

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y ZOOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



TESIS

**COMPORTAMIENTO HIDRICO Y VARIACIÓN SUPERFICIAL DEL
HUMEDAL ALTOANDINO DE LA MICROCUENCA ALAYRIPAMPA,
CORDILLERA VILCANOTA, EN LOS AÑOS 2020 - 2021**

PRESENTADO POR:

Br. MIGUEL CHRISTIAN VARGAS VALVERDE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

ASESOR:

Mg. NILTON MARIANO MONTOYA JARA

CUSCO - PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Nilton Mariano Montoya Jara
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada:
Comportamiento hídrico y Variación Superficial
del humedal altoandino de la microcuenca Abagrepampa,
Cordillera Vilcanota, en los años 2020 - 2021

Presentado por: Miguel Christian Vargas Valverde DNI N° 74090170 ;
presentado por: DNI N°:

Para optar el título Profesional/Grado Académico de
Ingeniero Agrónomo

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2da veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 03 de Noviembre de 2025.....


.....
Firma

Post firma Nilton Mariano Montoya Jara

Nro. de DNI 23279191

ORCID del Asesor 0000-0002-4147-2579

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:522144535

Miguel Vargas

Tesis_2025_Miguel Vargas F_obs.pdf



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:522144535

Fecha de entrega

3 nov 2025, 7:36 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

3 nov 2025, 7:48 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis_2025_Miguel Vargas F_obs.pdf

Tamaño del archivo

7.6 MB

118 páginas

19.845 palabras

118.291 caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de fuente excluida

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por guiarme en cada paso y brindarme la inspiración para completar este trabajo.

A mis padres, Miguel Vargas y Maribel Valverde, mis abuelitos Miguel y Elsa por su amor incondicional, apoyo constante, enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia que han marcado en mí, las ganas de seguir adelante.

A mi hermano, Gabriel quien todos estos años es la motivación y ganas de seguir aprendiendo.

A mi familia, primos, tíos que en todo momento siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder lograr mis objetivos.

Para todos los amigos, personas que con sus consejos, experiencias y compañía hicieron posible este trabajo de investigación.

Miguel Christian Vargas Valverde

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Escuela Profesional de Agronomía.

A los asesores del presente trabajo de investigación, al Mgt. Nilton Montoya y Mgt. Joshua Castro, por el compromiso con este estudio, su conocimiento e incesante ánimo que me ha permitido poder concluir este trabajo de investigación.

Al Fondo Newton – Paulet, NERC y CONCYTEC, a través de su unidad ejecutora ProCiencia por el proyecto RAHU: Seguridad hídrica y adaptación al cambio climático en las cuencas Hidrográficas de los glaciares peruanos” con el contrato N° 005-2019-FONDECYT, por el desarrollo de actividades que han permitido la realización de este trabajo de investigación.

Al Dr. Carlos Baca por los consejos brindados y al Grupo de Estudios en Ingeniería de Riego e Hidrología, por las experiencias y conocimiento adquirido.

A la institución Estrategias Participativas para el Desarrollo Sostenible – EPDS, por a lo largo de estos años confiar en mi trabajo y brindarme el conocimiento necesario para poder afrontar los retos profesionales que vienen.

El Autor

ÍNDICE

RESUMEN	IX
INTRODUCCION	X
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Formulación del problema	2
1.1.1. Problema general.....	2
1.1.2. Problemas específicos	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación.....	4
II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Marco conceptual	5
2.1.1. Sensoramiento remoto	5
2.1.2. Sistemas de teledetección	6
2.1.3. Radiación electromagnética	6
2.1.4. Bandas espectrales.....	7
2.1.5. Constelación Sentinel	8
2.1.6. Misión Sentinel II	9
2.1.7. Google Earth Engine - GEE.....	9
2.1.8. Árboles de Decisión en Teledetección.....	9
2.1.9. Ecosistemas de montaña.....	10
2.1.10. Bofedales.....	10
2.1.11. Índices espectrales	11
2.1.12. Sensor sónico Arduino. –.....	13
2.2. Bases teóricas	15
2.2.1. Criósfera	15
2.2.2. Glaciar	15
2.2.3. Cuenca Glaciar	15
2.2.4. Microcuenca.....	16
2.2.5. Zona de recarga de la cuenca.....	16
2.2.6. Zona de descarga de la cuenca	16
2.2.7. Cambio climático.....	17
2.2.8. Definición y características de bofedales	17
2.2.9. Importancia de bofedales en la regulación del ciclo hidrológico	18
2.2.10. Cambios en los bofedales debido al cambio climático.....	18

2.2.11. Características geográficas y climáticas de la Microcuenca Alayripampa:.....	19
2.3. Antecedentes de la investigación	20
2.3.1. Comportamiento hidrológico de bofedales	20
III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	28
3.1. Ámbito de estudio	28
3.1.1 Ubicación política	28
3.1.2 Ubicación geográfica.....	28
3.1.3 Ubicación hidrográfica.....	29
3.1.4 Ubicación temporal	29
3.2. Nivel y tipo de investigación.....	31
3.2.1. Nivel de investigación.....	31
3.2.2. Tipo de investigación	31
3.2.3. Diseño de investigación	31
3.3. Unidad de análisis	32
3.4. Población de estudio	32
3.5. Tamaño de la muestra.....	32
3.6. Límites de la investigación.....	32
3.7. Materiales.....	33
3.7.1. Fase de campo	33
3.7.2.Fase de gabinete	35
3.8. Descripción de la metodología.....	35
3.8.1. Sensoramiento remoto	37
3.8.2. Evaluación de campo	43
3.8.3. Análisis de relación entre la variación superficial y nivel freático de los humedales altoandinos de la microcuenca Alayripampa.....	47
IV. RESULTADOS	48
4.1 Características generales de la cuenca	48
4.1.1. Delimitación.....	48
4.1.2. Parámetros generales	49
4.2. Clasificación de la superficie Bofedal/Humedal.....	54
4.2.1. Colección de imágenes satelitales	54
4.2.2. Árbol de decisiones.....	56
4.2.3. Corrección	59
4.2.4. Validación	64
4.2.5. Variación superficial de bofedales.....	65
4.3. Características hidrológicas del Bofedal Alayripampa.....	68
4.3.1. Información mensual	68

4.4. Relación entre el comportamiento hidrológico y la variación de la superficie Bofedal/Humedal	69
4.4.1. Comportamiento mensual	69
4.5. Correlación entre las variables evaluadas	71
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
5.1. CONCLUSIONES	74
5.2. RECOMENDACIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA	78
PANEL FOTOGRAFICO	83
ANEXOS.....	86
ANEXO 01. CODIGO GOOGLE EARTH ENGINE	86
ANEXO 02. CODIGO CONTROL DE DATOS RSTUDIO.....	89
ANEXO 03. CODIGO ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE NIVEL FREÁTICO Y ÁREA DE BOFEDAL	92
ANEXO 04. LISTA DE IMÁGENES UTILIZADAS EN EL SENSORAMIENTO REMOTO	94
ANEXO 05. DETALLE DE ENMASCARAMIENTOS MENSUALES 2020	96
ANEXO 06. DETALLE DE ENMASCARAMIENTOS MENSUALES 2021	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros generales de la cuenca	49
Tabla 2. Numero de imágenes satelitales por mes en cada año.	54
Tabla 3. Parámetros del árbol de decisión aplicado para la clasificación de enmascaramientos de bofedal	56
Tabla 4. Corrección de área bofedal 2020.....	61
Tabla 5. Corrección de área bofedal 2021.....	63
Tabla 6. Validación AcATaMa de áreas.....	64
Tabla 7. Comparativa con el Inventario Nacional de Bofedales.....	67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Radiación Electromagnética.....	7
Figura 2. Reflectancia de diferentes cuerpos.	7
Figura 3. Índices espectrales.....	13
Figura 4. Representación gráfica de Sensor Sonico Arduino	13
Figura 5. Mapa de ubicación de la microcuenca Alayripampa.	30
Figura 6. Metodología empleada en el trabajo de investigación.....	37
Figura 7. Árbol de decisiones para la clasificación de coberturas.	39
Figura 8. Desarrollo de enmascaramientos Google Earth Engine.	41
Figura 9. Mapa de ubicación de sensores sónicos Arduino.	44
Figura 10. Representación gráfica del modelo digital de elevación DEM.....	48
Figura 11. Representación espacial de la delimitación de la microcuenca.....	50
Figura 12. Representación de pendientes en la microcuenca Alayripampa	50
Figura 13. Clasificación de cursos de agua de la microcuenca	52
Figura 14. Mapa topográfico de la microcuenca Alayripampa.....	53
Figura 15. Resultados enmascaramientos del árbol de decisiones.	57
Figura 16. Representación del proceso de corrección del enmascaramiento.	59
Figura 17. Área bofedal depurada – 2020.	61
Figura 18. Área bofedal depurada – 2021	63
Figura 19. Área bofedal 2020 – 2021.	66
Figura 20. Comparativa con el Inventario Nacional de Bofedales	67
Figura 21. Nivel freático de bofedal 2020 – 2021.	68
Figura 22. Comportamiento mensual del bofedal 2020.	69
Figura 23. Comportamiento mensual del bofedal 2021.	70
Figura 24. Correlación Nivel freático / Área bofedal 2020	71
Figura 25. Correlación Nivel freático / Área bofedal 2021	72

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Bofedales del centro del Perú	11
Fotografía 2. Fotografía aérea de la cuenca	28
Fotografía 3. Fotografía de bofedales saturados de la microcuenca Alayripampa. 29	
Fotografía 4. Fotografía de Sensor Sonico Arduino instalado en la microcuenca Alayripampa	34
Fotografía 5. Fotografía realizando colecta de datos del sensor	43
Fotografía 6. Instalación de sensor en bofedales de la microcuenca Alayripampa. 46	
Fotografía 7. Fotografía de la parte alta de la microcuenca Alayripampa	49
Fotografía 8. Fotografía de bofedales en el lado este de la cuenca	58

RESUMEN

Este estudio analiza el comportamiento hídrico del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, en la Cordillera Vilcanota, durante 2020 y 2021. Se evaluó la variación de la superficie del bofedal mediante imágenes satelitales y su relación con el nivel freático, registrado por sensores instalados en campo. Se aplicó un algoritmo de clasificación basado en un árbol de decisiones en Google Earth Engine, que evidenció fluctuaciones significativas influenciadas por el régimen hídrico estacional.

En enero de 2020, el área del bofedal fue de 587.47 ha, disminuyendo a 370.69 ha en 2021; sin embargo, en febrero de ese año alcanzó un máximo de 1056.19 ha. El monitoreo mostró una fuerte relación entre la extensión del bofedal y el nivel freático, medido como la distancia entre el sensor y el espejo de agua. En 2020 fue altamente significativa ($R = -0.965$), indicando que una mayor superficie inundada corresponde a una menor distancia al agua, es decir, mayor disponibilidad hídrica. En los meses secos, como agosto, esa distancia aumentó, reflejando menor contenido de agua. En 2021, la relación fue débil y no significativa ($R = 0.371$), posiblemente debido a condiciones meteorológicas atípicas o errores en la clasificación.

En conjunto, los resultados muestran que los bofedales son ecosistemas dinámicos y sensibles a las variaciones climáticas, con un comportamiento temporal caracterizado por marcadas fluctuaciones estacionales y variabilidad interanual.

Palabras clave: Bofedales, Teledetección, Hidrología, ecosistemas.

INTRODUCCION

La variación superficial de los humedales altoandinos o bofedales están íntimamente ligada a los cambios climáticos y a las dinámicas de almacenamiento y liberación de agua. Esto se puede demostrar mediante imágenes de alta resolución, como las obtenidas por la misión Sentinel-2, que han permitido capturar las fluctuaciones en la cobertura de agua, lo que contribuye a una mejor comprensión de los procesos hidrológicos que ocurren en estos sistemas.

Este trabajo de investigación presentado, involucra variables que corresponden al análisis de sensoramiento remoto a través de imágenes multiespectrales obtenidas del satélite Sentinel 2, así como el monitoreo continuo durante dos años de los bofedales a través de sensores sónicos que realizan mediciones de nivel freático.

En el desarrollo de este estudio se han desarrollado diferentes puntos a través de algoritmos de clasificación, árbol de decisiones y corrección de valores, para poder obtener información de primera mano, así como el control de datos y procesamiento de información hidrológica obtenida por los sensores sónicos Arduino instalados en campo.

Se han encontrado resultados importantes para la identificación, monitoreo y evaluación de bofedales, con la ayuda de métodos indirectos y sensoramiento remoto, validados y correlacionados con información recopilada en campo. Todos estos datos servirán para demostrar la calidad de información obtenida por sensores remotos, para así poder realizar el análisis de estos ecosistemas a mayor escala en cuencas de vital importancia para el desarrollo de las actividades del ser humano.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La degradación de grandes extensiones del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa genera alteraciones significativas en la disponibilidad y distribución del agua, afectando su capacidad de retención hídrica fundamental para el equilibrio ecológico local. En particular, la comunidad de Phinaya, asentada a 4,800 msnm en la Cordillera Vilcanota, viene sufriendo serios problemas relacionados a la disponibilidad hídrica por la degradación de los mismos.

Un aspecto clave para comprender esta problemática es la insuficiente identificación y monitoreo a escalas temporales detalladas, necesarias para capturar tanto los cambios acelerados debidos al calentamiento global como los patrones estacionales intrínsecos. Actualmente, no se dispone de información precisa sobre la dinámica temporal del humedal altoandino en la microcuenca Alayripampa, limitando la capacidad para diagnosticar su respuesta frente al cambio climático.

Además, la limitada evidencia científica acerca de la alta variabilidad estacional en la extensión y en la capacidad hidrológica del humedal dificulta la formulación de estrategias de conservación adaptadas a estas particularidades. Esta carencia de datos afecta la evaluación integral del impacto climático, imposibilitando la implementación de medidas adaptativas adecuadas a la rápida transformación de los ecosistemas altoandinos.

Por lo tanto, el desarrollo de estudios que revelen el comportamiento hidrológico y la variación superficial del humedal a escala mensual durante los años 2020 y 2021 resulta fundamental para mejorar la gestión y conservación de estos ecosistemas en el contexto del cambio climático global.

1.1. Formulación del problema

1.1.1. Problema general

- ¿Como se relaciona la variación superficial del área con el comportamiento hídrico del humedal altoandino en la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota a escala mensual en los años 2020 – 2021?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la variación mensual del área superficial del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota, ¿durante los años 2020 y 2021?
- ¿Cómo varía mensualmente el nivel freático en el humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa durante los meses de los años 2020 y 2021?
- ¿Qué relación existe entre la variación superficial y la variación del nivel freático del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa a escala mensual durante el periodo 2020–2021?

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo general*

- Analizar la relación entre la variación superficial del área y el comportamiento hídrico del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota, a escala mensual durante los años 2020 y 2021.

1.2.2. *Objetivos específicos*

- Determinar la variación mensual del área superficial del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota, entre los años 2020 y 2021.
- Determinar la variación mensual del área superficial del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota, entre los años 2020 y 2021.
- Determinar la variación mensual del área superficial del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota, entre los años 2020 y 2021.

1.3. Justificación

La investigación sobre el humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa resulta crucial ante las crecientes amenazas que enfrenta este ecosistema, altamente vulnerable a las variaciones climáticas recientes. Una limitante actual es la escasa disponibilidad de información detallada sobre la dinámica de este humedal específico, especialmente a escala mensual.

Este nivel de detalle permite comprender con mayor precisión los cambios estacionales en la extensión superficial y en la capacidad de retención y liberación de agua del humedal, funciones clave para la regulación hídrica en ambientes altoandinos.

Contar con datos de alta resolución temporal fortalecerá las acciones de monitoreo, conservación y mitigación de efectos ocasionados por el cambio climático en la microcuenca. Este estudio permitirá disponer de información precisa y continua sobre el comportamiento mensual del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, facilitando la comprensión de su interacción con otros ecosistemas de montaña y su papel en la provisión de servicios ecosistémicos esenciales.

La información generada en este trabajo es fundamental para fortalecer la toma de decisiones sobre la gestión de recursos naturales y para diseñar políticas públicas que respondan de forma adecuada a las particularidades del humedal altoandino de la microcuenca, contribuyendo al conocimiento científico y al mejor entendimiento del ecosistema. Al entender cómo cambia el humedal a lo largo del año, se podrán diseñar estrategias más efectivas y sostenibles para garantizar la seguridad hídrica frente al cambio climático.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

2.1.1. *Sensoramiento remoto*

Campaña-Olaya & Tafu (2021), menciona que el sensoramiento remoto y teledetección es una técnica que permite la obtención de información sobre la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo. Se basa en el uso de sensores instalados en satélites o aeronaves para captar imágenes y datos sobre la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos en la Tierra. Estas imágenes se procesan para extraer información clave, como la identificación de cuerpos de agua, el monitoreo de cambios ambientales, o la detección de fenómenos como la sequía. Los índices espectrales como el NDII y NDWI son herramientas derivadas de la teledetección que facilitan el análisis de la cobertura vegetal y del agua en áreas específicas, ayudando en la gestión ambiental y de recursos naturales.

Wang (2023) indica que el sensoramiento remoto es una tecnología que utiliza sensores en satélites, aviones o drones para obtener datos sobre la superficie terrestre, la atmosfera y los océanos sin contacto directo, así mismo desempeña un papel crucial en el estudio y la comprensión de los efectos del cambio climático en el medio ambiente, los científicos pueden recabar información valiosa sobre los cambios en el sistema climático de la Tierra a través de los monitoreo continuo de los patrones climáticos, incluidas las variaciones de temperatura, los regímenes de precipitaciones, ecosistemas, el aumento del nivel del mar y el deshielo de cobertura glaciar.

2.1.2. Sistemas de teledetección

Mao et al., (2020) hace referencia que la integración de los sistemas de teledetección espacial con los sistemas de información geográfica son herramientas valiosas en diversas aplicaciones, sobre todo en el análisis y seguimiento de los impactos medio ambientales y del cambio climático. Los sistemas de teledetección, como los satélites y las plataformas aéreas equipadas con sensores, proporcionan datos sobre la superficie y la atmósfera de la Tierra. Estos sistemas captan imágenes verticales de alta resolución que pueden georreferenciarse en SIG, lo que permite integrar y analizar datos espaciales

2.1.3. Radiación electromagnética

Hu et al. (2021) menciona que el espectro visible es un componente crucial de la radiación electromagnética, que desempeña un papel fundamental en la teledetección del medio ambiente y la vigilancia del cambio climático. La tecnología de teledetección se basa en la detección y el análisis de ondas electromagnéticas que muchas veces se centra en la porción del espectro electromagnético visible para el ojo humano, con una longitud de onda de entre 400 y 700 nanómetros aproximadamente.

Mediante la teledetección, los sensores son capaces de detectar y captar la luz visible reflejada o emitida por los objetos del entorno. Esto permite identificar y analizar diversas características y fenómenos, como la cubierta terrestre, la salud de la vegetación, las condiciones atmosféricas, entre otros factores.

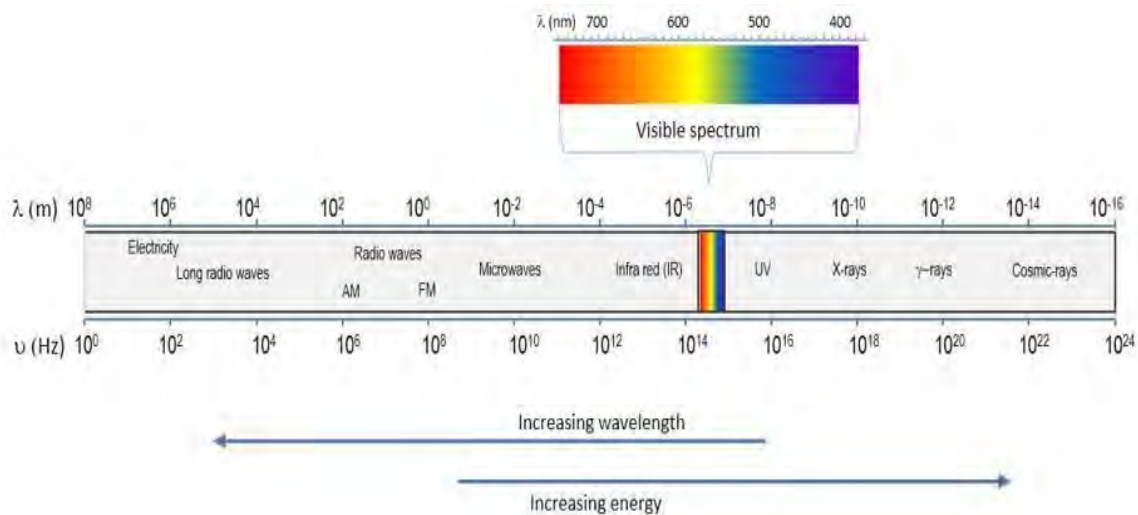


Figura 1. Radiación Electromagnética **Fuente:** Engineering ToolBox, (2016)

2.1.4. Bandas espectrales

Roman-Gonzalez & Vargas-Cuentas (2013) indican que las bandas espectrales se refieren a los rangos específicos del espectro electromagnético. En el contexto de imágenes hiperespectrales o teledetección, estas bandas corresponden a los intervalos específicos de longitudes de onda que los sensores de una cámara o satélite pueden detectar y registrar.

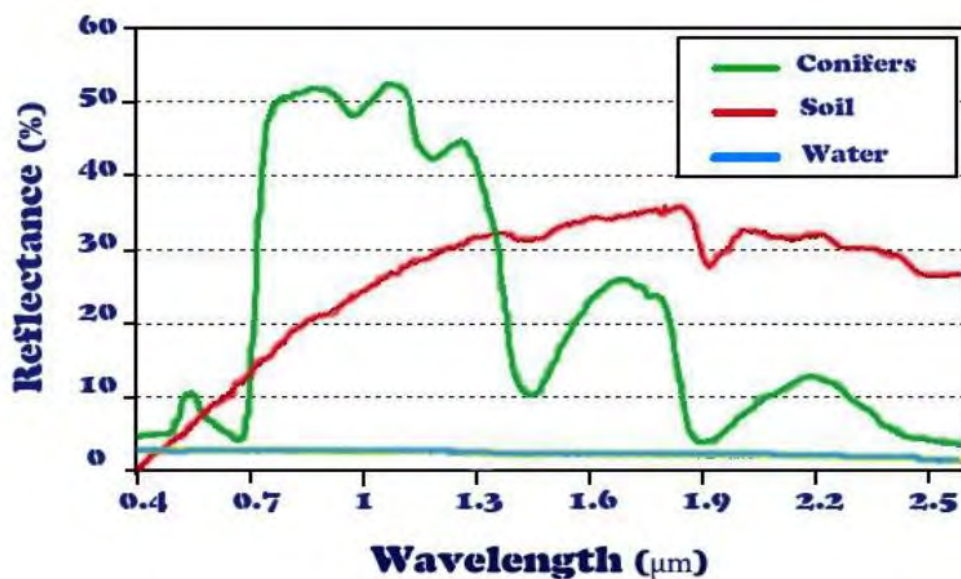


Figura 2. Reflectancia de diferentes cuerpos. **Fuente:** Análisis de imágenes hiperespectrales. Roman & Vargas, 2013.

Roman & Vargas (2013) Mencionan que cada banda espectral captura la energía (radiación) reflejada de la superficie de la Tierra en ese rango específico de longitudes de onda. Dependiendo de las propiedades de la superficie y su interacción con la luz, diferentes objetos reflejarán diferentes cantidades de energía en diferentes longitudes de onda, lo cual puede proporcionar información útil para la identificación y análisis de diferentes elementos en la superficie de la Tierra.

2.1.5. Constelación Sentinel

Copernicus (*The Sentinel Missions*, s. f.) Brinda la información oficial de la agencia espacial de la Unión Europea La misión de la constelación Sentinel es una serie de misiones por satélite desarrolladas por la Agencia Espacial Europea (ESA) en el marco del programa Copernicus. El programa Copernicus es una iniciativa de la Unión Europea para la observación de la Tierra y la vigilancia del medio ambiente. Las misiones Sentinel están diseñadas específicamente para satisfacer las necesidades operativas del programa

Las misiones de la constelación Sentinel, incluidas Sentinel-1 y Sentinel-2, desempeñan un papel crucial en el suministro de datos continuos y fiables de observación de la Tierra para una amplia gama de aplicaciones, como la vigilancia del medio ambiente, el análisis del cambio climático y la gestión de catástrofes.

2.1.6. Misión Sentinel II

La información que proporciona la Agencia Espacial Europea (ESA) es que misión Copernicus SENTINEL-2 consiste en una constelación de dos satélites de órbita polar situados en la misma órbita helio síncrona, con una diferencia de fase de 180°.

Sentinel-2 - Missions, s. f., p. 2 también menciona que su objetivo es vigilar la variabilidad de las condiciones de la superficie de la Tierra, y su amplia cobertura (290 km) y elevado tiempo de revisita (10 días en el ecuador con un satélite, y 5 días con dos satélites en condiciones de ausencia de nubes, lo que se traduce en 2-3 días en latitudes medias) contribuirán a vigilar los cambios en la superficie de la Tierra.

2.1.7. Google Earth Engine - GEE

Google Earth Engine es una plataforma de análisis geoespacial desarrollada y utilizada por Google para realizar análisis de datos a gran escala utilizando imágenes de satélite y otros datos geoespaciales. La plataforma permite a los usuarios realizar amplios análisis de datos aprovechando las imágenes de satélite y la información geoespacial almacenada en la nube.

2.1.8. Árboles de Decisión en Teledetección

Los árboles de decisión son algoritmos de aprendizaje automático supervisado que construyen modelos predictivos mediante una estructura jerárquica de nodos/niveles y ramas. Cada nodo interno representa una prueba sobre un atributo (ej: valor del Índice de Diferencia Normalizada de Agua - NDWI), cada rama un resultado posible de la prueba, y cada nodo una clase o decisión final (ej: "bofedal" vs "no bofedal") (Ross et al., 2023).

AIMSpress (2024) Estos algoritmos son particularmente útiles en ecología por su capacidad para manejar datos no lineales, integrar variables heterogéneas (espectrales, topográficas) y generar reglas interpretables.

2.1.9. Ecosistemas de montaña

Para el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina - CONDESAN (2012) La región de los Andes es conocida por su gran biodiversidad, sobre todo en la zona norte. Los ecosistemas andinos tropicales poseen una de las mayores riquezas de especies de la tierra. Esta diversidad puede atribuirse a la amplia gama de climas, ecosistemas y hábitats que se encuentran en esta región, así como a factores como las altas tasas de especiación y las barreras físicas que contribuyen al aislamiento y la diferenciación entre poblaciones.

2.1.10. Bofedales

Según el Ministerio del Ambiente - MINAM (2019) los humedales andinos o bofedales son sistemas hidromórficos con vegetación herbácea. Se encuentra en los Andes sobre suelos planos o ligeramente inclinados, permanentemente inundados o saturados de agua corriente. Un bofedal es un tipo especializado de humedal andino que se distingue, entre otros rasgos, por la presencia de suelos orgánicos profundos (turba o materia orgánica en diferentes grados de descomposición).

Los suelos orgánicos pueden ser profundos. La vegetación del bofedal es densa y compacta, siempre verde y de aspecto almohadillado. Su estructura general corresponde a pastizales de 0,1 a 0,5 metros de altura.



Fotografía 1. Bofedales del centro del Perú

Fuente: Guía de evaluación del estado del ecosistema de bofedal | SINIA – Sistema Nacional de Información Ambiental, 2019.

2.1.11. Índices espectrales

Lenhardt (2019). Indica que, en teledetección y análisis de imágenes, los índices espectrales se calculan a partir de los valores de reflectancia de varias bandas espectrales captadas por sensores remotos. Estos índices ayudan a extraer información específica sobre el objetivo, como la salud de la vegetación, el contenido de agua o la clasificación de la cubierta terrestre. Algunos ejemplos populares son el NDVI para evaluar vegetación y el NDWI para indicar la presencia de agua.

Índice de agua de diferencia normalizada. – El análisis del Índice de agua de diferencia normalizada o por sus siglas en inglés “NDWI” del área de estudio, es la primera etapa del árbol de decisiones planteado, se ha realizado el reconocimiento de todos los cuerpos de agua de la cuenca de estudio, para posteriormente ser restados del área de intervención.

Aponte-Saravia & Ospina-Noreña (2019) mencionan que el índice de diferencia normalizada de agua o NDWI está dentro del umbral de entre -1.000 y 1.000, esto aplicado especialmente a los humedales altoandinos, es importante mencionar que los valores de NDWI serán variables dependiendo la ubicación geográfica que presente el área de estudio.

Índice de nieve de diferencia normalizada. – Para realizar el análisis del índice de nieve normalizada, o por sus siglas en inglés NDSI, se ha seleccionado cuidadosamente las imágenes a emplear en el estudio, tomando en cuenta principalmente la cobertura de nubes y nieve temporal, especialmente en la época de lluvias, donde es muy frecuente este tipo de fenómenos.

Índice infrarrojo de diferencia normalizada. – El desarrollo de este índice multiespectral que por sus siglas en inglés se define como NDII, es empleado para mapear la humedad registrada en una determinada área, y poder conocer la variación espacial de la humedad del suelo, este índice fue empleado para realizar el Inventario Nacional de Bofedales, (INAIGEM – Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, 2023).

Se ha realizado un estudio en bofedales en la cuenca alta del río Chillón García et al. (2021) donde se han mapeado bofedales mediante sensoramiento remoto, presentando umbrales que están entre 0.02 y 0.76, por otro lado el Inventario Nacional de Bofedales presentado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña ha considerado dentro de su metodología teniendo valores entre 0.2 y 1.00 para la macrozona sur.

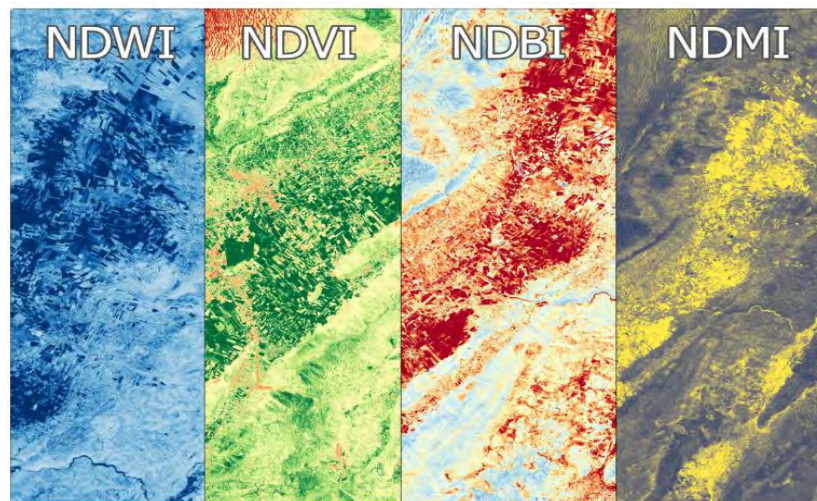
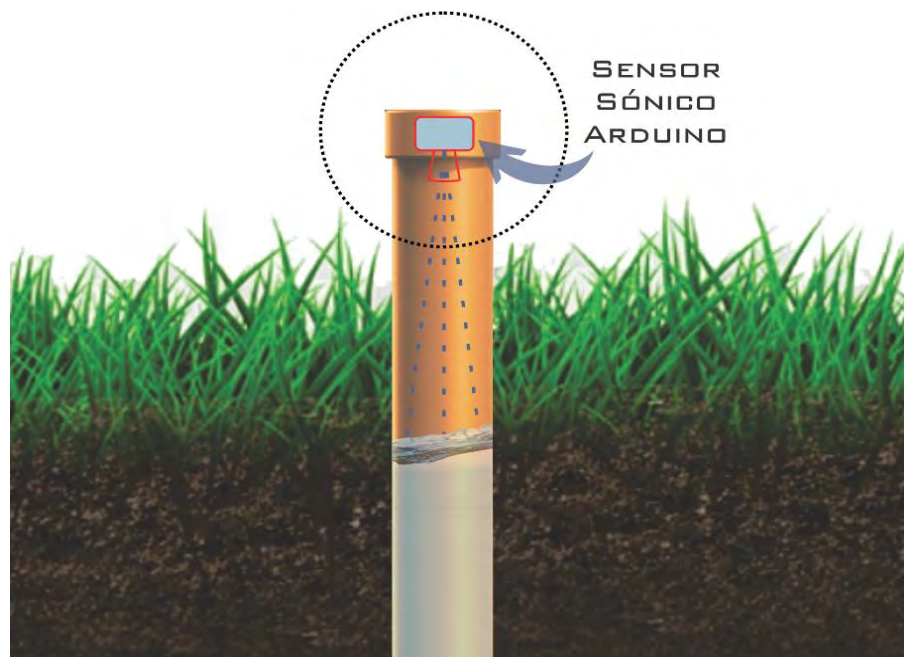


Figura 3. Índices espectrales. Fuente: GIS Geomatics. Douha Akkari, 2023

2.1.12. Sensor sónico Arduino. –

Paul et al., 2020. Ha planteado una mejora en las técnicas de medición, llevando a la elaboración equipos de medición que emplean métodos sin contacto para la monitorización del nivel de agua, muchos de los sistemas operativos actuales se basan en la medición del tiempo que tardan los pulsos de ondas ultrasónicas y de radar en reflejarse en la superficie del agua.



**Figura 4. Representación gráfica de Sensor Sonico Arduino
Fuente: Elaboración propia, 2024**

El sensor ultrasónico funciona mediante la emisión de un pulso sonoro de alta frecuencia (usualmente 40 kHz), generado por un transductor integrado en el dispositivo. Este pulso viaja por el aire hasta encontrar un objeto o superficie, donde se refleja y regresa al sensor como eco. El sistema mide con precisión el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso y la recepción del eco, conocido como tiempo de vuelo (Time of Flight, ToF). Utilizando la velocidad conocida del sonido en el aire (aproximadamente 343 m/s a 20°C), el microcontrolador calcula la distancia al objeto dividiendo el tiempo de vuelo entre dos (debido al trayecto de ida y vuelta) y multiplicando por la velocidad del sonido. Finalmente, el sensor entrega una señal eléctrica proporcional a esa distancia, que es registrada y procesada por sistemas electrónicos como Arduino para su posterior análisis, almacenamiento o visualización.

Ross et al. (2023) emplearon sensores sónicos en la dinámica de bofedales en la cuenca Vilcanota, demuestran que estos sistemas funcionan como amortiguadores del impacto del cambio climático en el régimen hídrico de cuencas altoandinas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Criósfera

Según la Organización Meteorológica Mundial (2022) la criósfera es la parte del sistema climático terrestre constituida por todas las formas de agua en estado sólido presentes en la superficie o debajo de esta, incluyendo nieve, hielo marino, glaciares, casquetes polares, plataformas de hielo, permafrost y suelo congelado de manera estacional o permanente. Aproximadamente el 70% del agua dulce del planeta está contenida en la criósfera.

2.2.2. Glaciar

El IPCC. (2001) menciona que un glaciar es una masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo por deformación de su estructura interna y por deslizamiento en su base, subsistiendo gracias a la acumulación de nieve a gran altura y a la fusión en cotas bajas, Los glaciares juegan un papel fundamental en el ciclo hidrológico de las cuencas altoandinas, siendo fuentes principales de agua en época seca.

2.2.3. Cuenca Glaciar

Para la Autoridad Nacional del Agua (2020) Una cuenca glaciar es un sistema hidrográfico cuyo régimen hídrico está dominado, en parte significativa, por el aporte de agua de fusión proveniente de glaciares. En época seca, el derretimiento de los glaciares es una de las fuentes principales de agua que contribuye a la disponibilidad hídrica en las cuencas andinas. Este aporte regula el caudal base de ríos y humedales y es crítico para los ecosistemas de montaña en condiciones de variabilidad climática.

2.2.4. Microcuenca

La Organización de las naciones Unidas (2010) indica que una microcuenca se define como una pequeña unidad hidrográfica delimitada por la topografía, generalmente de primer o segundo orden, en la que la precipitación escurre hacia un único colector principal, permitiendo la gestión y planificación detallada de los recursos naturales y servicios ecosistémicos presentes. Su escala facilita el manejo integrado de agua, suelo, vegetación y la participación social en procesos de rehabilitación y conservación.

2.2.5. Zona de recarga de la cuenca

Para Peñuela-Arévalo (2013) la zona de recarga en una cuenca hidrológica es donde el agua proveniente de precipitaciones, escorrentía superficial o deshielo se infiltra en el suelo y recarga los acuíferos subterráneos, manteniendo así el flujo base y el suministro hídrico para ecosistemas y uso poblacional.

2.2.6. Zona de descarga de la cuenca

Por otro lado, Peñuela-Arévalo (2013) indica también que la zona de descarga es el área de una cuenca donde el agua aflora de regreso a la superficie mediante manantiales, lagunas, humedales, ríos o zonas saturadas, representando la etapa final del flujo subterráneo y condicionando la presencia, propiedades y continuidad de recursos hídricos superficiales.

2.2.7. Cambio climático

Paluš et al., (2020) Indica que el cambio climático es un problema mundial acuciante que plantea importantes retos a la economía mundial y a los mercados financieros. Según la Comisión Europea, el impacto del cambio climático está transformando nuestro entorno, provocando un aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos.

Raudsepp et al., (2021) demuestra que el cambio climático ha acaparado la atención mundial en los últimos años. En la actualidad está ampliamente reconocido como el principal reto mundial en cuanto a adaptación y mitigación de sus efectos. Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático - IPCC, existe un sólido consenso científico en que las actividades humanas son responsables en gran medida del cambio climático y de los problemas medioambientales asociados.

2.2.8. Definición y características de bofedales

Liu et al. (2022), da a conocer que los bofedales desempeñan un papel vital en el equilibrio ecológico y proporcionan numerosos beneficios tanto a las comunidades locales como a los ecosistemas globales. Además, los humedales de la sierra de Perú actúan como filtros naturales del agua, ayudando a purificar y regular su caudal lo que no sólo mejora la calidad del agua, sino que también garantiza un suministro estable y sostenible de recursos hídricos.

Ross et al., 2023. Desarrolla un enfoque hidrológico, donde los bofedales altoandinos presentan un comportamiento estacional influenciado por la acumulación y el deshielo de nieve, además de la precipitación directa.

2.2.9. Importancia de bofedales en la regulación del ciclo hidrológico

Chasmer et al., (2020). El ciclo hidrológico que se registra en los humedales se refiere al proceso natural de movimiento y ciclo del agua en los ecosistemas de humedales. Estos procesos hidrológicos son esenciales para el funcionamiento de los humedales y desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de su salud y sus servicios ecológicos.

Abarca del Río (2018) analiza la función clave de los humedales altoandinos en el ciclo hidrológico, destacando su capacidad para regular el almacenamiento y distribución del agua en la región andina. El estudio utiliza metodologías cualitativas para evaluar la conexión de estos humedales con los servicios ecosistémicos. Los resultados confirman que los humedales actúan como reservorios naturales, favoreciendo la recarga de acuíferos y mitigando los efectos de sequías. Se concluye que la conservación de los bofedales es esencial para mantener el equilibrio hidrológico, especialmente bajo los efectos del cambio climático, que amenaza con alterar su dinámica.

2.2.10. Cambios en los bofedales debido al cambio climático

El cambio climático está afectando la distribución y el comportamiento hidrológico de bofedales.

Ojeda et al. (2019), relaciona que el calentamiento global está causando el retroceso y la desaparición de algunos bofedales, lo que tiene implicaciones en la disponibilidad de agua y en los ecosistemas dependientes de ellos.

Aponte y Ospina (2019) estudiaron los índices espectrales para identificar y monitorear los humedales altoandinos, para ello determinó la eficacia de estos índices en la detección de cambios en la superficie de los bofedales debido a variaciones

climáticas. Mediante el uso de imágenes satelitales y análisis espectral, los autores observaron una disminución en la superficie inundada de los bofedales durante los periodos de sequía.

Carlson et al. (2020) por su parte realizaron el monitoreo a la hidrología estacional de los humedales alpinos utilizando imágenes de alta resolución del satélite Sentinel-2. Se basó en el análisis de la dinámica de la cobertura de nieve y su influencia en la disponibilidad de agua en los bofedales. Los resultados mostraron la disminución en la cobertura de nieve, producto del cambio climático, reduciendo significativamente la disponibilidad hídrica durante el verano, afectando negativamente la salud de los humedales. El estudio concluyó que el cambio en los patrones de nieve pone en riesgo la sustentabilidad de estos ecosistemas.

2.2.11. Características geográficas y climáticas de la Microcuenca Alayripampa:

Los recursos hídricos de la Microcuenca Alayripampa y en general la Cordillera Vilcanota provee de agua al gran valle del río Vilcanota, este valle es importante puesto que concentra el 75% de la población del Departamento del Cusco (Molina et al., 2015).

Molina (2020), analizó la disponibilidad y calidad del agua en esta cuenca están influenciadas por el deshielo de los glaciares y la época de lluvias. La gestión adecuada de los recursos hídricos es crucial para garantizar la seguridad hídrica y el desarrollo sostenible en la cuenca.

2.3. Antecedentes de la investigación

2.3.1. Comportamiento hidrológico de bofedales

2.3.1.1. Antecedentes internacionales.

Carlson et al., (2020) El artículo en mención se centra en el uso de imágenes de satélite Sentinel-2 para supervisar la hidrología estacional de los humedales alpinos y las lagunas de montañas (p. 1). En el estudio que lleva por nombre: *Monitoring the Seasonal Hydrology of Alpine Wetlands in Response to Snow Cover Dynamics and Summer Climate: A Novel Approach with Sentinel-2.*

Donde los investigadores pretenden cuantificar la variación de la superficie de agua e identificar los factores que regulan la hidrología de los humedales alpinos poniendo énfasis en la vulnerabilidad de los humedales alpinos al cambio climático en curso e incentivando el uso de la monitorización basada en la teledetección combinada con observaciones sobre el terreno para mejorar la comprensión de las respuestas del terreno al cambio climático. La metodología empleada incluye el uso de la desmezcla espectral lineal para cuantificar la variación estacional de la superficie acuática de los humedales alpinos, así como el uso de imágenes del satélite Sentinel-2 para controlar la duración de la capa de nieve a escala de cuenca hidrográfica y de humedal local. El estudio también utilizó un modelo de ecuaciones estructurales (SEM) para probar las relaciones lineales entre los parámetros meteorológicos y del manto nivoso y la superficie de agua observada en la estación de verano (pp 1 - 4). El artículo concluye que el uso de imágenes del satélite Sentinel-2 en trabajo conjunto con observaciones in situ, puede mejorar la comprensión de las respuestas a nivel del suelo al cambio climático en los humedales alpinos. En el estudio, la disminución de la capa de nieve y los veranos calurosos

aumentan el riesgo de sequía en los humedales alpinos, lo que tiene importantes repercusiones en las necesidades de hábitat de la flora y la fauna especializadas de los humedales. El artículo recomienda utilizar Sentinel-2 no sólo para la vigilancia hidrológica de la capa de nieve y las aguas superficiales, sino también para detectar posibles cambios tanto en la biomasa vegetal como en la cubierta arbustiva (p. 16).

Kool et al. (2022) En este estudio se utilizan imágenes para estimar la dinámica de inundación estacional y el balance hídrico del humedal de Mara en Tanzania, destacando la importancia del caudal fluvial y las precipitaciones (p. 1). En la investigación titulada: *Seasonal inundation dynamics and water balance of the Mara Wetland, Tanzania based on multi-temporal Sentinel-2 image classification*,

Los autores pretenden utilizar imágenes multitemporales, multispectrales del satélite Sentinel-2 para cartografiar la dinámica de inundación estacional y el balance hídrico del humedal en mención, destacando la importancia fluvial y pluvial (p. 3). La metodología empleada consiste en utilizar imágenes multitemporales Sentinel-2 para cartografiar la dinámica de inundación estacional y el balance hídrico del humedal. El estudio emplea un clasificador Random Forest (RF), entrenado bi-estacionalmente con un conjunto de datos multibanda y multi índice para tener en cuenta múltiples características simultáneamente. El balance hídrico se estima para los intervalos entre las fechas de adquisición de escenas de Sentinel-2, basándose en el supuesto de que la extensión aérea está relacionada con la disponibilidad de agua en el humedal (pp. 3 - 6). El estudio concluye en que la extensión de la inundación estacional del humedal de Mara en Tanzania cambia significativamente a lo largo del año siguiendo un patrón bimodal coherente, con una extensión

máxima de inundación de 707 km² y una mínima de 294 km². El estudio también pone de relieve la importancia del caudal de los ríos y de las precipitaciones locales para la disponibilidad de agua en el humedal (p. 10).

Zhang et al. (2022) Este estudio utiliza imágenes de satélite Sentinel-2 y algoritmos de aprendizaje automático para evaluar el estado de inundación de las servidumbres de conservación en humedales, (p. 1) En el estudio que lleva por título: *Using Sentinel-2 Imagery and Machine Learning Algorithms to Assess the Inundation Status of Nebraska Conservation Easements during 2018–2021*.

Los autores pretenden utilizar imágenes de satélite Sentinel-2 y algoritmos de aprendizaje automático para lograr el objetivo que es evaluar el estado de inundación de las servidumbres de conservación en humedales, proporcionando un enfoque rentable y eficiente para supervisar el estado de inundación de las aguas superficiales en todas las servidumbres de conservación. Este estudio también tiene como objetivo proporcionar información valiosa para la gestión y restauración de humedales mencionados, la metodología empleada en el estudio fue un modelo de clasificación basado en píxeles, en el que las imágenes Sentinel-2 se filtraron por fecha y se utilizó la banda QA-60 para seleccionar las imágenes menos cubiertas de nubes. La aplicación de códigos en Google Earth Engine (GEE) se utilizó para etiquetar diferentes clases de cobertura del suelo, y los datos de las Encuestas Anuales de Hábitat de la Cuenca de Agua de Lluvia en 2020 y las encuestas de campo en 2021 se utilizaron como información de apoyo para etiquetar y verificar las designaciones de las clases de agua y tierra en el área de entrenamiento.

2.3.1.2. Antecedentes nacionales.

García et al. (2021), Proponen un estudio utilizando técnicas de teledetección. (p. 1). En el estudio que lleva por título: *Propuesta de un Índice de Bofedal para la Teledetección de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Usando Datos Imágenes de los Sensores TM, OLI a bordo de los Satélites Landsat - Caso Estudio: Bofedal Chunal, Cuenca Alta del río Chillón.*

La metodología propuesta en la investigación consiste en utilizar técnicas de teledetección para identificar humedales de altura en la cuenca del río Chillón, en Perú. La metodología incluye dos enfoques: el método de endmembers y el método de índices. El método de endmembers utiliza la técnica Linear Spectral Unmixing (LSU) para obtener las fracciones de endmember de tres clases principales que caracterizan el área de estudio (suelo, roca y humedal). El método de índices utiliza las propiedades de los humedales basadas en el índice de vegetación (NDVI), el índice de agua (NDWI) y el índice infrarrojo (NDII) para desarrollar un Índice de Humedal (IB) (pp. 2-6). En cuanto a los resultados de este estudio el índice propuesto alcanzó una elevada precisión. El Índice de Humedales (IB) desarrollado usando Linear Spectral Unmixing (LSU) y de vegetación fue validado usando imágenes de Google Earth y alcanzó una alta precisión. El IB fue capaz de cartografiar la distribución de los humedales en la zona de estudio. (pp. 5 - 7)

Por otro lado, Javier Silva et al. (2021), El artículo analiza la evaluación de la cubierta vegetal en humedales altoandinos mediante imágenes de satélite, centrándose concretamente en el humedal de Minas Corral, en Ayacucho (p. 1), en el estudio denominado: *Evaluación de la cobertura vegetal en bofedales altoandinos en función de la napa freática y precipitación utilizando imágenes de satélite*,

El objetivo principal del estudio es evaluar la relación entre la cubierta vegetal, las aguas subterráneas y las precipitaciones en humedales altoandinos utilizando imágenes de satélite, utilizando los siguientes pasos metodológicos: preprocesamiento de las imágenes de satélite, recogida de datos meteorológicos, seguimiento de los niveles de aguas subterráneas mediante piezómetros, análisis estadístico, interpretación de los resultados y compilación de los datos. El preprocesamiento de las imágenes de satélite incluyó la corrección geométrica y radiométrica, la corrección atmosférica y la clasificación supervisada mediante NDVI. El análisis estadístico incluyó el uso de análisis de correlación y regresión para determinar la relación entre la cubierta vegetal, las aguas subterráneas y las precipitaciones (pp. 5 - 6). El estudio encontró una correlación lineal negativa entre la cubierta vegetal y los niveles de agua subterránea en el humedal de Minas Corral, lo que indica que los cambios en los niveles de agua subterránea afectan a la extensión de la cubierta vegetal. Sin embargo, la correlación entre la cubierta vegetal y la precipitación resultó ser débil, lo que indica una relación no lineal. El análisis estadístico utilizó un nivel de significación del 95%, y los resultados se validaron mediante una prueba de chi-cuadrado (pp. 4 - 7).

Pauca-Tanco et al. (2020), presentan un estudio para analizar los cambios espaciales y temporales en el humedal altoandino de Chalhuanca, desde 1986 hasta 2016, utilizando técnicas de teledetección y análisis de datos climáticos (p. 105) el cual se denomina: *Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016*.

El objetivo central del estudio fue analizar los cambios espaciales y temporales en el humedal altoandino de Chalhuanca, desde 1986 hasta 2016, utilizando técnicas de teledetección y análisis de datos climáticos, con el fin de comprender la vulnerabilidad de los humedales altoandinos al cambio climático y la importancia de monitorear sus cambios (pp 106 - 107), la metodología del estudio se basó en la clasificación supervisada de imágenes Landsat para identificar el área del humedal y estimar sus cambios a lo largo del tiempo. También calcularon el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de la zona de estudio. Los datos climáticos, incluidas la precipitación y la temperatura diarias, se obtuvieron de la estación meteorológica de Imata y se analizaron mediante la prueba de Mann-Kendall para evaluar las tendencias de los datos (pp 108 - 110), Se constató un aumento de la superficie del humedal y del índice de vegetación en el humedal entre 1986 y 2016. El aumento de la superficie del humedal se atribuyó a un aumento de las precipitaciones, mientras que el aumento del índice de vegetación se atribuyó tanto a un aumento de las precipitaciones como de la temperatura, también hace énfasis en la vulnerabilidad del humedal al cambio climático, y que el seguimiento de sus cambios es importante para su conservación (pp. 112 - 114) La clasificación de las imágenes Landsat resultó ser precisa, con valores aceptables de precisión global e índice Kappa.

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM, 2023) desarrolló el Inventario Nacional de Bofedales (INB) del Perú 2023 con el objetivo de identificar, delimitar y caracterizar la extensión y distribución de los bofedales a nivel nacional.

La metodología empleada ha combinado el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2, modelos digitales de elevación, índices espectrales, topográficos y botánicas, utilizando árboles de decisión supervisados para delimitar y caracterizar los bofedales a nivel nacional con una unidad mínima cartografiable de 0,09 ha. El proceso incluyó el entrenamiento del modelo con miles de puntos de referencia, la aplicación de filtros morfológicos y la validación tanto en campo como con imágenes de alta resolución, logrando una exactitud global promedio del 92% y un índice Kappa de 0,89. Los resultados muestran que en el Perú existen aproximadamente 1 052 211 hectáreas de bofedales, lo que representa el 0,8% del territorio nacional y casi duplica lo reportado en estudios previos. La región Cusco, junto a Puno y Arequipa, concentra más del 57% de la superficie nacional de estos humedales altoandinos. En la región Cusco, el inventario identificó más de 182 mil hectáreas de bofedales. Los bofedales en la región del Cusco cumplen funciones esenciales en la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y el sostenimiento de la ganadería de comunidades aledañas,

2.3.1.3. Antecedentes locales

Macera (2021) da a conocer los resultados de su trabajo de investigación que analiza ecosistemas altoandinos a través de sensoramiento remoto, en el trabajo titulado: *“Evaluación del retroceso glaciar y sus implicancias en el recurso hídrico en la cuenca glaciar Alayripampa en los años 2013-2019”*

Este trabajo ha tenido como objetivo realizar el retroceso glaciar y sus implicancias en el recurso hídrico en la cuenca glaciar Alayripampa en el periodo de años 2013-2019, adicional a ello parte de los objetivos específicos desarrollados también contempla realizar la identificación y mapeo de las fuentes de agua o bofedales ubicados en la microcuenca Alayripampa, todo este trabajo se ha realizado mediante procesos de sensoramiento remoto con imágenes del satélite LANDSAT 8-OLI y TIRS, la identificación, Macera (2021) ha desarrollado la identificación de bofedales a través de índices espectrales como NDVI, que consideran el estado de salud de la vegetación presente, indicando que la presencia de bofedales representa un $\bar{x} = 2.13 \text{ Km}^2$, indicando que el área es mayor en relación a años anteriores y por lo tanto se puede afirmar que hay un incremento del área del bofedal en los años 2014-2019.

III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Ámbito de estudio

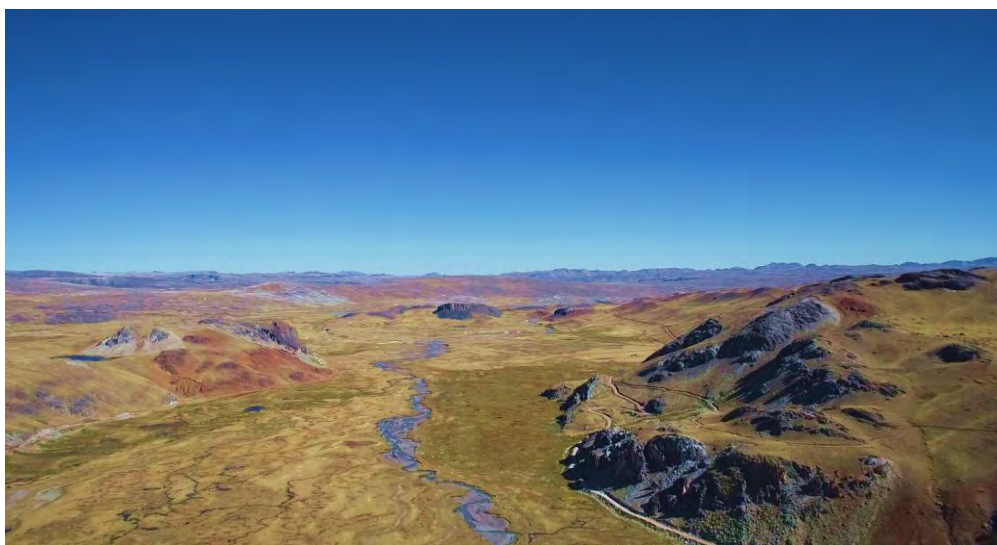
3.1.1 Ubicación política

La cuenca glaciar Alayripampa políticamente se ubica en los distritos de Pitumarca y Checacupe – provincia de Canchis, región Cusco.

3.1.2 Ubicación geográfica

La cuenca glaciar Alayripampa se encuentra entre las latitudes -13.54 y -13.46 sur, y longitudes -70.50 y -70.56 oeste, con una superficie de 54.259 km², elevación máxima de 5761 m y mínima de 4742 m.

La cuenca glaciar Alayripampa limita al norte con el distrito de Marcapata, al sur con Checacupe, al este con la región de Puno y al oeste con Pitumarca, todos dentro de la región Cusco. En torno a la cuenca existen comunidades y caseríos importantes como Phinaya al noroeste, Chachacomayo al sur, Pacchanta y zonas rurales del distrito de Marcapata al oeste, Pitumarca y Chillca al suroeste. Estos asentamientos contribuyen a la ocupación territorial, actividades productivas y son puntos claves de acceso a la zona glacial de Alayripampa, integrándose estrechamente con el ámbito natural y social de la cuenca.



Fotografía 2. Fotografía aérea de la cuenca. **Fuente:** Propia, 2021

3.1.3 Ubicación hidrográfica

Hidrográficamente la microcuenca Alayripampa objeto de estudio, está ubicada en la cuenca N6 del río Salcca (499498), que este a la vez este considerado parte de la Intercuenca N6 Alta del río Vilcanota (499499), parte de la cuenca Nivel 5 del río Vilcanota, parte de la Unidad Hidrográfica Urubamba – Vilcanota, todos los cursos de agua antes mencionados son parte de la Región Hidrográfica Amazonas. (ANA, 2018)

Es importante mencionar que, según criterios operacionales y técnicos, se considerará microcuenca ya que al tener una extensión poco mayor a 5000 hectáreas (50 km²), Esta delimitación permite manejarla eficazmente en términos de planificación, conservación ambiental y gestión hídrica, involucrando el uso sostenible del suelo, agua y vegetación, así como las comunidades locales que habitan en ella.

3.1.4 Ubicación temporal

El presente estudio se realizó entre los años 2020 y 2021 a escala mensual entre los años mencionados (24 meses)



Fotografía 3. Fotografía de bofedales saturados de la microcuenca Alayripampa.

Fuente: propia, 2021

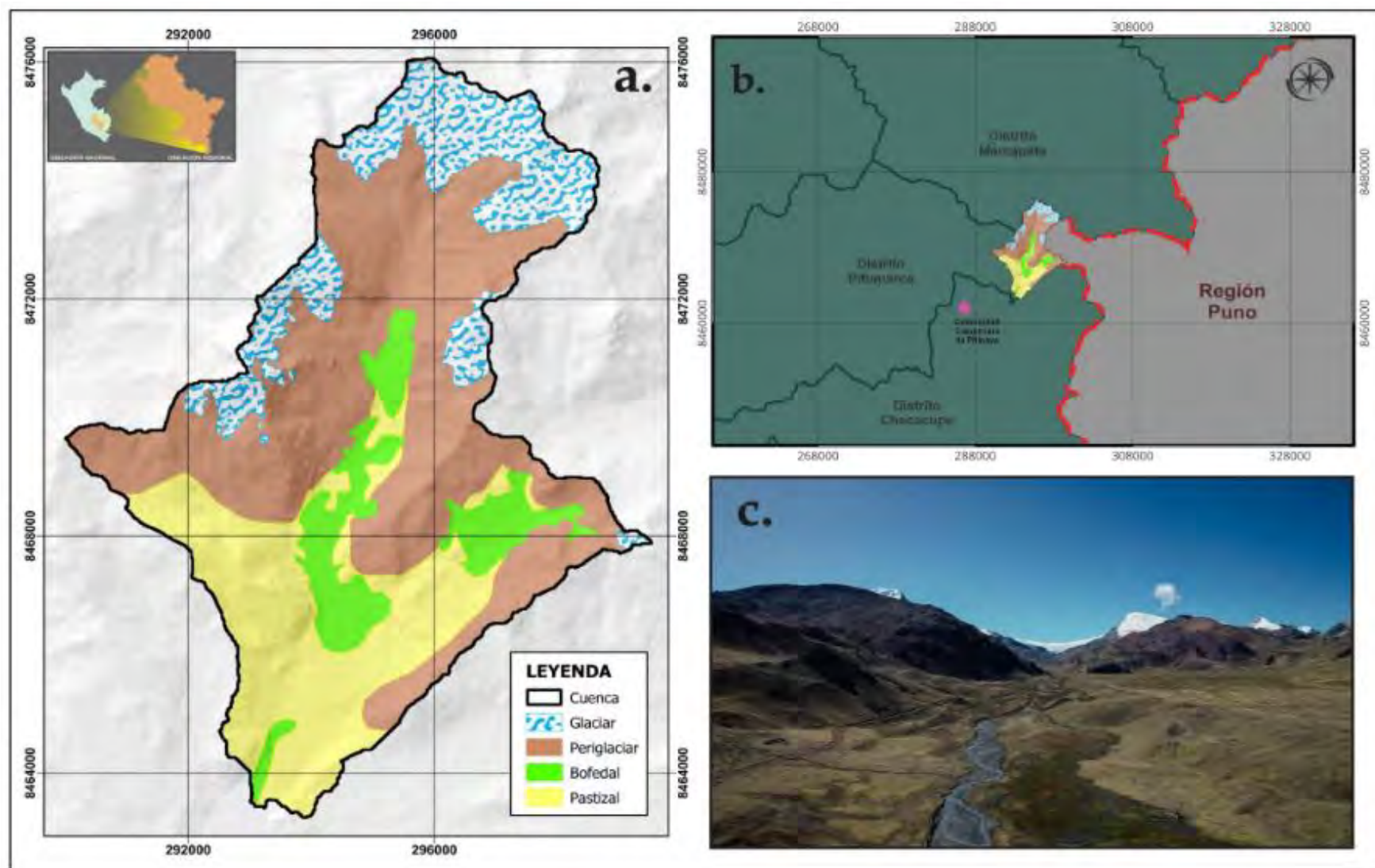


Figura 5. Mapa de ubicación de la microcuenca Alayripampa. a) Muestra la microcuenca Alayripampa con ecosistemas representativos. b) Representa la ubicación de la cuenca entre las regiones de Cusco y Puno. c) Imagen aérea del bofedal.
Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2. Nivel y tipo de investigación

3.2.1. Nivel de investigación

Investigación básica y cuantitativa: La investigación es de tipo básica, ya que su propósito central es generar y ampliar el conocimiento científico específicamente sobre la variación superficial y la dinámica de nivel freático de los bofedales altoandinos. Es cuantitativo por que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos. El estudio describe y analiza la relación entre variables, sin resolver un problema práctico ni proponer aplicaciones directas.

3.2.2. Tipo de investigación

Investigación Descriptiva - Correlacional:

- **Descriptiva:** El estudio caracteriza la variación espacial y temporal de los bofedales en base a la información mensual de las variables de superficie y nivel freático.
- **Correlacional:** Analiza la asociación entre las variables de superficie y nivel freático de los bofedales, para identificar el grado de relación sin pretender causalidad directa.

3.2.3. Diseño de investigación

Investigación no experimental: Este estudio está basado en la observación de los fenómenos que ocurren en la variación superficial del área bofedal de la cuenca y el nivel freático de bofedales. El uso de la investigación, se basa en conocer cómo se comporta una variable según el comportamiento de otra donde no se pueden manipular deliberadamente las variables.

3.3. Unidad de análisis

La investigación se realizó con elementos de ecosistemas de montaña de la microcuenca Alayripampa (Bofedales) en la cordillera Vilcanota, partir de teledetección, y series de datos recopilados en campo. Estos elementos, son analizados de manera multitemporal a escala mensual dentro del mismo periodo de estudio comprendido desde 2020 hasta el 2021.

3.4. Población de estudio

La población de estudio se determinó en relación a la cuenca de estudio, en este caso se sabe que en la microcuenca Alayripampa y el área de 9.16 km² de bofedales presentes a lo largo de los años 2020 y 2021.

3.5. Tamaño de la muestra

Se ve por conveniente tomar como muestra para el estudio la microcuenca Alayripampa así como el total de 10.56 km² área de bofedales como punto más elevado en temporada de lluvia y la fluctuación que estos presenten entre los años 2020 y 2021.

3.6. Límites de la investigación

Es fundamental precisar que el presente estudio no constituye una investigación integral del ciclo hidrológico de la microcuenca Alayripampa, ni tiene como objetivo principal el análisis detallado de la precipitación o de todos los componentes del balance hídrico. El enfoque de este trabajo se centra en la variación superficial de los bofedales altoandinos y su relación con el comportamiento hidrológico local, especialmente a través del monitoreo del nivel freático y el análisis de imágenes satelitales.

Si bien se reconoce la influencia de la precipitación y otros factores climáticos en la dinámica del humedal, no se realizó una evaluación exhaustiva

de las precipitaciones, esorrentía, evapotranspiración ni de las entradas y salidas de agua a escala de cuenca.

Por lo tanto, los resultados y conclusiones aquí presentados deben interpretarse en el marco de un estudio de dinámica superficial y respuesta hidrológica de los bofedales, y no deben extrapolarse como un análisis completo del ciclo hidrológico regional.

3.7. Materiales

Durante el proceso de la investigación se recolectaron datos directos de nivel freático en la cuenca de estudio así como observación y procesamiento de información para el proceso de sensoramiento remoto y los cálculos estadísticos:

Equipos: GNSS Diferencial, Cámara fotográfica, Data logger, Computadora personal, Baterías de litio, Sensor sónico Arduino v.01

Software: R Studio, Google earth engine, ArcGIS

3.7.1. Fase de campo

En la etapa de campo se utilizaron los equipos mencionados anteriormente, en el siguiente orden y en actividades específicas que a continuación se detallan.

- GNSS Diferencial, Para establecer puntos geográficos en la microcuenca Alayripampa, con fin de georreferenciar la ubicación de los sensores instalados
- Cámara fotográfica, Se empleó para contar con el registro fotográfico de las actividades realizadas.
- Data logger, Colectora, donde se almacenaron los datos de sensores instalados en campo.

- Computadora personal, Empleada, para recopilar información de campo, fotografías y puntos geográficos.
- Baterías de litio, Estas baterías son utilizadas para poner en marcha los Sensores sónicos de nivel de agua empleados en este trabajo.
- Sensor sónico Arduino v.01, Estos sensores fueron instalados en puntos específicos en bofedales de la microcuenca Alayripampa para el monitoreo hidrológico.



Fotografía 4. Sensor Sonico Arduino instalado en la microcuenca Alayripampa.

Fuente: Nilton Montoya, 2019

3.7.2. Fase de gabinete

En la etapa de gabinete y procesamiento de información se empleó esencialmente hardware y programas computacionales que permitieron procesar información, obtener y analizar los resultados.

Información y datos

- Imágenes satelitales Sentinel 2 2ª escala mensual durante 2020 – 2021
- Modelo Digital de Elevación NASA SRTM 30M

Los programas empleados son:

- Google Earth Engine, para aplicación del modelo de clasificación
- Software R en entorno R-Studio y complementos, para análisis de información hidrológica, creación de gráficos y correlaciones.
- Software Arcgis, para corrección de enmascaramientos, edición y creación de mapas.

3.8. Descripción de la metodología

En el trabajo de investigación realizado se ha planteado un diseño metodológico (Figura 06) que permita relacionar los procesos de sensoramiento remoto con las evaluaciones y descarga de datos en campo realizados en la microcuenca Alayripampa, esta metodología tiene como base el desarrollado en el Inventario nacional de Bofedales, por el INAIGEM, con modificaciones que se vieron en campo y en el desarrollo del trabajo de investigación, desarrollado por el responsable del proyecto y sus asesores.

La metodología empieza con el análisis de sensoramiento remoto a partir del límite de la microcuenca Alayripampa, sobre la cual se aplica una recolección búsqueda de imágenes disponibles de reflectancia satelital producto de la misión Sentinel 2 (Figura 06-a1).

Estas imágenes son seleccionadas a escala mensual durante los años 2020 y 2021 a las cuales mediante código desarrollado en Google Earth Engine (Figura 06-a2), se aplica un árbol de decisiones establecido en la presente investigación y detallada en la sección 3.7.1, Como resultado de este procesamiento se tiene información de enmascaramiento de bofedales en la cuenca, los cuales serán validados y corregidos a través de software de información geográfica - ArcGis 10.6 (Figura 06-a3).

Paralelamente, la metodología de trabajo cuenta con una recolección realizada en campo la cual consiste en realizar la colecta de datos de sensores del nivel freático (Figura 06-b1) instalados en la cuenca. Esta información se procesó en el paquete de trabajo R-studio, (Figura 06-b2) con el fin de aplicar un control de datos y estandarizar la información obtenida a escala mensual.

Teniendo la información de sensoramiento remoto y de campo, se procede a realizar el análisis de correlación para demostrar el nivel de relación que tiene la variación temporal del área bofedal de la cuenca con el nivel freático durante los años 2020 y 2021 a escala mensual (Figura 06-c)



Figura 6. Metodología empleada en el trabajo de investigación.

Fuente: Elaboración propia, 2023

3.8.1. Sensoramiento remoto

El desarrollo del sensoramiento remoto realizado en este trabajo es la primera parte de todo el proceso metodológico, para esta primera etapa, denominada sensoramiento remoto como se puede observar párrafos anteriores (Figura 06) se utilizó el método de clasificación denominado Árbol de decisiones o DT por sus siglas en ingles Decision Tree, este método de clasificación fue desarrollado en Google Earth Engine, donde se realizó la aplicación de un algoritmo de clasificación.

Esta metodología divide los datos en segmentos en función de criterios específicos, el código realizado en Google Earth Engine es presentado en el apartado de anexos (Anexo 01) de este documento, de la misma forma se observa trabajos realizados por Berhane et al. (2018) donde han empleado el árbol de decisiones para mapear e inspeccionar humedales utilizando imágenes multiespectrales de alta resolución.

Para el presente estudio se realizaron trabajos mediante la Unidad mínima de trabajo de los enmascaramientos, en el desarrollo de esta se han encontrado pixeles de 10m x 10m, que es la resolución con la que se trabaja en estudios realizados con imágenes satelitales multiespectrales Sentinel 2 como indica (Delalay et al., 2019) en los trabajos realizados con teledetección y clasificación de suelos.

Los algoritmos de clasificación como NDSI, NDWI, NDII pueden analizar los patrones espaciales presentes en las imágenes con el fin de detectar áreas cubiertas por humedales y diferenciarlas de otros tipos de terreno. (Jiang et al., 2011) en este caso particularmente morrena, roca y pastizales.

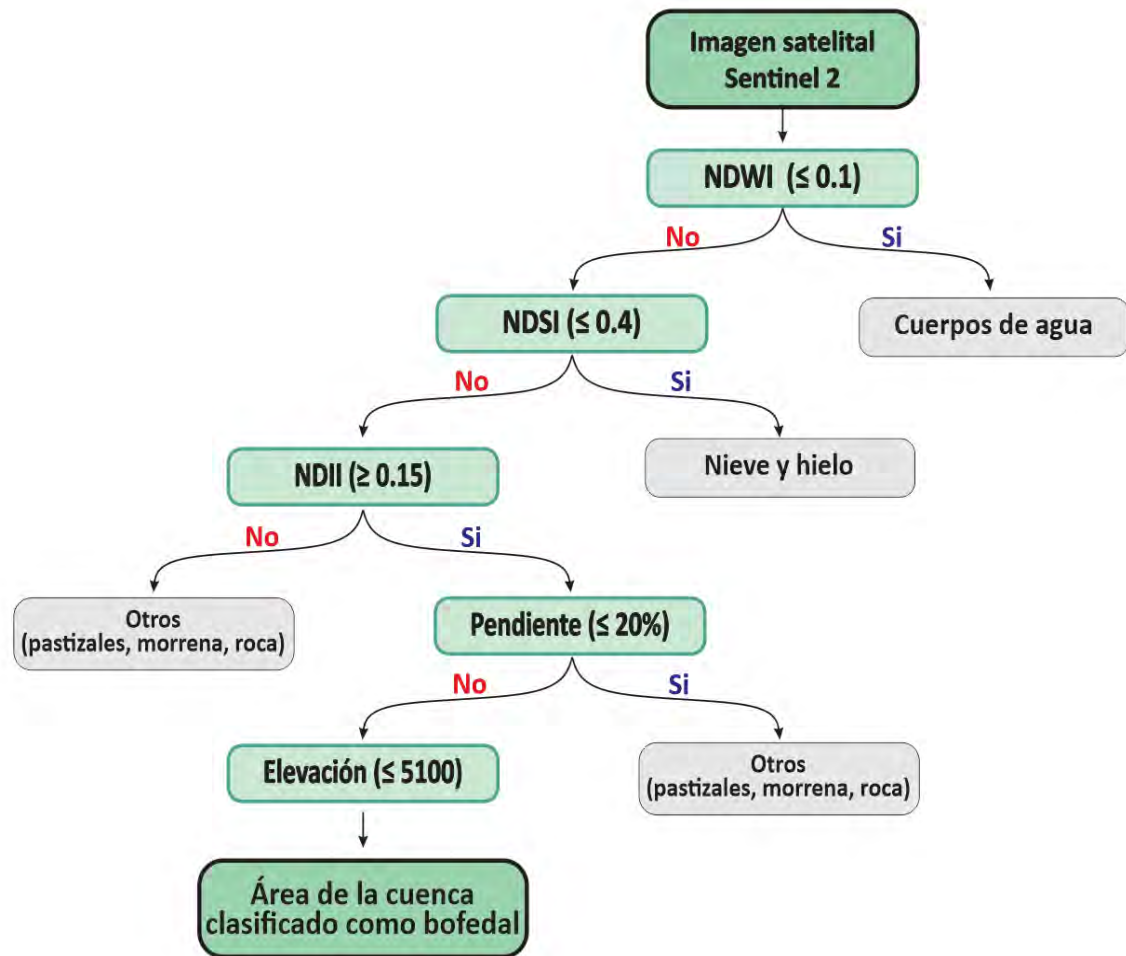


Figura 7. *Árbol de decisiones para la clasificación de coberturas.*
Fuente: *Elaboración propia, 2023*

El árbol de decisión empleado en este trabajo inicia a partir del nivel superior ramificado hacia abajo, donde el primer clasificador que se aplica en la microcuenca Alayripampa, es el índice de diferencia normalizada de agua (NDWI) y realizando las pruebas correspondientes se ha establecido trabajar con el umbral de 0.100, este clasificador realizará la discriminación entre la presencia de cuerpos de agua y ausencia de estos, los clasificados como cuerpos de agua, serán retirados del flujo de enmascaramientos que se están trabajando.

Al primer resultado de enmascaramiento se procede a aplicar el segundo clasificador, que es el Índice de diferencia normalizada de Nieve (NDSI), estudios realizados por Durán-Alarcón et al. (2015) para mapear cobertura de hielo/nieve en los nevados Caullaraju - Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) donde se emplearon umbrales entre 0.4 y 0.6, encontrando resultados óptimos, sin embargo, estos estudios se realizaron empleando imágenes multiespectrales, Landsat-5 Thematic Mapper (TM), por otro lado se tiene experiencia en el mapeo de hielo/nieve realizando por Mohammadi et al. (2023) empleando imágenes multiespectrales del sensor Sentinel-2 donde se recomiendan umbrales " ≥ 0.4 ". Para el análisis y mapeo de hielo/nieve en la cuenca Alayrimpampa, se ha desarrollado utilizando el valor umbral de " $= 0.4$ " encontrando resultados satisfactorios para el mapeo temporal de estos cuerpos. El segundo clasificador va a permitir disgregar la cobertura clasificada como hielo/nieve, para poder ser depurada del flujo de enmascaramientos.

DESARROLLO ENMASCARAMIENTO

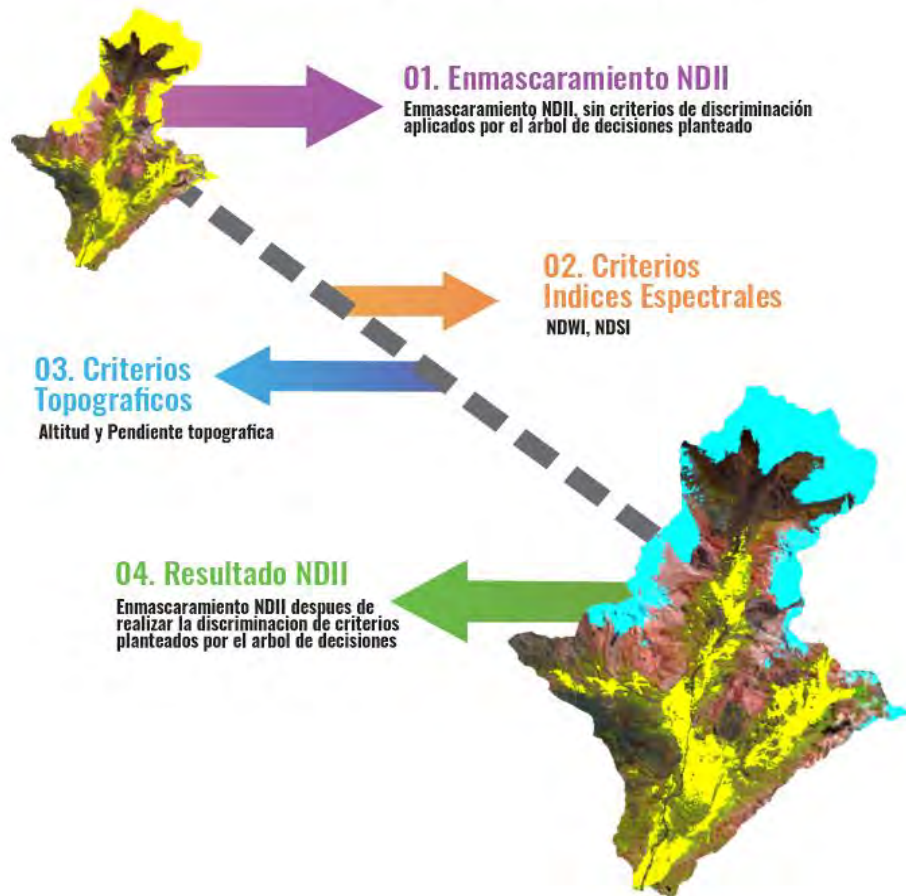


Figura 8. Desarrollo de enmascaramientos Google Earth Engine.

Fuente: Elaboración propia, 2024

A los resultados obtenidos se deberá aplicar la tercera etapa del árbol de decisiones, el Índice de Diferencia Normalizada Infrarroja a realizar la discriminación entre zonas con presencia de humedad y áreas que no representan humedal como, morrena, pastizales, roca entre otros, para este tipo de estudio en los bofedales, se ha determinado utilizar umbrales " ≥ 0.15 ", debido a que estos valores realizan un mejor enmascaramiento de bofedales.

Por último, el árbol de decisiones tiene dos clasificadores adicionales que están relacionados con la topografía de la cuenca, el primero realizará la clasificación entre áreas clasificadas como bofedal que estén por debajo del 20% de pendiente y por otro lado el último clasificador realizará la discriminación entre las áreas clasificadas como bofedales que se encuentren por debajo de los 5100 metros de elevación.

Después de todos estos criterios de clasificación empleados en el árbol de decisiones, se tiene como resultado el enmascaramiento de áreas clasificadas como bofedales.

A continuación de la metodología de sensoramiento remoto se procede a realizar el post proceso de los enmascaramientos generados por el algoritmo del árbol de decisiones, mediante el software Arcgis, (Figura 06-a3), donde se procesan los enmascaramientos obtenidos por el algoritmo descrito anteriormente, se emplea el criterio de depuración de píxeles no asociados a áreas clasificadas como bofedales, esto para contar con enmascaramientos más limpios que representen el comportamiento de la dinámica espacial de los bofedales.

En la parte final de la metodología de sensoramiento remoto, se tiene la etapa de validación de los enmascaramientos que se tienen, a través de software GIS de procesamiento, contemplado en el plugin AcATaMa (Accuracy Assessment of Thematic Maps) o por su denominación en español Evaluación de la precisión de los mapas temáticos (Llano, 2024) , este plugin será empleado para la evaluación de la precisión diseñado para la clasificación del uso/cobertura del suelo, de los enmascaramientos realizados.

3.8.2. Evaluación de campo

Para la evaluación de campo, se han considerado dos etapas importantes, la de recopilación y descarga de datos en campo, y la segunda que es el procesamiento de esta información, procedimientos que se describen a continuación:

1°. Recopilación y descarga de datos: Para evaluar el comportamiento hídrico de los bofedales de la microcuenca Alayripampa se ha utilizado información de sensores sónicos Arduino, para recopilar la información del nivel freático, el 19 de noviembre del 2019, fueron instalados 03 sensores sónicos como marco del proyecto water security And climate cHange adaptation in perUvian glacier-fed river basins - RAHU, estos registran datos cada 05 minutos, durante todos los días del año; los sensores necesitan el mantenimiento correspondiente y la descarga de información que se realiza cada 03 meses.



Fotografía 5. Fotografía realizando colecta de datos del sensor.
Fuente: propia, 2022

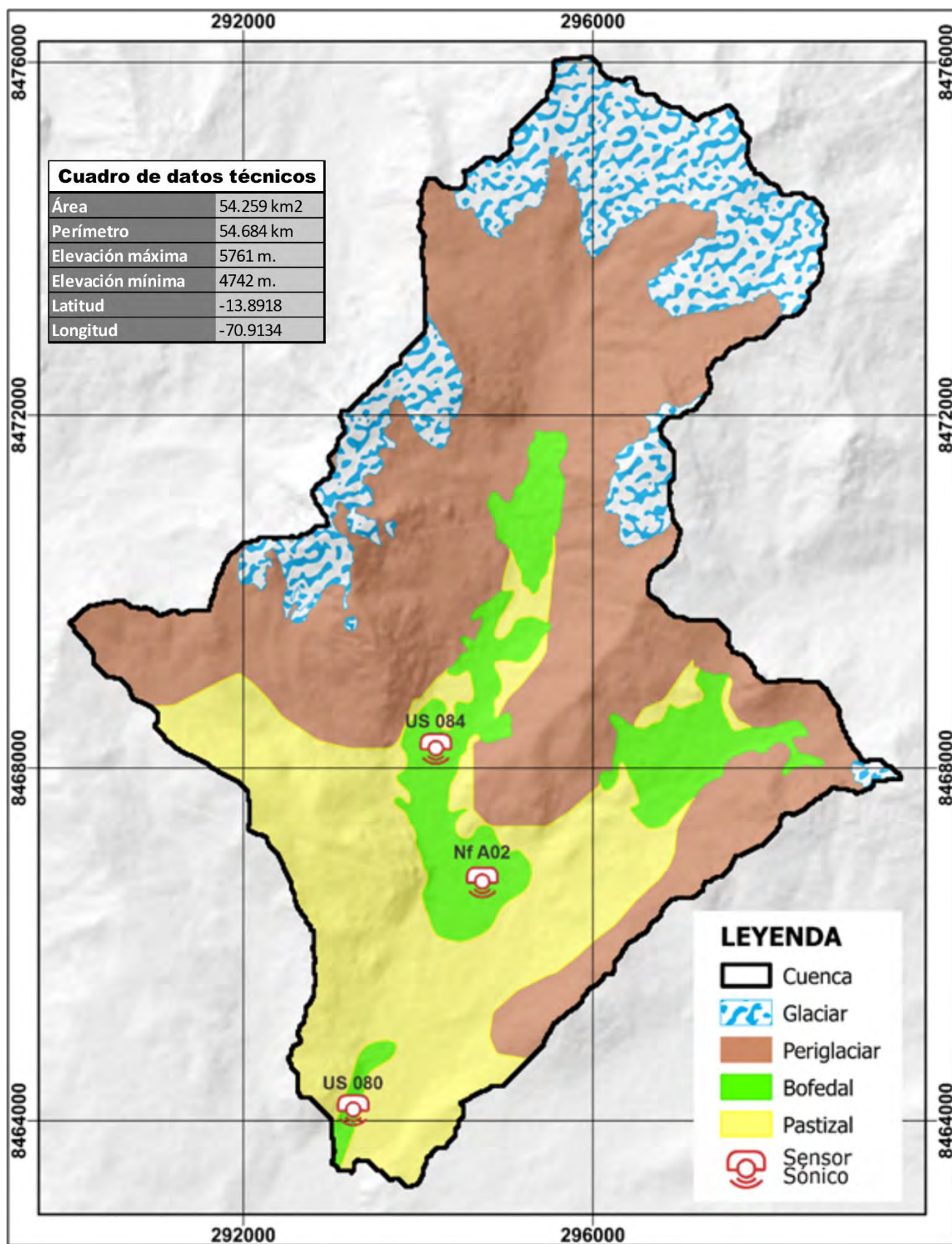


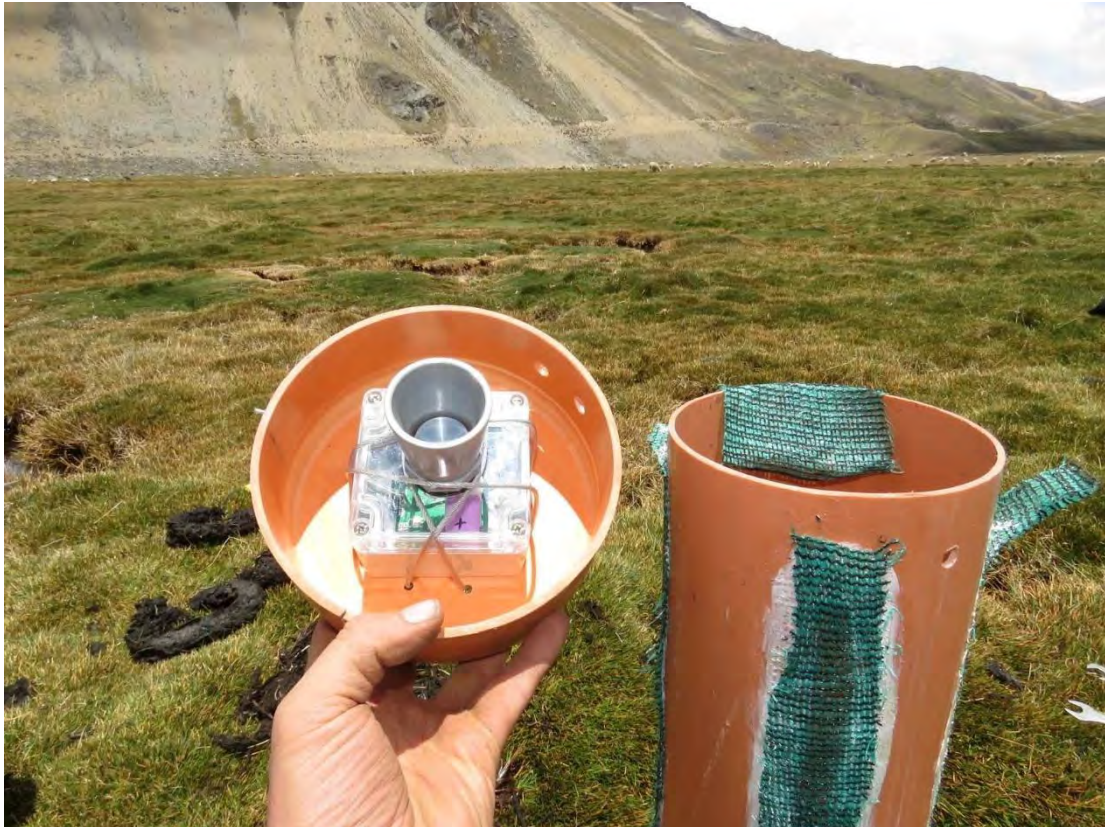
Figura 9. Mapa de ubicación de sensores sónicos Arduino, instalados en la microcuenca Alayripampa. **Fuente:** Elaboración propia, 2023

Los datos registrados por el sensor, son recopilados en la unidad de milímetros, marcando la distancia entre la base del sensor sónico y la superficie del nivel freático (espejo de agua) en los bofedales. Se tomo referencia la distancia real entre el nivel del suelo (h) y la base del sensor, estos datos son descargados en formato (.csv) hacia un data logger.

Los archivos descargados en formato .csv tendrán los nombres en el siguiente formato “yyyymmdd.csv” cada uno de los archivos tendrá una serie de datos colectados, que se encuentran en el siguiente orden: “2020/01/01 00:00:00, 669, 669, 669, 669, 669, 669, 669, 669, 669, 669” estos datos expresan primero la fecha y hora que el sensor ha tomado los datos, y los 10 valores siguientes son las medidas en mm que ha generado en cada lectura.

2° Procesamiento de información Para el procesamiento, se debe tomar en cuenta que los sensores fueron programados en la ciudad de Londres, Uk. Por este motivo se deberá de corregir la fecha a la zona horaria local, Al tener 10 valores, se deberá sacar el promedio de estos valores, por último, de la escala temporal de 5 min, se deberá llevar a la escala mensual, para estandarizar los datos.

Para este procesamiento se ha desarrollado un código en el software R Studio mediante el cual se simplifica todos los pasos mencionados en el párrafo anterior, dicho código se encuentra a detalle en el apartado de anexo 02.



Fotografía 6. Instalación de sensor en bofedales de la microcuenca Alayripampa.
Fuente. Nilton Montoya, 2020

3° Control de datos: Para realizar el control de datos se necesita limpiar y/o filtrar los valores que presentan un error -999 y datos anómalos equivalentes a 5000.

Como etapa final en este proceso, se realiza la transformación de los valores que se presentan de manera intermitente cada 05 minutos a una escala mensual, a través de un código empleado en el software Rstudio, esto para poder estandarizar los datos de sensoramiento remoto y monitoreo hidrológico para así poder realizar los análisis de relación, entre ambos datos.

Los códigos aplicados para el control de datos, se adjuntarán en el Anexo 02.

3.8.3. *Análisis de relación entre la variación superficial y nivel freático de los humedales altoandinos de la microcuenca Alayripampa*

Se aplica un análisis de relación mediante el coeficiente de correlación de Spearman para evaluar el nivel de relación que existe entre dos variables, los datos mensuales del área bofedal obtenidos con el sensoramiento remoto y los datos de monitoreo hidrológico obtenidos en el campo, es importante mencionar que los datos de las variables mencionadas tienen que estar en una misma escala temporal, para poder realizar el análisis de relación entre ambas, se realizó mediante el software Rstudio.

Los códigos aplicados en el presente trabajo se adjuntan en el Anexo 03, al finalizar el documento.

IV. RESULTADOS

4.1 Características generales de la cuenca

4.1.1. Delimitación

La delimitación mediante sensoramiento remoto de la microcuenca Alayripampa, se ha encontrado los límites a través del procesamiento de un modelo de elevación digital (DEM) a una resolución espacial de 30m a través de software GIS, donde mediante el procesamiento Hydrologic Modeling, trabaja realizando simulaciones de drenaje para poder realizar la delimitación correcta (Geraldí et al., 2010)

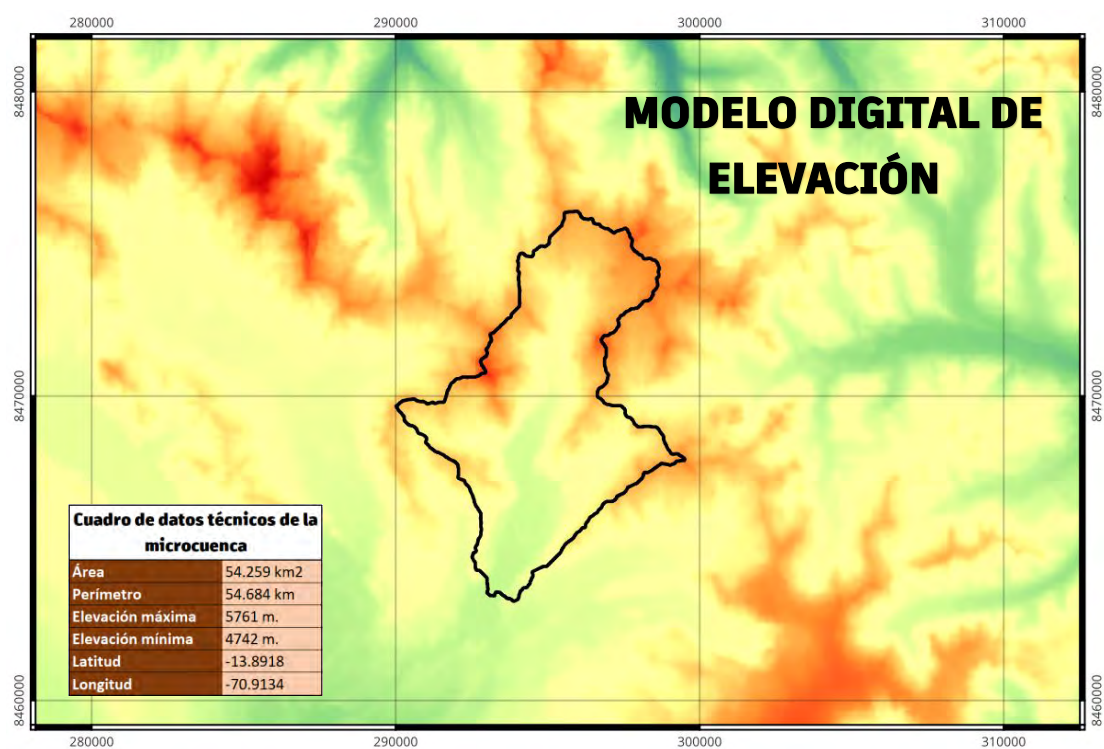


Figura 10. Representación gráfica del modelo digital de elevación DEM

Fuente: Elaboración propia, 2023

4.1.2. Parámetros generales

La cuenca en estudio, abarca un área de 54.259 km² con un perímetro de 54.684 km. Las pendientes mayores a 60% y se concentran en las áreas montañosas, mientras que las pendientes más suaves, entre 0% y 10%, se encuentran en las partes bajas y planas aledañas a cursos de agua y la presencia de bofedales.

Tabla 1. Parámetros generales de la cuenca

Área	54.259 km²
Perímetro	54.684 km
Elevación máxima	5761 m.
Elevación mínima	4742 m.
Latitud	-13.8918
Longitud	-70.9134

Fuente: Elaboración propia. 2024.



Fotografía 7. Parte alta de la microcuenca Alayripampa. **Fuente:** Propia, 2022

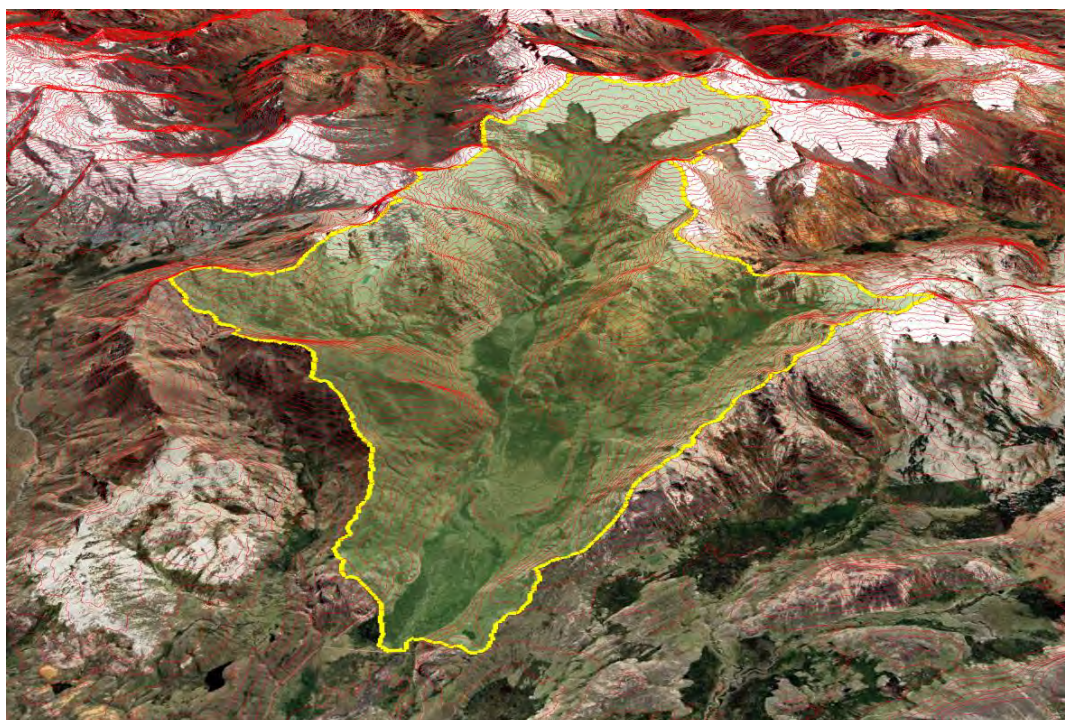


Figura 11. Representación espacial de la delimitación de la microcuenca Alayripampa. **Fuente:** Elaboración propia, 2025

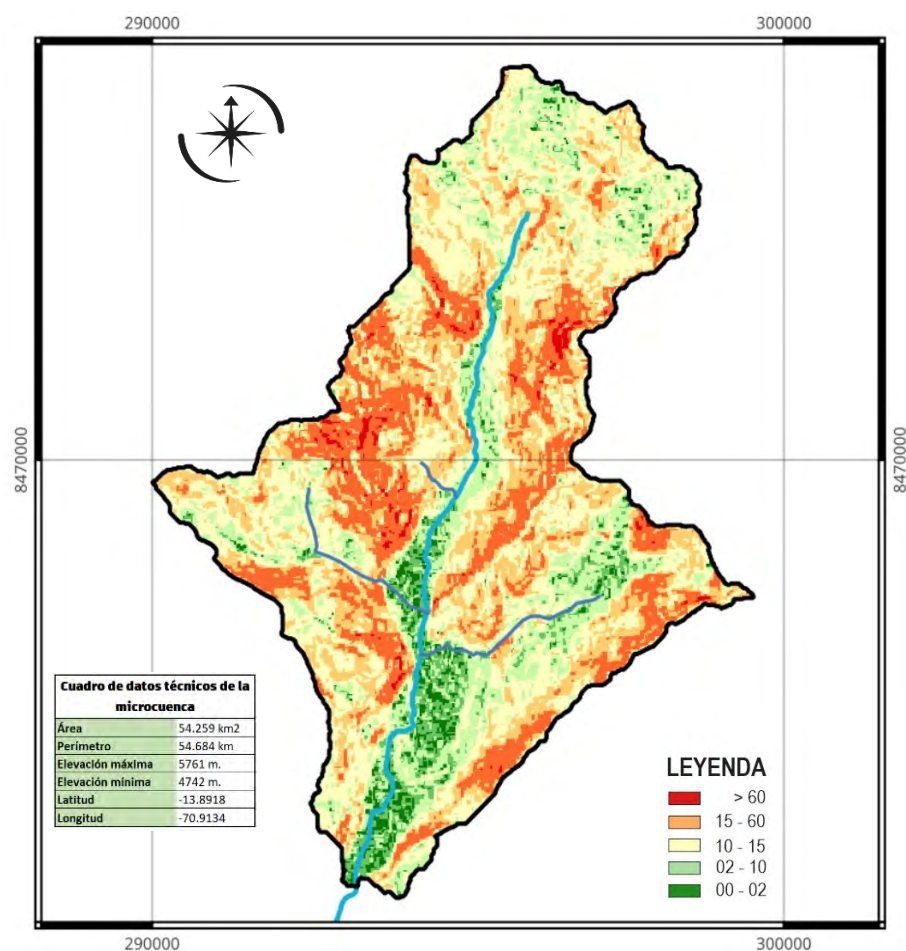


Figura 12. Representación de pendientes en la microcuenca Alayripampa. **Fuente:** Elaboración propia, 2024

En la Figura 11, se puede observar la delimitación de la microcuenca hidrográfica en QGIS que se realizó empleando un Modelo Digital de Elevación (MDE), donde se aplicaron herramientas automáticas de análisis hidrológico que calculan la dirección y acumulación de flujo a partir del relieve. Primero se carga el MDE del área de interés, se corrigen las depresiones del terreno, y luego se define el punto de salida de la cuenca; el software genera la cuenca asociada a ese punto, permitiendo obtener la extensión, morfometría y límites del área de drenaje mediante procesos automáticos disponibles en QGIS.

La Figura 12 muestra la distribución de pendientes en la microcuenca Alayripampa, representada mediante un mapa temático con una clasificación de pendientes en rangos por colores. Las zonas de pendiente muy bajas (0-2%), indicadas en verde claro, se encuentran principalmente en los fondos de valle y áreas cercanas a los cursos principales de agua, donde se favorece la acumulación de agua y el desarrollo de bofedales. Las pendientes suaves (2-10%) en verde se distribuyen en las zonas de transición entre valles y laderas, mientras que las pendientes moderadas (10-15%) en amarillo corresponden a las laderas intermedias. Las pendientes pronunciadas (15-60%) en naranja y las muy fuertes (>60%)

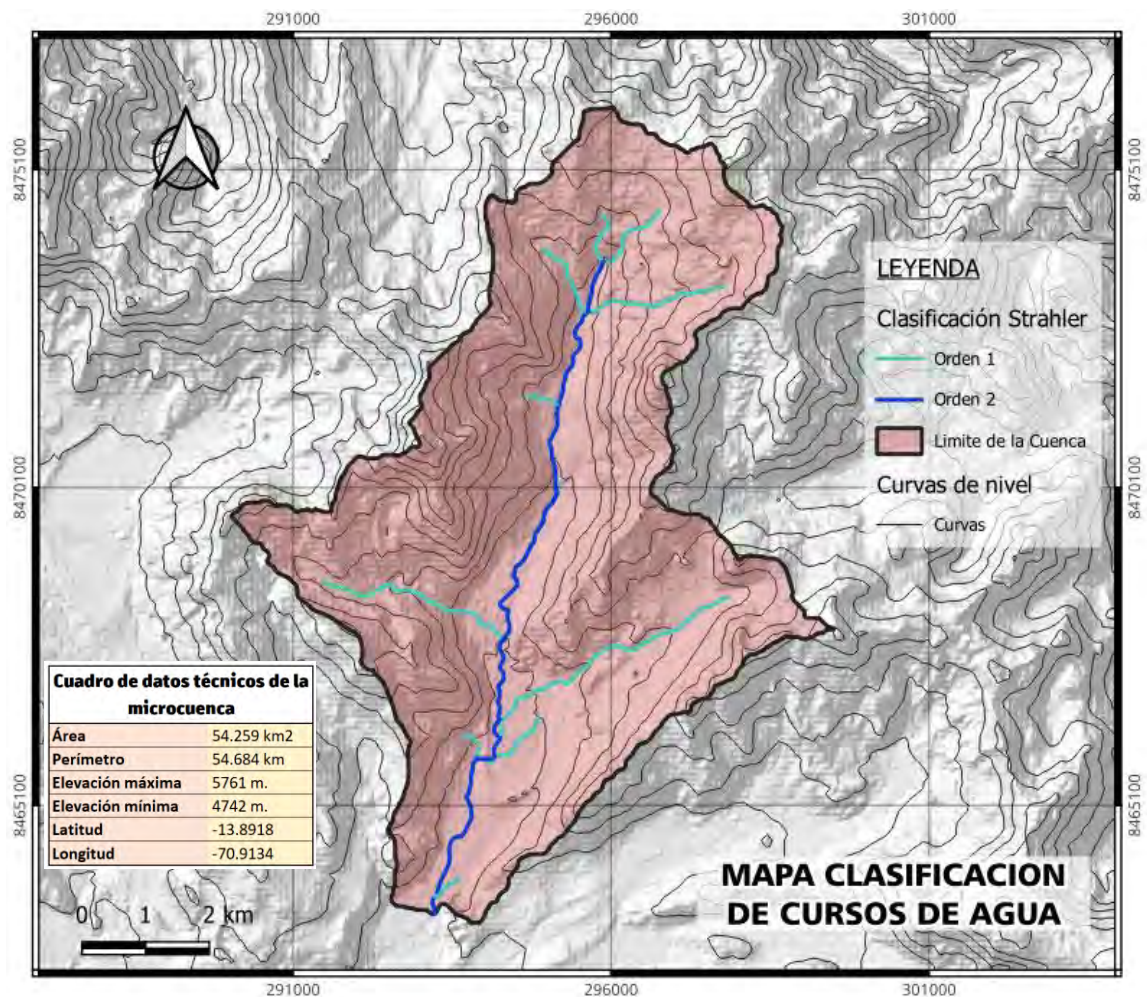


Figura 13. Clasificación de cursos de agua de la microcuenca
Fuente: Elaboración propia, 2024

El método de Strahler permite clasificar los cursos de agua de una cuenca asignando un orden jerárquico en función de sus confluencias y ramificaciones. En este estudio, se identificaron los cursos de agua de primer y segundo orden, lo que posibilita entender la estructura y complejidad de la red de drenaje. Como resultado, en la figura 13, se determinó que los cursos de primer orden alcanzan una longitud total aproximada de 16,085 metros, mientras que los cursos de segundo orden suman en conjunto alrededor de 4,781 metros. Este análisis resalta la predominancia de los cauces menores y la organización de la red fluvial de la cuenca, información fundamental para estudios.

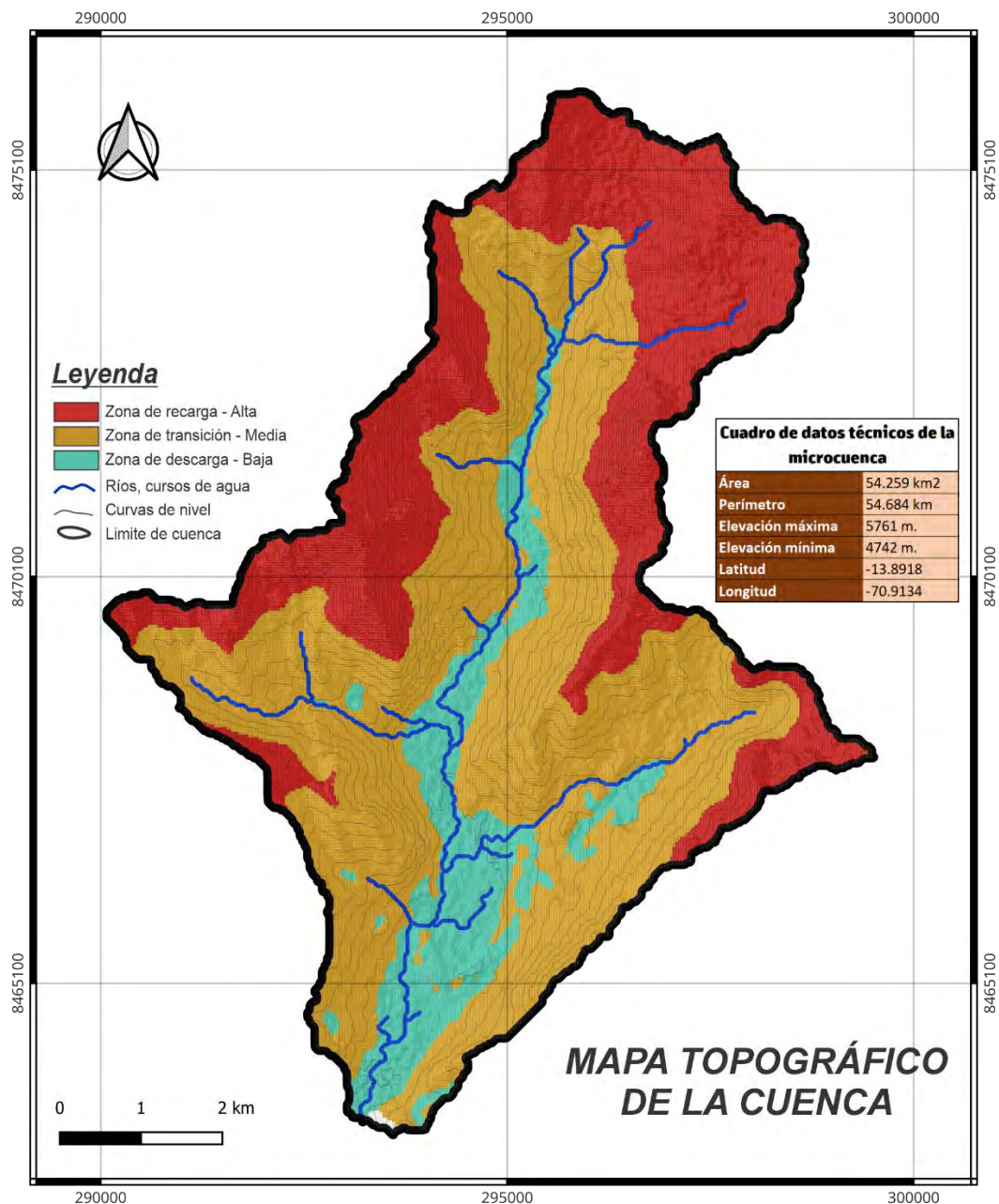


Figura 14. Mapa topográfico de la microcuenca Alayripampa.

Fuente: Elaboración propia, 2024

El mapa presentado muestra una zonificación topográfica detallada de la cuenca, basada en los rangos de elevación y pendiente del terreno obtenidos a partir del modelo digital de elevación SRTM. La cuenca se dividió en tres clases principales: zona de recarga (alta montaña), zona de transición media y zona baja (descarga), utilizando criterios altitudinales y morfométricos relevantes para el funcionamiento hidrológico.

4.2. Clasificación de la superficie Bofedal/Humedal

4.2.1. Colección de imágenes satelitales

La presente investigación se ha realizado la colecta de imágenes satelitales multiespectrales del satélite Sentinel 2 teniendo en cuenta la cobertura de nubes (CLOUD_COVER,) teniendo como criterios de elección la temporalidad y disponibilidad mensual de las mismas.

De este modo se han obtenido total de 32 imágenes para el año 2020 y para el año 2021 un total de 35 imágenes multiespectrales, el principal criterio para obtener las imágenes las cuales se muestran en el siguiente resumen:

Tabla 2. Numero de imágenes satelitales por mes en cada año.

N°	Mes	Año 2020	Año 2021
		N° de Imágenes	N° de Imágenes
1	Enero	1	5
2	Febrero	1	1
3	Marzo	3	2
4	Abril	1	3
5	Mayo	4	3
6	Junio	4	3
7	Julio	5	4
8	Agosto	3	4
9	Septiembre	6	3
10	Octubre	2	5
11	Noviembre	2	1
12	Diciembre	1	1
CLOUDY PP AVG - Código		33	45

Fuente: *Elaboración propia, 2023.*

La información detallada de las imágenes usadas se encuentra en los Anexos 04.

Por otro lado, los resultados obtenidos de la recolección de imágenes muestran un patrón claro de disponibilidad a lo largo de los años de estudio, condicionado por las variaciones estacionales en época de lluvias y seca. Durante la época de lluvias, se ha observado una disponibilidad limitada de imágenes, , en los meses de noviembre, diciembre y entre enero y marzo, donde solo se encontró una imagen por mes que cumpliera con los parámetros de tolerancia de cobertura de nubes. Esta situación evidencia las dificultades para obtener datos satelitales de calidad en condiciones de alta nubosidad.

En contraste, durante la época seca, la disponibilidad de imágenes aumenta significativamente, debido a la menor presencia de nubosidad, lo que facilita un mayor acceso a imágenes sin interferencias atmosféricas. Esta disparidad en la cantidad de imágenes disponibles entre estaciones subraya la importancia de ajustar los periodos de monitoreo para optimizar la obtención de datos durante la época seca, cuando las condiciones atmosféricas son más favorables para la captura de imágenes claras y consistentes.

4.2.2. Árbol de decisiones

Para el desarrollo del árbol de decisiones descrito en la sección 3.8.1, se determinó los valores de cada rama para obtener resultados de humedales, esto fue ajustado según las condiciones de la zona.

Tabla 3. Parámetros del árbol de decisión aplicado para la clasificación de enmascaramientos de bofedal

NDSI	≤ 0.4
NDWI	≤ 0.1
NDII	≥ 0.15
Elevación	≤ 5100 m.
Pendiente terreno	≤ 20

Fuente: *Elaboración propia, 2023.*

En la tabla se observa el detalle de los umbrales empleados para el desarrollo del árbol de decisiones empleado en este trabajo, todos estos parámetros funcionaron como filtro para poder tener el enmascaramiento final del índice NDII que se usó para determinar la variación superficial de humedales en la microcuenca Alayripampa.

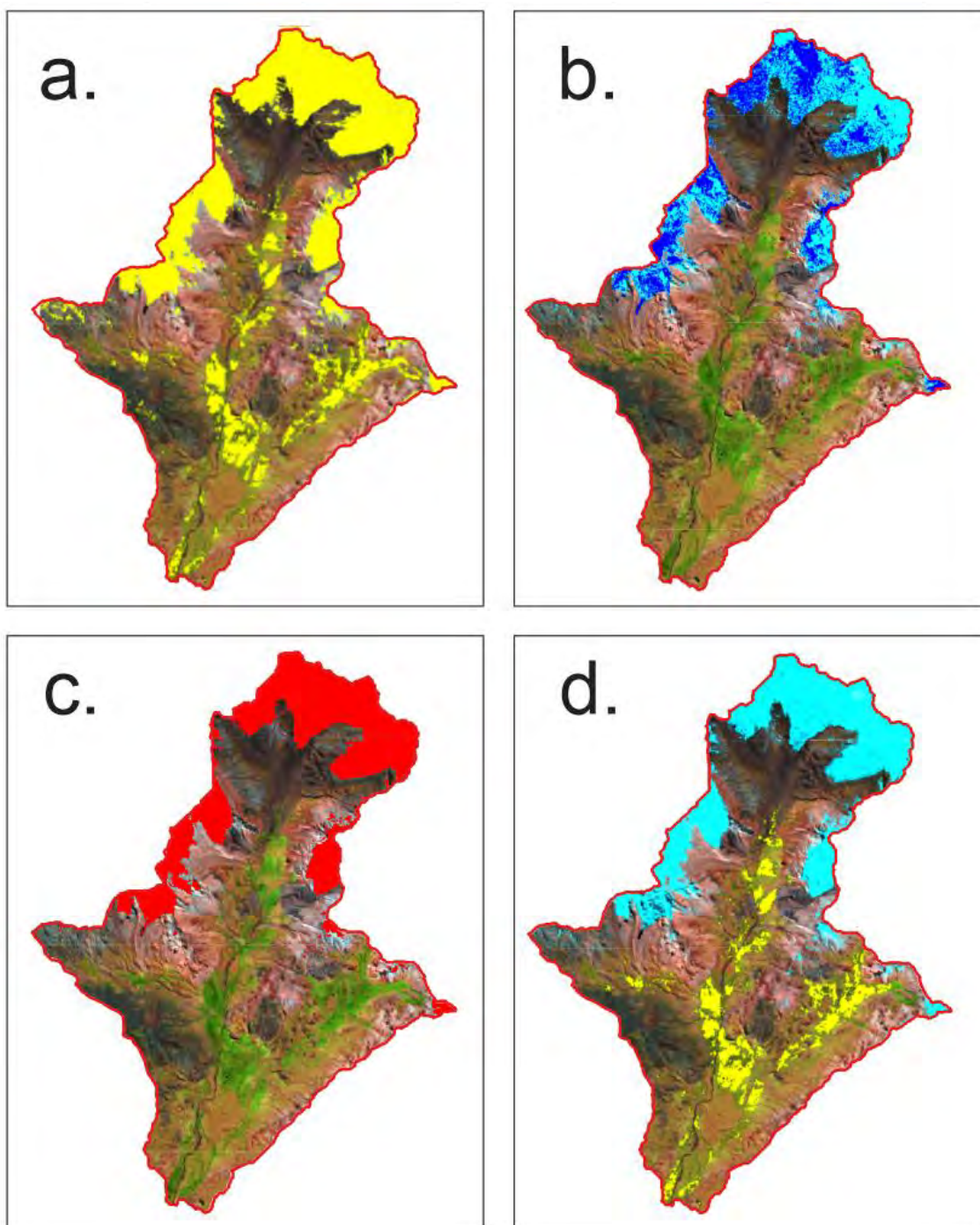


Figura 15. Resultados enmascaramientos del árbol de decisiones.
Fuente: Elaboración propia, 2023

En la figura 13., en la página anterior se presentan los resultados obtenidos por los clasificadores del árbol de decisiones, los cuales han sido aplicados en diferentes etapas del enmascaramiento, la sección **a** muestra el enmascaramiento antes de cualquier procesamiento adicional, destacando las áreas con mayor humedad superficial. En la sección **b**, se visualiza el enmascaramiento NDWI, utilizado para identificar cuerpos de agua en la región. La sección **c** refleja el enmascaramiento NDSI, que permite delimitar zonas cubiertas de nieve o hielo destacando principalmente las áreas con cubierta glaciaria en la cuenca. Finalmente, en la sección **d**, se presenta el resultado final del árbol de decisiones, después de haber pasado por todos los clasificadores mencionados en la sección 3.8.1. Este resultado varía a lo largo de los diferentes meses de estudio, capturando los cambios en la superficie terrestre en relación a los bofedales de la cuenca.



Fotografía 8. Bofedales en el lado este de la cuenca.
Fuente: propia, 2022

4.2.3. Corrección

En el trabajo se presenta, el proceso de corrección que se ha aplicado busca eliminar errores de clasificación (falsos positivos y ruido espacial) en los resultados obtenidos de Google Earth Engine (GEE).

a. Eliminación de píxeles aislados

Umbral de 100 m²: Descartar píxeles individuales (<100 m²) que no representan bofedales funcionales. Este criterio se basa en estudios que indican que humedales menores a 0.01 ha tienen baja relevancia ecológica en zonas altoandinas (Mahdavi et al., 2018)

Esto se debe a que, en teledetección, los píxeles aislados suelen ser errores de clasificación causados por sombras, nubes residuales o reflectancia anómala del suelo (Klemas, 2011)

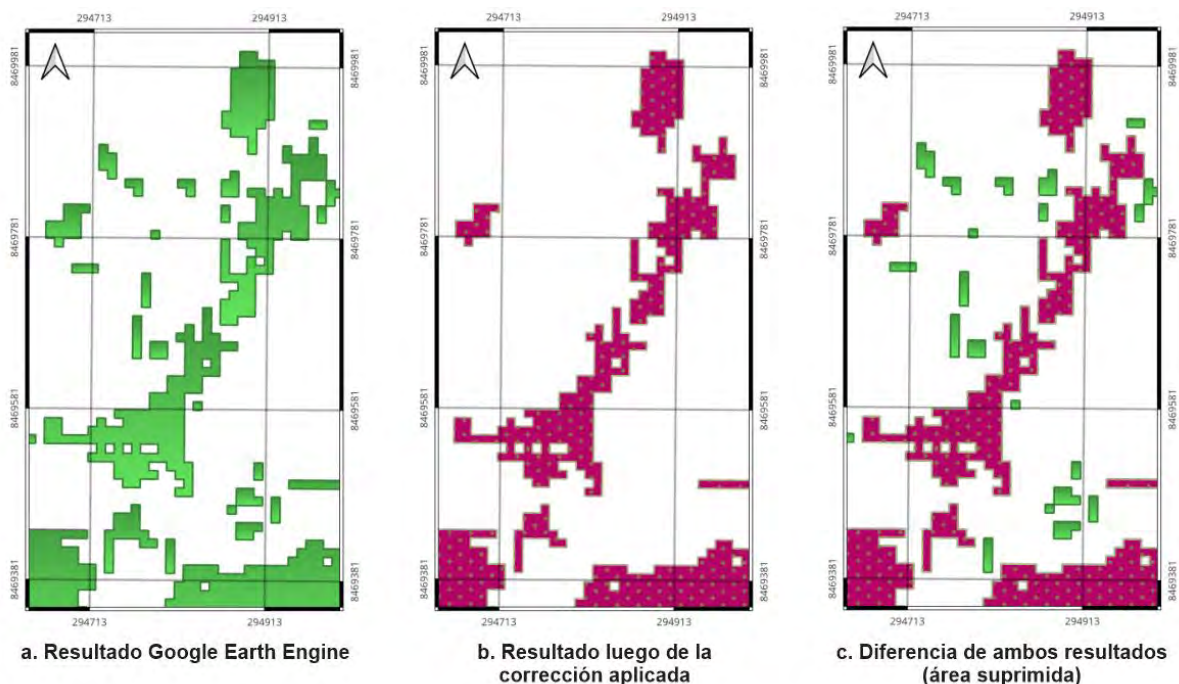


Figura 16. Representación del proceso de corrección del enmascaramiento de bofedal. **Fuente:** Elaboración propia, 2024

En la figura anterior se presentan tres mapas comparativos:

a. Resultado Google Earth Engine: Muestra el enmascaramiento inicial de posibles áreas de bofedal (en verde), incluyendo muchas áreas pequeñas y dispersas. **b.** Resultado luego de la corrección aplicada: muestra el resultado tras aplicar la corrección, donde se observa un mayor agrupamiento espacial y se han eliminado los píxeles pequeños o aislados. **c.** Diferencia de ambos resultados (área suprimida): Indica las áreas que fueron eliminadas tras la corrección, resaltando la depuración de píxeles dispersos y no representativos.

En la tabla 04 y grafico que a continuación se presenta se observa el resultado de un análisis detallado del trabajo de sensoramiento remoto realizado en el año 2020 para la variación superficial de bofedales en la microcuenca Alayripampa

En la tabla 04 se observa tres columnas clave del proceso de corrección de datos Área GEE (ha), que representa las estimaciones iniciales obtenidos de Google Earth Engine, producto del enmascaramiento de bofedales realizado; Área Final Corregida (ha), que muestra el resultado tras aplicar las correcciones GIS; y la diferencia (ha), que indica la magnitud de las variaciones entre ambos valores. Resultado de esto se afirma que, en febrero, se registra la mayor diferencia con 61.353 ha, mientras que en septiembre la corrección es mínima, con 4.573 ha. Estos valores re afirman lo mencionado anteriormente donde se indica que las condiciones atmosféricas y ambientales en los meses de época de lluvias, como la cobertura de nieve y nubosidad, tienen impacto negativo en el sensoramiento remoto.

Tabla 4. Corrección de área bofedal 2020

Área Bofedal 2020				
Mes	Día	Área GEE (ha)	Área Final Corregida (ha)	Diferencia (ha)
Ene	10	611.492	587.47	24.022
Feb	19	943.843	882.49	61.353
Mar	5	665.386	639.98	25.406
Abr	14	863.093	842.81	20.283
May	29	515.625	497.23	18.395
Jun	18	356.519	339.47	17.049
Jul	18	212.998	198.66	14.338
Ago	17	72.844	68.06	4.784
Set	6	94.583	90.01	4.573
Oct	6	126.841	120.17	6.671
Nov	15	220.741	211.33	9.411
Dic	15	456.225	404.59	51.635

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 17. Área bofedal depurada – 2020.

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la figura 15, se muestra una representación de la variación mensual de áreas corregidas a lo largo del año 2020, evidenciando dos picos significativos: uno en febrero y otro en diciembre, con diferencias de 61.353 ha y 51.635 ha respectivamente, lo que indica que los meses de época de lluvia requieren mayores ajustes en la delimitación de los bofedales.

Por otro lado en la tabla 5 y figura 23, se presenta el análisis de sensoramiento remoto del año 2021 presenta variaciones muy marcadas, como se puede observar en la siguiente tabla, los valores muestran fluctuaciones significativas, especialmente en febrero, donde la diferencia es la más alta del año con 773.579 ha, lo que indica un alto nivel de ajuste en la corrección realizada de las áreas estimadas, esta gran diferencia está asociada a condiciones atmosféricas extremas, como presencia de nieve en gran parte del mes, así como nubosidad constante, estos factores dificultaron la interpretación inicial de las imágenes satelitales. En noviembre, también se observa una gran diferencia de 424.813 ha, marcando otro periodo crítico en el proceso de corrección, también debido a los factores ambientales antes mencionados.

Tabla 5. Corrección de área bofedal 2021

Área Bofedal 2021				
Mes	Día	Área GEE (ha)	Área Final Corregida (ha)	Diferencia
Ene	4	391.354	370.690	20.664
Feb	8	1829.768	1056.189	773.579
Mar	10	941.474	912.360	29.114
Abr	19	749.212	730.470	18.742
May	19	456.065	444.040	12.025
Jun	23	253.227	239.840	13.387
Jul	13	104.648	95.930	8.718
Ago	12	82.456	76.290	6.166
Set	16	112.680	106.430	6.250
Oct	21	160.691	149.170	11.521
Nov	15	747.839	323.026	424.813
Dic	30	575.670	516.625	59.045

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Área depurada en el proceso de corrección GIS - 2021

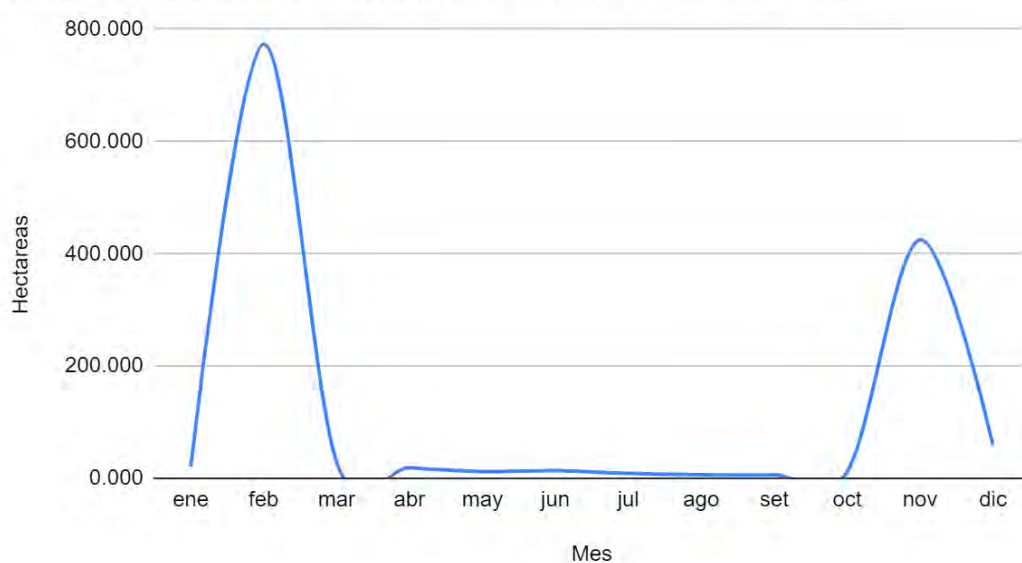


Figura 18. Área bofedal depurada – 2021

Fuente: Elaboración propia, 2024

4.2.4. Validación

Para la validación de los enmascaramientos realizados, en relación a las imágenes multiespectrales Seninel_2, se ha utilizado AcATaMa (Accuracy Assessment of Thematic Maps) es un plugin avanzado para QGIS, que permite realizar evaluaciones rigurosas de la exactitud de mapas temáticos generados a partir de la 693 clasificación de imágenes satelitales. Este complemento está diseñado para cumplir con los estándares y mejores prácticas internacionales en muestreo, diseño de respuesta y estimación de precisión, siguiendo las metodologías propuestas por Stehman & Czaplewski (1998) y Stehman (2013)

Tabla 6. Validación AcATaMa de áreas

AcATaMa		
Periodo	Overall Accuracy	DS (σ)
2020_01 - 04	0.96	0.01969
2020_05 - 08	0.85	0.03872
2020_09 - 12	0.86	0.03487
2021_01 - 04	0.88	0.03266
2021_05 - 08	0.88	0.03266
2021_09 - 12	0.85	0.03589

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para este análisis se emplearon 100 puntos de muestreo aleatorios en cada análisis, fueron agrupados en periodos de cuatro meses para un análisis más detallado. Por ejemplo, el periodo 2020_01-04 corresponde a los meses de enero a abril de 2020 y muestra una exactitud global del 96% con una desviación estándar de 0.01969, lo que refleja una alta confiabilidad en la delimitación de los bofedales para ese intervalo.

Esta alta precisión se atribuye a la calidad de las imágenes durante estos meses, con menor cobertura de nieve y nubes, a diferencia de otros periodos como mayo a agosto de 2020, donde la precisión global fue del 85% con una desviación estándar de 0.03872, debido a una mayor presencia de nubosidad. Estos factores ambientales influyen directamente en la precisión de la clasificación, como se evidencia en el análisis de Área Bofedal 2021, donde febrero mostró una diferencia de 773.579 ha debido a la alta nubosidad y presencia de nieve.

Los valores de exactitud global se mantuvieron altos (85% a 96%) y las desviaciones estándar bajas en todos los periodos, lo que evidencia la solidez del método y la calidad de los resultados obtenidos con AcATaMa.

4.2.5. Variación superficial de bofedales.

Como resultado de todo el procesamiento de sensoramiento remoto se tiene el área bofedal de los años 2020 y 2021 a escala mensual, estos datos reflejan el análisis mostrando variaciones significativas en relación con el régimen hídrico a lo largo del año.

Durante la época de lluvias (noviembre a marzo), se observa un incremento en el área de bofedales considerable, con valores más altos en meses como febrero de 2021 (1056.19 ha) en comparación con el mismo mes de 2020 (882.49 ha). Sin embargo, en la época seca (abril a octubre), las áreas se reducen drásticamente, evidenciando la dependencia de estos ecosistemas del aporte hídrico estacional y la importancia que estos representan. Por ejemplo, el área en julio de 2020 (198.66 ha) es considerablemente menor que

en el año anterior, lo que resalta la vulnerabilidad de los bofedales a las variaciones climáticas principalmente a la precipitación.

Lo mencionado anteriormente, los bofedales el régimen de variación superficial de los mismos nos pueden ayudar a entender cómo es que varía la temporalidad de precipitaciones en las zonas andinas, podemos observar en el grafico como es que en el año 2021 la época de lluvias ha modificado su régimen, adelantándose unos meses en comparación al año 2020.

Área bofedal 2020 y 2021

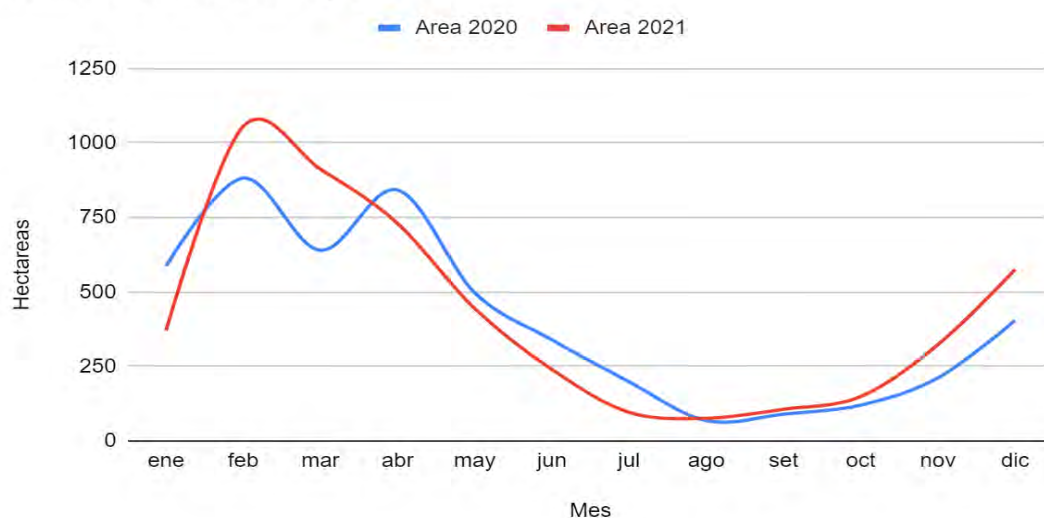


Figura 19. Área bofedal 2020 – 2021. **Fuente:** Elaboración propia, 2024

Según los datos establecidos se puede afirmar que en ambos años, tanto 2020 y 2021 los meses entre julio y septiembre son los más críticos en cuanto al régimen hídrico de estos bofedales, épocas donde la precipitación es nula, los bofedales se mantienen únicamente por la presencia de manantes presentes, así como prácticas culturales de pobladores de la zona que realizan canales rústicos para poder regar bofedales temporales y mantener los pastos naturales que ellos requieren para sus crianzas.

En la presente trabajo, se compararon los resultados del Inventario Nacional de Bofedales (INAIGEM, 2023) para abril de 2021 con los obtenidos en este estudio para la microcuenca Alayripampa. El INB reporta un área de bofedal de 650,29 hectáreas, mientras que el análisis realizado en este estudio identificó 749,21 hectáreas para el mismo periodo, evidenciando una diferencia de aproximadamente 100 hectáreas adicionales.

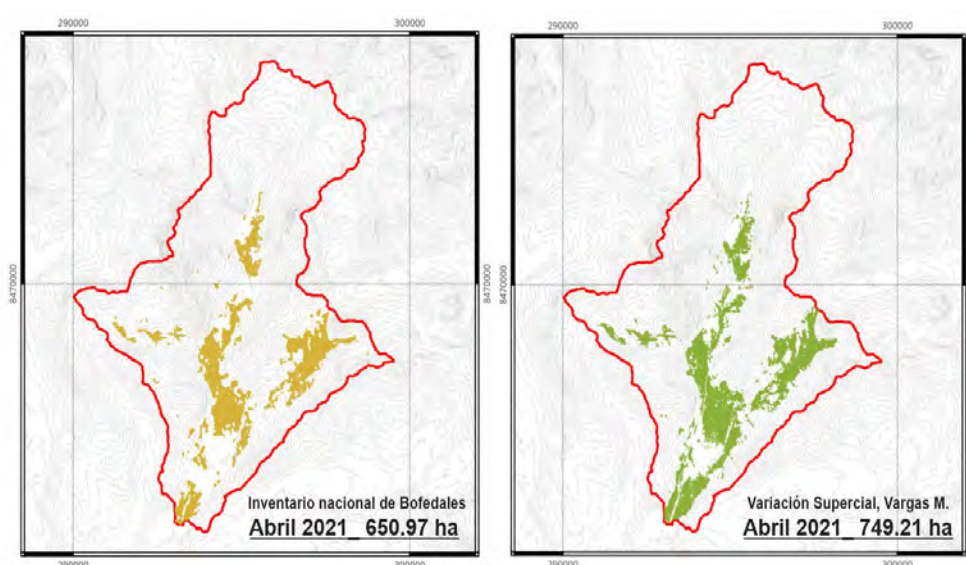


Figura 20. Comparativa con el Inventario Nacional de Bofedales
Fuente: INB - Elaboración propia, 2024

Tabla 7. Comparativa con el Inventario Nacional de Bofedales

Abr-21	
Fuente	Área ha
INB	650.29
Vargas, M	749.21

Fuente: INB - Elaboración propia, 2024

Esta diferencia se puede atribuirse a la mayor resolución espacial y a los criterios metodológicos empleados en el presente trabajo, a pesar de esta diferencia, ambas delimitaciones muestran una alta coincidencia espacial, lo que valida la consistencia de los métodos y resalta la relevancia de complementar los inventarios nacionales con estudios locales de mayor detalle

4.3. Características hidrológicas del Bofedal Alayripampa

4.3.1. Información mensual

Para realizar el análisis de los datos de nivel freático se ha procesado información del sensor Arduino US-084.

El nivel freático registrado en los bofedales de la microcuenca Alayripampa muestra un comportamiento hídrico muy marcado en cuanto al régimen hidrológico, en ambos años 2020 y 2021 los meses de enero a marzo se mantienen constantes, principalmente a la completa saturación del bofedal, también se puede observar que los bofedales registrados en la cuenca, presentan un régimen permanente a lo largo del año, teniendo disminuciones considerables en los meses de época seca.

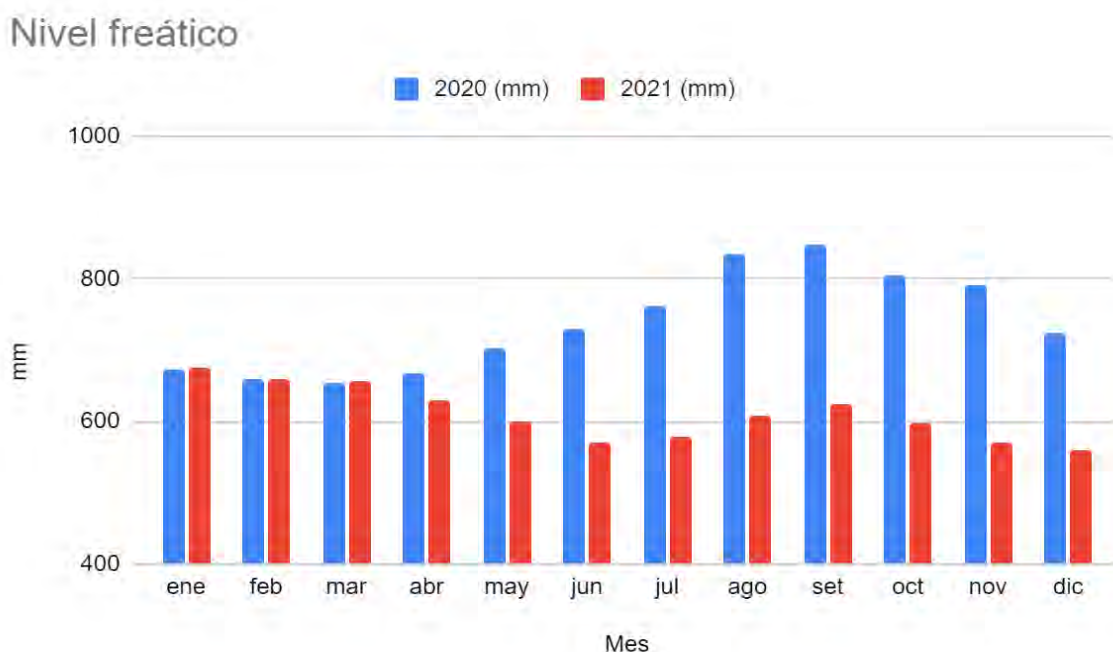


Figura 21. Nivel freático de bofedal 2020 – 2021.
Fuente: Elaboración propia, 2023

4.4. Relación entre el comportamiento hidrológico y la variación de la superficie Bofedal/Humedal

4.4.1. Comportamiento mensual

En el siguiente grafico se observa el comportamiento entre las dos variables, se demuestra la relación entre el nivel freático (mm) y el área del bofedal (ha) a lo largo de 2020, destacando un comportamiento estacional clave a lo largo del año hidrológico. Durante la época de lluvias (noviembre a marzo), el nivel freático alcanza sus valores más altos, con un incremento progresivo de la superficie del bofedal, alcanzando su máximo en febrero. En contraste, en la época seca (abril a octubre), ambos parámetros disminuyen notablemente, con un descenso del área del bofedal y del nivel freático, reflejando la reducción de la presencia de lluvias disponible en la cuenca y la reducción de la extensión del bofedal.

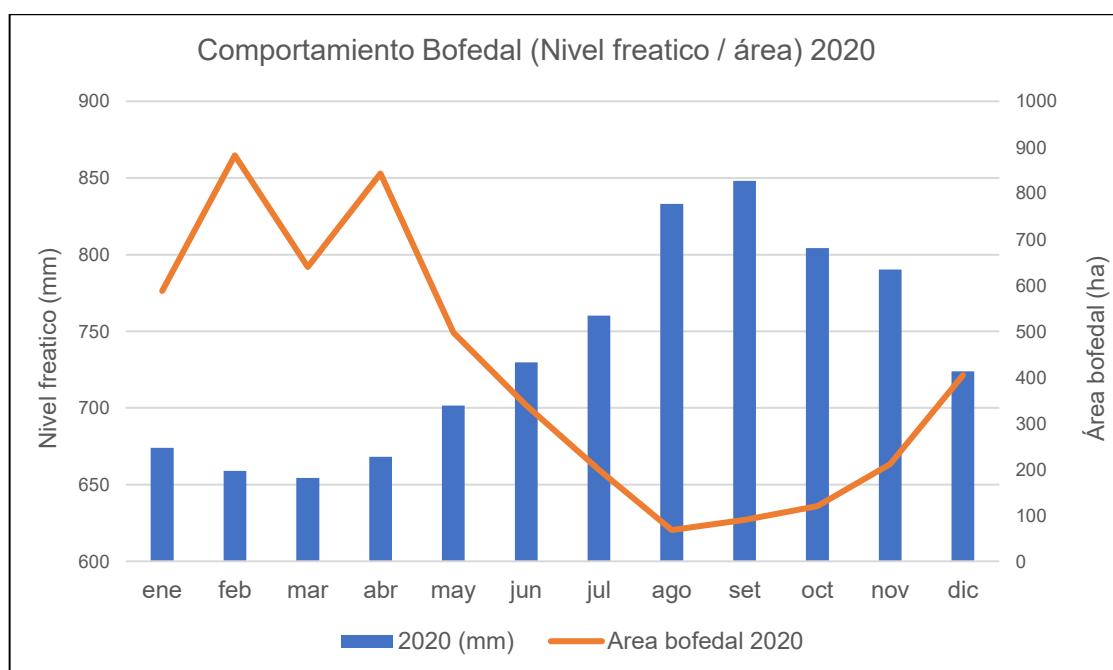


Figura 22. Comportamiento mensual del bofedal 2020.
Fuente: Elaboración propia, 2024

Por otro lado, en el año 2021, se aprecia una notable disminución del área del bofedal durante los meses de la época seca (abril a octubre), alcanzando el punto más bajo en julio. Sin embargo, el nivel freático se mantiene relativamente estable, con ligeras fluctuaciones, aunque también desciende durante el periodo seco. Es importante destacar que en 2021 se presentaron dificultades en el cálculo del área del bofedal debido a la presencia de nieve en las imágenes satelitales, lo que pudo afectar la precisión de los datos especialmente en los meses de la temporada lluviosa (noviembre a marzo).

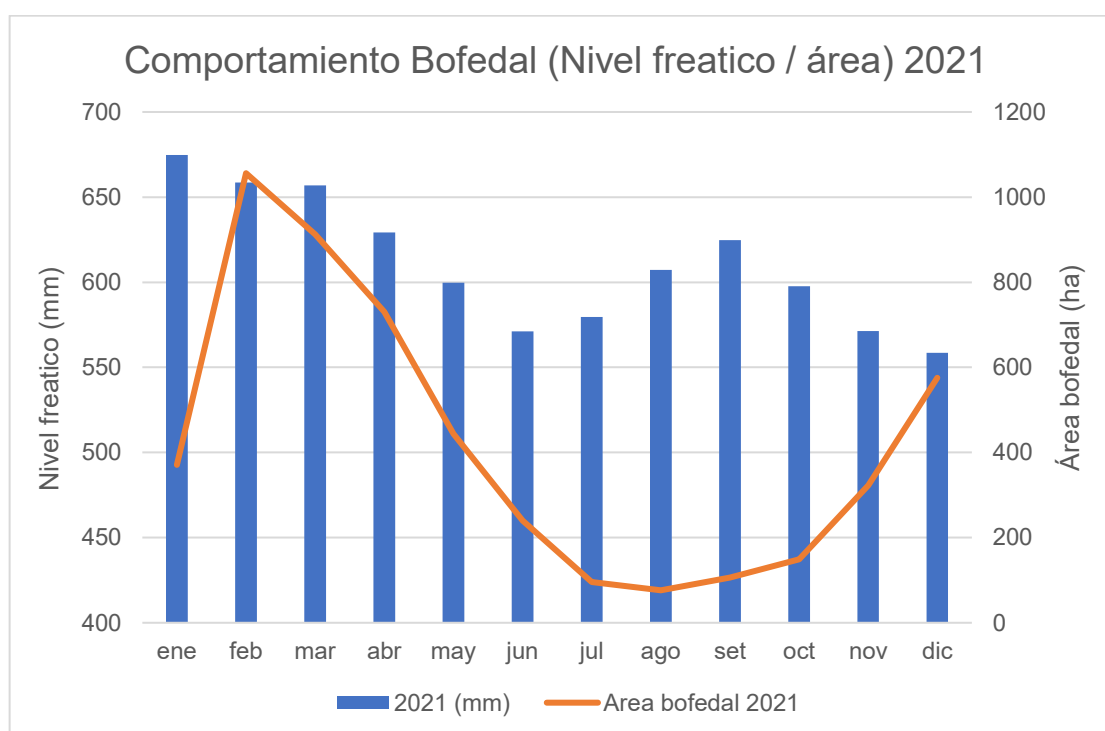


Figura 23. Comportamiento mensual del bofedal 2021.

Fuente: Elaboración propia, 2024

4.5. Correlación entre las variables evaluadas

El análisis de la relación entre el nivel freático y el área del bofedal durante el año 2020 muestra una fuerte correlación negativa: $R = -0.965$, $p\text{-valor} < 2e-16$, lo que indica que, a medida que el área del bofedal aumenta, el sensor y el nivel del agua disminuye significativamente. Los datos muestran un patrón estacional claro: los meses con mayor área del bofedal, como febrero (882.49 ha) y marzo (639.98 ha), presentan niveles freáticos de distancia entre el sensor sónico y el nivel del agua más bajos, con valores de 658.9 mm y 654.3 mm, respectivamente. Por el contrario, en meses de menor área de bofedal, como agosto (68.06 ha) y septiembre (90.01 ha), los niveles de espejo de agua son considerablemente más altos (833.2 mm y 848.2 mm). Este comportamiento hidrico sugiere que, en los periodos de menor expansión del bofedal, se incrementa probablemente por la evapotranspiración, lo que reduce considerablemente el nivel de agua subterránea.

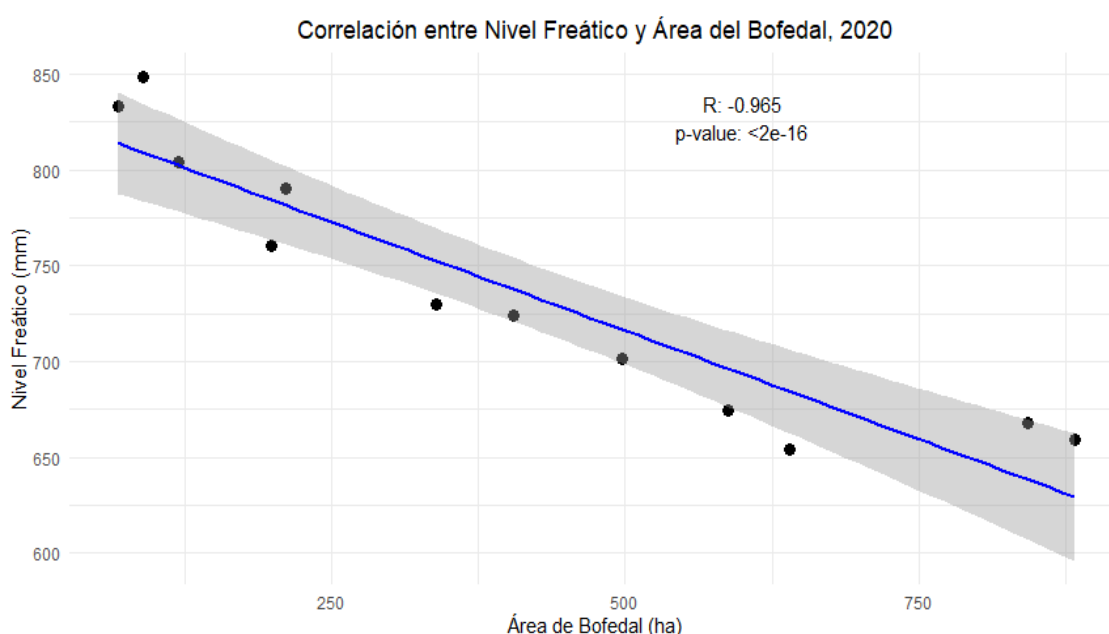


Figura 24. Correlación Nivel freático / Área bofedal 2020

Fuente: Elaboración propia, 2024

La consistencia de esta relación, respaldada por su alta significancia estadística, subraya la importancia de los ciclos estacionales en la dinámica hídrica de los bofedales.

La figura 23 muestra la correlación entre el nivel freático y el área del bofedal para el año 2021, con un coeficiente de correlación de $R = 0.371$ y un p-valor de 0.24, lo que indica una correlación positiva débil y no significativa entre ambas variables.

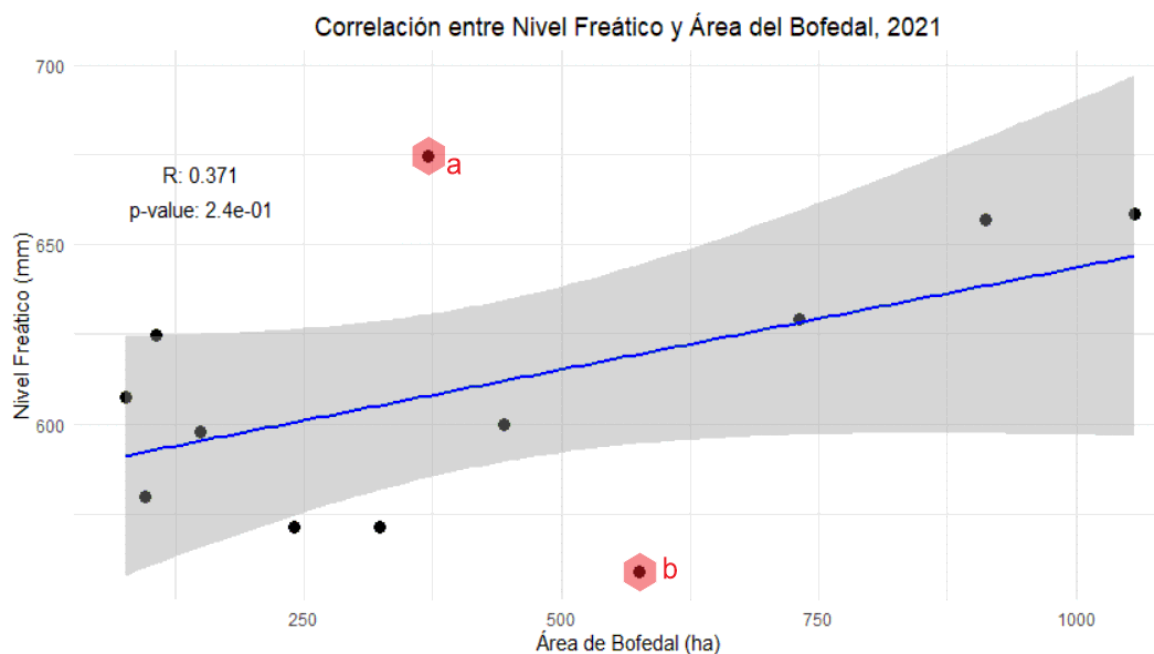


Figura 25. Correlación Nivel freático / Área bofedal 2021

Fuente: Elaboración propia, 2024

A diferencia del comportamiento observado en 2020, donde la correlación fue fuertemente negativa, en 2021 se observan eventos extraordinarios notables: el evento **a** se encuentra alrededor de un área de 500 hectáreas y un nivel freático de 600 mm, mientras que el evento **b** muestra una expansión considerable del bofedal, con un área cercana a 1000 hectáreas y un nivel freático bajo, cerca de 650 mm.

Estos puntos se desvían del patrón general del gráfico y podrían tener dos explicaciones: (1) un error en la clasificación del área debido a condiciones meteorológicas adversas como la presencia de nubes o nieve, afectando la precisión de las imágenes satelitales; o (2) cambios hídricos importantes, como la presencia de lluvias extemporáneas en la cuenca.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- 1. Determinar la variación mensual del área superficial del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota, entre los años 2020 y 2021.-** Para evaluar la dinámica superficial del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa se aplicó un algoritmo de clasificación supervisada en Google Earth Engine, utilizando imágenes satelitales multiespectrales de los años 2020 y 2021. El procesamiento integrado de índices espectrales permitió discriminar las áreas cubiertas por bofedal, evidenciando variaciones significativas en su extensión mensual relacionadas con el régimen hídrico anual. Por ejemplo, en enero de 2020 el área registrada fue de 587.47 ha, bajando a 370.69 ha en 2021, posiblemente por menor precipitación ese año. En febrero se observó un aumento en 2021 (1056.19 ha) comparado con 2020 (882.49 ha), atribuido a mayor precipitación y posibles sobreestimaciones del sensor por condiciones atmosféricas. Durante la temporada seca (abril a octubre) el área disminuyó notablemente, con mínimos en julio, y recuperación en noviembre, indicando patrones hidrológicos marcados. La comparación entre los resultados del algoritmo y el Inventario Nacional de Bofedales mostró diferencias en áreas detectadas (ej. abril 2021: 749.21 ha vs. 650.29 ha), posiblemente debidas a la metodología o resolución de imágenes, pero con consistencia espacial en la microcuenca Alayripampa.

2. Determinar la variación mensual del área superficial del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota, entre los años 2020 y 2021. Para el monitoreo del comportamiento hidrológico del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, se utilizó información proveniente de sensores instalados en el área, como parte del proyecto RAHU durante el año 2019. Estos sensores registraron datos a una escala temporal de 5 minutos, que posteriormente fueron procesados a escala mensual para facilitar el análisis. Es importante señalar que el nivel freático fue medido como la distancia entre el sensor y el espejo de agua, reflejando así las variaciones del régimen hídrico temporal o estacional.

Los registros muestran que, durante los primeros meses de cada año, el nivel freático se mantiene relativamente estable, debido a la saturación del humedal durante la época de lluvias. Por ejemplo, en enero los valores de 2020 y 2021 son muy similares, con 674.1 mm y 674.7 mm respectivamente, indicando una cantidad comparable de agua disponible. En febrero, las diferencias son mínimas, con valores de 658.9 mm en 2020 y 658.5 mm en 2021, lo que sugiere saturación completa propia de la temporada de lluvias.

Durante la época seca, de abril a octubre, se observan incrementos significativos en la distancia entre el sensor y el espejo de agua, indicando una disminución en el volumen de agua disponible. En junio se detectaron 729.7 mm en 2020 frente a 571.2 mm en 2021, evidenciando una marcada reducción hídrica en ese último año.

Esta tendencia continúa en julio, con valores de 760.2 mm en 2020 y 579.6 mm en 2021, lo cual indica que en 2021 hubo un cambio significativo en el régimen hídrico, asociado a la precipitación ocurrida en la microcuenca Alayripampa.

- 3. Determinar la variación mensual del área superficial del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa, Cordillera Vilcanota, entre los años 2020 y 2021.** Se establece la relación entre el nivel freático y el área del humedal altoandino de la microcuenca Alayripampa. En 2020 se observa una correlación negativa fuerte ($R = -0.965$, $p\text{-valor} < 2e-16$), lo que indica que, a medida que el área del humedal aumenta, la distancia entre el sensor y el espejo de agua disminuye, reflejando una mayor presencia de agua. Este patrón estacional es claro: en meses de mayor área, como febrero con 882.49 ha y marzo con 639.98 ha, los niveles freáticos alcanzan valores bajos de 658.9 mm y 654.3 mm, respectivamente. En contraste, durante los meses secos, como agosto (68.06 ha) y septiembre (90.01 ha), la distancia entre el sensor y el agua aumenta significativamente, con 833.2 mm y 848.2 mm, indicando menor cantidad de agua disponible. Para el año 2021, la relación entre el nivel freático y el área del humedal presenta una correlación positiva débil ($R = 0.371$, $p\text{-valor} = 0.24$), lo que sugiere que no existe una relación estadísticamente significativa entre ambas variables. En este año se presentan dos eventos destacados que se desvían del patrón general: el evento "a" con un área aproximada de 500 ha y un nivel freático de 600 mm, y el evento "b", que muestra una expansión considerable del humedal hasta 1000

ha, con un nivel freático bajo de 650 mm. Estas excepciones podrían deberse a (1) errores en la clasificación del área del humedal causados por condiciones meteorológicas adversas, como nubes o nieve que afectaron la precisión de las imágenes satelitales, o (2) lluvias extemporáneas en la microcuenca que provocaron una recarga abrupta y tardía, modificando el comportamiento hidrológico en esos meses específicos.

5.2. RECOMENDACIONES

- Ampliar el análisis temporal de variación superficial de los bofedales mediante sensoramiento remoto a escala temporal en diferentes cuencas con presencia de bofedales.
- Continuar con el monitoreo hídrico de bofedales, poner en marcha y dar el mantenimiento correspondiente tres veces al año a los sensores instalados en la cuenca, por parte de la UNSAAC.
- Replicar el estudio de sensoramiento remoto en áreas con presencia de bofedales para validar el código de clasificación en diferentes zonas.
- Se recomienda realizar mayores estudios de investigación que involucren ecosistemas de montaña, considerando el aporte que ofrecen para el ciclo de regulación hídrica en cabeceras de cuenca.
- Estudiar interacción glaciar-bofedal, para poder analizar cómo el retroceso del glaciar Suyuparina-Quisoquipina afecta la recarga hídrica de los bofedales en la microcuenca Alayripampa.

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca del Río, R. (2018). Importancia de los humedales altoandinos en la gestión del agua y su conexión con los servicios ecosistémicos en la región andina. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(3), 343-353.
- Alva Huayaney, M., & Ramos Alonzo, R. (2018). Evolución de los glaciares de los nevados Collquepucre, Llongote, Pariacaca y Ticlla en la cuenca del río Cañete. *Investigaciones Sociales*, 21(38), 97–106. <https://doi.org/10.15381/is.v21i38.14219>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2018). Clasificación de los cuerpos de agua continentales superficiales. Autoridad Nacional del Agua. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2439>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2014). Inventario de Glaciares del Perú (2da actualización). Huaraz, Perú.
- Aponte-Saravia, J., & Ospina-Noreña, J. E. (2019). Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos. *Revista de Teledetección*, 53, Article 53. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.10580>
- Arévalo, L. A. P. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea en la porción centro-sur de la Mesa Central de México. *Investigaciones Geográficas*, 81, 7-22. <https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/30518>
- Berhane, T. M., Lane, C. R., Wu, Q., Autrey, B. C., Anenkhonov, O. A., Chepinoga, V. V., & Liu, H. (2018). Decision-Tree, Rule-Based, and Random Forest Classification of High-Resolution Multispectral Imagery for Wetland Mapping and Inventory. *Remote Sensing*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/rs10040580>
- Campaña-Olaya, J., & Tafur, E. G. (2021). Análisis multitemporal del NDDI, comparación con el NDWI para determinar la sequía en la Reserva Nacional de Tumbes, Perú, 1986—2019. *Manglar*, 18(4), Article 4. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.050>

- Carlson, B. Z., Hébert, M., Van Reeth, C., Bison, M., Laigle, I., & Delestrade, A. (2020). Monitoring the Seasonal Hydrology of Alpine Wetlands in Response to Snow Cover Dynamics and Summer Climate: A Novel Approach with Sentinel-2. *Remote Sensing*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/rs12121959>
- CONDESAN. (2012). *Sustainable Mountain Development in the Andes* (Vol. 4).
- CONDESAN. (2023, junio 15). Presentado el Primer Inventario Nacional de Bofedales del Perú. <https://condesan.org/2023/06/15/presentado-el-primer-inventario-nacional-de-bofedales-del-peru/>
- Delalay, M., Tiwari, V., Ziegler, A., Gopal, V., & Passy, P. (2019). Land-use and land-cover classification using Sentinel-2 data and machine-learning algorithms: Operational method and its implementation for a mountainous area of Nepal. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13, 1. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.014530>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). *La microcuenca como ámbito de planificación para la rehabilitación productiva y el manejo sostenible de recursos naturales*. Roma: FAO. <https://www.fao.org/climatechange/3032907fbeat2365b50c707fe5ed283868f23d.pdf>
- García, J., & López, M. (2019). Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina peruana. *Revista de Teledetección*, 38, 97-109. https://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_09.pdf
- García, J., Guerrero, J., Willems, B., & Espinoza, R. (2021). Propuesta de un Índice de Bofedal para la Teledetección de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Usando Datos Imágenes de los Sensores TM, OLI a bordo de los Satélites Landsat - Caso Estudio: Bofedal Chunal, Cuenca Alta del río Chillón. *Revista de Investigación de Física*, 24(2), Article 2. <https://doi.org/10.15381/rif.v24i2.20385>
- Geraldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, 52, 215-225.
- Google Earth Engine. (s.f.). [Motor de Google Earth]. <https://earthengine.google.com>

- Hu, H., Wu, L., Zhan, Y., & Zhang, S. (2021). Spatial and Temporal Pattern Analysis of Land Use in Yangtze River Delta Based on Remote Sensing and GIS in Intelligent Environment. *Advances in Civil Engineering*, 2021, e5561977. <https://doi.org/10.1155/2021/5561977>
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). (2023). Inventario Nacional de Bofedales del Perú 2023. Huaraz, Perú. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/61d605a3-5bba-4357-a1fc-a716d595af8a>
- Javier Silva, L. A., Portal Quicaña, E., & Alcántara Boza, F. A. (2021). Evaluación de la cobertura vegetal en bofedales altoandinos en función de la napa freática y precipitación utilizando imágenes de satélite. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 299-306. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.19521>
- Jiang, L., Wang, W., Yang, X., Xie, N., & Cheng, Y. (2011). Classification Methods of Remote Sensing Image Based on Decision Tree Technologies. En D. Li, Y. Liu, & Y. Chen (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV* (pp. 353-358). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18333-1_41
- Kool, J., Lhermitte, S., Hrachowitz, M., Bregoli, F., & McClain, M. E. (2022). Seasonal inundation dynamics and water balance of the Mara Wetland, Tanzania based on multi-temporal Sentinel-2 image classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 109, 102766. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102766>
- Lenhardt, V. V., Julia. (2019, mayo 21). Introducing the Spectral Index Library in ArcGIS. Esri. <https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/spectral-library/>
- Llano, X. (2024). AcATaMa—Accuracy Assessment of Thematic Maps. GitHub. <https://github.com/SMBByC/AcATaMa/blob/master/README.md>
- Macera Palomino, B. M. (2022). Evaluación del retroceso glaciar y sus implicancias en el recurso hídrico en la cuenca glaciar Alayripampa en los años 2013–2019. Repositorio UNSAAC. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7059>

- Mao, L., Li, M., & Shen, W. (2020). Remote Sensing Applications for Monitoring Terrestrial Protected Areas: Progress in the Last Decade. *Sustainability*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su12125016>
- MINAM. (2019). Guía de evaluación del estado del ecosistema de bofedal. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-evaluacion-estado-ecosistema-bofedal>
- Molina, E., Schauwecker, S., Huggel, C., Haeberli, W., Cochachin Rapre, A., Condom, T., Drenkhan, F., Giráldez, C., Salzmann, N., Jiménez, L., Montoya, N., Rado, M., Chaparro, N., Samata, J., Suarez, W., Arias, S., & Sikos, F. (2015). Iniciación de un monitoreo del balance de masa en el glaciar Suyuparina, Cordillera Vilcanota, Perú. *Autoridad Nacional del Agua*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3185>
- Moncada, J. A., Pellegrini, N., & Aranguren, J. (2013). Los humedales altoandinos venezolanos como espacios naturales: significados para la comunidad local. *Multiciencias*, 13(4), 345-354. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90430055002>
- Paluš, H., Parobek, J., Moravčík, M., Kovalčík, M., Dzian, M., & Murgaš, V. (2020). Projecting Climate Change Potential of Harvested Wood Products under Different Scenarios of Wood Production and Utilization: Study of Slovakia. *Sustainability*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/su12062510>
- Pauca-Tanco, A., Ramos-Mamani, C., Luque-Fernández, C. R., Talavera-Delgado, C., Villasante-Benavides, J. F., Quispe-Turpo, J. P., & Villegas-Paredes, L. (2020). Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016. *Revista de Teledetección*, 0(55), 105-118. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13325>
- Paul, J. D., Buytaert, W., & Sah, N. (2020). A Technical Evaluation of Lidar-Based Measurement of River Water Levels. *Water Resources Research*, 56(4), e2019WR026810. <https://doi.org/10.1029/2019WR026810>
- Peñuela-Arévalo, L. A., & Carrillo-Rivera, J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea en la porción centro-sur de la Mesa Central de México. *Investigaciones Geográficas*, 81, 7-22.

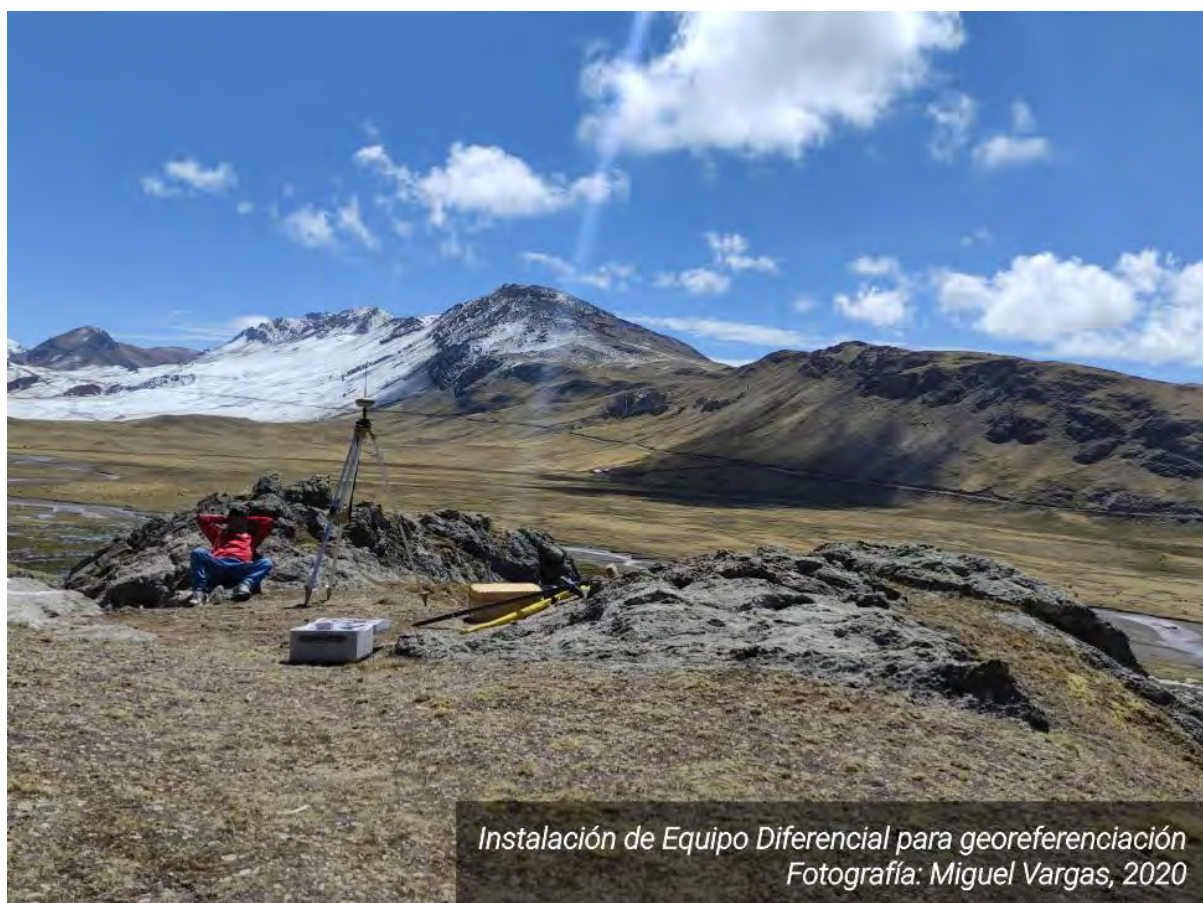
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112013000200003

- Ross, A. C., Mendoza, M. M., Drenkhan, F., Montoya, N., Baiker, J. R., Mackay, J. D., Hannah, D. M., & Buytaert, W. (2023). Seasonal water storage and release dynamics of bofedal wetlands in the Central Andes. *Hydrological Processes*, 37(8), e14940. <https://doi.org/10.1002/hyp.14940>
- SINIA. (2016). Cuencas - Bases conceptuales. Ministerio del Ambiente, Perú. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/cuencas_hidrograficas_bases.pdf
- Sentinel-2—Missions—Sentinel Online. (s.f.). Sentinel Online. <https://copernicus.eu/missions/sentinel-2>
- Servindi. (2022, junio 26). Minam prepara primer Inventario Nacional de Bofedales. <https://www.servindi.org/actualidad-noticias/25/06/2022/minam-prepara-primer-inventario-nacional-de-bofedales>
- Spearman, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72. <https://doi.org/10.2307/1412159>
- Valencia, A. (2018). Relación entre humedales altoandinos y comunidades campesinas: Estudio de caso en la comunidad de Phinaya, Perú.
- Wang, X. (2023). Remote Sensing Applications to Climate Change. *Remote Sensing*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/rs15030747>
- Zhang, L., Hu, Q., & Tang, Z. (2022). Using Sentinel-2 Imagery and Machine Learning Algorithms to Assess the Inundation Status of Nebraska Conservation Easements during 2018–2021. *Remote Sensing*, 14(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/rs14174382>
- Zhang, L., Sun, T., Fei, K., Deng, L., Song, N., Wang, X., ... & Chen, L. (2022). Soil Moisture Variations Of Wetland At Different Altitudes In Desert Regions. *IJEAB*, 5(7), 041-051. <https://doi.org/10.22161/ijeab.75.5>

PANEL FOTOGRAFICO







ANEXOS

ANEXO 01. CODIGO GOOGLE EARTH ENGINE

```
//***** 1. CONFIGURACIÓN DE IMAGENES SENTINEL 2 *****//

// Cargar la geometría del área de estudio
var geometry = ee.FeatureCollection("users/Mvar/tesis/area_tesis");

// DEM (Digital Elevation Model) para análisis de pendiente y altitud
var dem = ee.Image("USGS/SRTMGL1_003");
Map.centerObject(geometry,12);

//***** 2. FILTRADO DE IMÁGENES SENTINEL 2 *****//

// Parámetros del año, mes y porcentaje de nubes
var Year = 2021; // Año de análisis
var Mes = 4; // Mes de análisis
var CloudCover = 10; // Máximo porcentaje de cobertura de nubes

// Fechas de inicio y fin
var Fecha_Inicial = Year + '-' + Mes + '-01';
var Fecha_Final = Year + '-' + Mes + '-30';

// Filtrar la colección Sentinel 2 por la geometría y las fechas
var Coll_Sentinel = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
    .filterBounds(geometry)
    .filterDate(Fecha_Inicial, Fecha_Final)
    .filterMetadata('CLOUD_COVERAGE_ASSESSMENT', 'less_than',
CloudCover);

// Seleccionar bandas espectrales: azul (B2), verde (B3), rojo (B4), NIR
(B8), SWIR (B11)
var Bands = ['B2', 'B3', 'B4', 'B8', 'B11'];

// Crear un mosaico usando la mediana
var Mosaico = Coll_Sentinel.median().clip(geometry).select(Bands);

// Añadir el mosaico al mapa para visualización
Map.addLayer(Mosaico,{min:100, max:5000,
bands:['B11', 'B8', 'B4']}, 'Mosaico', true);

//***** 3. CALCULO DE ÍNDICES (NDSI, NDWI, NDII) *****//

// Calcular NDSI (Índice de nieve)
var ndsi = Mosaico.expression('(green - swir1)/(green + swir1)', {
'green': Mosaico.select('B3'),
```

```

    'swir1': Mosaico.select('B11'))});

// Calcular NDWI (Índice de agua)
var ndwi = Mosaico.expression('(green - nir)/(green + nir)', {
  'green': Mosaico.select('B3'),
  'nir': Mosaico.select('B8'))});

// Calcular NDII (Índice de humedad)
var ndii = Mosaico.expression('(nir - swir1)/(nir + swir1)', {
  'nir': Mosaico.select('B8'),
  'swir1': Mosaico.select('B11'))});

//***** 4. ANÁLISIS DEL TERRENO (ALTITUD Y PENDIENTE) *****/

// Calcular la pendiente a partir del DEM
var slope = ee.Terrain.slope(dem).rename('slope');

// Parámetros visuales para el DEM
var parame_dem = {
  min: 0,
  max: 6000,
  palette: ['006633', 'FFFFCC', '662A00', 'D8D8D8', 'F5F5F5'],};

// Cargar la altitud
var altitud = ee.Image(dem);

// Parámetros visuales para la altitud
var parame_alti = {
  min: 0,
  max: 6000,
  palette: ['006633', 'FFFFCC', '662A00', 'D8D8D8', 'F5F5F5'],};

//***** 5. UMBRALES Y CLASIFICACIÓN *****/

// Máscaras para detectar humedad, nieve y agua
var hume = ndii.gte(0.15).selfMask(); // Humedad
var nieve = ndsi.gte(0.4).selfMask(); // Nieve
var agua = ndwi.gte(0.1).selfMask(); // Agua

// Añadir capas al mapa
Map.addLayer(hume, {palette: ['yellow']}, 'Humedad', false);
Map.addLayer(nieve, {palette: ['red']}, 'Nieve', false);
Map.addLayer(agua, {palette: ['blue']}, 'Agua', false);
Map.addLayer(slope.clip(geometry).updateMask(slope.gt(0)), parame_dem,
'DEM', false);
Map.addLayer(altitud.clip(geometry).updateMask(altitud.gt(0)),
parame_alti, 'Altitud', false);

```

```

// Clasificación final para humedales con umbrales específicos
var hume2 = ndsi.lte(0.4)
    .and(ndwi.lte(0.1))
    .and(ndii.gte(0.15))
    .and(altitud.lte(5100))
    .and(slope.lte(20))
    .selfMask();

// Añadir resultado final al mapa
Map.addLayer(hume2, {palette: ['yellow']}, 'Humedal final', true);

//***** 6. CÁLCULO DEL ÁREA DE HUMEDALES *****/
// Calcular el área de los humedales
var Area_HUM2 = hume2.multiply(ee.Image.pixelArea()).rename('Area')
    .reduceRegion({
        reducer: ee.Reducer.sum(),
        geometry: geometry,
        scale: 10 });
print('Área de humedales', Area_HUM2.get('Area'));

//***** 7. EXPORTACIÓN *****/
// Exportar el mosaico de imágenes de Sentinel-2
Export.image.toDrive({
    image: Mosaico,
    description: 'S2_' + Year + '_' + Mes,
    folder: 'Tesis2',
    fileNamePrefix: 'S2_' + Year + '_' + Mes,
    region: geometry,
    scale: 10,
    crs: 'EPSG:32719',
    maxPixels: 1e13});

// Exportar el shapefile de los humedales clasificados
var Hume_shp = hume2.addBands(hume2).reduceToVectors({
    geometry: geometry,
    scale: 10,
    geometryType: 'polygon',
    labelProperty: 'Humedal',
    reducer: ee.Reducer.mean()});

Export.table.toDrive({
    collection: Hume_shp,
    description: 'Humedal_' + Year + '_' + Mes,
    folder: 'Tesis2',
    fileFormat: 'SHP'});

```

ANEXO 02. CODIGO CONTROL DE DATOS RSTUDIO

```
##### 1. CARGAR LIBRERÍAS #####//

# Cargar Las Librerías necesarias
library(tidyverse)
library(data.table)
library(lubridate) # Para manejar fechas y horas

##### 2. CONFIGURACIÓN INICIAL #####//

# Establecer el directorio de trabajo
setwd("E:/Anteproyecto de Tesis - Vargas/R/Piezometros/datos")

# Listar todos Los archivos CSV en mayúsculas
archivos_csv <- list.files(path = ".", pattern = "*.CSV")

# Leer todos Los archivos CSV en una Lista de dataframes
lista_csv <- lapply(archivos_csv, read.csv, header = FALSE)

# Unir todos Los dataframes en uno solo
data <- dplyr::bind_rows(lista_csv)

##### 3. PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS #####//

# Renombrar columnas
colnames(data) <- c("Fecha_char", "X1", "X2", "X3", "X4", "X5",
"X6", "X7", "X8", "X9", "X10", "X11", "X12")

# Convertir La columna 'Fecha_char' a formato de fecha en zona
horaria UTC
data$Fecha_Date <- as.POSIXct(data$Fecha_char, format = "%Y/%m/%d
%H:%M:%S", tz = "UTC")

# Ajustar la fecha a tu zona horaria local (por ejemplo,
"America/Lima" para Perú)
data$Fecha_Local <- with_tz(data$Fecha_Date, tzone = "America/Lima")
```

***** 4. CÁLCULO DEL PROMEDIO *****//

```
# Calcular el promedio de las 10 mediciones para cada registro
data$Promedio_Mediciones <- rowMeans(data[, 2:11], na.rm = TRUE) #
Ajustar para las columnas de medición
```

```
# Filtrar solo los datos correspondientes al año 2020
```

```
data_2020 <- data %>%
  filter(year(Fecha_Local) == 2020) %>%
  filter(Promedio_Mediciones <= 1000 & Promedio_Mediciones >= 0) #
Filtrar valores de promedio
```

***** 5. ANÁLISIS DIARIO *****//

```
# Agrupar por fecha y calcular el promedio diario
```

```
promedio_diario <- data_2020 %>%
  group_by(Fecha_Dia = as.Date(Fecha_Local)) %>%
  summarise(Promedio_Diario = mean(Promedio_Mediciones, na.rm =
TRUE))
```

```
# Extraer el mes para cada promedio diario
```

```
promedio_diario$Mes <- month(promedio_diario$Fecha_Dia)
```

```
# Convertir el número del mes a factor para mantener el orden
```

```
promedio_diario$Mes <- factor(promedio_diario$Mes, levels = 1:12,
labels = month.abb)
```

***** 6. CREACIÓN DE GRÁFICOS *****//

```
# Crear gráfico de cajas para el promedio diario
```

```
ggplot(promedio_diario, aes(x = Mes, y = Promedio_Diario)) +
  geom_boxplot() + # Gráfico de cajas
  geom_jitter(color = "red", size = 1, alpha = 0.5) + # Puntos con
jitter
labs(title = "Distribución del Promedio Diario de Mediciones
(2020)",
  x = "MESES",
  y = "Promedio SENSOR (mm)") +
  theme_minimal() + # Tema minimalista
  scale_x_discrete(limits = month.abb) # Asegurar el orden correcto
de los meses
```

Versión con tema Tufte

```
ggplot(promedio_diario, aes(x = Mes, y = Promedio_Diario)) +  
  geom_boxplot(fill = "skyblue", color = "black", outlier.color =  
"red", outlier.size = 2) +  
  geom_jitter(color = "darkred", size = 1, alpha = 0.6) +  
  labs(title = "Distribución del Promedio Diario de Mediciones  
(2020)",  
        x = "MESES",  
        y = "Promedio SENSOR (mm)") +  
  theme_tufte(base_size = 15) + # Tema Tufte  
  theme(  
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 20, face =  
"bold"), # Centrar y aumentar tamaño del título  
    axis.title.x = element_text(size = 14, face = "bold"), # Estilo  
del eje x  
    axis.title.y = element_text(size = 14, face = "bold"), # Estilo  
del eje y  
    axis.text.x = element_text(size = 12), # Tamaño del texto del  
eje x  
    axis.text.y = element_text(size = 12) # Tamaño del texto del  
eje y  
  ) +  
  scale_x_discrete(limits = month.abb) # Asegurar el orden correcto  
de los meses
```

ANEXO 03. CODIGO ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE NIVEL FREÁTICO Y ÁREA DE BOFEDAL

```
##### 1. CARGAR LIBRERÍAS NECESARIAS #####//

# Librerías para gráficos y pruebas estadísticas
library(ggplot2)
library(trend)

##### 2. CREACIÓN DEL DATA FRAME #####//

# Datos de nivel freático y área de bofedal para el año 2021
data_2021 <- data.frame(
  Month = c("Ene", "Feb", "Mar", "Abr", "May", "Jun", "Jul", "Ago",
    "Set", "Oct", "Nov", "Dic"),
  nivel_freatico = c(674.7, 658.5, 656.8, 629.3, 599.7, 571.2,
    579.6, 607.3, 624.7, 597.7, 571.4, 558.6),
  Area_bofedal = c(370.69, 1056.1893, 912.36, 730.47, 444.04,
    239.84, 95.93, 76.29, 106.43, 149.17, 323.0255, 575.67)
)

##### 3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO #####//

# Test de Mann-Kendall para nivel freático y área de bofedal
nivel_freatico_test_2021 <- mk.test(data_2021$nivel_freatico)
area_bofedal_test_2021 <- mk.test(data_2021$Area_bofedal)

# Correlación de Spearman entre nivel freático y área de bofedal
spearman_test_2021 <- cor.test(data_2021$nivel_freatico,
  data_2021$Area_bofedal, method = "spearman")
p_value_2021 <- spearman_test_2021$p.value
rho_2021 <- spearman_test_2021$estimate

##### 4. GRÁFICO DE CORRELACIÓN #####//

# Gráfico de dispersión y línea de regresión
ggplot(data_2021, aes(x = Area_bofedal, y = nivel_freatico)) +
  geom_point(size = 3, color = "black") + # Puntos de datos
  geom_smooth(method = "lm", color = "blue", se = TRUE) + # Línea
  de regresión
  labs(title = "Correlación entre Nivel Freático y Área del Bofedal,
    2021",
    x = "Área de Bofedal (ha)",
```

```

    y = "Nivel Freático (mm)") +
theme_minimal() + # Tema minimalista
annotate("text", x = 150, y = 670, # Mostrar valor de R en el
gráfico
        label = paste("R:", round(rho_2021, 3)),
        size = 4, color = "black") +
annotate("text", x = 150, y = 660, # Mostrar p-value
        label = paste("p-value:", format.pval(p_value_2021,
digits = 2, scientific = TRUE)),
        size = 4, color = "black") +
theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5)) # Centrar el título

```

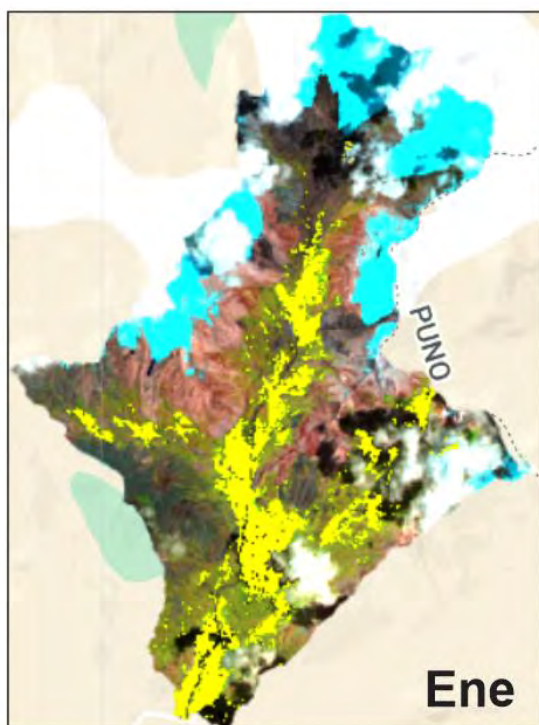
ANEXO 04. LISTA DE IMÁGENES UTILIZADAS EN EL SENSORAMIENTO REMOTO

Detalle de colecta de imágenes de reflectancia 2020					
N°	Mes	Imagen	Cloud_cover	Cloud_cod	Fecha
1	Ene	COPERNICUS/S2_SR/20200110T145721_20200110T145720_T19LBE	22.09	30	10/01/2020
1	Feb	COPERNICUS/S2_SR/20200219T145721_20200219T150530_T19LBE	37.10	50	19/02/2020
1	Mar	COPERNICUS/S2_SR/20200305T145729_20200305T150537_T19LBE	62.84	70	05/03/2020
2	Mar	COPERNICUS/S2_SR/20200310T145721_20200310T150405_T19LBE	43.34	70	10/03/2020
3	Mar	COPERNICUS/S2_SR/20200325T145729_20200325T150244_T19LBE	33.56	70	25/03/2020
1	Abr	COPERNICUS/S2_SR/20200414T145719_20200414T150535_T19LBE	4.00	10	14/04/2020
1	May	COPERNICUS/S2_SR/20200509T145731_20200509T150215_T19LBE	14.64	20	09/05/2020
2	May	COPERNICUS/S2_SR/20200514T145729_20200514T150538_T19LBE	7.21	20	14/05/2020
3	May	COPERNICUS/S2_SR/20200519T145731_20200519T145937_T19LBE	12.00	20	19/05/2020
4	May	COPERNICUS/S2_SR/20200529T145731_20200529T150217_T19LBE	0.94	20	29/05/2020
1	Jun	COPERNICUS/S2_SR/20200608T145731_20200608T150217_T19LBE	4.67	10	08/06/2020
2	Jun	COPERNICUS/S2_SR/20200613T145729_20200613T150539_T19LBE	0.56	10	13/06/2020
3	Jun	COPERNICUS/S2_SR/20200618T145731_20200618T150227_T19LBE	0.17	10	18/06/2020
4	Jun	COPERNICUS/S2_SR/20200623T145729_20200623T150542_T19LBE	2.47	10	23/06/2020
5	Jun	COPERNICUS/S2_SR/20200628T145731_20200628T150227_T19LBE	2.60	10	28/06/2020
1	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20200703T145729_20200703T150541_T19LBE	38.75	40	03/07/2020
2	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20200708T145731_20200708T150215_T19LBE	33.81	40	08/07/2020
3	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20200713T145729_20200713T150538_T19LBE	16.55	40	13/07/2020
4	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20200718T145731_20200718T150215_T19LBE	0.49	40	18/07/2020
5	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20200723T145729_20200723T150418_T19LBE	5.39	40	23/07/2020
1	Ago	COPERNICUS/S2_SR/20200807T145731_20200807T150216_T19LBE	33.62	40	07/08/2020
2	Ago	COPERNICUS/S2_SR/20200817T145731_20200817T150216_T19LBE	14.45	40	17/08/2020
3	Ago	COPERNICUS/S2_SR/20200827T145731_20200827T150516_T19LBE	25.15	40	27/08/2020
1	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20200901T145729_20200901T150459_T19LBE	32.89	50	01/09/2020
2	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20200906T145731_20200906T150515_T19LBE	8.12	50	06/09/2020
3	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20200911T145729_20200911T150552_T19LBE	32.25	50	11/09/2020
4	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20200916T145731_20200916T150646_T19LBE	37.44	50	16/09/2020
5	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20200921T145729_20200921T150339_T19LBE	28.54	50	21/09/2020
6	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20200926T145731_20200926T145731_T19LBE	8.08	50	26/09/2020
1	Oct	COPERNICUS/S2_SR/20201006T145731_20201006T145803_T19LBE	1.88	10	06/10/2020
2	Oct	COPERNICUS/S2_SR/20201026T145731_20201026T150248_T19LBE	4.09	10	26/10/2020
1	Nov	COPERNICUS/S2_SR/20201105T145731_20201105T150410_T19LBE	8.81	10	05/11/2020
2	Nov	COPERNICUS/S2_SR/20201115T145731_20201115T150536_T19LBE	6.85	10	15/11/2020
1	Dic	COPERNICUS/S2_SR/20201215T145721_20201215T145723_T19LBE	33.76	40	15/12/2020

Detalle de colecta de imágenes de reflectancia 2021

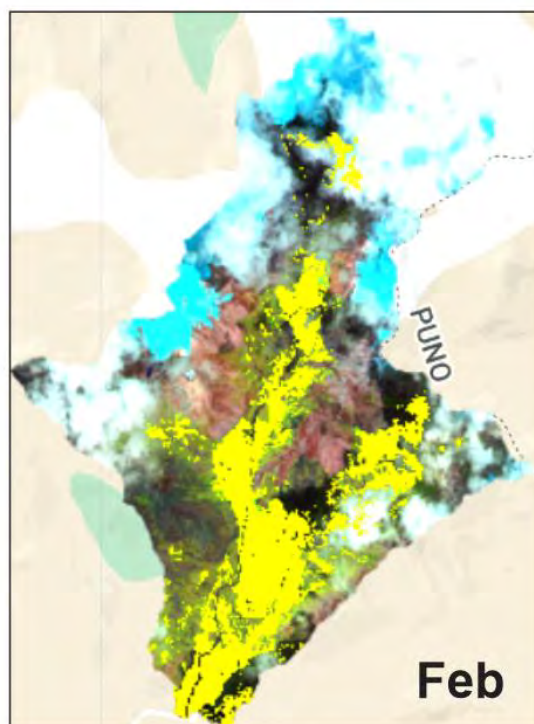
Nro.	Mes	Imagen	Cloud_cover	Cloud Código	Fecha
1	Ene	COPERNICUS/S2_SR/20210104T145731_20210104T145726_T19LBE	62.68	90	04/01/2021
2	Ene	COPERNICUS/S2_SR/20210109T145729_20210109T150603_T19LBE	78.38	90	09/01/2021
3	Ene	COPERNICUS/S2_SR/20210119T145729_20210119T150532_T19LBE	57.82	90	19/01/2021
4	Ene	COPERNICUS/S2_SR/20210124T145731_20210124T150605_T19LBE	73.25	90	24/01/2021
5	Ene	COPERNICUS/S2_SR/20210129T145729_20210129T150445_T19LBE	42.18	90	29/01/2021
1	Feb	COPERNICUS/S2_SR/20210213T145721_20210213T150245_T19LBE	73.15	80	13/02/2021
1	Mar	COPERNICUS/S2_SR/20210310T145729_20210310T150325_T19LBE	33.09	60	10/03/2021
2	Mar	COPERNICUS/S2_SR/20210325T145721_20210325T150603_T19LBE	37.06	60	25/03/2021
1	Abr	COPERNICUS/S2_SR/20210419T145719_20210419T150346_T19LBE	5.78	50	19/04/2021
2	Abr	COPERNICUS/S2_SR/20210424T145721_20210424T150507_T19LBE	32.35	50	24/04/2021
3	Abr	COPERNICUS/S2_SR/20210429T145719_20210429T150434_T19LBE	40.49	50	29/04/2021
1	May	COPERNICUS/S2_SR/20210509T145729_20210509T150454_T19LBE	4.76	10	09/05/2021
2	May	COPERNICUS/S2_SR/20210519T145729_20210519T150626_T19LBE	1.68	10	19/05/2021
3	May	COPERNICUS/S2_SR/20210529T145729_20210529T150432_T19LBE	3.81	10	29/05/2021
1	Jun	COPERNICUS/S2_SR/20210608T145729_20210608T150457_T19LBE	2.09	10	08/06/2021
2	Jun	COPERNICUS/S2_SR/20210613T145731_20210613T150551_T19LBE	3.80	10	13/06/2021
3	Jun	COPERNICUS/S2_SR/20210623T145731_20210623T150555_T19LBE	1.50	10	23/06/2021
1	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20210708T145729_20210708T150458_T19LBE	11.74	40	08/07/2021
2	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20210713T145731_20210713T150524_T19LBE	0.32	40	13/07/2021
3	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20210723T145731_20210723T150514_T19LBE	0.51	40	23/07/2021
4	Jul	COPERNICUS/S2_SR/20210728T145729_20210728T150331_T19LBE	36.86	40	28/07/2021
1	Ago	COPERNICUS/S2_SR/20210807T145729_20210807T150457_T19LBE	14.99	20	07/08/2021
2	Ago	COPERNICUS/S2_SR/20210812T145731_20210812T150510_T19LBE	2.11	20	12/08/2021
3	Ago	COPERNICUS/S2_SR/20210817T145729_20210817T150431_T19LBE	15.38	20	17/08/2021
4	Ago	COPERNICUS/S2_SR/20210822T145731_20210822T150513_T19LBE	3.59	20	22/08/2021
1	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20210901T145731_20210901T150317_T19LBE	16.52	10	01/09/2021
2	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20210916T145719_20210916T150134_T19LBE	10.19	10	16/09/2021
3	Sep	COPERNICUS/S2_SR/20210926T145729_20210926T150531_T19LBE	14.68	10	26/09/2021
1	Oct	COPERNICUS/S2_SR/20211001T145731_20211001T145741_T19LBE	27.71	70	01/10/2021
2	Oct	COPERNICUS/S2_SR/20211011T145731_20211011T150002_T19LBE	43.78	70	11/10/2021
3	Oct	COPERNICUS/S2_SR/20211016T145729_20211016T150230_T19LBE	55.49	70	16/10/2021
4	Oct	COPERNICUS/S2_SR/20211021T145731_20211021T150154_T19LBE	6.04	70	21/10/2021
5	Oct	COPERNICUS/S2_SR/20211026T145729_20211026T150404_T19LBE	24.51	70	26/10/2021
1	Nov	COPERNICUS/S2_SR/20211115T145729_20211115T150444_T19LBE	40.15	50	15/11/2021
1	Dic	COPERNICUS/S2_SR/20211230T145731_20211230T145727_T19LBE	29.39	30	30/12/2021

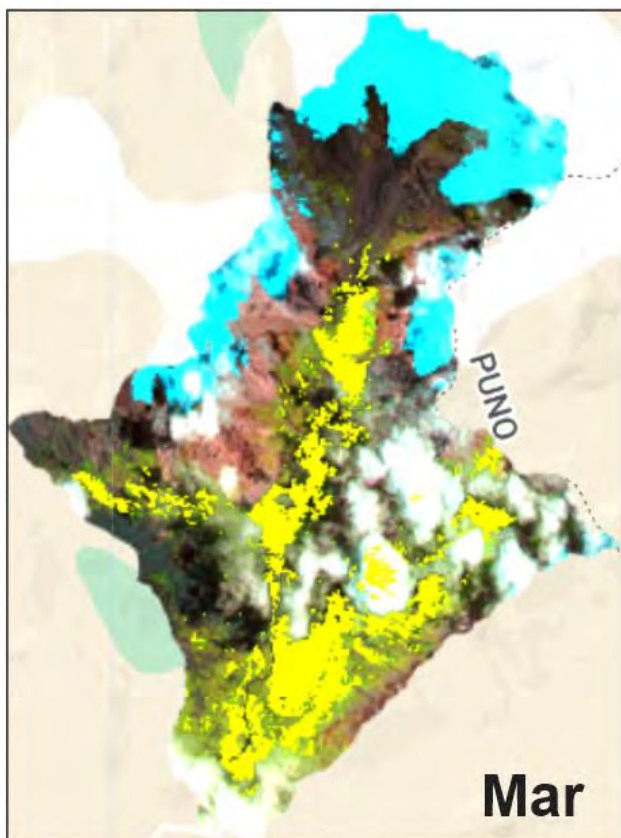
ANEXO 05. DETALLE DE ENMASCARAMIENTOS MENSUALES 2020



En enero de 2020, la superficie de bofedal en la microcuenca Alayripampa alcanzó 587.47 hectáreas, reflejando el inicio de la época de lluvias y la recarga hídrica característica de los ecosistemas altoandinos. Durante este mes, los bofedales presentan una cobertura extensa y continua, favorecida por la saturación del suelo y la acumulación de agua.

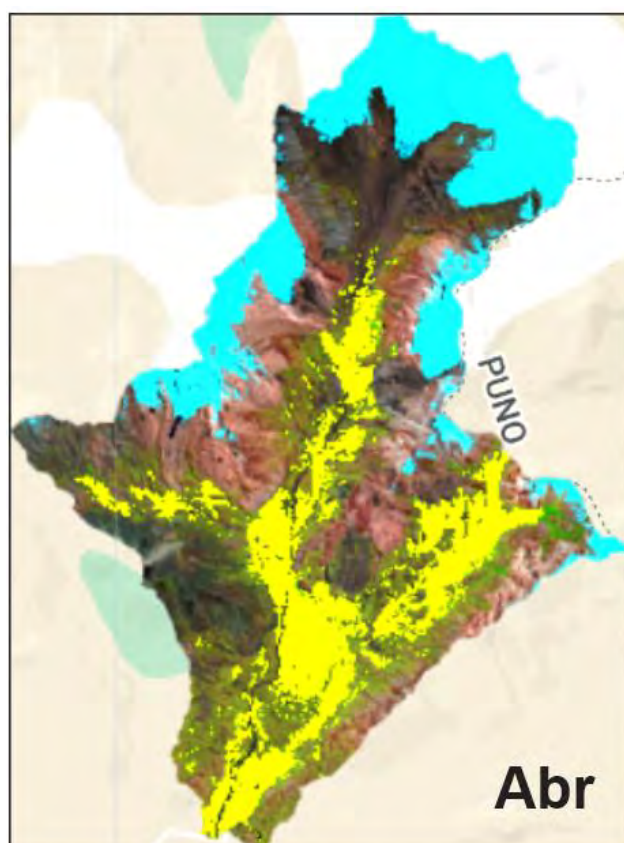
En febrero de 2020, la superficie de bofedal en la microcuenca Alayripampa alcanzó su valor máximo anual, con 882.49 hectáreas. Este notable incremento respecto al mes anterior refleja la saturación hídrica característica de la temporada.

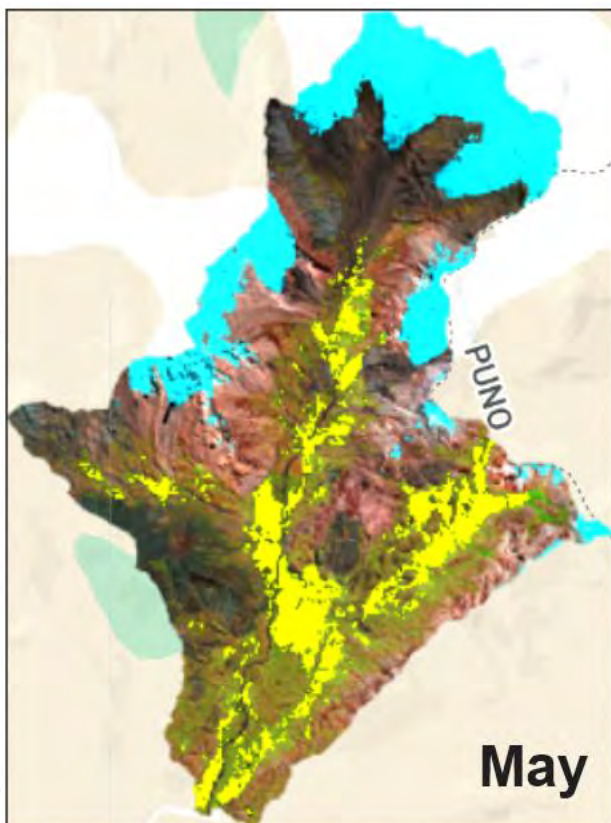




En marzo, la superficie de bofedal fue de 639.98 ha. El mapa muestra una reducción respecto a febrero y una mayor presencia de nubes (zonas blancas y grisáceas), lo que introduce cierta incertidumbre en la estimación real, especialmente en sectores altos de la cuenca.

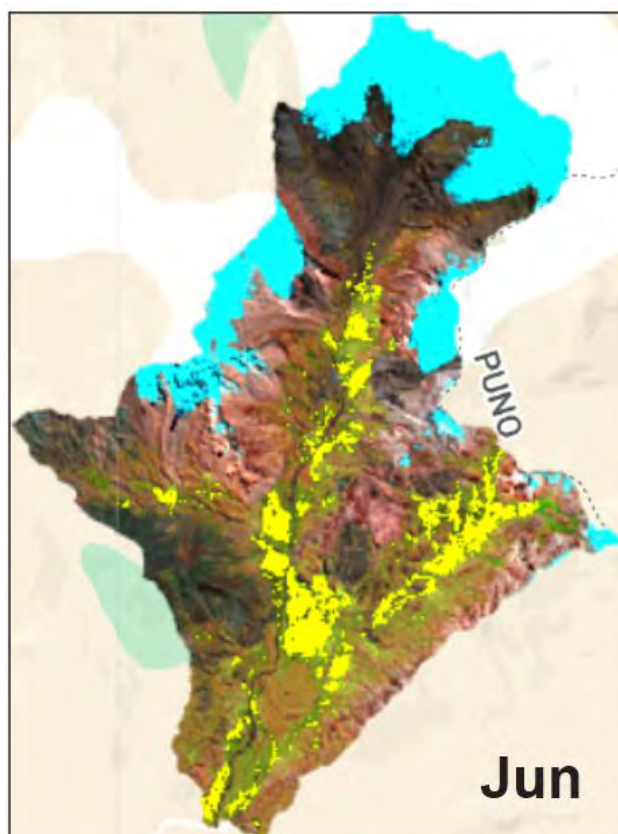
Para abril, el área final corregida subió a 842.21 ha, posiblemente por recarga residual o eventos de precipitación tardía. El mapa indica algunas zonas cubiertas por nubes, lo que podría afectar la precisión de la clasificación en sectores puntuales

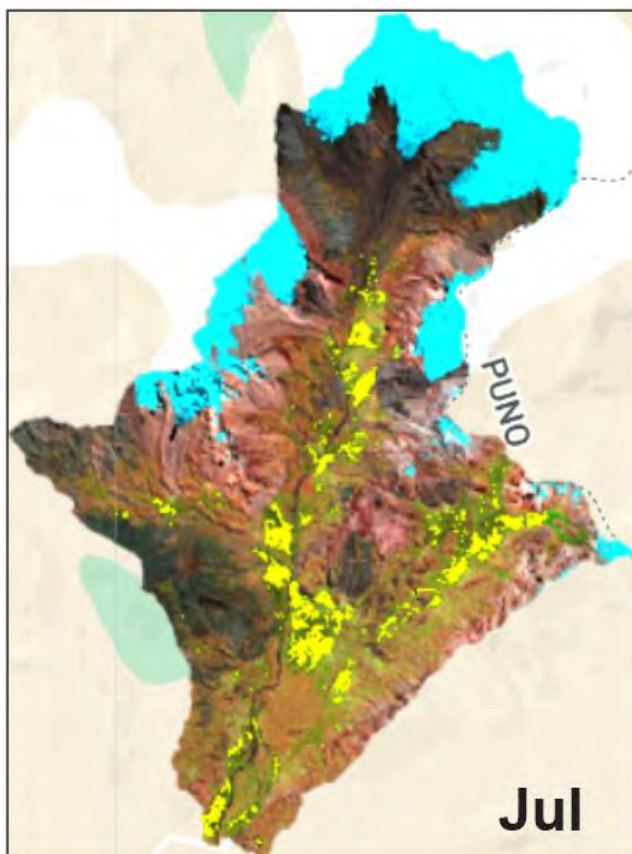




En mayo, la superficie de bofedal descendió a 497.23 ha. Los bofedales se restringen a las zonas de mayor retención hídrica. El mapa muestra menor interferencia de nubes y una retracción clara de las áreas húmedas.

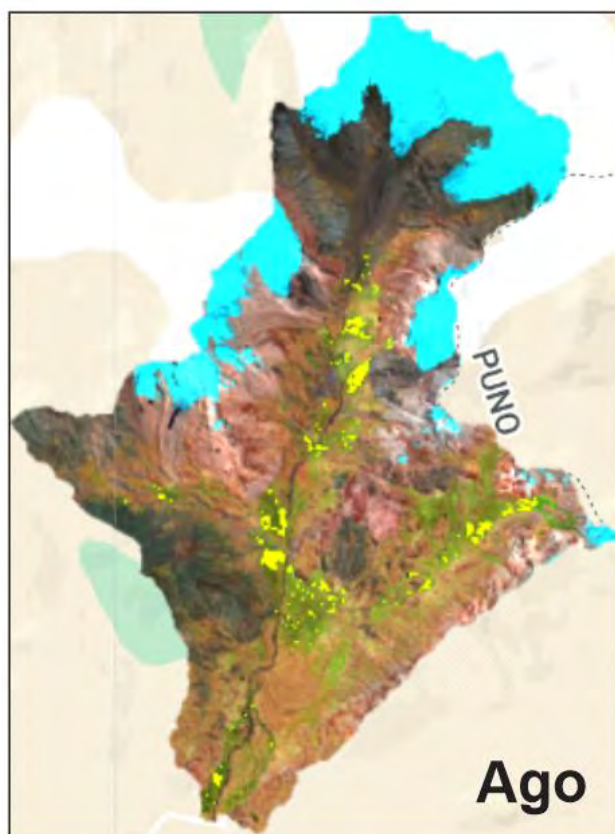
En junio, el área fue de 339.47 ha. El mapa evidencia la contracción máxima de los bofedales, con humedales limitados a sectores bajos y con aporte subterráneo. La nubosidad es mínima, lo que mejora la confianza en la delimitación.

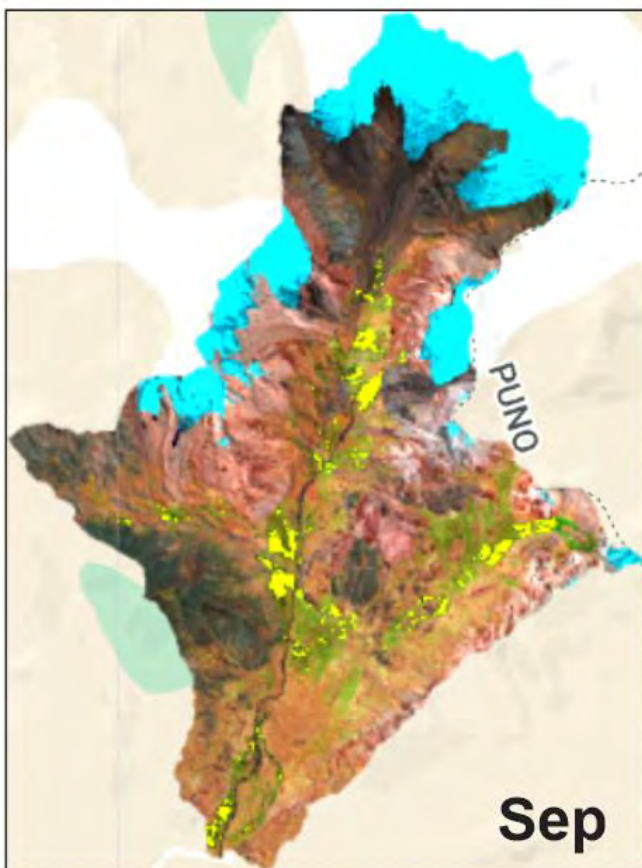




Durante julio, la superficie de bofedal fue de 198.66 ha. Los mapas muestran la persistencia de humedales solo en zonas muy deprimidas. La cobertura nubosa es baja.

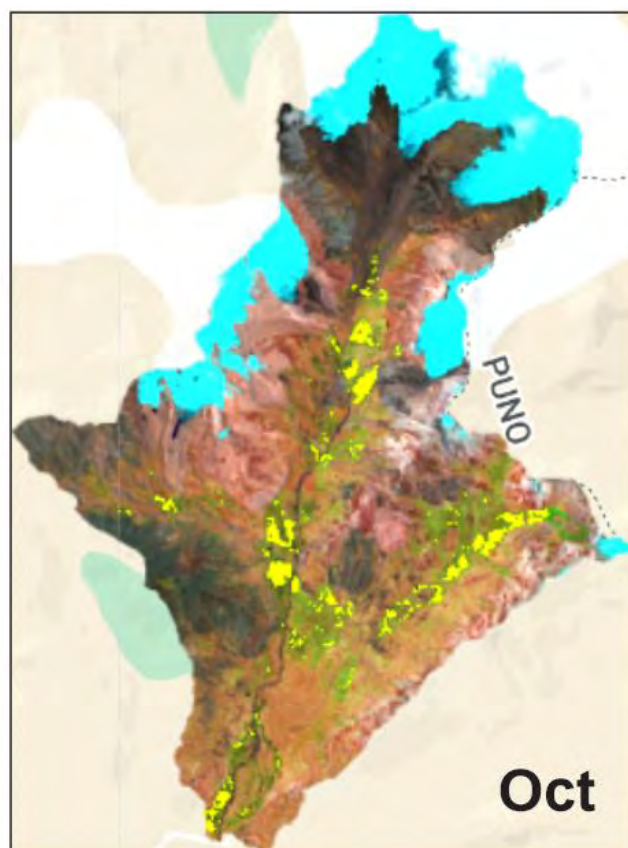
En agosto, el área corregida alcanzó el mínimo anual con 68.06 ha. El mapa confirma la máxima retracción estacional y la casi ausencia de nubes.



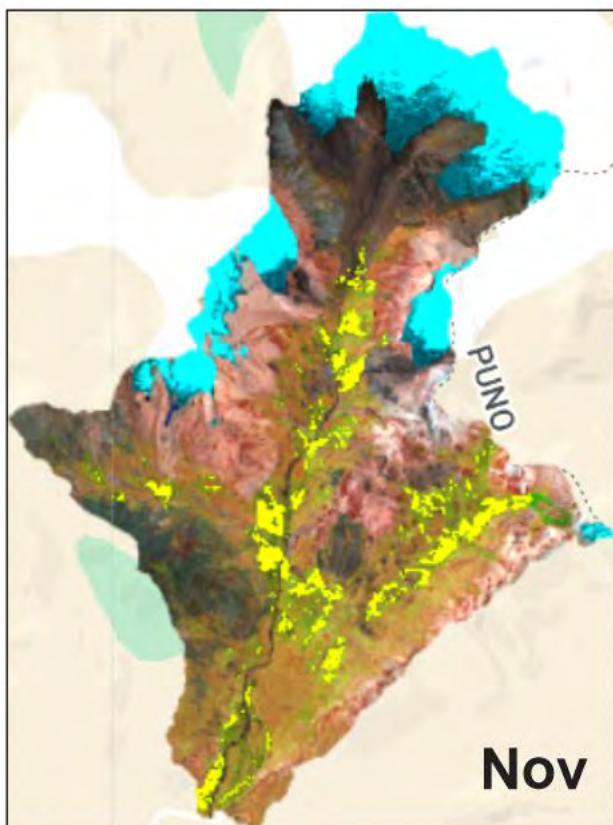


En setiembre, la superficie fue de 90.01 ha. Se observa una ligera recuperación de los bofedales, posiblemente por lluvias esporádicas.

El mapa muestra condiciones atmosféricas favorables para la observación.

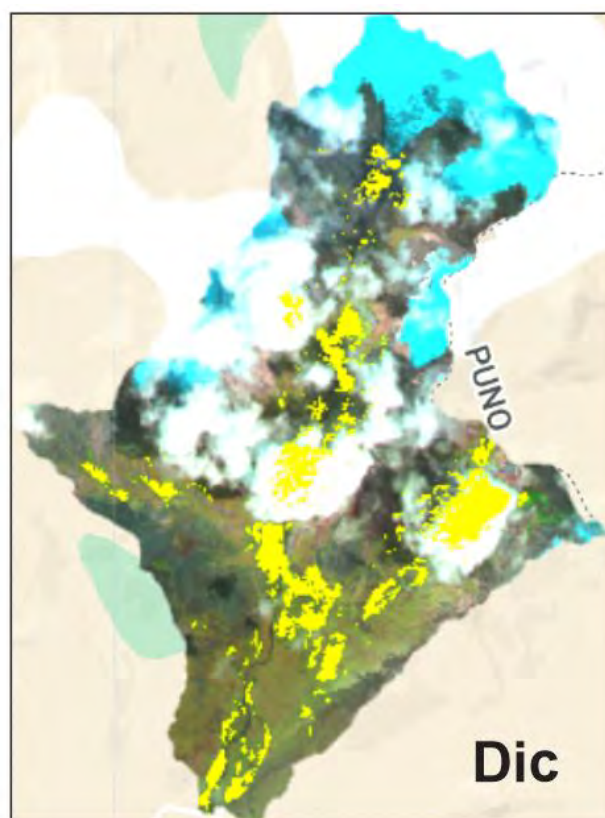


En octubre, el área de bofedal aumentó a 120.17 ha. El mapa refleja el inicio de la recuperación estacional, con mayor extensión de zonas húmedas y baja presencia de nubes.

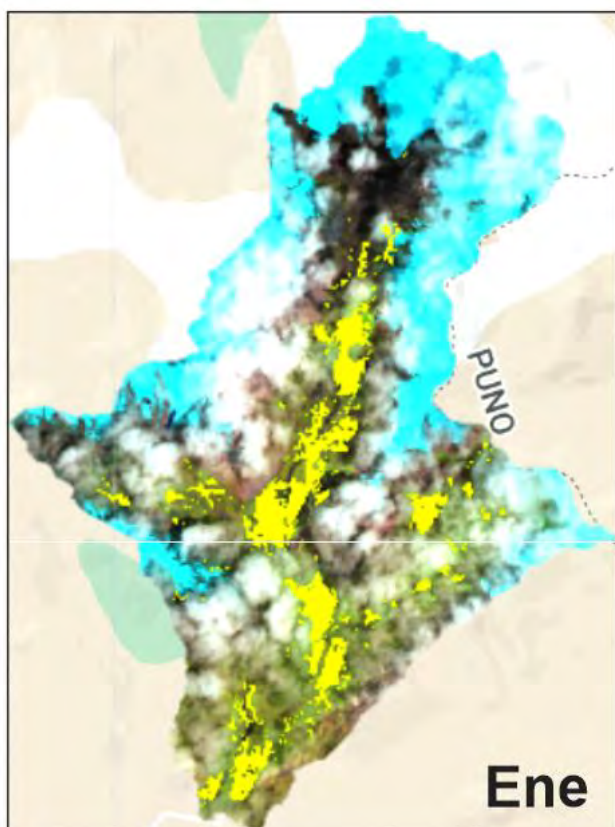


En noviembre, la superficie fue de 211.33 ha. Se evidencia una recuperación significativa de los bofedales, aunque el mapa muestra algunas áreas cubiertas por nubes, lo que puede introducir cierta incertidumbre en la delimitación.

Finalmente, en diciembre, el área final corregida fue de 404.59 ha. El mapa muestra una recuperación consolidada de los humedales, pero también una mayor presencia de nubes y zonas no clasificadas, lo que limita la precisión en la estimación del área real.

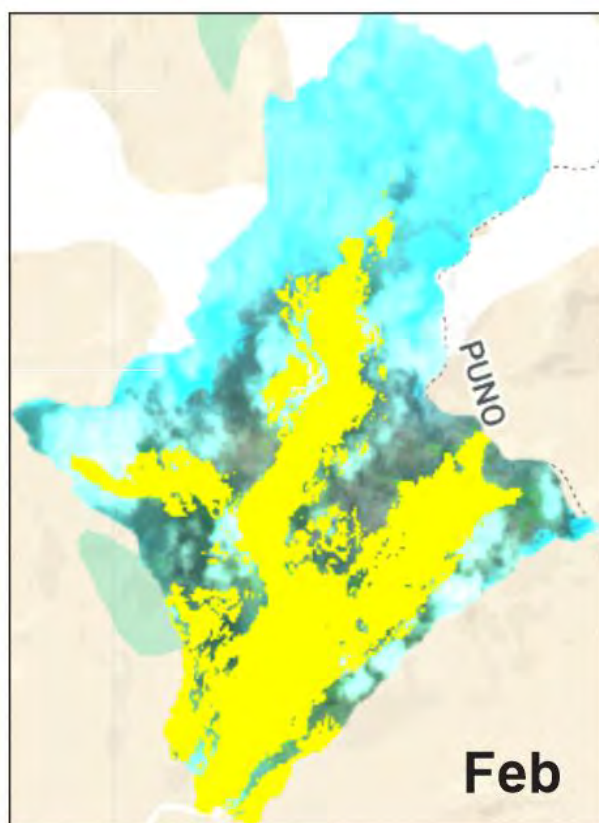


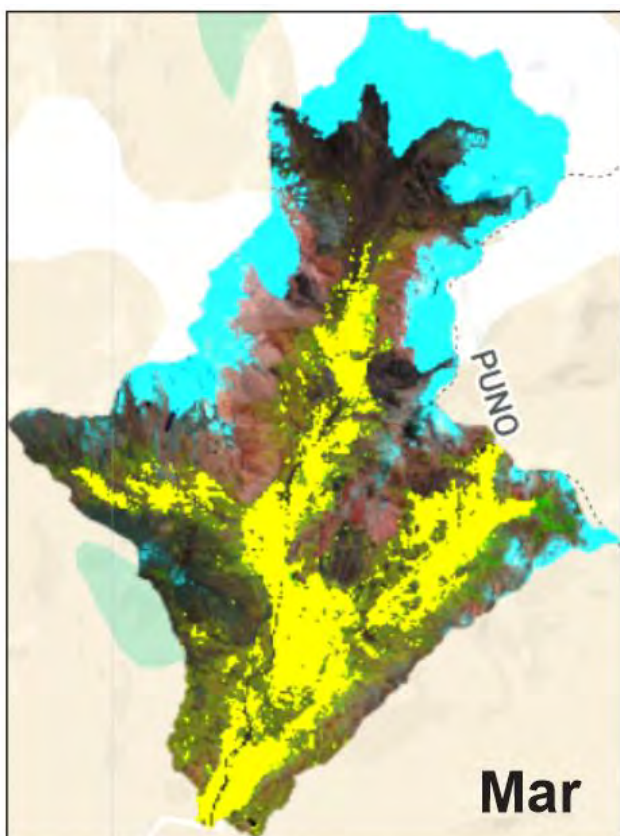
ANEXO 06. DETALLE DE ENMASCARAMIENTOS MENSUALES 2021



La cobertura de bofedales es relativamente reducida, con una superficie final corregida de 370.69 ha. El mapa muestra una extensión limitada de zonas húmedas, coherente con un inicio de época de lluvias menos intenso que el año anterior. La nubosidad es baja, lo que permite una delimitación confiable.

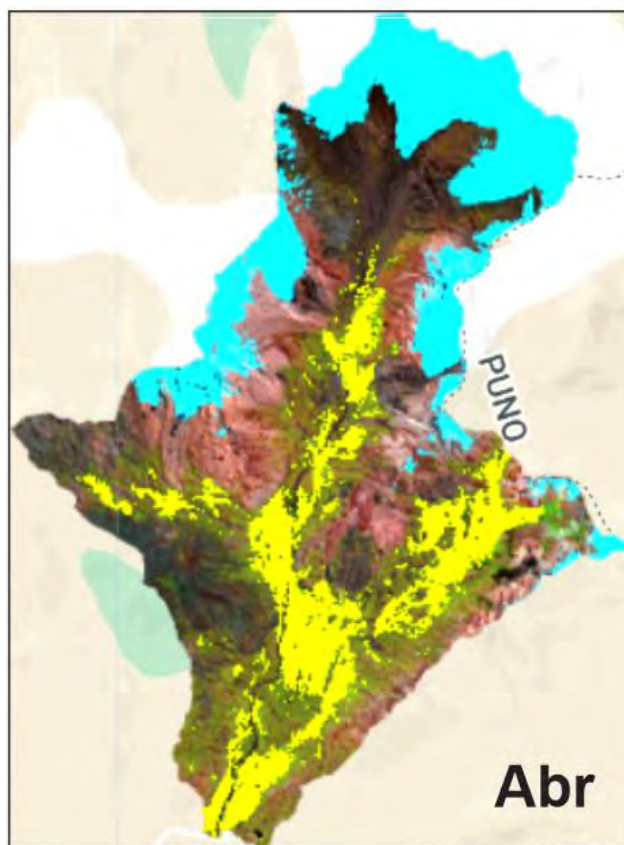
Se observa la máxima expansión anual de bofedales, alcanzando 1,056.19 ha. El mapa muestra una presencia dominante de zonas amarillas, aunque con algunas áreas blancas por nubosidad, que pueden introducir cierta incertidumbre en la estimación exacta. Este mes refleja una saturación hídrica excepcional, probablemente por lluvias intensas.

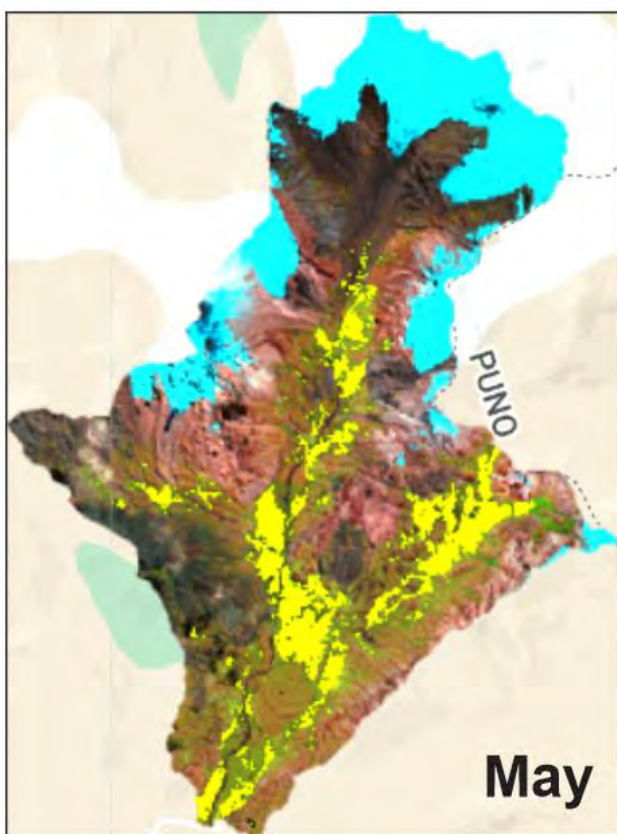




La superficie de bofedal disminuye a 912.36 ha. El mapa muestra una cobertura aún amplia, pero la presencia de nubes (zonas blancas y grisáceas) es más notoria, especialmente en las partes altas, lo que puede afectar la precisión de la delimitación en algunos sectores.

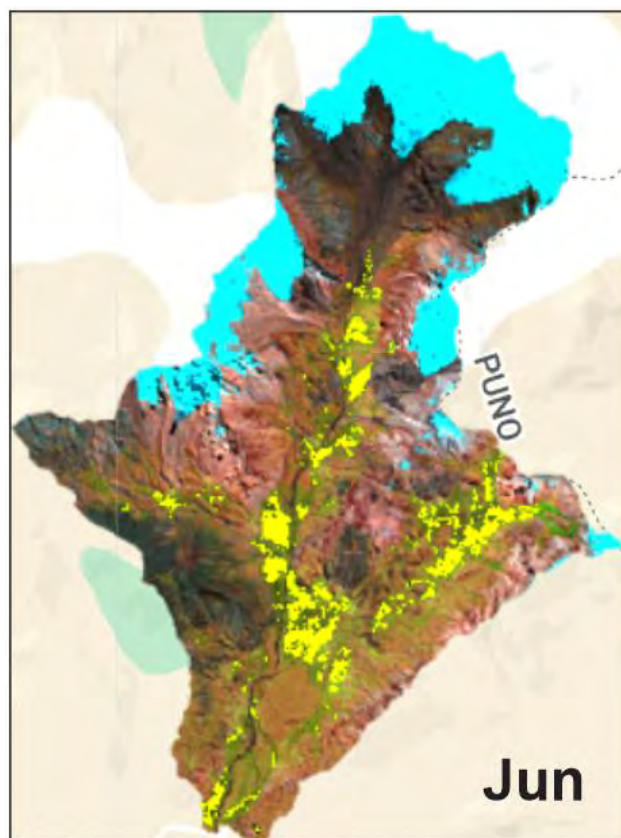
En abril, el área de bofedal se reduce a 730.47 ha. El mapa indica una retracción de las zonas húmedas y la persistencia de nubosidad en algunas áreas, lo que debe considerarse al interpretar los resultados.

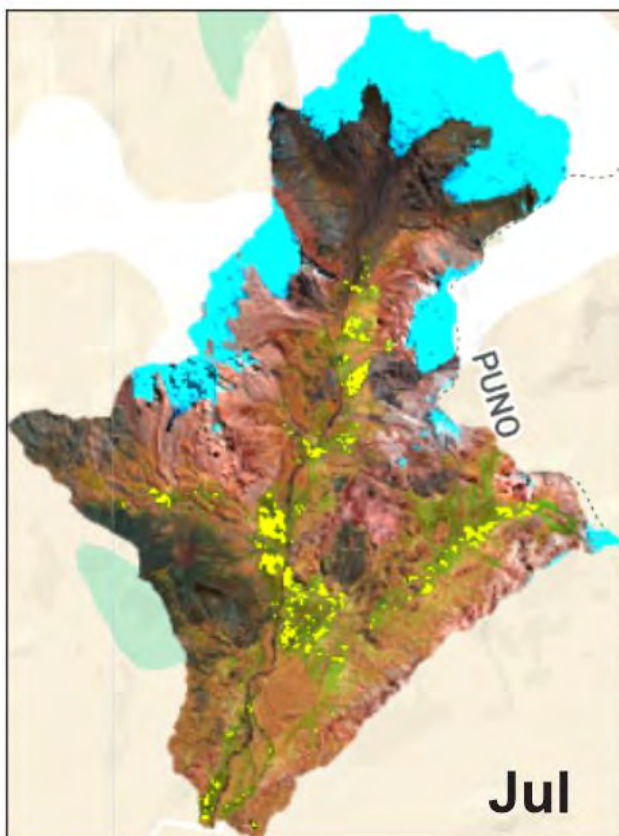




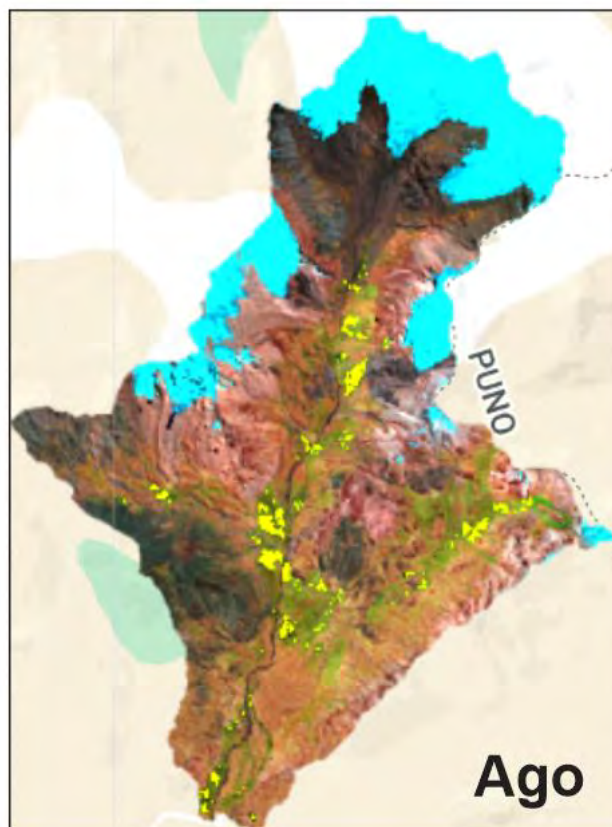
La superficie de bofedal cae a 444.04 ha. El mapa muestra una contracción clara de los humedales, con menor influencia de nubes, lo que mejora la confianza en la delimitación.

El área de bofedal es de 239.84 ha, evidenciando la retracción máxima estacional. El mapa muestra bofedales restringidos a sectores bajos y húmedos, con nubosidad mínima.

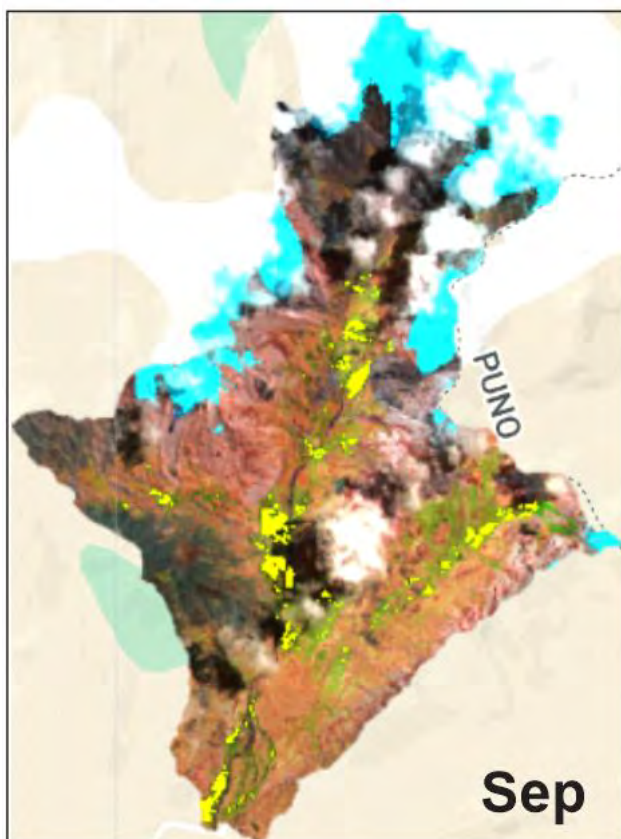




En julio, la extensión de bofedales es de 95.93 ha, uno de los valores más bajos del año. El mapa refleja la persistencia de humedales solo en zonas muy deprimidas, sin interferencia significativa de nubes.

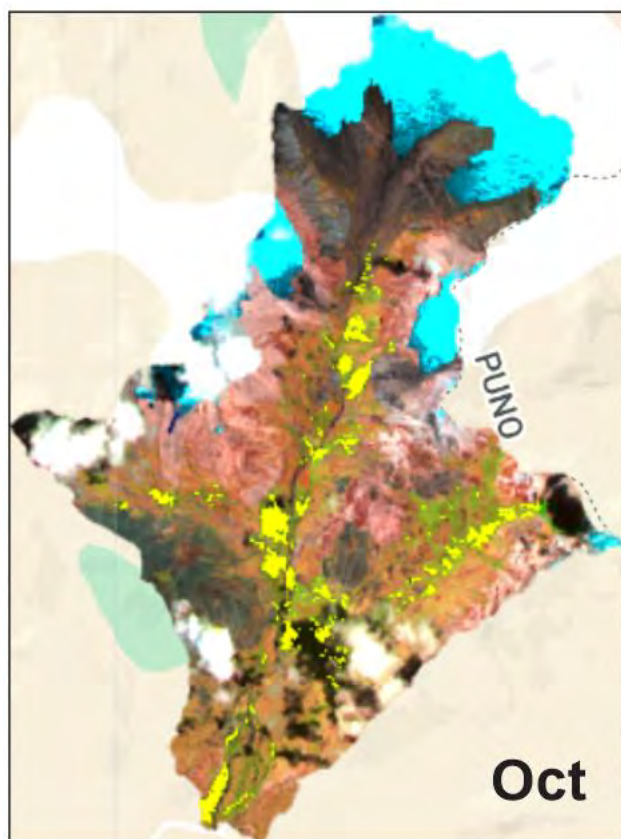


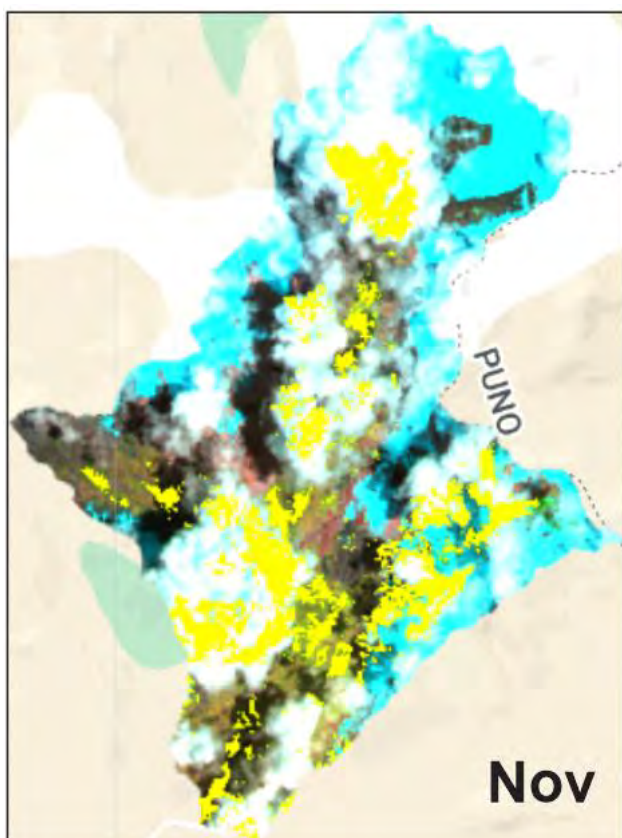
El área mínima anual se alcanza en agosto con 79.20 ha. El mapa confirma la máxima contracción estacional y la ausencia de nubosidad relevante.



En setiembre, la superficie aumenta a **106.40 ha**, mostrando una ligera recuperación posiblemente asociada a lluvias esporádicas. La nubosidad sigue siendo baja.

El área de bofedal sube a 149.51 ha, continuando la tendencia de recuperación con el inicio de las primeras lluvias. El mapa refleja una mayor extensión de zonas húmedas y baja presencia de nubes.





En noviembre, la superficie aumenta a 323.026 ha. Se evidencia una recuperación significativa de los bofedales, aunque el mapa muestra algunas áreas cubiertas por nubes, lo que puede introducir incertidumbre en la delimitación.

Finalmente, en diciembre, el área de bofedal es de 516.63 ha, consolidando la recuperación de los humedales hacia el cierre del año hidrológico. El mapa presenta mayor presencia de nubes, lo que limita la precisión en la estimación del área real.

