09	cambio
Formación Natural No Forestal Inundable	Río, Lago	1,08	cambio
Otra Área Sin Vegetación	Herbazal	1,06	cambio
Otra Formación Natural no Forestal	Otra Área Sin Vegetación	1,06	cambio
Río, Lago	Bosque	1,05	cambio

Otra Formación Natural no Forestal	Mosaico Agropecuario	1,03	cambio
Otra Formación Natural no Forestal	Río, Lago	0,99	cambio
Mosaico Agropecuario	Otra Formación Natural no Forestal	0,93	cambio
Bosque	Otra Área Sin Vegetación	0,79	cambio
Río, Lago	Otra Área Sin Vegetación	0,76	cambio
Bosque	Silvicultura	0,53	cambio
Silvicultura	Bosque	0,45	cambio
Otra Formación Natural no Forestal	Silvicultura	0,41	cambio
Silvicultura	Herbazal	0,36	cambio
Formación Natural No Forestal Inundable	Otra Área Sin Vegetación	0,31	cambio
Río, Lago	Otra Formación Natural no Forestal	0,19	cambio
Otra Área Sin Vegetación	Río, Lago	0,17	cambio
Otra Área Sin Vegetación	Bosque	0,12	cambio
Formación Natural No Forestal Inundable	Silvicultura	0,11	cambio
Río, Lago	Formación Natural No Forestal Inundable	0,10	cambio
Otra Área Sin Vegetación	Otra Formación Natural no Forestal	0,06	cambio
		2465,25	

Elaborado por el Autor

Tabla 19. Matriz de cambio del 2011 al 2019

Matriz de cambio 2011 al 2019	Bosque (ha)	Silvicultura (ha)	Formación Natural No Forestal Inundable (ha)	Herbazal (ha)	Otra Formación Natural no Forestal (ha)	Mosaico Agropecuario (ha)	Otra Área sin vegetación (ha)	Rio, Lago (ha)	Total
Bosque	204,01	0,53	1,28	47,36	20,4	39,48	0,79	5,03	318,88
Silvicultura	0,45	19,54	0	0,36	0	2,4	0	0	22,75
Formación Natural No Forestal Inundable	1,76	0,11	8,21	4,08	0	13,01	0,31	1,08	28,56
Herbazal	61,29	1,1	4,55	558,83	18,65	184,68	105,26	3,04	937,4
Otra Formación Natural no Forestal	8,48	0,41	24,72	19,89	0	1,03	1,06	0,99	56,58
Mosaico Agropecuario	38,08	1,09	3,82	56,65	0,93	570,32	50,19	3,69	724,77
Otra Área sin vegetación	0,12	0	0	1,06	0,06	2,12	77,21	0,17	80,74
Rio, Lago	1,05	0	0,1	2,42	0,19	3,07	0,76	287,98	295,57
									2465,25

Elaborado por el Autor

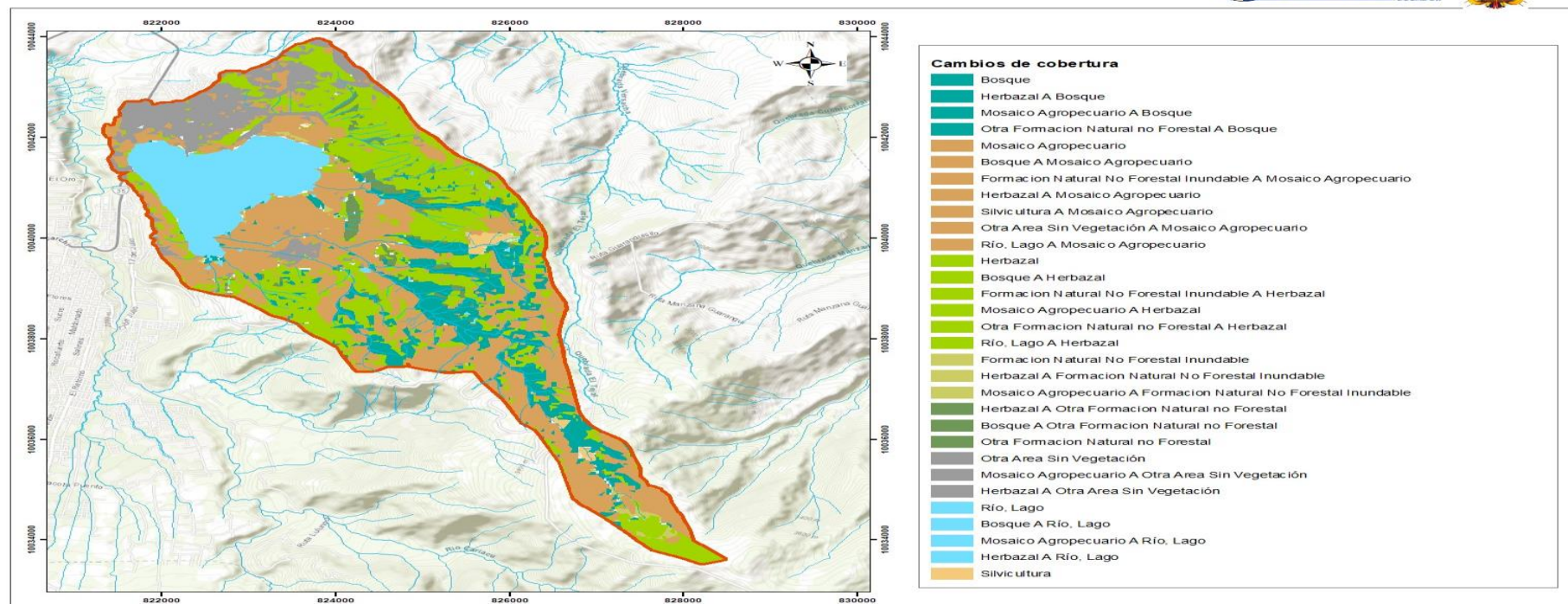
En el periodo de 2011 al 2019:

- Herbazal cambio Mosaico Agropecuario con 184,68 ha, lo que ha incrementado el uso agropecuario por un aumento de la frontera agrícola.
- Herbazal a Otra Área Sin Vegetación con 77,21 ha, indica un proceso de degradación o urbanización.
- Mosaico Agropecuario a Herbazal a 558,83 ha, refleja una posible regeneración o no hay prácticas de cultivo en las tierras agropecuarias.
- También en la cobertura de mosaico Agropecuario con 570,32 ha, que indica una estabilidad en esa área.

Para el año 2019, herbazal ha incrementado, en la que ha recibido áreas desde otras categorías como "Mosaico Agropecuario" y "Bosque".

Con respecto a la categoría de Otra Formación Natural No Forestal mantiene su estabilidad y se incrementa pero en recibe áreas pequeñas.

MAPA DE CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL 2011-2019



Mapa 8. Categorías de uso y cobertura vegetal año de 2011 al 2019

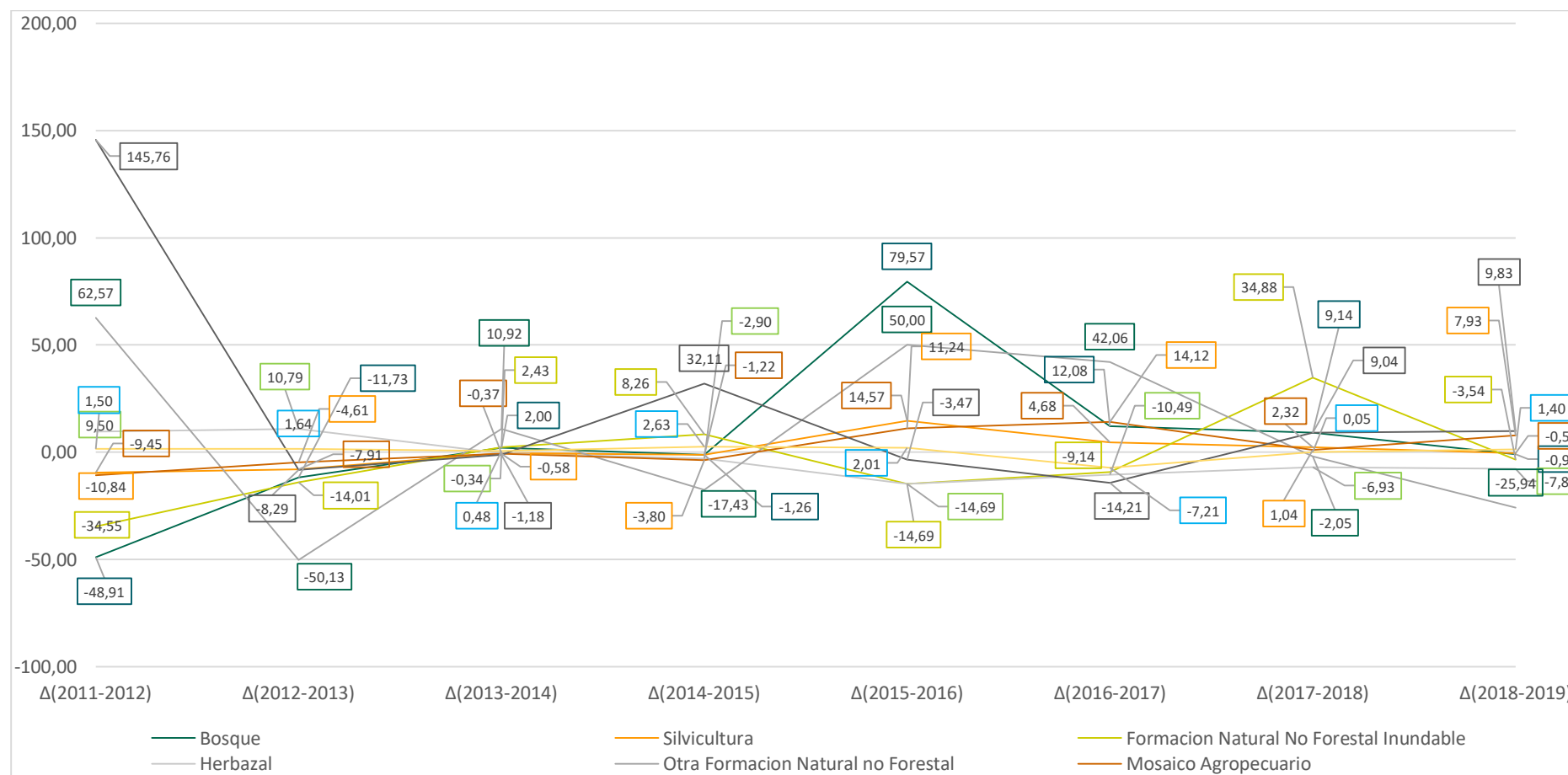
Elaborado por el Autor

Tabla 20. Matriz de transición del 2011 al 2019

Categoría	Units	$\Delta(2011-2011)$	$\Delta(2011-2012)$	$\Delta(2012-2013)$	$\Delta(2013-2014)$	$\Delta(2014-2015)$	$\Delta(2015-2016)$	$\Delta(2016-2017)$	$\Delta(2017-2018)$	$\Delta(2018-2019)$	Total (2011-2019)
Bosque	ha	0,00	-155,98	-19,11	2,88	-1,85	115,23	31,41	26,65	-2,88	-3,65
	% (q)	0,00%	-48,91	-11,73	2,00	-1,26	79,57	12,08	9,14	-0,91	-0,14
Silvicultura	ha	0,00	-2,15	-1,63	-0,07	-0,23	2,72	1,00	0,52	-0,12	0,04
	% (q)	0,00%	-9,45	-7,91	-0,37	-1,22	14,57	4,68	2,32	-0,52	0,02
Otra Formación Natural no Forestal	ha	0,00	-9,87	-2,62	0,39	1,36	-2,62	-1,39	4,82	-0,66	-10,59
	% (q)	0,00%	-34,55	-14,01	2,43	8,26	-14,69	-9,14	34,88	-3,54	-5,62
Herbazal	ha	0,00	89,05	110,78	-3,92	-32,91	-200,71	-94,40	-55,84	-58,79	-246,74
	% (q)	0,00%	9,50	10,79	-0,34	-2,90	-14,69	-10,49	-6,93	-7,84	-3,75
Otra Formación Natural no Forestal	ha	0,00	35,41	-46,12	5,01	-8,87	21,01	26,51	-1,84	-22,75	8,36
	% (q)	0,00%	62,57	-50,13	10,92	-17,43	50,00	42,06	-2,05	-25,94	1,74
Mosaico Agropecuario	ha	0,00%	-78,56	-29,78	-3,60	-23,28	66,28	92,59	7,76	59,93	91,34
	% (q)	0,00%	-10,84	-4,61	-0,58	-3,80	11,24	14,12	1,04	7,93	1,49
Otra Área sin vegetación	ha	0,00%	117,67	-16,44	-2,15	57,73	-8,24	-32,59	17,78	21,09	154,85
	% (q)	0,00%	145,76	-8,29	-1,18	32,11	-3,47	-14,21	9,04	9,83	14,32
Rio, Lago	ha	0,00%	4,43	4,92	1,46	8,05	6,33	-23,13	0,15	4,18	6,39
	% (q)	0,00%	1,50	1,64	0,48	2,63	2,01	-7,21	0,05	1,40	0,27

Elaborado por el Autor

Figura 7 Transición de cobertura y uso de suelo de 2011 al 2019



Elaborado por el Autor

- **Bosque:** Sé que muestra periodos con pérdidas significativas, como en 2011-2012 (-48,91%), seguido de una leve recuperación en 2015-2016 (79,57 ha), esto puede reflejar eventos específicos como deforestación por actividades antropogénicas y ciertos periodos con de reforestación. El periodo 2011-2019 (-3.65 ha) ha pérdida acumulada de bosque en el indicando presiones continuas.
- **Silvicultura:** Incrementos menores en ciertos periodos (2015-2016, +2,72 ha) podrían estar vinculados a programas de manejo forestal.
- **Otra Formación Natural no Forestal:** Presenta fluctuaciones, con una pérdida significativa en 2012-2013 (-50,13%), pero con cierta recuperación en 2017-2018 (50,06%), refleja cambios en ecosistemas secundarios y transiciones hacia otras coberturas.
- **Herbazal:** Fluctuaciones en el periodo de 2012-2013 (+110,78 ha), pero pérdidas marcadas hacia 2015-2019 (-246,74 ha). Esto podría estar relacionado con su conversión a otros usos como agricultura o zonas urbanas.
- **Mosaico Agropecuario:** Se mantiene relativamente estable, con cambios menos pronunciados. Esto podría indicar una consolidación de las áreas agrícolas.
- **Otras Áreas sin Vegetación:** Incrementos en periodos como 2015-2016 (+32,11 ha) reflejan potencialmente actividades de construcción o expansión urbana.
- **Río, Lago:** Los cambios parecen mantenerse dentro de márgenes naturales.

5.2.2 Indicador NDWI

Para calcular el indicador NDWI, se Abre ArcGIS, se agregó las bandas satelitales descargadas del año 2018, Banda Verde: B3 para Landsat 8 y Banda NIR: B5

Con la herramienta Raster Calculator se escribe la formula ("B3" - "B5") / ("B3" + "B5"), se guarda el resultado como un nuevo raster (NDWI_2018.tif) y se realiza el procesamiento de la información.

Tabla 21. Matriz de NDWI de los puntos de monitoreo del año 2018

Nro.	Punto	NWDI	Interpretación
1	INAMHI	0,190331	Inundación, humedad
2	P4-0	0,226550	Superficie de agua
3	P5-0	0,007276	Inundación, humedad
4	P10-0	0,038080	Inundación, humedad
5	P11	0,167181	Inundación, humedad
6	P6	0,272462	Superficie de agua
7	P7	0,271146	Inundación, humedad
8	P1	0,139092	Inundación, humedad
9	P2	0,038080	Inundación, humedad
10	P8	0,395982	Superficie de agua

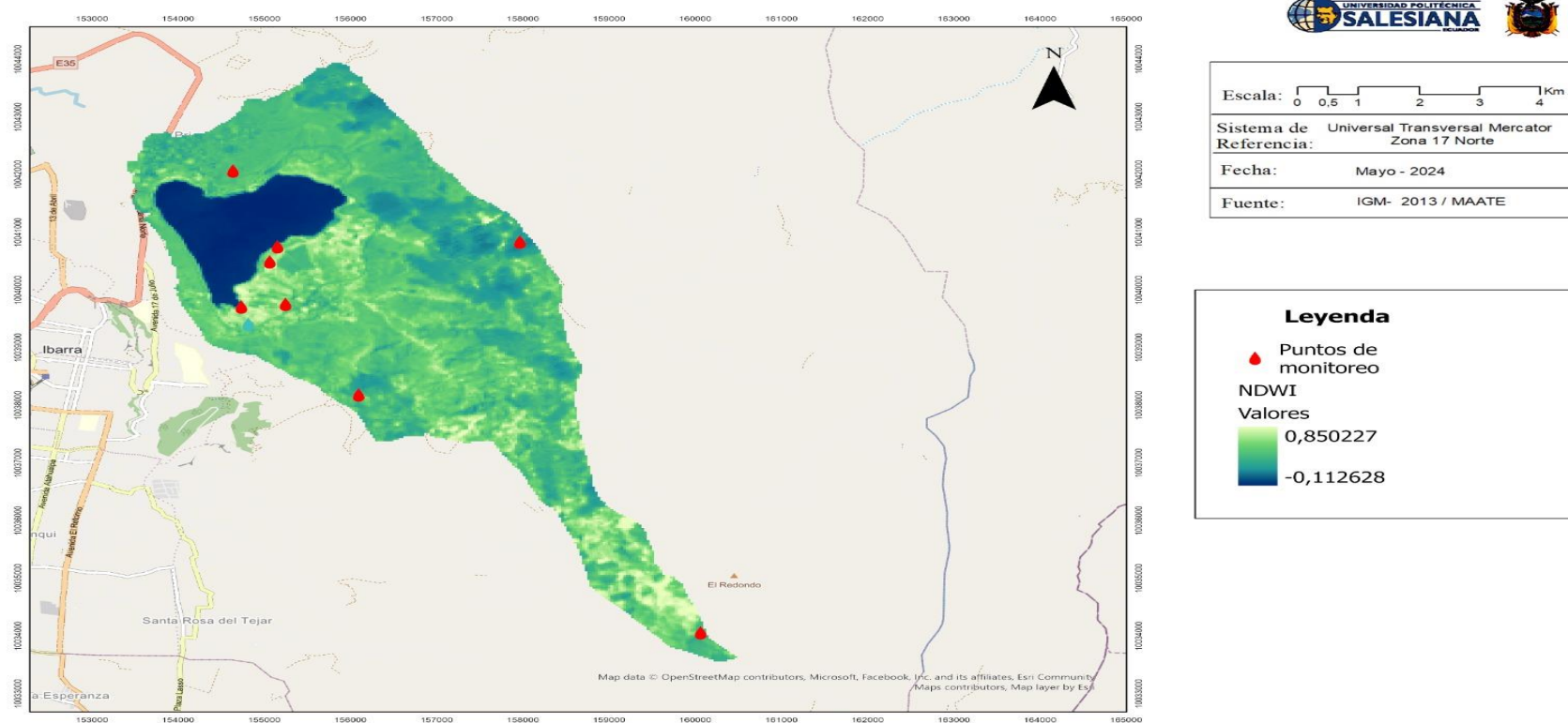
Elaborado por el Autor

Los puntos: INAMHI, P11, P1 el NDWI indica que pueden estar cerca del agua, pero no cubiertas completamente, representar orillas con vegetación húmeda o suelos saturados.

El NWDI < 0.1 calculado tienen valores muy bajos, lo que indica suelos húmedos pero sin agua libre. P10-0, P2, P5-0, estos puntos no estaban completamente secos para el año de 2018 la presencia de agua era limitada.

La laguna de Yahuarcocha para el año 2018 tenía agua en su cuerpo principal, sin signos de disminución drástica y sus riberas mostraban humedad significativa, lo que podría deberse a filtraciones o zonas de encharcamiento, con áreas periféricas tenían suelos húmedos pero sin agua libre, posiblemente afectadas por cambios estacionales.

Mapa 9. Resultado del cálculo del índice de NDWI para el año 2018



Elaborado por el Autor

5.2.3 Indicador NDTI

Para calcular el indicador NDTI, se Abre ArcGIS, se agregó las bandas satelitales descargadas del año 2018, Banda Verde: B3 para Landsat 8 y Banda B4

Con la herramienta Raster Calculator se escribe la formula $(\text{"B3"} - \text{"B4"}) / (\text{"B3"} + \text{"B4"})$, se guarda el resultado como un nuevo raster (NDWI_2018.tif) y se realiza el procesamiento de la información.

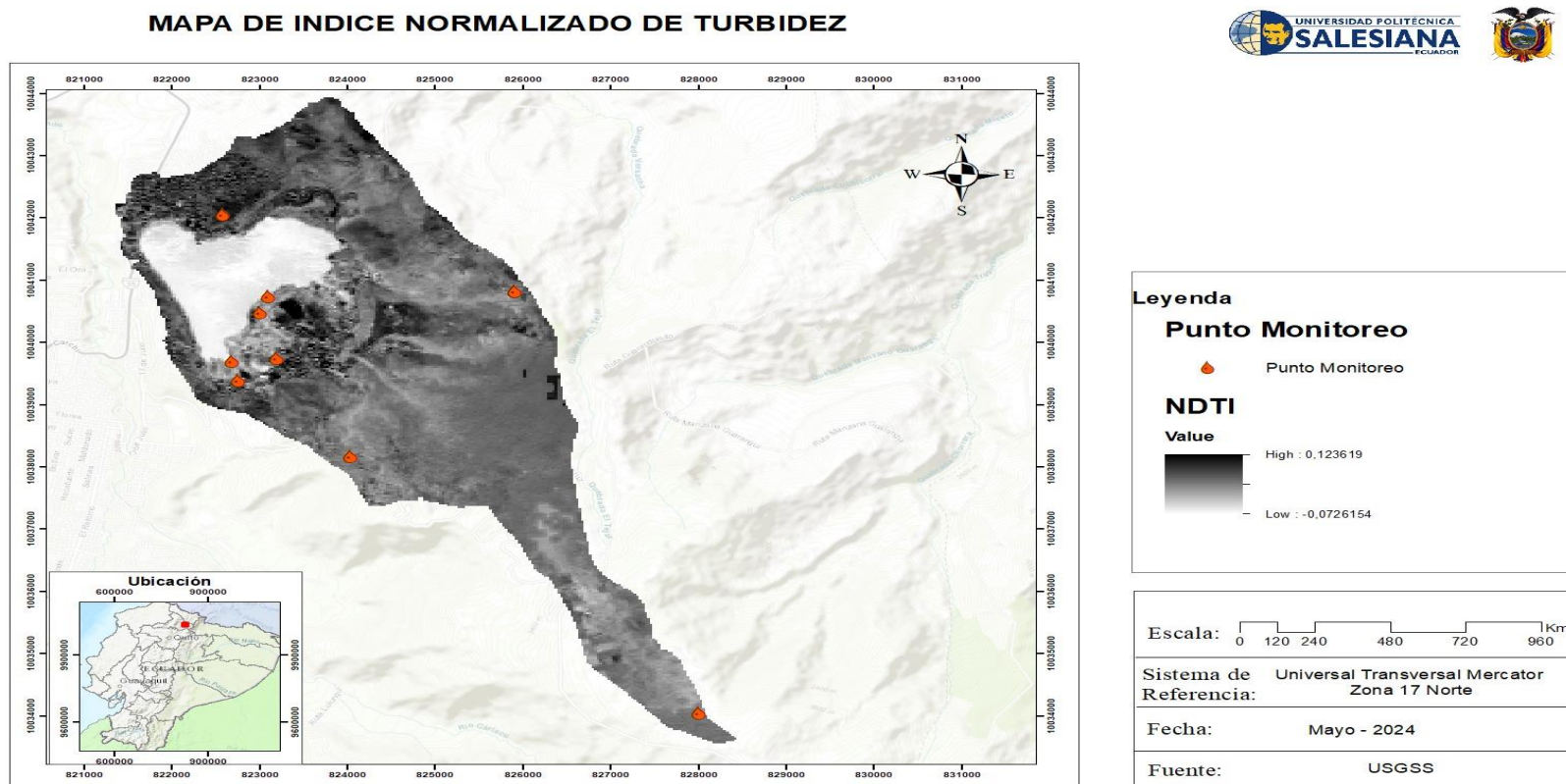
Tabla 22. Matriz de NDTI de los puntos de monitoreo del año 2018

Nro.	Punto	NDTI	Interpretación
1	INAMHI	0,056537	Agua con poca turbidez
2	P4-0	- 0,001959	Agua con poca turbidez
3	P5-0	-0,039205	Agua con poca turbidez
4	P10-0	0,002471	Agua con poca turbidez
5	P11	0,010494	Agua con poca turbidez
6	P6	-0,037743	Agua con poca turbidez
7	P7	0.022437	Agua con poca turbidez
8	P1	0,004224	Agua con poca turbidez
9	P2	0,002471	Agua con poca turbidez
10	P8	-0.021884	Agua con poca turbidez

Elaborado por el Autor

En todos los puntos el NDWI indica el agua con poca turbidez

Mapa 10. Resultado del cálculo del índice de NDTI para el año 2018



Elaborado por el Autor

5.2.4 Calidad del agua

Para la evaluación de la calidad del agua en la laguna de Yahuarcocha incluyó la recopilación de datos de parámetros físico-químicos y bacteriológicos entregados por INAMHI y GAD Municipal de Ibarra del año 2018. Los puntos de monitores se encuentran en afluente que drenan a la Laguna de Yahuarcocha. Los parámetros de calidad del agua evaluados incluyeron el pH, Oxígeno Disuelto (OD), turbidez, coliformes fecales, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Nitratos, Fosfatos, primero se comparó con la tabla 2: criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces con el propósito de evaluar su estado y obtener información esencial para el diseño de estrategias de conservación y gestión sostenible del TULSMA 097A.

También se realizó el Índice de calidad del agua de cada punto del año 2018.

5.2.5 Análisis de los parámetros de calidad del agua

En la Tabla 7, se puede observar los puntos de calidad del agua con sus respectivos parámetros que fueron analizados en los años de 2011 a 2018, los cuales fueron comparados con la “Tabla 2 Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en Aguas dulces, marinas y de estuarios”, del TULSMA 097 A.

Tabla 23. Comparación de los parámetros con la Tabla 2: criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces con el propósito de evaluar su estado y obtener información esencial para el diseño de estrategias de conservación y gestión sostenible del TULSMA 097A.

Nro.	CÓDIGO	Año	ph	Turbidez	OD	Nitratos	DBO5	Fosfatos	Coliformes fecales
			UpH	NTU	%	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100 ml
1	INAMHI (drena a la laguna)	2018	9,02	47,57	75	0	16,26	-	33
2	P4-0	2018	8,8	-	76,3	0,25	8	-	30
3	P5-0	2018	8,77	--	76,8	0,25	8	-	40
4	P10-0	2018	8,85	-	61,2	0,25	12	-	30
5	P11	2018	8,71	-	88,7	0,25	14	-	30
6	P6	2018	6,07	-	-	0,28	-	0,5	-
7	P7	2018	7,91	-	-	4,9	-	0,6	30
8	P1	2018	8,32	-	-	0,78	-	0,7	3400
9	P2	2018	8,25	-	-	0,05	-	0,5	2 400
10	P8	2018	-	-	-	0,25	-	21	1100

* (-) no cuenta con información

Elaborado por el Autor

Del análisis de la calidad del agua, en el punto de muestreo denominado como INAMHI, P4-0, P4-1, P5-0, P10-0, que exceden los límites de calidad admisibles de la tabla 2 del TULSMA 097 A, en el parámetro de Oxígeno Disuelto (%OD), ya que se encuentra por debajo del 80%, lo que indica insuficiencia de oxígeno para la vida acuática.

5.2.6 Índice de calidad del Agua (ICA)

Se realizó el cálculo del Índice de calidad del agua de los puntos de monitoreo del año 2018, para el cálculo del ICA se utilizó el método propuesto por la NSF (Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU.) en la que intervienen los siguientes parámetros: coliformes fecales (en NMP/100mL), pH (en unidades de pH), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO5 en mg/L), nitratos (NO3 en mg/L), fosfatos (PO4 en mg/L), turbidez (en FAU), y oxígeno disuelto (OD en % saturación).

Cabe indicar que estos puntos de calidad del agua drenan sus aguas a la laguna de Yahuarcocha.

Tabla 24. Cálculo del índice de calidad del agua (ICA), método propuesto por la NSF (Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU.)

Nro.	Año	Código	ICA	Calidad del Agua
1	2018	INAMHI	54,99	Regular
2	2018	P4-0	72,03	Buena
3	2018	P5-0	72,18	Buena
4	2018	P10-0	66,87	Regular
5	2018	P11	71,12	Buena
6	2018	P6	77,25	Buena
7	2018	P7	83,84	Buena
8	2018	P1	82,4	Buena
9	2018	P2	83,46	Buena
10	2018	P8	72,22	Buena

Elaborado por el Autor

Los puntos de calidad buena ($ICA > 70$), P4-0, P5-0, P11, P6, P7, P1, P2, P8, estos están aportando agua de mejor calidad a la Laguna de Yahuarcocha, se encuentran ubicados en áreas con menos actividades antrópicas.

Los puntos con calidad regular (ICA entre 55 y 70), INAMHI, P9, P10-0, estos puntos están aportando agua con una afectación al agua moderada que es ocasionada por actividades antrópicas, por agricultura o explotación de áreas rurales, estaría realizando un impacto a la calidad del agua.

5.3 Correlación entre los índices de cobertura y uso de suelo y la calidad del agua

5.3.1 Correlación entre el Índice NDWI y el Índice de Calidad del Agua

Para establecer una correlación entre el Índice NDWI y el Índice de Calidad del Agua, se utilizaron los datos correspondientes al año 2018, ya que ese año cuenta con registros de parámetros de calidad del agua (coliformes fecales, pH, demanda bioquímica de oxígeno en 5 días, nitratos fosfatos, turbidez y oxígeno disuelto) alrededor de la laguna de Yahuarcocha.

Se procede iniciar con el cálculo del NDWI de los puntos de monitoreo de calidad del agua, a través de ArcGIS, se convirtió de raster a polígono, con herramienta Extract Multi Values to Points, se continua con selecciona tu capa de puntos de monitoreo, se selecciona el raster de NDWI del 2018, se configura el nombre del campo (NDWI_2018). Se selecciona Attribute Table para revisar los valores de NDWI agregados.

Tabla 25. Cálculo del NDWI de cada punto de monitoreo del año 2018

Nro.	Año	Punto	NDWI	ICA
1	2018	INAMHI	0,190331	54,99
2	2018	P4-0	0,226550	72,03
3	2018	P5-0	0,007276	72,18
4	2018	P10-0	0,038080	66,87
5	2018	P11	0,167181	71,12
6	2018	P6	0,272462	77,25
7	2018	P7	0,271146	83,84
8	2018	P1	0,139092	82,4
9	2018	P2	0,038080	83,46
10	2018	P8	0,395982	72,22

Elaborado por el Autor

El coeficiente de correlación de *Pearson* (r) entre NDWI e ICA es 0.0186, lo que indica una correlación muy débil entre estos dos índices para el año 2018.

$r = 0$ significa que no hay una relación lineal clara entre el NDWI (presencia de agua) y el ICA (calidad del agua), esto quiere indicar que la cantidad de agua en una zona no influye directamente en la calidad del agua medida por el ICA en estos puntos específicos.

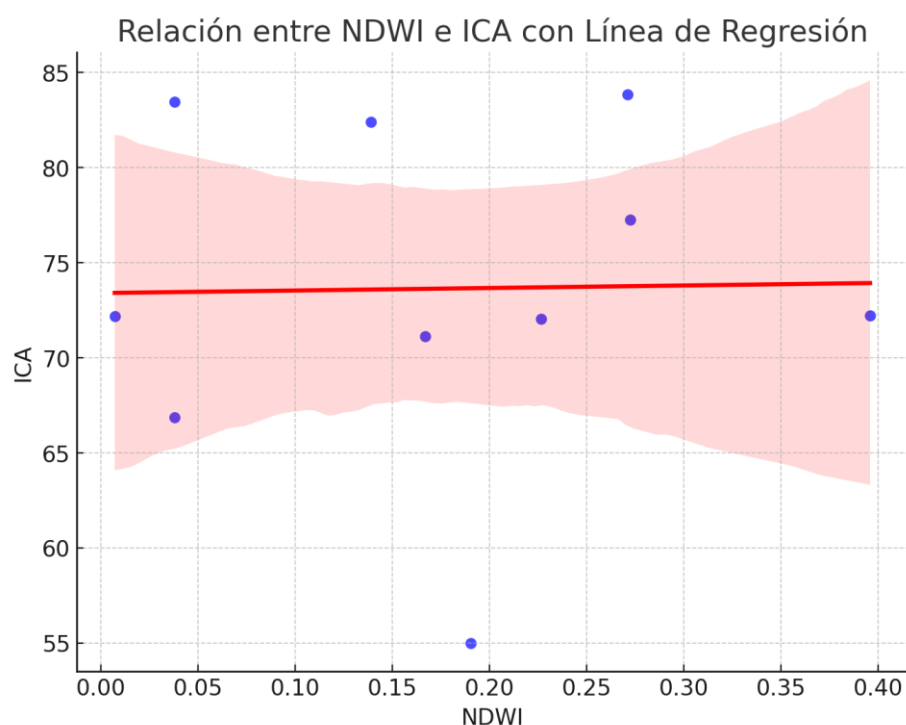


Figura 8. Correlación de *Pearson* entre NDWI e ICA para el año 2018

Elaborado por el Autor

Hay una distribución dispersa, los puntos indica una correlación muy baja ($r = 0,0186$), la línea de regresión es muy baja (1,3258), lo que indica que un cambio en NDWI no tiene un impacto significativo en ICA., el valor p (0,9593) indica que esta relación no es estadísticamente significativa.

5.3.2 Correlación entre el Índice NDTI y el Índice de Calidad del Agua

Con respecto con el NDTI y el Índice de Calidad del Agua, se utilizaron los datos correspondientes al año 2018, ya que ese año cuenta con registros de parámetros de calidad del agua (coliformes fecales, pH, demanda bioquímica de oxígeno en 5 días, nitratos fosfatos, turbidez y oxígeno disuelto) alrededor de la laguna de Yahuarcocha.

A continuación, se procede con el cálculo del NDTI de los puntos de monitoreo de calidad de la agua, a través de ArcGIS, se convirtió de raster a polígono, con herramienta Extract Multi Values to Points, se continúa con seleccionar tu capa de puntos de monitoreo, se selecciona el raster de NDTI del 2018, se configura el nombre del campo (NDTI_2018). Se selecciona Attribute Table para revisar los valores de NDTI agregados.

Tabla 26. Cálculo del NDTI de cada punto de monitoreo del año 2018

Nro.	Año	Punto	NDTI	ICA
1	2018	INAMHI	0,056537	54,99
2	2018	P4-0	- 0,001959	72,03
3	2018	P5-0	-0,039205	72,18
4	2018	P10-0	0,002471	66,87
5	2018	P11	0,010494	71,12
6	2018	P6	-0,037743	77,25
7	2018	P7	0.022437	83,84
8	2018	P1	0,004224	82,4
9	2018	P2	0,002471	83,46
10	2018	P8	-0.021884	72,22

Elaborado por el Autor

El coeficiente de correlación de Pearson (r): -0,378, esto indica que hay una correlación negativa moderada entre NDTI (Índice de Diferencia Normalizada de Turbidez) y ICA (Índice de Calidad del Agua), este valor negativo significa que a medida que NDTI disminuye, el ICA tiende a aumentar, aunque la relación no es muy fuerte.

El valor p : 0,281, si un valor $p > 0,05$ indica que la correlación no es estadísticamente significativa al 95% de confianza.

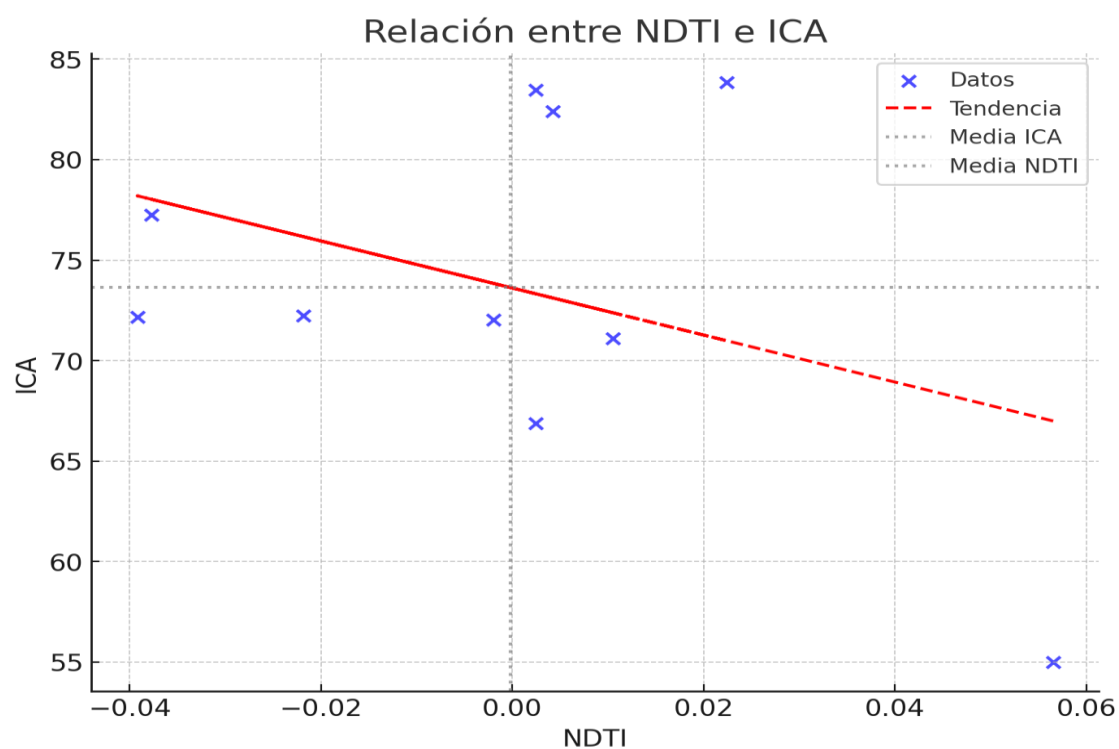


Figura 9. Correlación de *Pearson* entre NDTI e ICA para el año 2018

Elaborado por el Autor

En la Figura 8, se observa la relación entre NDTI e ICA, la línea roja discontinua representa la tendencia lineal, mientras que las líneas grises punteadas indican los valores medios de NDTI e ICA, la relación entre los datos no es muy fuerte.

6. Conclusiones

- Los resultados con respecto al cambio en la cobertura del suelo, muestran una disminución en la cobertura de vegetación herbazal a mosaico agropecuario con 185,68 ha hasta el año 2019, esta reducción sugiere una conversión de áreas naturales hacia usos agrícolas, lo que incrementa la presión sobre los ecosistemas de la laguna de Yahuarcocha.
- Aumento notable del área destinada a actividades agropecuarias, que alcanzó el 2,43% hasta el 2019, esta expansión está asociada con la utilización de fertilizantes y pesticidas en los cultivos, que podrían contribuir a la afectación de la laguna, incrementando así los niveles de nutrientes y favoreciendo la eutrofización.
- Los parámetros de calidad del agua del 2018, porcentaje de oxígeno disuelto, superan los criterios de calidad del agua de la Tabla 2: *Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios* del TULSMA 097A, indicando una afectación urbana, afectando el ecosistema acuático.
- El índice de Calidad del Agua para el año 2018, indicando una calidad del agua de los puntos de monitoreo que drenan a la Laguna de Yahuarcocha de buena a regular.
- El índice NDWI se calculó en los puntos de monitoreo en el año 2018, en la que indica que no hay cambios significativos y que sus riberas muestran humedad.
- El índice NDTI, se calculó en los puntos de monitoreo en el año 2018, el que indica “ Agua con poca turbidez”
- La correlación de los índices de NDWI e ICA, indica una correlación muy baja ($r = 0.0186$), la línea de regresión es muy baja (1.3258), lo que indica que un cambio en NWDI no tiene un impacto significativo en ICA., el valor p (0.9593).
- La correlación de los índices NDTI e ICA indica una correlación baja ($r = -0.378$), lo que sugiere que la relación entre ambos índices no es fuerte.
- El uso de MapBiomas Ecuador en este estudio permitió obtener una visión integral de los cambios en la cobertura y uso del suelo en la laguna de

Yahuarcocha entre 2011 al 2019| esta plataforma está basada en imágenes Landsat y procesada con algoritmos de Machine Learning en Google Earth Engine, proporcionó datos valiosos para la caracterización y monitoreo del territorio, sin embargo, la calidad del mosaico varió a lo largo de los años, con períodos de alta precisión (2015 y 2017) y otros con mayor incertidumbre (2019), las principales limitaciones incluyen la presencia de píxeles sin observaciones, la dependencia de la disponibilidad de imágenes Landsat, y la afectación por condiciones atmosféricas, lo que puede generar errores en la interpretación de los cambios de cobertura del suelo.

- Las técnicas de teledetección son indispensables para analizar de manera precisa y detallada los cambios temporales y espaciales en el uso del suelo y la calidad del agua. Esta tecnología se ha consolidado como una herramienta fundamental para el monitoreo y gestión óptima de los recursos naturales e hídricos, proporcionando datos para la toma de decisiones informadas y la implementación de políticas públicas de conservación y protección efectivas de cuencas hidrográficas.

Referencias

- Aguirre Núñez, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual REDESMA*, 5, 4-12.
- Álvaro, I., & Alcalde, C. A. (s. f.). SAN MIGUEL DE IBARRA.
- Amado-Alvarez, J., Pérez-Cutillas, P., Alatorre-Cejudo, L. C., Olguín-López, J. L., Ramírez-Valle, O., Segovia-Ortega, E. F., & Alarcón-Cabañero, J. J. (2018). Análisis multiespectral para la estimación de la turbidez como indicador de la calidad del agua en embalses del estado de Chihuahua, México. *Revista Geográfica de América Central*, 1(62), 49. <https://doi.org/10.15359/rgac.62-1.2>
- Andueza, F., Chaucala, S., Vinueza, R., Escobar, S., Medina-Ramirez, G., & Araque, J. (2019). Calidad microbiológica de las aguas termales del balneario “El Tingo”. Pichincha. Ecuador. Escuela de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleo y Ambiental. Universidad Central del Ecuador. Quito. Ecuador.
- Argota perez, G., & Doroteo Neyra, P. F. (2021). Daño ambiental latente en la laguna de la Huacachina, Ica (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 23(2), 111-114. <https://doi.org/10.18271/ria.2021.282>
- Ávila García, P. (2008). Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, 46-57.
- Ayala Jesús, C., & Herrera Díaz, M. A. (2019). Monitoreo de la calidad del agua del lago Chinchaycocha, mediante técnicas de teledetección espacial. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 2(2). <https://doi.org/10.46380/rias.v2i2.46>
- Ayala-Esparza, V. A., Hurtado-Astudillo, J. R., & Caicedo Hinojosa, L. A. (2024). Calidad del Agua Potable y su Relación en la Parasitosis Infantil en el Recinto San Agustín. *REICIT*, 3(2). <https://doi.org/10.48204/reict.v3n2.4674>
- Barceló, D., & López, M. J. (2008). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Jornadas de presentación de*

- resultados: el estado ecológico de las masas de agua. Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas, Sevilla, 1-27.
- Bastidas Obando, S. A. (2024). "Caracterización físicoquímica y bacteriológica del agua de la laguna de Yahuarcocha en la provincia de Imbabura.
- Borrero García, C. B. (2018). Metodología para determinación del índice de calidad del agua a partir de parámetros fáciles de medir en campo. Universidad de los Andes- Repositorio Institucional Séneca.
- Botero, L. A. C. (2020). La paradoja de la disponibilidad de agua de mala calidad en el sector rural colombiano. *Revista de ingeniería*, 49, 38-51.
- Cárdenas, J., & Zamora, L. (2019). ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA CUENCA RÍO QUITO, PRESIONADA POR ACTIVIDAD MINERA.
- Carrasco Vela, D. (2018). «Teledetección y calidad del agua: una revisión de la literatura científica».
- Castaño Velez, E., & Palacio Baena, J. (2021). Análisis del nivel de oxígeno disuelto en el agua en varios sitios de una represa. Universidad de Antioquia.
- Castillo Blanco, A., Pereira García, F. J., & Muñoz Lucas, M. I. (2024). Estudio bibliométrico de la presencia de plomo en el medio ambiente. *Ambiociencias*, 21. <https://doi.org/10.18002/ambioc.i21.8182>
- Castro Villegas, J. (2020). IDENTIFICACIÓN DE HÚMEDAD EN EL SUELO A TRAVES DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL MEJOR MANEJO DE LA TIERRA: CASO ZONA FLORICOLA, ESTADO DE MÉXICO. *Facultad de Geografía, Ciudad Universitaria*, 2, 1-13.
- Chamorro, R. (2021). UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE "ESTUDIO MULTITEMPORAL DE USO DEL SUELO Y COBERTURA.
- Chavarría Márquez, E. Y., Huamaní Astocaza, L. L., Basurto Contreras, C. M., Gutierrez Collao, J. E., & Cusiche Huamaní, M. L. (2023). Determinación clásica de coliformes fecales en agua entubada en el distrito de Ahuaycha, Perú. *Revista Alfa*, 7(21), 560-566. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i21.236>
- Coloquio Ciencia y Sociedad. (2021). Calidad del agua: Salud de los ecosistemas y salud humana (Primera edición,). www.concytec.gob.pe

- Conejeros Molina, A., Pichunman, H., Martinez-Jimenez, B. L., & Remior, A. P. (2021). Monitoreo de calidad del agua en sistema de agua potable rural. En RIELAC (Vol. 42).
- Cuarán Guerrero, M., & Burbano Benítez, J. (2018). Análisis en la microcuenca de la Laguna Yahuarcocha. Halopraxis Ciencia, tecnología e Innovación, 2(2588-0942), 1-13.
- Dámaso, C., Delisles, P., Andrés, C., & Quan, L. (2013). Uso de las imágenes de satélites y los SIG en el campo de la Ingeniería Agrícola Use of satellite images and GIS in the branch of the agricultural engineering (Vol. 22, Número 4).
- De Marco, S. G., Barral, P., Bó, J., Beltrame, O., de Armentia, A. M. L., Bazzini, S. M., & Marcovecchio, J. E. (2014). VULNERABILIDAD DE CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES EN EL SUDESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES ESTUDIO PRELIMINAR DE LA CUENCA DE LA LAGUNA COSTERA MAR CHIQUITA. GEOQUÍMICA DE LA SUPERFICIE ARGENTINA, 70.
- Delgado, M., Santoyo, A. H., Humberto, L., & Casas Vilardell, M. (2021). ENVIRONMENTAL EDUCATION: CONCEPTUAL AND METHODOLOGICAL EVOLUTION TOWARDS THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS.
<https://orcid.org/0000-0002-2390-768X>
- Duarte, L., Queirós, C., & Teodoro, A. C. (2021). Comparative analysis of four QGIS plugins for web maps creation | Análisis comparativo de cuatro plugins de QGIS para la creación de mapas web. Granja, 34(2), 8-25.
<https://doi.org/10.17163/LGR.N34.2021.01>
- Dueñas Jurado, C., & Hinojosa Yzarra, L. (2021). Calidad del agua potable y su influencia en la salud humana. GnosisWisdom, 1(3).
<https://doi.org/10.54556/gnosiswisdom.v1i3.19>
- Equipo Consultor. (2022). Actualización del plan de manejo integral de la microcuenca hidrográfica de Yahuarcocha, provincia de Imbabura. Ibarra, Ecuador: Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Ibarra.
- Escobar, J. (2002). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura.
- Espinosa, L., Castro, G., Pacheco, R., & Martínez, N. (2020). TEMPERATURE, SALINITY, NUTRIENTS AND CHLOROPHYLL a IN COASTAL WATERS OF THE SOUTHERN

- CALIFORNIA BIGHT. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48027305>
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Imbabura. (2023). Plan de Manejo Integral de la Cuenca Hidrográfica de la Laguna de Yahuarcocha. 1-368.
- Gobierno Autonomo Descentralizado Municipal San Miguel de Ibarra. (2015). Estudio de impacto ambiental Ordenamiento de las actividades deportivas, Recreativas y de alimentación que se realizan en la Laguna Yahuarcocha del cantón Ibarra.
- Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel de Ibarra. (2020). PDOT 2020-2040 Cantón San Miguel de Ibarra. 98-105.
- Gómez Moscoso, K. B., & Vizcarra Medina, S. H. (2023). Aplicación de sistema de información geográfica en la recuperación de aguas contaminadas, Revisión Sistemática: 2015-2021.
- González M, S. (2021). Contaminación difusa de las aguas. INIA TIERRA ADENTRO, Agricultura limpia.
- González, P., & García Rodríguez, P. (2006). Aplicaciones de la teledetección en hidrología. <https://www.researchgate.net/publication/27590857>
- Grondona, S., Sagua, M., Massone, H., & Miglioranza, K. (2015). Evaluación de la vulnerabilidad social asociada al consumo de agua subterránea en la cuenca del río Quequén Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31 (4), 315-359.
- Guangsig Toapanta, V., & Loor, K. (2023). General urine test: Manual and automated method. *Medwave*, 23(S1). <https://doi.org/10.5867/medwave.2023.s1.uta053>
- Hernández, I., Ellis, E. A., & Gallo, C. A. (2013). "Aplicación de teledetección y sistemas de información geográfica para el análisis de deforestación y deterioro de selvas tropicales en la región Uxpanapa, Veracruz". *GeoFocus (Informes y Aplicaciones)*, 13(1578-5157), 1-24.
- Hernández-Navarrete, M. J., Celorrio-Pascual, J. M., Moros, C. L., & Bernad, V. M. S. (2014). Principles of antisepsis, disinfection and sterilization. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 32(10), 681-688. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2014.04.003>
- Impactos en la salud humana relacionados con el agua, saneamiento y cambio climático. (2024). <https://doi.org/10.18356/9789233001367c011>

- Jimenez Quiceno, J. N., & Rodríguez, E. A. (2023). Resistencia bacteriana en ambientes acuáticos: origen e implicaciones para la salud pública. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 41(3). <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.e351453>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Raúl Blas-Sevillano, ;, & Bello-Amez, S. (2016). LA MATERIA ORGÁNICA, IMPORTANCIA Y EXPERIENCIAS DE SU USO EN LA AGRICULTURA ORGANIC MATTER, IMPORTANCE, EXPERIENCES AND IT ROLE IN AGRICULTURE.
- Larrea-Murrell, J., Rojas-Badía, M., Romeu, N., & Rojas, M. (2015). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. Departamento de Microbiología y Virología, Facultad de Biología, Universidad de La Habana, 25 No. 455 entre calles J e I Vedado, La Habana, Cuba.
- Lenina Tamara Menocal Heredia, D., & Isabel Caraballo Sánchez, Y. (2014). Importancia de la vigilancia sanitaria de los parásitos en la calidad del agua, según su uso Importance of health surveillance of parasites in water quality according to use. En *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología* (Vol. 52, Número 2). <http://scielo.sld.cu>
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, 1 (2014). www.lexis.com.ec
- López-Montecinos, C. (2019). Fundamentos Básicos para la Teledetección Ambiental. Universidad Católica del Norte (Chile), Facultad de Ciencias Geológicas. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20684.44161>
- Lozano-Rivas, W. A. (2018). ESCORRENTÍA. En *Clima, hidrología y meteorología*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv7fmfh3.17>
- Manuel, J., Arcos, G., Hoyos Manchado, R., Roció, R. I., Ávila, E., Maldonado Lasunción, I., & Revello Sánchez, J. (2021). Contaminantes químicos del agua.
- Mapbiomas, (2024) <http://www.upo.es/MoleQla>
- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., & García, M. (2019). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). Argentina, La

turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadoras a partir de fuentes superficiales.

- Maridueña-Zavala, M. G., Quevedo, A., Aguaguiña, K., Serrano, L., & Sosa del Castillo, D. (2021). Colección de cultivos microbianos CIBE (CCM-CIBE): Una colección para la investigación. *Bionatura*, 6(1). <https://doi.org/10.21931/rb/2021.06.01.32>
- Martínez, E., Coello, C., & Feyen, J. (2017). Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *MASKANA*, 8(1).
<https://doi.org/10.18537/mskn.08.01.12>
- Massone, H., Corleto, B., Albornoz, D., Lima, L., Pertini, I., Damiano, F., Barilari, A., & Fresta, P. (2022). INVENTARIO DE FUENTES PUNTUALES DE CONTAMINACION POTENCIAL DEL AGUA SUBTERRANEA. CASO DE ESTUDIO MAR DEL PLATA.
- McLaughlin, M., Pennock, D., & Rodriguez Eugenio, N. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura FAO, 144.
<http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
- Méndez, L. A. (2023). Calidad y estado sanitario del agua distribuida para consumo humano en Guastatoya, El Progreso. *Revista Científica Internacional*, 6(1).
<https://doi.org/10.46734/revcientifica.v6i1.60>
- Méndez Landázuri, O. (2022). Evaluación del estado actual de eutrofización de la laguna de Yahuarcocha.
- Ministerio de Medio Ambiente. Libro Blanco del Agua en España. Ediciones del Ministerio de Medio Ambiente, 2000.
- Moises Narvaez-Brito III, J., Paola Arcos-Logroño, J. I., & Xavier Ibáñez-Moreno, W. I. (2021). Técnicas espectroscópicas utilizadas para determinar la calidad del agua Spectroscopic techniques used to determine water quality Técnicas espectroscópicas usadas para determinar a qualidade da agua. 6(9), 45-58.
<https://doi.org/10.23857/pc.v6i9.3004>
- Molina L., K. (2019). Teledetección multitemporal para la determinación de suelos degradados en el distrito de Palpa 2019. Lima - Perú, Calidad y gestión de los recursos naturales.

- Mollocana Lara, J. G., Heredia Medina, M. S., Álvarez Mendoza, C. I., & Guaman Pozo, J. M. (2024). Assessment of the trophic state of Yaguarcocha Lagoon using AQUATOX software. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(7), 1–14.
<https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-094>
- Montealegre Medina, F. A., & Gaspari, F. J. (2023). Monitoreo por teledetección de la variación del almacenamiento de agua superficial en cuencas hidrográficas. *AUGM DOMUS*, 10. <https://doi.org/10.24215/18522181e004>
- Mora-Orozco, C., Flores-Garnica, J., Flores-López, H., Rubio-Arias, H., Chávez, Á., Ochoa-Rivero, J., & García-Velasco, J. (2018). Variaciones espacio-temporales y modelaje de la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 39-52. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-03>
- Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J., García, E., & Neira, M. (2017). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VI, VI.
- Muyón Rivera, C. A. (2022). Efectos de las causas antropogénicas en la eutrofización en las hidroeléctricas de Agoyán y Pisayambo. *Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Ambato*, 593(03), 119.
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/34286>
- Navarro Oronoz, V. (2023). *Evaluación de algoritmos de aprendizaje automático para la determinación de parámetros de calidad del agua mediante teledetección*. Universitat Oberta de Catalunya.
- Navoni, J. A., De Pietri, D., Garcia, S., & Villaamil Lepori, E. C. (2012). Riesgo sanitario de la población vulnerable expuesta al arsénico en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 31, 1-18.
- Ochoa-Mendoza, D., Zambrano-Ochoa, D., & Zambrano-Ochoa, V. (2022). El medio ambiente y su influencia en la salud humana en la República de Ecuador. *Sistematización teórica*. 593 Digital Publisher CEIT, 7(1-1).
<https://doi.org/10.33386/593dp.2022.1-1.1013>
- Ongley, E. D. (1997). *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. (Estudio FAO Riego y Drenaje-55).

- Ortega Pereira, A. F., Treminio Martínez, J. M., & Méndez Rivas, R. A. (2022). Una revisión del modelo WEAP 21 y SWAT para la planificación de los recursos hídricos. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 12(2).
<https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15198>
- Pablo Quichimbo, Guamán, J., Cajamarca, M., & Aguirre, A. J. (2016). EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO POR GRAVIMETRÍA Y REFLECTOMETRÍA. ECUADOR ES CALIDAD: *Revista Científica Ecuatoriana*, 4(1).
<https://doi.org/10.36331/revista.v4i1.25>
- Pérez-Castillo, G., & Rodríguez, A. (2008). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. En *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN (Vol. 56, Número 4)*.
- Pinos A., N. (2016). Prospectiva del uso de suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial-Caso cantón Cuenca Prospective land use and vegetation cover on land management-Case canton Cuenca. *Estoa N°*, 9.
<https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.02>
- Poma, M. P., & Usca, M. R. (2020). Estimación del balance hídrico climático (BHC) de las microcuencas del cantón Joya de los Sacha, Orellana. *Revista Científica FIPCAEC (Fomento de la investigación y publicación científico-técnica multidisciplinaria)*. ISSN : 2588-090X . Polo de Capacitación, Investigación y Publicación (POCAIP), 5(5).
- Portilla, O., Leiva, C., Luna, M., & González, I. (2023). EVALUATION OF DIGITAL LAND AND GEOPOTENTIAL MODELS IN ECUADOR | EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DE TERRENO Y GEOPOTENCIALES EN EL ECUADOR. *Granja*, 38(2), 58-79. <https://doi.org/10.17163/lgr.n38.2023.05>
- Quan, L., Garea-Llano, E., & Ruiz, M. E. (2005). Estimación de la salinidad de los suelos utilizando una imagen espectrozonal y el sistema de información geográfica Telemap. <https://www.researchgate.net/publication/237042458>
- Quezada A y Sevilla J (2021), *"el análisis multitemporal permitió estimar la transformación de la cobertura vegetal y uso de suelo en el periodo 2000-2020"*
- Quimbiamba, N., & Sánchez Barahona, A. (2023). Análisis espacio temporal de la calidad del agua del lago Yahuarcocha utilizando métodos convencionales y sensores remotos.

- Rodríguez, C., & Ramón-Alarcón, M. (2021). Estudio hidromorfológico de la cuenca La Mona, El Cady y el riesgo de inundaciones imprevistas. *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores.*, VIII.
- Rodríguez Valero, M. I., & Alonso Sarria, F. (2022). OBTENCIÓN DE CARTOGRAFÍAS DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA PARA EL PERIODO 1986-2019, EMPLEANDO TELEDETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES. *Papeles de Geografía*, 67, 45-65.
<https://doi.org/10.6018/geografia.472241>
- Romero, F. S. (2017). LA TELEDETECCIÓN SATELITAL Y LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL.
- Romero, S. F. T., & Santos, C. O. P. (2018). Water balance components in the Paramo of Jatunsacha, Ecuador | Componentes del balance hídrico en los páramos de jatunsacha, Ecuador. *Granja*, 28(2), 52-66.
<https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Laura Ortiz-Hernández, M. (2019). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR UN SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES: EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA.
- Romero-Valdivieso, F. S. (2006). La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental.
- Sáenz-Arias, S., Garcés-Ordóñez, O., Córdoba-Meza, T., Blandon, L., Espinosa Díaz, L., Vivas-Aguas, L., & Canals, M. (2023). Contaminación por vertidos de aguas residuales: Una revisión de las interacciones microorganismos–microplásticos y sus posibles riesgos ambientales en aguas costeras colombianas. *Ecosistemas*, 32(1). <https://doi.org/10.7818/ecos.2489>
- Salas Quispe, L. D. (2022). *Análisis comparativo del ICA-NSF e índice de calidad de agua diseñado para la Microcuenca de Cachimayo, Cusco, Perú*. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad César Vallejo.
- Trujillo-Jiménez, M., Liberoff, A., Pessacg, N., Pacheco, C., & Flaherty, S. (2021). Uso de Métodos de Aprendizaje Automático y teledetección para clasificación de uso y

- cobertura del suelo en un valle semiárido de la Patagonia. CAI, Congreso Argentino de Agroinformática, 175-188.
- Vargas, T. B., Karina, A., Pérez, C., & García Leoz, V. (2011). Una metodología para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico. En Revista Ingenierías Universidad de Medellín (Vol. 10, Número 19).
- Vargas-Baecheler, J. (2010). FORMULACIÓN DE UN MODELO DEL COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO DISUELTO FRENTE AL EFECTO DEL VIENTO EN UN LAGO ESTRATIFICADO TÉRMICAMENTE. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Vázquez-Blanco, S., González-Freire, L., Dávila-Pousa, M. C., & Crespo-Diz, C. (2018). pH determination as a quality standard for the elaboration of oral liquid compounding formula. *Farmacia Hospitalaria*, 42(6), 221-227.
<https://doi.org/10.7399/fh.10932>
- Vega-Carreño, M. B., & Febles-González, J. M. (2005). LA INVESTIGACIÓN DE SUELOS EROSIONADOS: MÉTODOS E ÍNDICES DE DIAGNÓSTICO Investigation in eroded soils: methods and diagnosis indexes (Vol. 2).
- Velázquez-Chávez, L. D. J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>
- Valeriano Quispe, V. D. (2024). *Análisis multitemporal de la deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata-Madre de Dios, periodo 2013-2022* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua Application of remote sensors for the analysis of vegetation cover and water bodies. *Idesia (Arica)*, 38.
- Vera Laceiras, M. S., Kuna, H., De Miranda, N. G., Puchini, M., & Zamudio, E. (2021). Detección de la calidad del agua mediante imágenes satelitales: Revisión

Sistemática de la literatura con análisis cuantitativo.

<https://ciencia.lasalle.edu.co/>

Villena Chávez, J. A. (2018a). Calidad del agua y desarrollo sostenible. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública, 35(2).

<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>

Villena Chávez, J. A. (2018b). Water quality and sustainable development. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, 35(2), 304-308.

<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>

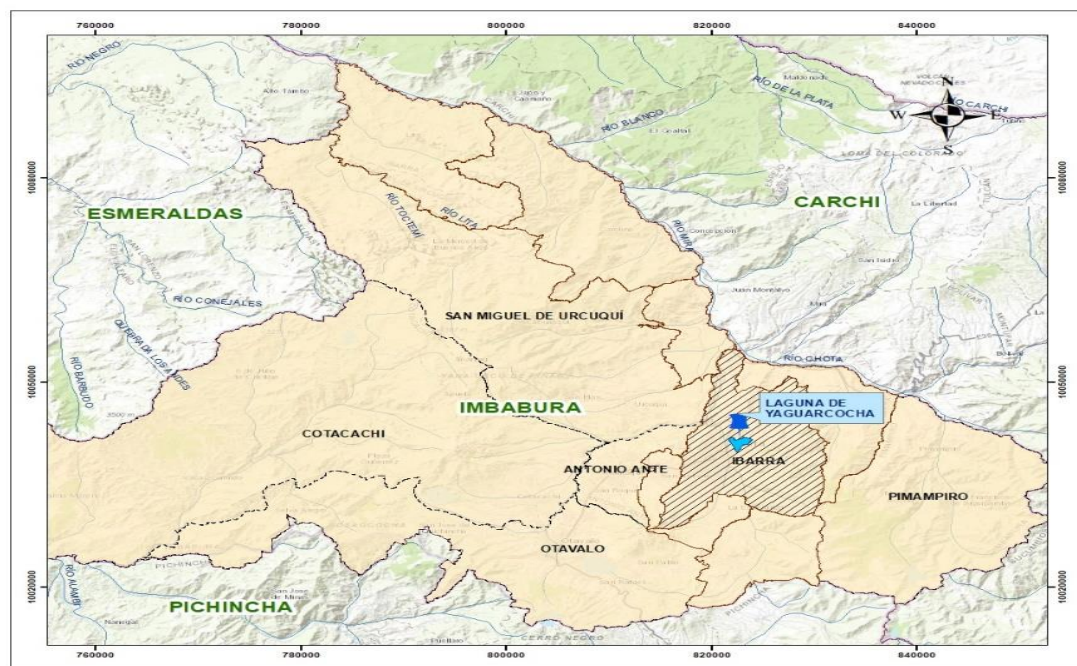
Villena Chávez, J. A. (2018c). Water quality and sustainable development. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, 35(2), 304-308.

<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>

Anexos

Anexo 1:

MAPA DE UBICACIÓN TERRITORIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO



Simbología

- Río
- Laguna de Yaguarcocha

Leyenda

- Parroquia San Miguel Ibarra
- Organización Cantonal
- Provincia de Imbabura

Escala: 0 120 240 480 720 960 Km

Sistema de Referencia: Universal Transversal Mercator Zona 17 Norte

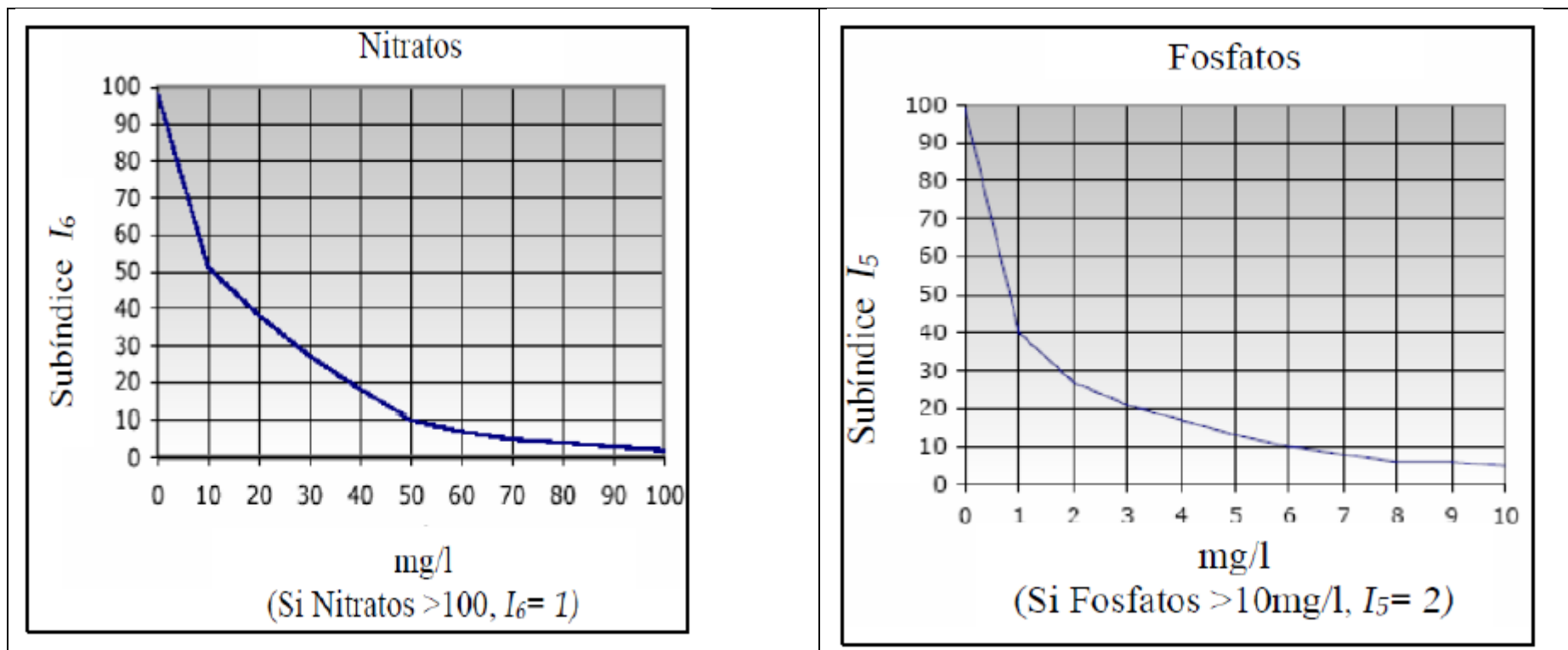
Fecha: Mayo - 2024

Fuente: Instituto Geográfico Militar . 2013

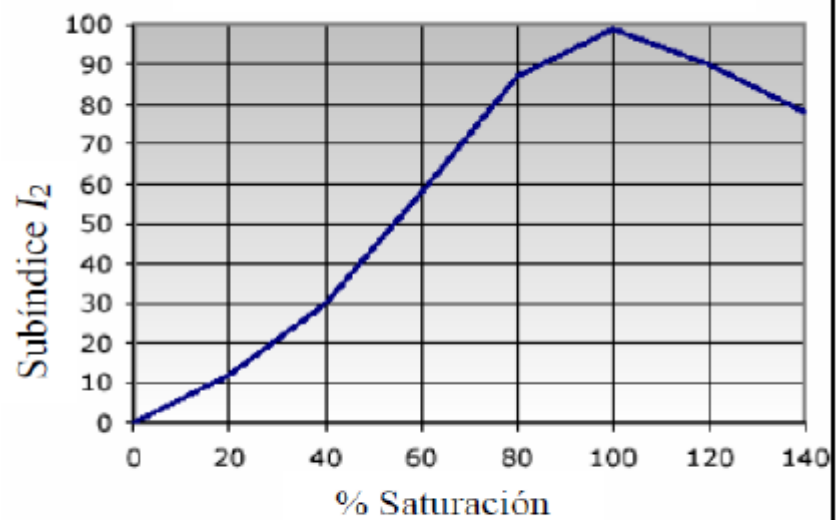
Mapa 11. Ubicación territorial de la zona de estudio.

Elaborado por el Autor

Anexo 2: Cálculo del valor de calidad de cada parámetro (Qi) utilizando las curvas de calidad del método NSF.

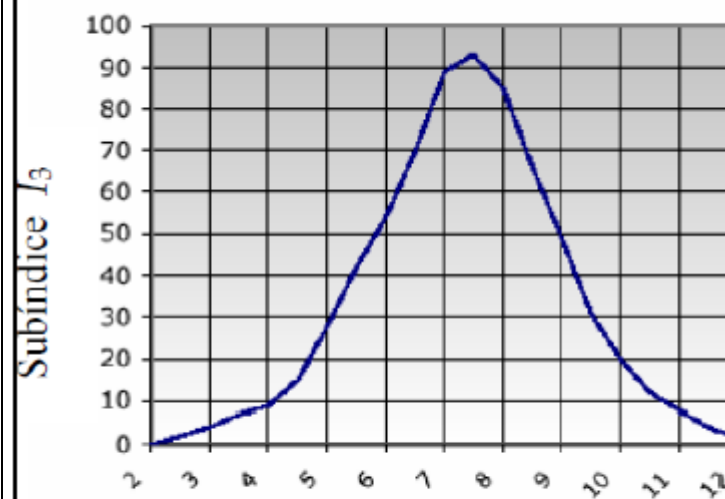


Oxígeno Disuelto



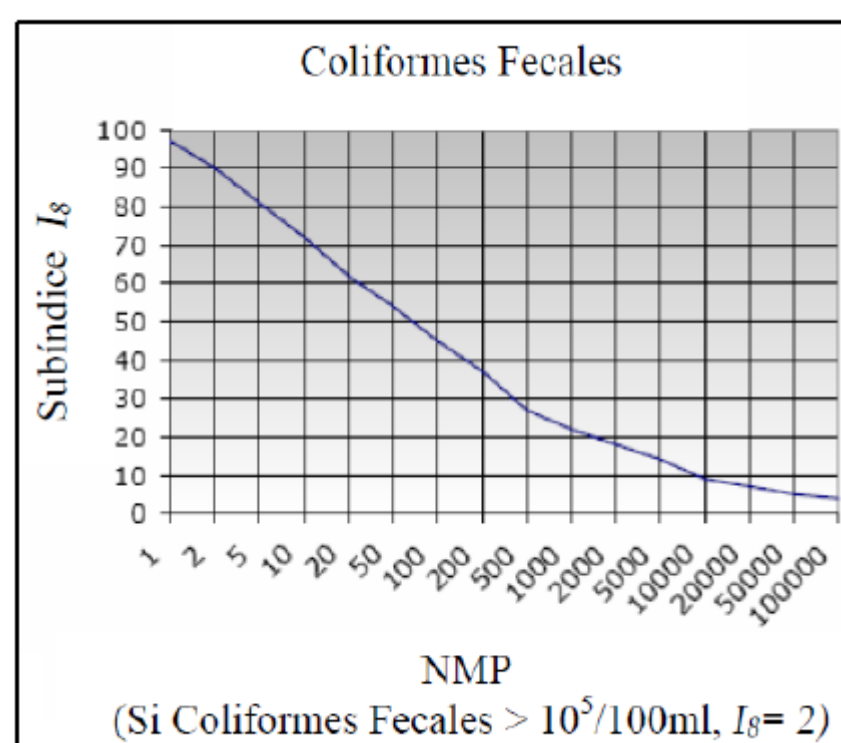
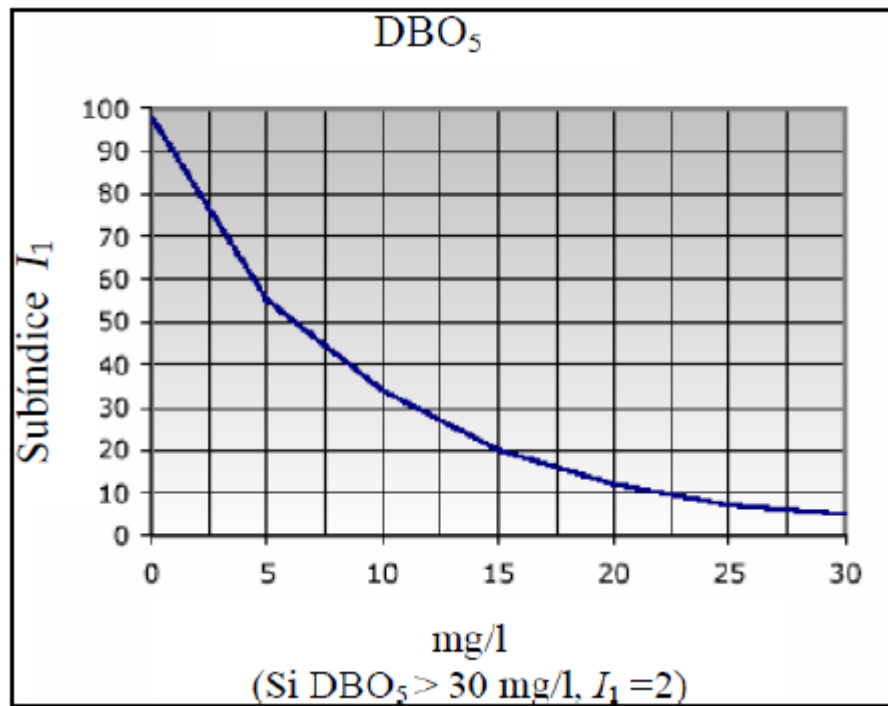
(Si % OS > 140, $I_2 = 50$)

pH



und

(Si pH < 2 o pH > 12 und, $I_3 = 0$)



Anexo 3: Concentraciones de oxígeno disuelto a varias altitudes y temperaturas

VALORES DE OXÍGENO DISUELTO SATURADO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA Y TEMPERATURA											
ALTURA (m)	TEMPERATURA ° C										
	6	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24
1900	10.34	9.8	9.31	8.86	8.44	8.06	7.7	7.38	7.07	6.79	6.52
2000	10.21	9.68	9.2	8.75	8.34	7.96	7.61	7.28	6.98	6.70	6.44
2100	10.08	9.56	9.08	8.64	8.23	7.86	7.51	7.19	6.89	6.61	6.35
2200	9.95	9.44	8.97	8.53	8.13	7.76	7.41	7.10	6.80	6.53	6.27
2300	9.83	9.32	8.85	8.42	8.02	7.66	7.32	7.01	6.72	6.44	6.19
2400	9.70	9.20	8.74	8.32	7.92	7.56	7.23	6.92	6.63	6.36	6.11
2500	9.58	9.09	8.63	8.21	7.82	7.47	7.13	6.83	6.54	6.28	6.03
2600	9.46	8.97	8.52	8.11	7.72	7.37	7.04	6.74	6.46	6.20	5.95
2700	9.34	8.86	8.42	8.00	7.63	7.28	6.95	6.66	6.38	6.12	5.88
2800	9.23	8.75	8.31	7.90	7.53	7.18	6.87	6.57	6.30	6.04	5.80
2900	9.11	8.64	8.20	7.80	7.43	7.09	6.78	6.49	6.22	5.96	5.72
3000	9.00	8.53	8.10	7.71	7.34	7.00	6.69	6.4	6.14	5.89	5.65
3100	8.88	8.42	8.00	7.61	7.25	6.91	6.61	6.32	6.06	5.81	5.58
3200	8.76	8.31	7.90	7.51	7.16	6.82	6.53	6.24	5.98	5.73	5.51