



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

Facultad de
Ciencias e Ingeniería

**Cambio climático y su influencia en las clasificaciones de las ecorregiones andinas:
Un análisis sistemático de vegetación y factores ambientales**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Alejandra Nicole Flores Jamjachi

Jener Cesar Huincho Ramos

Asesor:

Mg. Luis Ramon Huaman Mesia

Lima, Perú

2026

Jurado calificador

Presidente: Mg. Danny Emerson Robles Sanchez

Vocal: Mg. Claudia Roxana Morales Pantoja

Secretario: Dr. Federico Luis Sebastian Rizo Patron Viale

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	FLORES JAMJACHI ALEJANDRA NICOLE
2.	HUINCHO RAMOS JENER CESAR

Pertencientes al programa de la **CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**, autores del trabajo titulado: **Cambio climático y su influencia en las clasificaciones de las ecorregiones andinas: Un análisis sistemático de vegetación y factores ambientales**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL** bajo la modalidad de **TESIS**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	HUAMAN MESIA LUIS RAMON	FACI	ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **9%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3531962535**; fecha de entrega: **09/04/2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 09 de abril de 2026**



Firma del asesor

DNI: 08704404

ORCID: 0000-0002-5156-7379

Índice

Resumen	1
Abstract	3
I. Introducción	5
1.1. Estado del arte	6
1.1.1. Cambio climático: Fundamentos e implicancias	6
1.1.2. Los Andes tropicales del Perú	9
1.1.3. Variables climáticas: Temperatura y precipitación	15
1.1.4. Glaciares andinos del Perú: centinelas del cambio climático	17
1.1.5. Respuestas de la vegetación altoandina al cambio climático	19
1.1.6. Sistemas bioclimáticos del Perú: Aportes y propuestas de regiones naturales a través de la historia	22
1.2. Justificación	29
II. Pregunta de investigación	31
III. Objetivos	31
3.1. Objetivo general	31
3.2. Objetivos específicos	31
IV. Metodología	32
4.1. Tipo de estudio	32
4.2. Área de estudio	33
4.3. Diseño de investigación científica	35
4.3.1. Enfoque general	35
4.3.2. Estrategias para la búsqueda de referencias bibliográficas	38
4.4. Operacionalización de las variables	41
V. Resultados	43

5.1.	Caracterización y línea base de ecorregiones andinos según Brack y Pulgar Vidal	43
5.2.	Análisis de tendencias climáticas en la región andina	51
5.2.1.	Revisión sistemática de tendencias climáticas en la región andina	51
5.2.2.	Modelamiento de variables climáticas en la región andina	55
5.3.	Análisis y modelamiento de glaciares en el Perú	98
5.3.1.	Análisis de glaciares a base de los inventarios históricos del Perú	98
5.3.2.	Revisión sistemática sobre glaciares en el Perú	100
5.3.3.	Modelamiento en el estudio de glaciares	105
5.4.	Resultados de la revisión sobre respuestas de la vegetación andina al cambio climático	109
VI.	Discusión	119
6.1.	Línea base conceptual Pulgar Vidal y Antonio Brack para interpretar ecorregiones andinas bajo cambio climático	119
6.2.	Tendencias climáticas en los Andes peruanos: Temperatura y Precipitación	123
6.3.	Los glaciares: Centinelas del cambio climático en los andes	129
6.4.	Vegetación y respuesta al cambio climático	134
6.5.	Síntesis ecológica - climática e implicancias para la gestión	140
VII.	Conclusiones	142
VIII.	Recomendaciones	144
IX.	Referencias bibliográficas	145
Anexos		167

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Búsqueda en Scopus, Elaboración propia</i>	39
Tabla 2 <i>Búsqueda en PubMed, Elaboración propia</i>	40
Tabla 3 <i>Búsqueda en Scholar, Elaboración propia</i>	41
Tabla 4 <i>Operacionalización de variables de temperatura, precipitación, retroceso glaciar y desplazamiento de especies vegetales</i>	42
Tabla 5 <i>Cuadro de Pisos Ecológicos de la Región Andina según Javier Pulgar Vidal</i>	45
Tabla 6 <i>Cuadro de las ecorregiones andinas planteados por Antonio Brack</i>	47
Tabla 7 <i>Estudios sobre precipitación analizados en la revisión sistemática</i>	53
Tabla 8 <i>Estudios sobre temperaturas analizados en la revisión sistemática</i>	55
Tabla 9 <i>Estudios sobre glaciares analizados en la revisión sistemática</i>	103
Tabla 10 <i>Revisión sistemática sobre cambios en la vegetación andina</i>	113
Tabla 11 <i>Revisión sistemática sobre cultivos andinos</i>	117
Tabla 12 <i>Marcos conceptuales y operativos para interpretar la dinámica climática en los Andes peruanos</i>	122
Tabla 13 <i>Tendencias climáticas (prueba de Mann–Kendall, 1981–2016) por ecorregión andina según Brack</i>	127
Tabla 14 <i>Tendencias climáticas (prueba de Mann–Kendall, 1981–2016) por piso altitudinal andino según Pulgar Vidal</i>	127
Tabla 15 <i>Resumen del comportamiento y dinámicas de los glaciares representativos en los andes peruanos</i>	133

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Los 9 límites planetarios: umbrales biofísicos y niveles de riesgo</i>	8
Figura 2 <i>Sección transversal norte del Perú (5° 30' lat. S)</i>	12
Figura 3 <i>Sección transversal centro del Perú (10° 18' lat. S)</i>	13
Figura 4 <i>Sección transversal sur del Perú (16° 0' lat. S)</i>	14
Figura 5 <i>Modelo conceptual del ciclo de nutrientes y facilitación microbiana en suelos altoandinos recientemente deglaciados</i>	20
Figura 6 <i>Ocho regiones naturales, Javier Pulgar Vidal(1940)</i>	24
Figura 7 <i>Once ecorregiones, Antonio Brack y Cecilia Mendiola (2000)</i>	26
Figura 8 <i>Diagrama bioclimático de Holdridge (1967)</i>	27
Figura 9 <i>Delimitación del área de estudio: región andina del Perú</i>	34
Figura 10 <i>Diseño de la investigación</i>	36
Figura 11 <i>Metodología PRISMA para la revisión sistemática</i>	37
Figura 12 <i>Criterios de inclusión y exclusión para la revisión sistemática</i>	38
Figura 13 <i>Mapa de pisos altitudinales de los andes del Perú-Pulgar Vidal</i>	49
Figura 14 <i>Mapa de ecorregiones andinas del Perú</i>	50
Figura 15 <i>Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en la Serranía Esteparia para el periodo 1981-2016</i>	57
Figura 16 <i>Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en la Serranía Esteparia durante 1981 - 2016</i>	58
Figura 17 <i>Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en la Serranía Esteparia para el periodo 1981-2016</i>	59

Figura 18 <i>Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en la Serranía Esteparia durante 1981-2016</i>	60
Figura 19 <i>Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en la Serranía Esteparia para el periodo 1981-2016</i>	61
Figura 20 <i>Tendencia temporal de la precipitación media anual (mm) en la Serranía Esteparia durante 1981-2016</i>	62
Figura 21 <i>Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en la unidad Puna y Altos Andes para el periodo 1981-2016</i>	63
Figura 22 <i>Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en la unidad Puna y Altos Andes durante 1981-2016</i>	64
Figura 23 <i>Distribución espacial de la temperatura mínima media (°C) en la unidad Puna y Altos Andes para el periodo 1981-2016</i>	65
Figura 24 <i>Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en la unidad Puna y Altos Andes durante 1981-2016</i>	66
Figura 25 <i>Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en la unidad Puna y Altos Andes para el periodo 1981-2016</i>	67
Figura 26 <i>Tendencia temporal de la precipitación media anual (mm) en la unidad Puna y Altos Andes durante 1981-2016</i>	68
Figura 27 <i>Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en la ecorregión Páramo para el periodo 1981-2016</i>	69
Figura 28 <i>Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en la ecorregión Páramo durante 1981-2016</i>	70
Figura 29 <i>Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en la ecorregión Páramo para el periodo 1981-2016</i>	71
Figura 30 <i>Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en la ecorregión Páramo durante 1981-2016</i>	72

Figura 31 <i>Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en la ecorregión Páramo para el periodo 1981 - 2016</i>	73
Figura 32 <i>Tendencia temporal de la precipitación media anual (mm) en la ecorregión Páramo durante 1981-2016</i>	74
Figura 33 <i>Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016</i>	75
Figura 34 <i>Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016</i>	76
Figura 35 <i>Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016</i>	77
Figura 36 <i>Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016</i>	78
Figura 37 <i>Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016</i>	79
Figura 38 <i>Tendencia temporal de la precipitación media anual (mm) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016</i>	80
Figura 39 <i>Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016</i>	81
Figura 40 <i>Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016</i>	82
Figura 41 <i>Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016</i>	83
Figura 42 <i>Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016</i>	84
Figura 43 <i>Precipitación promedio (mm), en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016</i>	85

Figura 44 <i>Tendencia temporal de la precipitación (Mann Kendall) en el piso Suni durante 1981 - 2016.....</i>	86
Figura 45 <i>Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en el piso altitudinal Puna (Pulgar Vidal) para el periodo 1981-2016.....</i>	87
Figura 46 <i>Tendencia temporal (Mann Kendall) de la temperatura máxima media anual (°C) en el piso Puna (Pulgar Vidal), 1981-2016.....</i>	88
Figura 47 <i>Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso altitudinal Puna (Pulgar Vidal).....</i>	89
Figura 48 <i>Tendencia temporal (1981-2016) de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso Puna</i>	90
Figura 49 <i>Precipitación promedio (mm), en el piso altitudinal Puna (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016.....</i>	91
Figura 50 <i>Tendencia temporal de la precipitación (Mann Kendall) en el piso Puna durante 1981 - 2016.....</i>	92
Figura 51 <i>Distribución espacial de la temperatura máxima media (°C) en el piso altitudinal Janca (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 – 2016.....</i>	93
Figura 52 <i>Tendencia temporal de la temperatura máxima (Mann Kendall) en el piso Janca durante 1981 - 2016.....</i>	94
Figura 53 <i>Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso altitudinal Janca (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016.....</i>	95
Figura 54 <i>Tendencia temporal de la temperatura mínima (Mann Kendall) en el piso Janca durante 1981 - 2016.....</i>	96
Figura 55 <i>Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en el piso altitudinal Janca (Pulgar Vidal) para el periodo 1981-2016.....</i>	97
Figura 56 <i>Tendencia temporal (Mann Kendall) de la precipitación media anual (mm) en el piso Janca (Pulgar Vidal), 1981 - 2016.....</i>	98

Figura 57 <i>Línea de tiempo de los inventarios nacionales de glaciares en el Perú (1960-2023)</i>	99
Figura 58 <i>Evolución del área glaciaria y del número de lagunas en el Perú (1960-2023)</i>	100
Figura 59 <i>Distribución de los glaciares en Perú</i>	105
Figura 60 <i>Análisis multitemporal del retroceso glaciario en el Nevado Huascarán 1989-2020</i>	107
Figura 61 <i>Análisis multitemporal del retroceso glaciario en el Nevado Ausangate 1989-2020</i>	108
Figura 62 <i>Análisis multitemporal del retroceso glaciario en el Nevado Coropuna</i>	109
Figura 63 <i>Cambio de la altitud mínima promedio de la superficie glaciaria por cordillera del Perú (1962 vs. 2020)</i>	132
Figura 64 <i>Evidencia altitudinal y desplazamiento de vegetación frente al cambio climático</i>	135
Figura 65 <i>Esquema de migración de especies vegetales por los climas cambiantes</i> ..	141

Resumen

La investigación examina cómo el cambio climático está afectando las características climáticas, la dinámica glaciar y la vegetación de las ecorregiones andinas del Perú, tomando como referencia los esquemas clásicos: Los pisos altitudinales de Pulgar Vidal y Ecorregiones de Antonio Brack. Para ello se planteó un objetivo general y varios específicos orientados a contrastar esos marcos tradicionales con evidencia climática reciente, evaluar tendencias de temperatura y precipitación, analizar el retroceso de glaciares y sintetizar hallazgos sobre la respuesta de la vegetación de los andes. El estudio adoptó un enfoque descriptivo y analítico, integrando métodos cualitativos y cuantitativos. Se procesaron series históricas de datos climáticos (PISCO-SENAMHI, 1981-2016) aplicando la prueba de tendencia de Mann Kendall, se realizaron análisis multitemporales con Sistemas de Información Geográfica sobre glaciares y se revisó sistemáticamente (Metodología PRISMA) la literatura científica sobre cómo la vegetación andina responde al cambio climático.

Los resultados revelaron un patrón consistente de calentamiento en las ecorregiones estudiadas. Se evidenció un incremento estadísticamente significativo de las temperaturas mínimas y máximas en los distintos pisos ecológicos, con mayor intensidad en las zonas de mayor altitud (Puna y Janca), lo cual respaldó la hipótesis de un ascenso térmico sostenido en ambientes de montaña. En contraste, las tendencias de precipitación fueron heterogéneas en el espacio: no se identificaron cambios claros y uniformes en los totales anuales, pero sí señales de eventos extremos más frecuentes e intensos y alteraciones en la estacionalidad de las lluvias. Estos hallazgos coinciden con evidencias regionales previas y sugieren que la respuesta hídrica al calentamiento es compleja, condicionada por la variabilidad geográfica y los cambios en los patrones estacionales. El análisis de los glaciares confirmó un retroceso acelerado del hielo andino, considerado uno de los indicadores más sensibles del cambio climático en alta montaña. Según los inventarios nacionales, el Perú ha perdido más del 56% de su superficie glaciar desde 1960 a 2020. En estudios de caso detallados se documentó, por ejemplo, que el nevado Ausangate (Cordillera Vilcanota) redujo su área glaciar en un 36,6% entre 1989 y 2020 (de 37,4 km² a 23,7 km²). Asimismo, se registraron retrocesos significativos en los glaciares del Huascarán (Cordillera Blanca) y Coropuna (Cordillera Ampato), lo que demuestra que la pérdida de masa de hielo ocurre en distintos contextos climáticos andinos.

Desde el enfoque biológico, la revisión de 24 estudios científicos mostró que las comunidades vegetales altoandinas se encontraban en un proceso de reorganización asociado al cambio climático. Se reportaron desplazamientos altitudinales en diversas especies: especies pioneras y de menor altitud evidenciaron expansión hacia cotas superiores, mientras que especies endémicas adaptadas a condiciones de frío extremo presentaron restricción de hábitat y mayor riesgo de pérdida de nicho. En ecosistemas de bosques montanos se identificaron indicios de ascenso de la línea arbórea y modificaciones fenológicas, como adelantos en periodos de floración vinculados a temperaturas más altas. En agroecosistemas de los andes, cultivos tradicionales como la papa, ulluco y la quinua enfrentan riesgos emergentes por incremento térmico y variabilidad hídrica.

Palabras clave: Cambio climático, Andes peruanos, ecorregiones andinas, vegetación altoandina, glaciares tropicales, temperatura y precipitación.

Abstract

This research examines how climate change is affecting climatic characteristics, glacier dynamics, and vegetation across the Andean ecoregions of Peru, using as a reference the classical frameworks of Pulgar Vidal's altitudinal zones and Antonio Brack's ecoregions. To this end, a general objective and several specific objectives were formulated to contrast these traditional classifications with recent climatic evidence, assess trends in temperature and precipitation, analyze glacier retreat, and synthesize scientific findings on the response of Andean vegetation to climate change. The study adopted a descriptive and analytical approach, integrating qualitative and quantitative methods. Historical climate data series (PISCO–SENAMHI, 1981–2016) were processed using the Mann–Kendall trend test, multitemporal glacier analyses were conducted using Geographic Information Systems, and a systematic literature review was carried out following the PRISMA methodology to evaluate how Andean vegetation responds to climate change.

The results revealed a consistent warming pattern across the studied ecoregions. A statistically significant increase in both minimum and maximum temperatures was detected across the different ecological zones, with greater intensity at higher elevations (Puna and Janca), supporting the hypothesis of sustained thermal rise in mountain environments. In contrast, precipitation trends were spatially heterogeneous: no clear or uniform changes were identified in annual totals, but signals of more frequent and intense extreme events and alterations in rainfall seasonality were observed. These findings are consistent with previous regional evidence and suggest that hydrological responses to warming are complex, shaped by geographic variability and seasonal shifts. Glacier analysis confirmed an accelerated retreat of Andean ice, one of the most sensitive indicators of climate change in high-mountain regions. According to national inventories, Peru has lost more than 56% of its glacier surface area between 1960 and 2020. Detailed case studies documented, for example, a 36.6% reduction in glacier area at Nevado Ausangate (Vilcanota Range) between 1989 and 2020 (from 37.4 km² to 23.7 km²). Significant glacier retreat was also recorded in the Huascarán (Cordillera Blanca) and Coropuna (Cordillera Ampato) massifs, demonstrating that ice mass loss occurs across diverse Andean climatic contexts.

From a biological perspective, the review of 24 scientific studies indicated that high-Andean plant communities are undergoing a process of reorganization associated with climate change. Altitudinal shifts were reported for multiple species: pioneer and lower-elevation species showed expansion toward higher elevations, while endemic species adapted to extreme cold conditions exhibited habitat contraction and increased risk of niche loss. In montane forest ecosystems, evidence of upward shifts in the treeline and phenological changes, such as earlier flowering periods linked to rising temperatures, was identified. In Andean agroecosystems, traditional crops such as potato, ulluco, and quinoa face emerging risks associated with increasing temperatures and heightened hydrological variability.

Keywords: Climate change, Peruvian Andes, Andes ecoregions, high Andean vegetation, tropical glaciers, temperature and precipitation.

I. Introducción

En las últimas décadas, el cambio climático ha pasado de ser una preocupación ambiental futura a convertirse en una realidad concreta y multidimensional que transforma las bases ecológicas, sociales y económicas del planeta. El Informe de Síntesis del Sexto Ciclo de Evaluación del IPCC (2023) confirmó que el sistema climático se ha calentado aproximadamente 1,1 °C respecto a los niveles preindustriales, debido al incremento de gases de efecto invernadero (GEI) derivados de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso del suelo y la deforestación a gran escala (IPCC, 2023). Esta alteración genera consecuencias en cadena: desde el aumento de temperaturas extremas y precipitaciones intensas, hasta la acidificación de los océanos, el derretimiento de glaciares y la pérdida acelerada de biodiversidad (Masson-Delmotte et al., 2021).

Estos cambios tienen implicaciones especialmente severas en regiones de alta biodiversidad y geografía compleja, como el Perú, donde los ecosistemas son altamente sensibles a las variaciones climáticas. El Perú, reconocido por su extraordinaria diversidad geográfica y biológica, abarca una variedad de ecosistemas que van desde las aguas profundas del mar de Grau y las frías cumbres de los Andes hasta las extensas selvas amazónicas. Esta diversidad ecológica está organizada en ecorregiones, áreas con características climáticas y biológicas únicas que son fundamentales para la conservación de la biodiversidad y el manejo sostenible de los recursos naturales (Brack Egg & Mendiola, 2000). Sin embargo, estudios recientes han demostrado que el cambio climático está alterando significativamente las condiciones ambientales en los Andes tropicales, afectando la temperatura media (Rangwala & Miller, 2012), promoviendo el desplazamiento altitudinal de especies (Feeley et al., 2011) y acelerando el retroceso de los glaciares (Laqui et al., 2023). Además, estas transformaciones incluyen cambios en los patrones de precipitación y alteraciones en los ciclos de temperatura, lo que afecta la estructura y composición de las comunidades ecológicas en estas montañas tropicales, con profundas consecuencias para la biodiversidad y la estabilidad de estos ecosistemas (Young, 2015).

1.1. Estado del arte

1.1.1. Cambio climático: Fundamentos e implicancias

Durante las últimas décadas, el cambio climático ha dejado de ser un riesgo potencial para consolidarse como una realidad evidente y multidimensional, cuya influencia abarca los sistemas físicos, biológicos y sociales del planeta. En términos científicos, el cambio climático se refiere a variaciones persistentes del clima en escalas de décadas o más, expresadas no solo en cambios del promedio de variables como la temperatura o la precipitación, sino también en modificaciones de su variabilidad y en la frecuencia e intensidad de eventos extremos. El calentamiento global, en cambio, describe un componente específico de este proceso: el incremento sostenido de la temperatura media de la superficie terrestre. En otras palabras, el calentamiento global constituye un indicador central del cambio climático, pero este último comprende un conjunto más amplio de transformaciones del sistema climático que incluyen alteraciones del ciclo hidrológico, de la criósfera y de la dinámica atmosférica y oceánica (Masson-Delmotte et al., 2021).

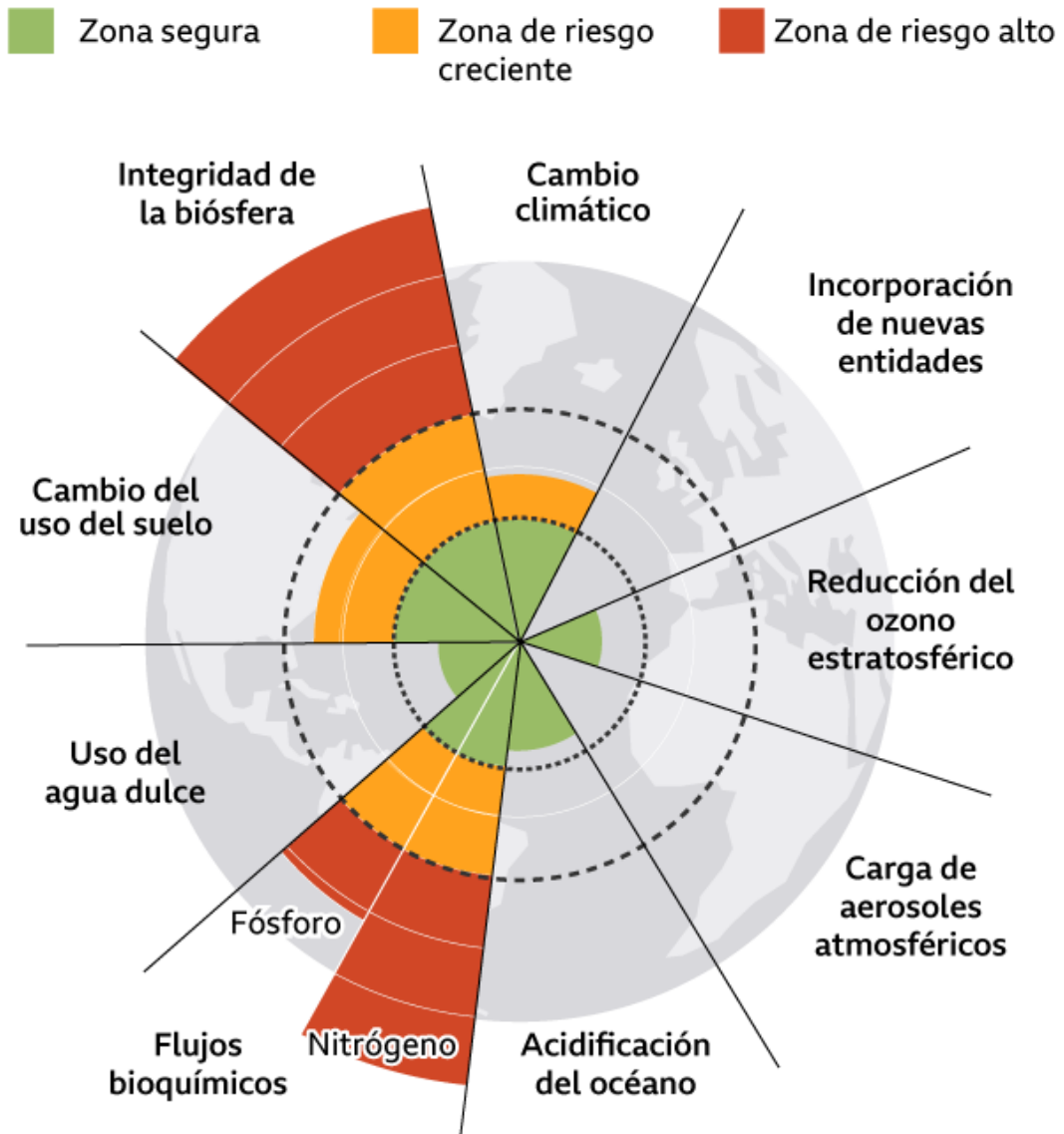
La comunidad científica coincide en que el aumento observado de la temperatura media global, cercano a 1,1 °C respecto a la era preindustrial (1850–1900), tiene un origen principalmente antropogénico y se relaciona con el incremento sostenido de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono, metano y óxido nitroso (IPCC, 2021). Para comprender este proceso, es fundamental distinguir entre el efecto invernadero natural y su intensificación por acción humana. El efecto invernadero natural es un mecanismo físico indispensable para la vida: ciertos gases presentes de manera natural en la atmósfera absorben y reemiten radiación infrarroja, evitando que toda la energía térmica emitida por la superficie escape al espacio y manteniendo el planeta en un rango térmico habitable. Sin embargo, las actividades humanas han incrementado la abundancia de gases de efecto invernadero de larga vida en la atmósfera, intensificando la retención de energía y generando un desequilibrio en el balance radiativo del sistema climático. Esta intensificación se expresa como un forzamiento radiativo positivo adicional, que explica la tendencia sostenida al calentamiento contemporáneo y su persistencia en el tiempo (Forster et al., 2021; IPCC, 2021).

Aunque el clima terrestre también puede variar por causas naturales, la síntesis científica actual muestra que la magnitud y el patrón del calentamiento observado desde mediados del siglo XX no se explican por forzamientos naturales por sí solos, sino por el predominio del componente antropogénico asociado a emisiones (IPCC, 2021). En este marco, el cambio climático no se limita a una tendencia térmica, sino que involucra procesos interconectados que amplifican y redistribuyen sus efectos. Entre ellos destacan la acelerada pérdida de masa de glaciares, que reduce la capacidad reflectante del planeta y favorece una mayor absorción de energía solar; el incremento del vapor de agua atmosférico, que potencia la retención de calor; y las transformaciones en la cobertura vegetal, que modifican tanto el ciclo del carbono como el balance energético de la superficie terrestre. En conjunto, estos mecanismos ayudan a explicar por qué cambios relativamente pequeños en la concentración de dióxido de carbono pueden desencadenar un calentamiento global de gran magnitud y persistencia (Forster et al., 2021; IPCC, 2021).

Asimismo, estas bases físico-climáticas permiten situar el cambio climático dentro de un marco sistémico más amplio, en el que las perturbaciones inducidas por actividades humanas no se expresan de manera aislada, sino como presiones simultáneas sobre la estabilidad del sistema Tierra. En ese contexto, el marco de los límites planetarios, desarrollado inicialmente por Rockström et al. (2009) y actualizado por Steffen et al. (2015), ofrece una perspectiva integradora para comprender la gravedad de la crisis socioambiental contemporánea, al definir umbrales biofísicos cuya transgresión compromete la estabilidad del planeta.. La literatura reciente advierte que cuatro de los nueve límites identificados ya han sido sobrepasados, entre ellos el climático y el de integridad de la biosfera (Richardson et al., 2023). Cruzar estos umbrales no implica un colapso inmediato, pero sí eleva sustancialmente el riesgo de dinámicas no lineales y cambios abruptos, como la desestabilización de capas de hielo, la alteración de la circulación oceánica o la transformación de bosques tropicales en sabanas degradadas. La **Figura 1** sintetiza gráficamente el estado actual de los nueve límites planetarios que sostienen la estabilidad del sistema Tierra. El espacio operativo seguro aparece en verde, mientras que las zonas amarillas son de riesgo creciente y naranjas reflejan riesgos altos.

Figura 1

Los 9 límites planetarios: umbrales biofísicos y niveles de riesgo



Nota. Centro de resiliencia de Estocolmo.

Las implicancias son cada vez más pronunciadas en los ecosistemas a escala global. Uno de los efectos más evidentes es la intensificación del ciclo hidrológico, manifestada por un aumento tanto en la frecuencia como en la magnitud de lluvias extremas, sequías prolongadas e inundaciones repentinas. Estas alteraciones impactan no solo la disponibilidad de agua, sino también la seguridad alimentaria de poblaciones vulnerables. Al mismo tiempo, las especies están reorganizando sus distribuciones geográficas, desplazándose hacia latitudes y altitudes superiores en respuesta a cambios térmicos

regionales y estacionales, lo que provoca desajustes en fenómenos ecológicos como la fenología, la polinización y las interacciones entre especies (IPCC, 2022; Araújo., 2017). Por otra parte, Doney et al. (2009) indican que la acidificación oceánica constituye un problema paralelo al calentamiento global, afectando de manera significativa los ecosistemas marinos y las cadenas tróficas. En los ecosistemas terrestres, el calentamiento combinado con sequías recurrentes y olas de calor favorece incendios de gran intensidad, mortalidad vegetal elevada y degradación del suelo, especialmente en zonas ya fragmentadas o degradadas (Moghadam et al., 2024). Estas transformaciones implican no solo pérdida de biodiversidad, sino también reducción de servicios ecosistémicos esenciales como la regulación del agua, la protección del suelo, y la provisión de alimentos.

1.1.2. Los Andes tropicales del Perú

La cordillera de los Andes estructura el territorio peruano de sur a norte y concentra los gradientes altitudinales más pronunciados de Sudamérica, lo que genera una marcada heterogeneidad climática, ecológica y fisiográfica. En el contexto global, los Andes tropicales constituyen uno de los sistemas de montaña más diversos del planeta y un área crítica de conservación por su alta riqueza y endemismo, especialmente en plantas, anfibios y aves (Rahbek et al., 2019). Esta complejidad orográfica crea fuertes transiciones de temperatura, humedad y radiación en distancias cortas, con arreglos bioclimáticos que favorecen la coexistencia de climas húmedos en las vertientes orientales, condiciones semiáridas en la vertiente amazónica intermedia y climas áridos en el flanco del Pacífico (Vuille et al., 2018; Larsen, et al., 2011).

La importancia funcional de este macizo se expresa en su papel como “torre de agua” regional: capta, almacena, regula y distribuye agua hacia los valles interandinos, la franja costera y la cuenca amazónica, sosteniendo ciudades, agricultura de altura, riego costero e hidroenergía (Immerzeel et al., 2020; Ochoa-Tocachi et al., 2019). A escala nacional, la estructura andina configura una marcada asimetría hidroclimática determinada por la existencia de tres grandes vertientes hidrográficas: la del Pacífico, la del Amazonas y la del Titicaca. La vertiente del Pacífico, situada en el flanco occidental de los Andes, es mayormente árida y alberga cuencas cortas que desembocan en el océano. Aunque representa solo el 21 % del territorio nacional y recibe apenas el 1,7 % del agua renovable

del país, concentra alrededor de dos tercios de la población peruana y más del 80 % del producto bruto interno (PBI), debido a la concentración urbana e industrial en la costa. En contraste, la vertiente del Amazonas abarca cerca del 74 % del territorio nacional y concentra el 97,7 % del agua renovable, mientras que la vertiente del Titicaca, localizada en el extremo sur andino, cubre el 5 % restante del territorio y recibe el 0,6 % del agua disponible (OECD, 2021). Esta desigualdad estructural amplificada por el retroceso glaciar, la degradación de ecosistemas reguladores y la variabilidad climática interanual convierte a los ecosistemas altoandinos como los glaciares, nieves estacionales, bofedales y pajonales en unidades estratégicas para la seguridad hídrica (Hugonnet et al., 2021; Vuille et al., 2018).

Evidencia hidrológica reciente muestra que los bofedales y los suelos orgánicos de montaña poseen una alta capacidad de retención y liberación sostenida de agua, lo cual permite amortiguar picos de escorrentía durante lluvias intensas y mantener caudales base durante el estiaje (Cervantes et al., 2022; Ochoa-Tocachi et al., 2019). A esto se suma el hecho de que la vertiente oriental húmeda y de mayor extensión alberga ecosistemas críticos como los bosques montanos nublados y la ceja de selva, que no solo capturan humedad sino que también amortiguan eventos climáticos extremos, mientras que la vertiente amazónica intermedia, aunque más reducida, juega un rol de transición climática y ecológica (Vuille et al., 2018).

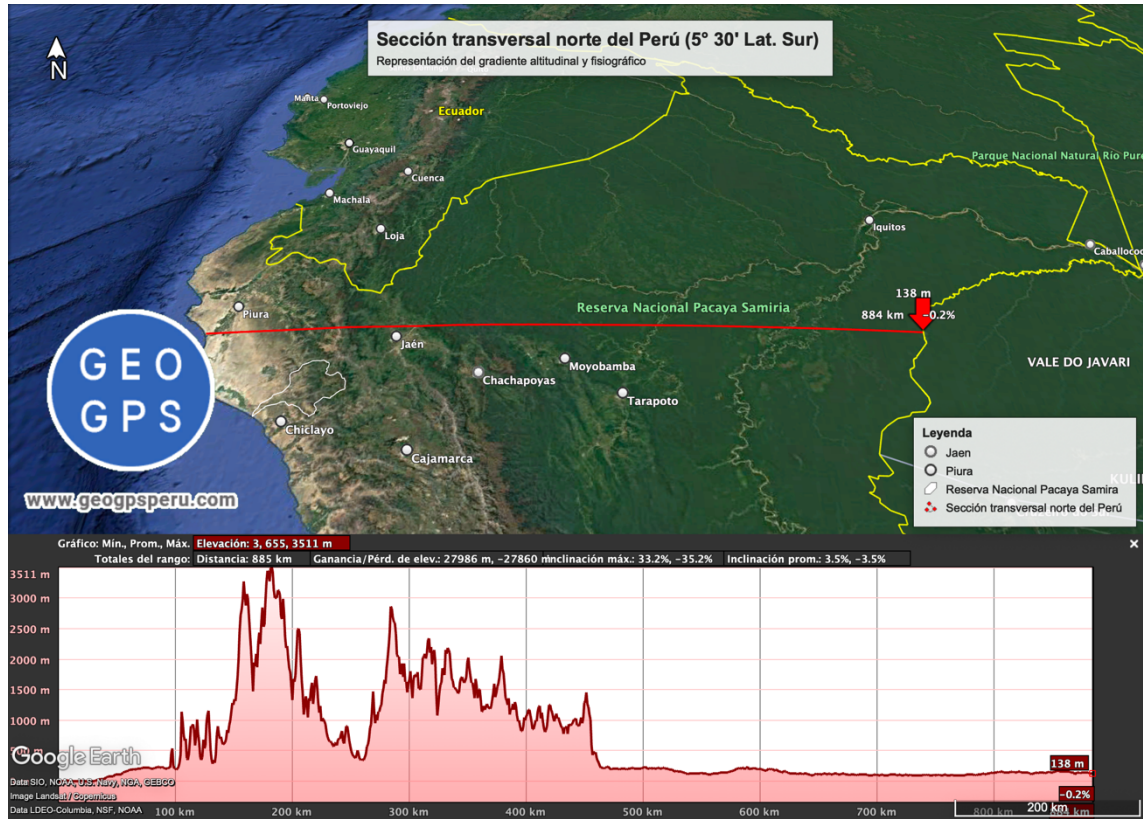
Con el fin de caracterizar cómo varía la estructura ecológica y fisiográfica del Perú a lo largo de su gradiente latitudinal, y en concordancia con el enfoque de estudios comparativos de montaña (Larsen, et al., 2011), se definieron tres transectos topográficos representativos: uno en el norte, otro en la zona centro y otro en el sur del país. Estos transectos fueron trazados ortogonalmente a la cordillera, desde la costa del Pacífico hasta la llanura amazónica, buscando capturar las transiciones altitudinales y fisiográficas más marcadas de cada región. Los criterios utilizados para su selección fueron: (1) representatividad altitudinal y ecológica del tramo andino considerado, (2) presencia de unidades ecofisiográficas contrastantes (cordillera occidental, mesetas intermedias, cordillera oriental), y (3) disponibilidad de datos topográficos de alta resolución.

Las siguientes figuras 2, 3 y 4 presentan los perfiles topográficos correspondientes a tres transectos altitudinales representativos del territorio peruano: norte ($5^{\circ} 30' S$), centro (10°

18' S) y sur (16° 0' S). Cada transecto ha sido trazado ortogonalmente a la cordillera de los Andes desde la franja costera del Pacífico hasta la región amazónica o altiplánica correspondiente, permitiendo visualizar los contrastes morfológicos, altitudinales y fisiográficos que definen cada zona. Esta estrategia de corte transversal responde a enfoques comparativos utilizados en estudios sobre gradientes altitudinales y biodiversidad (Forero-Medina et al., 2011), y permite evidenciar cómo varían la amplitud topográfica, la pendiente promedio y la complejidad estructural a lo largo del país. En conjunto, las figuras permiten interpretar cómo las condiciones físicas influyen en la distribución climática, la organización de ecosistemas y los arreglos ecohidrológicos a nivel regional.

Figura 2

Sección transversal norte del Perú (5° 30' lat. S)

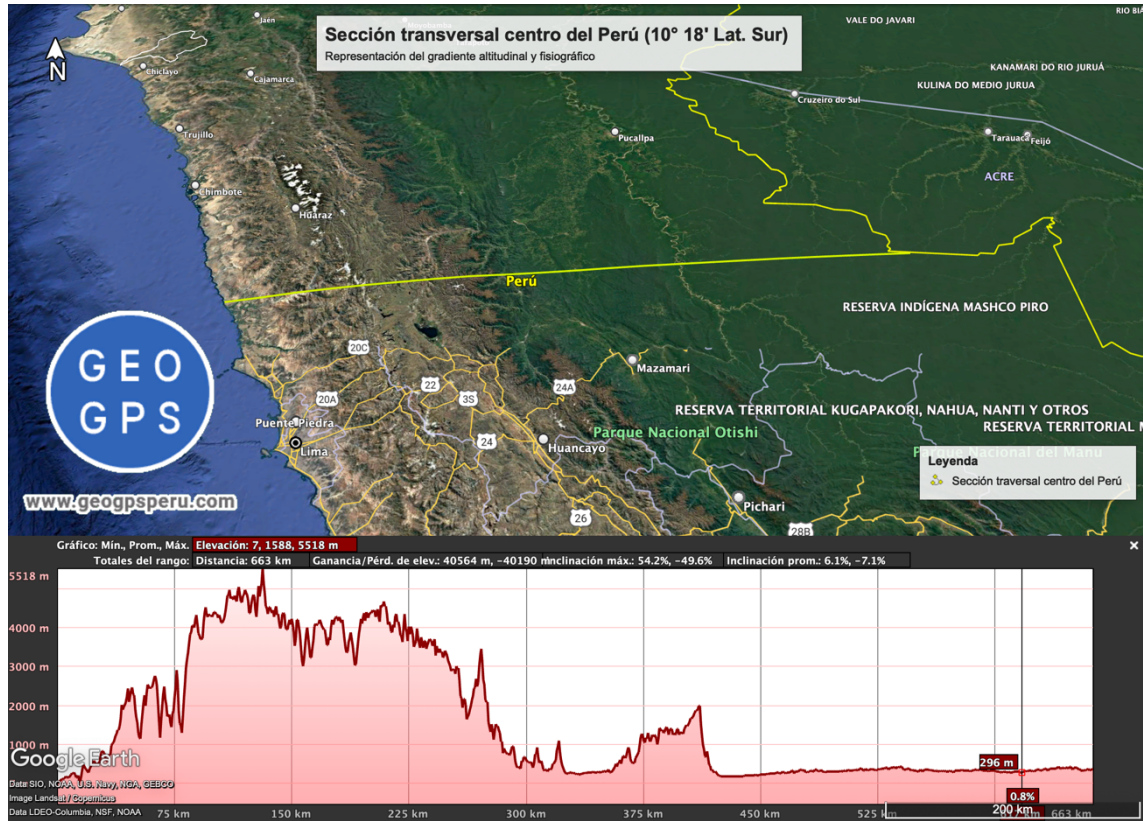


Nota. Elaboración propia basada en Google Earth (2024).

La **figura 2** es un perfil altitudinal correspondiente a un transecto ubicado en el norte del Perú, que se extiende desde las zonas bajas del litoral hasta la llanura amazónica. Se observan cordilleras de altura intermedia (~3500 msnm), una disposición irregular de elevaciones y una rápida transición hacia las tierras bajas, indicando una menor amplitud andina en comparación con otras regiones. Este perfil muestra una fisiografía abrupta y angosta, con potencial influencia sobre el patrón de lluvias y la conectividad ecológica entre regiones costeras y amazónicas.

Figura 3

Sección transversal centro del Perú (10° 18' lat. S)

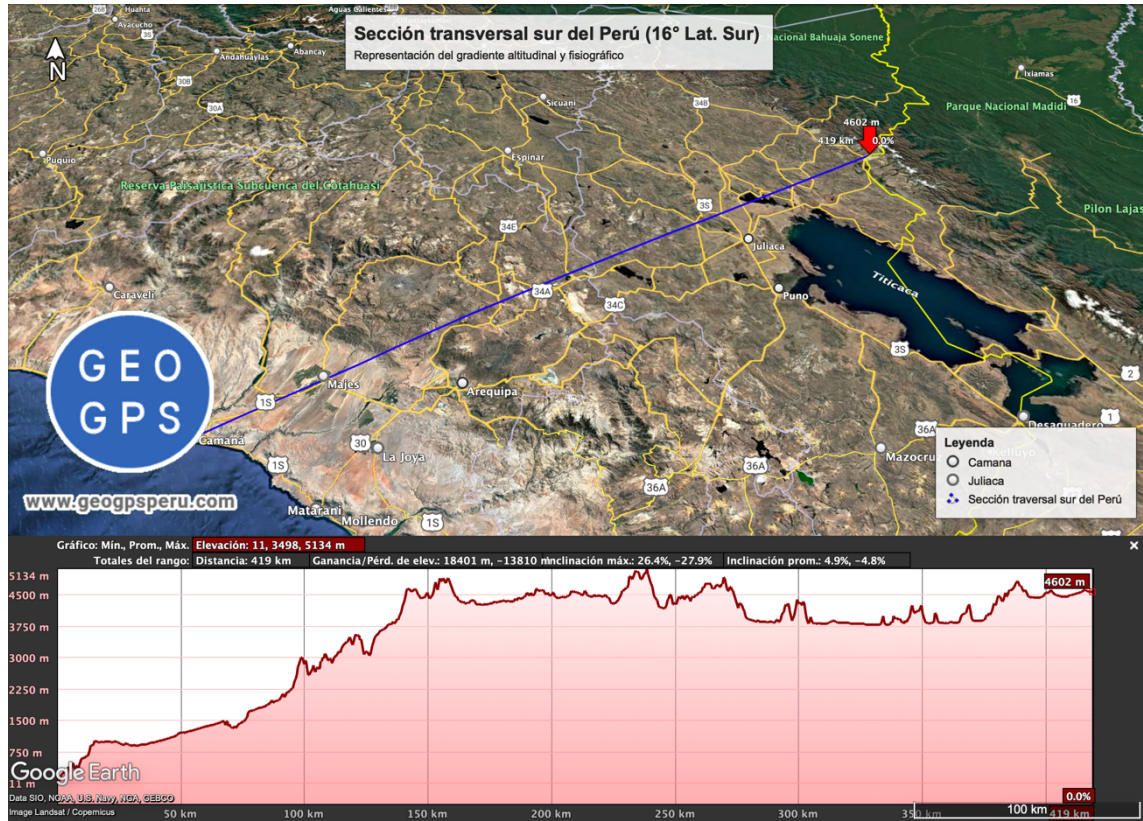


Nota. Elaboración propia basada en Google Earth (2024).

La **figura 3** es un perfil altitudinal correspondiente al transecto central, que muestra un relieve más elevado y complejo, con cumbres que superan los 5500 msnm y mesetas intermedias amplias. Este sector presenta una dorsal andina más ancha, una mayor persistencia de altitud elevada, y un descenso prolongado hacia la vertiente oriental, lo que sugiere un control topográfico más marcado sobre los gradientes climáticos y la retención hídrica. Es el transecto con mayor heterogeneidad altitudinal entre los tres analizados.

Figura 4

Sección transversal sur del Perú (16° 0' lat. S)



Nota. Elaboración propia basada en Google Earth (2024).

La **figura 4** es un perfil altitudinal del sur del Perú, caracterizado por un ascenso continuo desde la costa hasta una extensa meseta del Altiplano (con altitudes >4000 msnm), seguida por un ligero declive hacia la cuenca del Titicaca. A diferencia de los perfiles anteriores, el sur muestra una fisiografía más estable y homogénea, típica de las regiones de altiplano. Este patrón influye fuertemente en los procesos de acumulación hídrica, el almacenamiento de agua en bofedales, y las dinámicas de conectividad ecológica horizontal.

La cordillera de los Andes en el Perú no solo configura una de las estructuras montañosas más complejas y biodiversas del planeta (Rahbek et al., 2019), sino que también define los gradientes ecológicos, climáticos e hídricos que sustentan la organización territorial y la funcionalidad de los ecosistemas andinos y amazónicos (Vuille et al., 2018). La caracterización transectal presentada permite visibilizar las profundas diferencias altitudinales y fisiográficas entre el norte, centro y sur del país, revelando patrones que

influyen decisivamente en la distribución de la vegetación, la disponibilidad hídrica y la conectividad ecológica (Ochoa-Tocachi et al., 2019). Estas evidencias resaltan la importancia de integrar el enfoque espacial y altitudinal en el análisis bioclimático del territorio andino, como base para evaluar los impactos del cambio climático y fortalecer estrategias de conservación y gestión sostenible en los Andes tropicales.

1.1.3. Variables climáticas: Temperatura y precipitación

El Perú presenta una heterogeneidad climática marcada por la interacción entre la orografía andina, las circulaciones océano - atmósfera del Pacífico y Atlántico, lo que se traduce en fuertes gradientes térmicos y pluviométricos entre costa, Andes y Amazonía, así como a lo largo del gradiente altitudinal. Para caracterizar el clima reciente con resolución espacial fina, la comunidad científica nacional emplea redes de estaciones del SENAMHI y productos grillados de alta resolución de la familia PISCO: PISCOp para precipitación diaria, PISCOp_h para precipitación horaria y PISCOt v1.2 para temperatura diaria (Huerta et al., 2023; SENAMHI, 2022). Estos productos integran observaciones in situ con información satelital y reanálisis, facilitando el análisis de tendencias, estacionalidad y extremos, así como la validación y el contraste de simulaciones climáticas regionales.

En términos térmicos, la evidencia observacional converge en un calentamiento sostenido desde mediados del siglo XX, con señal particularmente clara en dominios altoandinos, donde los gradientes altitudinales amplifican la sensibilidad del sistema a cambios de temperatura (SENAMHI, 2022). En la sierra sur, por ejemplo, se han reportado incrementos estadísticamente significativos en temperaturas máximas diarias del orden de +0,13 a +0,34 °C por década, mientras que las mínimas muestran aumentos de menor magnitud y con modulación estacional (Imfeld et al., 2021). A escala de cuenca, en Cordillera Blanca (río Santa) y Vilcanota (río Urubamba) se han estimado incrementos cercanos a 0,016 - 0,018 °C por año para 1980 - 2018, evidenciando una señal regional coherente de calentamiento en áreas de alta montaña (Potter et al., 2023).

Respecto a la precipitación, su respuesta es espacialmente heterogénea y está modulada por forzantes acoplados océano - atmósfera y por la dinámica continental de verano. En este sentido, además de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO), resulta esencial incorporar el Sistema de Monzón Sudamericano (SAMS), dado que este estructura la estacionalidad

lluviosa en la Amazonía y modula de manera decisiva las precipitaciones de la vertiente oriental de los Andes, mediante el fortalecimiento de la convección estival y del transporte de humedad desde el Atlántico tropical hacia el interior del continente (Marengo et al., 2016). En el marco del SAMS, la organización de la circulación de bajo nivel y la convergencia de humedad favorecen la ocurrencia de lluvias persistentes en la cuenca amazónica y en las laderas orientales andinas, condicionando el balance hídrico regional y los gradientes eco hidrológicos que son críticos para el análisis de la presente tesis.

A escala nacional, se han descrito aumentos relativos de precipitación en la costa norte y descensos en porciones de la Amazonía norte durante la segunda mitad del siglo XX, mientras que en los Andes el signo y la magnitud dependen de la estación y del sector (SENAMHI, 2022). En los Andes centrales se documenta un retraso del inicio de la temporada húmeda y una reducción de su duración del orden de tres días por década, con mayor concentración de la lluvia hacia el verano austral (Giráldez-Solano et al., 2020). En la sierra meridional, varias localidades muestran incrementos en lluvias estivales y descensos en primavera (Imfeld et al., 2021). A escala de cuenca, el río Santa presenta incrementos promedio de precipitación, mientras que en Vilcanota y Urubamba se han observado patrones contrastantes (aumentos hacia el norte y disminuciones hacia el sur), particularmente al inicio de la temporada húmeda (Potter et al., 2023).

Los extremos de precipitación y sequía evidencian cambios compatibles con un clima más variable. Con base en estaciones y productos interpolados, los índices del Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) permiten evaluar cambios en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, con implicancias directas para inundaciones, huaicos y periodos secos prolongados (SENAMHI, 2022).

Dado que el análisis se apoya en productos grillados, es metodológicamente clave explicitar sus limitaciones, particularmente en la región andina. Para PISCOp, SENAMHI advierte que las incertidumbres aumentan en zonas con baja densidad de estaciones (condición frecuente en alta montaña y áreas remotas), y que el producto puede no representar adecuadamente eventos convectivos de escala local o variabilidad espacial muy fina; asimismo, se reporta una tendencia a sobreestimar el número de días lluviosos y a presentar mayor incertidumbre lejos de los puntos de observación (Aybar et al., 2020).

En consecuencia, los resultados de tendencia y extremos basados en PISCO deben interpretarse con criterio de validación cruzada, contrastando (cuando sea posible) con estaciones cercanas, coherencia altitudinal y consistencia por cuenca, de modo que las inferencias climáticas se sostengan con trazabilidad y robustez.

1.1.4. Glaciares andinos del Perú: centinelas del cambio climático

El Perú alberga aproximadamente el 68% de los glaciares tropicales del planeta, lo que lo convierte en un referente global para el estudio de la sensibilidad de estos ecosistemas glaciares frente al calentamiento global (Taylor et al., 2022). Situados en condiciones únicas de alta irradiación solar y ausencia de estación invernal prolongada, los glaciares andinos actúan como indicadores vivos del cambio climático, reflejando alteraciones abruptas en la dinámica térmica y pluviométrica regional (Kaser et al., 2010; Gorin et al., 2024).

Los recientes informes del Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar (INAIGEM, 2023) reportan que entre 1960 y 2023 el país ha perdido más del 56% de su superficie glaciaria, equivalente a una reducción de aproximadamente 1,348 km² en las últimas seis décadas. Además, a escala nacional, imágenes satelitales de alta resolución muestran pérdidas generalizadas de área y masa glaciaria desde comienzos de siglo, con declives particularmente marcados en cordilleras como la Blanca, Vilcanota, Huayhuash, La Viuda y Raura (Seehaus et al., 2019; Vuille et al., 2018). Para la Cordillera Blanca el conjunto glaciario tropical más extenso se ha documentado una reducción sustancial del área desde la primera mitad del siglo XX y pérdidas de espesor coherentes con balances de masa negativos persistentes (Seehaus et al., 2019; Rabatel et al., 2013). En la sierra sur, la Cordillera Vilcanota presenta también descensos marcados de área en las últimas décadas, en consonancia con el calentamiento regional (Seehaus et al., 2019; Vuille et al., 2018). En Junín, el macizo de Huaytapallana ha perdido más de la mitad de su cobertura desde mediados de los años 1990, reflejando la elevada sensibilidad de los glaciares subtropicales a pequeñas variaciones térmicas (Barzola et al., 2024). A nivel de cordilleras menores y hoy altamente degradadas como La Chonta los inventarios y reportes técnicos describen pérdidas cercanas a la desaparición de los núcleos de hielo remanentes (INAIGEM, 2018, 2023). En el extremo sur oriental (Carabaya, Puno), un análisis multitemporal para los nevados Allin Capac y Chichi Capac evidencia una

contracción glaciaria sostenida a partir de los años setenta, con implicancias geomorfológicas e hidrológicas a escala de cuenca (Guillén & Juli, 2017).

Más allá de su valor como archivo climático, los glaciares son reguladores críticos del ciclo hidrológico andino: almacenan agua en la estación húmeda y aportan caudales de fusión durante la estación seca, sosteniendo la base de flujo en cuencas altoandinas y valles costeros dependientes (Baraer et al., 2012; Kaser et al., 2003). En la cuenca del río Santa (Cordillera Blanca), el análisis de series de caudal junto con métodos estadísticos ha evidenciado que el retroceso glaciario ha producido un aumento temporal del caudal en varios tributarios, fenómeno conocido como “pico hídrico”. No obstante, conforme la masa glaciaria continúa disminuyendo, se proyecta que el caudal medio durante los periodos de estiaje podría reducirse hasta en un 30% en zonas aguas abajo, afectando la disponibilidad hídrica a largo plazo. (Baraer et al., 2012). Este comportamiento no es exclusivo de la cordillera Blanca: estudios de síntesis para los Andes tropicales prevén una fase transitoria de mayores aportes por fusión, seguida de declinación progresiva del caudal seco a medida que los reservorios se agotan (Vuille et al., 2018). La contracción del hielo afecta además a bofedales y humedales altoandinos, al modificar los pulsos hídricos y la conectividad hidrológica, con impactos en servicios ecosistémicos como provisión de agua, forraje y regulación climática local (Polk et al., 2017).

Por otra parte, el acelerado retroceso de los glaciares andinos en el Perú ha desencadenado complejas transformaciones ambientales que van más allá de la simple pérdida de masa glaciaria. La exposición de superficies inestables ha facilitado la formación y expansión de lagunas proglaciares retenidas por morrenas, fenómeno que incrementa notablemente el riesgo de desbordes súbitos o glacial lake outburst floods (GLOFs); eventos que pueden generar inundaciones devastadoras en zonas pobladas aguas abajo (Emmer et al., 2022). Desde la Pequeña Edad del Hielo, se han registrado más de 160 GLOFs en los Andes tropicales, con una concentración significativa en el Perú, donde la laguna Palcacocha en la Cordillera Blanca representa un caso paradigmático de riesgo persistente para la ciudad de Huaraz, a pesar de las medidas de mitigación implementadas, debido a la combinación de avalanchas, oleajes y erosión de diques naturales (Somos-Valenzuela et al., 2016; Huggel et al., 2020). Asimismo, la deglaciación ha expuesto litologías sulfuradas que, al oxidarse en contacto con la atmósfera y el agua, generan drenajes ácidos con elevadas concentraciones de sulfatos y metales pesados (Fe, Al, Mn, Zn), afectando la calidad del

agua en microcuencas emblemáticas como Shallap, Quillcayhuanca y Pachacoto. Estos procesos geogénicos, potenciados por la meteorización acelerada de morrenas y la mayor ventilación provocada por el retroceso glaciar, plantean amenazantes desafíos para la potabilización, el riego y la salud ecosistémica, evidenciados mediante detallados estudios hidroquímicos y trazadores isotópicos en la Cordillera Blanca (Santofimia et al., 2017; Magnússon et al., 2020; Guittard et al., 2020; Bravo et al., 2024). En conjunto, estas manifestaciones ponen de relieve la multidimensionalidad del impacto climático, que no sólo transforma los glaciares físicamente, sino que también reconfigura el equilibrio hidrológico y químico en las cuencas altoandinas, profundizando la vulnerabilidad ambiental y social en las regiones afectadas.

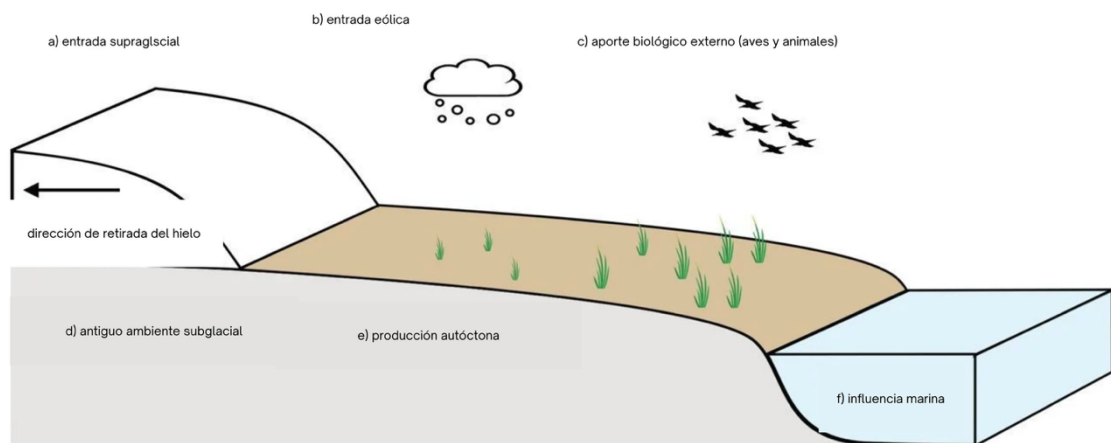
1.1.5. Respuestas de la vegetación altoandina al cambio climático

A medida que los glaciares andinos retroceden, los territorios antes cubiertos por hielo emergen como nuevos espacios para la colonización de plantas. Estos ecosistemas emergentes, estudiados a través de un enfoque de cronosecuencia, revelan que antes del establecimiento de plantas superiores, los microbios fijadores de nutrientes facilitan la acumulación inicial de reservas de nutrientes para el posterior crecimiento vegetal (Bradley et al., 2014; Anthelme *et al.*, 2014). No obstante, bajo un escenario de calentamiento acelerado, la migración altitudinal de especies no se traduce automáticamente en una expansión exitosa hacia cotas superiores. Esto ocurre porque el desplazamiento está limitado por el desfase entre la velocidad del cambio climático y el ritmo de estabilización del hábitat recién expuesto, donde predominan la aridez superficial, la baja retención hídrica y la inestabilidad del sustrato, factores que incrementan la mortalidad de plántulas y restringen el establecimiento efectivo, especialmente en especies menos competitivas o con menor tolerancia al estrés (Herzog *et al.* 2011; Gottfried *et al.* 2012; Cuesta *et al.* 2012). Además, los vegetales se exponen a plagas e insectos, los cuales se adaptan más rápidamente que las plantas debido a su corto tiempo generacional y su alta tasa de reproducción, lo que puede aumentar la presión de plagas sobre los cultivos y las plantas silvestres (IPPC, 2021). Por otro lado, una investigación sobre interacciones positivas y negativas entre especies en los Andes chilenos demostró que, incluso bajo condiciones de calentamiento, que elevaban la temperatura en 4 °C, las plantas de cebada silvestre (*Hordeum comosum*) que crecían en asociación con la planta cojín (*Azorella madreporica*) mostraron mejores tasas de

supervivencia y desarrollo que aquellas que no contaban con esta interacción facilitadora. La cebada silvestre, una gramínea nativa que se adapta bien a las condiciones frías y secas de los Andes, se benefició significativamente de la protección y el microclima más estable proporcionado por la *Azorella madreporica*. Esta planta cojín, conocida por su capacidad de retener humedad y proporcionar sombra, creó un ambiente más favorable para el crecimiento de la cebada silvestre, mitigando los efectos adversos del aumento de temperatura y la aridez. Este tipo de interacciones facilita la colonización y expansión de plantas en nuevas áreas, ilustrando la importancia de las relaciones ecológicas en la adaptación al cambio climático (Cavieres & Sierra-Almeida, 2012). Estas evidencias bibliográficas nos demuestran que el cambio climático ha traído consigo la migración de muchas especies vegetales a altitudes más elevadas, desafiando las condiciones hostiles y la existencia de plagas, las plantas logran adaptarse a los nuevos nichos ecológicos.

Figura 5

Modelo conceptual del ciclo de nutrientes y facilitación microbiana en suelos altoandinos recientemente deglaciados



Nota. Adaptado y traducido de Bradley et al. (2014), *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1795), 20140882.

La **figura 5** es un esquema conceptual de las principales vías de ingreso (aportes alóctonos) y transformación interna (producción autóctona) de nutrientes en suelos recientemente expuestos por el retroceso glaciar, donde la actividad microbiana facilita

el acondicionamiento del sustrato y el establecimiento vegetal durante las etapas tempranas de sucesión.

Es así, que un estudio de metaanálisis ha mostrado que las especies están ascendiendo a elevaciones más altas a un ritmo de 11,0 metros por década, y se proyecta que esta tasa podría incluso triplicarse en los próximos años (Chen et al., 2011). La **Guea-guea** (*Gaultheria glomerata*) una especie arbustiva, común en la región Suni y Puna (3500 - 4000 m.s.n.m.), está adaptándose a altitudes más altas debido a las temperaturas más cálidas y la variabilidad climática. Estudios han documentado su presencia en altitudes superiores a las históricas, lo cual sugiere una respuesta adaptativa al cambio climático para evitar la competencia y aprovechar los nuevos nichos ecológicos disponibles (Herzog et al., 2011; Cuesta et al., 2012). La **Yareta** (*Azorella compacta*), tradicionalmente encontrada cerca de las cordilleras nevadas (>4800 m.s.n.m.). Esta planta, que es un indicador ecológico clave debido a su resistencia a condiciones extremas, está utilizando nuevas áreas liberadas por el retroceso glaciar para expandirse. Este movimiento altitudinal refleja una capacidad de adaptación significativa frente a la disminución de la cobertura de hielo y cambios en la disponibilidad de agua y nutrientes (Zimmer et al., 2014). **Buddleja** (*Buddleja coriacea*), conocida como quishuar, esta especie, nativa de la región Puna, está migrando a altitudes mayores, ahora encontrándose en áreas por encima de los 4000 m.s.n.m. Los cambios en las condiciones climáticas permiten su crecimiento en nuevas áreas, lo que podría contribuir a la estabilización de suelos y la creación de hábitats para otras especies (Cavieres & Sierra-Almeida, 2012).

Por otra parte, ciertos cultivos que anteriormente no podían ser cultivados en determinadas altitudes, o que no lograban crecer y desarrollarse adecuadamente debido a condiciones ambientales subóptimas, hoy en día pueden ser cultivados con éxito gracias a las nuevas condiciones climáticas. Por ejemplo, la quinua (*Chenopodium quinoa*), especie emblemática de los andes peruanos, es una de las plantas que, a extremas condiciones climáticas, es capaz de crecer en suelos pobres, demostrando su resistencia y adaptabilidad a las variaciones ambientales en la región andina del país (Benique O, 2021; Gómez y Aguilar, 2016). La maca (*Lepidium meyenii*), planta nativa de los Andes reconocida por sus propiedades medicinales, constituye un ejemplo pertinente de cómo el cambio climático puede modificar la distribución altitudinal de

algunos cultivos sin implicar necesariamente la pérdida inmediata de sus zonas tradicionales de cultivo. En este caso, el aumento de temperaturas y la reducción relativa de ciertas limitaciones térmicas en cotas más altas han favorecido una expansión del rango de cultivo hacia altitudes superiores, más que un reemplazo total de las áreas originarias. Así, si bien la maca se ha cultivado históricamente entre aproximadamente 3500 y 4500 m s. n. m., evidencia reciente reporta su establecimiento en zonas más elevadas bajo condiciones climáticas emergentes que resultan más favorables para su desarrollo (Cordova et al., 2022). Este patrón responde a un proceso de ampliación de la distribución potencial y, en algunos contextos, de desplazamiento parcial, el cual coexiste con la persistencia del cultivo en áreas tradicionales, dependiendo de la disponibilidad hídrica, la ocurrencia de heladas y las prácticas de manejo local. En conjunto, estas adaptaciones productivas son relevantes porque contribuyen a la seguridad alimentaria y a la diversificación económica en territorios altoandinos expuestos a la variabilidad climática (Cordova et al., 2022).

En este contexto, el cambio climático no solo presenta desafíos sino también oportunidades para expandir y diversificar los cultivos, aumentando así la biodiversidad local, potenciando la estabilidad de los ecosistemas, asimismo el desarrollo de nuevos modelos económicos basados en la bioeconomía, que aprovechen de manera sostenible la rica biodiversidad de los Andes para beneficio de las comunidades locales (Báez et al., 2016; Ponce C, 2020).

1.1.6. Sistemas bioclimáticos del Perú: Aportes y propuestas de regiones naturales a través de la historia

Los sistemas bioclimáticos se entienden como unidades espaciales en las que la combinación de variables climáticas (principalmente temperatura y precipitación), moduladas por la altitud y la fisiografía andina, condiciona patrones relativamente coherentes de vegetación y funcionamiento ecosistémico. Esta noción permite vincular, de manera operativa, el gradiente altitudinal peruano con la distribución potencial de biomas y formaciones vegetales, tal como lo hacen enfoques bioclimáticos de zonificación que relacionan clima y biomas mediante indicadores como la biotemperatura, la precipitación y la evapotranspiración (Aybar - Camacho et al., 2017). En el Perú, esta lectura integradora también está alineada con los marcos nacionales de

caracterización de ecosistemas, que incorporan explícitamente el bioclima y los pisos ecológicos como insumos para delimitar unidades ecológicas y comprender su distribución territorial (MINAM, 2019).

Las regiones naturales del Perú representan un mosaico complejo de ecosistemas, definidos por su diversidad de relieves, climas y biomas. A lo largo de la historia, varios investigadores y exploradores han intentado clasificar estas áreas para comprender mejor su riqueza y complejidad. Uno de los primeros intentos de clasificación fue realizado en el siglo XVI por **Cieza de León**, quien ofreció una visión inicial de la diversidad geográfica del Perú, dividiéndola en tres macro regiones: la costa, la sierra y la montaña (Cieza de León, 1553). Esta perspectiva proporcionó una base temprana para comprender las diferencias climáticas y topográficas del territorio peruano, aunque de manera simplificada como se puede observar en el **anexo 1**.

En el siglo XX, **Javier Pulgar Vidal** propuso una clasificación más detallada y matizada de las regiones naturales del Perú. En su obra, estableció **ocho regiones naturales**, basadas principalmente en rangos altitudinales y factores ambientales, que van desde la cálida región costera de 'Chala' hasta la helada 'Janca' en las cumbres de los Andes. Según un artículo del 2014 publicado en Terra Brasilis, Pulgar Vidal (2014) describe una "**región natural**" como un área que puede ser continua o discontinua, donde predominan factores ambientales similares. En este contexto, el ser humano se considera como el principal agente que influye activamente en la modificación de estos entornos naturales. Esta clasificación, que se muestra en el **Figura 6**, ha sido influyente en el campo de la geografía peruana y ha ayudado a definir las características de cada región natural del país.

Figura 6

Ocho regiones naturales, Javier Pulgar Vidal(1940)



A finales del siglo XX, Antonio Brack y Cecilia Mendiola desarrollaron una clasificación detallada de los ecosistemas del territorio peruano, proponiendo un sistema de **once ecorregiones** que va más allá de los enfoques basados solo en altitud, al incluir también la diversidad biológica y los patrones ecológicos, tales como el clima, la topografía, la hidrografía, la flora y la fauna (Brack Egg, 1987). Esta innovadora clasificación, publicada en el libro *Ecología del Perú* y presentada en el **Figura 7**, destaca no solo por la riqueza biológica del país, sino también por subrayar la compleja interacción entre los componentes bióticos y abióticos que definen las distintas zonas ecológicas (Brack & Mendiola, 2000). Brack y Mendiola definieron una "ecorregión" como un área geográfica con características similares en términos de factores climáticos, geográficos, florísticos y faunísticos. Este enfoque es distintivo porque incorpora elementos como la hidrografía y las interacciones entre organismos vivos y su entorno físico, lo que contrasta con la propuesta de Pulgar Vidal, ya que también considera el mar como un ecosistema vital para el Perú. Esta perspectiva integral facilita una mejor comprensión de la diversidad ecológica del país y proporciona una base sólida para la gestión y conservación ambiental.

Figura 7

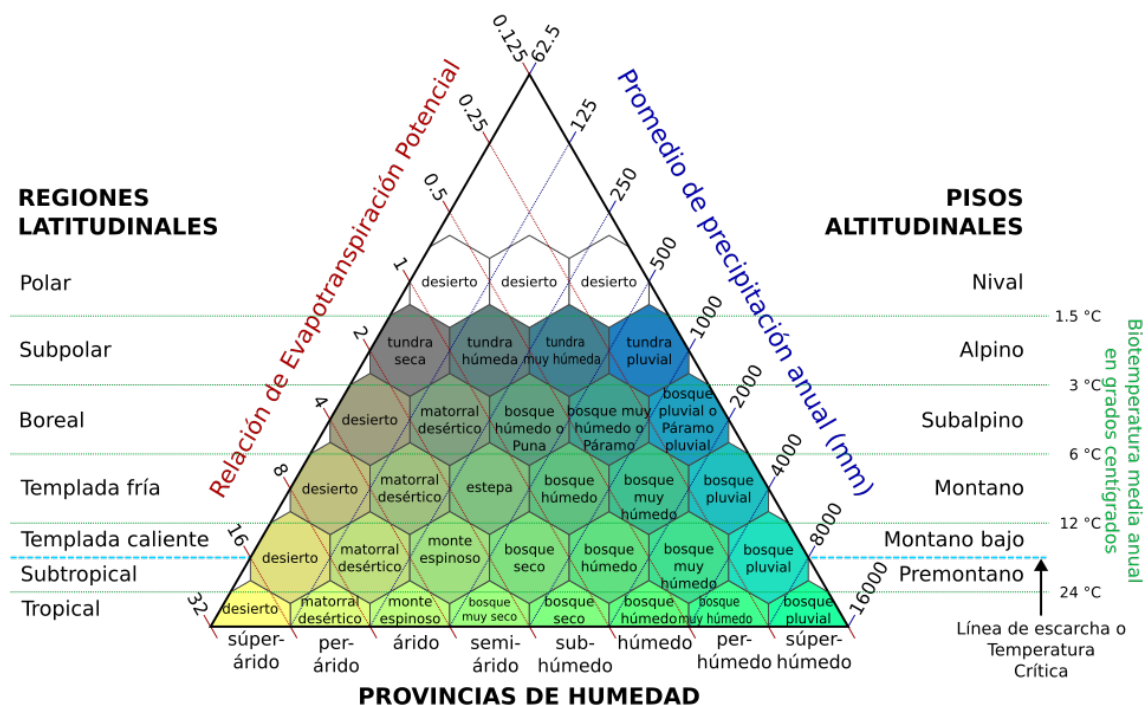
Once ecorregiones, Antonio Brack y Cecilia Mendiola (2000)



Uno de los enfoques que a tomado importancia son las **zonas de vida de Holdridge** como referente técnico - bioclimático de uso internacional, basado en relaciones cuantificables entre biotemperatura, precipitación y razón de evapotranspiración potencial, variables que permiten aproximar la correspondencia clima - vegetación y comparar gradientes ambientales con mayor precisión (Holdridge, 1967; Aybar-Camacho et al., 2017). En el caso peruano, este marco fue operacionalizado tempranamente en el Mapa Ecológico del Perú, que reconoce 84 zonas de vida de las 117 unidades existentes a nivel mundial, aportando una lectura climática explícita de la diversidad ecológica del territorio y constituyendo un insumo de referencia para instrumentos posteriores de caracterización ambiental (MINAM, 2019). En la misma línea, el SENAMHI ha actualizado su aplicación mediante el Atlas de Zonas de Vida y estimaciones nacionales recientes, fortaleciendo la trazabilidad metodológica y la relación entre climatología observada y patrones espaciales de condiciones eco fisiográficas (Aybar - Camacho et al., 2017).

Figura 8

Diagrama bioclimático de Holdridge (1967)



Nota. Adaptado de Life zone ecology, por L. R. Holdridge, 1967, Tropical Science Center

La **figura 8** es un diagrama que clasifica las condiciones bioclimáticas a partir de la biotemperatura media anual, la precipitación anual y la razón evapotranspiración potencial/precipitación; cada celda representa una “zona de vida” y sus transiciones, asociadas a formaciones de vegetación esperables bajo condiciones climáticas equivalentes.

No obstante, en términos de objetivo y diseño de esta tesis, el sistema de Holdridge se asume como marco complementario y no como eje comparativo principal: su fortaleza radica en la clasificación bioclimática, mientras que los planteamientos de Pulgar Vidal y Brack ofrecen categorías interpretativas de alta utilidad para el análisis histórico, territorial y la discusión de cambios en la organización de ecorregiones andinas bajo influencia climática. De este modo, Holdridge se integra para reforzar el sustento físico - climático de los gradientes y la coherencia ambiental de las unidades, sin desplazar el foco central del estudio, orientado a evaluar la influencia del cambio climático en la clasificación de ecorregiones andinas desde marcos nacionales ampliamente difundidos y comparables en el tiempo (MINAM, 2019).

En los últimos años, investigaciones recientes han sugerido ajustes y expansiones a estas clasificaciones tradicionales, fundamentadas principalmente en estudios botánicos como el **Catálogo de Angiospermas y Gimnospermas** y el **Libro Rojo de las Plantas Endémicas del Perú** (Brako & Zarucchi, 1993; León et al., 2006). Estas obras han permitido identificar especies endémicas y han servido de base para actualizar las ecorregiones considerando la dinámica actual de los ecosistemas. El Ministerio del Ambiente (MINAM) adoptó un enfoque moderno con la creación del **Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú**, aprobado en 2018 (**Ver anexo 2**). En este documento, el MINAM define un ecosistema como "un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional" (MINAM, 2019). Este mapa, desarrollado a partir de un proceso colaborativo entre diversas instituciones gubernamentales y académicas, proporciona una representación cartográfica detallada de la distribución de 36 ecosistemas naturales continentales en el Perú. Estos incluyen once ecosistemas de selva tropical, tres de yunga, once de la región andina, nueve de la costa y dos ecosistemas acuáticos (MINAM, 2019). El enfoque del MINAM integra variables como la cobertura vegetal, el bioclima, la fisiografía y los pisos

ecológicos para facilitar la gestión del territorio y el monitoreo de los ecosistemas, particularmente en el contexto del cambio climático.

1.2. Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad de comprender cómo el cambio climático está modificando las condiciones ambientales que sostienen la clasificación del territorio andino del Perú, particularmente en los marcos propuestos por Pulgar Vidal (Regiones Naturales) y por Brack y Mendiola (Ecorregiones). En este sentido, el estudio no se plantea como una evaluación general de “ecosistemas andinos”, sino como un análisis de cómo los cambios recientes en temperatura y precipitación, junto con transformaciones en la criósfera y en la vegetación, pueden alterar los criterios que históricamente han permitido distinguir y delimitar estas unidades de clasificación en el espacio andino. Dicho de manera simple: si el clima y la vegetación cambian, también pueden cambiar los rasgos que definen dónde empieza y termina una región natural o una ecorregión, así como sus zonas de transición.

Este enfoque es relevante porque los Andes tropicales del Perú concentran alta diversidad biológica y cumplen un rol estratégico como “torres de agua”, al regular el abastecimiento hídrico, sostener la agricultura y aportar servicios ecosistémicos clave (Ochoa-Tocachi et al., 2019; Immerzeel et al., 2020). Sin embargo, su compleja topografía y sus fuertes gradientes altitudinales los hacen especialmente sensibles al calentamiento contemporáneo. La evidencia científica documenta procesos acelerados en la región andina, como el retroceso glaciario, la reducción de la fracción nival, el desplazamiento altitudinal de especies y la intensificación de extremos hidroclimáticos (Hugonnet et al., 2021; IPCC, 2021). Desde una perspectiva territorial, estos cambios pueden expresarse como desplazamientos de gradientes climáticos y biogeográficos, afectando la coherencia interna y las transiciones espaciales de las unidades andinas descritas por Pulgar Vidal y Antonio Brack. En consecuencia, comprender estas reconfiguraciones es fundamental para interpretar adecuadamente el cambio climático en los Andes peruanos y su posible implicancia sobre la lectura geográfica de regiones naturales y ecorregiones.

De manera explícita, esta investigación se circunscribe a la región andina del Perú y adopta como unidades de análisis un conjunto acotado de categorías históricas y ampliamente difundidas en la literatura nacional, seleccionadas por su pertinencia para

interpretar gradientes altitudinales y respuestas de la vegetación frente al cambio climático. En el marco de Pulgar Vidal, se trabajará con cuatro Regiones Naturales andinas: Quechua, Suni, Puna o Jalca y Janca; mientras que, en el marco de Brack y Mendiola, se analizarán tres ecorregiones andinas representativas: Páramo, Puna o Altos Andes y Serranía Esteparia (Pulgar Vidal, 1940; Brack & Mendiola, 2000). Esta delimitación no busca abarcar la totalidad de regiones naturales o ecorregiones del país, sino focalizarse en aquellas unidades que coexisten y se interrelacionan a lo largo del gradiente de montaña, donde los cambios térmicos e hídricos pueden traducirse con mayor claridad en desplazamientos altitudinales, reorganización de coberturas vegetales y modificaciones de transiciones ecológicas.

La elección conjunta de Pulgar Vidal y Brack responde a su carácter complementario para sustentar la justificación del estudio. Por un lado, el esquema altitudinal de Pulgar Vidal proporciona un marco directo para examinar variaciones en el rango de distribución de la vegetación en función de la altura, lo que resulta especialmente relevante ante procesos como la migración altitudinal de especies. Por otro lado, la propuesta ecorregional de Brack integra explícitamente componentes bioclimáticos y ecológicos (como patrones de temperatura y precipitación asociados a unidades territoriales), lo que permite discutir con mayor detalle cómo el cambio climático puede reconfigurar las características ambientales que sostienen la clasificación andina y, en consecuencia, tensionar su coherencia espacial y sus límites interpretativos (Pulgar Vidal, 1940; Brack & Mendiola, 2000). En ese sentido, el problema central no es la “limitación” de los ecosistemas andinos, sino comprender cómo se transforman los criterios geográficos y bioclimáticos que enmarcan la clasificación de estas unidades andinas y qué implicancias tiene ello para su lectura territorial contemporánea.

En consecuencia, el estudio aporta al conocimiento científico mediante un análisis sistemático de literatura y la integración de evidencia climática y ambiental de alta resolución, generando insumos útiles para el debate técnico sobre clasificación territorial en contextos de cambio climático. Asimismo, ofrece una base aplicable para la gestión territorial y la planificación de adaptación, al aportar criterios interpretativos sobre la dinámica de las unidades andinas y sus transiciones ambientales bajo escenarios de calentamiento y variabilidad hidroclimática (IPCC, 2021; Ochoa-Tocachi et al., 2019).

II. Pregunta de investigación

¿Cómo está influyendo el cambio climático en las características bioclimáticas y ecológicas que sustentan la clasificación de las ecorregiones andinas del Perú, según los marcos de Pulgar Vidal (1940) y Antonio Brack (2000), a partir de cambios observados en temperatura, precipitación, retroceso glaciar y respuesta de la vegetación andina?

III. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar cómo el cambio climático está modificando las características bioclimáticas y ecológicas que sustentan la clasificación de las ecorregiones andinas del Perú, a partir del análisis de variaciones en temperatura, precipitación, dinámica glaciar y respuesta de especies vegetales.

3.2. Objetivos específicos

1. Examinar el planteamiento de las ecorregiones andinas de Antonio Brack (2000) y de las Regiones Naturales andinas de Pulgar Vidal (1940), caracterizando sus rangos altitudinales, variables climáticas (temperatura y precipitación) y atributos de vegetación, para establecer una línea base que permita evaluar las alteraciones asociadas al cambio climático.
2. Analizar las tendencias históricas y recientes de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en la región andina, utilizando datos del SENAMHI (productos PISCO), mediante pruebas de tendencia Mann-Kendall y estimación de tasas de cambio, y representar los resultados con gráficos y mapas para contrastarlos con los rangos climáticos considerados en la clasificación original.
3. Examinar el retroceso glaciar mediante un análisis multitemporal utilizando datos de INAIGEM y estudios científicos, cuantificar la pérdida de cobertura glaciar a través de Sistemas de Información Geográfico(GIS) y analizar su impacto en los ecosistemas adyacentes.

4. Evaluar la evidencia científica sobre las respuestas de la vegetación andina del Perú al cambio climático, identificando patrones de cambio en su distribución altitudinal, adaptación de especies y en la dinámica de comunidades.

IV. Metodología

4.1. Tipo de estudio

El estudio es descriptivo - analítico y adopta un enfoque mixto, articulando análisis cuantitativo (estadístico y geoespacial) con síntesis cualitativa (revisión sistemática) para evaluar la influencia del cambio climático sobre unidades andinas del Perú a partir de marcos de clasificación ampliamente difundidos en la literatura nacional. En coherencia con la pregunta y los objetivos, el marco referencial integra dos propuestas complementarias: los pisos altitudinales de Javier Pulgar Vidal (1940) y las ecorregiones de Brack y Mendiola (2000). Esta elección se sustenta en su comparabilidad histórica y en su legitimidad académica y uso extendido en la interpretación territorial del país, lo que permite contrastar los criterios originales de clasificación con evidencia climática y ecológica reciente.

La incorporación de los pisos altitudinales responde a un fundamento metodológico central: en sistemas de montaña, el gradiente vertical estructura la variabilidad climática y la respuesta biológica, por lo que el desplazamiento altitudinal de la vegetación se interpreta de manera más directa y comparable cuando se organiza el análisis por umbrales de altura. A su vez, las ecorregiones aportan la escala territorial y biogeográfica necesaria para discutir coherencia espacial y límites interpretativos en unidades andinas extensas, donde existe heterogeneidad interna. De este modo, el enfoque por ecorregiones se complementa con la lectura por pisos para mejorar la resolución del análisis sin cambiar el eje conceptual del estudio. Por otra parte, no se adopta como marco principal una clasificación institucional reciente de ecosistemas ni las zonas de vida de Holdridge porque ello reduciría la comparabilidad histórica o desplazaría el enfoque hacia una tipología estrictamente climática. En cambio, el acoplamiento Pulgar y Brack permite mantener el objetivo de la tesis: analizar cómo las variaciones de temperatura y precipitación, la dinámica glacial y la evidencia sobre cambios en la vegetación pueden tensionar y reconfigurar los criterios que sustentan la clasificación de las unidades andinas. En el componente cuantitativo se estiman tendencias y tasas de cambio de

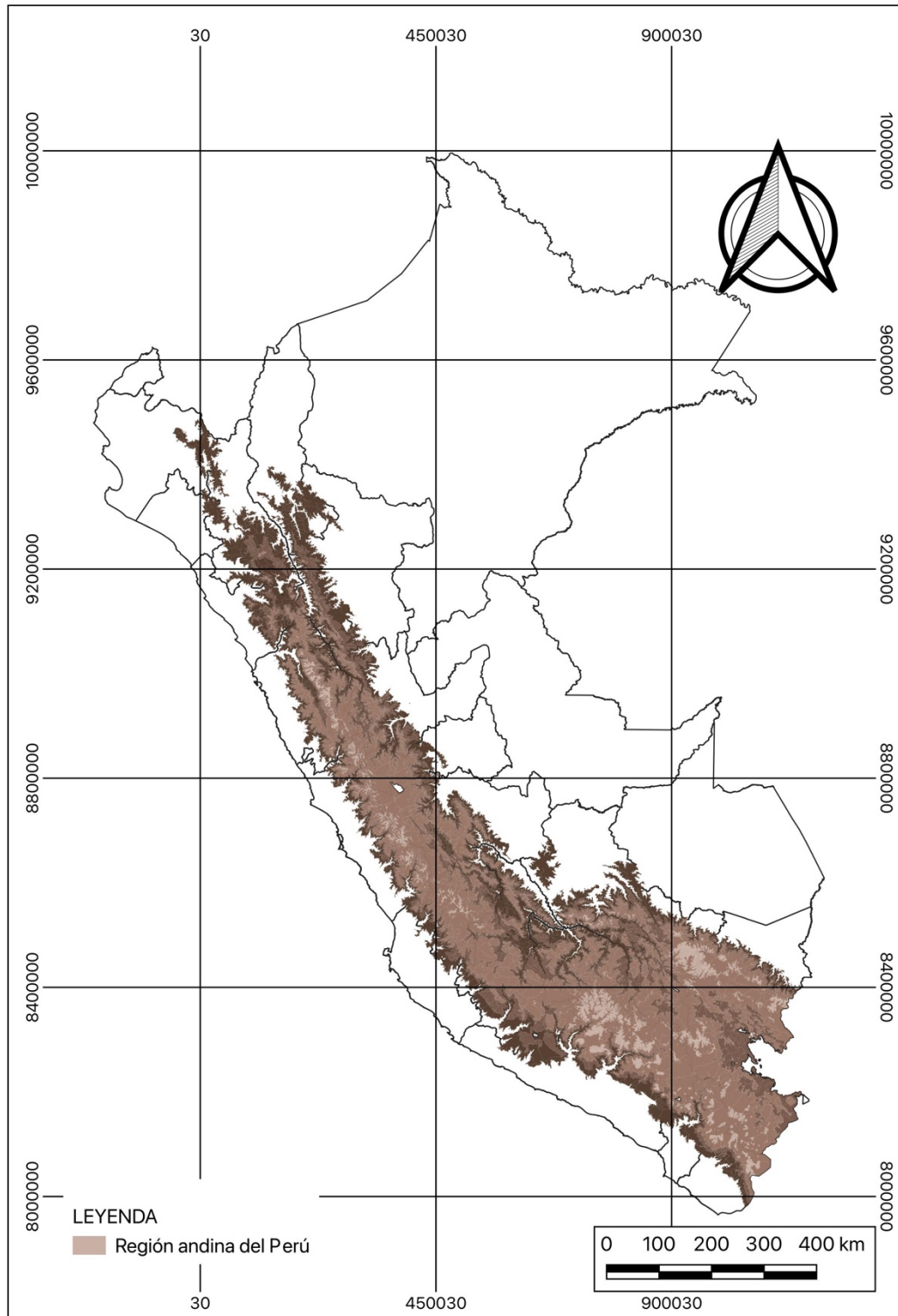
variables climáticas y glaciares; en el cualitativo, la revisión sistemática sintetiza evidencia sobre respuestas de la vegetación. La integración se realiza por ecorregión y piso altitudinal, presentando resultados en mapas comparativos, series temporales y resúmenes estadísticos (Pulgar Vidal, 1940; Brack & Mendiola, 2000).

4.2. Área de estudio

El área de estudio se circunscribe a la región andina del Perú (**Figura 9**), entendida como el eje montañoso que estructura el territorio nacional de norte a sur y que concentra los gradientes altitudinales más pronunciados del país. Para fines de esta investigación, la delimitación abarca aproximadamente entre 3° S y 17° S, e incorpora un continuo altitudinal desde los 500 hasta 6,768 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), de modo que se capturen, en una sola unidad espacial, las transiciones fisiográficas y bioclimáticas que enlazan valles interandinos, laderas y cordilleras de alta montaña, mesetas altoandinas y ambientes glaciares. Esta selección es metodológicamente pertinente porque en dicha franja se expresan con mayor intensidad las señales del cambio climático analizadas en la tesis, particularmente la variación térmica e hídrica con la altura, la dinámica de la criósfera y la reorganización de coberturas vegetales a lo largo del gradiente de montaña.

Figura 9

Delimitación del área de estudio: región andina del Perú



4.3. Diseño de investigación científica

4.3.1. Enfoque general

El estudio adopta un diseño mixto que combina la revisión sistemática de literatura con el análisis geoespacial y estadísticos de datos climáticos y de glaciares. Esta integración tiene como finalidad proporcionar una visión holística de los impactos del cambio climático en los ecosistemas andinos del Perú, abordando tres ámbitos clave en el siguiente orden: (1) variables climáticas (temperatura y precipitación), (2) dinámica de los glaciares, y (3) respuesta de la vegetación altoandina.

La integración entre estos tres ámbitos se operacionaliza mediante un enfoque de convergencia: (a) se armonizan las variables a una misma unidad de análisis espacial, (b) se estandarizan los indicadores para asegurar comparabilidad pese a sus distintas unidades, y (c) se integran en una lectura conjunta clima, criosfera y ecosistemas, donde las tendencias climáticas se interpretan como forzantes, la dinámica glaciar como respuesta física y la vegetación altoandina como respuesta ecológica. Esta integración se complementa con la triangulación entre resultados cuantitativos (mapas y tendencias) y la evidencia sintetizada en la revisión sistemática, reforzando consistencia y explicaciones del patrón observado.

La selección de variables (temperatura, precipitación, dinámica glaciar y vegetación) se sustenta en un criterio de pertinencia causal, relevancia explicativa y viabilidad metodológica: temperatura y precipitación representan los principales controles climáticos sobre la alta montaña; la dinámica glaciar constituye un indicador centinela altamente sensible al clima y con implicancias directas en la regulación hídrica; y la vegetación altoandina expresa la respuesta biológica y ecosistémica ante cambios del hábitat. En conjunto, estas variables capturan de forma suficiente y replicable el encadenamiento clave de impactos del cambio climático en ecosistemas andinos, evitando incorporar variables adicionales que, para la escala y objetivos del estudio, incrementarían complejidad sin mejorar proporcionalmente la capacidad explicativa.

Figura 10

Diseño de la investigación



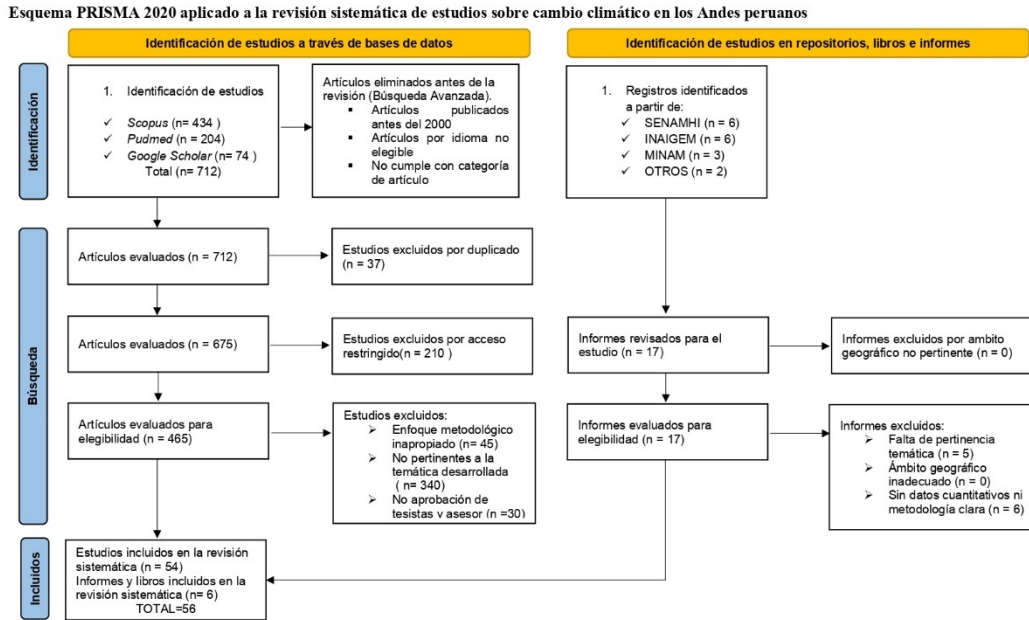
La **figura 10** sintetiza el diseño metodológico, integrando la revisión sistemática (clima, glaciares y vegetación) con el análisis estadístico y geoespacial, proyectados en las ecorregiones de Brack y los pisos altitudinales de Pulgar Vidal.

A. Revisión sistemática

La presente investigación se desarrolló bajo la metodología **PRISMA** (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), reconocida internacionalmente por su rigurosidad en la revisión sistemática de literatura científica y por garantizar un proceso transparente y reproducible (Page et al., 2021; Matthew, 2020). Esta metodología permitió organizar y sintetizar de manera estructurada la información más relevante sobre el impacto del cambio climático en los ecosistemas andinos del Perú, identificando estudios clave vinculados con variaciones en la temperatura, la precipitación, el retroceso glacial y la migración altitudinal de especies vegetales. El esquema general del proceso de selección y depuración de artículos se presenta en la **Figura 11**.

Figura 11

Metodología PRISMA para la revisión sistemática

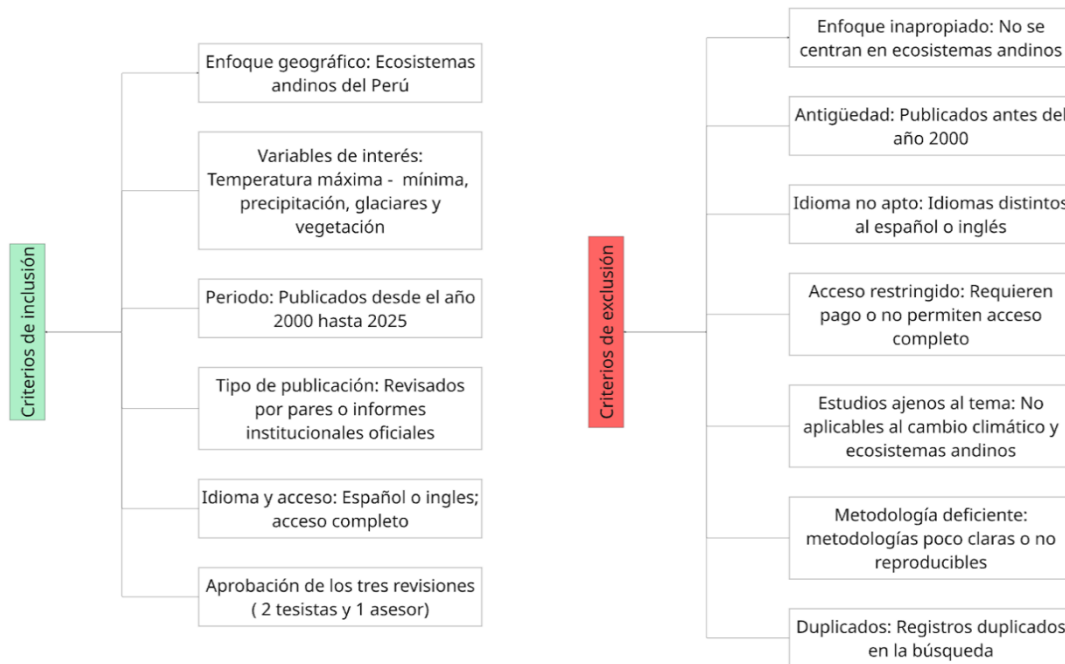


La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en bases de datos internacionales de alto impacto como **Scopus** y **PubMed**, complementadas con repositorios de libre acceso (**Google Scholar**) y con informes técnicos de instituciones nacionales como SENAMHI, INAI GEM, MINAM, MIDAGRI y ANA. La última actualización de la búsqueda se realizó el 25 de septiembre de 2025, lo que asegura la inclusión de los estudios más recientes y pertinentes.

Asimismo, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión claramente definidos (véase **Figura 12**), considerando aspectos como el enfoque geográfico en los ecosistemas andinos del Perú, las variables de interés (temperatura, precipitación, glaciares y vegetación), el rango temporal (2000–2025), los idiomas (español e inglés) y la calidad metodológica de los estudios seleccionados.

Figura 12

Criterios de inclusión y exclusión para la revisión sistemática



B. Análisis geoespacial y estadísticos de datos climáticos y de glaciares

Las series climáticas (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) provienen del producto PISCO-SENAMHI para el periodo 1981-2016. Estos datos se procesaron en RStudio, generando mapas rasterizados de la distribución espacial y tendencias temporales con prueba estadística de Mann Kendall. Para la dinámica de los glaciares, se utilizaron los inventarios y geoportales de INAIGEM, que documentan la evolución de la superficie glaciar en el Perú, con ello se desarrollaron gráficos programados en Python. Asimismo, la información se analizó en ArcGIS 10.8 y QGIS, calculando la cobertura y la tasa de retroceso de los glaciares y visualizando los resultados en mapas temáticos.

4.3.2. Estrategias para la búsqueda de referencias bibliográficas

La búsqueda bibliográfica en **Scopus** **Tabla 1** se diseñó considerando tres bloques temáticos principales: clima (precipitación y temperatura), glaciares y vegetación altoandina. En todos los casos se aplicaron criterios homogéneos de filtrado que permitieron garantizar la comparabilidad de los resultados. Se restringió el tipo de documento a artículos científicos, el periodo de análisis comprendió los años 2000 a 2025,

el territorio de estudio se limitó al ámbito peruano y los idiomas seleccionados fueron inglés y español (**véase anexo 3**).

Tabla 1

Búsqueda en Scopus, Elaboración propia

Bloque temático	Búsqueda en Scopus	Total Seleccionados	
Clima (temperatura y precipitación)	("climate change" OR "global warming" OR "cambio climático" OR "climate variability" OR "variabilidad climática") AND (temperature OR "air temperature" OR Tmax OR Tmin OR precipitation OR rainfall OR drought OR sequía) AND (Peru OR "Peruvian Andes" OR "Andes of Peru" OR "Cordillera de los Andes")	252	10
Criósfera (glaciares y retroceso)	(glacier OR "glacier retreat" OR "glacial melt" OR deglaciation OR "mass balance" OR "ice loss" OR cryosphere OR "glacial lake" OR "proglacial lake" OR GLOF) AND (Peru OR "Peruvian Andes" OR "Andes of Peru" OR "Cordillera de los Andes")	159	12
Vegetación altoandina (migración altitudinal y distribución)	(vegetation OR flora OR "alpine plant" OR "high-Andean vegetation" OR montane vegetation OR puna OR paramo OR yungas OR "Andean grassland") AND ("altitudinal shift" OR "elevational range shift" OR "upslope migration" OR "altitudinal migration" OR "species distribution" OR "species range shift") AND (Peru OR "Tropical Andes" OR "Cordillera de los Andes")	23	7
Total		434	29

La búsqueda bibliográfica en **PubMed** **Tabla 2** se llevó a cabo mediante estrategias avanzadas diseñadas para tres bloques temáticos: clima, criósfera y vegetación altoandina. Se aplicaron filtros homogéneos para garantizar la comparabilidad, limitando los resultados al periodo 2000-2025, con restricción a publicaciones en inglés y español. Asimismo, se seleccionó la opción de texto completo disponible, a fin de asegurar el acceso integral a los documentos recuperados. Las ecuaciones empleadas se detallan en la tabla correspondiente (**véase anexo 4**).

Tabla 2*Búsqueda en PubMed, Elaboración propia*

Bloque temático	Búsqueda en PubMed	Total	Seleccionados
Clima (temperatura y precipitación)	(Peru[tiab] OR "Perú"[tiab] OR "Tropical Andes"[tiab] OR "Andes"[tiab]) AND ("climate change"[tiab] OR "climatic change"[tiab] OR "climate variability"[tiab]) AND (temperature[tiab] OR "air temperature"[tiab] OR precipitation[tiab] OR rainfall[tiab])	138	8
Criósfera (glaciares y retroceso)	(Peru[tiab] OR "Tropical Andes"[tiab] OR "Andes"[tiab]) AND (glacier*[tiab] OR cryosphere[tiab] OR "glacial mass balance"[tiab]) AND (retreat[tiab] OR recession[tiab] OR shrink*[tiab] OR melting[tiab] OR "mass balance"[tiab] OR "ice loss"[tiab] OR deglaciation[tiab])	49	3
Vegetación altoandina (migración altitudinal y distribución)	(Peru[tiab] OR "Tropical Andes"[tiab] OR "Andes"[tiab]) AND (vegetation[tiab] OR plant*[tiab] OR flora[tiab]) AND ("altitudinal shift"[tiab] OR "elevational shift"[tiab] OR altitudinal[tiab] OR elevational[tiab] OR upslope[tiab] OR "range shift"[tiab] OR migration[tiab] OR treeline[tiab] OR "timberline"[tiab]) AND ("climate change"[tiab] OR "climatic change"[tiab] OR deglaciation[tiab])	17	4
Total		204	15

Para el bloque temático referido a la **vegetación altoandina y su migración altitudinal frente al cambio climático**, se realizó una búsqueda complementaria en **Google Scholar** con el objetivo de identificar literatura adicional que no siempre está indexada en bases de datos comerciales. La estrategia aplicada fue la siguiente:

Tabla 3

Búsqueda en Scholar, Elaboración propia

Bloque temático	Búsqueda en Google Scholar	Totales Seleccionados	
Vegetación altoandina (migración altitudinal y distribución)	("Peru" OR "Andes Peru") AND ("Andean vegetation" OR "vegetación andina" OR "ecosistemas andinos") AND ("altitudinal shift" OR "migración altitudinal" OR "altitudinal distribution") AND ("climate change" OR "cambio climático")	74	10
Total		74	10

La búsqueda se delimitó al periodo 2000-2025, considerando publicaciones en inglés y español. Como resultado, se obtuvieron 74 registros, de los cuales se procedió a realizar el cribado en función de los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos, seleccionando únicamente 10 de los estudios más pertinentes al contexto peruano y de alta relevancia científica. **(véase anexo 5).**

En el presente estudio, se ha complementado la revisión sistemática con datos obtenidos de informes institucionales que abordan el impacto del cambio climático en los ecosistemas andinos del Perú **(véase Anexo 6)**. Los datos recolectados de estas instituciones gubernamentales serán utilizados para validar y enriquecer los resultados obtenidos mediante la revisión de literatura.

4.4. Operacionalización de las variables

El estudio empleó una serie de variables clave para evaluar los efectos del cambio climático en las ecorregiones andinas del Perú. Estas variables se operacionalizaron con el fin de facilitar su medición y análisis, permitiendo obtener una interpretación precisa de cómo los factores climáticos han influido en estos ecosistemas. Las variables incluyeron **temperatura, precipitación, retroceso glaciar y respuesta de especies**

vegetales al cambio climático. Cada variable fue definida conceptualmente y operacionalmente para estandarizar los métodos de recolección de datos, usando tanto registros históricos como datos actuales de fuentes científicas y gubernamentales.

Tabla 4

Operacionalización de variables de temperatura, precipitación, retroceso glaciar y desplazamiento de especies vegetales

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Fuentes de datos
Temperatura	Grado de calor medido en la atmósfera en un lugar y tiempo específicos (IPCC, 2023).	Registro de temperatura promedio anual de las estaciones meteorológicas.	Grados Celsius (°C)	SENAMHI; bibliografía científica
Precipitación	Cantidad de agua que cae en un período específico (IPCC, 2023).	Registros de precipitación acumulada anual de las estaciones meteorológicas.	Milímetros (mm)	SENAMHI; ANA; bibliografía científica
Retroceso glaciar	Reducción en la masa y extensión de los glaciares (Vuille et al., 2018).	Registros históricos de área y volumen, imágenes satelitales y datos de teledetección.	Kilómetros cuadrados (km ²)	Imágenes satelitales; bibliografía científica
Respuesta vegetal	Migración de especies vegetales hacia elevaciones mayores en respuesta a factores climáticos (Lozano., 2021).	Análisis de datos históricos y actuales sobre la distribución de especies; revisión de estudios que evidencian este fenómeno.	Tasa de migración	Bibliografía científica

V. Resultados

5.1. Caracterización y línea base de ecorregiones andinos según Brack y Pulgar Vidal

En cumplimiento del **Objetivo 1**: Examinar el planteamiento de las ecorregiones andinas de Antonio Brack (2000) y de las Regiones Naturales andinas de Pulgar Vidal (1940), caracterizando sus rangos altitudinales, variables climáticas (temperatura y precipitación) y atributos de vegetación, para establecer una línea base que permita evaluar las alteraciones asociadas al cambio climático. Se estableció la línea base de los ecosistemas andinos del Perú a partir de dos marcos clásicos y complementarios: la estratificación altitudinal propuesta por **Javier Pulgar Vidal (1940)** y la tipología ecorregional desarrollada por **Antonio Brack Egg a fines del siglo XX**. Consideradas en conjunto, ambas propuestas ofrecieron una representación histórica coherente del gradiente andino y de su heterogeneidad ecológica; esta convergencia metodológica resultó idónea para fijar la condición de referencia previa a las transformaciones recientes atribuibles al cambio climático. La pertinencia de articular pisos ecológicos y ecorregiones fue además consistente con la práctica institucional moderna de clasificación y monitoreo de ecosistemas en el país.

Los **pisos altitudinales de Javier Pulgar Vidal** se asume como una regionalización principalmente altitudinal, cuyo “hilo conductor” es la diferenciación por altura; sin embargo, Pulgar Vidal no reduce su propuesta únicamente a la altitud, sino que la sustenta además en toponimia, clima, flora y fauna, productos límite, obras del hombre y rasgos del paisaje (Pulgar Vidal, 2014). Asimismo, advierte que los límites entre regiones no son abruptos y pueden presentar variaciones por factores locales como orientación, sombra orográfica, vientos dominantes y la vertiente (occidental u oriental), lo que implica transiciones e interpenetraciones entre pisos a lo largo del territorio. De este enfoque altitudinal nos centramos en el estudio del espacio andino en cuatro pisos ecológicos de interés directo para esta investigación: Quechua, Suni o Jalca, Puna y Janca (**véase Figura 13**). La sistematización de estos pisos en la **Tabla 5** permitió consignar cuantitativamente sus atributos climáticos y de vegetación. El piso Quechua (2300 - 3500 m) se caracterizó por temperaturas medias de 11 a 16 °C y precipitaciones de 500 a 1200 mm/año, asociándose a valles interandinos templados con agricultura intensiva (maíz, papa, frutales) y presencia de bosques montanos. Por encima, el Suni o Jalca (3500 - 4000 m)

presentó temperaturas de 7 a 11 °C y precipitaciones de 400 a 700 mm/año; se trató de laderas frías con marcada oscilación térmica diaria, donde prosperaron terrazas agrícolas y vegetación arbustiva adaptada a condiciones edáficas limitantes, incluyendo cultivos andinos de alta resiliencia como la quinua y la cañihua. La Puna (4000 - 4800 m) registró temperaturas mayores a 7 °C y precipitaciones de 400-1200 mm/año; dominada por gramíneas, pajonales y bofedales, constituyó la base de los sistemas pastoriles altoandinos. Finalmente, la Janca (>4800 m) correspondió a ambientes nivosos y glaciares con temperaturas medias menores a 0 °C y precipitación predominantemente sólida; suelos rocosos, vegetación extremadamente especializada y función hídrica estratégica la definieron como el límite superior de la vida en la cordillera. Esta lectura escalonada, de fuerte raigambre en la geografía peruana, fue la que sentó el estándar nacional de comprensión de “región natural” por factores físicos y biológicos integrados.

Tabla 5

Cuadro de Pisos Ecológicos de la Región Andina según Javier Pulgar Vidal

Piso ecológico	Altitud (m s. n. m.)	Clima	Vegetación (tipos generales y especies importantes)	Uso de suelos
Quechua	2300 - 3500	Templado, moderada temperatura precipitación estacional	variación de Aliso, pashullo, gongapa, muña, shacshaca, eucalipto. Cultivos: papa, maíz, caigua	Agricultura (intensiva, de regadío y secano), reforestación de eucaliptos
Suni/Jalca	3500 - 4000	Frío, seco, variación temperatura precipitaciones estacionales	fuerte Árboles y arbustos espinosos adaptados a la sequía de (queuña, yasta-yasta, quinua). Vegetación densa: <i>Buddleja</i> (quishuar), colli, <i>Globulosa</i> , ñacna, coriacea, sauco, cantuta, cactus, orquídeas. Cultivos: quinua, cañihua, oca, olluco, tarhui	Agricultura (terrazas, cultivos de tubérculos), pastoralismo
Puna	4000 - 4800	Frío, fuerte variación de temperatura diurna	Ichu, q'oscha; cactus: ulluyma, vagoro. Arbustos: shaulli-shaulli, huamanpinta, culli, colli, queñoa, quishuar. Vegetales de lago: totora. Cultivos: papa, cebada, maca	Pastoralismo, algo de agricultura (tubérculos), almacenamiento de agua y generación hidroeléctrica
Janca / Cordillera	> 4800	Mucho frío, heladas	nieve, Pocas plantas; ninguna > 5200 m s. n. m.; especies como yareta y chunchohuaita; no existe cultivo	Ninguno (excepto almacenamiento de hielo/agua)

Por otra parte, el enfoque biogeográfico y funcional de Brack y Mendiola organiza el territorio en **ecorregiones** definidas como áreas con condiciones relativamente homogéneas de **clima, suelos, hidrología, flora y fauna**, cuyos componentes interactúan en estrecha interdependencia. En términos cartográficos, esta propuesta se sustenta en criterios de **geografía, clima, suelos, flora y fauna**, lo que refuerza su utilidad para interpretar patrones ecológicos a escala regional. Por ende, para el estudio de esta tesis se consideraron tres: Serranía Esteparia, Puna o Altos Andes y Páramo (**véase Figura 14**). La **Tabla 6** incorporó los rangos altitudinales y climáticos historicistas de estas unidades: la Serranía Esteparia (1000 - 4000 m) presentó temperaturas medias de 12 hasta 18 °C y precipitaciones de 250 a 1000 mm/año, mostrando un mosaico que transita desde ambientes semiáridos con vegetación xerofítica y cactáceas en cotas bajas hasta laderas frías con gramíneas, matorrales y relictos boscosos en cotas mayores. La Puna o Altos Andes (3800 - 6700 m) se consolidó como la unidad más extensa del espacio andino, con temperaturas medias mayores a 7 °C y precipitaciones que alcanzaron hasta 1500 mm/año en sectores húmedos; se distinguió por pastizales, bofedales y plantas almohadilladas altamente adaptadas a la radiación y al frío. El Páramo (2000 - 3400 m), restringido al extremo norte, se definió por temperaturas templadas y precipitaciones mayores a 2000 mm/año, nieblas persistentes y vegetación de pajonales, arbustos densos y bosques montanos nublados, con un papel relevante en la captación de humedad atmosférica. La noción de “ecorregión” en Brack y Mendiola enfatizó la homogeneidad relativa en clima, suelos, hidrología, flora y fauna en escalas meso a regionales, lo que la vuelve particularmente útil para interpretar funciones ecosistémicas de mayor alcance.

El cotejo entre la Puna de Pulgar Vidal (4000 - 4800 m) se superpuso con el núcleo de la ecorregión Puna de Brack (que se extiende a cotas aún mayores), mientras la Serranía Esteparia abarcó franjas que, desde el punto de vista de pisos, incluyen porciones de Quechua y Suni; por su parte, el Páramo de Brack introdujo explícitamente una dimensión saturada de la atmósfera y nieblas de montaña que no aparece como piso autónomo en el esquema de Pulgar Vidal, pero que se ubica funcionalmente en el tramo alto de la Yunga y de transición hacia Puna en el norte peruano. La articulación resultante entre pisos ecológicos y ecorregiones permitió fijar una línea base espacialmente coherente que vincula rangos de altitud y clima con formaciones vegetales y usos tradicionales del suelo.

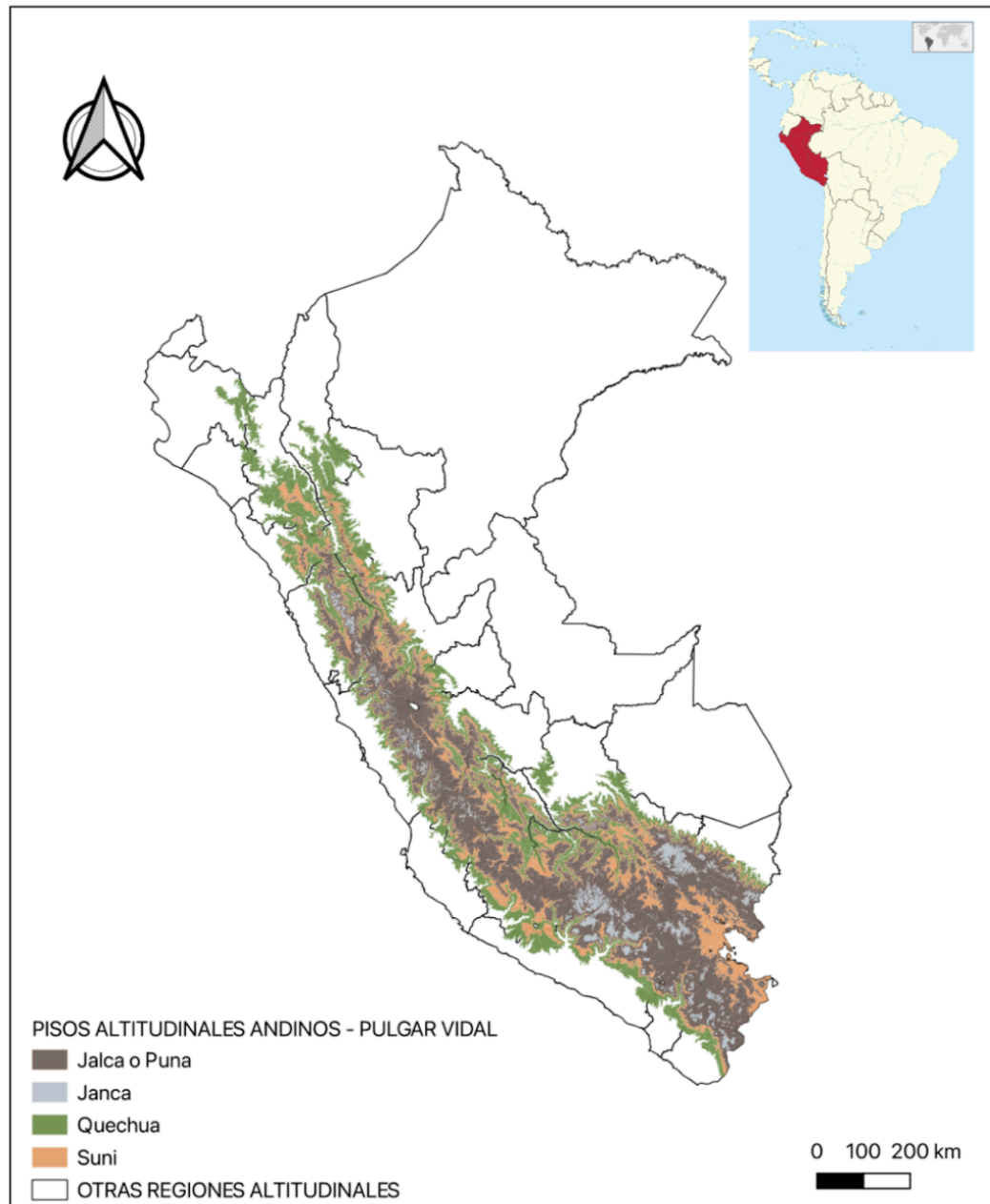
Tabla 6*Cuadro de las ecorregiones andinas planteados por Antonio Brack*

Ecorregión	Altitud (m s.n.m.)	Clima	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm/año)	Vegetación	Uso del suelo y actividades
Serranía Esteparia	Semidesierto 1000-1600	a. Templado y subhúmedo entre los 1000–3000 m s. n. m.	20	< 500	Plantas suculentas y xerófitas como achupallas, cactus, gramíneas y huarangas	Agricultura en terrazas, pastoreo, reforestación
	S.E. Baja 1400-2600		-		Vegetación de estepa, donde el mito, huarapo y varias cactáceas alternan con pajonal y formaciones de bromelias	
	S.E. Alta 2400–3200	b. Frío encima de los 3000	12	700	Bosque ralo y zonas pedregosas cubiertas de bromelias y cactus	
Puna y Altos Andes	Región Puna 3800-5200	a. Frígido o de puna entre los 4000–5200 m s. n. m.	6	700	Con estepa de gramíneas y arbustos diversos, especialmente de chocho	Pastoreo, agricultura, hidroenergía

Ecorregión	Altitud (m s.n.m.)	Clima	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm/año)	Vegetación	Uso del suelo y actividades
	Nieves Perpetuas 5200-6700	b. Gélido o de nieves perpetuas	<0	-	Pajonales, totorales, bosques de queñua, rodales de ccara y formaciones de plantas almohadilladas	
Páramo	2145–3400	Muy húmedo, alta incidencia de neblinas nocturnas	17	900	Pajonales, arbustos y bosques de altura	Pastoreo, agricultura, hidroenergía

Figura 13

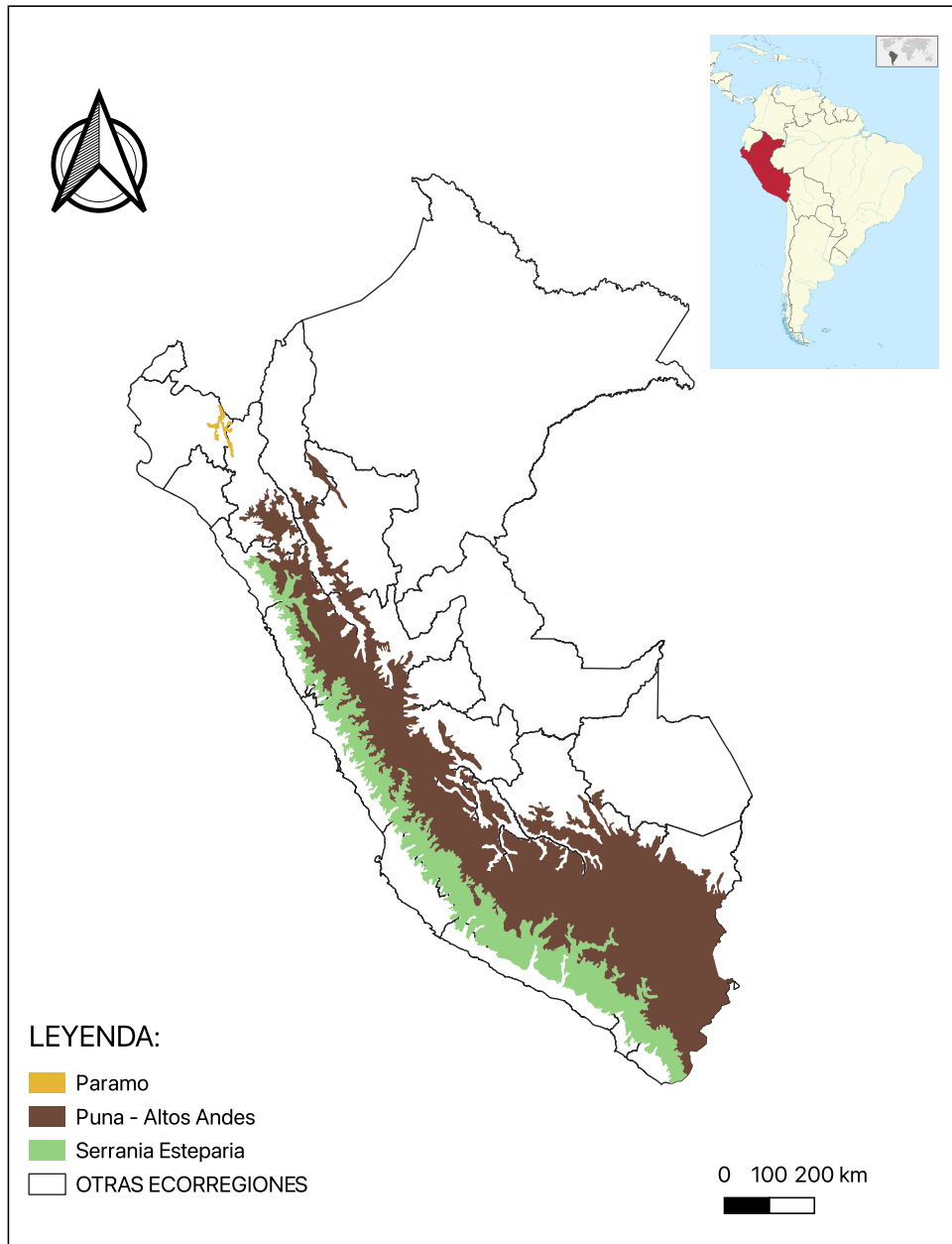
Mapa de pisos altitudinales de los andes del Perú-Pulgar Vidal



La **figura 13** es la distribución de los cuatro pisos altitudinales andinos establecidos por Javier Pulgar Vidal: **Quechua (2300-3500 m)**, **Suni (3500-4000 m)**, **Puna (4000-4800 m)** y **Janca (>4800 m)**. La cartografía evidencia el gradiente ecológico altitudinal característico de la cordillera peruana, desde los valles agrícolas y zonas de transición hasta las áreas de alta montaña y glaciares.

Figura 14

Mapa de ecorregiones andinas del Perú



La **figura 14** es la distribución de las principales ecorregiones andinas. En el extremo norte se observa el **Páramo**(2000 - 3400 m), presente en áreas reducidas y asociadas a sectores altoandinos húmedos. Hacia el centro y sur predominan la **Serranía Esteparia**(1000 - 3800 m) y la **Puna - Altos Andes**(3800 - 6700 m), que abarcan extensas superficies a lo largo de la cordillera.

5.2. Análisis de tendencias climáticas en la región andina

5.2.1. Revisión sistemática de tendencias climáticas en la región andina

La revisión sistemática de la literatura especializada permitió integrar de manera crítica un conjunto de estudios observacionales, de modelamiento y de síntesis climática que abordan las tendencias y proyecciones de la precipitación y la temperatura en los Andes peruanos. La amplitud de enfoques metodológicos desde mediciones in situ con estaciones meteorológicas y radares de perfil vertical, hasta modelos regionales y globales de circulación climática corregidos por sesgo ofrece una visión consistente aunque heterogénea en su detalle, que refleja la complejidad de los sistemas de montaña y las particularidades de la cordillera andina peruana. Las tablas de resultados presentadas sintetizan las principales evidencias, y permiten establecer patrones comunes que sustentan una interpretación robusta y orientada a la gestión de impactos.

A. Precipitación

En cuanto a la precipitación, los resultados muestran una señal compleja que combina variabilidad natural y tendencias vinculadas al cambio climático. En el Altiplano y en la cuenca del Mantaro, estudios basados en radares meteorológicos de perfil vertical y campañas de campo han evidenciado que la organización de las lluvias sigue un ciclo diurno marcado, con máximos durante la tarde y la noche, y con la existencia de una banda de fusión situada entre 4.3 y 4.7 km de altitud (Endries et al., 2018; Kumar et al., 2020). Este hallazgo es crucial, ya que señala que el incremento de la temperatura atmosférica favorece la transición de nieve a lluvia a cotas cada vez más elevadas, con implicaciones directas en la acumulación nival y en la disponibilidad de agua en temporadas secas.

En el norte, particularmente en la cuenca del río Piura, la evidencia muestra que los extremos de precipitación están fuertemente controlados por la variabilidad asociada al El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), con mayor intensificación durante su fase cálida (El Niño) incluida su manifestación costera, la cual explica una proporción dominante de la variabilidad de los máximos diarios del 70 % (Farías de Reyes et al., 2024). El estudio, basado en series históricas (1950–2023) e integración de estaciones, PISCO e índices océano-atmósfera, documenta contrastes de magnitud entre años neutrales y años El Niño: mientras los acumulados anuales típicos sin El Niño se aproximan a 50 mm/año,

durante eventos extremos como 1983 y 1998 se registraron acumulados superiores a 2000 mm. Asimismo, se estiman períodos de retorno aproximados de 25 años para eventos El Niño muy fuertes y 19 años para La Niña muy fuerte (frente a 2 años en condiciones neutrales), y se reporta un incremento reciente de la recurrencia del El Niño Costero en las últimas décadas (reducción del período de retorno de eventos muy fuertes de 5.2 a 3.4 años). Por otra parte, las proyecciones climáticas para el sur del Perú indican un comportamiento estacional diferenciado. En Tacna, se proyecta una reducción de las lluvias en verano austral (diciembre a febrero) de entre -10 y -20 %, mientras que en otoño (marzo a mayo) se esperan aumentos de 5 a 15 % (De la Cruz et al., 2025). Estos resultados evidencian que no solo importa la magnitud de la precipitación total, sino también la redistribución estacional, que afecta la recarga de acuíferos, el abastecimiento agrícola y la planificación de infraestructura hidráulica. A escala cordillerana, otros estudios proyectan un incremento promedio cercano al 12 % en la precipitación anual hacia finales de siglo, acompañado por un aumento de la frecuencia de extremos húmedos y de sequías prolongadas, lo cual refuerza la idea de una intensificación de la variabilidad hidrológica (Potter et al., 2023).

De manera complementaria, en escenarios de incremento de temperatura media de 2 °C, se estima que la fracción de precipitación sólida puede descender por debajo del 10 % en sectores como Huaytapallana, confirmando una clara transición hacia lluvias líquidas en cotas elevadas (Llactayo et al., 2024). Esta pérdida de acumulación nival compromete la función de regulación natural de los glaciares y nevados, y se traduce en una mayor escorrentía inmediata y en menor disponibilidad de agua durante la estación seca. Además, los impactos hidrológicos de estas transformaciones son igualmente evidentes. En la Quebrada del Diablo (Tacna), se proyecta un incremento de entre 10 y 25 % en los caudales máximos bajo escenarios de altas emisiones, lo que incrementa la exposición de la población a eventos extremos (Pino-Vargas et al., 2022). En el valle del río Cunas (Junín), los escenarios de modelación hidrodinámica anticipan un aumento de hasta el 20 % en el área inundada y en la profundidad de las láminas de agua (Torres-Mercado et al., 2025). Asimismo, un escenario de reducción de la precipitación anual en los Andes centrales del orden de -10 a -20 % tendría consecuencias severas para la dinámica glaciar y para la generación hidroeléctrica, al reducirse tanto la recarga sólida como la capacidad de regulación natural de las cuencas (Kronenberg et al., 2016). En conjunto (**Tabla 7**),

los estudios sobre precipitación muestran una señal heterogénea, pero convergen en señalar un futuro marcado por mayor variabilidad, con lluvias más intensas en algunos sectores, déficit en otros, y una reducción clara de la fracción sólida.

Tabla 7

Estudios sobre precipitación analizados en la revisión sistemática

ID	Autor y año	Área de estudio	Hallazgos principales
P1	Potter et al. (2023)	Cordilleras Blanca– Vilcanota	↑T +3.6 y +4.1 °C al 2100; ↑P anual +12 %; eventos extremos y sequías más frecuentes
P2	Llactayo et al. (2024)	Andes centrales (Huaytapallana)	↑T +2 °C; fracción sólida < 10 %; incremento de lluvias en zonas altas
P3	Endries, J. L. et al. (2018)	Altiplano sur (Perú)	56 % estratiforme; 44 % convectiva; banda brillante de 4.5 - 4.7 km
P4	Kumar, S. et al. (2020)	Cuenca Mantaro (Huancayo)	Ciclo bimodal tarde/noche; banda brillante 4.3 - 4.7 km
P5	Farías de Reyes et al. (2024)	Cuenca Piura (costa norte)	ENSO explica el 70 % de máximos; años extremos: 1982-83, 1997-98 y 2017
P6	De la Cruz, G. et al. (2025)	Región Tacna (sur)	↑T +2-3 °C; P: Junio, Julio y Agosto (-10 a -20 %); Marzo, Abril y Mayo (+5 a +15 %)
P7	Pino-Vargas et al. (2022)	Tacna (Quebrada del Diablo)	↑ caudales pico 10-25 % (RCP 8.5)
P8	Torres-Mercado et al. (2025)	Junín (río Cunas)	↑ área inundada hasta 20 % (RCP 8.5)
P9	Kronenberg et al. (2016)	Andes centrales	↓P -10 a -20 % anual; riesgo para glaciares e hidroenergía
P10	Tafur Anzualdo et al. (2024)	Perú (nacional)	Costa: 22-174 mm/año; Sierra: 570-834 mm; Selva: 1156-2093 mm
P11	Imfeld et al. (2021)	Sur andino (Perú)	Tendencias positivas NW/C y negativas hacia el este

B. Temperatura

La evidencia sobre temperatura es más consistente y homogénea que la de precipitación. En el Altiplano peruano - boliviano, se reporta un incremento de la temperatura máxima diaria de entre 0.15 y 0.25 °C por década y un aumento en la temperatura mínima de aproximadamente 0.08 °C por década, aunque no siempre significativo (López-Moreno

et al., 2016). En el sur andino, la tendencia es igualmente clara: la temperatura mínima en invierno austral muestra un incremento de 0.16°C por década, estadísticamente significativo, mientras que la máxima evidencia señales positivas generalizadas (Imfeld et al., 2021). A escala nacional, el conjunto de datos PISCOt v1.2 ofrece evidencia de alta resolución espacial (igual a km), confirmando las tendencias observadas y validando la magnitud del calentamiento. Sus evaluaciones muestran un error medio absoluto de 1.2 a 1.4°C , con diferencias de más de 6°C respecto a reanálisis internacionales en zonas altoandinas, lo que reafirma la necesidad de contar con información local ajustada a la complejidad topográfica del país (Huerta et al., 2023).

Las proyecciones confirman un aumento sostenido de la temperatura en las próximas décadas. En Tacna, hacia 2035 se proyectan incrementos de entre 0.3 y 0.6°C en las temperaturas mínimas y de 0.1 a 0.3°C en las máximas, mientras que hacia 2080 los incrementos llegarían a $+1.5$ a $+2.1^{\circ}\text{C}$ en las mínimas y $+1.0$ a $+1.5^{\circ}\text{C}$ en las máximas (De la Cruz et al., 2025). En un horizonte de fin de siglo, bajo escenarios de altas emisiones, el calentamiento total en las cordilleras peruanas oscilaría entre $+3.6$ y $+4.1^{\circ}\text{C}$ (Potter et al., 2023). Incluso aumentos moderados de 1°C en el corto plazo ya se asocian a reducciones significativas en el rendimiento de cultivos de secano como maíz y papa en los Andes centrales, evidenciando la sensibilidad del sistema agrícola andino al clima (Sanabria et al., 2014). A nivel nacional, estudios de síntesis (**Tabla 8**) corroboran este panorama: las temperaturas medias recientes oscilan 12.6 a 14.4°C en la sierra con incrementos proyectados de entre 0.2 y 0.5°C hacia 2025 (Tafur Anzualdo et al., 2024).

Tabla 8*Estudios sobre temperaturas analizados en la revisión sistemática*

ID	Autor y año	Área de estudio	Hallazgos principales
T1	López-Moreno et al. (2016)	Altiplano Perú - Bolivia	T _{máx} ↑ 0.15-0.25 °C/década; T _{min} ↑ 0.08 °C/década
T2	Imfeld et al. (2021)	Sur andino (Perú)	T _{min} (Junio-Julio-Agosto) ↑ 0.16 °C/década (p = 0.02)
T3	Huerta et al. (2023)	Perú (nacional, 1 km)	MAE: 1.4 °C (T _{max}); 1.2 °C (T _{min}); diferencias > 6 °C en los Andes
T4	De la Cruz, G. et al. (2022)	Tacna (sur)	T _{min} ↑ 0.3–0.6 °C y T _{max} ↑ 0.1–0.3 °C (2035); hasta +2 °C (2080)
T5	Potter et al. (2023)	Cordilleras del Perú	↑T 3.6-4.1 °C (RCP 8.5 al 2100)
T6	Sanabria et al. (2014)	Andes centrales	↑T ≈ 1 °C (2030); ↓ rendimiento de maíz y papa
T7	Tafur Anzualdo et al. (2024)	Perú (nacional)	Costa: 21.1–22.6 °C; Sierra: 12.6–14.4 °C; Selva: 22.7–25.7 °C

En síntesis, los resultados de esta revisión sistemática confirman que el clima de los Andes peruanos se encuentra en un proceso de transformación profunda, caracterizado por un calentamiento inequívoco y sostenido, una redistribución estacional y espacial de la precipitación, y un cambio de fase nival a pluvial en las zonas altas. La consecuencia inmediata de estos procesos es una mayor variabilidad hidrológica, con extremos de inundación y sequía más frecuentes, y con impactos crecientes en glaciares, ecosistemas y sectores productivos.

5.2.2. Modelamiento de variables climáticas en la región andina

En este apartado se presentan los resultados del **análisis espacio temporal de variables climáticas** en la región andina del Perú, integrando (A) la **representación espacial** de los campos climáticos y (B) la **evaluación estadística de tendencias temporales**. El objetivo es demostrar, con rigor metodológico, que los patrones climáticos observados no solo tienen una distribución geográfica heterogénea condicionada por la compleja

topografía andina sino que además exhiben, o no, señales de cambio sistemático a lo largo del periodo de estudio.

El procesamiento se realizó a partir de datos **PISCO-SENAMHI** (1981-2016), mediante un flujo reproducible desarrollado en **R/RStudio**, que permitió generar cartografía climática (valores medios espaciales) y series temporales agregadas por unidades territoriales. Para evaluar la presencia de tendencias monótonas en las series climáticas, se empleó la prueba **no paramétrica de Mann-Kendall**, por su uso extendido en climatología y su robustez frente a supuestos de normalidad. En conjunto, este enfoque fortalece la interpretación de resultados al responder dos preguntas complementarias: **(1) cómo se organiza espacialmente la variable climática dentro de cada unidad, y (2) si existe evidencia estadística de cambio en el tiempo.**

1. Resultados de variabilidad climática en las ecorregiones andinas - Antonio Brack

A. Serranía Esteparia

Temperatura máxima. La **figura 15** estimada con datos PISCO-SENAMHI representa la Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en la Serranía Esteparia para el periodo 1981-2016. En ella se evidencia un rango térmico aproximado que varía desde 15°C hasta valores superiores a 30°C, evidenciando una heterogeneidad espacial marcada dentro de la unidad, lo que confirma la existencia de contrastes intrarregionales en el campo de Tmax. Esta variabilidad espacial se expresa a lo largo de la unidad, mostrando sectores relativamente más cálidos en el lado occidental límite con el desierto costero y otros con valores moderados dentro del mismo dominio territorial, lo cual queda reflejado en el gradiente de la escala de colores.

En el componente temporal, la serie de temperatura máxima media anual agregada para la ecorregión muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa durante 1981-2016 (**Figura 16**). La prueba estadística de Mann Kendall reporta un estadístico $\tau = 0.394$ con valor $p = 0.000767$, evidenciando un incremento monótono de Tmax hacia los años más recientes. En conjunto, los resultados espacial y temporal documentan simultáneamente la variabilidad térmica interna de la Serranía Esteparia y la presencia de una señal positiva de cambio en la temperatura máxima a escala regional en el periodo evaluado.

Figura 15

Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en la Serranía Esteparia para el periodo 1981-2016.

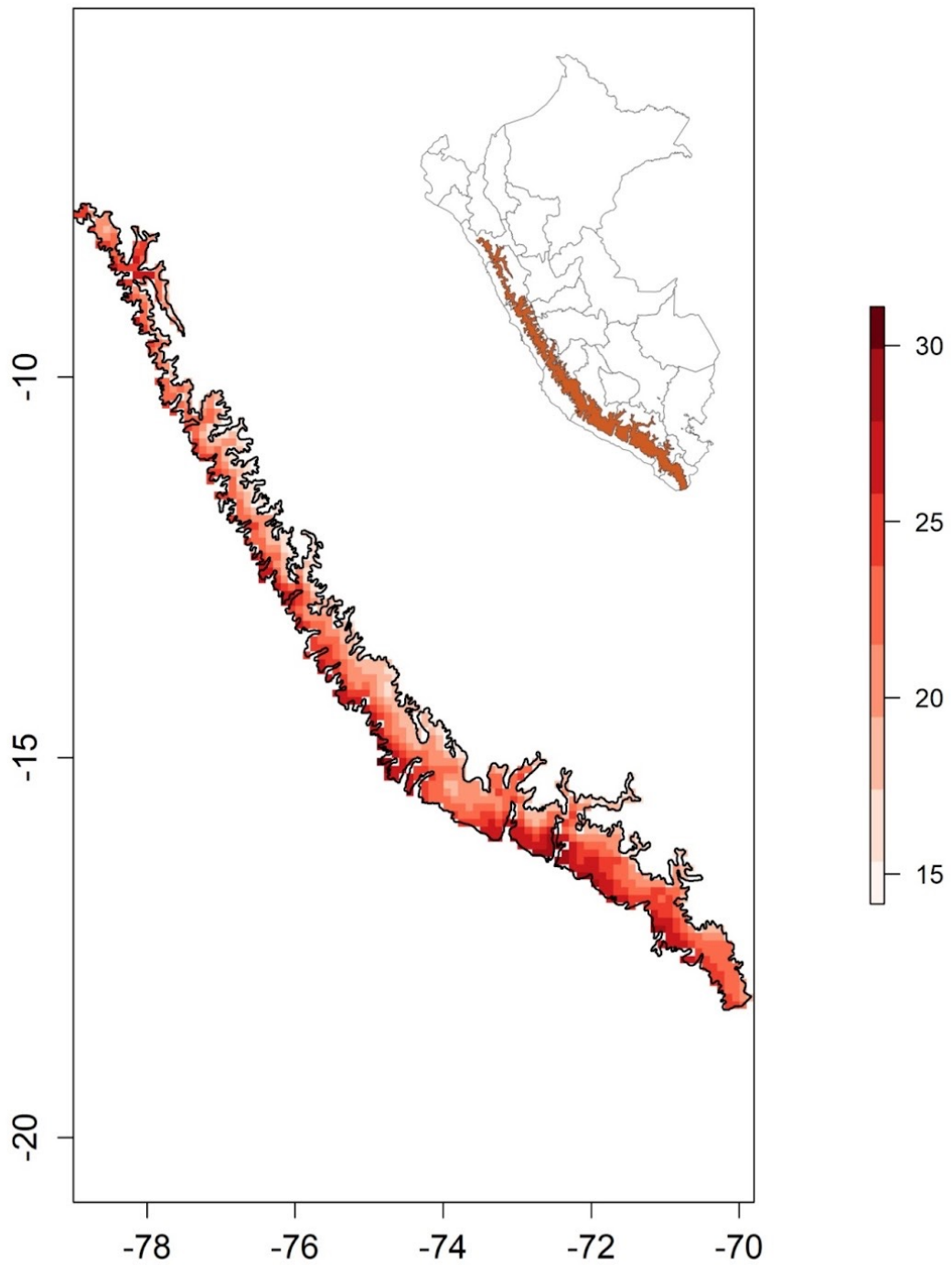
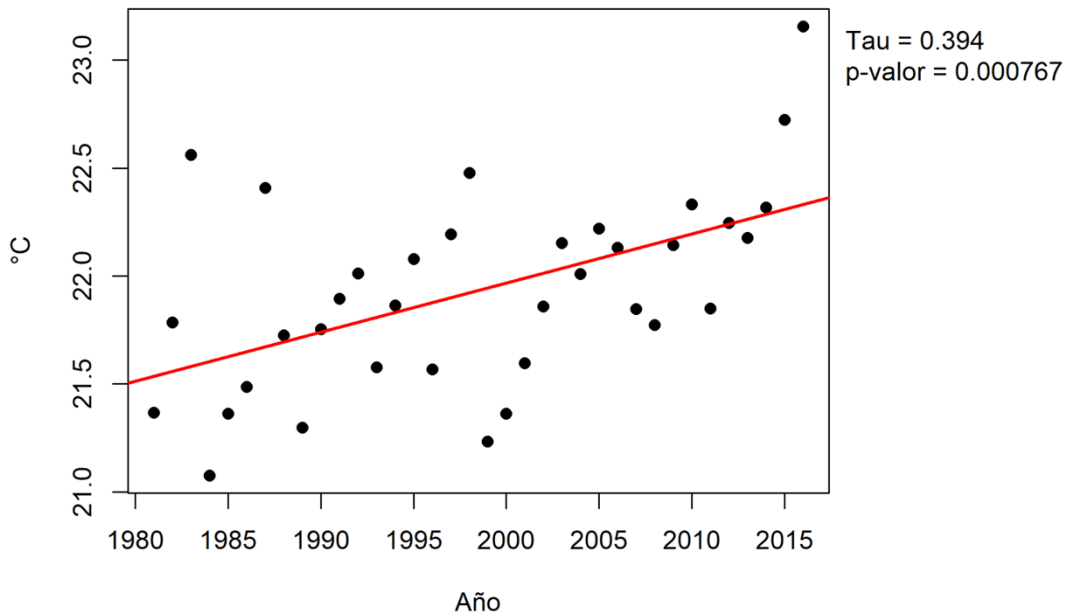


Figura 16

Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en la Serranía Esteparia durante 1981 - 2016

Tendencia temporal (Mann-Kendall) - Serrania - Antonio Brack Temperatura máxima



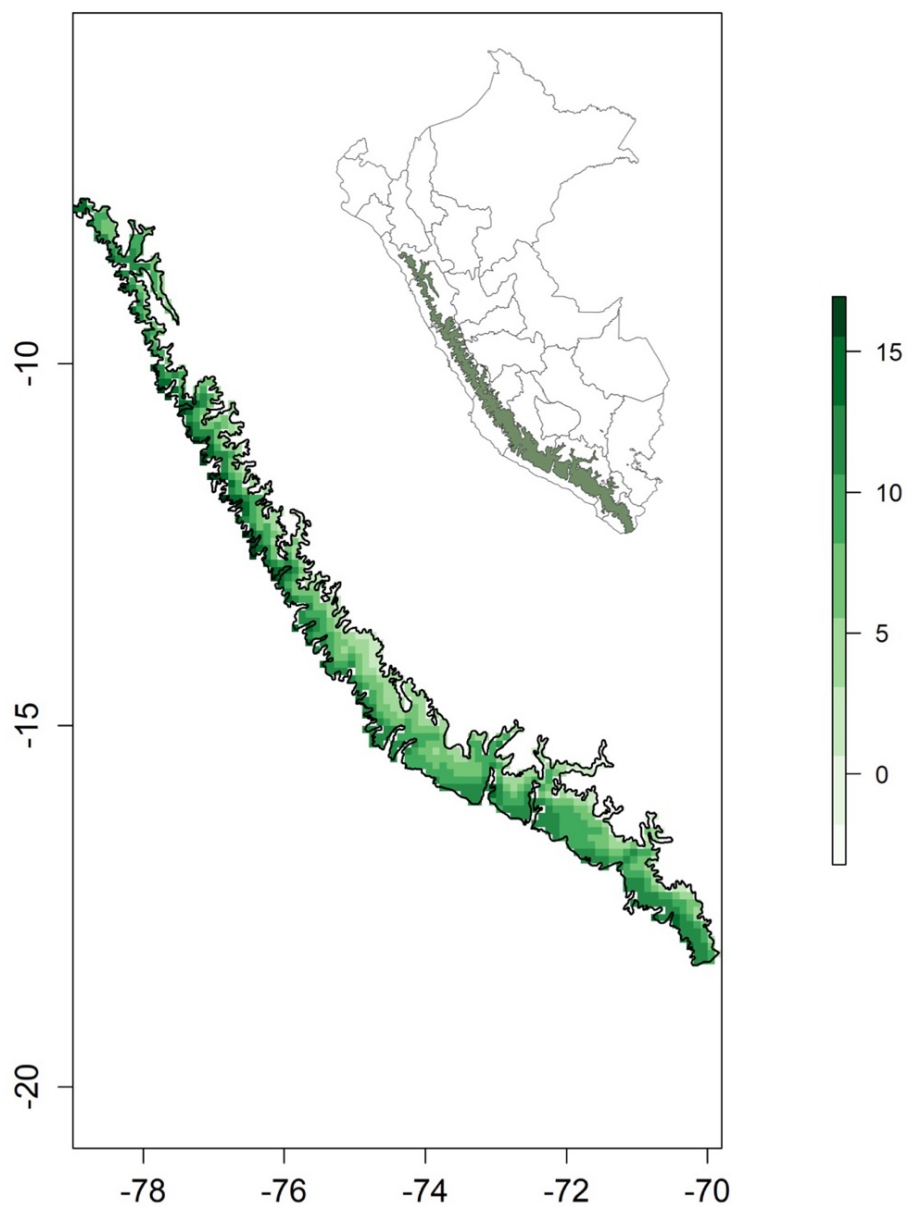
La **figura 16** evaluada mediante la prueba Mann Kendall. Se observa una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.394$; $p = 0.000767$). Los puntos representan los valores anuales agregados (promedio areal) de la ecorregión y la línea indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

Temperatura mínima. En la Serranía Esteparia presenta una distribución espacial heterogénea (**Figura 17**). El patrón cartográfico evidencia contrastes intrarregionales, con sectores de menores Tmin y otros de mayores Tmin, reflejados en la gradación de la escala de colores. En términos cuantitativos, la escala representada abarca aproximadamente desde valores cercanos a 0 °C hasta los 15 °C, lo que confirma una amplitud térmica espacial relevante dentro de la unidad analizada.

En el análisis temporal, la serie de temperatura mínima media anual muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa durante 1981 – 2016 (**Figura 18**). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.425$ con $p = 0.000276$, evidenciando un incremento monótono de la Tmin hacia los años recientes para la Serranía Esteparia.

Figura 17

Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en la Serranía Esteparia para el periodo 1981-2016

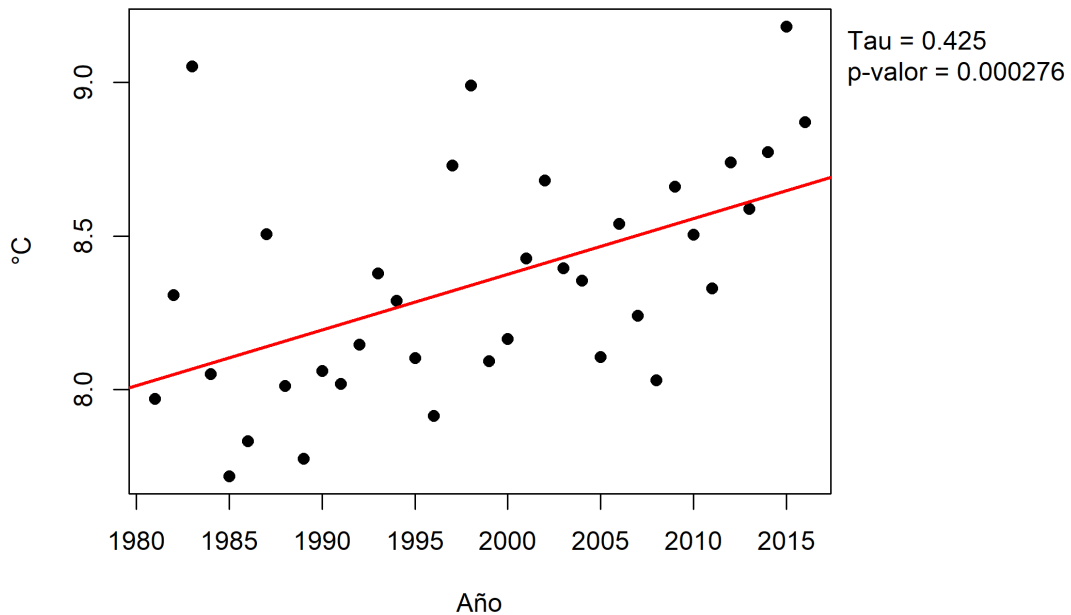


La **figura 17** estimada a partir de datos PISCO-SENAMHI. La escala cromática representa un gradiente aproximado desde valores cercanos a 0°C hasta 15°C, evidenciando heterogeneidad intrarregional con zonas de menor temperatura mínima en el sector occidental y mayor temperatura mínima en el sector oriental dentro de la unidad.

Figura 18

Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en la Serranía Esteparia durante 1981-2016

Tendencia temporal (Mann-Kendall) - Serranía - Antonio Brack Temperatura mínima



La **figura 18** muestra la tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en la Serranía Esteparia durante 1981-2016, evaluada mediante la prueba Mann-Kendall. Se observa una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.425$; $p = 0.000276$). Los puntos representan los valores anuales agregados (promedio areal) de la ecorregión y la línea roja indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

Precipitación. La precipitación promedio en la Serranía Esteparia presenta una distribución espacial heterogénea (**Figura 19**). El mapa evidencia contrastes intrarregionales con sectores de menor y mayor precipitación dentro de la unidad, observándose un gradiente representado por la escala de colores que abarca aproximadamente desde valores cercanos a 20 mm hasta mayores de 120 mm en el periodo analizado (1981-2016). Este patrón confirma que, aun dentro de una misma ecorregión, la precipitación no se distribuye de manera uniforme y exhibe variabilidad espacial claramente distinguible en la cartografía.

En el componente temporal, la serie de precipitación media anual analizada para la ecorregión Serranía Esteparia no muestra una tendencia monótona estadísticamente significativa durante 1981-2016 (**Figura 20**). La prueba de Mann-Kendall reporta $\tau = 0.079$ con $p = 0.505$, indicando ausencia de evidencia estadística para un incremento o disminución sistemática de la precipitación en el periodo evaluado.

Figura 19

Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en la Serranía Esteparia para el periodo 1981-2016

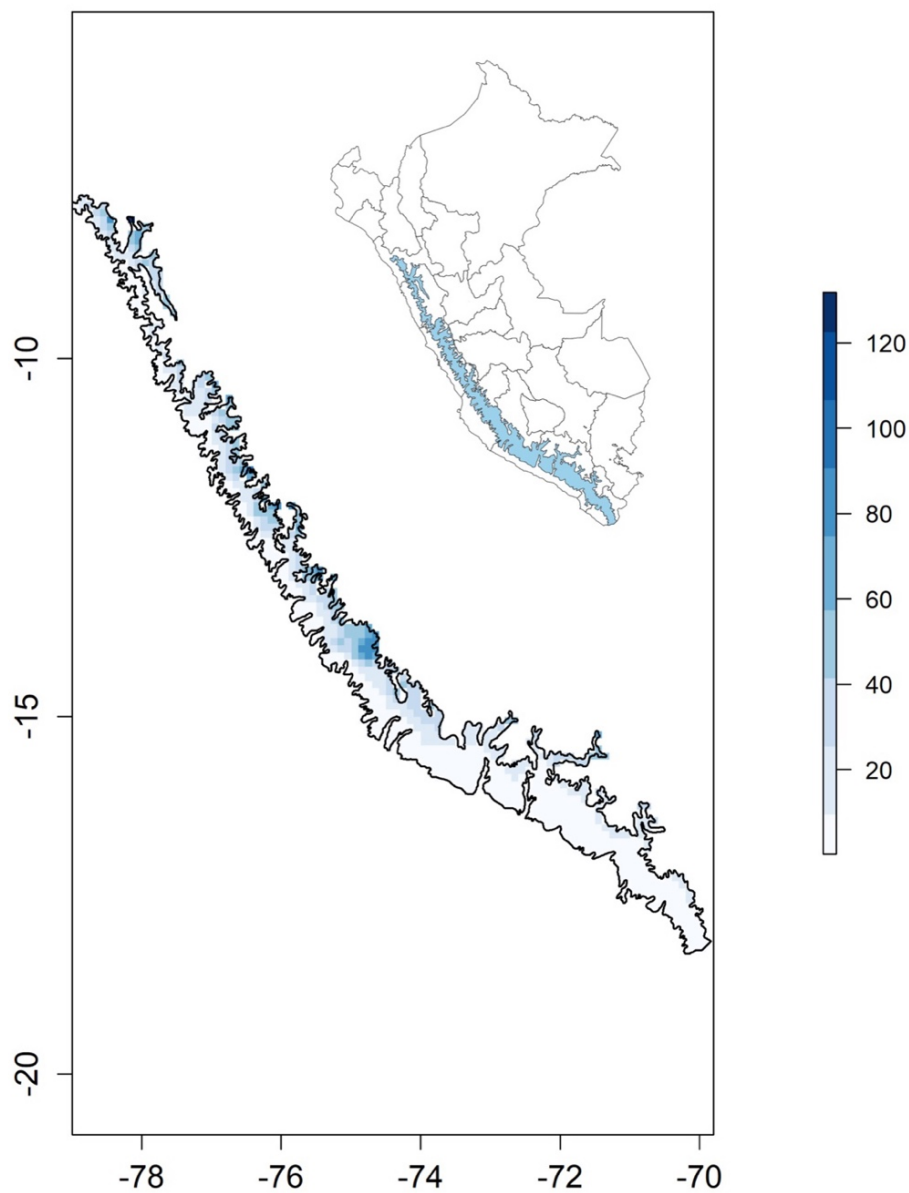
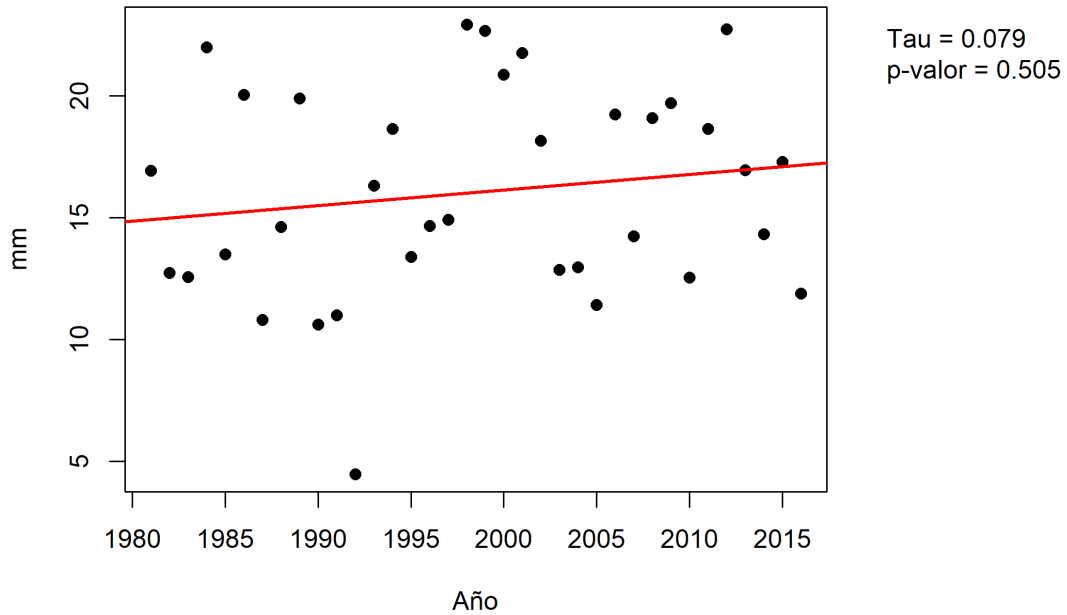


Figura 20

Tendencia temporal de la precipitación media anual (mm) en la Serranía Esteparia durante 1981-2016

Tendencia temporal (Mann-Kendall) - Serrania - Antonio Brack Precipitación



En la **figura 20** evaluada mediante la prueba estadística de Mann Kendall. El resultado indica tendencia no significativa ($\tau = 0.079$; $p = 0.505$). En un rango de precipitación que va desde los 5 mm hasta mayores de 20 mm de precipitación; los puntos representan los valores anuales agregados (promedio areal) de la ecorregión y la línea roja indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

B. Puna y los Altos Andes:

Temperatura máxima. En la **figura 21** se aprecia la distribución espacial de la temperatura máxima promedio ($^{\circ}\text{C}$) en la unidad **Puna y Altos Andes** para el periodo analizado de 1981-2016, estimada a partir de datos PISCO-SENAMHI. La escala cromática representa un rango aproximado de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $>25\text{ }^{\circ}\text{C}$, evidenciando heterogeneidad intrarregional con contrastes térmicos internos.

En el componente temporal, la serie de Tmax media anual agregada para la Puna y Altos Andes muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa durante 1981-2016 (**Figura 22**). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.435$ con $p = 2 \times 10^{-4}$, lo que indica un incremento monótono de la Tmax hacia los años más recientes en el periodo evaluado.

Figura 21

Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en la unidad Puna y Altos Andes para el periodo 1981-2016

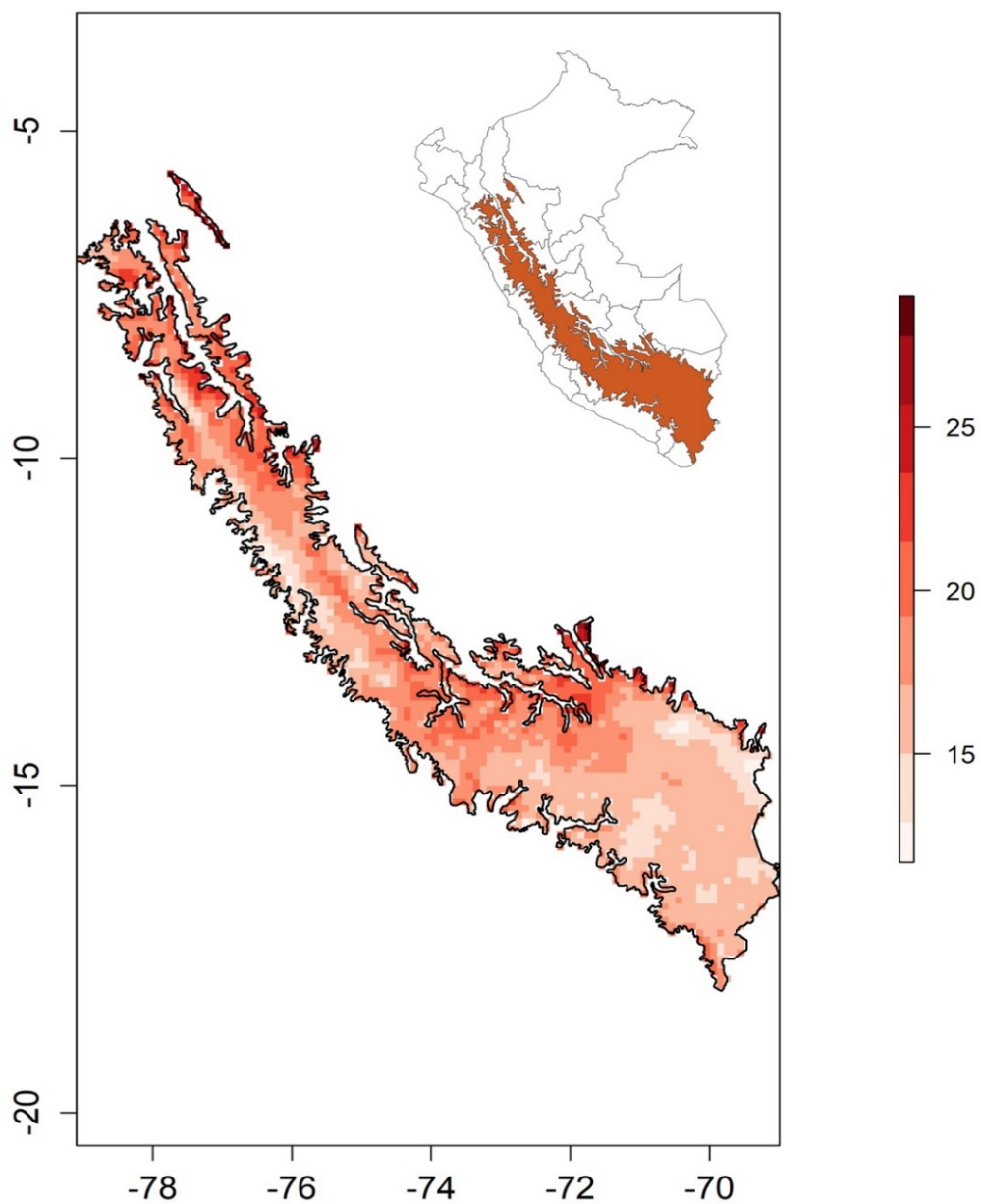
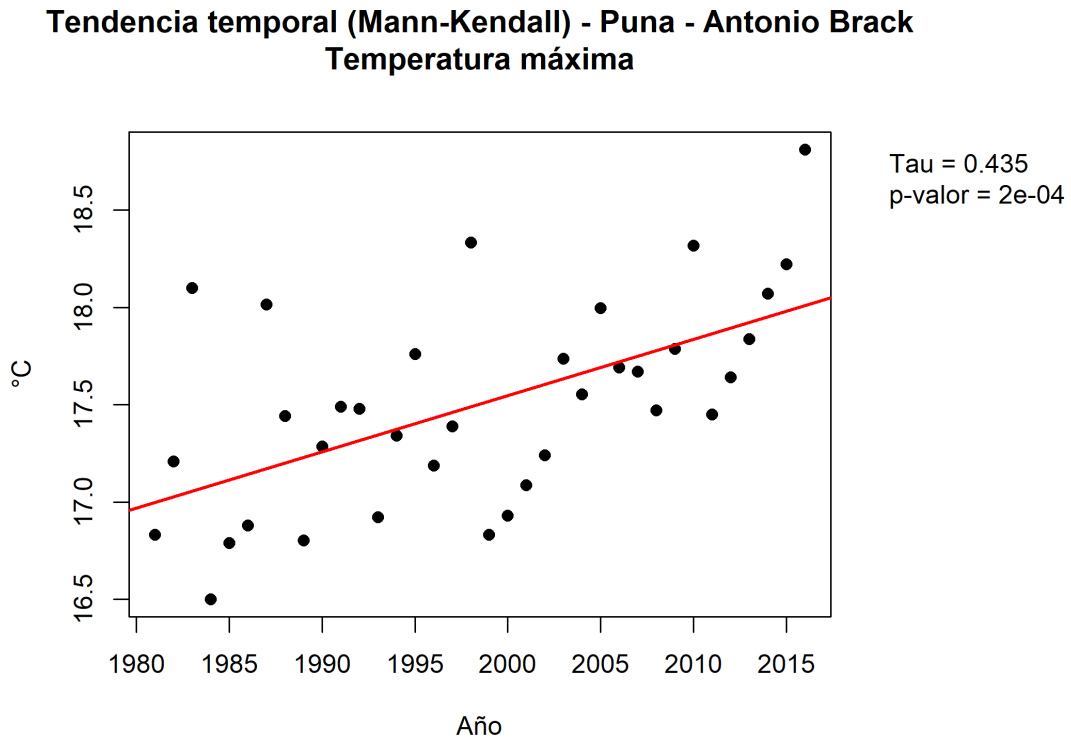


Figura 22

Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en la unidad Puna y Altos Andes durante 1981-2016



La **figura 22** evaluada mediante la prueba Mann Kendall muestra la tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en la unidad Puna y Altos Andes durante 1981-2016. Se observa una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.435$; $p = 2 \times 10^{-4}$). Los puntos representan valores anuales agregados (promedio areal) y la línea roja indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

Temperatura mínima. La temperatura mínima promedio en la unidad Puna y Altos Andes presenta una configuración espacial marcadamente heterogénea (**Figura 23**). El mapa evidencia un rango térmico aproximado que se extiende desde valores cercanos a -5 °C hasta ≥ 15 °C, según la escala representada. Esta amplitud se expresa en la presencia de sectores con T_{min} más bajas (tonalidades más claras) y otros con T_{min} relativamente más altas (tonalidades más intensas), confirmando contrastes intrarregionales dentro de la unidad.

En el componente temporal, la serie de Tmin media anual agregada para la Puna y Altos Andes muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa durante 1981-2016 (**Figura 24**). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.451$ con $p = 0.000116$, lo que evidencia un incremento monótono de la Tmin hacia los años más recientes. Los valores anuales representados se sitúan aproximadamente entre 2.0 y 3.2 °C, con una trayectoria general ascendente respaldada por la significancia estadística del test.

Figura 23

Distribución espacial de la temperatura mínima media (°C) en la unidad Puna y Altos Andes para el periodo 1981-2016

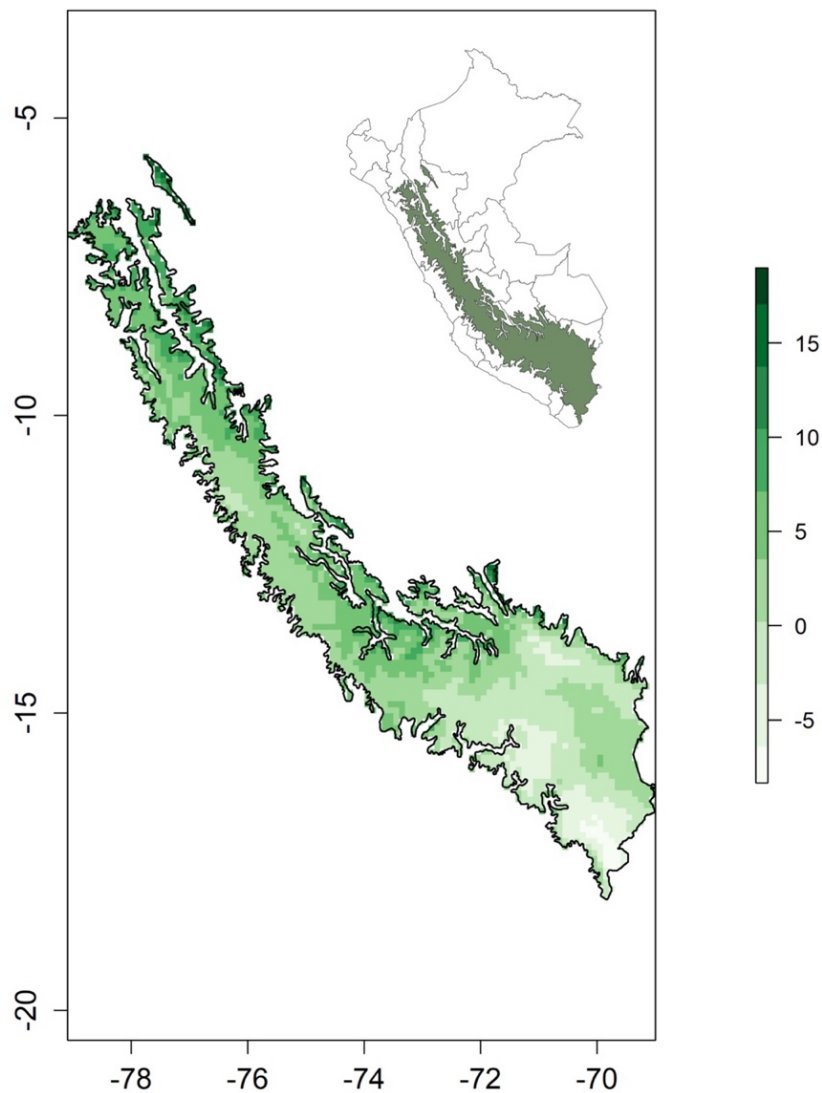
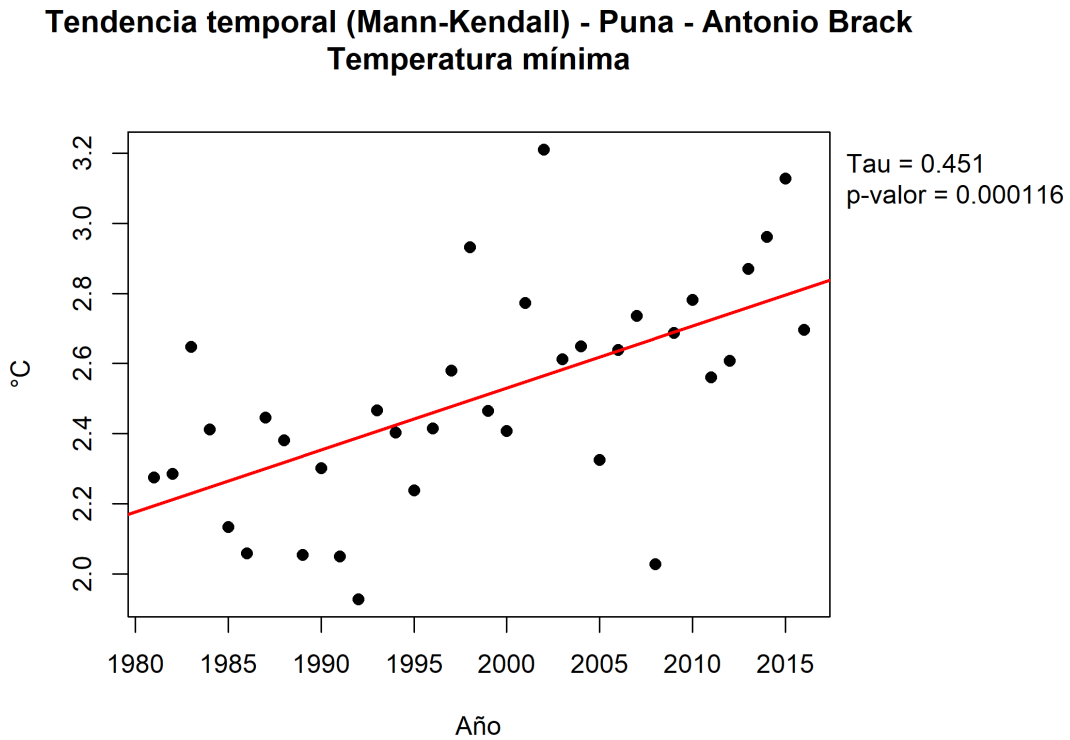


Figura 24

Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en la unidad Puna y Altos Andes durante 1981-2016



La **figura 24** evaluada mediante la prueba Mann Kendall. Se identifica una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.451$; $p = 0.000116$). Los puntos representan los valores anuales agregados (promedio areal) y la línea roja indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

Precipitación. La precipitación promedio en la unidad Puna y Altos Andes presenta una distribución espacial heterogénea (**Figura 25**). El mapa evidencia un gradiente con valores aproximados desde los 50 mm hasta mayores de 300 mm, según la escala representada, con sectores de menor precipitación (tonos más claros) y áreas localizadas con mayores (tonos más intensos). Esta configuración confirma la presencia de contrastes intrarregionales en la precipitación dentro de la unidad analizada.

En el análisis temporal, la serie de precipitación media anual agregada para la Puna y Altos Andes no muestra una tendencia monótona estadísticamente significativa durante

1981-2016 (**Figura 26**). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.092$ con $p = 0.438$, lo que indica ausencia de evidencia estadística para un incremento o disminución sistemática en el periodo evaluado.

Figura 25

Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en la unidad Puna y Altos Andes para el periodo 1981-2016

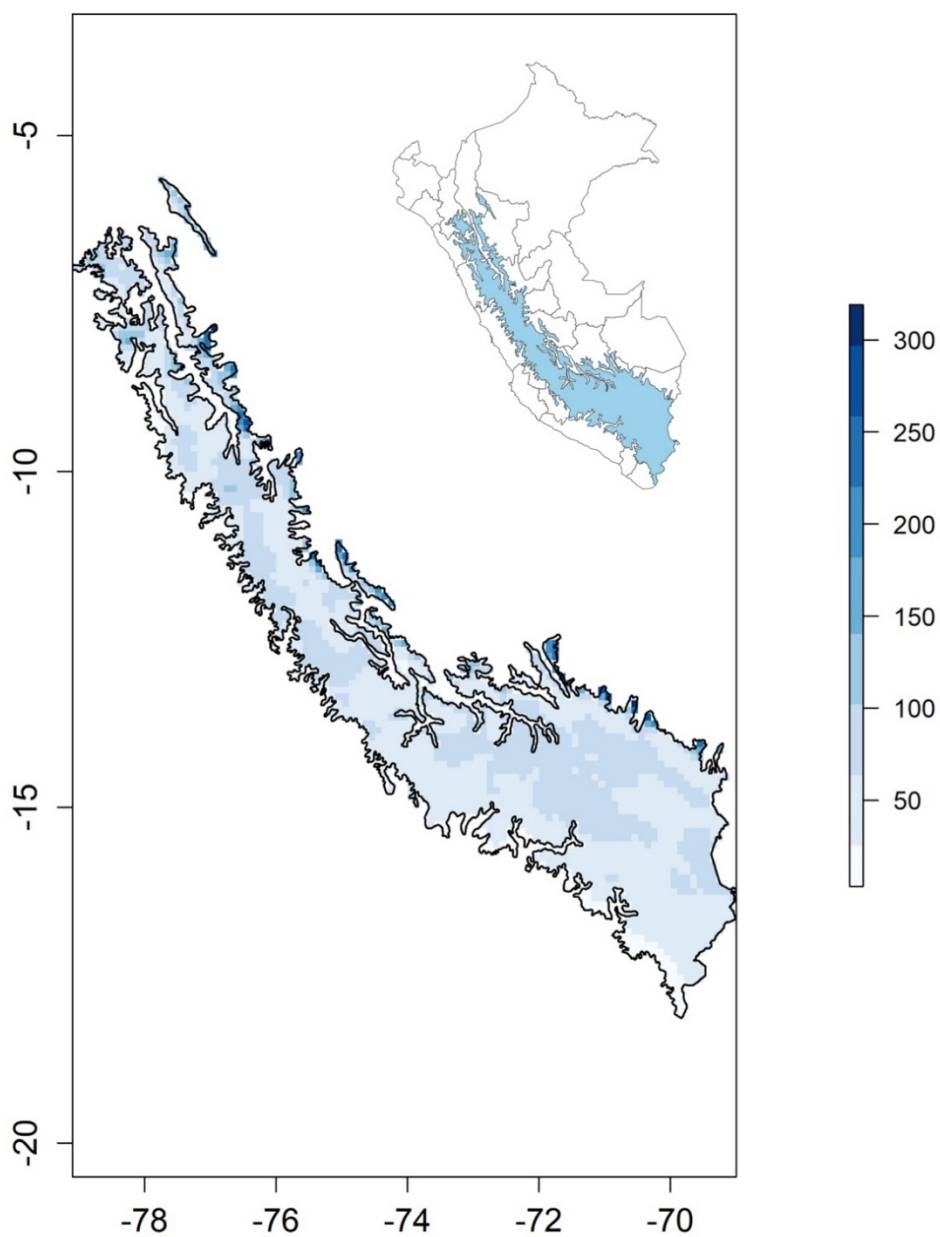
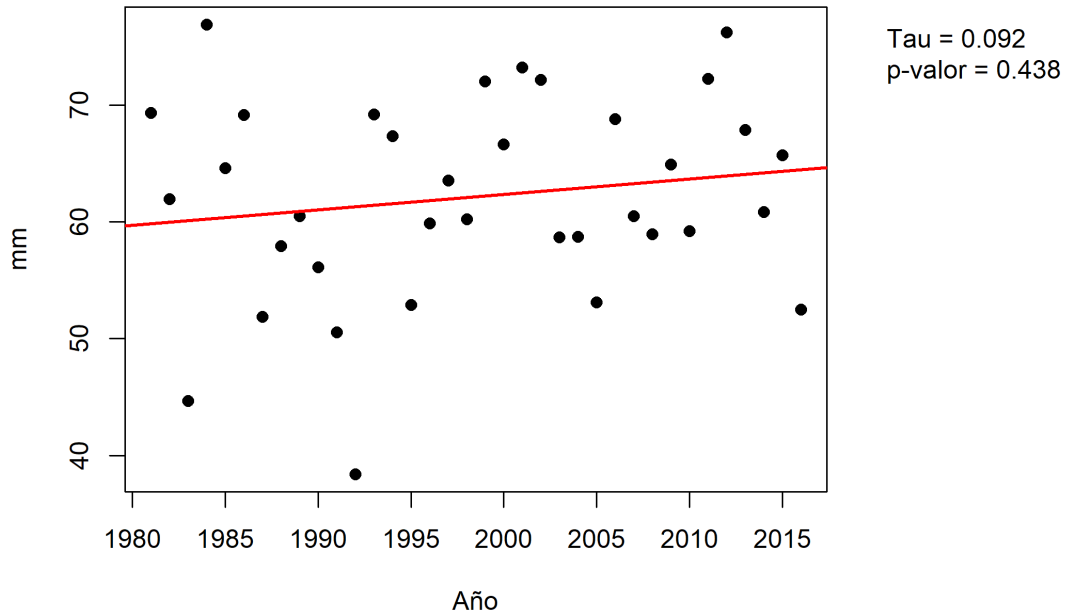


Figura 26

Tendencia temporal de la precipitación media anual (mm) en la unidad Puna y Altos Andes durante 1981-2016

**Tendencia temporal (Mann-Kendall) - Puna - Antonio Brack
Precipitación**



La **figura 26** evaluada mediante la prueba Mann Kendall muestra que el resultado indica tendencia no significativa ($\tau = 0.092$; $p = 0.438$). Los puntos representan valores anuales de precipitación agregados (promedio areal) en un rango de 40 mm hasta superiores a 70 mm y la línea roja indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

C. Páramo

Temperatura máxima. La ecorregión Páramo presenta una extensión espacial reducida dentro del territorio peruano, lo que se refleja en un dominio cartográfico acotado para el análisis espacial. Aun con esta limitada cobertura, la temperatura máxima promedio muestra variabilidad interna, con valores aproximados entre 20.5 °C y 23.5 °C según la escala representada, evidenciando contrastes locales dentro del área delimitada (**Figura 27**).

En el análisis temporal, la serie de temperatura máxima media anual agregada para el Páramo muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa durante 1981-2016 (**Figura 28**). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.235$ con $p = 0.0453$, indicando una señal positiva de cambio en la Tmax a lo largo del periodo evaluado.

Figura 27

Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en la ecorregión Páramo para el periodo 1981-2016

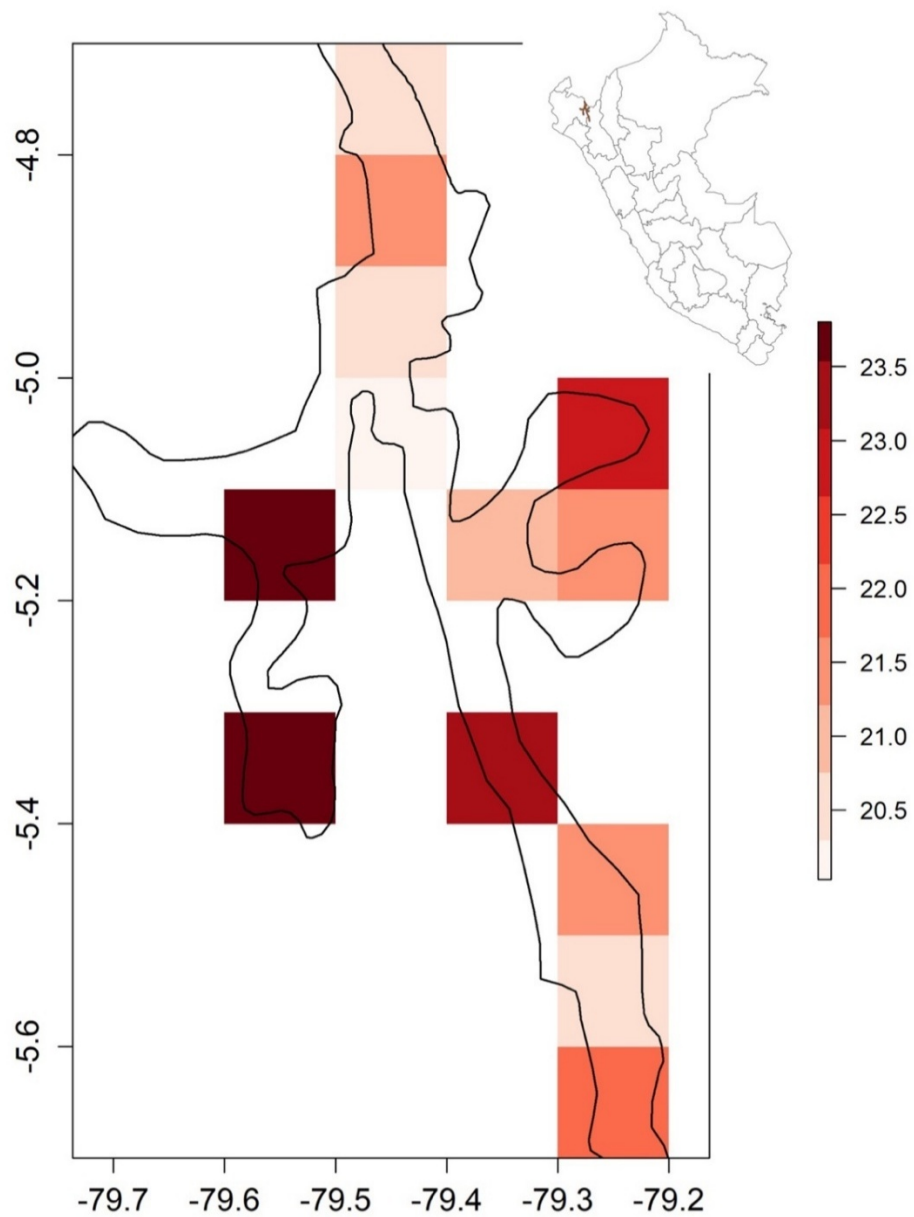
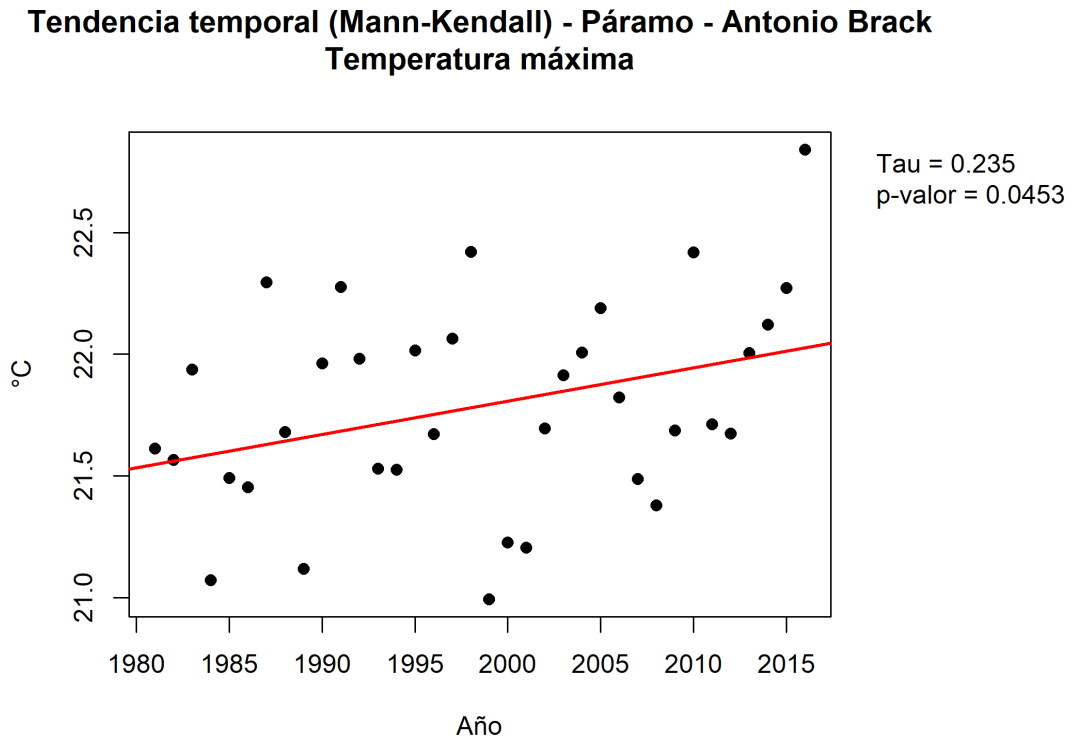


Figura 28

Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en la ecorregión Páramo durante 1981-2016



La **figura 28** evaluada mediante la prueba Mann Kendall identifica una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.235$; $p = 0.0453$). Los puntos representan valores anuales de temperatura máxima media (promedio areal) en un rango de 21 °C hasta los 22.5 °C y la línea roja indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

Temperatura mínima. La ecorregión Páramo, de cobertura espacial reducida en el territorio peruano, presenta una distribución espacial de la temperatura mínima promedio con variabilidad interna (**Figura 29**). El mapa muestra valores aproximados entre 11.0 °C y 13.5 °C, según la escala representada, evidenciando contrastes locales dentro del área delimitada, con celdas de menor T_{min} (tonos más claros) y otras de mayor T_{min} (tonos más intensos).

En el componente temporal, la serie de temperatura mínima media anual agregada para el Páramo muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa durante 1981-

2016 (**Figura 30**). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.283$ con $p = 0.0159$, lo que confirma un incremento monótono de la Tmin hacia los años más recientes en el periodo evaluado.

Figura 29

Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en la ecorregión Páramo para el periodo 1981-2016

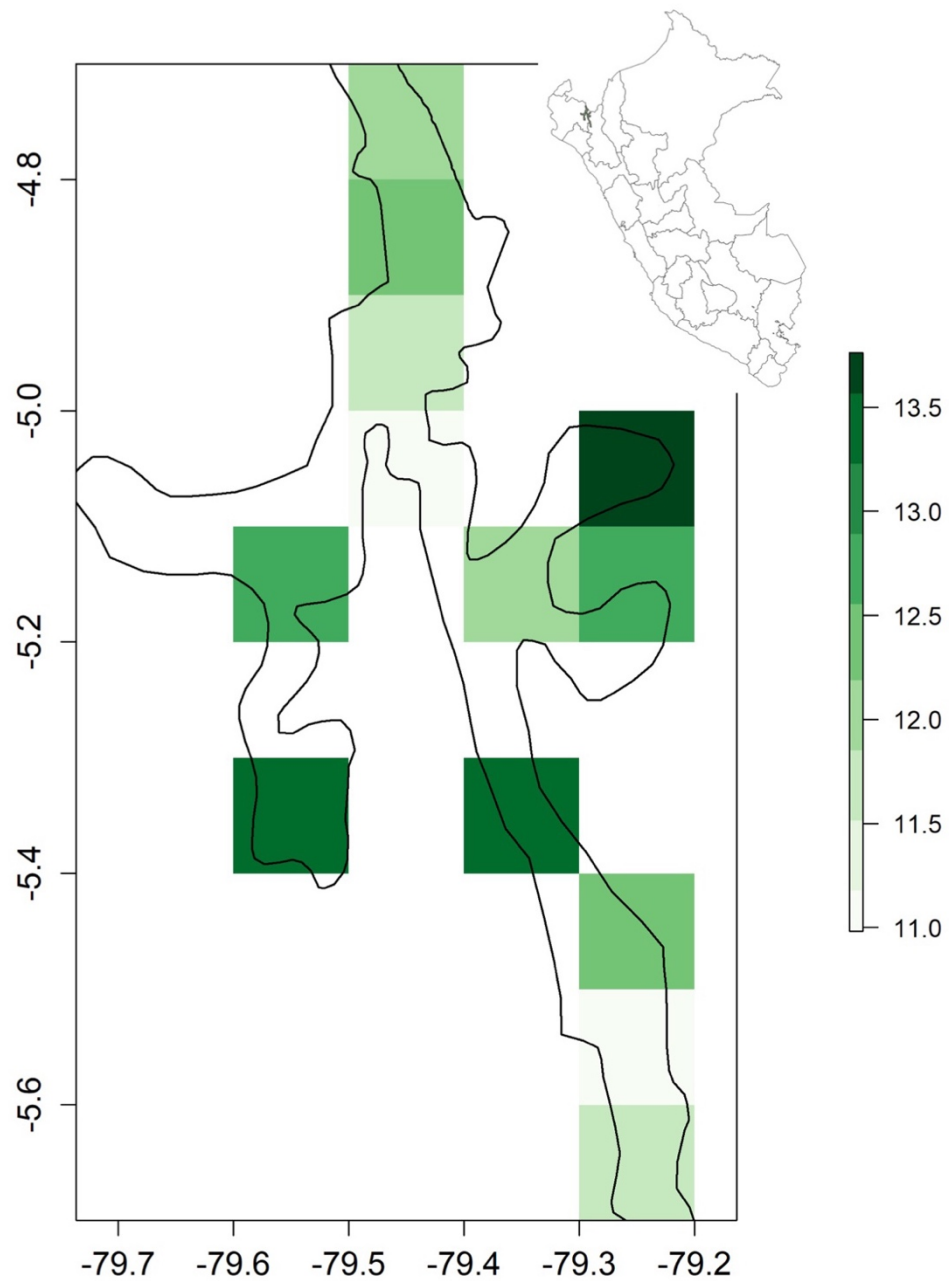
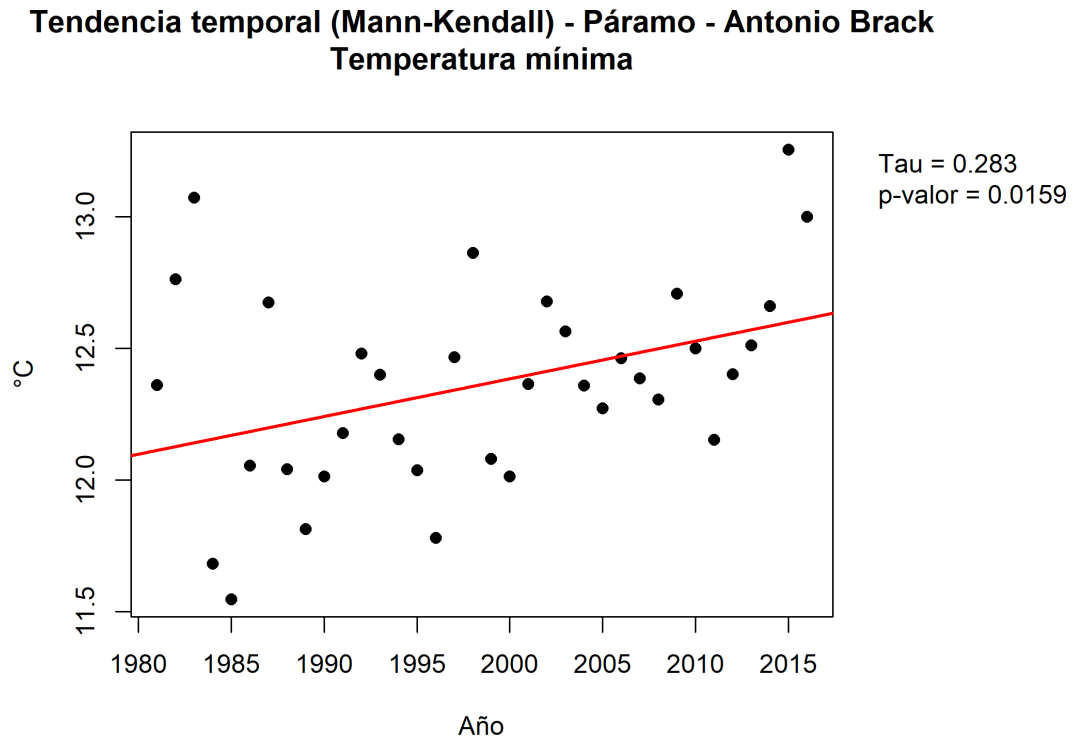


Figura 30

Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en la ecorregión Páramo durante 1981-2016



La **figura 30** evaluada mediante la prueba Mann Kendall identifica una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.283$; $p = 0.0159$). Los puntos representan valores anuales de temperatura mínima media (promedio areal) en un rango de 11.5 °C hasta los 13 °C y la línea roja indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

Precipitación. La ecorregión Páramo presenta una distribución espacial de la precipitación promedio con variabilidad local (**Figura 31**). El mapa muestra valores aproximados en el rango de 40 mm a 80 mm, de acuerdo con la escala representada, evidenciando celdas con menores valores (tonos más claros) y otras con mayores (tonos más intensos) dentro del área delimitada.

En el análisis temporal, la serie de precipitación media anual agregada para el Páramo no evidencia una tendencia monótona estadísticamente significativa durante 1981–2016 (**Figura 32**). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.073$ con $p = 0.54$, indicando

ausencia de evidencia estadística para un incremento o disminución sistemática de la precipitación en el periodo evaluado.

Figura 31

Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en la ecorregión Páramo para el periodo 1981 - 2016

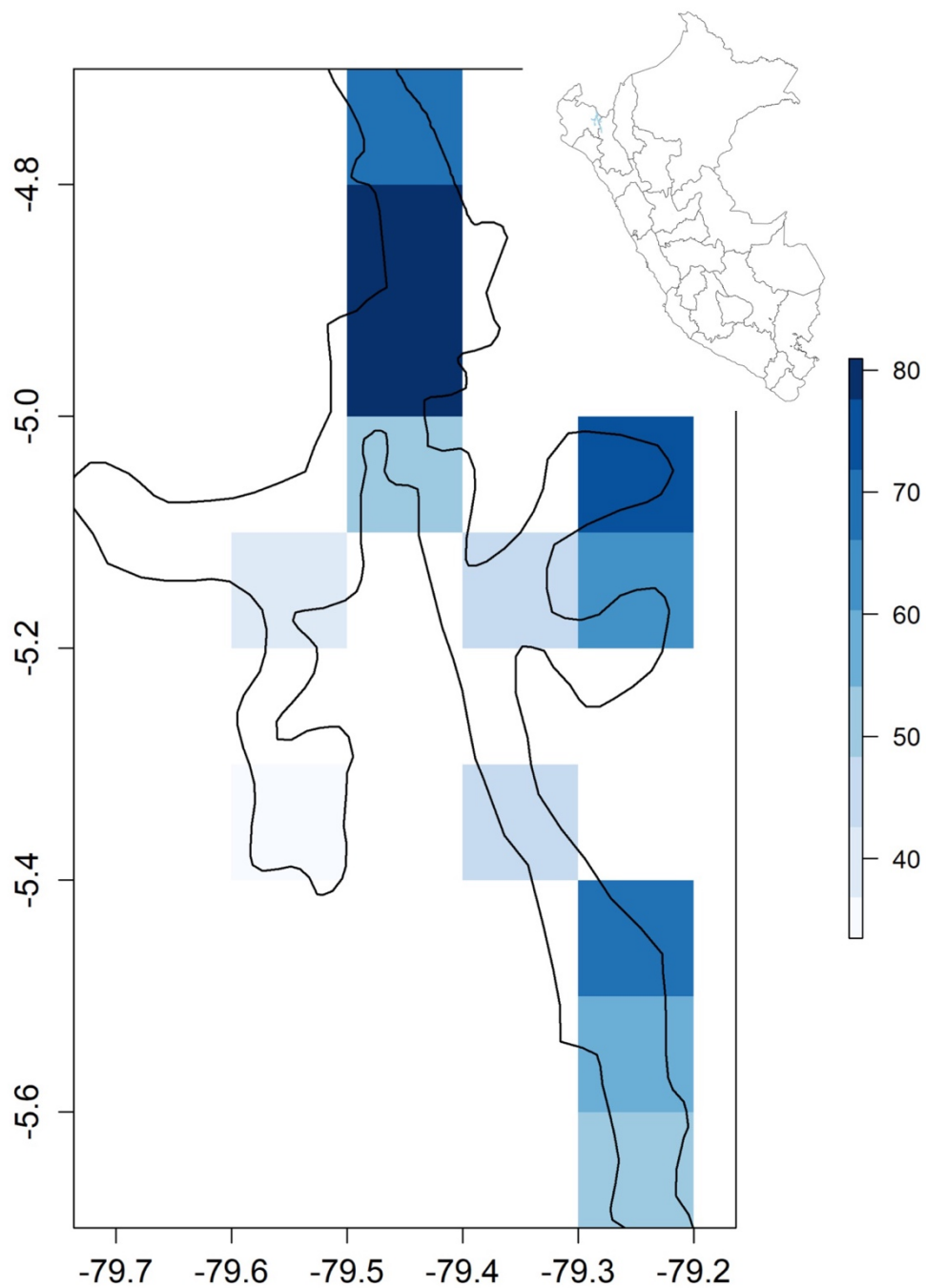
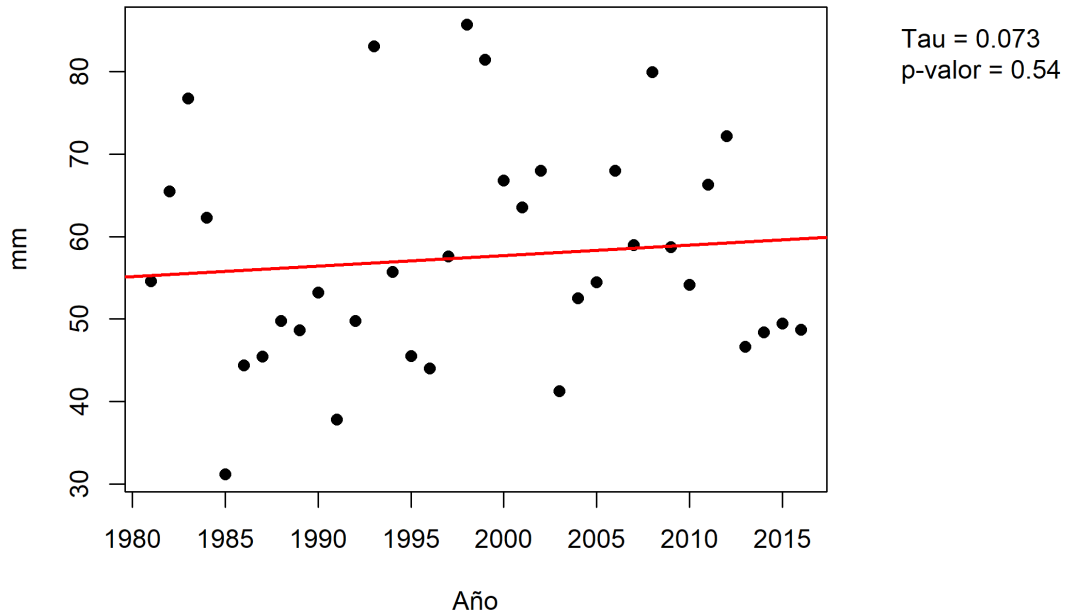


Figura 32

Tendencia temporal de la precipitación media anual (mm) en la ecorregión Páramo durante 1981-2016

**Tendencia temporal (Mann-Kendall) - Páramo - Antonio Brack
Precipitación**



La **figura 32** evaluada mediante la prueba Mann Kendall. El resultado indica tendencia no significativa ($\tau = 0.073$; $p = 0.54$). Los puntos representan valores anuales de precipitación media (promedio areal) en un rango de 30 mm a mayores de 80 mm y la línea roja indica la dirección general del cambio a lo largo del periodo analizado.

2. Resultados de variabilidad climática de Pisos Altitudinales - Pulgar Vidal

A. Piso Altitudinal - Quechua

Temperatura máxima promedio en el piso Quechua muestra una distribución espacial heterogénea y de patrón discontinuo a lo largo del dominio andino representado (**Figura 33**). De acuerdo con la escala, los valores de Tmax se sitúan aproximadamente entre 16 °C y 26 °C, evidenciando contrastes con sectores relativamente más cálidos y otros con valores moderados dentro de la misma unidad altitudinal. En el análisis temporal, la serie de Tmax media anual agregada para el piso Quechua presenta una tendencia creciente

estadísticamente significativa durante el periodo evaluado (**Figura 34**). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.371$ y $p = 0.00151$, lo que indica un incremento monótono de la temperatura máxima hacia los años más recientes.

Figura 33

Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016

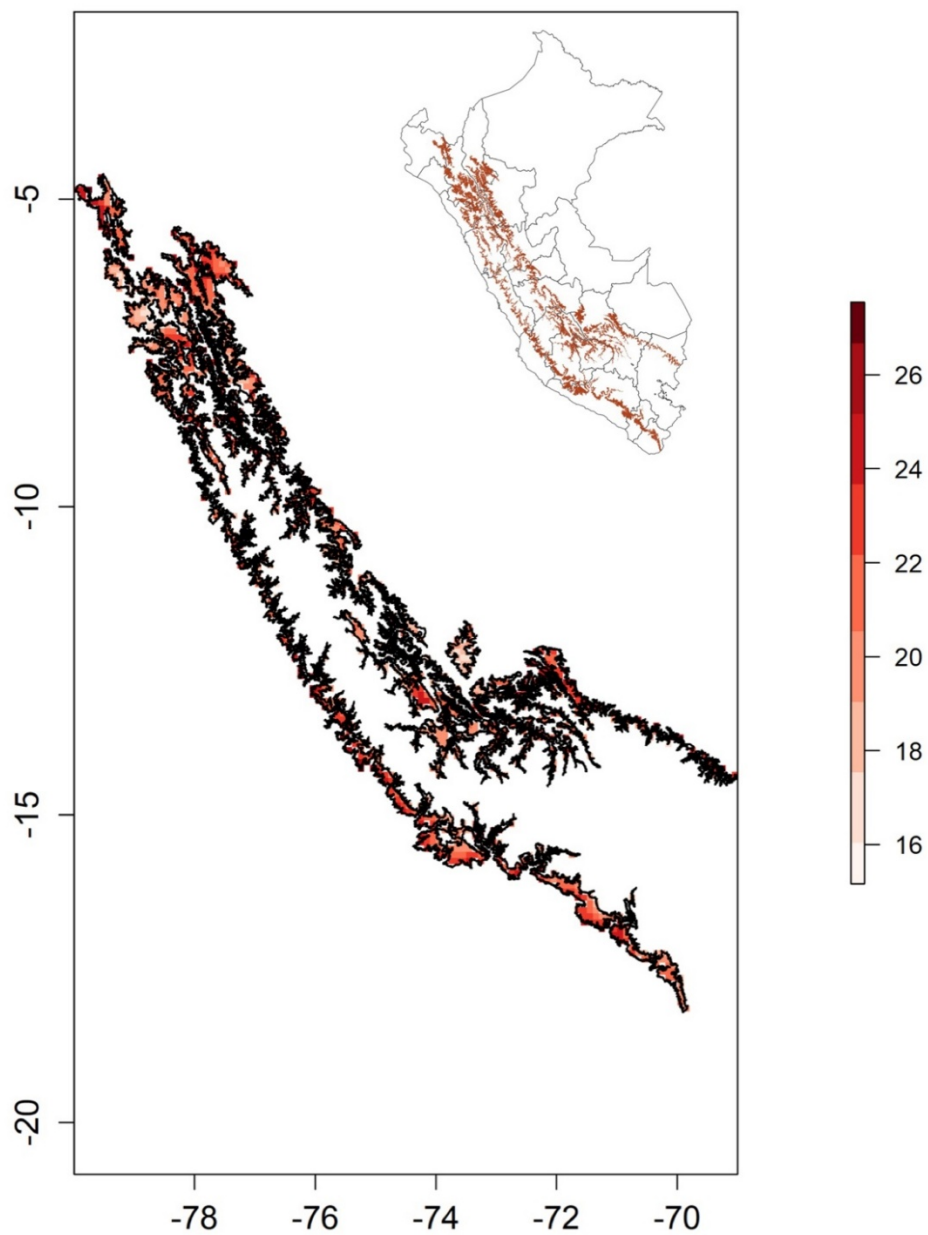
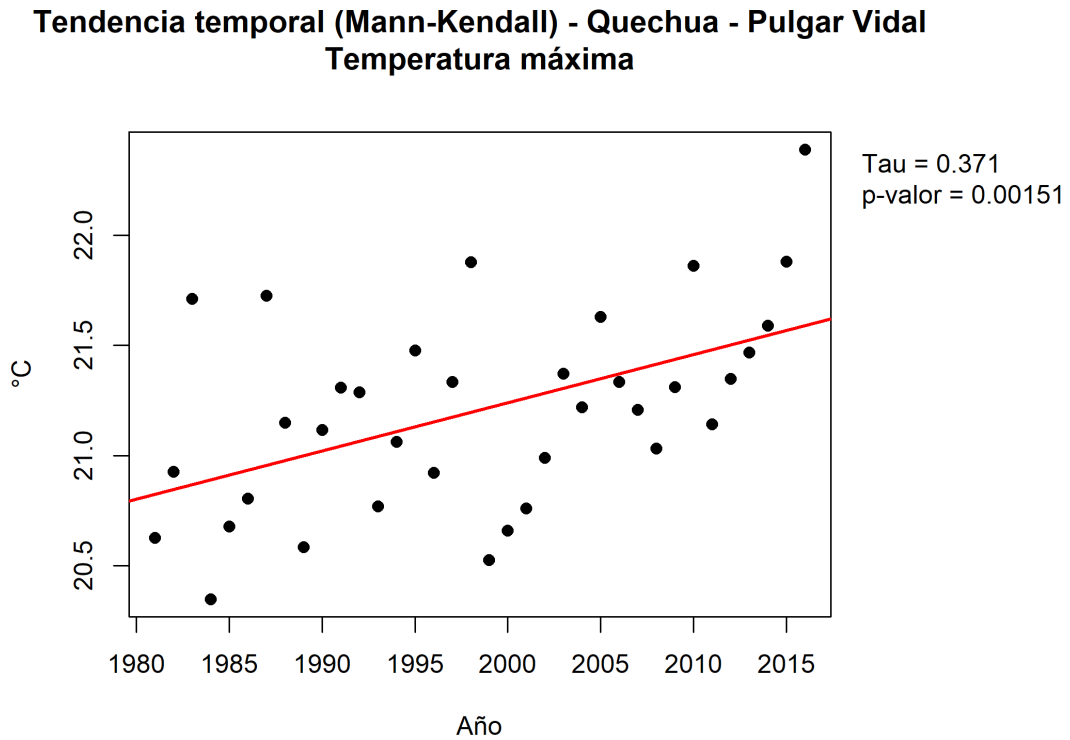


Figura 34

Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016



La figura 34 evaluada mediante la prueba Mann Kendall identifica una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.371$; $p = 0.00151$). Los puntos representan valores anuales de temperatura máxima media (promedio areal) en un rango de 20.5 °C a 22.0 °C la línea roja indica la dirección general del cambio en el periodo analizado.

Temperatura mínima. La temperatura mínima promedio en el piso altitudinal Quechua presenta una distribución espacial heterogénea y de patrón discontinuo a lo largo del dominio andino representado (**Figura 35**). De acuerdo con la escala de colores, los valores medios de Tmin se ubican aproximadamente entre 5 °C y 15°C, evidenciando contrastes intrapiso con sectores de menor Tmin (tonalidades más claras) y otros con valores relativamente más altos (tonalidades más intensas) dentro de la misma unidad.

En el componente temporal, la serie de Tmin media anual agregada para el piso Quechua muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa durante 1981 – 2016

(Figura 36). La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.467$ y $p = 6.58 \times 10^{-5}$, confirmando un incremento monótono de la temperatura mínima hacia los años más recientes. Los valores anuales observados se sitúan aproximadamente entre 8.0°C y 9.5°C , con una trayectoria general ascendente consistente con el resultado estadística.

Figura 35

Distribución espacial de la temperatura mínima promedio ($^{\circ}\text{C}$) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016

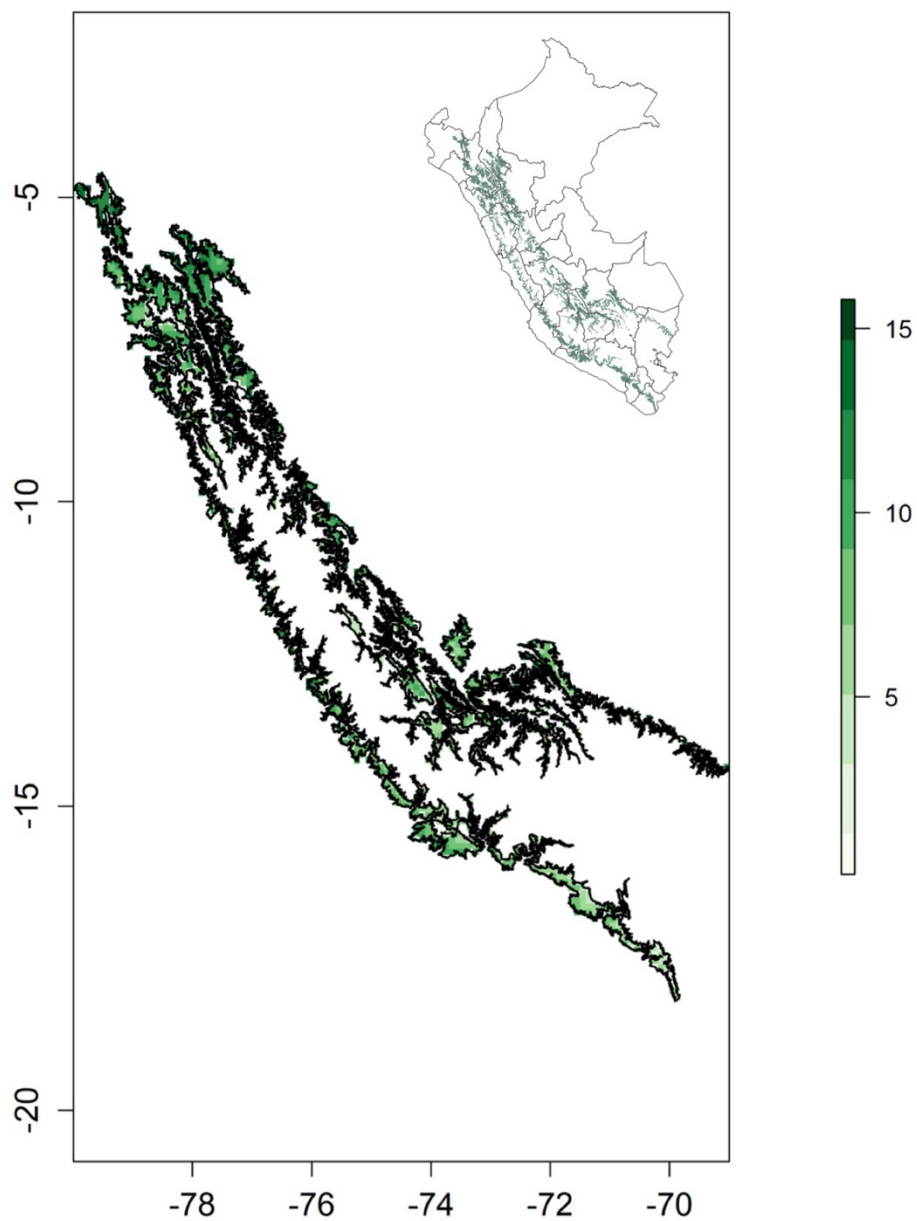
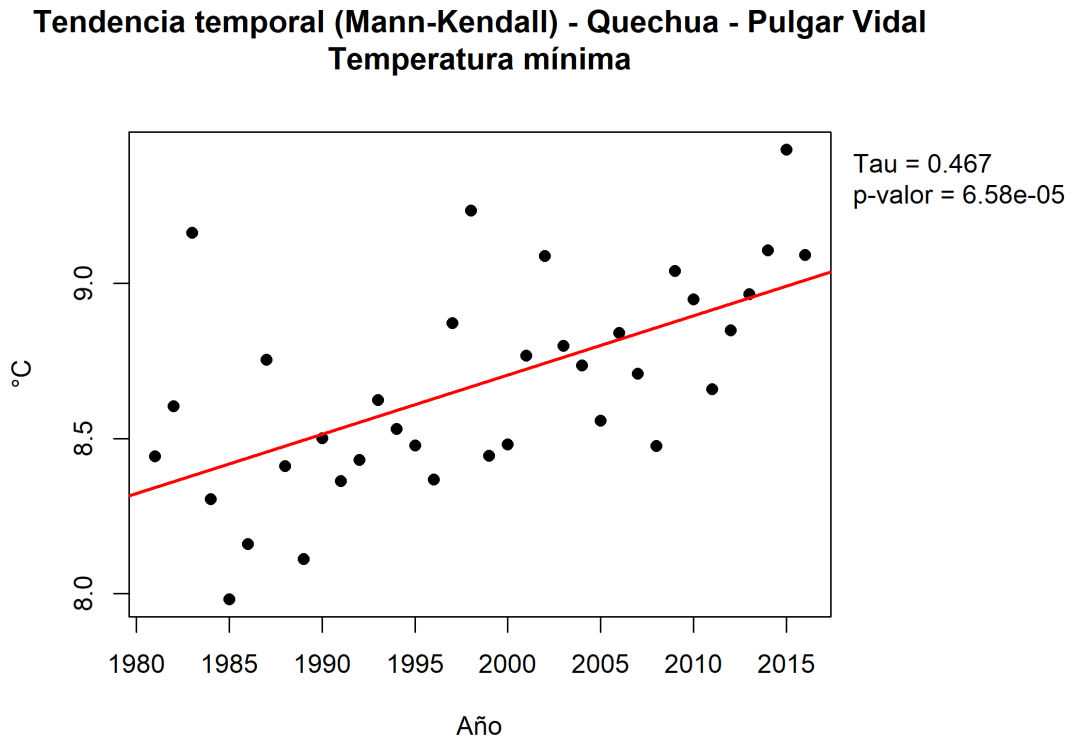


Figura 36

Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016



La **figura 36** evaluada mediante la prueba Mann Kendall identifica una tendencia creciente altamente significativa ($\tau = 0.467$; $p = 6.58 \times 10^{-5}$). Los puntos representan valores anuales de temperatura mínima media (promedio areal) en un rango de 8 °C a superiores de 9 °C y la línea roja indica la dirección general del cambio en el periodo analizado.

Precipitación. La precipitación promedio en el piso altitudinal Quechua presenta una configuración espacial heterogénea y de patrón discontinuo a lo largo del dominio andino representado (**Figura 37**). Conforme a la escala, los valores de precipitación se distribuyen aproximadamente desde 50mm hasta 350 mm, evidenciando contrastes intrapiso con sectores de menor precipitación (tonos más claros) y áreas puntuales con mayores acumulados (tonos más intensos). Este patrón confirma que, incluso dentro de una misma unidad altitudinal, la precipitación no es uniforme y exhibe variabilidad espacial claramente distinguible. En el análisis temporal, la serie de precipitación media

anual en el piso Quechua muestra una señal positiva, aunque sin significancia estadística para el periodo 1981 – 2016 (**Figura 38**). La prueba de Mann–Kendall reporta $\tau = 0.187$ con $p = 0.111$, lo que indica ausencia de evidencia estadística suficiente para afirmar una tendencia monótona (creciente o decreciente) al nivel de significancia convencional.

Figura 37

Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016

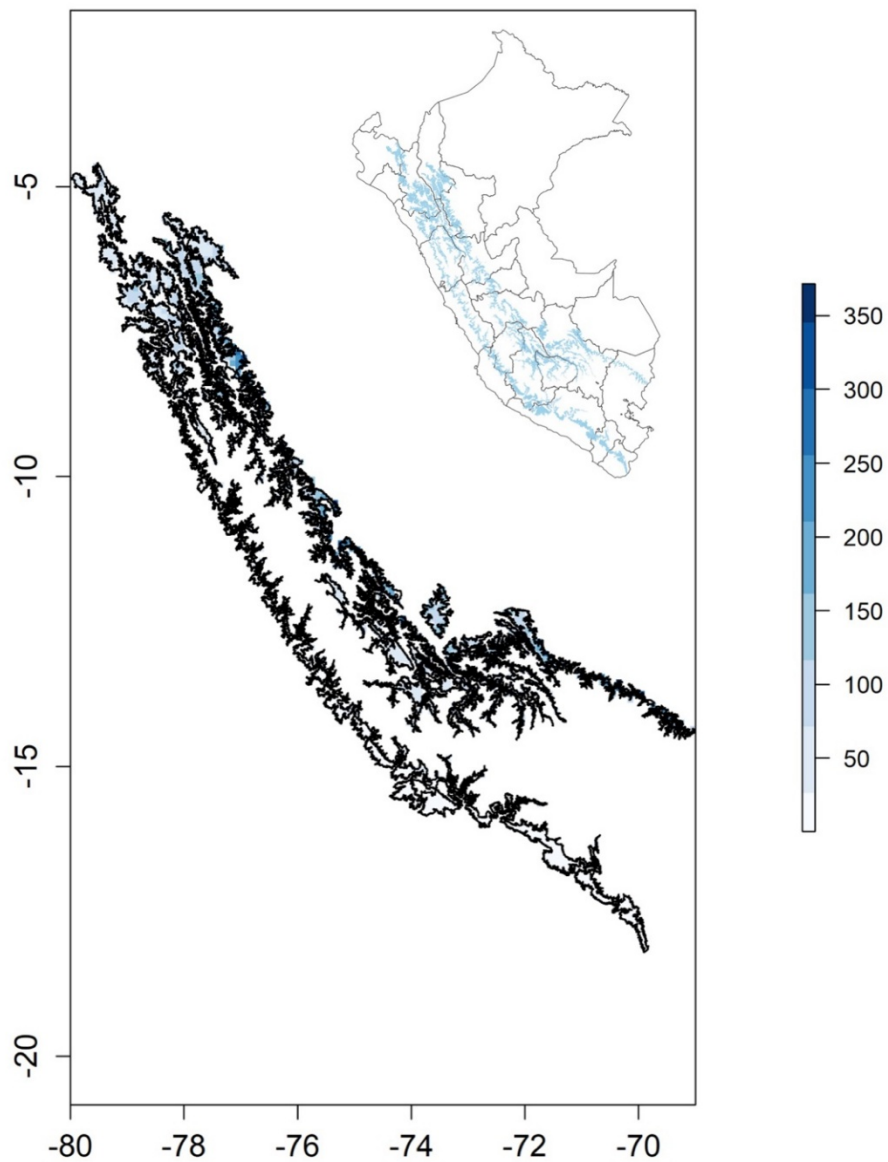
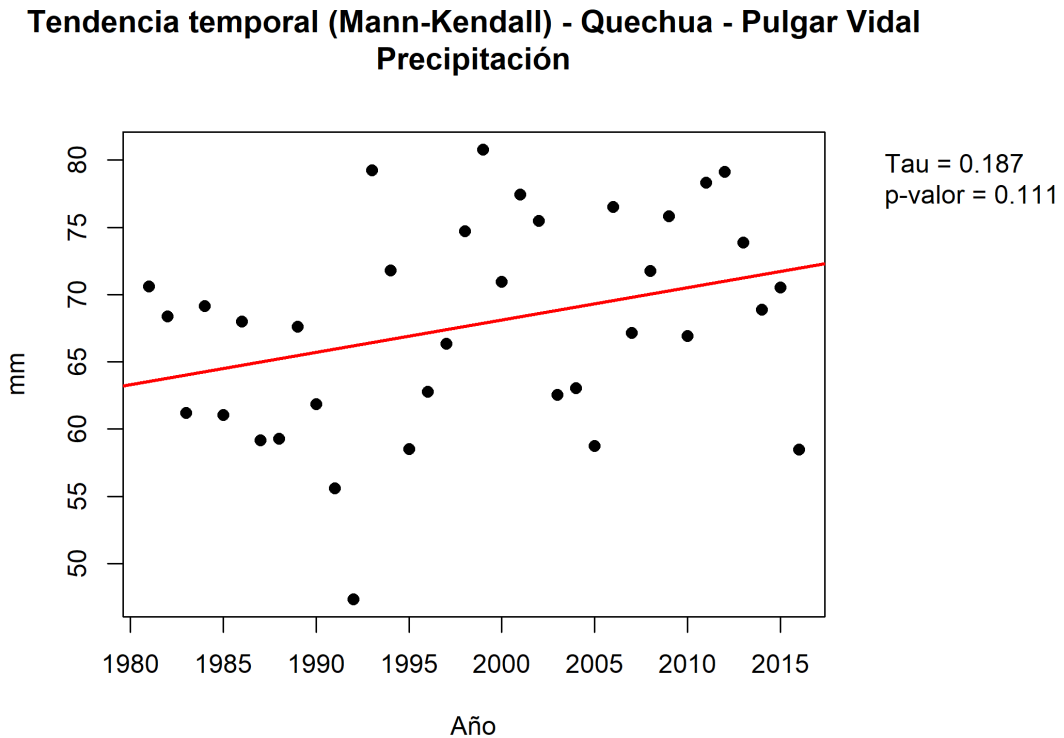


Figura 38

Tendencia temporal de la precipitación media anual (mm) en el piso altitudinal Quechua (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016



La **figura 38** evaluada mediante la prueba Mann Kendall. El resultado indica tendencia no significativa ($\tau = 0.187$; $p = 0.111$). Los puntos representan valores anuales de precipitación media (promedio areal) en un rango de 50 mm a mayores de 80 mm y la línea indica la dirección general del cambio en el periodo analizado.

B. Piso Altitudinal - Suni

La **temperatura máxima** media en el piso altitudinal Suni presenta una distribución espacial heterogénea y de patrón discontinuo a lo largo del dominio andino representado (**Figura 39**). Según la escala cromática, los valores medios de Tmax se ubican aproximadamente entre 14 °C y mayores a 22 °C, con sectores de menor temperatura (tonos más claros) y núcleos relativamente más cálidos (tonos más intensos) dentro del mismo piso altitudinal, evidenciando contrastes intrapiso en su configuración térmica.

En el análisis temporal, la serie de Tmax media anual agregada para el piso Suni muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa durante 1981 – 2016 (**Figura 40**).

La prueba de Mann Kendall reporta $\tau = 0.416$ con $p = 0.000378$, indicando un incremento monótono de la temperatura máxima hacia los años más recientes.

Figura 39

Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016

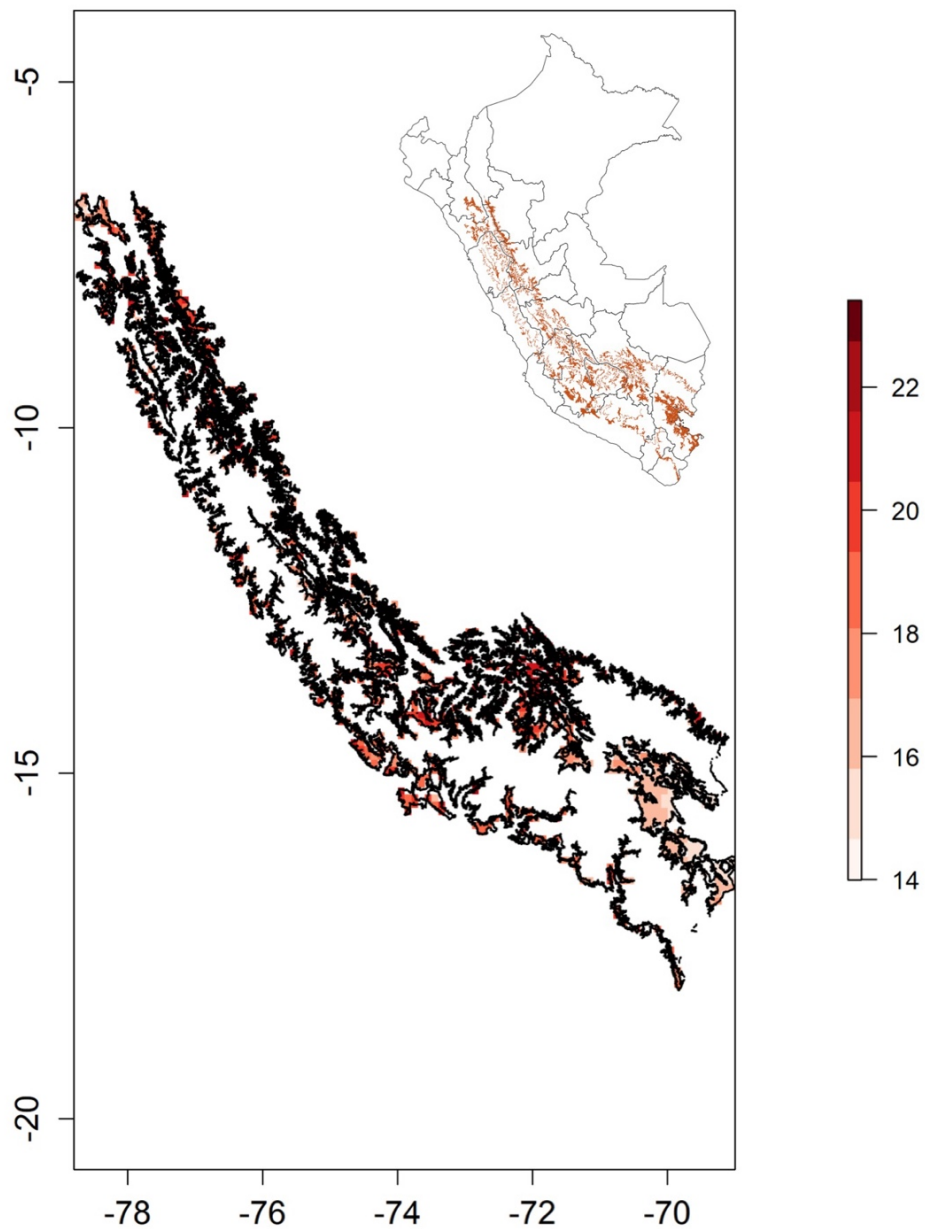
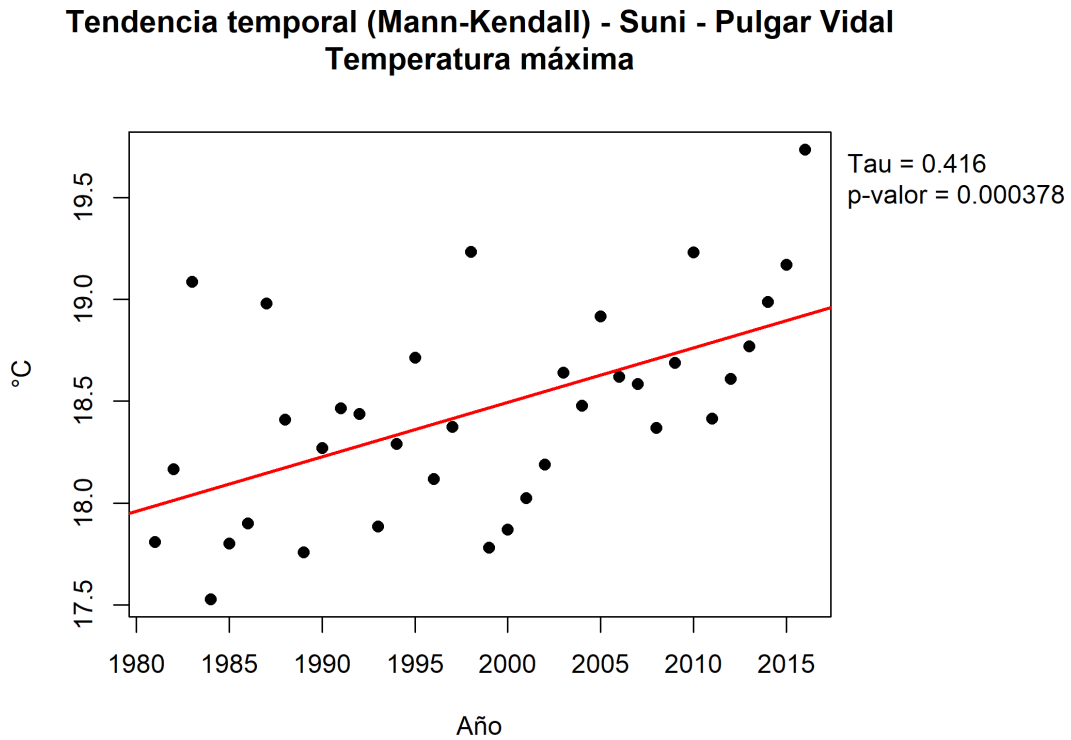


Figura 40

Tendencia temporal de la temperatura máxima media anual (°C) en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016



La **figura 40** evaluada mediante la prueba Mann Kendall identifica una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.416$; $p = 0.000378$). Los puntos representan valores de temperatura máxima (promedio areal) en un rango de 17.5 °C a 19.5 °C y la línea indica la dirección general del cambio en el periodo analizado.

La **temperatura mínima** media en el piso altitudinal Suni exhibe una distribución espacial heterogénea y de patrón discontinuo a lo largo del dominio andino representado (**Figura 41**). Conforme a la escala cromática, los valores de Tmin se sitúan aproximadamente entre -5 °C y 10 °C, con predominio de tonalidades claras (valores cercanos o inferiores a 0 °C) y sectores puntuales con Tmin relativamente más altas (tonos más intensos). Este patrón evidencia contrastes intrapiso en la configuración térmica mínima, con variabilidad espacial marcada dentro de la misma unidad altitudinal.

En el análisis temporal, la serie de Tmin media anual agregada para el piso Suni muestra una tendencia creciente altamente significativa durante 1981 – 2016 (**Figura 42**). La

prueba Mann Kendall reporta $\tau = 0.46$ y $p = 8.27 \times 10^{-5}$, confirmando un incremento monótono de la temperatura mínima hacia los años más recientes.

Figura 41

Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016

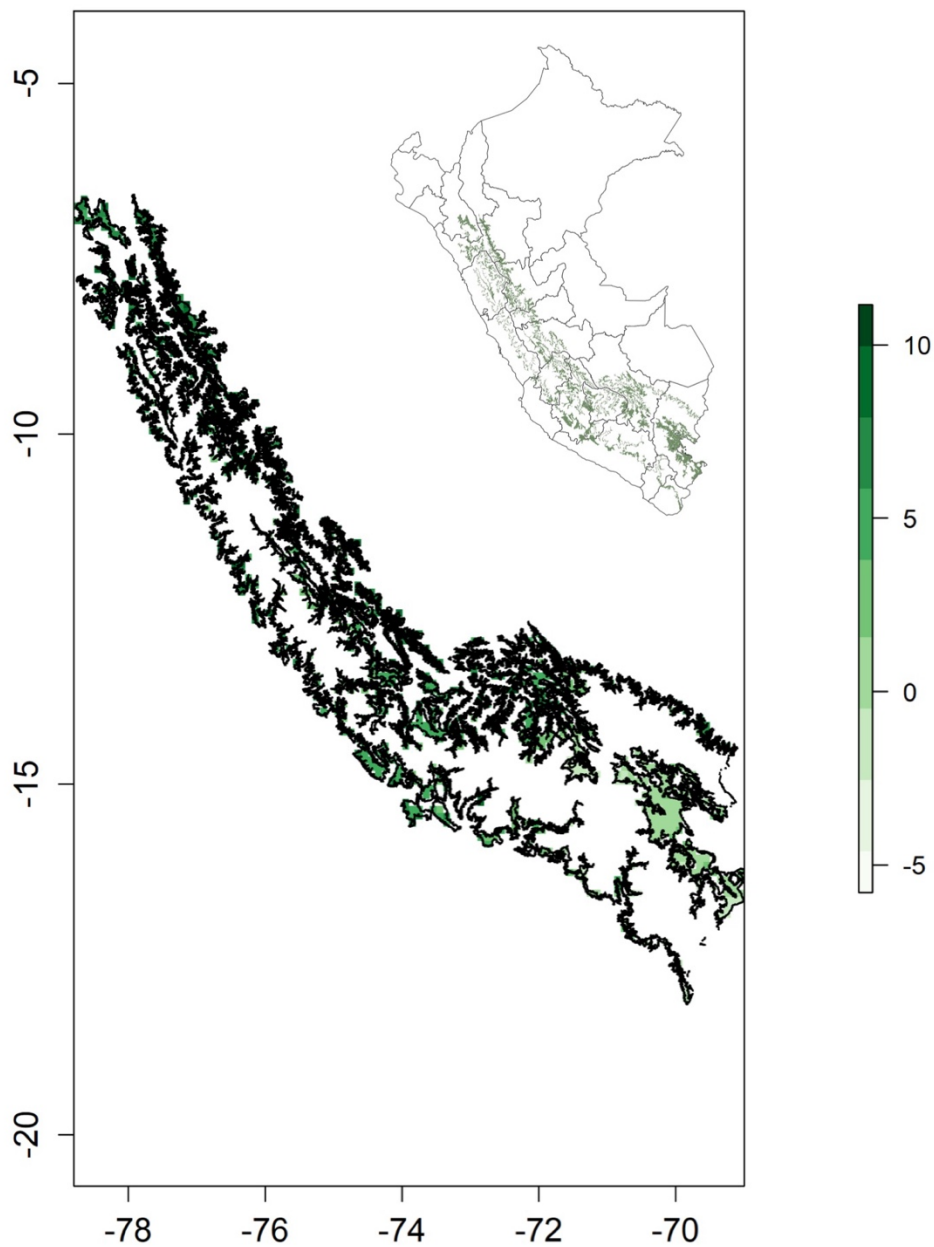
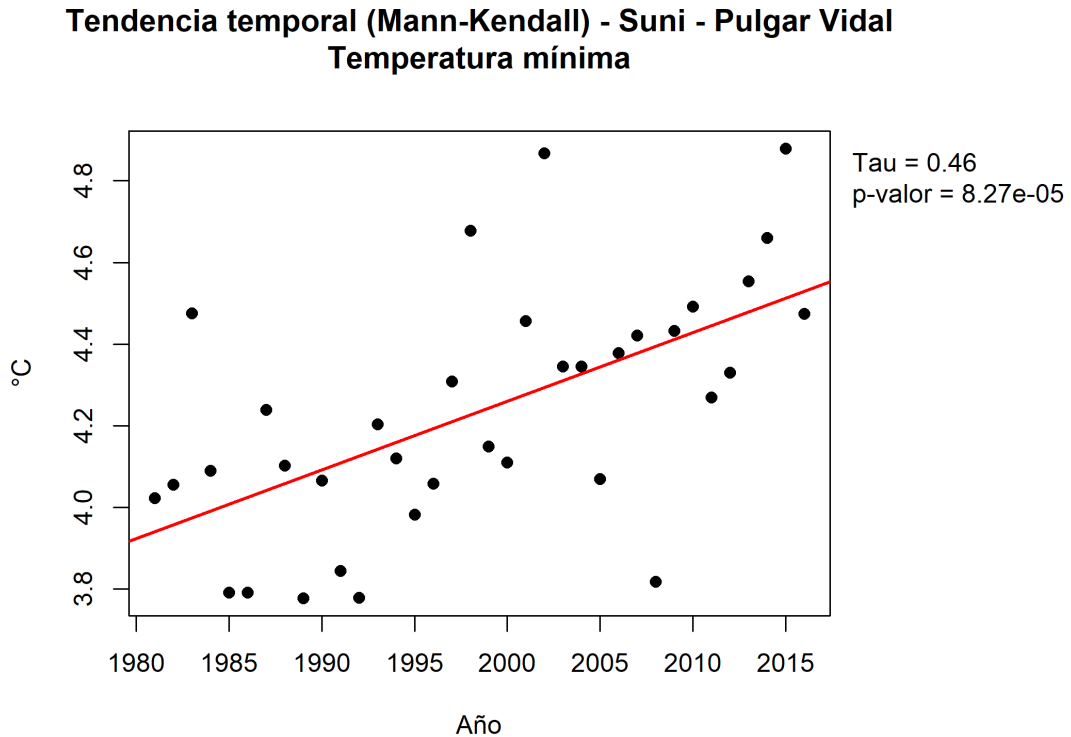


Figura 42

Tendencia temporal de la temperatura mínima media anual (°C) en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016



La **figura 42** evaluada mediante la prueba Mann Kendall. Se identifica una tendencia creciente altamente significativa ($\tau = 0.46$; $p = 8.27 \times 10^{-5}$). Los puntos representan valores de temperatura mínima (promedio areal) con valores que se distribuyen aproximadamente entre 3.8 °C y 4.8 °C, con variabilidad interanual y una trayectoria general ascendente coherente con el resultado estadístico.

La **precipitación promedio** en el piso Suni evidencia una distribución espacial heterogénea a lo largo del corredor andino (**Figura 43**). En términos cuantitativos, el campo espacial presenta valores predominantemente moderados con sectores que alcanzan magnitudes altas (aprox. mayores a 150 mm, según la escala), intercalados con extensos tramos de menor precipitación (tonos claros). Este patrón confirma que, incluso dentro de una misma unidad altitudinal, la precipitación no se comporta de manera uniforme, sino que exhibe contrastes espaciales asociados a la variabilidad climática regional y a la configuración longitudinal del piso. En el dominio temporal, la serie anual agregada para Suni muestra oscilaciones interanuales marcadas, con valores que fluctúan

aproximadamente entre 35 y 70 mm (**Figura 44**). Aunque la línea de ajuste sugiere una pendiente levemente positiva, la prueba de Mann Kendall no identifica una tendencia monotónica estadísticamente significativa ($\tau = 0.073$; $p = 0.54$), por lo que, para el periodo analizado, la precipitación del piso Suni se caracteriza por variabilidad interanual sin evidencia robusta de cambio direccional.

Figura 43

Precipitación promedio (mm), en el piso altitudinal Suni (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016

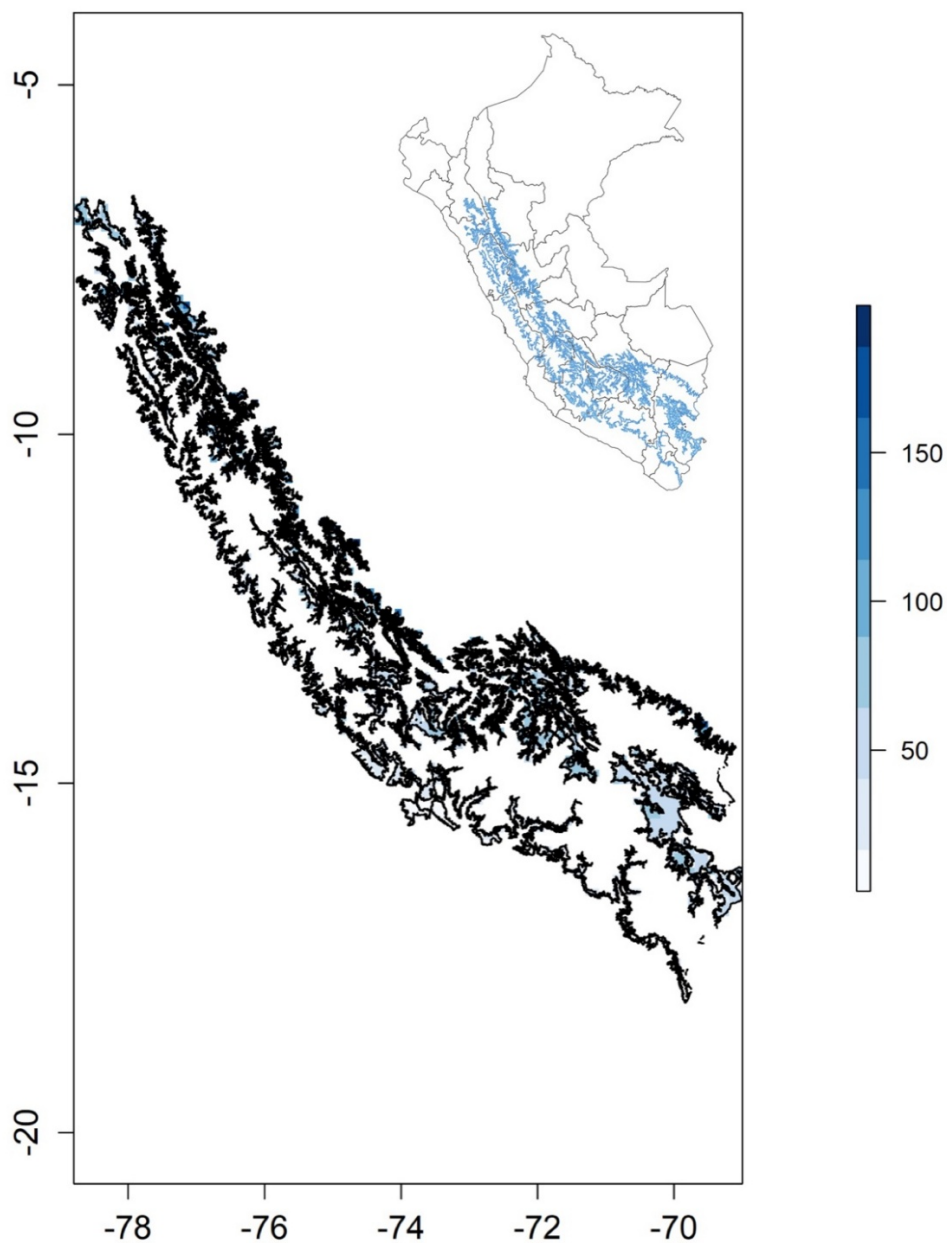
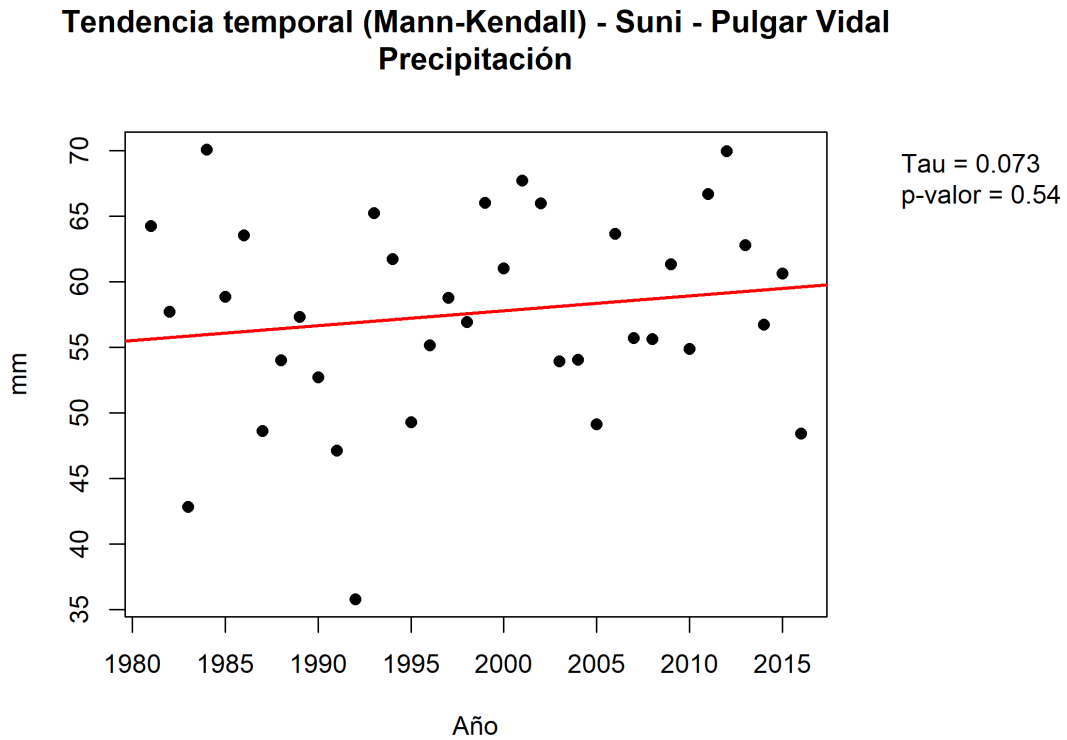


Figura 44

Tendencia temporal de la precipitación (Mann Kendall) en el piso Suni durante 1981 - 2016



La **figura 44** muestra la serie temporal (mm) evidencia alta variabilidad interanual (aprox. 35 a 70 mm). La prueba estadística indica ausencia de tendencia significativa ($\tau = 0.073$; $p = 0.54$), pese a la pendiente positiva del ajuste lineal (línea roja).

C. Piso ecológico - Puna

La temperatura máxima promedio presenta una distribución espacial heterogénea a lo largo del corredor altoandino (**Figura 45**). Los valores se ubican, en términos generales, dentro de un rango aproximado de 12 a 24 °C, con núcleos más cálidos (tonos rojo oscuro) en sectores puntuales y áreas relativamente más frías (tonos más claros) hacia zonas de mayor altitud/continentalidad dentro del propio piso, evidenciando el carácter discontinuo y topográficamente controlado de esta unidad altitudinal. En la dimensión temporal, la serie anual de Tmax evidencia una tendencia creciente estadísticamente significativa. La prueba Mann Kendall reporta $\tau = 0.451$ con $p = 0.000116$, indicando un incremento monótono a lo largo del periodo analizado. En términos cuantitativos, los valores anuales

oscilan aproximadamente entre 15.6 y 18.0 °C, y la recta de ajuste muestra un aumento sostenido desde valores cercanos a 16 °C al inicio de la serie hacia valores superiores a 17 °C en la parte final.

Figura 45

Distribución espacial de la temperatura máxima promedio (°C) en el piso altitudinal Puna (Pulgar Vidal) para el periodo 1981-2016

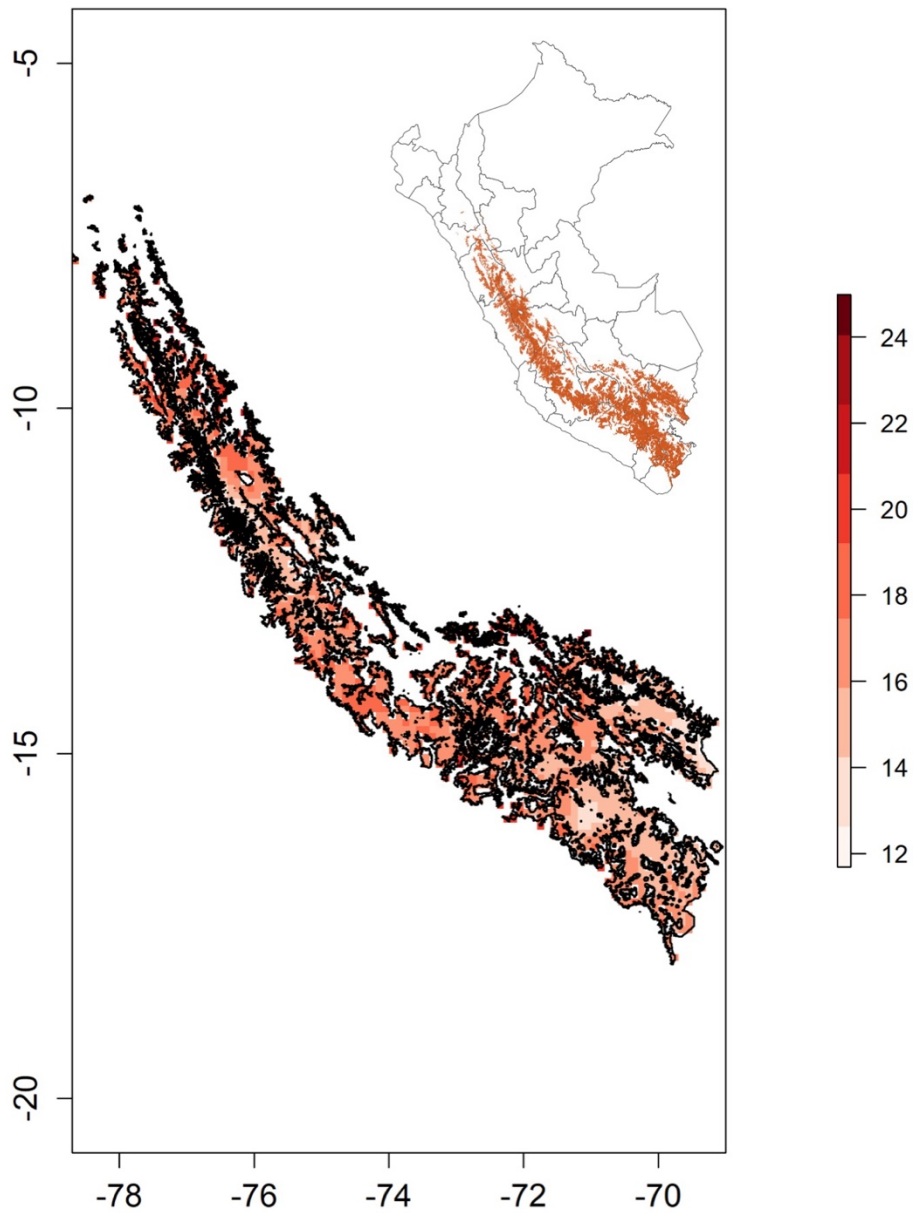
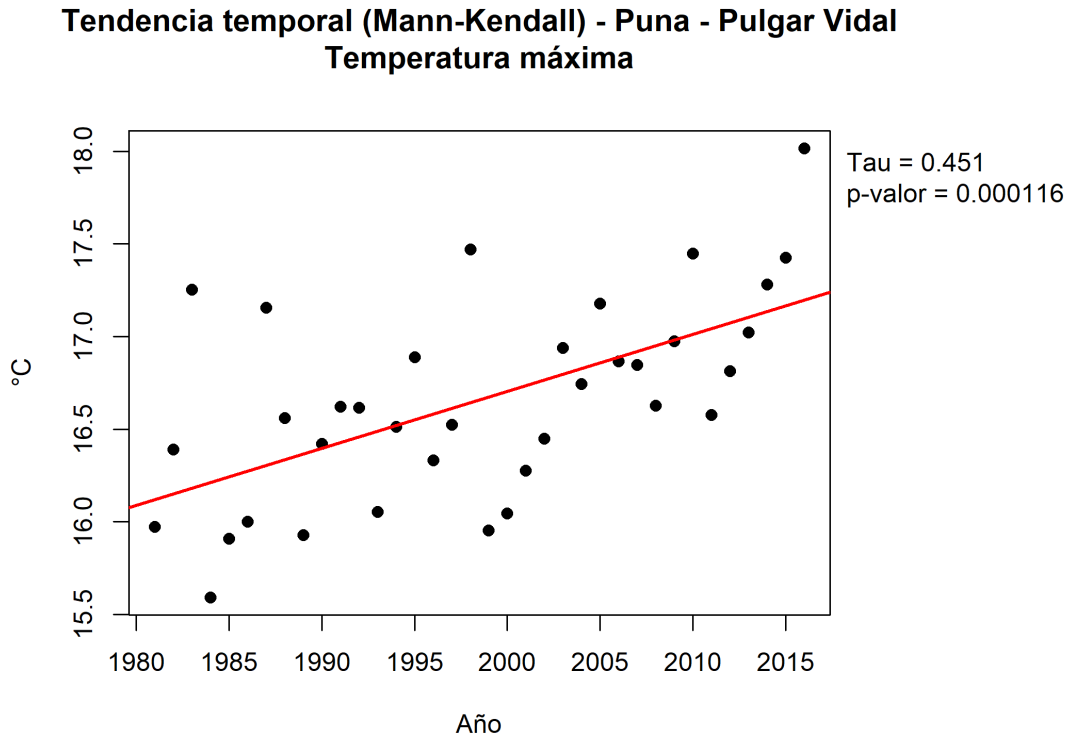


Figura 46

Tendencia temporal (Mann Kendall) de la temperatura máxima media anual (°C) en el piso Puna (Pulgar Vidal), 1981-2016



La figura 46 muestra los puntos que representan los promedios anuales y la línea roja el ajuste lineal. Se observa una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.451$; $p = 0.000116$), con valores anuales en torno a 15.5 a 18.0 °C a lo largo de la serie.

La temperatura mínima promedio evidencia un patrón marcadamente heterogéneo (**Figura 47**). En el dominio espacial evaluado, los valores se ubican aproximadamente entre -5 y 10 °C, con núcleos relativamente más cálidos (tonos verdes más intensos) y sectores más fríos (tonos claros, cercanos a 0 °C y negativos) distribuidos de forma discontinua a lo largo del eje andino. Esta configuración espacial sugiere que, incluso dentro de un mismo piso altitudinal, la temperatura mínima promedio no es uniforme, sino que se organiza en mosaicos térmicos que reflejan contrastes regionales dentro del ámbito de la Puna. En la dimensión temporal, el análisis de tendencia mediante Mann Kendall para la serie 1981-2016 indica una tendencia creciente y estadísticamente significativa de la temperatura mínima promedio ($\tau = 0.473$; $p = 5.22 \times 10^{-5}$). Los valores anuales se distribuyen aproximadamente entre 0.4 y 1.8 °C, con variabilidad interanual,

pero con una señal monótonica positiva consistente: en los primeros años predominan valores cercanos a 0.7 a 1.0 °C, mientras que hacia el tramo final de la serie se observan con mayor frecuencia valores alrededor de 1.2 a 1.7 °C, coherentes con la pendiente ascendente de la recta de ajuste mostrada en la **figura 48**.

Figura 47

Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso altitudinal Puna (Pulgar Vidal)

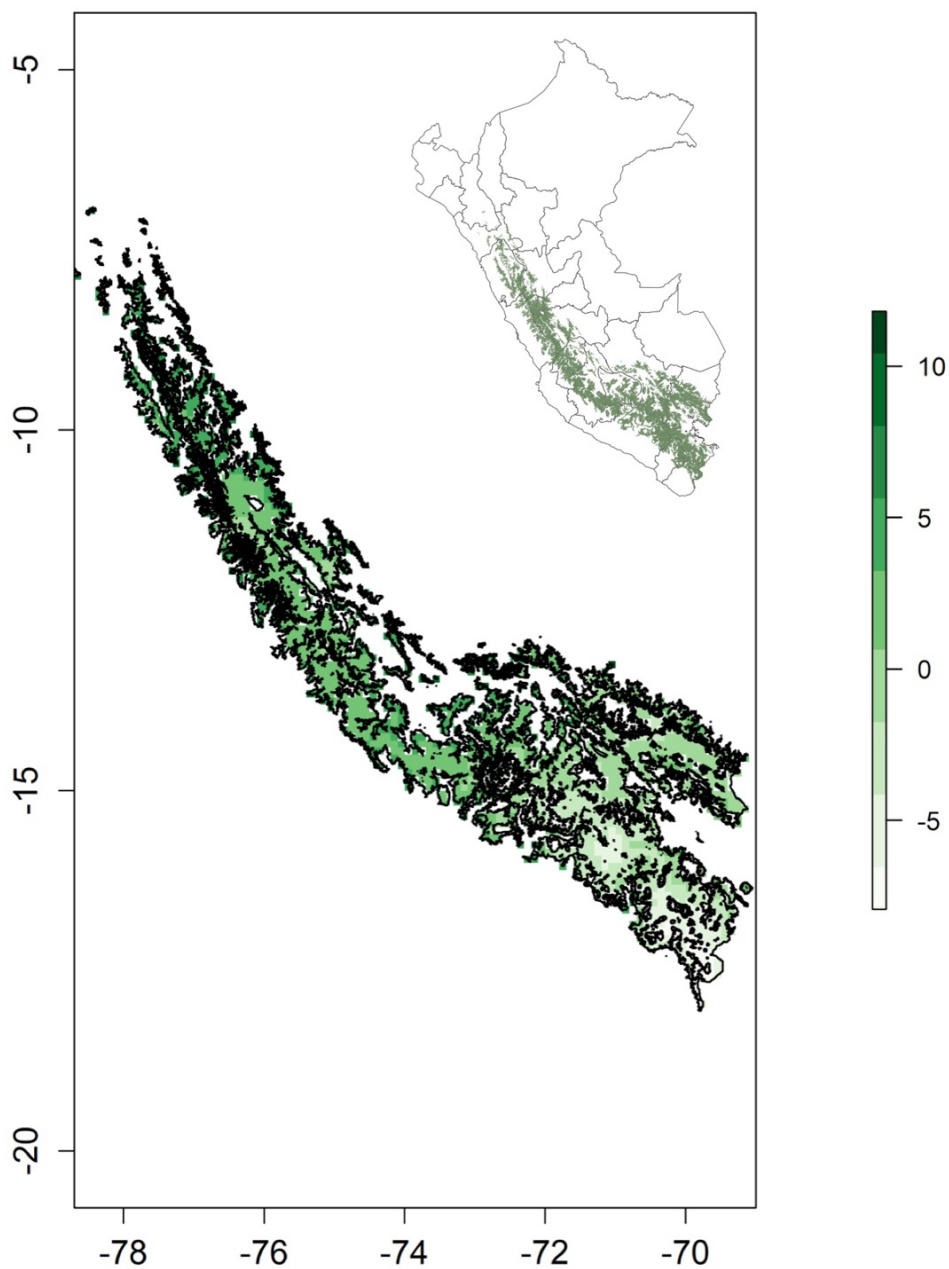
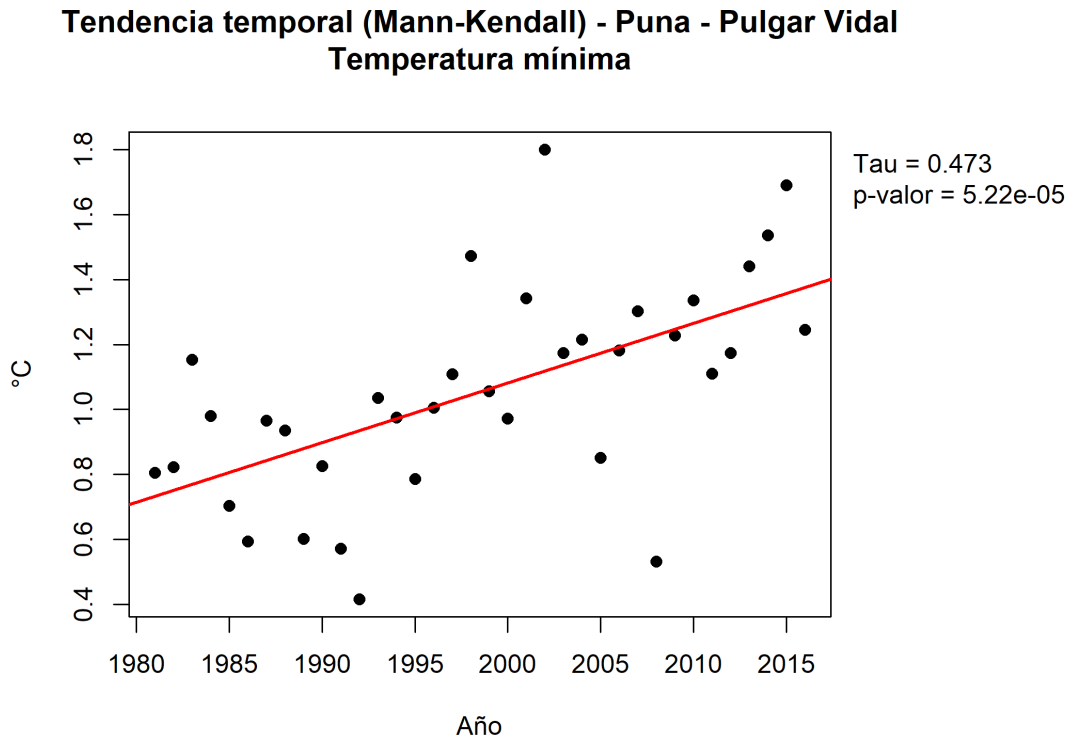


Figura 48

Tendencia temporal (1981-2016) de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso Puna



La **figura 48** evaluada con la prueba Mann Kendall observa una tendencia creciente significativa ($\tau = 0.473$; $p = 5.22 \times 10^{-5}$), con valores anuales aproximados entre 0.4 y 1.8 °C y variabilidad interanual, pero con un incremento monótonico sostenido en el periodo de estudio como se muestra en la línea roja.

La precipitación promedio asociada al piso altitudinal Puna, considerando dos escalas complementarias: (i) la distribución espacial del promedio climatológico en el ámbito de estudio y (ii) la dinámica temporal mediante la prueba no paramétrica de Mann Kendall, aplicada a la serie 1981-2016. Este enfoque permitió caracterizar, de forma objetiva, tanto la heterogeneidad territorial de la precipitación como la presencia o ausencia de una tendencia monótonica en el periodo evaluado.

Figura 49

Precipitación promedio (mm), en el piso altitudinal Puna (Pulgar Vidal) durante 1981 - 2016

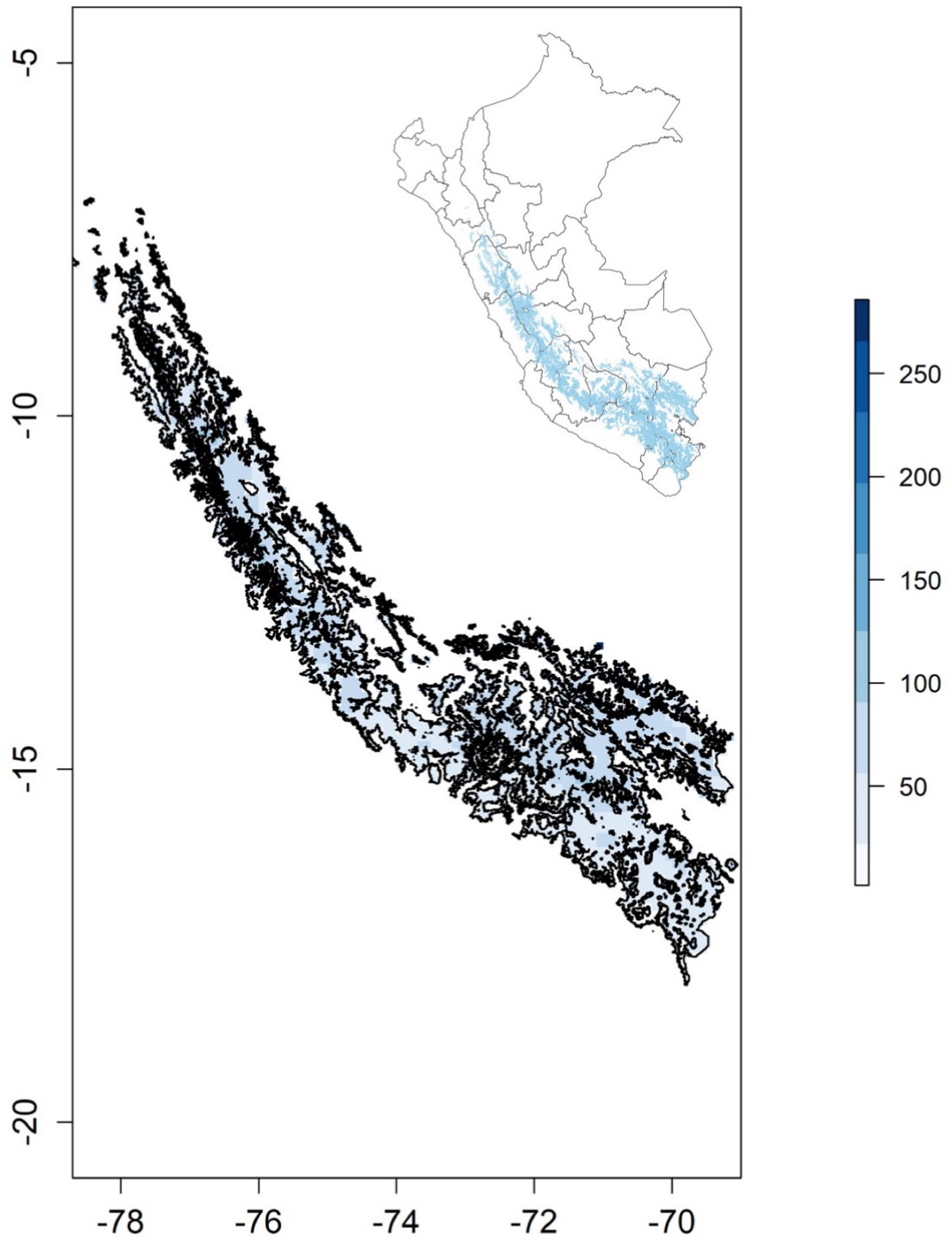
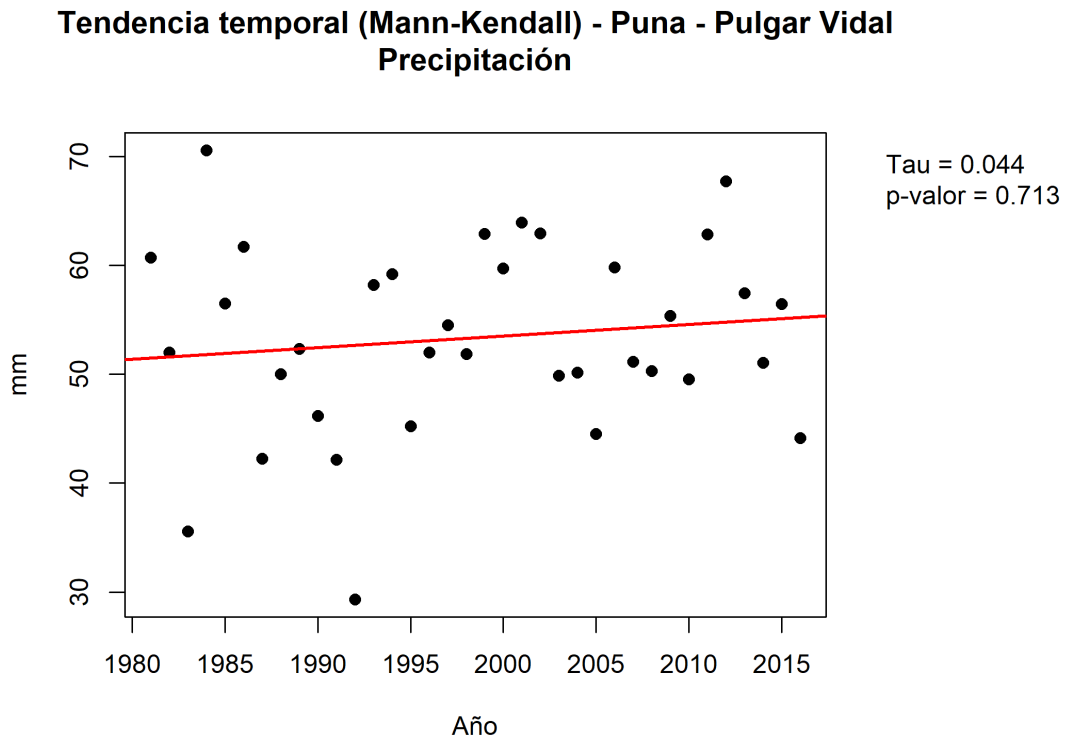


Figura 50

Tendencia temporal de la precipitación (Mann Kendall) en el piso Puna durante 1981 - 2016



La figura 50 en la serie temporal presenta variabilidad interanual pronunciada (valores típicos 30 a 70 mm en el gráfico), sin un cambio sostenido en el tiempo. La prueba Mann Kendall indica ausencia de tendencia significativa ($\tau = 0.044$; $p = 0.713$). Aunque la recta roja de ajuste sugiere un incremento leve, este no es estadísticamente robusto, por lo que el resultado dominante es la variabilidad y no una tendencia monotónica.

D. Piso altitudinal - Janca

El piso Janca representa la franja altitudinal más elevada y discontinua del territorio andino, asociada a cumbres, divisorias y ambientes glaciares. En términos analíticos, su extensión espacial reducida y fragmentada implica que la señal climática esté fuertemente modulada por la topografía (gradientes altitudinales abruptos, orientación de laderas y condiciones locales), por lo que la interpretación debe centrarse en patrones consistentes y en la dirección de cambio. La **Figura 51** muestra que la temperatura máxima promedio en el piso Janca se distribuye de manera muy localizada, concentrándose en “parches” que corresponden a sectores de alta montaña. Los valores presentan un contraste espacial

marcado (aprox. 13 a 19 °C, según la escala), con núcleos relativamente más cálidos y otros más fríos, reflejando la fragmentación altitudinal y la influencia de condiciones topográficas locales. En conjunto, la figura confirma que la señal térmica en Janca no es continua a escala regional, sino altamente dependiente de la configuración del relieve.

Figura 51

Distribución espacial de la temperatura máxima media (°C) en el piso altitudinal Janca (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 – 2016

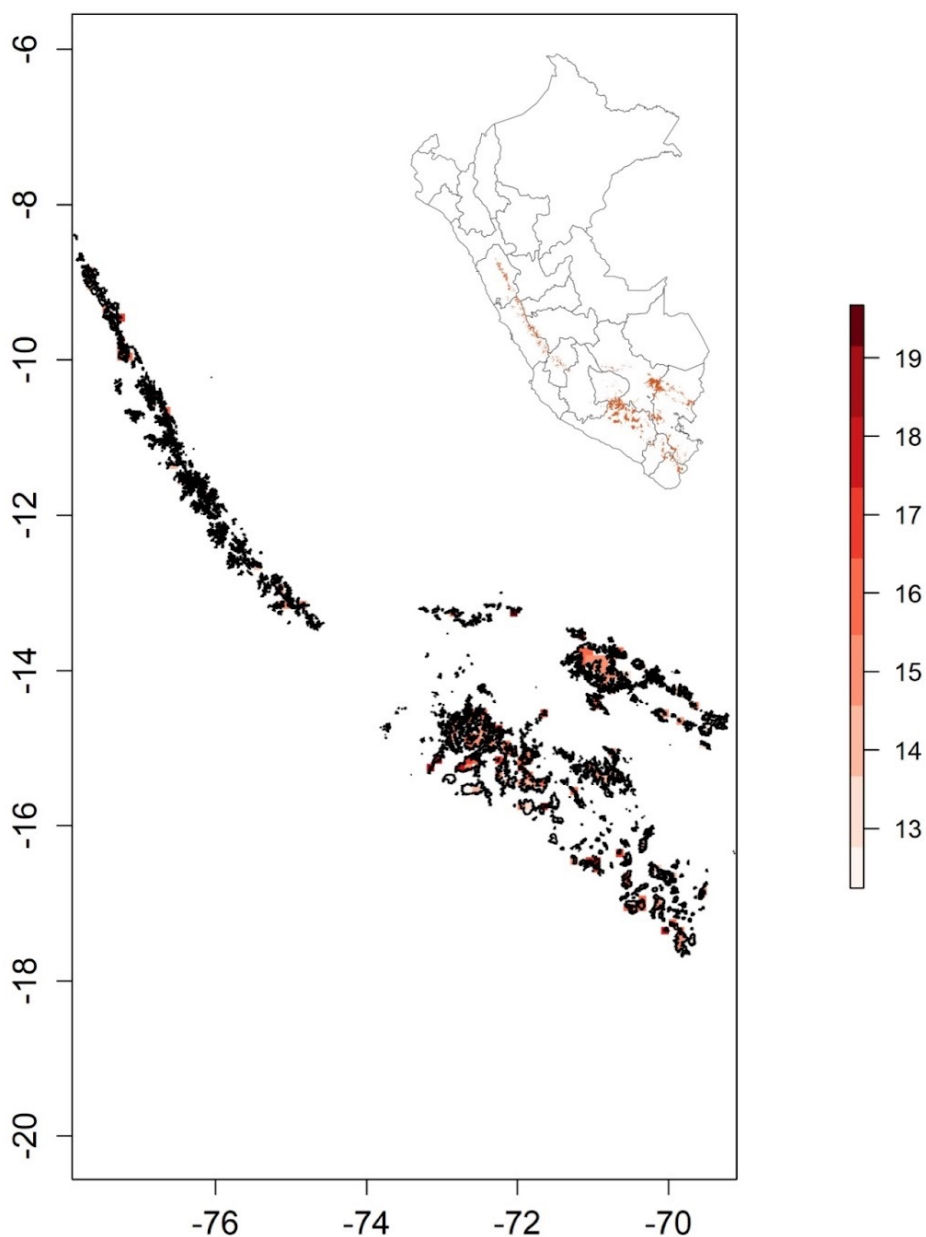
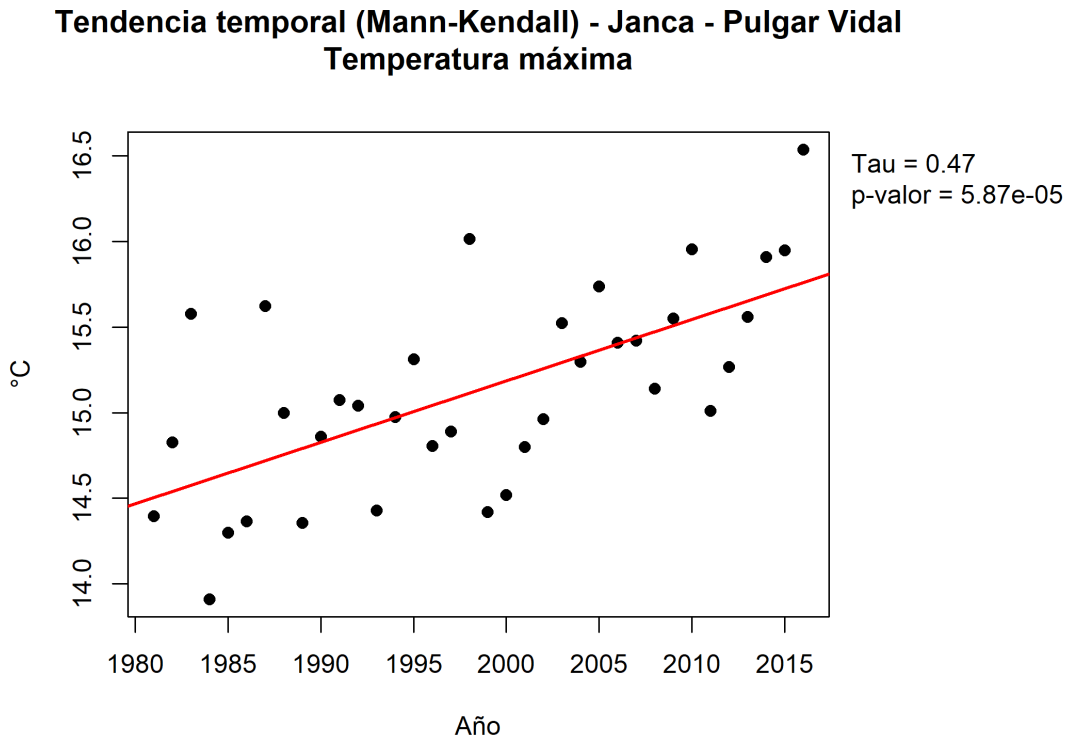


Figura 52

Tendencia temporal de la temperatura máxima (Mann Kendall) en el piso Janca durante 1981 - 2016



La **Figura 52** evidencia una tendencia creciente significativa de la temperatura máxima en Janca: $\tau = 0.47$ con $p\text{-valor} = 5.87 \times 10^{-5}$, lo que indica un incremento sostenido y estadísticamente robusto en el periodo evaluado. Aunque existe variabilidad interanual (puntos dispersos), la pendiente positiva (línea roja) confirma que la señal dominante es de calentamiento. Este resultado es particularmente relevante en Janca por su sensibilidad: aumentos en la temperatura máxima pueden intensificar procesos de fusión nival/glaciar, elevar el nivel de la isoterma y modificar condiciones físicas y ambientales en zonas de cumbre.

La **temperatura mínima (Figura 53)** promedio del piso Janca presenta un patrón espacial muy frío y fragmentado, característico de cumbres y cordilleras: el mapa muestra valores entre -8 y 4 °C, muestra el patrón espacial que evidencia una fragmentación marcada del piso Janca, con ocurrencias concentradas en los principales sistemas montañosos. Los valores de T_{min} se ubican mayoritariamente en el rango bajo 0 °C, con sectores que alcanzan condiciones más frías (tonos más intensos) y otros relativamente menos fríos (tonos claros), reflejando la heterogeneidad altitudinal. En términos

generales, la figura confirma que la Janca mantiene un régimen térmico dominado por mínimas negativas, coherente con su carácter nival-glaciar.

Figura 53

Distribución espacial de la temperatura mínima promedio (°C) en el piso altitudinal Janca (Pulgar Vidal) para el periodo 1981 - 2016

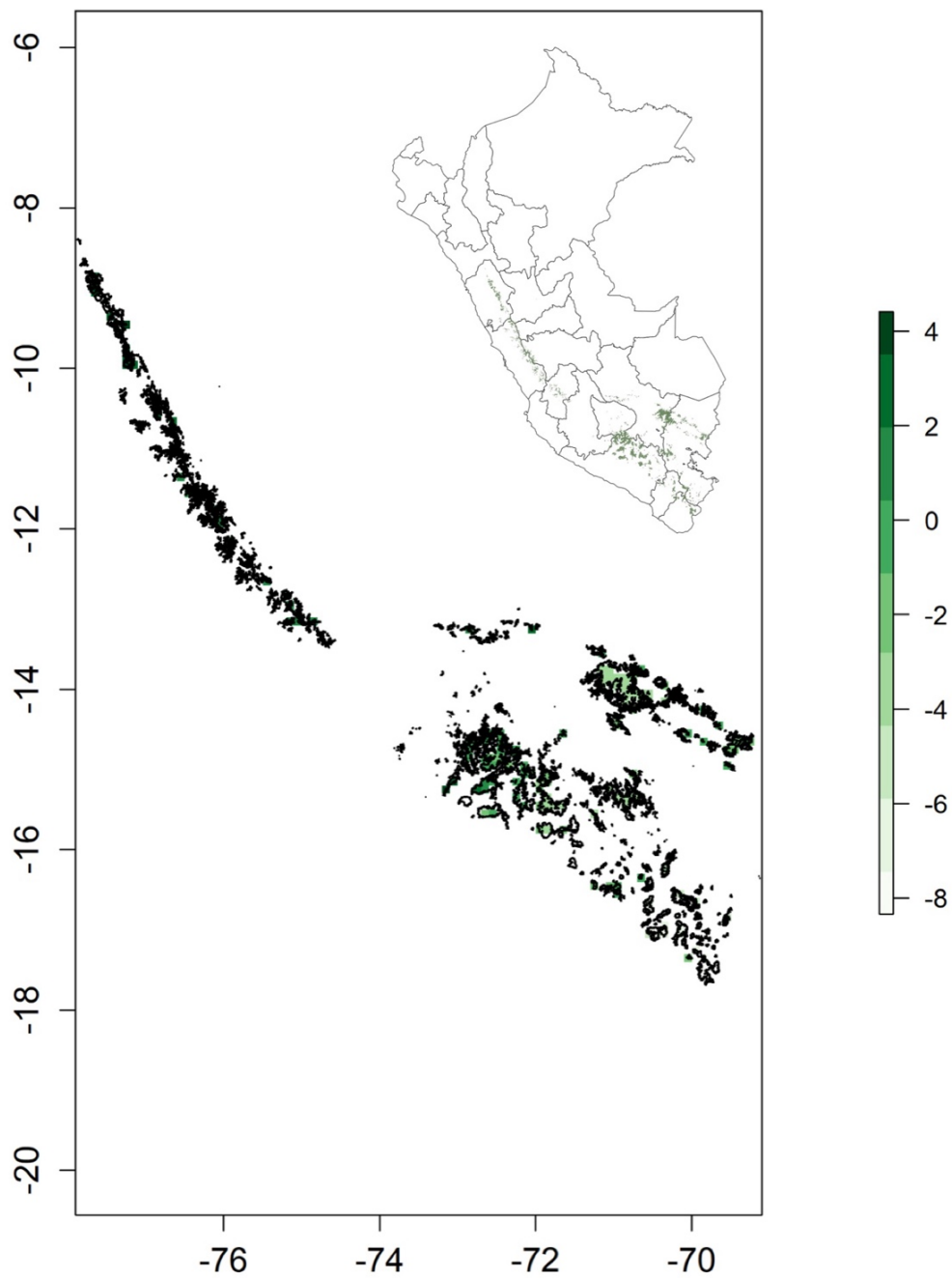
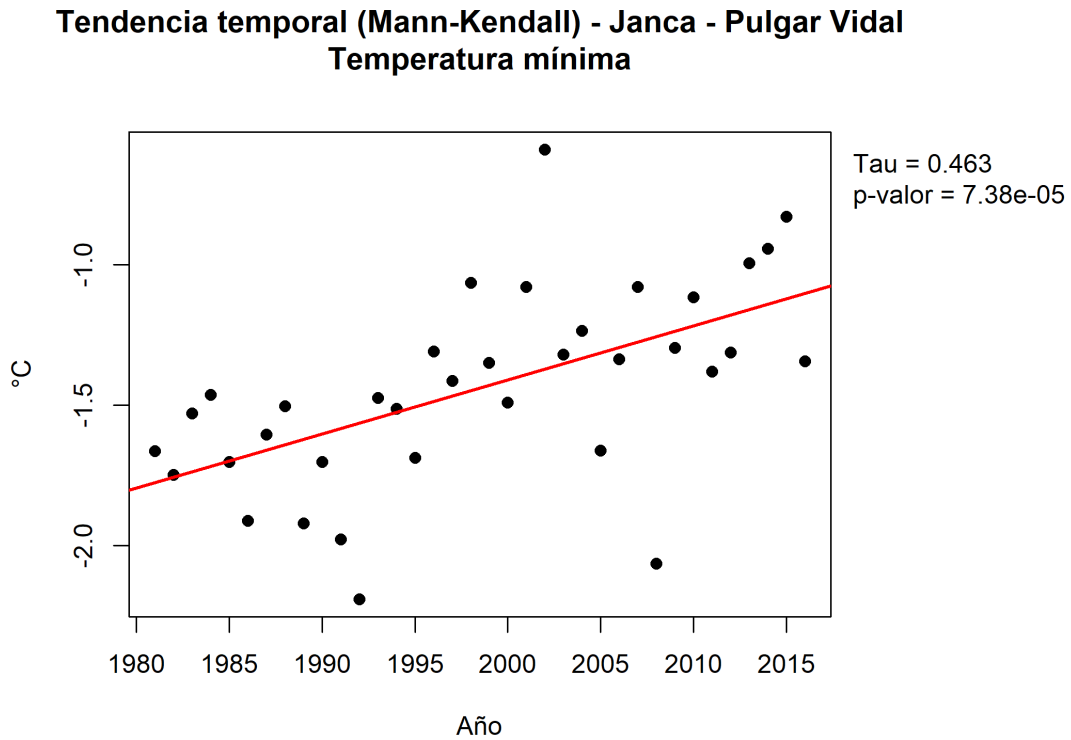


Figura 54

Tendencia temporal de la temperatura mínima (Mann Kendall) en el piso Janca durante 1981 - 2016



La **figura 54** es una serie temporal que muestra una tendencia creciente estadísticamente significativa en la temperatura mínima: $\tau = 0.463$ y $p = 7.38 \times 10^{-5}$. Esta señal indica un calentamiento sostenido de las mínimas a lo largo del periodo de análisis, pese a la variabilidad interanual observada. En términos interpretativos, el resultado es contundente: en la Janca, las noches/fríos extremos se atenúan progresivamente, reforzando la evidencia de calentamiento en los pisos de mayor elevación.

La precipitación promedio presenta una distribución espacial altamente discontinua y heterogénea, coherente con la naturaleza fragmentada de esta unidad (cumbres y sectores de muy alta montaña) (**Figura 55**). Los valores se sitúan, de manera general, en un rango aproximado de 20 a 80 mm. Este patrón sugiere un control dominante de la topografía local y la exposición orográfica, más que un gradiente latitudinal continuo, lo cual es esperable dada la reducida cobertura espacial de la Janca.

Figura 55

Distribución espacial de la precipitación promedio (mm) en el piso altitudinal Janca (Pulgar Vidal) para el periodo 1981-2016

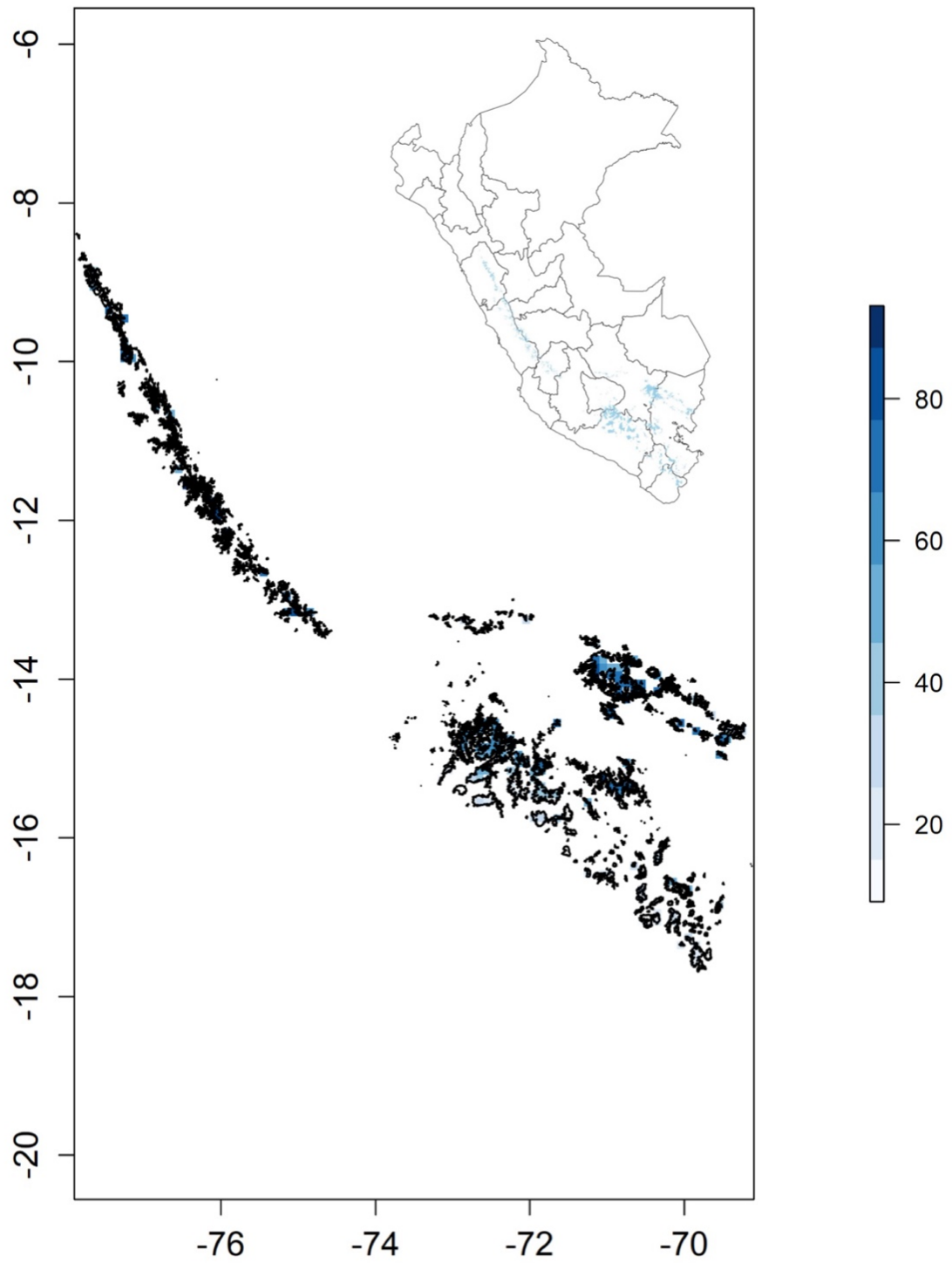
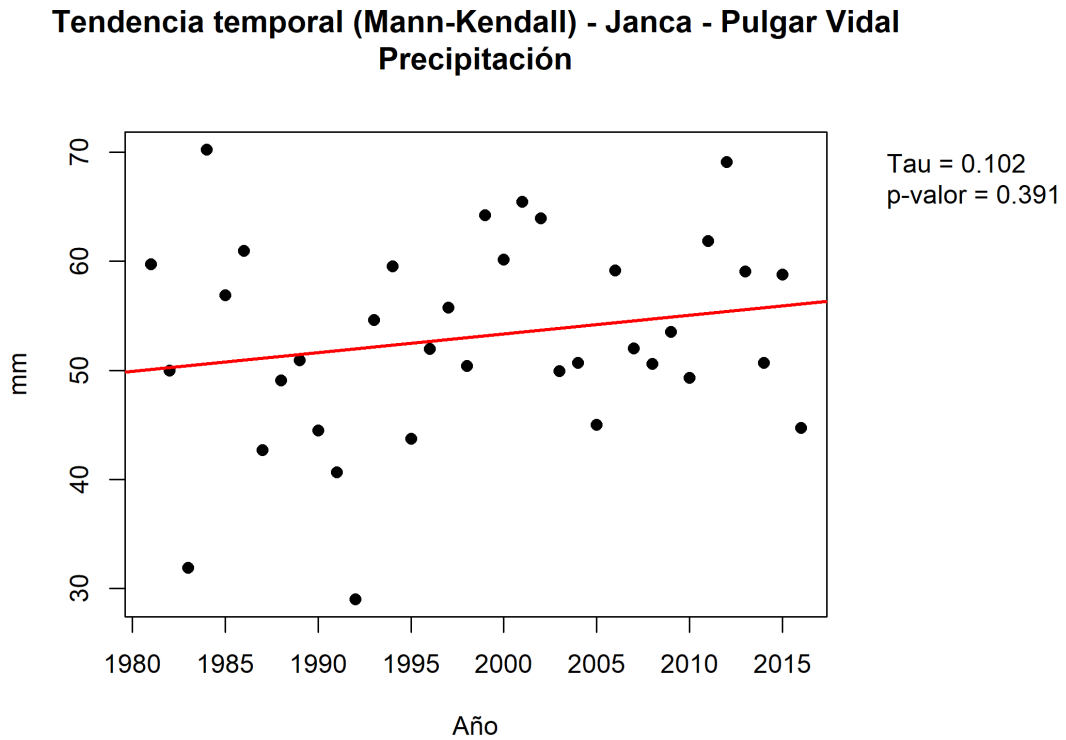


Figura 56

Tendencia temporal (Mann Kendall) de la precipitación media anual (mm) en el piso Janca (Pulgar Vidal), 1981 - 2016



La **figura 56** muestra el análisis temporal, la serie anual de precipitación para el piso altitudinal Janca, el cual muestra una tendencia positiva débil y no significativa en un rango de 30 mm a 70 mm durante los periodos de 1981 a 2016. La prueba de Mann Kendall desarrollada reporta $\tau = 0.102$ con $p = 0.391$, por lo que no se evidencia un cambio monótono estadísticamente significativo durante 1981-2016.

5.3. Análisis y modelamiento de glaciares en el Perú

5.3.1. Análisis de glaciares a base de los inventarios históricos del Perú

Este apartado presenta un análisis multitemporal del retroceso glaciar en la región andina, basado en datos satelitales y registros oficiales del INAIGEM, complementados con estudios científicos recientes. La pérdida de cobertura glaciar ha sido cuantificada mediante herramientas SIG, lo que ha permitido identificar variaciones espaciales y

temporales en la extensión de los glaciares y su estrecha relación con la generación de lagunas de origen glaciar.

La **figura 57** muestra la síntesis comparativa de cinco hitos institucionales y metodológicos en el inventario glaciar del país. Se detallan periodos de análisis, insumos de teledetección (de fotografías aéreas de 1955–1962 a imágenes Sentinel-2) y escalas cartográficas empleadas. Los resultados evidencian una disminución sostenida del área glaciar nacional desde 2041,85 km² (inventario con base 1960) a 1050,32 km² (2023). El recuento de lagunas de origen glaciar no reportado en los dos primeros inventarios alcanza 8365 (2014), 8577 (2019) y 8466 (2023), mostrando un aumento asociado al retroceso glaciar.

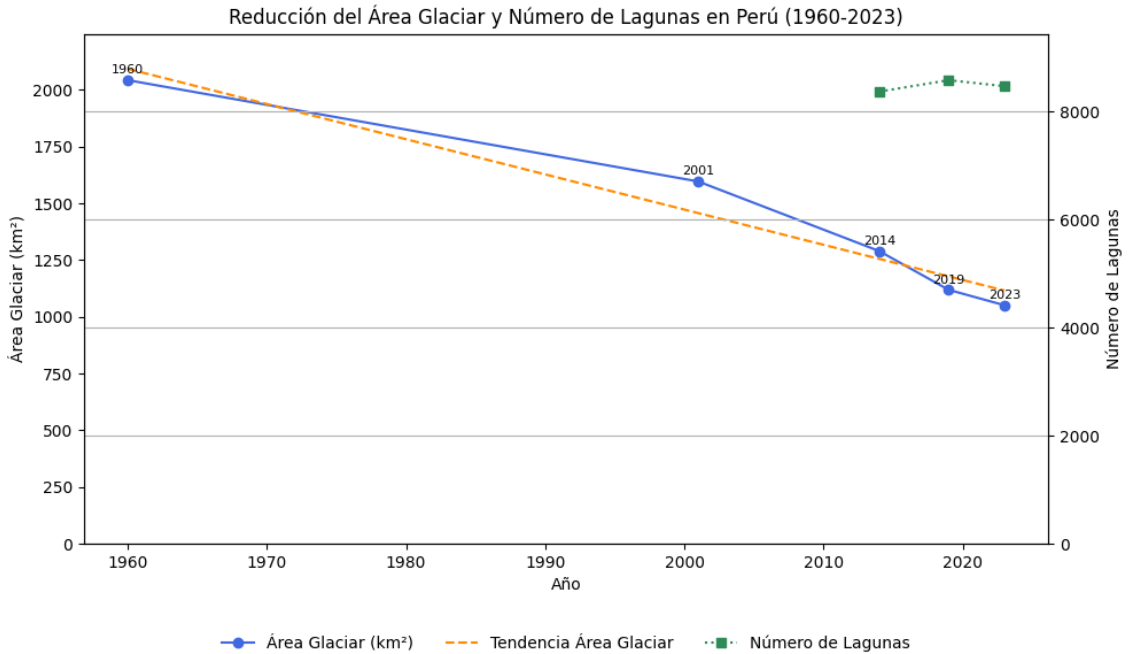
Figura 57

Línea de tiempo de los inventarios nacionales de glaciares en el Perú (1960-2023)

LINEA DE TIEMPO DE LOS INVENTARIOS DE GLACIARES EN EL PERÚ					
Instituto y año de publicación	HIDRANDINA S.A. 1989	CONAM 2001	UGRH - ANA 2014	INAIGEM 2019	INAIGEM 2023
Periodo	1978 - 1989	1997-2001	2006 - 2014	2017 - 2019	2022 - 2023
Información base	Fotografías aéreas (1955-1962)	Imágenes satelitales: Landsat 5 (1995 - 1997)	Imágenes satelitales: SPOT 4 y 5, ASTER, Landsat 5 y LISSIII (2003 - 2010)	Imágenes satelitales: Sentinel 2 (2016)	Imágenes satelitales: Sentinel 2 (2020)
Cartografía	Cartografía Nacional a 1:25000, 1:50000 y 1:100000 del IGN	Cartografía Nacional a 1:25000, 1:50000 y 1:100000 del IGN	Cartografía Nacional a 1:100000	Cartografía Nacional a 1:25000	Cartografía Nacional a 1:25000
Resultados:					
Superficie glaciar	2041.85 km²	1595 km²	1289 km²	1118 km²	1.050,32 km²
Número de lagunas	No registra	No registra	8365 lagunas	8577 lagunas	8466 lagunas

Figura 58

Evolución del área glaciaria y del número de lagunas en el Perú (1960-2023)



La **figura 58** muestra la serie bivariada a escala nacional. La línea azul muestra la reducción del área glaciaria desde 2041,85 (1960), 1595,59 (2001), 1289 (2014), 1118 (2019), 1050,32 km² (2023); la línea discontinua naranja representa la tendencia lineal negativa del período. La serie verde (eje derecho) incorpora únicamente los años con información disponible de lagunas (2014: 8365; 2019: 8577; 2023: 8466); los años previos se marcan como “sin datos”.

5.3.2. Revisión sistemática sobre glaciares en el Perú

La revisión sistemática de quince estudios sobre glaciares peruanos permite evidenciar un patrón claro de retroceso multitemporal, con repercusiones que trascienden lo físico para impactar directamente en lo hidrológico, ecosistémico y social. Los resultados cuantitativos sintetizados en la **Tabla 9** muestran una tendencia coherente en distintas cordilleras del país, reafirmando el carácter estructural y persistente de la pérdida glaciaria en el contexto del cambio climático.

Los glaciares tropicales peruanos muestran retrocesos acelerados en las últimas décadas, con tasas que varían según la región. Por ejemplo, en las cordilleras Vilcanota, Vilcabamba y Urubamba del sur peruano se estiman pérdidas de área entre los 54 64%

entre 1975 y 2020 (Taylor et al, 2022). En la Cordillera Blanca, Durán-Alarcón et al (2015) reportaron descensos similares (51 - 58% de 1975 a 2010 en el área Caullaraju - Pastoruri), mientras que otros glaciares aislados como el Ampay disminuyeron en 48.9% entre 1991 y 2017 (Soto Carrión et al, 2022). Incluso en períodos cortos Palacios-Robles(2024) documentan reducciones notables: por ejemplo, la cuenca Parón perdió un 1.82% de área glaciar pasando de 18.82 a 18.48 km² durante el periodo evaluado correspondiente a 2009 - 2018. Estas tasas implican balances de masa muy negativos. En la Cordillera Vilcanota, por ejemplo, se midió un balance geodésico teniendo como resultados principales la disminución de -0.48 ± 0.07 metros de equivalente de agua por año(m w.e./año) entre los años 2000 - 2020(Taylor et al, 2022). La sublimación es un factor crítico en la pérdida anual en glaciares tropicales: en el estudio desarrollado por Winkler et al. (2009) muestran que en el glaciar Artesonraju el 60 - 90% de la energía disponible en la temporada seca se consume en sublimación frente a solo 10 - 15% en la temporada húmeda, limitando aún más el derretimiento. En otro estudio de gran relevancia Kochtitzky(2018) analizó la cuantificación de las tasas de pérdida de masa de los glaciares para gestionar los recursos hídricos y evaluar los peligros en los volcanes cubiertos de hielo, en regiones áridas como el sur de Perú. Se evidencio que la capa de hielo de Coropuna es actualmente la masa de hielo más extensa de los trópicos, con una superficie de 44,1 km², y se ha ido reduciendo a una tasa media de pérdida de superficie de 0,409 km² por año (0.71% anual) desde 1980. Por lo tanto, si la recesión de los glaciares continúa al ritmo actual, los resultados sugieren que Coropuna probablemente continuará contribuyendo al suministro de agua para usos agrícolas y domésticos hasta 2120, que es casi 100 años más de lo previsto por otros estudios.En conjunto, todos los estudios coinciden en saldos negativos generalizados y retrocesos pronunciados en Perú.

Estos cambios glaciologicos alteran fuertemente los regímenes hidrológicos y la regulación estacional. Modelos hidrológicos recientes indican que, aunque el manto de nieve en las cotas altas es frecuentemente delgado y efímero, contribuye de manera sustantiva al caudal: en la cuenca del Río Santa se estima que la nieve aporta alrededor del 23% del agua en temporada húmeda y los 38% en la seca; el derretimiento de hielo es particularmente crucial en la mitad de la estación seca aportando hasta 44% de la entrada de agua(Fyffe et al, 2025). En tanto, la reducción de la cobertura glaciar conlleva cambios ecosistémicos acuáticos: Palacios-Robles et al. (2024) documentaron que ríos con menor

influencia glacial presentaban aguas más calientes, turbidez menor y significativamente mayor diversidad local de macroinvertebrados, con un reemplazo de especies especializadas por especies generalistas al disminuir la influencia glacial.

Las proyecciones climáticas apuntan a escenarios de drástica pérdida futura de hielo. En el campo climático, el aumento de temperaturas implica un viraje de precipitación sólida a líquida; Llactayo et al. (2024) estiman que un calentamiento de +2°C reduciría la fracción de precipitación sólida a menos del 10% de su valor actual, lo que aceleraría el retroceso glacial. Modelos de desaparición de glaciares emblemáticos refuerzan este pronóstico: Yarleque et al. (2018) proyectan que el campo de hielo Quelccaya alcanzará un equilibrio lineal por encima de su cima hacia mediados de siglo, culminando en su desaparición irreversiblemente alrededor de 2055. De forma similar, se espera que para los años 2050 a 2100 los glaciares en cuencas como la Vilcanota y Urubamba pierdan decenas de porcentajes adicionales de área (hasta los 42 y 93% según escenario). Estos cambios indican un inminente agotamiento de la reserva de hielo, con pocas superficies altas suficientes para sostener la acumulación (Drenkhan, 2019).

El retroceso glacial aumenta los riesgos geohídricos en la región. El crecimiento de lagunas proglaciales es claro; Drenkhan et al. (2018) documenta un incremento del 15.5% en área de lagos con estimaciones de 23.3 a 26.9 km² entre los años 1988 y 2016 en las cuencas de Vilcanota - Urubamba, y se formarán nuevos lagos. Taylor et al. (2022) advierten que la declinación de hielo incrementa el potencial de peligros como avalanchas o inundaciones por Desbordamiento Repentino de Lagos Glaciares (GLOFs) y tensiona la provisión hídrica, pues el volumen perdido equivalente a 3.44 km³ entre 2000 hasta 2020 corresponde a unas 84 veces el abastecimiento anual de Cusco. Además, los glaciares alimentan cultivos e hidroeléctricas: por ejemplo, se estima que el 54% de la electricidad de Perú proviene de hidroelectricidad de cuencas glaciares. En el aspecto social y de servicios ecosistémicos, la pérdida de hielo tiene impactos medibles: Pozada-Rengifo et al. (2023) calcularon que el derretimiento glacial en la cuenca del Parón entre 2009 a 2018 ocasionó una disminución del servicio de regulación hídrica equivalente a 3.2 millones USD (valor presente) (más 0.05 millones USD en servicios turísticos), representando costos económicos directos.

Tabla 9*Estudios sobre glaciares analizados en la revisión sistemática*

ID	Autor y año	Área de estudio	Resultados cuantitativos
G1	Taylor et al. (2022)	Andes del sur de Perú (Cord. Vilcanota, Vilcabamba, Urubamba)	Pérdida de 54-64% de área glaciaria (1975–2020); balance geodésico -0.48 m w.e./año
G2	Drenkhan et al. (2019)	Cuenca Vilcanota-Urubamba (Cusco)	Área glaciaria -37.3% ($226.1 \rightarrow 141.7$ km ² , 1988-2016); lagos $+15.5\%$ ($23.3 \rightarrow 26.9$ km ²); futuro: 41-93% hielo perdido al 2100
G3	Winkler et al. (2009)	Glaciar Artesonraju (Cord. Blanca)	Sublimación domina la ablación: consume 60-90% de energía seca (10-15% en húmeda); implica pérdida anual elevada en masa.
G4	Pozada-Rengifo et al. (2023)	Cuenca Parón (Cordillera Blanca, PN Huascarán)	Retroceso de 1.82% área (2009-2018); valor presente perdido: \$3.2 M USD en servicios de caudal y \$0.05 M en turismo.
G5	Durán-Alarcón (2015)	Nevados Caullaraju Pastoruri (Cord. Blanca)	Retroceso glaciaria histórico 58.4% (-22.53 km ²) entre 1975 y 2010
G6	Soto Carrión et al. (2022)	Nevado Ampay (Andes del Sur)	Descenso de área de $2.13 \rightarrow 1.09$ km ² (48.9%) entre 1991 y 2017
G7	Llactayo et al. (2024)	Cumbres Alto-Andinas (Huaytapallana, Andes C. Perú)	(Cord. $+2^{\circ}\text{C}$ de T \Rightarrow precip. sólido $<10\%$ del actual (menos nevadas), alterando equilibrio hídrico.

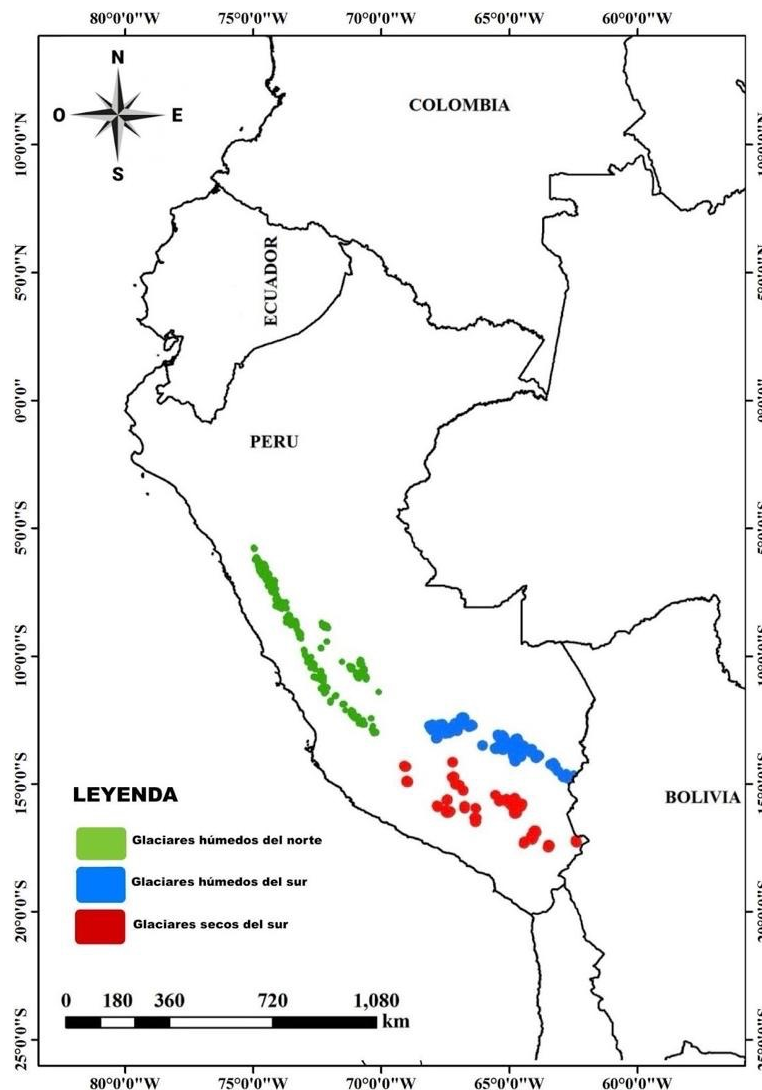
ID	Autor y año	Área de estudio	Resultados cuantitativos
G8	Yarleque et al. (2018)	Campo de hielo Quelccaya (Andes Centrales)	Área -31% (1988-2018); línea de equilibrio sube hasta la cumbre para 2050's, con desaparición completa al 2055
G9	Fyffe et al. (2025)	Cuenca Río Santa (Cord. Blanca)	Nieve endeble contribuye el 23% (wet) y 38% (dry) del flujo; hielo aporta hasta 44% mid-seca (modelación TOPKAPI).
G10	Palacios et al. (2024)	Ríos Cordillera Blanca (Parón, Huaytapallana)	Ríos con menor cobertura glaciaria mostraron temperaturas +tibias, turbidez baja y mayor diversidad local (α) de macroinvertebrados.
G11	Kochtitzky et al. (2018)	Nevado Coropuna (Arequipa)	Área glaciaria 1980-2014: de 58.0 a 44.1 km ² (-24%, -0.71%/año) (\approx 13.9 km ² perdidos).
G12	Bulegue & Custodio (2020)	Cordillera Huaytapallana (Junín, Perú)	Evolución glaciaria reciente; reporta fuerte retroceso de glaciares con tendencias negativas de masa (datos históricos hasta 2019).
G13	Mark & McKenzie (2007)	Ríos glaciares tropicales (Cord. Blanca)	Uso de isótopos ($\delta^{18}O$, δD) para rastrear el aporte de derretimiento glaciario a caudales; evidencia aumento de fracción de agua de glaciario en la descarga
G14	Veetil et al. (2017)	Glaciares peruanos (nacional)	(revisión) Integra varios estudios y trata de comprender las diferencias en las magnitudes de las respuestas de los glaciares hacia las perturbaciones climáticas en los trópicos internos y externos.

5.3.3. Modelamiento en el estudio de glaciares

El retroceso glaciar en los Andes peruanos es uno de los indicadores más visibles y preocupantes del cambio climático. La diferenciación climática utilizada en la **Figura 59** se sustenta en el marco de clasificación de glaciares tropicales por régimen de humedad y estacionalidad, donde se distinguen dominios de trópicos exteriores húmedos y trópicos exteriores secos; esta distinción es clave porque la sensibilidad glaciar cambia según la dominancia relativa de temperatura y precipitación en el balance de masa (Veettil et al., 2017). La **figura 59** clasifica en tres tipos: glaciares húmedos del norte (verde), glaciares húmedos del sur (azul) y glaciares secos del sur (rojo).

Figura 59

Distribución de los glaciares en Perú



Se desarrolló el estudio a través del análisis multitemporal de 3 sistemas glaciares seleccionadas estratégicamente: Nevado Huascarán (Cordillera Blanca, Áncash) - Glaciares húmedos del norte, Nevado Ausangate (Cordillera Vilcanota, Cusco) - Glaciares húmedos del sur y Nevado Coropuna (Cordillera Occidental, Arequipa) - Glaciares secos del sur.

Con el fin de que los casos de estudio sean comparables, trazables y representativos de la diversidad climática que controla la dinámica glaciaria en el Perú, la selección de Huascarán, Ausangate y Coropuna se realizó bajo un enfoque de muestreo intencional por “casos representativos”. Este criterio es consistente con la lógica metodológica empleada por el INAIGEM a escala nacional, que selecciona nevados y sistemas glaciares emblemáticos por su representatividad física y territorial, y recomienda evaluar la unidad “sistema glaciario” (conjunto de glaciares de un macizo) debido a su interconexión y dinámica común (Mejía Camones et al., 2025). En esa línea, los tres casos seleccionados responden a un criterio explícito: representar tres dominios climáticos - glaciológicos presentes en el territorio peruano y reflejados en tu cartografía (húmedo norte, húmedo sur y seco sur), asegurando al mismo tiempo relevancia hidrológica y disponibilidad de información oficial (INAIGEM, 2025).

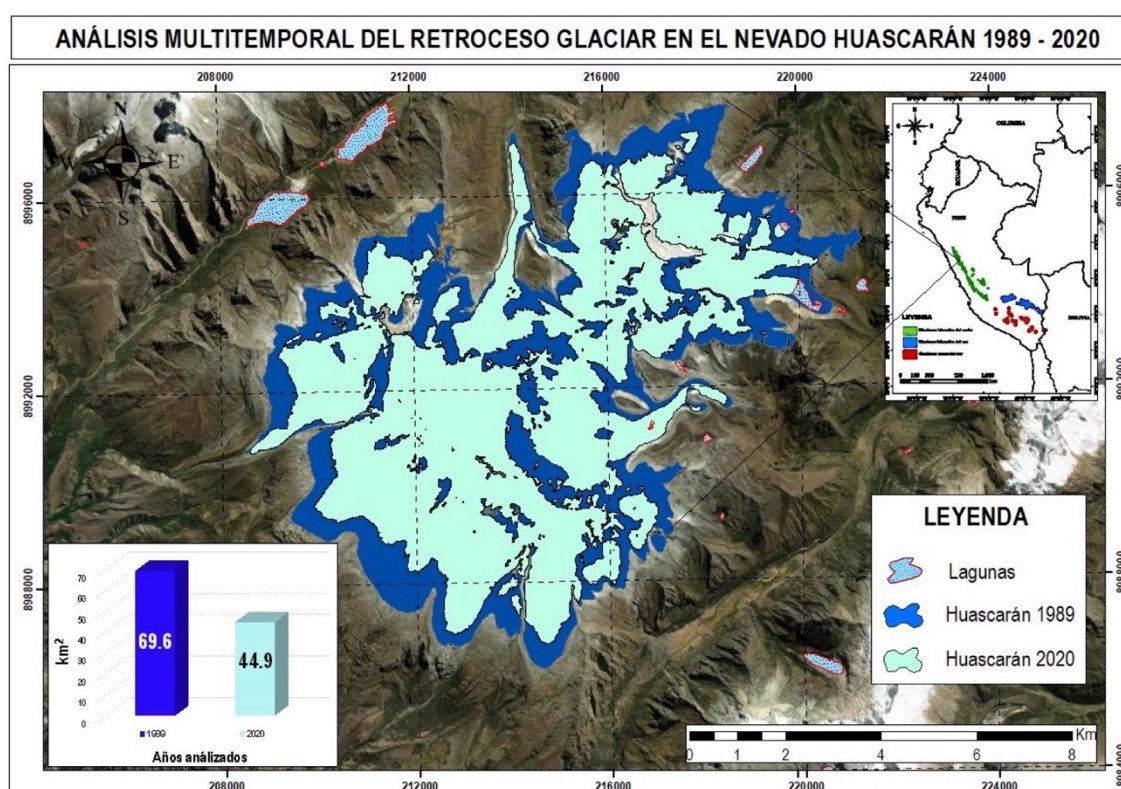
1. Glaciar Huascarán - Glaciares húmedos del norte

El Glaciar Huascarán, ubicado en la Cordillera Blanca (región Áncash), es el glaciar tropical más alto del mundo y uno de los más estudiados en los Andes peruanos. Según el análisis multitemporal desarrollado, su superficie glaciaria pasó de **69.6 km² en 1989 a 44.9 km² en 2020**, lo que representa una pérdida del **35.5%** de su área total en tres décadas. Este retroceso refleja los efectos combinados del aumento de temperaturas en la región, que alcanzan hasta 0.3 °C por década en promedio, y la disminución de la acumulación de nieve en sus cumbres. La **figura 60** muestra la distribución del área glaciaria en el Nevado Huascarán, ubicado en la Cordillera Blanca, región Áncash. Los polígonos representan las áreas glaciares correspondientes a los años 1989 (color azul oscuro) y 2020 (color celeste claro). La comparación evidencia un retroceso significativo, especialmente en las lenguas glaciares de menor altitud, donde el hielo ha dado paso a superficies expuestas al ambiente.

El siguiente análisis se enfoca en tres glaciares representativos: Huascarán, Ausangate y Coropuna, correspondientes a las macrorregiones climáticas de glaciares húmedos del norte, glaciares húmedos del sur y glaciares secos del sur, respectivamente. Utilizando datos multitemporales del geoportal de INAIGEM y herramientas de SIG, se evalúa la magnitud del retroceso glaciar entre 1989 y 2020, proporcionando un panorama integral.

Figura 60

Análisis multitemporal del retroceso glaciar en el Nevado Huascarán 1989-2020



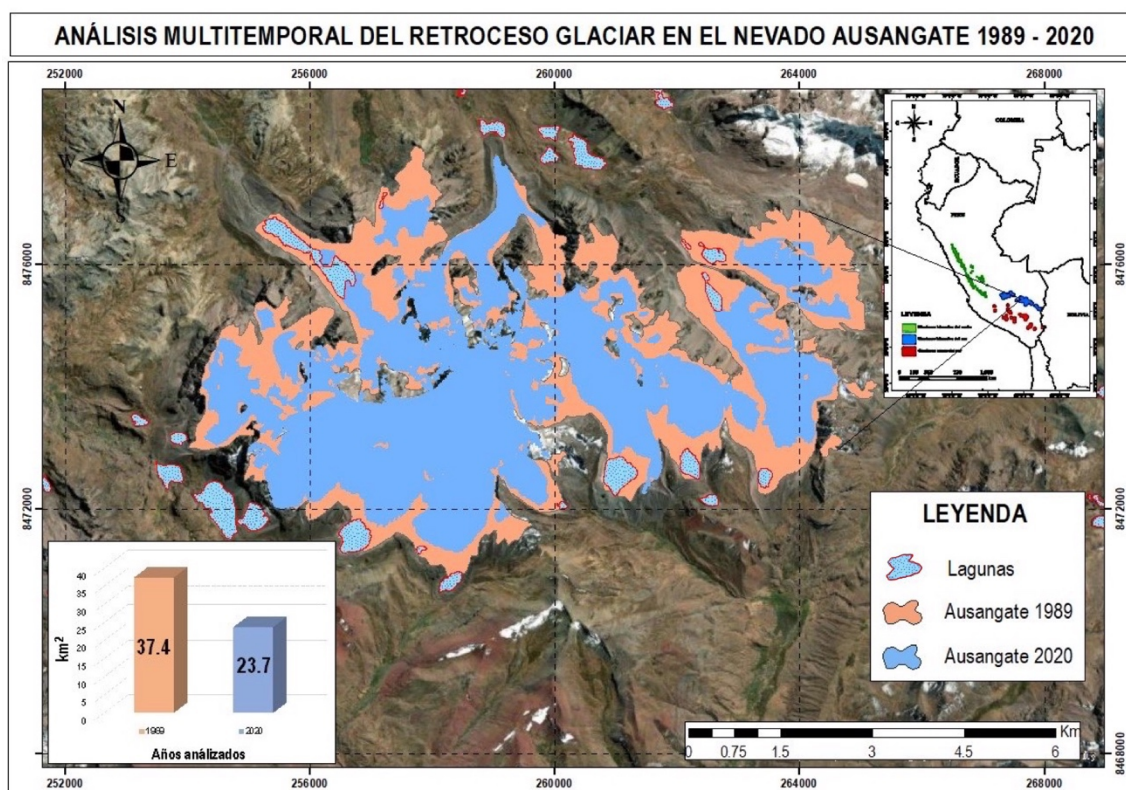
2. Glaciar Ausangate - Glaciares húmedos del sur

El Glaciar Ausangate, situado en la Cordillera Vilcanota (región Cusco), es una fuente vital de agua para las comunidades altoandinas. Entre 1989 y 2020, su superficie glaciar disminuyó de **37.4 km² a 23.7 km²**, lo que corresponde a una pérdida del **36.6%**. Este retroceso ha sido impulsado por el aumento de temperaturas en la región surandina, combinado con variaciones estacionales en las precipitaciones que afectan la acumulación de nieve en el glaciar. La **figura 61** ilustra la distribución espacial del glaciar Ausangate, localizado en la Cordillera Vilcanota, región Cusco. Los polígonos correspondientes a 1989 (color naranja) y 2020 (color azul claro) revelan una contracción sustancial en las

zonas de menor altitud, donde la cobertura de hielo ha retrocedido a favor de nuevas áreas rocosas. Además, se puede observar cómo este fenómeno ha dado lugar a la formación de nuevas lagunas glaciales, que son esenciales para el abastecimiento hídrico de las comunidades agrícolas durante la temporada seca. Sin embargo, estas lagunas presentan problemas de estabilidad debido a la fragmentación del glaciar, lo que incrementa el riesgo de desbordes.

Figura 61

Análisis multitemporal del retroceso glaciar en el Nevado Ausangate 1989-2020



3. Glaciar Coropuna: Representante de los glaciares secos del sur

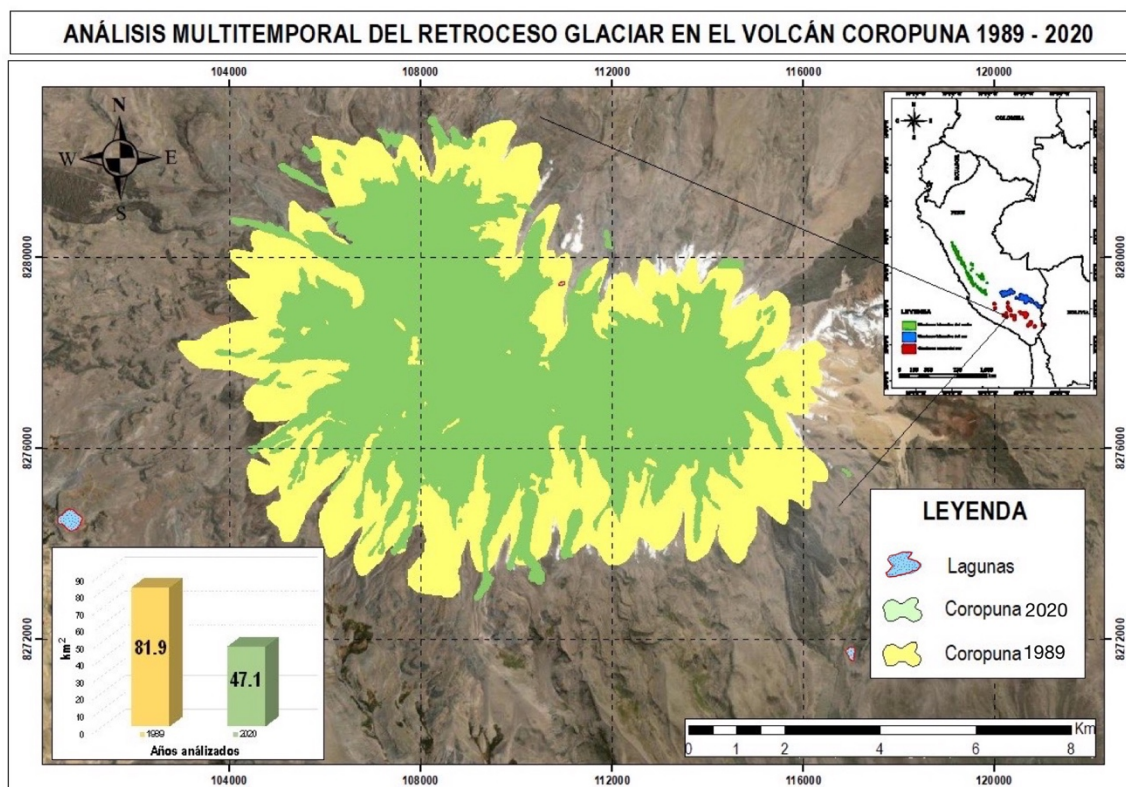
El Glaciar Coropuna, ubicado en la Cordillera Occidental en la región Arequipa, destaca por su vulnerabilidad frente al cambio climático debido a las condiciones áridas de la región. Entre 1989 y 2020, su superficie glaciar se redujo drásticamente de **81.9 km² a 47.1 km²**, representando una pérdida del **42.5%**, la más alta entre los glaciares estudiados. La **figura 62** evidencia un retroceso acelerado, con una contracción significativa en las zonas más bajas y una fragmentación del hielo en áreas de mayor altitud. Esta pérdida se

debe principalmente a las altas tasas de radiación solar, la disminución de precipitaciones y el incremento de temperaturas extremas en la región sur del Perú.

El impacto del cambio climático en el Glaciar Coropuna es crítico, ya que su retroceso afecta directamente la disponibilidad de agua para consumo humano y actividades agrícolas en comunidades rurales que dependen de su descarga estacional. Además, la desertificación de los suelos expuestos incrementa la vulnerabilidad del ecosistema circundante, reduciendo la capacidad de adaptación de las especies locales. Este glaciar, por su sensibilidad extrema, representa un caso emblemático de los efectos adversos del cambio climático en los glaciares secos de los Andes.

Figura 62

Análisis multitemporal del retroceso glaciar en el Nevado Coropuna



5.4. Resultados de la revisión sobre respuestas de la vegetación andina al cambio climático

Este apartado presenta la evidencia consolidada a partir de **24 estudios científicos** seleccionados mediante el proceso de revisión empleado en la tesis. El cuerpo de

resultados se organiza en **dos bloques**: (A) **vegetación silvestre o nativa** (n = 16), centrada en cambios de distribución, composición y dinámica en gradientes altitudinales y sistemas de alta montaña (véase **Tabla 10**); y (B) **vegetación cultivable y agroecosistemas altoandinos** (n = 8), orientada a respuestas productivas, fenológicas y de manejo frente a escenarios climáticos y estrés hídrico (véase **tabla 11**). En conjunto, los artículos abarcan escalas espaciales que van desde microhábitats subnavales y proglaciales hasta gradientes montanos amplios, e integran evidencia observacional, experimental, histórica y modelada.

A. Cambios en la vegetación altoandina

La evidencia en alta montaña muestra que los sistemas subnavales y proglaciales presentan una organización espacial extremadamente sensible al microclima, a los pulsos hídricos y a la microtopografía. En Andes peruanos, el análisis fitosociológico y florístico de comunidades vinculadas a procesos criogénicos integró un esfuerzo de muestreo amplio (152 plots y 287 relevés) y documentó que la estructura de comunidades está fuertemente filtrada por condiciones locales de humedad, sustrato y relieve fino (Galán de Mera et al., 2014). En la franja subnival del sur del Perú, el trabajo en Moquegua registró 153 relevés entre 4450 a 4800 metros, evidenciando reemplazos y transiciones comunitarias en bandas estrechas de altitud y exposición, coherentes con límites ecológicos frente a variación térmica y régimen de heladas (Montesinos-Tubée et al., 2021). Complementariamente, en suelos recientemente desglaciados por encima de 5000 metros, se reportan etapas tempranas de sucesión donde la colonización microbiana ocurre en pocos años y la fijación de Nitrógeno aumenta casi dos órdenes de magnitud en aproximadamente 4 a 5 años posteriores a la retracción, indicando que la reorganización ecosistémica inicia desde fases muy tempranas del post-glaciar (Schmidt et al., 2008).

A escala temporal reciente, la interacción entre retroceso glaciar y recolonización biótica revela cambios medibles en la estructura comunitaria. En un gradiente proglacial tropical, se observó que la riqueza local aumentó desde 8.69 ± 0.49 hasta 16.26 ± 1.09 especies/m² entre 2003 y 2007, y que un subconjunto de especies especialistas de ambientes fríos disminuyó, sugiriendo que la reorganización comunitaria no ocurre de forma instantánea sino con desfases y reacomodos de composición conforme cambian las condiciones del hábitat (Zimmer et al., 2018). En la Cordillera Vilcanota (Perú), un programa de

monitoreo de una década reporta señales climáticas consistentes; por ejemplo, promedios de temperatura máxima con incremento de hasta $+0.07$ °C/año y documenta cambios concomitantes en hábitat altoandino, proporcionando un marco empírico de seguimiento para evaluar transformaciones bióticas en sistemas glaciares tropicales (Seimon et al., 2017).

En bosques montanos y ecotonos, los resultados muestran respuestas heterogéneas y, en ocasiones, desacopladas respecto al ritmo del calentamiento. En parcelas de bosque andino, se estimó una migración altitudinal promedio de árboles de aproximadamente $+2.5$ m/año (con variación según el indicador considerado), mostrando una señal de desplazamiento ascendente, aunque con diferencias entre métricas basadas en abundancia, área basal y composición (Feeley & Silman, 2011). A nivel de mecanismos, los ensayos de trasplante de plántulas en la línea de árboles evidencian que el desempeño no es uniforme: la supervivencia puede variar sustantivamente entre especies y condiciones, con registros de supervivencia que alcanzan valores altos en determinados tratamientos (p. ej., hasta 95% para una especie en un sitio), mientras otras combinaciones reflejan restricciones de micrositio y exposición (Rehm & Feeley, 2016). En paralelo, los estudios de ensamblajes arbóreos a gran escala en gradientes montanos reportan que las comunidades no siempre “siguen” el calentamiento contemporáneo al ritmo esperado, destacando que los cambios en composición pueden ser más lentos que la señal climática, y que la respuesta puede depender de dispersión, suelo, historia de disturbio y estructura del bosque (Farfán-Ríos et al., 2025).

Además de cambios espaciales, algunos estudios incorporan evidencia de modificaciones funcionales y biofísicas asociadas al clima. Por ejemplo, se ha propuesto que cambios en rasgos foliares a lo largo de gradientes tropicales podrían influir en la reflectancia y, por extensión, en el balance energético superficial, con resultados que relacionan aumentos de temperatura con disminuciones del albedo de onda corta y del infrarrojo cercano a lo largo de gradientes altitudinales, en un marco que sugiere sensibilidad de atributos foliares frente al calentamiento (Doughty et al., 2018). En escalas históricas largas, análisis de composición funcional en sitios amazónicos y andinos reportan reorganizaciones coherentes con señales de calentamiento, sequía y disturbios a lo largo del tiempo, aportando una perspectiva de dinámica ecosistémica y cambios de ensamblaje bajo presiones climáticas (Van der Sande et al., 2023).

Finalmente, los estudios de modelación espacial complementan la evidencia observacional al estimar cambios potenciales de idoneidad y distribución. Para el género *Gynoxys* en el Perú, se reporta alta capacidad predictiva del modelamiento y se delimitan áreas potenciales de distribución e idoneidad en función de variables bioclimáticas (Coronel-Castro et al., 2025). En *Cedrela angustifolia*, el análisis conjunto de cambio climático y pérdida de cobertura arbórea proyecta disminuciones fuertes de hábitat, con estimaciones de reducción del orden de hasta 70% hacia 2070 para Perú en determinados escenarios, y cuantifica áreas potenciales de refugio (p. ej., del orden de miles de km²) que resultan relevantes para planificación de conservación y restauración (Ames-Martínez et al., 2025). En la región Arequipa, la modelación de géneros endémicos de *Asteraceae* evidencia que la respuesta no es uniforme entre taxa: se reportan expansiones porcentuales notorias bajo escenarios específicos (p. ej., incrementos reportados en el orden de >100% e incluso >1000% para algunos casos), mientras otros presentan reducciones, y el uso del suelo aparece como factor que co - modula la idoneidad espacial (Quipuscoa et al., 2019). A escala de Andes tropicales, el empleo de modelos de distribución para orientar estrategias de conservación reporta contracciones importantes del rango potencial en una fracción significativa de especies y resalta la necesidad de incorporar incertidumbre de escenarios en el diseño de prioridades (Ramírez-Villegas et al., 2014). En Tacna, la modelación de nichos para flora amenazada muestra respuestas divergentes entre especies y escenarios, reforzando la utilidad de análisis especie - específicos para gestionar riesgo climático y orientar medidas de conservación (Navarro Guzmán et al., 2020). Complementariamente, un análisis a escala nacional de biomas en el Perú reporta que, bajo escenarios evaluados, alrededor de 82% del territorio mantendría su clasificación de bioma, mientras ciertos biomas presentan cambios relevantes y algunos sistemas (p. ej., glaciares y humedales tipo pantano) se estiman con pérdidas superiores al 50%, aportando un marco macroecológico para ubicar la dinámica vegetal dentro del mosaico biogeográfico del país (Zevallos & Lavado-Casimiro, 2022)

Tabla 10*Revisión sistemática sobre cambios en la vegetación andina*

ID	Autor – año	Área de estudio	Método	Principales hallazgos
V1	Galán de Mera et al. (2014)	Andes peruanos (vegetación vinculada a criogénesis)	Fitociología y clasificación de comunidades asociadas a procesos criogénicos	Identifica comunidades altamente filtradas por microtopografía, a pulsos hídricos y extremos térmicos; cambios en estacionalidad nival y heladas pueden gatillar reorganización comunitaria.
V2	Montesinos-Tubée et al. (2021)	Sur del Perú (franja subnival)	Fitociología (inventarios, asociaciones y bandas altitudinales)	Evidencia reemplazo de comunidades (cojines, casmófitas, pastizales) en bandas estrechas determinadas por microclima y exposición; alta sensibilidad frente a variabilidad climática y retroceso glaciar.
V3	Zimmer et al. (2018)	Andes tropicales, ambientes alpinos de proglaciares	Síntesis conceptual y análisis cronosecuencias de proglaciares	Demuestra que el desfase temporal entre retroceso glaciar y respuesta biótica altera la trayectoria de ensamblaje, favoreciendo comunidades alpinas “nuevas”.
V4	Seimon et al. (2017)	Cordillera Vilcanota, Perú	Monitoreo de 10 años de hábitat alpino tropical	Registra transformación del hábitat altoandino en una década; la reorganización asociada al calentamiento y retroceso glaciar ejerce presión sobre componentes bióticos.
V5	Schmidt et al. (2008)	Andes peruanos (≈5000 m; suelos recién desglaciados)	Análisis microbiano y biogeoquímico de sucesión temprana	Muestra ensamblaje rápido de microorganismos y funciones del suelo, indicando que el retroceso glaciar activa nuevas trayectorias de sucesión que condicionan cambios posteriores en vegetación.
V6	Feeley & Silman (2011)	Andes del Perú (gradiente bosque montano–alta montaña)	Parcelas permanentes y análisis de migración altitudinal	Evidencia desplazamientos hacia mayores elevaciones en ensamblajes arbóreos; sugiere reorganización compositiva asociada al calentamiento, con respuestas lentas y heterogéneas.
V7	Rehm & Feeley (2016)	Línea de árboles tropical de alta montaña (Andes)	Experimento de trasplante de plántulas	Confirma que el ascenso del treeline es especie-específico y depende de temperaturas mínimas, radiación y microclimas; no responde de forma automática al calentamiento.

ID	Autor – año	Área de estudio	Método	Principales hallazgos
V8	Farfán-Ríos et al. (2025)	Andes (parcelas de comunidades arbóreas)	Series temporales y métricas de termofilización	Reporta “deuda climática”: las comunidades arbóreas no siguen el calentamiento al ritmo esperado, evidenciando desacople clima–composición.
V9	Doughty et al. (2018)	Gradiente altitudinal del Perú (bosques tropicales)	Análisis de rasgos foliares y reflectancia/albedo	Sugiere que el calentamiento se asocia a hojas más oscuras y cambios funcionales, con implicancias en el balance energético y procesos ecosistémicos.
V10	Van der Sande et al. (2023)	Sitios amazónicos y andinos (escala milenaria)	Paleoecología y análisis de rasgos funcionales	Evidencia que calentamiento, sequía y perturbaciones impulsan cambios de composición funcional a largo plazo; aporta contexto de dinámica no lineal y reensamblaje.
V11	Quipuscoa Silvestre et al. (2019)	Arequipa, Perú (Asteraceae endémicas)	Modelos de distribución y análisis de uso del suelo	Proyecta reducción y fragmentación de idoneidad para endemismos; muestra impacto combinado de clima y uso del suelo.
V12	Navarro Guzmán et al. (2020)	Tacna, Perú (flora amenazada)	Modelación de nicho ecológico (escenarios climáticos)	Muestra respuestas divergentes entre especies; algunas pierden idoneidad y otras la redistribuyen, justificando manejo y conservación específicos por especie.
V13	Coronel-Castro et al. (2025)	Perú (Gynoxys, Andes)	Modelos de distribución de especies (actual–futuro)	Proyecta pérdida de idoneidad en rangos cálidos y potencial ganancia hacia pisos fríos; enfatiza la importancia de la conectividad altitudinal.
V14	Ames-Martínez et al. (2025)	Bosques montanos andinos (<i>Cedrela angustifolia</i>)	SDM + cambio climático + pérdida de cobertura	Evidencia disminución y fragmentación de idoneidad por efecto combinado de clima y deforestación; prioriza refugios climáticos y restauración del paisaje.
V15	Ramírez-Villegas et al. (2014)	Andes tropicales	SDM aplicado a planificación de conservación	Propone asegurar continuidad altitudinal y considerar incertidumbre climática en estrategias de conservación.
V16	Zevallos Lavado (2022)	& Perú (biomas a escala nacional)	Modelación de biomas y bioclimas	Proyecta cambios en la distribución de biomas; ofrece un marco macro para interpretar reconfiguraciones territoriales y desajustes con clasificaciones ecológicas estáticas.

B. Cultivos andinos, manejo adaptativo y seguridad alimentaria

En los agroecosistemas, los resultados muestran que el cambio climático se expresa tanto como riesgo productivo como mediante oportunidades de ajuste agronómico, dependiendo del cultivo, el manejo y el contexto altitudinal. Tres estudios aplican AquaCrop (Modelo de la FAO para la productividad hídrica y el rendimiento de los cultivos) para simular rendimientos bajo escenarios climáticos futuros en sistemas altoandinos. En ulluco (*Ullucus tuberosus*) en los Andes centrales del Perú, el modelamiento reporta rendimientos observados por campaña que oscilan en el orden de 18.45 t/ha (F1), 26.13 t/ha (F2) y 20.59 t/ha (F3), y muestra sensibilidad del rendimiento a la estacionalidad de lluvias y al calendario de siembra (Flores-Márquez et al., 2024). En papa (*Solanum tuberosum*) de secano (Altiplano peruano, variedad *Imilla Negra*), se reporta un buen desempeño del modelo y rendimientos medios simulados del orden de 11.26 t/ha (2023-2037) y 10.84 t/ha (2038-2052) bajo escenarios evaluados, con variaciones según ventana temporal y condiciones climáticas proyectadas (Puma-Cahua et al., 2024). En quinua (*Chenopodium quinoa*) en valles interandinos del Perú, la simulación para 2050 muestra diferencias por variedad y escenario: se reportan rendimientos simulados de aproximadamente 5.52 t/ha, 4.65 t/ha y 3.61 t/ha para variedades evaluadas, y se señala que los escenarios de cambio climático inducen cambios diferenciados según cultivar (Ramos et al., 2023).

De manera complementaria a la modelación, los estudios empíricos de resiliencia genética y de manejo aportan indicadores cuantificables y comparables. En *Solanum tuberosum*, un ensayo de selección de 79 papas nativas bajo condiciones de estrés hídrico reporta que la sequía puede reducir la producción hasta 70%, y se identifican al menos nueve variedades locales con alta resiliencia y productividad relativa bajo estrés, aportando evidencia directa para estrategias de adaptación basadas en recursos genéticos locales (Zevallos et al., 2023). En sistemas de pequeños productores, el análisis del manejo tradicional de fertilidad de suelos indica que las prácticas locales pueden amortiguar impactos climáticos; por ejemplo, se reportan rendimientos de referencia del orden de 6.8 kg/m² en la zona media con fertilización orgánica y, en contraste, reducciones fuertes (del orden de 60%) en rendimiento comercial bajo condiciones de baja altitud con fertilización sintética en el marco del análisis comparativo, reforzando la

relevancia de prácticas de manejo como parte del paquete de adaptación (Visscher et al., 2024).

En la dimensión territorial y de dinámica socio ecológica, el estudio de agrobiodiversidad de papa (*Solanum tuberosum*) en sierra central peruana muestra evidencia espacial concreta de reorganización del uso agrícola en altura: se reporta un desplazamiento altitudinal hacia arriba de aproximadamente 306 metros desde 1975, sobre una base de 323 hogares y 1101 parcelas, ilustrando cómo la gestión campesina y la diversificación pueden reconfigurarse en gradientes altitudinales en respuesta a presiones ambientales y socioeconómicas (Arce et al., 2019). Finalmente, un estudio de alcance regional en Andes tropicales evidencia que los riesgos sobre rendimiento pueden ser severos bajo calentamiento: se reportan disminuciones proyectadas de rendimiento que pueden superar 87% en ciertos contextos, y pérdidas económicas potenciales que alcanzan magnitudes del orden de 2300 USD/ha/año, con reducciones también reportadas para maíz (*Zea mays*) en el rango aproximado de 21 - 29% según condiciones y escenarios evaluados (Tito et al., s. f.). Estos resultados consolidan una base cuantitativa para describir vulnerabilidad y rangos de respuesta productiva en agroecosistemas de montaña.

Tabla 11*Revisión sistemática sobre cultivos andinos*

ID	Autor-año	Área de estudio	Método	Principales hallazgos
V17	Flores-Márquez et al., 2024	Andes centrales (secano; cultivo ulluco)	Modelación + calendario de siembra	El rendimiento depende de estacionalidad de lluvias; ajustes fenológicos (fecha de siembra) pueden compensar pérdidas bajo ciertos escenarios, mostrando ventana de adaptación.
V18	Puma-Cahua et al., 2024	Altiplano peruano (papa en secano)	AquaCrop + escenarios climáticos	Identifica sensibilidad del rendimiento ante cambios de temperatura/precipitación; permite mapear condiciones futuras de productividad y discutir medidas de adaptación (manejo/fechas).
V19	Inca Roca et al., 2023	Valle del Mantaro (Jauja, Junín), Perú (quinua)	Rendimiento real (campo) + simulación (escenarios) AquaCrop	Calibra el modelo y compara rendimiento real vs simulado; proyecta cambios de rendimiento bajo escenarios, útil para discutir desplazamientos de aptitud agrícola en valles interandinos.
V20	Zevallos et al., 2023	Andes centrales del Perú (papa nativa/landraces)	Ensayos de (“screening”) de locales	Identifica variabilidad de respuesta de landraces frente a variedades de estrés asociado a CC; sustenta selección de materiales con mejor desempeño como medida de adaptación.

ID	Autor-año	Área de estudio	Método	Principales hallazgos
V21	Tito et al., 2018	Andes tropicales (gradiente altitudinal; seguridad alimentaria)	Experimento de desplazamiento altitudinal + evaluación de rendimiento	Concluye aumento del riesgo de pérdidas de rendimiento de y presión sobre seguridad alimentaria; conecta CC con vulnerabilidad productiva de montaña.
V22	Visscher et al., 2024	Sistemas de pequeños productores andinos (Perú)	Manejo tradicional del suelo (comparación/ensayos)	Prácticas de fertilidad amortiguan impactos del estrés climático, aumentando estabilidad productiva y resiliencia del agroecosistema.
V23	Arce et al., 2019	Sierra central del Perú (paisajes agrícolas de papa)	Dinámica espacio-temporal de agrodiversidad (gestión campesina)	La diversidad de variedades actúa como seguro adaptativo frente a clima/mercado, pero es vulnerable a erosión; recomienda conservación in situ y soporte institucional.
V24	Lozano-Povis et al., 2021	Andes (agricultura andina; revisión)	Revisión sistemática (síntesis de evidencia)	Resume sensibilidad de agricultura andina al CC y enfatiza integración de conocimiento local + innovación y planificación territorial; funciona como evidencia de segundo orden para contextualizar hallazgos.

VI. Discusión

6.1. Línea base conceptual Pulgar Vidal y Antonio Brack para interpretar ecorregiones andinas bajo cambio climático

La lectura clásica de los ecosistemas andinos en el Perú se ha apoyado en dos marcos de gran influencia: los 8 pisos altitudinales de Javier Pulgar Vidal y las 11 ecorregiones de Antonio Brack. El primero privilegia gradientes altitudinales, térmicos y culturales para organizar el territorio (Pulgar Vidal, 1996); el segundo propone unidades ecológicas funcionales marinas, costeras, andinas y amazónicas definidas por combinaciones de clima, biota, procesos y rasgos fisiográficos (Brack Egg & Mendiola, 2000). Ambos cumplieron, y siguen cumpliendo, un papel pedagógico y de ordenamiento conceptual. Sin embargo, la aceleración del calentamiento global, la redistribución espacio estacional de la precipitación y la retracción sostenida de la criosfera obligan a releer estos marcos con criterios dinámicos y explícitamente climáticos. Nuestros resultados respaldan que las fronteras ecológicas andinas se comportan hoy como umbrales móviles más que como sistemas estáticos, y que el desacople entre altitud y clima se ha intensificado por la variabilidad topográfica, la complejidad microclimática y los cambios en el balance hídrico (IPCC, 2023; Pepin et al., 2015; Vuille et al., 2008). La premisa implícita de estas dos clasificaciones ecológicas es la estabilidad relativa del clima (o al menos de sus rangos típicos por altitud). Sin embargo, el IPCC sintetiza que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y que la influencia humana ha calentado atmósfera, océano y tierra; esto implica que las variables que sostienen la diferenciación ecológica (temperatura, extremos, componentes de hielo, ciclo hidrológico) están cambiando en escalas relevantes para planificación (IPCC, 2021).

La visión clásica de Pulgar Vidal sobre la zonificación altitudinal de los Andes se fundamentaba en una correspondencia estable entre la altitud, la temperatura (representada por isocronas térmicas) y la estacionalidad de las lluvias. Los pisos ecológicos Quechua, Suni, Puna y Janca se ubicaban tradicionalmente dentro de estos parámetros climáticos. No obstante, este equilibrio se está alterando debido al calentamiento dependiente de la elevación, un fenómeno en el que el calentamiento es más acelerado en las altas montañas. Este proceso causa un ascenso de las isotermas, lo que modifica la base climática sobre la que se asientan estos pisos y fuerza el

desplazamiento de sus límites altitudinales tradicionales y cuando la fase nival da paso a regímenes más pluviales a igual elevación, alterando la duración y el momento de la acumulación nival (Pepin et al., 2015; Vuille et al., 2008). La consecuencia conceptual es doble. Primero, la base térmica que sustentaba la “normalización” altitudinal de los pisos se desplaza, haciendo que las zonas de transición entre pisos ecológicos se ensanchen y se tornen más difusas. Segundo, la heterogeneidad topográfica (exposición y pendiente) y procesos locales (acumulación de aire frío, inversión térmica, sombras orográficas) generan mosaicos microclimáticos que rompen la idea de un único límite altitudinal continuo. La cartografía estática de pisos, sin rangos y sin bandas de incertidumbre, tiende entonces a representar la realidad ecológica y climática actual.

El enfoque de ecorregiones de Brack y Mendiola captura mejor los procesos (flujos de energía y agua, circulación oceánica-atmosférica, estacionalidad) y los ensamblajes biológicos que resultan de ellos. En los Andes, ecorregiones como Serranía Esteparia, Puna y Páramo sintetizan atributos climáticos y biogeográficos, no solo la altitud. Aun así, su representación operativa en mapas nacionales suele fijar límites rígidos por conveniencia cartográfica, lo que también queda tensionado por tres evidencias convergentes: (i) retroceso glaciario secular con formación de nuevas lagunas y reorganización hidrológica aguas abajo; (ii) aumento de temperaturas mínimas y máximas que redefinen la duración de “ventanas térmicas” para crecimiento vegetal; y (iii) redistribución intra-anual de la precipitación con cambios en la estacionalidad y en el balance nival (Rabatel et al., 2013; IPCC, 2023). En la práctica, nuestros mapas y gráficos muestran zonas de transición que se desplazan y reconfiguran en función de la interacción clima y relieve, y que ya no pueden asumirse como bordes nítidos y permanentes. Además, el nexo entre la criosfera y los ecosistemas es particularmente ilustrativo para una relectura crítica. La literatura documenta pérdidas persistentes de área y espesor de los glaciares tropicales andinos desde mediados del siglo XX, con aceleración reciente (Vuille et al., 2008; Rabatel et al., 2013). Este retroceso contrae el dominio criogénico de Janca, desplaza hacia arriba el límite funcional con Puna y altera el régimen de caudales, con efectos aguas abajo en productividad primaria y en la fenología de la vegetación altoandina. En términos de marcos clasificatorios, esto equivale a un corrimiento de umbrales que no es estrictamente altitudinal, sino térmico e hídrico. Es decir, la delimitación de Puna o Serranía Esteparia resulta ser una función de rangos climáticos

dinámicos (temperatura mínima estacional, déficit hídrico efectivo, duración de la cobertura nival) más que de cotas absolutas.

A fin de sostener la elección de **Pulgar Vidal** y **Antonio Brack** como marcos de referencia en esta tesis, es necesario discutir no solo su influencia histórica, sino también qué tipo de lectura permiten y qué sesgos generan cuando se interpretan en un contexto de cambio climático **Tabla 12**. En términos operativos, ambos marcos comparten una premisa de fondo: la posibilidad de describir el territorio mediante unidades relativamente coherentes. Sin embargo, los resultados climáticos y ecohidrológicos ya discutidos muestran que, en sistemas de montaña, esa coherencia se expresa hoy como zonas de transición móviles más que como fronteras estables. Por ello, la comparación con instrumentos contemporáneos como el Mapa Nacional de Ecosistemas (MINAM, 2019) y las zonas de vida basadas en Holdridge implementadas por SENAMHI (Aybar-Camacho et al., 2017) permite precisar qué aporta cada marco y cómo debe leerse para evitar interpretaciones rígidas.

Tabla 12*Marcos conceptuales y operativos para interpretar la dinámica climática en los Andes peruanos*

Marco (año)	Unidad principal	VARIABLES ESTRUCTURANTES	Aporte climático	Limitación
Pulgar Vidal (1940)	Piso altitudinal	Altitud; gradiente térmico; estacionalidad de lluvias; componente cultural	Explica umbrales altitudinales y su posible desplazamiento asociado al ej., “los pisos solo ascienden”); aumento de isotermas; útil para analizar transiciones y “bandas” ecológicas.	Riesgo de interpretación simplista (p. subestima microclimas y discontinuidades espaciales.
Brack-Mendiola (2000)	Ecorregión	Coherencia funcional entre clima, suelo, hidrología y biota	Permite discutir el funcionamiento ecohidrológico y los cambios en la coherencia territorial más allá de la altitud.	Puede homogeneizar la variabilidad interna; límites rígidos pueden ocultar mosaicos y zonas de transición.
MINAM (2019)	Ecosistemas (mapa oficial)	Capas integradas de cobertura, bioclima y fisiografía mediante SIG	Enlace directo con la gestión ambiental y el monitoreo; base operativa para la actualización y seguimiento de cambios ecosistémicos.	Riesgo de “congelar” ecosistemas si no se actualiza periódicamente; comparabilidad histórica limitada sin equivalencias metodológicas.
Holdridge / SENAMHI (2017)	Zonas de vida	Biotemperatura; precipitación; evapotranspiración potencial	Proporciona un lenguaje bioclimático cuantitativo para evidenciar corrimientos asociados a la temperatura y al balance hídrico.	Puede reducir el análisis a variables climáticas; alta dependencia del periodo climatológico utilizado.

Estos dos planteamientos se priorizaron porque funcionan como marcos “clásicos” de referencia (pedagógicos y ampliamente internalizados en el país), lo que los convierte en una base idónea para discutir cómo el calentamiento, la variabilidad hidroclimática y el retroceso criosférico reconfiguran fronteras que históricamente se comunicaron como estables. Por otro lado, el Mapa Nacional de Ecosistemas se concibe como un producto técnico operativo reciente, sustentado en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), sensores remotos y criterios de clasificación actualizados; por ello, resulta excelente para gestión, reporte y monitoreo, pero no cumple el mismo rol histórico de “línea base conceptual” orientada a contrastes temporales amplios (MINAM, 2019). De modo similar, el enfoque de zonas de vida es potente para expresar desplazamientos bioclimáticos porque traduce el clima a unidades comparables; sin embargo, al estar directamente definido por variables climáticas (dependientes de la climatología), su aporte se interpreta mejor como soporte cuantitativo complementario bioclimático y no como el marco principal de comparación frente a Pulgar Vidal y Brack - Mendiola (Aybar-Camacho et al., 2017). En síntesis, MINAM y Holdridge no se han descartado; al contrario, son referentes de validación y como instrumentos de operacionalización para esta investigación.

6.2. Tendencias climáticas en los Andes peruanos: Temperatura y Precipitación

En este apartado se discuten los hallazgos sobre variabilidad climática andina integrando dos líneas de evidencia complementarias: (i) la revisión sistemática de estudios climáticos (Tablas 7 y 8), y (ii) el análisis de tendencias (1981-2016) de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin) y precipitación mediante la prueba no paramétrica de Mann - Kendall, aplicada a series PISCO - SENAMHI y resumida para unidades biofísicas derivadas de los marcos de Pulgar Vidal (pisos altitudinales) y Antonio Brack (ecorregiones). Este enfoque mixto es metodológicamente clave porque, en montaña tropical, el cambio climático rara vez se manifiesta como variaciones lineales y uniformes en promedios anuales; con mayor frecuencia emerge como reorganización estacional, cambios en la fase de la precipitación (nieve - lluvia), modificaciones en extremos y señales moduladas por variabilidad natural multiescala (Pepin et al., 2015; Garreaud, 2018; Vuille et al., 2018).

En conjunto, la evidencia converge en un patrón robusto: la temperatura muestra una señal de calentamiento estadísticamente consistente en todas las unidades analizadas, mientras que la precipitación exhibe alta complejidad (heterogeneidad espacial, estacionalidad y dominancia de extremos), lo cual puede impedir que una prueba de tendencia monotónica detecte cambios a escala anual aun cuando el régimen hidroclimático esté configurándose (Huerta et al., 2023; SENAMHI, 2022; Potter et al., 2023).

A. Precipitación

Los resultados de la prueba de Mann - Kendall muestran que el indicador anual de precipitación empleado en este estudio (derivado de PISCO-SENAMHI y agregado por unidad biofísica) no presenta una tendencia monotónica estadísticamente significativa en el periodo 1981-2016. Esta conclusión se sostiene de manera consistente tanto en las ecorregiones altoandinas de Brack (Serranía Esteparia, Puna/Altos Andes y Páramo) como en los pisos altitudinales de Pulgar Vidal (Quechua, Suni, Puna y Janca), donde los valores de τ se mantienen bajos y los p-valores superan el umbral convencional de significancia ($p > 0.05$). Por ejemplo, en el piso Quechua en relación a la variable precipitación se observa una pendiente visual ligeramente positiva en la serie, pero con $\tau = 0.187$ y $p = 0.111$, lo cual indica que la variación interanual y la dispersión de los datos impiden afirmar un cambio direccional sostenido con significancia estadística para el indicador analizado (véase **Gráfico 38**). En términos interpretativos, este patrón no debe leerse como “ausencia de cambio climático”, sino como evidencia de que en sistemas de montaña tropical la señal pluviométrica suele manifestarse de forma no lineal y multiescala, por lo que una prueba monotónica aplicada a un único indicador anual puede no capturar cambios que ocurren vía: (i) redistribución estacional e intra-anual de la lluvia, (ii) aumento de la variabilidad interanual, (iii) cambios en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, y (iv) modificaciones en la fase de precipitación (nieve vs. lluvia) asociadas al ascenso del nivel de 0 °C (Garreaud, 2018; Sulca et al., 2018; SENAMHI, 2022). Esta lectura se refuerza con la evidencia espacial: los mapas areales promedio desarrollado para los periodos de 1981 a 2016 muestran que la precipitación presenta gradientes y contrastes internos dentro de una misma unidad (heterogeneidad intrasistema), además de diferencias claras entre unidades, lo que sugiere que el cambio

puede expresarse más como reorganización espacial - temporal del régimen de lluvias que como una tendencia monotónica uniforme en toda el área analizada.

La revisión sistemática aporta mecanismos que explican por qué la señal pluviométrica suele ser heterogénea. En el Altiplano sur (Perú-Bolivia) y la cuenca del Mantaro, mediciones con radar y campañas in situ han descrito organización de lluvias con fuerte ciclo diurno y una banda brillante vinculada a la capa de fusión en torno a 4.3 y 4.7 km, aspecto crítico para entender cambios en el nivel de 0 °C (Endries et al., 2018; Kumar et al., 2020). Bajo calentamiento, el ascenso del nivel de 0 °C favorece la transición de precipitación sólida a líquida, lo que modifica el “modo” de regulación hídrica de montaña: más escorrentía inmediata y menor almacenamiento estacional en forma de nieve (Pepin et al., 2015; Vuille et al., 2018). En esa misma dirección, resultados aplicados a nevados andinos señalan que, bajo un escenario de incremento térmico de +2 °C, la fracción de precipitación sólida podría descender por debajo de 10% en zonas como Huaytapallana (Llactayo et al., 2024), reforzando que la pregunta relevante no es solo cuánto llueve, sino cómo y en qué fase precipita.

Adicionalmente, la revisión sistemática evidencia que la precipitación extrema se encuentra fuertemente modulada por forzantes oceánico - atmosféricos como ENSO. En la cuenca del río Piura, Farías de Reyes et al. (2024) reportan dominancia de ENSO sobre los máximos diarios hasta el (70%), en los años como 1982–83, 1997–98 y 2017 concentrando los eventos más intensos. Este patrón explica por qué una tendencia sobre totales anuales puede resultar no significativa: los extremos pueden estar concentrados en episodios de alta energía que dominan la estadística interanual y producen “saltos” no monotónicos (Garreaud, 2018; Farías de Reyes et al., 2024).

Finalmente, los estudios de proyección citados en este trabajo sugieren que los cambios de precipitación pueden expresarse más por estación que por el promedio anual. Por ejemplo, para Tacna, se proyecta una reducción en JJA (-10 a -20%) y aumentos en MAM (+5 a +15%) (De la Cruz et al., 2025). A escala cordillerana, se anticipan cambios en precipitación anual junto con incremento de extremos húmedos y periodos secos prolongados, indicando un futuro dominado por intensificación de la variabilidad hidrológica más que por una señal uniforme (Potter et al., 2023). En síntesis, la evidencia combinada sustenta una conclusión técnica central: en los Andes peruanos, la

precipitación está gobernada por controles multiescala (topografía, mesoescala y ENSO) y por reorganización estacional, por lo que su evaluación debe priorizar métricas de estacionalidad, extremos y fase, además del total anual (Garreaud, 2018; SENAMHI, 2022).

Nota de siglas estacionales: JJA = junio-julio-agosto; MAM = marzo-abril-mayo.

B. Temperatura

A diferencia de la precipitación, la señal térmica es consistente y estadísticamente robusta. Los resultados Mann - Kendall muestran tendencias crecientes significativas en Tmax y Tmin para todas las unidades analizadas, tanto en ecorregiones (Serranía Esteparia, Puna o Altos Andes, Páramo) como en pisos altitudinales (Quechua, Suni, Puna y Janca). Los valores de τ y p-valor (Véase **Tabla 13 y 14**) evidencian un calentamiento generalizado durante 1981-2016.

Este patrón es coherente con la literatura regional citada en la tesis: en el Altiplano Perú-Bolivia se han reportado incrementos en Tmax del orden de 0.15 - 0.25 °C/década y aumentos en Tmin cercanos a 0.08 °C/década (López-Moreno et al., 2016), magnitudes compatibles con un calentamiento persistente de alta montaña. Además, la tesis resalta un punto metodológico crítico: en un país con topografía extrema, los productos climáticos de alta resolución son determinantes para representar gradientes reales. El producto PISCOT v1.2 (5 km) presenta desempeños cuantificados con Error Absoluto Medio(MAE) de 1.2 - 1.4 °C. Significa que, en promedio, la temperatura estimada por el producto (PISCOT) difiere de la temperatura observada en alrededor de 1.2 a 1.4 °C, por ende revela discrepancias sustantivas frente a reanálisis globales en zonas altoandinas, lo que justifica el uso de datos ajustados al relieve peruano para inferencias territoriales (Huerta et al., 2023; SENAMHI, 2022).

En términos funcionales, el calentamiento no debe interpretarse únicamente como “más calor”, sino como una modificación del balance energético que incrementa la demanda evaporativa, altera ventanas agroclimáticas y desplaza umbrales térmicos que sostienen gradientes ecológicos. La literatura sugiere que aumentos cercanos a 1 °C hacia 2030 podrían asociarse con reducciones en rendimiento de cultivos andinos como maíz y papa

en sistemas de secano (Sanabria et al., 2014), evidenciando que la señal térmica es, además de estadísticamente clara, ecológica y socialmente relevante.

Tabla 13

Tendencias climáticas (prueba de Mann–Kendall, 1981–2016) por ecorregión andina según Brack

Unidad (ecorregión)	Variable	τ (Tau)	p-valor	Lectura estadística
Serranía Esteparia	Temperatura máxima	0.394	0.000767	Tendencia significativa creciente
Serranía Esteparia	Temperatura mínima	0.425	0.000276	Tendencia significativa creciente
Serranía Esteparia	Precipitación	0.079	0.505	Tendencia no significativa
Puna y Altos Andes	Temperatura máxima	0.435	0.000200	Tendencia significativa creciente
Puna y Altos Andes	Temperatura mínima	0.451	0.000116	Tendencia significativa creciente
Puna y Altos Andes	Precipitación	0.092	0.438	Tendencia no significativa
Páramo	Temperatura máxima	0.235	0.045300	Tendencia significativa creciente
Páramo	Temperatura mínima	0.283	0.015900	Tendencia significativa creciente
Páramo	Precipitación	0.073	0.540	Tendencia no significativa

La **tabla 13** muestra las tres ecorregiones altoandinas se observa calentamiento significativo en Tmax y Tmin, mientras que la precipitación no presenta tendencia monótona significativa en 1981 - 2016.

Tabla 14

Tendencias climáticas (prueba de Mann–Kendall, 1981–2016) por piso altitudinal andino según Pulgar Vidal

Piso altitudinal (Pulgar Vidal)	Variable	τ (Tau)	p-valor	Lectura estadística	
Quechua	Temperatura máxima	0.371	0.001510	Tendencia significativa	creciente
Quechua	Temperatura mínima	0.467	0.0000658	Tendencia significativa	creciente
Quechua	Precipitación	0.187	0.111	Tendencia significativa	no
Suni	Temperatura máxima	0.416	0.000378	Tendencia significativa	creciente
Suni	Temperatura mínima	0.460	0.0000827	Tendencia significativa	creciente
Suni	Precipitación	0.073	0.540	Tendencia significativa	no
Puna	Temperatura máxima	0.451	0.000116	Tendencia significativa	creciente
Puna	Temperatura mínima	0.473	0.0000522	Tendencia significativa	creciente
Puna	Precipitación	0.044	0.713	Tendencia significativa	no
Janca	Temperatura máxima	0.470	0.0000587	Tendencia significativa	creciente
Janca	Temperatura mínima	0.463	0.0000738	Tendencia significativa	creciente
Janca	Precipitación	0.102	0.391	Tendencia significativa	no

La **tabla 14** muestra el calentamiento que se intensifica hacia pisos altos (Puna y especialmente Janca), mientras la precipitación no presenta tendencia monótona significativa en ningún piso.

En términos de lectura integrada, ambas tablas condensan el hallazgo central: la señal térmica es robusta y generalizada en ecorregiones y pisos altitudinales, mientras que la precipitación mantiene un comportamiento estadísticamente no monotónico, compatible con una dinámica dominada por redistribución estacional, extremos y cambios de fase. Este contraste es coherente con la literatura sintetizada en la revisión sistemática, que describe controles multiescala (topografía, convección, ENSO) y cambios relevantes en el nivel de congelamiento y la fracción sólida de la precipitación, procesos que son cruciales para interpretar impactos posteriores en la criósfera y en los ecosistemas altoandinos (Endries et al., 2018; Kumar et al., 2020; Llactayo et al., 2024; Garreaud, 2018; Potter et al., 2023).

La convergencia entre revisión sistemática y modelamiento climático permite establecer una idea estructural para el capítulo de Discusión: mientras la precipitación muestra una complejidad elevada (cambios expresados en extremos, estacionalidad y fase, con fuerte modulación por ENSO y topografía), la temperatura exhibe un calentamiento inequívoco y territorialmente consistente. En este marco, el cambio climático andino se expresa como un sistema donde el “motor térmico” es dominante y la precipitación actúa como modulador altamente variable. Esta configuración es crucial para el hilo argumental del trabajo, porque define el contexto climático que tensiona los rangos bioclimáticos de Vidal y Brack (Pepin et al., 2015; Garreaud, 2018; Vuille et al., 2018; IPCC, 2023).

6.3. Los glaciares: Centinelas del cambio climático en los andes

“En un sistema donde el motor térmico domina y la fase de la precipitación tiende a cambiar, la criósfera emerge como el indicador centinela más sensible...” El retroceso glaciar constituye el indicador más visible y alarmante de la interacción clima - criosfera y, en el marco del Objetivo general de esta tesis: Evaluar cómo el cambio climático modifica las características bioclimáticas y ecológicas que sustentan la clasificación andina, incorporando explícitamente la dinámica glaciar, representa una evidencia física particularmente robusta porque integra (i) el aumento térmico, (ii) cambios en la fase de precipitación (nieve-lluvia) y (iii) respuestas hidrológicas y geomorfológicas de rápida manifestación. En ese sentido, los glaciares tropicales operan como “centinelas” del cambio climático: su balance de masa responde con alta sensibilidad a variaciones relativamente pequeñas de temperatura y humedad (Kaser et al., 2010; Vuille et al., 2018). Nuestros resultados, consistentes con los inventarios oficiales, muestran una disminución

sostenida de la superficie glaciar nacional de 2041.85 km² (1960) a 1050.32 km² (2023), equivalente a una pérdida cercana al 50% y un patrón asociado de reorganización proglaciar reflejado en el número de lagunas (INAIGEM, 2019, 2023; Rabatel et al., 2013). Este retroceso, especialmente acelerado en glaciares pequeños, no es solo un fenómeno físico: desencadena efectos en cascada, como la formación de lagunas proglaciares con potencial de Inundación por Desbordamiento de un Lago Glaciar (GLOFs), la alteración de caudales estacionales y la reducción de la función reguladora en estación seca (Carey et al., 2017; Vuille et al., 2017). Funcionalmente, implica la contracción del “techo de nieve” que daba identidad a la región **Janca**, desplazando su frontera hacia mayores altitudes y generando desajustes con los criterios altitudinales clásicos; por ello, resultó clave explicitar la trazabilidad metodológica (año base, resolución y criterios de delimitación) al comparar estimaciones entre series e inventarios (INAIGEM, 2023).

A partir de ese diagnóstico general, la evidencia reunida en esta tesis muestra que la deglaciación peruana es marcadamente heterogénea y no puede interpretarse como un proceso uniforme. La señal nacional se compone de respuestas regionales contrastantes, moduladas por gradientes latitudinales, altitudinales y de continentalidad, así como por diferencias en exposición, estacionalidad y régimen de humedad. En ese marco, las pérdidas destacadas reportadas para cordilleras como Ausangate (-36.6%) y Coropuna (-42.5%) refuerzan que la dinámica glaciar responde a controles climáticos regionales (energía y humedad) y a la sensibilidad diferencial de cada sistema, más que a un único mecanismo generalizado. Esta lectura es consistente con la síntesis de literatura incluida en la revisión, donde se documentan reducciones que superan el 50% en periodos estudiados para cordilleras del sur (p. ej., Vilcanota, Vilcabamba y Urubamba) y descensos sustantivos en sectores de la Cordillera Blanca, así como en glaciares aislados; en conjunto, estos resultados convergen en un patrón estructural de contracción sostenida y balances de masa predominantemente negativos (Rabatel et al., 2013; Durán-Alarcón et al., 2015; Seehaus et al., 2019; Soto Carrión et al., 2022; Taylor et al., 2022).

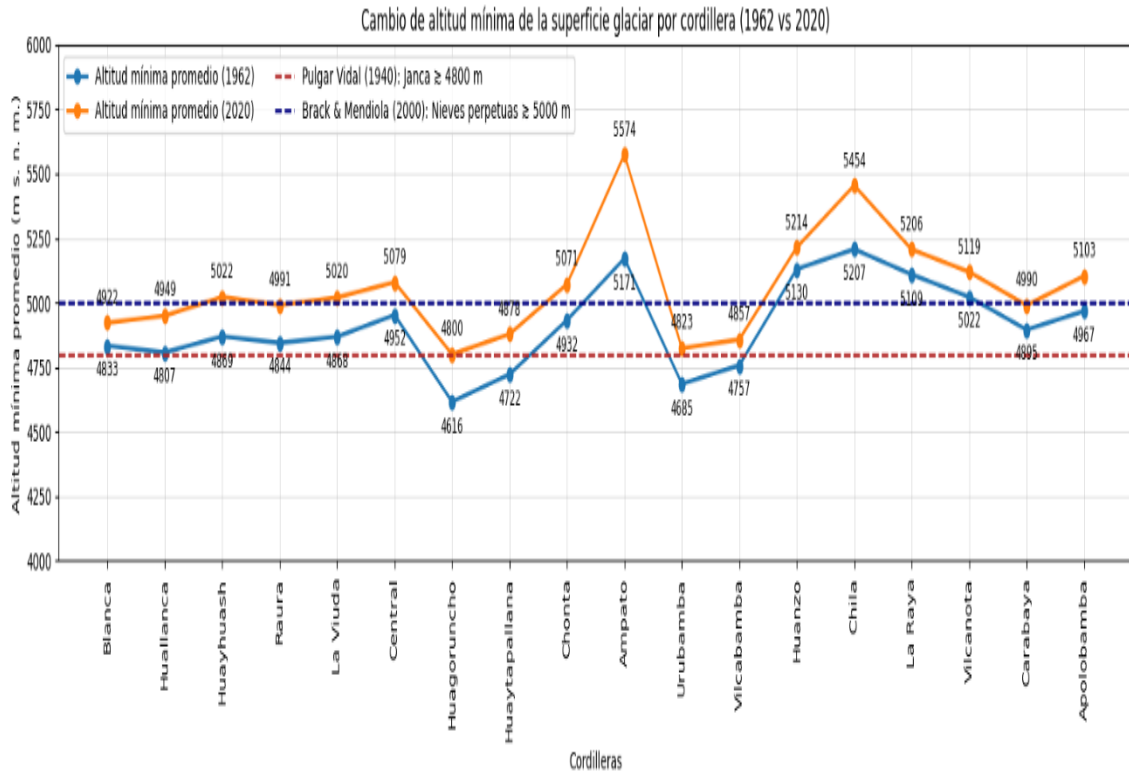
La discusión de esta heterogeneidad se fortalece cuando se contrasta con los forzantes climáticos analizados en el estudio. Los resultados de tendencia muestran una asimetría físicamente relevante: mientras la precipitación exhibe alta variabilidad y ausencia de tendencia monotónica significativa en varias unidades (p. ej., Puna, Quechua, etc), la

temperatura máxima y mínima presenta incrementos estadísticamente robustos tanto por pisos altitudinales como por ecorregiones (SENAMHI, 2022; Garreaud, 2018). Esta señal térmica sostenida constituye el “motor” más consistente para explicar el retroceso, porque en glaciares tropicales el calentamiento eleva la línea de equilibrio (ELA), reduce la fracción de precipitación sólida y prolonga la temporada de ablación, generando balances negativos incluso si los totales anuales de precipitación no muestran cambios significativos (Kaser et al., 2010; Vuille et al., 2018). En alta montaña, además, la variable decisiva no es únicamente cuánto precipita, sino cómo precipita (nieve o lluvia) y en qué periodo del año, ya que el cambio de fase altera la acumulación efectiva y el albedo, amplificando la vulnerabilidad glaciar (Llactayo et al., 2024).

En esta secuencia interpretativa, el análisis altitudinal aporta un argumento especialmente potente para la discusión porque evidencia que el retroceso no se expresa solo como reducción areal, sino como una reorganización vertical del hielo. Como se observa en la Figura 63, la altitud mínima de la superficie glaciar se incrementa de manera generalizada entre 1962 y 2020, evidenciando el ascenso de la cota inferior de los glaciares a escala de cordillera (INAIGEM, 2025). Este ascenso significa que las franjas inferiores que históricamente sostuvieron lenguas glaciares pierden condiciones de persistencia y el hielo tiende a replegarse hacia cotas mayores, donde el balance de masa es menos desfavorable. A su vez, el contraste de la figura con umbrales altitudinales clásicos la región Janca (≥ 4800 m) propuesta por Pulgar Vidal y el criterio de nieves perpetuas (≥ 5000 m) empleado por Brack y Mendiola permite discutir que los límites eco-altitudinales no son estáticos bajo calentamiento: en varias cordilleras, la altitud mínima glaciar se aproxima o incluso supera los 5000 m, sugiriendo una contracción funcional del dominio nival y una creciente restricción espacial del hielo hacia cumbres y cabeceras (Pulgar Vidal, 1940; Brack & Mendiola, 2000; INAIGEM, 2025). En términos territoriales, este resultado refuerza la idea de “fronteras móviles”: el componente criosférico redefine gradualmente la ubicación efectiva de los ambientes de nieves y glaciares, generando desajustes con los criterios altitudinales clásicos usados para interpretar pisos y dominios.

Figura 63

Cambio de la altitud mínima promedio de la superficie glaciar por cordillera del Perú (1962 vs. 2020)



Nota. Elaboración propia a partir de los valores reportados por Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) (2025, figura 30, p. 53).

La **Figura 63** muestra que las líneas horizontales representan los umbrales altitudinales de referencia: región Janca (≥ 4800 m) según Javier Pulgar Vidal (1940) y nieves perpetuas (≥ 5000 m) según Antonio Brack Egg y Mendiola (2000).

Esta reorganización también se comprende mejor cuando se incorpora la diferenciación de regímenes glaciares discutida en los resultados: glaciares húmedos del norte, glaciares húmedos del sur y glaciares secos del sur. La importancia de esta clasificación radica en que la sensibilidad del balance de masa cambia según la dominancia relativa de la temperatura y la precipitación en la acumulación y ablación, y según procesos energéticos característicos de ambientes más áridos (Veettil et al., 2017). Así, el uso de sistemas representativos como se muestra en la Tabla 15 Huascarán (húmedos del norte),

Ausangate (húmedos del sur) y Coropuna (secos del sur) permite sostener una discusión mecanística: en glaciares húmedos, el calentamiento desplaza la ELA y erosiona la acumulación nival estacional; en glaciares secos del sur, además del calentamiento, la sublimación puede consumir una fracción muy elevada de la energía disponible durante la estación seca, intensificando pérdidas netas aun sin derretimiento continuo, lo que ayuda a explicar vulnerabilidades más altas en contextos de aridez y alta radiación (Winkler et al., 2009; Kochtitzky et al., 2018). En conjunto, estos patrones refuerzan que la deglaciación peruana se acelera donde convergen aumento térmico sostenido, deterioro de la acumulación sólida y procesos de pérdida energética intensos en ambientes secos (Kaser et al., 2010; Vuille et al., 2018; Winkler et al., 2009).

Tabla 15

Resumen del comportamiento y dinámicas de los glaciares representativos en los andes peruanos

Glaciar representativo	Tipo de glaciar	Región	Reducción de área (%)	Factores clave de retroceso
Huascarán	Húmedo del Norte	Cordillera Blanca (Áncash)	35.50	Altas precipitaciones, moderadas temperaturas, acumulación estable de nieve
Ausangate	Húmedo del Sur	Cordillera Vilcanota (Cusco)	36.60	Incremento de temperatura, precipitación estacional variable
Coropuna	Seco del Sur	Cordillera Occidental (Arequipa)	42.50	Alta radiación solar, bajas precipitaciones, temperaturas extremas

Desde la perspectiva sociohidrológica, la discusión se vuelve necesariamente aplicada: el retroceso glaciar implica la transición desde un sistema con mayor capacidad de almacenamiento criosférico hacia otro con menor regulación estacional. La literatura muestra que los glaciares aportan caudales de fusión que sostienen parcialmente el flujo base en estación seca y que el proceso de deglaciación puede inducir una fase transitoria de incremento de descarga (“pico hídrico”), seguida de una declinación cuando el reservorio glaciar se agota; este comportamiento se ha discutido para cuencas clave como la del río Santa en la Cordillera Blanca, con implicancias para agricultura, consumo poblacional e hidroenergía (Kaser et al., 2003; Baraer et al., 2012; Vuille et al., 2018).

Además, la modificación de pulsos hídricos y conectividad afecta servicios ecosistémicos de alta montaña (p. ej., bofedales y pajonales), reforzando que la pérdida de hielo no solo reduce “superficie glaciar”, sino que reconfigura el funcionamiento ecohidrológico del territorio y afecta directamente al resto de las ecorregiones y pisos altitudinales (Polk et al., 2017).

Finalmente, la expansión y reconfiguración del paisaje proglaciar añade un componente crítico de riesgo. El aumento de lagunas asociadas al retiro de frentes, junto con la exposición de depósitos y pendientes inestables, incrementa la probabilidad de peligros por desbordes súbitos (GLOFs), especialmente cuando confluyen morrenas susceptibles, eventos de avalancha y oleajes que comprometen diques naturales (Emmer et al., 2022; Somos-Valenzuela et al., 2016; Huggel et al., 2020). Estos riesgos obligan a integrar la criósfera en la planificación territorial y en la gobernanza del agua, ya que el retroceso glaciar opera simultáneamente como indicador climático, condicionante hidrológico y factor de peligro. En síntesis, la discusión integrada sostiene que la dinámica glaciar del Perú se expresa por una doble evidencia convergente: contracción areal y ascenso altitudinal del hielo (Figura 63), ambos coherentes con un calentamiento robusto y con sensibilidades regionales moduladas por régimen de humedad y energía; al contrastar esta señal con umbrales clásicos (Pulgar Vidal; Brack y Mendiola), se refuerza el argumento central de la tesis: bajo cambio climático, los límites altitudinales y las unidades de lectura territorial deben entenderse como fronteras móviles, con consecuencias directas y medibles para agua, riesgos, ecosistemas y planificación en los Andes peruanos (Kaser et al., 2010; Vuille et al., 2018; Pulgar Vidal, 1940; Brack & Mendiola, 2000; INAIGEM, 2025).

6.4. Vegetación y respuesta al cambio climático

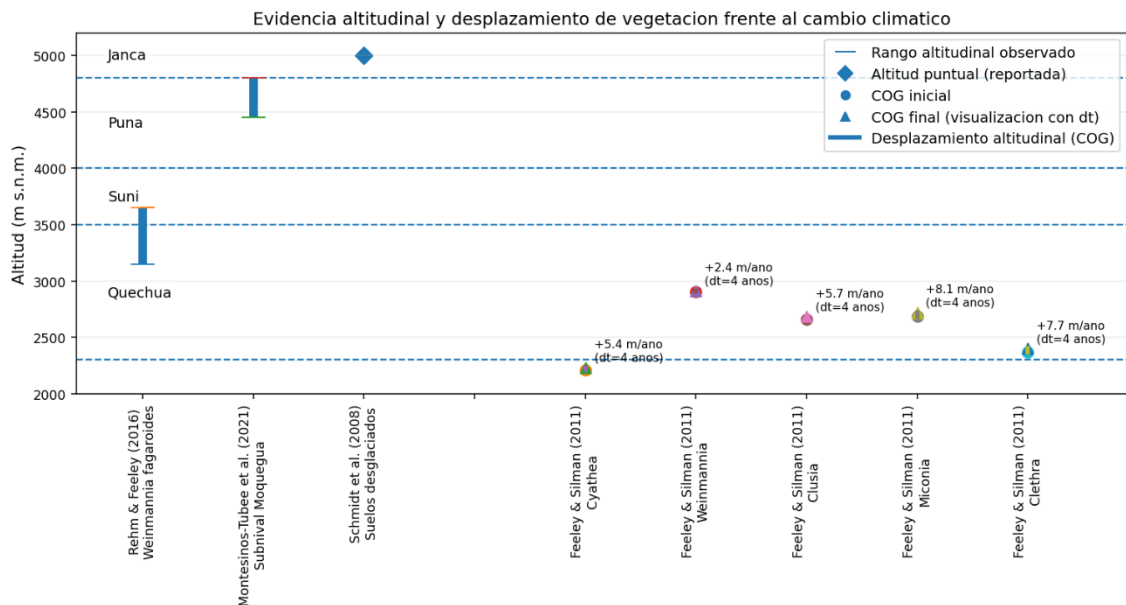
Los hallazgos sintetizados en esta tesis confirman que la vegetación andina responde al cambio climático mediante un conjunto de mecanismos no lineales y espacialmente heterogéneos, donde el calentamiento observado actúa como forzante dominante, pero su expresión ecológica depende de umbrales altitudinales, microclimas, disponibilidad hídrica estacional, dinámica criosférica y limitaciones biológicas de dispersión y establecimiento. En este sentido, la evidencia revisada y discutida aquí sostiene que el cambio climático no se traduce en un “simple corrimiento vertical uniforme”, sino en una reterritorialización ecológica: cambios en distribución altitudinal, reorganización

composicional, alteración funcional y aparición de trayectorias sucesionales nuevas, especialmente cerca de los límites superiores de tolerancia ambiental (Rehm & Feeley, 2016; Feeley & Silman, 2011; Montesinos-Tubée et al., 2021; Schmidt et al., 2008).

En términos de evidencia comparada, la revisión sistemática consolidada en el Resultado 4 (**Tabla 1**) integra estudios empíricos y modelaciones que convergen en tres patrones principales: (i) **señales de desplazamiento altitudinal** (en rangos o centros de gravedad) en bosques montanos y ecotonos altoandinos; (ii) **desacoples clima-biota** y respuestas especie - específicas que limitan la velocidad del cambio; y (iii) **respuestas mediadas por la criósfera**, donde el retroceso glaciar habilita nuevos sustratos y reorganiza gradientes de humedad y suelo, pero con desfases temporales y ensamblajes emergentes (Feeley & Silman, 2011; Zimmer et al., 2018; Schmidt et al., 2008; Montesinos-Tubée et al., 2021).

Figura 64

Evidencia altitudinal y desplazamiento de vegetación frente al cambio climático



La **figura 64** muestra las líneas punteadas no representan rangos completos, sino umbrales altitudinales mínimos (línea base) de cada piso de Pulgar Vidal para facilitar una lectura de “saltos funcionales” entre ecotonos. El COG corresponde al promedio ponderado altitudinal (según abundancia/ocurrencia reportada en cada estudio), y las tasas (m/año) corresponden a $\Delta\text{COG}/\Delta t$ cuando el trabajo reporta Δt . Esta figura es una síntesis comparativa: los estudios difieren en escalas, diseños y métricas, por lo que la

interpretación es evidencial (coherencia direccional) y no una homogenización metodológica.

La figura 64 sintetiza, bajo el marco altitudinal de Javier Pulgar Vidal (líneas horizontales punteadas ubicadas en los umbrales mínimos de 2300 m, 3500 m, 4000 m y 4800 m para Quechua, Suni, Puna y Janca respectivamente, evidencia empírica de: (a) rangos altitudinales observados (barras verticales), (b) altitudes puntuales reportadas (rombos), y (c) desplazamiento del centro de gravedad altitudinal (COG) representado por un punto inicial y final, con su diferencia altitudinal (segmento grueso) y tasa de desplazamiento en (m/año) cuando el estudio lo permite. Se muestran, entre otros, los rangos y desplazamientos asociados a treeline (Rehm & Feeley, 2016), vegetación subnival del sur peruano (Montesinos-Tubée et al., 2021), sucesión primaria en suelos recientemente desglaciados en altitudes de 5000 m (Schmidt et al., 2008) y desplazamientos COG en taxones arbóreos (p. ej., *Cyathea*, *Weinmannia*, *Clusia*, *Miconia*, *Clethra*) (Feeley & Silman, 2011).

(1) Desplazamientos altitudinales

A partir de los estudios de parcelas y gradientes incluidos, la tesis documenta que la respuesta altitudinal es detectable, especialmente en bosques montanos y ecotonos hacia la puna, pero no es universal ni ocurre al ritmo que exigiría el calentamiento regional. El enfoque basado en centro de gravedad (COG) clave para evitar interpretaciones binarias presencia o ausencia, el cual permite capturar cambios graduales de composición y abundancia a lo largo del gradiente altitudinal; en este marco, Feeley y Silman reportan desplazamientos hacia mayores elevaciones en grupos arbóreos, con tasas del orden de 2 a 8 m/año según el taxón (Feeley & Silman, 2011). Esta señal es consistente con el supuesto físico - ecológico de que el aumento térmico reduce restricciones a mayores elevaciones, pero la propia evidencia comparada muestra que el desplazamiento se expresa como reacomodo composicional antes que como “migración uniforme” de toda la comunidad. Sin embargo, la investigación incorpora evidencia crítica: comunidades arbóreas amazónicas y andinas pueden no estar siguiendo el calentamiento actual como se esperaría, lo que sugiere deuda climática y desacople entre la velocidad del cambio climático y la velocidad de respuesta biológica. Este desacople emerge por restricciones de dispersión, establecimiento, competencia, historia de uso del suelo y microclimas

locales, lo que refuerza una conclusión discutiva central: la elevación “climáticamente apta” no se convierte automáticamente en elevación “ecológicamente ocupada” (Van der Sande et al., 2023).

El ecotono bosque - puna (Suní/Puna) es un laboratorio natural donde se evidencia por qué el movimiento altitudinal no es automático. Los experimentos de trasplante de plántulas en límites superiores del bosque muestran respuestas especie-específicas, controladas no solo por el promedio térmico, sino por temperaturas mínimas, eventos de congelamiento, radiación y protección por sombra (Rehm & Feeley, 2016). Bajo este marco, incluso si el calentamiento incrementa la ventana térmica para crecer a mayor altitud, heladas episódicas pueden impedir el establecimiento y, por lo tanto, frenar el ascenso del bosque. Esto es crucial para la interpretación integrada con Pulgar Vidal: el treeline (línea de árboles) no se movería como “frontera rígida”, sino como ecotono sensible donde cambia la dominancia y la regeneración, con avances o estancamientos según microhábitat y frecuencia de extremos.

(2) Retroceso glaciar y sucesión primaria en alta montaña

En la franja Puna-Janca a los 4000 y mayor de 4800 metros de altitud, los resultados se vuelven aún más dependientes del microambiente. La vegetación subnival del sur peruano (Moquegua) descrita por Montesinos-Tubée et al (2011). revela comunidades (casmófitas, pastizales, cojines) fuertemente estructuradas por topografía, exposición, procesos criogénicos y pulsos hídricos asociados a la nieve. En este dominio, el cambio climático opera menos como una traslación vertical ordenada y más como un reordenador de mosaicos: pequeñas variaciones en radiación, viento, acumulación nival y humedad edáfica determinan persistencia, reemplazo o contracción local. Este comportamiento es coherente con la teoría discutida en el estado del arte: la respuesta puede darse por microrefugios y facilitación (p. ej., plantas nodriza), no solo por migración (Cabido et al., 2018; Anthelme et al., 2014).

El retroceso glaciar no solo expone terreno virgen; sino, crea sustratos jóvenes extremos donde la sucesión primaria se inicia desde la base biogeoquímica. En suelos recientemente desglaciados a 5000 m, Schmidt et al. muestran incrementos tempranos en complejidad química y ensamblajes microbianos, seguidos por colonización vegetal (Schmidt et al., 2008). Esta trayectoria sugiere que el cambio climático habilita rutas

ecosistémicas nuevas: lo que aparece en el terreno postglaciar puede no reproducir el estado previo, porque el ensamblaje ocurre bajo un clima ya modificado y con condiciones edáficas y de humedad distintas. Además, el estudio sobre el desfase temporal entre retroceso glaciar y migración ascendente indica que estos procesos pueden estar desincronizados, alterando comunidades alpinas tropicales y favoreciendo configuraciones novedosas (Zimmer et al., 2018). Esto significa que parte de la respuesta vegetal altoandina no es “desplazarse”, sino reorganizarse y re-ensamblarse bajo nuevas restricciones.

Las investigaciones evidencian que la respuesta no es únicamente espacial. Cambios en rasgos funcionales; por ejemplo, variaciones en características foliares asociadas a condiciones ambientales pueden modificar procesos ecosistémicos relevantes (captura de energía, albedo, transpiración y acoplamiento suelo - atmósfera). En este sentido, los hallazgos reportados para gradientes tropicales sugieren ajustes funcionales coherentes con estrés térmico e hídrico, reforzando que el cambio climático impulsa la reconfiguración estructural y funcional además de desplazamiento.

Los estudios de modelación incluidos en el análisis expanden la discusión hacia escenarios: la idoneidad de hábitat para taxa andinos puede cambiar sustantivamente bajo variación climática, pero su traducción en persistencia real depende de presión antrópica, cobertura vegetal y conectividad. Para flora amenazada de Tacna, se aplican modelos de nicho ecológico para escenarios de cambio climático (Navarro Guzmán et al., 2020), mientras que para géneros andinos como *Gynoxys* se plantea un enfoque explícito de conservación y restauración basado en distribución potencial y altitud, con concentración de ocurrencias en intervalos altitudinales característicos y potencial de expansión o reducción según escenarios (Coronel-Castro et al., 2025). De forma complementaria, el caso de *Cedrela angustifolia* ilustra cómo la vulnerabilidad se intensifica cuando el cambio climático se combina con pérdida de cobertura arbórea: la idoneidad climática futura puede deteriorarse y, simultáneamente, la capacidad de migración se reduce por fragmentación y degradación (Ames-Martínez et al., 2025). Asimismo, para endemismos de *Asteraceae* en Arequipa, el componente de uso de suelo se incorpora como factor determinante en la distribución presente y futura (Quipuscoa Silvestre et al., 2019). Esto refuerza un punto clave: el cambio climático puede empujar distribuciones a cotas

superiores, pero el territorio real puede volverse ecológicamente inaccesible por barreras antrópicas; por ello, el riesgo no es solo desplazamiento, sino pérdida de hábitat efectivo.

(3) Cultivos andinos, manejo adaptativo y seguridad alimentaria

En los agroecosistemas altoandinos, la evidencia revisada muestra que el cambio climático se expresa simultáneamente como riesgo productivo (mayor variabilidad interanual, estrés hídrico, alteración del calendario agrícola) y como oportunidad de ajuste mediante decisiones de manejo y elección de cultivares, con resultados fuertemente condicionados por el contexto altitudinal. Los estudios de modelación con AquaCrop convergen en que la productividad futura depende, de manera crítica, de la estacionalidad de lluvias y de la sincronización fenológica (fecha de siembra, duración del ciclo y oferta hídrica), lo que habilita “ventanas de adaptación” en ciertos escenarios: en ulluco (*Ullucus tuberosus*), los rendimientos observados por campaña (F1-F3) y su sensibilidad al calendario de siembra sugieren que ajustes agronómicos pueden amortiguar pérdidas bajo variaciones en lluvia (Flores-Márquez et al., 2024); en papa (*Solanum tuberosum*) del altiplano, las simulaciones muestran rendimientos medios comparables entre ventanas temporales (2023 - 2037 vs. 2038 - 2052) pero con variaciones asociadas a cambios proyectados en temperatura y precipitación, reforzando el valor del modelamiento para anticipar condiciones de productividad y orientar manejo (Puma-Cahua et al., 2024); y en quinua (*Chenopodium quinoa*), las diferencias por variedad bajo escenarios hacia 2050 evidencian que la respuesta no es homogénea y que la selección de cultivar puede ser tan decisiva como el escenario climático (Ramos et al., 2023; Inca Roca et al., 2023).

Complementariamente, la evidencia empírica refuerza que la adaptación no debe depender sólo de proyecciones, sino de capacidades biológicas y de manejo disponibles en territorio. En papa nativa, la sequía puede reducir la producción hasta en 70%, pero evaluación sistemática (tamizaje) de variedades de 79 variedades identifica un subconjunto con resiliencia superior, sosteniendo estrategias de adaptación basadas en recursos genéticos locales (Zevallos et al., 2023). A escala de finca, el manejo tradicional de fertilidad muestra potencial amortiguador: prácticas orgánicas y enfoques locales incrementan estabilidad productiva, mientras que combinaciones menos adecuadas pueden amplificar pérdidas, subrayando que la adaptación climática es inseparable de la gestión de suelos y del paquete tecnológico (Visscher et al., 2024). En la dimensión

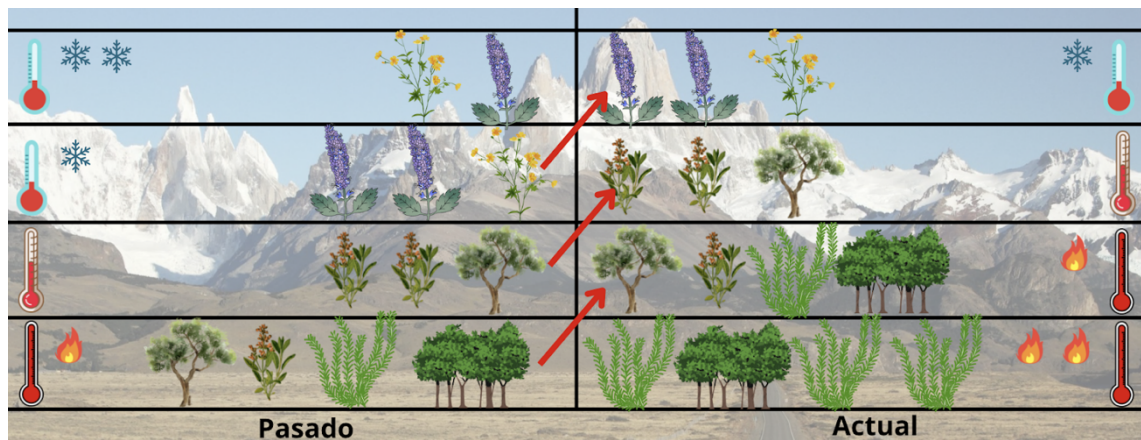
territorial, la evidencia de reorganización altitudinal del uso agrícola con desplazamientos hacia arriba de la producción y la agrobiodiversidad de papa sugiere que la respuesta campesina ocurre también como reconfiguración espacial, diversificación y “seguro adaptativo” mediante portafolios varietales (Arce et al., 2019). Sin embargo, los estudios regionales advierten que, bajo escenarios de calentamiento, los impactos sobre rendimiento pueden ser severos y traducirse en pérdidas económicas significativas, comprometiendo la seguridad alimentaria y ampliando la vulnerabilidad de sistemas de montaña (Tito et al., 2018). En suma, este bloque evidencia que la adaptación agroalimentaria altoandina requiere integrar modelación climática-cultivo, conservación y uso de agrobiodiversidad, y manejo regenerativo de suelos dentro de estrategias de planificación territorial, articulando conocimiento local e innovación para sostener productividad bajo escenarios de mayor incertidumbre (Lozano-Povis et al., 2021).

6.5 Síntesis ecológica - climática e implicancias para la gestión

El análisis conjunto de la dinámica climática, la retracción glacial y la reorganización de la vegetación revela que los **ecosistemas andinos están atravesando un proceso de transformación multidimensional**, en el cual las fronteras ecológicas dejan de ser entidades fijas para convertirse en **umbrales móviles**. Esta tesis demuestra que el cambio climático no puede entenderse únicamente como una alteración gradual de promedios térmicos y pluviométricos, sino como un **reordenamiento sistémico** en el que interactúan múltiples componentes: atmósfera, criosfera, hidrología, vegetación y sociedad.

Figura 65

Esquema de migración de especies vegetales por los climas cambiantes



La relación clima, criosfera y vegetación se configura como una cascada de efectos en cadena. En la primera etapa, el calentamiento dependiente de la altitud eleva isotermas y modifica el balance energético de la alta montaña (Pepin et al., 2015; IPCC, 2023). En la segunda, este forzamiento desencadena la pérdida de masa glaciaria, que contrae el dominio criogénico de la Janca y desplaza hacia arriba el límite funcional con la Puna (Rabatel et al., 2013; INAIGEM, 2019). Finalmente, en la tercera etapa, la alteración hídrica y térmica repercute en la migración altitudinal de especies silvestres y en el corrimiento de la frontera agrícola, reconfigurando tanto ecosistemas naturales como paisajes socio-productivos (Feeley et al., 2011; Bazile et al., 2016). Este encadenamiento no es un simple “efecto dominó”, sino un entramado de retroalimentaciones múltiples que intensifican la vulnerabilidad y, a la vez, abren ventanas de resiliencia.

Nuestros resultados permiten delinear un diagrama causal (**figura 65**) en el que el clima actúa como motor primario, la criósfera como eslabón regulador y la vegetación como respuesta biofísica y socioecológica. Este modelo interpretativo ofrece una lectura integradora: el clima no solo modifica la temperatura y la precipitación, sino que reestructura la base hídrica de los Andes; los glaciares no son solo reservorios de agua, sino sensores y amplificadores de cambio; y la vegetación no es un receptor pasivo, sino un actor adaptativo que reorganiza ecosistemas y sistemas productivos. En conjunto, esta visión refleja lo que se podría denominar una **ecología en movimiento**, donde las transiciones espaciales y temporales reemplazan la estabilidad ecológica del pasado.

En términos conceptuales, esta síntesis cuestiona las bases rígidas de los **pisos altitudinales de Pulgar Vidal (1996)** y de las **ecorregiones de Brack y Mendiola (2000)**. Nuestros hallazgos muestran que los límites ecológicos, antes asumidos como relativamente estables, son hoy dinámicos, móviles y dependientes de condiciones climáticas y sociales cambiantes. Las fronteras entre Quechua, Suni, Puna y Janca ya no corresponden exclusivamente a cotas altitudinales, sino a rangos de temperatura, humedad y disponibilidad hídrica que varían en décadas e incluso años. De igual forma, las ecorregiones de Puna, Serranía Esteparia y Páramo deben ser reinterpretadas como envolventes funcionales más que como unidades discretas. Esta reconceptualización no implica descartar los marcos históricos, sino integrarlos en un paradigma de transición, donde se reconozca el valor pedagógico y cultural de sus categorías, pero se adopte un enfoque dinámico y probabilístico para su aplicación científica y de gestión.

VII. Conclusiones

1. La evidencia analizada confirma que el cambio climático está reconfigurando de manera progresiva y profunda las ecorregiones altoandinas del Perú, al modificar los gradientes térmicos e hídricos que sostienen la estructura altitudinal del territorio. En conjunto, el aumento sostenido de la temperatura, la alta variabilidad de la precipitación y la pérdida acelerada de masa glaciar están actuando de forma interconectada, generando efectos en cascada sobre la criósfera, la disponibilidad hídrica y la organización de la vegetación. Este patrón integrado revela que los Andes peruanos ya se encuentran en una transición hacia un nuevo equilibrio ecosistémico, con implicancias directas para la gestión territorial, la conservación y la seguridad hídrica.
2. Los marcos de clasificación de **Javier Pulgar Vidal** y de **Antonio Brack** constituyen una base sólida para interpretar la organización ambiental andina, al articular criterios altitudinales, ecológicos y biogeográficos. No obstante, los resultados indican que sus límites no deben asumirse como fronteras fijas, sino como umbrales que pueden desplazarse bajo condiciones climáticas cambiantes. En ese sentido, estas clasificaciones conservan su validez explicativa, pero requieren una reinterpretación dinámica: los rangos ecológicos tienden a

proyectarse hacia cotas más altas, sin abandonar sus criterios originales, sino incorporando la movilidad altitudinal inducida por el calentamiento.

3. El análisis de tendencias evidencia un calentamiento estadísticamente significativo en las regiones altoandinas, lo que implica un cambio de régimen térmico con efectos directos sobre el funcionamiento de los ecosistemas de montaña. En contraste, la precipitación muestra una variabilidad alta y heterogénea, sin expresar una tendencia uniforme a escala agregada, lo que configura un escenario de mayor incertidumbre hidrológica. En términos funcionales, estos hallazgos describen un ambiente progresivamente más cálido, con lluvias menos predecibles, condición que incrementa la sensibilidad de la criósfera y la biota altoandina frente a cambios relativamente pequeños en temperatura y estacionalidad (en concordancia con la evidencia sintetizada por IPCC).
4. Los resultados cuantitativos confirman una reducción de más de la mitad de la cobertura glaciaria histórica en el Perú, acompañada por el ascenso de la altitud mínima de presencia de hielo en los sistemas evaluados. Este retroceso sostenido indica que la criósfera ya no cumple el mismo rol regulador que en décadas pasadas, debido a la disminución de su capacidad de almacenamiento de agua en forma sólida y a la alteración de su aporte estacional. En consecuencia, se incrementa la vulnerabilidad de cuencas altoandinas ante periodos secos y se modifican las condiciones hidrológicas que sostienen ecosistemas, actividades productivas y servicios ecosistémicos asociados al agua.
5. La evidencia revisada muestra que las comunidades vegetales altoandinas se encuentran en un proceso de reorganización espacial y funcional: especies propias de altitudes menores tienden a expandirse hacia mayores elevaciones, mientras que las especies especializadas en condiciones de frío extremo muestran contracción, mayor presión ecológica y potencial aumento de riesgo. Esta respuesta se observa tanto en ecosistemas naturales como en agroecosistemas, mediante cambios en distribución, composición y sincronía fenológica. En tal sentido, la vegetación se consolida como un indicador altamente sensible del

cambio climático, reflejando de manera temprana las modificaciones térmicas e hídricas que ya están ocurriendo en el gradiente andino.

VIII. Recomendaciones

Ampliar el monitoreo de los datos de temperatura, precipitación y coberturas de hielo a lo largo de los Andes. Recomendamos extender la red de estaciones meteorológicas en zonas críticas y financiar próximos inventarios glaciares. Esto consolidará las tendencias detectadas y permitirá validar futuras proyecciones.

Desarrollar modelos climáticos de alta resolución espacial para los Andes, que incorporen la compleja topografía. Así se podrían simular escenarios futuros más precisos, mejorando la predicción de cambios en ecorregiones específicas. Esto es clave para la planificación local (gobiernos regionales, INAIGEM, SENAMHI).

Implementar parcelas de monitoreo permanente en bosques altoandinos y páramos para registrar dinámicas de especie y fenología. Investigaciones futuras podrían incorporar análisis genéticos para identificar adaptaciones en plantas sensibles (p.ej., cambios en la cronología de brotes en especies líderes de cada zona).

Se sugiere incorporar las percepciones y conocimientos de agricultores y pobladores altoandinos en estudios subsiguientes. Sus observaciones sobre cambios en cultivos y ciclos agrícolas pueden validar los resultados obtenidos y ayudar a diseñar medidas adaptativas efectivas.

En cuanto a la investigación futura, esta tesis podría servir de base para ampliar el análisis a escalas microregional y temporal más detallada. Asimismo, sería valioso profundizar en los mecanismos fisiológicos de adaptación de especies andinas (por ejemplo, tolerancia al estrés térmico y hídrico). Además, los resultados destacan la importancia de conectar esta línea de investigación con políticas nacionales: sugerimos que instancias gubernamentales consideren estas conclusiones al actualizar planes climáticos y normas de conservación.

IX. Referencias bibliográficas

- Aguilar-Lome, J., Espinoza-Villar, R., Espinoza, J. C., Rojas-Acuña, J., Willems, B. L., & Leyva-Molina, W. M. (2019). Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000–2017). *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 77, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.12.013>
- Álvarez, A. M., León, J. O., & Pacheco, X. J. (2015). Evaluación del Modelo Climático Global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5(2), 188-195. <https://doi.org/10.18259/acs.2015028>
- Ames-Martínez FN, Capcha Romero I, Guerra A, Inga Guillen JG, Quispe-Melgar HR, Galeano E, Rodríguez-Ramírez EC. 2025. Climate change and tree cover loss affect the habitat suitability of *Cedrela angustifolia*: evaluating climate vulnerability and conservation in Andean montane forests. *PeerJ* 13:e18799 <https://doi.org/10.7717/peerj.18799>
- Anthelme, F., & Meneses, R. I. (2012). Plant–plant interactions in tropical alpine environments. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 14(5), 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2012.05.002>
- Anthelme, F., Cavieres, L. A., & Dangles, O. (2014). Facilitation among plants in alpine environments in the face of climate change. *Frontiers in plant science*, 5, 98257. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2014.00387>
- Arce, A., de Haan, S., Juarez, H., Burra, D. D., Plasencia, F., Ccanto, R., ... & Scurrah, M. (2019). The spatial-temporal dynamics of potato agrobiodiversity in the highlands of central Peru: A case study of smallholder management across farming landscapes. *Land*, 8(11), 169. <https://doi.org/10.3390/land8110169>
- Aybar-Camacho, C., Lavado-Casimiro, W., Sabino, E., Ramírez, S., Huerta, J., & Felipe-Obando, O. (2017). *Atlas de zonas de vida del Perú - Guía explicativa*. Servicio

Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Dirección de Hidrología. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-9.pdf>

- Aybar, C., Fernández-Palomino, C., Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day (PISCOp v2.1). *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Báez, S., Jaramillo, L., Cuesta, F., & Donoso, D. A. (2016). Effects of climate change on Andean biodiversity: a synthesis of studies published until 2015. *Neotropical Biodiversity*, 2(1), 181-194. <https://doi.org/10.1080/23766808.2016.1248710>
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K.-I., Portocarrero, C., & Gómez, J. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>
- Barzola Rivera, D. G., & Fretel Vadillo, N. B. (2024). Dinámica glaciaria del nevado Huaytapallana y su relación con la variabilidad climática desde 1993-2023 [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental]. Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/15734>
- Bat'ka, J., Emmer, A., Klimeš, J., Engel, Z., Vilímek, V., & Strozzi, T. (2020). Glacial lake outburst floods (GLOFs) in the Cordillera Huayhuash, Peru: Lake inventory and GLOF susceptibility assessment. *Water*, 12(10), 2664. <https://doi.org/10.3390/w12102664>
- Bax, V., Castro-Núñez, A., & Francesconi, W. (2021). Assessment of potential climate change impacts on montane forests in the Peruvian Andes: Implications for conservation prioritization. *Forests*, 12(3), 375. <https://doi.org/10.3390/f12030375>
- Benique Olivera, E. (2021). Impacto económico del cambio climático en cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) orgánica en la región del Altiplano: un enfoque Ricardiano. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 23(4), 236-243.

- Bennett, M., New, M., Marino, J., & Sillero-Zubiri, C. (2016). Climate complexity in the Central Andes: A study case on empirically-based local variations in the Dry Puna. *Journal of Arid Environments*, 128, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.01.004>
- Bolch, T., Kulkarni, A., Kääb, A., Huggel, C., Paul, F., Cogley, J. G., Frey, H., Bajracharya, S., & Stoffel, M. (2012). The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 336(6079), 310-314. <https://doi.org/10.1126/science.1215828>
- Brack, A., Mendiola, C. (2000). *Ecología del Perú*. Editorial Bruño/PNUD, Lima, Perú.
- Bradley, J. A., Singarayer, J. S., & Anesio, A. M. (2014). Microbial community dynamics in the forefield of glaciers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1795), 20140882. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0882>
- Bradley, R. S., Keimig, F. T., & Diaz, H. F. (2006). Recent changes in freezing level heights in the tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions. *Geophysical Research Letters*, 33(17). <https://doi.org/10.1029/2006GL027142>
- Brako, L., Zarucchi, J. (1993). *Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms in Peru*.
- Bravo, W., Fernández, Y., Torres, J. C., Zúñiga, K., & coaut. (2024). Assessment of human health risk indices due to metal contamination in the surface water of the Negro River sub-basin, Ancash (Peru). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21, 733. <https://doi.org/10.3390/ijerph21060733>
- Britto, B. (2017). Actualización de las ecorregiones terrestres de Perú propuestas en el Libro Rojo de Plantas Endémicas del Perú. *Gayana. Botánica*, 74(1), 15-29. <https://www.scielo.cl/pdf/gbot/v74n1/0717-6643-gbot-00318.pdf>
- Bulege-Gutiérrez, W., & Custodio, M. (2020). Cambio climático y retroceso glaciar en la Cordillera Huaytapallana, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2), 229-261. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-06>

- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112, 733–767. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8>
- Castro, K. C., Palomino, A. C., Ladera, G. F., Rojas, A. P., & Aburto, N. M. (2022). Analysis of the influence of solar cycles on meteorological variables in the central inter-Andean valley of Peru in the period 1986–2019. *Energy Reports*, 8, 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.084>
- Cavieres, L. A., & Sierra-Almeida, A. (2012). Facilitative interactions do not wane with warming at high elevations in the Andes. *Oecologia*, 170, 575-584. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2316-x>
- Cervantes, J., Córdova, M., Rojas, E., & Hernández, F. (2022). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*, 21(2), 73–90. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v20i2.1804>.
- Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026. <https://doi.org/10.1126/science.1206432>
- Cieza de León, P. (1553). *Crónica del Perú*. Sevilla: Casa de Juan de León.
- Cordova, H., Valverde, A., Campos, M. (2022). Raíz Nutritiva de los Andes. <https://www.unheval.edu.pe/portal/wp-content/uploads/2022/05/LBRO-MACA-CON-ISBN-APROBADO-publicado-21052022.pdf>
- Coronel-Castro, E., Meza-Mori, G., Pariente-Mondragón, E., Haro, N., Oliva-Cruz, M., Barboza, E., ... & Guzman, B. K. (2025). Habitat suitability distribution of genus *Gynoxys* Cass.(Asteraceae): An approach to conservation and ecological restoration of the Andean flora in Peru. *Sustainability*, 17(6), 2406. <https://doi.org/10.3390/su17062406>

- Cuesta, Francisco & Muriel, Priscilla & Beck, Stephan & Meneses, Rosa & Halloy, Stephan & Salgado, Silvia & Ortiz, Edwin & Becerra Ramirez, Maria Teresa. (2012). Biodiversidad y Cambio Climático en los Andes Tropicales - Conformación de una red de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones de adaptación. <https://redgloria.condesan.org/wp-content/uploads/2021/02/201357161125gloria.pdf>
- De la Cruz, G., Huerta, A., Franco-León, P., Pino-Vargas, E., Ramos-Fernández, L., & Lavado-Casimiro, W. (2025). Future Climate Projections for Tacna, Peru: Assessing Changes in Temperature and Precipitation. *Atmosphere*, 16(2), 144. <https://doi.org/10.3390/atmos16020144>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Doughty, C. E., Santos-Andrade, P. E., Shenkin, A., Goldsmith, G. R., Bentley, L. P., Blonder, B., ... & Malhi, Y. (2018). Tropical forest leaves may darken in response to climate change. *Nature ecology & evolution*, 2(12), 1918-1924. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0716-y>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., Morales-Arno, B., Silva, Y. & Portocarrero, C. (2019). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 169, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Durán-Alarcón, C., Gevaert, C. M., Mattar, C., Jiménez-Muñoz, J. C., Pasapera-Gonzales, J. J., Sobrino, J. A., ... & Santillan-Portilla, N. (2015). Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery. *Journal of South American Earth Sciences*, 59, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.01.006>
- Emmer, A., Wood, J. L., Cook, S. J., Harrison, S., Wilson, R., Diaz-Moreno, A., Reynolds, J. M., Torres, J. C., Yarleque, C., Mergili, M., Jara, H. W., Bennett, G., Caballero, A., Glasser, N. F., Melgarejo, E., Riveros, C., Shannon, S., Turpo, E.,

- ... Poma, C. (2022). 160 glacial lake outburst floods (GLOFs) across the Tropical Andes since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 208, 103722. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103722>
- Endries, J. L., Perry, L. B., Yuter, S. E., Seimon, A., Andrade-Flores, M., Winkelmann, R., ... & Arias, S. (2018). Radar-observed characteristics of precipitation in the tropical high Andes of southern Peru and Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(7), 1441-1458. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0248.1>
- Farfan-Rios, W., Feeley, K. J., Myers, J. A., Tello, S., Sallo-Bravo, J., Malhi, Y., ... & Silman, M. R. (2025). Amazonian and Andean tree communities are not tracking current climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(34), e2425619122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2425619122>
- Farias de Reyes, M., Chávarri-Velarde, E., Cotrina, V., Aguilar, P., & Vegas, L. (2024). Space-Time Variability of Maximum Daily Rainfall in Piura River Basin in Peru Related to El Niño Occurrence. *Water*, 16(23), 3452. <https://doi.org/10.3390/w16233452>
- Feeley, K. J., Silman, M. R., Bush, M. B., Farfan, W., Cabrera, K. G., Malhi, Y., ... & Saatchi, S. (2011). Upslope migration of Andean trees. *Journal of Biogeography*, 38(4), 783-791. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x>
- Fernández-Palomino, C. A., Hattermann, 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, 34. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02863-z>
- Flores-Marquez, R., Vera-Vilchez, J., Verástegui-Martínez, P., Lastra, S., & Solórzano-Acosta, R. (2024). An evaluation of dryland ulluco cultivation yields in the face of climate change scenarios in the Central Andes of Peru by using the Aquacrop model. *Sustainability*, 16(13), 5428. <https://doi.org/10.3390/su16135428>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J. L., Frame, D., ... Zhang, H. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working*

Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 923–1054). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>

Fyffe, C. L., Potter, E., Miles, E., Shaw, T. E., McCarthy, M., Orr, A., ... & Pellicciotti, F. (2025). Thin and ephemeral snow shapes melt and runoff dynamics in the Peruvian Andes. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 434.
<https://doi.org/10.1038/s43247-025-02379-x>

Galán de Mera, A., Méndez, E., Linares, E., Campos de la Cruz, J., & Vicente Orellana, J. A. (2014). Las comunidades vegetales relacionadas con los procesos criogénicos en los Andes peruanos. *Phytocoenologia*, 121-161. DOI: [10.1127/0340-269X/2014/0044-0576](https://doi.org/10.1127/0340-269X/2014/0044-0576)

Giráldez-Solano, L., Domínguez-Castro, F., Sánchez-Lorenzo, A., Vicente-Serrano, S. M., Seiler, C., & Seiler, R. (2020). Change of the rainfall seasonality over central Peruvian Andes and its large-scale forcings during 1965–2014. *Climate*, 8(2), 23.
<https://doi.org/10.3390/cli8020023>

Gómez, L., & Aguilar, E. (2016). Guía de cultivo de la quinua. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Universidad Nacional Agraria La Molina, 2, 17-18. <http://www.fao.org/3/i5374s/i5374s.pdf>

Gottfried, M. D., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barančok, P., Alonso, J. L. B., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Calzado, M. R. F., Kazakis, G., Krajčí, J., Larsson, P., Mallaun, M., Michelsen, O., Moiseev, D., Moiseev, P., Molau, U., Merzouki, A., . . . Grabherr, G. (2012). Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2(2), 111-115.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1329>

Guillén, L., & Juli, A. (2017). Análisis multi-temporal del retroceso glaciar de los nevados Allin Capac y Chichicapac. *Revista de Investigaciones en Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 20(39), 67–76.
<http://dx.doi.org/10.18271/ria.2017.291>

- Guittard, A., Baraer, M., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Rapre, A. C., Bury, J., ... & Young, K. R. (2020). Trace metal stream contamination in a post peak water context: lessons from the cordillera Blanca, Peru. *ACS Earth and Space Chemistry*, 4(4), 506-514. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.9b00269>
- Haeberli, W., & Weingartner, R. (2020). In full transition: Key impacts of vanishing mountain ice on water-security at local to global scales. *Water Security*, 11, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100074>
- Hermann, M., & Bernet, T. (2009). The transition of maca from neglect to market prominence: Lessons for improving use strategies and market chains of minor crops. *Agricultural Biodiversity and Livelihoods Discussions Papers*, 2.
- Herzog, S. K., Martínez, R., Jørgensen, P. M., & Tiessen, H. (Eds.). (2011). *Climate change and biodiversity in the tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Holdridge, L. R. (1967). *Life zone ecology*. Tropical Science Center.
- Huerta, A., Beck, H. E., Álvarez-Quiñones, P., Lavado-Casimiro, W., & Rau, P. (2023). High-resolution grids of daily air temperature for Peru—The new PISCOt v1.2 dataset. *Scientific Data*, 10, 847. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02777-w>
- Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., & Felipe-Obando, O. (2022). High-resolution gridded hourly precipitation dataset for Peru (PISCOp_h). *Data in Brief*, 45, 108570. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108570>
- Huggel, C., Carey, M., Emmer, A., Frey, H., Walker-Crawford, N., & Wallimann-Helmer, I. (2020). Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: local and global drivers and responsibilities for the case of lake Palcacocha, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2175-2193. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2175-2020>

- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., ... Kääh, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Imfeld, N., Rössler, O., Weingartner, R., & others. (2021). A combined view on precipitation and temperature climatology and trends in the southern Peruvian Andes. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E679–E698. <https://doi.org/10.1002/joc.6645>
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., ... Kraaijenbrink, P. D. A. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790), 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
- INAIGEM. (2018). El inventario nacional de glaciares: Las cordilleras glaciares del Perú. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. [Repositorios Latinoamericanos](#)
- INAIGEM. (2023). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar (INGLOG II). Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. [Sigrid CENEPRED](#)
- Inca Roca, H. R., Valderrama Vásquez, L., Jiménez Dábalos, J., Zorogastúa Cruz, P., & Pinedo-Taco, R. (2023). Rendimiento real y simulado con Aquacrop de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), en escenarios de cambio climático en los valles interandinos del Perú. *Idesia (Arica)*, 41(4), 115-119. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292023000400115>
- Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A., Saenz, C., Taguchi, M., Makkar, H., & Louhaichi, M. (2018, 7 octubre). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/9380>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K.

Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.)]. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

International Plant Protection Convention (IPPC). (2021). Scientific review of the impact of climate change on plant pests. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb4769en>

Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar 2023. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/499>

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

Jiménez-Muñoz, J. C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., Sobrino, J. A., & van der Schrier, G. (2016). Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific Reports*, 6, 33130. <https://doi.org/10.1038/srep33130>

Kaser, G., Juen, I., Georges, C., Götsch, A., & Yarleque, C. (2003). The impact of glaciers on runoff and reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology*, 282(1–4), 130–144. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00259-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00259-2)

- Kochtitzky, W. H., Edwards, B. R., Enderlin, E. M., Marino, J., & Marinque, N. (2018). Improved estimates of glacier change rates at Nevado Coropuna Ice Cap, Peru. *Journal of Glaciology*, 64(244), 175-184. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.2>
- Kronenberg, M., Schauwecker, S., Huggel, C., Salzmann, N., Drenkhan, F., Frey, H., ... & Rohrer, M. (2016). The projected precipitation reduction over the Central Andes may severely affect Peruvian glaciers and hydropower production. *Energy Procedia*, 97, 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.072>
- Kumar, S., Seidel, J., Endries, J. L., Yuter, S. E., Martinez-Castro, D., Saavedra, F., Marzano, P., Cimini, D., Dusek, J. P., & Barros, J. P. (2020). *Rainfall characteristics in the Mantaro Basin over tropical Andes derived from a vertical profiling rain radar and in situ field campaign*. *Atmosphere*, 11(3), 248. <https://doi.org/10.3390/atmos11030248>
- Laqui, W., Zubieta, R., Laqui-Vilca, Y., Calizaya, E., & Laqui-Vilca, C. (2023). Temporal dynamics of glacier retreat and its relationship with local climate in Cordillera Apolobamba, Peru. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01865-5>
- Larsen, T. H., Brehm, G., Navarrete, H., Franco, P., Gomez, H., Mena, J. L., ... & Canhos, V. (2011). Range shifts and extinctions driven by climate change in the tropical Andes: synthesis and directions. *Climate change and biodiversity in the tropical Andes*, 1, 47-67. DOI:[10.13140/2.1.4009.3128](https://doi.org/10.13140/2.1.4009.3128)
- León, B., Pitman, N., & Roque, J. (2006). Introducción a las plantas endémicas del Perú. *Revista peruana de biología*, 13(2), 9-22. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1727-99332006000200004&script=sci_arttext
- Llactayo, V., Valdivia, J., Yarleque, C., Callañaupa, S., Villalobos-Puma, E., Guizado, D., & Alvarado-Lugo, R. (2024). Future changes of precipitation types in the Peruvian Andes. *Scientific Reports*, 14, 22634. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71840-2>

- López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés, B., ... & Alejo-Cochachín, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010>
- López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Bazo, J., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., ... & Chura, O. (2016). Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru. *International Journal of Climatology*, 36(4). <https://doi.org/10.1002/joc.4459>
- Lozano-Povis, A., Alvarez-Montalván, C. E., & Moggiano, N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108. <http://www.scielo.org.pe/pdf/agro/v12n1/2306-6741-agro-12-01-101.pdf>
- Magnússon, R., McKenzie, J. M., Stibal, M., Mark, B. G., Bury, J., Baraer, M., & Fortner, S. K. (2020). Influence of glacial sediments on the chemical quality of surface water in the Ulta valley, Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology*, 590, 125027. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125027>
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Mark, B. G. & McKenzie, J. M. (2007). Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water. *Environmental Science & Technology*, 41(20), 6955–6959. <https://doi.org/10.1021/es071099d>
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962–1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24(20-21), 2265-2280. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.01.003>
- Martínez-Castro, D., Lavado-Casimiro, W., Espinoza, J. C., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., & Ronchail, J. (2025). Extreme droughts in the Peruvian Amazon region (2000–2024). *Water*, 17(12), 1744. <https://doi.org/10.3390/w17121744>

- Marzeion, B., Jarosch, A. H., & Hofer, M. (2012). Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere*, 6(6), 1295-1322. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1295-2012>
- Mejía Camones, M., Zumaran Salazar, V., Morey Huamani, J., Palomino Quispe, A., Ccanto Huaytalla, M., Mejía, J., Maza Parra, L., Apaéstegui, J., Torres Aguirre, D., Brenning, A., *et al.* (2025). *Retroceso glaciar en los Andes peruanos durante las últimas seis décadas*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). <https://repositorio.inaigem.gob.pe/bitstreams/1804687f-ad4e-4fc6-8c84-a0259951d2a1/download>
- Michelutti, N., Cooke, C. A., Hobbs, W. O., & Smol, J. P. (2015). Climate-driven changes in lakes from the Peruvian Andes. *Journal of paleolimnology*, 54, 153-160. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9843-5>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2019). Memoria Descriptiva del Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. Lima: MINAM. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/memoria_mapa_ecosistemas.pdf
- Moghadam, N. T., *et al.* (2024). Vulnerability assessment of hydrological ecosystem services under future climate and land use change. *Global Environmental Change*, 94, 102532. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111905>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). "Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement." *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://journals.plos.org/plosmedicine/article?id=10.1371/journal.pmed.1000097>
- Montesinos-Tubée, D. B., Cleef, A. M., & Sýkora, K. V. (2021). The subnival vegetation of Moquegua, South Peru: chasmophytes, grasslands and cushion communities. *Ecologies*, 2(1), 71-111. <https://doi.org/10.3390/ecologies2010005>
- Navarro Guzmán, M. A., Jove Chipana, C. A., & Ignacio Apaza, J. M. (2020). Modelamiento de nichos ecológicos de flora amenazada para escenarios de

cambio climático en el departamento de Tacna-Perú. *Colombia forestal*, 23(1), 51-67. <https://doi.org/10.14483/2256201x.14866>

Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., ... Gnxx, M. (2019). High-resolution hydrology in the Andes: A framework for monitoring and modeling the role of páramos and montane forests in water regulation. *Nature Sustainability*, 2(8), 584–593. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.80>

OECD. (2021). Water Governance in Peru. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003179900-102/organisation-economic-co-operation-development%E2%80%94oecd-helen-canton>

Palacios-Robles, E., Medina, K., Loarte, E., Castañeda-Barreto, A., Gamboa-Mendoza, M., Polo-Salazar, R., Tapia, P., Pellicciotti, F. & Brown, L. E. (2024). Declining glacier cover drives changes in aquatic macroinvertebrate biodiversity in the Cordillera Blanca, Perú. *Global Change Biology*, 30, e17355. <https://doi.org/10.1111/gcb.17355>

Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I.-C., ... Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332), eaai9214. <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>

Pino-Vargas, E., Chávarri-Velarde, E., Ingol-Blanco, E., Mejía, F., Cruz, A., & Vera, A. (2022). Impacts of climate change and variability on precipitation and maximum flows in devil's creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>

Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., & Bury, J. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>

- Ponce, C. (2020). Intra-seasonal climate variability and crop diversification strategies in the Peruvian Andes: A word of caution on the sustainability of adaptation to climate change. *World Development*, 127, 104740. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104740>
- Potter, E. R., Fyffe, C. L., Orr, A., Quincey, D. J., Ross, A. N., Rangelcroft, S., ... Pellicciotti, F. (2023). A future of extreme precipitation and droughts in the Peruvian Andes. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6, 96. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00409-z>
- Pozada Rengifo, R., Bravo Toledo, L., & Iparraguirre Ayala, J. E. A. (2023). Retroceso glaciar y el valor de los servicios ecosistémicos asociados con el recurso hídrico en la cuenca Parón-Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca), 2009-2018. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/4952/1/Pozada-Retroceso_glaciar_cuenca_Paron_Cordillera_Blanca.pdf
- Pulgar Vidal, J. (1981). *Geografía del Perú: Las Ocho Regiones Naturales*. Lima: Editorial Universitaria
- Puma-Cahua, J., Belizario, G., Laqui, W., Alfaro, R., Huaquisto, E., & Calizaya, E. (2024). Evaluating the Yields of the Rainfed Potato Crop under Climate Change Scenarios Using the AquaCrop Model in the Peruvian Altiplano. *Sustainability*, 16(1), 71. <https://doi.org/10.3390/su16010071>
- Quipuscoa Silvestre, V., Dillon, M. O., Treviño Zevallos, Í., Balvin Aguilar, M., Mejía Rios, A., Ramos Aranibar, D., ... & Montesinos Tubée, D. (2019). Impacto de los cambios climáticos y uso de suelo, en la distribución de las especies de géneros endémicos de Asteraceae de Arequipa. *Arnaldoa*, 26(1), 71-96. <https://doi.org/10.22497/1065>
- Quispe Rojas, M. E. (2022). Patrones de migración de especies altoandinas en respuesta al cambio climático en los Andes centrales del Perú. *Revista de Ecología Andina*, 8(3), 45-59
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y.,

- Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Jordan, E. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gómez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes-Serrano, R., et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rahbek, C., Borregaard, M. K., Colwell, R. K., Dalsgaard, B., Holt, B. G., Morueta-Holme, N., ... Fjeldsø, J. (2019). Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary processes. *Science*, 365(6458), 1114–1119. <https://doi.org/10.1126/science.aax0151>
- Ramirez-Villegas, J., Cuesta, F., Devenish, C., Peralvo, M., Jarvis, A., & Arnillas, C. A. (2014). Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for nature conservation*, 22(5), 391-404. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.03.007>
- Ramos Jauregui, L. Y. (2014). Estimación del efecto del cambio climático en la precipitación de la costa norte del Perú usando simulaciones de modelos climáticos globales. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/1899>
- Rangwala, I., Miller, J.R. Cambio climático en las montañas: una revisión del calentamiento dependiente de la elevación y sus posibles causas. *Cambio climático* 114, 527-547 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0419-3>
- Rapp, J. M., & Silman, M. R. (2012). Diurnal, seasonal, and altitudinal trends in microclimate across a tropical montane cloud forest. *Climate Research*, 55(1), 17–32. <https://doi.org/10.3354/cr01127>
- Rehm, E. M., & Feeley, K. J. (2016). Seedling transplants reveal species-specific responses of high-elevation tropical treeline trees to climate change. *Oecologia*, 181(4), 1233-1242. DOI: [10.1007/s00442-016-3619-0](https://doi.org/10.1007/s00442-016-3619-0)

- Richardson, K., Steffen, W., Rockström, J., Bai, X., Fetzer, I., & Cornell, S. E. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., ... Foley, J. A. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14(2), 32. <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>
- S.K. Herzog, R. Martínez, P.M. Jørgensen, & H. Tiessen. (2011). Climate change and biodiversity in the tropical Andes. <https://doi.org/10.13140/2.1.3718.4969>
- Sabino, E., Lavado, W., & Aybar, C. (2019). *Estimación de las zonas de vida de Holdridge en el Perú*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Dirección de Hidrología. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-87.pdf>
- Salinas, N., van de Weg, M. J., Asbjornsen, H., ... Zimmermann, M. (2021). Tropical montane forests in a changing climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 709236. https://www.researchgate.net/publication/353847465_Editorial_Tropical_Montane_Forests_in_a_Changing_Environment
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7(1), 103-118. <https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>
- Sanabria, J., Calanca, P., Alarcón, C., & Canchari, G. (2014). Potential impacts of early twenty-first century changes in temperature and precipitation on rainfed annual crops in the Central Andes of Peru. *Regional Environmental Change*, 14(4), 1533-1548. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0595-y>
- Santofimia, E., López-Pamo, E., Palomino, E. J., et al. (2017). Acid rock drainage in Nevado Pastoruri glacier area (Huascarán National Park, Peru): Hydrochemical and mineralogical characterization and environmental implications.

Environmental Science and Pollution Research, 24(32), 25243–25259.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0093-0>

Schauwecker, S., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Salzmann, N., & Schwarb, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 85–97.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>

Schmidt, S. K., Reed, S. C., Nemergut, D. R., Stuart Grandy, A., Cleveland, C. C., Weintraub, M. N., ... & Martin, A. M. (2008). The earliest stages of ecosystem succession in high-elevation (5000 metres above sea level), recently deglaciated soils. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1653), 2793–2802. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0808>

Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Seeber, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016—Mass changes and area fluctuations. *The Cryosphere*, 13, 2537–2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019> pearl.plymouth.ac.uk

Seimon, T. A., Seimon, A., Yager, K., Reider, K., Delgado, A., Sowell, P., ... & Halloy, S. (2017). Long-term monitoring of tropical alpine habitat change, Andean anurans, and chytrid fungus in the Cordillera Vilcanota, Peru: Results from a decade of study. *Ecology and Evolution*, 7(5), 1527–1540.
<https://doi.org/10.1002/ece3.2779>

SENAMHI-IDESEP. (2022). Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030 (Informe técnico). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjw3Nqzbz-GPaxUsuZUCHVXMLJAQFnoECB8QAQ&url=https%3A%2F%2Fidesep.senamhi.gob.pe%2Fportalidesep%2Ffiles%2Ftematica%2Fcambio_climatico%2FEscenarios_climaticos_en_el_Peru_para_el_ano_2030.pdf&usg=AOvVaw0Jy-upNu_1w-x8CQx5G3ib&opi=89978449

- Somos-Valenzuela, M. A., Chisolm, R. E., Rivas, D. S., Portocarrero, C., & McKinney, D. C. (2016). Modeling a glacial lake outburst flood process chain: The case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2519–2543. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2519-2016>
- Soto Carrión, C., Bastidas, B. & Rojas, J. (2022). Análisis multitemporal del retroceso glaciar mediante imágenes Landsat en el Santuario Nacional Nevado del Ampay, Perú. *Journal of Sustainable Development and Energy*, 10(2), 185–193. <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0380>
- Squeo, F. A., Warner, B. G., Aravena, R., & Espinoza, D. (2006). Bofedales: High altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(2), 245–255.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., ... Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Tafur Anzualdo, V. I., Aguirre Chavez, F., Vega-Guevara, M., Esenarro, D., & Vilchez Cairo, J. (2024). Causes and effects of climate change 2001 to 2021, Peru. *Sustainability*, 16(7), 2863. <https://doi.org/10.3390/su16072863>
- Taylor, L. S., Quincey, D. J., Smith, M. W., Potter, E. R., Castro, J. & Fyffe, C. L. (2022). *Multi-Decadal Glacier Area and Mass Balance Change in the Southern Peruvian Andes*. *Frontiers in Earth Science*, 10, 863933. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.863933>
- Tito, R., Vasconcelos, H. L., & Feeley, K. J. (2018). Global climate change increases risk of crop yield losses and food insecurity in the tropical Andes. *Global change biology*, 24(2), e592-e602. <https://doi.org/10.1111/gcb.13959>
- Torres-Mercado, C.-E., Villafuerte-Jeremias, J.-A., Guerreros-Ollero, G.-P., & Perez-Campomanes, G. (2025). *Comparison of flood scenarios in the Cunas River under the influence of climate change*. **Hydrology**, 12(5), 117. <https://doi.org/10.3390/hydrology12050117>

- van Der Sande, M. T., Bush, M. B., Åkesson, C. M., Berrio, J. C., Correia Metrio, A., Flantua, S. G., ... & Gosling, W. D. (2023). Warming, drought, and disturbances lead to shifts in functional composition: A millennial-scale analysis for Amazonian and Andean sites. *Global Change Biology*, 29(17), 4775-4792. <https://doi.org/10.1111/gcb.16818>
- Veettil, B. K., Wang, S., de Souza, S. F., Bremer, U. F., & Simões, J. C. (2017). Glacier monitoring and glacier-climate interactions in the tropical Andes: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 77, 218-246. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.04.009>
- Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Correa, K., Avalos, G., Bazo, J., Azorin-Molina, C., ... & Nieto, R. (2018). Recent changes in monthly surface air temperature over Peru, 1964–2014. *International Journal of Climatology*, 38(1), 283-306. <https://doi.org/10.1002/joc.5176>
- Visscher, A. M., Vanek, S., Huaraca, J., Mendoza, J., Ccanto, R., Meza, K., ... & Fonte, S. J. (2024). Traditional soil fertility management ameliorates climate change impacts on traditional Andean crops within smallholder farming systems. *Science of the Total Environment*, 912, 168725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168725>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., ... & Sicart, J. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-science reviews*, 176, 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W. S., & Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9), 3745-3757. <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>
- Vuille, M., Kaser, G., & Juen, I. (2008). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru, and its relationship with climate and the large-scale circulation.

Global and Planetary Change, 62(1-2), 14-28.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.003>

Winkler, M., Juen, I., Mölg, T., Wagnon, P., Gómez, J., & Kaser, G. (2009). Measured and modelled sublimation on the tropical Glaciar Artesonraju, Perú. *The Cryosphere*, 3(1), 21-30. <https://doi.org/10.5194/tc-3-21-2009>

Yarleque, C., Vuille, M., Hardy, D. R., Crecelius, D., Brewer, M. & Smith, J. A. (2018). Projections of the future disappearance of the Quelccaya Ice Cap in the Central Andes. *Scientific Reports*, 8, 15564. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33698-z>

Young, K. R. (2015). Ecosystem change in high tropical mountains. The high-mountain cryosphere: Environmental changes and human risks, 227-46. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107588653.013>

Zavala, R. M. O., Gomez, A. L. M., Mercado, N. D. B., Chuquillanqui, A. B. A., & Malca, U. F. G. Remote sensing evaluation of the expansion of the palcacocha lake and glacial retreat in the cordillera blanca-peru. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/669474/10.18687LACCEI2023.1.1.1084.pdf?sequence=1>

Zevallos, E., Marmolejo, K., Alvarez, F., Paitan, R., Viza, I., Becerra, D., ... & Inga, J. (2023). Screening Potato Landraces to Cope with Climate Change in the Central Andes of Peru. *International Journal of Plant Biology*, 14(4), 1167-1179. <https://doi.org/10.3390/ijpb14040085>

Zevallos, J., & Lavado-Casimiro, W. (2022). *Climate change impact on Peruvian biomes, Forests*, 13, 238. <https://doi.org/10.3390/f13020238>

Zimmer, A., Meneses, R. I., Rabatel, A., Soruco, A., & Anthelme, F. (2014). Caracterizar la migración altitudinal de las comunidades vegetales altoandinas frente al calentamiento global mediante cronosecuencias post-glaciales recientes. *Ecología en Bolivia*, 49(3), 27-41. http://www.scielo.org/bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282014000300004&lng=es&tlng=es

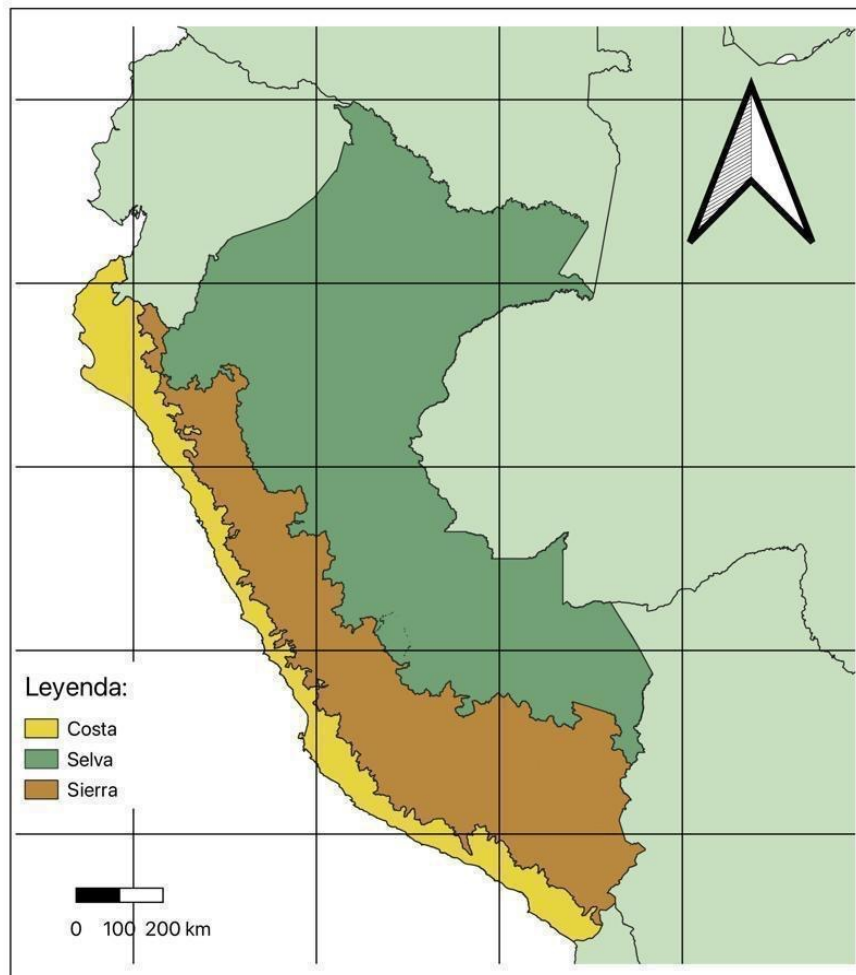
Zimmer, A., Meneses, R. I., Rabatel, A., Soruco, A., & Anthelme, F. (2018). High elevation plant colonization after glacier retreat in the tropical Andes: Context and limiting factors. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 50(1), S100010. <https://doi.org/10.1080/15230430.2017.1420854>

Zimmer, A., Meneses, R. I., Rabatel, A., Soruco, A., Dangles, O., & Anthelme, F. (2018). Time lag between glacial retreat and upward migration alters tropical alpine communities. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 30, 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2017.05.003>

Anexos

Anexo 1: Mapa de las Tres regiones naturales del Perú, Cieza de León.

Tres regiones naturales del Perú



Tres regiones naturales del Perú



Autores:

-Nicole Flores Jamjachi
-Jener Huincho Ramos

Anexo 2: Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú elaborado por el Ministerio del Ambiente.

[Documentos](#)
[Preimpresiones](#)
Beta
[Documentos secundarios](#)

252 documentos encontrados

[Analizar resultados](#)

Refinar la búsqueda

Filtros [Borrar todo](#)

Año [Claro](#)

Rango Individual



-

Nombre del autor

Área temática

	Título del documento	Autores	Fuente	Año	Citas
<input type="checkbox"/> 1	Artículo · Acceso abierto La pérdida de resiliencia de los glaciares debido al cambio climático en toda la Cordillera Blanca, Perú entre 1984 y 2023	Giraldo Malca, UF, Yauri Salano, LN, Choraco Carranza, SV, Chávez García, JA, Mark, BG	Avances en la ciencia cuaternaria , 19, 100286	2025	0
Ver en la editorial Documentos relacionados					
<input type="checkbox"/> 2	Artículo Efectos de la lluvia y los vientos cargados de sedimentos en sitios arqueológicos terrestres a partir de la morfometría: un estudio de caso de Huaca Chotuna (siglos VIII-XVI d. C.), Lambayeque, Perú	Maganini, L, Ana, MIP, Gutiérrez Cachay, RF, La Torre, CEW, Ventura, G,	Teledetección , 17(17), 3103	2025	0
Ver en la editorial Documentos relacionados					
<input type="checkbox"/> 3	Artículo Isótopos de oxígeno como indicador clave de la variabilidad de	Rodríguez-Morata, C,	Paleoceanografía y	2025	Comentario

[Documentos](#)
[Preimpresiones](#)
Beta
[Documentos secundarios](#)

159 documentos encontrados

[Analizar resultados](#)

Refinar la búsqueda

Filtros [Borrar todo](#)

Año [Claro](#)

Rango Individual



-

Nombre del autor

Área temática

	Título del documento	Autores	Fuente	Año	Citas
<input type="checkbox"/> 1	Artículo · Acceso abierto La nieve delgada y efímera forma el derretimiento y la dinámica del escurrimiento en los Andes peruanos	Eyyfe, CL, Potter, E, Miles, E, Westoby, M, Pellicciotti, F,	Comunicaciones Tierra y Medio Ambiente , 6(1), 434	2025	1
Ver en la editorial Documentos relacionados					
<input type="checkbox"/> 2	Artículo El avance del glaciar Dryas Reciente en los Andes tropicales impulsado por el aumento de las precipitaciones	Glasser, NF, Harrison, S, Wilson, R, Villafañe, H, Cosi, M,	Informes científicos , 15(1), 30832	2025	0
Ver en la editorial Documentos relacionados					
<input type="checkbox"/> 3	Artículo Concentración de carbono negro (BCe) en nieve, hielo glaciar y agua glaciar de altas montañas del centro de México y los Andes centrales (Perú y Bolivia)	Ontiveros-González, G, Carrillo-Chávez, A, Dávila-Roller, L,	Revista de Ciencias de la Tierra Sudamericanas , 165, 105668	2025	0

[Guardar búsqueda](#)
[Establecer alerta de búsqueda](#)
[Añadir campo de búsqueda](#)
[Reiniciar](#)

[Documentos](#)
[Preimpresiones](#)
[Documentos secundarios](#)

23 documentos encontrados
[Analizar resultados](#)

[Página](#)
[Exportar](#)
[Download](#)
[Resumen de citas](#)
[Más](#)
[Mostrar todos los resúmenes](#)
[Ordenar por](#)
[Date \(newest\)](#)

Document title	Authors	Source	Year	Citations
<input type="checkbox"/> 1 Habitat Suitability Distribution of Genus Gynoxys Cass. (Asteraceae): An Approach to Conservation and Ecological Restoration of the Andean Flora in Peru	Coronel-Castro, E. , Meza-Morí, G. , Pariente-Mandragón, E. , ... Tariq, A. , Guzman, B.K.	Sustainability Switzerland , 17(6), 2406	2025	2
<input type="checkbox"/> 2 Potential distribution of the oncilla <i>Leopardus tigrinus</i> (Carnivora: Felidae) based on high-resolution spatial data and camera traps in a national park in Peru	Briceño, N. , Cano, D. , Cámara, E. , ... Rico, A. , Rojas-Briceño, N.	Journal of Animal Behaviour and Biometeorology , 13(1), e2025006	2025	0
<input type="checkbox"/> 3 Caught in the Act: Incipient Speciation at the Southern Limit of <i>Viburnum</i> in the Central Andes	Maya-Lastra, C.A. , Sweeney, P.W.	Systematic Biology , 73(4), pp. 629–643	2024	2

Anexo 4: Estrategias para la búsqueda de referencias bibliográficas PudMed.

[Advanced](#)
[Create alert](#)
[Create RSS](#)
[User Guide](#)

Sort by: [Best match](#)

MY CUSTOM FILTERS

138 results

 << < Page of 14 > >>

Filters applied: Full text. [Clear all](#)

Climate change, allergy and asthma, and the role of tropical forests.

1 D'Amato G, Vitale C, Rosario N, Neto HJC, Chong-Silva DC, Mendonça F, Perini J, Landgraf L, Solé D, Sánchez-Borges M, Ansoategui I, D'Amato M.
 Cite World Allergy Organ J. 2017 Mar 7;10(1):11. doi: 10.1186/s40413-017-0142-7. eCollection 2017. PMID: 28286602 [Free PMC article](#). [Review](#).
 There are many causes of deforestation, including socioeconomic and natural factors, such as clear-cutting for agriculture, ranching and development, unsustainable logging for timber, as well as droughts, fires and degradation due to **climate change**. About natural ca ...

Downscaling precipitation and temperature in the Andes: applied methods and performance-a systematic review protocol.

2 Núñez Mejía S, Villegas-Lituma C, Crespo P, Córdova M, Gualán R, Ochoa J, Guzmán P, Ballari D, Chávez A, Mendoza Paz S, Willems P, Ochoa-Sánchez A.
 Cite Environ Evid. 2023 Dec 12;12(1):29. doi: 10.1186/s13750-023-00323-0.

RESULTS BY YEAR

PUBLICATION DATE

 1 year

 5 years

 10 years

 Custom Range

TEXT AVAILABILITY

PubMed® (Peru[tiab] OR "Tropical Andes"[tiab] OR Andes[tiab]) AND (glacier*[tiab] O

Avanzado Crear alerta Crear RSS Guía del usuario

Ahorrar Correo electrónico Enviar a

Ordenar por: Mejor partido Opciones de visualización

MIS FILTROS PERSONALIZADOS 49 resultados << < Página 1 de 5 > >>

RESULTADOS POR AÑO

Reiniciar

FECHA DE PUBLICACIÓN

1 año

5 años

10 años

Gama personalizada

DISPONIBILIDAD DE TEXTO

Abstracto

Filtros aplicados: Texto completo . [Borrar todo.](#)

1 **La sequía andina y el retroceso de los glaciares vinculados al calentamiento de Groenlandia durante el último período glacial.**

Citar Woods A, Rodbell DT, Abbott MB, Hatfield RG, Chen CY, Lehmann SB, McGee D, Weidhaas NC, Tapia PM, Valero-Garcés BL, Bush MB, Stoner JS. Nat Commun. 12 de octubre de 2020;11(1):5135. doi: 10.1038/s41467-020-19000-8. PMID: 33046707 [Artículo gratuito de PMC.](#)

Las variaciones correspondientes en la intensidad del monzón de verano sudamericano (SASM) se documentan, con mayor frecuencia, en registros isotópicos de espeleotemas, pero se sabe menos sobre cómo estos cambios afectaron la precipitación y **el balance de masa de los glaciares** andinos . Aquí presentamos un...

2 **El reciente retroceso de los glaciares tropicales andinos no tiene precedentes en el Holoceno.**

Citar Gorin AL, Shakun JD, Jones AG, Kennedy TM, Marcott SA, Goehring BM, Zoet LK, Jomelli V, Bromley GRM, Mateo EJ, Mark BG, Rodbell DT, Gilbert A, Caffee MW. Ciencia. 2 de agosto de 2024;385(6708):517-521. doi: 10.1126/science.ada7546. Publicación electrónica 1

PubMed® (Peru[tiab] OR "Tropical Andes"[tiab] OR Andes[tiab]) AND (vegetation[tiab]

Avanzado Crear alerta Crear RSS Guía del usuario

Ahorrar Correo electrónico Enviar a

Ordenar por: Mejor partido Opciones de visualización

MIS FILTROS PERSONALIZADOS 17 resultados << < Página 2 de 2 > >>

RESULTADOS POR AÑO

FECHA DE PUBLICACIÓN

1 año

5 años

10 años

Gama personalizada

DISPONIBILIDAD DE TEXTO

Filtros aplicados: Texto completo . [Borrar todo.](#)

11 **Estructura de la comunidad aviar y uso del hábitat de los bosques de *Polylepis* a lo largo de un gradiente de elevación.**

Citar Sevillano-Ríos CS, Rodewald AD. PeerJ. 27 de abril de 2017; 5: e3220. doi: 10.7717/peerj.3220. Colección electrónica 2017. PMID: 28462030 [Artículo gratuito de PMC.](#)

ANTECEDENTES: Como uno de los ecosistemas forestales más altos del mundo, los bosques de *Polylepis* son reconocidos tanto como centro de endemismo y diversidad a lo largo de los **Andes** como un ecosistema seriamente amenazado por la pérdida de hábitat, la fragmentación y **el cambio climático** debido a la hu...

12 **La situación de presencia-ausencia y su impacto en la estructura del ensamblaje y las relaciones interespecíficas de las mariposas *Pronophilina* en los **Andes** venezolanos (*Lepidoptera: Nymphalidae*).**

Citar Pyrcz T. W., Garlacz R.

Anexo 5: Estrategias para la búsqueda de referencias bibliográficas en Google Scholar.

Google Académico ("Peru" OR "Andes Peru") AND ("Andean vegetation" OR "vegetación andina")

Artículos Aproximadamente 74 resultados (0,03 s) Mi perfil Mi biblioteca

Cualquier momento Desde 2025 Desde 2024 Desde 2021 Intervalo específico... 2000 — 2025 Buscar

Ordenar por relevancia Ordenar por fecha

Cualquier idioma Buscar solo páginas en español

Cualquier tipo Artículos de revisión incluir patentes incluir citas Crear alerta

[PDF] Desplazamientos de los rangos de distribución y extinciones impulsados por el **cambio climático** en los Andes tropicales: síntesis y orientaciones
 TH Larsen, G Brehm, H Navarrete, P Franco... - ..., H Cambio climático y ..., 2012 - academia.edu
 ... Las nubes y la niebla son además importantes para proteger los **ecosistemas andinos** de la radiación solar a alturas mayores. Las especies también pueden verse afectadas por el ...
 ☆ Guardar Citar Citado por 13 Artículos relacionados Las 2 versiones

[PDF] academia.edu

Major altitudinal shifts in **Andean vegetation** on the Amazonian flank show temporary loss of biota in the Holocene
 Z González-Carranza, H Hooghiemstra... - The ..., 2012 - journals.sagepub.com
 ... Our objectives are to reconstruct and to assess Holocene vegetation and **climate change** at ... (Figure 5) show changes in **altitudinal distribution** and changes in vegetation composition. ...
 ☆ Guardar Citar Citado por 64 Artículos relacionados Las 12 versiones

[PDF] eafit.edu.co

[HTML] Modeled Shifts in *Polylepis* Species Ranges in the Andes from the Last Glacial Maximum to the Present
 BR Zutta, PW Rundel - Forests, 2017 - mdpi.com
 ... past response of high **Andean vegetation** to **climate change**. Although Quaternary ... Peru to Argentina, and jalca in the transition zones between these two ecosystems in northern Peru...
 ☆ Guardar Citar Citado por 41 Artículos relacionados Las 10 versiones

[HTML] mdpi.com

Plant diversity and vegetation of the Andean Páramo
 G Peyre - 2015 - dposit.ub.edu
 ... **climate change** impacts on the páramo flora and vegetation. ... A general approximation of the

[PDF] ub.edu

Anexo 6. Búsqueda en repositorios institucionales - Perú, Elaboración propia

Institución	Información proporcionada	N° de documentos incluidos	Repositorio
INAIQUEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña)	Glaciares, retroceso glacial, inventarios nacionales, dinámica criósfera-ecosistemas de montaña, rehabilitación de puna altoandina.	6	www.inaiquem.gob.pe
SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú)	Serías históricas y tendencias de temperatura y precipitación, variabilidad climática en los Andes peruanos, proyecciones de cambio climático.	6	www.senamhi.gob.pe
SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre)	Vegetación andina, flora nativa y ecosistemas altoandinos, biodiversidad y adaptación al cambio climático.	2	www.serfor.gob.pe
MINAM (Ministerio del Ambiente de Perú)	Ecosistemas del Perú, mapa nacional de ecosistemas, estrategia nacional frente al cambio climático 2050, bosques andinos y servicios ecosistémicos.	3	www.minam.gob.pe
TOTAL		17	

Anexo 7: Cuadro de rescisión sistemática de estudios referidos a precipitación

ID	AUTOR Y AÑO	TÍTULO	ÁREA DE ESTUDIO	PERIODO DE DATOS	FUENTE	MODO / ENFOQUE	RESULTADOS CUANTITATIVOS
P1	Potter et al. (2023)	A future of extreme precipitation and droughts in the Peruvian Andes	Cordillera Blanca y Vilcanota-Urubamba	1981 - 2010 (base), 2015-2100 (proy.)	WRF + CMIP5/6, downscaling estadístico	Proyecciones de extremos de T y P	T: +3.6 a +4.1 °C (2081-2100, RCP8.5); precipitación anual -12%; intensificación de extremos húmedos y secas.
P2	Llactayo et al. (2024)	Future changes of precipitation types in the Peruvian Andes	Huaytapallana (4709 m) y Andes centrales	2019 - 2021 (obs.), 21.º siglo (proy.)	Disdómetros + CMIP5/6-CCCP	Tipos de precipitación y transición lluvia/nieve	Con +2 °C, la fracción sólida \downarrow a +10%; aumento de lluvia a mayor altitud; riesgo para balance glaciar.
P3	Endries, J. L. et al. (2018)	Radar-Observed Characteristics of Precipitation in the Tropical High Andes of Southern Peru and Bolivia	Altiplano sur de Perú y Bolivia	2014 - 2016	Red de radares meteorológicos	Observacional (microfísica, ciclo diurno)	56% estratiforme, 44% convectiva; altura de banda brillante -4.5-4.7 km; picos vespertino-nocturnos; 57% de tormentas con lluvia sobre glacares en EN 2015-2016.
P4	Kumar, S. et al. (2020)	Rainfall Characteristics in the Mantaro Basin over Tropical Andes from a Vertically Pointed Profile Rain Radar and In-Situ Field Campaign	Cuenca del Mantaro (Hancayo)	2015 - 2018	Radar MRA35c + campaña in situ	Perfiles verticales de DSD y ciclo diurno	Altura de banda brillante 4.3-4.7 km (+70%); ciclo bimodal (tarde/noche); relación con T superficial.
P5	Fatas de Reyes et al. (2024)	Space-Time Variability of Maximum Daily Rainfall in the Piura River Basin in Peru in relation to the occurrence of El Niño	Cuenca del río Piura (costa norte)	1950 - 2023	Estaciones + PISCO	Estadística de extremos y ENSO	ENSO explica ~70% de variabilidad en máximos; eventos 1982-83, 1997-98 y 2017 concentraron máximos.
P6	De la Cruz, G. et al. (2025)	Future Climate Projections for Tacna, Peru: Assessing Changes in Temperature and Precipitation	Región Tacna (sur)	1981 - 2010 (base), 21.º siglo	Conjunto de GCMs (CMIP)	Proyecciones regionales de T y P	T: +2-3 °C a 2050-2080; P: [DJF (-10 a -20%), 1MM (+6 a +15%); mayor frecuencia de extremos.
P7	Pico-Vargas et al. (2022)	Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru	Cuenca área del sur (Tacna)	Proy. 2050 - 2080	Modelos hidrológicos + RCP	Impactos hidrológicos de P	7 caudales pico 10-25% en RCP8.5; alta sensibilidad a P extremo.
P8	Torres-Mercado et al. (2025)	Comparison of Flood Scenarios in the Cunas River Under the Influence of Climate Change	Cuenca del río Cunas (Junín)	Horizonte 2050 - 2080	CMIP5 + corrección de sesgo + HEC-RAS 2D	Escenarios de inundación	Área inundada hasta 20% (RCP8.5); mayor profundidad de lámina de agua.
P9	Kronenberg et al. 2016	The Projected Precipitation Reduction over the Central Andes may Severely Affect Peruvian Glaciers and Hydropower Production	Andes centrales del Perú	21.º siglo	GCMs / escenarios	Proyecciones + impactos	Reducción de P proyectada (-10 a -20% anual); riesgo severo para glacares y generación hidroeléctrica.
P10	Tafur Anzualdo et al. (2024)	Causes and Effects of Climate Change 2001 to 2021, Peru	Perú (cobertura nacional)	2001 - 2021; proy. 2022 - 2025	INEI + datos oficiales	Revisión bibliográfica nacional	Costa: 22-174 mm/año; Sierra: 570-834 mm; Selva: 1150-2050 mm; tendencia \uparrow leve en Selva.
P11	Infeld et al. (2021)	A combined view of climatology, precipitation, and temperature trends in the southern Andes of Peru	Sur andino (Perú)	1965 - 2018	Estaciones + rejillas	Análisis de tendencias (MK/Theil-Sen)	DJF: tendencias positivas en NN/CW; negativas hacia el este; heterogeneidad espacial marcada.

Anexo 8: Tabla de resultados de revisión sistemática de Temperatura

ID	AUTOR Y AÑO	TÍTULO	ÁREA DE ESTUDIO	PERIODO DE DATOS	FUENTE	MODO / ENFOQUE	RESULTADOS CUANTITATIVOS
T1	López-Moreno et al. (2018)	Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru	Altiplano de Bolivia y Perú	1965 - 2012	25 estaciones (SENAMH y redes)	Tendencias (MK/Theil-Sen)	Tmáx: +0.15-0.25 °C/década; Tmín: +0.08 °C/década (no siempre significativa).
T2	Infeld et al. (2021)	A combined view on precipitation and temperature climatology and trends in the southern Andes of Peru	Sur andino	1965 - 2018	Estaciones + rejillas	Análisis de tendencias	Tmín JJA: +0.16 °C/década (p<0.02); Tmáx con señales positivas generalizadas.
T3	Huerta et al. (2023)	High-resolution grids of daily air temperature for Peru – the new PISCOt v1.2 dataset	Perú (cobertura nacional)	1981 - 2020	PISCOt v1.2 (~1 km)	Control de calidad, interpolación y validación cruzada	MAE =1.4 °C (Tmáx), 1.2 °C (Tmín); diferencias vs ERA5-Land >6 °C en Andes.
T4	De la Cruz, G. et al. (2022)	Future Climate Projections for Tacna, Peru: Assessing Changes in Temperature and Precipitation	Región Tacna (sur)	2035 y 2080 (escenarios)	Conjunto de GCMs (CMIP)	Proyecciones climáticas regionales	2035: Tmín +0.3-0.6 °C; Tmáx +0.1-0.3 °C; 2080: Tmín +1.5-2.1 °C; Tmáx +1.0-1.5 °C.
T5	Potter et al. (2023)	A future of extreme precipitation and droughts in the Peruvian Andes	Cordilleras del Perú	21.º siglo	WRF + CMIP5/6	Proyecciones de T y P	T marcada a lo largo del siglo (+3.6 a +4.1 °C en 2100, RCP8.5).
T6	Sanabria et al. (2014)	Potential impacts of early twenty-first century changes in temperature and precipitation on rainfed annual crops in the Central Andes of Peru	Andes centrales	Escenarios -2030 (A1B)	Modelos regionales (PRECIS, etc.)	Impactos agroclimáticos	+T -1 °C; P con variación modesta; \downarrow rendimiento de maíz y papa.
T7	Tafur Anzualdo et al. (2024)	Causes and Effects of Climate Change 2001 to 2021, Peru	Perú (cobertura nacional)	2001 - 2021; proy. 2022 - 2025	INEI + datos oficiales	Revisión bibliográfica nacional	Costa: 21.1-22.6 °C; Sierra: 12.6-14.4 °C; Selva: 22.7-25.7 °C; proy. +0.2-0.6 °C adicionales hacia 2025.