

Influence of Climate Variability on the Spatio-temporal Dynamics of the High Andean Wetlands of the Chicllarazo Microbasin. Period 1988-2022.

Luis Gilmer Buitrón Sulca, B. Sc¹, Haniel Josue Torres Joaquin, M. Sc¹

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00260141@upn.pe

¹Universidad Privada del Norte, Perú, Haniel.Torres@upn.pe

Abstract- *High Andean wetlands are ecosystems that fulfill key ecological and socioeconomic functions, such as water regulation, biodiversity support, forage provision and recreational spaces. However, due to changing climatic conditions, they are considered fragile ecosystems, due to the sensitivity of the species they harbor and their dependence on water sources. Therefore, given the instability of climatic conditions, the objective of this research is to evaluate the influence of climate variability on the spatiotemporal dynamics of wetlands during the period 1988-2022, for which climatic data and Landsat 5, Landsat 8 and Sentinel 2 were used. The spectral classification of wetlands was carried out using the NDVI index within the range 0.436 to 1. The trend of climatic variables was determined using the Mann Kendall test, and the influence of climatic variables was determined using ANOVA and Kruskal Wallis. The results indicates that only accumulated precipitation influences the spatiotemporal dynamics of wetlands ($P < 0.05$, $R^2 = 0.4838$, $\epsilon^2 = 0.431$) with a moderate effect and a dependency of 48.38% on precipitation.*

Keywords-- *High Andean wetlands, remote sensing, climate change, climate variability, Chicllarazo micro-watershed*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Influencia de la Variabilidad Climática en la Dinámica Espacio Temporal de los Bofedales Altoandinos en la Microcuenca Chicllarazo. Periodo 1988-2022.

Luis Gilmer Buitrón Sulca, B. Sc¹, Haniel Josue Torres Joaquin, M. Sc¹

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00260141@upn.pe

¹Universidad Privada del Norte, Perú, Haniel.Torres@upn.pe

Resumen– Los bofedales altoandinos son ecosistemas que cumplen funciones ecológicas y socioeconómicas clave, como la regulación hídrica, el sustento de la biodiversidad, la dotación de forraje y espacios de recreación. Sin embargo, a causa de las condiciones climáticas cambiantes son considerados ecosistemas frágiles, por la sensibilidad de especies que albergan y la dependencia de fuentes de agua. Por ello, debido a la inestabilidad de las variables climáticas, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales durante el periodo 1988-2022, para lo cual se utilizaron datos climáticos e imágenes satelitales de Landsat 5, Landsat 8 y Sentinel 2. La clasificación espectral de los bofedales se llevó a cabo mediante el índice NDVI dentro del intervalo 0.436 a 1. La tendencia de las variables climáticas se determinó mediante la prueba de Mann Kendall, y la influencia de las variables climáticas se determinó mediante ANOVA y Kruskal Wallis. Los resultados indican que solo la precipitación acumulada influyó en la dinámica espaciotemporal de los bofedales ($P < 0.05$, $R^2 = 0.4838$, $\epsilon^2 = 0.431$) con un efecto moderado y una dependencia del 48,38% de la precipitación.

Palabras claves–Bofedales altoandinos, teledetección, cambio climático, variabilidad climática, microcuenca Chicllarazo.

I. INTRODUCCIÓN

Los humedales de la zona altoandina también conocidas como bofedales, turberas u oconales, constituyen ecosistemas hidromórficos que albergan comunidades vegetales hidrofílicas y están ubicados por encima de los 3800 msnm, gran parte de estos ecosistemas se desarrollan en áreas planas o de ladera cercanos a los nevados [1]–[3]. En el Perú los bofedales altoandinos en el año 2019 representaban el 0.42% del territorio nacional con una extensión superficial de 548174 ha [4]. Este tipo de ecosistemas son muy característicos en la zona altoandina por la composición vegetal hidrofílica de especies de tipo *Distichia spp.* y por el flujo permanente del agua, las cuales permiten que el ecosistema se mantenga con buen vigor vegetativo durante todo el año [1][2][5]. Si bien es cierto, los bofedales altoandinos (BAA) son de vital importancia desde el punto de vista ecológico, económico, social y cultural, debido a que provisionan servicios de regulación y purificación del agua, almacenamiento de carbono, regulación del microclima, protección contra la erosión, soporte de la diversidad de fauna y flora, dotación de forraje y espacios de recreación [6]. Por todo ello y por el requerimiento permanente del agua de fuentes tales como la precipitación, agua subterránea, deshielo de los

nevados, entre otros, son considerados como ecosistemas frágiles [2][7].

En ese sentido, los BAA requieren de un manejo adecuado para su conservación. Sin embargo, las actividades antrópicas, como el sobrepastoreo, extracción de turba, actividades mineras, construcción de canales para desviación del flujo de agua, son algunos de los factores antrópicos que inciden en su estabilidad espacial, poniendo en riesgo su permanencia y una serie de sus funciones esenciales de soporte y de provisión [1][3][8][9].

Mas aún, la variabilidad climática a causa del cambio climático los hace más vulnerables, ya que el incremento insostenido de gases de efecto invernadero (GEI) tales como el CO₂, hizo que en la actualidad la variabilidad de los patrones climáticos especialmente la de temperatura y precipitación sean cada vez más evidentes [8][10][11]. Y se estima que el aumento de 1.5 °C de temperatura tendría efectos extremos en los ecosistemas frágiles por eventos de sequías y precipitaciones torrenciales [12].

En ese contexto, las técnicas de teledetección mediante los sensores de diversos satélites artificiales que orbitan la tierra han demostrado ser una tecnología y una herramienta poderosa para realizar monitoreos espaciales por ser económica y precisa. Dado que se basa en la interacción del flujo energético por medio de las radiaciones electromagnéticas entre la cobertura terrestre que refleja energía a una longitud de onda y el sistema sensor que captura dicha información para posteriormente ser enviado al sistema de recepción y ser analizados por los intérpretes [13][14].

A pesar de su importancia, los bofedales han sido poco estudiados hasta la fecha. Aunque contamos con la tecnología y la información necesarias, son escasos los estudios que han investigado si la dinámica espacial de los bofedales se ve afectada por la variabilidad climática. Por ello, la presente investigación tiene por objetivo determinar la influencia de la variabilidad climática de temperatura y precipitación en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.

II. MÉTODO Y MATERIALES

A. Identificación del área de estudio

La microcuenca Chicllarazo está ubicado geográficamente en la sierra central de los andes peruanos, políticamente localizado entre las provincias de Huamanga y Cangallo del departamento de Ayacucho entre las coordenadas UTM

WGS84 Zona 18 S (Este: 566867.70; Norte: 8516320.52) con una extensión superficial de 61284 hectáreas, situados a una altitud que comprende desde 3313 a 4949 msnm (Fig. 1). En donde las condiciones climáticas están bien definidas por la estación húmeda (diciembre a abril) y seca (mayo a noviembre), siendo la precipitación máxima de 182.9 mm y 17.5 mm en la estación húmeda y seca respectivamente. Además, la temperatura mínima es de 6.7°C (estación húmeda) y 0.9 °C (Estación seca), por su parte la temperatura máxima alcanza valores máximos en la estación seca de hasta 20.1 °C (Fig. 2). Además, desde el punto vista socioeconómico, el ámbito de estudio comprende una de las principales fuentes de captación y de recarga hídrica hacia la represa Cuchoquesera para el represamiento y distribución para el consumo humano y actividades agrícolas y ganaderas.

B. Adquisición de datos climáticos e imágenes satelitales

La adquisición de datos climáticos e imágenes satelitales fueron obtenidos para la estación seca debido a la mayor disponibilidad de información de imágenes satelitales por la baja presencia de nubosidad.

En ese sentido, las imágenes satelitales de Landsat 5, Landsat 8 y Sentinel 2, se tomaron de la plataforma de USGS Earth Explorer de Path/Row (005/069 y 006/069) con un nivel de procesamiento de L1TP (misión Landsat) y L1C (misión Sentinel) (TABLA I).

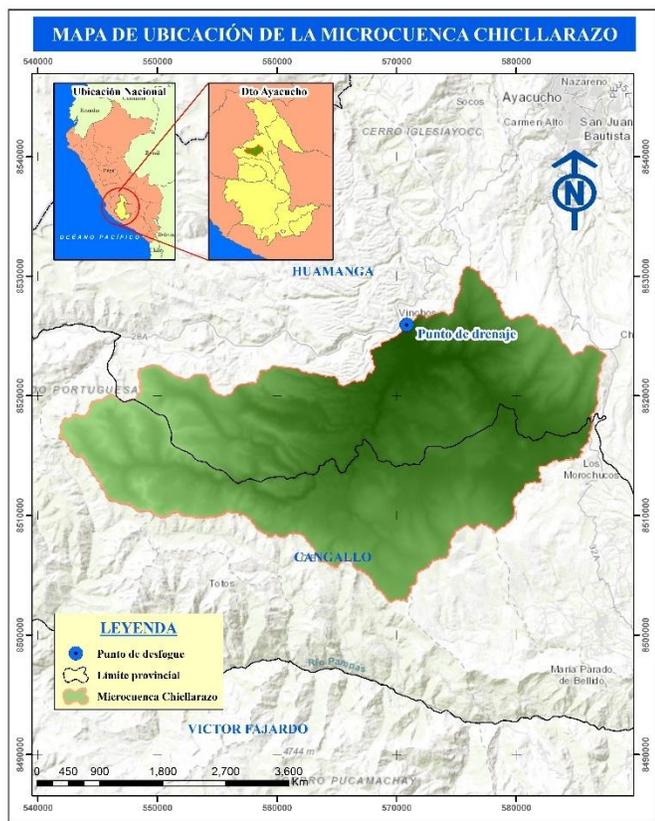


Fig. 1. Mapa de ubicación de la Microcuenca Chicllarazo. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se adquirió un modelo digital de elevación (MDE) de Alos Palsar de la plataforma ASF ALASKA para la delimitación de la microcuenca.

Por otro lado, los datos de las variables climáticas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación fueron obtenidas del producto grillado PISCO en su versión mensual para el periodo de 1988 – 2016. Mientras tanto, por la carencia de información de data climática para el periodo 2017-2022 del producto grillado PISCO, se realizó la interpolación de datos utilizando 8 estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, la cual se realizó en ArcGIS Pro mediante la metodología Kriging universal por su efectividad al emplear modelos geoestadísticos avanzados [15]. Cabe mencionar, que la adquisición de datos climáticos de dos fuentes de información recae a la poca disponibilidad de estaciones meteorológicas en el ámbito de estudio.

Cabe precisar, que el procesamiento de datos climáticos obtenidos del producto grillado PISCO se realizó utilizando RStudio empleando librerías tales como *Sp*, *Raster* y *ncdf4*.

C. Tratamiento digital de imágenes de la misión Landsat

Las imágenes de Landsat 5 y Landsat 8 al ser del nivel de procesamiento de L1TP, requieren ser corregidos geométrica, radiométrica y atmosféricamente. En ese sentido, empleando el software ArcGIS Pro se realizó la corrección digital generando procesos automatizados mediante ModelBuilder, para ello se empleó las ecuaciones (1)(2)(3).

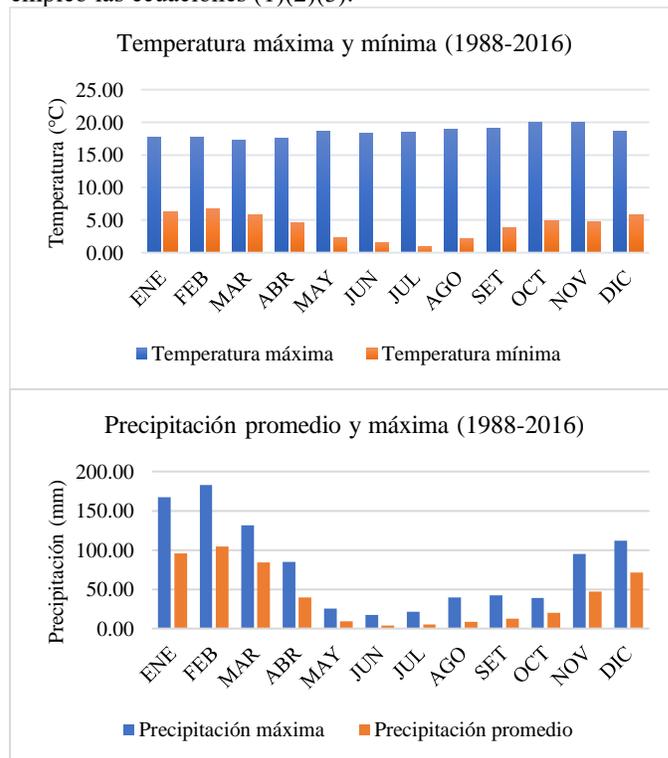


Fig. 2. Condiciones climáticas en la microcuenca Chicllarazo. Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, como parte de la corrección geométrica se realizó la reproyección a un sistema de referencia WGS84 Zona 18S y como parte de la corrección radiométrica de transformación de números digitales a valores de radiancia, se empleó la ecuación (1) propuesta por Chander (2009) [16].

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{\text{máx}\lambda} - L_{\text{mín}\lambda}}{Q_{\text{calmáx}} - Q_{\text{calmín}}} \right) (Q_{\text{cal}} - Q_{\text{calmín}}) + L_{\text{mín}\lambda} \quad (1)$$

Donde: L_{λ} = radiancia espectral del sensor; $L_{\text{máx}\lambda}$ = radiancia espectral máxima de la banda; $L_{\text{mín}\lambda}$ = radiancia espectral mínima de la banda; $Q_{\text{calmáx}}$ = Valor máximo del ND del píxel, $Q_{\text{calmín}}$ = Valor mínimo del ND del píxel y Q_{cal} = Valor del píxel discretizado.

Además, para la corrección atmosférica se empleó la metodología DOS1 ecuación (2) propuesta por Chávez (1996) y Sobrino (2004) [17][18]. Ya que la interacción de los aerosoles o partículas presentes en la atmósfera dispersan la radiación electromagnética procedente del objeto de estudio, provocando un disturbio de tipo sombra, conocido como efecto bruma. Por ende, esta corrección permite recuperar la radiación intrínseca del objeto de estudio con la finalidad de que las imágenes satelitales tengan una mejor claridad al momento de realizar la clasificación espectral [19].

$$p_s = \frac{\pi \times (L_{\lambda} - L_p) \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times SEN_{\theta SE}} \quad (2)$$

Donde: p_s = reflectancia de la superficie; L_{λ} = radiancia espectral del sensor; L_p = efecto bruma; d = distancia del sol a la tierra; $ESUN_{\lambda}$ = irradiancia media solar exo-atmosférica y θSE = ángulo de elevación de sol.

D. Tratamiento digital de imágenes de misión Sentinel

Las imágenes de Sentinel 2 con el nivel de procesamiento L1C ya cuenta con la corrección radiométrica y geométrica. Por ende, la corrección digital comprendió únicamente la corrección atmosférica y se realizó con la ayuda del software SNAP empleando la herramienta Sen2cor [9], y por medio de la herramienta *Resampling* se realizó un remuestreo a las imágenes con la finalidad de obtener una resolución espacial de 10 metros.

E. Procesamiento de imágenes, clasificación espectral y TCA

Luego de haber realizado los tratamientos digitales de las imágenes satelitales se procedió con el cálculo del índice espectral de NDVI mediante la ecuación (3) [20] para los años descritos en la TABLA I.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (3)$$

Donde: ρ_{NIR} = Banda infrarroja cercana y ρ_{RED} = Banda roja.

TABLA I
LISTA DE IMÁGENES SATELITALES EMPLEADOS

Año	Sensor	ID de la imagen	Nivel de tratamiento
1988		LT05_L1TP_005069_19880715_20170208_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_006069_19880706_20170208_01_T1	L1TP
1990		LT05_L1TP_006069_19900728_20170129_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_005069_19900619_20170130_01_T1	L1TP
1992		LT05_L1TP_006069_19920717_20170122_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_005069_19920710_20170122_01_T1	L1TP
1994		LT05_L1TP_005069_19940716_20170114_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_006069_19940707_20170113_01_T1	L1TP
1995		LT05_L1TP_006069_19950811_20170107_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_005069_19950719_20170108_01_T1	L1TP
1998	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_006069_19980702_20161223_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_005069_19980609_20161224_01_T1	L1TP
2001		LT05_L1TP_006069_20010811_20161210_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_005069_20010804_20161211_01_T1	L1TP
2003		LT05_L1TP_006069_20030801_20161205_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_005069_20030709_20161205_01_T1	L1TP
2006		LT05_L1TP_005069_20060701_20161120_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_006069_20060708_20161120_01_T1	L1TP
2008		LT05_L1TP_005069_20080722_20161030_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_006069_20080814_20161030_01_T1	L1TP
2010		LT05_L1TP_006069_20100820_20161014_01_T1	L1TP
		LT05_L1TP_005069_20100728_20161014_01_T1	L1TP
2014	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_006069_20140714_20170421_01_T1	L1TP
		LC08_L1TP_005069_20140824_20170420_01_T1	L1TP
2017		L1C_T18LWL_A010804_20170717T151029	L1C
2020	Sentinel 2 MSI	L1C_T18LWL_A026391_20200711T150930	L1C
2022		L1C_T18LWL_A028565_20220825T151122	L1C
2010	Alos Palsar	AP_21137_FBS_F6910_RT1	-

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la clasificación espectral en un rango de NDVI de 0.436 a 1, tomando como referencia el valor mínimo de NDVI propuesto por García et al. (2016) [21] y el valor máximo propuesto por Meza y Diaz (2014) [22] para la detección de la

cobertura de los bofedales. Este rango se seleccionó debido a que en este intervalo la vegetación se encuentra en un estado saludable y con alta densidad vegetal, mientras que valores inferiores se consideran como bofedales degradados. La clasificación espectral en este rango también permitió distinguir entre otros tipos de cobertura que se desarrollan en valores más bajos durante la época seca.

Luego se cuantificó la extensión superficial en diferentes series de tiempo, así como la tasa de cambio anual (TCA) mediante la ecuación (4) desarrollada por FAO (1996) [23].

$$TCA = \left[\left(\frac{S2}{S1} \right)^{1/n} - 1 \right] \times 100 \quad (4)$$

Donde: $S2$ = Extensión superficial de la fecha 2, $S1$ = Extensión superficial de fecha 1, n = número de años transcurridos entre $S1$ y $S2$.

F. Análisis estadístico

Se aplicaron diversas pruebas estadísticas para determinar la influencia y relación entre las variables climáticas (temperatura, precipitación) y la cobertura de bofedales. Se utilizó la prueba de Mann Kendall para estimar la tendencia de

las variables climáticas, mientras que la prueba ANOVA y Kruskal Wallis se emplearon para determinar la influencia de las variables climáticas en la cobertura de los bofedales. Además, se realizó una regresión lineal simple para confirmar la relación. Por último, la magnitud del efecto de las variables climáticas en la cobertura de los bofedales se evaluó mediante el uso de eta cuadrada parcial y épsilon cuadrado.

III. RESULTADOS

A. Dinámica espacio temporal de la cobertura de los bofedales

Se ha determinado las variaciones multianuales de la cobertura de los BAA mediante el índice de NDVI dentro del rango 0.436 a 1, estableciéndole a este como un indicador de un estado sano de los bofedales. Por consiguiente, este ecosistema en la microcuenca Chicllarazo abarca en promedio 2866.5 ha y se estimó que desde 1988 al 2022 se dio una pérdida de 2656.3 ha con una tasa de cambio anual (TCA) de -6.8 % (TABLA II), siendo los años de 1992, 1995, 2010 y 2022 de mayor pérdida de su extensión superficial, siendo el 2022 el año más crítico. Mientras tanto, los años de mayor cobertura superficial corresponden a 1990, 1998, 2001, 2014, 2017 y 2020 (Fig. 4).

TABLA II.
TASA DE CAMBIO ANUAL PORCENTUAL DE COBERTURA DE BOFEDALES

	1988	1990	1992	1994	1995	1998	2001	2003	2006	2008	2010	2014	2017	2020	2022
1988	0.0	24.9	-19.2	-1.3	-7.8	1.8	0.9	-0.3	0.2	-1.2	-4.3	1.1	2.3	1.4	-6.8
1990		0.0	-22.9	-12.2	-18.4	-3.3	-2.9	-3.7	-2.5	-3.7	-6.8	-0.7	0.8	0.0	-8.5
1992			0.0	47.5	9.9	18.7	11.4	7.6	6.5	4.0	-0.6	5.3	6.2	4.7	-5.0
1994				0.0	-39.0	6.4	2.8	0.3	0.9	-1.1	-5.4	1.8	3.2	2.0	-7.9
1995					0.0	28.1	12.2	6.8	5.6	2.6	-2.5	4.6	5.7	4.1	-6.5
1998						0.0	-1.8	-4.3	-1.7	-4.0	-9.0	0.7	2.6	1.2	-10.1
2001							0.0	-8.0	-1.7	-4.9	-11.3	1.3	3.4	1.6	-11.3
2003								0.0	2.8	-3.7	-12.2	3.0	5.1	2.8	-11.6
2006									0.0	-12.5	-21.9	3.1	5.8	2.9	-14.1
2008										0.0	-30.3	9.0	10.4	5.7	-14.3
2010											0.0	36.3	25.9	14.9	-11.3
2014												0.0	13.3	2.5	-28.4
2017													0.0	-7.2	-45.6
2020														0.0	-75.6
2022															0.0

Fuente: Elaboración propia.

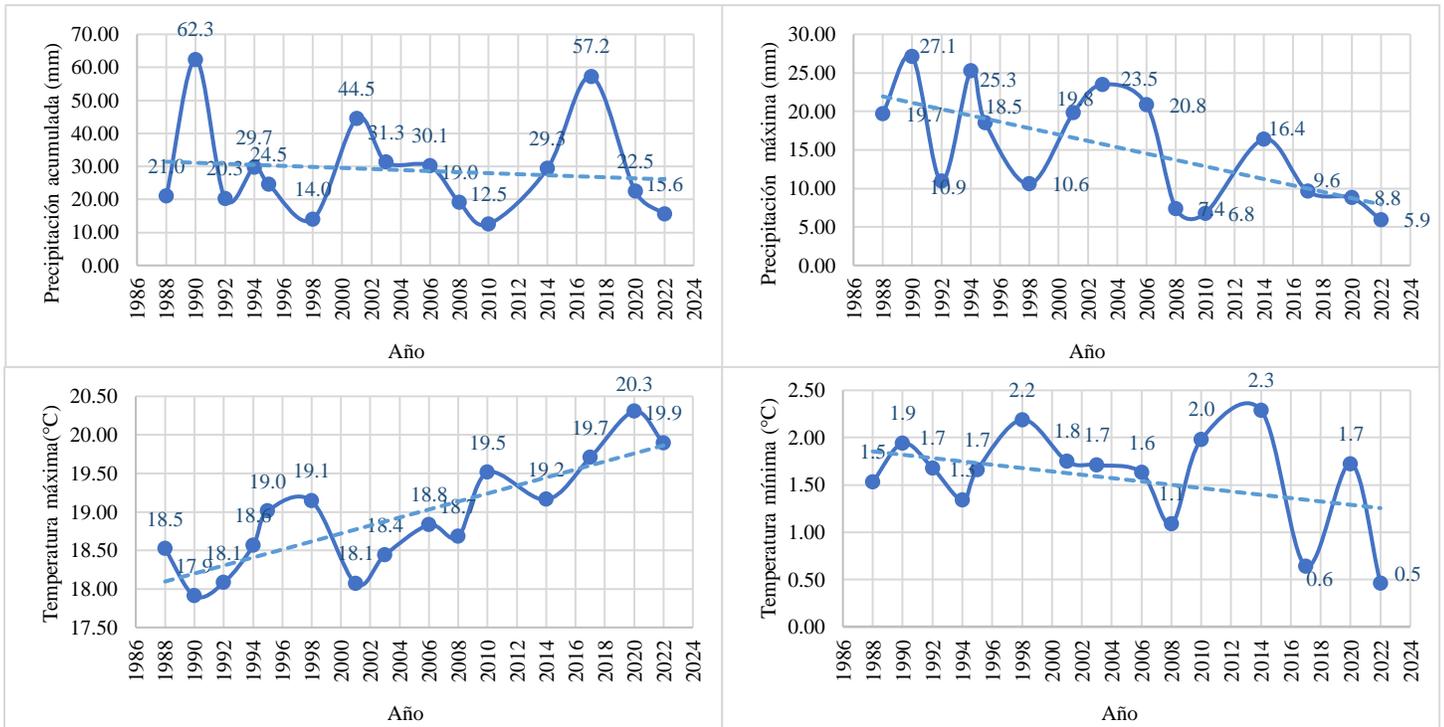


Fig. 3. Variabilidad de los patrones climáticos. Fuente: Elaboración propia.

En ese sentido, en el año 2022 los BAA representaron solo el 0.44% a nivel de microcuena. Sin embargo, en el año 2017 fue de 9.19% siendo este el valor máximo.

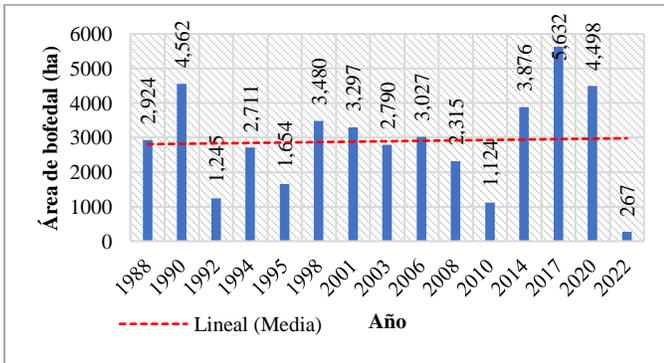


Fig. 4. Variaciones anuales en la cobertura de los bofedales. Fuente: Elaboración propia.

B. Caracterización de los patrones climáticos

Se empleó en total 4188 datos de las estaciones virtuales del producto grillado PISCO y de la interpolación kriging. Desde 1988 al 2022 la temperatura máxima y mínima se incrementaron en 1.37 °C y 1.07 °C respectivamente, en cambio la precipitación máxima se redujo en un 5.92 mm y la precipitación acumulada se mantuvo ligeramente constante con pequeño incremento de 0.75 mm, pero con variaciones notables durante los años de 1990, 2001 y 2017 (Fig. 3).

La prueba secuencial de Mann Kendall indica que la temperatura máxima y precipitación máxima tuvieron una tendencia positiva moderada ($P < 0.05$; $\tau = 0.565$) y una

tendencia negativa baja ($P < 0.05$; $\tau = -0.270$) respectivamente. Sin embargo, para temperatura mínima y precipitación acumulada indica que no hubo una tendencia ($P > 0.05$) (TABLA III).

TABLA III.
ANÁLISIS SECUENCIAL DE MANN KENDALL

Variables climáticas	τ (Tau)	P-value	IC
Precipitación acumulada	-0.044	0.733	95%
Precipitación máxima	-0.270	0.031	95%
Temperatura máxima	0.565	6.057E-06	95%
Temperatura mínima	0.157	0.212	95%

Fuente: elaboración propia.

C. Análisis de influencia de variables

Previamente se realizó un análisis de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk, siendo las variables tales como la precipitación máxima, temperatura máxima, temperatura mínima y área de los bofedales, aquellas que presentaron distribución normal ($P > 0.05$), mas no la precipitación acumulada ($P < 0.05$). Por ende, para variables con distribución normal se realizó un análisis ANOVA y para variables sin distribución normal un análisis de Kruskal Wallis (TABLA IV).

TABLA IV.
ANÁLISIS DE PRUEBA DE NORMALIDAD SHAPIRO-WILK

Variables	P-value	Prueba estadística
Precipitación acumulada	0.0225	Kruskall Wallis
Precipitación máxima	0.2701	ANOVA
Temperatura máxima	0.7742	ANOVA
Temperatura mínima	0.1259	ANOVA
Área de los bofedales	0.9926	ANOVA

Fuente: Elaboración propia.

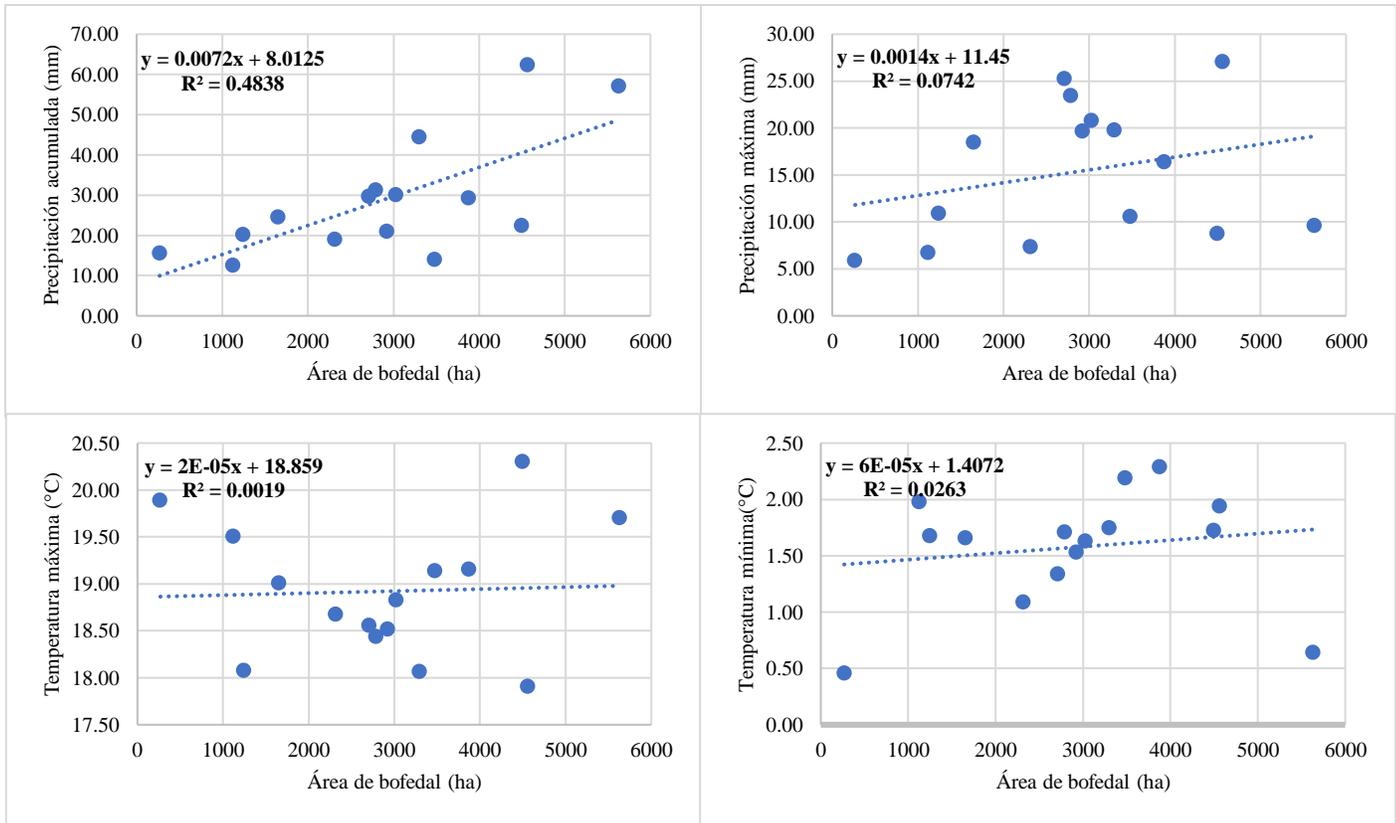


Fig. 5. Regresión lineal simple de las variables climáticas. Fuente: Elaboración propia.

En ese sentido, el análisis estadístico ANOVA a $P > 0.05$ indica que variables tales como la precipitación máxima, temperatura máxima y mínima no influyen en la dinámica espacio temporal de los bofedales (TABLA V).

TABLA V.
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ANOVA

Variables climáticas	Suma cuadrática	Media cuadrática	F valor	Sig.
Precipitación máxima	3158546	3158546	1.633	0.224
Temperatura máxima	96216	96216	0.044	0.836
Temperatura mínima	354154	354154	0.165	0.691

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, el análisis estadístico de Kruskal Wallis indica que la precipitación acumulada sí influye en la dinámica espacio temporal de los bofedales ($P < 0.05$) (TABLA VI).

TABLA VI.
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE KRUSKALL WALLIS

Variable climática	Chi-Square	Df	Sig.
Precipitación acumulada	6.0322	2	0.04899

Fuente: Elaboración propia

Además, se realizó un contraste mediante el cálculo del coeficiente de determinación (R^2) por medio de la regresión lineal simple, e indica que la precipitación acumulada tiene una relación moderada en un 48.38%. En cambio, las demás variables tienen una relación nula (Fig. 5).

Por último, se ha determinado el tamaño del efecto de las variables climáticas mediante la Eta cuadrada parcial para variables del análisis ANOVA y Épsilon cuadrada para la prueba estadística de Kruskal Wallis, e indica que la precipitación acumulada tiene un efecto moderado y las demás variables un efecto bajo (TABLA VII).

TABLA VII
TAMAÑO DEL EFECTO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

Parámetro	Eta Cuadrada parcial η^2	Épsilon cuadrada ϵ^2
Precipitación acumulada	-	0.431
Precipitación máxima	0.11	-
Temperatura máxima	0.0034	-
Temperatura mínima	0.01	-

Fuente: Elaboración propia

IV. DISCUSIÓN

La cobertura superficial de los bofedales altoandinos durante el periodo de estudio de 1988 al 2022, se ha observado una disminución significativa, pasando de una superficie de 2924 ha a 267 ha con una TCA de -6.8%. Asimismo, se han

evidenciado pérdidas en otras zonas geográficas, como las cabeceras de las cuencas Pampas y Pisco, cuenca Cachi y Reserva de fauna Chimborazo, con una TCA de -8.6%, -2.54% y -5.4% respectivamente, las cuales son principalmente atribuidas a la variabilidad climática [24]–[26]. Si bien la TCA entre diferentes ámbitos de estudio no son muy ajustados, esto obedece a algunos factores como las diferentes condiciones geográficas y climáticas, así como la intervención de la actividad humana.

En ese sentido, es importante destacar que los años críticos de mayor pérdida de la cobertura vegetal se dieron durante 1992, 1995, 2010 y 2022 con una TCA de -19.20%, -7.80%, -4.30% y -6.80% respectivamente (TABLA II). Cabe señalar que, durante todos estos periodos la precipitación acumulada fue muy baja, tal como se muestra en las figuras 3 y 4. Por ello, es muy probable que la escasa dotación de agua por parte de la precipitación haya incidido en la degradación en los bofedales debido a que las especies constituyentes de este ecosistema como la *Distichia spp.* no son tolerantes al déficit hídrico [8].

No obstante, se observa un comportamiento diferente en los años 1990, 1998, 2001, 2014, 2017 y 2020, donde la cobertura vegetal aumentó significativamente con una TCA de 24.9%, 1.8%, 0.9%, 1.1% y 1.4% respectivamente. Se ha identificado que este aumento estuvo influenciado por un incremento en la precipitación acumulada durante los años mencionados, por lo que los bofedales al ser ecosistemas hidromórficos que integran especies vegetales hidrófilas, requieren agua en cantidades necesarias para un mejor desarrollo vegetativo [2][27].

Por ello, nuestros resultados mediante la prueba estadística de Kruskal Wallis indica que la precipitación acumulada influye en la dinámica espacial de los bofedales ($P < 0.05$) con un efecto moderado ($\epsilon^2 = 0.431$), y cuyo coeficiente de determinación es de $R^2 = 0.4838$ (relación moderada). Sin embargo, en los ámbitos de estudio tales como Chalhuanca y la Cabecera de la cuenca del río Santa la relación entre precipitación y área de bofedal fue $R^2 = 0.85$ (relación muy alta) y $R^2 = 0.68$ (relación alta) respectivamente [3][7]. No obstante, en nuestro estudio la razón por la que el coeficiente de determinación $R^2 = 0.4838$ fue moderada, estaría asociado a diferentes factores, tales como la dotación de agua por deshielo de nevados, actividades de siembra y cosecha del agua y actividades tradicionales de pastoreo [1][28].

En contraste, un estudio realizado en la cuenta alta del río Santa indica que la relación entre la acumulación de nieve y área de bofedal fue alta $R^2 = 0.71$ [3][24][28]. Esto sugiere que este tipo de ecosistemas dependieron en un 71% de la dotación del agua de parte de los nevados. A su vez, el almacenamiento de agua en pequeños reservorios naturales en la parte alta de la microcuenca comprende una de las fuentes de suministro de agua, principalmente en la época seca. Por lo tanto, los bofedales no solo dependen de la precipitación, sino que también de parte de la influencia glaciar y antrópica [3].

Por otro lado, a pesar de que la temperatura máxima tuvo una tendencia estadísticamente moderada ($P < 0.05$, $\tau = 0.565$),

este no afectó en la dinámica espacial de los bofedales ($P > 0.05$), y su relación fue baja ($R^2 = 0.0019$), al igual que en la cuenca Caquena $R^2 = 0.09$ [22]. Posiblemente, el incremento de temperatura como parte del cambio climático aún no tendría efectos directos en la zona de estudio. Sin embargo, es importante señalar que en 1998 el incremento de la cobertura de los bofedales se dio cuando la precipitación acumulada registraba picos de menor precipitación, y cuando la temperatura máxima en ese entonces alcanzaba un récord de 19.14°C (Fig. 3). Es posible que el incremento del área del bofedal haya sido influenciado en respuesta a la dotación del agua por desintegración de los nevados a causa del aumento de la temperatura. No obstante, en el anexo de Chalhuanca, la relación de temperatura y área de bofedal fue moderada ($R^2 = 0.46$) [7][24], lo que podría deberse a la falta de cobertura glaciar en esa área de estudio.

Por lo tanto, la pérdida abrupta del ecosistema en el 2022 se atribuye a la inestabilidad de las variables climáticas, donde la temperatura máxima y mínima alcanzaron valores elevados, mientras que la precipitación fue escasa. Además, se estima la desintegración total de la cobertura glaciar para el 2022, debido a la corta duración de su permanencia hasta el 2015 [24]. En ese sentido, es posible que la combinación de las condiciones climáticas inestables y las actividades de pastoreo hayan ejercido un impacto significativo en la degradación del ecosistema.

Finalmente, es necesario afirmar que en un escenario del cambio climático en donde la cobertura glaciar se haya desintegrado por completo a causa del progresivo incremento de temperatura máxima, los efectos serán directos sobre el ecosistema, ya que no habría una fuente de dotación constante de agua proveniente del deshielo de los nevados en temporada seca, lo que podría llevar a la degradación del ecosistema en condiciones climáticas desfavorables. Esto representa un riesgo potencial para la represa Cuchoquesera, que suministra agua a la provincia de Huamanga y a otras áreas circundantes para actividades de consumo humano y actividades. Por ello, es de vital importancia priorizar actividades de conservación para garantizar la disponibilidad continua de los servicios ecosistémicos.

IV. CONCLUSIÓN

Durante el periodo de estudio, se ha observado una disminución en la cobertura vegetal de los bofedales con una tasa de cambio anual de -6.8%, lo que resultó en una pérdida total de 2656.3 ha. Los análisis estadísticos indican que la precipitación acumulada fue el factor más importante que influyó en la dinámica temporal y espacial de los bofedales ($P < 0.05$, $R^2 = 0.4838$, $\epsilon^2 = 0.431$) con un efecto moderado del 48.38%. En cambio, las variables climáticas como la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación máxima no demostraron una influencia significativa en la dinámica de dicho ecosistema ($P > 0.05$), pero es importante considerar en futuros estudios para comprender mejor la dinámica de los bofedales.

REFERENCIAS

- [1] M. Maldonado, "Introducción a los bofedales de la región Altoandina Peruana," *Grupo Internacional de conservación de turbales*, vol. 15, no. 5, pp. 1–13, 2014. http://mires-andpeat.net/media/map15/map_15_05_Spanish.pdf
- [2] MINAM, "Mapa nacional de cobertura vegetal - Memoria descriptiva," Lima, Perú, 2015. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/12076/10_mapa-nacional-de-cobertura-vegetal.pdf?v=1530548584
- [3] E. García and M. Otto, "Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del río santa, Ancash, Perú," *Ecología aplicada*, vol. 14, no. 4, pp. 115–125, 2015. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34143179004>
- [4] MINAM, "Guía de evaluación del estado del ecosistema bofedal," Lima, Perú, 2019. <https://www.inaigem.gob.pe/wp-content/uploads/2020/01/GUIA-DE-EVALUACION-ESTADO-DE-ECOSISTEMA-BOFEDA.pdf>
- [5] W. Aquino, F. Condo, J. Romero, and R. Illaconda, "Composición florística del distrito de Huarochiri, provincia de Huarochiri (Lima, Perú)," *Arnaldoa*, vol. 25, no. 3, pp. 877–922, 2018. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25305>
- [6] S. Page and A. Baird, "Peatlands and Global Change: Response and Resilience," *Environment and Resources*, vol. 41, no. 1, pp. 35–57, 2016. <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-environ-110615-085520>
- [7] A. Pauca et al., "Análisis espacial temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el período 1986-2016," *Asociación Española de Teledetección*, vol. 55, pp. 105–118, 2020. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13325>
- [8] S. Loza Herrera, R. I. Meneses, and F. Anthelme, "Comunidades vegetales de los bofedales de la Cordillera Real (Bolivia) bajo el calentamiento global," *Ecología en Bolivia*, vol. 50, no. 1, pp. 39–56, 2015. http://www.scielo.org.bo/pdf/rev/v50n1/v50n1_a04.pdf
- [9] C. Jara, J. Delegido, J. Ayala, P. Lozano, A. Armas, and V. Flores, "Estudio de humedales en los Andes ecuatorianos a través de la comparación de imágenes Landsat-8 y Sentinel-2," *Revista de Teledetección*, vol. 53, pp. 45–57, 2019. <https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/11715/11499>
- [10] J. Álvarez, "El cambio climático y el desarrollo," *Ingeniería industrial*, vol. 1, no. 28, pp. 25–39, 2010. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337428494003>
- [11] NASA, "Dióxido de carbono. Signos Vitales – Cambio Climático: Signos Vitales del Planeta," *Global Climate Change*, Apr. 2022. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- [12] IPCC, "Climate Change. Impacts, adaptation and vulnerability. Summary for Policymakers," 2022. https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- [13] C. Bella, G. Posse, G. Beget, M. Fischer, N. Mari, and S. Veron, "La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones," *Asociación Española de Ecología Terrestre*, vol. 17, no. 3, pp. 39–52, 2008. <https://www.redalyc.org/pdf/540/54017106004.pdf>
- [14] E. Chuvieco, *Fundamentos de la teledetección espacial*, 3rd ed. Barcelona, España: Ariel, 2008. https://www.u-cursos.cl/forestal/2011/1/EF016/1/material_docente/bajar?id_material=487457
- [15] J. Míguez, J. Rodríguez, P. Eguía, A. Saavedra, and J. Morán, "Aplicación de técnicas de interpolación de kriging a datos meteorológicos para su empleo en simulaciones térmicas de edificios empleando trnsys," *Eficiencia energética y sostenibilidad*, 2015.
- [16] G. Chander, B. L. Markham, and D. L. Helder, "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors," *Remote Sens Environ*, vol. 113, no. 5, pp. 893–903, 2009. doi: 10.1016/J.RSE.2009.01.007.
- [17] P. Chávez, "Image Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved," *Photogramm Eng Remote Sensing*, vol. 62, no. 9, pp. 1025–1036, 1996. http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/891472/15133582/1321370214637/C_havez_P.S._1996.pdf?token=z0vrMkYqCcjZKksJLZYfRnYF5SRc%3D
- [18] J. A. Sobrino, J. C. Jiménez, and L. Paolini, "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5," *Remote Sens Environ*, vol. 90, pp. 434–440, 2004. doi: 10.1016/j.rse.2004.02.003.
- [19] H. Aguilar, R. Mora, and C. Vargas, "Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, RapidEye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI," *Revista Geográfica de América central*, vol. 1, no. 43, pp. 39–59, 2014. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- [20] S. Ormeño, *Teledetección Fundamental*, 3rd ed. Madrid, 2006. <http://pdi.topografia.upm.es/santi/descarga/FunTeled.PDF>
- [21] J. García, B. Willems, and R. Espinoza, "Mapeo de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Mediante Imágenes de los Satélites Landsat," *INAIGEM*, vol. 1, no. 1, pp. 81–97, 2016. <https://doi.org/10.36580/rgem.i1.81-97>
- [22] M. Meza and Y. Díaz, "Efecto de la variabilidad climática sobre las fluctuaciones del nivel de las aguas y actividad ganadera en humedales altoandinos," *Interciencia*, vol. 39, no. 9, pp. 651–658, 2014. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33932147007.pdf>
- [23] FAO, *Survey of tropical forest cover and study of change processes*. Roma, Italia, 1996.
- [24] R. Chávez, "inventario y variación multianual de bofedales en la cuenca alta del río Cachi, 2003 al 2013," *Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga*, Perú, 2015. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2249>
- [25] F. Valeria, "Predicción de bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo a través del tratamiento de imágenes satelitales," *Escuela superior politécnica de Chimborazo*, Ecuador, 2017. <http://dspace.espoche.edu.ec/handle/123456789/8200>
- [26] M. Adauro and B. Willems, "Estudio de la evolución del ecosistema de bofedales de la cabecera de las cuencas pisco y pampas (Huancavelica) empleando imágenes TM y OLI," 2007. <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/505>
- [27] S. Aponte and J. Ospina, "Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos," *Revista de teledetección*, vol. 53, pp. 59–72, 2019. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.10580>
- [28] F. Paredes, "Sistematización de la crianza de lagunas de agua de lluvia y prácticas agropecuarias para la disponibilidad de alimentos en la comunidad de Quisillaccta, Ayacucho en el periodo 1996-2018," *Universidad Peruana Cayetano Heredia*, Lima, 2022. <https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20.500.12866/11998#.Y2aFtuJa76U.mendeley>