

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DESGLACIACIÓN DEL NEVADO
ANANEA Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA
EN LA CORDILLERA SUR DEL PERÚ, 2015 - 2025.**

PRESENTADA POR:

JAIME ALFREDO ITO MULLISACA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO – PERÚ

2026



Repositorio Institucional ALCIRA by [Universidad Privada San Carlos](https://www.upsc.edu.pe/) is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



3.9%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 15 JUN 2026, 10:05 AM

Originality & Authorship Report

Your text is highlighted according to the matched content in the results above.

IDENTICAL
1.08%

CHANGED TEXT
2.82%

Report #33794505

JAIME ALFREDO ITO MULLISACA // ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DESGLACIACIÓN D EL NEVADO ANANEA Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA EN LA CORDILLERA SUR DEL PERÚ, 2015 - 2025 RESUMEN El estudio actual presenta como objetivo examinar la desglaciación del Nevado Ananea y su conexión con el cambio de temperatura en la cordillera sur de Perú entre 2015 y 2025. Se utilizó un enfoque cuantitativo como metodología, que consistió en el procesamiento de datos de temperatura del aire cerca de la superficie y superficial, así como en el análisis multitemporal de la cobertura glaciar a través de técnicas de teledetección. El análisis se completó con métodos estadísticos de correlación de Pearson y regresión lineal. Los hallazgos evidenciaron una reducción notable de la superficie glaciar, que decreció de 43,76 km² en 2015 a 16,03 km² en 2024 y a 18,30 km² en 2025. Esto demuestra una tasa media de pérdida anual de -1,6985 km² y un coeficiente de determinación (R²) igual a 0,5509. Respecto a la temperatura, la superficie tuvo valores que fluctuaron entre 6,59 °C y 8,27 °C; por su parte, el aire presentó temperaturas entre 1,53 °C y 3,22 °C. En los dos casos se observó una tendencia a l aumento. La correlación de Pearson mostró una relación inversa entre la temperatura superficial ($r = -0,667$) y la temperatura del aire ($r = -0,680$), así como una sólida asociación positiva entre las dos variables térmicas ($r = 0,937$). Para resumir, se ha encontrado que el aumento gradua

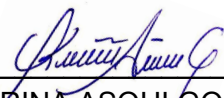
UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TESIS

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DESGLACIACIÓN DEL NEVADO
ANANEA Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA
EN LA CORDILLERA SUR DEL PERÚ, 2015 - 2025.**

PRESENTADA POR:
JAIME ALFREDO ITO MULLISACA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

: 
M.Sc. KORINA ASQUI GOMEZ

PRIMER MIEMBRO

: 
Mtra. NATALY SILVIA GARCIA VILCA

SEGUNDO MIEMBRO

: 
M.Sc. DENILSON MEDINA SANCHEZ

ASESOR DE TESIS

: 
Dra. MARLENE CUSI MONTESINOS

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Ingeniería Ambiental

Línea de investigación: Ciencias Ambientales

Puno, 25 de junio del 2026.

DEDICATORIA

En primer lugar, este trabajo de investigación se lo dedico a Dios, por estar conmigo en cada paso del camino y otorgarme fortaleza, sabiduría y perseverancia para superar los retos y lograr este objetivo académico. Asimismo, a mi familia, por su constante apoyo, entendimiento y estímulo durante el desarrollo de este proceso.

Además, quiero dedicar este esfuerzo a los profesores y asesores que contribuyeron a mi desarrollo profesional al compartir sus conocimientos, consejos y experiencias, lo cual fue crucial para reforzar esta investigación.

Por último, dedico estas palabras a todos aquellos que con su apoyo, confianza y frases de motivación han aportado significativamente al cumplimiento de mis metas académicas y personales.

Jaime Alfredo Ito Mullisaca

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por brindarme la oportunidad de continuar con mi desarrollo profesional, así como salud y fortaleza para terminar esta investigación de manera satisfactoria.

Por su apoyo incesante, paciencia y motivación sin condiciones, elementos fundamentales que me impulsaron a seguir con responsabilidad y compromiso en cada fase de esta labor, mi más sincero agradecimiento a mi familia.

Agradezco, de igual forma, a los maestros y al asesor de investigación, así como a cada individuo que proporcionó guía, saberes y cooperación, lo cual ayudó significativamente a la culminación y desarrollo de esta investigación.

Jaime Alfredo Ito Mullisaca

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE ANEXOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1.1 Problema General	15
1.1.2 Problemas específicos	15
1.2. ANTECEDENTES	15
1.2.1. Antecedentes internacionales	15
1.2.2 Antecedentes nacionales	18
1.2.3. Antecedente local	19

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.3.1. Objetivo general	20
1.3.2 Objetivos específicos	20

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO	21
2.1.1 Desglaciación	21
2.1.2. Glaciar	22
2.1.3. Variabilidad de la temperatura	22
2.1.4. Cambio climático	23
2.1.5. Análisis multitemporal	23
2.1.6. Temperatura superficial terrestre	23
2.1.7. Teledetección	24
2.1.8. Sistemas de Información Geográfica (SIG)	24
2.2. MARCO CONCEPTUAL	24
2.3. MARCO NORMATIVO	25
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	26
2.2.1. Hipótesis general	26
2.2.2 Hipótesis específicos	26

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO	27
3.2. TAMAÑO DE MUESTRA	28

3.2.1 Población	28
3.2.2 Muestra	28
3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS	28
3.4. Metodología	28
3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	32
3.5. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO	32
CAPÍTULO IV	
EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS	
4.1. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LA LA DESGLACIACIÓN DEL NEVADO ANANEA DURANTE EL PERÍODO 2015 - 2025.	33
4.2. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA Y EL PROCESO DE DESGLACIACIÓN DEL NEVADO ANANEA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO.	37
4.3. DISCUSIÓN	39
4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS	40
CONCLUSIONES	42
RECOMENDACIONES	44
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	50

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Identificación de variables.	32
Tabla 02: Correlación de las variables.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Desglaciación.	21
Figura 02: Mapa de ubicación	27
Figura 03: Desglaciación del nevado Ananea durante el periodo 2015 y 2026.	34
Figura 04: Variabilidad desglaciación del nevado Ananea.	35
Figura 05: Mapa de variabilidad del nevado Ananea.	35
Figura 06: Regresión lineal de la desglaciación del nevado Ananea.	36
Figura 07: Variabilidad de las temperaturas del nevado Ananea.	38

INDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia.	51
Anexo 02: Descarga de imágenes satelitales.	53
Anexo 03: Datos de análisis de la desglaciación.	54
Anexo 04: Cálculo del NDSI.	55
Anexo 05: Datos climáticos.	56

RESUMEN

El estudio actual presenta como objetivo examinar la desglaciación del Nevado Ananea y su conexión con el cambio de temperatura en la cordillera sur de Perú entre 2015 y 2025. Se utilizó un enfoque cuantitativo como metodología, que consistió en el procesamiento de datos de temperatura del aire cerca de la superficie y superficial, así como en el análisis multitemporal de la cobertura glaciar a través de técnicas de teledetección. El análisis se completó con métodos estadísticos de correlación de Pearson y regresión lineal. Los hallazgos evidenciaron una reducción notable de la superficie glaciar, que decreció de 43,76 km² en 2015 a 16,03 km² en 2024 y a 18,30 km² en 2025. Esto demuestra una tasa media de pérdida anual de -1,6985 km² y un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0,5509. Respecto a la temperatura, la superficie tuvo valores que fluctuaron entre 6,59 °C y 8,27 °C; por su parte, el aire presentó temperaturas entre 1,53 °C y 3,22 °C. En los dos casos se observó una tendencia al aumento. La correlación de Pearson mostró una relación inversa entre la temperatura superficial ($r = -0,667$) y la temperatura del aire ($r = -0,680$), así como una sólida asociación positiva entre las dos variables térmicas ($r = 0,937$). Para resumir, se ha encontrado que el aumento gradual de la temperatura está fuertemente vinculado con la aceleración del proceso de desglaciación, lo cual muestra cómo el cambio climático afecta a la dinámica glaciar de la cordillera sur del Perú en el tiempo analizado.

Palabras claves: Cambio climático, Cordillera sur del Perú, Desglaciación, Imágenes satelitales, Teledetección

ABSTRACT

The current study aims to examine the deglaciation of Nevado Ananea and its connection to temperature changes in the southern Andes of Peru between 2015 and 2025. A quantitative approach was used as the methodology, consisting of processing near-surface and surface air temperature data, as well as multi-temporal analysis of glacier cover using remote sensing techniques. The analysis was completed with statistical methods of Pearson correlation and linear regression. The findings showed a significant reduction in glacier surface area, decreasing from 43.76 km² in 2015 to 16.03 km² in 2024 and to 18.30 km² in 2025. This demonstrates an average annual loss rate of -1.6985 km² and a coefficient of determination (R^2) of 0.5509. Regarding temperature, surface temperatures ranged from 6.59 °C to 8.27 °C, while air temperatures ranged from 1.53 °C to 3.22 °C. Both showed an upward trend. Pearson's correlation coefficient revealed an inverse relationship between surface temperature ($r = -0.667$) and air temperature ($r = -0.680$), as well as a strong positive correlation between the two thermal variables ($r = 0.937$). In summary, the gradual increase in temperature has been strongly linked to the acceleration of the deglaciation process, demonstrating how climate change affects the glacial dynamics of the southern Andes of Peru during the analyzed period.

Keywords: Climate change, southern Andes of Peru, deglaciation, satellite imagery, remote sensing

INTRODUCCIÓN

El nevado Ananea, ubicado en la región Puno, es una fuente significativa de recursos acuáticos para los ecosistemas y las comunidades locales. No obstante, en años recientes se ha notado una disminución gradual de la cobertura nevada y glaciár, quizás debido al aumento de la temperatura y a los cambios climáticos que han tenido lugar entre 2015 y 2025. Las causas principales incluyen el incremento de las temperaturas a nivel regional, la reducción de las precipitaciones sólidas y las repercusiones del cambio climático en los ecosistemas altoandinos.

Hidalgo et al. (2024) investigó en el glaciár Carihuairazo, que se encuentra en Tungurahua, Ecuador. Su objetivo fue examinar cómo el retroceso glaciár y sus consecuencias afectan a la comunidad de Cunucyacu en un escenario de cambio climático. Para este propósito, se emplearon fotografías aéreas antiguas, datos de reanálisis climático, registros meteorológicos y entrevistas locales, además de un modelo hidroglaciológico que fue ajustado con información fotográfica del glaciár. Los hallazgos indicaron que en 2021 el glaciár había perdido aproximadamente el 99 % de su extensión territorial desde 1956, lo cual equivale a 0.34 km². Asimismo, el análisis de 67 años de evolución glaciár mostró una disminución continua desde 1978, con la temperatura como el principal factor vinculado a la pérdida de hielo (Hidalgo et al., 2024).

El proyecto de investigación se llevó a cabo tomando en cuenta una estructura organizada que incluía los componentes esenciales que orientaron el estudio. Se consideraron, además del título de investigación, la formulación y el planteamiento del problema, así como la pertinencia y justificación del tema y los objetivos específicos y generales. Además, se añadieron las hipótesis cuando fueron necesarias, las variables de estudio junto con sus indicadores correspondientes, y el apoyo teórico y los antecedentes relacionados con la investigación. También se determinó la metodología

utilizada, detallando el diseño y tipo de investigación, la población y muestra, los métodos e instrumentos empleados para la obtención de datos, así como el calendario de actividades, los recursos económicos calculados, los resultados anticipados y las referencias bibliográficas. En general, estas características permitieron una organización y orientación apropiadas del proceso de investigación de manera coherente y sistemática.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El calentamiento global ha provocado en el ámbito internacional una reducción rápida de los glaciares en diversas cordilleras del mundo, sobre todo en áreas altas como los Alpes, los Andes y el Himalaya. Las emisiones de gases de efecto invernadero y las actividades humanas han causado que la temperatura suba constantemente, lo que ha alterado el balance natural de los glaciares y ha propiciado que se derritan y retrocedan poco a poco. El incremento de la temperatura en la atmósfera, la disminución de las nevadas y la variabilidad del clima son algunos de los elementos más importantes. Por ende, se producen cambios ecológicos, disminución de reservas de agua dulce, crecimiento de lagunas pro glaciares y un incremento en los peligros relacionados con desastres naturales como las inundaciones y los aluviones. Por esta razón, el empleo de imágenes satelitales y herramientas geoespaciales es esencial para la supervisión y valoración de las transformaciones glaciares en los ecosistemas montañosos (Rey, 2021).

El Perú, a nivel nacional, alberga una gran cantidad de glaciares tropicales en el mundo entero, que se encuentran sobre todo en las cordilleras Blanca y Vilcanota y otras áreas altoandinas del sur peruano. Sin embargo, la extensión de los glaciares ha disminuido

significativamente en años recientes, lo que está vinculado con el aumento de la temperatura promedio y las fluctuaciones climáticas a nivel regional. La cordillera sur de la nación es muy vulnerable a estas alteraciones térmicas, lo que pone en riesgo la estabilidad de los nevados y el suministro de agua para las poblaciones andinas. Entre las razones más importantes se encuentran los cambios en la precipitación, el calentamiento del clima y la presencia de fenómenos climáticos extremos. Sus consecuencias son la disminución de caudales, el impacto sobre las actividades ganaderas y agrícolas, y el deterioro de los ecosistemas montañosos. A pesar de este problema, el número de investigaciones que examinan la relación entre la variabilidad de temperatura en el sur peruano y el análisis multitemporal de glaciares menores sigue siendo limitado (Torres et al., 2022).

El nevado Ananea, ubicado en la región Puno, es una fuente significativa de recursos acuáticos para los ecosistemas y las comunidades locales. No obstante, en años recientes se ha notado una disminución gradual de la cobertura nevada y glaciar, quizás debido al aumento de la temperatura y a los cambios climáticos que han tenido lugar entre 2015 y 2025. Las causas principales incluyen el incremento de las temperaturas a nivel regional, la reducción de las precipitaciones sólidas y las repercusiones del cambio climático en los ecosistemas altoandinos. La escasez de agua para el consumo y la producción agrícola, así como la modificación de los bofedales y un aumento en la vulnerabilidad del medio ambiente en las áreas circundantes, son algunas posibles consecuencias de esta situación. En esta línea, es imprescindible llevar a cabo un análisis multitemporal de la desglaciación del nevado Ananea y su conexión con la fluctuación de la temperatura, utilizando métodos de teledetección y estudios geoespaciales que ayuden a entender el comportamiento glaciar y a gestionar sosteniblemente los recursos hídricos (Rojas & Iannacone, 2023).

1.1.1 Problema General

¿Cuál es la desglaciación del nevado Ananea y su relación con la variabilidad de la temperatura en la cordillera sur del Perú, 2015 - 2025?

1.1.2 Problemas específicos

P1. ¿Cuanto es la desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025?

P2. ¿De qué manera la variabilidad de la temperatura influye en el proceso de desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015-2025?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. Antecedentes internacionales

- Pilato et al. (2022) el estudio se llevó a cabo en los glaciares Dickson, Cubo y Frías, también llamados Glaciares Escondidos, situados en el sector sudoeste del Campo de Hielo Patagónico Sur. El propósito era analizar la evolución a través del tiempo del retroceso glaciar, la dinámica del hielo y el balance de masa durante las dos últimas décadas. Con este propósito, se utilizaron imágenes satelitales de radar y ópticas, así como datos meteorológicos y la técnica de offset tracking; además, se incorporó el método geodésico para calcular las fluctuaciones en la masa glaciar. Los hallazgos revelaron un importante retroceso de los frentes glaciares, particularmente en la última década, así como cambios en el drenaje natural del agua y la formación de lagos proglaciares. También se observó que, además de la pérdida significativa de masa glaciar y velocidades elevadas del flujo del hielo, los ríos que antes fluían más de 250 km hacia el océano Atlántico ahora desembocan en el océano Pacífico.
- Hidalgo et al. (2024) la investigación se realizó en el glaciar Carihuairazo, que se encuentra en Tungurahua, Ecuador. Su objetivo fue examinar cómo el retroceso glaciar y sus consecuencias afectan a la comunidad de Cunucyacu en un escenario de cambio climático. Para este propósito, se emplearon fotografías aéreas antiguas, datos de reanálisis climático, registros meteorológicos y entrevistas locales, además

de un modelo hidroglaciológico que fue ajustado con información fotográfica del glaciar. Los hallazgos indicaron que en 2021 el glaciar había perdido aproximadamente el 99 % de su extensión territorial desde 1956, lo cual equivale a 0.34 km². Asimismo, el análisis de 67 años de evolución glaciar mostró una disminución continua desde 1978, con la temperatura como el principal factor vinculado a la pérdida de hielo.

- Fuentes & Santana (2025) el estudio se llevó a cabo en los glaciares tropicales de Colombia, situados en áreas cercanas a la línea ecuatorial, con el objetivo de analizar la relación entre las fluctuaciones climáticas y las variaciones multitemporales del manto glaciar durante el periodo comprendido entre 2010 y 2023. La metodología comprendió el procesamiento de imágenes multiespectrales de PlanetScope y Rapid Eye, que fueron complementadas con Segment Anything Model, una herramienta de inteligencia artificial utilizada para definir zonas glaciares. Asimismo, para determinar las altitudes glaciares se emplearon datos de temperatura y precipitaciones desde 1991 hasta 2023, los cuales fueron adquiridos a través del modelo digital SRTM y Google Earth Engine. A pesar de que se produjeron aumentos temporales en 2011 y 2021 debido al fenómeno La Niña, los hallazgos revelaron una reducción gradual de la superficie glaciar durante el período estudiado. Además, las altitudes glaciares varían entre 4804 y 5067 metros sobre el nivel del mar (msnm), con un promedio de 4952 msnm. Se observó que los acontecimientos de El Niño incrementaron la velocidad del retroceso glaciar, mientras que los de La Niña propiciaron pequeñas recuperaciones en la cobertura de hielo.
- Vecchio et al. (2022) con el objetivo de examinar la manera en que los elementos morfométricos afectan la dinámica de cobertura glaciar entre 1976 y 2020, se realizó una investigación en el volcán Maipo, situado en los Andes Centrales, Chile. Tomando en cuenta variables como la inclinación, la altitud y la dirección de las laderas, el

método se basó en un análisis multitemporal de 11 imágenes LANDSAT (MSS, TM y OLI). Los hallazgos revelaron una disminución glaciaria de $6 \pm 0,5 \text{ km}^2$, lo que representa el 63 % del área inicial calculada en $9,6 \pm 0,5 \text{ km}^2$, con un índice promedio de reducción de $-0,14 \pm 0,01 \text{ km}^2$ anualmente. Además, se notó que la reducción relativa del glaciar disminuía 0,1 % por año por cada 100 metros de incremento altitudinal ($R^2=0,81$; $p<0,05$), y aproximadamente la mitad de la disminución glaciaria ocurrió entre los 3900 y los 4400 msnm. Las zonas con orientación hacia el sur, por otra parte, mantuvieron una mayor cobertura de glaciares; en cambio, las pendientes orientadas hacia el norte llegaron a perder toda su superficie de hielo.

- Revueltas et al. (2020) el análisis de variables hidrológicas y meteorológicas se llevó a cabo en 13 microcuencas situadas al norte de Colombia para detectar indicios de variabilidad climática local. La metodología incluyó el examen estadístico de la temperatura del aire, la humedad del ambiente, la densidad de vapor de agua y la evapotranspiración potencial, junto con el análisis de la respuesta hidrológica a través del método del número de curva. Los hallazgos revelaron un aumento medio de 30,9 mm en la evapotranspiración potencial, una subida media de $0,66 \text{ }^\circ\text{C}$ en la temperatura del aire y un incremento cercano al 16 % en la densidad de vapor atmosférico. Asimismo, se observó que en 11 microcuencas, el número de curva fue superior a 80 en más del 85 % del área evaluada. Esto demuestra que las características físicas del territorio y la cobertura vegetal están vinculadas con los cambios climáticos locales.
- Medina et al. (2020) con el objetivo de analizar el impacto del cambio climático y del calentamiento global en la producción potencial de alfalfa en escenarios futuros, se llevó a cabo una investigación en áreas con alto potencial para cultivar alfalfa bajo sistemas de riego en México. La metodología utilizó anomalías de temperatura y precipitación proyectadas para el lapso 2021-2080, que se adquirieron a partir de un

grupo de 11 modelos de circulación general y escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5. Según los resultados, el aumento de la temperatura causaría una disminución paulatina de las zonas con elevado potencial productivo; en el escenario RCP 4.5, se prevé que para el año 2070 dicha reducción alcanzaría el 24,7 % en comparación con las condiciones climáticas iniciales. El escenario RCP 8.5 también mostró pérdidas más grandes en la superficie cultivable, que dependen de la zona agrícola, y sugirió la posibilidad de sustituir la alfalfa por cultivos que necesiten menos agua, como el maíz.

1.2.2 Antecedentes nacionales

- Monge et al. (2022) el objetivo del estudio fue entender, desde una perspectiva interdisciplinaria, cómo las comunidades andinas de Perú perciben el cambio climático y el deshielo glaciar. Se utilizó la metodología de aplicar encuestas y evaluar variables psicológicas relacionadas con la evaluación del riesgo climático y el retroceso glaciar. Los hallazgos revelaron una asociación significativa entre la percepción del deshielo y la preocupación por las consecuencias del cambio climático, indicando que un alto porcentaje de la población piensa que los glaciares seguirán disminuyendo en el futuro. También se detectó una gran inquietud acerca de los efectos sociales y medioambientales, así como un mayor deseo de llevar a cabo acciones para mitigar y adaptarse a este problema.
- Tacsí et al. (2025) el objetivo de la investigación, que se realizó entre 1962 y 2020 en las cordilleras andinas peruanas, fue estudiar cómo están conservados los glaciares tropicales, su localización geográfica y cuánta agua hay por persona almacenada como hielo. Para estimar el volumen glaciar se utilizó la metodología que consistió en utilizar imágenes satelitales Sentinel y Spot, fotografías aéreas, validación con puntos GPS, modelos digitales de elevación y el modelo GlabTop. A esta información se le añadió datos censales de las áreas donde hay glaciares. Los hallazgos indicaron que entre 1962 y 2020, la superficie glaciar pasó de ser de 2349,20 km² a 1049 km²; por

su parte, el volumen se vio reducido de 69 564 hm³ a 31 686 hm³. Esto equivale a una disminución del 55 % y del 54 %, en ese orden. Asimismo, la población vinculada a las cuencas glaciares creció de más de 650.000 a 1.200.000 personas y el 86 % de los glaciares presentó áreas inferiores a 1 km², lo que produjo una disminución en la reserva hídrica per cápita, pasando de 106,66 m³ a 24,85 m³ por individuo.

- Tacsí et al. (2022) la investigación se llevó a cabo en los glaciares tropicales situados entre las latitudes 8° y 16° S de los Andes peruanos, con el objetivo de analizar la correlación entre el proceso de desglaciación y las condiciones climáticas actuales. La metodología incluye el análisis de imágenes obtenidas por satélites, modelos digitales de elevación y datos provenientes de estaciones meteorológicas. Se categorizaron los glaciares según su tamaño (menor a 1 km² o mayor o igual a 1 km²) y rangos latitudinales. Además, se usaron imágenes Landsat para cotejar los contornos de los glaciares de las épocas 2015–2019 y 1962–1970 con el fin de calcular variaciones en la superficie, el volumen y las propiedades geomorfológicas. Los glaciares actuales tienen 1,058 km² de superficie y 31,930 hm³ de volumen, con una predominancia en la dirección suroeste. Asimismo, se observó una disminución del 54 % en superficie y volumen glaciar; por otro lado, los glaciares de menos de 1 km² mostraron un descenso del 67 % en superficie y del 72 % en volumen. Se estableció, además, que las precipitaciones más intensas se produjeron entre las latitudes 8° y 14° S, en tanto que las temperaturas más altas en la estación seca se registraron entre los grados 14° y 16° S. Esto provocó un aumento en la velocidad del retroceso glaciar en zonas ubicadas por debajo de los 4900 msnm.

1.2.3. Antecedente local

- Díaz et al. (2023) el propósito de la investigación fue examinar los efectos potenciales del cambio climático en los ecosistemas montañosos para las futuras situaciones de 2050 y 2070, bajo las condiciones RCP-4.5 y RCP-8.5. La cordillera Carabaya,

situada en los Andes peruanos, fue el lugar donde se llevó a cabo el estudio. Se utilizó el modelo bioclimático de Holdridge para implementar la metodología, empleando datos climáticos de WorldClim que fueron ajustados y validados con información observada; esto posibilitó la identificación de nueve zonas vitales. Los hallazgos mostraron que las coberturas más amplias fueron las del Páramo (41,2 %), seguido del Bosque húmedo-Montano (20,3 %) y la Tundra (14,6 %), con una alta concordancia con el mapa de ecosistemas peruano ($Kappa=0,83$). Asimismo, en el escenario RCP-8.5, las áreas de Páramo, Tundra y Nival experimentarían disminuciones hacia 2050 de hasta -33,9 %, -92,7 % y -96,1 %, respectivamente; y hacia 2070 de -71,7 %, -99,2 % y -98,8 %. Por su parte, el Bosque húmedo-Montano presentaría aumentos entre +86,8 % y +131,6 %, extendiéndose a altitudes más altas.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Analizar la desglaciación del nevado Ananea y su relación con la variabilidad de la temperatura en la cordillera sur del Perú, 2015 - 2025.

1.3.2 Objetivos específicos

- O1.** Evaluar la desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025.
- O2.** Determinar la relación entre la variabilidad de la temperatura y el proceso de desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015-2025.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1 Desglaciación

La desglaciación es el proceso de reducción progresiva en la masa y cobertura de hielo de los glaciares, que se debe mayormente al incremento de las temperaturas y a las variaciones en los patrones de precipitación asociadas con el cambio climático (Aguilar et al., 2023).



Figura 01: Desglaciación.

Fuente: (Moragues et al., 2021)

La disminución de los glaciares afecta la disponibilidad del agua, los ecosistemas altoandinos y el balance ecológico en las regiones montañosas. Además, es uno de los indicadores clave de las alteraciones climáticas que impactan a los glaciares tropicales (Moragues et al., 2021).

2.1.2. Glaciar

Un glaciar es una acumulación natural y duradera de hielo, formada por la compresión continua de la nieve durante prolongados períodos, sobre todo en zonas montañosas o polares donde las temperaturas son constantemente bajas. Cuando la acumulación de nieve excede el deshielo del año, se produce su desarrollo, lo que posibilita que la nieve se convierta de manera gradual en hielo glaciar (Ventura, 2020).

Estas grandes masas de hielo son cruciales para el sistema hídrico y climático, ya que representan importantes reservas de agua dulce y colaboran en la regulación de ríos y lagos. Del mismo modo, se consideran los glaciares como indicadores sensibles del medio ambiente porque la temperatura y las precipitaciones influyen de manera directa en su expansión, disminución y comportamiento glaciar (Campos, 2020).

2.1.3. Variabilidad de la temperatura

La variabilidad de la temperatura se refiere a las alteraciones o fluctuaciones térmicas que tienen lugar en un tiempo y espacio específicos, las cuales pueden presentarse de forma diaria, estacional o anual como consecuencia de factores climáticos y atmosféricos (Ruiz et al., 2022).

Las fluctuaciones de temperatura tienen un impacto directo en los procesos de acumulación y deshielo del hielo glaciar en los ecosistemas montañosos. El aumento constante de la temperatura hace que la pérdida de masa glaciar sea más rápida y altera el comportamiento natural de los glaciares (Nájera et al., 2021).

2.1.4. Cambio climático

Se entiende por cambio climático la alteración a largo plazo de las condiciones climáticas del planeta, que se origina fundamentalmente por el aumento de gases de efecto invernadero generados por acciones humanas. Temperatura, precipitación y circulación del aire son algunas de las variables que se ven modificadas por este fenómeno (Moraga, 2022).

Entre las consecuencias más importantes se encuentran el incremento de la temperatura mundial, la disminución de glaciares, los cambios en los ecosistemas y la intensificación de sucesos extremos relacionados con el clima. Se considera que los ecosistemas de los glaciares tropicales son particularmente susceptibles a estos cambios (Armesto, 2021).

2.1.5. Análisis multitemporal

A través del análisis multitemporal, se pueden detectar y valorar alteraciones en el espacio y en el tiempo. Esto se logra comparando datos adquiridos en varias fechas, sobre todo a partir de imágenes satelitales y de instrumentos geoespaciales (Sandoval et al., 2021).

En investigaciones sobre glaciares, este método permite supervisar la fluctuación de la cobertura helada, el retroceso glaciar y las alteraciones del entorno relacionadas. Asimismo, posibilita la vinculación entre las transformaciones de los glaciares y los elementos climáticos (Vela et al., 2024).

2.1.6. Temperatura superficial terrestre

La temperatura superficial de la Tierra corresponde al calor que emite su superficie y se puede calcular a través de imágenes satelitales y sensores remotos. Esta variable es utilizada ampliamente en investigaciones ambientales y climáticas (Caballero & López, 2023).

Los procesos de fusión glacial se benefician con el aumento de la temperatura superficial, y el balance térmico de los ecosistemas montañosos se ve alterado. Por lo tanto, es un indicador importante para analizar la dinámica de desglaciación (Martínez, 2020).

2.1.7. Teledetección

La teledetección es un método que posibilita conseguir información de la superficie terrestre a través de sensores ubicados en aeronaves o satélites, sin requerir contacto directo con el área de investigación. Esta herramienta permite el análisis tanto temporal como espacial de diversas situaciones medioambientales (Cellone et al., 2023).

La teledetección posibilita detectar variaciones en la cobertura de hielo, el clima y los rasgos del territorio en estudios sobre glaciares. Además, favorece el monitoreo del medio ambiente y la evaluación de los procesos de desglaciación (Kotova et al., 2024).

2.1.8. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica son instrumentos tecnológicos cuyo objetivo es recolectar, guardar, procesar y mostrar información geoespacial. Para realizar el análisis territorial, utilizan bases de datos, imágenes satelitales y datos cartográficos (Colque et al., 2021).

Los SIG ayudan a calcular las áreas de retroceso, estudiar los glaciares en términos espaciales y examinar la interacción entre las variables ambientales y climáticas en investigaciones de dinámica glacial. Asimismo, posibilitan la creación de mapas temáticos y modelos espaciales para administrar el territorio (Gilio et al., 2022).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Glaciar: Se refiere a la superficie ocupada por grandes bloques de hielo en un área montañosa específica, que se usa como punto de referencia para examinar las variaciones en el tamaño y la preservación de los glaciares (Drenkhan & Castro, 2023).

Nieve: Proceso de disminución y movimiento de los glaciares hacia regiones con más altura debido a que la temperatura se incrementa y hay cambios en el clima (Drenkhan & Castro, 2023).

Temperatura: es una magnitud física que indica el grado de calor o frío de un cuerpo o del ambiente, y está vinculada con la energía cinética media de sus partículas (Ebensperger et al., 2020).

Temperatura del aire cerca de la superficie: es la superficie se refiere al nivel de calor o enfriamiento que existe en las capas más bajas de la atmósfera, y suele medir entre 1.5 y 2 metros sobre el suelo (Ebensperger et al., 2020)..

Temperatura de la superficie: la temperatura superficial se refiere al calor que existe en el nivel más externo de la superficie terrestre, ya sea en zonas de vegetación, agua, suelo o urbanizadas (Ebensperger et al., 2020).

2.3. MARCO NORMATIVO

En el Perú, la Ley General del Ambiente (Ley N.º 28611) constituye uno de los principales instrumentos legales en términos ambientales. Esta normativa fomenta principios de sostenibilidad, prevención y cuidado del medio ambiente, con el objetivo de mitigar las consecuencias de la degradación ecológica y reforzar las medidas de adaptación ante la pérdida de recursos hídricos y los efectos del cambio climático.

La Ley de Recursos Hídricos (Ley N.º 29338) también establece la gestión sostenible del agua y acepta que los glaciares son elementos fundamentales para el almacenamiento de agua en las cuencas andinas. Esta normativa fomenta la administración integral de los recursos hídricos y la preservación de ecosistemas estratégicos relacionados con el equilibrio ambiental y la seguridad hídrica.

Por otro lado, el monitoreo y la protección glaciar son tareas importantes que llevan a cabo instituciones como el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA). El INAIGEM, establecido

por la Ley N.° 30286, busca realizar estudios científicos acerca de ecosistemas altoandinos y glaciares, así como proporcionar datos técnicos para la toma de decisiones ambientales.

El Perú, por último, también participa en convenios internacionales vinculados a la batalla contra el cambio climático, entre los cuales se encuentran el Acuerdo de París y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre este mismo tema. Estos compromisos respaldan las políticas nacionales dirigidas a proteger los glaciares y fomentan el avance de investigaciones relacionadas con la desglaciación y la variabilidad del clima en áreas altoandinas del país.

2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.2.1. Hipótesis general

La desglaciación del nevado Ananea y su relación con la variabilidad de la temperatura en la cordillera sur del Perú, 2015 - 2025, es significativa.

2.2.2 Hipótesis específicos

H1. La desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025, es significativa.

H2. El incremento de la temperatura influye significativamente en el proceso de desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015-2025.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La investigación se llevó a cabo en el nevado Ananea, que está situado en la cordillera sur peruana, específicamente en la región de Puno. Esta zona se distingue por sus condiciones climáticas frías, propias de los glaciares tropicales, y por tener ecosistemas altoandinos. Este nevado tiene un papel relevante en la conservación del agua de forma natural y en el balance ambiental de los alrededores, ya que provee recursos hídricos a las comunidades y ecosistemas montañosos.

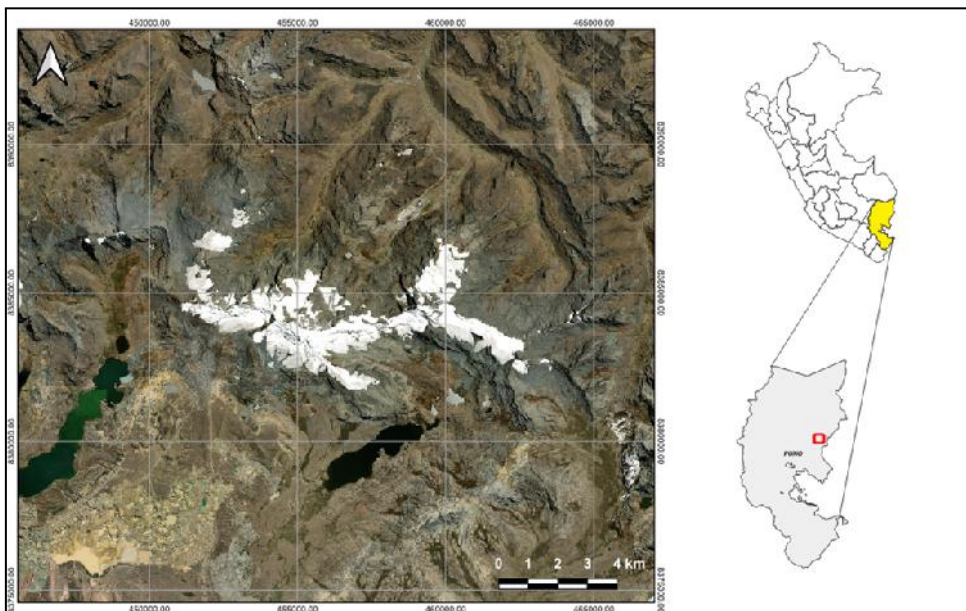


Figura 02: Mapa de ubicación.

La zona de estudio está situada en un área de alta altitud, que se caracteriza por temperaturas bajas, precipitaciones estacionales y una cobertura de hielo glaciar. Como el nevado Ananea es especialmente susceptible al cambio climático, es un lugar adecuado para analizar la dinámica de desglaciación y su vínculo con las fluctuaciones térmicas observadas entre 2015 y 2025.

3.2. TAMAÑO DE MUESTRA

3.2.1 Población

Toda la cobertura glaciar del nevado Ananea y las mediciones de temperatura del lapso 2015-2025 en la cordillera sur peruana constituyeron la población.

3.2.2 Muestra

Entre 2015 y 2025, se recogieron imágenes satelitales de Landsat y Sentinel para formar parte de la muestra.

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

3.4. Metodología

La investigación se centró en un enfoque cuantitativo, aplicado y correlacional porque su objetivo era establecer la conexión entre la desglaciación del nevado Ananea y las fluctuaciones de temperatura en el sur de Perú durante el lapso 2015-2025. Además, la investigación fue diseñada de manera longitudinal y no experimental porque las variables se examinaron en diferentes puntos temporales sin intervenir directamente.

Se utilizaron técnicas de teledetección y análisis geoespacial, a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para llevar a cabo el desarrollo del estudio. Las imágenes satelitales Landsat y Sentinel se emplearon para cuantificar e identificar la cobertura de glaciares a través de procesos de clasificación supervisada e índices espectrales. Con el propósito de determinar tendencias en la temperatura de la superficie terrestre y su relación con el retroceso glaciar, también se examinaron los datos de los registros meteorológicos. Para interpretar la dinámica de desglaciación del nevado Ananea, los

resultados se presentaron, al final, a través de gráficos, mapas temáticos y análisis estadísticos.

Metodología para el Objetivo Específico 1

Evaluar la desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025.

Se utilizó una metodología que combine la teledetección y el análisis multitemporal por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para examinar la desglaciación del nevado Ananea. Se utilizarán imágenes satelitales de Sentinel-2, Landsat 8 y Landsat 9 del lapso de tiempo 2015–2025, que se han adquirido a través de plataformas en línea libres como el portal de la USGS y Google Earth Engine. Para elegir las imágenes, se tendrán en cuenta estándares de visibilidad apropiada de la superficie del glaciar y cobertura mínima de nubes.

Después, se realizaron correcciones atmosféricas en las imágenes, así como el recorte del área de estudio y la creación de composiciones espectrales. El Índice Normalizado de Nieve (NDSI) se usará para determinar la extensión glaciar, ya que esta herramienta posibilita distinguir las zonas de hielo y nieve en comparación con otras coberturas superficiales según (Toledo et al., 2025) . La ecuación que se utilizará es la siguiente:

Donde:

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

Verde = Banda de la luz visible en el color verde

SWIR = banda infrarroja de onda corta

Las áreas cubiertas con nieve y hielo glaciar en la zona de investigación se podrán identificar gracias a los altos niveles del índice NDSI. Después, se implementará una clasificación supervisada con el objetivo de determinar con exactitud la cobertura glaciar correspondiente a cada año estudiado.

La cuantificación de la superficie glaciar se llevará a cabo a través de herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), empleando la expresión que sigue (Veneros et al., 2020):

Donde:

$$A = \sum_{i=1}^n a_i$$

A = área total glaciar

a_i = superficie de cada píxel que ha sido clasificado como glaciar

n = cantidad total de píxeles glaciares.

La tasa de desglaciación anual se calculará a través de la variación porcentual de la superficie glaciar (Veneros et al., 2020):

$$TD = \frac{A_f - A_i}{A_i} \times 100$$

Donde:

TD = porcentaje de desglaciación (%)

A_i es igual a la superficie glaciar inicial.

A_f = área final del glaciar

Finalmente, se representó la información adquirida a través de procedimientos estadísticos, gráficos multitemporales y mapas temáticos. Esto posibilitó el análisis del retroceso glaciar del nevado Ananea en términos espaciales y temporales durante el periodo de estudio.

Metodología para el Objetivo Específico 2

Determinar la relación entre la variabilidad de la temperatura y el proceso de desglaciación del nevado Ananea durante el período de estudio

Para analizar la relación entre los cambios de temperatura y el proceso de desglaciación, se utilizarán registros de temperatura superficial terrestre (LST) y datos meteorológicos obtenidos durante el lapso 2015-2025 de estaciones climáticas y plataformas satelitales.

Utilizando imágenes Landsat, se calculará la temperatura de la superficie terrestre mediante técnicas de conversión de radiancia espectral y estimación de temperatura de brillo. La ecuación que se empleará para calcular la radiancia espectral es la siguiente (Moraga, 2022):

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L$$

Donde:

L_{λ} = Radiancia a través del espectro

M_L = factor multiplicador de la radiancia

Q_{cal} = valor de píxel digital

A_L = factor de adición de radiancia

Después, se calculará la temperatura de brillo de la siguiente manera:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

Donde:

T_B = temperatura de brillo (K)

K_2 y K_1 = constantes térmicas del sensor Landsat.

L_{λ} = Radiancia a través del espectro.

3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Tabla 01: Identificación de variables.

Tipo de variable	Variable	Dimensiones	Indicadores
Independiente	Variabilidad de la temperatura	Temperatura superficial y temperatura del aire cercano a la superficie	- Temperatura superficial (°C) - Temperatura del aire (°C) - Tendencia temporal de la temperatura
Dependiente	Desglaciación del Nevado Ananea	Cobertura glaciar	- Superficie glaciar (km²) - Tasa de cambio anual (km²/año) - Tendencia de retroceso glaciar

3.5. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO

Con el fin de estudiar la tendencia a la baja de la cobertura glaciar en función del tiempo, se empleó el modelo de regresión lineal simple. Este método estadístico facilitó la determinación de la relación entre la variable dependiente, que se refiere a la superficie glaciar, y la variable independiente, que es el tiempo de estudio en años. La ecuación general $y = a + bx$, donde "y" representa la cobertura glaciar, "x" el tiempo, "a" la intersección con el eje vertical y "b" la pendiente que indica el cambio de superficie cada año, es utilizada para expresar el modelo. El análisis, de manera complementaria, reveló que la pendiente de la ecuación es negativa. Esto corrobora el proceso de desglaciación y la reducción gradual del área glaciar durante el periodo analizado.

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LA LA DESGLACIACIÓN DEL NEVADO ANANEA DURANTE EL PERÍODO 2015 - 2025.

La figura 03 de radial evidencia el comportamiento multitemporal de la desglaciación del nevado Ananea entre los años 2015 y 2025, observándose una tendencia general de disminución de la cobertura glaciar. La superficie cubierta por hielo y nieve tuvo su mayor registro en 2015 con 43,76 km², disminuyendo después a 25,19 km² en el año siguiente y a 22,64 km² en el subsiguiente. Se observó un aumento temporal de la cobertura glaciar hasta 32,29 km² en 2018; no obstante, desde el año 2019 se ha producido una tendencia decreciente con cifras de 21,72 km² en ese año, 23,21 km² en el siguiente, 22,20 km² en 2021, 21,28 km² en el año posterior y finalmente 22,18 km² en el año presente. De igual manera, las extensiones glaciares más pequeñas se documentaron en 2024 y 2025, con 16,03 km² y 18,30 km² respectivamente. Estos resultados evidencian un proceso acelerado de retroceso glaciar, ya que la superficie glaciar ha disminuido considerablemente durante el período analizado.

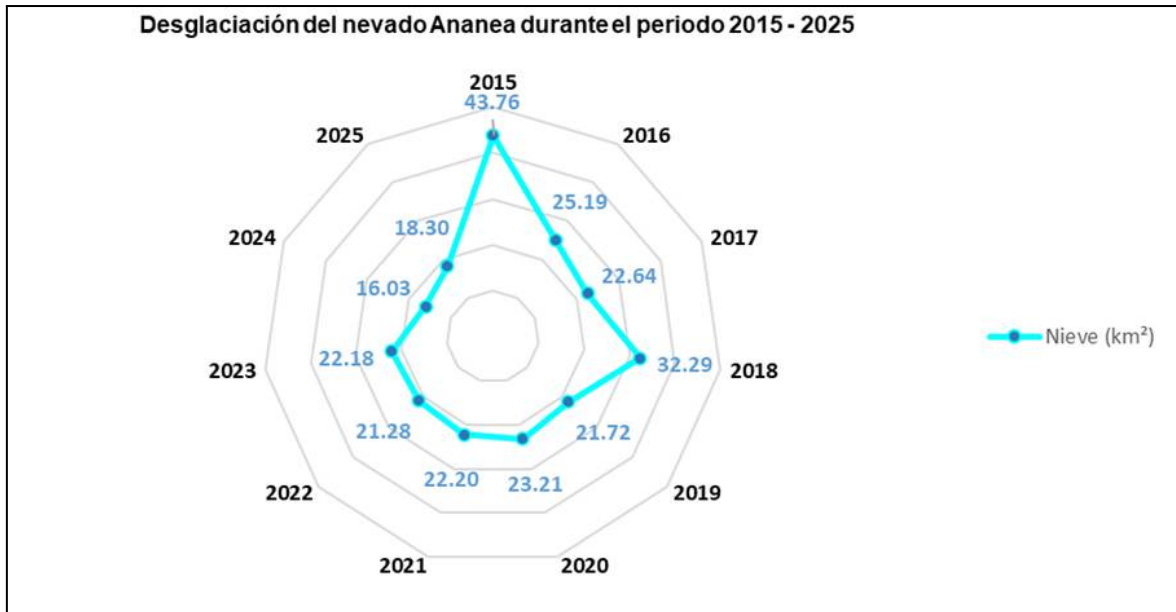


Figura 03: Desglaciación del nevado Ananea durante el periodo 2015 y 2026.

La figura 04 y 05 ilustra cómo la desglaciación del nevado Ananea ha cambiado entre 2015 y 2025, connotando alteraciones significativas en la cobertura de hielo glaciar y nieve durante los años analizados. En 2015, se observó una variación de 0,00 km²; luego, en el año siguiente, la disminución más importante fue de -18,57 km². En 2017, el área disminuyó en -2,55 km², pero en 2018 se recuperó temporalmente con un aumento de 9,65 km². No obstante, se volvió a notar una merma importante de -10,56 km² en 2019, que fue seguida por un leve aumento de 1,49 km² en el año 2020. De igual manera, se documentaron cambios negativos durante los años 2021 y 2022, con una disminución de -1,00 km² y -0,92 km² en ese orden. En 2023 se observó un incremento moderado de 0,90 km²; sin embargo, en 2024 hubo otra reducción de cerca de -6 km². Para concluir, se observó una recuperación de 2,27 km² en el año 2025. En el análisis de datos hasta octubre de 2023, se observa que las fluctuaciones negativas son predominantes durante la mayor parte del período estudiado. Esto refleja una conducta glaciar inestable y una tendencia constante a perder masa de hielo relacionada con la variabilidad térmica y los efectos del cambio climático en la cordillera sur peruana.

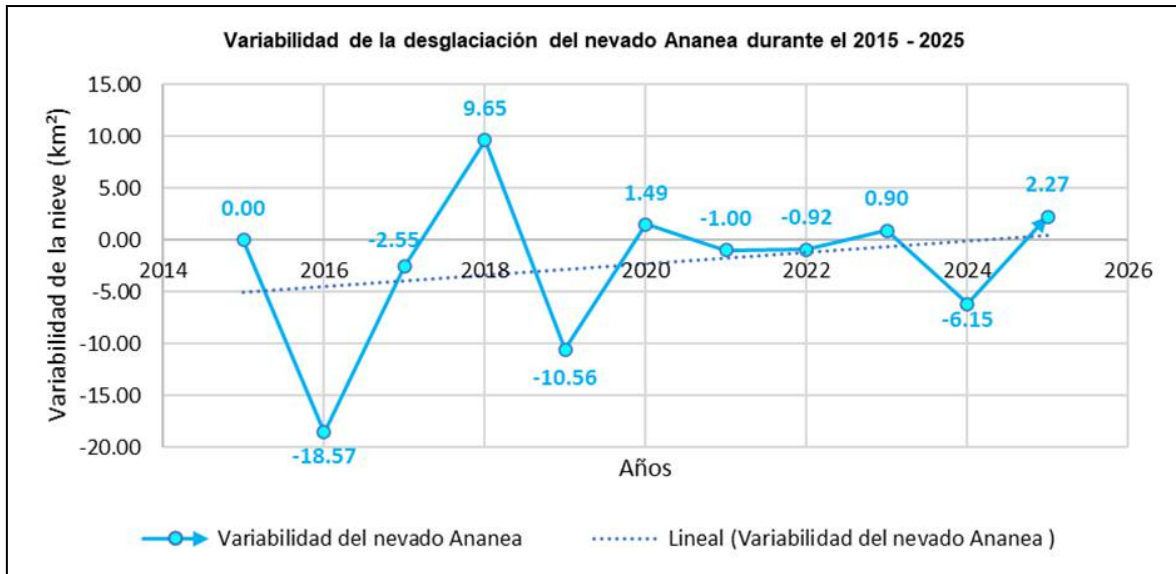


Figura 04: Variabilidad desglaciación del nevado Ananea.

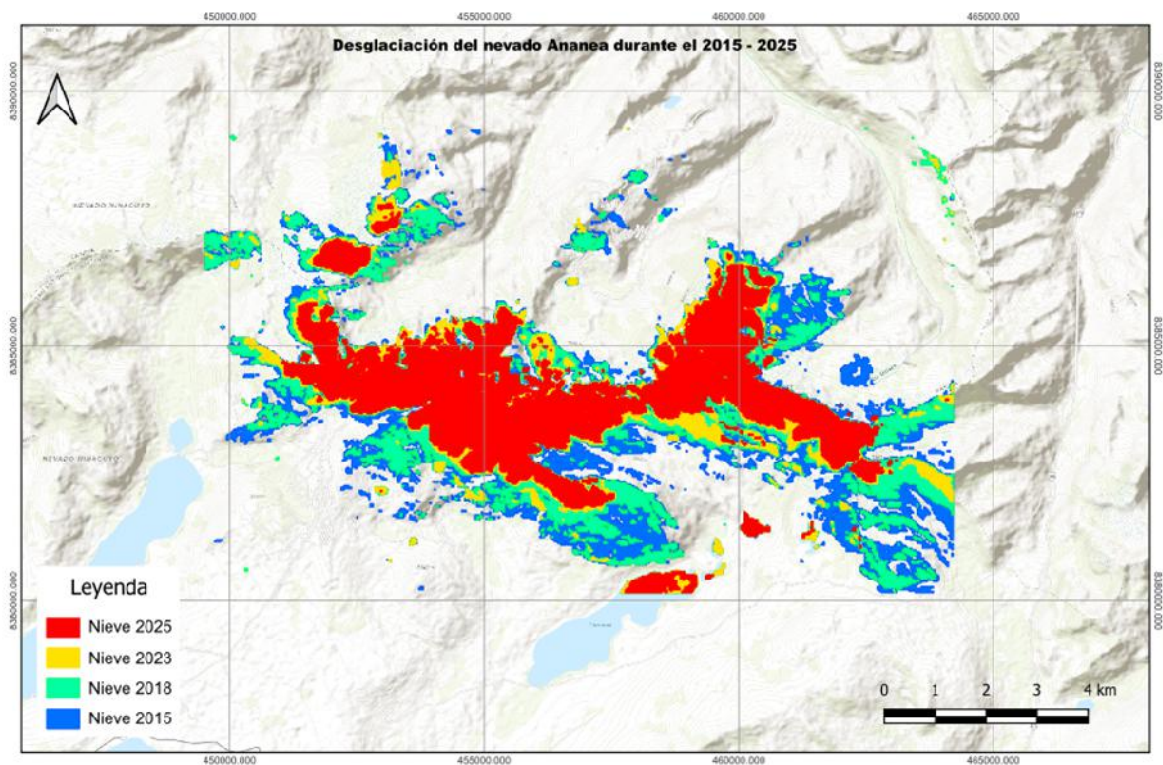


Figura 05: Mapa de variabilidad del nevado Ananea.

En el gráfico se presenta el análisis de regresión lineal de la desglaciación del nevado Ananea en la época 2015-2025, y se puede ver que la cobertura de hielo glaciar y nieve ha disminuido a lo largo del tiempo. Según los registros, en el año 2015 se presentó la

superficie glaciar más extensa, con cerca de 43,76 km². Sin embargo, para los años 2024 y 2025 la cantidad se redujo a 16,03 km² y a 18,30 km², respectivamente. La ecuación de regresión que se obtuvo fue ($y = -1.6985x + 3455.4$). En esta ecuación, la pendiente negativa (-1,6985) demuestra que durante el periodo estudiado hubo una disminución promedio por año de cerca de 1,70 km² en la cobertura glaciar. Asimismo, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.5509$) revela que el 55,09 % de las alteraciones registradas en la superficie glaciar son explicadas por la tendencia temporal del estudio; el otro 44,91 % podría estar vinculado con otros elementos ambientales y climáticos, tales como la radiación solar, las fluctuaciones atmosféricas y la precipitación. En general, los resultados muestran un proceso constante de glaciación regresiva en el nevado Ananea, que se relaciona sobre todo con la fluctuación térmica y las consecuencias del cambio climático en la cordillera sur peruana.

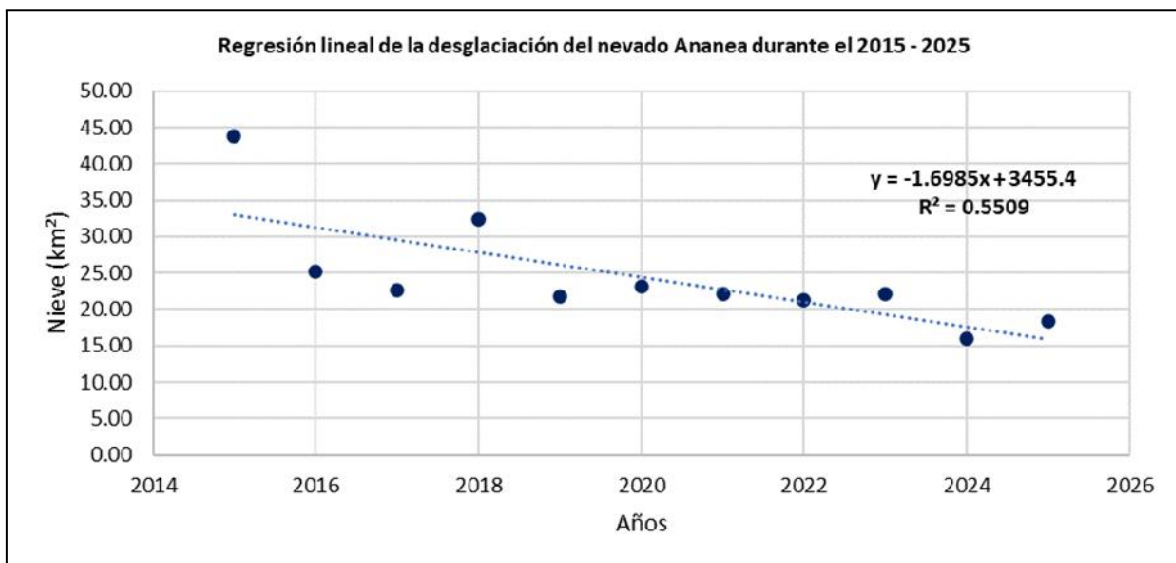


Figura 06: Regresión lineal de la desglaciación del nevado Ananea.

4.2. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA Y EL PROCESO DE DESGLACIACIÓN DEL NEVADO ANANEA DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO.

La gráfica 07 muestra cómo ha variado la temperatura en el nevado Ananea entre 2015 y 2025, tomando en cuenta la temperatura del aire cercano a la superficie y la de esta misma. Respecto a la temperatura superficial, los datos fluctúan entre 6,59 °C y 8,27 °C; el mínimo se observó en 2018 y el máximo, en 2024. También se documentaron temperaturas de 6,80 °C en 2015, 7,11 °C en 2016 y en 2019, 6,99 °C en 2017, 7,22 °C en 2020, 7,08 °C en el año siguiente (2021), y de nuevo se registró una temperatura de esta magnitud (7,02 °C) en el año posterior (2022). En los años siguientes se reportaron las siguientes temperaturas: 7.61 °C para el año 2023 y finalmente la cifra más alta: 7.49 °C para el año 2025. Los valores de la temperatura del aire cerca de la superficie oscilaron entre 1,53 °C y 3,22 °C, siendo el año 2018 cuando se registró la menor temperatura y el año 2024 cuando se dio la mayor. Asimismo, se detectaron temperaturas de 1,88 °C en 2015, de 2,17 °C en 2016 y 2019, de 1,85 °C en 2017, de 2,43 °C en los años 2020 y 2022, de 2,36 °C en el año 2021 y de 2,49 °C en el año 2025. En términos generales, los resultados demuestran una tendencia de aumento en las temperaturas a lo largo del período estudiado. Esta situación podría estar relacionada con el deshielo progresivo del nevado Ananea y los impactos del cambio climático en la cordillera sur del Perú.

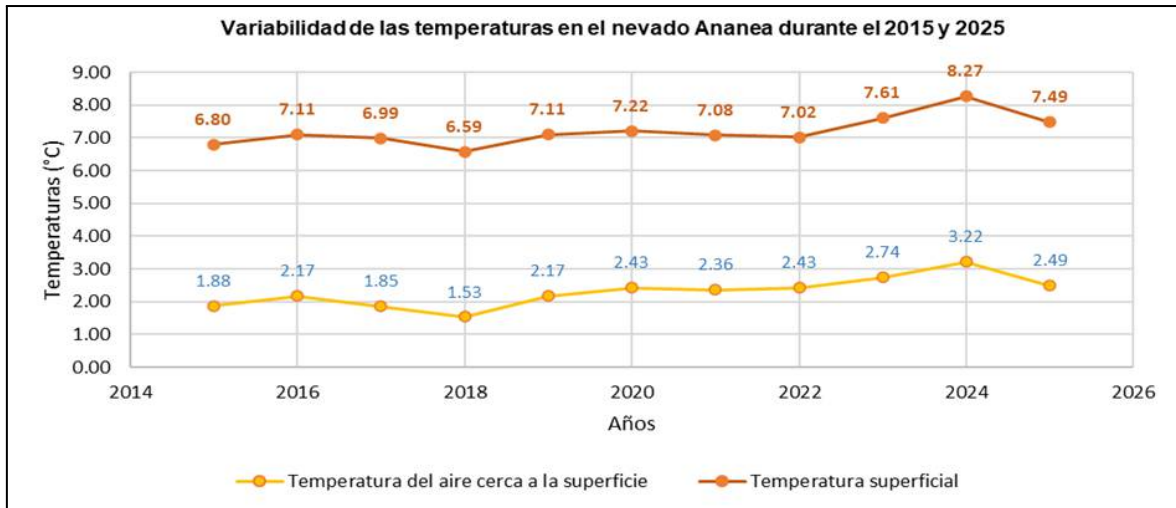


Figura 07: Variabilidad de las temperaturas del nevado Ananea.

La matriz de correlación indica que, durante el período examinado, existe una conexión significativa entre la disminución de la cobertura glaciar del nevado Ananea y el aumento de las temperaturas. La variable de la nieve está correlacionada negativamente con las temperaturas del aire cerca de la superficie ($r = -0,680$) y con la temperatura superficial ($r = -0,667$). Esto significa que el incremento de la temperatura se vincula directamente con una reducción gradual de la masa glaciar. Además, los años tienen correlaciones positivas con la temperatura superficial ($r = 0.719$) y la del aire ($r = 0.781$), lo que muestra una tendencia constante de aumento térmico a lo largo del tiempo. Asimismo, la estrecha relación entre la temperatura superficial y la del aire ($r = 0,937$) indica un vínculo sólido entre estas dos variables meteorológicas. En resumen, los hallazgos muestran que el aumento constante de las temperaturas tiene un papel importante en el derretimiento del hielo glaciar, lo que acelera la desglaciación del nevado Ananea, en la cordillera sur peruana.

Tabla 02: Correlación de las variables.

	Años	Nieve (km ²)	Temperatura del aire cerca a la superficie	Temperatura superficial
Años	1			
Nieve (km ²)	-0.742	1		
Temperatura del aire cerca a la superficie	0.781	-0.680	1	
Temperatura superficial	0.719	-0.667	0.937	1

4.3. DISCUSIÓN

Concuerda con Hidalgo et al. (2024) en el glaciar Carihuairazo, que se encuentra en Tungurahua, Ecuador. Los hallazgos indicaron que en 2021 el glaciar había perdido aproximadamente el 99 % de su extensión territorial desde 1956, lo cual equivale a 0.34 km². Asimismo, el análisis de 67 años de evolución glaciar mostró una disminución continua desde 1978, con la temperatura como el principal factor vinculado a la pérdida de hielo.

De igual manera con Vecchio et al. (2022) en el volcán Maipo, situado en los Andes Centrales, Chile. Los hallazgos revelaron una disminución glaciar de $6 \pm 0,5$ km², lo que representa el 63 % del área inicial calculada en $9,6 \pm 0,5$ km², con un índice promedio de reducción de $-0,14 \pm 0,01$ km² anualmente. Además, se notó que la reducción relativa del glaciar disminuía 0,1 % por año por cada 100 metros de incremento altitudinal ($R^2=0,81$; $p<0,05$), y aproximadamente la mitad de la disminución glaciar ocurrió entre los 3900 y los 4400 msnm. Las zonas con orientación hacia el sur, por otra parte, mantuvieron una mayor cobertura de glaciares; en cambio, las pendientes orientadas hacia el norte llegaron a perder toda su superficie de hielo.

Concuerda con Revueltas et al. (2020) en norte de Colombia para detectar indicios de

variabilidad climática local. Los hallazgos revelaron un aumento medio de 30,9 mm en la evapotranspiración potencial, una subida media de 0,66 °C en la temperatura del aire y un incremento cercano al 16 % en la densidad de vapor atmosférico. Asimismo, se observó que en 11 microcuencas, el número de curva fue superior a 80 en más del 85 % del área evaluada. Esto demuestra que las características físicas del territorio y la cobertura vegetal están vinculadas con los cambios climáticos locales.

4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS

Hipótesis específica 1

H₁: La desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015–2025 es significativa.

Los resultados muestran que la cobertura glaciaria en el nevado Ananea se ha reducido significativamente durante el lapso de estudio. La superficie glaciaria era alrededor de 43,76 km² en 2015, pero para 2025 se redujo a 18,30 km². Esto significa una disminución acumulada cercana a los 25,46 km² de hielo y nieve. Asimismo, el modelo de regresión lineal calculado ($y = -1,6985x + 3455,4$) revela una tendencia a la baja, lo que significa que cada año se reduce en promedio cerca de 1,70 km². El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,5509$) también señala que el 55,09 % de la variabilidad en la cobertura glaciaria se explica por el comportamiento del tiempo durante el periodo evaluado. Con base en estos hallazgos, se acepta la hipótesis específica 1, lo que confirma que la desglaciación del nevado Ananea entre 2015 y 2025 tiene una relevancia estadística.

Hipótesis específica 2

H₁: El incremento de la temperatura influye significativamente en el proceso de desglaciación del nevado Ananea durante el período de estudio.

La asociación entre el incremento de las temperaturas y la disminución de la cobertura glaciaria del nevado Ananea es evidente, según indican los hallazgos del análisis de

correlación. La variable nieve muestra correlaciones negativas con la temperatura de la atmósfera cerca de la superficie ($r = -0.680$) y con la temperatura en la superficie ($r = -0.667$), lo que sugiere que el aumento de temperatura está directamente relacionado con la reducción del hielo glaciar. También se observó una tendencia creciente de la temperatura a lo largo del tiempo, como lo demuestran las correlaciones positivas entre los años y la temperatura superficial ($r = 0,719$) y la temperatura del aire ($r = 0,781$). Asimismo, se reafirma su comportamiento estrechamente vinculado por la elevada correlación entre las dos variables térmicas ($r = 0,937$). Por lo tanto, se admite la hipótesis específica 2, ya que se concluye que el aumento de la temperatura tiene un impacto significativo en el proceso de desglaciación del nevado Ananea entre los años 2015 y 2025.

CONCLUSIONES

PRIMERA: Se establece que entre el incremento de la temperatura y el proceso de retroceso glaciar en el Nevado Ananea durante 2015-2025 hay una relación clara. La temperatura superficial fluctuó entre 8,27 °C y 6,59 °C, mientras que la del aire próximo a la superficie se movió entre 3,22 °C y 1,53 °C; ambas mostraron un patrón de incremento. La reducción gradual de la cobertura glaciar está directamente relacionada con esta conducta térmica, lo que demuestra cómo el calentamiento regional afecta la dinámica de desglaciación.

SEGUNDA: Se registra una disminución constante de la superficie del glaciar. En el periodo estudiado, se observó una disminución significativa en la cobertura de hielo: la extensión del área bajó de 43,76 km² en 2015 a 16,03 km² en 2024 y a 18,30 km² en 2025. La ecuación $y = -1,6985x + 3455,4$, que proviene del análisis de regresión lineal, corrobora esta tendencia; esto señala una reducción anual promedio de cerca de 1,70 km². Además, la tendencia temporal explica el 55,09 % de la variación en la cobertura glaciar, según lo indica el valor de $R^2 = 0,5509$; lo que demuestra un proceso constante de disminución glaciar.

TERCERA: Se establece una conexión importante entre las dos variables estudiadas. La temperatura del aire ($r = -0,680$) y la de la superficie ($r = -0,667$) tienen una correlación inversa con la cobertura nival, lo que sugiere que a medida que aumenta la temperatura, se pierde más hielo glaciar. Asimismo, la correlación positiva fuerte ($r = 0.937$) entre la

temperatura del aire y la de la superficie muestra que hay una relación muy cercana entre estas dos variables climáticas. En general, estos hallazgos corroboran que el incremento de la temperatura es un elemento principal que acelera la desglaciación del Nevado Ananea.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Para el MINAM detectar posibles aceleraciones en la desaparición del glaciar y para actualizar regularmente lo que ocurre con la cobertura glaciar del Nevado Ananea, se aconseja establecer un sistema constante de seguimiento a través de imágenes satelitales y teledetección.

SEGUNDA: Al gobierno Regional de Puno, dado que las masas glaciares se están reduciendo y eso afecta la cantidad de agua disponible, es fundamental reforzar la planificación y la gestión de los recursos hídricos en el sur de Perú. Esto debe hacerse con anticipación a situaciones de escasez para el consumo humano, las actividades agrícolas y la preservación de los ecosistemas.

TERCERA: Se sugiere al Distrito de Ananea trabajar con imágenes satelitales añadiendo variables extras, como la nubosidad, la humedad relativa, la precipitación y la radiación solar, para optimizar el porcentaje restante de variabilidad que no es descrito por el modelo (44.91 %).

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, G., Martinod, J., & Gallardo, M. (2023, 01 16). Chronology of the Bayo River valley deglaciation and implications for the Late Pleistocene Atlantic-to-Pacific drainage reversal of the General Carrera-Buenos Aires palaeolake, Patagonia-Chile. *Andean geology*, 50. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeov50n1-6460>
- Armesto, A. (2021, 04 14). Preocupación por el cambio climático, condiciones económicas individuales y priorización del medioambiente en América Latina. *Opinião Pública*. <https://doi.org/10.1590/1807-019120212711>
- Caballero, C., & López, V. (2023, 12 14). Análisis de la variación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) y del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) en el área metropolitana de Asunción. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 28. <https://doi.org/10.32480/rscp.2023.28.2.352>
- Campos, N. (2020, 09 12). Revisión de procedimientos metodológicos para la reconstrucción glacial y el cálculo de la altitud de la línea de equilibrio. *Revista de geografía Norte Grande*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022020000200321>
- Cellone, F., Borzi, G., & Silvina, E. (2023, 06 08). Balances hídricos y teledetección aplicados al estudio de inundaciones en la planicie costera del Río de la Plata, Buenos Aires, Argentina. *Revista de geografía Norte Grande*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022023000100145>
- Colque, A., Valdivia, R., & Navarrete, M. (2021, 03 16). Un sistema de información geográfico para el transporte público basado en el estandar GTFS realtime. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 29. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052021000100051>

- Díaz, R., Machaca, A., & Belizario, G. (2023, 04 13). Efectos del Cambio Climático Sobre los Ecosistemas de Montaña en la Cordillera Carabaya - Perú. *Revista Brasileira de Meteorologia*. <https://doi.org/10.1590/0102-778638230088>
- Drenkhan, F., & Castro, S. (2023, 08 31). Una aproximación hacia la seguridad hídrica en los Andes tropicales: desafíos y perspectivas. *Revista Kawsaypacha*, 12. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202302.A006>
- Ebensperger, L., Oyarzún, J. C., & Torres, R. (2020, 04 13). Determinación de la temperatura datum para la aplicación de la madurez en climas fríos. *Revista ingeniería de construcción*, 35. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000100084>
- Fuentes, J., & Santana, L. (2025, 05 22). Evolución de los glaciares tropicales de Colombia (2010-2023) utilizando herramientas geoespaciales. *Revista de geografía Norte Grande*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022025000200101>
- Gilio, B. L., Franco, N. V., & Vetrizano, L. (2022, 06 12). Modelos de movilidad humana en Patagonia centro- meridional a través del análisis de artefactos líticos y sistemas de información geográfica. *Intersecciones en antropología*, 23. <https://doi.org/https://doi.org/10.37176/iea.23.2.2022.768>
- Hidalgo, D., Domínguez, C., & Villacís, M. (2024, 08 12). Retroceso del glaciar del carihuaírazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 39. <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.06>
- Kotova, V., Díaz, G., & Mohr, D. (2024, 08 18). Remote sensing of forest fine-scale gap dynamics: A case study on lenga beech forests in Argentina. *Bosque (Valdivia)*, 45. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-92002024000200359>
- Martínez, R. (2020, 12 11). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.65-2.1>

- Medina, G., Echavarría, F., & Ruiz, J. (2020, 06 30). Efecto del calentamiento global sobre la producción de alfalfa en México. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4686>
- Monge, F., Huggel, C., & Vicuna, L. (2022, 02 25). Percepción del deshielo glaciar y el cambio climático en pobladores andinos de Perú: abordaje interdisciplinario. *Ambiente & Sociedade*. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200227r2vu2022L3AO>
- Moraga, P. (2022, 06 15). Una nueva era del derecho ambiental: La Ley Marco de Cambio Climático en Chile a 50 años de Estocolmo. *Revista de derecho ambiental* (Santiago). <http://dx.doi.org/10.5354/0719-4633.2022.67640>
- Moragues, S., Lenzano, M. G., & Rivera, A. (2021, 09 19). Caracterización y reconstrucción del deslizamiento Agassiz mediante el uso de datos geoespaciales. *Patagonia Austral, Argentina. Andean geology*, 48. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeov48n3-3350>
- Nájera, A., Carrillo, F., & Nájera, O. (2021, 05 14). Caracterización climática y variabilidad de temperatura superficial de la llanura costera de Nayarit y su teleconexión con ENSO y PDO. *Acta universitaria*, 30. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2651>
- Pilato, G., Ortone, A., Barrios, A., Saavedra, S., & Macote, E. (2022, 02 38). Tecnología espacial aplicada a glaciares patagónicos y su comportamiento como indicadores ambientales. *Revista cartográfica*. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i104.1049>
- Revueltas, J., Zabaleta, A., & Mercado, T. (2020, 12 10). Cambios en el clima local y su efecto en la regulación hídrica en microcuencas del departamento del Magdalena, Norte de Colombia. *Información tecnológica*, 31. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000600193>

- Rey, S. (2021, 09 14). De cobre, agua y glaciares en la metrópolis global. El nuevo papel de la mega minería en la gobernanza ambiental de Santiago de Chile. Revista de geografía Norte Grande. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022021000200139>
- Rojas, N., & Iannacone, J. (2023, 06 23). Evaluación del impacto de la acidificación en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 47. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1950>
- Ruiz, Ó., Prieto, M., & González, K. (2022, 09 14). Conocimiento ecológico tradicional en el Altiplano chileno: Entre la variabilidad climática y la percepción local. Revista de geografía Norte Grande. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022022000300107>
- Sandoval, R., González, R., & Jiménez, J. (2021, 10 04). Análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. Revista mexicana de ciencias forestales, 12. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.816>
- Tacsi, A., Condom, T., & Cochachin, A. (2022, 09 11). Seguimiento del comportamiento de tamaño morfométrico de glaciares y la relación de clima regional en la latitud 8°-16° S, Perú. Aqua-LAC, 14. <https://aqualac.org/index.php/Aqua-LAC/article/view/311>
- Tacsi, A., Condom, T., & Mejia, A. (2025, 10 10). Monitoreo de glaciares por tamaño y su impacto en la disponibilidad hídrica en Los Andes del Perú. Pirineos, 180. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2025.180.364>
- Toledo, M., Ibañez, G., & Ahumada, A. (2025, 05 16). Mapeo espacial-temporal de la cobertura nival en la Sierra del Aconquija, provincias de Tucumán y Catamarca, Argentina, de 2014 a 2021. Revista cartográfica. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i108.4099>
- Torres, C., Bendezú, Y., & Álvarez, D. (2022, 11 09). Caracterización estacional de los elementos traza y partículas absorbentes de luz (pal) en la nieve del glaciar

- Huaytapallana (Perú). Revista internacional de contaminación ambiental, 38.
<https://doi.org/10.20937/rica.54091>
- Vecchio, A., Candela, M., & Falaschi, D. (2022, 01 14). Cambio de área glaciar en el volcán Maipo (Andes Centrales), una aproximación morfométrica: 4 décadas de registros satelitales. Andean geology, 49.
<http://dx.doi.org/10.5027/andgeov49n1-3369>
- Vela, A., Navarro, M., & Mendoza, M. (2024, 05 13). Análisis multitemporal de cambios en el NDVI en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México. Revista mexicana de ciencias forestales, 15.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425>
- Veneros, J., García, L., & Morales, E. (2020, 12 14). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. Idesia (Arica), 38.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>
- Ventura, J. (2020, 09 15). Spatial and temporal distribution of glaciers, debris-covered glaciers and rock glaciers during the last deglaciation in the Valley of the Bonaigua (Central Pyrenees). Cuadernos de Investigación Geográfica / Geographical Research Letters, 46. <https://doi.org/10.18172/cig.4395>

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia.

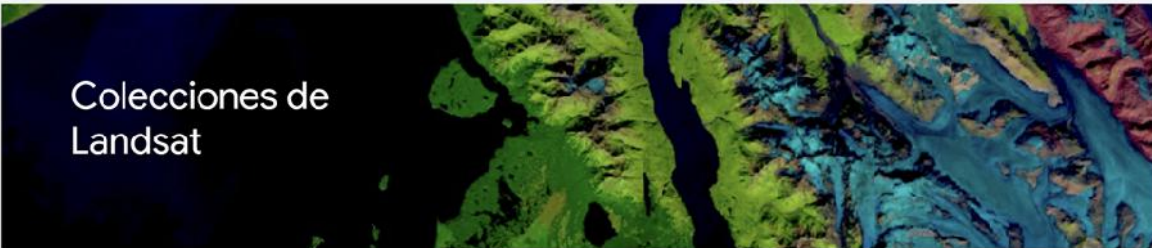
ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DESGLACIACIÓN DEL NEVADO ANANEA Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA EN LA CORDILLERA SUR DEL PERÚ, 2015 - 2025.

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
¿Cuál es la desglaciación del nevado Ananea y su relación con la variabilidad de la temperatura en la cordillera sur del Perú, 2015 - 2025?	Analizar la desglaciación del nevado Ananea y su relación con la variabilidad de la temperatura en la cordillera sur del Perú, 2015 - 2025.	La desglaciación del nevado Ananea y su relación con la variabilidad de la temperatura en la cordillera sur del Perú, 2015 - 2025, es significativo	Variable Independiente: Variabilidad de la temperatura	- Temperatura superficial terrestre (LST)- Variación térmica anual- Tendencia térmica multitemporal	- Temperatura media anual (°C)- Temperatura máxima y mínima (°C)- Tasa de incremento térmico anual	Enfoque de investigación: Cuantitativo Tipo de investigación: Aplicada Nivel de investigación: Correlacional – explicativo.
			Variable Dependiente: Desglaciación del nevado Ananea	- Cobertura glaciar- Retroceso glaciar- Pérdida superficial del glaciar.	- Área glaciar (km²)- Tasa de reducción glaciar (%) - Variación espacial del glaciar	Diseño de investigación: No experimental, longitudinal y multitemporal
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas				
1. ¿Cuanto es la desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025?	1. Evaluar la desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025.	1. La desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025, es significativa				

2. ¿De qué manera la variabilidad de la temperatura influye en el proceso de desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025?	2. Determinar la relación entre la variabilidad de la temperatura y el proceso de desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025.	2. El incremento de la temperatura influye significativamente en el proceso de desglaciación del nevado Ananea durante el período 2015 - 2025			Técnicas de recolección de datos: Teledetección satelital, análisis SIG y procesamiento digital de imágenes Instrumentos: Imágenes satelitales Landsat 8 Procesamiento y análisis: Clasificación supervisada, cálculo de índices glaciares (NDSI). Software: QGIS
---	--	--	--	--	--

Anexo 02: Descarga de imágenes satelitales.

translated by Google Google uses AI technology to translate content into your preferred language. AI translations can contain errors. [Switch to English](#)



Colecciones de Landsat

El [Programa Landsat del USGS/NASA](#) observa la Tierra de forma continua desde 1972. Los datos espectrales y térmicos que proporcionan los sensores de Landsat son un componente esencial de muchos proyectos de investigación y supervisión de la Tierra.



Colección 2

La [Colección 2 de Landsat](#), el segundo esfuerzo de reprocesamiento importante del archivo de Landsat, generó varias mejoras en los productos de datos que aplicaron avances en el procesamiento de datos y el desarrollo de algoritmos.

Además de las imágenes sin procesar, Earth Engine contiene varias colecciones de [imágenes compuestas de Landsat](#): SR, BAI, EVI, NBR, NDVI y NDWI con cadencias anuales, de 8 días y de 32 días.



Landsat 9 OLI-2/TIRS-2



OLI/TIRS de Landsat 8

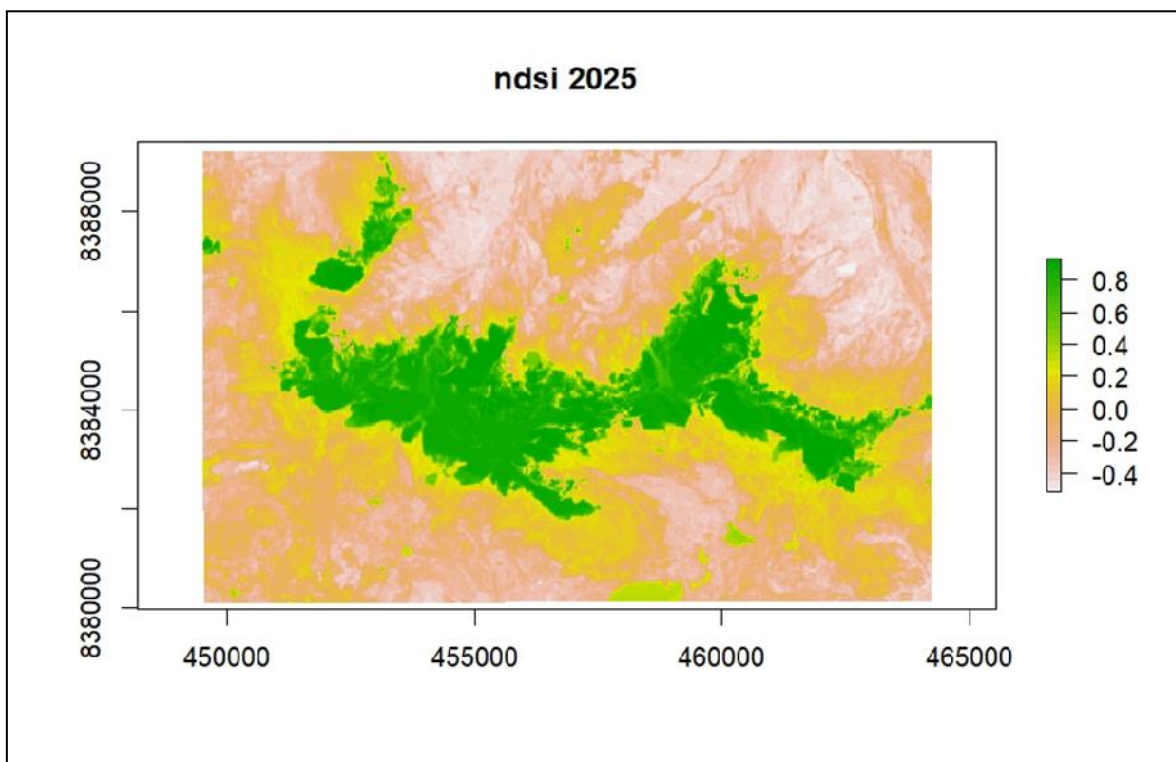
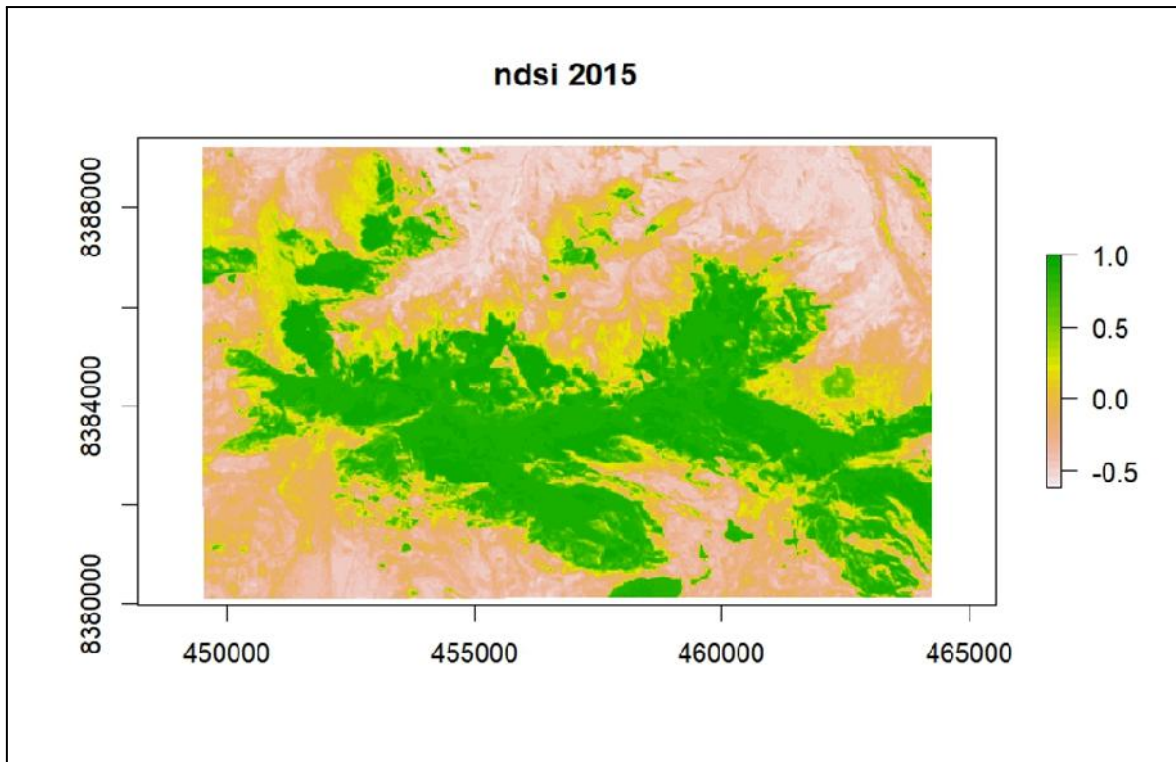


ETM+ de Landsat 7

Anexo 03: Datos de análisis de la desglaciación.

N°	Años	Nieve (km²)	Variabilidad del nevado Ananea	Temperatura del aire cerca a la superficie	Temperatura superficial
1	2015	43.76	0.00	1.88	6.80
2	2016	25.19	-18.57	2.17	7.11
3	2017	22.64	-2.55	1.85	6.99
4	2018	32.29	9.65	1.53	6.59
5	2019	21.72	-10.56	2.17	7.11
6	2020	23.21	1.49	2.43	7.22
7	2021	22.20	-1.00	2.36	7.08
8	2022	21.28	-0.92	2.43	7.02
9	2023	22.18	0.90	2.74	7.61
10	2024	16.03	-6.15	3.22	8.27
11	2025	18.30	2.27	2.49	7.49

Anexo 04: Cálculo del NDSI.



Anexo 05: Datos climáticos.

