

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Rol de los bofedales en la recarga hídrica en la cabecera de la
microcuenca Chikllarazu, Chuschi - Ayacucho, 2025**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

Bach. Clevert Aldair PACOTAPE QUISPE

ASESOR:

M.Sc. Eleazar CHUCHÓN ANGULO

AYACUCHO - PERÚ

2025

DEDICATORIA

*A Dios, fuente inagotable de la vida,
salud y sabiduría, por ser la guía
constante en mi camino y darme la
fortaleza para enfrentar cada
desafío.*

*A mi familia, A mi madre Sonia Quispe
Tomaylla, a mi Padre Teodor Pacotaipe
Huamani a mi hermano Jhon Edison
Pacotaipe Quispe y enamorada, por su gran
sacrificio y apoyo incondicional en mi formación
profesional.*

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por brindarme la oportunidad de formarme en esta noble profesión. Mi sincero agradecimiento se extiende a mis docentes, quienes, con su dedicación y compromiso, me guiaron durante todo el proceso académico, permitiéndome desarrollar las competencias necesarias para afrontar los desafíos del mundo profesional.

De igual manera, quiero expresar mi agradecimiento a mi familia y a mi enamorada, cuyo amor y apoyo incondicional me han motivado y dado fuerzas para seguir adelante. También a mis amigos, quienes estuvieron presentes en los momentos más difíciles, brindándome su apoyo y aliento. Este logro es para todos ustedes, con todo mi cariño.

Finalmente, quiero agradecer a mi asesor, Msc. Eleazar Chuchón Angulo, por su constante apoyo y orientación durante esta investigación. Agradezco también a los jurados, quienes, con su paciencia y dedicación, me guiaron a realizar lo mejor de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	xi
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
Objetivos	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
CAPÍTULO I	18
MARCO TEÓRICO	18
1.1 Antecedentes	18
1.1.1 <i>Antecedentes internacionales</i>	18
1.1.2 <i>Antecedentes nacionales</i>	22
1.1.3 <i>Antecedentes locales</i>	25
1.2 Bases teóricas	27
1.2.1 <i>Humedales</i>	27
1.2.2 <i>Humedales altoandinos</i>	27
1.2.3 <i>Rol de bofedales</i>	28
1.2.4 <i>Bofedal</i>	28
1.2.5 <i>Importancia de los bofedales</i>	29
1.2.6 <i>Características de los bofedales</i>	30
1.2.7 <i>Tipos de bofedales</i>	30
1.2.8 <i>Distribución geográfica</i>	33
1.2.9 <i>Bofedales en el departamento de Ayacucho</i>	34
1.2.10 <i>Servicios ecosistémicos</i>	35
1.2.11 <i>Hidroperiodo</i>	36
1.2.12 <i>Mecanismos de almacenamiento y liberación de agua</i>	37
1.2.13 <i>Recarga hídrica</i>	38
1.2.14 <i>Importancia de recarga hídrica</i>	39

1.2.15 Tipos de recarga hídrica	39
1.2.16 Teledetección	41
1.2.17 Evolución de la teledetección.....	41
1.2.18 Proceso de la teledetección	42
1.2.19 Tipos de teledetección.....	44
1.2.20 Satélites para teledetección	45
1.2.21 Estudio de bofedales por teledetección	47
1.2.22 Aplicación de índices	48
1.2.23 Tomografía eléctrica (ERT).....	49
1.2.24 Aplicaciones generales de ERT.....	49
1.2.25 Métodos y técnicas de medición.....	50
1.2.26 Equipos a utilizar en ETR.....	51
1.2.27 Perfil de resistividad.....	52
CAPÍTULO II.....	54
MATERIAL Y MÉTODOS	54
2.1 Aspectos generales del proyecto	54
2.1.1 Zona de estudio	54
2.1.2 Ubicación política.....	54
2.1.3 Ubicación geográfica.....	55
2.1.4 Límites.....	55
2.1.5 Vías de acceso.....	57
2.1.6 Clima de la microcuenca Chikllarazu.....	57
2.1.7 Topografía de la microcuenca Chikllarazu.....	58
2.1.8 Parámetros fisiográficos de la microcuenca Chikllarazu.....	60
2.2 Materiales y equipos	60
2.2.1 Materiales y equipos en campo	60
2.2.2 Materiales y equipos en oficina.....	61
2.2.3 Programas de ingeniería.....	61
2.3 Metodología	61
2.3.1 Método de investigación	61
2.3.2 Tipo de investigación	61
2.3.3 Nivel de investigación	62
2.3.4 Diseño de investigación.....	62
2.4 Técnicas e instrumentos	63
2.4.1 Técnicas.....	63
2.4.2 Instrumentos	63

2.5	La población y muestra del estudio de proyecto de ingeniería	63
2.5.1	<i>Población</i>	63
2.5.2	<i>Muestra</i>	64
2.6	Procesamiento de la información.....	64
2.6.1	<i>Delimitar las áreas de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes satelitales.</i>	64
2.6.2	<i>Analizar la variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, observando cambios estacionales y anuales.</i>	74
2.6.3	<i>Evaluar la capacidad de los bofedales para contribuir a la recarga hídrica en la microcuenca a través de cobertura y contenido de humedad.</i>	78
CAPÍTULO III.....		84
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		84
3.1	Resultados	84
3.1.1	<i>Áreas de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes satelitales.</i>	84
3.1.2	<i>Variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, observando cambios estacionales y anuales.</i>	91
3.1.3	<i>Capacidad de los bofedales para contribuir a la recarga hídrica en a la microcuenca a través de cobertura y contenido de humedad.</i>	99
3.2	Discusiones.....	107
CAPÍTULO IV.....		110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		110
4.1	Conclusiones	110
4.2	Recomendaciones	111
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....		113
ANEXOS.....		123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Muestra de suelo de bofedal con acumulación de turba	30
Figura 5	Servicios ecosistémicos de los bofedales	36
Figura 7	Procesos de almacenamiento y liberación de agua	38
Figura 8	Proceso de recarga hídrica	39
Figura 9	Proceso de teledetección de cobertura de la tierra	43
Figura 10	Método mide la resistividad	49
Figura 11	Método y técnicas de medición.....	51
Figura 12	Perfil característico de resistividades invertidas	52
Figura 20	Imagen tomada con dron en la microcuenca Chikllarazu	68
Figura 21	Trabajo de campo en la cabecera de la microcuenca	71
Figura 22	Trabajo de campo en la microcuenca Chikllarazu	81
Figura 23	Reconocimiento de cobertura en la microcuenca Chikllarazu con GPS diferencial.....	82
Figura 24	Instalación de electrodos para la toma de datos en la microcuenca Chikllarazu.....	83
Figura 25	Mapa de clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época húmeda 2025.....	84
Figura 26	Distribución del área por tipo de cobertura durante la época húmeda (2025).....	85
Figura 27	Clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época seca 2025.....	87
Figura 28	Clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época seca 2025.....	88
Figura 29	Cobertura de la microcuenca Chikllarazu en época seca y húmeda (2025).....	90
Figura 30	Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2016)	91
Figura 31	Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2020)	92
Figura 32	Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2025)	93
Figura 33	Evolución del área de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2016–2025)	94
Figura 34	Serie temporal del área de bofedales permanentes (2016–2025).....	95

Figura 35	Matriz de tasa de cambio de área de bofedales (2016–2025).....	96
Figura 36	Gráfico de tendencia anual de precipitación total en (mm).....	98
Figura 37	Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (abril 2023).....	99
Figura 38	Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (agosto 2023)	100
Figura 39	Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (diciembre 2023)	101
Figura 40	Evolución mensual del área de bofedales en la microcuenca Chikllarazu (2023).....	102
Figura 41	Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (29 de marzo de 2025).....	104
Figura 42	Clasificación ETR TE-01 geofísica (2025).....	105
Figura 43	Clasificación ETR TE-02 geofísica (2025).....	106
Figura 44	Gráfico de tendencia de precipitación mensual para el año 2023	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Variedad de bofedales distribuidos en Ayacucho.....	34
Tabla 2	Tipos de imágenes satelitales	44
Tabla 3	Satélites para teledetección	45
Tabla 4	Satélites para teledetección de imágenes Sentinel.....	47
Tabla 5	Índices de teledetección para sentinel-2	48
Tabla 6	Rango de resistividad según tipo de suelo.....	52
Tabla 7	Límite del distrito de Chuschi	55
Tabla 8	Vías de acceso de la microcuenca Chikllarazu	57
Tabla 9	Topografía de la microcuenca Chikllarazu	58
Tabla 10	Datos de las imágenes satelitales utilizadas en el análisis.....	65
Tabla 11	Rango de clasificación de NDVI	67
Tabla 12	Levantamiento de coordenadas con equipo GNSS.....	68
Tabla 13	Escalas de calificación para el índice Kappa.....	73
Tabla 14	Resumen de imágenes satelitales seleccionadas	75
Tabla 15	Rango de clasificación de NDVI	76
Tabla 16	Imágenes satelitales Sentinel-2 seleccionadas en la microcuenca Chikllarazu (2023)	79
Tabla 17	Imagen del satélite seleccionada realizada en trabajo de campo 29/03/2025.....	79
Tabla 18	Rango de clasificación de NDII.....	80
Tabla 19	Rango de resistividad según tipo de suelo	82
Tabla 20	Área de coberturas en la microcuenca Chikllarazu - época húmeda 2025.....	85
Tabla 21	Matriz de confusión de la clasificación supervisada para la época húmeda.....	86
Tabla 22	Área de coberturas en la microcuenca Chikllarazu - época seca.....	88
Tabla 23	Matriz de confusión de la clasificación supervisada para la época seca.....	89
Tabla 24	Área de bofedales permanentes por año en la microcuenca Chikllarazu (2016–2025)..	95
Tabla 25	Matriz de tasa de cambio de área de bofedales (2016–2025).....	96
Tabla 26	Índice Kappa de la clasificación supervisada (2016–2025)	97
Tabla 27	Área mensual de bofedales en la microcuenca Chikllarazu (2023) ..	102
Tabla 28	Matriz de tasa de cambio mensual del área de bofedales (2023)	103

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

Sigla	Definición
ALOS-2	Satélites japones de radar (banda L) para estudios geodinámicos y humedad del suelo
CONIDA	Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial del Perú
COPASA	Cooperación para el Proceso de Autodesarrollo Sostenible de Arequipa
DEM	Modelo Digital de Elevación (equivalente a MDE)
EPSG	Código de referencia para sistemas de coordenadas
ERT	Tomografía Eléctrica de Resistividad
ESA	Agencia Espacial Europea
GEE	Google Earth Engine
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
INAIGEM	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montana
ISO	Organización Internacional de Normalización
JAXA	Agencia Aeroespacial de Japón
Kappa	Índice de concordancia de Cohen para clasificaciones
LiDAR	Detección y rango por luz (Light Detection and Ranging)
MDE	Modelo Digital de Elevación
MINAM	Ministerio del Ambiente del Perú
MNDWI	Índice de Diferencia Normalizada de Agua Modificado
MODIS	Espectro radiómetro de resolución moderada de imagen
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio
NDII	Índice de Diferencia Normalizada de Infrarrojo (contenido de humedad)
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NDWI	Índice de Agua de Diferencia Normalizada
NIR	Infrarrojo cercano
OA	Exactitud global (Overall Accuracy)

Pe	Proporción de coincidencias esperadas por azar
Po	Proporción de aciertos observados
QA60	Banda de calidad de Sentinel-2 para nubes
RES2DINV	Software de inversión 2D para tomografía eléctrica
RF	Random Forest (Bosques Aleatorios)
RGB	Rojo, Verde y Azul
S2_SR	Sentinel-2 Surface Reflectance (Reflectancia de Superficie)
SAR	Radar de Apertura Sintética
SCL	Capa de clasificación de escena de Sentinel-2
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SR	Reflectancia de Superficie
SWIR	Infrarrojo de onda corta
Tc	Tasa anual de cambio
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
UTM	Proyección Universal Transversa de Mercator
VV/VH	Polarizaciones de radar SAR vertical-vertical y vertical-horizontal
WGS84	Sistema Geodésico Mundial 1984

RESUMEN

Los bofedales constituyen ecosistemas estratégicos de las zonas altoandinas, esenciales para la regulación hídrica y el equilibrio ambiental. Sin embargo, en las últimas décadas se han visto fuertemente afectados por el cambio climático y por la presión derivada de actividades humanas, lo que ha generado una acelerada degradación y pérdida de su extensión. El estudio tuvo como finalidad evaluar la contribución de los bofedales a la recarga hídrica en la microcuenca Chikllarazu, así como analizar los cambios espacio-temporales en su capacidad de almacenamiento, dada su importancia como reguladores naturales de los recursos hídricos en ecosistemas altoandinos. Se aplicó un enfoque cuantitativo mediante el análisis de imágenes satelitales Sentinel-2 procesadas en Google Earth Engine. Se utilizaron índices espectrales (NDVI y NDII) y técnicas de clasificación supervisada con Random Forest, validadas a partir de 200 puntos de verificación en campo de manera complementaria, se realizaron perfiles de tomografía eléctrica (ERT) para identificar condiciones subsuperficiales asociadas a la retención hídrica. En el año 2025 los bofedales alcanzaron 20.11 km² durante la temporada de lluvias y 19.43 km² en la época seca. El análisis temporal de 2016 a 2024 evidenció una disminución de 8.90 km² a 6.69 km² en la estación seca, con una recuperación parcial a 8.73 km² en 2025. El NDII confirmó la fuerte estacionalidad en 2023, registrando un máximo de 33.83 km² en abril y un mínimo de 3.23 km² en septiembre, con julio y agosto como los meses más críticos. Los perfiles ERT revelaron suelos subsaturados con baja resistividad ($\leq 30 \Omega \cdot m$), lo cual evidencia zonas de acumulación de agua. Los bofedales de la cabecera de la microcuenca Chikllarazu cumplen un rol estratégico en la regulación de la recarga hídrica. La variabilidad espacio-temporal observada refleja la influencia del cambio climático, lo que resalta la necesidad de implementar estrategias de conservación y gestión sostenible para garantizar la seguridad hídrica en ecosistemas de montaña.

Palabras clave: Bofedales; Recarga hídrica; Teledetección; NDVI; NDII; Microcuenca Chikllarazu.

ABSTRACT

Wetlands are strategic ecosystems in the high Andean regions, essential for water regulation and environmental balance. However, in recent decades, they have been significantly impacted by climate change and human activities, leading to accelerated degradation and loss of their extent. This study aimed to evaluate the contribution of wetlands to water recharge in the Chikllarazu micro-basin and analyze the spatiotemporal changes in their storage capacity, given their importance as natural regulators of water resources in high Andean ecosystems. A quantitative approach was applied through the analysis of Sentinel-2 satellite images processed in Google Earth Engine. Spectral indices (NDVI and NDII) and supervised classification techniques with Random Forest were used, validated with 200 field verification points. Additionally, electrical resistivity tomography (ERT) profiles were conducted to identify subsurface conditions related to water retention. In 2025, wetlands reached 20.11 km² during the rainy season and 19.43 km² in the dry season. The temporal analysis from 2016 to 2024 showed a decrease from 8.90 km² to 6.69 km² in the dry season, with a partial recovery to 8.73 km² in 2025. The NDII confirmed strong seasonality in 2023, with a peak of 33.83 km² in April and a minimum of 3.23 km² in September, with July and August as the driest months. ERT profiles revealed subsaturated soils with low resistivity ($\leq 30 \Omega \cdot m$), indicating areas of water accumulation. Wetlands in the headwaters of the Chikllarazu micro-basin play a strategic role in regulating water recharge. The observed spatiotemporal variability reflects the influence of climate change, highlighting the need to implement conservation and sustainable management strategies to ensure water security in mountain ecosystems.

Keywords: Peatlands; Water recharge; Remote sensing; NDVI; NDII; Chikllarazu micro-watershed.

INTRODUCCIÓN

La mayor parte del planeta sufre actualmente estrés hídrico, y las principales causas son el rápido crecimiento demográfico, el crecimiento económico y el cambio climático. Según el programa de las naciones unidas para los asentamientos humanos (hábitat) 2.500 millones de personas, es decir el 36% de la población mundial, viven en lugares con estrés hídrico y más 20% de PIB mundial se genera en lugares con riego de escasas de agua (Space4Water Portal, s. f.).

Los humedales son ecosistemas muy dinámicos y complejos, caracterizados por una variabilidad considerable derivada de factores como los cambios en los balances hídricos, la agricultura y los cambios estacionales de temperatura. Lo distintivo de los recursos terrestres húmedos, en comparación con otros recursos naturales, es que no permanecen inalterados a lo largo del tiempo y pueden estar allí o no, dependiendo de las circunstancias del entorno. En este contexto, la teledetección es de gran utilidad para monitorear los cambios en el cuerpo de agua mediante análisis de lapsos de tiempo y bandas multiespectrales, señalando áreas potenciales de humedad y observando cambios significativos en estos ecosistemas (Geoinnova, s. f.). Además, la teledetección es útil para monitorear y cartografiar la biodiversidad a nivel de paisaje, y para brindar información sobre la distribución y el estado de los ecosistemas y las especies en diversos ecosistemas. Esta información es la base para la gestión de la biodiversidad y su conservación, con el fin de tomar decisiones informadas sobre la preservación de los hábitats naturales (Space4Water Portal, s. f.).

La definición de los humedales es muy amplia y abarca zonas como, por ejemplo, pantanos, arrecifes de coral, lagos y ríos, que contienen componentes físicos, químicos y biológicos como agua, suelo, nutrientes, plantas y especies animales. Así (Maldonado, 2010b). “Los bofedales son considerados como ecosistemas frágiles en la Ley General del Ambiente del Perú (Ley N° 28611, Artículo 99)”. Algunas de las principales funciones que desempeñan los humedales incluyen la regulación de inundaciones, la protección contra tormentas, la recarga de aguas subterráneas, el almacenamiento de sedimentos y la estabilización del microclima (Gómez, 2015).

La disponibilidad de agua es un recurso fundamental para la agricultura, el consumo humano, la biodiversidad y otros usos en la región, y su gestión sostenible depende en gran medida del correcto funcionamiento de los bofedales. Por lo tanto,

comprender cómo estos ecosistemas contribuyen a la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu es esencial para asegurar la seguridad hídrica y el bienestar de las comunidades locales (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023).

Este ecosistema es evaluado como frágil en la legislación peruana y cumple un rol importante en el equilibrio ecológico de las regiones altoandinas. Estudios recientes sobre imágenes satelitales, como TM y OLI, con una técnica de clasificación, han sido utilizados para caracterizar la evolución de los humedales de la región Altoandina, demostrando así la tendencia al decrecimiento de la ecorregión (Adauto & Willems, 2014).

El ecosistema de la cuenca de Cachi-Apacheta, en la región de Ayacucho, está sujeto a prácticas mineras atroces, pastoreo incontrolado de ganado, cambio climático y deshielo de glaciares, todos ellos con impactos negativos. La variabilidad de la vegetación, la capa de nieve y la humedad del suelo, sumada al aumento de las temperaturas, induce fluctuaciones espaciales y temporales que obligan a los ecosistemas a hacer uso de sus recursos hídricos durante los meses más secos. Estos problemas se pueden solucionar adoptando la teledetección satelital para monitorear la precipitación, la temperatura, la vegetación y la humedad, junto con el advenimiento de nuevas metodologías para el manejo de la información satelital, todo lo cual contribuye a una mejor comprensión y gestión de los recursos hídricos (Moncada, 2021).

La investigación anterior sobre los humedales altoandinos de Huancavelica utilizó imágenes satelitales TM y OLI utilizando técnicas de clasificación para construir información mapeada temáticamente que permite la comprensión y gestión de los ecosistemas amenazados (Adauto & Willems, 2014). Los bofedales son ecosistemas únicos y vitales que se encuentran en las regiones altoandinas, desempeñando un papel crucial en la regulación y provisión de agua en estos entornos. La microcuenca Chikllarazu, ubicada en la región de Ayacucho, Perú, alberga una red de bofedales que constituyen un componente esencial del sistema hídrico local. Estos ecosistemas, a menudo pasados por alto, actúan como esponjas naturales que retienen y filtran el agua de lluvia y nieve, liberándola gradualmente a lo largo del tiempo. En este contexto, el presente estudio se enfoca en examinar el rol de los bofedales en la recarga hídrica de la cabecera de la microcuenca Chikllarazu durante el año 2025.

Objetivos

Objetivo general

- Determinar el rol de los bofedales en la recarga hídrica de la microcuenca Chikllarazu y cómo se puede analizar utilizando imágenes satelitales.

Objetivos específicos

- Delimitar las áreas de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes satelitales.
- Analizar la variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, observando cambios estacionales y anuales.
- Evaluar la capacidad de los bofedales para contribuir a la recarga hídrica en la microcuenca a través de cobertura y contenido de humedad.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes internacionales

Según la tesis de investigación Torrejón (2023) "*Caracterización de humedales utilizando técnicas de teledetección en la cuenca del río Katari, Departamento de la Paz, período 1990-2021*" tesis para obtener un máster de la Universidad de Mayor de San Andrés en sistemas de información geográfica y teledetección espacial aplicados a las ciencias de la tierra., Esta investigación tuvo como objetivo cuantificar, mediante técnicas de teledetección, el área del Lago Menor del Titicaca, humedal de importancia internacional. Se realizaron inventarios de humedales lacustres utilizando técnicas de teledetección, umbrales de índices espectrales y validación mediante matriz de confusión e índice kappa. De esta manera, se evaluaron índices espectrales como NDWI, SAVI, TGC y LSWI para encontrar uno más apropiado, que caracterice a los macrófitos emergentes (totora). El incremento neto en la distribución de humedales lacustres ha variado durante el período de 31 años, con áreas totales de bofedales entre 8110 ha y un mínimo de 3890 ha en 1999. Estos se compararon con los niveles históricos del lago Titicaca para comprender la relación con sus oscilaciones. El índice TGC fue el más efectivo para identificar humedales lacustres. También se proyectaron menores probabilidades de encontrar macrófitos emergentes para el escenario futuro, de 2040 a 2100. Este trabajo es relevante para la línea base necesaria para el establecimiento de un sistema permanente de monitoreo remoto de humedales en Bolivia, que podría ser replicado en otras áreas de interés ecológico para el monitoreo y conservación de sus extensiones.

Flores (2017) en su tesis "*Predicción de la distribución de bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo utilizando imágenes Landsat y el algoritmo Random Forest*". Desarrollar un modelo predictivo para identificar la distribución espacial de bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, empleando imágenes satelitales Landsat y técnicas de clasificación mediante el algoritmo Random Forest. El enfoque adoptado fue cuantitativo, apoyado en técnicas de teledetección y aprendizaje automático. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI de los años 1991, 2001, 2010 y 2016, que permitieron un análisis multitemporal. Se realizaron tres entrenamientos del modelo Random Forest, incorporando variables espectrales como NDWI, NDVI y SAVI, algunas de las cuales

fueron corregidas con factores como la luminosidad del suelo. Se evaluó la precisión del modelo a través del porcentaje de clasificación de bofedales y otras coberturas. El área de estudio fue la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, un ecosistema altoandino con presencia importante de bofedales. Se usaron series temporales de imágenes satelitales para cubrir cambios ocurridos en un periodo de 25 años. El modelo de clasificación presentó altos niveles de precisión. En el primer entrenamiento, el índice NDWI logró una clasificación de 97,78% para bofedales. En el segundo, se utilizó SAVI con corrección de luminosidad del suelo, logrando una precisión de 95,85%. En el tercer entrenamiento, NDVI modificado arrojó un 89,35% de precisión. Además, el análisis multitemporal permitió evaluar la evolución de los bofedales y, mediante la metodología de reducción de áreas, se proyectó una pérdida crítica del ecosistema en los siguientes 16 años. El estudio demostró la eficacia del algoritmo Random Forest en la predicción y monitoreo de bofedales, especialmente al combinar imágenes satelitales con índices espectrales corregidos. También evidenció la disminución progresiva de estas áreas húmedas en el tiempo, clasificando el ecosistema como en estado crítico de conservación. Esta investigación ofrece un valioso precedente metodológico para estudios en ecosistemas altoandinos similares. En el caso de la microcuenca Chikllarazu, puede adaptarse el enfoque multitemporal y el uso de Random Forest con imágenes Sentinel para delimitar y monitorear bofedales, así como para proyectar escenarios de pérdida o conservación hídrica.

Huaraca et al. (2025) "*Monitoreo multitemporal de humedales altos andinos ecuatorianos mediante radar y teledetección multiespectra*". El estudio se desarrolló con el fin de diseñar una estrategia multitemporal que permita mapear y monitorear humedales de alta montaña ubicados en los Andes ecuatorianos, zonas caracterizadas por una fuerte nubosidad y topografía accidentada. La investigación destaca la relevancia ecológica de estos ecosistemas por su función de regulación hídrica y conservación de biodiversidad, pero también la dificultad de monitorearlos con imágenes ópticas tradicionales debido a las condiciones climáticas adversas. Se utilizaron imágenes satelitales de radar (Sentinel-1) y ópticas (Sentinel-2), integradas en la plataforma Google Earth Engine. Para la clasificación se aplicó el algoritmo Random Forest, y se complementó con la estimación de humedad del suelo mediante el modelo físico, que permite relacionar la retrodispersión SAR con el contenido de agua en el suelo. Los resultados revelaron que el análisis únicamente con datos multiespectrales subestimó la cobertura de humedales, registrando solo 18.919

hectáreas en 2022, equivalente al 4,7 % del área total. Sin embargo, al integrar datos radar y multiespectrales, se logró identificar una cobertura mucho mayor: 28.972 hectáreas en 2023, alcanzando el 7,2 % del área de estudio. Se encontró también que la cobertura mensual más alta se produjo en abril (6,7 %). Además, las estimaciones de humedad del suelo indicaron una extensión estable de los humedales entre el 15,3 % y el 15,9 %, siendo el periodo enero-febrero el de mayor humedad con 3065 hectáreas. Estas cifras presentaron una correlación significativa con los datos de precipitación acumulada. Los autores concluyen que el enfoque combinado de radar y multiespectral, junto con técnicas avanzadas de clasificación y modelado de humedad, permite una estimación más precisa y dinámica de los cambios estacionales y anuales en la cobertura de humedales altoandinos. Además, este enfoque puede aplicarse en regiones montañosas donde las condiciones atmosféricas limitan el uso de sensores ópticos. Este estudio representa un valioso referente metodológico para el análisis multitemporal de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu, ya que demuestra la utilidad de integrar sensores Sentinel-1 y Sentinel-2 para el monitoreo estacional de cobertura y contenido de humedad. Asimismo, respalda el uso de clasificadores como Random Forest y modelos como el WCM para estimar procesos hidrológicos en zonas altoandinas.

Usman et al. (2025) *“Estimación de la elevación de la superficie de agua en un humedal mediante datos de teledetección multifuente integrados”*. Desarrollar un método confiable para estimar la elevación del agua superficial en humedales pequeños, utilizando imágenes satelitales multifuente y datos auxiliares de alta precisión, con fines de monitoreo ambiental y apoyo a la toma de decisiones de entidades de gestión local. El estudio se enmarcó en un enfoque cuantitativo y experimental. Se emplearon imágenes ópticas multitemporales provenientes de los satélites Sentinel-2 y Landsat-8, combinadas con imágenes fotogramétricas de alta resolución y datos LiDAR. Se aplicaron cuatro índices espectrales: NDWI, dos versiones del MNDWI (Índice de Diferencia Normalizada Modificado de Agua) y el Índice de Relación de Agua, con el objetivo de identificar el que mejor predijera los niveles de agua. Las imágenes aéreas fueron utilizadas como referencia espacial y los datos LiDAR para generar curvas área-elevación. La precisión de los métodos fue validada usando métricas estadísticas: coeficiente de determinación, error cuadrático medio y suma de errores al cuadrado. El área de estudio fue un humedal construido, delimitado y monitoreado en campo. Se utilizaron datos satelitales multitemporales, vuelos fotogramétricos y registros continuos de nivel de agua obtenidos in situ. Los

resultados indicaron que el índice MNDWI presentó mejor rendimiento en ambos sensores. El umbral óptimo fue de -0.35 para Sentinel-2 y -0.25 para Landsat-8. Se obtuvieron valores de Kappa entre 0.72 y 0.77 para Sentinel-2, y entre 0.73 y 0.87 para Landsat-8. Los niveles de agua estimados alcanzaron un R^2 de 0.86 y 0.88 respectivamente, con errores de 0.04 m y 0.06 m en RMSE, lo que demuestra alta exactitud. La investigación confirmó que es posible estimar con precisión la elevación de agua superficial en humedales pequeños utilizando datos satelitales públicos, combinados con datos topográficos auxiliares. La metodología es robusta y replicable. Este estudio constituye una contribución significativa al monitoreo hídrico de humedales mediante teledetección. Sus resultados son aplicables al estudio de bofedales altoandinos, como los de la microcuenca Chikllarazu, ya que permite estimar volúmenes de agua y su variación temporal, facilitando el análisis de la recarga hídrica en regiones de difícil acceso.

Moreira et al. (2021) en su tesis "*Hydraulic conductivity and geophysics (ERT) to assess the aquifer recharge capacity of an inland wetland in the Brazilian Savanna*". Realizaron un estudio sobre la hidrodinámica y la recarga hídrica en un humedal continental ubicado en la Estación Ecológica de Itirapina, en el Estado de São Paulo (Brasil). El objetivo principal fue revelar la relación entre la hidrodinámica y la arquitectura pedológica mediante un enfoque combinado que integró pruebas de conductividad hidráulica in situ, el método geofísico de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y descripciones morfológicas del suelo. Se aplicaron técnicas de ERT bidimensional (2D) y pseudotridimensional (3D) con el fin de investigar los flujos subterráneos de agua y la interacción entre aguas superficiales y subterráneas. Los resultados mostraron que las áreas con menor infiltración estaban asociadas a un nivel freático elevado en zonas herbáceas, mientras que las áreas con mayor infiltración se relacionaron con superficies expuestas de suelo. Las técnicas geofísicas permitieron identificar zonas de conexión entre los sistemas suelo-agua y agua subterránea, lo cual confirma que estos humedales pueden actuar como puntos locales de recarga hídrica. Asimismo, la hidrodinámica estuvo influenciada por la evolución geoquímica de la cubierta edáfica, en particular por la disolución de costras de hierro (lateritas) que condicionan la estructura del relieve. Este antecedente es relevante porque demuestra que incluso los humedales interiores de menor extensión cumplen un rol clave en la infiltración y en la recarga de acuíferos. Además, valida el uso de métodos geofísicos (ERT) para analizar la conectividad suelo-agua, lo cual puede extrapolarse al estudio de bofedales altoandinos como los de la microcuenca

Chikllarazu, donde también se aplican técnicas geofísicas para evaluar la capacidad de almacenamiento y recarga hídrica.

1.1.2 Antecedentes nacionales

García et al. (2016). *“Mapeo de bofedales en cabeceras de cuenca mediante imágenes de los satélites Landsat (1986–2015)”*. Este estudio se orientó a delimitar y cuantificar con precisión la extensión de los bofedales de puna en la cabecera de la cuenca del río Chillón, ubicados a más de 3 800 metros sobre el nivel del mar, abordando un periodo de casi tres décadas entre 1986 y 2015. Se seleccionó una imagen por año de los satélites Landsat TM, ETM+ y OLI. Sobre estas imágenes se calcularon índices espectrales clave (NDVI, NDWI y NDII), los cuales fueron combinados en un composite RGB: NDII en rojo, NDVI en verde y NDWI en azul. Este composite facilitó la identificación visual de áreas de agua, vegetación y humedad. Posteriormente, se empleó la clasificación supervisada por paralelepípedos, integrada con un mapa de pendientes (rango de 0–15°) para refinar espacialmente la delimitación y generar vectores poligonales de bofedales. La metodología permitió identificar una superficie total de 1 862,55 hectáreas, equivalente a 18,63 km², que corresponde al 0,76 % del área de la cabecera de cuenca del río Chillón. La precisión de la clasificación fue validada con datos de campo, arrojando un 96 % de exactitud, lo que confirma la fiabilidad del enfoque. La combinación de índices espectrales multitemporales y la consideración de la topografía resultó determinante para la correcta delimitación de los bofedales, incluso en condiciones de nubosidad intermitente y en terrenos escarpados. Su enfoque basado en Landsat, NDVI/NDWI/NDII y clasificación por paralelepípedos soportada en SIG, puede servir como marco de referencia para establecer al menos 20 km² de área de bofedal proyectada, con alta confiabilidad en delimitación geoespacial y una metodología compatible con imágenes Sentinel-2.

Gonzales (2024). *“Determinación de la dinámica de cambio de los bofedales altoandinos empleando imágenes satelitales en la cuenca del río Huenque en el periodo 1990–2024”*. Determinar la dinámica de cambio de los bofedales altoandinos mediante el uso de imágenes satelitales multitemporales en la cuenca del río Huenque durante el periodo 1990–2024, considerando su relación con las variables climáticas y su estado de conservación. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat correspondientes a los años 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 y 2024. A dichas imágenes se les aplicó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para estimar la cobertura de bofedales en cada periodo. Posteriormente, se

realizó un análisis estadístico correlacional entre las superficies bofedales obtenidas y las variables climáticas (precipitación y temperatura), utilizando significancia estadística con p -valor < 0.05 . Además, se evaluó el estado de conservación de 15 bofedales seleccionados de la cuenca. La extensión de los bofedales mostró una variabilidad notable en el tiempo. En 1990 se registraron 45.49 km², mientras que en el año 2000 la superficie se redujo a 27.56 km². Posteriormente, se observaron fluctuaciones, con máximos de 40.93 km² en 2015 y un valor de 37.87 km² en 2024. Se identificó una correlación estadísticamente significativa entre la disminución de superficie bofedal y la variabilidad climática, particularmente con la disminución de precipitaciones. Se determinó una tasa media de cambio de -0.5224 %. El análisis del estado de conservación mostró que la mayoría de los bofedales se encontraban en estado bueno, y una menor proporción en estado muy bueno. Los resultados evidencian que los bofedales altoandinos de la cuenca del río Huenque presentan una dinámica de cambio influenciada tanto por factores climáticos (sequías extremas) como por factores antrópicos (ganadería y erosión). La variación temporal en la cobertura demuestra la vulnerabilidad de estos ecosistemas frente al cambio climático y la necesidad de monitorearlos con mayor frecuencia. El estudio constituye un referente metodológico útil para la delimitación y el análisis multitemporal de bofedales en la microcuenca Chikllarazu. Valida el uso del índice NDVI aplicado a imágenes Landsat como herramienta eficaz para monitorear cambios en la cobertura vegetal de bofedales en el tiempo y su relación con variables climáticas. Además, resalta la importancia de vincular la teledetección con información climática y de conservación para tomar decisiones en la gestión de estos ecosistemas.

Realizado por Pamo & Oscoco (2022). "*Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990 – 2021, con técnicas de teledetección*" se analizaron los cambios en el área del bofedal de la comunidad de Ancomarca, ubicada en el distrito de Palca, provincia y departamento de Tacna, Perú. El objetivo principal de la investigación fue evaluar la dinámica espacial y temporal del bofedal entre 1990 y 2021, utilizando técnicas de teledetección. Para ello, se emplearon imágenes satelitales Landsat (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM y Landsat 8 OLI/TIRS) obtenidas de la plataforma USGS, junto con software especializado como ArcGIS 10.2 y ERDAS Imagine 2014 para el procesamiento de las imágenes. Además, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para evaluar el vigor de la vegetación y se determinó la tasa anual de cambio en la cobertura del bofedal. La metodología del estudio se

basó en un enfoque cuantitativo, con técnicas de teledetección y análisis espacial. Se realizó un muestreo discrecional en puntos seleccionados del bofedal, utilizando GPS e imágenes fotográficas para la extracción de firmas espectrales. Las imágenes satelitales fueron sometidas a correcciones radiométricas y atmosféricas, y se aplicaron fórmulas para calcular el NDVI y la tasa anual de cambio. Los resultados mostraron una disminución significativa en el área del bofedal, pasando de 629.01 hectáreas en 1990 a 551.07 hectáreas en 2021, lo que representa una pérdida de 77.94 hectáreas en 31 años. La tasa anual de cambio fue de -0.42%, indicando una pérdida promedio de 2.68 hectáreas por año. Además, se observó que la vegetación del bofedal presentaba predominantemente "poca vegetación con baja vigorosidad", con una reducción en los valores del NDVI a lo largo del tiempo, lo que sugiere un deterioro en la salud del ecosistema. Entre los factores que podrían estar contribuyendo a la disminución del área del bofedal se encuentran la sobreexplotación de aguas subterráneas, el sobrepastoreo y el cambio climático. Aunque no se estableció una relación causal directa, estos factores han sido identificados como posibles causas de la degradación del bofedal. Además, se observó un ligero incremento en el área del bofedal entre 2005 y 2021, posiblemente debido a la desglaciación y el aumento de la temperatura asociados al cambio climático. Sin embargo, este incremento no fue suficiente para compensar la pérdida general del área. En conclusión, el estudio evidenció una disminución significativa en el área y el vigor de la vegetación del bofedal de Ancomarca, lo que resalta la importancia de implementar estrategias de conservación y gestión sostenible para proteger este ecosistema altoandino. La investigación aporta tanto teórica como prácticamente al campo de la ecología y la teledetección, proporcionando herramientas y metodologías que pueden ser utilizadas para el monitoreo y la gestión de ecosistemas vulnerables. Este estudio sirve como un antecedente relevante para futuras investigaciones sobre la dinámica de los bofedales y su relación con factores ambientales y antropogénicos.

Talaverano et al. (2024) realizaron la investigación titulada "*Variación temporal de bofedales andinos utilizando tecnología de información geográfica en el distrito de Uranmarca, Apurímac - Perú*". El estudio tuvo como objetivo general estimar la cantidad de superficie húmeda de los bofedales y su variación en el período 2010–2023 en el distrito de Uranmarca, y como objetivos específicos identificar la información satelital disponible para determinar la variación de humedad en la superficie de los bofedales, analizar índices espectrales que permitan discriminar la

superficie húmeda y cuantificar la variación de la superficie en los años 2010, 2013, 2017, 2020 y 2023. La metodología aplicada tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo no experimental y nivel explicativo, utilizando imágenes satelitales Landsat 8 y 9 de la época de estiaje, modelos digitales del terreno e información cartográfica digital topográfica. Para la delimitación de las áreas húmedas se emplearon los índices espectrales NDII y NDVI. La población de estudio estuvo conformada por la superficie de los bofedales del distrito de Uranmarca, evaluada en distintos años del período mencionado. Los resultados indicaron que la superficie de los bofedales fue de 1,570,248.16 m² en 2013, 1,783,753.43 m² en 2017, 1,478,876.20 m² en 2020 y 1,728,497.94 m² en 2023. Se concluyó que los bofedales de Uranmarca presentaron fluctuaciones a lo largo del período de análisis, con una disminución neta de 55,255.49 m² entre 2013 y 2023, lo que evidencia la dinámica interanual de estos ecosistemas y la influencia de factores climáticos e hidrológicos en su extensión. El aporte de esta investigación radica en fortalecer la comprensión de la dinámica de los bofedales altoandinos mediante el uso de tecnologías satelitales y SIG, proporcionando insumos relevantes para la gestión hídrica y ambiental del distrito de Uranmarca y sirviendo como referencia metodológica para estudios similares en otras microcuencas andinas.

1.1.3 Antecedentes locales

R. Chávez (2015) en sus tesis "*Inventario y variación multianual de bofedales en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho*". Realizar un inventario detallado y estimar la variación multianual de los bofedales en la cuenca alta del río Cachi, ubicada en las provincias de Cangallo y Huamanga, en el departamento de Ayacucho. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat (path 5/69 y 6/69), corregidas atmosférica y geométricamente. Además, se integró un modelo de elevación digital (DEM ASTER). Se aplicó clasificación supervisada utilizando los softwares ENVI 5.1 y ArcGIS 10.1. Para el inventario se usó una unidad mínima cartografiable de 1 ha, y de 2,24 ha para el análisis multianual. Se evaluaron características como área, perímetro, altitud, pendiente y uso de la tierra. En el año 2013 se identificaron 883 bofedales con una superficie total de 14 500,66 ha. El 80 % de estos ecosistemas se ubican sobre los 4 100 m.s.n.m., y el 55 % se encuentra en pendientes de 8–15 %. La variación multianual mostró que en 2003 existía una mayor superficie (14 077,08 ha), la cual se redujo a 10 882,8 ha en 2013, evidenciando una tasa de pérdida promedio anual de –2,17 %. El estudio demuestra que el uso de imágenes Landsat y DEM permite la delimitación precisa y la evaluación temporal de los bofedales altoandinos, resaltando

su reducción progresiva en la última década. Este antecedente proporciona un ejemplo local metodológicamente sólido para delimitar bofedales mediante teledetección multitemporal. Su aplicación en la microcuenca Chikllarazu permitiría estimar superficies en hectáreas o km² con precisión aceptable, apoyando decisiones de conservación y ordenamiento.

Marcatoma (2023). *“Relación de la humedad de suelo con el índice de agua y vegetación de los bofedales altoandinos de la Microcuenca-Apacheta, Ayacucho 2017”*. Establecer la relación entre la humedad del suelo medida en campo (método gravimétrico) y los índices espectrales NDVI y NDWI derivados de imágenes satelitales, para validar su uso como indicadores de contenido hídrico en ecosistemas de bofedal. Se tomaron muestras de suelo en diferentes parcelas de bofedales durante la época seca y húmeda. Estas muestras fueron analizadas en laboratorio mediante el método gravimétrico estándar para estimar el porcentaje de humedad del suelo. Paralelamente, se procesaron imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 para calcular los valores de NDVI y NDWI correspondientes a cada punto de muestreo. Se aplicó análisis estadístico de correlación de Pearson para establecer la relación entre los índices espectrales y la humedad gravimétrica. El índice NDWI presentó una correlación positiva fuerte ($r = 0.84$) con el contenido de humedad, superando al NDVI ($r = 0.71$). Además, se encontró una mayor sensibilidad del NDWI en suelos saturados durante la temporada de lluvias. Esta relación permitió estimar espacialmente zonas de alta humedad con precisión superior al 85 % al comparar con valores medidos. La correlación significativa entre los índices espectrales y la humedad del suelo valida el uso de imágenes satelitales para estimar indirectamente el contenido hídrico de los bofedales. Este enfoque permite complementar o reemplazar mediciones en campo, especialmente en zonas de difícil acceso. El estudio de Tumbalobos respalda el uso de NDWI como indicador confiable para evaluar la capacidad hídrica de los bofedales en términos de contenido de humedad.

Moncada et al. (2018) desarrolló la investigación titulada *“Caracterización de la dinámica espacial de humedales en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho, mediante imágenes de radar Sentinel-1A y 1B”*, con el propósito de analizar la variación temporal y espacial de la humedad en los humedales altoandinos. La metodología empleada tuvo un enfoque cuantitativo y de tipo descriptivo-analítico, utilizando el índice delta, calculado a partir de la relación entre las bandas VV y VH, lo que permitió identificar píxeles con información de humedad superficial. Los resultados mostraron que, durante 2017, el área promedio con

presencia de humedad fue de 2016,5 ha, registrándose variaciones significativas a lo largo del año. Se identificaron máximos en los meses de julio (2270 ha) y noviembre (2311,4 ha), y mínimos hacia finales del año, con el valor más bajo en diciembre (1572,3 ha). Además, se observaron anomalías positivas en febrero, mayo, julio, agosto, setiembre y noviembre, mientras que las negativas correspondieron a enero, marzo, abril, junio, octubre y diciembre. Estos resultados reflejaron la dinámica estacional del ecosistema, evidenciando la alternancia entre periodos de mayor y menor humedad vinculados a los ciclos de precipitación. Se concluyó que el índice delta constituye un indicador confiable para caracterizar la variación temporal y espacial de la cobertura de los humedales altoandinos, lo que aporta evidencia científica sobre los cambios estacionales y anuales de la humedad en bofedales.

1.2 Bases teóricas

1.2.1 Humedales

Los humedales son ecosistemas complejos, debido a la gran diversidad de formas que pueden adoptar, lo que complica su identificación y protección, además de ser de gran relevancia para la conservación de la biodiversidad y las actividades de las comunidades cercanas (Amstein, 2017). RAMSAR (2016). Estos “Pueden ser naturales o creadas por el ser humano, y su agua puede ser dulce, salobre o salada. Estos ecosistemas incluyen marismas, pantanos, turberas, lagos, ríos, estuarios, deltas, manglares, arrecifes de coral y zonas costeras poco profundas”.

1.2.2 Humedales altoandinos

Los humedales altoandinos, conocidos en Perú como bofedales, se caracterizan por su notable acumulación de materia orgánica en estado de turba. En primer lugar, funcionan como praderas higrófilas que alimentan el ganado en las regiones más altas ubicados en de los Andes peruanos a más de 3,500 metros sobre el nivel del mar (Mendoza et al., 2024), estos son considerados por el estado peruano como ecosistemas frágiles debido a su delicado equilibrio ambiental. Además, regulan el flujo de agua dentro de la cuenca y capturan carbono, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático a escala global (Foster et al., 2020). Los humedales altoandinos constituyen un recurso natural que, por su singularidad biológica, económica y cultural, resulta indispensable para la permanencia y el bienestar de los pueblos indígenas y campesinos que ocupan sus márgenes (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), 2020).

Los humedales altoandinos se caracterizan por su temperatura, constituyen ecosistemas frágiles con agua constante, además poseen una gran riqueza en diversidad biológica y de especies endémicas. Su innegable fragilidad los hace particularmente susceptibles a cualquier tipo de cambio (González, 2015). Los humedales altoandinos se ubican en las altas zonas de la cordillera andina, caracterizados por bajas temperaturas y abundante agua que puede saturar suelos o moverse superficialmente. El agua en estos ecosistemas tiene propiedades únicas, lo que les da un funcionamiento y formación particulares (Marrero, 2021).

1.2.3 Rol de bofedales

Los bofedales, como humedales altoandinos, desempeñan un papel crucial en los ecosistemas andinos peruanos debido a su capacidad única para acumular carbono y agua. Esto es especialmente relevante en el contexto actual del cambio climático (Oyague, 2020). Además, los bofedales proporcionan un valioso forraje para el ganado altoandino, lo que contribuye significativamente a la subsistencia de la población ubicada en este lugar (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023).

Las técnicas tradicionales de gestión de la tierra en los altos Andes dependen de los bofedales, que son entornos húmedos con plantas y a veces capas subterráneas llenas de turba. Estas zonas retienen el agua en las etapas superiores de las cuencas hidrográficas y son núcleos de biodiversidad, lo que es beneficioso para los animales domésticos en términos de forraje y suministro de agua (Zamora, 2019).

1.2.4 Bofedal

La palabra «bofedales» se utiliza para referirse a una variedad de comunidades vegetales de humedales que pueden encontrarse en los Andes de Perú. Los bofedales son conocidos por su humedad edáfica constante durante todo el año (Maldonado, 2010a). En el argot peruano, el término «bofedal» describe un tipo específico de humedal andino. En otras regiones de la nación, estos hábitats se denominan “oconales” (INIGEM, 2023). Según varios autores, este ecosistema se encuentra en los Andes desde una altitud de 3800 metros sobre el nivel del mar (Maldonado, 2010a; Rivas & Tovar, 1982).

Los Andes se caracterizan por una ecología hidromórfica que sustenta una planta herbácea hidrófila. Prospera en suelos llanos, ligeramente inclinados, con depresiones y constantemente inundados o empapados por las corrientes de agua.

El bofedal tiene una estructura acolchada o almohadillada y una vegetación exuberante, compacta y siempre verde. La altura de estos pastizales parece oscilar entre 0,1 y 0,5 metros (MINAM, 2019). Gómez, (2015) para el autor “Los bofedales también son llamados “oconales” o “turberas” están distribuidas a lo largo de las praderas como parches, ocupa un 40% de la superficie nacional”, estos valles lluviosos que se alimentan aguas provenientes del deshielo glaciario (Rocha & Sáez, 2003). En los andes centrales, que se extienden desde el norte de Perú hasta la frontera entre Chile, Bolivia y Argentina, los bofedales son ecosistemas mixtos cuya altitud oscila entre los 3.500 y los 4.900 metros sobre el nivel del mar (Baiker, 2019).

1.2.5 Importancia de los bofedales

Los bofedales se extienden como extensos campos verdes sobre las áreas elevadas y planas de nuestras punas, pareciendo cobijas que resguardan los altiplanos cercanos a las cumbres nevadas (Cooperación para el Proceso de Autodesarrollo Sostenible de Arequipa (COPASA), 2021). Estos espacios albergan pastizales nutritivos que son fundamentales para la alimentación del ganado, incluyendo alpacas, llamas e incluso la vicuña silvestre en algunas regiones. Funcionan como reservas naturales de agua, comportándose como "esponjas" que proveen agua de manera continua a lo largo del año de las cuencas, mediante procesos de filtración (SERNANP, 2020). Así que a debido a actividades humanas como la construcción de carreteras, el drenaje, la urbanización, la agricultura intensiva, la construcción de presas, el pastoreo excesivo, la contaminación y otras formas de intervención en los sistemas ecológicos, muchos ecosistemas han perdido parte de su capacidad para proporcionar bienes y servicios ambientales, a pesar de su importancia crítica (Calvo, 2016).

Además, el INIGEM (2023) menciona que “Los bofedales habitan regiones que reciben agua del deshielo de glaciares, ríos, lagos y acuíferos subterráneos, almacenándola en las regiones superiores de las cuencas. Los humedales retrasan la escorrentía y con frecuencia el agua se filtra a través de la tierra antes de volver a fluir a un ritmo reducido”. Los ecosistemas de humedales controlan así la estabilidad del suelo y el movimiento del agua. Los bofedales también retienen una cantidad considerable de agua, pero no sustituyen por completo la capacidad de los glaciares para almacenarla. Los bofedales actúan como esponjas naturales que absorben y retienen agua de lluvia y deshielo, para luego liberarla gradualmente, alimentando los ríos y arroyos de forma constante. Este proceso ayuda a mantener el flujo de agua

en épocas secas, estabilizando los niveles de los cuerpos de agua y asegurando recursos hídricos para el entorno (Ramírez, 2008).

1.2.6 Características de los bofedales

El bofedal, una especie vegetal que se encuentra en la puna seca, es un valioso recurso forrajero. Estos hábitats son oasis en regiones desérticas, que constituyen una pequeña fracción del terreno altoandino, pero con un importante valor biológico debido a su capacidad para retener agua y mantener la biodiversidad (Huanca, 2012). Los humedales están formados por tres elementos esenciales: el suelo, el agua y las plantas. Los bofedales pueden dividirse en dos categorías: permanentes (húmedos todo el año) y estacionales (húmedos sólo durante la estación lluviosa) en función del hidroperiodo, que mide el tiempo que el suelo está empapado de agua. La ubicación y el origen del agua influyen en el tipo de plantas que pueden crecer y en la calidad del agua (INIGEM, 2023).

Figura 1

Muestra de suelo de bofedal con acumulación de turba



Nota: La imagen detalla una muestra de suelo extraída de un bofedal en Ayacucho, Perú, evidenciando la acumulación de turba, un componente orgánico clave que permite la retención de agua y carbono. Fuente: (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, 2023).

1.2.7 Tipos de bofedales

La altitud, la latitud, el terreno, la humedad, la exposición, el impacto de la ganadería vacuna y otros factores afectan a la diversidad botánica y la riqueza de especies de los humedales. La presencia de determinados tipos de comunidades vegetales viene

determinada por estas características (Maldonado, 2018). Además, hay tipos bofedales tipo cojín o almohadillados, bofedales gramíneas y graminoides, bofedales tipo musgos (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023)

1.2.7.1 Bofedales tipo cojín o almohadillados. Los bofedales tipo cojín, también conocidos como alfombrados o cojines planos, son ecosistemas altoandinos con vegetación densa y esponjosa, formada por especies como *Distichia muscoides* y *Oxychloe* andina. Se caracterizan por su capacidad de retener agua y soportar condiciones extremas, siendo clave en la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. Estos ecosistemas de la puna altoandina se representan en comunidades vegetales. Se caracterizan especialmente por la formación de almohadillas duros y compactos que ayudan en la regulación hídrica. Principalmente están formadas por las especies de *Distichia*. Estas plantas están adaptadas a las bajas temperaturas, alta radiación, y humedad de los suelos en los Andes.

Figura 2

Bofedal especie Distichia muscoide



Nota: La imagen presenta un panorama de un área de aguas peruanas convocado por la gramínea altoandina *Distichia muscoides* en la región de Ayacucho. Se distingue claramente la desarrollada capa de turba, un residuo orgánico característico ecosistemas de bofedal.

1.2.7.2 Bofedales gramíneas y graminoides. Son humedales menos frecuentes que se parecen a pastizales altos, con plantas de hasta 60 cm que crecen en zonas con agua temporal. Se diferencian de otros ecosistemas andinos por sus especies dominantes, como *Calamagrostis*, *Festuca*, *Carex* y *Juncus*. Aunque están presentes en varias regiones, son más comunes en la vertiente occidental del país.

Se describe como aquellos humedales altoandinos que, por su fisonomía de crecimiento, guardan un notable parecido con un pastizal húmedo, pero que, al mismo tiempo, disponen de la capacidad de acumular turba en sus suelos. Están dominados principalmente por especies pertenecientes a las familias *Poaceae* (gramíneas) y *Cyperaceae* (graminoides), con géneros frecuentes como *Festuca*, *Calamagrostis*, *Carex*, *Eleocharis* y *Phylloscirpus*. Las condiciones de saturación hídrica, suelos húmedos o inundados parcialmente, junto con la acumulación de materia orgánica (turba) favorecen el desarrollo de estos pastizales turbosos, que cumplen funciones importantes como el forraje para la ganadería andina, retención de agua y almacenamiento de carbono.

Figura 3

Bofedal Calamagrostis vicunarum



Nota: La fotografía capta un bofedal dominado por *Calamagrostis vicunarum*, planta emblemática de los ecosistemas de bofedal gramíneo–graminoide. *C. vicunarum* se asocia a ambientes que experimentan inundaciones estacionales, donde el suelo presenta alta humedad fuente: (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023).

1.2.7.3 Bofedales tipo musgos. Son ecosistemas poco comunes, dominados por musgos del género *Sphagnum*, conocidos por su gran capacidad para retener agua. Suelen estar acompañados de arbustos y líquenes, formando paisajes resilientes y diversos. Se localizan principalmente en el norte y este del Perú, asociados a los ecosistemas de Páramo y Jalca. Entre sus especies clave destacan *Sphagnum spp.*, *Cladina spp.* y *Loricaria spp.*, que cumplen un rol importante en la conservación hídrica y de la biodiversidad.

Figura 4

Bofedales tipo musgos



Nota: La fotografía ilustra un pantano de turba tipo musgo, lleno predominantemente con miembros del género *Sphagnum*, buenos por su excepcional capacidad de retención de agua. la imagen extraída de (MINAM, 2019b)

1.2.8 Distribución geográfica

Los bofedales en Perú ocupan aproximadamente 1,051,134 hectáreas, lo que equivale al 0.8% del territorio nacional, según el (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023). Estos se distribuyen principalmente en los departamentos de Puno, Cusco, Arequipa y Ayacucho (MINAM, 2019a). Las comunidades vegetales varían según las condiciones locales, se distinguen principalmente por las especies como *Distichia* o *Plantago rigida*, los céspedes cubiertos de musgos o pequeños arbustos (Maldonado, 2018). Se han identificado 165 especies pertenecientes a 40 familias botánicas (Mendoza et al., 2024).

Tabla 1*Variedad de bofedales distribuidos en Ayacucho*

Especie	Familia	Distribución	Altitud (msnm)	Observaciones
Azorella crenata	Apiaceae	AM, AN, CA, CU, HU, HV, JU, PA, PU, AY	3000-4000	Frecuente en pajonales.
Lilaeopsis macloviana	Apiaceae	AR, AY, CA, CU, LI, PU	Nivel del mar - 4700	Abundante, adaptada a diversos ecosistemas.
Cotula mexicana	Asteraceae	AM, AR, AY, CA, CU, HU, HV, JU, LI, MO, PA, PU	3400-4300	Frecuente en diferentes altitudes.
Rockhausenia pygmaea	Asteraceae	AM, AN, AP, AR, AY, CU, HU, HV, JU, LI, MO, PA, PU	3300-5600	Muy variable, adaptaciones según zonas.
Plagiocheilus soliviformis	Asteraceae	AM, AN, AY, CA, HU, HV, LL, PA	2700-4500	Poco frecuente.

Nota: Variedad de bofedales distribuidos en Ayacucho, de las diferentes especies *Azorella crenata*, *Lilaeopsis macloviana*, *Cotula mexicana*, *Rockhausenia pygmaea*, *Plagiocheilus soliviformis*, (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023).

1.2.9 Bofedales en el departamento de Ayacucho

Los bofedales de Ayacucho se ubican en las cadenas montañosas del sur del Perú, entre los 3,750 y 5,250 metros sobre el nivel del mar, con mayor concentración en la provincia de Lucanas. Estos ecosistemas abarcan 102,597.3 hectáreas, lo que representa el 2.34% del territorio regional, y se distribuyen en 103 distritos de 11 provincias. Su importancia radica en su aporte a la biodiversidad y en los servicios ecosistémicos, especialmente la regulación hídrica. Además, el 27.4% de su superficie es gestionada por comunidades campesinas, lo que evidencia una estrecha relación con las poblaciones locales (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023).

1.2.10 Servicios ecosistémicos

1.2.10.1 Purificación del agua. Se ha demostrado que los bofedales altoandinos desempeñan un papel crucial en la purificación del agua, ya que actúan como filtros naturales eliminando la presencia de metales pesados y mejorando el color, olor, sabor, turbidez entre otros (Calvo, 2016; Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023). La calidad del agua se define por sus propiedades físicas, químicas y biológicas como: niveles de pH junto con conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, especialmente cerca de arroyos y manantiales (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023). Aparte de su valor ecológico, estos ecosistemas también son críticos como fuentes de agua para el consumo humano, agricultura y ganadería incluyendo camélidos andinos lo que hace que su conservación junto con una gestión sostenible sea una necesidad prioritaria (Gómez, 2015).

1.2.10.2 Almacén de agua. Los bofedales altoandinos funcionan como reservorios de agua naturales principalmente debido a la presencia de turba, un material orgánico que puede retener agua y ralentizar su flujo, lo que permite una mayor infiltración y recarga subsuperficial (Calvo, 2016; MINAM, 2019a). Durante los períodos húmedos, estos ecosistemas reciben agua de escorrentía superficial, derretimiento de nieve y precipitación alta andina, así como de acuíferos altos andinos. Esto ayuda a sostener sus funciones regulatorias durante los períodos secos y apoya actividades productivas como la ganadería (Zúñiga, 2021). Sin embargo, los humedales estacionales están dominados por vegetación de plantas en cojín que forman matas u otras especies adaptadas a estas condiciones, lo que lleva a una cobertura de turba más superficial. Por lo tanto, los bofedales estacionales tienden a tener una menor capacidad de almacenamiento de agua y carbono (MINAM, 2019a). Aunque aún no se cuenta con estimaciones precisas respecto a la cantidad de agua que almacenan los ecosistemas de bofedales de la región altoandina del Perú, se tiene un consenso en la comunidad científica y técnica sobre la importancia que tienen en la regulación del agua en esas cuencas montañosas. Los humedales de alta montaña, cuyos suelos, vegetación y turba son inmersos, reciben agua de precipitación, de deshielo y de flujo subterráneo, actúan como “esponjas” naturales al almacenarla. En los períodos húmedos, el bofedal la retiene en los períodos húmedos y la suelta de manera controlada en los meses secos (INIGEM, 2023).

Figura 5

Servicios ecosistémicos de los bofedales



Nota: Una vista panorámica bofedales en la microcuenca Chikllarazu, muestra la abundante vida vegetal del área y las zonas de agua en su superficie.

1.2.10.3 Regulación hídrica. Los bofedales, también conocidos como humedales de altura, llevan a cabo funciones ecosistémicas que son claves para la regulación del agua. Subsuelo y acuíferos actúan como esponjas que recogen y almacenan agua durante épocas de lluvia. De esta manera, se contribuye al equilibrio ecológico de las cuencas e incluso brindan un constante abastecimiento a fuentes vitales como ríos y arroyos (Calvo, 2016). La turba algo similar en donde retiene el agua en forma controlada libera solo el exceso (MINAM, 2019a). Asimismo, el progresivo almacenamiento la erosión, haciendo que quede más controlado y por ende más sostenible (Ñahui, 2021). Ya sea en ambientes rurales o urbanos, el filtrado del agua ha mejorado la disponibilidad reduciendo la dependencia superficial de otras fuentes hídricas (Castro, 2011; Cifuentes et al., 2023). Por otro lado, los bofedales son clave para los andinos cuya adaptación climática depende directamente ya que les permiten protegerse ante su cambio. Esto explicaría por qué lo han mantenido durante tantas generaciones (Vivas, 2022).

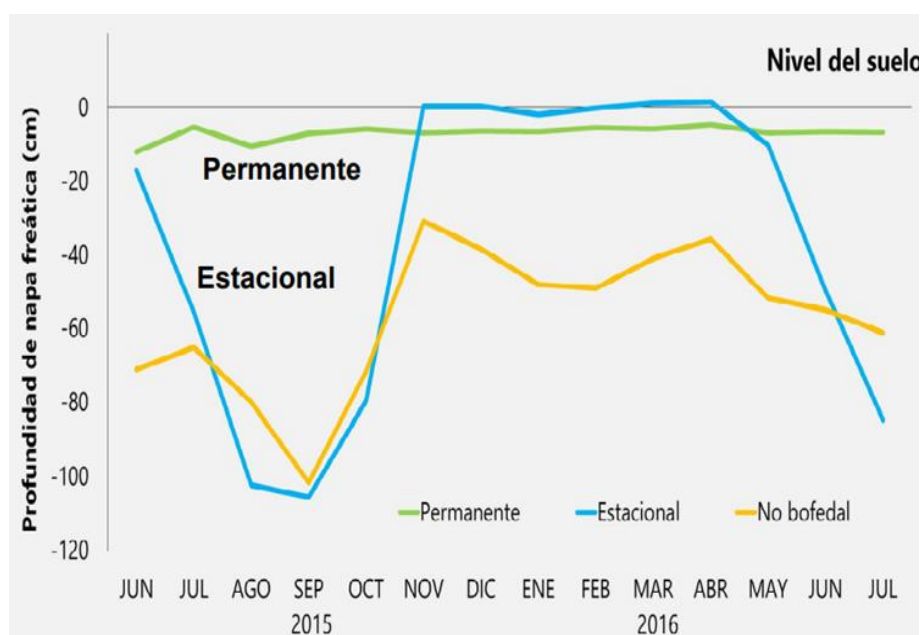
1.2.11 Hidroperiodo

La duración de la saturación del suelo para propósitos de clasificación divide los bofedales en estacionales y permanentes. Los primeros se inundan solo durante la temporada de lluvias, mientras que en el período seco el nivel freático desciende de 40 a 90 cm, y el segundo tipo mantiene suelos saturados durante todo el año con

niveles de agua a menos de 20 cm de la superficie (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023). Este hidroperíodo revela la fuente de agua que los alimenta: para los humedales permanentes, el agua proviene de acuíferos subterráneos, pero para los humedales estacionales proviene exclusivamente de la lluvia. Factores como la posición de la cuenca y la pendiente también afectan la capacidad de retención (Fuentealba, 2019). Situados a más de cuatro mil metros de elevación m.s.n.m, los bofedales son como oasis biológicos en medio de elevaciones en los Andes, ya que recolectan lluvia, así como agua de deshielo y manantiales, lo que permite que su vegetación permanezca verde durante todo el año, sosteniendo el ganado que sustenta a las comunidades montañosas, haciendo que su conservación urgente sea crucial dada su fragilidad ecológica (Lorini, 2014).

Figura 6

Clasificación del bofedal según la acumulación de turba



Nota: Los gráficos muestran una clasificación de bofedales según la acumulación de turba a lo largo del tiempo, distinguiendo entre bofedales permanentes y estacionales.

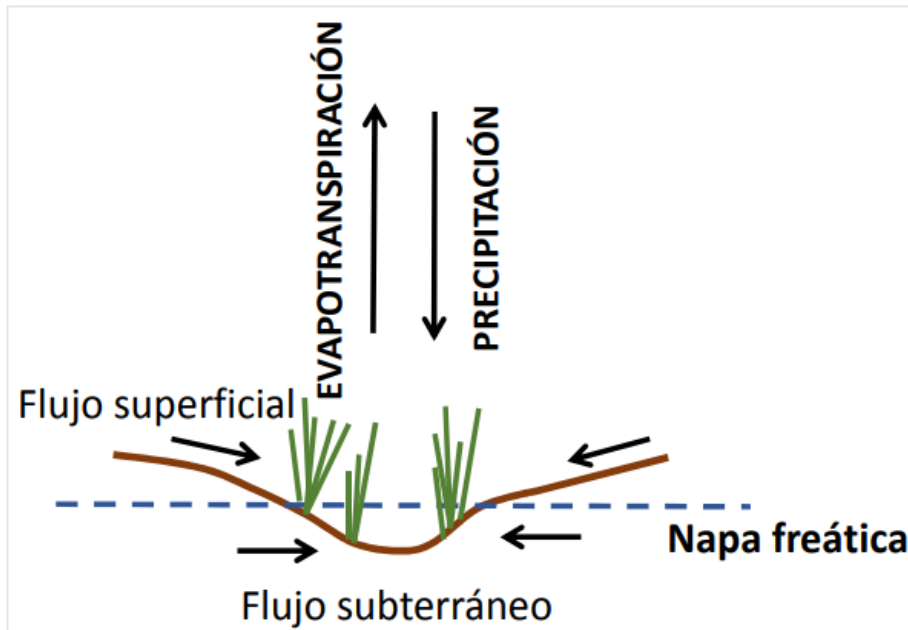
1.2.12 Mecanismos de almacenamiento y liberación de agua

- **Humedal:** Ecosistema donde interfieren de modo predominante el agua y la tierra debido a la proximidad del nivel freático, y que es de fundamental importancia para la biodiversidad, así como para la regulación del ciclo hidrológico.

- **Turba:** Suelo orgánico que resulta de un proceso de acumulación de descompuesto vegetal ($\geq 30\%$), siendo sustancial en la captura de carbono y nutrientes en los humedales.
- **Turbera:** Humedal donde hay una extensa reserva de turbas con que actúa como reservas a profundidad (30-40 cm).

Figura 7

Procesos de almacenamiento y liberación de agua



Nota: La figura representa los procesos de almacenamiento y liberación de agua en los ecosistemas, incluyendo el escurrimiento superficial, la evapotranspiración, la precipitación y la sumersión de agua en la capa freática como recarga de aguas subterráneas.

1.2.13 Recarga hídrica

La recarga hídrica se refiere al proceso en el que el agua proveniente de las lluvias se filtra al suelo hasta los acuíferos subterráneos, posibilitando la reposición de sus reservas. Tal como señala (AGRECOL, 2019, p. 5), “La recarga hídrica es el proceso mediante el cual el agua de lluvia penetra en el suelo para permitir la reposición de las reservas de agua subterránea”. El manejo adecuado de las zonas de recarga es clave para garantizar dicha infiltración y la sostenibilidad del recurso hídrico (González, 2011). En este sentido, menciona que tecnologías para la recarga hídrica y aprovechamiento del agua pluvial mejoran su disponibilidad en zonas críticas, contribuyendo a la seguridad hídrica de las comunidades (Corzantes et al., 2023). De igual forma, estas áreas son objeto de restauración ecológica con acciones que conservan la capacidad ubicua sobre la resiliencia a fenómenos climáticos extremos (CityAdapt, 2022). En la región Andina, evaluar la contribución de los ecosistemas

con respecto a la regulación de los recursos hídricos no es una tarea sencilla (Ochoa et al., 2016).

Figura 8

Proceso de recarga hídrica



Nota: La imagen ilustra el ciclo de recarga hídrica, mostrando cómo la precipitación, el deshielo y los manantiales alimentan los afluentes y desembocaduras que abastecen a zonas urbanas y naturales. <https://www.agrecolandes.org/wp-content/uploads/2020/01/boletin-recarga-h%C3%ADdrica-misereor-y-solidagro.pdf>.

1.2.14 Importancia de recarga hídrica

A pesar de que se reconoce la importancia de los ecosistemas en la regulación del agua en la región andina (particularmente en las áreas de puna y jalca), se ha estudiado poco sobre su funcionamiento que permita comprender y cuantificar la contribución de agua (Ochoa et al., 2016). Las áreas de recuperación hídrica, que son cruciales para el almacenamiento y la distribución del agua de lluvia, han venido sufriendo estragos por causas como la dejadez, deforestación, fuegos, sobrepastoreo y contaminación. Esto destruye su posibilidad de infiltrar el agua y daña su disponibilidad además de calidad (AGRECOL, 2019).

1.2.15 Tipos de recarga hídrica

La recarga de un acuífero se puede dar por medios naturales: lluvia, cuerpos de agua superficiales y transferencias entre acuíferos, así como recursos artificiales como la irrigación, las fugas en redes o infiltraciones desde embalses (Vásquez, 2022).

Recarga natural

Es el proceso por el cual el agua de lluvia o el agua de cuerpos de superficie entra en el acuífero de manera natural.

- Recarga directa o difusa: Ocurre cuando la lluvia se infiltra verticalmente a través de las capas del suelo hasta que llega al acuífero. Este tipo de recarga proviene del exceso de humedad no retenida por el suelo y no perdida a través de la evapotranspiración.
- Recarga indirecta o preferencial: Ocurre en casos donde el agua superficial, como el escurrimiento de la lluvia, se recoge y se acumula en ciertas zonas, como depresiones, pequeños lagos o charcos. Desde allí, más tarde se filtra por debajo de la tierra.
- Recarga vertical: Es el movimiento descendente de agua desde la superficie debido a la lluvia o flujos de retorno de riego agrícola.
- Recarga horizontal: El flujo de agua hacia un acuífero desde otros acuíferos adyacentes. En palabras simples, flujos laterales que alimentan un determinado sistema hidrológico desde áreas vecinas.

Recarga artificial

Es una intervención humana destinada a aumentar la cantidad de agua que se permite infiltrar en los acuíferos, especialmente en casos donde la recarga natural es insuficiente o mal gestionada.

Los métodos más comunes son:

- Pozos de infiltración o inyección: Se utiliza para introducir agua directamente al acuífero mediante pozos profundos, especialmente en terrenos donde el suelo no permite una buena infiltración natural.
- Viajes de agua o galerías subterráneas: Son sistemas antiguos que pueden utilizarse tanto para extraer como para infiltrar agua en el subsuelo, dependiendo de su diseño.
- Dispositivos de dispersión o modificación del cauce: Se emplean en ríos o canales para ralentizar el flujo y facilitar la infiltración del agua en el terreno.
- Jardines de lluvia: pequeñas áreas verdes urbanas o rurales diseñadas con el propósito de filtrar y retener el agua pluvial, permitiendo que se infiltre gradualmente.

Recarga según la temporalidad

- La regularidad frecuente también tiene su clasificación como recarga.

- Recarga a corto tiempo: Ocasional, como tras eventos torrenciales en zonas sin sequías severas.
- Recarga estacional: Durante aguaceros monzónicos definidos, pero acompaña zonas secas estables dominantes.
- Recarga perenne: continua en cíclica anual por ubicación geográfica; las lluvias son frecuentes todo el año e ideal a trópicos húmedos.

1.2.16 Teledetección

La teledetección es una técnica que permite observar, analizar y medir las características superficiales de la tierra sin contacto directo. Se realiza mediante la captación de ondas electromagnéticas que son reflejadas por la superficie terrestre debido a la luz solar y son detectadas por sensores que se encuentran en satélites, aviones o radares. Estos sensores convierten la información obtenida en fotografías digitales formadas por píxeles organizados. Las imágenes pueden ser pancromáticas, que cubren un amplio rango del espectro electromagnético en una sola banda y son multiespectrales donde cada banda capta una porción específica del espectro brindando información detallada del terreno (Sánchez, 2019). Esta habilidad de diferenciar y analizar distintas bandas permite evaluar propiedades geológicas, biológicas y químicas de un determinado lugar en el planeta.

Desde el lanzamiento del primer satélite de observación terrestre en 1972 la teledetección no ha dejado de desarrollarse. Aunque al principio había escasez de datos e infraestructura tecnológica, con el tiempo existe mayor disponibilidad científica, así como un acceso masivo a imágenes satelitales lo que hoy permite su uso en diversos campos. El uso de la teledetección hoy integra la agricultura de precisión, el monitoreo de desastres naturales como inundaciones, incendios forestales y terremotos, la vulcanología, la meteorología, la arqueología, la gestión de recursos naturales, así como la observación de cambios en el medio ambiente (Ingeoexpert, 2024; Instituto Geográfico Nacional (IGN), 2024). Debido a la capacidad de cobertura espacial y temporal de la teledetección, se hace más fácil realizar evaluaciones ambientales y gestionar la planificación del territorio y actividades de conservación.

1.2.17 Evolución de la teledetección

La teledetección ha recorrido un largo camino desde 1859, cuando se emplearon globos para capturar las primeras imágenes aéreas, hasta convertirse en una tecnología basada en satélites altamente sofisticados. Durante la Segunda Guerra

Mundial, en 1945, la fotografía aérea se consolidó como una herramienta estratégica clave. Posteriormente, el lanzamiento del Sputnik en 1957 y del TIROS-1 en 1960 marcó el inicio de la observación satelital, abriendo nuevas posibilidades en meteorología y análisis geográfico. En las décadas siguientes, misiones como Apollo y Gemini no solo ampliaron el conocimiento científico, sino que también mejoraron la precisión en el monitoreo de la Tierra. Durante los años 80 y 90, el desarrollo de sensores avanzados y satélites como ERS y TERRA impulsaron su aplicación en temas ambientales y climáticos. En la actualidad, plataformas como Deimos y Sentinel se han convertido en herramientas fundamentales para promover la sostenibilidad y gestionar de manera efectiva los desastres naturales (J. Martínez & Martín, 2010).

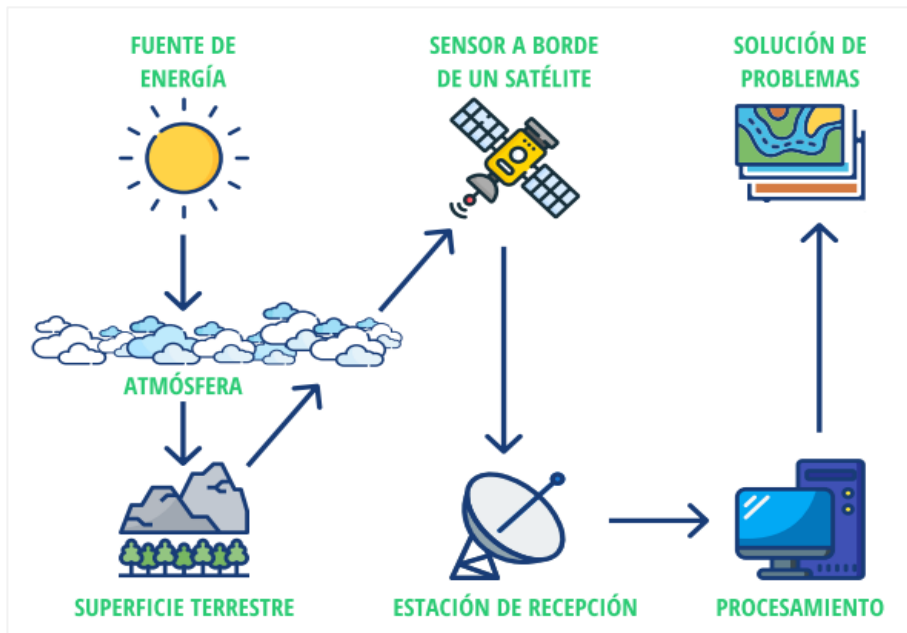
La teledetección comenzó a finales del siglo XVIII con fines militares, utilizando globos aerostáticos para fotografiar y analizar las posiciones enemigas y las rutas estratégicas. Esta técnica ofrecía información valiosa para planificar acciones y tomar decisiones. Con el tiempo, la tecnología avanzó y hoy en día se emplean satélites con sensores sofisticados, aunque el objetivo sigue siendo el mismo: observar y estudiar la superficie terrestre para obtener datos útiles y aplicarlos en diferentes áreas (Mas Monsonis, 2017).

1.2.18 Proceso de la teledetección

La tecnología de los sensores ha avanzado de tal forma que ahora también se pueden sensores que captan imagen de rangos del espectro electromagnético que son invisibles al ojo humano y a la fotografía clásica como los infrarrojos térmicos, los infrarrojos medios y las microondas. Esta situación permite un notable incremento en la observación y análisis del territorio, ya que se pueden detectar cambios en las temperaturas superficiales, la humedad del suelo, la cobertura vegetal y otros indicadores biofísicos que no pueden ser captados mediante los métodos ópticos convencionales (Uriós, 1997). En los últimos años, todo lo que integra la teledetección ha mejorado en sus componentes junto a su tecnología. Ha habido un avance significativo en cuanto al número, tiempo de vida útil, óptica y electrónica ofrecida por los satélites. Igualmente, hay otras novedades respecto a la calidad óptica y espacial de otros sensores electrónicos o telescópicos. Una nueva adición a las tecnologías de análisis espacial, como sensores remotos activos, LiDAR y radar interferométrico, también han avanzado significativamente en el análisis espacial (Quirós, 2011).

Figura 9

Proceso de teledetección de cobertura de la tierra



Nota: La imagen detalla la muestra y el proceso de obtención de las diferentes imágenes satelitales para luego llevar a procesar como resultado un mapa.

- **Fuente de Energía:** Esta da inicio en el proceso de teledetección. La fuente de energía proporciona la “iluminación” que se requiere para el objetivo emitiendo una onda electromagnética. La fuente puede ser natural, como la radiación solar (en teledetección pasiva) o artificial, tal como es el caso de radares y sistemas LiDAR (en teledetección activa).
- **Atmósfera:** Existen diversas formas a través de las cuales la energía puede sufrir cambios durante el desplazamiento desde la fuente hasta el sensor, tales como absorción y dispersión. Estas pueden causar alteraciones a la señal original con fenómenos como refracción resultada en lo que se llama atmósfera.
- **Objetivo o Escena:** Los diferentes elementos (agua, vegetación, edificación) dentro de esta porción tienen comportamiento diferente lo que les permite reflejar o absorber electromagnetismo en función a sus características pudiese ser físicas o químicas e incluso ambas. Estas energías constituyen ahora objetos básicos junto a otros que forman una escena competitiva subyacente donde interactúan.
- **Sensor:** Se encuentran a bordo de satélites, aviones y drones. Son portadores aptos con capacidad receptora para realizar un trabajo específico

mediante la captura del objeto espectral en diferentes bandas, incluso clasificando y diferenciando entre los fenómenos o objetos.

- **Estación de Recepción:** Es el lugar donde se recibe la información enviada por el sensor. Dispone de sistemas de hardware y software que acopian, almacenan, clasifican y organizan la información en formatos adecuados para su análisis posterior.
- **Procesamiento:** En esta estación, los datos recibidos son procesados a imágenes digitales interpretables. El procesamiento incluye: correcciones geométricas y radiométricas, bandas generadoras, análisis espectral y clasificación temática.
- **Solución de Problemas:** Al procesar una imagen, estas pueden ser utilizadas para identificar las causas de un fenómeno, diagnosticar problemas, proponer soluciones, modelar escenarios, etc. Así la teledetección sirve para facilitar el proceso de toma de decisiones fundamentales en la gestión ambiental, la agricultura, la planeación urbana, la gestión de riesgos, etc.

1.2.19 Tipos de teledetección

Hay tres tipos principales de resolución de satélites: espectral, temporal y espacial. En cuanto a la resolución espectral, se refiere al número de bandas en el espectro electromagnético que un sensor puede capturar, lo que permite diferenciar varios tipos de cobertura o materiales. La resolución temporal indica con qué frecuencia un área determinada es imágenes por el satélite. Por su parte, la resolución espacial mide el nivel de detalle capturado por el sensor expresado en tamaño de pixel; píxeles más pequeños se traducen en imágenes más detalladas (Moyota, 2015)

Tabla 2

Tipos de imágenes satelitales

Tipo de Imagen	Características Principales	Usos Principales
Visible	Espectro visible (RGB), solo de día, fácil interpretación	Meteorología, monitoreo de nubes y vegetación, interpretación visual básica
Infrarroja	Espectro infrarrojo, operativa día y noche, sensible a temperatura	Análisis de temperatura superficial, salud de vegetación, detección de nubes

Tipo de Imagen	Características Principales	Usos Principales
Vapor de Agua	Sensible a la humedad atmosférica en capas medias-altas	Meteorología, análisis de humedad atmosférica, pronóstico del tiempo
Pancromática	Blanco y negro, alta resolución espacial, amplio rango espectral	Análisis detallado, cartografía base, fusión con imágenes multiespectrales
Multiespectral	Múltiples bandas espectrales, análisis temático cuantitativo	Agricultura, medio ambiente, clasificación de cobertura terrestre, estudios de vegetación

Nota: Clasificaciones de Imágenes de Satélite. Esta tabla captura varias clasificaciones diferentes de imágenes satelitales, sus características principales y sus usos primarios. Estos diferentes tipos de imágenes varían desde las imágenes visibles e infrarrojas.

1.2.20 Satélites para teledetección

En este momento, son modernos satélites en órbita que tienen como objetivo monitorear el medio ambiente global y los recursos naturales (Gonzales, 2024).

Tabla 3

Satélites para teledetección

Satélite	Agencia / País	Tipo de Sensor	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Temporal	Usos Comunes
Landsat 8/9	NASA / USGS (EE.UU.)	Óptico multiespectral + térmico	15 m (PAN) 30 m (MS) 100 m (TIR)	11 bandas	16 días	Monitoreo ambiental, uso del suelo, agricultura, agua
Sentinel-2A/B	ESA (Europa)	Óptico multiespectral	10–20–60 m (según banda)	13 bandas	5 días (con ambos satélites)	Vegetación, cuerpos de agua, desastres, agricultura
MODIS (Terra/Aqua)	NASA (EE.UU.)	Óptico multiespectral	250 m – 1 km	36 bandas	1–2 días	Clima, cobertura terrestre, incendios, variabilidad estacional
PeruSat-1	CONIDA (Perú)	Óptico pancromático y	0.7 m (PAN)	4 bandas (MS)	1 a 3 días	Cartografía detallada, monitoreo de

Satélite	Agencia / País	Tipo de Sensor	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Temporal	Usos Comunes
		multiespectral	2.8 m (MS)			recursos, seguridad nacional
PlanetScope	Planet Labs (Privado, EE.UU.)	Óptico multiespectral	3–5 m	4 bandas (RGB + NIR)	Diaria	Agricultura, silvicultura, infraestructura, monitoreo urbano
Sentinel-1A/B	ESA (Europa)	Radar (SAR - C banda)	5–20 m (según modo)	N/A (no espectral, radar)	6–12 días	Inundaciones, desplazamientos, estructura del suelo, humedad
ALOS-2 (PALSA R)	JAXA (Japón)	Radar (SAR - L banda)	3–100 m	N/A (radar)	14 días aprox.	Geodinámica, deslizamientos, humedad del suelo

Nota: Esta tabla muestra varios satélites que se especializan en teledetección junto con sus respectivos operadores o países patrocinadores, tipo de sensor, resoluciones espacial, espectral y temporal, y el uso común específico de cada satélite.

Sentinel - 2

Forma parte de los nuevos satélites de la ESA, y S2 ofrece 13 bandas que proporcionan imágenes de alta calidad en términos radiométricos y con una resolución espacial excelente (10 y 20 m), muy útil para clasificación (Borrás et al., 2017). Sentinel-2A fue lanzado el 23 de junio de 2015, mientras que su gemelo, Sentinel-2B, fue lanzado en marzo de 2017, ambos desde el puerto espacial europeo en Kourou, Guayana Francesa. Estos satélites son parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), cuyo principal propósito es proporcionar datos de observación de la Tierra de alta resolución para el monitoreo ambiental y la gestión sostenible de los recursos naturales. Los Sentinel-2 están equipados con un sensor multispectral (MSI) que captura imágenes en 13 bandas del espectro electromagnético. Cada Sentinel-2 puede evaluar en gran detalle la vegetación viva, el agua, el suelo y las áreas urbanas. La alta resolución espacial del sensor (de 10 a 60 metros) y la frecuencia de revisita combinada de los satélites de cinco días (HelpGIS, s. f.).

Tabla 4*Satélites para teledetección de imágenes Sentinel*

Satélite	Lanzamiento	Tipo de Sensor	Resolución Espacial	Aplicaciones Principales
Sentinel-1 A/B	2014 / 2016	Radar (activo, SAR)	5–20 m	Inundaciones, deslizamientos, estructura del suelo, monitoreo todo clima
Sentinel-2 A/B	2015 / 2017	Óptico (pasivo)	10 m (RGB/NIR) 20 m (SWIR) 60 m (aerosoles)	Agricultura, vegetación, agua, uso del suelo, incendios forestales
Sentinel-3 A/B	2016 / 2018	Óptico + altímetro	300 m – 1.2 km	Temperatura del mar, color oceánico, energía terrestre, altimetría
Sentinel-4	Desde 2024 (con MTG)	Atmosférico	5–10 km	Monitoreo de calidad del aire y gases traza
Sentinel-5P	2017	Atmosférico	7 x 3.5 km	Contaminación atmosférica, ozono, NO ₂ , metano
Sentinel-6	2020	Radar altimétrico	300 m	Medición del nivel del mar y cambio climático

Nota: Los satélites Sentinel tienen varios espacios, sensores y resoluciones, como se destaca en la tabla anterior, junto con su uso en diversos campos. Aparte de los satélites Sentinel-1A/B.

1.2.21 Estudio de bofedales por teledetección

La teledetección proporciona la posibilidad de realizar un monitoreo más exhaustivo y permanente de los bofedales, simplificando la elaboración de mapas e inventarios a un nivel semidetallado. El análisis multiespectral junto con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite, en comparación con el trabajo de campo o la fotointerpretación, detectar cambios en la vegetación, humedad del suelo, temperatura y elementos orgánicos (Torrejón, 2023; Uriós, 1997). Así mismo, es posible identificar cambios fundamentales tales como NDVI, expansión urbana, deforestación y contaminación por desechos hídricos (Veneros et al., 2020). Jara (2022) añade que esta tecnología hace posible “el seguimiento de alteraciones

topográficas, control hidrológico, calidad del agua y el estudio sobre biodiversidad en bofedales”.

1.2.22 Aplicación de índices

En teledetección, el uso de índices de vegetación es una de las técnicas más importantes para analizar la cobertura vegetal utilizando imágenes de satélite. Un índice de vegetación (IV) puede definirse como un parámetro obtenido a partir de mediciones de reflectividad en diferentes bandas espectrales que busca proporcionar información relacionada con la vegetación mientras minimiza la influencia de las perturbaciones del suelo y del clima (Gilabert et al., 1997). Estos índices se calculan mediante operaciones matemáticas en dos o más bandas espectrales, principalmente la banda roja y la banda del infrarrojo cercano. La diferencia espectral entre ambas es significativa en áreas vegetadas porque hay una fuerte absorción en la luz roja y una reflexión significativa en el infrarrojo cercano. En contraste, para superficies no vegetadas como suelos desnudos, esta diferencia es mínima (Flores, 2017).

Tabla 5

Índices de teledetección para sentinel-2

Índice	Fórmula	Bandas de Sentinel-2	Aplicaciones
NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)	$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$	Banda 8 (NIR) y Banda 4 (Rojo)	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo de la salud y densidad de la vegetación. - Evaluación de la actividad fotosintética. - Monitoreo de la cobertura vegetal y el cambio en el uso del suelo. - Evaluación del contenido de agua en la vegetación y el suelo.
NDII (Índice de Inundación por Diferencia Normalizada)	$NDII = \frac{(B8 - B11)}{(B8 + B11)}$	Banda 8 (NIR) y Banda 11 (SWIR)	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de áreas afectadas por inundaciones. - Monitoreo de la salud de los cultivos y análisis de estrés hídrico.

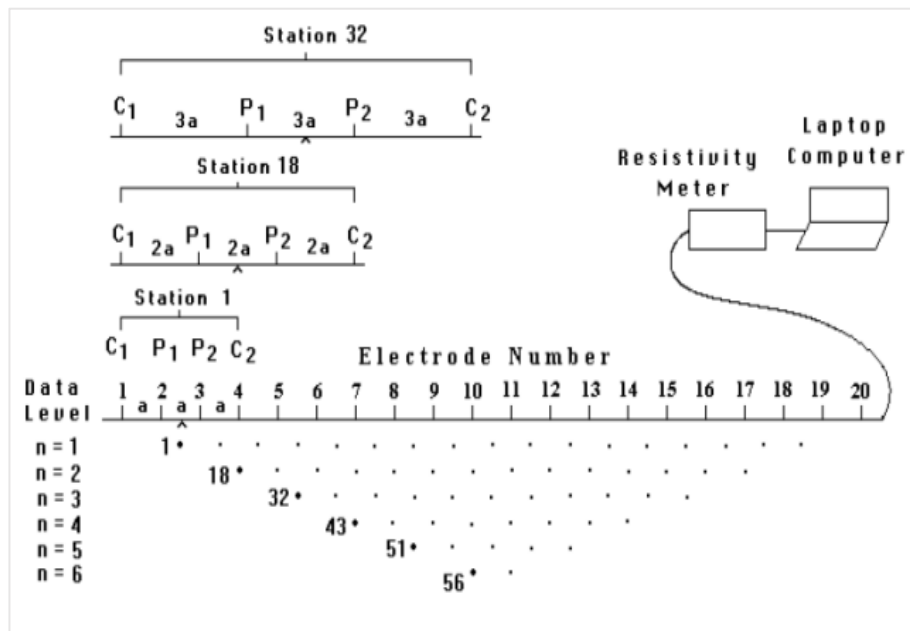
Nota: El Índice de Teledetección es un componente crítico del monitoreo satelital, ya que puede analizar y separar varios tipos de vegetación y monitorear inundaciones, el estado de la vegetación y el nivel de estrés hídrico en la agricultura y entornos extremos. Fuente: (Mamani, 2024).

1.2.23 Tomografía eléctrica (ERT)

La Tomografía Eléctrica (ERT) en inglés es una técnica multielectrodo de resistividad que forma modelos bidimensionales y tridimensionales de la resistividad del suelo. Este método de investigación del subsuelo es bastante frecuente en enfoques interdisciplinarios: geología, geotecnia, hidrogeología y estudios ecológicos (Quintanilla, 2013). Para obtener mediciones de resistividad, se inyecta directamente una corriente en el suelo a través de los electrodos de corriente C1 y C2, y se mide la corriente y la diferencia de potencial en los electrodos de potencial P1 y P2. El valor de resistividad calculado por este método se denomina resistividad aparente, ya que es la resistividad que se observa en la superficie mediante la aplicación de técnicas de resistividad eléctrica de corriente continua en superficie, y tiene alguna relación con la verdadera resistividad a mayores profundidades (Córdova, 2024).

Figura 10

Método mide la resistividad



Nota: Diagrama utilizando la colocación de electrodos de (C1, C2, P1, P2) en varias ubicaciones (Estación 1, Estación 18, Estación 32) y sus respectivos enlaces al instrumento de medición de resistividad, resultando en la obtención de información relacionada con la resistividad del suelo.

1.2.24 Aplicaciones generales de ERT

Un conjunto de cuatro casos ilustra la aplicación de la tomografía eléctrica para mostrar su eficiencia en diferentes problemas de geología de ingeniería en varios contextos geológicos. Su valor depende de una serie de parámetros, por lo que la planificación es clave para definir adecuadamente el problema y seleccionar el conjunto correcto de instrumentos. Todo el procedimiento, especialmente la

adquisición y la interpretación de los datos en cuestión, debe ser gestionado por profesionales calificados (Quispe, 2021).

ERT tiene diferentes usos prácticos, especialmente en geingeniería, hidrología e ingeniería ambiental.

- Investigación de recursos hídricos: Se utiliza para localizar y caracterizar acuíferos, evaluando su tamaño, distribución y calidad, lo cual es vital en la gestión del suministro de agua y el riego agrícola.
- Geingeniería: ERT se utiliza para estudiar la estructura del suelo antes de excavaciones, cimentaciones o movimientos de tierra para infraestructura, detectando posibles zonas inestables.
- Estudios ambientales: En ingeniería ambiental, el método se utiliza para identificar sitios contaminados y para evaluar la efectividad de las intervenciones realizadas.
- Localización de fallas y fracturas geológicas: En ingeniería civil, ERT ayuda a encontrar y evaluar fallas, fracturas o zonas débiles en el suelo que puedan afectar la estabilidad de las estructuras como puentes y represas.

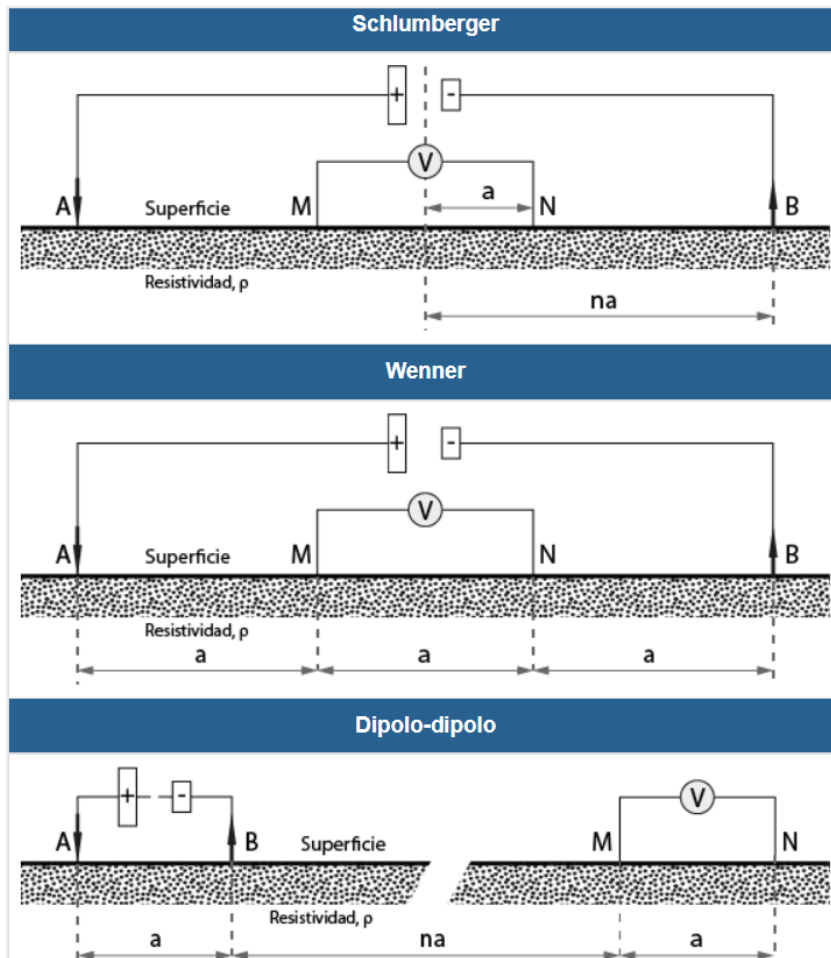
1.2.25 Métodos y técnicas de medición

Según Córdova (2024) “Las diferentes disposiciones y configuraciones de campo para instalar electrodos en estudios geofísicos pueden cambiar de acuerdo con el objetivo del levantamiento, la investigación a la profundidad, y las condiciones del terreno”. Las más comúnmente utilizadas son las configuraciones Wenner, Schlumberger, Dipolo–Dipolo y Polo–Dipolo, cada una con sus ventajas y limitaciones particulares:

- Configuración Wenner: En esta disposición, los electrodos se colocan en una línea recta, igualmente espaciados entre sí. Es una de las más comunes debido a su facilidad de uso y los resultados que proporciona.
- Configuración Schlumberger: Similar a la disposición Wenner, pero con una mayor distancia entre los electrodos de corriente, lo que permite una mayor profundidad de penetración.
- Configuración Dipolo-Dipolo: Esta configuración se utiliza mejor para obtener perfiles más profundos de resistividad para mayor detalle. Esta configuración se utiliza en estudios más avanzados y complejos donde se requiere alta resolución lateral.

Figura 11

Método y técnicas de medición



Nota: La imagen exhibe tres configuraciones de electrodos utilizados en tomografía eléctrica: el método Schlumbergere, Wenner y Dipolo-Dipolo.

1.2.26 Equipos a utilizar en ETR

El procedimiento de resistividad y tomografía eléctrica (ERT) es una aplicación de adquisición de datos de resistividad y requiere ciertos sistemas tomográficos. Algunos de los equipos básicos utilizados en tales estudios incluyen esto según (Quispe, 2021):

Electrodos

- Electrodo de corriente: Inicia la aplicación de corriente en el suelo. Estos sistemas suelen estar en pares (C1 y C2).
- Electrodo de potencial: Mide la caída de voltaje como resultado de la aplicación de corriente. También suelen estar en pares (P1 y P2). Los electrodos se colocan transversalmente a lo largo de la línea de investigación. Su disposición depende del tipo de geometría utilizada (Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo).

Generador de Corriente

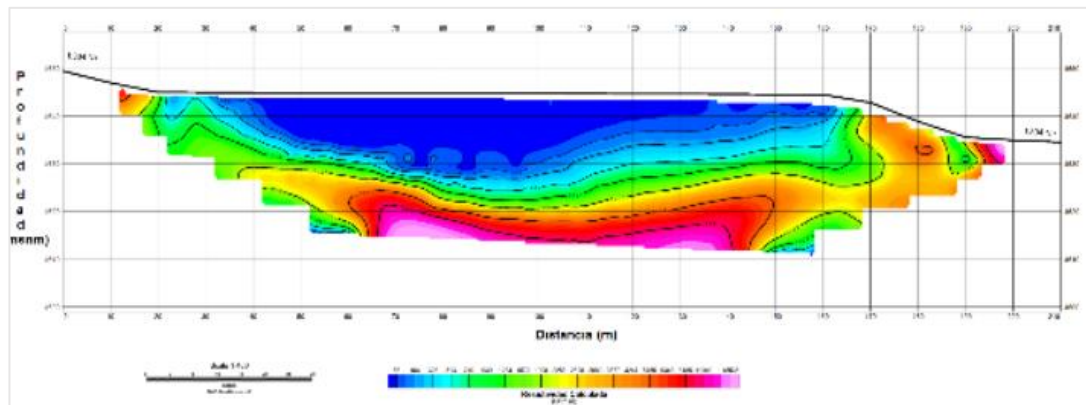
- Generador de Corriente: el instrumento que se utiliza para proporcionar a los electrodos de corriente la corriente eléctrica que se requiere inyectar en el suelo. Este dispositivo garantiza que se mantenga un flujo constante de corriente a lo largo de los medidores.
- Fuente de corriente constante: Controla la corriente que se inyecta en el suelo con el propósito de hacer que las mediciones sean más precisas.

1.2.27 Perfil de resistividad

Es una técnica en prospección física que tiene como objetivo determinar la distribución real de resistividad en el subsuelo de un área determinada mediante la realización de multitud de mediciones de potencial en la superficie debido a la inyección de corrientes eléctricas directas (Mollocco, 2023). Este enfoque multielectrodo es capaz de producir imágenes subsuperficiales bidimensionales e incluso tridimensionales (Córdova, 2024).

Figura 12

Perfil característico de resistividades invertidas



Nota: El subsuelo resistivo en la imagen se mantuvo en un plano el cual corresponde a un perfil, caracterizándose por la distribución de las resistividades en función de la distancia horizontal, (Mollocco, 2023).

Tabla 6

Rango de resistividad según tipo de suelo

Descripción	Margen de valores ($\Omega \cdot m$)	Valor medio ($\Omega \cdot m$)
Terreno pantanoso	2–50	30
Barro mezclado con paja	2–200	40
Terreno fangoso y arcilloso, humus	20–260	100

Arena y terreno arenoso	50–3000	200 (húmedos)
Turba	≥ 1200	1000 (húmedo)
Grava (húmeda)	50–3000	2000
Terreno pedregoso y rocoso	100–8000	2000

Nota: La Tabla 19 ilustra los rangos típicos de resistividad eléctrica en relación con los tipos de suelo. Los valores de resistividad bajos son indicativos de suelos húmedos o suelos ricos en materia orgánica, mientras que los valores altos son indicativos de suelos secos, pedregosos o rocosos (Mollocco, 2023).

CAPÍTULO II

MATERIAL Y MÉTODOS

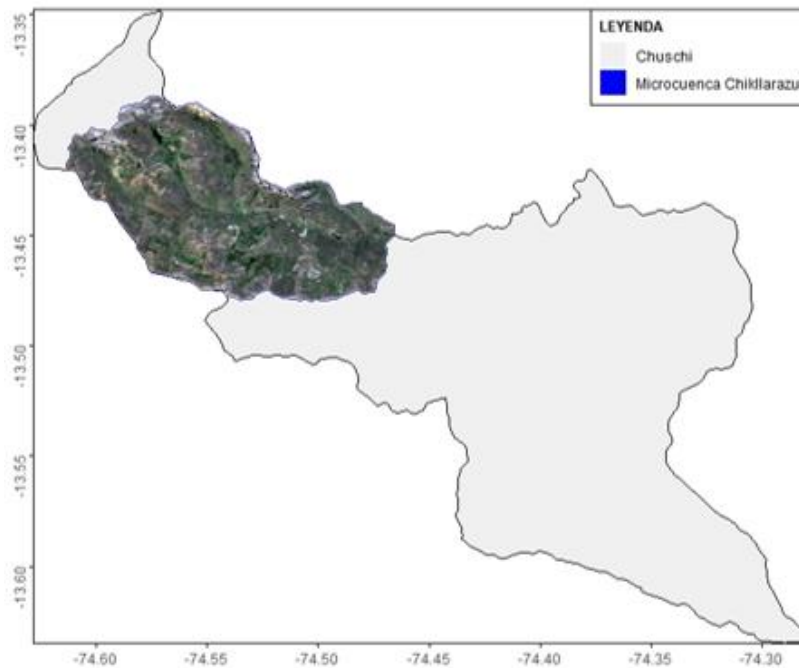
2.1 Aspectos generales del proyecto

2.1.1 Zona de estudio

La investigación se desarrolló en la microcuenca de Chikllarazu ubicada en el distrito de Chuschi, provincia de Cangallo, departamento de Ayacucho, en la región de puna a una altitud de 4,417 msnm. Las coordenadas UTM son 546452.35 m E y 8517606.49 m S. El área de estudio consiste en las comunidades de Yanacocha, Yupana, Lircona, Jaujalla, Pampahuasi, Waccracocha, Pucruhuasi, Chaquiccocha y Waracco, todas ubicadas en el distrito de Chuschi sobre un área de 96 km².

Figura 13

Mapa de zona de estudio del proyecto



2.1.2 Ubicación política.

Región : Ayacucho.
Provincia : Cangallo
Distrito : Chuschi
Localidad : Chuschi

2.1.3 Ubicación geográfica

Sur : 8517606.49 m S
Este : 546452.35 m E
Altitud : 4417 msnm (promedio)

2.1.4 Límites

Tabla 7

Límite del distrito de Chuschi

Dirección	Límite	Dirección	Límite
Norte	Vinchos	Este	María Parada de Bellido
Sur	Sarhua	Oeste	Totos y Paras

Nota: Límites políticos del distrito de Chuschi, adaptado, Fuente: (Municipalidad Distrital de Chuschi, 2019).

Figura 14

Mapa departamental del proyecto



Figura 15

Mapa provincial del proyecto

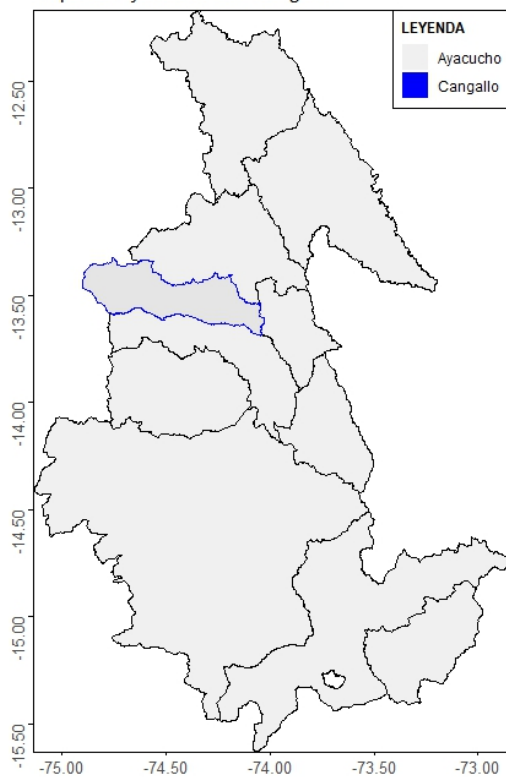


Figura 16

Mapa distrital del proyecto

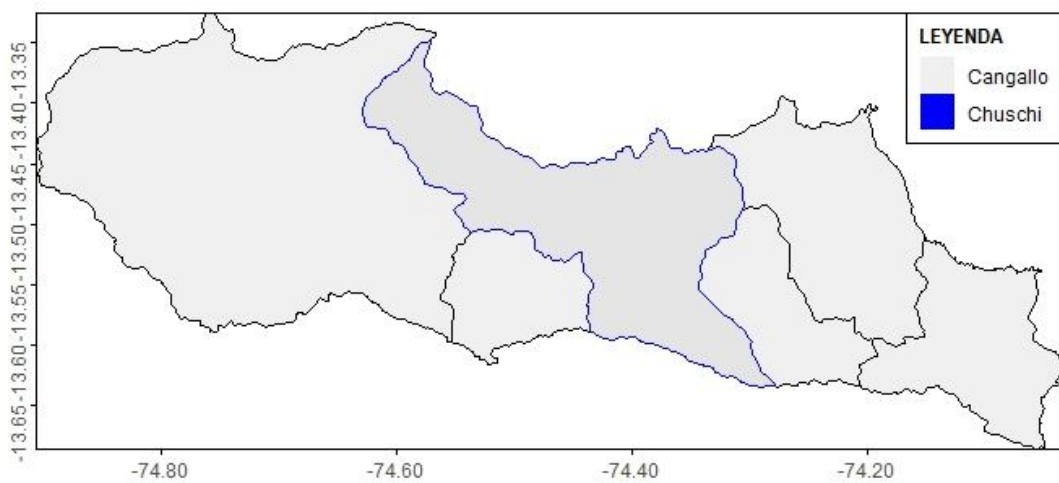
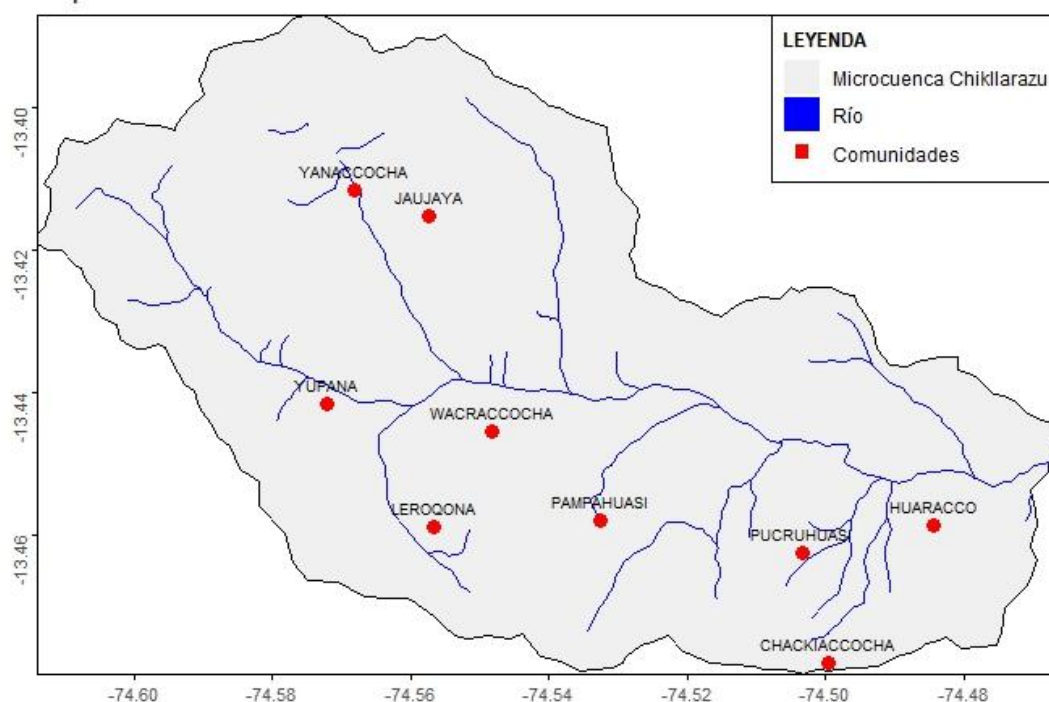


Figura 17

Mapa de intervención del proyecto



2.1.5 Vías de acceso

Tabla 8

Vías de acceso de la microcuenca Chikllarazu

Ruta	Distancia	Tiempo	Estado
Huamanga – Chuschi	110 km	3.30 hr	Asfaltado
Chuschi - Chikllarazu	25 km	1.30 hr	trocha
Total	125 km	5 hr	

Nota: Esta tabla muestra la distancia, tiempo estimado de viaje y el estado del pavimento de la ruta entre Huamanga y Chuschi. Los datos son aproximados y corresponden a un recorrido de 5 km. Fuente: MTC

2.1.6 Clima de la microcuenca Chikllarazu

La microcuenca Chikllarazu, ubicada en el distrito de Chuschi, provincia de Cangallo, en la región Ayacucho, tiene un clima característico de las zonas altoandinas del Perú. Durante el día, las temperaturas varían entre 15°C y 20°C, mientras que por la noche pueden descender a 0°C o incluso menos, especialmente en la temporada seca. Las lluvias se concentran entre noviembre y abril, siendo más intensas de diciembre a marzo, mientras que la temporada seca, de mayo a octubre, se caracteriza por días soleados y noches frías. La humedad relativa aumenta en la

época de lluvias, y los vientos, generalmente moderados, pueden intensificarse en las zonas más altas. Debido a la altitud y los cambios térmicos, es común experimentar variaciones bruscas de temperatura entre el día y la noche (Najarro, 2020).

2.1.7 Topografía de la microcuenca Chikllarazu

2.1.7.1 Tipos de suelos: Los Regosoles y los afloramientos líticos. Estos suelos son típicos de las zonas altoandinas, donde el relieve montañoso y las condiciones climáticas generan terrenos poco desarrollados. Los Regosoles, al ser suelos jóvenes, poseen baja cantidad de materia orgánica, lo que puede limitar su uso agrícola. En cambio, los afloramientos líticos, con áreas de roca expuesta, presentan una cobertura edáfica muy reducida.

2.1.7.2 Altitud. La microcuenca Chikllarazu presenta un típico ecosistema micrográfico y de alta montaña andina, con una altitud que varía entre 3963 y 4763 m s. n. m. y una altitud media de 4495.74 m s. n. m. La mayor parte de su superficie, más del 70% del total, se localiza en las altitudes medias, entre 4183 y 4583 m s. n. m., y se caracteriza por la predominancia de pastizales naturales, bofedales y un extenso uso agropecuario de la tierra.

Tabla 9

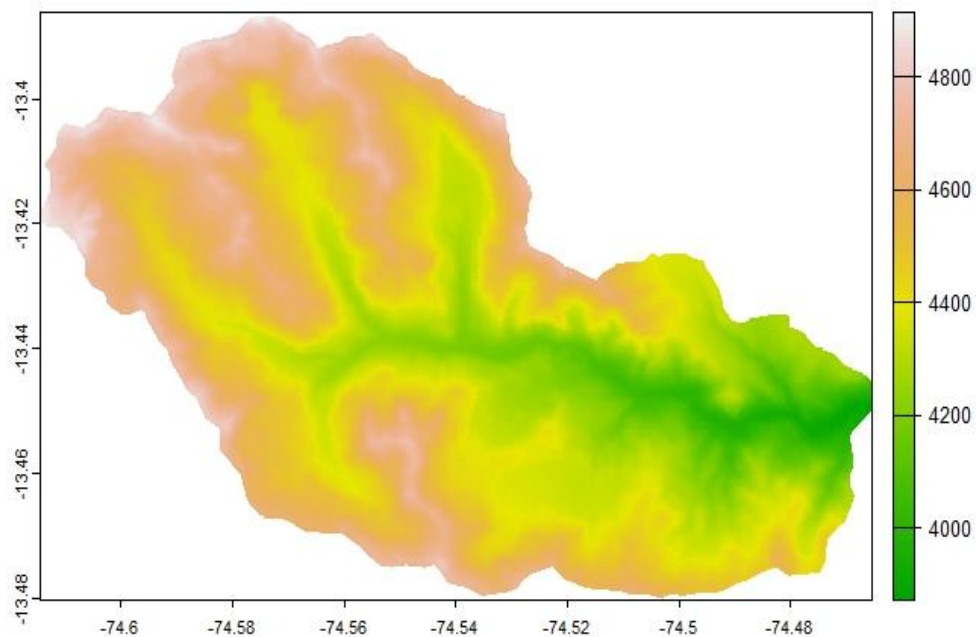
Topografía de la microcuenca Chikllarazu

Cota		Promedio	Área Parcial (km ²)
Mínima	Máxima		
3963	4148	4055.5	2.7882
4149	4260	4204.5	4.9212
4261	4345	4303.0	7.8903
4346	4423	4384.5	13.2723
4424	4500	4462.0	14.9706
4501	4582	4541.5	13.8141
4583	4668	4625.5	12.5514
4669	4762	4715.5	10.0971
4763	4948	4855.5	5.0841

Nota: Esta tabla muestra la distribución de topografía de la microcuenca Chikllarazu.

Figura 18

Mapa topográfico de la microcuenca Chikllarazu

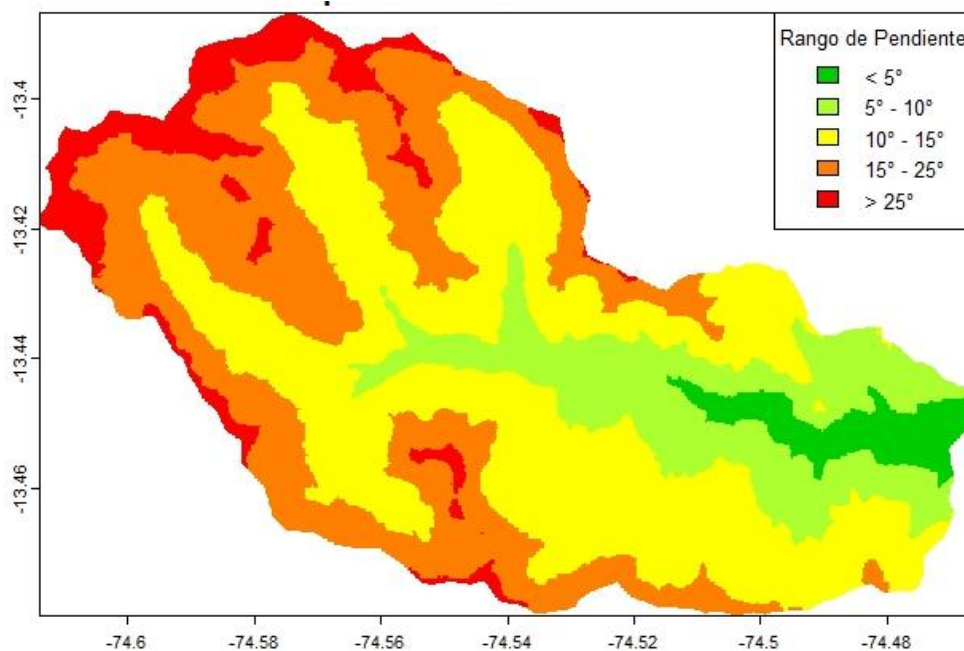


Nota: Figura de la topografía de la microcuenca Chikllarazu con contornos topográficos y gradaciones de altitud.

2.1.7.3 Pendiente. La pendiente de la microcuenca Chikllarazu, según el análisis mostrado, varía entre valores mínimos 0° a $>25^\circ$.

Figura 19

Mapa de pendiente de la microcuenca Chikllarazu



Nota: Pendiente de la microcuenca Chikllarazu, clasificada según grado.

2.1.8 Parámetros fisiográficos de la microcuenca Chikllarazu

2.1.8.1 Área de la microcuenca. El área total de la microcuenca es de 85.42 km² define la extensión geográfica que comprende el sistema hídrico en análisis, a cubrir tanto las zonas de captación como las de drenaje. Este dato es esencial para comprender la capacidad de retención de agua y las dinámicas de escorrentía que ocurren dentro de la microcuenca.

2.1.8.2 Perímetro. El perímetro de la microcuenca, que alcanza los 54,46 km, representa la longitud total de su contorno. Este dato es fundamental para calcular diversos parámetros morfométricos, como el coeficiente de compactación y el radio de circularidad, los cuales aportan información clave sobre la forma y las características.

2.1.8.3 Forma de microcuenca. La cuenca tiene una configuración alargada y ligeramente ensanchada, de acuerdo con los rangos establecidos en estudios de priorización de cuencas. Esta característica influye significativamente en su dinámica hidrológica, ya que las cuencas alargadas suelen tener tiempos de respuesta más prolongados. Esto puede ser una ventaja al actuar como un regulador natural, distribuyendo de manera más gradual la descarga de agua durante eventos de lluvias intensas, reduciendo así el riesgo de inundaciones repentinas. Coordenadas del centroide. Las coordenadas centroidales, con valores de Este X: 548908.94 y Norte Y: 851429.81, indican el punto promedio de ubicación geográfica de la microcuenca.

2.2 Materiales y equipos

2.2.1 Materiales y equipos en campo

- Wincha 100m
- Flexómetro 5m
- Libreta de campo
- Pizarra
- Estacas y cuerdas
- Calculadora científica
- Casco
- Chaleco
- Guantes
- Equipos de Tomografía Eléctrica
- GPS Diferencial SOUTH Galaxy G7
- Dron Rg106

- Yeso

2.2.2 Materiales y equipos en oficina

- Laptop Corel i5, 16 GB Ram
- Impresora multifunción
- Papel bond A4 y A3
- Lapiceros

2.2.3 Programas de ingeniería

- Microsoft Office
- AutoCAD Civil 3D 2020
- ArcGIS 10.8.0
- ArcGIS Pro
- Google Earth
- Google Earth Engine
- RStudio

2.3 Metodología

2.3.1 Método de investigación

Método de investigación es el procedimiento metódico y estructurado para abordar un reto o tema de investigación el tema, la determinación del tema de investigación, la recopilación y el análisis de datos, y la presentación de conclusiones y sugerencias son componentes de una metodología de investigación, presentación de conclusiones y sugerencias (Medina et al., 2023).

Para el estudio del rol de los bofedales en la recarga hídrica de la microcuenca Chikllarazu, se implementó un análisis de tipo cuantitativo. Se utilizaron imágenes satelitales Sentinel las cuales se procesaron mediante la elaboración de los índices de vegetación y humedad, entre ellos el NDVI y el NDII. Gracias a estos indicadores se registraron cambios en la cobertura vegetal y el contenido de humedad de los bofedales a lo largo del tiempo, que resulta información fundamental para cuantificar la dinámica e importancia hidrográfica de los bofedales.

2.3.2 Tipo de investigación

Las investigaciones explicativas tienen como objetivo alcanzar un análisis profundo y un alto nivel de abstracción, lo que permite generar teorías y comprender relaciones de causa y efecto, así como interacciones y significados entre diferentes fenómenos.

Para lograr este nivel de complejidad, es fundamental contar con estudios exploratorios y descriptivos previos (Martínez, 2013). Se centran en reconocer y describir las características y atributos de fenómenos, personas o grupos, con el objetivo de ofrecer una visión detallada y fundamentada a partir de la información recopilada (Hernández et al., 2010).

Con esto, el estudio se define como investigación explicativa. Este tipo de investigación se centra en determinar y estudiar las relaciones de causa y efecto sobre la capacidad de los bofedales en la recarga hídrica. Su objetivo principal fue entender cómo estos ecosistemas impactan el almacenamiento y la regulación del agua, ofreciendo así una comprensión clara y profunda sobre el rol de los bofedales en la regulación de los sistemas hídricos altoandinos y su equilibrio.

2.3.3 Nivel de investigación

En cuanto a los tipos de estudio, existen varios modelos y clasificaciones basados en el grado, el diseño y el objetivo. Pero todos son tipos de investigación, y como no se excluyen mutuamente, un estudio puede incluirse en más de una clase», independientemente de cómo se clasifiquen (Gallardo, 2017). Además, tiene por objeto definir los rasgos, atributos y perfiles de individuos, comunidades, grupos, procesos, elementos o cualquier otra cosa que se estudie para determinar su comportamiento o estructura (Hernández et al., 2010).

El enfoque descriptivo tiene por objeto definir los rasgos, atributos y perfiles de individuos, comunidades, grupos, procesos, elementos o cualquier otra cosa que se estudie para determinar su comportamiento o estructura (Hernández et al., 2010). Para la tesis se orientó a identificar y analizar las características de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu. Esto incluye examinar su ubicación geográfica, extensión, tipo de vegetación y estado actual de conservación, con el objetivo de proporcionar una visión clara y detallada de estos ecosistemas. El enfoque correlacional busca analizar cómo se relacionan las características de los bofedales, como su extensión y cobertura vegetal, con su capacidad para contribuir a la recarga hídrica en la microcuenca. Este análisis permite entender de qué manera estos factores influyen en el balance hídrico y la sostenibilidad del ecosistema.

2.3.4 Diseño de investigación

El diseño de investigación es una pieza clave para lograr los objetivos de cualquier estudio. Se entiende como una guía estructurada que permite contrastar hechos con

teorías de manera efectiva, funcionando como un plan general que organiza y dirige todas las etapas necesarias para desarrollar la investigación de forma ordenada y coherente (Sabino, 2007).

Los estudios longitudinales recopilan información en varios momentos a lo largo del tiempo, lo que permite analizar cómo evoluciona un fenómeno o problema de investigación, identificando sus posibles causas y efectos de manera más detallada.

2.4 Técnicas e instrumentos

2.4.1 Técnicas

Para llevar a cabo este estudio se emplearon imágenes satelitales de Sentinel-2, utilizadas, con una resolución espacial de 10 metros, en la delimitación y en el monitoreo de los bofedales. Se realizó un análisis multitemporal de 2016 a 2025, el cual se centró en la época más seca, delimitada entre los meses de agosto y septiembre. Esto le permitió, entre otros, evaluar la variación de los bofedales en el transcurso de los años. Se integró, además, el método de Tomografía Eléctrica (ERT) y el índice NDII en 2023 con el propósito de correlacionar las áreas húmedas y las mediciones de humedad en el suelo, lo que permitió evaluar la capacidad de los bofedales para almacenar agua. También se utilizó la observación en campo para la recolección de datos y la validación del entrenamiento del modelo de clasificación.

2.4.2 Instrumentos

- Para la recolección de datos de campo utilizados en el entrenamiento del modelo, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).
- Para la gestión y análisis de los datos adquiridos, Microsoft Excel.
- Para el procesamiento de imágenes de satélite y análisis espacial de las áreas de bofedal, Google Earth Engine (GEE).
- Para el procesamiento de mapas y la producción de gráficos que ilustraron los resultados del análisis realizado, RStudio.
- Para la realización de análisis geoespaciales adicionales y la presentación de datos, ArcGIS.

2.5 La población y muestra del estudio de proyecto de ingeniería

2.5.1 Población

En esta investigación, resulta esencial identificar a la población como el conjunto de elementos o unidades que serán objeto de estudio, tomando en cuenta sus características particulares para garantizar resultados representativos. La población,

en este sentido, se comprende como un grupo completo sobre el cual se busca generalizar los hallazgos, destacándose por atributos específicos que diferencian a unos sujetos de otros. Este enfoque subraya la importancia de delimitar con precisión el grupo de interés para asegurar la relevancia y validez de los resultados obtenidos (Chávez, 2010). Lo cual incluye todos los bofedales situados de la microcuenca Chikllarazu, ubicada en el distrito de Chuschi, provincia de Cangallo, en la región de Ayacucho.

2.5.2 Muestra

Es una porción o subconjunto de la población o universo que será objeto del estudio. Para determinar la cantidad de los componentes de la muestra se utilizan fórmulas, lógica y otros métodos que se tratarán más adelante. La población está representada por la muestra (López, 2014).

Se seleccionó una muestra representativa de los bofedales mediante un muestreo no probabilístico intencional o muestreo por criterio, considerando aspectos como la accesibilidad al sitio, la extensión y el estado de conservación de estos ecosistemas. Este enfoque permitió garantizar que los bofedales estudiados representaran de manera adecuada las características y variabilidad presentes en el conjunto total de la microcuenca.

2.6 Procesamiento de la información

El procesamiento de la información es una etapa clave para analizar los datos obtenidos y transformarlos en resultados significativos. Este paso combina herramientas tecnológicas, análisis estadístico y validación de campo para cumplir con los objetivos del estudio.

2.6.1 Delimitar las áreas de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes satelitales.

a) Definir el área de estudio

La microcuenca Chikllarazu, ubicada en la región surandina del Perú, fue seleccionada como área de estudio por su importancia hídrica. Para su delimitación, se trazó un polígono geográfico en formato shapefile que se elaboró en ArcGIS. Este polígono se cargó en Google Earth Engine (GEE), como asset MICROCUENCA_CHIKLLARAZU, lo cual permitió el recorte de imágenes satelitales y el análisis exclusivo dentro de la microcuenca EPSG:4326 WGS 84 / UTM 18S.

b) Selección y descarga de imágenes satelitales

Para el análisis espacial, se utilizaron las imágenes del satélite Sentinel-2, específicamente de la colección llamada Sentinel-2 Reflectancia de Superficie (SR) que proporciona un producto procesado con corrección atmosférica adecuado para la investigación ambiental o el monitoreo del uso del suelo. Esta colección fue elegida por su resolución espacial de 10 metros, su frecuencia de revisita de 5 días y su disponibilidad en Google Earth Engine (GEE).

Las imágenes se filtraron teniendo en cuenta las dos estaciones climáticas más importantes que caracterizan la región andina del Perú:

- Época húmeda, correspondiente a los meses de noviembre a abril, donde se presentan mayores precipitaciones.
- Época seca, comprendida entre los meses de mayo a octubre, caracterizada por menor presencia de lluvias.

Se emplearon controles sistemáticos para asegurar la calidad de las imágenes satelitales empleadas en la investigación. Se eligieron las escenas donde la nubosidad no excediera el 20% y en enero y agosto para las estaciones húmedas y secas, respectivamente. Adicionalmente, las imágenes contaban con la resolución espacial de 10 metros, la cual permite el análisis de coberturas como bofedales, vegetación, y cuerpos de agua.

Tabla 10

Datos de las imágenes satelitales utilizadas en el análisis

Sensor	Plataforma	Fecha	Estación	Resolución Espacial (m)	Nubosidad (%)
Sentinel 2	Google Earth Engine	15/08/2025	Seca	10	< 20
Sentinel 2	Google Earth Engine	16/01/2025	Húmeda	10	< 20

Nota: La fuente principal fue el sensor Sentinel-2, procesado a través de Google Earth Engine y adquirido el 15 de agosto de 2025 (época seca) y el 16 de enero de 2025 (época húmeda).

c) Preprocesamiento

- Corrección radiométrica: en este trabajo se utilizaron imágenes que habían sido corregidas a reflejar correctamente la superficie (SR), lo que indica que los datos habían sido sometidos a un proceso de corrección radiométrica. Sin embargo, en este caso fue necesario asegurar que los valores se encontraran entre 0 y 1.

- Enmascaramiento de nubes y sombras: se realizó enmascaramiento de nubes y sombras, que es uno de los pasos más característicos que permiten reducir errores de un análisis de cobertura terrestre. En este caso, se tomó la banda de calidad QA60 del producto Sentinel-2, que contiene la información de los píxeles que han sido afectados por nubes o incluso sus sombras. Estos píxeles han sido descartados y, por lo tanto, asegurar la información procesada es bastante confiable.
- Recorte de imágenes: en este caso se procedió al recorte espacial de las imágenes usando la función clip() junto con el polígono vectorial de la microcuenca Chikllarazu. Con esto se puede restringir el análisis solamente al área de estudio, suprimiendo toda la influencia de las regiones adyacentes o externas que no deben considerarse.
- Composición: se realizaron composiciones temporales utilizando la mediana temporal por estación, dividiendo en épocas húmeda y seca. Este procedimiento facilitó la integración de varias imágenes en una imagen representativa, minimizando la interferencia de nubes residuales y otras anomalías que podrían alterar los valores espectrales. De esta manera, se consiguió una imagen más nítida y fiable para los procesos de clasificación y análisis de cobertura.

d) Cálculo del NDVI

Se llevó a cabo el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual es uno de los más utilizados en teledetección para evaluar la densidad, el estado y la vitalidad de la vegetación. Este índice es de una alta importancia, en los ecosistemas altoandinos, como en la microcuenca Chikllarazu, donde es necesario distinguir coberturas vegetales permanentes como los bofedales, de otras formas de vegetación más temporales o degradadas. El NDVI se obtiene de la proporción de la cantidad de radiación reflejada en el infrarrojo cercano (el cual es muy bien reflejado por la vegetación sana) y la del espectro rojo (que es absorbida por la clorofila). La fórmula que se emplea es la siguiente:

Definir rangos de NDVI para clases como:

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

- B8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR), que permite capturar el nivel de reflectancia en longitudes de onda asociadas con el vigor vegetal.
- B4 representa la banda del rojo (Red), sensible al nivel de absorción de la vegetación.

Los valores del NDVI oscilan entre -1 y +1. Los valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que valores cercanos a 0 o negativos indican escasa vegetación, presencia de suelo desnudo, agua o áreas degradadas (EOS DATA ANALYTICS, s. f.).

Tabla 11

Rango de clasificación de NDVI

Rango de NDVI	Interpretación
-1.0 a 0.0	Lagunas, Ríos
0.0 a 0.2	Suelo desnudo o vegetación muy escasa
0.2 a 0.4	Vegetación baja o dispersa
0.4 a 0.6	Bofedales
0.6 a 0.8	Vegetación densa y saludable

Nota: La tabla muestra el rango de valores de índice NDVI junto con una interpretación. Como se observa, este rango de valores ayuda a detectar diferentes coberturas del suelo, según (EOS DATA ANALYTICS, s. f.).

e) Clasificación supervisada con Random Forest

Para determinar los tipos de cobertura terrestre presentes en la microcuenca de Chikllarazu, se empleó una técnica de clasificación supervisada, específicamente el Algoritmo Random Forest, que es bien conocido por su alta precisión, estabilidad y eficiencia en el procesamiento de grandes volúmenes de datos satelitales y otros datos geoespaciales sin asumir una distribución estadística particular. Este enfoque permitió identificar las principales coberturas terrestres del área de estudio, incluyendo humedales, pasturas nativas, suelo desnudo, cuerpos de agua y tierras agrícolas en predominancia. La clasificación de imágenes satelitales se realizó en el entorno de Google Earth Engine (GEE), aprovechando el procesamiento en la nube de las imágenes satelitales Sentinel-2, cuya resolución temporal y espacial era de 10-20 m (Mamani, 2024).

Figura 20

Imagen tomada con dron en la microcuenca Chikllarazu



Nota: La figura muestra la imagen aérea obtenida mediante dron en la microcuenca Chikllarazu, utilizada como insumo de verificación y apoyo en la clasificación supervisada de coberturas.

Tabla 12

Levantamiento de coordenadas con equipo GNSS

Cód.	Coord E	Coord N	Clase	Descripción
1	8517570.25	546576.85	Bofedales	Bofedal permanente: humedal altoandino con vegetación higrófila (<i>Carex</i> , <i>Distichia</i>).
2	8517570.27	546576.85	Bofedales	Bofedal permanente: humedal altoandino con vegetación higrófila (<i>Carex</i> , <i>Distichia</i>).
3	8517612.61	546668.14	Bofedales	Bofedal estacional: cobertura higrófila con variación hídrica marcada.

4	8517706.47	546630.41	Bofedales	Bofedal estacional: pajonal húmedo con dominancia de <i>Plantago tubulosa</i> .
5	8517795.42	546589.67	Bofedales	Bofedal permanente: humedal encharcado con <i>Oxychloe andina</i> .
6	8518405.08	546042.15	Bofedales	Bofedal estacional: herbazal húmedo sujeto a inundación temporal.
7	8517142.11	546909.06	Bofedales	Bofedal estacional: pajonal herbáceo en área inundable.
8	8517045.48	546982.88	Bofedales	Bofedal estacional: cobertura vegetal higrófila con variación temporal.
9	8518428.52	546159.76	Bofedales	Bofedal permanente: humedal con herbazal encharcado (<i>Carex, Distichia</i>).
10	8518476.79	546083.1	Bofedales	Bofedal permanente: cobertura higrófila densa en humedal.
11	8517926.74	546480.7	Bofedales	Bofedal estacional: pajonal húmedo con variación hídrica.
12	8518020.6	546484.19	Bofedales	Bofedal permanente: cobertura higrófila constante (<i>Distichia, Oxychloe</i>).
13	8516905.89	546931.39	Bofedales	Bofedal estacional: herbazal húmedo sujeto a inundación parcial.
14	8516907.94	546901.82	Bofedales	Bofedal estacional: cobertura herbácea en depresión húmeda.
15	8517825.27	546576.01	Bofedales	Bofedal permanente: humedal con vegetación higrófila densa.
16	8517578.2	546646.91	Bofedales	Bofedal estacional: pajonal húmedo con variación estacional.
17	8518231.83	546302.83	Agua	Superficie hídrica (laguna)
18	8518227.51	546324.08	Agua	Superficie hídrica (laguna)

19	8518165.89	546417.8	Agua	Superficie hídrica (laguna)
20	8518137.71	546437.96	Agua	Superficie hídrica (laguna)
21	8517844.46	546545.47	Agua	Superficie hídrica (laguna)
22	8517076.09	546881.13	Agua	Superficie hídrica (río).
23	8517081.74	546896.14	Agua	Superficie hídrica (río).
24	8516576.48	546706.18	Vegetación dispersa	Cobertura vegetal rala (<40%).
25	8516947.16	547087.45	Vegetación dispersa	Cobertura vegetal rala (<40%).
26	8517610.7	546495.46	Vegetación densa	Pajonal altoandino con cobertura $\geq 60\%$.
27	8517975.64	546490.95	Vegetación densa	Pajonal higrófilo compacto.
28	8518083.13	546479.77	Vegetación densa	Pajonal herbáceo cerrado.
29	8518364.8	546022.99	Vegetación densa	Pajonal denso, cobertura continua.
30	8518408.72	545969.57	Vegetación densa	Pajonal higrófilo denso.
31	8516644.61	546687.72	Suelo desnudo	Área sin cobertura vegetal (relleno, calicata, suelo expuesto).
32	8516645.22	546690.08	Suelo desnudo	Área sin cobertura vegetal (suelo expuesto).
33	8516646.71	546686.66	Suelo desnudo	Roca
34	8516960.74	546865.59	Suelo desnudo	Área sin cobertura vegetal (relleno).
35	8517076.1	546881.15	Suelo desnudo	Calicata o ensayo de suelo.

Nota: Las coordenadas corresponden al sistema WGS 84 / UTM zona 18S realizadas in situ en la zona de estudio. La selección de los puntos se realizó en el campo y mediante verificación con imágenes de drones.

Clases de cobertura definidas:

- Agua
- Suelo desnudo
- Vegetación dispersa
- Vegetación densa

- Bofedales permanentes – bofedales estacionales

Figura 21

Trabajo de campo en la cabecera de la microcuenca



Nota: La imagen muestra el trabajo de campo realizado en la cabecera de la microcuenca de Chikllarazu, donde se recopilaron puntos de entrenamiento georreferenciados.

Entrenamiento del modelo:

- Los puntos de datos de entrenamiento para cada clase se recopilaron manualmente a través de FeatureCollection.
- Los datos se dividieron en un 80% para entrenamiento y un 20% para validación.
- Se entrenó un modelo de Bosques Aleatorios con 500 árboles de decisión (árboles = 500).

Aplicación de la clasificación:

La imagen fue clasificada por estación y se produjo un mapa temático con las 5 clases de uso del suelo.

f) Validación

Para evaluar la efectividad del modelo de clasificación supervisada Random Forest, se realizó una validación distinta para los períodos seco y húmedo, utilizando un conjunto de datos no involucrado en el entrenamiento. A partir de las matrices de confusión, se calcularon indicadores como la precisión general (OA), la precisión del

usuario (errores de comisión) y la precisión del productor (errores de omisión). Los resultados demostraron que ambas temporadas exhibieron un alto rendimiento, con ligeras variaciones por el cambio estacional en la cobertura (vegetación y cuerpos de agua). En general, el modelo mostró un fuerte poder discriminatorio entre clases, confirmando su utilidad para el análisis multitemporal en la microcuenca de Chikllarazu.

2.6.1.1 Matriz de confusión. La matriz de confusión compara las predicciones con los datos reales y permite identificar errores de omisión y de comisión. También, su configuración permite calcular la precisión total del modelo, siendo así un indicador contundente y un indicador del modelo (Mamani, 2024). La norma ISO 19157 reconoce la matriz de confusión como un mecanismo estándar para evaluar y presentar la calidad temática de los productos geográficos, incluidos los derivados de clasificaciones de imágenes (Ariza et al., 2018).

2.6.1.2 Índice Kappa. El índice Kappa determina la exactitud de un mapa considerando todos los valores presentes en la matriz de confusión y no solo aquellos que corresponden a la diagonal principal (Mamani, 2024). El índice Kappa adopta valores comprendidos entre 0 y 1, donde una puntuación próxima a 1 refleja un alto nivel de concordancia entre las observaciones, mientras que valores cercanos a 0 evidencian un mayor grado de discrepancia. Este coeficiente considera tanto los errores de comisión como los de omisión en su estimación (MINAM, 2019a).

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Donde:

- P_o = proporción de observaciones correctamente clasificadas (exactitud global).
- P_e = proporción de coincidencias esperadas por azar.

Precisión Observada (P_o): Es la fracción de clasificaciones certeras en relación al total de clasificaciones ejecutadas. Se obtiene sumando los valores en la diagonal principal de la matriz de confusión y dividiendo por la cantidad total de clasificaciones.

$$P_o = \frac{\sum \text{Diagonal}}{\text{Total de clasificaciones}}$$

Precisión Esperada (P_e): Se pueden considerar los casos sin clasificaciones como clasificaciones al azar y, por lo tanto, la precisión que se esperaría llamaríamos

precisión esperada que se puede calcular con las sumas de las filas y las columnas. P_e se puede calcular de la forma siguiente.

$$P_e = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Suma de la fila}_i \times \text{Suma de la columna}_i}{\text{Total de clasificaciones}^2} \right)$$

La valoración del índice de kappa son los siguientes:

Tabla 13

Escalas de calificación para el índice Kappa

Índice Kappa	Fuerza de concordancia
0	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecta

Nota: Escala propuesta por Landis y Koch (1977), citado en Mamani (2024, p. 106).

g) Análisis espacial y cálculo de áreas

Se llevó a cabo un análisis espacial de las coberturas en la microcuenca Chikllarazu, con especial énfasis en los bofedales. Con RStudio y la librería terra, se obtuvo su extensión en hectáreas para la época húmeda (noviembre-abril) y la época seca (mayo-octubre). Los resultados evidenciaron un mayor incremento en la temporada húmeda y una notable reducción en la temporada seca, lo que refleja la estricta dependencia de estos ecosistemas al régimen climático e hídrico. Este análisis, los bofedales se pudieron monitorear y conservar, lo que contribuyó a las discrepancias de su dinámica estacional.

h) Generación de mapas y presentación

Se desarrollaron mapas para ambas temporadas climáticas (húmeda y seca) que ayudaron a comparar visualmente la extensión espacial y la variación estacional de los bofedales, ilustrando su dependencia de la disponibilidad de agua y las dinámicas ecológicas locales. Además, en el contexto de la divulgación científica, los mapas se incorporaron en los informes técnicos y se presentaron junto con otros resultados en

forma de gráficos, tablas y cuadros, sirviendo como una herramienta vital para el monitoreo, la conservación y la gestión sostenible de estos ecosistemas estratégicos.

2.6.2 Analizar la variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, observando cambios estacionales y anuales.

a) Definición del área de estudio

La microcuenca Chikllarazu, en la región surandina del Perú, fue seleccionada debido a su importancia socioecosistémica así como por su relevancia ecológica e hidrológica. La microcuenca alberga bofedales permanentes y estacionales que regulan y almacenan agua, así como sostienen la biodiversidad. Su delimitación se realizó con cartografía, MDE, validada en ArcGIS Pro, y el polígono resultante fue exportado a Google Earth Engine (GEE) como MICROCUENCA_CHIKLLARAZU. En el GEE, esto se utilizó como una máscara espacial para asegurar que el análisis se enmarcara dentro del área de enfoque.

b) Selección y descarga de imágenes satelitales

En relación a la variación espacial y temporal de la cobertura de los bofedales, se seleccionaron imágenes del sensor Sentinel-2 Surface Reflectance (S2_SR) por su resolución espacial de 10 metros, su frecuencia de adquisición de 5 días y la corrección atmosférica ya realizada, lo cual la hace más confiable para estudios de cambio de cobertura. Se identificaron dos períodos clave para capturar la dinámica estacional de los bofedales:

- Época seca: de mayo a octubre, caracterizada por precipitaciones escasas y descenso del nivel freático.

Para cada año se seleccionaron las imágenes con menor a 20% de nubosidad, usando en primer lugar el metadato CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE y posteriormente con un proceso de enmascarado. Se buscó que las fechas fueran lo más próximas a la estación (agosto-septiembre) para facilitar las comparaciones anuales. La información de las imágenes seleccionadas se organizó en una tabla que incluye: sensor, plataforma, fecha de adquisición, estación, resolución espacial y porcentaje de nubosidad. Esta estructura provee transparencia y permite la replicabilidad del estudio.

Tabla 14*Resumen de imágenes satelitales seleccionadas*

Año	Época	Sensor	Resolución Espacial (m)	Nubosidad (%)	Fecha
2025	Seca	Sentinel - 2	10	20	15/08/2025
2024	Seca	Sentinel - 2	10	20	10/08/2024
2023	Seca	Sentinel - 2	10	20	12/09/2023
2022	Seca	Sentinel - 2	10	20	01/09/2022
2021	Seca	Sentinel - 2	10	20	10/08/2021
2020	Seca	Sentinel - 2	10	20	25/08/2020
2019	Seca	Sentinel - 2	10	20	22/08/2019
2018	Seca	Sentinel - 2	10	20	01/09/2018
2017	Seca	Sentinel - 2	10	20	20/08/2017
2016	Seca	Sentinel - 2	10	20	17/08/2016

Nota: Todas las imágenes corresponden a la época seca (agosto–septiembre) y fueron seleccionadas con nubosidad menor al 20%, con resolución espacial de 10 m.

c) Preprocesamiento de imágenes

El preproceso se desarrolló en tres etapas principales:

- Enmascarado de nubes y sombras: se eliminaron los píxeles correspondientes a nubes (clases 8, 9, 10) y sombras (clase 3) con el uso de la banda SCL de Sentinel-2 SR, asegurando de esta forma que los valores espectrales no estuvieran contaminados.
- Recorte espacial: se espaciaron los límites de cada imagen utilizando la función clip () en GEE, lo que los restringió a la poligonal de la microcuenca. Esto, a su vez, redujo la carga computacional y el análisis mantuvo la precisión espacial.
- Composición estacional: se elaboró una imagen compuesta de mediana para cada estación y año. Esta técnica ayuda a suavizar el efecto de los valores atípicos y los remanentes de nubosidad, obteniendo de esta forma una representación espectral más estable y representativa de las condiciones típicas de la temporada.

d) Cálculo de índices espectrales (NDVI)

Para reforzar la discriminación de coberturas, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Definir rangos de NDVI para clases como:

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

- B8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR), que permite capturar el nivel de reflectancia en longitudes de onda asociadas con el vigor vegetal.
- B4 representa la banda del rojo (Red), sensible al nivel de absorción de la vegetación.

El NDVI fluctúa entre -1 y 1. Un valor cercano a 1 representa vegetación densa y saludable. Por el contrario, valores cercanos a 0 o negativos, indican escasa vegetación, suelo desnudo, agua o áreas degradadas.

Tabla 15

Rango de clasificación de NDVI

Rango de NDVI	Interpretación
-1.0 a 0.0	Agua
0.0 a 0.2	Suelo desnudo
0.2 a 0.4	Vegetación dispersa
0.4 a 0.6	Bofedales
0.6 a 0.8	Vegetación densa

Nota: Los valores de NDVI permiten discriminar diferentes coberturas del suelo (EOS DATA ANALYTICS, s. f.).

e) Clasificación supervisada con Random Forest

La clasificación de coberturas se llevó a cabo utilizando el algoritmo Random Forest (RF), seleccionado por su capacidad de manejar datos espectrales complejos y su habilidad para analizar múltiples variables sin caer en sobreajuste.

Las clases definidas incluyen:

- Agua
- Suelo desnudo
- Vegetación dispersa
- Vegetación densa
- Bofedales permanentes

Entrenamiento:

Mediante el uso de imágenes de alta resolución y gracias al conocimiento local, se crearon colecciones de entrenamiento (FeatureCollection) a partir de puntos distribuidos en toda la microcuenca.

- Se priorizó un mínimo de 20-100 muestras por clase.
- El conjunto se dividió en 80% para entrenamiento y el 20% restante se utilizó para la validación.
- Se utilizaron como variables predictoras las bandas B2, B3, B4, B8, B11, B12 y los índices NDVI.

Parámetros del modelo:

Se utilizaron 500 árboles (numberOfTrees = 500) para maximizar la estabilidad del modelo.

Se utilizó Bagging fraccional (63.2%) para mejorar la generalización.

f) Validación y métricas de desempeño

El modelo fue validado con el 20% de muestras reservadas. Se generaron matrices de confusión de cada estación y al año, calificando cada una.

Se necesita clasificar en las imágenes de satélite y al mismo tiempo de alguna manera reflejar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Índice de Kappa, el cual corresponde al acuerdo corregido por azar y para el cálculo Kappa en nuestro caso corresponde como objetivo.

g) Se realizó el cambio de cobertura entre cada año

La tasa de cambio de los bofedales se determinó con base en la diferencia de superficie entre años consecutivos, normalizada respecto al área inicial de referencia (Pamo & Oscoco, 2022).

$$T_c = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \times 100$$

Donde:

- T_c = tasa anual de cambio (%)
- S_1 = superficie en el año inicial (ha o km^2)
- S_2 = superficie en el año final (ha o km^2)
- n = número de años entre las dos fechas analizadas

Este cálculo permite tanto la identificación de aumentos como de disminuciones relativas en el área de bofedales. Los resultados se presentaron tanto en términos

absolutos como relativos (%), lo que simplificó la interpretación de los diferentes períodos de expansión o contracción. Los valores de T_c se compilaron en una tabla comparativa y se ilustraron como una serie temporal para mostrar la dinámica de los bofedales durante los años 2016–2025 (R. Chávez, 2015).

h) Análisis espacial y cálculo de áreas

Posteriormente a recibir los mapas clasificados, se procedió a calcular el área de cada clase utilizando la herramienta pixelArea() de GEE, transformando los resultados a hectáreas. Se elaboró una serie temporal de la cobertura de los bofedales, anotando los datos correspondientes a cada estación del año.

Adicionalmente, se calculó la persistencia estacional de los bofedales, determinando los píxeles que se mantuvieron estables durante la época seca, lo que ofrece conocimientos sobre la trayectoria de su estabilidad ecológica.

Los cambios anuales fueron considerados utilizando diferencias absolutas y relativas (Δha y $\Delta\%$) generando un diagnóstico de tendencia.

i) Generación de mapas, gráficos y reporte final

Con respecto a la difusión de resultados la producción consistió en:

- Temáticos por año con leyendas estandarizadas y simbología diferenciada por clase.
- Barra y serie de tiempo para el análisis de la evolución en la cobertura de los bofedales.
- Resúmenes en hojas de cálculo con métricas y cálculo de áreas por clasificación.
- Tabla de tasa de cambio de cobertura anual.

2.6.3 *Evaluar la capacidad de los bofedales para contribuir a la recarga hídrica en la microcuenca a través de cobertura y contenido de humedad.*

a) Definición del área de estudio

La microcuenca Chikllarazu (sur andino del Perú) se delimitó con cartografía oficial y MDE; la divisoria hidrográfica fue editada y validada en ArcGIS Pro. El polígono final se exportó a shapefile y se cargó a Google Earth Engine (GEE) como asset MICROCUNECA_CHIKLLARAZU. Este polígono se emplea como máscara espacial en todos los procesos.

b) Selección y descarga de imágenes satelitales

Se emplearon imágenes Sentinel-2 SR (S2SR) (10 m, 5 días, corrección atmosférica incluida). Para capturar la dinámica estacional se definieron meses del año 2023.

Tabla 16

Imágenes satelitales Sentinel-2 seleccionadas en la microcuenca Chikllarazu (2023)

Años	Sensor	Resolución Espacial (m)	Nubosidad (%)	Fecha
Enero	Sentinel - 2	10	40	12/01/2023
Febrero	Sentinel - 2	10	30	26/02/2023
Marzo	Sentinel - 2	10	30	12/03/2023
Abril	Sentinel - 2	10	20	22/04/2023
Mayo	Sentinel - 2	10	20	17/05/2023
Junio	Sentinel - 2	10	20	01/06/2023
Julio	Sentinel - 2	10	20	01/07/2023
Agosto	Sentinel - 2	10	20	10/08/2023
Setiembre	Sentinel - 2	10	20	04/09/2023
Octubre	Sentinel - 2	10	20	08/10/2023
Noviembre	Sentinel - 2	10	20	03/11/2023
Diciembre	Sentinel - 2	10	20	23/12/2023

Nota: Datos obtenidos de la colección Sentinel-2 Surface Reflectance (SR) procesados en Google Earth Engine (2023). La tabla muestra las imágenes seleccionadas mensualmente.

Tabla 17

Imagen del satélite seleccionada realizada en trabajo de campo 29/03/2025.

Años	Sensor	Resolución Espacial (m)	Nubosidad (%)	Fecha
Abril	Sentinel - 2	10	40	01/04/2025

Nota: La imagen corresponde a la misión Sentinel-2, descargada desde Google Earth Engine, utilizada para relacionar observaciones de campo realizadas el 29 de marzo de 2025 en la microcuenca Chikllarazu.

c) Preprocesamiento de imágenes

El preprocesamiento se desarrolló en tres etapas principales:

- Enmascaramiento de nubes y sombras: a través de la banda SCL de Sentinel-2 SR, se enmascararon los píxeles de nubes (clase 8, 9, 10) y sombras (clase 3), asegurando así que los valores espectrales estuvieran libres de contaminación.

d) Cálculo de índices espectrales (NDII)

Se utilizó NDII (Índice de Diferencia Normalizada de Infrarrojos), junto con las bandas B08 (NIR, 819 nm) y B11 (SWIR, 1600 nm) de Sentinel-2, para discriminar los bofedales húmedos. NDII tiene usos en administración de bosques, estrés hídrico, e hidratación de la vegetación y suelo, debido a que aumenta con la hidratación. El índice presenta valores de -1 a 1, donde vegetación sana y densa suele estar entre 0.02 y 0.6 (EOS DATA ANALYTICS, s. f.).

Definir rangos de NDII para clases como:

$$NDII = \frac{(B8 - B11)}{(B8 + B11)}$$

- B8 = Banda del infrarrojo cercano NIR 842 nm en Sentinel 2.
- B11 = Banda del infrarrojo de onda corta SWIR1 1610 Nm en Sentinel 2.

Tabla 18

Rango de clasificación de NDII

Rango de NDII	Interpretación
-1 a 0.02	No bofedal
0.02 a 0.79	Bofedal húmedo
0.79 a 1	No bofedal

Nota: Como se muestra una tabla, se establece el intervalo de valores de índice NDII y su respectiva interpretación. Los valores de NDII que se aproximan a 0.02–0.79 reflejan la presencia de bofedales húmedos (García & Willems, 2015).

e) Se realizó el cambio de cobertura entre cada mes

La tasa de cambio de los bofedales se determinó con base en la diferencia de superficie entre meses consecutivos, normalizada respecto al área inicial de referencia (Pamo & Oscco, 2022) .

$$T_c = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] \times 100$$

Donde:

- Tc = tasa de cambio (%)
- At₂ = área de bofedales en el año posterior
- At₁ = área de bofedales en el año inicial

Este cálculo ayuda a determinar tanto aumentos como disminuciones en relación con el área de bofedales. Los resultados se expresan en medidas absolutas (hectáreas) y medidas relativas (porcentaje) para mejorar la interpretación de las tendencias cambiantes de expansión o contracción a lo largo de diferentes intervalos de tiempo.

f) Integración de trabajo de campo (ERT) y Sentinel-2

Se llevaron a cabo dos perfiles eléctricos tomográficos Sismógrafo SeismeX16/24 con geófonos de 4.5 Hz en dos trazas TE-01 y TE-02. Se usó el arreglo Wenner con 24 electrodos, espaciamiento 4 m o 2.5 m y longitud 320 m. La topografía se incorporó desde GPS diferencial. La inversión 2D se realizó en software RESYPI con regularización suave.

Figura 22

Trabajo de campo en la microcuenca Chikllarazu



Nota: Figura muestra la salida de campo en la microcuenca Chikllarazu, en la cual se realizó la tomografía eléctrica para el análisis hidrogeológico y la caracterización de los bofedales.

Tabla 19

Rango de resistividad según tipo de suelo

Descripción	Margen de valores ($\Omega \cdot m$)	Valor medio ($\Omega \cdot m$)
Terreno pantanoso	2–50	30
Barro mezclado con paja	2–200	40
Terreno fangoso y arcilloso, humus	20–260	100
Arena y terreno arenoso	50–3000	200 (húmedos)
Turba	≥ 1200	1000 (húmedo)
Grava (húmeda)	50–3000	2000
Terreno pedregoso y rocoso	100–8000	2000

Nota: Se ilustra los rangos típicos de resistividad eléctrica en relación con los tipos de suelo según (Mollocco, 2023).

Figura 23

Reconocimiento de cobertura en la microcuenca Chikllarazu con GPS diferencial



Nota: Registro fotográfico del levantamiento de datos en campo con GPS diferencial para la validación y reconocimiento de coberturas en la microcuenca Chikllarazu.

Figura 24

Instalación de electrodos para la toma de datos en la microcuenca Chikllarazu



Nota: Registro fotográfico del proceso de instalación de electrodos en campo, utilizado para la adquisición de datos geofísicos en la microcuenca Chikllarazu.

g) Generación de mapas, gráficos y reporte final

Lo siguiente fue creado para comunicar resultados:

- Mapas temáticos mensuales de enero a diciembre del año 2023 con leyendas estandarizadas y simbología diferenciada para cada clase.
- Gráficas de barras y gráficas de series temporales que muestran la evolución de la cobertura de bofedales.
- Tablas resumen con métricas de clasificación y áreas calculadas.
- Tabla de tasa de cambio de cobertura anual.

CAPÍTULO III

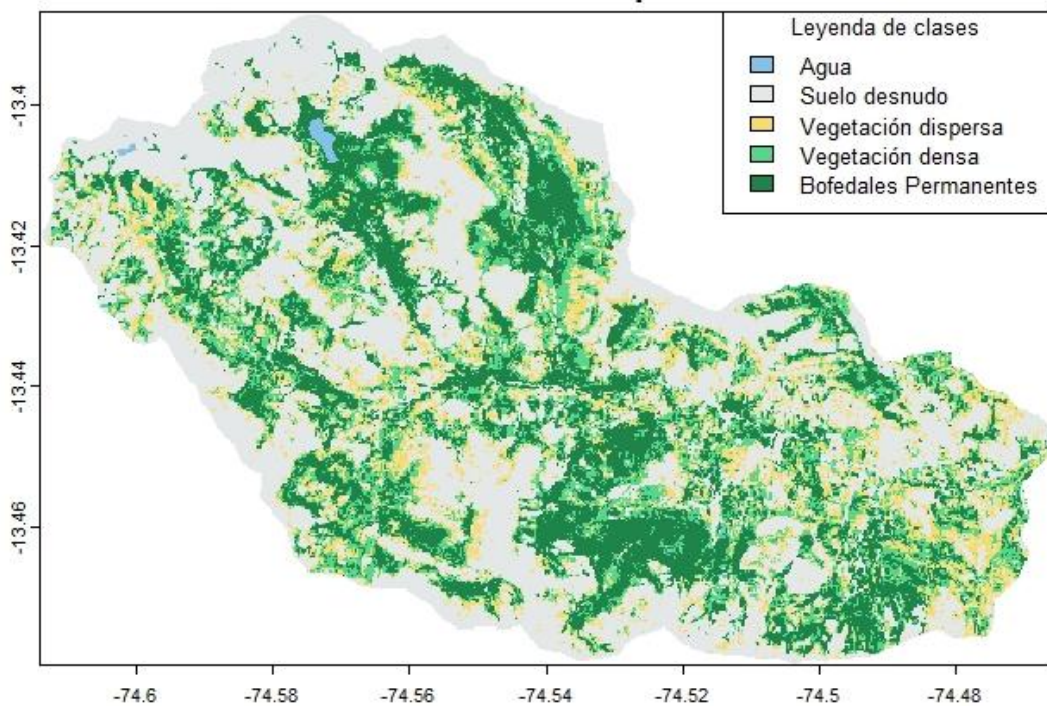
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.7 Resultados

2.7.1 Áreas de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes satelitales.

Figura 25

Mapa de clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época húmeda 2025



Nota: El mapa muestra la distribución espacial de las clases de cobertura del suelo identificadas en la microrregión Chikllarazu, basándose en la clasificación supervisada (Random Forest) de imágenes de Sentinel-2.

El mapa en la Figura 25 la clasificación supervisada con Random Forest habilitado define cinco clases de cobertura en la microcuenca Chikllarazu. Hay una gran distribución de suelos desnudos con vegetación densa y escasa, además de la distribución espacial de bofedales permanentes, que se encuentran principalmente en las áreas bajas y planas. Esto muestra que, en la temporada húmeda, los bofedales definitivamente y en gran medida definen el área, sirviendo como reservorios de agua en época húmeda su mayor proporción de bofedales y vegetación densa es vista debido a la temporada de lluvia en esta zona.

Tabla 20

Área de coberturas en la microcuenca Chikllarazu - época húmeda 2025

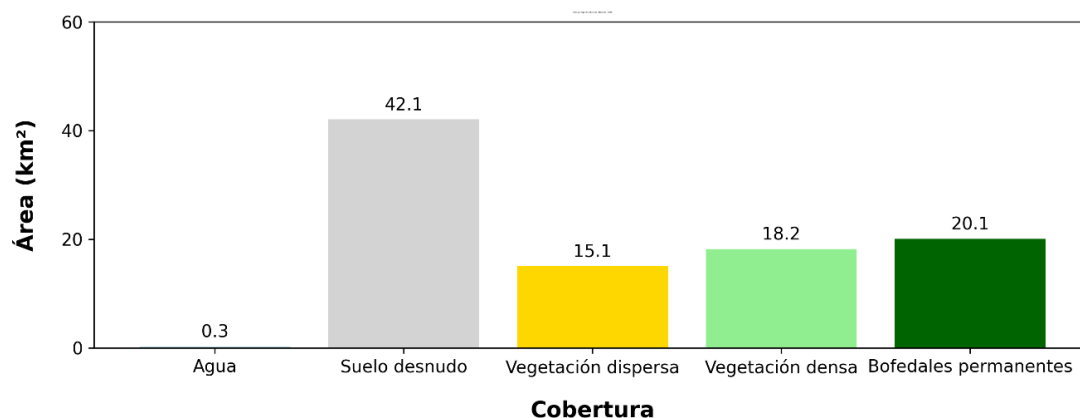
N°	Descripción	Área (km ²)
1	Agua	0.29
2	Suelo desnudo	42.15
3	Vegetación dispersa	15.12
4	Vegetación densa	18.23
5	Bofedales	20.11

Nota: La tabla muestra el área (km²) de las clases de cobertura que fueron identificadas en la microcuenca Chikllarazu en el año 2025 mediante la clasificación de imágenes de Sentinel-2.

Según la Tabla 20 en 2025, durante la temporada de lluvias, el tipo de cobertura terrestre más extendido fue el suelo desnudo con un área de 42.15 km², seguido de los bofedales permanentes que ocuparon 20.11 km². La vegetación densa ocupó 18.23 km² y la vegetación dispersa cubrió 15.12 km², mientras que el agua superficial apenas alcanzó 0.29 km². Estos resultados indican que, a pesar de las altas precipitaciones, los bofedales constituyen una parte sustancial del paisaje (alrededor del 20%), aunque no son el tipo de cobertura dominante.

Figura 26

Distribución del área por tipo de cobertura durante la época húmeda (2025)



Nota: La figura muestra la extensión de las coberturas (agua, suelo desnudo, áreas escasamente vegetadas, áreas densamente vegetadas y bofedales permanentes) en la microcuenca de Chikllarazu.

Según la gráfica en barras en la Figura 26 los documentos de los días húmedos de 2025, los bofedales persistentes tenían un área de 20.11 km², que corresponde a casi el 20% de la cobertura total de la microcuenca Chikllarazu. Esta área demuestra la importancia de estos ecosistemas en el balance hídrico durante los meses más

lluviosos. Aunque no ocupan el lugar de forma dominante, su presencia continua garantiza el almacenamiento de agua, que son esenciales para el balance hídrico de la microcuenca. Además, la magnitud de su cobertura confirma que, incluso en el contexto de la variabilidad climática, los bofedales continúan desempeñando funciones esenciales para el mantenimiento de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos.

Tabla 21

Matriz de confusión de la clasificación supervisada para la época húmeda

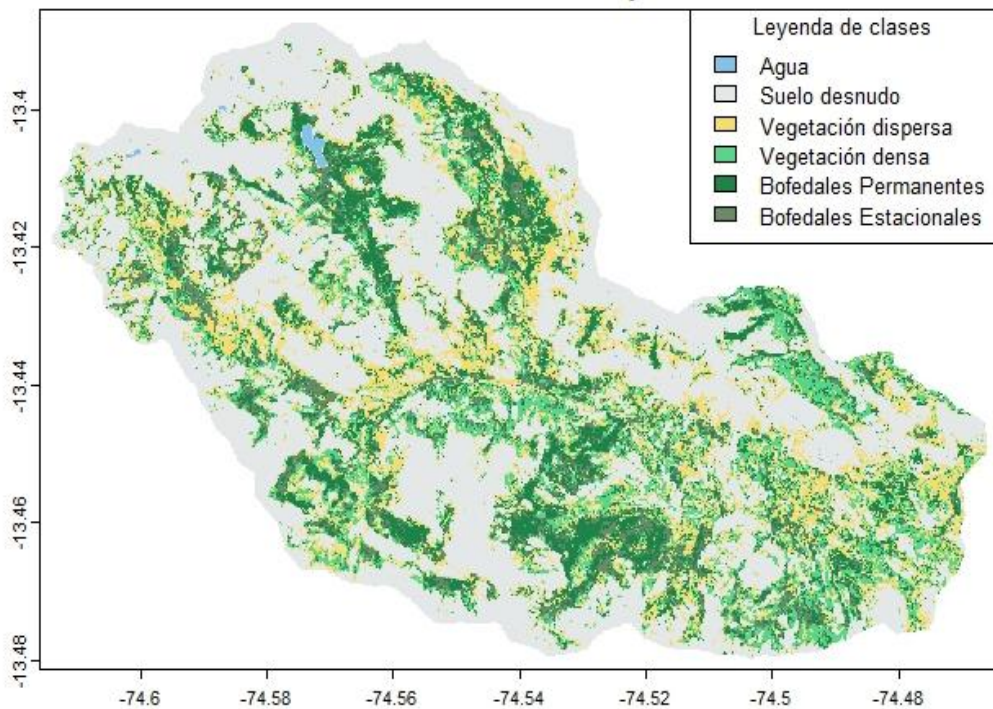
	Agua	Suelo desnudo	Vegetación dispersa	Vegetación densa	Bofedales	Total	Error de omisión	Kappa
Agua	85	6	0	0	0	91	0.023	0
Suelo desnudo	2	286	0	3	3	294	0.034	0
Vegetación dispersa	0	0	1	0	0	1	0	0
Vegetación densa	0	1	0	27	1	29	0.129	0
Bofedales	0	3	0	1	48	52	0.077	0
Total	87	296	1	31	52	467	0	0
Error de omisión	0.067	0.027	0	0.069	0.077	0	0	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0.9218

Nota: La tabla presenta la matriz de confusión de la validación de la clasificación supervisada aplicada a las imágenes de Sentinel-2.

Según la Tabla 21 la validación del modelo para la clasificación durante el período húmedo alcanzó un índice Kappa de 0.92187, lo que se traduce en un acuerdo casi perfecto. Los errores de omisión, que fueron inferiores al 8% para todas las clases, indicaban la fiabilidad del modelo de Bosques Aleatorios (Random Forest). Esto indica que los resultados obtenidos sobre la distribución de las coberturas son robustos y con gran precisión además incorpora errores de omisión por clase y también proporciona el valor Kappa global de 0.92187 que, según la escala de Landis y Koch, indica un acuerdo casi perfecto.

Figura 27

Clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época seca 2025



Nota: El mapa ilustra la distribución espacial de las clases de cobertura del suelo derivadas de imágenes de Sentinel-2 durante la estación seca del año 2025.

El mapa de la Figura 27 donde se analiza de este período seco de 2025 predice una disminución de las áreas vegetadas densas y un aumento del suelo desnudo. Además, hay bofedales estacionales, que solo se desarrollan durante unos pocos meses del año e ilustran la sensibilidad de estos ecosistemas a los déficits de agua. El patrón espacial muestra un retroceso de la vegetación ante la estacionalidad que acentúa el papel de los bofedales en la microcuenca como sostenedores de humedad, además se observa que es mejor proporción debido a temporada de lluvias que son escasas en estas zonas.

Tabla 22

Área de coberturas en la microcuenca Chikllarazu - época seca

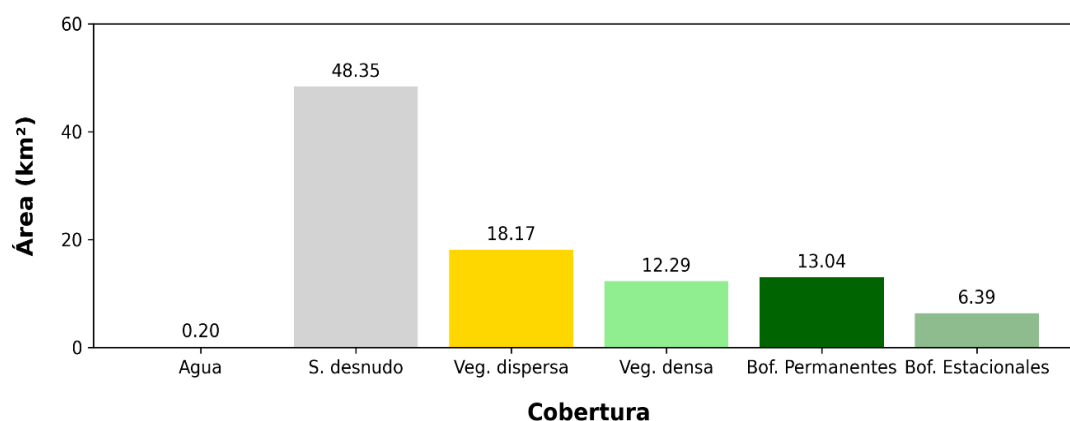
N°	Descripción	Área (km ²)
1	Agua	0.20
2	Suelo desnudo	48.35
3	Vegetación dispersa	18.17
4	Vegetación densa	12.29
5	Bofedales permanentes	13.04
6	Bofedales estacionales	6.39

Nota: La tabla presenta las áreas estimadas de distintos tipos de cobertura del suelo en la microcuenca Chikllarazu durante la época seca del año 2025.

En la Tabla 22 el suelo desnudo durante el período seco aumentó a 48.35 km², lo que representa un aumento en comparación con el período húmedo. La vegetación dispersa cubrió 18.17 km² y la vegetación densa disminuyó a 12.29 km². Los bofedales permanentes cubrieron 13.04 km² y los bofedales estacionales 6.39 km², sumando en total 19.43 km². Esto indica una reducción de bofedales permanentes y la formación de superficies temporales de bofedal que sustentan las dinámicas hidrológicas durante el período seco. La reducción de la vegetación densa y el aumento del suelo desnudo destacaron la cobertura protectora que está disminuyendo y la vulnerabilidad del ecosistema que es mayor durante este tiempo.

Figura 28

Clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época seca 2025



Nota: La figura muestra la distribución de área por tipo de cobertura en la microcuenca Chikllarazu en el período seco de 2025.

En la Figura 28 el período seco del año 2025, los bofedales permanentes y estacionales de la microcuenca Chikllarazu tuvieron una superficie de 13.04 km² y 6.39 km² respectivamente, lo que sumó un total de 19.43 km². Este patrón muestra que, a pesar de que los bofedales permanentes sufren una reducción cualitativa durante el período seco, la presencia de bofedales estacionales compensa parcialmente y apoya la regulación hidrológica de la microcuenca. La presencia de ambos tipos de bofedales durante la temporada seca del año enfatiza los bofedales migratorios como un soporte adicional durante las sequías, cuando los ecosistemas multifuncionales estiran las funciones primarias de retención de agua, recarga de subsuelo y biodiversidad.

Tabla 23

Matriz de confusión de la clasificación supervisada para la época seca

	Agua	Suelo desnudo	Vegetación dispersa	Vegetación densa	Bofedales permanentes	Bofedales estacionales	Total	Error de omisión	Kappa
Agua	80	2	0	0	0	0	82	0.024	0
Suelo desnudo	1	265	0	1	1	0	268	0.011	0
Vegetación dispersa	0	1	5	0	0	0	6	0.167	0
Vegetación densa	0	0	0	30	0	0	30	0	0
Bofedales permanentes	0	1	0	0	52	1	54	0.037	0
Bofedales estacionales	0	0	0	0	1	3	4	0.25	0
Total	81	269	5	31	54	4	444	0	0
Error de omisión	0.012	0.015	0	0.032	0.037	0.25	0	0	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	444	0	0.96

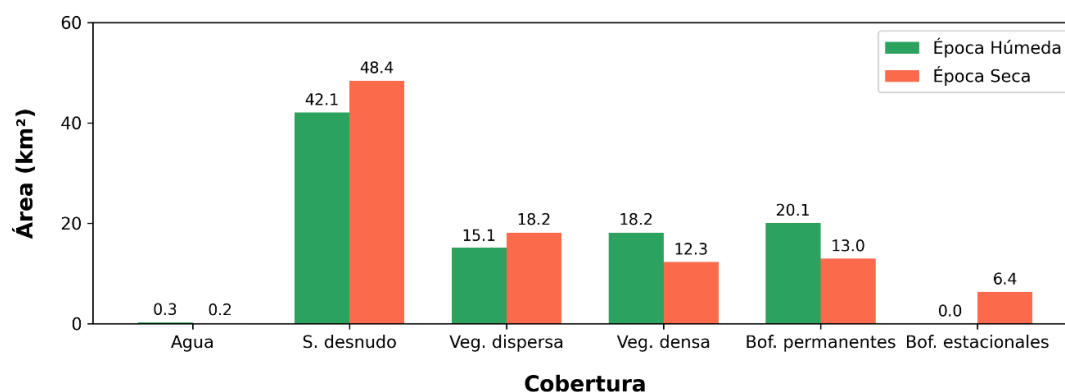
Nota: La tabla muestra la matriz de confusión obtenida para la validación de clasificación supervisada en la temporada seca del año 2025 para la microcuenca Chikllarazu.

En la Tabla 23 el valor alcanzado por el índice Kappa durante la sequía fue de 0.965, lo que es un avance en la capacidad del modelo de clasificación, ya que también es superior al alcanzado en la época húmeda. Refiriéndose nuevamente a la escala de Landis y Koch, Kappa 0.965 logra una casi perfecta concordancia entre la clasificación y los datos de referencia, lo que otorga bastante confianza al análisis realizado. En este sentido, la consecución de un Kappa tan alto, confirma la veracidad

de las hipótesis que rodean la variación estacional de los resultados y la robustez del modelo aplicado. También es importante mencionar que los errores de omisión por clase fueron en general de orden. Esto permite sostener que las diferencias entre los resultados de la temporada húmeda y la seca, no se deben a incoherencias en el planteamiento metodológico, sino a verdaderas diferencias en el contexto.

Figura 29

Cobertura de la microcuenca Chikllarazu en época seca y húmeda (2025)



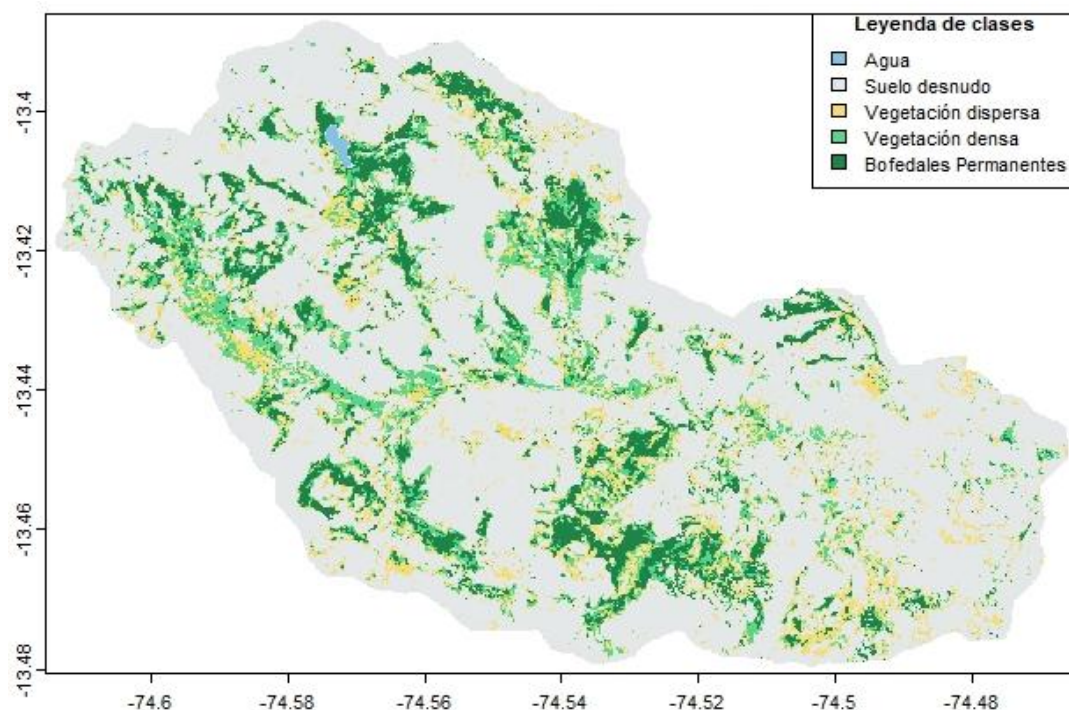
Nota: El gráfico compara el área (km²) ocupada por diferentes cubiertas de tierra en la microcuenca Chikllarazu durante las estaciones húmeda y seca del año 2025.

En la Figura 29 se observa cambios significativos en la cobertura de la microcuenca entre la época húmeda y la época seca. En primer lugar, el suelo desnudo mostró un incremento importante, pasando de 42.15 km² en la estación húmeda a 48.35 km² en la estación seca, lo que refleja la pérdida temporal de cobertura vegetal asociada a la disminución de la humedad superficial. Por otro lado, la vegetación densa experimentó una reducción considerable, descendiendo de 18.23 km² a 12.29 km², lo que evidencia la sensibilidad de esta cobertura frente a la estacionalidad climática y su vulnerabilidad a periodos de déficit hídrico. En cuanto a los bofedales, se observa una relativa estabilidad en términos de superficie total, con 20.11 km² en época húmeda y 19.43 km² en época seca; sin embargo, se aprecia una redistribución interna entre bofedales permanentes y estacionales, lo cual pone de manifiesto su dinámica ecológica. Esta característica resulta especialmente relevante, dado que los bofedales cumplen un papel resiliente frente a la variabilidad climática, actuando como verdaderos reservorios naturales de agua que regulan y sostienen la disponibilidad hídrica incluso en los meses secos, contribuyendo de manera decisiva al equilibrio del ecosistema y al mantenimiento de los servicios ambientales de la microcuenca.

2.7.2 Variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, observando cambios estacionales y anuales.

Figura 30

Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2016)

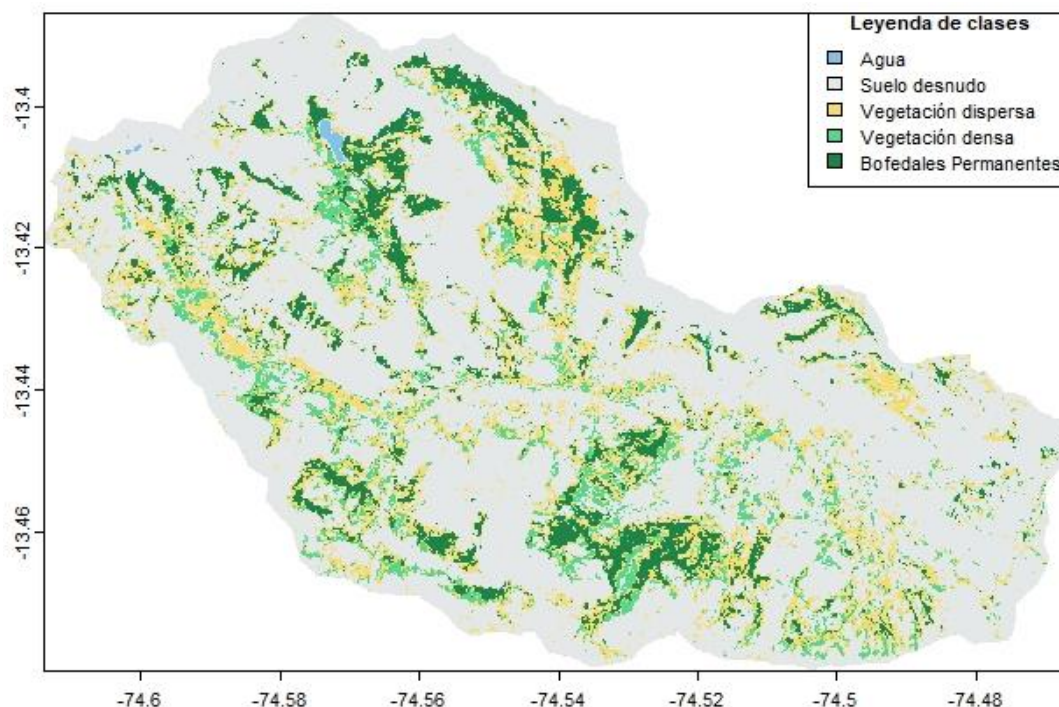


Nota: El mapa ilustra la distribución espacial de los bofedales permanentes a lo largo de la microcuenca Chikllarazu para el año 2016.

Como se aprecia en la Figura 30 se observa durante el año 2016, la microcuenca Chikllarazu tuvo una cobertura de bofedales permanentes de 8,90 km². Cabe señalar que esto se convirtió en un indicador del total de la cobertura de bofedales más representativa de todo el año analizado. Esta superficie destaca la notable presencia de los ecosistemas húmedos altoandinos que, desde el punto de vista fisiográfico y ecológico, son fundamentales en la regulación del sistema hídrico y en la conservación de la biodiversidad de la región. El mapa inicial, realizado a partir de imágenes satelitales, muestra que esta región de bofedales se encuentra, en su mayor parte, de forma contigua y en una disposición concentrada a lo largo de los fondos de valle y amplias planicies de la cuenca. Esta disposición se asocia a la topografía, a la presencia de suelos saturados y a la existencia de un sistema de banca acuática que se encuentra intermitente y subterránea, la cual hace posible que los bofedales se mantengan durante el invierno y toda la época del año de forma continua.

Figura 31

Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2020)

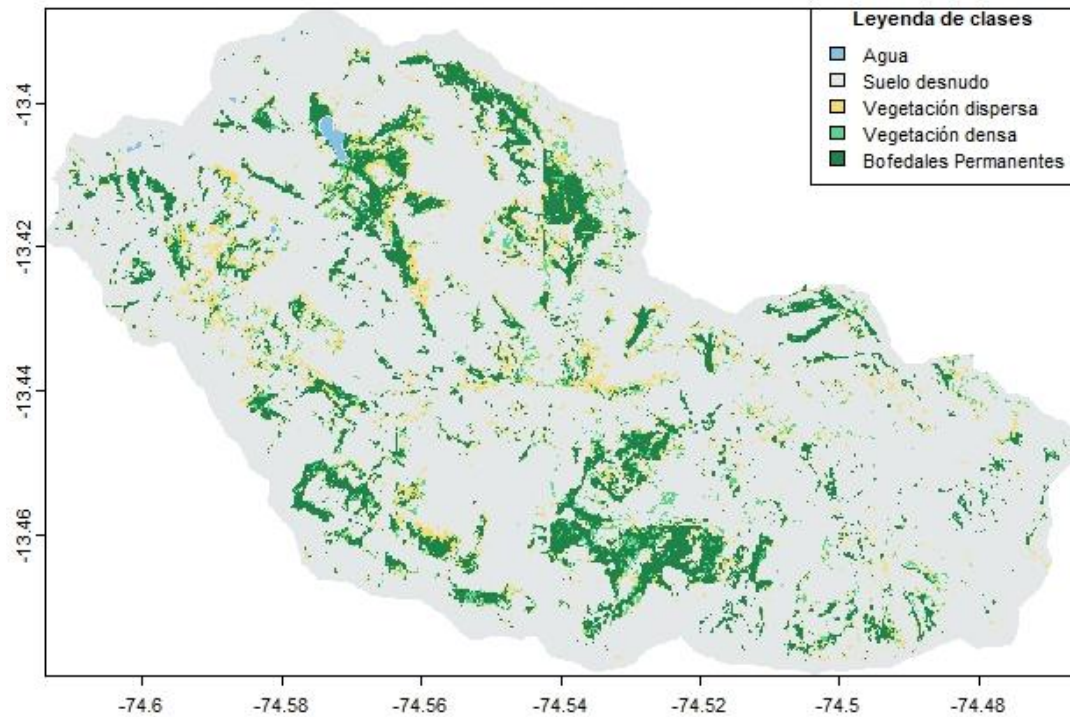


Nota: El mapa ilustra la distribución espacial de las áreas de bofedales permanentes en la microcuenca de Chikllarazu a partir de 2020.

El análisis espacial de 2020 evidencia una reducción del 14.6% en la cobertura de bofedales permanentes respecto a 2016 (8.90 km²), situando el área en 7.60 km². Esta contracción se manifiesta espacialmente como un proceso de fragmentación progresiva, caracterizado por la desconexión de parches periféricos en laderas medias y altas, y la pérdida de conectividad hidrológica entre sectores previamente continuos. Estos patrones reflejan impactos combinados de la variabilidad climática, con episodios de sequía recurrentes, y presiones antrópicas como el sobrepastoreo y la alteración de canales hídricos, que aceleran procesos de degradación del suelo y reducen la eficiencia de la recarga hídrica. La fragmentación observada en 2020 representa un punto crítico en la serie temporal, donde la disrupción de corredores ecológicos amenazó la funcionalidad hidrológica integral del sistema, destacando la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante perturbaciones sostenidas.

Figura 32

Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2025)

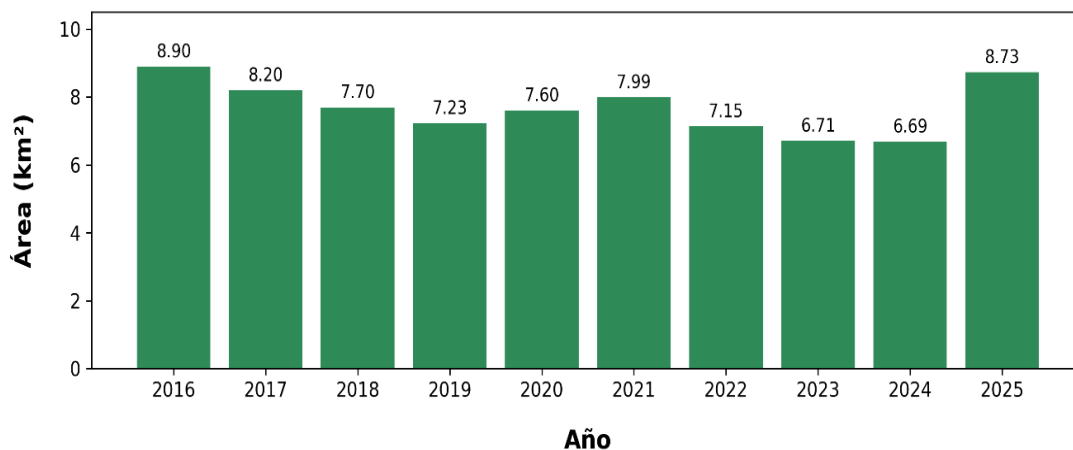


Nota: El mapa representa la distribución de los bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu para el año 2025.

En la Figura 32 el análisis espacial del año 2025 revela una notable recuperación de los bofedales permanentes, que alcanzan 8.73 km² tras el mínimo histórico de 2024 (6.69 km²), representando un incremento del 30.5%. Esta expansión se manifiesta como una mejor conectividad entre parches de bofedales y la recuperación de áreas estratégicas en zonas de cabecera, donde se concentra la recarga hídrica. El patrón observado confirma la resiliencia de estos ecosistemas ante la variabilidad climática, mostrando su capacidad de respuesta ante condiciones húmedas favorables. Sin embargo, la cobertura aún no iguala los niveles basales de 2016 (8.90 km²), reflejando un déficit acumulado que evidencia la vulnerabilidad estructural de estos ecosistemas. La distribución espacial destaca la mayor estabilidad de los bofedales en fondos de valle y laderas de pendiente suave, donde persisten condiciones de saturación prolongada, reforzando la necesidad de priorizar la conservación de estas unidades geomorfológicas para mantener los servicios ecosistémicos hídricos ante escenarios de cambio climático.

Figura 33

Evolución del área de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2016–2025)

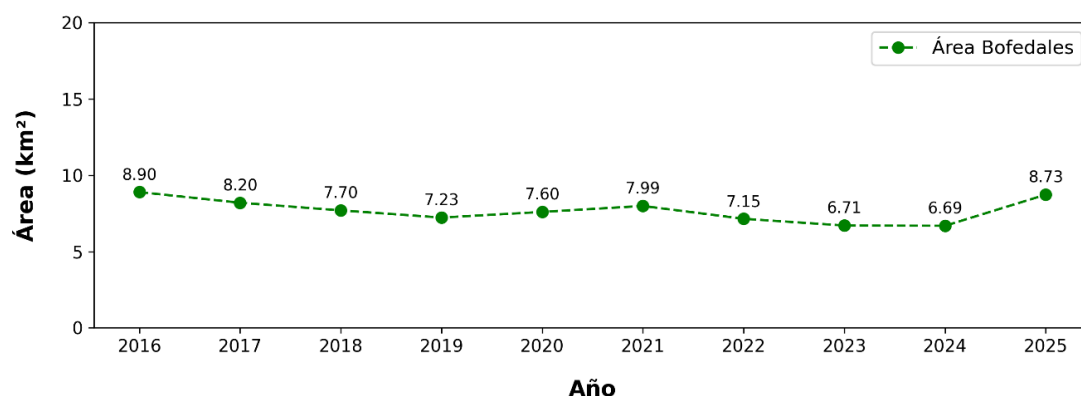


Nota: El gráfico ilustra los cambios en el área de bofedales permanentes, o bofedales, en la microcuenca de Chikllarazu desde 2016 hasta 2025.

El análisis de la serie temporal 2016-2025 en la Figura 33 revela una tendencia general de contracción en el área de bofedales permanentes, con una reducción acumulada del 24.8% entre 2016 (8.90 km²) y 2024 (6.69 km²), mínimo histórico registrado. Esta fase de degradación progresiva refleja la vulnerabilidad del ecosistema ante factores como la variabilidad climática (sequías prolongadas, cambios en los regímenes de precipitación) y posibles presiones antrópicas. Sin embargo, en 2025 se observa una recuperación significativa (8.73 km²), que representa un incremento del 30.5% respecto a 2024. Esta reversión parcial coincide con condiciones hídricas favorables durante la temporada de lluvias 2024-2025, confirmando tanto la sensibilidad de los bofedales a las condiciones climáticas como su capacidad regenerativa cuando las condiciones ambientales lo permiten. No obstante, el área en 2025 aún no alcanza los niveles base de 2016, evidenciando un déficit acumulado que subraya la urgencia de implementar estrategias de conservación proactivas para preservar su función crítica en la regulación hídrica de la microcuenca.

Figura 34

Serie temporal del área de bofedales permanentes (2016–2025)



Nota: La figura ilustra la evolución temporal del área de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu desde 2016 hasta 2025, en km².

Tabla 24

Área de bofedales permanentes por año en la microcuenca Chikllarazu (2016–2025)

Mes	Área (km ²)
2016	8.90
2017	8.20
2018	7.70
2019	7.23
2020	7.60
2021	7.99
2022	7.15
2023	6.71
2024	6.69
2025	8.73

Nota: El área de los bofedales permanentes localizados en la microcuenca Chikllarazu, así como su extensión, han sido clasificados con imágenes satelitales.

Para la Figura 34 y Tabla 24 los datos revelan que los bofedales permanentes están sujetos a escalas interanuales, con un área registrada que oscila entre 6.69 km² y 8.90 km². Esta dinámica evidencia la influencia tanto de la estacionalidad como de la variabilidad del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos. La recuperación observada en el año 2025 enfatiza la importancia de estos ecosistemas en la preservación del balance hidrológico de la microcuenca.

Tabla 25*Matriz de tasa de cambio de área de bofedales (2016–2025)*

		Años									
		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Años	2016	--	-7.87	-6.99	-6.69	-3.87	-2.13	-3.58	-3.95	-3.51	-0.21
	2017	8.54	--	-6.1	-6.1	-2.5	-0.65	-2.7	-3.29	-2.87	0.79
	2018	7.51	6.49	--	-6.1	-0.65	1.24	-1.84	-2.71	-2.32	1.81
	2019	7.17	6.5	6.5	--	5.12	5.12	-0.37	-1.85	-1.54	3.19
	2020	4.03	2.57	0.66	-4.87	--	5.13	-3.01	-4.07	-3.14	2.81
	2021	2.18	0.65	-1.22	-4.87	-4.88	--	-10.5	-8.36	-5.75	2.24
	2022	3.72	2.78	1.87	0.37	3.1	11.75	--	-6.15	-3.27	6.88
	2023	4.12	3.4	2.79	1.88	4.24	9.12	6.56	--	-0.3	14.06
	2024	3.63	2.95	2.37	1.56	3.24	6.1	3.38	0.3	--	30.49
	2025	0.21	-0.78	-1.78	-3.09	-2.73	-2.19	-6.44	-12.3	-23.4	--

Nota: La figura muestra la tasa de cambio (%) del área de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu para el período 2016–2025.

El análisis de la matriz de tasas de cambio revela una dinámica fluctuante en la cobertura de bofedales durante el período 2016-2025, caracterizada por dos fases críticas de pérdida acumulativa: el trienio 2016-2018, con reducciones superiores al 6.99 % anual, y el período 2021-2024, donde destaca una drástica reducción del 10.5% entre 2021-2022. Estas fases de deterioro reflejan la vulnerabilidad de los bofedales ante perturbaciones como sequías prolongadas y presiones antrópicas. No obstante, el período 2024-2025 muestra una recuperación excepcional del 30.49%, la mayor registrada en la serie temporal, coincidiendo con condiciones climáticas húmedas favorables que confirmaron la resiliencia del ecosistema. Pese a esta recuperación puntual, la tendencia general evidencia un balance negativo que subraya la urgencia de implementar medidas de conservación para estos esenciales reguladores hídricos altoandinos.

Tabla 26*Índice Kappa de la clasificación supervisada (2016–2025)*

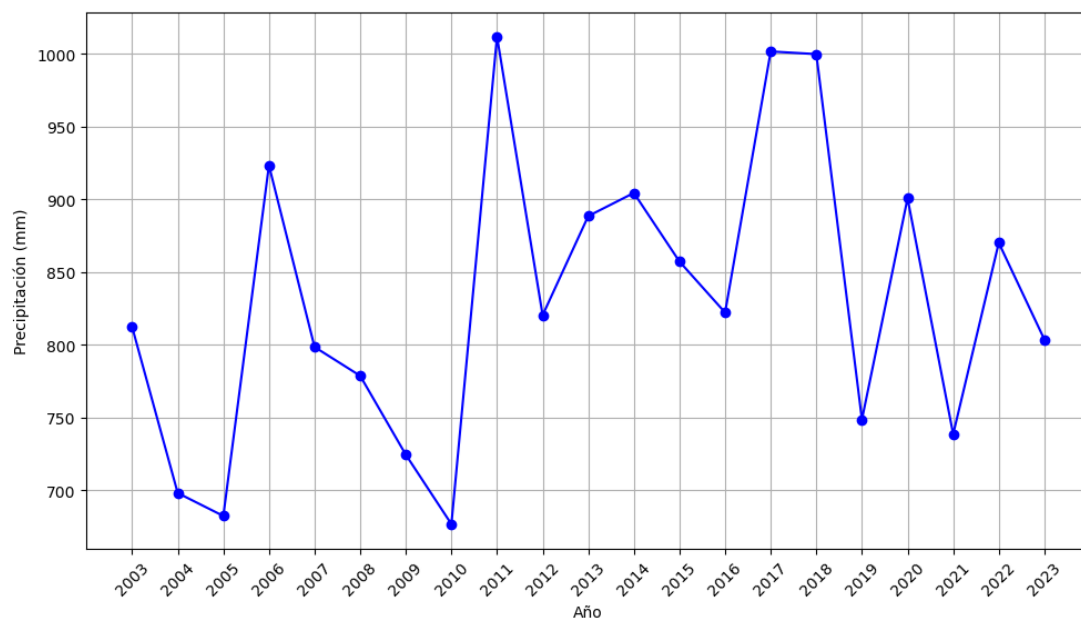
Años	Índice Kappa
2016	0.91
2017	0.89
2018	0.93
2019	0.95
2020	0.87
2021	0.90
2022	0.91
2023	0.92
2024	0.86
2025	0.92

Nota: La tabla muestra los valores del índice Kappa anuales obtenidos de los resultados validados de la clasificación supervisada realizada con imágenes de Sentinel-2 para la microcuenca de Chikllarazu desde 2016 hasta 2025.

La Tabla 25 presenta los valores del índice Kappa obtenidos en la validación de la clasificación supervisada de la cobertura de bofedales para el período 2016-2025. El análisis de estos valores revela un nivel de exactitud general "casi perfecto", de acuerdo con la escala de Landis & Koch (1977), donde un valor de Kappa superior a 0.81 indica una concordancia excelente entre la clasificación automatizada y la verdad terreno. Se observa una consistencia notable en la alta precisión a lo largo de toda la serie temporal, con valores que fluctúan en un rango estrecho, entre 0.86 (2024) y 0.95 (2019). Este rango confirma la robustez y confiabilidad del método de clasificación implementado, demostrando que la combinación del algoritmo Random Forest con imágenes Sentinel-2 es una técnica reproducible y precisa para el mapeo de bofedales en la microcuenca Chikllarazu.

Figura 35

Gráfico de tendencia anual de precipitación total en (mm)



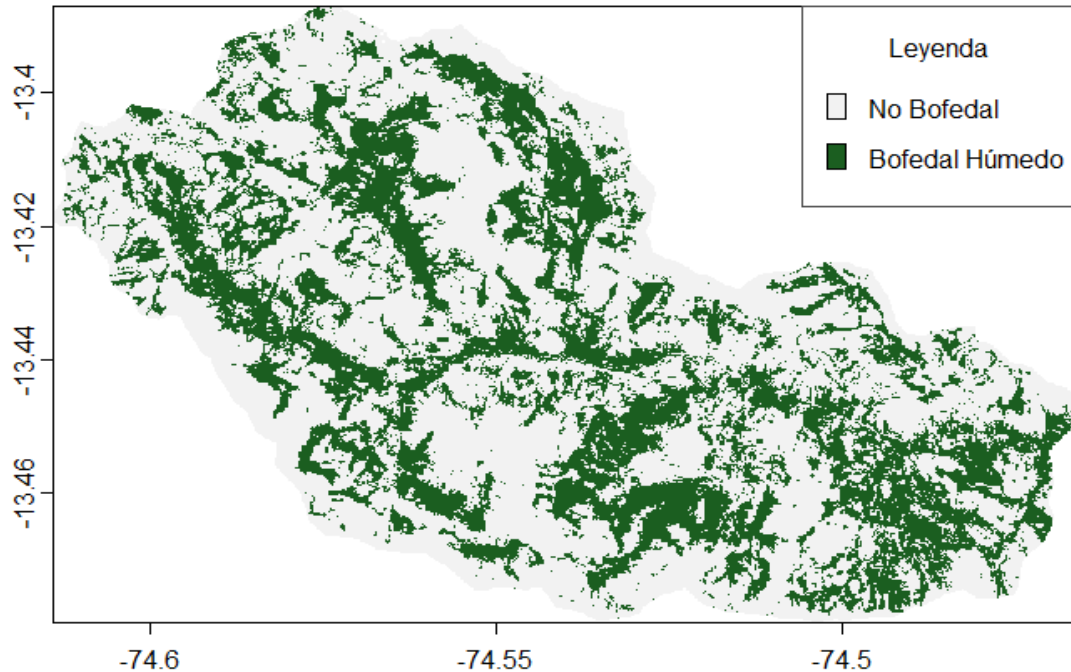
Nota: La grafica muestra la tendencia de precipitación de la estación meteorológica de Cuchoquesera.

La Figura 36 presenta un gráfico con la tendencia anual de precipitación total. Dicha figura evidencia una variabilidad interanual relevante en los niveles de precipitación a lo largo del período de estudiado. Además, también se observan los picos más altos de lluvia en los años más altos, los cuales coinciden con los años de cobertura total recuperada para la superficie de bofedales, al mismo tiempo que se presentan los menores índices de precipitación en los años con mayor pérdida para dicha métrica espacial. En línea con lo observado, la estrecha relación entre hídrico bofedal afirma que este variable es un elemento influyente en la dinámica espacio temporal de estos ecosistemas.

2.7.3 Capacidad de los bofedales para contribuir a la recarga hídrica en a la microcuenca a través de cobertura y contenido de humedad.

Figura 36

Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (abril 2023)

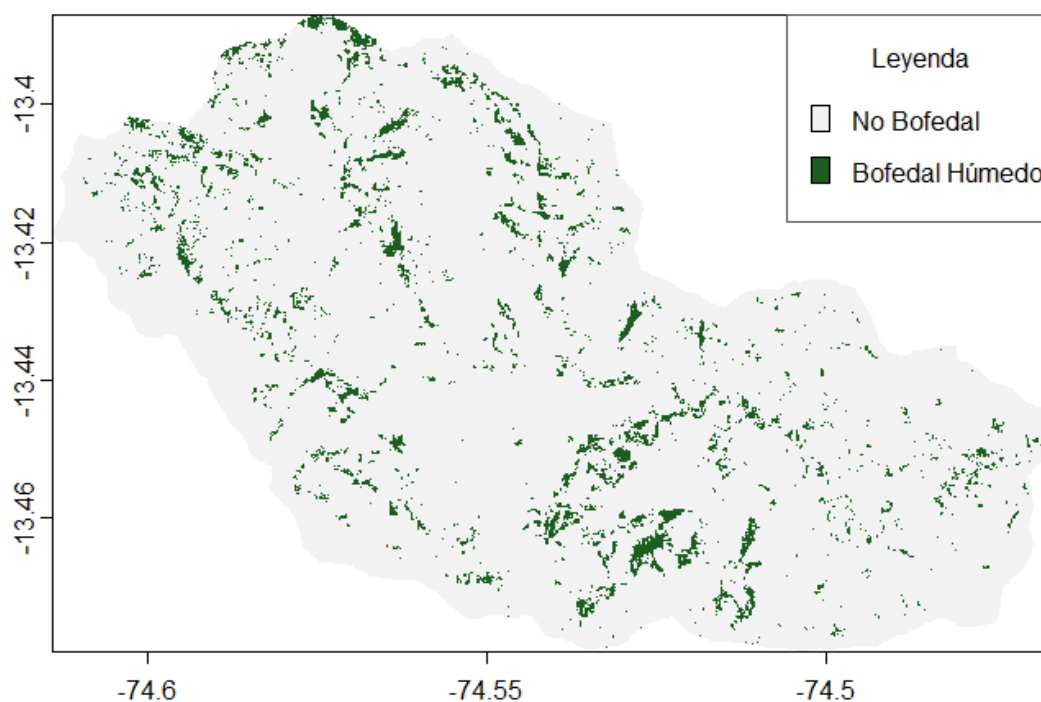


Nota: El mapa muestra la distribución espacial de los bofedales húmedos en la microcuenca Chikllarazu durante el mes de abril de 2023.

La Figura 36, correspondiente al mes de abril de 2023 (temporada de lluvias), muestra que los bofedales húmedos alcanzaron su máxima extensión real dentro del período de estudio. Esta cobertura extensa y continua refleja la condición de máxima saturación hídrica del suelo, resultado de la alta precipitación acumulada y el consecuente aumento de la escorrentía superficial y subsuperficial. Esta condición de saturación, identificada de manera remota, se correlaciona directamente con los datos de Tomografía Eléctrica (ERT) obtenidos en campo. Durante este período, se espera que los perfiles de resistividad eléctrica muestren valores notablemente bajos (representados típicamente con colores azules a verdes en la escala de interpretación), como efectivamente se corroboró en los perfiles ERT. Los valores de resistividad $\leq 30 \Omega \cdot m$ confirman la presencia de suelos subsaturados y la acumulación de agua en el subsuelo, validando que la expansión superficial observada en el mapa es consistente con una recarga hídrica activa y una alta capacidad de almacenamiento en la zona radicular y por debajo de ella.

Figura 37

Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (agosto 2023)

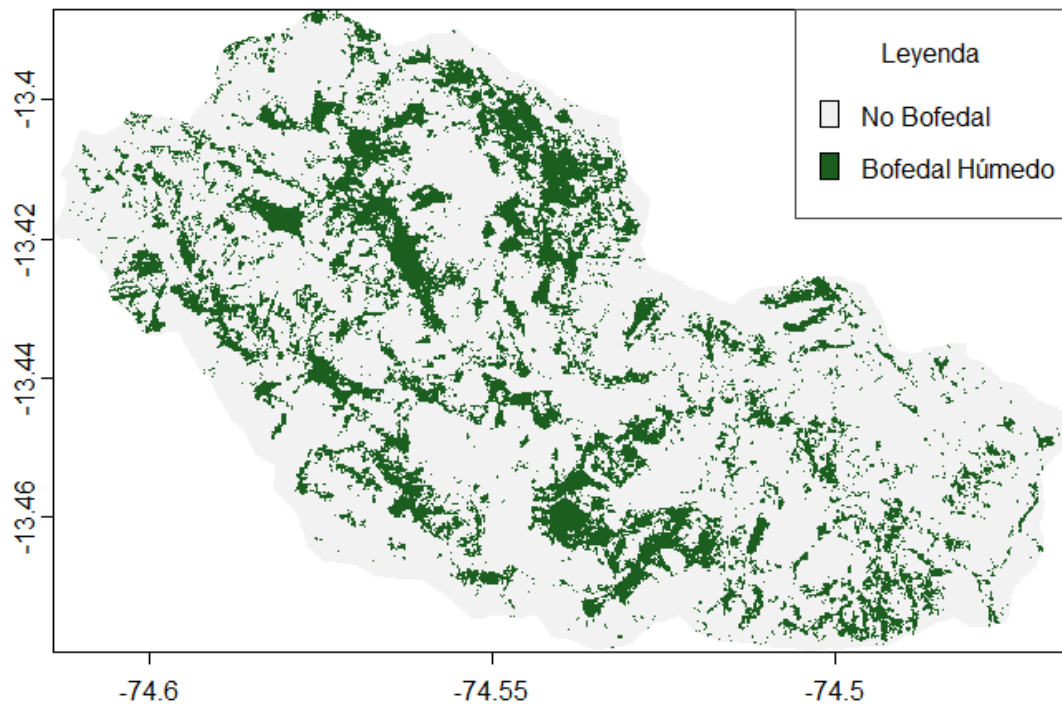


Nota: El mapa muestra la clasificación de bofedales húmedos en la microcuenca de Chikllarazu para agosto de 2023, que es la temporada seca. Se distinguen dos categorías: área desprovista de bofedal y bofedales húmedos.

El análisis de la Figura 37, correspondiente a agosto de 2023 (temporada seca), revela una drástica reducción y fragmentación de la superficie de bofedales húmedos en la microcuenca Chikllarazu. Esta contracción deja los bofedales reducidos a pequeñas y aisladas parcelas, lo cual constituye la expresión espacial de la marcada estacionalidad hídrica que define a estos ecosistemas altoandinos. Esta fragmentación no es solo un fenómeno visual; implica una pérdida crítica de la funcionalidad hidrológica integral del sistema. Durante este período, la capacidad de los bofedales para regular el flujo hídrico y sostener la biodiversidad se ve severamente comprometida. El patrón observado es coherente con los valores mínimos registrados por el índice NDII para los meses de julio y agosto, confirmando que este es el período de mayor estrés hídrico.

Figura 38

Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (diciembre 2023)

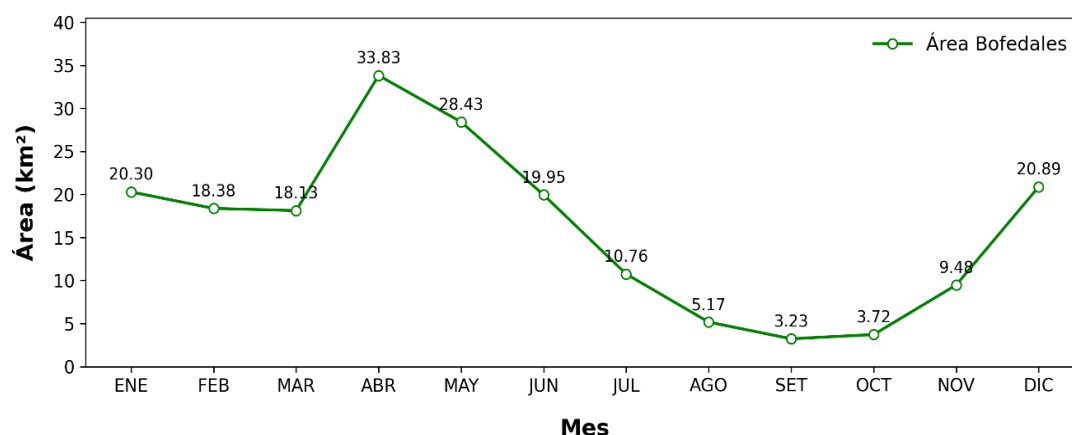


Nota: El mapa muestra la distribución de los bofedales húmedos en la microcuenca Chikllarazu en diciembre de 2023, que es el inicio del período de lluvias.

La Figura 38, correspondiente a diciembre de 2023, evidencia una recuperación significativa en la cobertura y estado hídrico de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu. Esta expansión y saturación de los bofedales húmedos se atribuye directamente al inicio de la estación de lluvias, la cual genera una recarga directa por precipitación y contribuye a la escorrentía superficial que inunda estas áreas. Este patrón estacional es crucial para el ciclo hidrológico local, ya que demuestra la función de los bofedales como ecosistemas de amortiguación y almacenamiento. Durante este período, los bofedales actúan como esponjas naturales, captando y reteniendo el excedente de agua lluvia. Este proceso no solo revitaliza la biomasa vegetal (reflejada en un NDVI más alto), sino que también recarga los acuíferos subsuperficiales, tal como lo sugieren los perfiles de tomografía eléctrica (ERT) que mostraron zonas de baja resistividad.

Figura 39

Evolución mensual del área de bofedales en la microcuenca Chikllarazu (2023)



Nota: El gráfico ilustra cómo cambió el área de bofedales de forma mensual en la microcuenca Chikllarazu a lo largo del año 2023.

Tabla 27

Área mensual de bofedales en la microcuenca Chikllarazu (2023)

Mes	Área (km²)
ENE	20.3
FEB	18.38
MAR	18.13
ABR	33.83
MAY	28.43
JUN	19.95
JUL	10.76
AGO	5.17
SET	3.23
OCT	3.72
NOV	9.48
DIC	20.89

Nota: La tabla muestra las áreas de bofedales de forma mensual para la microcuenca Chikllarazu y el año 2023.

Los resultados obtenidos de la Figura 39 y la Tabla 26 se dice que la superficie de los bofedales durante el mes de enero refleja un total de 20.30 km² el cual fue alcanzado a un máximo en los meses de abril, según la investigación doméstica, a

33.83 km². Un descenso progresivo fue documentado durante los meses secos. En el mes de septiembre, fue reportado el ‘mínimo’ a 3.23 km². A finales de noviembre, la superficie aumentaba a 20.89 km²; a finales de diciembre, la superficie aumentaba a 20.89 km², precipitando el cerrojo de los bofedales. Esto los relaciona directamente a la estacionalidad de las lluvias.

Tabla 28

Matriz de tasa de cambio mensual del área de bofedales (2023)

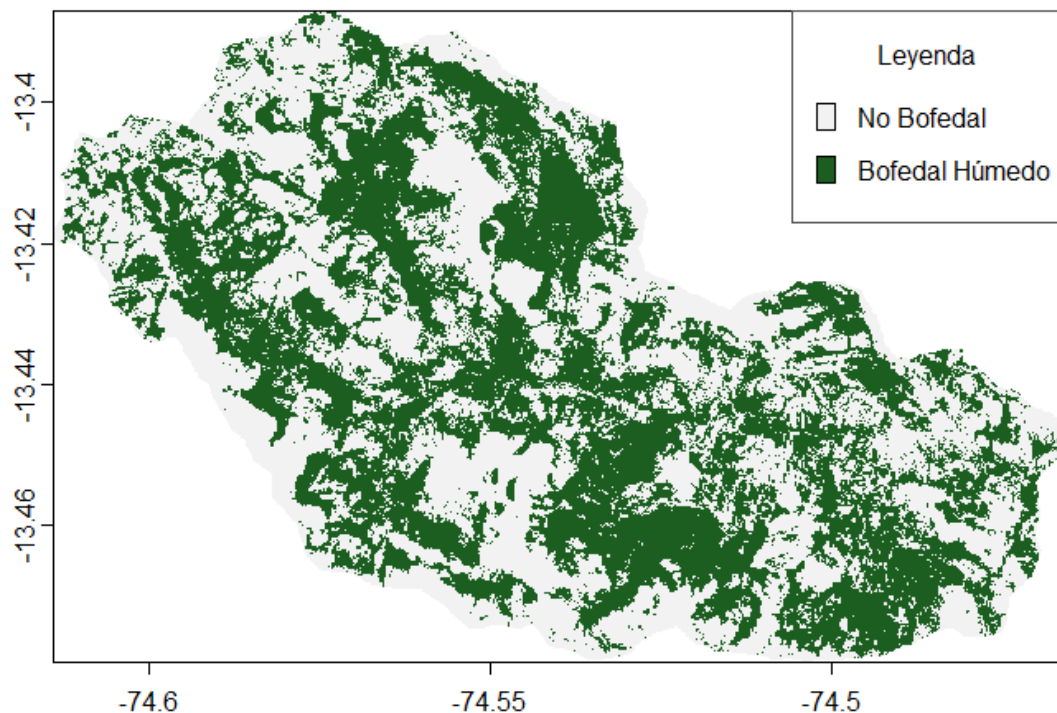
		Meses											
meses		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Meses	ENE		-9.46	-5.5	18.6	8.79	-0.35	-10.0	-17.7	-20.5	-17.1	-7.33	0.26
	FEB	10.45		-1.36	35.6	15.5	2.07	-10.1	-19.0	-22	-18.1	-7.09	1.29
	MAR	5.82	1.38		86.6	25.2	3.24	-12.2	-22.1	-24.9	-20.3	-7.7	1.59
	ABR	-15.6	-26.3	-46.4		-15.9	-23.2	-31.7	-37.4	-37.4	-30.7	-16.6	-5.85
	MAY	-8.08	-13.5	-20.1	18.99		-29.8	-38.4	-43.3	-41.9	-33.4	-16.7	-4.31
	JUN	0.35	-2.03	-3.14	30.2	42.5		-46.0	-49.0	-45.5	-34.2	-13.8	0.77
	JUL	11.2	11.3	13.9	46.5	62.5	85.4		-51.9	-45.2	-29.8	-3.12	14.2
	AGO	21.5	23.5	28.5	59.9	76.5	96.4	108		-37.5	-15.1	22.4	41.7
	SET	25.8	28.2	33.3	59.9	72.2	83.4	82.5	60.0		15.1	71.32	86.31
	OCT	20.7	22.1	25.3	44.48	50.19	52.18	42.48	17.89	-13.1		154.8	137
	NOV	7.91	7.63	8.44	19.93	20.09	16.05	3.22	-18.3	-41.6	-60.7		120.4
	DIC	-0.26	-1.27	-1.56	6.21	4.5	-0.76	-12.4	-29.4	-46.3	-57.8	-54.6	

Nota: La figura muestra la relación de las áreas clasificadas de acuerdo con valores de NDII y sus categorías de uso para el año 2023 en la microcuenca Chikllarazu.

Según la Tabla 27 se ilustra que los contrastes mensuales en la dinámica de los bofedales. Las ganancias más pronunciadas ocurrieron en abril y mayo. En contraste, las pérdidas más pronunciadas ocurrieron en agosto y septiembre. Estos cambios ilustran hasta qué punto la disponibilidad de agua condiciona el ciclo de expansión y contracción de los bofedales, lo cual se puede evidenciar en la matriz donde los colores verdes definen la ganancia en esos meses del año y los rojos pérdidas además la intensidad de estos colores definirá si es en gran medida o en poca.

Figura 40

Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (29 de marzo de 2025)

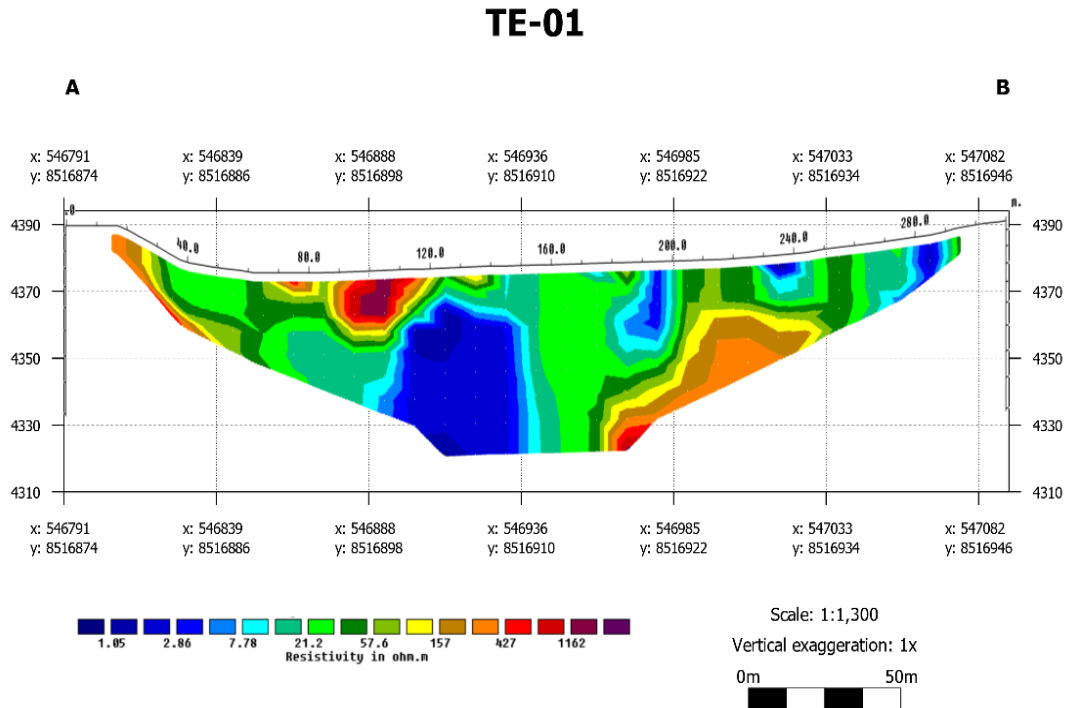


Nota: Para el 29 de marzo de 2025, en el mapa se puede observar la clasificación de la cobertura de los bofedales húmedos en la microcuenca Chikllarazu.

La Figura 40, correspondiente al 29 de marzo de 2025, confirma la presencia extensa y continua de los bofedales húmedos en la microcuenca Chikllarazu. Esta condición coincide con el período inmediatamente posterior al pico de la temporada de lluvias, momento en el cual los bofedales han alcanzado su máxima capacidad de almacenamiento de agua superficial y subsuperficial. La amplia cobertura observada en esta fecha es de suma importancia hidrológica, ya que representa el estado óptimo del sistema para los procesos de infiltración y recarga. Los suelos saturados permiten que el excedente de agua percole hacia los acuíferos, recargando las reservas subterráneas que sustentarán el flujo base de los cursos de agua durante la estación seca. Este patrón es consistente con los bajos valores de resistividad ($\leq 30 \Omega \cdot m$) identificados mediante los perfiles de Tomografía Eléctrica (ERT), los cuales confirman la saturación del subsuelo.

Figura 41

Clasificación ETR TE-01 geofísica (2025)



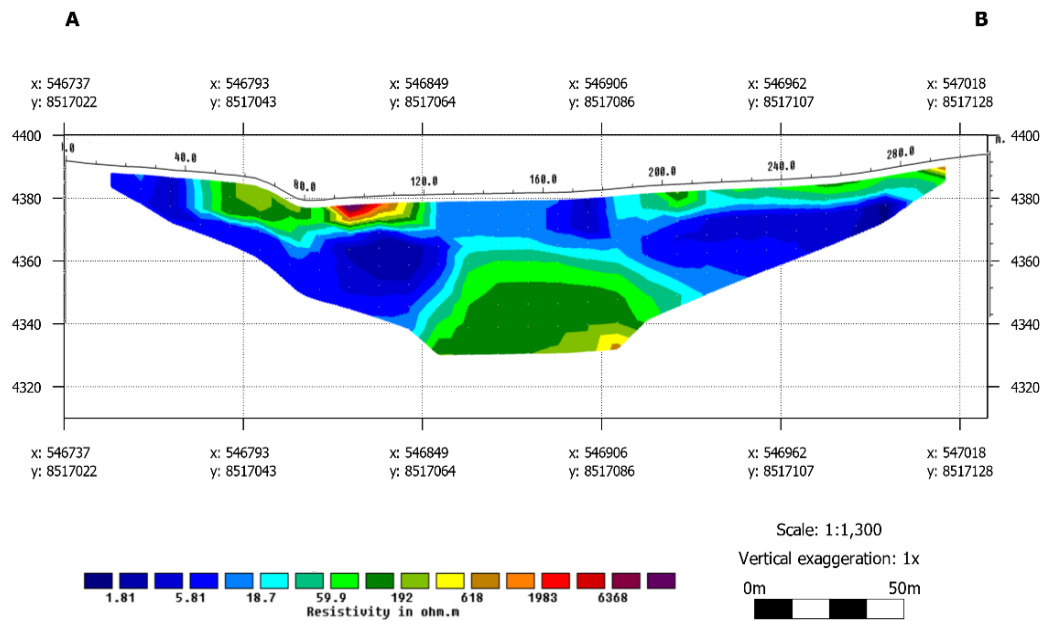
Nota: El perfil geofísico TE-01 ilustra la distribución de resistividades ($\Omega \cdot m$) en una sección transversal de la microcuenca Chikllarazu para la temporada seca de 2025.

Según la Figura 41 del perfil de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) TE-01 revela la estructura subsuperficial de la microcuenca durante la temporada seca de 2025. Los valores de resistividad inferiores a $30 \Omega \cdot m$ (tonos azules a verdes) se interpretan como zonas saturadas de agua, asociadas a la presencia de turba húmeda y sedimentos finos con alta porosidad. Estas áreas confirman la existencia de reservorios subsuperficiales de agua, fundamentales para el mantenimiento de los bofedales incluso en condiciones de estiaje. Por otro lado, los valores superiores a $100 \Omega \cdot m$ (tonos anaranjados a rojos) corresponden a materiales no saturados, como suelos secos o rocas fracturadas de baja conductividad hidráulica, que limitan el almacenamiento y flujo hídrico. La identificación de estos cuerpos saturados embebidos en la matriz orgánica de los bofedales corrobora su función como zonas prioritarias de recarga y almacenamiento de acuíferos, validando que, más allá de la retención superficial observada en imágenes satelitales, los bofedales operan como infraestructuras naturales críticas para la regulación hídrica en la microcuenca. Este comportamiento explica su capacidad para sustentar el flujo base durante períodos de escasa precipitación, resaltando su relevancia para la seguridad hídrica en ecosistemas altoandinos.

Figura 42

Clasificación ETR TE-02 geofísica (2025)

TE-02

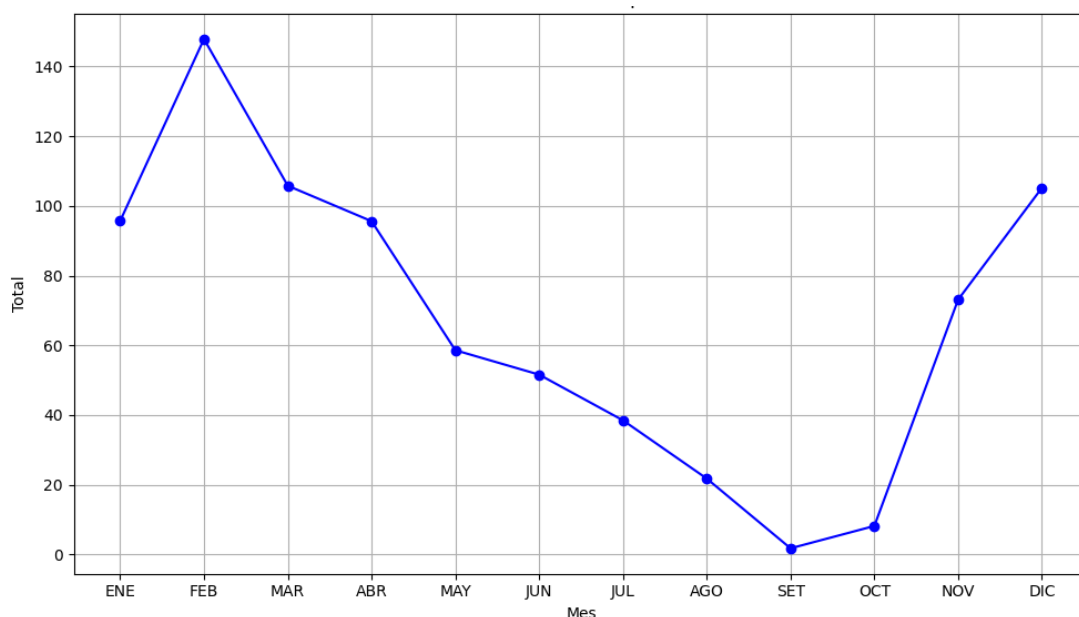


Nota: El perfil geofísico TE-02 representa la distribución de resistividades ($\Omega \cdot m$) a lo largo de una sección transversal de la microcuenca Chikllarazu durante la temporada seca de 2025.

Según la Figura 42 el transecto TE-02 donde al analizar otra sección estratégica de la microcuenca. Los resultados confirman un patrón hidrológico coherente: los valores de resistividad inferiores a $30 \Omega \cdot m$ (representados en tonos azules a verdes) se asocian a zonas saturadas de agua, donde la presencia de turba húmeda y sedimentos finos favorece la acumulación de agua subterránea. Por el contrario, los valores superiores a $100 \Omega \cdot m$ (tonos amarillos a rojos) corresponden a materiales no saturados, como suelos secos o sustratos rocosos con baja conductividad hidráulica, que limitan el almacenamiento y flujo hídrico. La distribución espacial de estas zonas saturadas en el perfil TE-02 refuerza la hipótesis central del estudio: los bofedales no solo actúan como almacenadores superficiales de agua, sino que también funcionan como estructuras subsuperficiales clave para la recarga de acuíferos. Esta capacidad de retener y redistribuir agua en profundidad explica su rol crítico en el mantenimiento del flujo base durante la estación seca, sustentando la resiliencia hídrica de la microcuenca.

Figura 43

Gráfico de tendencia de precipitación mensual para el año 2023



Nota: Gráfico de tendencia de precipitación mensual para el año 2023 donde los meses de poca precipitación son de setiembre y octubre para la estación meteorológica Cuchoquesera.

En la figura 43 la tendencia de precipitación mensual para el año 2023 en la estación meteorológica de Cuchoquesera. Se ve la notable estacionalidad en el régimen de lluvias, setiembre y octubre bajos niveles de precipitación que confirman un período de estiaje definido. Esta sequía estacional se encuentra de forma temporal con la pérdida mínima de la cobertura hidratada de los bofedales detectados por NDII. La evidencia es entonces bastante directa, mostrando una relación evidente entre la lluvia disponible y la salud superficial de estos bofedales.

2.8 Discusiones

Esta investigación, basada en la delimitación de áreas de bofedales en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes de Sentinel-2 y clasificación supervisada (Random Forest), tuvo como objetivo construir mapas confiables para apoyar el análisis hidrológico. La clasificación estacional (húmeda y seca, 2025) logró puntajes Kappa entre 0.922 y 0.965 con errores de omisión < 8%. Un total de 20.11 km² de bofedales fueron mapeados en la temporada húmeda y 19.43 km² en la temporada seca (13.04 km² permanentes y 6.39 km² estacionales), dentro de una microcuenca de 85.42 km². Estos valores indican que los bofedales se localizan en fondos planos y depresiones con drenaje convergente; la ligera reducción durante la temporada seca se debe a la caída estacional del nivel freático, mientras que la estabilidad relativa total del área sugiere una persistencia funcional para el

almacenamiento de agua y liberación gradual. La alta precisión valida que el límite es lo suficientemente robusto como para ser integrado en balances y modelos. La precisión alcanzada, junto con la coherencia espacial de los polígonos, conduce al rechazo de la hipótesis nula y a la aceptación de la hipótesis específica 1: la delimitación primaria de los bofedales es necesaria para comprender su papel en la recarga hidrológica en Chikllarazu. La coincidencia previa con García et al. (2016), quienes combinaron NDWI/NDVI/NDII y pendiente para delimitar bofedales en Chillón con 96% de precisión sobre 18.63 km², y con Chávez (2015), quien mapeó 14,500 ha en la cuenca alta del Cachi usando Landsat+DEM. Huaraca et al. (2025), por ejemplo, muestran que el uso de datos de radar de sentinel-1 y sentinel-2 y datos multiespectrales aumenta la detección en áreas nubladas. Además, Torrejón (2023) enfatiza la importancia del umbral espectral y la validación de la matriz de confusión. En general, la literatura respalda que una delimitación validada en campo y de múltiples fuentes proporciona una base sólida para evaluar los servicios hidrológicos de los bofedales de alta montaña andina. En consecuencia, los mapas producidos deben ser adoptados y utilizados como línea de base y actualizados cada 6 meses (húmedo/seco) utilizando capas SAR para reducir la cobertura de nubes y reglas de posprocesamiento que eliminen las detecciones erróneas y mejoren la auditabilidad en la toma de decisiones para acciones de gestión.

Analizar la variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, considerando los cambios estacionales y anuales para el período de 2016 a 2025. Los bofedales permanentes disminuyeron de 8.90 km² (2016) a 6.69 km² (2024) y se recuperaron a 8.73 km² (2025). Las tasas de cambio más negativas se concentraron en 2016–2018 y 2022–2024; el patrón espacial fue fragmentado en años secos. La validación anual reportó Kappa de 0.86 a 0.95. La trayectoria indica sensibilidad a la variabilidad climática (precipitaciones y temperatura) y presiones antrópicas, pero también resiliencia hidrológica en 2025, cuando una mayor disponibilidad de agua apoyó la reconexión de parches. Los cambios en la extensión y continuidad interrumpen la regulación del caudal base y la retención de humedad en el suelo. La hipótesis específica 2 también está respaldada: los cambios espacio-temporales en la cobertura de los bofedales afectan directamente la disponibilidad de agua en la microcuenca. Los hallazgos son coherentes con Gonzales (2024), quien encontró variabilidad interanual en el NDVI del bofedal (1990–2024) vinculada a las precipitaciones y temperatura, con Pamo & Oscco (2022) que reportaron una tasa anual de -0.42% en Ancomarca, y con Chavez (2015) que documentó pérdidas multi-

anuales en la cuenca alta del Cachi. Según Torrejon (2023) y Huaraca et al. (2025), la integración de datos de Sentinel-1 y Sentinel-2 mejora la detección de pulsos estacionales y su asociación con los factores climáticos. Para fines de gestión, los autores abogan por monitoreo interanual con ventanas fijas (agosto-septiembre para seco, marzo-abril para húmedo y uso complementario de MNDWI/NDII para humedad superficial y el reporte de continuidad espacial como un indicador temprano de riesgo hidrológico potencial.

Evaluación de la capacidad de los bofedales para contribuir a la recarga de agua subterránea de la microcuenca a través de la cobertura espacial y el contenido de humedad. En el año 2023, el área de bofedales húmedos donde con Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDII) alcanzó un máximo de 33.83 km² en abril y un mínimo de 3.23 km² en septiembre. Los perfiles de ERT (TE-01 y TE-02) indicaron zonas de baja resistividad ($\leq 30 \Omega \cdot m$) debajo de parches de bofedales, lo que indica saturación y almacenamiento potencial en superficie y subsuperficie; la correspondencia espacial de NDII-ERT fue muy alta en valles y altitudes bajas. La expansión estacional de áreas con alto NDII y la conductividad evidencian el papel de los bofedales como 'esponjas' que capturan y liberan gradualmente aguas de la lluvia, sosteniendo el flujo para la recarga del acuífero y durante períodos secos. Considerando la consistencia del NDII-ERT espacial, las observaciones geofísicas apoyan la hipótesis 3 de este estudio: la capacidad de almacenamiento de los bofedales es vital para sostener los flujos de la microcuenca. Estas conclusiones apoyan los hallazgos de Marcatoma (2023) sobre la fuerte correlación entre NDWI y humedad gravimétrica de Apacheta y Moncada et al. (2018) que utilizaron radar Sentinel-1 (índice delta VV/VH) para mapear la humedad estacional, y en conjunto con Moreira et al. (2021) donde ERT y conductividad hidráulica mostraron recarga localizada en bofedales interiores. Usman et al. (2025) demuestran que el MNDWI integrado con LiDAR puede estimar niveles en volúmenes; esta metodología debería adaptarse para determinar el almacenamiento efectivo. Proponer un indicador de recarga hídrica en bofedales. Este índice, relacionado con la precipitación mensual, permitiría una selección a priori de bofedales para la conservación, captación de agua y estimación de recarga, así como evaluación de restauración de bofedales altoandinos.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Conclusiones

1. Respecto a los resultados encontrados a partir del análisis mediante imágenes satelitales y evaluación in situ en la microcuenca Chikllarazu, se determinó que los bofedales en su cabecera juegan un papel fundamental y significativo en la recarga hídrica, regulando eficazmente el flujo de agua y garantizando la sostenibilidad del recurso a largo plazo. El empleo de imágenes satelitales permitió analizar y correlacionar la extensión a largo de una serie temporal de 10 años y estado de estos humedales con la disponibilidad hídrica en la microcuenca a través de ERT.
2. Los resultados obtenidos a partir de 200 puntos de clasificación geofrenciada y supervisada mediante el algoritmo Random Forest aplicado a imágenes Sentinel-2 indican que la cobertura del bofedal en la microcuenca Chikllarazu tiene una alta precisión de su delimitación, con 20.11 km² y 19.43 km² en húmeda y seca, respectivamente. Este hecho está justificado por los índices Kappa de 0.922 y 0.965, errores de omisión $\leq 8\%$. La precisión en la identificación de bofedales permite detectar la presencia de bofedales permanentes y estacionales, cuyas dinámicas estacionales prueban la significativa contribución de los bofedales en la recarga hídrica de la microcuenca, regulando el flujo de agua entre estación y estación y garantizando la sostenibilidad del recurso hídrico a largo plazo.
3. En relación a los hallazgos obtenidos en el análisis de series temporales de imágenes satelitales entre 2016 y 2025, la variación espaciotemporal de la cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu influye significativa y directamente en la disponibilidad hídrica. Los resultados de este análisis muestran una disminución de la cobertura presente entre 2016 y 2025, la cual presenta un retroceso desde 8.90 km² en 2016 a 6.69 km² en 2024 con una tasa de cambio negativa de -23.4% entre 2024 y 2025; sin embargo, se observa una recuperación para 2025, la cobertura alcanzó los 8.73 km², lo que representa una tasa de cambio positiva del 30.49% entre 2024 y 2025, soportada con validaciones anuales la cual arrojó valores Kappa entre 0.86 y 0.95. Esta variabilidad está claramente asociada al fenómeno de sequía debido a las extremas duraciones observadas, mientras que la

recuperación observada en 2025 evidencia la resiliencia de estos ecosistemas ante condiciones propicias.

4. Los resultados del análisis del NDII mensual en 2023 y las mediciones de los perfiles ERT TE-01 y TE-02 determinaron que los bofedales en Chikllarazu tienen una capacidad significativa para recargar y almacenar agua superficial y subsuperficial. Durante el año, hubo una variación estacional en cobertura húmeda con un máximo de 33.83 km² en abril y un mínimo de 3.23 km² en septiembre. Además, los valores de resistividad baja $\leq 30 \Omega \cdot m$, demostraron la presencia espacial de zonas saturadas en la subsuperficie. Como los índices de NDII y los valores de ERT corresponden espacial y temporalmente, se concluyó que la capacidad de almacenamiento de bofedales es crucial para mantener el caudal base de Chikllarazu.

3.2 Recomendaciones

1. La documentación formal del reconocimiento de los bofedales como infraestructura natural para la seguridad hídrica debe realizarse conjuntamente con las autoridades locales, así como con las comunidades regionales y campesinas. Esto implica su incorporación en los planes de manejo de cuencas, la asignación de fondos específicos para su monitoreo, conservación y restauración. También se recomienda complementar la investigación que utilice teledetección, modelado hidrológico y participación comunitaria para sostener el recurso hídrico a lo largo de períodos prolongados.
2. El uso de imágenes satelitales de mejores resoluciones y actualizadas, complementadas con verificaciones de campo, permitirá un monitoreo sistemático y actualizaciones a mitad de año (períodos húmedos y secos). Esto ayudará a mantener los mapas de bofedales actualizados y proteger su uso en la planificación hidrológica. También existe la necesidad de capacitar a las comunidades locales y a los gobiernos municipales en la aplicación de estas herramientas de toma de decisiones.
3. Teniendo en cuenta que la superficie de los bofedales pasó de 8.90 km² en 2016 a 6.69 km² en 2024, se sugiere que se implementen programas de conservación y restauración ecológica. En este sentido, se sugiere en particular: manejo de sobrepastoreo, establecimiento de zonas de exclusión temporal y fomento a la revegetación con especies nativas higrófilas. Esto, en

conjunto, permitirá una menor fragmentación de los bofedales, además de aumentar su resiliencia a la variación climática.

4. Es recomendable desarrollar proyectos piloto de gestión sobre recarga artificial y la restauración del ciclo hidrológico dentro de los bofedales identificados con la mayor capacidad de almacenamiento ($NDII > 0.02$ y resistividades $\leq 30 \Omega \cdot m$). Esto podría incluir micro reservorios, trincheras de infiltración y bofedales artificiales complementarios. Además, se deben integrar datos geofísicos (ERT) o recolectar datos meteorológicos para poder estimar el volumen de aporte en esta microcuenca.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Adauto M. E., & Willems B. L. (2014). Estudio de la evolución del ecosistema de bofedales de la cabecera de las cuencas Pisco y Pampas (Huancavelica) empleando imágenes TM y OLI. *Ministerio del Ambiente, Dirección General de Investigación e Información Ambiental*.
- AGRECOL. (2019). Protegiendo nuestras áreas de recarga hídrica y fuentes de agua. *Fundación AGRECOL andes, Boletín temático*. <https://agrecolandes.org/wp-content/uploads/2020/01/boletin-recarga-h%C3%ADdrica-misereor-y-solidagro.pdf>
- Amstein, S. (2017). Los humedales y su protección en el Derecho Internacional. *Revista de Derecho Ambiental*, 7, 114. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2017.46451>
- Ariza, F., Rodríguez, J., & Alba, V. (2018). Control estricto de matrices de confusión por medio de distribuciones multinomiales. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 215-226. <https://doi.org/10.21138/GF.591>
- Baiker, J. (2019). *El rol de los bofedales en las cabeceras de cuenca (alto)andinas del río Mariño – Apurímac | Bosques Andinos*. <https://www.bosquesandinos.org/el-rol-de-los-bofedales-en-las-cabeceras-de-cuenca-altoandinas-del-rio-marino-apurimac/>
- Borrás, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, 48, 55. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133>
- Calvo, V. (2016). *Marco conceptual y metodológico para estimar el estado de salud de bofedales en alta montaña*. Universidad Nacional Agraria la Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12390/2017>
- Castro, M. (2011). *Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos: La experiencia en Oña-Nabón-Saraguro-Yacuambi y el Frente Suroccidental de Tungurahua* (Unidad de Economía - EcoCiencia, Ed.; Vol. 1). EcoCiencia, Wetlands

International, Ministerio del Ambiente, Mancomunidad del Bosque Protector.

Chávez, D. (2010). *Conceptos y Técnicas de recolección de datos en la investigación jurídico social*.

Chávez, R. (2015). *Inventario y variación multianual de bofedales en la cuenca alta del río Cachi, 2003 al 2013*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2249>

Cifuentes, J., Ochoa, W., del Cid, M., Carias, O., Barrera, A., Corzantes, K., & Estupinian, G. (2023). *Ingeniería del agua: Recarga de acuíferos gestionada* (Vol. 3).

CityAdapt. (2022). *Infografía: Reforestación de cuencas hidrográficas*. CityAdapt. https://cityadapt.com/sbn_cityadapt/reforestacion-de-cuencas-hidrograficas/

Cooperación para el Proceso de Autodesarrollo Sostenible de Arequipa (COPASA). (2021). *Guía 8: Manejo de bofedales e instalación de cercos* (Primera edición., Trad.). <https://www.gob.pe/institucion/copasa/informes-publicaciones/4910875-guia-n-8-manejo-de-bofedales-e-instalacion-de-cercos>

Córdova, L. (2024). *Metodología para la identificación del contenido de humedad en muro de tranques de relaves basado en la técnica de tomografía eléctrica* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/200635/Metodologia-para-la-identificacion-del-contenido-de-humedad-en-muro-de-tranques-de-relaves-basado-en-la-tecnica-de-tomografia-electrica.pdf?sequence=1>

Corzantes, K., Ochoa, W., & Carias, O. (2023). *Water engineering Ingeniería del agua* (Recarga de acuífero..., Vol. 3). https://www.researchgate.net/publication/371286762_Libro_Recarga_de_Acuiferos_Gestionada

- EOS DATA ANALYTICS. (s. f.). *Fórmula de índice, rango de valores y usos en la agricultura*. Recuperado 27 de junio de 2025, de https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/?utm_source=chatgpt.com
- Flores, V. (2017). *Predicción de bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo a través del tratamiento de imágenes satelitales*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Foster, M., Chen, D., & Kieser, M. (2020). *Restauración y protección de humedales altoandinos*. CUBHIC. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2020/03/CUBHIC-Restauraci%C3%B3n-y-Protecci%C3%B3n-de-humedales-Altoandinos.pdf>
- Fuentealba, B. (2019). *Bofedales: características y su importancia frente al cambio climático*. INAGEM.
- Gallardo, E. (2017). *Metodología de la investigación*. Manual autoformativo interactivo. Universidad Continental.
- García, J., & Willems, B. (2015). *Metodología para el Estudio 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. : Avances. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB*. <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1122.pdf>
- García, J., Willems, B., & Espinoza, R. (2016). *Mapeo de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Mediante Imágenes de los Satélites Landsat*. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 1. <https://doi.org/10.36580/rgem.i1.81-97>
- Geoinnova. (s. f.). *La teledetección y los humedales*.
- Gilabert, M., González, J., & García, J. (1997). *Acerca de los Índices de Vegetación*. https://www.aet.org.es/revistas/revista8/AET8_4.pdf

- Gomez, S. (2015). *Hidrogeología en bofedales alto andinos con fines de aprovechamiento hídrico en la comunidad Rosaspata Vinchos - Ayacucho 2015*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- González, P. (2015). *Diversidad de asteráceas en los humedales altoandinos del Perú*. https://www.researchgate.net/profile/Paul-Gonzales-2/publication/284551638_DIVERSIDAD_DE_ASTERACEAS_EN_LOS_HUMEDALES_ALTOANDINOS_DEL_PERU/links/5654db1d08aefe619b1a2c60/DIVERSIDAD-DE-ASTERACEAS-EN-LOS-HUMEDALES-ALTOANDINOS-DEL-PERU.pdf
- Gonzales, R. (2024). *Determinación de la dinámica de cambio de los bofedales altoandinos empleando imágenes satelitales en la cuenca del río Huenque en el periodo (1990 – 2024)*. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22804>
- González, W. (2011). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá [CATIEC]*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2932>
- HelpGIS. (s. f.). *Teledetección*. Recuperado 26 de junio de 2025, de <https://helpgis.com/fundamentos-de-teledeteccion/>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (McGraw-Hill., Ed.; 5.ª ed.).
- Huanca, N. M. (2012). *Evaluación de la condición vegetal de tres bofedales altoandinos en época seca de la cuenca alta de llave – Puno 2009*. Universidad Nacional del Altiplano. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4043>
- Huaraca, L., Bourrel, L., Zapata-Ríos, X., Páez-Bimos, S., Lahuate, B., Galeas, R., Fuentes, P., & Frappart, F. (2025). *Multitemporal Monitoring of Ecuadorian Andean High Wetlands Using Radar and Multispectral Remote Sensing*. *Water*, 17(11), 1637. <https://doi.org/10.3390/w17111637>
- Ingeoexpert. (2024). *¿Qué es la teledetección?* Ingeoexpert.

Instituto Geográfico Nacional. (2024). *Teledetección*.

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2023). *Memoria Descriptiva del Inventario Nacional de Bofedales del Perú 2023*. INAIGEM. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/466>

Jara, C. A. (2022). *Estudio integral de humedales altoandinos (andean peatlands) con Teledetección y SIG*. Universitat de València, Facultad de Física, Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica.

Lorini, H. (2014). *Estrategia de adaptación al cambio climático para humedales altoandinos*.

Landis, JR y Koch, GG (1977) *Aplicación de la estadística jerárquica de tipo kappa en la evaluación de la concordancia mayoritaria entre múltiples observadores*. Biometrics, 33, 363-374.

<https://doi.org/10.2307/2529786>

Maldonado Fonkén, M. (2010). *Legislación ambiental en Perú: Bofedales como ecosistemas frágiles*. Ley General del Ambiente del Perú.

Maldonado, M. (2010). *Comportamiento de la vegetación de bofedales influenciados por actividades antrópicas*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Maldonado, M. (2018). *Dinámica espacio temporal de la flora de bofedales en Ayacucho y Huancavelica 2010-2012*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Mamani, Y. (2024). *Análisis multitemporal de bofedales y su relación con la variabilidad climática en la microcuenca de Potojani Grande, período 2003 - 2023*. Puno, Perú.
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22286>

Marcatoma, E. (2023). *Relación de la humedad de suelo con el índice de agua y vegetación de los bofedales altoandinos de la Microcuenca - Apacheta, Ayacucho 2017*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
<https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/6129>

- Marrero, C. (2021). *Conociendo los Humedales: Guía de actividades, lecturas y ejercicios para principiantes*. <http://libreria.unellez.edu.ve/wp-content/uploads/2021/11/Conociendo-los-humedales.-Guia-de-actividades-lecturas-y-ejercicios-principales-Crispulo-Marrero.pdf>
- Martínez, A. M. (2013). *Diseño de investigación. Principios teórico-metodológicos y prácticos para su concreción*. Anuario Escuela de Archivología IV 2012-2013, Universidad Nacional de Córdoba.
- Martínez, J., & Martín, P. (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*.
- Mas Monsonis, M. (2017). *Uso de la teledetección y los SIG en la vigilancia de la calidad del agua: aplicación al Mar Menor*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, 1.
- Mendoza, W., Cano, A., Roque, J., La Torre, M. I., Navarro, E., Gonzáles, P., Delgado, A., Castillo, S., Trujillo, D., Ramírez, D., Trinidad, H., & Valencia, N. (2024). *Guía de las plantas de los bofedales del Perú* (Fondo Editorial de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, Ed.; primera, Vol. 1).
- MINAM. (2019). *Guía de Evaluación del Estado del Ecosistema de Bofedal*. Ministerio del Ambiente, 1.
- Mollocco, A. C. (2023). *Estudio de tomografía eléctrica y sondaje eléctrico vertical para la identificación de acuíferos en las comunidades de Puquis, Requena y Jasana, Huancane - Puno* [Universidad Nacional de San Agustín]. <https://hdl.handle.net/20.500.12773/17442>
- Moncada, W. (2021). *Análisis del balance de masa para la evaluación del régimen hidrológico empleando técnicas de teledetección satelital y modelos hidrológicos – Caso estudio: Cabecera de la cuenca Cachi-*

Apacheta, Región Ayacucho. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Unidad de Posgrado.

Moncada, W., Pereda, A., & Lagos, M. (2018). *Caracterización de la dinámica espacial de humedales en la cabecera de cuenca Cachi - Apacheta, Región Ayacucho, mediante el uso de imágenes de radar Sentinel 1 A*. *Investigación*, 26(1), 173-183. <https://doi.org/10.51440/UNSCH.REVISTAINVESTIGACION.2018.1.74>

Moreira, C. A., Rosolen, V., Furlan, L. M., Bovi, R. C., & Masquelin, H. (2021). *Hydraulic conductivity and geophysics (ERT) to assess the aquifer recharge capacity of an inland wetland in the Brazilian Savanna*. *Environmental Challenges*, 5. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100274>

Moyota, P. (2015). *Caracterización ecológica de los bofedales, como habitat vital de las Vicuñas en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo con la aplicación de herramientas de SIG y teledetección*. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4102>

Municipalidad Distrital de Chuschi. (2019). *Mejoramiento del servicio de transitabilidad vehicular y peatonal en las calles del centro poblado de Quispillaccta del distrito de Chuschi, provincia de Cangallo - Ayacucho*.

Najarro, R. (2020). *En tiempos de cambio climático: Relación agua-hombre en localidades altoandinas de Paras y Chuschi, Ayacucho*. *Alteritas. Revista de Estudios Socioculturales Andino Amazónicos*, 9(10).

Ñahui, E. (2021). *Comportamiento y estrategias de conservación del recurso hídrico de bofedales en Callqui Chico, Huancavelica – 2021*. universidad Nacional de Huancavelica.

Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). *Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments*. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074-4089. <https://doi.org/10.1002/HYP.10980;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>

- Oyague, E. (2020). *Peatlands of the Central Andes Puna, South America*. *Wetland Science & Practice*, 37(4), 255-260. <https://doi.org/10.1672/UCRT083-204>
- Pamo, J., & Oscco, C. E. (2022). *Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990 – 2021, con técnicas de teledetección*. *Revista Ciencias Biológicas y Ambientales*, 1(1), 43-53. <https://doi.org/10.33326/29585309.2022.1.1587>
- Quintanilla, Á. (2013). *Aplicación de la tomografía eléctrica en la caracterización del deslizamiento de Doña Mencía* [Universidad de Granada]. https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/20130924_Tomografia_electrica_TFM_GEOMET_AQB.pdf
- Quirós, M. (2011). *Tecnologías de la Información Geográfica (TIG): Cartografía, Fotointerpretación, Teledetección y SIG* (Ediciones Universidad de Salamanca, Ed.; 1.ª ed.).
- Quispe, S. (2021). *Aplicaciones del ensayo de tomografía eléctrica a problemas de la ingeniería geotécnica en la minería | Rumbo Minero*. *Rubro minero internacional*. <https://www.rumbominero.com/revista/articulos-tecnicos/aplicaciones-del-ensayo-de-tomografia-electrica-problemas-de-la-ingenieria-geotecnica-en-la-mineria/>
- Ramírez, E. (2008). *Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto*. *Revista virtual REDESMA*, 2(3), 49-61.
- RAMSAR. (2016). *Introducción a la Convención sobre los Humedales*. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5_ed_introductiontoconvention_s_final.pdf
- Rivas-Martinez, S., & Tovar, Omar. (1982). *Vegetatio Andinae, I: datos sobre las comunidades vegetales altoandinas de los Andes Centrales del Perú*. *Lazaroa*, 4, 167-188. <https://produccioncientifica.ucm.es/documentos/61989cc649d6133331f4f3ea>

- Rocha, O., & Sáez, C. (2003). *Uso pastoril en humedales altoandinos*. Talleres de capacitación para el manejo integrado de los humedales altoandinos de Argentina, Bolivia, Chile y Perú. https://www.researchgate.net/publication/343084037_Uso_pastoril_en_humedales_altoandinos_2003
- Sabino, C. (2007). *El proceso de investigación*. Panapo.
- Sánchez, M. (2019). *Análisis de la deforestación en la cuenca del río Cumbaza mediante el uso de imágenes satelitales desde el año 2008 al 2017*. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- SERNANP. (2020). *Proyecto conservando los humedales altoandinos para la gente y la naturaleza*. Wetlands. <https://biblioteca.cehum.org/bitstream/CEHUM2018/1783/1/Wetlands%20International.%20Proyecto%20Conservando%20los%20Humedales%20Altoandinos%20para%20la%20gente%20y%20la%20naturaleza.pdf>
- Space4Water Portal. (s. f.). *La teledetección en la conservación de la biodiversidad*.
- Talaverano, N., Lora, J., Gómez, W., Escriba, B., Arboleda, Y., Ramos, V., Gallo, H., Zorogastúa, K., & León, R. (2024). *Variación temporal de bofedales andinos utilizando tecnología de información geográfica en el distrito de Uranmarca, Apurímac - Perú*. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 7(3), e71557. <https://doi.org/10.34188/BJAERV7N3-031>
- Torrejón, H. (2023). *Caracterización de humedales utilizando técnicas de teledetección la cuenca del Río Katari, Departamento de La Paz, período 1990-2021*. Universidad Mayor de San Andrés.
- Uriós, G. (1997). *Teledetección aplicada al estudio de humedales*. SEHUMED.
- Usman, M., Chua, L. H. C., Irvine, K. N., & Teang, L. (2025). *Estimating water surface elevation for a wetland using integrated multi-sourced remote sensing data*. *Wetlands Ecology and Management*, 33(1), 20. <https://doi.org/10.1007/s11273-025-10032-9>

Vásquez, M. (2022). *Métodos para determinar la recarga en acuíferos*.

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). *Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua*. *IDESIA*, 38(4), 99-107.

Vivas, D. (2022). *Bofedales: infraestructuras naturales y paisajes andinos*. *ArchDaily*.

Zamora, A. B. (2019). *Servicios ecosistémicos en los humedales costeros del Perú*. Universidad Científica del Sur.
<https://doi.org/10.21142/TB.2020.1374>

ANEXOS

ANEXO A

PANEL FOTOGRAFICO

Figura N°1 Área de estudio delimitada en Google Earth Engine

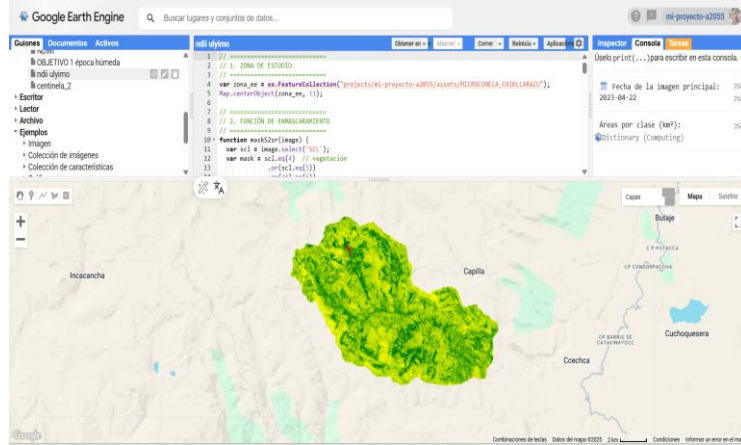


Figura N°2 Vista satelital del área de estudio microcuenca Chikllarazu

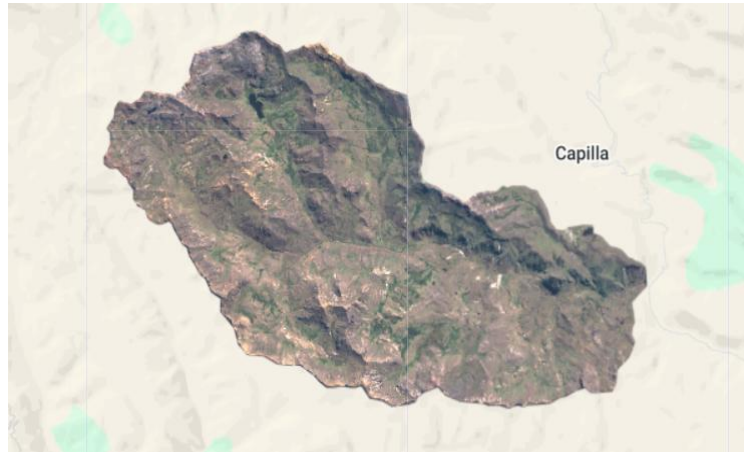


Figura N°3 Valle altoandino de la microcuenca Chikllarazu, observando bofedales.



Figura N°4 Fotografía panorámica de la laguna Yanacochoa



Figura N°5 Sismógrafo SeismeX16/24 con geófonos de 4.5 Hz utilizados en la salida de campo



Figura N°6 Cable de contacto entre percutor (electrodos) y sismógrafo



Figura N°7 Medición con receptor GNSS en campo



Figura N°8 Levantamiento topográfico en zona altoandina de microcuenca Chikllarazu



Figura N°9 Bofedales en la microcuenca Chikllarazu



Figura N°10 Dianas de control terrestre para amarre con puntos de dron e identificación de coberturas



Figura N°11 Levantamiento de coordenadas con equipo GNSS en bofedal de la zona de estudio



Figura N°12 Vista panorámica de la cobertura vegetal y relieve del área de influencia.



Figura N°13 Cabecera de la microcuenca Chikilarazu; se observan bofedales permanentes (*Distichia muscoides*) y estacionales (*Carex spp.*).



Figura N°14 Bofedal estacional/herbáceo con canales de escorrentía superficial.



Figura N°15 Bofedal de cojín con parches de agua libre y microrelieve abombado; dominancia de *Distichia muscoides*



ANEXO B

**SCRIPT PARA EL
PROCESAMIENTO DE DATOS
Y ELABORACIÓN DE MAPAS**

SCRIPT DE GOOGLE EARTH ENGINE PARA OBJETIVO 1

// Cargar el archivo del polígono desde tu asset en GEE

```
var zona_ee = ee.FeatureCollection("projects/mi-proyecto-a2055/assets/BUFFERCHIKLLARAZU");
```

// Obtener la geometría del polígono y centrar el mapa

```
var geometria = zona_ee.geometry();  
Map.centerObject(zona_ee, 9);  
Map.setOptions("SATELLITE");  
Map.addLayer(zona_ee, {"color" : "red"}, "Zona");
```

// Seleccionar la colección de imágenes Sentinel-2 para el año 2025 (de enero a diciembre)

```
var S2_RS = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")  
    .filterDate('2025-06-01', '2025-08-25') // Filtramos para el año 2025  
    .filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 10) //  
    Filtramos por nubes  
    .filterBounds(zona_ee); // Filtramos por la zona de interés  
print(S2_RS);
```

// Imprimir la lista de IDs de las imágenes

```
var ID_S2 = S2_RS.reduceColumns(ee.Reducer.toList(),  
["system:index"]).get("list").getInfo();  
print(ID_S2);
```

// Seleccionar una imagen de Sentinel-2 (puedes cambiar el índice si es necesario)

```
var img_id = ID_S2[1];
```

// Importar la imagen de Sentinel-2

```
var img_S2_clip = ee.Image("COPERNICUS/S2/" + img_id)  
    .select(["B2", "B3", "B4", "B8", "B11", "B12"], // Bandas de Sentinel-2  
    ["BLUE", 'GREEN', 'RED', 'NIR', 'SWIR1', 'SWIR2'])  
    .multiply(0.0001) // Escalar para valores de reflectancia  
    .reproject("EPSG:32719", null, 10) // Reproyectar con resolución espacial  
de 10m  
    .clip(zona_ee); // Recortar la imagen según la zona
```

// Definir la simbología para visualizar la imagen

```
var viz_es = {  
    bands: ['SWIR1', 'NIR', 'RED'],  
    min: 0,  
    max: 0.3,  
    gamma: 1.4  
};
```

// Visualizar la imagen de Sentinel-2

```
Map.addLayer(img_S2_clip, viz_es, "S2_" + img_id);
```

```
// Función para enmascarar nubes y sombras
```

```
function enmascararNubesSombras(image) {  
  var qa = image.select('QA60');  
  var nube = qa.bitwiseAnd(1 << 10).eq(0); // Bit 10: nubes  
  var sombra = qa.bitwiseAnd(1 << 11).eq(0); // Bit 11: sombra  
  return image.updateMask(nube.and(sombra))  
    .copyProperties(image, image.propertyNames());  
}
```

```
// Cargar colección y aplicar enmascaramiento para el año 2024
```

```
var S2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")  
  .filterDate('2025-01-01', '2025-07-30') // Filtrar para el año 2024  
  .filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 20)  
  .filterBounds(zona_ee)  
  .map(enmascararNubesSombras); // Enmascarar nubes y sombras  
print("Imágenes disponibles:", S2);
```

```
// Crear imagen compuesta (puedes usar median, mosaico, qualityMosaic, etc.)
```

```
var imagen_limpia = S2.median()  
  .select(["B2", "B3", "B4", "B8", "B11", "B12"],  
    ['BLUE', 'GREEN', 'RED', 'NIR', 'SWIR1', 'SWIR2'])  
  .multiply(0.0001)  
  .clip(zona_ee);
```

```
// Visualizar la imagen enmascarada
```

```
var viz_es = {  
  bands: ['SWIR1', 'NIR', 'RED'],  
  min: 0,  
  max: 0.3,  
  gamma: 1.4  
};  
Map.addLayer(imagen_limpia, viz_es, 'Imagen sin nubes ni sombras');
```

```
// Crear la tabla de atributos de entrenamiento con las clases (Asegúrate de definir  
tus propias clases: Agua, Suelo_desnudo, Vegetación_dispersa, vegetación_densa,  
Bofedales)
```

```
var training = ee.FeatureCollection([Agua, Suelo_desnudo, Vegetacion_dispersa,  
vegetacion_densa, Bofedales_permanentes, Bofedales_estacionales]);  
print(training);
```

```
// Generar las regiones de entrenamiento
```

```
var training_1 = img_S2_clip.sampleRegions({  
  collection: training,  
  properties: ["id", "cobertura"],  
  scale: 10, // Resolución espacial de Sentinel-2
```

```

        geometries: true
    });

// Clasificación
var bandas = ['BLUE', 'GREEN', 'RED', 'NIR', 'SWIR1', 'SWIR2'];

// Añadir columna de aleatorización
var Sample = training_1.randomColumn("random");
print(Sample);

// Dividir en entrenamiento (80%) y validación (20%)
var split = 0.8;
var training_sample = Sample.filter("random <= " + split);
var validation_sample = Sample.filter("random > " + split);
print(validation_sample);

// Visualizar los puntos de entrenamiento y validación
Map.addLayer(validation_sample, {color: "red"}, "Validación");
Map.addLayer(training_sample, {color: "blue"}, "Entrenamiento");

// Parámetros de los clasificadores
var classifier_RF = ee.Classifier.smileRandomForest(500).train(training_sample, "id",
bandas);

// Clasificar las imágenes usando los clasificadores
var clasificacionRF = img_S2_clip.classify(classifier_RF);

// Simbología para la clasificación
var class_6 = {
  min: 1,
  max: 6,
  palette: ["#1f78b4", "#636363", "#bdb76b", "#228B22", "#006400", "#9acd32"]
};
Map.addLayer(clasificacionRF, class_6, "S2_" + img_id + '_RF');

// Evaluación de la precisión en entrenamiento
var trainAccuracy_RF = classifier_RF.confusionMatrix();
print('Matriz de Error RF:', trainAccuracy_RF);
print('Precisión de Entrenamiento RF:', trainAccuracy_RF.accuracy());

// Evaluación de la precisión en validación
var validation_sample_RF = validation_sample.classify(classifier_RF);
var validationAccuracy_RF = validation_sample_RF.errorMatrix("id", 'classification');
print('Matriz de Error de Validación RF:', validationAccuracy_RF);
print('Precisión de Validación RF:', validationAccuracy_RF.accuracy());

// ===== MÉTRICAS DE ENTRENAMIENTO =====

```

```

var cmTrain = classifier_RF.confusionMatrix();
print('Matriz de Error (train) RF:', cmTrain);

// Exactitud global (OA) y Kappa
print('OA (train) RF:', cmTrain.accuracy());
print('Kappa (train) RF:', cmTrain.kappa());

// Exactitudes por clase
print('Prod. Accuracy (train) RF (recall por clase):', cmTrain.producersAccuracy());
print('User Accuracy (train) RF (precision por clase):',
cmTrain.consumersAccuracy());

// ===== MÉTRICAS DE VALIDACIÓN =====
var validation_sample_RF = validation_sample.classify(classifier_RF);
var cmVal = validation_sample_RF.errorMatrix('id', 'classification');
print('Matriz de Error (valid) RF:', cmVal);

// OA y Kappa en validación
print('OA (valid) RF:', cmVal.accuracy());
print('Kappa (valid) RF:', cmVal.kappa());

// Exactitudes por clase en validación
print('Prod. Accuracy (valid) RF (recall):', cmVal.producersAccuracy());
print('User Accuracy (valid) RF (precision):', cmVal.consumersAccuracy()););

```

SCRIPT DE GOOGLE EARTH ENGINE PARA OBJETIVO 2

// 1. ZONA DE INTERÉS

```

var zona_ee = ee.FeatureCollection("projects/mi-proyecto-
a2055/assets/MICROCUNECA_CHIKLLARAZU");
Map.centerObject(zona_ee, 10);
Map.setOptions("SATELLITE");
Map.addLayer(zona_ee, {"color" : "red"}, "Zona");

```

// 2. COLECCIÓN SENTINEL-2 SR (Limpieza y Homogeneización)

```

var bandas_utiles = ['B2', 'B3', 'B4', 'B8', 'B11', 'B12', 'SCL'];
function enmascararNubesSombras(image) {
  var scl = image.select('SCL');
  var mask = scl.neq(3).and(scl.neq(8)).and(scl.neq(9)); // sombras, nubes medias y
altas
  return image.select(bandas_utiles)
    .updateMask(mask)
    .copyProperties(image, image.propertyNames());
}

var S2_SR = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR")
  .filterDate('2023-08-01', '2023-09-30')
  .filterBounds(zona_ee)

```

```

.filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 10)
.map(enmascararNubesSombras);
print("Colección limpia", S2_SR);

```

```

// === MOSTRAR FECHAS DE LAS IMÁGENES USADAS ===

```

```

var fechas = S2_SR.aggregate_array('system:time_start')
  .map(function(fecha) {
    return ee.Date(fecha).format('YYYY-MM-dd');
  });
print('Fechas de imágenes usadas:', fechas);

```

```

// 3. IMAGEN COMPUESTA (MEDIANA)

```

```

var img_compuesta = S2_SR.median()
  .select(['B2', 'B3', 'B4', 'B8', 'B11', 'B12'], ['BLUE', 'GREEN', 'RED', 'NIR', 'SWIR1',
'SWIR2'])
  .multiply(0.0001)
  .clip(zona_ee)
  .reproject("EPSG:4326", null, 10);
Map.addLayer(img_compuesta, {bands: ['SWIR1', 'NIR', 'RED'], min: 0, max: 0.3,
gamma: 1.4}, 'Imagen Limpia');

```

```

// 4. ENTRENAMIENTO

```

```

// Asegúrate de haber cargado tus FeatureCollection de entrenamiento:

```

```

// Agua, Suelo_desnudo, Vegetacion_dispersa, vegetacion_densa,
Bofedales_permanentes
var training = ee.FeatureCollection([
  Agua, Suelo_desnudo, Vegetacion_dispersa, vegetacion_densa,
Bofedales_permanentes
]);
print("Muestras:", training);

```

```

// 5. MUESTRAS DE ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN

```

```

var muestras = img_compuesta.sampleRegions({
  collection: training,
  properties: ["id", "cobertura"],
  scale: 10,
  geometries: true
});

```

```

var muestra_random = muestras.randomColumn("random");
var split = 0.8;
var entrenamiento = muestra_random.filter("random <= " + split);
var validacion = muestra_random.filter("random > " + split);
Map.addLayer(entrenamiento, {color: "blue"}, "Muestras Entrenamiento");
Map.addLayer(validacion, {color: "red"}, "Muestras Validación");

```

```

// 6. CLASIFICADOR RANDOM FOREST

```

```

var bandas = ['BLUE', 'GREEN', 'RED', 'NIR', 'SWIR1', 'SWIR2'];
var clasificador = ee.Classifier.smileRandomForest(500).train({
  features: entrenamiento,
  classProperty: "id",
  inputProperties: bandas
});
var clasificacion = img_compuesta.classify(clasificador);
Map.addLayer(clasificacion, {
  min: 1,
  max: 5,
  palette: ["#1f78b4", "#636363", "#bdb76b", "#228B22", "#006400"]
}, "Clasificación 2025");

```

// 7. EVALUACIÓN

```

print("Matriz entrenamiento:", clasificador.confusionMatrix());
print("Precisión entrenamiento:", clasificador.confusionMatrix().accuracy());
var clas_valid = validacion.classify(clasificador);
var matriz_val = clas_valid.errorMatrix("id", "classification");
print("Matriz validación:", matriz_val);
print("Precisión validación:", matriz_val.accuracy());

```

// 8. CÁLCULO DE ÁREA EN KM² POR CLASE

```

var area_pix = ee.Image.pixelArea().divide(1e6); // en km²
var area_por_clase = area_pix.addBands(clasificacion)
  .reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum().group({
      groupField: 1,
      groupName: 'clase'
    }),
    geometry: zona_ee,
    scale: 10,
    maxPixels: 1e13
  });

```

```

var tabla_area = ee.List(area_por_clase.get("groups"));
print("Área por clase (km²)", tabla_area);

```

// 9. EXPORTAR CLASIFICACIÓN

```

Export.image.toDrive({
  image: clasificacion,
  description: 'Export_Clasificacion_RF_2025',
  folder: 'GEE_EXPORTS',
  fileNamePrefix: 'Clasificacion_RF_2025',
  region: zona_ee.geometry(),
  scale: 10,
  crs: 'EPSG:4326',
  maxPixels: 1e13
});

```

```
});
```

SCRIPT DE GOOGLE EARTH ENGINE PARA OBJETIVO 3

```
// --- CARGAR ÁREA DE ESTUDIO ---
```

```
var microcuenca = ee.FeatureCollection("projects/mi-proyecto-a2055/assets/MICROCUNECA_CHIKLLARAZU");
```

```
// --- FUNCIÓN DE ENMASCARAMIENTO USANDO BANDA SCL ---
```

```
function maskSCL(image) {  
  var scl = image.select('SCL');  
  // Mantener solo clases válidas: 4 = vegetación, 5 = suelo, 6 = vegetación baja, 7 =  
  alta, 11 = vegetación quemada  
  var mask = scl.eq(4).or(scl.eq(5)).or(scl.eq(6)).or(scl.eq(7)).or(scl.eq(11));  
  return image.updateMask(mask);  
}
```

```
// --- SENTINEL-2 SR, FILTRADO ---
```

```
var s2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR")  
  .filterBounds(microcuenca)  
  .filterDate("2023-02-01", "2023-02-28")  
  .filter(ee.Filter.lt("CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE", 50))  
  .map(maskSCL) // <<< aplicar enmascaramiento SCL  
  .select(['B8','B11','SCL']); // B8 = NIR, B11 = SWIR1, SCL = clasificación de escena
```

```
// OPCIÓN 1: Composición (mediana)
```

```
var img_median = s2.median();  
print("📄 Composición mediana (no tiene fecha real única).");
```

```
// OPCIÓN 2: Mejor imagen individual (menos nublada)
```

```
var img_best = s2.sort('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE').first();  
var imgDate = ee.Date(img_best.get('system:time_start'));  
print("📄 Fecha de la mejor imagen seleccionada:", imgDate.format("YYYY-MM-dd"));
```

```
// --- ELEGIR CUÁL USAR ---
```

```
var img = img_best;
```

```
// --- CALCULAR NDII ---
```

```
var ndii = img.normalizedDifference(['B8','B11']).rename('NDII');
```

```
// --- CLASIFICACIÓN NDII ---
```

```
// 0 = fuera de rango (<0.02)  
// 1 = Bofedal húmedo (0.02 – 0.45)  
// 2 = fuera de rango alto (>0.45)  
var ndii_class = ndii.expression(  
  '(ndii < 0.02) ? 0' +  
  ': (ndii <= 0.45) ? 1' +
```

```

' : 2',
  {'ndii': ndii}
).rename('NDII_Class');

// --- Paleta ---
var classParams = {
  min: 0,
  max: 2,
  palette: ['gray','green','gray']
};

// --- VISUALIZAR ---
Map.centerObject(microcuenca, 10);
Map.addLayer(ndii.clip(microcuenca),
  {min:0, max:1, palette:['brown','yellow','green','blue']},
  'NDII continuo');
Map.addLayer(ndii_class.clip(microcuenca), classParams, 'Clasificación NDII (con
SCL)');

// --- CALCULAR ÁREAS POR CLASE EN KM² ---
var pixelAreaKm2 = ee.Image.pixelArea().divide(1e6);
var arealImage = pixelAreaKm2.addBands(ndii_class);
var areasKm2 = arealImage.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum().group({
    groupField: 1,
    groupName: 'NDII_Class',
  }),
  geometry: microcuenca,
  scale: 10,
  maxPixels: 1e13
});
print("Áreas por clase (km²):", areasKm2);

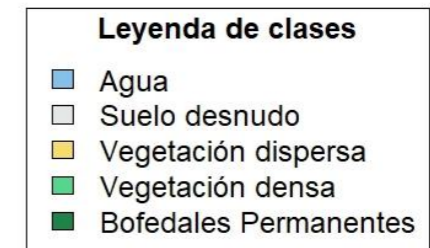
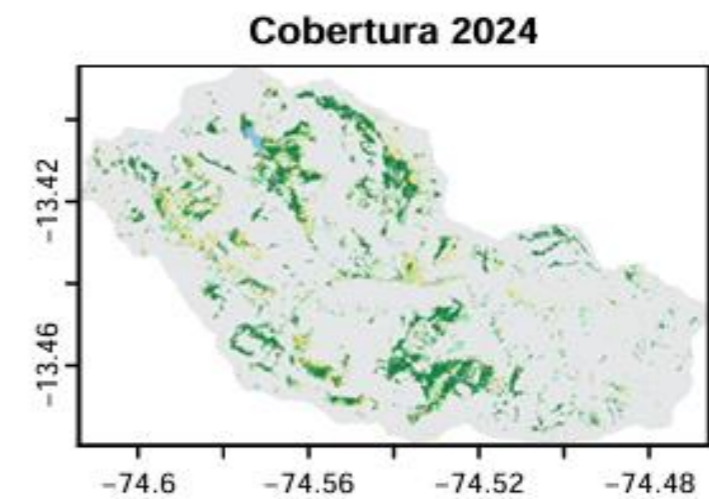
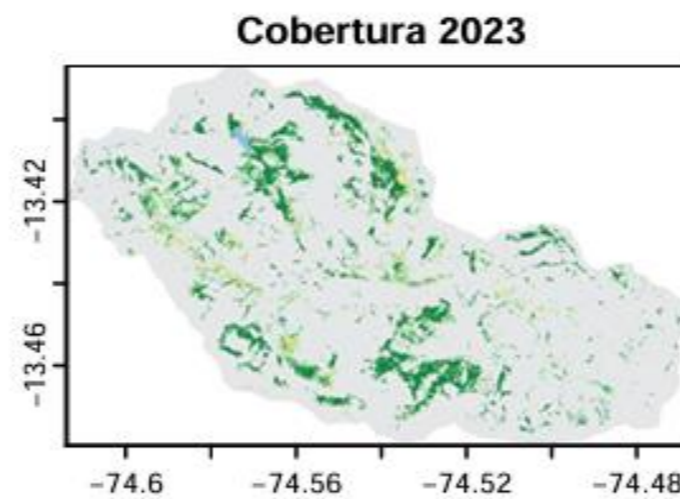
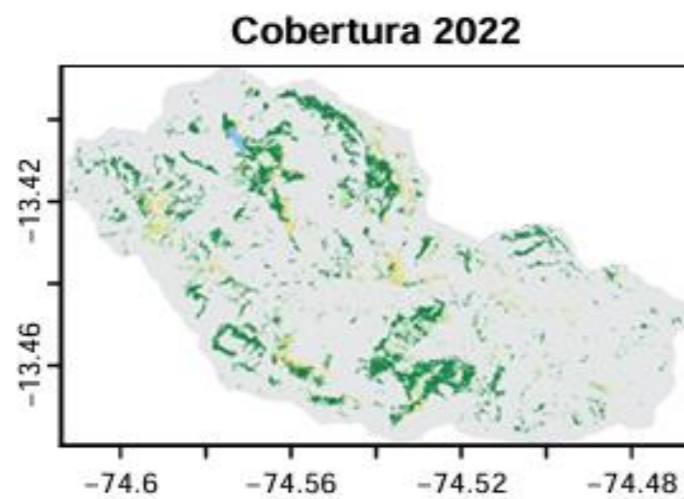
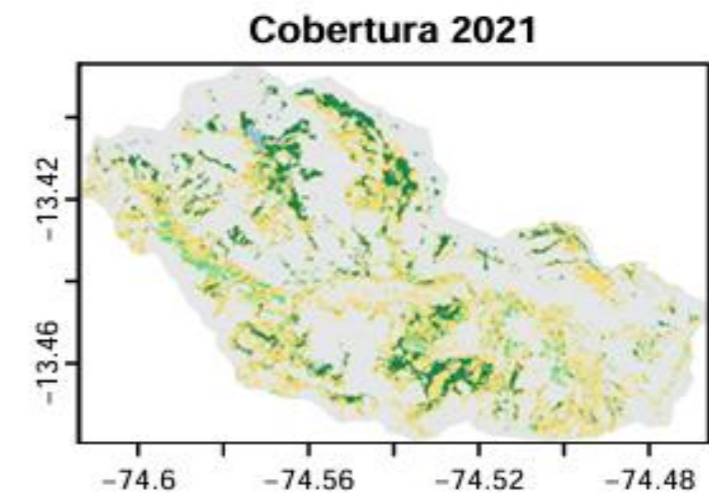
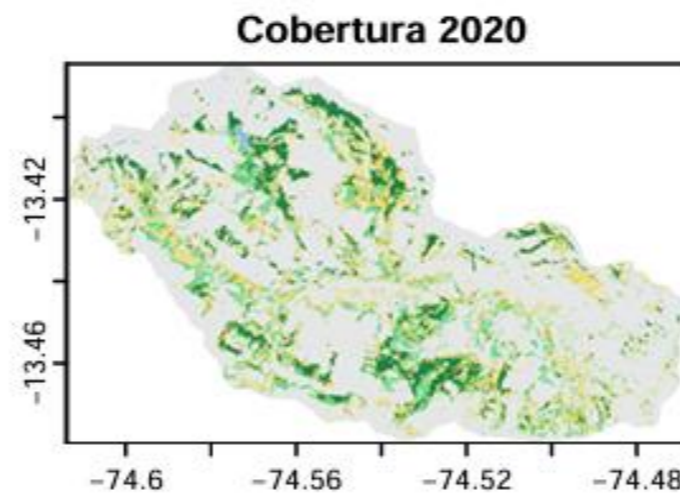
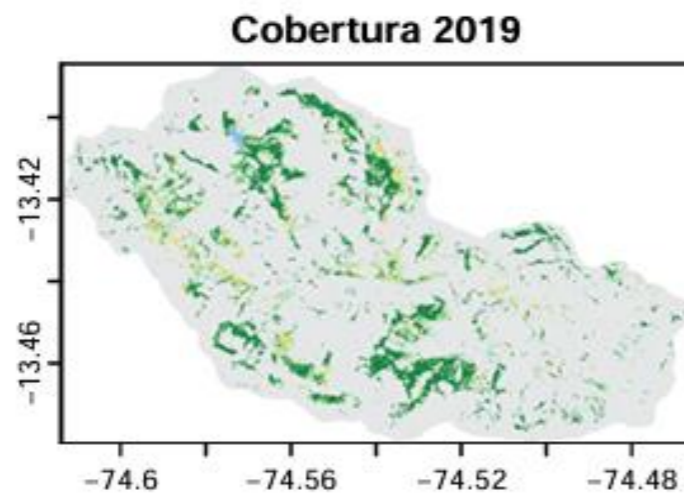
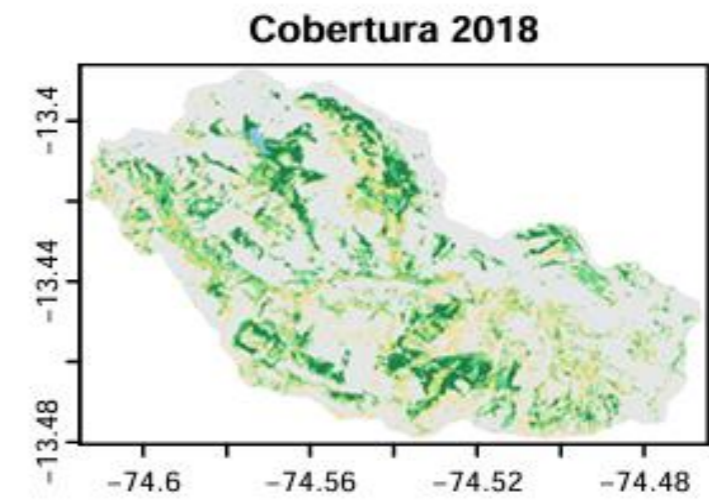
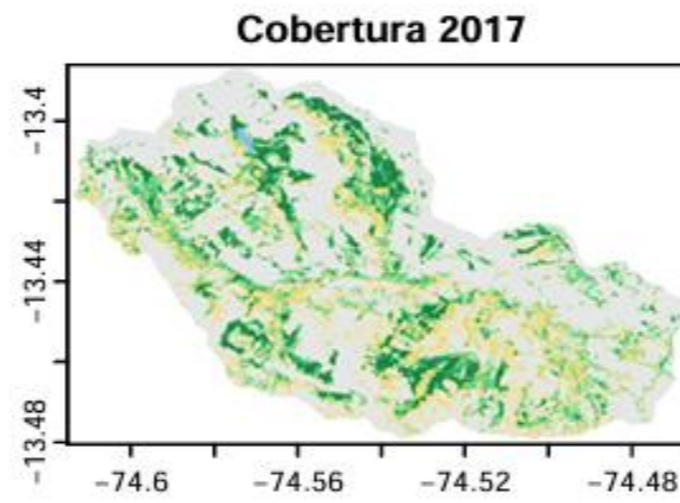
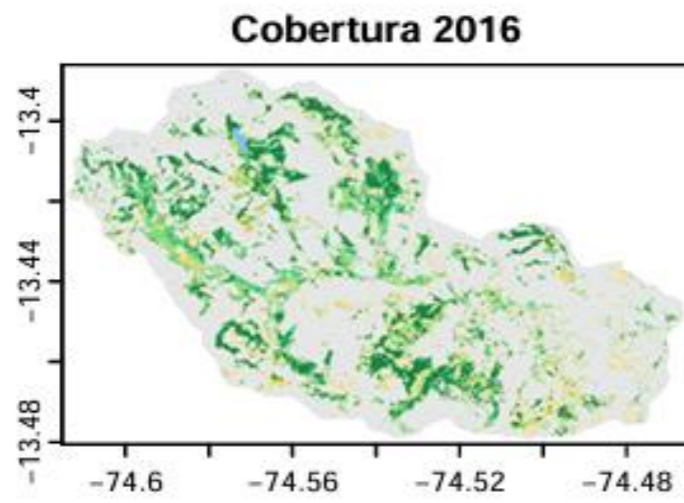
// --- EXPORTAR ---
Export.image.toDrive({
  image: ndii_class.clip(microcuenca),
  description: 'Clasificacion_NDII_Bofedal_SCL',
  region: microcuenca,
  scale: 10,
  maxPixels: 1e13
});

// --- Mostrar fecha ---
var label = ui.Label({
  value: 'Imagen usada: ' + imgDate.format("YYYY-MM-dd").getInfo(),
  style: {position: 'bottom-left', fontWeight: 'bold', color: 'black'}
});

```

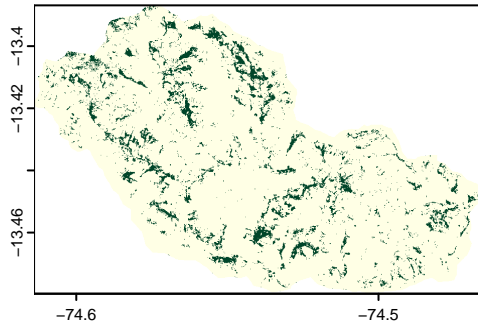
```
print(label);
```

MAPA MULTITEMPRAL DE COBERTURA DE AÑO 2016 – 2025

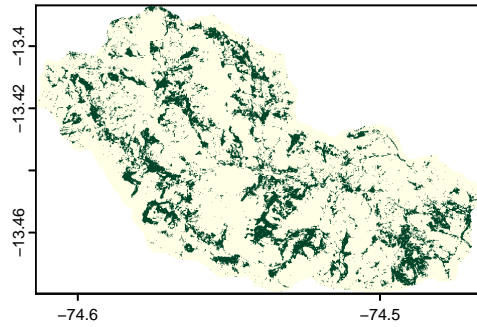


MAPA MENSUAL DE NDII PARA EL AÑO 2023 - OBJETIVO 3.

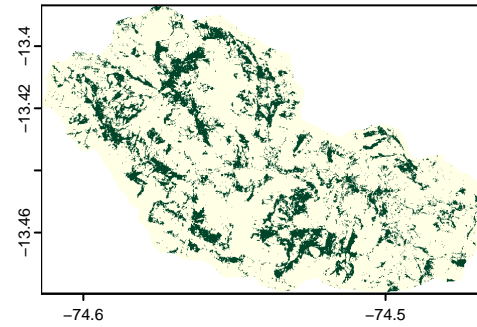
NDII Enero 2023



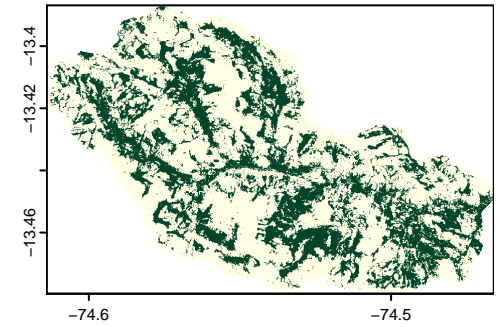
NDII Febrero 2023



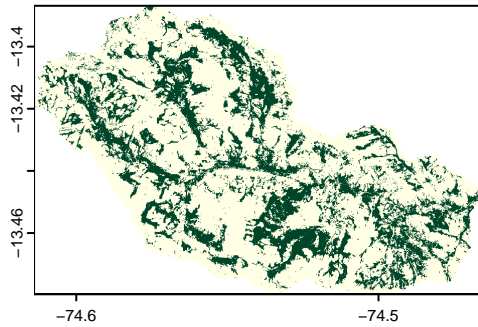
NDII Marzo 2023



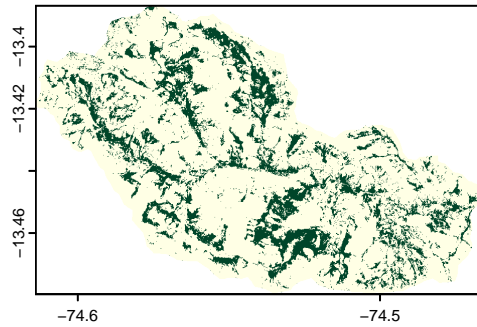
NDII Abril 2023



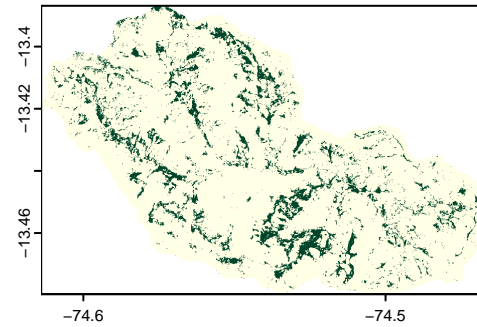
NDII Mayo 2023



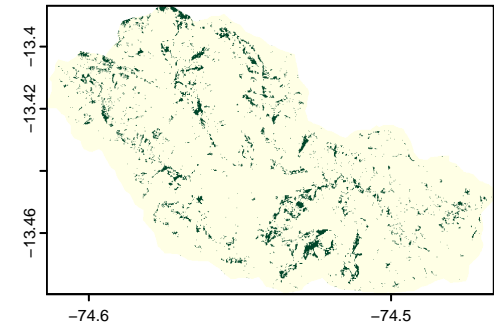
NDII Junio 2023



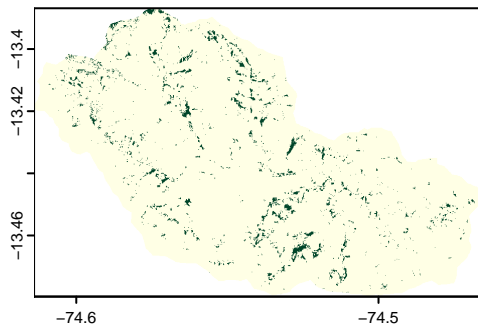
NDII Julio 2023



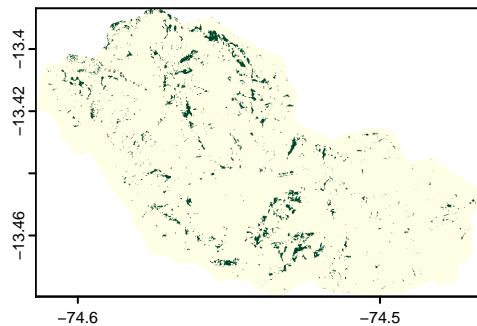
NDII Agosto 2023



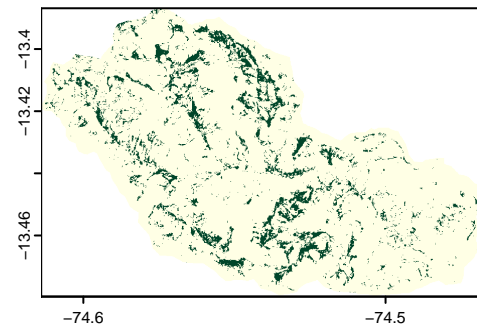
NDII Septiembre 2023



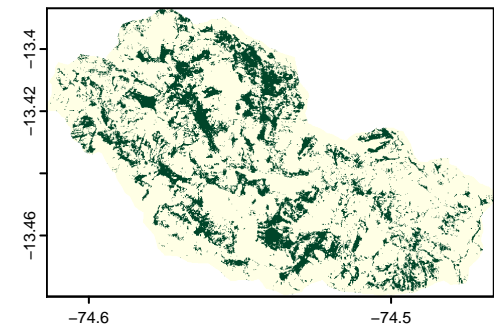
NDII Octubre 2023



NDII Noviembre 2023



NDII Diciembre 2023



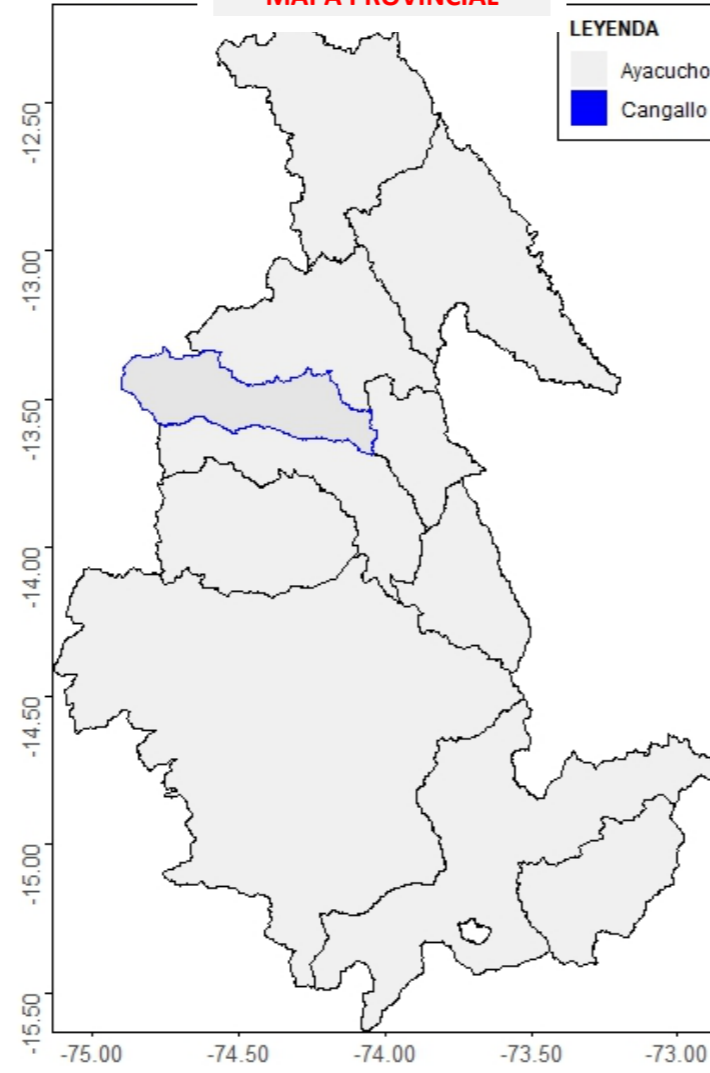
ANEXO C

**PLANO DE UBICACIÓN Y
LOCALIZACIÓN**

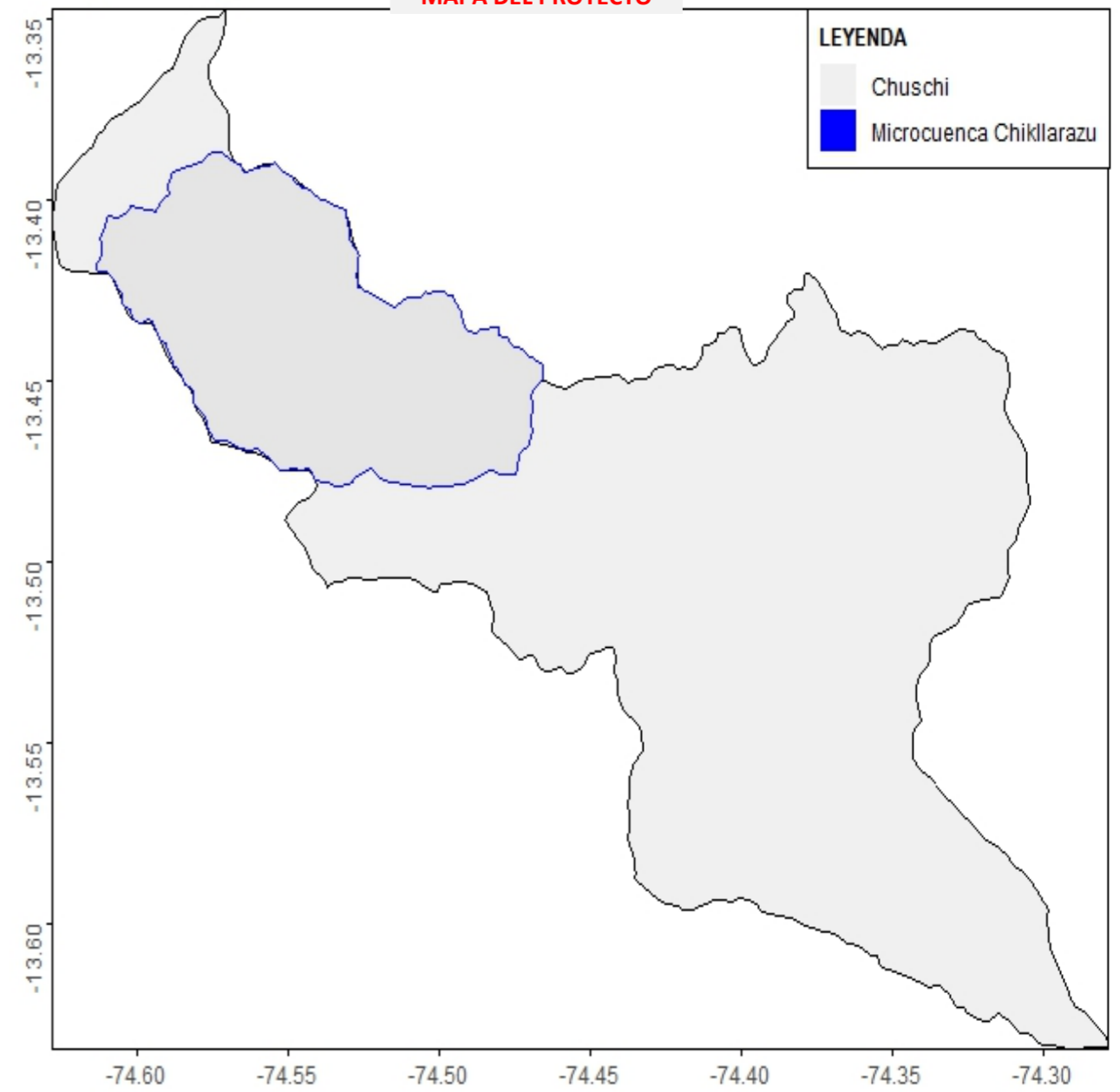
MAPA DEPARTAMENTAL



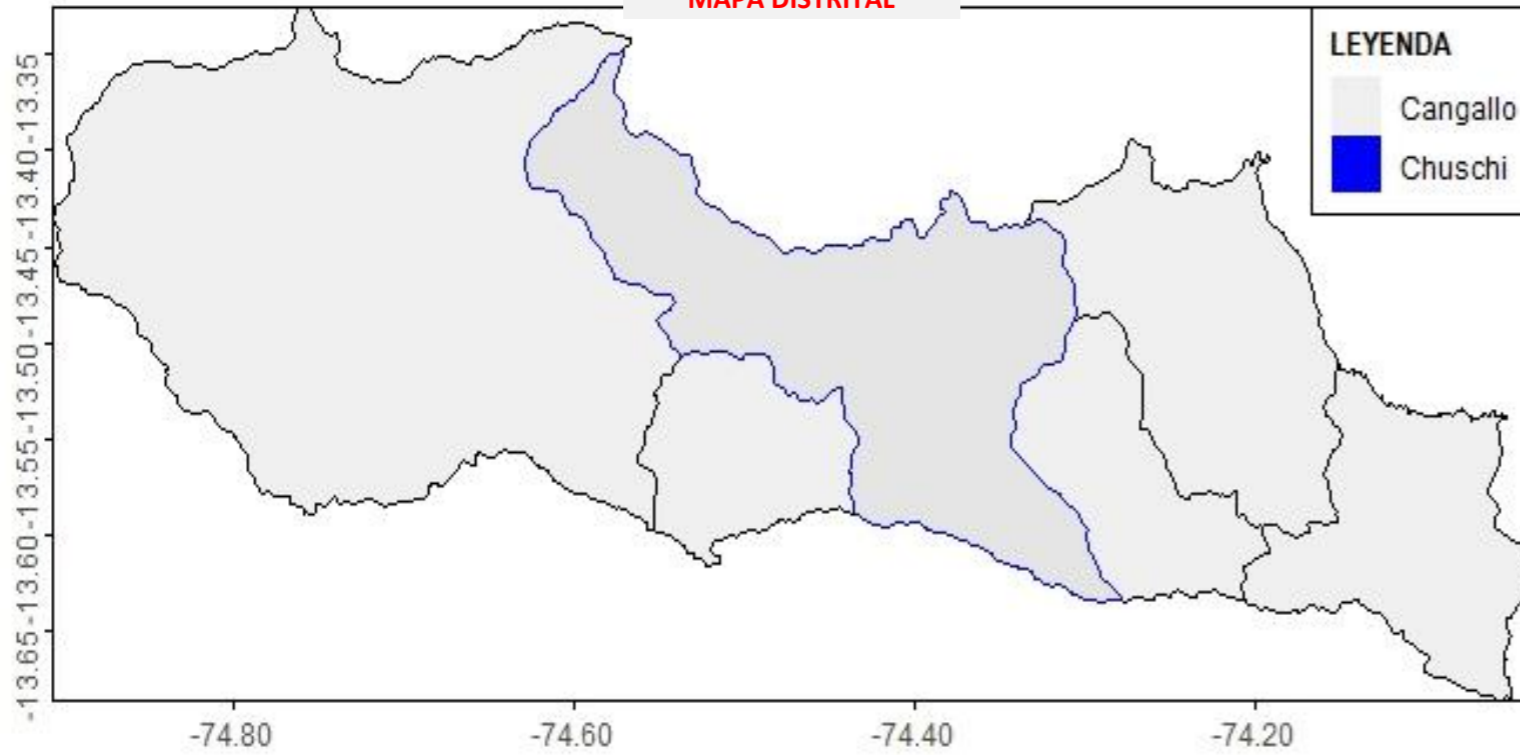
MAPA PROVINCIAL





MAPA DEL PROYECTO



MAPA DISTRITAL



	UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUMANGA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA		
UBICACIÓN: REGIÓN: AYACUCHO PROVINCIA: CANGALLO DISTRITO: CHUSCHI	PROYECTO: Rol de los bofedales en la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu, Chuschi – Ayacucho, 2025		<h1>U1</h1>
AUTOR: PACOTAIPE QUISPE CLEVERT ALDAIR	FECHA: SETIEMBRE-2025	ESCALA: INDICADA	

ANEXO D

INFORMES DE TRABAJO DE

CAMPO

INFORME DEL PROCESAMIENTO FOTOGRAMETRICO

**"Rol de los bofedales en la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca
Chikllarazu, Chuschi – Ayacucho, 2025"**

10 September 2025



Datos del levantamiento

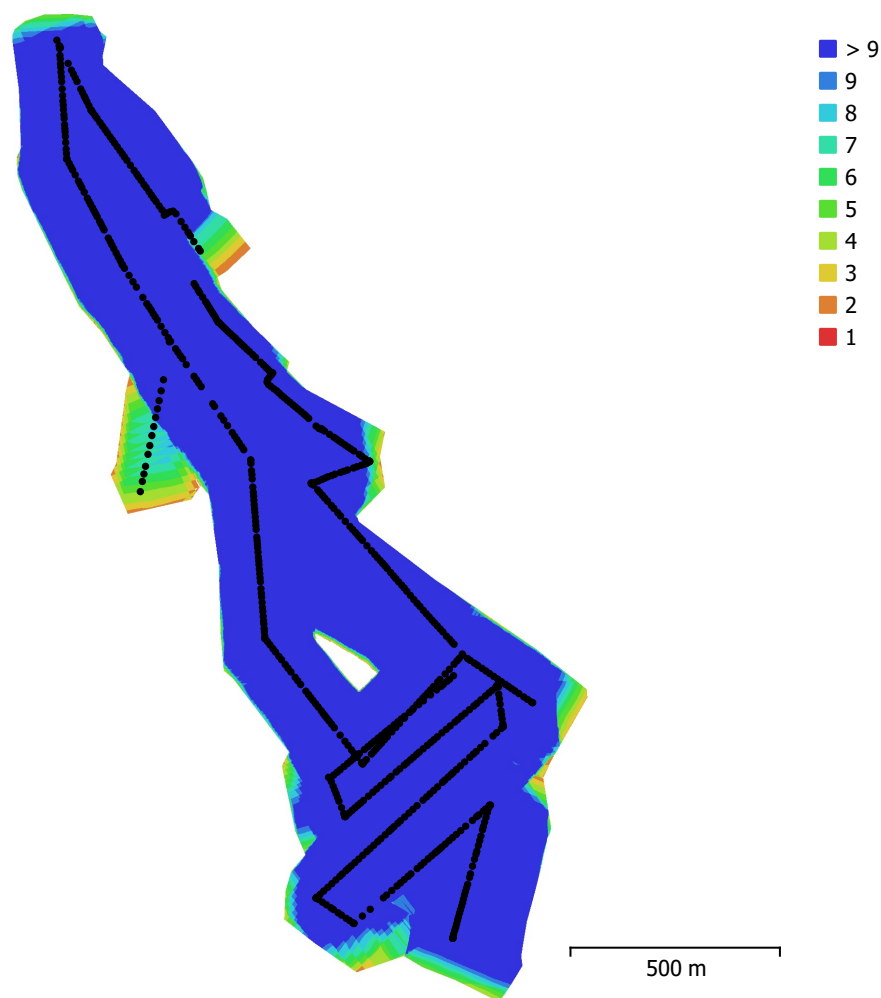


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 680

Altitud media de vuelo: 196 m

Resolución en terreno: 4.46 cm/pix

Área cubierta: 1.15 km²

Imágenes alineadas: 680

Puntos de paso: 240,022

Proyecciones: 1,669,167

Error de reproyección: 0.608 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
XL705 (10.181mm)	5472 x 3648	10.181 mm	2.4 x 2.4 micras	Sí

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

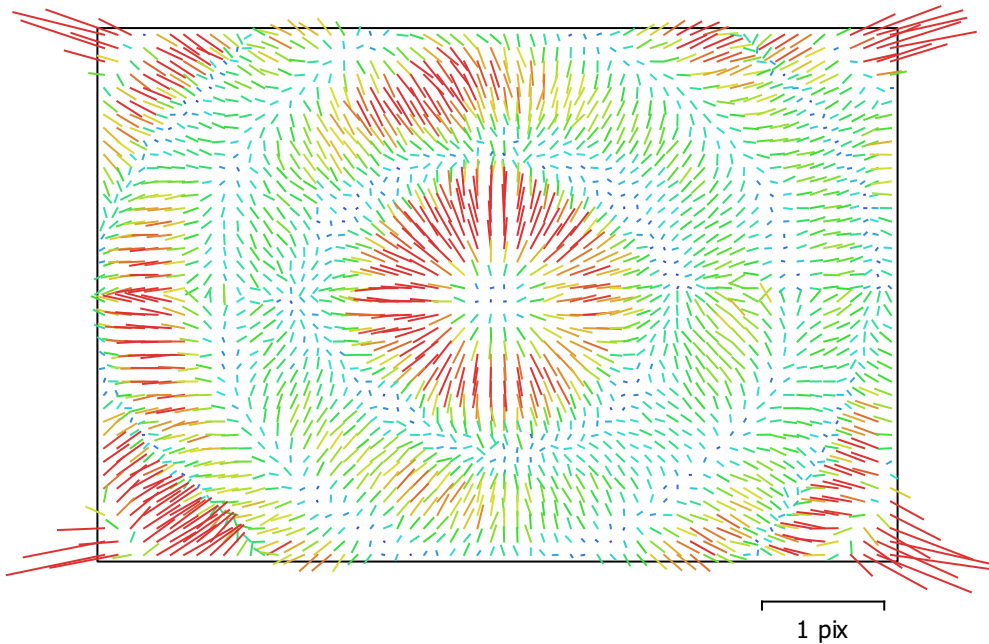


Fig. 2. Gráfico de residuales para XL705 (10.181mm).

XL705 (10.181mm)

680 imágenes, precalibrada

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Cuadro	5472 x 3648	10.181 mm	2.4 x 2.4 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	4243.84	0.14	1.00	0.18	-0.16	0.13	-0.22	0.34	0.01	-0.06
Cx	-21.106	0.03		1.00	0.01	0.02	-0.06	0.09	0.61	-0.02
Cy	-3.75686	0.029			1.00	-0.02	0.03	-0.05	0.07	0.58
K1	0.0495358	2.3e-05				1.00	-0.94	0.88	-0.00	-0.02
K2	-0.171977	8.8e-05					1.00	-0.98	-0.02	0.01
K3	0.20195	0.00011						1.00	0.03	-0.02
P1	-0.00131717	1.6e-06							1.00	0.03
P2	0.000515621	1.6e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Posiciones de cámaras

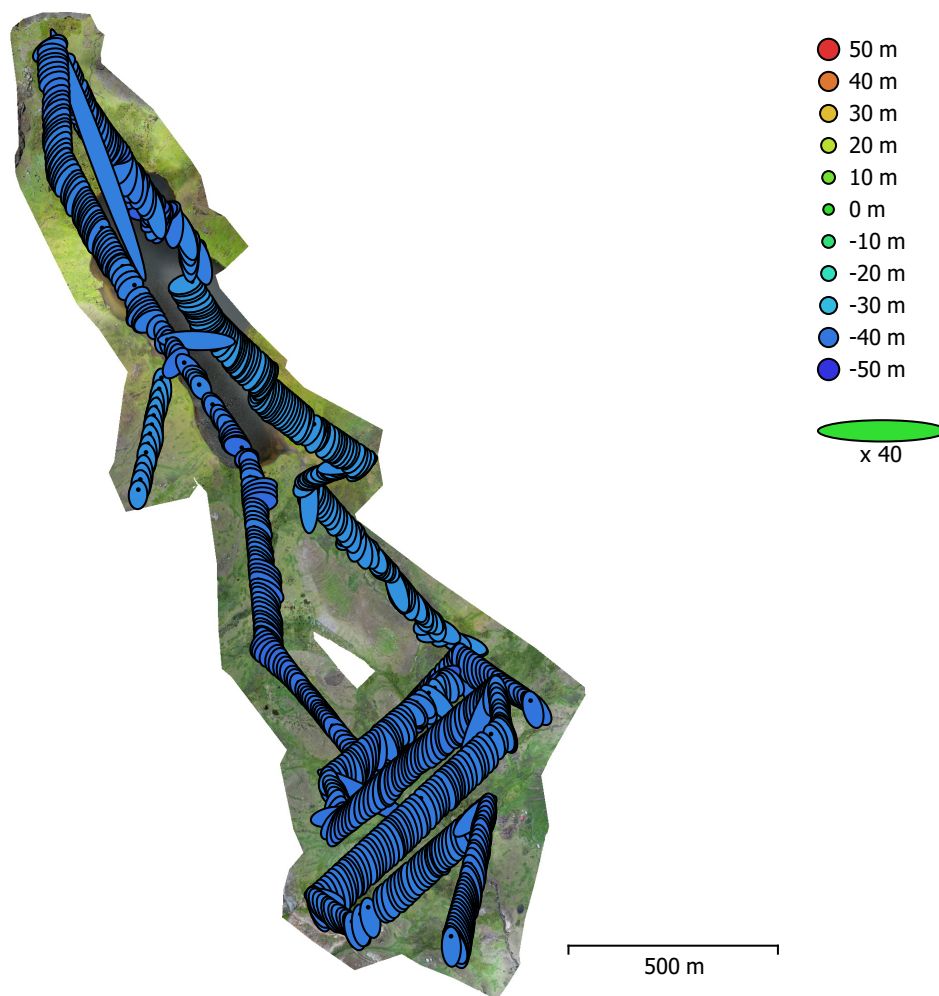


Fig. 3. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Error combinado (m)
0.588663	1.14692	38.9631	1.28916	38.9844

Tabla 3. Errores medios de las posiciones de cámaras.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Puntos de control terrestre

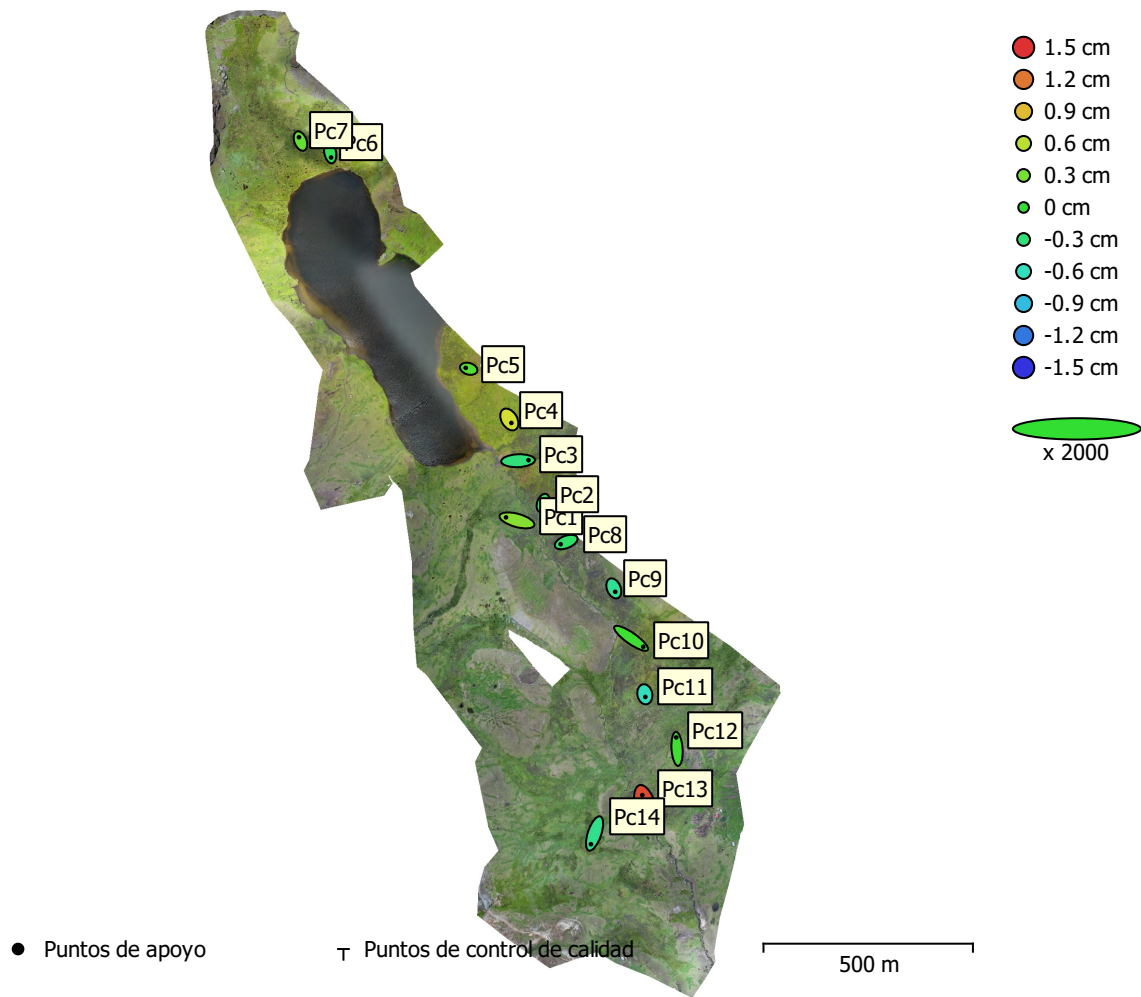


Fig. 4. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
 El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
 Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
14	1.35931	1.52346	0.502408	2.04172	2.10263

Tabla 4. ECM de puntos de apoyo.
 X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
Pc1	-2.62098	0.722652	0.367033	2.74344	0.955 (26)
Pc2	0.301247	0.819156	-0.168829	0.888971	1.009 (15)
Pc3	2.49283	0.108402	-0.312022	2.51462	1.131 (22)
Pc4	0.496465	-0.821973	0.698363	1.18736	0.872 (30)
Pc5	-0.711699	0.20764	0.131299	0.752907	0.422 (23)
Pc6	0.222419	-1.13542	-0.157591	1.16768	0.404 (15)
Pc7	-0.349367	0.909767	0.213949	0.997751	0.581 (32)
Pc8	-1.31215	-0.520476	-0.225692	1.42954	0.543 (14)
Pc9	0.341097	-0.813867	-0.418581	0.976696	0.580 (15)
Pc10	2.90469	-2.03064	0.0544939	3.54453	0.885 (25)
Pc11	0.120168	-0.628552	-0.596785	0.875026	0.708 (50)
Pc12	-0.184317	2.73406	0.0614733	2.74095	0.820 (38)
Pc13	-0.840198	2.99449	1.40004	3.41072	0.999 (54)
Pc14	-0.85989	-2.56094	-0.385361	2.72879	0.558 (27)
Total	1.35931	1.52346	0.502408	2.10263	0.803

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

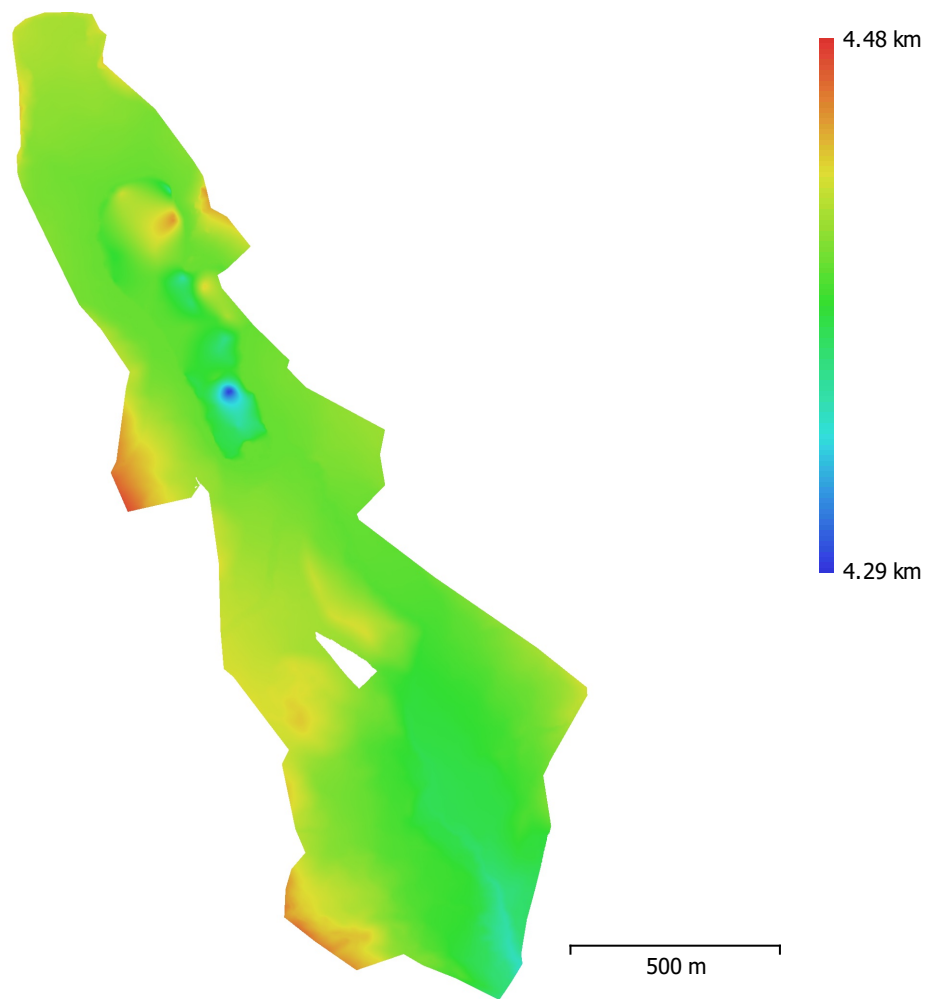


Fig. 5. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 17.8 cm/pix
Densidad de puntos: 31.4 puntos/m²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	680
Cámaras orientadas	680
Marcadores	14

Formas

Cadena poligonal	1477
Polígono	1
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 18S (EPSG::32718)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Puntos de paso

Puntos	240,022 de 335,585
RMS error de reproyección	0.178139 (0.608394 pix)
Error de reproyección máximo	2.17948 (36.4918 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	3.00844 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	8.38365

Parámetros de orientación

Precisión	Alta
Preselección genérica	Sí
Preselección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Límite de puntos clave por megapixel	1,000
Puntos de paso por foto	4,000
Excluir puntos de paso inmóviles	Sí
Emparejamiento guiado	Sí
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de emparejamientos	4 minutos 14 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	3.06 GB
Tiempo de orientación	8 minutos 50 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	358.74 MB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	6 segundos
Fecha de creación	2025:04:15 02:43:02
Versión del programa	2.0.1.15925
Tamaño de archivo	49.47 MB

Mapas de profundidad

Número	677
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Media
Modo de filtrado	Leve
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	20 minutos 50 segundos
Uso de memoria	1.64 GB
Fecha de creación	2025:04:15 05:09:19
Versión del programa	2.0.1.15925
Tamaño de archivo	1.09 GB

Nube de puntos

Puntos	35,822,768
Atributos de los puntos	
Posición	4.46 cm
Color	3 bandas, uint8
Normal	
Clases de puntos	
Creado (nunca clasificado)	2,983,656
Terreno	32,818,004
Punto enterrado (ruido)	21,108
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Media
Modo de filtrado	Leve
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	20 minutos 50 segundos
Uso de memoria	1.64 GB
Parámetros de generación de la nube de puntos	
Tiempo de procesamiento	29 minutos 52 segundos
Uso de memoria	5.29 GB
Parámetros de clasificación de puntos de terreno	
Ángulo máximo (deg)	45
Distancia máxima (m)	0.1
Tamaño de célula (m)	50
Tiempo de clasificación	1 minuto 14 segundos
Uso de memoria durante la clasificación	1.49 GB
Fecha de creación	2025:04:15 05:39:11
Versión del programa	2.0.1.15925
Tamaño de archivo	474.20 MB
Modelo	
Caras	2,279,034
Vértices	1,146,932
Colores de vértices	3 bandas, uint8
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Media
Modo de filtrado	Leve
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	20 minutos 50 segundos
Uso de memoria	1.64 GB
Parámetros de generación de la nube de puntos	
Tiempo de procesamiento	29 minutos 52 segundos
Uso de memoria	5.29 GB
Parámetros de reconstrucción	
Tipo de superficie	Bajorrelieve / terreno
Origen de datos	Nube de puntos
Interpolación	Habilitada
Máscaras volumétricas estrictas	No
Tiempo de procesamiento	1 minuto 31 segundos
Uso de memoria	1.08 GB
Fecha de creación	2025:04:16 02:06:59
Versión del programa	2.0.1.15925
Tamaño de archivo	52.28 MB
MDE	
Tamaño	7,819 x 13,543
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 18S (EPSG::32718)
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Malla
Interpolación	Habilitada

Tiempo de procesamiento	52 segundos
Uso de memoria	139.02 MB
Fecha de creación	2025:04:16 02:10:24
Versión del programa	2.0.1.15925
Tamaño de archivo	132.98 MB
Ortomosaico	
Tamaño	31,276 x 54,172
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 18S (EPSG::32718)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	21 minutos 57 segundos
Uso de memoria	1.63 GB
Fecha de creación	2025:04:16 02:48:26
Versión del programa	2.0.1.15925
Tamaño de archivo	17.81 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	2.0.0 build 15597
OS	Windows 64 bit
RAM	15.87 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU @ 2.90GHz
GPU(s)	GeForce GTX 1650

Levantamiento de coordenadas con equipo GNSS de la zona de estudio

Cód	Coord N	Coord E	Cota
1	8516576.48	546706.181	4438.607
2	8516786.85	546490.101	4442.266
3	8516799.26	546479.484	4442.103
4	8516819.16	546460.658	4441.417
5	8516841.01	546457.703	4437.125
6	8516920.79	546486.085	4442.918
7	8516985.48	546473.302	4436.972
8	8517065.49	546480.57	4429.48
9	8517100.27	546478.245	4432.127
10	8517137.9	546488.048	4432.081
11	8517216.8	546496.507	4428.83
12	8517610.7	546495.457	4406.139
13	8517610.67	546495.456	4406.146
14	8517607.68	546511.004	4405.285
15	8517570.25	546576.849	4402.995
16	8517570.27	546576.847	4402.994
17	8517578.21	546646.909	4398.619
18	8517612.61	546668.139	4401.382
19	8517706.47	546630.408	4405.501
20	8517795.42	546589.665	4405.883
21	8517825.27	546576.012	4405.347
22	8517926.74	546480.704	4403.45
23	8517975.64	546490.949	4403.544
24	8518020.6	546484.192	4402.491
25	8518083.13	546479.77	4400.91
26	8518428.52	546159.755	4401.457
27	8518476.79	546083.098	4405.325
28	8518411.78	546053.932	4402.264
29	8518364.8	546022.992	4400.776
30	8518408.72	545969.571	4402.094
31	8518405.08	546042.145	4402.181
32	8518405.74	546046.133	4402.06
33	8518302.38	546270.065	4399.617
34	8518286.37	546274.647	4399.586
35	8518267.42	546277.287	4399.71
36	8518231.83	546302.834	4403
37	8518227.51	546324.082	4404.45
38	8518165.89	546417.799	4403.015
39	8518137.71	546437.959	4399.881
40	8517844.46	546545.474	4403.818
41	8517506.3	546707.145	4398.067
42	8517392.77	546837.284	4394.328
43	8517261.61	546904.091	4391.543
44	8517142.11	546909.064	4385.327

45	8517045.48	546982.88	4386.089
46	8516907.94	546901.82	4377.295
47	8516862.85	546944.434	4377.678
48	8516790.92	546779.427	4393.457
49	8516790.92	546779.423	4393.437
50	8516965.8	546758.159	4390.212
51	8517260.27	546870.968	4389.583
52	8516947.16	547087.449	4391.236
53	8516944.75	547078.225	4390.357
54	8516942.15	547068.711	4389.134
55	8516939.63	547059.319	4386.767
56	8516937.22	547049.802	4385.502
57	8516934.51	547040.675	4384.254
58	8516931.47	547030.892	4383.188
59	8516928.76	547021.539	4381.664
60	8516926.16	547012.027	4380.855
61	8516923.86	547002.193	4380.301
62	8516922.12	546992.765	4379.851
63	8516918.37	546983.87	4379.692
64	8516916.87	546973.809	4379.405
65	8516913.67	546963.876	4379.025
66	8516910.75	546954.443	4378.78
67	8516908.54	546944.593	4378.839
68	8516907.61	546937.243	4378.509
69	8516905.89	546931.389	4378.303
70	8516903.35	546921.949	4377.875
71	8516901.65	546912.402	4377.512
72	8516899.55	546902.794	4376.888
73	8516897.93	546892.94	4376.888
74	8516895.88	546883.122	4376.206
75	8516893.64	546873.673	4376.073
76	8516890.48	546864.26	4375.795
77	8516888.05	546854.062	4375.162
78	8516885.21	546845.423	4376.848
79	8516882.45	546835.957	4377.996
80	8516880.96	546826.383	4380.123
81	8516879.35	546817.838	4384.732
82	8516877.32	546810.381	4388.851
83	8516875.51	546800.099	4390.593
84	8516873.8	546790.604	4389.761
85	8516960.74	546865.592	4376.356
86	8516960.7	546865.656	4376.362
87	8517076.09	546881.131	4381.727
88	8517076.1	546881.146	4381.721
89	8517078.12	546887.313	4381.689
90	8517081.74	546896.136	4382.2

91	8517085.1	546905.435	4382.888
92	8517088.71	546914.763	4383.734
93	8517092.27	546923.9	4384.287
94	8517096.1	546933.338	4384.792
95	8517099.46	546942.513	4385.166
96	8517103.08	546951.994	4385.494
97	8517106.54	546961.259	4385.969
98	8517110.22	546970.579	4386.504
99	8517113.58	546979.761	4387.626
100	8517117.05	546988.953	4388.901
101	8517120.54	546998.255	4390.614
102	8517123.98	547007.042	4392.148
103	8517127.57	547016.409	4393.226
104	8517131.11	547025.91	4393.896
105	8517131.28	547026.674	4394.023
106	8517072.7	546875.2	4381.528
107	8517069.22	546865.001	4381.45
108	8517065.9	546856.08	4381.342
109	8517062.95	546846.354	4381.173
110	8517058.92	546837.647	4380.942
111	8517055.37	546828.447	4380.597
112	8517052.24	546819.359	4379.565
113	8517048.67	546810.051	4379.621
114	8517048.7	546809.99	4379.618
115	8517045.73	546801.727	4384.584
116	8517042.32	546792.922	4386.97
117	8517038.79	546783.675	4388.065
118	8517035.87	546774.456	4388.736
119	8517032.43	546764.82	4389.736
120	8517029.04	546755.737	4390.155
121	8517025.53	546746.41	4390.829
122	8517021.94	546737.24	4392.078
123	8516947.32	546727.677	4394.068
124	8516646.71	546686.66	4418.022
125	8516644.61	546687.724	4418.038
126	8516645.22	546690.076	4417.878
127	8517609.64	546496.218	4406.891
128	8517108.24	546969.259	4386.606
129	8517085.08	546904.57	4383.592
130	8517117.84	546989.02	4389.803
131	8516905.02	546931.763	4377.536
132	8516938.11	547049.751	4385.354
133	8517079.36	546887.156	4381.346
134	8517045.12	546983.42	4386.381
135	8516906.33	546933.56	4377.978
136	8517794.9	546588.84	4406.376

137	8517120.42	546997.403	4389.954
138	8518021.26	546484.946	4402.926
139	8517106.77	546961.377	4386.144
140	8517132.16	547026.901	4394.566
141	8517124.27	547007.682	4390.982
142	8516576.15	546705.704	4438.096
143	8516842.53	546456.825	4437.9
144	8517610.9	546667.799	4401.512
145	8516900.27	546903.598	4376.609
146	8516902.88	546922.819	4377.722
147	8516644.07	546689.144	4418.276
148	8517066.04	546856.78	4381
149	8516917.51	546973.495	4379.77
150	8517112.91	546979.393	4387.321
151	8517110.71	546970.103	4386.514
152	8517089.2	546915.216	4384.266
153	8517824.84	546575.931	4403.997
154	8516789.45	546778.082	4392.639
155	8516861.94	546944.051	4378.717
156	8517045.37	546802.475	4383.837
157	8517091.31	546923.556	4384.959
158	8518265.67	546277.727	4399.9
159	8516904.42	546931.462	4377.879
160	8517975.88	546490.971	4404.825
161	8517609.66	546495.639	4406.315
162	8516878.69	546811.228	4389.136
163	8516959.49	546865.007	4375.621
164	8517607.29	546509.608	4405.793
165	8518164.4	546416.769	4403.266
166	8516800.11	546481.508	4444.434
167	8516936.22	547047.64	4385.716
168	8517031.61	546764.399	4389.246
169	8518232.91	546302.993	4402.873
170	8516798.21	546477.786	4441.714
171	8517570.53	546578.641	4403.099
172	8518232.83	546302.328	4402.052
173	8518407.99	545971.729	4401.437
174	8516841.86	546456.788	4437.87
175	8516880.8	546826.342	4379.599
176	8518227.96	546323.621	4403.47
177	8516947.5	546729.278	4394.196
178	8516645.1	546690.366	4418.923
179	8516798.84	546480.606	4442.446
180	8517111.78	546970.765	4385.524
181	8517030.71	546757.485	4390.011
182	8518404.69	546043.627	4401.295

183	8518232.48	546302.434	4402.996
184	8517844.29	546545.816	4404.944
185	8518232.48	546300.755	4402.961
186	8517577.35	546645.673	4397.916
187	8517063.87	546845.009	4381.198
188	8517123.49	547006.71	4392.95
189	8516915.03	546963.719	4378.468
190	8516873.58	546790.85	4389.902
191	8517072.79	546875.431	4383.542
192	8517609.59	546510.139	4405.055
193	8516939.04	547059.639	4387.732
194	8516928.03	547020.876	4379.946
195	8517260.53	546903.554	4390.842
196	8516908.45	546942.811	4377.665
197	8516907.24	546943.481	4380.309
198	8518408.69	546044.945	4401.765
199	8516909.69	546900.819	4377.099
200	8517707.26	546630.849	4405.2

**UNSCH**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**
Bach. CLEVERT ALDAIR PACOTAIBE QUISPE**R.D. N° 375-2025-UNSCH-FCA-D**

En la ciudad de Ayacucho a los veintisiete días del mes de octubre del año dos mil veinticinco, siendo las dieciséis horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el Mg. Alex Lázaro Tineo Bermúdez, Dr. Eleazar Chuchón Angulo como asesor, Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla y el Ing. Efraín Chuchón Prado; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Rol de los bofedales en la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu, Chuschi - Ayacucho, 2025**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **CLEVERT ALDAIR PACOTAIBE QUISPE**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Mg. Alex Lázaro Tineo Bermúdez	15	15	17	16
Dr. Eleazar Chuchón Angulo	16	17	17	17
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla	16	15	17	16
Ing. Efraín Chuchón Prado	15	16	16	16
PROMEDIO GENERAL				16

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

Mg. Alex Lázaro Tineo Bermúdez
Presidente

Dr. Eleazar Chuchón Angulo
Asesor

Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla
Jurado

Ing. Efraín Chuchón Prado
Jurado

Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-CF; hace constar que el trabajo titulado;

Rol de los bofedales en la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu, Chuschi – Ayacucho, 2025

Autor : Clevert Aldair Pacotaípe Quispe
Asesor : Eleazar Chuchón Angulo

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobando mediante de RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de seis **(6%)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajo estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 2803832892

Ayacucho, 04 de noviembre de 2025

Atentamente,



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias

Prof. Dr. Eleazar Chuchón Angulo

C.C.
✓ Archivo.

Rol de los bofedales en la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu, Chuschi – Ayacucho, 2025

por Clevert Aldair PACOTAIPE QUISPE

Fecha de entrega: 04-nov-2025 09:19p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2803832892

Nombre del archivo: Tesis-Final-revA.pdf (8.44M)

Total de palabras: 32559

Total de caracteres: 189036

Rol de los bofedales en la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu, Chuschi – Ayacucho, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
3	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
4	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
5	ojs.brazilianjournals.com.br Fuente de Internet	<1 %
6	revistas.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
7	futur.upc.edu Fuente de Internet	<1 %
8	tig.age-geografia.es Fuente de Internet	<1 %

9	oacg.fcs.ucr.ac.cr Fuente de Internet	<1 %
10	slideplayer.es Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.una.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
12	Machicao Rodrigo, Rodolfo. "Valoración económica de los servicios hidrológicos de los sistemas de bofedales en la cordillera oriental de la región Puno", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1 %
13	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
16	vbook.pub Fuente de Internet	<1 %
17	www.kerwa.ucr.ac.cr Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.ucss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

19	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
21	"Tendencias en la investigación universitaria. Una visión desde Latinoamérica. Volumen XXV", Alianza de Investigadores Internacionales SAS, 2024 Publicación	<1 %
22	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1 %
23	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
24	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
25	doaj.org Fuente de Internet	<1 %
26	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1 %
27	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
28	Submitted to unsaac Trabajo del estudiante	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo

**Rol de los bofedales en la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca
Chikllarazu, Chuschi – Ayacucho, 2025**

**Role of the bofedales in water recharge at the head of the Chikllarazu micro-
watershed, Chuschi – Ayacucho, 2025**

Clevert Aldair Pacotaípe Quispe¹ clevert.pacotaípe.21@unsch.edu.pe

Eleazar Chuchón Angulo¹ eleazar.chuchon@unsch.edu.pe

RESUMEN

Los bofedales constituyen ecosistemas estratégicos de las zonas altoandinas, esenciales para la regulación hídrica y el equilibrio ambiental. Sin embargo, en las últimas décadas se han visto fuertemente afectados por el cambio climático y actividades humanas, lo que ha generado una acelerada degradación y pérdida de su extensión. El estudio tuvo como finalidad evaluar la contribución de los bofedales a la recarga hídrica en la microcuenca Chikllarazu, así como analizar los cambios espacio-temporales y su capacidad de almacenamiento, dada su importancia como reguladores naturales de los recursos hídricos en ecosistemas altoandinos. Se aplicó un enfoque cuantitativo mediante el análisis de imágenes satelitales Sentinel-2 procesadas en Google Earth Engine. Se utilizaron índices espectrales (NDVI y NDII) y técnicas de clasificación supervisada con Random Forest, validadas a partir de 200 puntos de verificación en campo además se realizaron perfiles de tomografía eléctrica (ERT) para identificar condiciones subsuperficiales asociadas a la retención hídrica. En el año 2025 los bofedales alcanzaron 20.11 km² durante la temporada de lluvias y 19.43 km² en la época seca. El análisis temporal de 2016 a 2024 evidenció una disminución de 8.90 km² a 6.69 km² en la estación seca, con una recuperación parcial a 8.73 km² en 2025. El NDII confirmó la fuerte estacionalidad en 2023, registrando un máximo de 33.83 km² en abril y un mínimo de 3.23 km² en septiembre y los perfiles ERT revelaron suelos subsaturados con baja resistividad ($\leq 30 \Omega \cdot m$), lo cual evidencia zonas de acumulación de agua. En conclusión, los bofedales de la cabecera de la microcuenca Chikllarazu cumplen un rol estratégico en la regulación de la recarga hídrica.

Palabras clave: Bofedales; Recarga hídrica; Teledetección; NDVI; NDII; Microcuenca Chikllarazu.

¹ Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

ABSTRACT

Wetlands are strategic ecosystems in the high Andean regions, crucial for water regulation and environmental balance. However, in recent decades, they have been significantly affected by climate change and human activities, leading to accelerated degradation and a loss of their extent. This study aimed to evaluate the contribution of wetlands to water recharge in the Chikllarazu microbasin and analyze the spatiotemporal changes in their storage capacity, given their importance as natural regulators of water resources in high Andean ecosystems. A quantitative approach was applied through the analysis of Sentinel-2 satellite images processed in Google Earth Engine. Spectral indices (NDVI and NDII) and supervised classification techniques using Random Forest were employed, validated with 200 field verification points. Additionally, electrical resistivity tomography (ERT) profiles were conducted to identify subsurface conditions associated with water retention. In 2025, the wetlands covered 20.11 km² during the rainy season and 19.43 km² during the dry season. The temporal analysis from 2016 to 2024 showed a decrease from 8.90 km² to 6.69 km² in the dry season, with a partial recovery to 8.73 km² in 2025. The NDII confirmed strong seasonality in 2023, with a peak of 33.83 km² in April and a minimum of 3.23 km² in September. The ERT profiles revealed subsaturated soils with low resistivity ($\leq 30 \Omega \cdot m$), indicating water accumulation zones. In conclusion, the wetlands in the headwaters of the Chikllarazu microbasin play a strategic role in water recharge regulation.

Keywords: Wetlands, Water Recharge, Remote Sensing, NDVI, NDII, Chikllarazu Microbasin.

INTRODUCCIÓN

La crisis hídrica global constituye uno de los problemas más urgentes del siglo XXI. Según el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat), 2.500 millones de personas -36% de la población mundial- viven en áreas con estrés hídrico; en la misma medida, más de 20% del PIB mundial se produce en la región con escasez de agua (Space4Water Portal, s. f.). Esto, además, se agrava con el crecimiento demográfico, la expansión de las economías y los efectos del cambio climático, que apuntan sobre todo a los frágiles ecosistemas como los humedales altoandinos y los bofedales.

Estos últimos, y en particular los bofedales, se reconocen como ecosistemas frágiles en la Ley General del Ambiente del Perú (Ley N° 28611, Artículo 99) y forman parte del paisaje altoandino. Para (Maldonado, 2010), la definición de estos ecosistemas es más compleja, pues integra los sistemas de pantanos, arrecifes de coral, lagos y ríos que se caracterizan por sus dinámicas en el agua y la biodiversidad que albergan. Por su naturaleza, estos ecosistemas complejos, los híbridos.

En el contexto de nuestro país, la microcuenca Chikllarazu en Ayacucho es un caso emblemático que demuestra la importancia de los bofedales en la seguridad hídrica de la región. El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (Instituto Nacional de Investigación

en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM), 2023) considera que el adecuado funcionamiento de estos ecosistemas es fundamental para la disponibilidad de agua para la agricultura, el consumo humano, y la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, estos ecosistemas han comenzado a enfrentar peligros inminentes por el desarrollo de actividades mineras inadecuadas, el pastoreo descontrolado, el cambio climático, y el retroceso de los glaciares (Moncada et al., 2018). Para el monitoreo de estos ecosistemas en dinámico, la teledetección se convierte en una herramienta clave.

(GeoInnova, s. f.) explica que la variabilidad de los humedales, sujeta a cambios hídricos, las prácticas agrícolas y las dinámicas estacionales, demanda la utilización de metodologías que registren su comportamiento en el tiempo y en el espacio. El uso del análisis multiespectral y el procesamiento de imágenes satelitales en series temporales, junto con el análisis de otras técnicas, han sido unos de los métodos más efectivos en la caracterización de humedales altoandinos, en donde se han detectado niveles preocupantes de degradación (Aducci & Willems, 2014).

El Portal Space4Water (s.f.) destaca la utilidad de la teledetección para mapear, monitorear y evaluar la biodiversidad del paisaje, proporcionando datos críticos sobre la distribución espacial y el estado de varios ecosistemas. Tal capacidad tecnológica

ayuda en la toma de decisiones informadas sobre la conservación de hábitats naturales y su gestión sostenible.

Dentro de este contexto, el presente estudio intenta determinar la función específica de los pantanos en la recarga hídrica en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu para el año 2025. Este estudio pretende incorporar la teledetección, el análisis espectral y evaluaciones in situ para cuantificar el ciclo hidrológico a nivel local y contribuir con evidencia científica que apoye los esfuerzos de conservación bajo una creciente presión antropogénica y variabilidad climática. Esta investigación tiene como objetivo promover el desarrollo de políticas de gestión del agua que incorporen el verdadero valor hidrológico de estos ecosistemas para apoyar a la comunidad local y proporcionar sostenibilidad ambiental regional.

MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Materiales y equipos

2.2.1 *Materiales y equipos en campo*

- Wincha 100m
- Flexómetro 5m
- Libreta de campo
- Pizarra
- Estacas y cuerdas
- Calculadora científica
- Casco
- Chaleco
- Guantes
- Equipos de Tomografía Eléctrica
- GPS Diferencial SOUTH Galaxy G7

- Dron Rg106
- Yeso
- Microsoft Office
- AutoCAD Civil 3D 2020
- ArcGIS 10.8.0
- ArcGIS Pro
- Google Earth
- Google Earth Engine
- RStudio

2.2 Metodología

2.2.1 *Delimitar las áreas de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes satelitales.*

a) Definir el área de estudio

Se trazó un polígono geográfico en formato shapefile que se elaboró en ArcGIS. Este polígono se cargó en Google Earth Engine (GEE), como asset con ubicación de EPSG:4326 WGS 84 / UTM 18S.

b) Selección y descarga de imágenes satelitales

Para el análisis espacial, se utilizaron las imágenes del satélite Sentinel-2. Esta colección fue elegida por su resolución espacial de 10 metros, su frecuencia de revisita de 5 días y su disponibilidad en Google Earth Engine (GEE).

Las imágenes se filtraron teniendo en cuenta las dos estaciones climáticas:

- Época húmeda, correspondiente a los meses de noviembre a abril, donde se presentan mayores precipitaciones.

- Época seca, comprendida entre los meses de mayo a octubre, caracterizada por menor presencia de lluvias.

Se eligieron las escenas donde la nubosidad no excediera el 20% y en enero y agosto para las estaciones húmedas y secas.

Tabla 1

Datos de las imágenes satelitales utilizadas en el análisis

Sensor	Plataforma	Fecha	Estación	Resolución Espacial (m)	Nubosidad (%)
Sentinel 2	Google Earth Engine	15/08/2025	Seca	10	< 20
Sentinel 2	Google Earth Engine	16/01/2025	Húmeda	10	< 20

c) Preprocesamiento

- Corrección radiométrica:
- Enmascaramiento de nubes y sombras:
- Recorte de imágenes:
- Composición:

d) Cálculo del NDVI

Se llevó a cabo el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Definir rangos de NDVI para clases como:

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

- B8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR), ondas asociadas con el vigor vegetal.
- B4 representa la banda del rojo (Red), sensible al nivel de absorción de la vegetación.

Los valores del NDVI oscilan entre -1 y +1. Según (EOS DATA ANALYTICS, s. f.).

Tabla 2

Rango de clasificación de NDVI

Rango de NDVI	Interpretación
-1.0 a 0.0	Agua
0.0 a 0.2	Suelo desnudo
0.2 a 0.4	Vegetación dispersa
0.4 a 0.6	Bofedales
0.6 a 0.8	Vegetación densa

Nota: Los valores de NDVI permiten discriminar diferentes coberturas del suelo (EOS DATA ANALYTICS, s. f.).

e) Clasificación supervisada con Random Forest

Para determinar con precisión las coberturas existentes en la microcuenca Chikllarazu, se utilizó una técnica de clasificación supervisada utilizando el algoritmo Random forest, de manera preliminar a la identificación por dron y levantamiento topográfico con GNS; en el campo se recolectaron 200 puntos para el modelo de entrenamiento.

Clases de cobertura definidas:

- Agua
- Suelo desnudo
- Vegetación dispersa
- Vegetación densa
- Bofedales permanentes – bofedales estacionales

Figura 1

Trabajo de campo en la cabecera de la microcuenca



Entrenamiento del modelo:

- Los puntos de datos de entrenamiento para cada clase.
- Los datos se dividieron en un 80% para entrenamiento y un 20% para validación.
- Se entrenó un modelo de Bosques Aleatorios con 500 árboles de decisión (árboles = 500).

f) Validación

Para evaluar la efectividad del modelo de clasificación supervisada Random Forest, se realizó una validación distinta para los períodos seco y húmedo, utilizando un conjunto de datos no involucrado en el entrenamiento. A partir de las matrices de confusión, se calcularon indicadores como la precisión general (OA), la precisión del usuario (errores de comisión) y la precisión del productor (errores de omisión).

- Matriz de confusión. La matriz de confusión compara las predicciones con los datos reales y permite

identificar errores de omisión y de comisión.

- Índice Kappa. El índice Kappa determina la exactitud de un mapa considerando todos los valores presentes en la matriz. comprendidos entre 0 y 1, donde 1 refleja un alto nivel de concordancia y 0 discrepancia.

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Donde:

- P_o = proporción de observaciones correctamente clasificadas (exactitud global).
- P_e = proporción de coincidencias esperadas por azar.

Precisión Observada (P_o): Es la fracción de clasificaciones certeras en relación al total de clasificaciones ejecutadas. Se obtiene sumando los valores en la diagonal principal de la matriz de confusión y dividiendo por la cantidad total de clasificaciones.

$$P_o = \frac{\sum \text{Diagonal}}{\text{Total de clasificaciones}}$$

Precisión Esperada (P_e): Se pueden considerar los casos sin clasificaciones como clasificaciones al azar.

$$P_e = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Suma de la fila}_i \times \text{Suma de la columna}_i}{\text{Total de clasificaciones}^2} \right)$$

La valoración del índice de kappa son los siguientes:

Tabla 3

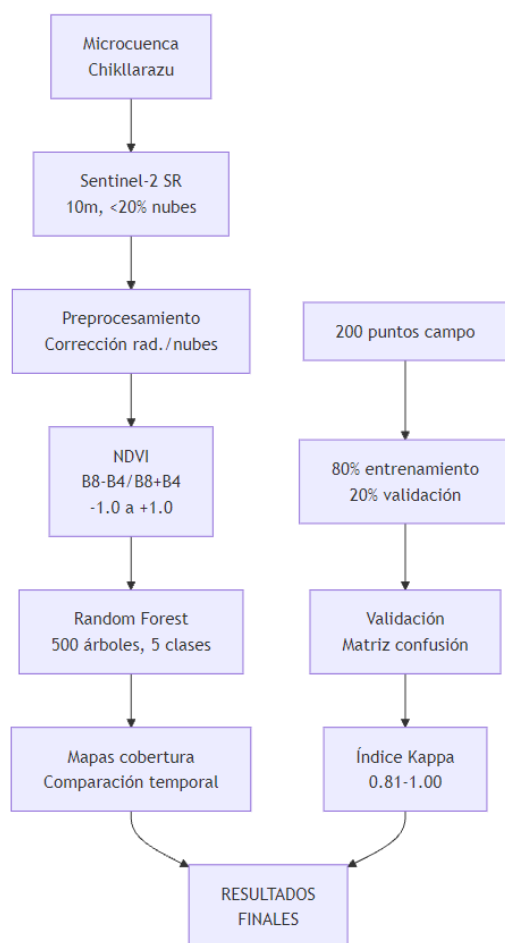
Escalas de calificación para el índice Kappa

Índice Kappa	Fuerza de concordancia
0	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecta

Nota: Escala propuesta por, citado en (Mamani, 2024, p. 106)

g) Análisis espacial y cálculo de áreas

Se llevó a cabo un análisis espacial de las coberturas en la microcuenca Chikllarazu. Con RStudio de la época húmeda (noviembre-abril) y la época seca (mayo-octubre).



2.2.2 Analizar la variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, observando cambios estacionales y anuales.

a) Definición del área de estudio

Se trazó un polígono geográfico en formato shapefile que se elaboró en ArcGIS. Este polígono se cargó en Google Earth Engine (GEE), como asset con ubicación de EPSG:4326 WGS 84 / UTM 18S.

b) Selección y descarga de imágenes satelitales

En relación a la variación espacial y temporal de la cobertura de los bofedales, se seleccionaron imágenes del sensor Sentinel-2. Se identificaron dos períodos clave para capturar la dinámica estacional de los bofedales:

- Época seca: de mayo a octubre, caracterizada por precipitaciones escasas y descenso del nivel freático.

Tabla 4

Resumen de imágenes satelitales seleccionadas

Año	Época	Sensor	Resolución Espacial (m)	Nubosidad (%)	Fecha
2025	Seca	Sentinel - 2	10	20	15/08/2025
2024	Seca	Sentinel - 2	10	20	10/08/2024
2023	Seca	Sentinel - 2	10	20	12/09/2023
2022	Seca	Sentinel - 2	10	20	01/09/2022
2021	Seca	Sentinel - 2	10	20	10/08/2021
2020	Seca	Sentinel - 2	10	20	25/08/2020
2019	Seca	Sentinel - 2	10	20	22/08/2019
2018	Seca	Sentinel - 2	10	20	01/09/2018
2017	Seca	Sentinel - 2	10	20	20/08/2017
2016	Seca	Sentinel - 2	10	20	17/08/2016

c) Preprocesamiento de imágenes

El preproceso se desarrolló en tres etapas principales:

- Enmascarado de nubes y sombras.
- Recorte espacial.
- Composición estacional.

d) Cálculo de índices espectrales (NDVI)

se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

- B8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR).
- B4 representa la banda del rojo (Red),

El NDVI fluctúa entre -1 y 1. Un valor.

Tabla 5

Rango de clasificación de NDVI

Rango de NDVI	Interpretación
-1.0 a 0.0	Agua
0.0 a 0.2	Suelo desnudo
0.2 a 0.4	Vegetación dispersa
0.4 a 0.6	Bofedales
0.6 a 0.8	Vegetación densa

Los valores de NDVI permiten discriminar diferentes coberturas del suelo (EOS DATA ANALYTICS, s. f.).

e) Clasificación supervisada con Random Forest

La clasificación de coberturas se llevó a cabo utilizando el algoritmo Random Forest (RF).

Las clases definidas incluyen:

- Agua
- Suelo desnudo
- Vegetación dispersa

- Vegetación densa
- Bofedales permanentes

Entrenamiento:

- Se priorizó un mínimo de 20-100 muestras por clase.
- El conjunto se dividió en 80% para entrenamiento y el 20% restante se utilizó para la validación.

Parámetros del modelo:

Se utilizaron 500 árboles (numberOfTrees = 500).

f) Validación y métricas de desempeño

El modelo fue validado con el 20% de muestras reservadas. Se generaron matrices de confusión de cada año.

Índice de Kappa, el cual corresponde al acuerdo corregido por azar y para el cálculo Kappa en nuestro caso corresponde como objetivo.

g) Se realizó el cambio de cobertura entre cada año

La tasa de cambio de los bofedales se determinó con base en la diferencia de superficie entre años (Pamo & Oscco, 2022).

$$T_c = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \times 100$$

Donde:

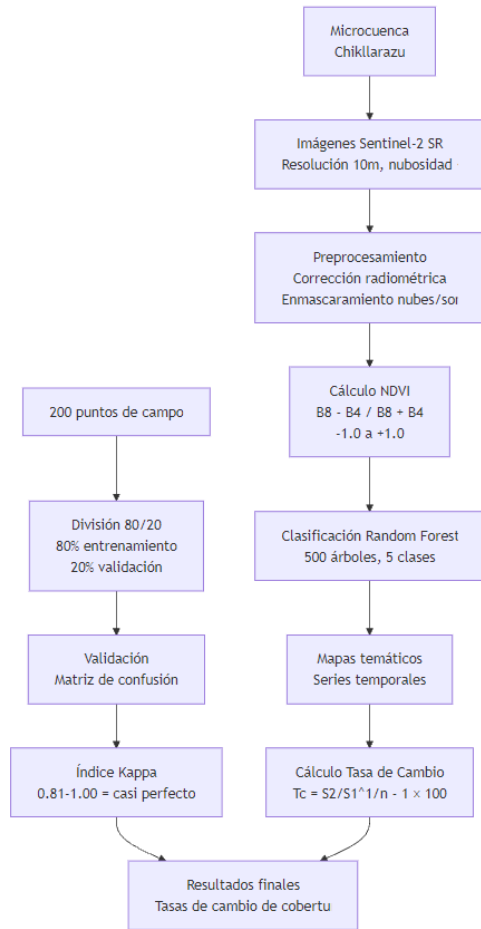
- Tc = tasa anual de cambio (%)
- S1= superficie en el año inicial (ha o km²)
- S2 = superficie en el año final (ha o km²)

- n = número de años entre las dos fechas analizadas

se analizó la dinámica de los bofedales durante los años 2016–2025 (Chávez, 2015).

h) Análisis espacial y cálculo de áreas

Posteriormente a recibir los mapas clasificados.



i) Generación de mapas, gráficos y reporte final

Con respecto a la difusión de resultados la producción consistió en:

- Mapas temáticos por año
- Barra y serie de tiempo para el análisis de la evolución en la cobertura de los bofedales.

- Tabla de tasa de cambio de cobertura anual.

2.2.3 Evaluar la capacidad de los bofedales para contribuir a la recarga hídrica en la microcuenca a través de cobertura y contenido de humedad.

a) Definición del área de estudio

Se trazó un polígono geográfico en formato shapefile que se elaboró en ArcGIS. Este polígono se cargó en Google Earth Engine (GEE), como asset con ubicación de EPSG:4326 WGS 84 / UTM 18S.

b) Selección y descarga de imágenes satelitales

Se emplearon imágenes Sentinel-2 SR (S2SR) (10 m, 5 días, corrección atmosférica incluida). Para capturar la dinámica estacional se definieron meses del año 2023.

Tabla 6
Imágenes satelitales Sentinel-2 seleccionadas en la microcuenca Chikllarazu (2023)

Años	Sensor	Resolución Espacial (m)	Nubosidad (%)	Fecha
Enero	Sentinel - 2	10	40	12/01/2023
Febrero	Sentinel - 2	10	30	26/02/2023
Marzo	Sentinel - 2	10	30	12/03/2023
Abril	Sentinel - 2	10	20	22/04/2023
Mayo	Sentinel - 2	10	20	17/05/2023
Junio	Sentinel - 2	10	20	01/06/2023
Julio	Sentinel - 2	10	20	01/07/2023
Agosto	Sentinel - 2	10	20	10/08/2023
Setiembre	Sentinel - 2	10	20	04/09/2023
Octubre	Sentinel - 2	10	20	08/10/2023
Noviembre	Sentinel - 2	10	20	03/11/2023
Diciembre	Sentinel - 2	10	20	23/12/2023

Tabla 7

Imagen del satélite seleccionada realizada en trabajo de campo 29/03/2025.

Años	Sensor	Resolución Espacial (m)	Nubosidad (%)	Fecha
Abril	Sentinel -2	10	40	01/04/2025

c) Preprocesamiento de imágenes

El preprocesamiento se desarrolló en tres etapas principales:

- Enmascaramiento de nubes y sombras.

d) Cálculo de índices espectrales (NDII)

Se utilizó NDII (Índice de Diferencia Normalizada de Infrarrojos), junto con las bandas B08 (NIR, 819 nm) y B11 (SWIR, 1600 nm) de Sentinel-2 (García & Willems, 2015).

Definir rangos de NDII para clases como:

$$NDII = \frac{(B8 - B11)}{(B8 + B11)}$$

- B8 = Banda del infrarrojo cercano NIR 842 nm.
- B11 = Banda del infrarrojo de onda corta SWIR1.

Tabla 8

Rango de clasificación de NDII

Rango de NDII	Interpretación
-1 a 0.02	No bofedal
0.02 a 0.79	Bofedal húmedo
0.79 a 1	No bofedal

e) Se realizó el cambio de cobertura entre cada mes

La tasa de cambio de los bofedales se determinó con base en la diferencia de superficie entre meses consecutivos.

$$T_c = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] \times 100$$

Donde:

- T_c = tasa de cambio (%)
- At_2 = área de bofedales en el año posterior
- At_1 = área de bofedales en el año inicial.

Este cálculo ayuda a determinar tanto aumentos como disminuciones en relación con el área de bofedales. Los valores de T_c fueron organizados en una tabla comparativa y representados en series de tiempo para transmitir gráficamente la dinámica de los bofedales durante el período enero a diciembre del año 2023

f) Integración de trabajo de campo (ERT) y Sentinel-2

Se llevaron a cabo dos perfiles eléctricos tomográficos Sismógrafo SeismeX16/24 con geófonos de 4.5 Hz en dos trazas TE-01 y TE-02. Se usó el arreglo Wenner con 24 electrodos, espaciamiento 4 m o 2.5 m y longitud 320 m. La topografía se incorporó desde GPS diferencial. La inversión 2D se realizó en software RESYPI con regularización suave.

Figura 2

Trabajo de campo en la microcuenca Chikllarazu



Tabla 9

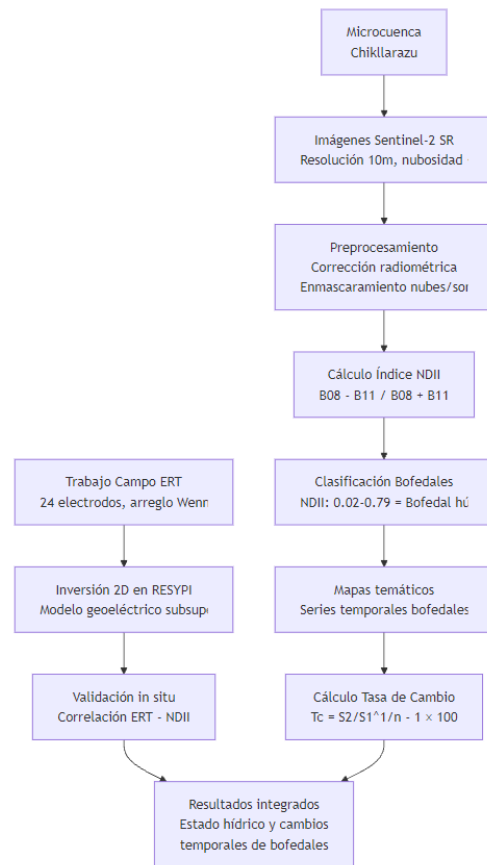
Rango de resistividad según tipo de suelo

Descripción	Margen de	
	valores	Valor medio ($\Omega \cdot m$)
	($\Omega \cdot m$)	
Terreno pantanoso	2–50	30
Barro mezclado con paja	2–200	40
Terreno fangoso y arcilloso, humus	20–260	100
Arena y terreno arenoso	50–3000	200 (húmedos)
Turba	≥ 1200	1000 (húmedo)
Grava (húmeda)	50–3000	2000
Terreno pedregoso y rocoso	100–8000	2000

g) Generación de mapas, gráficos y reporte final

Lo siguiente fue creado para comunicar resultados:

- Mapas temáticos mensuales.
- Gráficas de barras de series temporales.
- Tabla de tasa de cambio de cobertura anual.



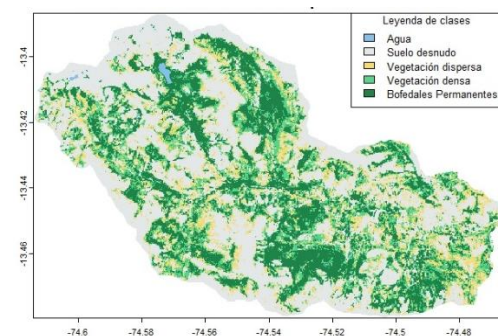
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3 Resultados

2.3.1 Áreas de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes satelitales.

Figura 3

Mapa de clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época húmeda 2025



El mapa en la Figura 3 la clasificación supervisada con Random Forest habilitado define cinco clases de cobertura en la microcuenca Chikllarazu. Esto muestra que, en la temporada húmeda, los bofedales definitivamente y en gran medida definen el área, sirviendo como reservorios de agua.

Tabla 10

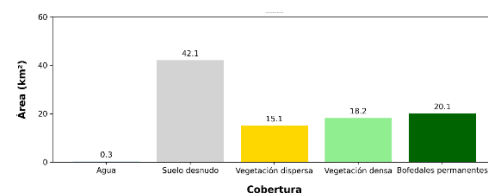
Área de coberturas en la microcuenca Chikllarazu - época húmeda 2025

N°	Descripción	Área (km ²)
1	Agua	0.29
2	Suelo desnudo	42.15
3	Vegetación dispersa	15.12
4	Vegetación densa	18.23
5	Bofedales	20.11

Según la Tabla 10 en 2025, durante la temporada de lluvias, el tipo de cobertura terrestre más extendido fue el suelo desnudo con un área de 42.15 km², seguido de los humedales permanentes que ocuparon 20.11 km². La vegetación densa ocupó 18.23 km² y la vegetación dispersa cubrió 15.12 km², mientras que el agua superficial apenas alcanzó 0.29 km². Estos resultados indican que, a pesar de las altas precipitaciones, los bofedales constituyen una parte sustancial del paisaje (alrededor del 20%), aunque no son el tipo de cobertura dominante.

Figura 4

Distribución del área por tipo de cobertura durante la época húmeda (2025)



Según la gráfica en barras en la Figura 4 se ve que los días húmedos de 2025, los bofedales persistentes tenían un área de 20.11 km², que corresponde a casi el 20% de la cobertura total de la microcuenca Chikllarazu. Esta área demuestra la importancia de estos ecosistemas en el balance hídrico durante los meses más lluviosos y la provisión de servicios ecosistémicos.

Tabla 11

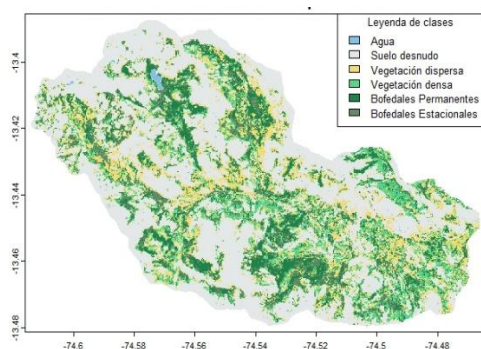
Matriz de confusión de la clasificación supervisada para la época húmeda

	Agua	Suelo desnudo	Vegetación dispersa	Vegetación densa	Bofedales	Total	Error de omisión	Kappa
Agua	85	6	0	0	0	91	0.023	0
Suelo desnudo	2	286	0	3	3	294	0.034	0
Vegetación dispersa	0	0	1	0	0	1	0	0
Vegetación densa	0	1	0	27	1	29	0.129	0
Bofedales	0	3	0	1	48	52	0.077	0
Total	87	296	1	31	52	467	0	0
Error de omisión	0.067	0.027	0	0.069	0.077	0	0	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0.9218

Según la Tabla 11 muestra la validación del modelo para la clasificación durante el período húmedo alcanzó un índice Kappa de 0.92187 con gran precisión además incorpora errores de omisión por clase y también proporciona el valor Kappa global de 0.92187 que, según la escala de Landis y Koch, indica un acuerdo casi perfecto.

Figura 5

Clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época seca 2025



El mapa de la Figura 5 del período seco de 2025 predice una disminución de las áreas vegetadas densas y un aumento del suelo desnudo. Además, hay humedales estacionales, que solo se desarrollan durante unos pocos meses del año e ilustran la sensibilidad de estos ecosistemas a los déficits de agua.

Tabla 12

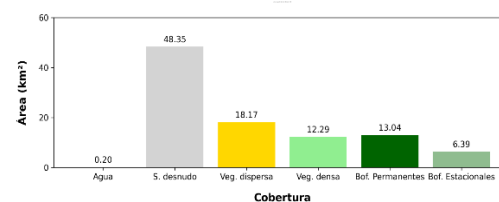
Área de coberturas en la microcuenca Chikllarazu - época seca 2025

N°	Descripción	Área (km²)
1	Agua	0.20
2	Suelo desnudo	48.35
3	Vegetación dispersa	18.17
4	Vegetación densa	12.29
5	Bofedales permanentes	13.04
6	Bofedales estacionales	6.39

En la Tabla 12 que los bofedales permanentes cubrieron 13.04 km² y los humedales estacionales 6.39 km², sumando en total 19.43 km². Esto indica una reducción de bofedales.

Figura 6

Clasificación de cobertura de la microcuenca Chikllarazu - época seca 2025



En la Figura 6 el período seco del año 2025, los bofedales permanentes y estacionales de la microcuenca Chikllarazu tuvieron una superficie de 13.04 km² y 6.39 km² respectivamente, lo que sumó un total de 19.43 km². Lo cual muestra la dinámica en la época seca de la microcuenca Chikllarazu.

Tabla 13

Matriz de confusión de la clasificación supervisada para la época seca

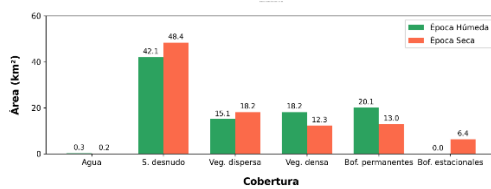
	Agua	Suelo desnudo	Vegetación dispersa	Vegetación n densa	Bofedales permanentes	Bofedales estacionales	Total	Error de omisión	Kappa
Agua	80	2	0	0	0	0	82	0.024	0
Suelo desnudo	1	285	0	1	1	0	288	0.011	0
Vegetación dispersa	0	1	5	0	0	0	6	0.167	0
Vegetación densa	0	0	0	30	0	0	30	0	0
Bofedales permanentes	0	1	0	0	52	1	54	0.037	0
Bofedales estacionales	0	0	0	0	1	3	4	0.25	0
Total	81	289	5	31	54	4	444	0	0
Error de omisión	0.012	0.015	0	0.032	0.037	0.25	0	0	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	444	0	0.95

En la Tabla 13 el valor alcanzado por el índice Kappa durante la sequía fue de 0.965, alcanzado en la época húmeda. Refiriéndose nuevamente a la escala de Landis y Koch, Kappa 0.965 logra una casi perfecta concordancia entre la clasificación y los datos de referencia. logra una casi perfecta concordancia entre la clasificación y los datos de referencia, lo que otorga bastante

confianza al análisis realizado. En este sentido, la consecución de un Kappa tan alto.

Figura 7

Cobertura de la microcuenca Chikllarazu en época seca y húmeda (2025)

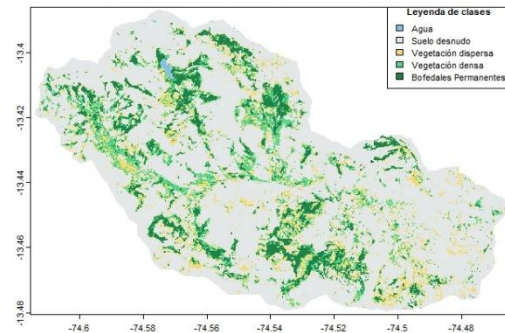


En la Figura 7 el gráfico comparativo evidencia cambios significativos en la cobertura de la microcuenca entre la época húmeda y la época seca. se observa en términos de superficie total, con 20.11 km² en época húmeda y 19.43 km² en época seca; sin embargo, se aprecia una redistribución interna entre bofedales permanentes y estacionales, lo cual pone de manifiesto su dinámica ecológica lo que evidencia la sensibilidad de esta cobertura frente a la estacionalidad climática y su vulnerabilidad a periodos de déficit hídrico.

2.3.2 Variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, observando cambios estacionales y anuales.

Figura 8

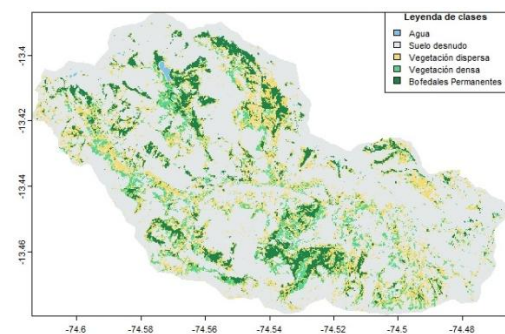
Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2016)



La extensión de los bofedales permanentes en la Figura 8 de la microcuenca de Chikllarazu durante el año 2016 fue de 8.90 km², convirtiéndose en la cobertura de bofedales más representativa del periodo.

Figura 9

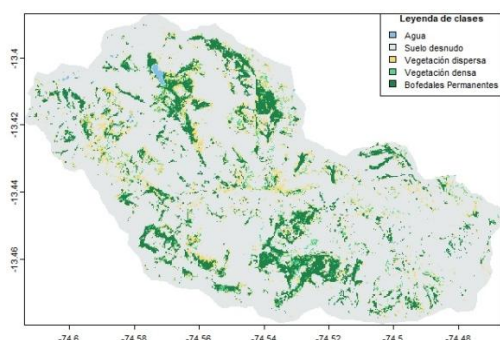
Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2020)



El análisis espacial según la Figura 9 en el año 2020 evidencia una reducción del 14.6% en la cobertura de bofedales permanentes respecto a 2016 (8.90 km²), situando el área en 7.60 km², destacando la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante perturbaciones sostenidas.

Figura 10

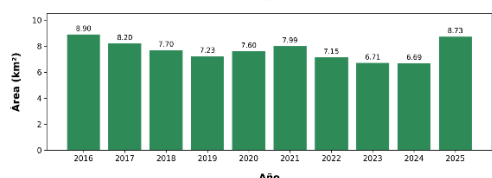
Mapa de cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2025)



En la Figura 10 el análisis espacial del año 2025 revela una notable recuperación de los bofedales permanentes, que alcanzan 8.73 km² tras el mínimo histórico de 2024 (6.69 km²), representando un incremento del 30.5%.

Figura 11

Evolución del área de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu (2016–2025)



El análisis de la serie temporal 2016-2025 en la Figura 11 revela una tendencia general de contracción en el área de bofedales permanentes, con una reducción acumulada del 24.8% entre 2016 (8.90 km²) y 2024 (6.69 km²), mínimo histórico registrado. Esta fase de degradación progresiva refleja la vulnerabilidad del ecosistema ante factores como la variabilidad climática (sequías prolongadas, cambios en los regímenes de precipitación) y posibles presiones antrópicas.

Figura 12

Serie temporal del área de bofedales permanentes (2016–2025)

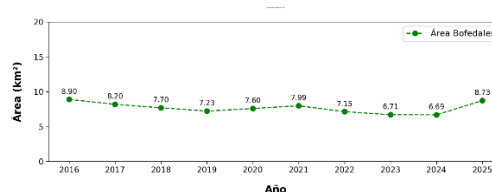


Tabla 14

Área de bofedales permanentes por año en la microcuenca Chikllarazu (2016–2025)

Mes	Área (km ²)
2016	8.90
2017	8.20
2018	7.70
2019	7.23
2020	7.60
2021	7.99
2022	7.15
2023	6.71
2024	6.69
2025	8.73

Para la Figura 12 y Tabla 14 los datos revelan que los bofedales permanentes están sujetos a escalas interanuales, con un área registrada que oscila entre 6.69 km² y 8.90 km². Esta dinámica evidencia la influencia tanto de la estacionalidad como de la variabilidad del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos.

Tabla 15

Matriz de tasa de cambio de área de bofedales (2016–2025)

	Años										
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
2016	--	-7.87	-6.99	-6.69	-3.87	-2.13	-3.58	-3.95	-3.51	-0.21	
2017	8.54	--	-6.1	-6.1	-2.5	-0.65	-2.7	-3.29	-2.87	0.79	
2018	7.51	6.49	--	-6.1	-0.65	1.24	-1.84	-2.71	-2.32	1.81	
2019	7.17	6.5	6.5	--	5.12	5.12	-0.37	-1.85	-1.54	3.19	
2020	4.03	2.57	0.66	-4.87	--	5.13	-3.01	-4.07	-3.14	2.81	
2021	2.18	0.65	-1.22	-4.87	-4.88	--	-10.5	-8.36	-5.75	2.24	
2022	3.72	2.78	1.87	0.37	3.1	11.75	--	-6.15	-3.27	6.88	
2023	4.12	3.4	2.79	1.88	4.24	9.12	6.56	--	-0.3	14.06	
2024	3.63	2.95	2.37	1.56	3.24	6.1	3.38	0.3	--	30.49	
2025	0.21	-0.78	-1.78	-3.09	-2.73	-2.19	-6.44	-12.3	-23.4	--	

El análisis de la matriz de tasas de cambio de la Tabla 15 revela una dinámica fluctuante en la cobertura de bofedales durante el período 2016-2025, caracterizada por dos fases críticas de pérdida acumulativa: el trienio 2016-2018, con reducciones superiores al 6.99 % anual, y el período 2021-2024, donde destaca una drástica reducción del 10.5% entre 2021-2022. Estas fases de deterioro reflejan la vulnerabilidad de los bofedales ante perturbaciones como sequías prolongadas y presiones antrópicas. No obstante, el período 2024-2025 muestra una recuperación excepcional del 30.49%.

Tabla 16

Índice Kappa de la clasificación supervisada (2016–2025)

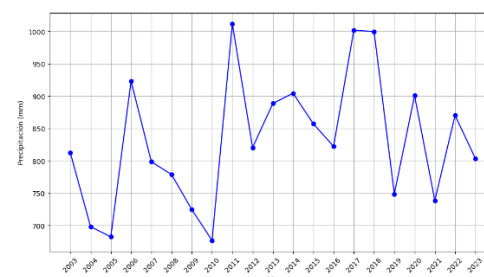
Años	Índice Kappa
2016	0.91
2017	0.89
2018	0.93
2019	0.95
2020	0.87
2021	0.90

2022	0.91
2023	0.92
2024	0.86
2025	0.92

La Tabla 16 presenta los valores del índice Kappa obtenidos en la validación de la clasificación supervisada de la cobertura de bofedales para el período 2016-2025. El análisis de estos valores revela un nivel de exactitud general "casi perfecto", de acuerdo con la escala de Landis & Koch (1977), entre 0.86 (2024) y 0.95 (2019). Este rango confirma la robustez y confiabilidad del método de clasificación implementado es precisa para el mapeo de bofedales en la microcuenca Chikllarazu.

Figura 13

Gráfico de tendencia anual de precipitación total en (mm)

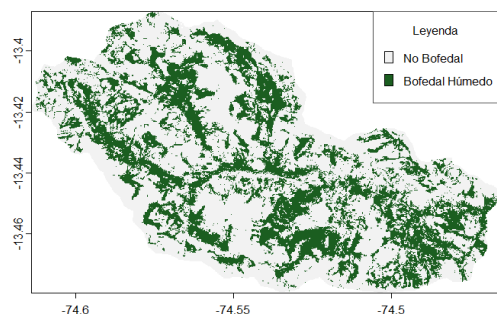


La Figura 13 presenta un gráfico con la tendencia anual de precipitación total. Dicha figura evidencia una variabilidad interanual relevante en los niveles de precipitación a lo largo del período de estudiado además coinciden con los años de cobertura total recuperada para la superficie de bofedales.

2.3.3 Capacidad de los bofedales para contribuir a la recarga hídrica en la microcuenca a través de cobertura y contenido de humedad.

Figura 14

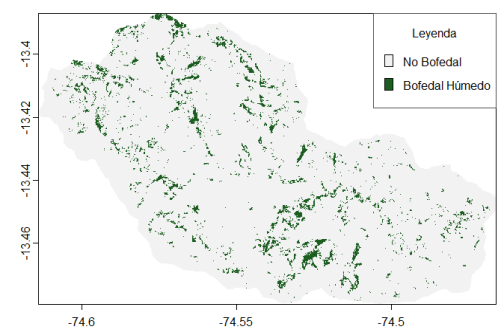
Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (abril 2023)



La Figura 14, correspondiente a abril de 2023 (temporada de lluvias), muestra que los bofedales húmedos alcanzaron su máxima extensión real dentro del período de estudio.

Figura 15

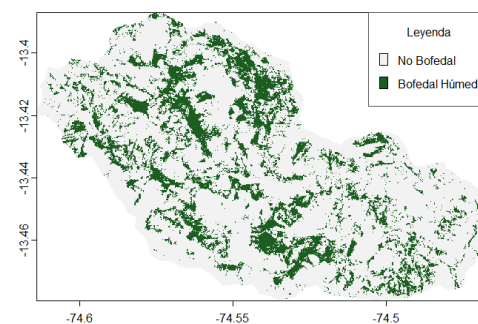
Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (agosto 2023)



El análisis de la Figura 16, correspondiente a agosto de 2023 (temporada seca), revela una drástica reducción y fragmentación de la superficie de bofedales húmedos en la microcuenca Chikllarazu.

Figura 16

Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (diciembre 2023)



La Figura 16 correspondiente a diciembre de 2023, evidencia una recuperación significativa en la cobertura y estado hídrico de los bofedales en la microcuenca Chikllarazu. Esta expansión y saturación de los bofedales húmedos se atribuye directamente al inicio de la estación de lluvias.

Figura 17

Evolución mensual del área de bofedales en la microcuenca Chikllarazu (2023)

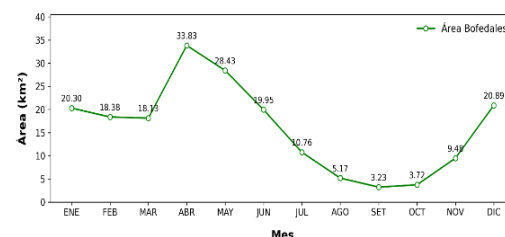


Tabla 17

Área mensual de bofedales en la microcuenca Chikllarazu (2023)

Mes	Área (km²)
ENE	20.3
FEB	18.38
MAR	18.13
ABR	33.83
MAY	28.43

JUN	19.95
JUL	10.76
AGO	5.17
SET	3.23
OCT	3.72
NOV	9.48
DIC	20.89

Los resultados obtenidos de la Figura 17 y la Tabla 16 se dice que la superficie de los bofedales fue alcanzado a un máximo en los meses de abril a 33.83 km². Un descenso progresivo durante los meses secos. En el mes de septiembre, fue reportado el ‘mínimo’ a 3.23 km².

Tabla 18

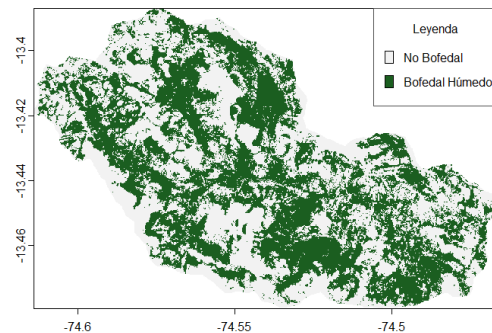
Matriz de tasa de cambio mensual del área de bofedales (2023)

meses	Meses											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
ENE	-9.46	-5.5	18.6	8.79	-0.35	-10.0	-17.7	-20.5	-17.1	-7.33	0.26	
FEB	10.45	-1.36	35.6	15.5	2.07	-10.1	-19.0	-22	-18.1	-7.09	1.29	
MAR	5.82	1.38	86.6	25.2	3.24	-12.2	-22.1	-24.9	-20.3	-7.7	1.59	
ABR	-15.6	-26.3	-46.4	-15.9	-23.2	-31.7	-37.4	-37.4	-30.7	-16.6	-5.85	
MAY	-8.08	-13.5	-20.1	18.99	-29.8	-38.4	-43.3	-41.9	-33.4	-16.7	-4.31	
JUN	0.35	-2.03	-3.14	30.2	42.5	-46.0	-49.0	-45.5	-34.2	-13.8	0.77	
JUL	11.2	11.3	13.9	46.5	62.5	85.4	-51.9	-45.2	-29.8	-3.12	14.2	
AGO	21.5	23.5	28.5	59.9	76.5	96.4	108	-37.5	-15.1	22.4	41.7	
SET	25.8	28.2	33.3	59.9	72.2	83.4	82.5	60.0	15.1	71.32	86.31	
OCT	20.7	22.1	25.3	44.48	50.19	52.18	42.48	17.89	-13.1	154.8	137	
NOV	7.91	7.63	8.44	19.93	20.09	16.05	3.22	-18.3	-41.6	-60.7	120.4	
DIC	-0.26	-1.27	-1.56	6.21	4.5	-0.76	-12.4	-29.4	-46.3	-57.8	-54.6	

Según la Tabla 18 se ilustra que los contrastes mensuales en la dinámica de los bofedales. Las ganancias más pronunciadas ocurrieron en abril y mayo. En contraste, las pérdidas más pronunciadas ocurrieron en agosto y septiembre.

Figura 18

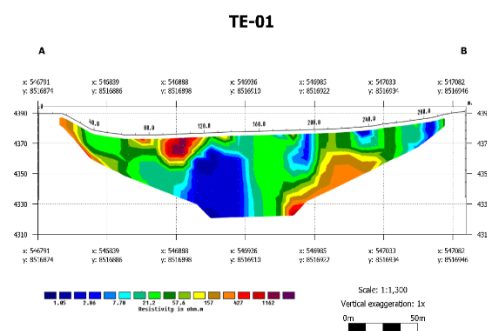
Clasificación de cobertura de bofedales húmedos (29 de marzo de 2025)



La Figura 18, correspondiente al 29 de marzo de 2025, confirma la presencia extensa y continua de los bofedales húmedos en la microcuenca Chikllarazu. Esta condición coincide con el período inmediatamente posterior al pico de la temporada de lluvias, momento en el cual los bofedales han alcanzado su máxima capacidad de almacenamiento de agua superficial y subsuperficial.

Figura 19

Clasificación ETR TE-01 geofísica (2025)

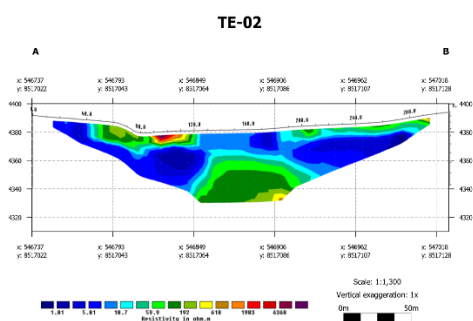


Según la Figura 19 el perfil de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) TE-01 revela la estructura subsuperficial de la microcuenca durante la temporada seca de 2025. Los valores de resistividad inferiores a 30 Ω·m (tonos azules a verdes) se interpretan como

zonas saturadas de agua, asociadas a la presencia de turba húmeda y sedimentos finos con alta porosidad.

Figura 20

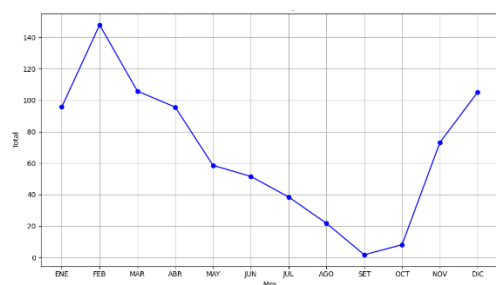
Clasificación ETR TE-02 geofísica (2025)



Según la Figura 20 el transecto TE-02 al analizar otra sección estratégica de la microcuenca. Los resultados confirman un patrón hidrológico coherente: los valores de resistividad inferiores a $30 \Omega \cdot m$ (representados en tonos azules a verdes).

Figura 21

Gráfico de tendencia de precipitación mensual para el año 2023



En la figura 21 la tendencia de precipitación mensual para el año 2023 en la estación meteorológica de Cuchoquesera. Se ve la notable estacionalidad en el régimen de lluvias, septiembre y octubre bajos niveles de precipitación que confirman un período de estiaje definido.

2.4 Discusiones

Esta investigación, basada en la delimitación de áreas de bofedales en la cabecera de la microcuenca Chikllarazu utilizando imágenes de Sentinel-2 y clasificación supervisada (Random Forest), tuvo como objetivo construir mapas confiables para apoyar el análisis hidrológico. La clasificación estacional (húmeda y seca, 2025) logró puntajes Kappa entre 0.922 y 0.965 con errores de omisión < 8%. Un total de 20.11 km² de bofedales fueron mapeados en la temporada húmeda y 19.43 km² en la temporada seca (13.04 km² permanentes y 6.39 km² estacionales), dentro de una microcuenca de 85.42 km². Estos valores indican que los bofedales se localizan en fondos planos y depresiones con drenaje convergente; la ligera reducción durante la temporada seca se debe a la caída estacional del nivel freático, mientras que la estabilidad relativa total del área sugiere una persistencia funcional para el almacenamiento de agua y liberación gradual. La alta precisión valida que el límite es lo suficientemente robusto como para ser integrado en balances y modelos. La precisión alcanzada, junto con la coherencia espacial de los polígonos, conduce al rechazo de la hipótesis nula y a la aceptación de la hipótesis específica 1: la delimitación primaria de los bofedales es necesaria para comprender su papel en la recarga hidrológica en Chikllarazu. La coincidencia previa con García et al. (2016), quienes combinaron NDWI/NDVI/NDII y pendiente para delimitar bofedales en Chillón con 96% de precisión sobre 18.63 km², y con Chávez (2015), quien

mapeó 14,500 ha en la cuenca alta del Cachi usando Landsat+DEM. Huaraca et al. (2025), por ejemplo, muestran que el uso de datos de radar de sentinel-1 y sentinel-2 y datos multiespectrales aumenta la detección en áreas nubladas. Además, Torrejón (2023) enfatiza la importancia del umbral espectral y la validación de la matriz de confusión. En general, la literatura respalda que una delimitación validada en campo y de múltiples fuentes proporciona una base sólida para evaluar los servicios hidrológicos de los humedales de alta montaña andina. En consecuencia, los mapas producidos deben ser adoptados y utilizados como línea de base y actualizados cada 6 meses (húmedo/seco) utilizando capas SAR para reducir la cobertura de nubes y reglas de posprocesamiento que eliminen las detecciones erróneas y mejoren la auditabilidad en la toma de decisiones para acciones de gestión.

Analizar la variación temporal y espacial de la cobertura de los bofedales, considerando los cambios estacionales y anuales para el período de 2016 a 2025. Los bofedales permanentes disminuyeron de 8.90 km² (2016) a 6.69 km² (2024) y se recuperaron a 8.73 km² (2025). Las tasas de cambio más negativas se concentraron en 2016–2018 y 2022–2024; el patrón espacial fue fragmentado en años secos. La validación anual reportó Kappa de 0.86 a 0.95. La trayectoria indica sensibilidad a la variabilidad climática (precipitaciones y temperatura) y presiones antrópicas, pero también resiliencia

hidrológica en 2025, cuando una mayor disponibilidad de agua apoyó la reconexión de parches. Los cambios en la extensión y continuidad interrumpen la regulación del caudal base y la retención de humedad en el suelo. La hipótesis específica 2 también está respaldada: los cambios espacio-temporales en la cobertura de los bofedales afectan directamente la disponibilidad de agua en la microcuenca. Los hallazgos son coherentes con Gonzales (2024), quien encontró variabilidad interanual en el NDVI del bofedal (1990–2024) vinculada a las precipitaciones y temperatura, con Pamo & Oscco (2022) que reportaron una tasa anual de -0.42% en Ancomarca, y con Chavez (2015) que documentó pérdidas multi-anales en la cuenca alta del Cachi. Según Torrejón (2023) y Huaraca et al. (2025), la integración de datos de Sentinel-1 y Sentinel-2 mejora la detección de pulsos estacionales y su asociación con los factores climáticos. Para fines de gestión, los autores abogan por monitoreo interanual con ventanas fijas (agosto-septiembre para seco, marzo-abril para húmedo y uso complementario de MNDWI/NDII para humedad superficial y el reporte de continuidad espacial como un indicador temprano de riesgo hidrológico potencial.

Evaluación de la capacidad de los humedales para contribuir a la recarga de agua subterránea de la microcuenca a través de la cobertura espacial y el contenido de humedad. En el año 2023, el área de

bofedales húmedos donde con Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDII) alcanzó un máximo de 33.83 km² en abril y un mínimo de 3.23 km² en septiembre. Los perfiles de ERT (TE-01 y TE-02) indicaron zonas de baja resistividad ($\leq 30 \Omega \cdot m$) debajo de parches de bofedales, lo que indica saturación y almacenamiento potencial en superficie y subsuperficie; la correspondencia espacial de NDII-ERT fue muy alta en valles y altitudes bajas. La expansión estacional de áreas con alto NDII y la conductividad evidencian el papel de los bofedales como 'esponjas' que capturan y liberan gradualmente aguas de la lluvia, sosteniendo el flujo para la recarga del acuífero y durante períodos secos. Considerando la consistencia del NDII-ERT espacial, las observaciones geofísicas apoyan la hipótesis 3 de este estudio: la capacidad de almacenamiento de los humedales es vital para sostener los flujos de la microcuenca. Estas conclusiones apoyan los hallazgos de Marcatoma (2023) sobre la fuerte correlación entre NDWI y humedad gravimétrica de Apacheta y Moncada et al. (2018) que utilizaron radar Sentinel-1 (índice delta VV/VH) para mapear la humedad estacional, y en conjunto con Moreira et al. (2021) donde ERT y conductividad hidráulica mostraron recarga localizada en humedales interiores. Usman et al. (2025) demuestran que el MNDWI integrado con LiDAR puede estimar niveles en volúmenes; esta metodología debería adaptarse para determinar el almacenamiento efectivo. Proponer un indicador de recarga hídrica en bofedales.

Este índice, relacionado con la precipitación mensual, permitiría una selección a priori de bofedales para la conservación, captación de agua y estimación de recarga, así como evaluación de restauración de humedales altoandinos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Conclusiones

Respecto a los resultados encontrados a partir del análisis mediante imágenes satelitales y evaluación in situ en la microcuenca Chikllarazu, se determinó que los bofedales en su cabecera juegan un papel fundamental y significativo en la recarga hídrica, regulando eficazmente el flujo de agua y garantizando la sostenibilidad del recurso a largo plazo. El empleo de imágenes satelitales permitió analizar y correlacionar la extensión a largo de una serie temporal de 10 años y estado de estos humedales con la disponibilidad hídrica en la microcuenca a través de ERT.

Los resultados obtenidos a partir de 200 puntos de clasificación georeferenciada y supervisada mediante el algoritmo Random Forest aplicado a imágenes Sentinel-2 indican que la cobertura del bofedal en la microcuenca Chikllarazu tiene una alta precisión de su delimitación, con 20.11 km² y 19.43 km² en húmeda y seca, respectivamente. Este hecho está justificado por los índices Kappa de 0.922 y 0.965, errores de omisión $\leq 8\%$. La precisión en la identificación de bofedales permite detectar la

presencia de bofedales permanentes y estacionales, cuyas dinámicas estacionales prueban la significativa contribución de los bofedales en la recarga hídrica de la microcuenca, regulando el flujo de agua entre estación y estación y garantizando la sostenibilidad del recurso hídrico a largo plazo.

En relación a los hallazgos obtenidos en el análisis de series temporales de imágenes satelitales entre 2016 y 2025, la variación espaciotemporal de la cobertura de bofedales permanentes en la microcuenca Chikllarazu influye significativa y directamente en la disponibilidad hídrica. Los resultados de este análisis muestran una disminución de la cobertura presente entre 2016 y 2025, la cual presenta un retroceso desde 8.90 km² en 2016 a 6.69 km² en 2024 con una tasa de cambio negativa de -23.4% entre 2024 y 2025; sin embargo, se observa una recuperación para 2025, la cobertura alcanzó los 8.73 km², lo que representa una tasa de cambio positiva del 30.49% entre 2024 y 2025, soportada con validaciones anuales la cual arrojó valores Kappa entre 0.86 y 0.95. Esta variabilidad está claramente asociada al fenómeno de sequía debido a las extremas duraciones observadas, mientras que la recuperación observada en 2025 evidencia la resiliencia de estos ecosistemas ante condiciones propicias.

Los resultados del análisis del NDII mensual en 2023 y las mediciones de los perfiles ERT TE-01 y TE-02 determinaron que los humedales en Chikllarazu tienen una

capacidad significativa para recargar y almacenar agua superficial y subsuperficial. Durante el año, hubo una variación estacional en cobertura húmeda con un máximo de 33.83 km² en abril y un mínimo de 3.23 km² en septiembre. Además, los valores de resistividad baja $\leq 30 \Omega \cdot m$, demostraron la presencia espacial de zonas saturadas en la subsuperficie. Como los índices de NDII y los valores de ERT corresponden espacial y temporalmente, se concluyó que la capacidad de almacenamiento de humedales es crucial para mantener el caudal base de Chikllarazu.

3.2 Recomendaciones

La documentación formal del reconocimiento de los bofedales como infraestructura natural para la seguridad hídrica debe realizarse conjuntamente con las autoridades locales, así como con las comunidades regionales y campesinas. Esto implica su incorporación en los planes de manejo de cuencas, la asignación de fondos específicos para su monitoreo, conservación y restauración. También se recomienda complementar la investigación que utilice teledetección, modelado hidrológico y participación comunitaria para sostener el recurso hídrico a lo largo de períodos prolongados.

El uso de imágenes satelitales de mejores resoluciones y actualizadas, complementadas con verificaciones de campo, permitirá un monitoreo sistemático y actualizaciones a mitad de año (períodos húmedos y secos). Esto ayudará a mantener los mapas de bofedales actualizados y proteger su uso en la

planificación hidrológica. También existe la necesidad de capacitar a las comunidades locales y a los gobiernos municipales en la aplicación de estas herramientas de toma de decisiones.

Teniendo en cuenta que la superficie de los bofedales pasó de 8.90 km² en 2016 a 6.69 km² en 2024, se sugiere que se implementen programas de conservación y restauración ecológica. En este sentido, se sugiere en particular: manejo de sobrepastoreo, establecimiento de zonas de exclusión temporal y fomento a la revegetación con especies nativas higrófilas. Esto, en conjunto, permitirá una menor fragmentación de los bofedales, además de aumentar su resiliencia a la variación climática.

Es recomendable desarrollar proyectos piloto de gestión sobre recarga artificial y la restauración del ciclo hidrológico dentro de los bofedales identificados con la mayor capacidad de almacenamiento (NDII > 0.02 y resistividades $\leq 30 \Omega \cdot m$). Esto podría incluir micro reservorios, trincheras de infiltración y humedales artificiales complementarios. Además, se deben integrar datos geofísicos (ERT) o recolectar datos meteorológicos para poder estimar el volumen de aporte en esta microcuenca.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Adauto, E., & Willems, B. (2014). Estudio de la evolución del ecosistema de bofedales de la cabecera de las cuencas Pisco y Pampas (Huancavelica) empleando imágenes TM y OLI. *Ministerio del Ambiente, Dirección General de Investigación e Información Ambiental*.

Chávez, R. (2015). *Inventario y variación multianual de bofedales en la cuenca alta del río Cachi, 2003 al 2013*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2249>

EOS DATA ANALYTICS. (s. f.). *Fórmula de índice, rango de valores y usos en la agricultura*. Recuperado 27 de junio de 2025, de https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/?utm_source=chatgpt.com

García, J., & Willems, B. (2015). Metodología para el Estudio 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.: Avances. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB*.
<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1122.pdf>
- Geoinnova. (s. f.). *La teledetección y los humedales*.
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INIGEM). (2023). *Memoria Descriptiva del Inventario Nacional de Bofedales del Perú 2023*. INAIGEM.
<https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/466>
- Maldonado, M. (2010). Legislación ambiental en Perú: Bofedales como ecosistemas frágiles. *Ley General del Ambiente del Perú*.
- Mamani, Y. (2024). *Análisis multitemporal de bofedales y su relación con la variabilidad climática en la microcuenca de Potojani Grande, período 2003 - 2023 Puno, Perú*.
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22286>
- Moncada, W., Pereda, A., & Lagos, M. (2018). Caracterización de la dinámica espacial de humedales en la cabecera de cuenca Cachi - Apacheta, Región Ayacucho, mediante el uso de imágenes de radar Sentinel 1 A. *Investigación*, 26(1), 173-183.
<https://doi.org/10.51440/UNSC.H.REVISTAINVESTIGACION.2018.1.74>
- Pamo, J., & Oscco, C. E. (2022). Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990 – 2021, con técnicas de teledetección. *Revista Ciencias Biológicas y Ambientales*, 1(1), 43-53.
<https://doi.org/10.33326/29585309.2022.1.1587>
- Space4Water Portal. (s. f.). *La teledetección en la conservación de la biodiversidad*.