



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

Propuesta de ordenamiento territorial del humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijíes

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniera Ambiental

Autoras:

Morales Navarrete, Katherine Abigail
Ramírez Ortiz, Solange Estefania

Tutor:

Mendoza Trujillo, Benito Guillermo PhD.

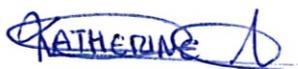
Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotras, Katherine Abigail Morales Navarrete y Solange Estefania Ramírez Ortiz, con cédula de ciudadanía 175516468-6 y 060561878-4, autor (a) (s) del trabajo de investigación titulado: Propuesta de ordenamiento territorial del humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijfes, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a la fecha de su presentación.



Katherine Abigail Morales Navarrete

C.I: 175516468-6



Solange Estefania Ramírez Ortiz

C.I: 060561878-4

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Benito Guillermo Mendoza Trujillo catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Propuesta de ordenamiento territorial del humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijíes, bajo la autoría de Katherine Abigail Morales Navarrete y Solange Estefanía Ramírez Ortiz; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los seis días del mes de mayo de 2025.



Benito Guillermo Mendoza Trujillo

C.I: 0603013866-3

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

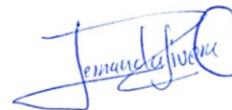
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Propuesta de ordenamiento territorial del humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijés, presentado por Katherine Abigail Morales Navarrete y Solange Estefania Ramírez Ortiz, con cédula de identidad número 175516468-6 y 060561878-4, bajo la tutoría de Ing. Benito Guillermo Mendoza Trujillo PhD; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba treinta de mayo de 2025.

Ing. Marcel Paredes MgS.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. María Fernanda Rivera MgS
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Patricio Santillán MgS.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-06.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **MORALES NAVARRETE KATHERINE ABIGAIL** con CC: **175516468-6**, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado” **PROPUESTA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL HUMEDAL UBICADO EN EL SECTOR DE SAN GERARDO Y CUBIJIES**”, cumple con el 5 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 20 de mayo de 2025



Ph.D. Benito Mendoza Trujillo
TUTOR

DEDICATORIA

A mis amados padres Zulay y Patricio quienes, con su amor e inquebrantable fe en mí, han sido mi fuente de inspiración y apoyo incondicional en todo momento de mi vida universitaria, ya que han sido los cimientos sobre los cuales he construido este logro. Ustedes me han dado la fuerza de seguir adelante a pesar de todos los obstáculos que se han presentado.

A mis queridos hermanos Carlos y Alexander quienes han estado siempre presente en esta etapa de mi vida, brindándome ánimo y comprensión en cada paso del camino. Y, por último, pero no menos importante a la memoria de mi hermano Esteban mi pequeño, quien confió en mi e ilumino mi vida con su presencia, siempre te llevaré en mi corazón y en cada logro que alcance.

Katherine Abigail Morales Navarrete

En primer lugar, me lo dedico a mí, por la constancia, el esfuerzo y la dedicación que me han llevado hasta aquí, superando desafíos y creyendo en mis sueños.

Mis padres, cuyo amor incondicional, apoyo y enseñanzas han sido la base de mi formación y el motor que me impulsa a seguir adelante.

A mis queridos abuelitos, Nelson y Yolanda, por su sabiduría, cariño y por ser ejemplo de fortaleza y amor en mi vida.

A mis hermanas, por su compañía, confianza y por estar siempre a mi lado en cada paso de este camino.

A Karlita, Ramiro, Victor y Lizzita, amigos inquebrantables que han estado presentes en cada desafío y celebración, brindándome su apoyo incondicional y alegrando esta etapa de mi vida.

A todos ustedes, gracias por ser mi mayor inspiración y mi mayor apoyo en este viaje.

Solange Estefania Ramírez Ortiz

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa en la realización del trabajo. En especial a mis padres por su amor, confianza, sacrificio y estímulo a lo largo de mi trayectoria académica siempre estuvieron presentes.

También quiero agradecer a mi tutor de tesis, el PhD. Benito Mendoza por su guía, enseñanza, conocimiento y experiencia que ha demostrado en el campo de investigación y al Mgs Carlitos Maldonado por su incondicional ayuda y mentoría a lo largo del trabajo.

A mis amigos quienes han sido un apoyo constante durante la vida universitaria, ya que han compartido conmigo momentos de estudio, discusión, diversión y han sido un ejemplo de amistad y solidaridad.

Katherine Abigail Morales Navarrete

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi padre, César Ramírez, cuyo amor incondicional, amor y confianza han sido mi guía en este camino, impulsándome a alcanzar este anhelado sueño. A mi madre, Cecilia Ortiz, por enseñarme a forjar un carácter fuerte y resiliente, recordándome siempre que ninguna adversidad es lo suficientemente grande para hacerme desistir.

A mi querida UNACH, por brindarme la oportunidad de crecer y formarme como Ingeniera Ambiental en una institución de tan alto prestigio y compromiso con la educación. Finalmente, mi más profundo reconocimiento al PhD. Benito Mendoza, tutor de esta investigación. Su conocimiento, pasión por la enseñanza y dedicación a su carrera han sido una fuente de inspiración por muchos estudiantes, despertando en nosotros el amor por la ingeniería ambiental. Agradezco su guía y apoyo en el desarrollo de este trabajo, cuyo aprendizaje ha sido invaluable en mi formación.

Solange Estefania Ramírez Ortiz

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Planteamiento del problema	16
1.3 Justificación.....	18
1.4 Objetivos	20
1.4.1 General.....	20
1.4.2 Específicos	20
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	21
2.1 Los SIG y el análisis multitemporal.....	21
2.2 Cambios en la cobertura y uso de la tierra.....	21
2.3 Clasificación Supervisada	22
2.4 Google Earth Engine.....	22
2.5 Detección de cambios	23
2.6 Puntos de validación	23
2.7 Herramientas para el estudio de la cobertura de la tierra.....	24
2.8 Árboles de decisión y Random Forest.....	24
2.9 Índice Kappa	25
2.10 Matriz de confusión.....	25
2.11 Calidad de agua.....	26
2.12 Índice de calidad de agua.....	26
2.13 Índice NSF.....	26

2.14	Ordenamiento territorial	27
2.15	Método multicriterio.....	27
2.16	Área de conservación	27
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.		28
3.1	Ubicación y área de estudio.....	28
3.2	Análisis multitemporal del uso y cobertura de suelo.....	28
3.2.1	Cuantificación de datos.....	29
3.2.2	Clasificación de la cobertura	33
3.2.3	Método de clasificación directa.....	33
3.2.5	Árbol de decisión	34
3.3	Índice Kappa.....	34
3.3.1	Matriz de Confusión	35
3.4	Caracterización de las condiciones de la calidad del agua en el humedal.....	36
3.4.1	Puntos de muestreo y toma de muestras de agua.....	36
3.4.2	Análisis del agua.	36
3.4.3	Índice NSF (ICA).....	37
3.5	Determinación de Metales Pesados por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA)	39
3.7	Modelo futuro del territorio	41
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		44
4.1	Cuantificación de datos.....	44
4.1.1	Puntos de muestreo.....	44
4.1.2	Sampling desing	44
4.1.3	Mapas de clasificación supervisada con Random Forest	45
4.2	Calidad de agua.....	50
4.2.1	Puntos de muestreo y ubicación geográfica	50
4.2.2	Comparativa de las muestras de campo con los límites máximos permisibles de acuerdo con los parámetros	52
4.2.3	Comparativa de los metales con el límite máximo permisible según el Acuerdo Ministerial 097A	56
4.2.4	Cálculo del ICA	57

4.3 Modelo actual del territorio	59
4.4 Modelo deseado del territorio	60
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
5.1 Conclusiones	64
5.2 Recomendaciones	65
BIBLIOGRAFIA.....	67
ANEXOS.....	72

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Catálogo de datos Earth Engine “ASTER L1T Radiance.	31
Tabla 2: Catálogo de datos de "H2 Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A".	32
Tabla 3: Clases seleccionadas de cobertura terrestre (World Land Cover).	33
Tabla 4: Valoración del índice Kappa	35
Tabla 5: Parámetros analizados In-situ.	36
Tabla 6: Parámetros de laboratorio.....	37
Tabla 7: Pesos relativos para parámetros del “ICA”	37
Tabla 8: Clasificación del “ICA” propuesto por Brown.....	38
Tabla 9: Resultados de puntos de muestreo del humedal.....	44
Tabla 10: Resultados de los puntos de validación del humedal	44
Tabla 11: Matriz de confusión del humedal periodo 2000.	46
Tabla 12: Índice Kappa periodo 2000.....	46
Tabla 13: Matriz de confusión del humedal periodo 2010.	47
Tabla 14: Índice Kappa periodo 2010.....	48
Tabla 15: Matriz de confusión del periodo 2020.....	49
Tabla 16: Índice Kappa periodo 2020.....	50
Tabla 17: Puntos de muestreo.....	50
Tabla 18: Comparativa de los parámetros con el Acuerdo Ministerial 097A	53
Tabla 19: Comparativa de los metales con el Acuerdo Ministerial 097A	56
Tabla 20: Resultados del cálculo del índice de calidad del agua (ICA)	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación del humedal entre San Gerardo y Cubijés.	28
Figura 2: Flujo metodológico de la clasificación supervisada.	30
Figura 3: Modelo futuro del territorio.....	41
Figura 4: Jerarquización del problema de decisión	42
Figura 5: Modelo cartográfico implementado para localizar espacialmente las áreas para el establecimiento de áreas de conservación en el humedal.	43
Figura 6: Mapa del humedal periodo 2000.	45
Figura 7: Mapa del humedal periodo 2010.	47
Figura 8: Mapa del humedal periodo 2020	49
Figura 9: Mapa de puntos de muestreo.....	52
Figura 10: Mapa del territorio actual.....	59
Figura 11: Mapa del territorio deseado.	60

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad proponer un modelo de ordenamiento territorial para la conservación del humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijíes, provincia de Chimborazo, Ecuador. El humedal enfrenta amenazas significativas debido al crecimiento urbano descontrolado, actividades agrícolas intensivas y la falta de planificación territorial, lo que ha provocado la pérdida de cobertura natural y la disminución de la calidad del agua. Se realizó un análisis multitemporal del uso y cobertura del suelo mediante imágenes satelitales de los años 2000, 2010 y 2020, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el algoritmo Random Forest. Los resultados mostraron un incremento en las áreas urbanizadas y agrícolas, con una consecuente reducción de las zonas de humedal. Paralelamente, se llevó a cabo una caracterización de la calidad del agua, donde se identificaron niveles de contaminación moderada en varios puntos, principalmente por la presencia de coliformes fecales, nitratos y fosfatos, afectando la salud del ecosistema y de las comunidades locales. Con base en estos resultados, se diseñó un modelo futuro del territorio mediante el método multicriterio, que identifica áreas prioritarias para conservación y restauración ecológica. Este modelo busca mitigar las amenazas actuales, garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico y aportar a la planificación territorial de los cantones Guano y Riobamba.

Palabras clave: ordenamiento territorial, análisis multitemporal, calidad de agua, conservación, método multicriterio.

ABSTRACT

This research proposes a land use planning model for the conservation of a wetland located in the San Gerardo and Cubijíes sector, Chimborazo province, Ecuador. The wetland faces significant threats due to uncontrolled urban growth, intensive agricultural activities, and a lack of land use planning, which has led to the loss of natural cover and a decline in water quality. A multi-temporal land use and cover analysis was conducted using satellite images from 2000, 2010, and 2020, using Geographic Information Systems (GIS) tools and the Random Forest algorithm. The results showed an increase in urbanized and agricultural areas, with a consequent reduction in wetland areas. In parallel, a water quality characterization was carried out, where moderate contamination levels were identified at several points, mainly due to fecal coliforms, nitrates, and phosphates, affecting the ecosystem's and local communities' health. Based on these results, a future territorial model was designed using a multi-criteria method, identifying priority areas for conservation and ecological restoration. This model not only seeks to mitigate current threats and ensure the sustainability of water resources but also offers hope for the future of the wetland and the local communities in the cantons of Guano and Riobamba.

Keywords: land use planning, multi-temporal analysis, water quality, conservation, multi-criteria method.



Reviewed by:
Mgs. Kerly Cabezas
ENGLISH PORFESSOR
I.D. 0604042382

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes

Según Moomaw et al., (2018) dice que los humedales son ecosistemas importantes por sus diversas funciones que cumplen en el ambiente son esenciales para el balance hídrico, control de inundaciones, mantiene la calidad de agua, almacena CO₂ atmosférico y a su vez son refugios para centenares de especies.

En el año 2008, (Núñez & Madero, 2009) realizaron un análisis multitemporal por comparación de aerofotografías e imágenes satelitales de distintos años 1954, 1998 y 2002 para determinar el cambio de cobertura y uso de suelo en los tres humedales la Bolsa, Charco de Oro y el Pital pertenecientes al Valle del Cauca, para el estudio consideraron la apariencia exterior por naturaleza por ejemplo la cobertura vegetal y área de los humedales, con respecto a las clases de cobertura se tomaron en cuenta los usos de suelo como bosques, pantanos, cultivos, entre otras. Una vez realizado el proceso del análisis multitemporal los resultados obtenidos del humedal Charco de Oro en el año 1954 tenía una área de influencia de 25 ha, mientras que en el 2002 su resultado final fue de 2.80 ha mostrando una pérdida de 88.8%, del área; sin embargo en el humedal la Bolsa en 1954 tenía un área de 29.30 ha y en el año 2002 un área de 25.59 ha, por su condición geográfica no se visibilizó una pérdida tan significativa como en su contraparte del estudio, finalmente el humedal el Pital en el año 1954 contaba con una área de 25.12 ha y para el año 2002 tuvo un incremento de su área 26.88 ha, esto debido a que el humedal estaba conectado con el río Cauca.

Se realizó una investigación con la finalidad de diseñar un modelo de monitoreo para definir la calidad hídrica de los humedales en la laguna de Limpiopungo del parque Nacional Cotopaxi, de acuerdo con (Caiza & Serrano, 2017), para la recolección de información realizaron visitas de campo recogiendo muestras de agua para hacer análisis en laboratorio de los parámetros físicoquímico los cuales fueron DBO₅, DQO, temperatura, pH, conductividad eléctrica además, se realizó análisis de vida acuática, flora y, fauna. Una vez obtenidos los resultados ejecutaron la construcción del modelo de monitoreo, la cual concluyó que la mayoría de los parámetros analizados cumplen con la normativa vigente.

1.2 Planteamiento del problema

El presente trabajo se enmarca en el estudio de los recursos hídricos en los humedales del Ecuador, por lo que requiere un enfoque interdisciplinario. En este sentido, la hidrología proporciona información sobre la distribución y flujo del agua, mientras que la ecología analiza la biodiversidad y las interacciones biológicas. La geología es crucial para comprender la formación y dinámica de estos ecosistemas, y la química y biología son esenciales para evaluar la calidad del agua y su impacto en los ecosistemas y la salud humana. Estas ciencias convergen para una gestión integral y sostenible de los recursos hídricos en los humedales ecuatorianos.

Por otra parte, los estudios sobre el cambio de cobertura y uso del suelo son cruciales para comprender la dinámica de los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo y el espacio. Estos estudios proporcionan información valiosa sobre las trayectorias de diferentes procesos de cambio en un área específica, así como el impacto de las actividades económicas en la dinámica del uso de la tierra y la degradación ambiental (Camacho-Sanabria et al., 2017).

Los humedales altoandinos de Ecuador enfrentan amenazas significativas derivadas de actividades humanas, especialmente por la expansión de la frontera agrícola y las modificaciones en el uso del suelo. Estas acciones están afectando negativamente las funciones ecosistémicas de estos humedales. Dada la escasez de información disponible sobre estos recursos hídricos, resulta importante llevar a cabo estudios ambientales para evaluar y comprender su estado actual (Guerrero et al., 2022).

El humedal ubicado en la provincia de Chimborazo, específicamente en los cantones Guano y Riobamba, abarca desde la laguna San Antonio de Padua, situada detrás de la Universidad Nacional de Chimborazo y se extiende hasta la parroquia Cubijíes. Este sector, catalogado como área urbana desde hace dos décadas por los catastros del Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Guano (GADG) y del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Riobamba (GADMR)(Municipio de Riobamba, 2023), está experimentando un notable crecimiento urbano lo que ha generado problemas en la infraestructura debido a la influencia del humedal. La presencia de viviendas, cultivos y animales en la zona ha contribuido a la contaminación de los cuerpos hídricos. Por tanto, la falta de información sobre el humedal en el sector de San Gerardo y Cubijíes dificulta la

planificación del ordenamiento territorial. Sin datos precisos sobre su ubicación y características, este problema se acarrea por varios años, ya que en los modelos de gestión territorial de ambos cantones se los considera que han cambiado de tal manera que resulta difícil diseñar estrategias efectivas de conservación y uso sostenible de este ecosistema. Es crucial realizar estudios para recopilar información necesaria que permita una gestión adecuada de este recurso en el contexto del ordenamiento territorial en Ecuador.

El humedal tiene varios problemas directos, uno sobre las construcciones que han sido autorizadas por los dos GAD's, ya que presentan fallas en sus estructuras por la presencia continua de agua en la base de sus estructuras, lo que puede ocasionar peligro a las personas que utilizan estas viviendas. Por otra parte, en la zona media del humedal es evidente el ingreso de cultivos de ciclo corto y presencia de animales pastando lo que implica contaminación de las fuentes de agua que más abajo son tomadas por la comunidad de Cubijíes para uso de agua de consumo. Y, por último, un problema mucho más grave es que por la falta de ordenamiento territorial en el sector se autorizó la construcción de una planta de tratamientos de aguas residuales para la ciudad de Riobamba, misma que mediante un Amparo Constitucional obligó al GAD Municipal de Riobamba a frenar la construcción de esta, ya que afectaba directamente al manantial del cual se sirve la comunidad de Cubijíes.

Además, el proyecto "CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO DEL RIO CHAMBO", tiene por objetivos estudiar agua superficial y subterránea para una adecuada gestión de este tipo de recursos, el sector del humedal es considerado como un punto de control para el modelamiento matemático y para el desarrollo de la gestión territorial del acuífero, por lo que dentro de sus objetivos específicos está la caracterización hídrica y territorial de esta zona como aporte al trabajo de investigación. Esto porque con lo descrito por Mendoza (2015) esta zona es un punto de control ya que el humedal posee varios manantiales que al momento no se encuentra protegidos o están siendo contaminados.

1.3 Justificación

La investigación sobre la importancia de estudiar los humedales desde un enfoque de Ordenamiento Territorial es fundamental a nivel global, en Latinoamérica y específicamente en Ecuador por diversas razones. A nivel global, los humedales son ecosistemas críticos que albergan una biodiversidad única, proporcionan servicios ecosistémicos vitales y desempeñan un papel crucial en la regulación del clima y el ciclo del agua (Geijzendorffer et al., 2019).

En Latinoamérica, los humedales son especialmente relevantes debido a su riqueza biológica y cultural, así como a su contribución a la seguridad hídrica y alimentaria de la región (Masud, 2019). En el caso de Ecuador, que alberga una amplia variedad de humedales, investigar su importancia desde la perspectiva del ordenamiento territorial es esencial para garantizar su conservación y uso sostenible, proteger la biodiversidad única que albergan y salvaguardar los medios de vida de las comunidades locales que dependen de ellos (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2019). Estas investigaciones proporcionan la base necesaria para desarrollar políticas y estrategias de planificación territorial que aseguren la protección adecuada de estos ecosistemas vitales a nivel global, regional y nacional.

El presente proyecto tiene la finalidad de proponer un ordenamiento territorial del humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijíes determinando sus condiciones actuales. Dicho ecosistema se encuentra actualmente amenazado por diversos factores, entre ellos, la expansión urbana, actividad agrícola intensiva, cambio de uso y cobertura del suelo que han causado la degradación progresiva y pérdida de caudal del recurso hídrico generando un impacto directo a las comunidades aledañas. La falta de un adecuado ordenamiento territorial expone al humedal a riesgos que podrían tener consecuencias irreversibles para la naturaleza como para las comunidades locales que dependen de sus servicios ecosistémicos, afectando no solo sus necesidades cotidianas, sino también su capacidad para desarrollarse de manera equitativa. Un ejemplo claro es lo que está sucediendo con el agua de consumo de la parroquia Cubijíes, ya que está en constante riesgo tanto por la contaminación de aguas residuales y del sobrepastoreo, además, corre el riesgo de perder su caudal definitivamente si se continúa autorizando la construcción de más edificaciones como el sistema de tratamiento de agua residual, es evidente que este tipo de permisos de construcción dependen del ordenamiento territorial que se da sobre este humedal.

Entonces, la pregunta de investigación sobre esta problemática es: ¿El modelo de gestión futuro del territorio como una propuesta de ordenamiento territorial permitirá la conservación del humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijíes?

En este contexto, el modelo de gestión futuro del área del humedal permitirá un adecuado ordenamiento territorial en el área de influencia, por lo que este trabajo se presenta como una innovación ante los desafíos ambientales que enfrenta el ecosistema, contribuyendo al conocimiento científico mediante información sobre el estado actual del humedal y sus interacciones con el entorno. Además, propondrá un correcto ordenamiento territorial que promueva la estabilidad ambiental y social.

En este contexto, el trabajo aporta de manera significativa al ordenamiento territorial de los cantones Guano y Riobamba, ya que provee una propuesta de ordenamiento territorial para la protección del humedal. Además, los datos obtenidos en esta investigación serán utilizados en el desarrollo del objetivo referente a la gestión del territorio del área de influencia del acuífero del proyecto “Caracterización de la oferta y demanda hídrica en el área de influencia del acuífero del Chambo”.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Realizar una propuesta de ordenamiento territorial del humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijés mediante el modelo futuro del territorio para conservación del humedal.

1.4.2 Específicos

- Realizar el análisis multitemporal del uso y cobertura de suelo de los años 2000, 2010 y 2020 del humedal en el sector de San Gerardo y Cubijés, mediante clasificación supervisada, para determinar el cambio de uso y cobertura respecto al ordenamiento territorial en la zona de estudio.
- Caracterizar las condiciones de la calidad de agua en el humedal de acuerdo con su origen, uso y ubicación, determinando el grado de afectación sobre este recurso.
- Analizar el modelo actual del territorio respecto al área de influencia del humedal, mediante el método multicriterio.
- Proponer un modelo futuro del territorio con fines de conservación del humedal, mediante el método multicriterio y con enfoque de conservación del humedal.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Los SIG y el análisis multitemporal

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se emplean como una herramienta complementaria para realizar análisis del entorno a través del almacenamiento, procesamiento y modelado de datos, con un enfoque particular en la detección de impactos ambientales asociados con cuestiones como el uso del suelo y la deforestación, entre otros. Asimismo, estos revelan información crucial para identificar alteraciones que ha experimentado la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, a lo que se le denomina análisis multitemporal. Este permite comparar las interpretaciones de coberturas entre dos o más imágenes satelitales o mapas de un mismo lugar en distintos periodos y facilita la evaluación de los cambios en la condición de las coberturas previamente clasificadas (Flórez et al., 2017).

Según comentan Soria y Matar (2016), la teledetección espacial engloba diversas operaciones que posibilitan la adquisición de datos sobre las características físicas de objetos, fenómenos geológicos, recursos naturales y actividades humanas mediante mediciones y observaciones realizadas a una distancia determinada, es decir, sin interactuar directamente con los elementos mencionados.

Por consiguiente, la contribución de la teledetección a las investigaciones ambientales reside en su capacidad para monitorear procesos dinámicos. A nivel global, la teledetección ha sido empleada para la captura y el monitoreo de datos, que se ha beneficiado de los progresos sostenidos en términos de resolución espectral, espacial y temporal, y la integración de éstos con información contextual lo cual detecta alteraciones en la cobertura y uso del suelo, y con ello analiza diversos eventos, que pueden ser eventos esporádicos o continuos, además de aquellos derivados de las actividades humanas (Farnum & Murillo, 2019).

2.2 Cambios en la cobertura y uso de la tierra

Se destaca la importancia de la relación entre la cobertura y uso de la tierra como una manifestación integral de la interacción entre factores bióticos y abióticos en un área específica. Esta interacción se presenta como una asociación espaciotemporal de elementos vegetales y su utilización por parte de la actividad humana incidente en el suelo. Es crucial comprender esta asociación para identificar posibles conflictos de uso y determinar los

problemas ambientales que podrían surgir como consecuencia (Rodríguez et al., 2013). Los cambios en la cobertura y uso de la tierra suelen presentarse de manera focalizada, pero pueden afectar a procesos atmosféricos y climáticos a nivel global, por lo que se los toma como referencia, tanto en estudios ambientales como en el diseño de políticas públicas, para el manejo sostenible de los recursos naturales (Magrin, 2015).

La descripción de diversos cambios en un área determinada se refleja por diferentes instantes temporales de la cobertura del suelo, observables y mensurables, que permanecen en el tiempo y algunos se tornan permanentes, lo que resulta esencial para cualquier labor de gestión territorial, debido a que prescindir de él significa perder el contexto histórico y actual de la zona de estudio, lo cual incrementa la incertidumbre al tomar decisiones y la probabilidad de causar efectos adversos en el territorio (Camacho-Sanabria et al., 2017).

Muchas de estas modificaciones son provocadas por el aumento poblacional y, consecuentemente, incremento de la demanda alimenticia y expansión territorial, a lo que se adhieren complicaciones ambientales como el cambio climático. Sin embargo, estas alteraciones no siempre se controlan, lo que provoca complicaciones en los ecosistemas, lo que evidencia la importancia de supervisar los cambios de uso y cobertura de la tierra.

2.3 Clasificación Supervisada

Es una técnica fundamental que se utiliza para procesar imágenes satelitales u otros tipos de datos geoespaciales con el objetivo de asignar categorías específicas a diferentes áreas de la imagen, implica la detección de patrones espectrales distintivos en los datos recopilados a lo largo del tiempo lo que permite distinguir tipos diferentes de cobertura terrestre como cultivos, bosques, cuerpos de agua, áreas urbanas entre otros. Para esto se requiere la creación de zonas de entretenimiento que son áreas en la imagen donde se conoce con certeza la clase a la que pertenece. Una vez se han identificado dichas zonas se procederá asignar números o etiquetas a cada clase, lo que permite al algoritmo aprender a reconocer los patrones espectrales asociados con cada categoría (Nicolau Puzzi et al., 2011).

2.4 Google Earth Engine

En 2010, la compañía tecnológica multinacional estadounidense Google lanzó “Google Earth Engine” (GEE) como una evolución de Google Earth. Esta plataforma pertenece a una nueva generación de herramientas con procesamiento en la nube que ofrece un amplio catálogo de imágenes satelitales y permite realizar análisis globales de manera

eficiente, esto se debe a que utiliza varios conjuntos de datos de tipo geofísico, climático, demográfico, entre muchos otros más (Long et al., 2019).

En la actualidad, Google Earth Engine se presenta como un servicio gratuito para proyectos de investigación y sin ánimo de lucro que excluye aquellos de naturaleza comercial. Esta plataforma incluye un entorno de programación web integrado conocido como Editor de Código de Earth Engine (Code Editor EE), diseñado para simplificar el uso de la interfaz de programación de aplicaciones (API), aplicaciones de terceros o bibliotecas de cliente (Sudmanns et al., 2020). Las solicitudes se originan en el Editor de Código y se envían a los servidores mediante la API. Por lo que, en el Editor de Código, los usuarios pueden redactar y ejecutar scripts para formular sus peticiones (Morales, 2020).

El editor de código proporciona acceso a todo el potencial de la plataforma y sin necesidad de tener formación técnica en JavaScript o Python, ya que permite usar las librerías de cliente, que evitan configurar manualmente las solicitudes HTTP y analizar las respuestas (Zhang et al., 2020).

2.5 Detección de cambios

Singh (1989) definió la detección de cambios como “el proceso de reconocer diferencias en el estado de un objeto o fenómeno observándolo en diferentes momentos”. La detección de cambios a través de datos de teledetección abarca diversas técnicas que analizan discrepancias en varios niveles, como píxel, objeto o extracción de patrones. (Hussain et al., 2013).

Asimismo, se requiere de un algoritmo que permita una clasificación más verás de los datos. Un algoritmo se refiere a pasos lógicos, secuenciales y metódicamente aplicados para solucionar cierto problema. Existen herramientas predictivas que clasifican datos basados en algoritmos que describen patrones. Estos algoritmos de clasificación supervisada tienen aplicaciones medioambientales, sociales, políticas, entre otras (Tobar et al., 2023).

2.6 Puntos de validación

Los puntos de validación en el análisis multitemporal son muestras de campo que se utilizan para verificar la precisión de los resultados obtenidos mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales. Estos puntos se recolectan en campo y se comparan con los resultados de la clasificación para evaluar qué tan bien se han identificado las diferentes coberturas del suelo. El proceso de validación con puntos de campo es crucial para asegurar

la calidad de los resultados del análisis multitemporal. Permite identificar errores en la clasificación y ajustar los algoritmos para mejorar la precisión (González Soto et al., 2024).

2.7 Herramientas para el estudio de la cobertura de la tierra

Las imágenes satelitales son representaciones visuales de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen información valiosa, dentro de rangos específicos de longitud de onda del espectro electromagnético, que es registrada en distintas bandas espectrales, de las características de la superficie terrestre. Así, el empleo de imágenes satelitales brinda información inmediata y precisa que es aprovechada en diversos ámbitos, que incluye el análisis de la evolución de la cobertura y uso de la tierra en un área geográfica determinada (Buzai et al., 2020).

Antes de 1972, la utilización de datos satelitales para vigilancia terrestre, cartografía y exploración era inimaginable. Sin embargo, con el programa Landsat, que es una serie de misiones de observación de la Tierra por satélite gestionadas en conjunto con la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), lo hicieron posible. El impacto de este programa transformó la manera en que se observa y estudia el planeta Tierra. Landsat ha sido el único sistema de satélites diseñado y operado para observar repetidamente la cobertura terrestre con resolución moderada. En la actualidad, el programa se encuentra en su octava versión, denominada "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM) (Ariza, 2013).

Otro satélite muy utilizado es SENTINEL 2, que posee una cámara multispectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación. Este programa de vigilancia ambiental sufre un cambio drástico en la forma en que se gestiona el entorno, entiende y abordan los efectos del cambio climático, debido a la combinación de la alta resolución y nuevas capacidades espectrales, así como un campo de visión que abarca 290 kilómetros de anchura y sobrevuelos frecuentes (The European Space Agency, 2015).

2.8 Árboles de decisión y Random Forest

Forest propuesto por Breiman (2001) es un algoritmo de clasificación no lineal que identifica patrones en los datos que se incorporan mediante la entrada de información. Este algoritmo emplea un sistema de “votos” entre el conjunto de árboles para decidir la clase. Cada árbol es un voto, y se asigna la clase según cuántos votos recibe cada unidad que se clasificará.

Un árbol de decisión representa gráficamente las posibles consecuencias de una serie de elecciones relacionadas, que permite la comparación de diversas acciones en función de probabilidades. Se utiliza para facilitar discusiones informales o para desarrollar algoritmos que calculen de manera matemática la opción adecuada (Berlanga et al., 2013).

En general, un árbol de decisión comienza con un nodo único para luego ramificarse en posibles resultados potenciales que generen nuevos nodos, así se despliegan otras alternativas que estructuran el árbol. Sin embargo, a pesar de su capacidad para ser comprensibles e interpretables, estos árboles pueden sufrir un sobreajuste, tener problemas con clases desequilibradas, generalización de datos y sensibilidad a la variación de estos (Berlanga et al., 2013). Esto puede ser solucionado al momento de aplicar un algoritmo más complejo que engloba varios árboles de decisión lo que permite reducir el sobreajuste y fortalecerse ante la variabilidad de información, lo que permite incrementar su rendimiento y confiabilidad, este es el caso de Random Forest o Bosque Aleatorio (Merino y Chacón, 2017).

Como se mencionó anteriormente, es un conjunto de múltiples árboles de decisión, donde cada árbol se entrena con una porción aleatoria de los datos y produce su propia predicción. Luego, las predicciones de todos los árboles se combinan para obtener una predicción final más precisa y robusta. Este algoritmo es uno de los más conocidos y utilizados por su precisión, simplicidad y flexibilidad, además de ser especialmente útil para tareas de clasificación y regresión en las que se busca reducir el sobreajuste y mejorar la generalización del modelo (Merino y Chacón, 2017).

2.9 Índice Kappa

Es una medida de la precisión de un clasificador, como un algoritmo de clasificación de imágenes satelitales. Se utiliza para evaluar la concordancia entre las clasificaciones realizadas por un algoritmo y las clasificaciones conocidas como "verdad de campo". El índice Kappa varía de -1 a 1, donde 1 indica una concordancia perfecta, 0 indica una concordancia equivalente a la que se esperaría por azar y valores negativos indican una concordancia peor que la que se esperaría por azar. Finalmente, es una herramienta útil para evaluar la precisión de los resultados de la clasificación de imágenes (Congalton, 2001).

2.10 Matriz de confusión

Esta matriz muestra la concordancia entre las categorías asignadas y las categorías reales, reflejando los acuerdos y desacuerdos en la clasificación. Los valores en la diagonal

principal representan los acuerdos entre las categorías, mientras que los valores fuera de la diagonal indican los errores de asignación. Esto es fundamental para validar la clasificación y obtener medidas estadísticas como la fiabilidad global, del usuario y del productor (Stehman, 1997).

2.11 Calidad de agua

La calidad de agua es importante para determinar la salud y el uso adecuado en las diferentes actividades. Para tener una garantía del estado del agua se analizan una serie de parámetros que comprenden aspectos físicos, químicos, biológicos y microbiológicos, estos son sometidos a evaluaciones obteniendo valores que son comparados con ciertos rangos ya establecidos, una vez obtenido los resultados se puede determinar en qué actividad es recomendable dar uso al agua (Vázquez et al., 2021).

2.12 Índice de calidad de agua

El índice de calidad del agua se define como una expresión simple que combina diversos parámetros para describir la calidad del agua de manera más comprensible que una lista de valores numéricos. Este índice resulta útil para diferentes usuarios, desde biólogos e ingenieros hasta el público en general, proporcionando una visión clara de la situación del agua, indicando niveles de contaminación. Identificando 9 variables importantes como oxígeno disuelto, DBO₅, coliformes fecales, pH, nitratos, fosfatos, desviación de la temperatura, turbidez y sólidos totales. La interpretación final se realiza a través de relaciones funcionales que asignan valores de 0 a 100 para cada parámetro, clasificando la calidad del agua en niveles como excelente, buena, media, mala y muy mala. Aunque se destaca su utilidad como herramienta de decisión para administradores ambientales, se reconoce la posibilidad de asignar mayor importancia a algunos parámetros, destacando la importancia de una precisión adecuada en la definición de los parámetros e índices (Valcarcel Rojas et al., 2010).

2.13 Índice NSF

El Índice de Calidad del Agua NSF (ICA-NSF) es un indicador numérico para evaluar la calidad del agua superficial para consumo humano. Se calcula a partir de nueve parámetros fisicoquímicos y biológicos ponderados, como oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, DBO₅, nitratos, fosfatos, temperatura, turbidez y sólidos totales disueltos (González et al., 2013).

2.14 Ordenamiento territorial

El ordenamiento territorial se rige por la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo la cual establece los principios y reglas generales que regulan el ejercicio de las competencias de ordenamiento territorial, uso y gestión del suelo. Esta ley tiene por objeto la utilización racional y la protección del patrimonio natural y cultural del territorio, así como la regulación de las intervenciones en el uso y ocupación del suelo. El ordenamiento territorial forma parte sustancial e ineludible de la planificación del desarrollo humano en el país, y está orientado a conseguir un desarrollo equitativo, equilibrado y sostenible de las diferentes regiones (Superintendencia de Ordenamiento Territorial, 2024).

2.15 Método multicriterio

El método multicriterio es una técnica utilizada en la toma de decisiones para evaluar alternativas considerando múltiples criterios. En el contexto del ordenamiento territorial y la gestión ambiental, este enfoque permite integrar diversos aspectos, como ambientales, sociales, económicos y culturales, en la evaluación de opciones de planificación y manejo. Este método implica identificar los criterios relevantes para la toma de decisiones, asignarles pesos relativos según su importancia, y luego comparar y evaluar las alternativas utilizando herramientas y técnicas analíticas, como los sistemas de información geográfica (SIG) y los modelos de análisis multicriterio. El método multicriterio facilita la consideración de múltiples intereses y valores en el proceso de toma de decisiones, permitiendo la selección de alternativas que optimicen el cumplimiento de objetivos y la satisfacción de diferentes partes interesadas (Belton, 2002).

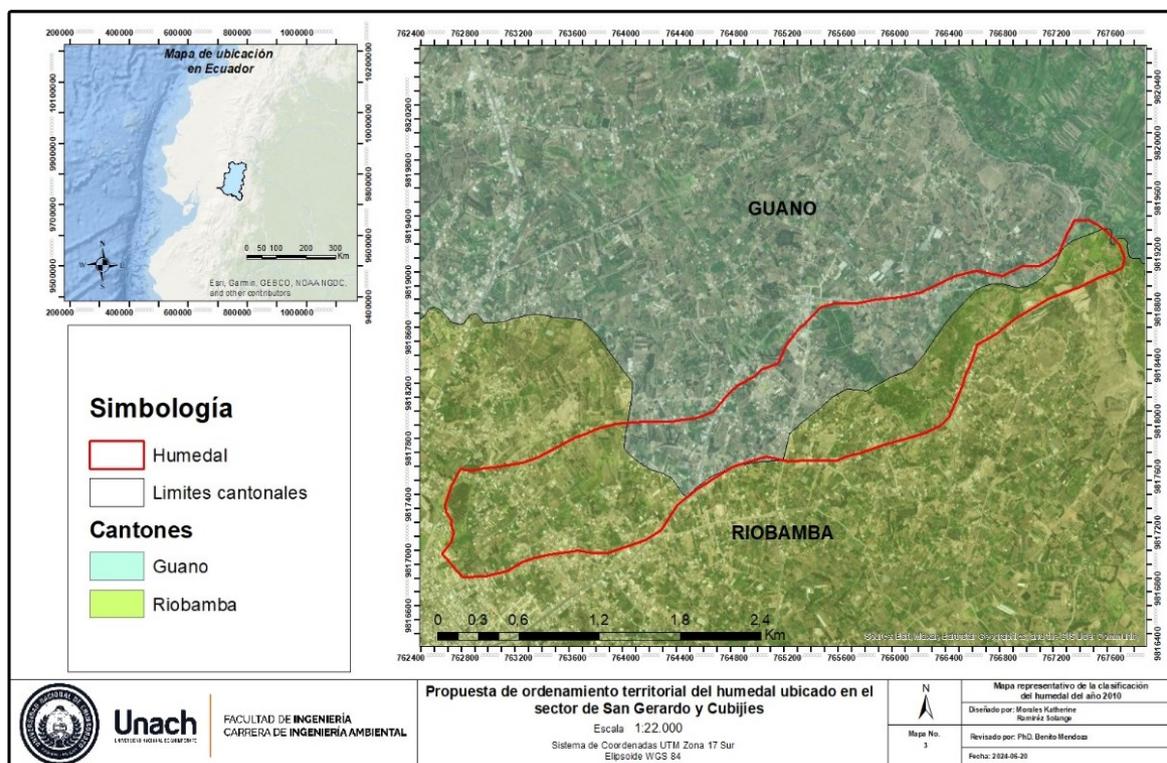
2.16 Área de conservación

Es un espacio designado y gestionado con el propósito de proteger y preservar la biodiversidad, los recursos naturales y los servicios ecosistémicos asociados a dicho humedal, estas áreas suelen establecerse con el objetivo de mantener la integridad ecológica, promover la restauración del ecosistema degradado y garantizar el uso sostenible de los recursos naturales presentes en el área (Guerrero et al., 2022).

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1 Ubicación y área de estudio

En la presente investigación la zona de estudio comprende el humedal situado en la provincia de Chimborazo, Ecuador el mismo que se aprecia en la Figura 1. El humedal se *Figura 1: Mapa de ubicación del humedal entre San Gerardo y Cubijies.*



extiende desde la parroquia Velasco en el cantón Riobamba, abarcando parte del territorio de Guano, llegando hasta la parroquia rural de Cubijies.

Fuente: Autores.

3.2 Análisis multitemporal del uso y cobertura de suelo.

Para el análisis multitemporal del uso y cobertura de suelo se realizó una investigación cualitativa con enfoque descriptivo en la zona de influencia que contiene las diferentes coberturas vegetales, para evaluar los cambios que ha presentado la cobertura. Se utilizaron los sistemas de información geográfica (SIG) como principal herramienta.

Para la selección de las imágenes se tomó en cuenta dos criterios importantes:

- Las imágenes fueron de libre acceso y amplia oferta temporal.
- Presento una amplia visión de la zona de estudio y el nivel de nubosidad fue bajo (Rojas et al., 2019).

Las imágenes satelitales utilizadas fueron tomadas de los años 2000, 2010 y 2020 que se obtuvieron del software Google Earth Engine (GEE) el cual dispone de una amplia base de datos (Gorelick et al., 2017).

3.2.1 Cuantificación de datos

Para realizar el análisis multitemporal de la dinámica del uso y la cobertura del suelo en el humedal, se empleará la técnica de detección de cambios propuesta por (Singh, 1989). Este método se considera adecuado para evaluar transformaciones en la cobertura terrestre, ya que permite obtener información cuantitativa y objetiva, con amplia cobertura espacial y temporal. Estos datos son esenciales para identificar procesos de degradación ambiental y pérdida de biodiversidad, tal como lo destacan (Jaramillo & Antunes, 2018).

3.2.1.1 Puntos de muestreo

Para la zona de estudio se realizó el conteo de píxeles y se aplicó la fórmula de cálculo de tamaño muestral propuesta por Orozco y Ordoñez (2023), empleando un nivel de confianza del 94% y un error máximo permisible del 6%. Esta metodología permitió definir el número de puntos de control requeridos para ejecutar el proceso de clasificación, tal como se ilustra en la Ecuación 1:

$$n = \frac{NZ^2_{\alpha/2}pq}{e^2(N-1) + pqZ^2_{\alpha/2}}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

$Z^2_{\alpha/2}$ = valor de la distribución normal estándar para un determinado nivel de confianza

N = tamaño de la población

e = error de estimación máximo tolerable

p = proporción de elementos que poseen la característica de interés

q = 1-p

3.2.1.2 Diseño de la muestra (Sampling design)

Stephen Stehman (2009) en “Sampling designs for accuracy assessment of land cover” se exponen los diseños de muestreo tradicionalmente utilizados para validar la precisión de clasificaciones de cubierta terrestre. La configuración de estos diseños se fundamenta en tres elementos esenciales:

Los objetivos de precisión

Los criterios de diseño de muestreo deseables

Los puntos fuertes y débiles de los diseños de muestreo básicos y complejos en relación con los objetivos de precisión.

Se empleó una hoja de cálculo en Microsoft Excel en la que se aplicó la metodología propuesta por Stephen Stehman (2009), donde el único dato introducido, fue el área del Humedal que se determinó con el conteo de píxeles antes mencionado.

El valor del error estándar objetivo para la precisión global es de 0,05, sugerido por Olofsson et al. (2014), el cual se utilizó para la precisión global y la precisión del proyecto. El número total de muestras basado en la superficie total, y se distribuyó por estrato de forma equitativa, proporcional y con tres opciones de equilibrio entre estas asignaciones (Nations Food and Agriculture Organization of the United, 2016).

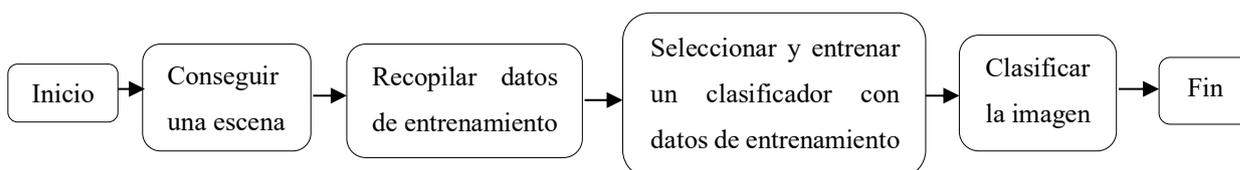
3.2.1.3 Puntos de validación

Para el establecimiento de los puntos de validación se realizarán varias salidas de observación al Humedal, donde se seleccionarán las zonas que han prevalecido a lo largo del tiempo sin alteraciones en su cobertura y uso de la tierra y con un GPS se adquirieron las coordenadas de cada punto establecido con el método de Sampling design (Stehman, 2009). Del mismo modo, se emplearon imágenes satelitales para comparar lo visto en campo, como las zonas con menos variaciones en el tiempo.

3.2.1.4 Clasificación supervisada en Google Earth Engine

La clasificación supervisada se realizará por medio de un conjunto de datos de entrenamiento que exponen las características espectrales de cada clase de cobertura terrestre de interés para "supervisar" la clasificación. El enfoque general de una clasificación supervisada en GEE se resume a continuación en la Figura 2.

Figura 2: Flujo metodológico de la clasificación supervisada.



Fuente: (Nicolau Puzzi et al., 2011).

3.2.1.5 Procesamiento de datos en Google Earth Engine

En esta etapa se obtendrán los datos geospaciales necesarios para el proyecto, como imágenes satelitales y bases de datos de programación. Luego, se llevarán a cabo diversas

operaciones para preparar y convertir estos datos en información aplicable para el análisis (Ruiz, 2017).

Dentro de GEE existe un catálogo de colecciones de imágenes satelitales el cual cuenta con correcciones radiométricas y atmosféricas, en los que se seleccionó la colección ASTER L1T Radiance para el periodo del 2000 y la colección Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A para los periodos del 2010 y 2020, debido a su resolución y previa corrección atmosférica.

Se definen bandas de predicción que dependen del tipo de imagen satelital utilizada y selecciona los puntos de entrenamiento de la muestra en el que se verifiquen dichos puntos por medio de la colección NICFI basemaps de Planet Labs, empresa que, a partir del año 2015, opera una flota de pequeños satélites que capturan imágenes de la Tierra en alta resolución.

3.2.1.6 Colección de ASTER L1T Radiance

El ASTER es un generador de imágenes multiespectrales que fue lanzado en diciembre de 1999 a bordo de la nave Terra de la Nasa. Este puede recoger datos en 14 bandas espectrales, desde el visible hasta el infrarrojo térmico. Cada escena cubre un área de 60x60 km, estas escenas producidas por el USGS, que contienen radiancia calibrada en el sensor.

Tabla 1: Catálogo de datos Earth Engine “ASTER L1T Radiance”.

Nombre	Descripción	Mínimo	Máximo	Resolución	Longitud de onda
B01	VNIR_Banda1 (verde/Amarillo visible)	1	255	15 metros	0,520- 0,600 μm
B02	VNIR_Banda 2 (rojo visible)	1	255	15 metros	0,630- 0,690 μm
B3N	VNIR_Band3N (Infrarrojo cercano, que apunta al nadir)	1	255	15 metros	0,780- 0,860 μm
B04	SWIR_Band4 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	1,600- 1,700 μm
B05	SWIR_Band5 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,145- 2,185 μm
B06	SWIR_Band6 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,185- 2,225 μm

B07	SWIR_Band7 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,235- 2,285 μm
B08	SWIR_Band8 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,295- 2,365 μm
B09	SWIR_Band9 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,360- 2,430 μm
DEM	Modelo de elevación digital del terreno	0	6000	30 metros	-

Fuente: Earth Engine Data Catalog.

3.2.1.7 Colección de Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2^a

La colección desplaza los datos en las escenas más recientes para que estén en el mismo rango que en las escenas más antiguas. Sentinel-2 brinda imágenes multiespectrales de alta resolución y gran amplitud que incluye el seguimiento de la vegetación, el suelo, la cubierta del agua e incluso la observación de las vías navegables interiores y las zonas costeras.

Tabla 2: Catálogo de datos de "H2 Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A".

Nombre	Escala	Tamaño de Píxel	Longitud de onda	Descripción
B2	0,0001	10 metros	496,6nm (S2A) / 492,1nm (S2B)	Azul
B3	0,0001	10 metros	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	Verde
B4	0,0001	10 metros	664,5nm (S2A) / 665nm (S2B)	Roja
B5	0,0001	20 metros	703,9nm (S2A) / 703,8nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B6	0,0001	20 metros	740,2nm (S2A) / 739,1nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B7	0,0001	20 metros	782,5nm (S2A) / 779,7nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B8	0,0001	10 metros	835,1nm (S2A) / 833nm (S2B)	NIR
B11	0,0001	20 metros	1613,7nm (S2A) / 1610,4nm (S2B)	Onda Corta Infrarroja (SWIR)

B12	0,0001	20 metros	2202,4nm (S2A) / 2185,7nm (S2B)	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
DEM	Modelo de elevación digital del terreno	0	6000	30 metros

Fuente: Earth Engine Data Catalog.

3.2.2 Clasificación de la cobertura

Los tipos de cobertura establecidos para la detección de cambios se basaron en la cobertura de World Land Cover establecida por la la Agencia Espacial Europea (ESA). Esta es una cobertura terrestre global de libre acceso que ofrece datos con una resolución de 10 metros, que maneja información de Sentinel-1 y Sentinel-2 e incluye once categorías de cobertura terrestre validadas independientemente con un análisis global por la ESA, en el que se demuestra una precisión de 75% aproximadamente.

En las zonas de estudio se determinó que las clases más representativas, con la aplicación de la colección de ESAWorldCover en GEE, fueron las mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3: Clases seleccionadas de cobertura terrestre (World Land Cover).

Valor	Color	Descripción
0	#f68a0f	Área poblada
1	#fffd15	Plantaciones forestales
2	#0fa1ff	Cuerpos de agua
3	#ffc82d	Mosaico agropecuario
4	#0716d6	Humedal

Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA).

3.2.3 Método de clasificación directa

Consistió en combinar dos imágenes de periodos distintos en un solo proyecto en el GEE y se aplicó una clasificación de cambios donde se utilizarán las bandas multiespectrales, las clases representaron los cambios en los usos del suelo, con la clasificación de cobertura definida.

Para la detección de cambios se utilizaron imágenes satelitales de los años 2000, 2010 y 2020 de la colección ASTER L1T Radiance y de la colección de Harmonized Sentinel-2 MSI, con la finalidad de identificar las pérdidas y ganancias de los tipos de cobertura.

3.2.4 Random Forest

El clasificador de bosque aleatorio es un algoritmo de conjunto permitió combinar múltiples clasificadores de árbol. Cada árbol se generó utilizando un vector aleatorio muestreado independientemente del vector de entrada, y emitió un voto unitario para la clase más popular al ser clasificada (Breiman, 1999).

3.2.5 Árbol de decisión

Mediante la biblioteca “ee.Classifier” que contiene árboles de decisión en JavaScript. Se creó un clasificador basado en árboles de decisión aplicado a las imágenes satelitales de las zonas de estudio.

Se generó un clasificador de árboles de decisión para clasificar la imagen en cinco clases para la zona de estudio (0: Área poblada, 1: Plantaciones forestales, 2: Cuerpos de agua, 3: Mosaico agropecuario y 4: Humedal).

Para el clasificador del árbol de decisión se efectuaron 50 divisiones debido a que se vuelve más preciso al capturar patrones detallados en los datos de entrenamiento.

3.3 Índice Kappa

Expresa la precisión de una clasificación de imágenes utilizada para producir un mapa temático, se elegirá este índice como indicador de precisión en la clasificación ya que se centrará en su capacidad para corregir el acuerdo al azar, debido a las escalas para interpretar lo que permitirá estimaciones específicas por clases (Congalton, 2001).

Se aplicó una notación similar a la de (Cohen, 1960), el coeficiente kappa de acuerdo, κ , se estima a partir de la ecuación 2:

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (2)$$

Para la estimación del coeficiente kappa existe la estimación del nivel de concordancia y también el nivel que ocurre al azar. Para el caso simple de una matriz de confusión, la proporción de concordancia, P_o se estima a partir de la ecuación 3:

$$P_o = \frac{a + d}{n} \quad (3)$$

Hay una variedad de formas de estimar el acuerdo aleatorio, pero por lo general la que se utiliza en la estimación del coeficiente kappa de Cohen, que se basa en el análisis simple de los valores marginales de fila y columna. Con eso se obtendrá la proporción de concordancia esperada debido al azar P_e en la ecuación 4:

$$P_e = \left(\left(\frac{a+c}{n} \right) \left(\frac{a+b}{n} \right) \right) + \left(\left(\frac{b+d}{n} \right) \left(\frac{c+d}{n} \right) \right) \quad (4)$$

Para la representación de la precisión por clase, se estimará el coeficiente kappa condicional (Congalton, 2001). Para la clase i , que con la etiqueta + o -, puede estimarse a partir de la ecuación 5:

$$\kappa_i = \frac{nn_{ii} - n_i \times n_i}{nn_i - n_i \times n_i} \quad (5)$$

Se estimará la varianza de kappa y puede expresarse en términos del error estándar, σ_κ , que es la raíz cuadrada de la varianza (ecuación 8), en las que se aplican también las ecuaciones 5 y 6.

$$P_o = \sum_{i=1}^m P_{ii} \quad (6)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^m P_i \times P_{.i} \quad (7)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{(1 - P_e)\sqrt{n}} \sqrt{P_e + P_e^2 - \sum_{i=1}^m P_i \times P_{.i}(P_i + P_{.i})} \quad (8)$$

3.3.1 Matriz de Confusión

El coeficiente kappa se estimó por medio de la matriz de confusión que se usa en la evaluación de la precisión de la clasificación.

El enfoque se extendió fácilmente a multiclases, matrices y esto se discutirá brevemente para completar. En todo momento las muestras de los casos utilizados para formar la matriz de confusión se adquirieron por medio del muestreo aleatorio (Stehman, 1997).

El valor del coeficiente puede variar de 0 a 1, entre más cercano este a 1, quiere decir que la concordancia de los dos métodos es muy alta. Este índice categoriza en seis clases (Tabla 4), y de acuerdo con esta clasificación se puede rechazar o aceptar la nueva clasificación a evaluar (Cerde & Villaroel, 2008).

Tabla 4: Valoración del índice Kappa

Coefficiente Kappa	Fuerza de concordancia
0,00	Pobre
0,01 – 0,20	Leve
0,21- 0,40	Aceptable
0,41- 0,60	Moderada
0,61- 0,80	Considerable
0,81- 1,00	Casi perfecta

Fuente: (Landis & Koch, 1977).

3.4 Caracterización de las condiciones de la calidad del agua en el humedal.

3.4.1 Puntos de muestreo y toma de muestras de agua.

En selección de los puntos de muestreo de agua tendrá en cuenta criterios como la ubicación, la accesibilidad y la representatividad de la muestra, y estos puntos deben elegirse de manera que estén distribuidos idealmente para reflejar mejor los cambios en la calidad del agua.

La NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2176:1998 AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS DE MUESTREO., (1998) se utilizará para las técnicas de muestreo de campo recomendadas para estudios de contaminación y calidad del agua. Una vez obtenida la muestra la cual se recogerá en un recipiente apropiado se colocará en una hielera a 4°C y se etiqueta adecuadamente según la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2169:98 AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS, (1998) con el código de muestreo, las coordenadas de recolección y la fecha para evitar confusión o identificación errónea.

3.4.2 Análisis del agua.

Análisis In-situ: El análisis in situ se realizará utilizando un multiparámetro HANNA HI98194 para un análisis rápido de muestras.

Tabla 5: Parámetros analizados In-situ.

Análisis In-situ ⁶⁵			
Parámetros	Siglas	Unidades	Técnicas
Oxígeno Disuelto	OD	% de saturación	Multiparámetro HANNA HI98194
Temperatura	T	°C	Multiparámetro HANNA HI98194
Sólidos Disueltos Totales	SDT	-	Multiparámetro HANNA HI98194
Conductividad	CE	S/cm	Multiparámetro HANNA HI98194
Potencial de Hidrógeno	pH	adimensional	Multiparámetro HANNA HI98194

Análisis en el laboratorio: Estos parámetros serán analizados en el Laboratorio de Servicios Ambientales de la UNACH utilizando los siguientes métodos:

Tabla 6: *Parámetros de laboratorio*

Parámetros	Unidad	Método
SERV. LAB. ANÁLISIS DE AGUAS	NMP/100	STANDARD METHODS 9211
COLIFORMES FECALES	ml	
SERV. LAB. ANÁLISIS DE AGUAS DBO5	mgO ₂ /L	STANDARD METHODS 5210
		B
SERV. LAB. ANÁLISIS DE AGUAS	mg/L	STANDARD METHODS 4500-
NITRATOS		NO ₃ -E
SERV. LAB. ANÁLISIS DE AGUAS	Mg/L	STANDARD METHODS 4500
FOSFATOS		- P - E
SERV. LAB. ANÁLISIS DE AGUAS	NTU	STANDARD METHODS 2130
TUBIDEZ		B

Fuente: (APHA et al., 1989).

3.4.3 Índice NSF (ICA)

Según los resultados de diferentes parámetros, se utilizará este método para determinar el ICA. Las condiciones óptimas suponen un valor máximo de 100, que disminuye a medida que aumenta la contaminación del agua. ICA se basa en la medición de nueve parámetros, entre ellos:

Tabla 7: *Pesos relativos para parámetros del "ICA"*

Parámetro indicador de calidad del	Unidades	Peso relativo (<i>Wi</i>)
agua		
Oxígeno disuelto (OD)	% de saturación	0,17

Coliformes fecales	NMP / 100 ml	0,15
pH	u.a.	0,12
DBO₅	mg / L	0,10
Nitratos (NO₃)	mg / L (N)	0,10
Fosfatos totales (PO₄)	mg / L (P)	0,10
Variación de Temperatura	°C	0,10
Turbidez	NTU	0,08
Sólidos disueltos totales (TDS)	mg / L	0,08

Fuente: (Brown et al., 1970).

La fórmula para determinar el índice de calidad de agua (ICA-NSF) es la siguientes:

$$ICA = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * W_i) \quad (10)$$

Donde:

ICA: índice de calidad de agua.

W_i: El peso relativo asignado a cada variable o parámetro (*Sub i*), este peso está ponderado entre 0 hasta 1 de tal manera que su sumatoria resulte igual a 1

Sub i: Subíndices de la variable o parámetro *i*.

Una vez calculado el "ICA-NSF", la calidad del agua se determinará utilizando el valor establecido (ICA) de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) con base en la siguiente tabla:

Tabla 8: Clasificación del "ICA" propuesto por Brown

Clase	Califica de calidad	Rango de valores	Comentario
5	Excelente	91 < ICA ≤ 100	El nivel de biodiversidad acuática es alto. Apto para todo tipo de contacto directo y apto para uso únicamente después de la limpieza.
4	Buena	71 < ICA ≤ 90	La calidad del agua está empezando a cambiar seriamente debido a la degradación ambiental y al contacto con los desechos domésticos y agrícolas.

3	Media	$51 < ICA \leq 70$	Contaminación leve, menor biodiversidad acuática y mayor crecimiento de algas. El agua se puede utilizar para recreación y riego de cultivos.
2	Mala	$26 < ICA \leq 50$	Se reduce la biodiversidad acuática debido a problemas de contaminación. Colonización de ecosistemas por grupos que resisten la contaminación.
1	Muy mala	$0 \leq ICA \leq 25$	Tiene vida acuática limitada o casi nula, los problemas de contaminación son graves y cualquier forma de consumo es peligrosa.

Fuente: (Brown et al., 1970).

3.5 Determinación de Metales Pesados por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA)

Para la cuantificación de metales pesados en las muestras de agua, se empleará la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA)(Trujillo et al., 2019). Este método se basa en la absorción selectiva de radiación por átomos en estado fundamental, permitiendo la determinación cuantitativa de los metales presentes en la muestra (Villanueva et al., 2023). El procedimiento analítico se desarrollará acorde a las siguientes etapas:

3.5.1 Preparación de la Muestra

Con el fin de asegurar la representatividad y estabilidad de los analitos, las muestras de agua serán sometidas a un proceso de preparación previo al análisis instrumental. Inicialmente, las muestras se filtrarán a través de un filtro para remover cualquier material particulado en suspensión que pueda interferir en la medición (Trujillo et al., 2019). Posteriormente, se procederá a acidificar las muestras con ácido nítrico (HNO_3) o ácido clorhídrico (HCl) para prevenir la precipitación de los metales y mantenerlos en una forma soluble y estable a lo largo del análisis (Trujillo et al., 2019).

3.5.2 Instrumentación

Las mediciones se llevarán a cabo utilizando un espectrómetro de absorción atómica adecuado para el análisis. Este equipo permite la medición precisa de la absorbancia a longitudes de onda específicas para cada metal. Se emplearán lámparas de cátodo hueco (LCH) dedicadas para cada metal a analizar (manganeso, níquel, cromo, zinc, aluminio y arsénico), seleccionando la longitud de onda de resonancia característica para cada elemento (Trujillo et al., 2019).

Se utilizará agua desionizada y ácidos de grado analítico para la preparación de todas las soluciones y diluciones. La calidad y pureza de los reactivos es crucial para minimizar posibles contaminaciones y asegurar la exactitud de los resultados analíticos.

3.5.3 Procesamiento Analítico

Para garantizar la exactitud y precisión de las mediciones, se elaborará una curva de calibración para cada metal, utilizando patrones certificados de concentraciones conocidas y trazables a estándares internacionales. Las soluciones patrón se prepararán en un rango de concentración que cubra las concentraciones esperadas en las muestras reales. La calibración se realizará mediante la medición de la absorbancia de las soluciones patrón y la construcción de una curva que relacione la absorbancia con la concentración del metal (Villanueva et al., 2023).

Las muestras preparadas se introducirán en el espectrómetro, ya sea mediante aspiración directa a la llama o mediante introducción en un horno de grafito, dependiendo de la sensibilidad requerida para cada analito. Durante el proceso de atomización, los iones metálicos se transformarán en átomos en estado fundamental, los cuales absorberán la radiación emitida por la LCH a la longitud de onda específica (Villanueva et al., 2023). La absorbancia resultante se medirá y se utilizará para determinar la concentración del metal en la muestra, mediante interpolación en la curva de calibración previamente establecida.

3.6 Modelo actual del territorio

De acuerdo con la guía para la formulación/actualización de Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial – PDOT proporcionada por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (Secretaría Nacional de Planificación, 2023) se definirá el modelo actual del humedal considerando los niveles cantonales y parroquiales. En este sentido, usando el componente estructurante del Plan de Uso y Gestión del Suelo vigente de los dos cantones y de las parroquias que intervienen en el área de influencia del humedal; se incluirá aquellos problemas que puedan ser ubicados territorialmente, a partir de información base disponible, sobre cada unidad territorial definida por el GAD.

En el caso de los cantones y parroquias para la formulación del modelo territorial actual se deberá considerar, para las unidades territoriales, las categorías de Uso y Gestión del Suelo del PUGS de los cantones respectivos:

- Suelo urbano:

Consolidado.

No consolidado.

Protección.

- Suelo rural:

Producción.

Aprovechamiento extractivo.

Expansión urbana.

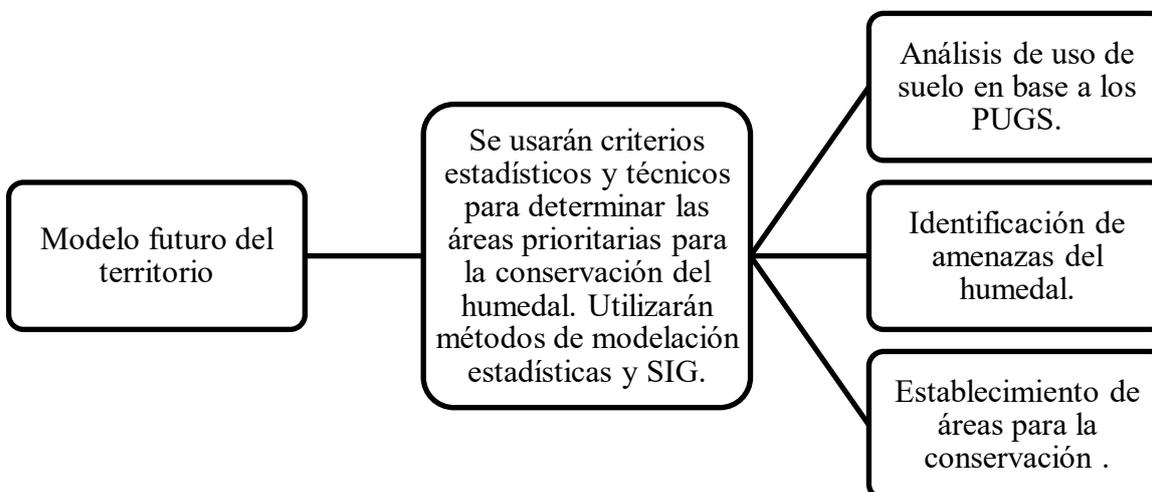
Protección.

Se utilizará la información de los PDOT vigentes del gobierno provincial, cantones, parroquias involucradas, además de ordenanzas y documentos que permitan identificar información relevante sobre este sector.

3.7 Modelo futuro del territorio

Para realizar el modelo futuro del territorio se considerará la misma metodología multicriterio de la guía para la formulación/actualización de Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial – PDOT proporcionada por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (Secretaría Nacional de Planificación, 2023), añadiendo a esta la valoración de amenazas y áreas de conservación del humedal como se muestra en la figura 2.

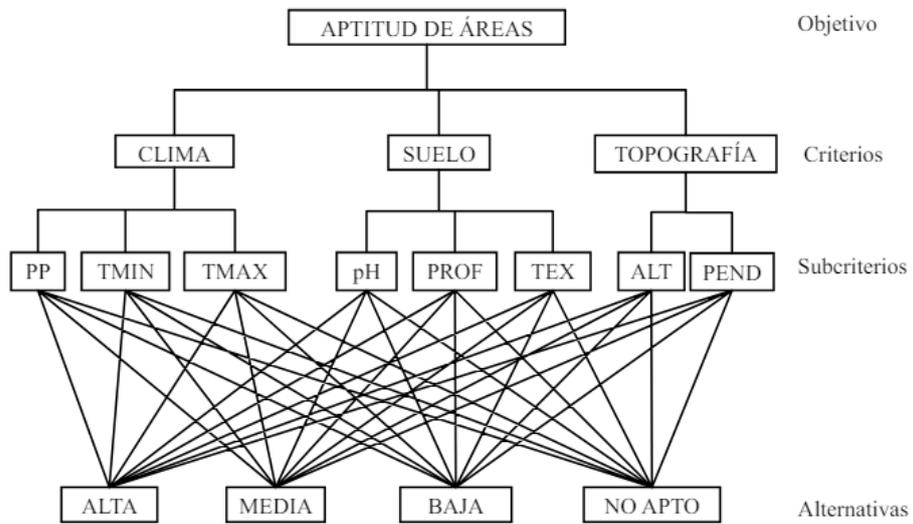
Figura 3: Modelo futuro del territorio.



Fuente: (Chávez González et al., 2015)

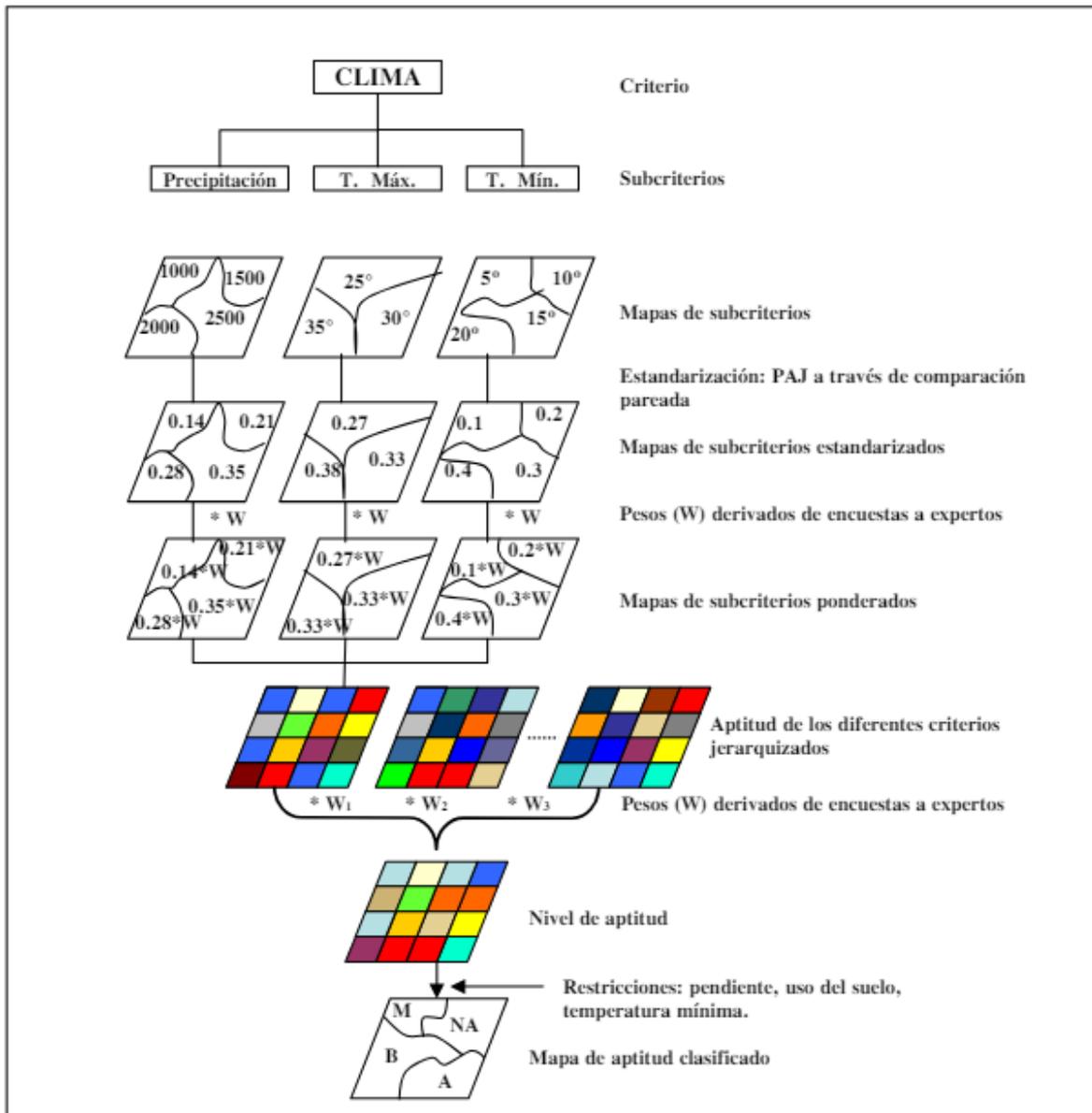
3.7.1. Análisis multicriterio

Figura 4: Jerarquización del problema de decisión



Fuente: (Esaú et al., 2007)

Figura 5: Modelo cartográfico implementado para localizar espacialmente las áreas para el establecimiento de áreas de conservación en el humedal.



Fuente: (Esaú et al., 2007)

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Cuantificación de datos

4.1.1 Puntos de muestreo

Al emplear la fórmula del tamaño de la muestra se obtuvo como resultado 60 puntos en la zona de estudio. En la tabla 9 se visualiza la precisión esperada por usuario y el total de puntos de muestreo a tomar en cuenta por cada clase.

Tabla 9: Resultados de puntos de muestreo del humedal.

	Área poblada	Plantaciones forestales	Cuerpos de agua	Mosaico agropecuario	Humedal
Ui (precisión esperada)	0,80	0,80	0,70	0,80	0,90
Total, de puntos de muestreo	6	7	0	39	8

Fuente: Autores

4.1.2 Sampling desing

En la zona de estudio se asignó porcentajes respecto a la predominancia de áreas que presentan cada clase en base a su área total, al igual que el número de puntos de validación como se muestra en la tabla 10. Las entradas necesarias se basan en la precisión esperada del usuario para el punto de muestra.

Tabla 10: Resultados de los puntos de validación del humedal

	Área poblada	Plantaciones forestales	Cuerpos de agua	Mosaico agropecuario	Humedal	Total
Área Poblada	490	16999	95	14376	4336	36296
Proporción cartográfica (Wi)	0,014	0,47	0,003	0,40	0,12	1,00
Ui (precisión esperada)	0,80	0,80	0,70	0,80	0,90	
Desviación estándar (Si)	0,40	0,40	0,46	0,40	0,30	
Wi*Si	0,005	0,19	0,001	0,16	0,036	0,39
Puntos de validación	12	12	7	12	17	60

Fuente: Autores

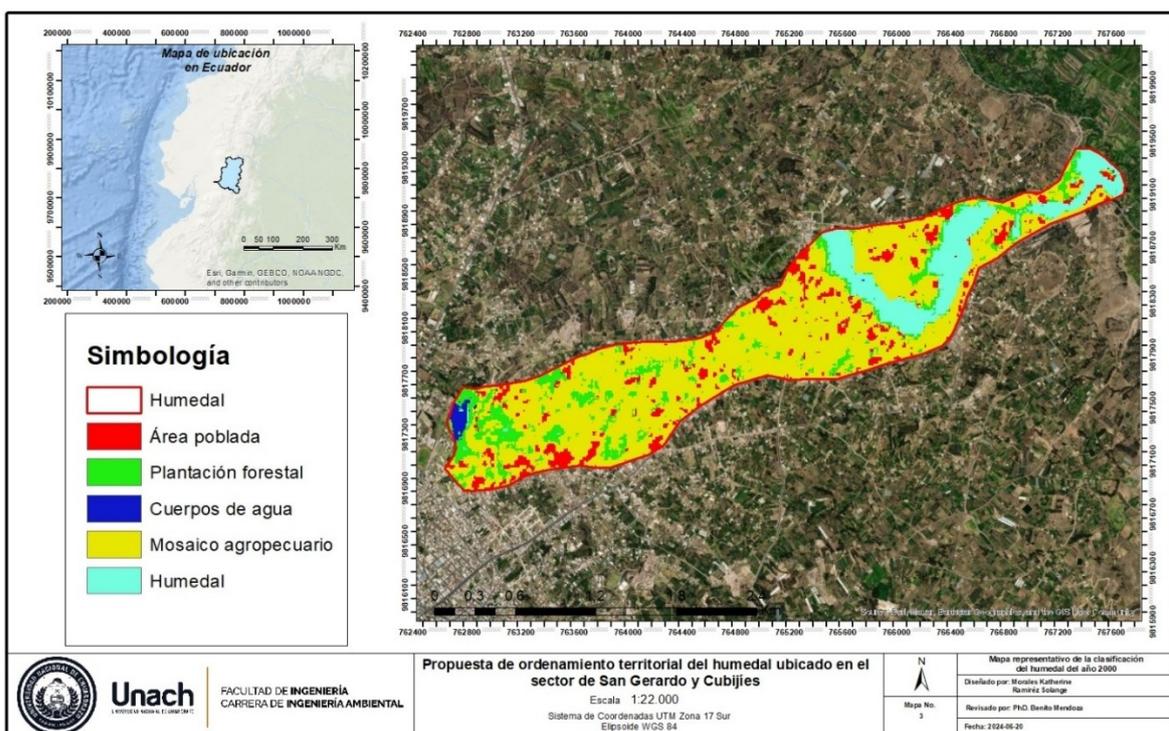
4.1.3 Mapas de clasificación supervisada con Random Forest

4.1.3.1 Validación de la precisión de datos obtenidos del humedal periodo 2000

La Figura 6 presenta la imagen del humedal en el año 2000. A simple vista, resalta la presencia predominante de la clase mosaico agropecuario en la zona central. Esta distribución se explica por el potencial agrícola que caracterizaba la región, con una variedad de cultivos que incluían maíz, papas, alfalfa, cebolla y fresas, tanto al aire libre como en invernaderos.

Así mismo, se observa una gran presencia de la clase plantación forestal en las zonas alta y baja, dado que la zona aún no había experimentado un proceso de urbanización y se encontraba en las afueras de la ciudad de Riobamba. La clase humedal tiene predominancia en la zona baja del área de estudio. Y finalmente la clase cuerpos de agua tiene una mínima presencia en la zona alta del área de estudio.

Figura 6: Mapa del humedal periodo 2000.



Fuente: Autores

En la tabla 11 se presentan los errores que generó el programa en cada clase donde se observan 5 errores totales de comisión; 1 punto de la clase área poblada se encuentra en mosaico agropecuario, 2 puntos de plantaciones forestales se encuentran en mosaico agropecuario y 2 puntos de cuerpos de agua se encuentran en humedal.

Tabla 11: Matriz de confusión del humedal periodo 2000.

Clases	Área Poblada	Plantaciones Forestales	Cuerpos de Agua	Mosaico Agropecuario	Humedal	Total	Error de Comisión
Área Poblada	11	0	0	1	0	12	1
Plantaciones Forestales	0	10	0	2	0	12	2
Cuerpos de Agua	0	0	5	0	2	7	2
Mosaico Agropecuario	0	0	0	12	0	12	0
Humedal	0	0	0	0	17	17	0
Total	11	10	5	15	19	60	
Error de Omisión	0	0	0	3	2		5

Fuente: Autores

En la tabla 12 se observa la clasificación del humedal del periodo 2000 presentó una precisión global del 92% y un índice Kappa del 89%, lo que indica una concordancia casi perfecta. En detalle la clase área poblada mostró un error de comisión de 1,67% sin error de omisión; las clases plantación forestal y cuerpos de agua presentaron un error de comisión del 3,33% sin error de omisión, la clase de mosaico agropecuario no mostro error de comisión y si cuenta con error de omisión del 5% y la clase humedal no presento error de comisión, pero cuenta con un error de omisión del 3,33%.

Tabla 12. Índice Kappa periodo 2000.

Clases	Error Com (%)	Error de Om (%)	Precisión global (po)	Precisión global (po %)	índice k	índice k (%)
Área poblada	1,67	0				
Plantación forestal	3,33	0				
Cuerpos de agua	3,33	0	0,92	92	0,89	89
Mosaico agropecuario	0	5				
Humedal	0	3,33				

Fuente: Autores

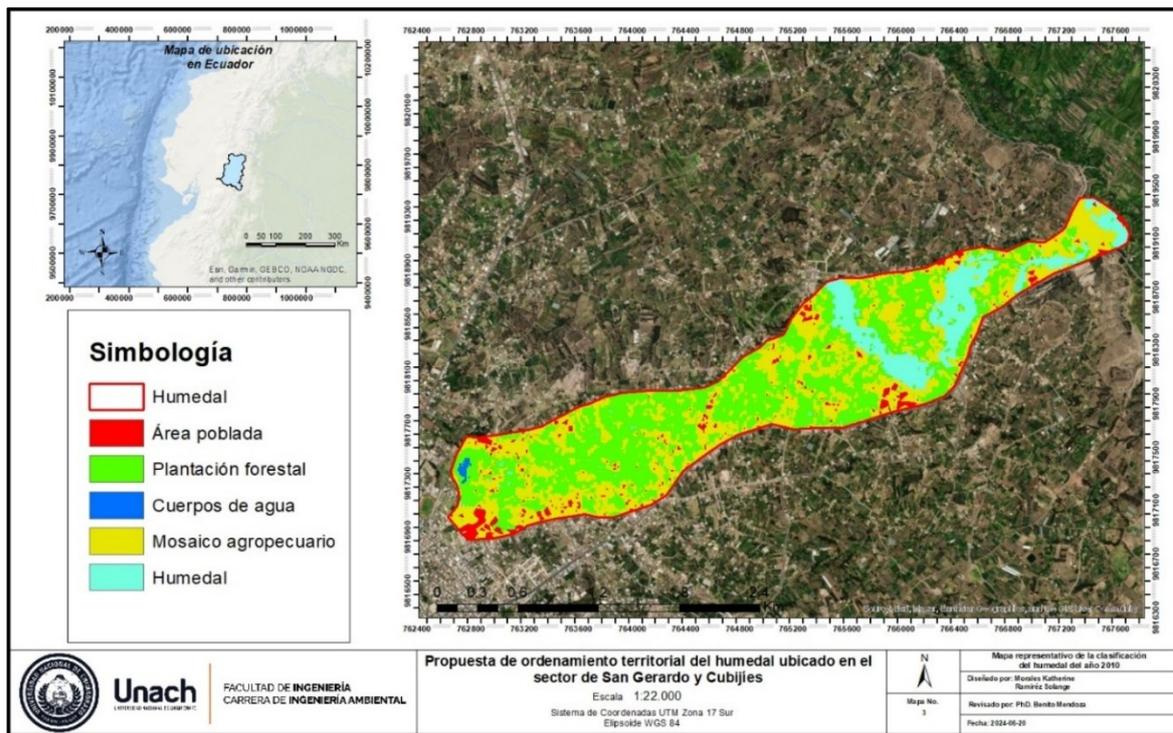
4.1.3.2 Validación de la precisión de datos obtenidos del humedal periodo 2010.

La Figura 7 presenta un panorama de la situación del humedal en el año 2000. A simple vista, resalta la presencia predominante de la clase mosaico agropecuario en las áreas altas y centrales. Esta distribución se explica por el potencial agrícola que caracterizaba la

región, con una variedad de cultivos que incluían maíz, tomate papa, alfalfa y fresas tanto al aire libre como en invernaderos.

Así mismo, se observa que la clase área poblada es la segunda que predomina, dado que la zona aún no había experimentado un proceso de urbanización y se encontraba en las afueras de la ciudad de Riobamba. La clase humedal se presenta en gran cantidad en la zona baja del humedal. Por último, la presencia de las clases de cuerpos de agua y plantaciones forestales son las que se presentan en mínima cantidad lo que evidencia la poca influencia de actividades antrópicas.

Figura 7: Mapa del humedal periodo 2010.



Fuente: Autores

En la tabla 13 se presentan los errores que generó el programa en cada clase donde se observan 3 errores totales de comisión; 1 puntos de la clase área aprobada se encuentran en mosaico agropecuario y 2 puntos de cuerpos de agua se encuentran en plantaciones forestales.

Tabla 13: Matriz de confusión del humedal periodo 2010.

Clases	Área Poblada	Plantaciones Forestales	Cuerpos de Agua	Mosaico Agropecuario	Humedal	Total	Error de Comisión
Área Poblada	11	0	0	1	0	12	1
Plantaciones Forestales	0	12	0	0	0	12	0

Cuerpos de Agua	0	2	5	0	0	7	2
Mosaico Agropecuario	0	0	0	12	0	12	0
Humedal	0	0	0	0	17	17	0
Total	11	14	5	13	17	60	
Error de Omisión	0	2	0	1	0		3

Fuente: Autores

En la tabla 14 se observa la clasificación del humedal del periodo 2010 presento una precisión global del 95% y un índice Kappa del 94%, lo que indica una concordancia casi perfecta. En detalle, la clase área poblada mostró un error de comisión 1,67% sin error de omisión; la clase plantación forestal no presentó error de comisión y si un error de omisión del 3,33%, la clase cuerpos de agua presento un error de comisión de 3,33 sin error de omisión y la clase de mosaico agropecuario no presento error de comisión y si error de omisión de 1,67%.

Tabla 14: Índice Kappa periodo 2010.

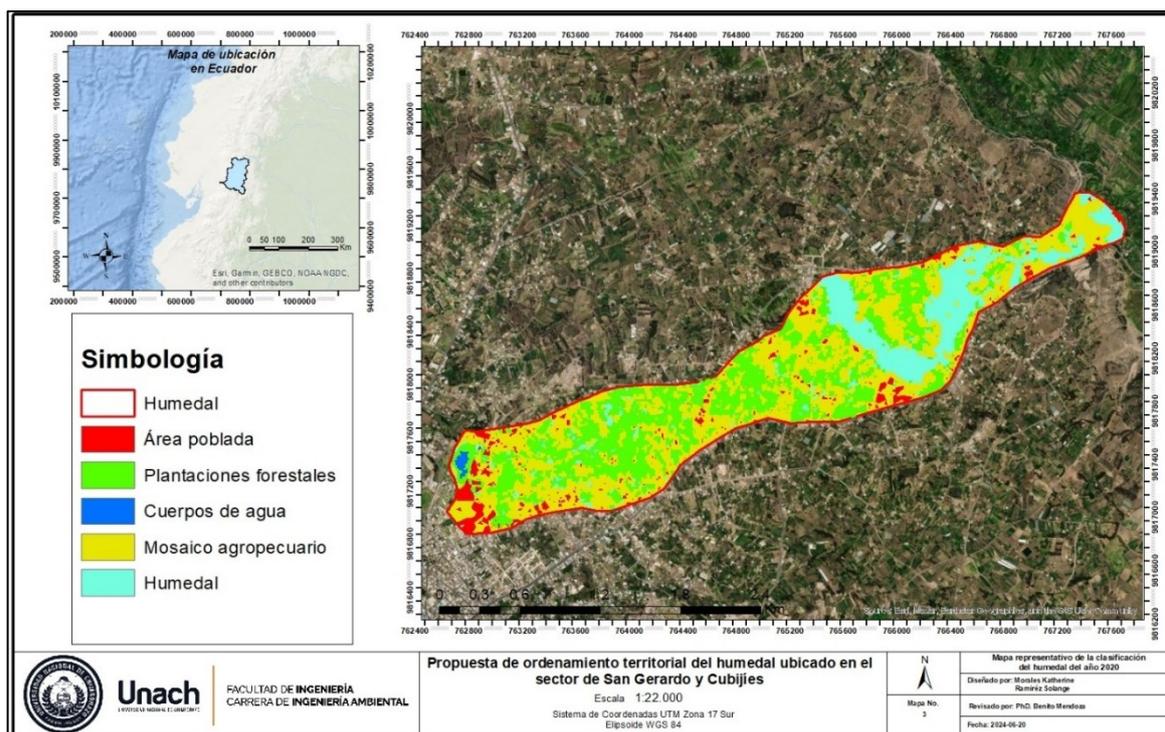
Clases	Error Com (%)	Error de Om (%)	Precisión global (po)	Precisión global (po %)	índice e k	índice k (%)
Área poblada	1,67	0				
Plantación forestal	0	3,33				
Cuerpos de agua	3,33	0	0,95	95	0,94	94
Mosaico agropecuario	0	1,67				
Humedal	0	0				

Fuente: Autores

4.1.3.3 Validación de la precisión de datos obtenidos del humedal periodo 2020.

La Figura 8 representa las clases presentes del humedal en el año 2020, se evidencia un aumento en la clase de área poblada en la zona alta y central del humedal, una disminución no tan notoria en la clase mosaico agropecuario en la zona alta y central, en cuanto a la clase de cuerpos de agua se observa un mínimo aumento en la zona central del humedal, la clase plantaciones forestales ha disminuido en la zona alta pero en la zona central se ve un mínimo aumento y en cuanto a la clase humedal se ve un aumento en la zona baja de la área de estudio. Estas alteraciones, se deben al crecimiento urbano lo que muestra un inadecuado control territorial.

Figura 8: Mapa del humedal periodo 2020



Fuente: Autores

En la tabla 15 se presentan los errores que generó el programa en cada clase donde se observan 4 errores totales en la clase área poblada se presenta un error en la clase de mosaico agropecuario, 1 punto de la clase plantaciones forestales se encuentra en humedal y 2 puntos de cuerpos de agua se encuentra en plantaciones forestales. Sin embargo, en las clases mosaico agropecuario y humedal no presentaron errores.

Tabla 15: Matriz de confusión del periodo 2020.

Clases	Área Poblada	Plantaciones Forestales	Cuerpos de Agua	Mosaico Agropecuario	Humedal	Total	Error de Comisión
Área Poblada	11	0	0	1	0	12	1
Plantaciones Forestales	0	11	0	0	1	12	1
Cuerpos de Agua	0	2	5	0	0	7	2
Mosaico Agropecuario	0	0	0	12	0	12	0
Humedal	0	0	0	0	17	17	0
Total	11	13	5	13	18	60	
Error de Omisión	0	2	0	1	1		4

Fuente: Autores

En la tabla 16 se observa la clasificación del humedal del periodo 2020 presento una precisión global del 93% y un índice Kappa del 91%, lo que indica una concordancia casi perfecta. En detalle, la clase área poblada mostró un error de comisión de 1,67% sin error de omisión; la clase plantación forestal presentó un error de comisión del 1,67% y un error de omisión del 3,33%, la clase cuerpos de agua presento un error de comisión de 3,33% sin error de omisión, la clase de mosaico agropecuario no mostro un error de comisión y si un error de omisión de 1,67% y la clase humedal no presento error de comisión y si error de omisión de 1,67%.

Tabla 16: Índice Kappa periodo 2020.

Clases	Error Com (%)	Error de Om (%)	Precisión global (po)	Precisión global (po %)	índice k	índice k (%)
Área Poblada	1,67	0				
Plantaciones Forestales	1,67	3,33				
Cuerpos de Agua	3,33	0	0,93	93	0,91	91
Mosaico Agropecuario	0	1,67				
Humedal	0	1,67				

Fuente: Autores

4.2 Calidad de agua

4.2.1 Puntos de muestreo y ubicación geográfica

La recolección de muestras de agua utilizadas en la evaluación de los índices de calidad del agua del humedal se realizó teniendo en cuenta los siguientes aspectos, los cuales se detallan en la tabla 17:

Tabla 17: Puntos de muestreo

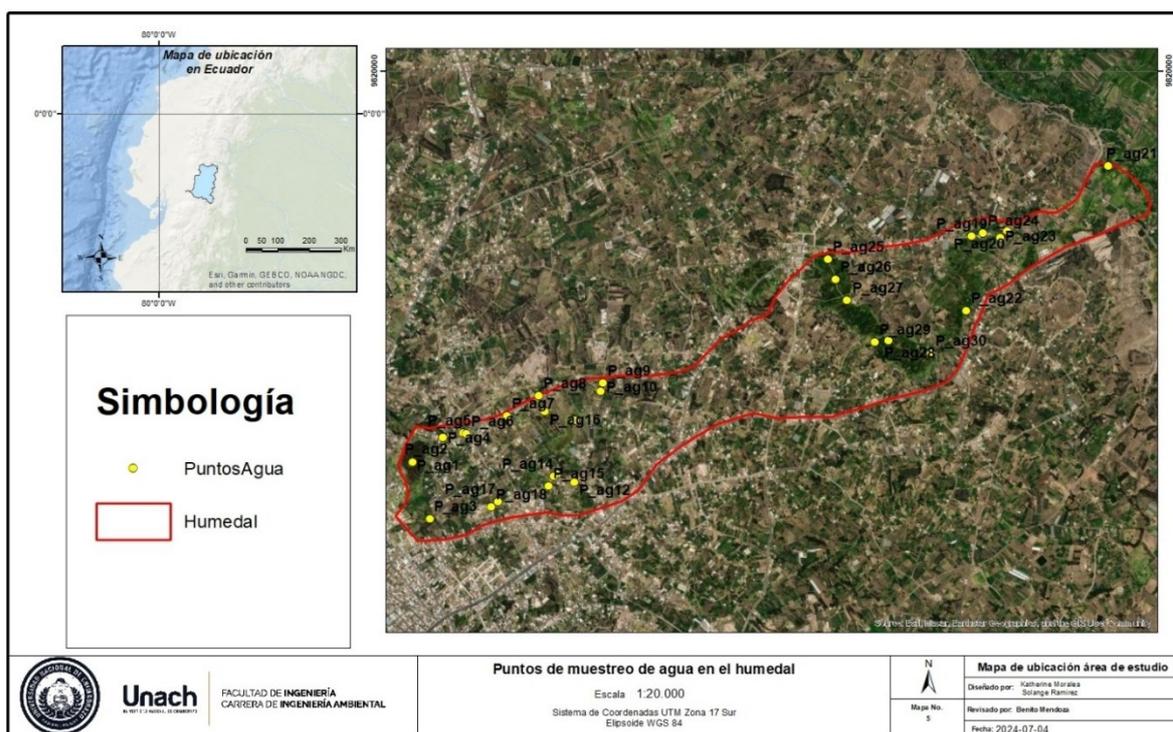
Puntos de muestreo	Descripción	Coordenadas	
		Longitud	Latitud
Punto 1	Laguna	762630,8	9817446,9
Punto 2	Agua de riego	762875,8	9817514,7
Punto 3	Agua de riego	762626,9	9816717,1
Punto 4	Agua de riego	762876,6	9817506,6
Punto 5	Uso precuario	763013,4	9817539,9
Punto 6	Uso precuario	763032,3	9817530,2
Punto 7	Agua de riego	763305,5	9817654,5

Punto 8	Agua de riego	763519,1	9817789,9
Punto 9	Agua de riego	763952,8	9817877,8
Punto 10	Agua de riego	763937,7	9817821,5
Punto 11	Agua de riego	763760,3	9817622,9
Punto 12	Agua de riego	763755,8	9817203,9
Punto 13	Agua de riego	763638,7	9817260,3
Punto 14	Agua de riego	763619,2	9817241,4
Punto 15	Agua de riego	763585,6	9817175,2
Punto 16	Agua de riego	763557,8	9817685,0
Punto 17	Agua de riego	763246,2	9817068,6
Punto 18	Agua de riego	763199,9	9817034,1
Punto 19	Captación de agua	766429,8	9818878,6
Punto 20	Agua de riego	766669,5	9818913,1
Punto 21	Rio	767292,9	9819412,8
Punto 22	Agua de riego	766390,7	9818371,9
Punto 23	Arroyo	766620,4	9818867,8
Punto 24	Vertiente	766505,2	9818899,7
Punto 25	Ojo de agua	765462,0	9818718,9
Punto 26	Vertiente	765514,9	9818584,9
Punto 27	Vertiente	765592,9	9818443,7
Punto 28	Vertiente	765872,2	9818168,9
Punto 29	Ojo de agua	765776,6	9818158,9
Punto 30	Pesca deportiva	766156,4	9818082,7

Fuente: Autores.

Los puntos de monitoreo se encuentran distribuidos estratégicamente a lo largo del humedal de San Gerardo y Cubijíes como se puede observar en la figura 9, cubriendo diversas zonas con distintos grados de influencia antropogénica. Esta disposición permitió analizar de manera efectiva cómo las actividades humanas impactan la calidad del agua en diferentes sectores del humedal.

Figura 9: Mapa de puntos de muestreo.



Fuente: Autores.

4.2.2 Comparativa de las muestras de campo con los límites máximos permisibles de acuerdo con los parámetros

Los resultados obtenidos corresponden a las 30 muestras de agua tomadas en el humedal, en la tabla 18 detallan los resultados derivados del análisis de laboratorio, indicando si cumplen o no con los requisitos establecidos por la normativa.

Los resultados obtenidos corresponden a las 30 muestras de agua tomadas en el humedal, las cuales fueron analizadas en laboratorio para evaluar su calidad y determinar si cumplen con los parámetros establecidos por la normativa ambiental vigente.

En la tabla 18 se detallan los resultados derivados de estos análisis, incluyendo valores específicos de parámetros como pH, concentración de oxígeno disuelto y presencia de coliformes fecales. Estos datos permiten identificar si las muestras cumplen o no con los límites máximos permisibles establecidos por la normativa, lo que es fundamental para evaluar el estado en que se encuentra el humedal y tomar medidas correctivas en caso de ser necesario.

Tabla 18: Comparativa de los parámetros con el Acuerdo Ministerial 097A

Parámetro	Muestra	Límite máximo permisible	Unidades	Valor obtenido	Cumplimiento
pH	P 1	6 – 9	Adimensional	-	Cumplen
	P 2			8,05	
	P 3			-	
	P 4			-	
	P 5			-	
	P 6			-	
	P 7			-	
	P 8			7,89	
	P 9			7,87	
	P 10			8,29	
	P 11			8,12	
	P 12			7,58	
	P 13			8,19	
	P 14			8,25	
	P 15			8,01	
	P 16			7,97	
	P 17			8,42	
	P 18			8,38	
	P 19			7,92	
	P 20			8,05	
	P 21			7,84	
	P 22			7,59	
	P 23			8,09	
	P 24			8,04	
	P 25			8,08	
	P 26			7,56	
	P 27			7,66	
	P 28			7,65	
	P 29			6,93	

	P 30		7,46	
	P 1		-	
	P 2		6,82	
	P 3		-	
	P 4		-	
	P 5		-	
	P 6		-	
	P 7		-	
	P 8		7,38	
	P 9		7,34	
	P 10		8,10	
	P 11		7,45	
	P 12		7,70	
	P 13		7,18	No cumplen
	P 14		7,55	
Oxígeno disuelto	P 15	3	7,11	
	P 16		7,02	
	P 17		7,74	
	P 18		7,64	
	P 19		6	
	P 20		6,49	
	P 21		6,60	
	P 22		3,18	
	P 23		6,69	
	P 24		7,07	
	P 25		6,96	
	P 26		0	Cumple
	P 27		5,52	No cumplen
	P 28		5,44	No cumplen
P 29	0,89	Cumple		
P 30	5,81	No cumple		
	P 1	-	-	.

Coliformes	P 2	27
fecales	P 3	-
	P 4	-
	P 5	-
	P 6	-
	P 7	-
	P 8	25
	P 9	31
	P 10	31
	P 11	0
	P 12	35
	P 13	77
	P 14	144
	P 15	180
	P 16	13
	P 17	15
	P 18	15
	P 19	0
	P 20	0
	P 21	144
	P 22	2
	P 23	1
	P 24	288
	P 25	3
	P 26	4
	P 27	0
	P 28	1
	P 29	0
	P 30	3

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se observa que, en el parámetro de pH, los 30 puntos de muestreo cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por la normativa. Sin embargo, en el caso del oxígeno disuelto, solo los puntos 26 y 29 cumplen

con el límite máximo permisible, lo que indica una posible afectación en la calidad del agua en los demás puntos. Por otro lado, en el parámetro de coliformes fecales, no se establece un límite específico en la normativa, lo que dificulta la evaluación de este indicador.

4.2.3 Comparativa de los metales con el límite máximo permisible según el Acuerdo Ministerial 097A

En la tabla 19 se presentan los resultados obtenidos del análisis de los metales evaluados, los cuales han sido comparados con los límites máximos permisibles establecidos en la tabla calidad de aguas para riego agrícola en el Acuerdo Ministerial 097A. Los metales analizados incluyen aluminio (Al), arsénico (As), zinc (Zn), manganeso (Mn), níquel (Ni) y cromo (Cr). Según los datos recopilados, todos estos metales se encuentran dentro de los rangos permitidos por la normativa mencionada, lo que indica que cumplen con los estándares de calidad y seguridad establecidos.

Los resultados demuestran que las concentraciones de los metales analizados están en conformidad con la normativa vigente, lo que garantiza que no existen riesgos significativos para la salud humana o el ambiente en relación con estos elementos.

Tabla 19: Comparativa de los metales con el Acuerdo Ministerial 097A

Metales	Puntos de muestreo	Límite máximo permisible	Promedio del valor obtenido	Cumplimiento
Aluminio	P1 – P30	5,0 mg/L	0,000136	Cumplen
Arsénico	P1 – P30	0,1 mg/L	0,001579	Cumplen
Cromo	P1 – P30	0,2 mg/L	0,000063	Cumplen
Manganeso	P1 – P30	0,2 mg/L	0,000479	Cumplen
Níquel	P1 – P30	0,2 mg/L	0,000115	Cumplen
Zinc	P1 – P30	2,0 mg/L	0,000479	Cumplen

Fuente: Autores.

En el caso del aluminio (Al), los niveles detectados están muy por debajo del límite máximo permitido, lo que sugiere una baja presencia de este metal en las muestras analizadas. Por su parte, el arsénico (As), un metaloide conocido por su toxicidad en concentraciones elevadas, también se mantiene dentro de los parámetros aceptables, lo que refleja un control adecuado en su concentración.

Respecto al zinc (Zn) y el manganeso (Mn), ambos metales esenciales en bajas concentraciones, pero potencialmente dañinos en exceso, los resultados indican que sus

niveles están dentro de los márgenes seguros establecidos por el Acuerdo Ministerial 097A.

Asimismo, el níquel (Ni) y el cromo (Cr), metales que pueden representar riesgos para el ambiente, también cumplen con los límites máximos permisibles, lo que confirma que no representan un peligro en las condiciones actuales.

4.2.4 Cálculo del ICA

En la siguiente tabla se detallan los parámetros utilizados para el cálculo del Índice de Calidad de Agua (ICA) basado en la metodología NSF (National Sanitation Foundation). Este índice permitió evaluar el estado de la calidad del agua en los diferentes puntos de muestreo.

Los resultados indican que la mayoría de los puntos analizados presentan una calidad de agua clasificada como buena, lo que refleja un cumplimiento satisfactorio de los estándares establecidos. Sin embargo, se identificó que los puntos 12, 13, 21, 22, 26 y 29 muestran una calidad de agua media, lo que sugiere la presencia de ciertos factores que podrían estar afectando negativamente su condición, como posibles fuentes de contaminación o alteraciones en los parámetros físicos, químicos o biológicos.

Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar medidas de monitoreo y control más específicas en dichos puntos para prevenir un mayor deterioro y garantizar la preservación del recurso hídrico.

Tabla 20: Resultados del cálculo del índice de calidad del agua (ICA)

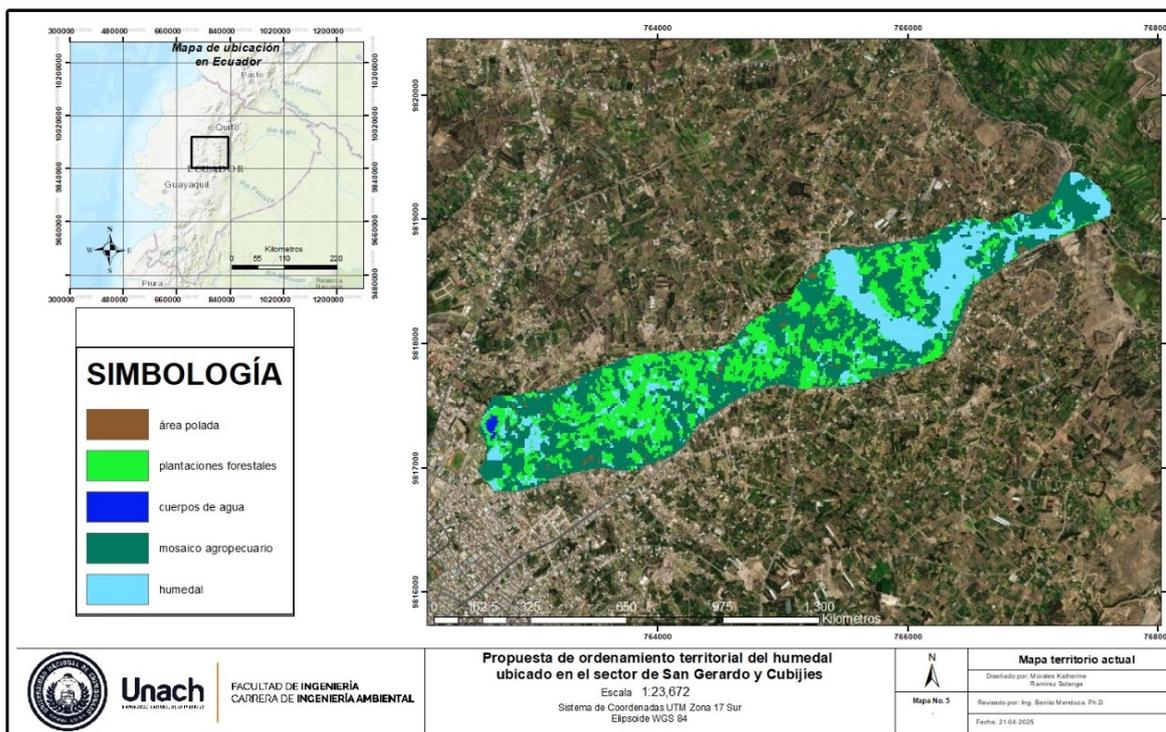
Puntos de muestreo	Parámetros										Calificación	
	pH	DBO	OD	Turbidez	Nitrato	Fosfatos	Coliformes fecales	Sólidos totales	Temperatura	ICA		
P 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 2	8,05	10	100,4	3,28	0,9	0,09	27	974,10	3,3	74,97	Buena	
P 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 8	7,89	3,5	101,4	1,87	1	0,11	25	987,87	0,9	80,2	Buena	
P 9	7,87	3	100,4	2,36	0,4	0,13	31	986	1	79,91	Buena	
P 10	8,29	5,5	108,2	2,65	1,1	0,08	31	977,87	3,7	75,42	Buena	
P 11	8,12	18	112,9	4,53	0,8	0,21	0	976,60	2,2	77,82	Buena	

P 12	7,58	10,5	117,7	4,14	1,9	0,91	35	977,93	0,4	69,65	Media
P 13	8,19	10	107,5	2,38	2,3	0,37	77	984,70	1,8	70,39	Media
P 14	8,25	1	110,1	2,26	1,2	0,19	144	982,63	1,4	77,79	Buena
P 15	8,01	4	106	2,84	1	0,31	180	975,33	1,5	73,72	Buena
P 16	7,97	2,5	100,8	3,84	0,9	0,56	13	977	1,5	77,23	Buena
P 17	8,42	7	111,5	2,4	1,4	0,13	15	981,80	1,7	75,82	Buena
P 18	8,38	4	107,5	2,58	1,6	0,53	15	946,27	1,4	74,44	Buena
P 19	7,92	5,5	88,3	0,82	1,7	0,82	0	994,80	2,2	78,93	Buena
P 20	8,05	2,5	89,7	0,44	0,1	0,27	0	986,13	2	84,7	Buena
P 21	7,84	6,5	92,4	0,67	1,2	1,04	144	991,70	1,8	69,23	Media
P 22	7,59	13,5	47,5	1,53	0,8	0,54	2	981,97	2	67,02	Media
P 23	8,09	2,5	94,5	0,79	0,5	0,31	1	979,23	2,1	84,38	Buena
P 24	8,04	9	98,3	1,09	0,8	0,18	288	989,37	1,8	72,07	Buena
P 25	8,08	3,5	103,2	0,79	0,6	0,23	3	991,10	2,5	82,46	Buena
P 26	7,56	5	0	3,07	0,5	0,2	4	987,40	1,9	65,72	Media
P 27	7,66	9	83,5	0,63	0,5	0,26	0	989,60	1,4	81,59	Buena
P 28	7,65	10,5	82,1	0,36	0,4	0,31	1	1004,57	1,2	80,22	Buena
P 29	6,93	8	12,6	0,83	0,9	0,7	0	994,20	1,8	63,83	Media
P 30	7,46	24	88,3	4,02	1,7	0,54	3	988,53	1,6	73,16	Buena

Fuente: Autores.

4.3 Modelo actual del territorio

Figura 10: Mapa del territorio actual

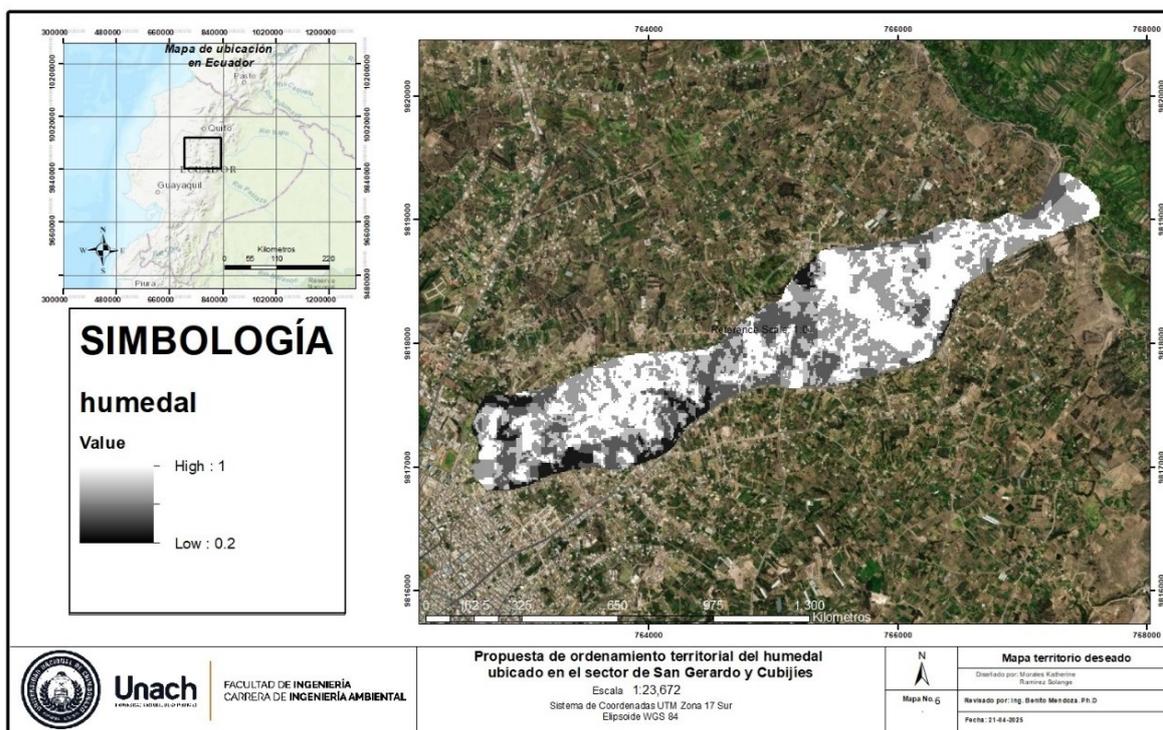


Fuente: Autores.

El análisis cartográfico del humedal San Gerardo-Cubijíes, basado en el método multicriterio, permitió identificar cinco categorías principales: área poblada (café), plantaciones forestales (verde), cuerpos de agua (azul), mosaico agropecuario (verde) y humedal (celeste). Del total del área analizada, se observó que una proporción significativa del humedal se encuentra en coexistencia con actividades agropecuarias, lo cual evidencia una fragmentación progresiva del ecosistema natural. Las zonas clasificadas como humedal se distribuyen de forma intermitente, lo que podría estar relacionado con procesos de degradación y cambios en el uso del suelo. Esta información es fundamental para delimitar las zonas prioritarias de conservación y orientar el plan de ordenamiento territorial.

4.4 Modelo deseado del territorio

Figura 11: Mapa del territorio deseado.



Fuente: Autores.

El análisis espacial del humedal, representado en la figura 11, evidencia una distribución significativa entre los colores negro, plomo y blanco. Evidenciando que existe una gran extensión de terreno de color negro, zonas que deberían ser consideradas como áreas de conservación prioritaria, este sector podría representar una alta vegetación natural, suelos con alta capacidad de retención hídrica, además de ser el hábitat de varias especies tanto de flora y fauna.

Para el caso de los colores plomo y blanco estas son zonas que corresponden a áreas que ya han sido objeto de intervención antrópica, lo cual ha modificado significativamente su estado natural. Durante los recorridos de campo y mediante el análisis espacial, se evidenció la presencia de construcciones (viviendas, galpones, corrales), animales de pastoreo (principalmente ganado vacuno y ovino), así como cultivos de especies vegetales introducidas o agrícolas, lo que indica una transformación del paisaje original del humedal.

Discusión

El análisis multitemporal realizado sobre el humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijes evidencia transformaciones significativas en la cobertura y uso del suelo durante los periodos evaluados (2000, 2010 y 2020). Los resultados muestran una disminución progresiva en las áreas naturales del humedal, principalmente debido a la

expansión urbana y agrícola. Esto coincide con estudios previos realizados en otros humedales, donde se ha observado que las actividades humanas son uno de los principales factores de degradación.

Por ejemplo, la matriz de confusión para el periodo 2000 indica un índice Kappa de 89%, lo que refleja una precisión casi perfecta en la clasificación de las coberturas terrestres. Este índice mejora ligeramente en los periodos posteriores (2010 y 2020), alcanzando valores de 94% y 91%, gracias a la incorporación de datos satelitales más precisos y técnicas avanzadas de procesamiento.

En cuanto al cambio de uso del suelo, las áreas destinadas a cultivos y asentamientos humanos han aumentado significativamente, mientras que las zonas húmedas han disminuido. Este patrón es consistente con la tendencia observada en otros estudios realizados en humedales, donde el crecimiento poblacional y la falta de planificación territorial han generado impactos negativos en estos ecosistemas.

Los análisis fisicoquímicos realizados in situ y en laboratorio demuestran que la calidad de agua del humedal presenta variaciones significativas dependiendo de los puntos de muestreo evaluados. En general, los parámetros analizados cumplen con los estándares establecidos por la normativa vigente en algunos puntos, pero exceden los límites permisibles en otros.

En particular, se identificaron niveles elevados de contaminación en las zonas donde se realiza actividad agrícola intensiva y pastoreo. Esto se debe al aporte de nutrientes provenientes de fertilizantes y desechos orgánicos que ingresan al sistema hídrico. Además, la presencia de construcciones cercanas al humedal contribuye al deterioro de la calidad del agua.

El contraste entre el mapa actual y el mapa deseado evidencia la necesidad de un enfoque integral que articule las dimensiones ambiental, social y económica en la gestión territorial. La implementación de un modelo de ordenamiento sostenible no solo debe considerar la restauración ecológica, sino también el fortalecimiento de las capacidades comunitarias para la gestión de recursos y el aprovechamiento turístico responsable. Este proceso requiere la participación activa de la comunidad, el apoyo técnico de instituciones académicas como la UNACH y el compromiso de las autoridades locales para implementar políticas públicas que promuevan la sostenibilidad a largo plazo. Además, el monitoreo continuo y la evaluación periódica de los avances serán fundamentales para asegurar el cumplimiento de los objetivos planteados en el modelo deseado.

En última instancia, el reto radica en equilibrar el aprovechamiento de los recursos naturales con la conservación ambiental, impulsando estrategias que fomenten el desarrollo económico sin comprometer el bienestar de las futuras generaciones. El mapa deseado no solo representa una visión de restauración ecológica, sino también una oportunidad para transformar el territorio en un referente de gestión sostenible que promueva la armonía entre el ser humano y la naturaleza.

Los resultados cartográficos revelan un patrón preocupante de ocupación del territorio, donde el humedal, pese a estar identificado como una unidad ecológica clave, convive con usos productivos que comprometen su integridad ecológica. El avance de las áreas agropecuarias, junto con la expansión de plantaciones forestales, indica una falta de planificación que contemple la fragilidad de este ecosistema. Esta superposición de usos genera una pérdida progresiva de servicios ecosistémicos, como la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono, y el mantenimiento de hábitats para especies nativas.

Además, la presencia de áreas pobladas dentro o en las cercanías del humedal sugiere una fuerte presión urbana, lo cual puede derivar en procesos de contaminación por aguas residuales, generación de desechos sólidos y fragmentación del hábitat.

Así también, gracias a las observaciones de campo y el análisis preliminar realizado, estas zonas marcadas de color negro son las que albergan vegetación nativa, suelos con alto contenido de materia orgánica y especies bioindicadoras que evidencian buenas condiciones ecológicas. Por lo que, desde el punto de vista funcional, estas áreas juegan un rol esencial en la regulación hídrica del sistema, ya que actúan como zonas de infiltración, almacenamiento temporal de agua y protección frente a eventos de escorrentía superficial. Además, su distribución a lo largo de todo el cuerpo del humedal permite mantener la conectividad ecológica, lo cual es crucial para el desplazamiento de especies y el mantenimiento de procesos biológicos.

Intervenir estas zonas traería como consecuencia la fragmentación del ecosistema, pérdida de biodiversidad, alteraciones en el ciclo del agua y una mayor vulnerabilidad frente a fenómenos como sequías o inundaciones. Por ello, se propone declarar estos sectores como zonas de conservación estricta y no intervención humana, dentro del plan de ordenamiento territorial, apoyándose en los principios de conservación preventiva y restauración ecológica. Además, se plantea la necesidad de diseñar e implementar políticas públicas específicas para la protección y manejo sostenible de humedales, que contemplen acciones de monitoreo ambiental, educación ambiental comunitaria y mecanismos de control frente a actividades que puedan alterar la funcionalidad ecológica del ecosistema. Estas políticas

deben ser construidas de manera participativa con las comunidades locales, garantizando tanto la conservación del humedal como el respeto a los modos de vida tradicionales compatibles con la sostenibilidad.

Asimismo, esta propuesta se encuentra alineada con la legislación ecuatoriana, específicamente que promueve la conservación de ecosistemas frágiles. Entre estos, se destacan el artículo 14 de la Constitución del Ecuador, los artículos 3 y 7 de la LORHUAA, el Código Orgánico del Ambiente en su Art. 84. Dichas normativas reconocen la importancia ecológica, hídrica y social de los humedales, y exigen su conservación para garantizar el derecho al buen vivir y la sostenibilidad ambiental.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se elaboró una propuesta de ordenamiento territorial para el humedal de San Gerardo y Cubijíes, basada en el análisis multitemporal del uso del suelo, la calidad del agua y el modelo actual del territorio. Se evidenció una progresiva intervención humana que afecta la funcionalidad del ecosistema. El análisis multicriterio permitió delimitar zonas prioritarias de conservación. Finalmente, se propuso un modelo territorial futuro que busca equilibrar la conservación del humedal con el desarrollo local sostenible.
- El análisis multitemporal realizado sobre el humedal ubicado en el sector de San Gerardo y Cubijíes permitió identificar transformaciones significativas en la cobertura y uso del suelo durante las últimas dos décadas. Los resultados evidencian una disminución progresiva de las áreas naturales del humedal, atribuida principalmente a la expansión de la frontera agrícola, el crecimiento urbano y la falta de un adecuado ordenamiento territorial. Los resultados obtenidos subrayan la importancia de integrar el análisis multitemporal como herramienta clave para la planificación territorial y la gestión ambiental. Este enfoque no solo contribuye a diagnosticar el estado actual del humedal, sino que también proporciona información fundamental para diseñar estrategias efectivas que aseguren su conservación a largo plazo.
- El análisis de la calidad del agua en el humedal revela una situación preocupante, influenciada por actividades humanas como la agricultura, expansión urbana y la falta de planificación territorial en los cantones de Guano y Riobamba. La contaminación agrícola, producto de cultivos de ciclo corto y pastoreo, junto con la expansión urbana que genera problemas estructurales, contribuyen significativamente al deterioro del agua. Esta degradación compromete las funciones ecosistémicas vitales del humedal, afectando la regulación hídrica y su capacidad para proveer agua, lo que demanda la implementación de medidas correctivas integrales, incluyendo la planificación territorial efectiva y estrategias de mitigación de la contaminación para asegurar la mejora y conservación de este recurso hídrico esencial.
- Gracias al método multicriterio se pudo evidenciar la presión antrópica sobre el humedal en la actualidad, principalmente por actividades agropecuarias y

asentamientos humanos. Se concluye que es necesario aplicar un ordenamiento territorial basado en la zonificación ambiental para proteger las áreas naturales remanentes y restaurar zonas degradadas. Este enfoque permitirá equilibrar el desarrollo local con la conservación de los ecosistemas. La información generada es clave para la toma de decisiones en la gestión ambiental del territorio.

- El modelo actual del humedal permitió identificar que aún conservan su integridad ecológica, por lo que se ve necesario declararlas como áreas de conservación estricta. Estas zonas deben quedar libres de intervención humana y contar con políticas públicas que garanticen su protección dentro del plan de ordenamiento territorial. Su conservación es clave para mantener los servicios ecosistémicos del humedal y prevenir su degradación. Además, estas áreas pueden convertirse en núcleos de restauración ecológica a largo plazo.

5.2 Recomendaciones

- Para el análisis multitemporal con imágenes satelitales, es recomendable que dichas imágenes tengan la misma resolución para cada periodo de tiempo, de lo contrario, esto hará que la clasificación presente confusiones y más porcentaje de error. Fue necesario comprender las causas subyacentes de los cambios identificados, por ello se consideraron factores como la urbanización, la deforestación, las prácticas agrícolas, alteraciones en el uso y cobertura de la tierra, ya que entendiendo que están zonas se han destinado para diferentes usos en el tiempo para interpretar correctamente tus resultados.
- Es crucial considerar el momento en que se recolectan las muestras de agua, ya que las condiciones hidrológicas variables pueden influir significativamente en los resultados del análisis. En el estudio, la dificultad para obtener muestras representativas en ciertas áreas del humedal durante la temporada seca resalta la importancia de planificar los muestreos en diferentes épocas del año. Se recomienda establecer un protocolo de muestreo que incluya mediciones en ambas temporadas (seca y lluviosa) para capturar la variabilidad hidrológica y garantizar una evaluación más completa y precisa de la calidad del agua en el humedal a lo largo del tiempo.
- La conservación del humedal no puede lograrse de manera efectiva sin la implicación activa de las comunidades locales. Por ello, se recomienda desarrollar programas de educación ambiental y talleres de capacitación dirigidos a los habitantes del sector, enfocados en el valor ecológico del humedal, las prácticas sostenibles de uso del

suelo y el manejo responsable de recursos naturales. Además, se sugiere establecer mecanismos de co-gestión entre autoridades locales, comunidades y actores sociales, donde se reconozca el conocimiento ancestral y se promueva la corresponsabilidad en la toma de decisiones.

- Es fundamental que los gobiernos locales, en coordinación con entidades ambientales, formulen e implementen políticas públicas específicas para la conservación del humedal de San Gerardo y Cubijies. Estas políticas deben estar sustentadas en la zonificación ambiental establecida en este estudio, delimitando claramente las zonas de conservación estricta, restauración y uso sostenible. Asimismo, deben incluir mecanismos de regulación y control del uso del suelo, evitando nuevas intervenciones en áreas sensibles, y promoviendo alternativas productivas compatibles con la conservación del ecosistema. La implementación de estas políticas permitirá proteger los servicios ecosistémicos del humedal, garantizar su resiliencia frente al cambio climático y cumplir con los principios constitucionales del derecho a un ambiente sano.

BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWW, & WPCF. (1989). *Standard Methods* (Diaz de Santos, Ed.; 17th ed.). 1992.
- Ariza, A. (2013). *Descripción y corrección de productos landsat 8 LDCM*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21308.44167>
- Berlanga, V., Rubio, M., & Vilá, R. (2019). *Cómo aplicar árboles de decisión en SPSS*.
<https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/43762>
- Breiman, L. (1999). *RANDOM FORESTS-RANDOM FEATURES*.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Delninger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). *A water quality index do-we dare?*
- Buzai, G. D., Montes Galbán, E., Buzai, G. D., & Montes Galbán, E. (2020). Megaciudad Buenos Aires: Cartografía de su última expansión y conurbación mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales nocturnas. *Revista Cartográfica*, 100, 215–238. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i100.667>
- Caiza, E. P., & Serrano, N. P. (2017). *PROPUESTA DE UN MODELO DE MONITOREO PARA DEFINIR LA CALIDAD HÍDRICA DE ECOSISTEMAS -HUMEDALES, EN EL PARQUE NACIONAL COTOPAXI LAGUNA DE LIMPIOPUNGO*.
- Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J. M., Balderas-Plata, M. Á., & Sánchez-López, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: Estudio de caso en progreso hidalgo, estado de México. *Madera Bosques*, 23(3), 39–60.
<https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331516>
- Cardozo, O. D., Vera R G Godoy, C. A., Daniel Cardozo Adjunto, O., Andrés Vera, C., & Gabriela Godoy, R. (2020). *CHANGE DETECTION OF LAND COVER IN THE GREAT RESISTENCIA BETWEEN 1990 AND 2020*.
- Cerda, J., & Villaroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1).
<https://doi.org/10.4067/S0370-41062008000100008>
- Chávez González, H., De Jesús González Guillén, M., & Hernández De La Rosa, P. (2015). *Ensayo Técnico / Technical Essay Metodologías para identificar áreas prioritarias para conservación de ecosistemas naturales Methodologies to find priority areas for the conservation of natural ecosystems*.
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46.
<https://doi.org/10.1177/001316446002000104>

- Congalton, R. G. (2001). Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International Journal of Wildland Fire*, 10(4), 321. <https://doi.org/10.1071/WF01031>
- Esaú, U., Gallegos, O., René Valdez Lazalde, J., Aldrete, A., González Guillén, M. D. J., Gil, Y., & Castillo, V. (2007). ÁREAS CON APTITUD PARA ESTABLECER PLANTACIONES DE MAGUEY CENIZO: DEFINICIÓN MEDIANTE ANÁLISIS MULTICRITERIO Y SIG SUITABLE AREAS FOR ESTABLISHING MAGUEY CENIZO PLANTATIONS: DEFINITION THROUGH MULTICRITERIA ANALYSIS AND GIS. In *Artículo Científico Rev. Fitotec. Mex* (Vol. 30, Issue 4).
- Farnum, F., & Murillo, V. (2019). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL (1970-2017) DEL USO DEL SUELO EN CINCO COMUNIDADES UBICADAS A LO LARGO DE LA CARRETERA BOYD ROOSEVELT, PANAMÁ*.
- Fátima Medina Merino, R., & Ismelda Ñique Chacón, C. (2017). *INTERFASES* Pág. 165. <https://www.kaggle.com/primaryobjects/voicegender>
- Flórez-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate-Alvarez, A. M. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA (Colombia)*, 84(201), 95–101. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>
- Geijzendorffer, I. R., Beltrame, C., Chazee, L., Gaget, E., Galewski, T., Guelmami, A., Perennou, C., Popoff, N., Guerra, C. A., Leberger, R., Jalbert, J., & Grillas, P. (2019). A more effective Ramsar convention for the conservation of Mediterranean Wetlands. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7(FEB). <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00021>
- González, V., Ciacedo, O., & Aguirre, N. (2013). *Aplicación de los índices de calidad de agua NSF, DINIUS y BMWP en la quebrada La Ayurá*.
- González Soto, F., Ullón, D., Yaguachi Alarcón, A. L., Ramos Alcivar, J. A., Montenegro Benalcázar, V. E., & Loján Córdova, J. I. (2024). Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo en la isla Santa Cruz, archipiélago de las Galápagos, periodo 1991 - 2023. *Ciencia y Tecnología*, 17(1), 1–9. <https://doi.org/10.18779/cyt.v17i1.521>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

- Guerrero, O. A., Camargo Mora, M. G., & Idrovo Torres, B. (2022). Caracterización y clasificación geo ecológica y ambiental: humedales altoandinos de la provincia de Loja-Ecuador. *AXIOMA*, 1(26), 19–28. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i26.742>
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., & Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 80, pp. 91–106). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>
- INEGI. (2015). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/usosuelo/metadatos/guia_interusos_uelov.pdf
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 169:98 AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS. (1998).
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2176:1998 AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS DE MUESTREO. (1998).
- Jaramillo, L. V., & Antunes, A. F. (2018). Change detection in vegetation cover through interpretation of Landsat images by artificial neural networks (ANN). case study: Ecuadorian Amazon Region. *Revista de Teledeteccion*, 2018(51), 33–46. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8995>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Long, T., Zhang, Z., He, G., Jiao, W., Tang, C., Wu, B., Zhang, X., Wang, G., & Yin, R. (2019). 30m resolution global annual burned area mapping based on landsat images and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/rs11050489>
- Masud, M. M. (2019). *Conservation of Marine Resources and Sustainable Coastal Community Development in Malaysia*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9730-1>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2019). *PLAN NACIONAL PARA LA*.
- Moomaw, W., Chmura, G., Davies, G., Finlayson, C., Middleton, B., Natali, S., Perry, J., Roulet, N., & Sutton-Grier, A. (2018). Wetlands In a Changing Climate: Science, Policy and Management. In *Wetlands* (Vol. 38, Issue 2, pp. 183–205). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s13157-018-1023-8>
- Municipio de Riobamba. (2023). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*.

- Nations Food and Agriculture Organization of the United. (2016). Map Accuracy Assessment and Area Estimation Map Accuracy Assessment and Area Estimation : A Practical Guide. *National Forest Monitoring Assessment Working Paper, No.46/E(46)*.
- Nicolau Puzzi, A., Dyson, K., Saah, D., & Clinton, N. (2011). *Capítulo F2 . 1 : Interpretación de una imagen : clasificación*.
- Núñez, C., & Madero, E. (2009). *Changes of the coverage of three wetland areas in Cauca Valley*.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment, 148*, 42–57. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.02.015>
- Rodríguez, A., Rubiano, Y., Gutierrez, A., Bernal, J., Rodríguez, N., Arguello, O., & Pulido, S. (2013). *COBERTURA VEGETAL Y USOS DEL SUELO DE LA ALTILLANURA PLANA DE LOS MUNIICPIOS DE PUERTO LÓPEZ Y PUERTO GAITÁN, META Escala 1:25.000*. www.corpoica.org.co
- Rojas, C., Pérez, U., & Fernández, F. (2019). Spatiotemporal dynamics of the processes of desertification and natural revegetation in the dry enclave of la Tatacoa, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 28(1)*, 134–151. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.63130>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2023). *Guía para la formulación/actualización de Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial-PDOT*.
- Singh, A. (1989). Review Article: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing, 10(6)*, 989–1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>
- Soria, M. V., & Matar, M. A. (2016). *Nociones Sobre Teledeteccion*. 1–79.
- Stehman, S. V. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment, 62(1)*, 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00083-7)
- Sudmanns, M., Tiede, D., Lang, S., Bergstedt, H., Trost, G., Augustin, H., Baraldi, A., & Blaschke, T. (2020). Big Earth data: disruptive changes in Earth observation data management and analysis? In *International Journal of Digital Earth* (Vol. 13, Issue 7, pp. 832–850). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1585976>

- Superintendencia de Ordenamiento Territorial, U. y G. del S. (2024). *ORDENAMIENTO TERRITORIAL, USO Y GESTIÓN DEL SUELO RURAL*.
<https://www.sot.gob.ec/detalle/4/4/esp>
- The European Space Agency. (2015, June 17). *SENTINEL 2*.
- Trujillo, J., Caballero, E., & Ramón, D. (2019). DETERMINATION OF THE CONCENTRATIONS OF HEAVY METALS PRESENT IN THE PARTICULAR MATERIAL PM 10 OF THE MUNICIPALITY OF SAN. *REVISTA AMBIENTALAGUA, AIRE Y SUELO*. <http://www.unipamplona.edu.co/>
- Vázquez, L., Correa, A., Vargas, R., Vázquez, M., & Rodríguez, J. (2021). Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina. *Revista de Estudios Sociales*, 16(64).
<https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>
- Villanueva, T., Quispe, G., Chui, H., & Pérez, K. (2023). *EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LAS*.
- Zhang, L., Wu, J., Fan, Y., Gao, H., & Shao, Y. (2020). An efficient building extraction method from high spatial resolution remote sensing images based on improved mask R-CNN. *Sensors (Switzerland)*, 20(5). <https://doi.org/10.3390/s20051465>

ANEXOS

Anexo 1.

Recolección de muestras de agua en el humedal.



Anexo 2.

Análisis in-situ de las muestras de agua.



Fuente: Autores.

Anexo 3.

Análisis de aguas realizados en el laboratorio de ciencias ambientales.



Fuente: Autores.

Anexo 4.

Análisis de metales pesados realizados en el espectrofotómetro de absorción atómica.



Fuente: Autores.

Anexo 5.

Como parte de la evaluación de la calidad del agua en el humedal, se realizó un análisis fisicoquímico exhaustivo de las muestras recolectadas en los 30 puntos de muestreo establecidos, revelando los siguientes datos sobre las condiciones del agua.

Puntos de muestreo	Parámetros								
	pH	DBO	OD	Turbidez	Nitratos	Fosfatos	Coliformes fecales	Solidos totales	Temperatura
Unidad	-	mg/L	%	NTU	mg/L	mg/L	-	ml	°C
P 1									
P 2	8,05	10	100,4	3,28	0,9	0,09	27	974,10	3,3
P 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P 8	7,89	3,5	101,4	1,87	1	0,11	25	987,87	0,9
P 9	7,87	3	100,4	2,36	0,4	0,13	31	986	1
P 10	8,29	5,5	108,2	2,65	1,1	0,08	31	977,87	3,7
P 11	8,12	18	112,9	4,53	0,8	0,21	0	976,60	2,2
P 12	7,58	10,5	117,7	4,14	1,9	0,91	35	977,93	0,4
P 13	8,19	10	107,5	2,38	2,3	0,37	77	984,70	1,8
P 14	8,25	1	110,1	2,26	1,2	0,19	144	982,63	1,4
P 15	8,01	4	106	2,84	1	0,31	180	975,33	1,5
P 16	7,97	2,5	100,8	3,84	0,9	0,56	13	977	1,5
P 17	8,42	7	111,5	2,4	1,4	0,13	15	981,80	1,7
P 18	8,38	4	107,5	2,58	1,6	0,53	15	946,27	1,4
P 19	7,92	5,5	88,3	0,82	1,7	0,82	0	994,80	2,2
P 20	8,05	2,5	89,7	0,44	0,1	0,27	0	986,13	2
P 21	7,84	6,5	92,4	0,67	1,2	1,04	144	991,70	1,8
P 22	7,59	13,5	47,5	1,53	0,8	0,54	2	981,97	2
P 23	8,09	2,5	94,5	0,79	0,5	0,31	1	979,23	2,1
P 24	8,04	9	98,3	1,09	0,8	0,18	288	989,37	1,8
P 25	8,08	3,5	103,2	0,79	0,6	0,23	3	991,10	2,5
P 26	7,56	5	0	3,07	0,5	0,2	4	987,40	1,9
P 27	7,66	9	83,5	0,63	0,5	0,26	0	989,60	1,4
P 28	7,65	10,5	82,1	0,36	0,4	0,31	1	1004,57	1,2
P 29	6,93	8	12,6	0,83	0,9	0,7	0	994,20	1,8
P 30	7,46	24	88,3	4,02	1,7	0,54	3	988,53	1,6

Fuente: Autores.

Anexo 6.

La siguiente tabla presenta las concentraciones de metales detectadas en cada punto de muestreo. Es importante destacar que todos los valores se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la normativa vigente.

Puntos de muestreo	Metales											
	Aluminio mg/L		Arsénico mg/L		Cinc mg/L		Manganeso mg/L		Níquel		Cromo	
	Valor obtenido	Límite máximo permisible										
P1	-		-		-		-		-		-	
P 2	0,000132		2,78E-04		9,54E-05		9,53E-05		7,41E-05		4,64E-05	
P 3	-		-		-		-		-		-	
P 4	-		-		-		-		-		-	
P 5	-		-		-		-		-		-	
P 6	-		-		-		-		-		-	
P 7	-		-		-		-		-		-	
P 8	6,58E-05		9,97E-04		0,000112		0,00011		0,0002		2,31E-05	
P 9	0,000125		2,52E-04		0,000105		0,00010		0,00016		4,71E-05	
P 10	6,62E-05		1,97E-03		0,000782		0,00078		0,000208		4,63E-05	
P 11	5,73E-05	5,0 mg/L	0,000820	0,1 mg/L	7,86E-05	2,0 mg/L	7,85E-05	0,2 mg/L	0,000109	0,2 mg/L	2,86E-05	0,2 mg/L
P 12	0,000344		0,000815		0,003026		0,00303		7,26E-05		6,75E-05	
P 13	6,17E-05		3,25E-03		0,000428		0,00043		0,000105		4,33E-05	
P 14	0,000327		4,03E-05		0,000209		0,00021		0,000171		2,54E-05	
P 15	7,95E-05		0,001366		0,00012		0,00012		4,3E-06		5,29E-05	
P 16	4,99E-05		0,002778		0,001025		0,00103		0,000227		6,81E-05	
P 17	1,17E-05		0,002825		0,000873		0,00087		7,91E-05		8,73E-05	
P 18	0,000235		0,001832		0,001157		0,00116		0,00019		2,41E-05	
P 19	0,000123		0,002688		0,000313		0,00031		3,81E-05		0,00011	
P 20	0,000184		0,004313		0,000481		0,00048		0,000133		4,94E-05	
P 21	9,07E-05		0,001566		0,000149		0,00015		5,71E-05		6,88E-05	

P 22	0,000119	7,34E-05	0,000176	0,00018	0,000148	1,64E-05
P 23	0,000217	1,49E-05	0,000125	0,00012	7,28E-05	4,72E-05
P 24	6,7E-05	0,002615	0,00033	0,00033	8,42E-05	7,88E-05
P 25	8,86E-05	0,002976	0,000708	0,00071	0,000121	8,08E-05
P 26	0,000158	0,000205	0,000274	0,00027	0,000114	6,79E-05
P 27	0,000124	7,91E-05	8,26E-05	8,26E-05	3,3E-05	0,00013
P 28	0,000132	0,001839	0,000275	0,00027	0,00017	9,07E-05
P 29	0,000234	0,002912	0,000277	0,00028	7,13E-05	7,52E-05
P 30	0,000161	0,001386	0,000302	0,00030	0,000124	0,00014

Fuente: Autores.