

Impactos del cambio climático en los pajonales altoandinos del Perú: un análisis multiescenario

Impacts of climate change on high Andean grasslands in Peru: a multi-scenario analysis

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.c.03.22>

José Cairampoma

 Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo – Junín, Perú

 jcairampoma@uncp.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-1998-6178>

Resumen

El estudio investigó los cambios en los pajonales de puna húmeda del Perú frente al cambio climático, con énfasis en patrones fenológicos e índices de congelamiento-descongelamiento. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo explicativo, con un diseño no experimental y longitudinal. Se seleccionaron cuatro localidades a lo largo de un gradiente latitudinal (Paracsha, Chongos Alto, Chuquibambilla y Macusani). Se utilizó información satelital de los sensores Landsat 5, 7 y 8, procesada con la herramienta DTimeS para identificar parámetros fenológicos (inicio, fin y duración de la estación de crecimiento), y se aplicó la prueba de Mann-Kendall y la pendiente de Sen para analizar tendencias. Asimismo, se calcularon los índices de congelamiento (AFI) y descongelamiento (ATI) utilizando proyecciones climáticas de la base BASD-CMIP6-PE bajo tres escenarios: SSP126, SSP370 y SSP585. Los resultados revelaron un gradiente latitudinal en la respuesta fenológica, con cambios más marcados en Chongos Alto que mostró un alargamiento significativo de la estación de crecimiento, mientras que Chuquibambilla presentó un adelanto significativo. Paracsha y Macusani mostraron tendencias no significativas. En cuanto a AFI y ATI, Paracsha presentó estabilidad relativa, mientras que Macusani mostró los cambios más intensos. Las alteraciones se intensifican en los escenarios climáticos más severos, especialmente bajo SSP585. En conclusión, estos hallazgos evidencian la vulnerabilidad diferenciada de los pajonales altoandinos y la necesidad de estrategias de conservación específicas según su localización y exposición al cambio climático.

Palabras clave: andes, alta montaña, cambio climático, pajonales, temperatura.



Abstract

This study investigated the changes in wet puna grasslands in Peru under climate change, focusing on phenological patterns and freeze–thaw indices. The research employed a quantitative approach, was explanatory in type, and followed a non-experimental, longitudinal design. Four localities were selected along a latitudinal gradient (Paracsha, Chongos Alto, Chuquibambilla, and Macusani). Satellite data from Landsat 5, 7, and 8 were processed using the DTimeS tool to identify key phenological parameters (start, end, and length of the growing season). Trend analyses were conducted using the Mann-Kendall test and Sen’s slope estimator. In addition, freeze (AFI) and thaw (ATI) indices were calculated using climate projections from the BASD-CMIP6-PE database under three climate scenarios: SSP126, SSP370, and SSP585. The results revealed a latitudinal gradient in phenological responses, with the most pronounced changes observed in Chongos Alto, which showed a significant extension of the growing season, and Chuquibambilla, which exhibited a significant advancement. In contrast, Paracsha and Macusani displayed non-significant trends. Regarding AFI and ATI, Paracsha showed relative stability, whereas Macusani exhibited the most intense changes. These alterations became more severe under the more pessimistic climate scenarios, particularly SSP585. In conclusion, the findings highlight the differentiated vulnerability of high Andean grasslands and underscore the need for targeted conservation strategies according to location and climate exposure.

Keywords: andes, high mountains, climate change, pajonales, temperature.

INTRODUCCIÓN

Los pajonales altoandinos son un ecosistema único y complejo ubicado en las alturas de la cordillera de los Andes de Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela, entre 3000 y 5000 m.s.n.m. Más que simples espacios geográficos, son sistemas vivos y dinámicos que cumplen una función crítica en la infraestructura ecológica y albergan una parte importante parte de la biodiversidad del planeta. Existen cuatro tipos de pajonales, según el ecosistema en el que se desarrollan: paramos, jalcas, punas húmedas y punas secas. En el Perú, los pajonales de puna húmeda ocupan una extensión de más de 11.98 millones de hectáreas lo que representa el 9.26% del territorio. Constituida por una vegetación herbácea dominada por pastos de los géneros *Calamagrostis*, *Festuca* y *Stipa* (Josse et al., 2009), alberga una extraordinaria variedad de especies endémicas, entre ellas; la vicuña, el guanaco, la alpaca, la vizcacha serrana, el puma andino, etc. Estudios han demostrado que los pajonales de puna húmeda desempeñan un papel fundamental en la seguridad hídrica regional y nacional, la regulación climática y la estabilidad ambiental, por lo que son indispensables no solo para las comunidades andinas locales, sino también para las redes ecológicas nacionales (Mosquera et al., 2022).

El cambio climático podría afectar significativamente a los pajonales de puna húmeda en los Andes. Por ejemplo, las proyecciones indican un incremento de la temperatura de hasta 4 °C en las zonas de gran altitud en el escenario menos optimista (RCP 8.5) entre los años 2040 y 2070 (Tovar et al., 2022) y un cambio

significativo en la cantidad de lluvias (Poveda et al., 2020). La interacción entre el incremento de temperaturas y los cambios en las precipitaciones conllevaría a la pérdida de hábitats. Esta serie de eventos subraya la urgente necesidad de investigaciones exhaustivas sobre el impacto del cambio en los pajonales andinos en un contexto de cambio climático en curso. Por un lado, algunos autores han evaluado la respuesta de los pastizales andinos de alta montaña al cambio de uso del suelo (Mosquera et al., 2022), mientras que otros como Montenegro-Díaz et al. (2022), han estudiado el efecto de la remoción de biomasa como consecuencia del pastoreo intenso en los ecosistemas montañosos de Ecuador. Sin embargo, se han realizado pocos esfuerzos para entender cómo el cambio climático está cambiando los ritmos de crecimiento de las plantas y sus ciclos reproductivos, que pueden alterar significativamente la dinámica de estos ecosistemas. Si bien estos estudios se ven limitados por la falta de datos, en los últimos años los avances en la teledetección por satélite han incrementado significativamente la información disponible. De tal manera que ahora se dispone de datos que permiten evaluar su desarrollo estacional en gran escala espacial y durante largos periodos de tiempo.

Los ciclos de crecimiento, las épocas de floración y los períodos vegetativos actúan como sensores biológicos de la alteración de su entorno ecológico (Li et al., 2021). Por lo tanto, la fenología es un indicador del cambio climático y constituye una herramienta adecuada para el estudio de los ecosistemas de pajonales de puna húmeda en los Andes peruanos. Al utilizar datos satelitales, los investigadores pueden monitorizar parámetros fenológicos críticos, como el inicio de la temporada (SOS), el final de la temporada (EOS) y la duración de la temporada (LOS), con mayor precisión y consistencia que los métodos terrestres tradicionales. En este sentido, Bellini et al. (2022) estudiaron el impacto del cambio climático en la fenología de los pastizales europeos y analizaron 20 años de datos satelitales MODIS, encontrando tendencias estacionales que indican que SOS y el pico de la primavera (POS) se han adelantado, en promedio, 0,56 días por año. Tal estudio también reveló que tanto el SOS como el POS se vieron principalmente influenciados por el aumento de las temperaturas invernales y primaverales.

En este contexto, el análisis fenológico de los pajonales de puna húmeda del Perú representa una vía clave para comprender los impactos del cambio climático en ecosistemas altoandinos, altamente sensibles a las alteraciones térmicas y de precipitación. Dado su papel fundamental en la regulación hídrica, la biodiversidad y el equilibrio ecológico regional, resulta crucial evaluar cómo responden estos ecosistemas a distintos escenarios climáticos futuros. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar los cambios en la fenología y los ciclos de congelamiento-descongelamiento de los pajonales de puna húmeda del Perú en un contexto de cambio climático, considerando su distribución latitudinal y su variabilidad ambiental. Esta investigación busca generar evidencia científica que contribuya a diseñar estrategias de conservación y adaptación climática en los Andes peruanos.

METODOLOGÍA

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, ya que se basó en el análisis de datos numéricos de sensores satelitales y modelos climáticos, lo cual permitió identificar patrones y establecer relaciones estadísticas. Fue de tipo explicativo, porque buscó comprender cómo el cambio climático afecta los patrones fenológicos y térmicos en los pajonales. El diseño fue no experimental y longitudinal, al analizar datos observacionales sin manipulación directa, durante el periodo 1985-2023. Este tipo de diseño es adecuado para estudiar variaciones temporales en contextos naturales (Hernández-Sampieri et al., 2014).

El ámbito de este estudio se centra en los pajonales de puna húmeda de los Andes del Perú, situados entre 3200 y 5000 m.s.n.m. como se muestra en la Figura 1. Estos ecosistemas presentan variaciones significativas de temperatura y precipitaciones. Para abordar esta variabilidad, se han seleccionado cuatro zonas de estudio que forman un transecto estratégico de norte a sur (Tabla 1), abarcando aproximadamente 4.2 grados de latitud (desde -10.18° hasta -14.38°). Ello permitió estudiar los pajonales en diferentes condiciones climáticas, como un gradiente térmico que muestra una disminución clara de la temperatura de norte a sur (de 11.70°C en Paracsha a 6.59°C en Macusani) y patrones de precipitación que varían, siendo más húmedos los pajonales del norte y del centro-sur (Paracsha y Chuquibambilla) que los del centro y sur (Chongos Alto y Macusani). Además, el gradiente latitudinal revela patrones de variabilidad climática, con mayor estabilidad térmica en el norte y mayor variabilidad en el sur, lo que es crucial para entender la resiliencia de los pajonales ante el cambio climático.

Las cuatro localidades ofrecen una muestra representativa de las condiciones ecosistémicas, lo que permite un estudio en profundidad de la respuesta de los pajonales al cambio climático. Paracsha (Huánuco) en el distrito de Jesús, provincia de Lauricocha (altitud de 4340 m.s.n.m.) es la localidad más septentrional del estudio, caracterizada por tener la temperatura promedio más alta (11.70°C) y la segunda mayor en precipitación promedio (89.94 mm/mes). Su clima muestra una relativa estabilidad térmica con un coeficiente de variación de 6.75%, el más bajo entre las localidades estudiadas. Chongos Alto (Junín), situada en la provincia de Huancayo, es la localidad de menor altitud del estudio (3940 m.s.n.m.). Presenta una temperatura media de 10.39°C y la menor precipitación (65.46 mm/mes). A pesar de su menor altitud, mantiene características típicas de puna húmeda, con una variabilidad térmica moderada (CV: 11.28%).

Tabla 1

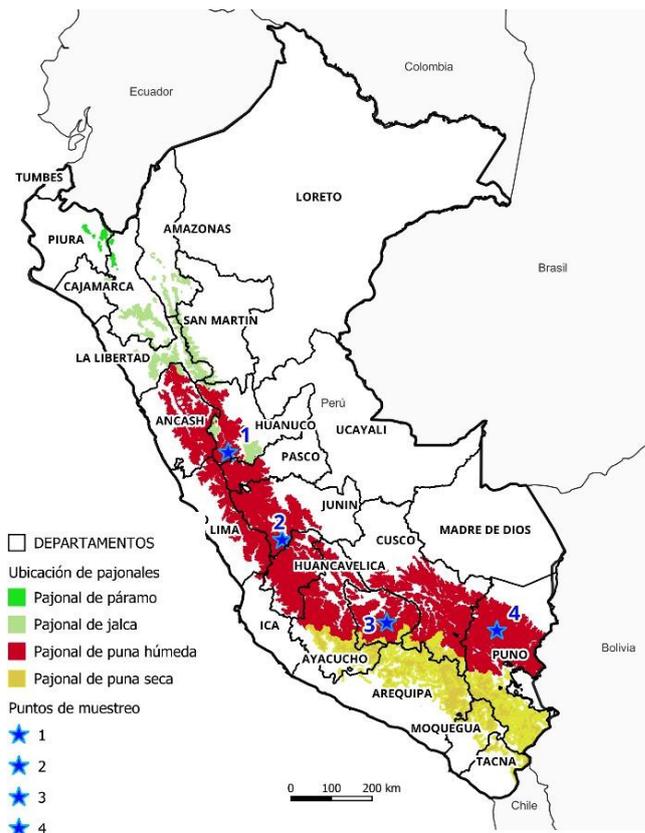
Descripción de las zonas de estudio

Id	Departamento	Provincia	Distrito	Localidad	Longitud	Latitud	Altura (m.s.n.m.)
1	Huánuco	Lauricocha	Jesús	Paracsha	-76.5426	-10.1826	4340
2	Junín	Huancayo	Chongos Alto	Chongos Alto	-75.2795	-12.2420	3940
3	Abancay	Graú	Chuquibambilla	Chuquibambilla	-72.8499	-14.2425	4400
4	Puno	Azángaro	Macusani	Macusani	-70.2603	-14.3803	4330

Por su parte, Chuquibambilla (Abancay), ubicada en la provincia de Graú, representa el punto más alto del estudio (4400 m.s.n.m.). Es notable por tener la mayor variabilidad en precipitaciones (CV: 96.89%) y la precipitación máxima más alta (360.98 mm/mes). Su temperatura promedio de 9.80°C refleja su elevada altitud, aunque mantiene una variabilidad térmica moderada. Mientras que, Macusani (Puno) ubicada en la provincia de Azángaro (4330 m.s.n.m.), es la localidad más meridional del estudio, destaca por tener la temperatura promedio más baja (6.59°C) y la mayor variabilidad térmica (CV: 28.63%) con precipitaciones moderadas (66.74 mm/mes), similares a las de Chongos Alto.

Figura 1

Área de estudio y distribución de los pajonales en el Perú



Nota. Las estrellas azules corresponden a las cuatro zonas de estudio: Paracsha (1), Chongos Alto (2), Chuquibambilla (3) y Macusani (4).

Los datos de precipitación diaria y temperatura media diaria se obtuvieron de la base de datos grillados BASD-CMIP6-PE (Fernandez-Palomino et al., 2024). Este conjunto de datos constituye una base sólida y completa para analizar el impacto del cambio climático en Perú y Ecuador. Gracias a su alta resolución espacial (10 km), es posible analizar con gran detalle los patrones climáticos locales seleccionados para el presente estudio. La serie histórica del conjunto de datos abarca desde 1850 hasta 2014. BASD-CMIP6-PE ofrece tres escenarios futuros diferentes para precipitación diaria, temperatura media, máxima y mínima (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5). Estos escenarios se generaron utilizando el método de ajuste de sesgo y reducción de escala estadística (BASD), que preserva la tendencia de las series originales (Fernandez-Palomino et al., 2022). Mientras que el error sistemático en los resultados del modelo climático se ha corregido utilizando datos observados de 804 estaciones pluviométricas y 178 estaciones climáticas.

Para el cálculo de la fenología, primero se obtuvieron datos de reflectancia usando el repositorio de GitHub de LandsatTS (Berner et al., 2023). Este repositorio ofrece un paquete para el programa R, diseñado para optimizar el proceso de colección, limpieza, calibración y modelado fenológico de los datos de series temporales de Landsat. Para obtener datos de reflectancia de calidad de los sensores Landsat 5, 7 y 8, se siguieron los siguientes pasos: (1) colección y evaluación de calidad de los datos de reflectancia. (2) calibración cruzada y homogenización de las mediciones de reflectancia de la superficie de los tres sensores Landsat. (3) cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que es el más recomendado para determinar la fenología (Shin et al., 2023). Por último, se exportaron los registros completos de las series temporales de NDVI para las cuatro localidades en estudio.

En cuanto a la identificación del modelo fenológico que mejor refleja el crecimiento, desarrollo y senescencia de los pajonales de puna húmeda implicó un proceso de selección entre nueve de los treinta modelos fenológicos disponibles en la caja de herramientas DATimeS, basada en MATLAB diseñada para el procesamiento de datos de series temporales, centrada especialmente en el índice NDVI. Los modelos considerados fueron sigmoide, lineal, pchip, GPR, SKRRlin, SSGPR, SKRRrbf, VHGPR y Whittaker. Cada uno de estos modelos presenta características y estructuras matemáticas distintas, detalladas en el estudio original de Belda et al. (2020), el cual sirvió como base metodológica para la presente investigación.

Por otra parte, para la evaluación, se calcularon el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio relativo (RRMSE). Finalmente, se determinó la duración de la temporada (LOS) como la diferencia entre la fecha de finalización (EOS) y la de inicio (SOS) en el período de 1985 a 2023, utilizando días julianos para expresar el período fenológico como el número de días a partir del 01 de enero (DOY).

Mientras que, para calcular el índice anual de congelación (AFI) y descongelación (ATI), primero se determinaron los grados día de crecimiento (GDD) a partir de los datos de temperatura media diaria. Los GDD se calculan restando al valor medio diario de la temperatura el valor de la temperatura de

base (10 °C). A continuación, se obtuvieron los valores del índice de congelación y del índice de descongelación, que serían los valores de temperatura acumulados por debajo o por encima de 0 °C durante periodos específicos (Shi et al., 2019).

Para el análisis de tendencias, se emplearon métodos no paramétricos: la pendiente de Sen y la prueba de Mann-Kendall (M-K), ampliamente utilizados para evaluar tendencias en series temporales de largo plazo (Araújo et al., 2023). La clasificación de la pendiente de Sen es la siguiente: valores positivos (pendiente > 0) indican eventos retrasados o de mayor duración, mientras que valores negativos (pendiente < 0) reflejan eventos adelantados o acortados. La prueba M-K se aplicó con un nivel de confianza del 95 %. Las tendencias se determinaron integrando los resultados de ambas pruebas, considerando parámetros fenológicos, así como los índices AFI y ATI. Adicionalmente, se evaluó la significancia estadística de los coeficientes de correlación mediante valores p. Estos coeficientes se clasificaron en tres niveles: fuerte ($0.8 < r \leq 1$), moderado ($0.3 < r \leq 0.8$) y débil ($0 < r \leq 0.3$), utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

RESULTADOS

La selección de los modelos fenológicos revela interesantes patrones relacionados con las características ambientales de cada zona. En Paracsha, caracterizada por tener la temperatura media más alta (11.70 °C) y una notable estabilidad térmica (CV: 6.75%), el modelo de Whittaker ($R^2 = 0.841$) demostró ser la mejor opción, ya que capturó efectivamente la respuesta fenológica en estas condiciones de temperatura más cálida y estable. Los modelos GPR y sigmoide también mostraron un buen rendimiento en esta zona ($R^2 = 0.656$ y 0.663 , respectivamente), aunque con métricas de error más elevadas, lo que sugiere que estos modelos podrían ser una alternativa viable en condiciones de alta estabilidad térmica. En Chuquibambilla (Zona 3), el modelo Whittaker alcanzó un R^2 aún mayor, de 0.910. con un RRMSE de apenas 8.09 %, mientras que el modelo SSGPR también obtuvo buenos resultados ($R^2 = 0.813$), lo que indica que ambos modelos son particularmente efectivos para capturar la variabilidad del NDVI en zonas donde la estacionalidad térmica es un factor determinante.

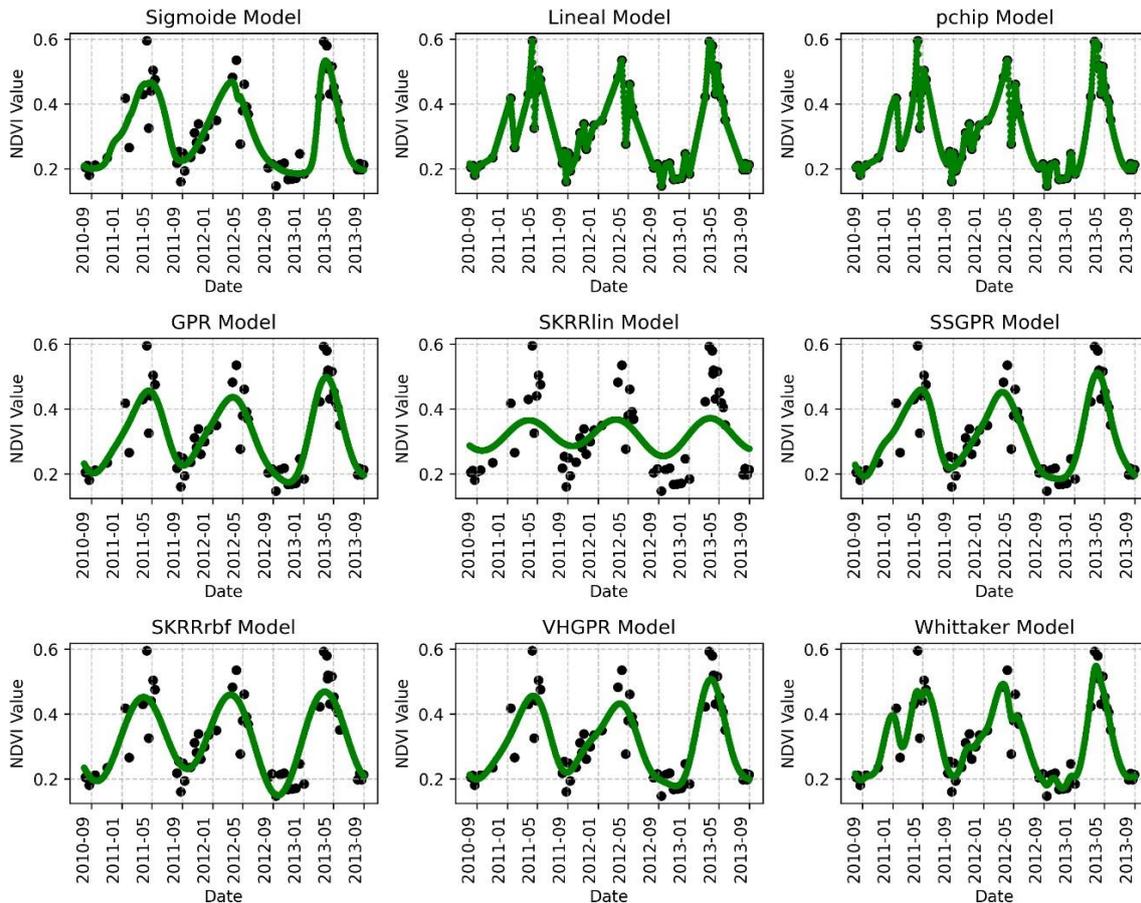
Por otro lado, en Chongos Alto, que presenta la menor altitud (3940 msnm) y precipitación (65.46 mm/mes) entre las zonas estudiadas, el modelo sigmoide ($R^2 = 0.824$) demostró ser más apropiado, ya que captó efectivamente la respuesta de la vegetación tanto en períodos húmedos como secos, a pesar de su menor disponibilidad hídrica. De manera similar, en Macusani, el modelo sigmoide ($R^2 = 0.822$) con un RMSE de 0.054 mostró una capacidad superior para representar las etapas de crecimiento y senescencia. Cabe destacar que, en todas las zonas, independientemente de sus características climáticas particulares, los modelos lineal y PCHIP alcanzaron valores perfectos ($R^2 = 1.0$), mostrando un claro sobreajuste que no reflejaba el comportamiento natural de la fenología de los pajonales. La selección final de los modelos priorizó aquellos que no solo mostraban buenos indicadores estadísticos, sino que también

capturaban de manera realista los patrones fenológicos característicos de cada zona, teniendo en cuenta sus condiciones ambientales específicas.

Es importante destacar que los modelos SKRRlin y SKRRrbf mostraron consistentemente un desempeño inferior en todas las zonas de estudio. En particular, en Macusani, el modelo SKRRlin mostró una correlación media ($R^2 = 0.44$) con un RMSE elevado de 0.099, lo que evidencia su limitada capacidad para capturar los patrones fenológicos. Por otro lado, los modelos GPR, VHGP y SSGPR mostraron un rendimiento intermedio consistente a través de las diferentes áreas de estudio, con un R^2 generalmente superior a 0.8 y valores de RMSE aceptables, lo que sugiere que estos modelos podrían ser útiles como alternativas cuando los modelos principales (Whittaker y Sigmoide) no sean aplicables. Esta variabilidad en el rendimiento de los diferentes modelos subraya la importancia de considerar enfoques de modelado múltiples al estudiar la fenología de los pajonales, especialmente en ecosistemas de alta montaña donde las condiciones ambientales pueden variar mucho.

Figura 2

Modelos fenológicos para el área de estudio Paracsha (Huánuco)



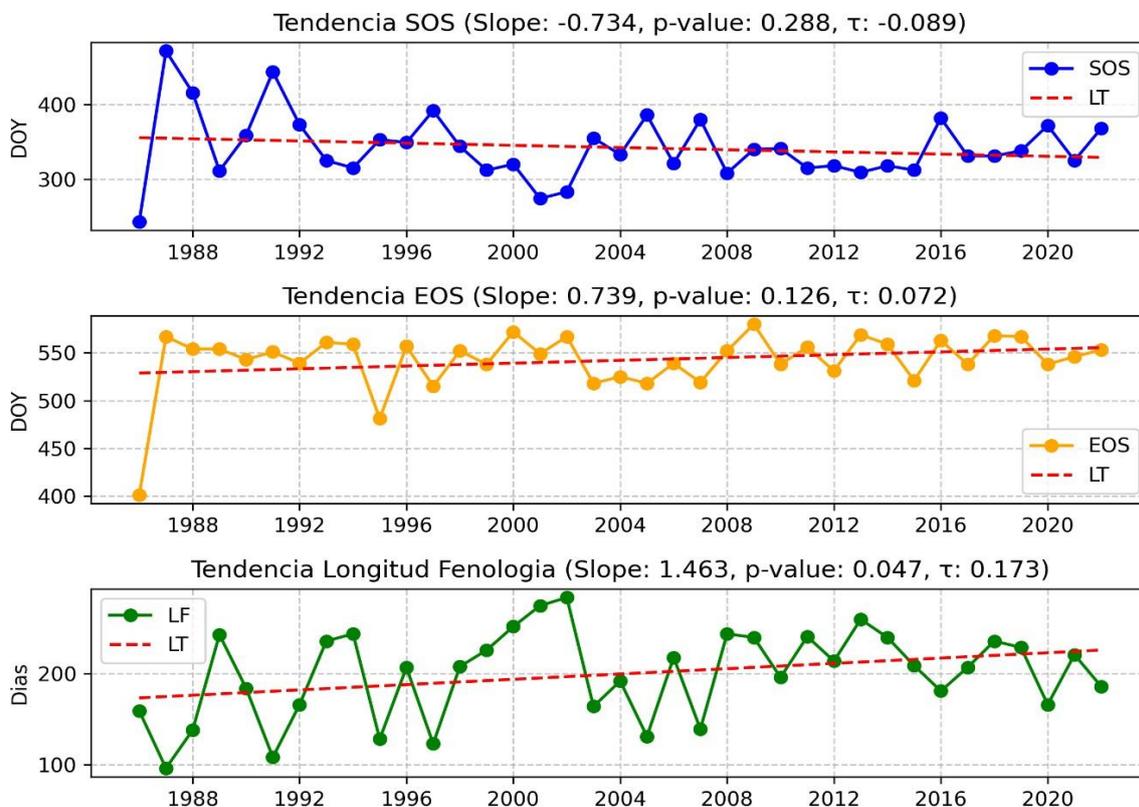
Nota. Los puntos negros representan los valores de NDVI, las curvas de color verde representan los modelos fenológicos en el intervalo de setiembre de 2010 a setiembre de 2013.

Tendencias de los parámetros de la fenología

El inicio de la estación de crecimiento (SOS) para la localidad de Paracsha (Huánuco - Norte) muestra una tendencia hacia un adelanto de 0.966 días por año, aunque esta tendencia no es estadísticamente significativa (p-valor: 0.160). Esto sugiere que la vegetación comienza a crecer antes. Por otro lado, el final de la estación de crecimiento (EOS) presenta una ligera tendencia hacia el adelanto (pendiente: -0.034 días/año), aunque no es significativa (p-valor: 0.891), lo que indicaría una relativa estabilidad en la finalización de dicha estación. La longitud del periodo fenológico (LF) muestra una ligera tendencia al aumento (pendiente: 0.941 días/año), aunque no es significativa (p-valor: 0.174), lo que sugiere que las estaciones de crecimiento son cada vez más largas. En la Figura 3 se muestra los resultados de análisis de tendencia para la localidad de Chongos Alto (Junín - Centro): El SOS presenta una tendencia negativa (pendiente: -0.734 días/año, p-valor: 0.288), lo que indica un posible adelanto en el inicio de la estación de crecimiento, aunque no es significativo. Por el contrario, el EOS muestra una tendencia positiva (pendiente: 0.739 días/año, p-valor: 0.126), lo que sugiere un retraso en el fin de la estación de crecimiento. La longitud del periodo fenológico muestra una tendencia significativa al aumento (pendiente: 1.463 días/año, p-valor: 0.047), siendo este el único parámetro estadísticamente significativo en esta localidad. Esto indica un claro alargamiento de la estación de crecimiento.

Figura 3

Resultado del análisis de tendencia para los parámetros fenológicos para Chongos Alto (Junín)



Nota. En la figura DOY es número de día del año, LT es línea de tendencia, SOS es inicio de estación, EOS es fin de estación, LF es Longitud de la fenología, Slope es la pendiente de Sen.

El SOS para los pajonales ubicados en Chuquibambilla (Abancay, zona centro y sur) muestra una tendencia negativa significativa (pendiente: -1.926 días/año, p-valor: 0.009), siendo el cambio más pronunciado y estadísticamente significativo de todos. Esto indica un claro adelanto en el inicio de la estación de crecimiento. El EOS presenta una tendencia negativa marginalmente significativa (pendiente: -0.573 días/año; p-valor: 0.081), lo que sugiere un posible adelanto en el fin de la estación de crecimiento. La longitud del periodo fenológico muestra una tendencia positiva marginalmente significativa (pendiente: 1,346 días/año; p-valor: 0.078), lo que indica una posible extensión de la estación de crecimiento (Figura XX). Mientras tanto, en la localidad de Macusani (Puno, sur), el SOS muestra una tendencia positiva (pendiente: 0.660 días/año, p-valor: 0.150), lo que sugiere un posible retraso en el inicio de la estación de crecimiento, aunque no significativo. El EOS presenta una ligera tendencia positiva (pendiente: 0.268 días/año, p-valor: 0.476), lo que indica una relativa estabilidad en el fin de la estación de crecimiento. La longitud del periodo fenológico muestra una tendencia negativa (pendiente: -0.389 días/año; p-valor: 0.521), lo que sugiere una posible reducción en la duración de la estación de crecimiento, aunque esta reducción no es significativa.

Tendencia del índice de temperatura

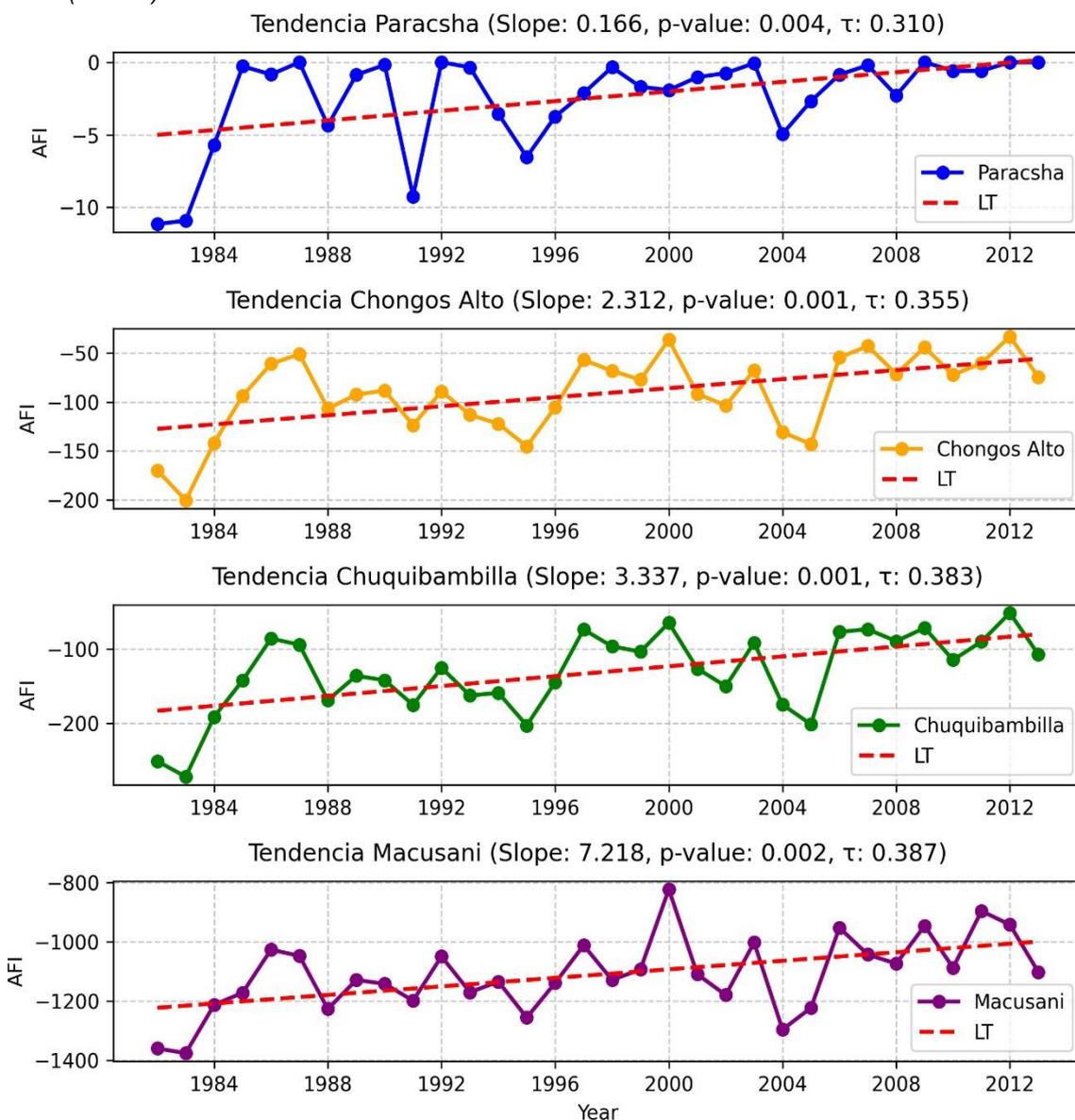
El análisis de las tendencias de los índices de congelamiento y descongelamiento reveló cambios significativos en todas las localidades estudiadas durante el período 1984-2012. Los resultados muestran patrones distintivos que varían según la ubicación geográfica y la altitud. Por ejemplo, en la localidad de Paracsha, el índice de congelamiento mostró una tendencia positiva significativa (pendiente: 0.166, p-valor: 0.004), lo que indica un incremento moderado en la intensidad del congelamiento entre 1980 y 2015. Paralelamente, el índice de descongelamiento mostró un aumento significativo (pendiente: 7.360, p-valor: 0.007), lo que sugiere un calentamiento progresivo más pronunciado durante los periodos de descongelamiento. Chongos Alto presentó una tendencia positiva significativa en el índice de congelamiento (pendiente: 2.312, p-valor: 0.001), lo que indica un incremento en la intensidad de las heladas. El índice de descongelamiento también mostró un aumento significativo (pendiente: 6.001, p-valor: 0.002), lo que indica una intensificación de los procesos de descongelamiento.

En Chuquibambilla, se observó la tendencia más pronunciada en el índice de congelamiento (pendiente: 3.337, p-valor: 0.001), lo que indica un incremento sustancial en la intensidad del congelamiento. El índice de descongelamiento también mostró un aumento significativo (pendiente: 5.065, p-valor: 0.001), lo que sugiere una intensificación de los ciclos de congelamiento-descongelamiento. Macusani exhibió la tendencia más marcada en el índice de congelamiento (pendiente: 7.218, p-valor: 0.002), lo que indica un incremento considerable en la intensidad de las heladas. Sin embargo, el índice de descongelamiento mostró un aumento más moderado pero significativo (pendiente: 0.222, p-valor: 0.002), lo que sugiere un cambio menos pronunciado en los procesos de descongelamiento. Estos resultados revelan un patrón general de intensificación en los procesos de congelación y descongelación en

todas las localidades estudiadas. Los cambios más pronunciados se observaron en las localidades de mayor altitud, particularmente en Macusani y Chuquibambilla. Este patrón sugiere una mayor vulnerabilidad de los ecosistemas de pajonal de puna húmeda a los cambios en los ciclos de congelamiento-descongelamiento, especialmente en las zonas más elevadas. La significancia estadística (p -valor < 0.01) de estas tendencias en todas las localidades indica que estos cambios no son aleatorios, sino que representan una transformación sistemática en los patrones térmicos de estos ecosistemas. Estas alteraciones en los ciclos de congelamiento-descongelamiento podrían tener importantes implicaciones para la estructura y función de los pajonales de puna húmeda, particularmente en aspectos como la fenología de la vegetación y los procesos biogeoquímicos del suelo.

Figura 4

Resultado de análisis de tendencia para el índice de congelamiento para Chongos Alto (Junín)



Nota. En la figura AFI es índices de congelamiento, slope pendiente de Sen. LT es línea de tendencia.

Análisis de los escenarios de cambio climático

El análisis de escenarios de cambio climático en Pajonales de Puna húmeda revela un panorama profundamente heterogéneo que varía significativamente de un escenario a otro. En el escenario optimista SSP126, los resultados sugieren que, aunque Paracsha podría conservar cierta estabilidad en sus ciclos de congelamiento y descongelamiento, la progresión hacia un aumento gradual de las temperaturas en Chuquibambilla y los cambios moderados en Chongos Alto ofrecen oportunidades para la adaptación. Esto implica que, en un contexto favorable, la biodiversidad podría mantenerse, lo que garantizaría la eficacia de los servicios ecosistémicos. Sin embargo, siempre está presente el riesgo de que la falta de una intervención proactiva en zonas como Macusani, que ya muestra señales de cambios significativos, provoque una vulnerabilidad alarmante.

A medida que se avanza hacia el escenario intermedio SSP370, se observan consecuencias más graves en las dinámicas ecológicas. La mayor variabilidad en Paracsha, la marcada reducción de ciclos en Chongos Alto y la intensificación de los cambios en Chuquibambilla ponen de manifiesto una preocupante tendencia hacia patrones más erráticos. Esto sugiere que las estrategias de gestión deben adaptarse con mayor urgencia para mitigar los efectos visibles y anticipar futuros cambios. La posibilidad de alteraciones en la composición de especies vegetales es una alerta que no debe subestimarse, ya que podría provocar una pérdida de biodiversidad que afecte profundamente a la resiliencia de estos ecosistemas.

El escenario más crítico, SSP585, es alarmante, ya que muestra alteraciones drásticas que pueden resultar en cambios irreversibles en la estructura de los ecosistemas. La situación de Chongos Alto y Macusani, con una reducción considerable de los ciclos, subraya la necesidad urgente de implementar medidas de adaptación y restauración para evitar el colapso de los servicios ecosistémicos esenciales. Este énfasis en la intervención intensiva es vital no solo para preservar la biodiversidad existente, sino también para reforzar la capacidad de estos ecosistemas para adaptarse a las condiciones cambiantes previstas a largo plazo.

DISCUSIÓN

El estudio de los cambios en los pajonales de puna húmeda del Perú en un contexto de cambio climático revela patrones significativos de cambio que podrían tener profundas implicaciones para estos ecosistemas. El análisis de tres escenarios de cambio climático hasta el año 2100 muestra variaciones importantes en la intensidad y frecuencia de los índices de congelación y descongelación, con diferencias notables entre las localidades estudiadas. Por ejemplo, en el extremo septentrional, Paracsha (Huánuco) muestra una notable estabilidad en sus proyecciones (pendiente = 0.004, $\tau = 0.117$), lo que, junto con su temperatura promedio relativamente alta (11.70°C) y precipitaciones significativas (89.94 mm/mes), sugiere una mayor resiliencia ante el cambio climático. Estos resultados coinciden con los de Feng et al. (2021), quienes señalan que hay regiones con mayor resiliencia ecológica. Los autores identificaron ciertas áreas, como la tundra, los desiertos y los pastizales de

montaña, como de menor resiliencia, mientras que otros biomas pueden presentar niveles de resiliencia más altos. En este sentido, si tenemos en cuenta la estabilidad térmica natural de esta zona, evidenciada por su bajo coeficiente de variación (6.75 %), podría convertirse en un importante refugio climático para la biodiversidad de los pajonales de puna húmeda. En esta línea, Soto Carrión et al. (2024) estudiaron la biomasa de pastizales altoandinos en la zona alta del Santuario Nacional del Ampay (Perú) y concluyeron que los pastizales del santuario se encontraban en un estado de conservación regular y que había pocas áreas erosionadas.

Chongos Alto (Junín), situada a menor altitud (3940 msnm), presenta una tendencia moderada al cambio (pendiente = 0.431, τ = 0.494), lo que, junto con su menor precipitación (65.46 mm/mes), sugiere una vulnerabilidad intermedia. Su posición altitudinal más baja podría facilitar la migración ascendente de especies de zonas inferiores, lo que alteraría la composición y estructura de las comunidades de pajonal de puna húmeda. Esta localidad podría aprovecharse como un importante corredor ecológico para la adaptación de especies al cambio climático. En este sentido, McCullough et al. (2024) señalan que las zonas de gran altitud son cruciales para sustentar refugios debido a su amplio gradiente altitudinal, que tienden a ser más pequeños y menos protegidos que los de las zonas de tierras bajas. A pesar de encontrarse en latitudes diferentes, los hallazgos enfatizan la necesidad de intensificar los esfuerzos de conservación de los refugios de gran altitud que sirven de base para futuras actividades de investigación y conservación que respalden la adaptación climática en cada región (Dhyani et al., 2022).

La situación en Chuquibambilla (Abancay) es particularmente compleja debido a su elevada altitud (4400 msnm) y a la alta variabilidad de las precipitaciones (CV = 96.89%). Según Fu et al. (2024), la tendencia significativa del incremento del AFI (pendiente = 0.558, τ = 0.441) sugiere cambios sustanciales en los regímenes de congelamiento-descongelamiento que, combinados con la variabilidad pluvial, podrían generar condiciones más estresantes para la vegetación. Esta localidad podría experimentar transformaciones significativas en la estructura y función de sus pajonales. Estas variaciones espaciales en la respuesta al cambio climático tienen implicaciones significativas para los ciclos biogeoquímicos, como lo indicaron Osborne et al. (2022). De acuerdo con Man et al. (2022), la alteración de los patrones de congelamiento-descongelamiento puede modificar las tasas de descomposición de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes, como ocurre en el ecosistema de la meseta Qinghai-Tíbet, la más alta del mundo. Estos cambios podrían afectar a la capacidad de almacenamiento de carbono de los pajonales y anular su papel en la regulación del ciclo global del carbono.

Macusani (Puno) emerge como la localidad más vulnerable, con la tendencia más pronunciada al cambio (pendiente = 4.570, τ = 0.571) y la mayor variabilidad térmica (CV = 28.63%). Su baja temperatura media (6.59 °C) y su posición meridional la hacen particularmente sensible a las alteraciones climáticas. Los cambios proyectados en esta zona podrían tener consecuencias dramáticas para los pajonales, alterando tanto su composición como su

funcionamiento ecológico. En este escenario tan adverso, nuestros resultados concuerdan con los de Rubio (2007), que indica que las estrategias de adaptación deben priorizar la viabilidad agrícola por encima de las prácticas ambientales convencionales que se consideran insostenibles. Las políticas a medio y largo plazo deben abordar cuestiones como la degradación de la tierra, la fragmentación y las prácticas agrícolas inadecuadas.

La respuesta de los pajonales de puna húmeda a estos cambios probablemente será heterogénea. Las especies con mayor plasticidad fenotípica y capacidad de adaptación podrían verse favorecidas, mientras que aquellas más especializadas a las condiciones actuales podrían experimentar reducciones de sus poblaciones. Este proceso podría dar lugar a una homogeneización biótica, como documentaron Pauli y Halloy (2019) en ecosistemas de alta montaña del mundo. El gradiente altitudinal y latitudinal representado por las cuatro localidades estudiadas ofrece la oportunidad de desarrollar estrategias de conservación diferenciadas. Las zonas más estables, como Paracsha, podrían priorizarse como áreas de conservación, mientras que los corredores altitudinales que incluyen localidades como Chongos Alto podrían habilitarse para permitir la migración de especies en respuesta al cambio climático.

Además, los estudios de Diaz et al. (2023) sobre los efectos del cambio climático en los ecosistemas de montaña sugieren que la biodiversidad del Perú se verá afectada, con cambios en la cobertura de biomas y una mayor humedad en algunas zonas, lo que podría influir en la composición y resiliencia de los pajonales. La degradación de más del 60% de los pastizales altoandinos, causada por el sobrepastoreo y la falta de políticas de conservación, aumenta su vulnerabilidad al cambio climático. Por lo tanto, es crucial diseñar estrategias adaptativas y de conservación para garantizar la sostenibilidad de estos ecosistemas. La experiencia en otros sistemas montañosos del mundo, como los descritos por Casazza et al. (2023) en los Alpes europeos, sugiere la importancia de establecer redes de áreas protegidas que abarquen diferentes elevaciones y condiciones microclimáticas. Se espera que estas áreas sustenten una mayor variedad de taxones en el futuro, en particular porque están ubicadas en regiones de gran altitud que históricamente han sido estables desde el punto de vista climático y ricas en especies endémicas.

La integración de los análisis de los índices de congelamiento-descongelamiento (AFI) y los patrones fenológicos en los pajonales de puna húmeda del Perú revela una dinámica espacial y temporal compleja en respuesta al cambio climático. Los tres escenarios evaluados (SSP126, SSP370 y SSP585) muestran una clara correspondencia con el gradiente latitudinal observado en los cambios fenológicos, donde las zonas centro y centro-sur emergen como las más vulnerables a las alteraciones climáticas, resultado que concuerda con los estudios de Wongchuig et al. (2018). Por otro lado, en Chongos Alto y Chuquibambilla, los cambios significativos en los ciclos de congelamiento-descongelamiento coinciden con alteraciones notables en la fenología, particularmente en el adelanto del inicio de la estación de crecimiento (SOS) y el alargamiento de la temporada de crecimiento.

En contraste, las localidades extremas, Paracsha, al norte, y Macusani al sur, muestran una interesante dicotomía: mientras Paracsha mantiene una relativa estabilidad tanto en la AFI como en los parámetros fenológicos, Macusani presenta cambios drásticos en AFI pero mantiene tendencias no significativas en sus patrones fenológicos, lo que sugiere posibles mecanismos de adaptación locales. Esta variabilidad espacial en las respuestas se intensifica progresivamente a través de los escenarios de cambio climático, siendo el escenario SSP585 el que presenta las alteraciones más significativas, lo que podría amenazar incluso actual resistencia observada en las localidades extremas. Las implicaciones de estos patrones son profundas para la gestión y conservación de estos ecosistemas, ya que sugieren la necesidad de estrategias diferenciadas según la posición latitudinal y la vulnerabilidad local, manteniendo una visión integral que considere la interacción entre los ciclos de congelamiento-descongelamiento y la fenología de la vegetación.

Entre las limitaciones del estudio se encuentra la dependencia de datos satelitales con resolución temporal limitada, lo que puede afectar la precisión en la detección de cambios fenológicos súbitos. Asimismo, la disponibilidad y calidad de los datos climáticos históricos y proyectados puede introducir incertidumbre en los análisis bajo escenarios futuros. Además, el enfoque cuantitativo no permite capturar dimensiones ecológicas o socioculturales relacionadas con el uso y manejo de los pajonales por parte de las comunidades locales. En futuras investigaciones, se recomienda integrar métodos mixtos que incluyan observaciones de campo y participación comunitaria, así como utilizar sensores con mayor resolución temporal y espacial. También será valioso ampliar el número de localidades estudiadas a fin de capturar una mayor heterogeneidad ambiental y evaluar con mayor profundidad la influencia de variables edáficas y antrópicas en la dinámica fenológica de estos ecosistemas.

CONCLUSIONES

El estudio permitió analizar cómo los pajonales de puna húmeda del Perú responden al cambio climático, revelando diferencias marcadas en los patrones fenológicos y en los ciclos de congelamiento-descongelamiento a lo largo de un gradiente latitudinal. Se evidenció que estas respuestas no son uniformes, sino que varían según la ubicación geográfica y las condiciones ambientales locales, lo que confirma la utilidad de un enfoque multiescenario y espacialmente diferenciado para entender los impactos climáticos en ecosistemas altoandinos.

Los cambios observados en la fenología de la vegetación, especialmente el adelanto o alargamiento de la estación de crecimiento en algunas zonas, sugieren una alteración progresiva en los ciclos ecológicos. Estas transformaciones pueden comprometer la estabilidad de los servicios ecosistémicos que brindan los pajonales, como la regulación hídrica y el soporte a la biodiversidad. Por tanto, es necesario monitorear continuamente estos procesos, dado que su aceleración podría superar la capacidad de adaptación natural de los ecosistemas.

Asimismo, se identificó que la vulnerabilidad de los pajonales depende no solo de las proyecciones climáticas, sino también de su resiliencia interna. Algunas

localidades podrían convertirse en refugios climáticos, mientras que otras requerirán intervenciones urgentes para evitar el deterioro de su funcionalidad ecológica.

Frente a ello, se recomienda diseñar estrategias de gestión adaptativa y conservación diferenciadas, considerando las particularidades ecológicas de cada zona. Esto permitirá una planificación más efectiva ante futuros escenarios de cambio climático, contribuyendo a la sostenibilidad de los ecosistemas de puna húmeda en el largo plazo.

Rol de contribución

José Cairampoma: Conceptualización, análisis formal, investigación, escritura –revisión y edición, visualización, supervisión.

REFERENCIAS

- Bellini, E., Moriondo, M., Dibari, C., Leolini, L., Staglianò, N., Stendardi, L., Filippa, G., Galvagno, M., & Argenti, G. (2022). Impacts of climate change on European grassland phenology: A 20-year analysis of MODIS satellite data. *Remote Sensing*, 15(1), 218. <https://doi.org/10.3390/rs15010218>
- Berner, L. T., Assmann, J. J., Normand, S., & Goetz, S. J. (2023). LandsatTS: an R package to facilitate retrieval, cleaning, cross-calibration, and phenological modeling of Landsat time series data. *Ecography*, 2023(9) e06768. <https://doi.org/10.1111/ecog.06768>
- Casazza, G., Guerrina, M., Dagnino, D., & Minuto, L. (2023). Will natura 2000 european network of protected areas support conservation of Southwestern Alps endemic flora under future climate? *Biodiversity and Conservation*, 32(4), 1353–1367. <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02556-4>
- Dhyani, S., Sivadas, D., Basu, O., & Karki, M. (2022). Ecosystem health and risk assessments for high conservation value mountain ecosystems of South Asia: A necessity to guide conservation policies. *Anthropocene Science*, 1(1), 211–225. <https://doi.org/10.1007/s44177-022-00010-8>
- Díaz, R. D., Machaca, A. D., Belizario, G., & Lujano, E. (2023). Efectos del Cambio Climático Sobre los Ecosistemas de Montaña en la Cordillera Carabaya-Perú. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38, e38230088. <https://doi.org/10.1590/0102-778638230088>
- Feng, Y., Su, H., Tang, Z., Wang, S., Zhao, X., Zhang, H., Ji, C., Zhu, J., Xie, P., & Fang, J. (2021). Reduced resilience of terrestrial ecosystems locally is not reflected on a global scale. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 88. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00163-1>
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2022). A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds: Development and Hydrological Evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309–336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>

- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Vega-Jácome, F., Menz, C., Gleixner, S., & Bronstert, A. (2024). High-resolution climate projection dataset based on CMIP6 for Peru and Ecuador: BASD-CMIP6-PE. *Scientific Data*, 11(1), 34. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02863-z>
- Fu, C., Hao, H., Li, T., Li, Y., & Yang, F. (2024). Lag effects of vegetation of temperature stress on and its ecological risk assessment. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1424578. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1424578>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrena, V., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., Ferreira, W., Peralvo, M., Saito, J., & Tovar, A. (2009). *Ecosistemas de los Andes del norte y centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela*. Secretaria General de La Comunidad Andina. https://www.researchgate.net/publication/259477857_Ecosistemas_de_los_Andes_del_Norte_y_Centro_Bolivia_Colombia_Ecuador_Peru_y_Venezuela
- Li, K., Wang, C., Sun, Q., Rong, G., Tong, Z., Liu, X., & Zhang, J. (2021). Spring phenological sensitivity to climate change in the Northern Hemisphere: Comprehensive evaluation and driving force analysis. *Remote Sensing*, 13(10), 1972. <https://doi.org/10.3390/rs13101972>
- Man, Z., Xie, C., Jiang, R., & Che, S. (2022). Freeze–thaw cycle frequency affects root growth of alpine meadow through changing soil moisture and nutrients. *Scientific Reports*, 12(1), 4436. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08500-w>
- McCullough, I. M., Beirne, C., Soto-Navarro, C., & Whitworth, A. (2024). Mapping climate adaptation corridors for biodiversity—A regional-scale case study in Central America. *PLOS ONE*, 19(5), e0304756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304756>
- Montenegro-Díaz, P., Alvear, R. C., Wilcox, B. P., & Carrillo-Rojas, G. (2022). Effects of heavy grazing on the microclimate of a humid grassland mountain ecosystem: Insights from a biomass removal experiment. *Science of The Total Environment*, 832, 155010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155010>
- Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. F., & Román-Dañobeytia, F. (2022). Servicios ecosistémicos hídricos de los pajonales altoandinos: ¿Qué sabemos? *Forest Trends: Lima, Peru*. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.16991.94881>
- Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., & Crespo, P. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land

- use. *Science of The Total Environment*, 804, 150112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150112>
- Osborne, B. B., Bestelmeyer, B. T., Currier, C. M., Homyak, P. M., Throop, H. L., Young, K., & Reed, S. C. (2022). The consequences of climate change for dryland biogeochemistry. *New Phytologist*, 236(1), 15–20. <https://doi.org/10.1111/nph.18312>
- Pauli, H., & Halloy, S. R. P. (2019). High Mountain Ecosystems Under Climate Change. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science* <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.764>
- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., & van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8, 162. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162>
- Shi, Y., Niu, F., Lin, Z., & Luo, J. (2019). Freezing/thawing index variations over the circum-Arctic from 1901 to 2015 and the permafrost extent. *Science of The Total Environment*, 660, 1294–1305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.121>.
- Shin, N., Katsumata, C., Miura, T., Tsutsumida, N., Ichie, T., Kotani, A., Nakagawa, M., Khoon, K. L., Kobayashi, H., Kumagai, T., Tei, S., Pungga, R. anak S., Yamada, T., Kameda, A., Yanagisawa, M., Nasahara, K. N., Muraoka, H., Ichii, K., & Tokumoto, Y. (2023). Perspective: Improving the accuracy of plant phenology observations and land-cover and land-use detection by optical satellite remote-sensing in the Asian tropics. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1106723>
- Soto Carrión, C., Jiménez Mendoza, W., Pérez-Almeida, I., & Marin Rodriguez, C. (2024). Prediction of high Andean grasslands biomass in the upper zone of the National Sanctuary of Ampay-Peru for promoting an adequate management of natural grasslands. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 12(2), 1120503. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0503>
- Tovar, C., Carril, A. F., Gutiérrez, A. G., Ahrends, A., Fita, L., Zaninelli, P., Flombaum, P., Abarzúa, A. M., Alarcón, D., Aschero, V., Báez, S., Barros, A., Carilla, J., Ferrero, M. E., Flantua, S. G. A., Gonzáles, P., Menéndez, C. G., Pérez-Escobar, O. A., Pauchard, A., ... Hollingsworth, P. M. (2022). Understanding climate change impacts on biome and plant distributions in the Andes: Challenges and opportunities. *Journal of Biogeography*, 49(8), 1420–1442. <https://doi.org/10.1111/jbi.14389>
- Wongchuig, S. C., Mello, C. R., & Chou, S. C. (2018). Projections of the impacts of climate change on the water deficit and on the precipitation erosive indexes in Mantaro River Basin, Peru. *Journal of Mountain Science*, 15(2), 264–279. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4418-8>