

# UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**TESIS**

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR EN LA  
CORDILLERA APOLOBAMBA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES  
CLIMÁTICAS DURANTE EL PERÍODO 2016-2024**

**PRESENTADA POR:**

**KATY CHAPARRO ESCOBAR**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PUNO – PERÚ**

**2025**



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



# 11.02%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 21 DEC 2025, 8:24 PM

## Originality & Authorship Report

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

● IDENTICAL  
1.7%

● CHANGED TEXT  
9.31%

## Report #30776615

KATY CHAPARRO ESCOBAR // ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR EN LA CORDILLERA APOLOBAMBA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS DURANTE EL PERÍODO 2016-2024 RESUMEN El estudio analiza el retroceso glaciar en la Cordillera Apolobamba entre 2016 y 2024 y su relación con la variación anual de la temperatura y la precipitación. Para ello se emplearon imágenes Landsat procesadas mediante el índice NDSI, además de registros climáticos provenientes de estaciones cercanas al área de estudio. Los materiales utilizados incluyeron escenas satelitales libres de nubosidad, herramientas SIG para la delimitación del hielo y bases de datos con series históricas de temperatura máxima, mínima y precipitación. La metodología combinó el procesamiento digital de imágenes, la elaboración de mapas multitemporales y el análisis estadístico de las variables climáticas. Los resultados muestran una una disminución progresiva de la superficie glaciar, que pasó de 149.39 km<sup>2</sup> en 2016 a 119.00 km<sup>2</sup> en 2024, lo que representa una pérdida acumulada de 30.39 km<sup>2</sup>, equivalente a aproximadamente 20 % de la cobertura glaciar durante el período evaluado, acompañada por un incremento gradual de la temperatura. En contraste, la precipitación presentó un comportamiento irregular sin una tendencia definida. La discusión señala que la temperatura actúa como el factor más relacionado con la pérdida glaciar, dado que las correlaciones obtenidas evidencian una relación negativa consistente entre ambas variables. Por otro

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

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR EN LA  
CORDILLERA APOLOBAMBA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES  
CLIMÁTICAS DURANTE EL PERÍODO 2016-2024.**

**PRESENTADA POR:**

**KATY CHAPARRO ESCOBAR**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

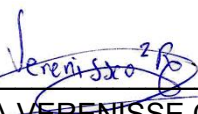
PRESIDENTE

:   
Mg. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

PRIMER MIEMBRO

:   
M.Sc. KORINA ASQUI GOMEZ

SEGUNDO MIEMBRO

:   
Dra. CELIA VERENISSE ORTIZ DE ORUE ROJAS

ASESOR DE TESIS

:   
Dra. MARLENE CUSI MONTESINOS

Área: Ingeniería, Tecnología

Sb área: Ingeniería ambiental

Línea de investigación: Sensores Remotos

Puno, 23 de diciembre del 2025.

## DEDICATORIA

A mi madre, que forjó en silencio mi temple y, con gestos mínimos, fue hilvanando cada jornada hasta volverla camino; a meu amparo diario, cuya presencia templó los días más ásperos y encendió la alegría en cada avance; y al Ing. Heffner Ortiz Valenzuela, que supo incitar la curiosidad justa, encauzar la disciplina y convertir las dudas en oficio. Todo lo que aquí permanece nace de esas manos, de esas miradas y de ese diálogo que me sostuvo, me exigió y me elevó.

## AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Privada San Carlos, por el entorno académico que hizo del rigor un hábito y del servicio a la región una orientación concreta.
- A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, por las gestiones oportunas y la tutoría colectiva que permitió decantar esta investigación.
- Al jurado calificador Mg. Julio Wilfredo Cano Ojeda, M.Sc. Korina Asqui Gomez y Dra. Celia Verenisse Ortiz de Orue Rojas, por la lectura minuciosa y las observaciones que reordenaron argumentos y afinaron alcances.
- A mi asesora, Dra. Marlene Cusi Montesinos, por conducir con criterio y exactitud metodológica cada tramo, volviendo productiva la duda y verificable cada resultado.

## ÍNDICE GENERAL

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

### CAPÍTULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>13</b>
1.1.1. PROBLEMA GENERAL	14
1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	14
<b>1.2. ANTECEDENTES</b>	<b>14</b>
1.2.1. A NIVEL INTERNACIONAL	14
1.2.2. A NIVEL NACIONAL	16
1.2.3. A NIVEL LOCAL O REGIONAL	18
<b>1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>21</b>
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	21
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

<b>2.1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>22</b>
2.1.1. GLACIAR Y COBERTURA GLACIAR	22
2.1.2. ANÁLISIS MULTITEMPORAL	22
2.1.3. CAMBIO CLIMÁTICO Y SU RELACIÓN CON LOS GLACIARES	22
2.1.4. RETROCESO GLACIAR	23
2.1.5. TELEDETECCIÓN SATELITAL	23
2.1.6. CORDILLERA APOLOBAMBA	23
2.1.7. ÍNDICE DIFERENCIAL NORMALIZADO DE NIEVE (NDSI)	24
2.1.8. COBERTURA GLACIAR	24
2.1.9. COBERTURA NIVAL	24
<b>2.2. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>25</b>
2.2.1. CALENTAMIENTO GLOBAL	25
2.2.2. CAMBIO CLIMÁTICO	25
2.2.3. PRECIPITACIÓN	25
2.2.4. QGIS	25
2.2.5. RSTUDIO	26
2.2.6. TEMPERATURA	26
<b>2.3. MARCO NORMATIVO</b>	<b>26</b>
<b>2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>27</b>
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	27
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	27

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

<b>3.1. ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>28</b>
<b>3.2. TAMAÑO DE MUESTRA</b>	<b>29</b>
3.2.1. POBLACIÓN	29

3.2.2. MUESTRA	29
3.2.3. MUESTREO	29
<b>3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS</b>	<b>30</b>
<b>3.4. METODOLOGÍA POR OBJETIVOS</b>	<b>31</b>
<b>3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES</b>	<b>33</b>
<b>3.6. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
<b>4.1. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA ESTIMACIÓN DEL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DE LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA CON RESPECTO A LOS PERIODOS 2016-2024</b>	<b>36</b>
<b>4.2 EXPOSICIÓN Y ANALISIS DE DETERMINACION DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DE LA CORDILLERA APOLOBAMBA 2016-2024</b>	<b>46</b>
<b>4.3. EXPOSICION Y ANALISIS DE DETERMINACION DE LA INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL RETROCESO DE LA COBERTURA DE LA CORDILLERA APOLOBAMBA ENTRE 2016-2024</b>	<b>50</b>
<b>4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS</b>	<b>55</b>
4.4.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 1	55
4.4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 2	56
4.4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 3	56
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>59</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>61</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>70</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 01:</b> Operacionalidad de variables	33
<b>Tabla 02:</b> Grado de correlación	34
<b>Tabla 03:</b> Cambios temporales del glaciar de la Cordillera Apolobamba	36
<b>Tabla 04:</b> Estadística descriptiva del área del glaciar de la Cordillera Apolobamba.	39
<b>Tabla 05:</b> Pruebas de normalidad para la variable de cobertura glaciar	45
<b>Tabla 06:</b> Distribución descriptiva de las temperaturas (°C) en la Cordillera Apolobamba, 2016–2024.	47
<b>Tabla 07:</b> Prueba de normalidad para la variable temperatura	49
<b>Tabla 08:</b> Estadística descriptiva de precipitaciones, periodo 2016 - 2024.	51
<b>Tabla 09:</b> Pruebas de normalidad para la variable precipitación del 2016-2024.	54
<b>Tabla 10:</b> Matriz de correlación de Pearson de las variables.	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 01:</b> Ubicación: del área de estudio de la cordillera Apolobamba	28
<b>Figura 02:</b> Cambio de la cobertura glaciár de la Cordillera Apolobamba 2016-2024.	38
<b>Figura 03:</b> Cambio temporal de la cobertura glaciár durante el 2016 - 2024	42
<b>Figura 04:</b> Mapa de cambio multitemporal de la cobertura glaciár durante 2016-2024.	43
<b>Figura 05:</b> Regresión lineal del área de la cobertura glaciár, con respecto al tiempo.	44
<b>Figura 06:</b> Gráfico de normalidad para la variable de cobertura glaciár	45
<b>Figura 07:</b> Grafico de las temperaturas máximas y mínimas en el periodo 2016-2024.	46
<b>Figura 08:</b> Matriz de correlaciones entre cobertura glaciár y temperaturas (2016–2024), Cordillera Apolobamba.	48
<b>Figura 09:</b> Gráfico de normalidad Tmax y Tmin	49
<b>Figura 10:</b> Boxplot de precipitaciones mensuales durante el 2016-2024	52
<b>Figura 11:</b> Correlación lineal de cobertura glaciár sobre precipitaciones durante 2016-2024	53
<b>Figura 12:</b> Gráfico de normalidad para la precipitación.	54
<b>Figura 13:</b> Correlación de la variable independiente con respecto a la variable dependiente	58

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo 01:</b> Matriz de consistencia	71
<b>Anexo 02:</b> Descarga de Imágenes Satelitales en USGS Earth Explorer	73
<b>Anexo 03:</b> Superficie de hielo y nieve en la Cordillera Apolobamba según el índice NDSI	73
<b>Anexo 04:</b> Muestra el proceso de combinación y unificación de polígonos glaciares dentro del software QGIS.	74
<b>Anexo 05:</b> Resultado de NDSI de la cordillera Apolobamba	75
<b>Anexo 06:</b> La tabla de datos climáticos descargados desde la plataforma NASA POWER	75
<b>Anexo 07:</b> Prueba de normalidad en R	76

## RESUMEN

El estudio analiza el retroceso glaciar en la Cordillera Apolobamba entre 2016 y 2024 y su relación con la variación anual de la temperatura y la precipitación. Para ello se emplearon imágenes Landsat procesadas mediante el índice NDSI, además de registros climáticos provenientes de estaciones cercanas al área de estudio. Los materiales utilizados incluyeron escenas satelitales libres de nubosidad, herramientas SIG para la delimitación del hielo y bases de datos con series históricas de temperatura máxima, mínima y precipitación. La metodología combinó el procesamiento digital de imágenes, la elaboración de mapas multitemporales y el análisis estadístico de las variables climáticas. Los resultados muestran una una disminución progresiva de la superficie glaciar, que pasó de 149.39 km<sup>2</sup> en 2016 a 119.00 km<sup>2</sup> en 2024, lo que representa una pérdida acumulada de 30.39 km<sup>2</sup>, equivalente a aproximadamente 20 % de la cobertura glaciar durante el período evaluado, acompañada por un incremento gradual de la temperatura. En contraste, la precipitación presentó un comportamiento irregular sin una tendencia definida. La discusión señala que la temperatura actúa como el factor más relacionado con la pérdida glaciar, dado que las correlaciones obtenidas evidencian una relación negativa consistente entre ambas variables. Por otro lado, la precipitación no mostró asociación significativa con la reducción de hielo, lo que sugiere una menor influencia en la dinámica glaciar reciente. En conclusión, la Cordillera Apolobamba registra un retroceso sostenido de su cobertura glaciar, estrechamente vinculado al aumento de la temperatura, mientras que la precipitación no presenta un papel determinante en el periodo analizado. Estos resultados aportan información relevante para el monitoreo ambiental y la gestión del recurso hídrico en zonas altoandinas.

**Palabras clave:** Glaciares tropicales, NDSI, Precipitación, Retroceso glaciar, Temperatura

## ABSTRACT

This study analyzes glacier retreat in the Apolobamba Mountain Range between 2016 and 2024 and its relationship with annual variations in temperature and precipitation. Landsat satellite imagery processed using the Normalized Difference Snow Index (NDSI) was employed, along with climatic records obtained from meteorological stations near the study area. The materials used included cloud-free satellite scenes, GIS tools for glacier delineation, and databases containing historical series of maximum and minimum temperature and precipitation. The methodology combined digital image processing, multitemporal mapping, and statistical analysis of climatic variables. The results show a progressive reduction in glacier area, decreasing from 149.39 km<sup>2</sup> in 2016 to 119.00 km<sup>2</sup> in 2024, which represents a cumulative loss of 30.39 km<sup>2</sup>, equivalent to approximately 20% of the glacier coverage during the evaluated period, accompanied by a gradual increase in temperature. In contrast, precipitation exhibited irregular behavior without a defined trend. The discussion indicates that temperature is the factor most closely associated with glacier loss, as the correlations obtained reveal a consistent negative relationship between both variables. Conversely, precipitation did not show a significant association with glacier reduction, suggesting a limited influence on recent glacier dynamics. In conclusion, the Apolobamba Mountain Range is experiencing sustained glacier retreat, closely linked to rising temperatures, while precipitation does not play a determining role during the analyzed period. These findings provide relevant information for environmental monitoring and water resource management in high-Andean regions.

**Keywords:** Tropical glaciers, NDSI, Precipitation, Glacial retreat, Temperature

## INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como finalidad analizar la variación reciente de la cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba entre 2016 y 2024 y examinar su relación con los cambios anuales de temperatura y precipitación. La investigación se desarrolla dentro de la línea institucional de Sensores Remotos, en el campo de la Ingeniería Ambiental, dado que el monitoreo de glaciares constituye un componente clave para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas altoandinos frente a los efectos del clima. La importancia del trabajo radica en que los glaciares representan una fuente esencial de agua y su retroceso progresivo puede afectar la disponibilidad hídrica y la estabilidad de los sistemas naturales que dependen de estos recursos.

La justificación surge de la escasa información multitemporal disponible sobre el comportamiento glaciar en Apolobamba, una cordillera donde las condiciones geográficas dificultan el seguimiento continuo. Para responder a esta necesidad, se emplearon imágenes satelitales Landsat procesadas mediante el índice NDSI, lo que permitió delimitar la superficie glaciar de forma precisa durante cada año del periodo evaluado. A la vez, se organizaron registros climáticos anuales de temperatura y precipitación provenientes de fuentes oficiales, los cuales fueron analizados mediante técnicas estadísticas con el fin de identificar tendencias y posibles relaciones con la dinámica del hielo.

El conocimiento generado por esta investigación contribuye a comprender el comportamiento reciente de los glaciares de Apolobamba, fortalecer el monitoreo ambiental en zonas sensibles y aportar información útil para la gestión del recurso hídrico ante escenarios de variabilidad y cambio climático.

La investigación se organiza en cuatro capítulos. En el **Capítulo I** se desarrolla el planteamiento del problema, los antecedentes a nivel internacional, nacional y local, así como los objetivos que orientan el estudio. El **Capítulo II** presenta el marco teórico,

conceptual y normativo que sustenta la investigación, además de la formulación de las hipótesis relacionadas con el retroceso glaciar y las variables climáticas. En el **Capítulo III** se describe la metodología empleada, incluyendo la zona de estudio, el tipo y diseño de investigación, el muestreo, las técnicas de teledetección aplicadas mediante el índice NDSI y el análisis estadístico de los datos climáticos. Finalmente, el **Capítulo IV** expone y analiza los resultados obtenidos, mostrando la evolución temporal de la cobertura glaciar y su relación con la temperatura y la precipitación durante el período 2016–2024, concluyendo con las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde 2020 la evidencia satelital y los balances globales muestran una pérdida acelerada de hielo en glaciares de montaña (Hugonnet et al., 2021). Para 2000–2019, la pérdida media global fue  $267 \pm 16$  Gt/año, con contribución directa al aumento del nivel del mar; la señal es generalizada aunque modulada por el clima regional. (Hugonnet et al., 2021b) A futuro, las proyecciones con (*Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6*) CMIP6 indican que incluso con  $1,5$  °C de calentamiento los glaciares continuarán disminuyendo, y con escenarios más cálidos las pérdidas crecen sustancialmente; por ello se requieren series multitemporales comparables que relacionen retroceso con temperatura y precipitación Zekollari et al. (2024).

El Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas 2023 reporta 2084 glaciares y 8466 lagunas en el país, confirmando una contracción sostenida de la criosfera y la expansión de cuerpos de agua proglaciares con implicancias para el abastecimiento, la energía y el riesgo de aluviones INAIGEM (2023). De forma complementaria, el análisis nacional de CEPLAN (2023) documenta los impactos y peligros asociados al retroceso (desembalses, avalanchas de hielo) y enfatiza la necesidad de monitoreo periódico y gestión del riesgo basada en evidencia (Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, 2023).

A nivel regional, los Andes del sur del Perú, particularmente el departamento de Puno, vienen experimentando un acelerado retroceso de la cobertura glaciar como consecuencia del incremento sostenido de la temperatura asociado al cambio climático. Las cordilleras glaciares de esta región, entre ellas la Cordillera Apolobamba, constituyen una fuente estratégica de regulación hídrica para ríos, bofedales y humedales altoandinos que sostienen actividades productivas como la ganadería extensiva y el abastecimiento de agua para comunidades rurales Laqui et al. (2024). En paralelo, el estudio de peligros de CENEPRED en la subcuenca Huari Huari evidencia formación crecimiento de lagunas, presencia de glaciares colgantes y exposición de centros poblados, lo que refuerza la urgencia de cuantificar el retroceso y vincularlo a variables climáticas para apoyar decisiones de adaptación hídrica y gestión del riesgo en la zona Apolobamba Vilca & Bustinza (2018)

### **1.1.1. PROBLEMA GENERAL**

¿Cuál es el análisis multitemporal del retroceso Glaciar en la Cordillera Apolobamba y su relación con las variables climáticas en el período 2016-2024?

### **1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

- ¿Cuanto es la variación de la cobertura glaciar generado en los últimos 8 años en la cordillera Apolobamba en el período 2016-2024?
- ¿Qué relación existe entre el retroceso glaciar y la temperatura en la cordillera Apolobamba durante en el período 2016-2024?
- ¿Qué relación existe entre el retroceso glaciar y la precipitación en la cordillera Apolobamba durante en el período 2016-2024?

## **1.2. ANTECEDENTES**

### **1.2.1. A NIVEL INTERNACIONAL**

- Zalazar et al.(2020) examinan cómo cambiaron, dónde están y cómo se relacionan en el tiempo los humedales de altura (vegas) y los glaciares en los Andes centrales

de Argentina (1986–2020), y cómo influyen la temperatura y la lluvia. Para medirlos se usaron imágenes Sentinel-2 (2020) y Landsat 5/7/8 (1986–2020); el clima provino de Terra Climate. Se aplicaron los índices NDVI (para vegas) y NDSI (para nieve/hielo), y el procesamiento se hizo en Google Earth Engine, con análisis en R y QGIS. En 2020 se cartografiaron 475 km<sup>2</sup> de vegas y 1 260 km<sup>2</sup> de glaciares (550 km<sup>2</sup> de hielo limpio y 710 km<sup>2</sup> con detritos). Desde 1986 el área glaciar cayó cerca de 36%, mientras que desde 2010 se observan temperaturas más altas y menos precipitaciones. Entre 34°S y 35°S las vegas se ubican cerca de los glaciares, lo que favorece su productividad. El trabajo muestra la conexión entre vegas y glaciares y cómo el clima afecta a ambos, aportando información útil para gestionar el agua y planificar en un contexto de cambio climático.

- González et al. (2018) procesaron imágenes satelitales para medir la nieve en la cuenca del río Los Patos (San Juan, Argentina) en dos años muy distintos: 1986 (nival) y 2014 (seco). Con Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI se calculó el NDSI, convirtiendo DN a reflectancia, aplicando correcciones topográficas y luego reclasificando para estimar área nevada. Esa extensión se comparó con los caudales del río San Juan, que recibe el aporte del Los Patos. Los resultados indican 8 721 km<sup>2</sup> de nieve en 1986 y 1 745 km<sup>2</sup> en 2014; la diferencia es de  $\approx -80\%$ , acompañada por una caída cercana al 90% en los caudales entre esos años. Se identificaron errores por sombras y relieve, por lo que las correcciones son clave para mejorar la clasificación. En conjunto, el trabajo muestra que el análisis multitemporal con NDSI es adecuado para relacionar nieve y disponibilidad hídrica, y además sirve como recurso didáctico para que docentes expliquen cómo varían nieve, precipitación y caudales dentro del ciclo del agua.
- Moraes et al. (2020) analizaron la disminución de la cobertura glaciar en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán y su vínculo con el clima reciente usando un análisis

multitemporal de imágenes Landsat TM/OLI de 1999, 2009 y 2019. La metodología nieve/hielo se realizó con NDSI y se apoyó en NDVI para descartar vegetación; los resultados se contrastaron con promedios mensuales de precipitación y temperatura cercanos a cada fecha. Se observó un retroceso marcado: 1999–2009,  $-1.1 \text{ km}^2$  ( $-28.2\%$ ); 2009–2019,  $-2.2 \text{ km}^2$  ( $-78.6\%$ ); total 1999–2019,  $-3.3 \text{ km}^2$  ( $-84.6\%$ ). Con NDSI se precisó  $-1.3 \text{ km}^2$  ( $-25\%$ ) en el primer periodo y  $-2.4 \text{ km}^2$  ( $-61.5\%$ ) en el segundo. Paralelamente, las series meteorológicas muestran menos precipitación y mayores temperaturas. En conjunto, la evidencia indica pérdida acelerada de hielo asociada al cambio climático, y recomienda complementar la teledetección con mediciones in situ para validar umbrales y reducir incertidumbres.

- Lara et al. (2020) en un estudio realizado sobre los efectos del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico de Chillán, Argentina, se analizaron imágenes satelitales de los años 1999, 2009 y 2019 mediante los índices NDVI y NDSI. Los resultados evidenciaron una pérdida glacial significativa entre 2009 y 2019, con una reducción de  $2.2 \text{ km}^2$ , lo que representa una disminución del  $78.6 \%$ . Sin embargo, al comparar los periodos de 1999 a 2019, se observó una pérdida de  $3.3 \text{ km}^2$ . En cuanto al índice NDSI, se registró una pérdida del  $71.2 \%$  entre 1999 y 2019, y una pérdida del  $61.5 \%$  entre 2009 y 2019, lo que indica un retroceso acelerado de la cobertura nival en las dos últimas décadas.

### 1.2.2. A NIVEL NACIONAL

- Soto et al. (2022) en un artículo dedicado al análisis multitemporal del retroceso glacial en el Santuario Nacional del Nevado Ampay, Perú, se evaluó la pérdida de superficie glacial entre los años 1991 y 2017. Los resultados indicaron una disminución del  $48,92 \%$  de la cobertura glacial durante ese periodo, equivalente a una pérdida de aproximadamente  $1,04 \text{ km}^2$ . La evolución temporal mostró que la superficie mínima se registró en 1993 con  $1,402 \text{ km}^2$ , mientras que la mayor pérdida

acumulada de cobertura glaciar se produjo en 2001, alcanzando una reducción de hasta 2,595 km<sup>2</sup>.

- Montoya et al. (2024) en la estimación del cambio en el contorno y volumen de los glaciares Suyuparina y Quisoquipina, ubicados en la Cordillera Vilcanota. Los resultados muestran que el glaciar Quisoquipina perdió 34,8 m<sup>2</sup> por día (12.694,35 m<sup>2</sup> por año), lo que representa una reducción del 12,18 % en 23 años. El glaciar Suyuparina presentó una pérdida diaria de 45,48 m<sup>2</sup>, alcanzando un 22,45 % de disminución en el mismo periodo. Entre 2006 y 2012, el volumen del glaciar Quisoquipina disminuyó de 11,73 km<sup>3</sup> a 11,04 km<sup>3</sup>, mientras que Suyuparina pasó de 6,26 km<sup>3</sup> a 5,93 km<sup>3</sup>. Estos cambios reflejan el impacto del clima sobre la cobertura de nieve en ambos glaciares. Mediante un análisis de regresión lineal, se identificó una correlación moderada entre la precipitación media anual y la tasa de variación del área de nieve en el glaciar Quisoquipina ( $R = -0,5236$ ,  $p < 0,05$ ). No se encontró una relación estadísticamente significativa ( $p > 0,05$ ) entre la variación del área de nieve y las temperaturas mínimas y máximas anuales. La temperatura mínima del aire mostró un incremento de 0,2 °C por década entre 1980 y 2020.
- Mendizábal & Quispe (2021) en la región del Cusco, se analizó la relación entre el retroceso glaciar de los nevados Salkantay, Tucurhuay y Humantay, y la dinámica de las lagunas adyacentes durante el periodo 1991–2021, utilizando técnicas de teledetección sobre un área de estudio de 13,800 hectáreas. Mediante (NDSI), se identificaron pérdidas de cobertura glaciar de 745,65 hectáreas entre 2011 y 2016, así como un aumento de 815,26 hectáreas entre 2016 y 2021. El área permanente de cobertura glaciar más reducida se registró en el periodo 2011–2021 (1469,97 ha), mientras que la mayor se observó entre 1996 y 2001 (2398,86 ha). Respecto a la dinámica de las lagunas, a través del (NDWI), se detectó una mayor pérdida de superficie de agua en el periodo 2006–2011 (1,98 ha), y una expansión significativa

entre 1996 y 2001 con 5,31 ha ganadas. El área permanente de cobertura hídrica fue menor entre 1996–2001 (6,48 ha), en contraste con el periodo 2011–2016, donde se alcanzó la mayor extensión de agua permanente (13,59 ha). Estos resultados evidencian la estrecha relación entre la dinámica glaciar y los cuerpos de agua circundantes, bajo la influencia de factores climáticos y ambientales.

- Seehaus et al. (2019) en una evaluación temporal con el objetivo de analizar los cambios espaciales en la cobertura glaciar tropical del Perú entre 2000 y 2016, así como estimar los balances de masa y sus variaciones en distintos periodos. El estudio permitió identificar la relación entre las fluctuaciones glaciales y las condiciones ambientales, empleando herramientas de teledetección como imágenes satelitales y el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI). Los resultados evidenciaron un proceso continuo de retroceso glaciar en todas las subregiones evaluadas. Específicamente, la superficie cubierta por hielo fue de  $1916,6 \pm 48,3 \text{ km}^2$  en el año 2000-2013, reduciéndose a  $1571,9 \pm 43,1 \text{ km}^2$ , y alcanzando los  $1368,1 \pm 45,5 \text{ km}^2$  en el año 2013-2016. En cuanto al balance de masa glaciar, se registró una pérdida estimada entre  $-7,62 \pm 1,05$  y  $-9,18 \pm 1,10$  m de agua equivalente durante el periodo 2000–2013. Para el periodo 2013–2016, la pérdida de masa se estimó en aproximadamente  $-752 \pm \text{kg/m}^2$ .

### 1.2.3. A NIVEL LOCAL O REGIONAL

- Salinas & Valdez (2024) en su estudio, examinaron la reducción de los glaciares en los nevados del altiplano de Puno y su vinculación con las variaciones de temperatura en el periodo comprendido entre 1986 y 2022. El estudio permitió identificar las tendencias de cambio en la cobertura glaciar de cada nevado analizado, evidenciando tasas de retroceso significativas: Qhuchi con una disminución de  $7,69 \text{ km}^2$  por año, Qhaya con  $3,24 \text{ km}^2/\text{año}$ , Waracha con  $2,66 \text{ km}^2/\text{año}$  y Ritipata con  $3,09 \text{ km}^2/\text{año}$ . Asimismo, se observó un incremento sostenido

en la temperatura media anual de aproximadamente  $0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que la temperatura mínima presentó una tendencia ascendente de  $0,008\text{ }^{\circ}\text{C}$  por año. Estas variaciones térmicas se correlacionaron con fluctuaciones notables en la extensión de la cubierta glaciar, lo que refuerza la influencia del cambio climático en la dinámica de los glaciares de alta montaña.

- Cansaya (2024) en su investigación desarrollada con el objetivo de evaluar el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Allinapac cordillera de Carabaya por la influencia de los elementos climáticos, período 2018 - 2023 además el investigador midió la temperatura y precipitación los hallazgos mostraron la cobertura glaciar del nevado tiende a reducirse en el año 2018 la cobertura glaciar fue de  $16.66\text{ km}^2$  que equivale al 21 %, mientras tanto en el año 2023 la cobertura glaciar fue de  $12.17\text{ km}^2$  que equivale al 15 %, en caso de la temperatura hubo incremento de manera notable de los 6 años de  $10.87\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en el año 2018 las temperaturas máximas y mínimas eran bajas con  $9.57\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-0.00$ , las temperaturas máximas y mínimas durante los 6 años de estudios tuvieron un incrementarse de  $+1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $+0.72$  esto demuestra el cambio climático y por ello se observa las sequías, las precipitaciones confirman que tuvo un aumento con el tiempo en el año 2018 las precipitaciones fueron  $1470.35\text{ mm}$ , en el año 2020 con  $1041.18\text{ mm}$
- Quispe (2024) una investigación desarrollada en la cordillera de Allinapac, distrito de Macusani, tuvo como objetivo principal analizar la variación de la cobertura glaciar entre 1970 y 2022, en intervalos de cinco años, así como proyectar su posible reducción al año 2030. Para ello, se utilizó el índice NDSI, datos climáticos del SENAMHI y herramientas de interpolación espacial en ArcGIS. Los resultados indicaron una reducción progresiva de la superficie glaciar, con pérdidas significativas como  $11,59\text{ km}^2$  entre 1990–1995 y  $9,58\text{ km}^2$  entre 2010–2015. Paralelamente, se observó un incremento gradual de la temperatura a lo largo del periodo analizado,

con una tendencia de aumento estimada del 0,03 %. Estos hallazgos refuerzan la relación entre el incremento térmico y el retroceso de los glaciares en la región, para el año 2030 la variación de la cobertura glaciar existirá una cobertura glaciar de 6.77 km<sup>2</sup> que equivale a un 20%.

- Ccallata (2021) investigó con el objetivo de analizar la influencia de los elementos climáticos en el retroceso de su cobertura glaciar del nevado Salluyo de la cordillera de Apolobamba y evaluar la influencia de la temperatura y la precipitación en 1985-2020. Los resultados evidenciaron una disminución total de 1,01 km<sup>2</sup>, lo que representa una reducción del 28,45 %. El año con mayor temperatura fue 1998, alcanzando los 11,57 °C, coincidiendo con una pérdida significativa de 3,18 km<sup>2</sup> de hielo. En cuanto a la precipitación, se observó que el valor más alto se registró en 1985 con 874 mm, mientras que el más bajo fue en 1998 con 355,41 mm. Estos datos sugieren que menores niveles de precipitación están asociados a un mayor retroceso glaciar.
- Vuille et al. (2018) analizaron el retroceso de los glaciares tropicales en los Andes, identificando al aumento de la temperatura como el principal factor de desglaciación, mientras que la precipitación cumple un rol secundario. El estudio concluye que esta pérdida glaciar genera impactos hidrológicos y ecosistémicos significativos, comprometiendo la sostenibilidad del recurso hídrico en regiones altoandinas.
- Deza Velasquez (2024) analizó el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Ananea, en la Cordillera Apolobamba, durante el periodo 2015–2023, utilizando imágenes Landsat 8 y el índice NDSI para evaluar los cambios espaciales del hielo. Los resultados evidenciaron una disminución significativa de la superficie glaciar, asociada principalmente al incremento de la temperatura, mientras que la precipitación mostró una influencia secundaria. El estudio concluye que los glaciares

de la Cordillera Apolobamba presentan una alta sensibilidad a las variaciones térmicas, confirmando la tendencia de retroceso glaciar en el sur del Perú.

- Cabrera (2024) estudió la variación espacio-temporal de la cobertura glaciar de los nevados Bella Durmiente y San Francisco, ubicados en el distrito de Ananea, región Puno, entre 2013 y 2023. Utilizando imágenes satelitales Landsat 8 procesadas en Google Earth Engine y aplicando el índice de nieve normalizado ( $NDSI > 0.4$ ), el autor evidenció un retroceso significativo de la superficie glaciar en ambos nevados: en 2013, Bella Durmiente y San Francisco tenían 104.86 y 56.98 hectáreas respectivamente, y en 2023 estas áreas disminuyeron a 80.91 y 40.42 hectáreas. La investigación también aplicó análisis estadísticos de Spearman, encontrando correlaciones negativas significativas entre la cobertura glaciar y los años, así como con las temperaturas máxima y mínima, lo que sugiere que el aumento térmico está asociado con la pérdida de hielo en la zona andina analizada.

### **1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar el retroceso glaciar de la Cordillera Apolobamba y su relación con variables climáticas durante el período (2016-2024).

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el retroceso de la cobertura glaciar en los últimos 8 años en la cordillera Apolobamba en el periodo de (2016-2024).
- Determinar la relación entre el retroceso glaciar y la temperatura en la cordillera Apolobamba en el periodo de (2016-2024).
- Evaluar la relación entre el retroceso glaciar y la precipitación en la cordillera Apolobamba en el periodo de (2016-2024).

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1. MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1. GLACIAR Y COBERTURA GLACIAR

Un glaciar es una masa perenne de hielo formada por la compactación y recristalización de la nieve en tierra firme que fluye lentamente por su propio peso; gana masa por acumulación (nieve/nieve soplada) y la pierde por ablación (fusión, sublimación, ruptura) (Matthews et al., 2018). La cobertura glaciar es la superficie ocupada por glaciares dentro de un área y periodo dados (p. ej., km<sup>2</sup> por cordillera o región), e incluye tanto hielo limpio como hielo cubierto por detritos cuando la metodología lo permite. En cartografía e inventarios se delimita usualmente con imágenes satelitales (p. ej., Landsat/Sentinel) y umbrales espectrales como el NDSI, validando y corrigiendo con topografía y revisión visual (INAIGEM, 2017).

##### 2.1.2 ANÁLISIS MULTITEMPORAL

Es una técnica de teledetección que consiste en comparar imágenes satelitales correspondientes a diferentes fechas para detectar y cuantificar cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Permite observar procesos dinámicos como la regresión de glaciares, deforestación, expansión urbana Pinilla (2020).

##### 2.1.3. CAMBIO CLIMÁTICO Y SU RELACIÓN CON LOS GLACIARES

Los glaciares actúan como reguladores hidrológicos: almacenan agua en forma de hielo y liberan caudal en estiaje, lo que atenúa picos de deshielo y sostiene la oferta hídrica en

los meses más secos. En las últimas décadas se ha intensificado el forzamiento térmico, por lo que estos cuerpos de hielo han sido fuertemente afectados. El retroceso acelerado de las superficies glaciares constituye un indicador directo del calentamiento de la superficie terrestre. La pérdida de masa conduce a cambios progresivos en los regímenes de escorrentía y condiciona transformaciones en los usos del suelo. Son también, potenciales factores de riesgo para las poblaciones ubicadas aguas abajo Zalazar et al. (2020).

#### **2.1.4. RETROCESO GLACIAR**

El retroceso de los glaciares se entiende como la elevación progresiva de la cota mínima de nieves persistentes en sistemas de montaña, pudiendo culminar en la pérdida total del glaciar. Dicha dinámica responde principalmente a la fusión del hielo, que provoca la retracción del frente, la disminución del espesor, y una merma en extensión superficial y volumen de la biomasa Pillaca (2019)

#### **2.1.5. TELEDETECCIÓN SATELITAL**

Se entiende por teledetección la recopilación de datos sobre un objeto o superficie a distancia. La imagen fotográfica es un ejemplo común de este enfoque. Los esquemas de muestreo varían y se seleccionan sensores específicos conforme a la aplicación requerida (NASA ARSET, 2023)

#### **2.1.6. CORDILLERA APOLOBAMBA**

La Cordillera de Apolobamba es una subcordillera andina de alta montaña ubicada a lo largo de la frontera Perú–Bolivia, dentro de la Cordillera Oriental. Constituye un alineamiento de cumbres y macizos glaciario (p. ej., Chaupi Orco ~6 000 m) que funciona como divisoria de aguas entre cuencas que drenan hacia el lago Titicaca y la Amazonía. En el lado peruano se extiende por la región Puno (provincias Sandía y San Antonio de Putina), y en Bolivia por el dpto. La Paz (gran parte dentro del ANMI Apolobamba). Es un sistema montañoso tropical con glaciares y nieves estacionales, de alta importancia

hídrica, ecológica y cultural, que alimenta ríos de cabecera y alberga ecosistemas altoandinos (puna, bofedales) y fauna como vicuñas (MDRAYMA, 2006).

### 2.1.7. ÍNDICE DIFERENCIAL NORMALIZADO DE NIEVE (NDSI)

El NDSI cuantifica, de forma relativa, el contraste de reflectancia entre el verde del espectro visible y el SWIR (infrarrojo de onda corta). Al comparar ambas bandas —una en el visible y otra en el infrarrojo de onda corta— se controla su variación y se realiza la señal propia de la nieve. Este índice resulta especialmente útil para el mapeo de nieve, ya que la nieve refleja con fuerza en el visible y absorbe en el NIR/SWIR, mientras que la mayoría de las nubes mantienen alta reflectancia en el visible y en el SWIR, lo que facilita separarlas de la nieve (EOS Data Analytics, 2023)

Fórmula:

$$\text{NDSI} = \frac{\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{SWIR1}}}$$

### 2.1.8. COBERTURA GLACIAR

Se refiere a la zona permanente cubierta por hielo glaciar consolidado, es decir, masas de hielo que persisten más allá de la nieve estacional. Incluye glaciares activos o relictos dinámicos, cuyos límites se miden y monitorean a largo plazo para evaluar retrocesos o cambios en el área ice. La determinación de su superficie se basa en teledetección y modelos multitemporales Nocua (2025)

### 2.1.9. COBERTURA NIVAL

Es la superficie temporalmente cubierta por nieve estacional en zonas montañosas, no necesariamente permanente. Se mapea con frecuencia usando el índice NDSI a partir de imágenes satelitales (MODIS, Landsat, Sentinel), generando áreas anuales o estacionales cubiertas por nieve. Estos mapas refieren a la distribución espacial y

temporal de la nieve, y se expresan comúnmente como porcentaje del área total de cuenca o región Roca (2022).

## **2.2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.2.1. CALENTAMIENTO GLOBAL**

El calentamiento global es el aumento de la temperatura media de la superficie de la Tierra respecto de un periodo de referencia, calculado como un promedio multianual (típicamente 20–30 años) para eliminar la variabilidad año a año; en las evaluaciones del IPCC se usa comúnmente 1850–1900 como línea base. Este calentamiento es, de forma inequívoca, causado por la influencia humana a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2021)

### **2.2.2. CAMBIO CLIMÁTICO**

El cambio climático se entiende como la modificación del clima que puede atribuirse, de forma directa o indirecta, a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera global, superponiéndose a la variabilidad natural del clima en periodos comparables (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992)

### **2.2.3. PRECIPITACIÓN**

La precipitación es el agua, líquida o sólida, que cae desde la atmósfera y alcanza la superficie por ejemplo: llovizna, lluvia, nieve, graupel o granizo; no incluye fenómenos que no llegan al suelo Huffman et al. (2020)

### **2.2.4. QGIS**

QGIS (anteriormente conocido como Quantum GIS) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto, multiplataforma (Windows, Linux, macOS) y desarrollado con tecnologías como C++ y Qt. Es ampliamente utilizado para el manejo, análisis y visualización de datos geospaciales en formatos raster y vectorial, con capacidades avanzadas de análisis espacial, simbología, conexión a bases de datos

geográficas como PostGIS y gestión mediante complementos y scripts (QGIS Development Team, 2025)

### **2.2.5. RSTUDIO**

RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para trabajar con el lenguaje R (y también con Python). Te brinda en una sola ventana el editor de código, consola, visor de gráficos/tablas, manejo de paquetes, variables y archivos, además de herramientas para depurar, versionar con Git, y crear informes R Markdown/Quarto o apps Shiny ([Posit Software, 2022](#)).

### **2.2.6. TEMPERATURA**

En meteorología, la temperatura se obtiene en estaciones meteorológicas distribuidas a nivel mundial. En ellas se realizan lecturas a horas fijas, se registran máximas y mínimas diarias y, en algunos casos, se llevan series continuas conocidas como *termogramas*. Estos registros permiten elaborar estadísticas útiles para las descripciones climatológicas de una región Inzunza (2012)

## **2.3. MARCO NORMATIVO**

El marco normativo de este estudio se sustenta en el conjunto de instrumentos legales e institucionales del Perú que regulan la conservación, monitoreo y uso sostenible de los glaciares y ecosistemas de montaña. En primer lugar, la Ley N.º 28611, Ley General del Ambiente (2005), establece los principios de sostenibilidad, prevención, responsabilidad ambiental y equidad, declarando la obligación del Estado de proteger los ecosistemas de montaña y promover su aprovechamiento sostenible (Ley 28611, 2005)

Mediante la Ley 30286 se crea el INAIGEM como institución técnica del MINAM, con personalidad jurídica de derecho público y autonomía en los planos administrativo, funcional, tecnológico, económico y financiero. Su objetivo central es fomentar la gestión sostenible de glaciares y ecosistemas altoandinos y fortalecer la investigación científica y tecnológica asociada (Ley N.º 30286., 2014).

El Reglamento de Organización y Funciones (ROF) del Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) fue aprobado mediante Decreto Supremo N° 004-2016-MINAM, de fecha 8 de julio de 2016, de conformidad con los lineamientos del Decreto Supremo N° 043-2006-PCM, Lineamientos para la elaboración y aprobación del Reglamento de Organización y Funciones - ROF por las entidades de la Administración Pública (DS N.º 004-2016-MINAM (ROF INAIGEM), 2016).

## **2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL**

El retroceso de la cobertura glaciar de la cordillera Apolobamba es significativo por la influencia de las variables climáticas en el periodo (2016 - 2024).

### **2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS**

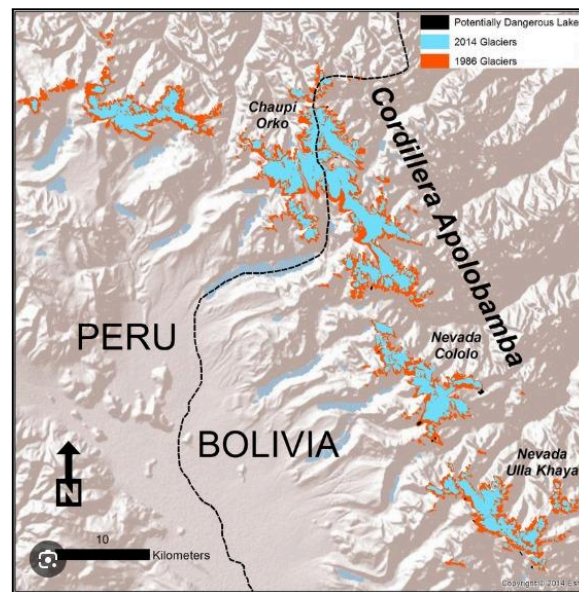
- La cobertura glaciar de la cordillera Apolobamba ha disminuido en el periodo (2016 - 2024)
- Las altas temperaturas influyen significativamente en el retroceso glaciar de la cordillera Apolobamba entre el (2016 - 2024).
- El aumento de las precipitaciones no influye significativamente en el retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba entre los periodos (2016-2024).

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. ZONA DE ESTUDIO

La cordillera Apolobamba forma parte del sistema montañoso de los Andes centrales del sur del Perú, ubicada en la región altiplánica del departamento de Puno, específicamente en la provincia de Melgar. Esta cadena montañosa se extiende entre las coordenadas aproximadas 14°30' a 14°55' de latitud sur y 70°40' a 71°00' de longitud oeste, con altitudes que superan los 5,200 m s.n.m.



**Figura 01:** Ubicación: del área de estudio de la cordillera Apolobamba

**Fuente:** <https://tc.copernicus.org/articles/10/2399/2016/>

## **3.2. TAMAÑO DE MUESTRA**

### **3.2.1. POBLACIÓN**

La población específica corresponde al conjunto de imágenes que cubren los glaciares de la Cordillera de Apolobamba en Puno (principalmente distritos Cuyocuyo, Quiaca, Sina y Ananea) durante 2016–2024. Las escenas provienen de Landsat y de Landsat 8 OLI y Landsat 9 OLI-2 (niveles de reflectancia superficial), que aportan las bandas necesarias para calcular el NDSI y derivados. Todas las imágenes son georreferenciadas y se consideran con máscara de nubes/sombras y controles básicos de calidad para asegurar su utilidad en el mapeo de la cobertura glaciar.

### **3.2.2. MUESTRA**

La muestra está conformada por una selección representativa de 12 imágenes satelitales multiespectrales y datos climáticos anuales que permiten analizar el retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba durante el período 2016-2024. Para garantizar la comparabilidad temporal y reducir el efecto de la nubosidad estacional, se ha optado por imágenes capturadas durante los meses de menor cobertura nubosa

### **3.2.3. MUESTREO**

Dado que la investigación se centró en el análisis de imágenes satelitales y datos climáticos en una zona específica (cordillera Apolobamba) y durante un período definido (2016–2024), se aplicó un muestreo no probabilístico de tipo intencional o dirigido (Figueroa, 2024). Este enfoque permitió seleccionar las unidades de análisis (imágenes satelitales y series climáticas) que cumplieron criterios técnicos indispensables para el cálculo del índice NDSI y la comparación temporal, tales como reflectancia superficial, baja nubosidad, fechas comparables correspondientes a la estación seca y cobertura íntegra del área de estudio (AOI), asegurando así la consistencia y comparabilidad de los resultados.

### 3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

#### Tipo de Investigación

La presente investigación fue de tipo cuantitativo, con un enfoque correlacional-descriptivo. Fue descriptiva porque buscó caracterizar y cuantificar el retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba durante el período 2016–2024, mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales utilizando el índice NDSI. Asimismo, fue correlacional porque pretendió establecer la relación entre dicho retroceso glaciar y las variables climáticas de temperatura y precipitación. Para ello, se recopilaron y analizaron datos geospaciales y meteorológicos, los cuales fueron procesados estadísticamente con el fin de identificar patrones y tendencias. Esta aproximación permitió no solo describir los cambios en la cobertura glaciar, sino también explicar su posible vínculo con el cambio climático regional.

#### Diseño de investigación

El estudio adopta un diseño no experimental y longitudinal. No se manipulan las variables; por el contrario, se observan en su contexto natural y se analizan tal como ocurren. La evidencia proviene de series históricas de imágenes satelitales y de registros climáticos correspondientes al período 2016–2024. Siguiendo a Ramirez & Callegas (2020) , en un diseño no experimental las variables se examinan sin intervención del investigador, privilegiando la identificación de asociaciones entre ellas. La dimensión longitudinal permite estudiar la evolución temporal del retroceso glaciar y su vínculo con la temperatura y la precipitación, de modo que se puedan reconocer tendencias y patrones de cambio a lo largo del tiempo.

#### Materiales

##### Equipos

- Computadora
- Impresora, scanner

→ Navegador GPS

### Programas

→ Qgis 3.38.0

→ Rstudio

### 3.4. METODOLOGÍA POR OBJETIVOS

- **Metodología para el objetivo específico N° 01:**

**Corrección radiométrica:** Se transformaron los valores digitales (DN) de las escenas Landsat (TM/ETM+/OLI) a reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) en QGIS 3.x mediante SCP. Preprocessing, usando el archivo MTL (ganancia, offset y ángulo solar). Esta normalización radiométrica evita que diferencias de calibración o iluminación entre fechas/sensores se confundan con cambios reales de nieve/hielo. Se verificó la coherencia con histogramas (rango 0–1) y se enmascaran saturaciones; en ETM+ SLC-off no se “corrigieron” líneas perdidas, sino que se mitigaron con mosaicos multitemporales por ventana trianual.

**Corrección atmosférica:** Para hacer comparables las escenas y eliminar la radiancia de trayectoria (aerosoles, vapor de agua y gases), se obtuvo reflectancia de superficie (SR). Cuando existieron productos Level-2/SR oficiales, se usaron directamente; en escenas TOA se aplicó DOS1 (Dark Object Subtraction) en SCP. Se integraron máscaras QA de nubes/sombras y se revisaron perfiles espectrales en áreas estables. Con SR homogénea se calcula un NDSI estable (umbral guía  $\approx 0.40$ , ajustable 0.35–0.45) para cuantificar con rigor el retroceso glaciar.

#### **Determinación de la variación de la cobertura glaciar:**

Para estimar el retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba, se emplearán imágenes satelitales que serán descargadas desde plataformas como “USGS Earth Explorer”. Se seleccionarán aquellas fechas en las que la cobertura nubosa sea mínima y la cobertura

nival se encuentre más visible, se procederá con la corrección y el procesamiento de las imágenes en el software QGIS, donde se aplicará una corrección atmosférica básica.

Posteriormente, se recortará el área de estudio mediante una máscara en formato shapefile correspondiente a la cordillera Apolobamba. Las bandas espectrales necesarias serán combinadas según la fórmula del índice NDSI, utilizando la herramienta *Raster Calculator* del software. Esta operación generará un nuevo raster con valores del índice. Finalmente, se aplicará un umbral de  $NDSI \geq 0.4$  con el fin de identificar y delimitar las áreas cubiertas por nieve o hielo glaciar.

- **Metodología para el objetivo específico N° 02:**

Determinar la influencia de la temperatura en el retroceso de la cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba durante el periodo 2016 hasta el 2024.

Para este análisis, se utilizaron datos climáticos obtenidos de la base de datos NASA POWER Data Access Viewer, los cuales proporcionan información sobre condiciones pasadas y actuales. Previamente, se identificó la ubicación óptima de una estación meteorológica en el área de estudio, mediante técnicas de teledetección. Esta se ubicó dentro del entorno glaciar de la Cordillera Apolobamba, en una zona despejada y libre de interferencias que puedan afectar la precisión de los registros climáticos. Los datos extraídos incluyeron principalmente temperaturas máximas y mínimas diarias ( $^{\circ}\text{C}$ ), con el fin de calcular la temperatura media anual y evaluar su posible relación con la pérdida de superficie glaciar.

- **Metodología para el objetivo específico N° 03**

Determinar la influencia de la precipitación en el retroceso de la cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba durante el periodo 2016 hasta el 2024.

Para este análisis, se utilizaron datos climáticos obtenidos de la base de datos NASA POWER Data Access Viewer, los cuales proporcionan información sobre condiciones pasadas y actuales. Previamente, se identificó la ubicación óptima de una estación

meteorológica en el área de estudio, mediante técnicas de teledetección. Esta se ubicó dentro del entorno glaciar de la Cordillera Apolobamba, en una zona despejada y libre de interferencias que puedan afectar la precisión de los registros climáticos. Los datos extraídos incluyeron principalmente la precipitaciones máximas y mínimas diarias ( $^{\circ}\text{C}$ ), con el fin de calcular la precipitación media anual y evaluar su posible relación con la pérdida de superficie glaciar.

### 3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

**Causa o Variable independiente (VI):** Influencia de los elementos climáticos (precipitación y temperatura)

**Efecto o Variable dependiente (VD):** Retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba

**Tabla 01:** Operacionalidad de variables

Variables	Dimensión	Indicador	Escala de medición
<b>Dependiente:</b>			
Retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba	Cobertura superficial	área glaciar por ventana (km <sup>2</sup> )	Razón (km <sup>2</sup> )
<b>Independiente:</b>			
Variables climáticas	Temperatura	T Máxima	$^{\circ}\text{C}$
		T mínima	$^{\circ}\text{C}$
	Precipitación	T mensual	$^{\circ}\text{C}$
		T Anual	$^{\circ}\text{C}$
		Mensual	mm
		Anual	mm

### 3.6. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO

#### Pruebas de normalidad.

Antes de aplicar pruebas de correlación, se evaluó el supuesto de normalidad de las variables. Para ello se utilizó la prueba de Shapiro–Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), apropiada para muestras pequeñas. Se fijó  $\alpha = 0.05$ : valores  $p > 0.05$  indican que los datos son compatibles con una distribución normal;  $p \leq 0.05$  sugieren desviación de la normalidad. Con base en este diagnóstico se eligieron pruebas paramétricas (p.ej., Pearson) o no paramétricas (p.ej., Spearman/Kendall).

#### Coefficiente de correlación

Se refiere a la fuerza de la asociación lineal que establece la fuerza de la relación entre dos variables. Cuando se realizan pruebas paramétricas, el coeficiente de correlación se calcula mediante el método de Pearson; en caso contrario (Artusi et al., 2002), se utiliza el método de Spearman. Para interpretar la fuerza de la relación, los rangos del coeficiente de correlación se fijan entre -1 y +1, se utiliza la tabla

**Tabla 02:** Grado de correlación

<b>r (valor absoluto)</b>	<b>Interpretación</b>
0.90 – 1.00	Correlación muy alta
0.70 – 0.89	Correlación alta
0.50 – 0.69	Correlación moderada
0.30 – 0.49	Correlación baja
0.00 – 0.29	Correlación muy baja o despreciable

Fuente: La interpretación del coeficiente de correlación se realizó considerando los rangos propuestos por Akoglu (2018).

### **Para contrastar la hipótesis**

Se evaluó la relación entre el retroceso de la cobertura glaciar en la cordillera Apolobamba durante el período 2016–2020 y las variables climáticas consideradas, tales como la temperatura media anual y la precipitación total. Previamente, se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk y de linealidad. Cuando dichos supuestos se cumplieron, se aplicó la regresión lineal simple y la correlación de Pearson; en caso de incumplimiento, se utilizó la correlación de Spearman como alternativa robusta. El contraste de hipótesis se realizó con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$  (IC del 95 %), empleando el software R-Studio.

### **Criterio para decidir**

- Si  $p < 0.05$ , se rechaza  $H_0$
- Si  $p \geq 0.05$ , no se rechaza  $H_0$

## CAPÍTULO IV

### EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

#### 4.1. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA ESTIMACIÓN DEL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DE LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA CON RESPECTO A LOS PERIODOS 2016-2024

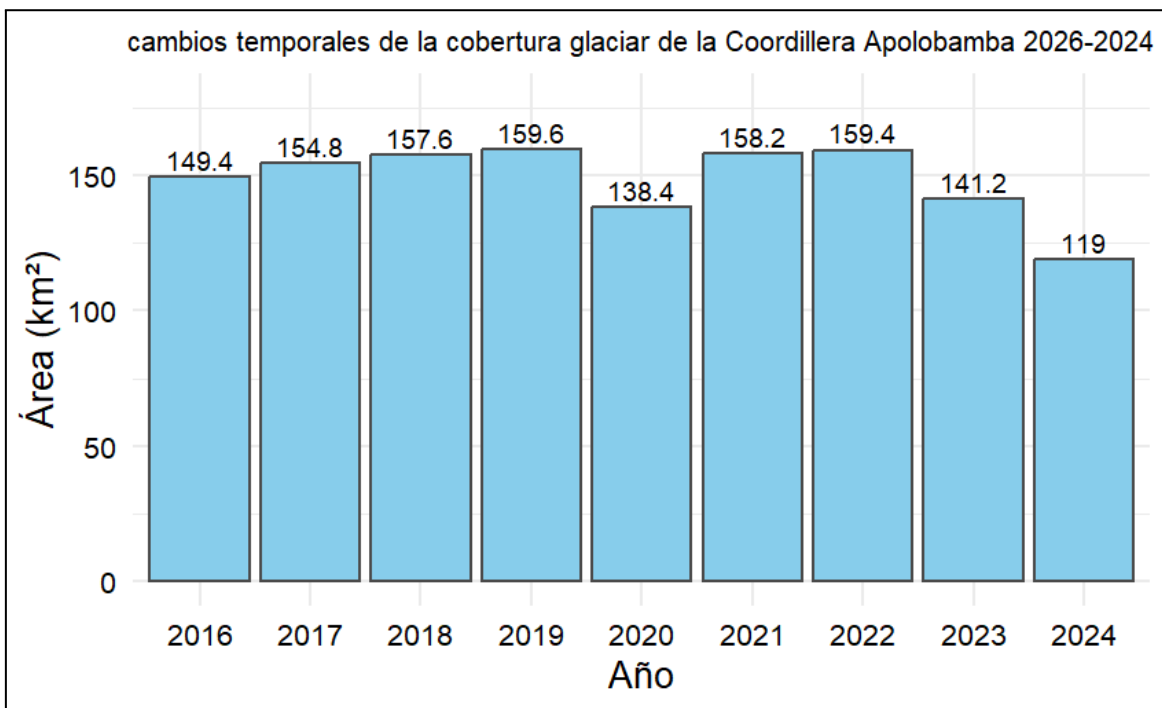
**Tabla 03:** Cambios temporales del glaciar de la Cordillera Apolobamba

Periodos		Cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba		
Periodo	Área (km <sup>2</sup> )	Variación del área (km <sup>2</sup> )	Tasa de cambio (%)	Porcentaje (%)
2016	149.39	0.00	0.00	11
2017	154.79	5.40	3.61	12
2018	157.60	2.81	1.82	12
2019	159.61	2.01	1.28	12
2020	138.43	-21.18	-13.27	10
2021	158.23	19.80	14.30	12
2022	159.43	1.20	0.76	12
2023	141.20	-18.23	-11.43	11

Periodos		Cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba		
2024	119.00	-22.20	-15.72	9
<b>Total</b>	<b>1,337.68</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>100</b>

En la tabla 03, muestra la evolución anual del área glaciar en la Cordillera Apolobamba entre 2016 y 2024, permitiendo identificar periodos de avance y retroceso, así como cuantificar la magnitud de los cambios. El área glaciar inicia en 149.39 km<sup>2</sup> en 2016 y disminuye hasta 119.00 km<sup>2</sup> en 2024, lo que representa una pérdida acumulada de 30.39 km<sup>2</sup> en ocho años. A nivel porcentual, esta variación equivale a una reducción aproximada del 20 % del glaciar durante el periodo de estudio. (Laqui et al., 2024) para 1986–2015, se observa que la dinámica glaciar reciente en la Cordillera Apolobamba muestra un ritmo de pérdida más acelerado. Mientras dichos autores identificaron una reducción promedio anual de aproximadamente 2.0 a 2.5 km<sup>2</sup>/año, en este estudio la tasa estimada alcanza los 3.8 km<sup>2</sup>/año. Esta diferencia sugiere que el retroceso glaciar se ha intensificado durante los últimos ocho años. La comparación entre los resultados obtenidos en este estudio y los reportados (Mamani, 2022) Al comparar los resultados del presente estudio, realizado para el periodo 2016–2024, con los obtenidos por (Mamani, 2022) para el nevado Ananea en el intervalo 1985–2021, es necesario considerar la diferencia de escala espacial entre ambas investigaciones. Mientras Mamani analizó un glaciar individual, este trabajo abarca la totalidad de la Cordillera Apolobamba. Aun así, la tasa de pérdida reciente en Apolobamba ( $\approx 3.80$  km<sup>2</sup>/año) supera ampliamente la tendencia histórica registrada en Ananea ( $\approx 1.2$  km<sup>2</sup>/año), lo que sugiere que en los últimos años la desglaciación se ha intensificado a nivel regional, mientras que los glaciares pequeños continúan mostrando una respuesta proporcionalmente más sensible frente al calentamiento y a las anomalías climáticas. (Deza, 2024) La comparación entre

los resultados obtenidos en este estudio y los reportados por Deza Velásquez (2024) para el nevado Ananea muestra una coincidencia temporal clara en el retroceso glaciar posterior al año 2019. En la Cordillera Apolobamba, los descensos más marcados se registran en 2020 ( $-21.18 \text{ km}^2$ ) y 2023 ( $-18.23 \text{ km}^2$ ), mientras que en Ananea las pérdidas más notorias se observan en 2021 ( $-1.26 \text{ km}^2$ ), 2022 ( $-0.98 \text{ km}^2$ ) y 2023 ( $-0.96 \text{ km}^2$ ). Aunque la magnitud difiere por la escala espacial de cada estudio, ambos registros evidencian una tendencia de reducción sostenida durante 2019–2023. Esta coincidencia sugiere que toda la región experimentó un episodio intenso de desglaciación a partir de 2019.



**Figura 02:** Cambio de la cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba 2016-2024.

En la figura 02. La figura muestra cómo ha ido variando la superficie glaciar de la Cordillera Apolobamba entre 2016 y 2024. En los primeros cuatro años (2016–2019) se observa una tendencia al incremento del área, alcanzando un máximo cercano a  $159.6 \text{ km}^2$  en 2019. Sin embargo, a partir de 2020 ocurre un cambio brusco: la cobertura se reduce de manera marcada hasta  $138.4 \text{ km}^2$ , lo que indica un episodio abrupto de pérdida

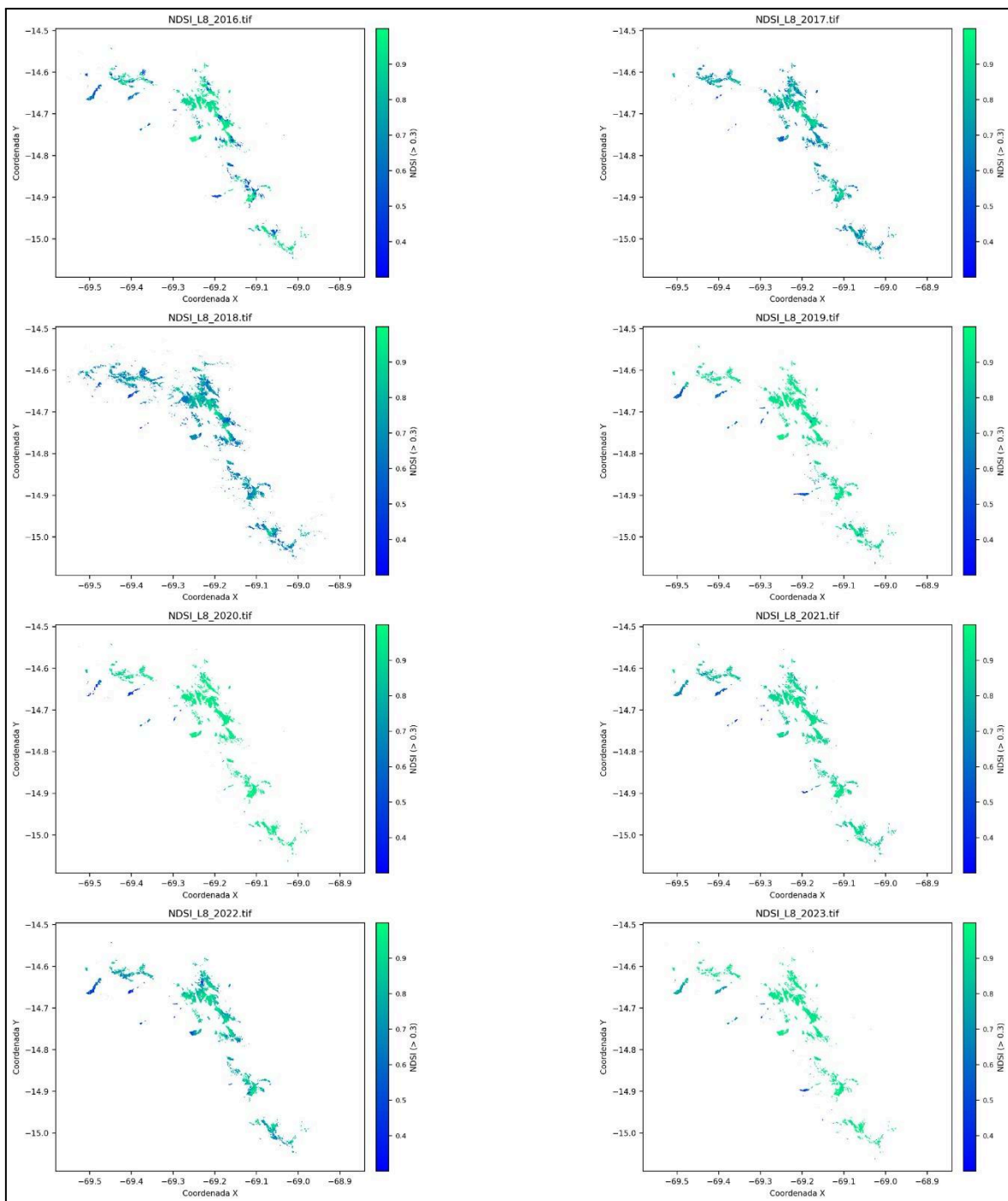
glaciar. Aunque en 2021 y 2022 se registra una ligera recuperación, esta no compensa la disminución previa. Finalmente, entre 2023 y 2024 el retroceso vuelve a intensificarse, llegando a 119 km<sup>2</sup> en 2024, el valor más bajo de todo el periodo analizado. En conjunto, la figura evidencia que, pese a fluctuaciones interanuales, la tendencia general hacia 2024 es una reducción sostenida de la superficie de hielo en Apolobamba. Los resultados muestran que la superficie glaciar de Apolobamba mantiene una tendencia de reducción continua entre 2016 y 2024, con un descenso marcado después de 2019. Este comportamiento coincide con lo reportado por Laqui et al. (2024) quienes señalan que la cordillera pasó de aproximadamente 209 km<sup>2</sup> en 1988 a 144.9 km<sup>2</sup> en 2018, evidenciando una disminución sostenida previa al periodo de este estudio. De manera similar, (Mamani, 2022) registra que el Nevado Ananea reduce su área a 7.32 km<sup>2</sup> en 2019, mientras que Deza (2024) describe una caída significativa en Suyuparina entre 2019 y 2022. La reducción observada aquí —de 159.6 km<sup>2</sup> en 2019 a 119 km<sup>2</sup> en 2024— confirma que Apolobamba atraviesa un proceso de desglaciación acelerada, coherente con la dinámica regional vinculada al aumento térmico y a la disminución de la precipitación sólida.

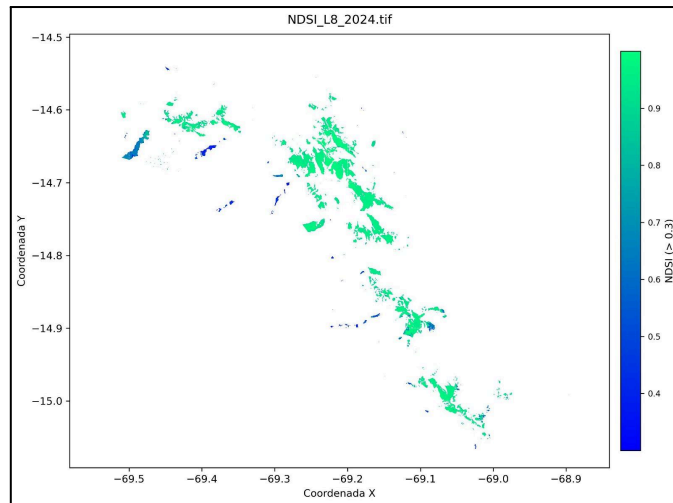
**Tabla 04:** Estadística descriptiva del área del glaciar de la Cordillera Apolobamba.

Estadísticos descriptivos						
Variable	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Curtosis
Cobertura glaciar (km <sup>2</sup> )	148.63	154.79	159.61	119	13.63	6.38

En la tabla 04, muestra que la cobertura glaciar de Apolobamba presenta una media de 148.63 km<sup>2</sup>, con una mediana ligeramente mayor (154.79 km<sup>2</sup>), lo que indica que los

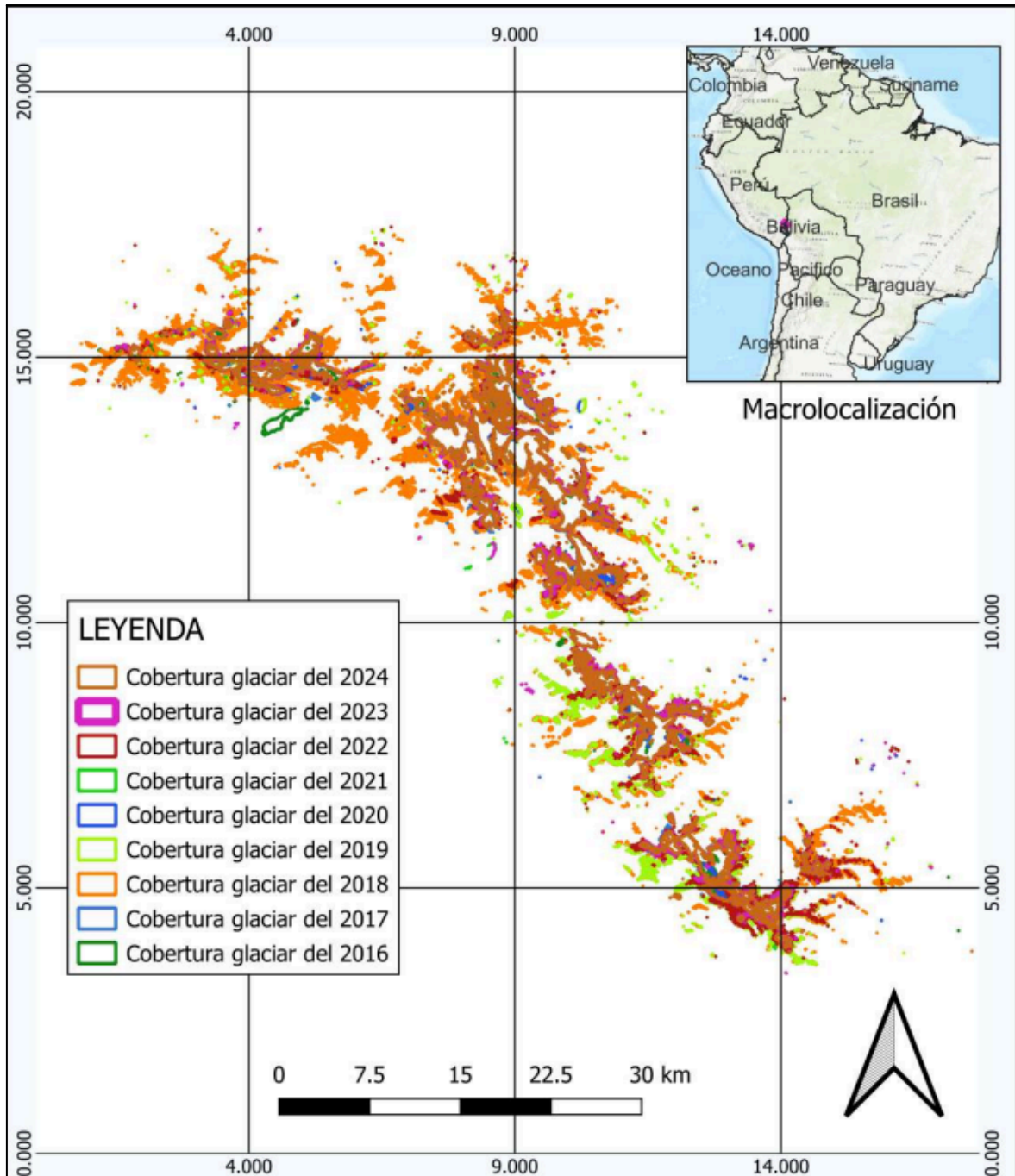
valores más bajos se concentran en los años finales. El máximo (159.61 km<sup>2</sup>) corresponde a 2019 y el mínimo (119 km<sup>2</sup>) a 2024, evidenciando una reducción marcada. La desviación estándar (13.63 km<sup>2</sup>) refleja variabilidad interanual significativa y la curtosis elevada (6.38) sugiere la presencia de valores extremos asociados al retroceso acelerado reciente. En síntesis, la tabla confirma un proceso de disminución progresiva y cada vez más acentuada de la superficie glaciar.





**Figura 03:** Cambio temporal de la cobertura glaciar durante el 2016 - 2024

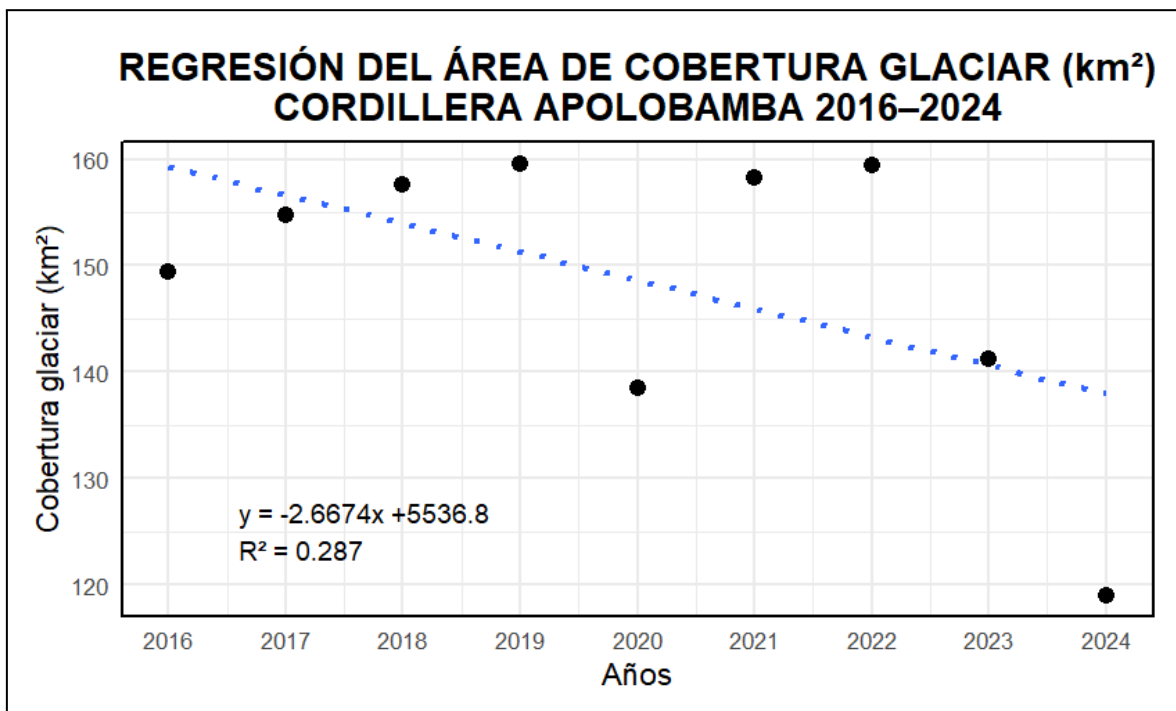
En la figura 03. La serie de mapas NDSI (umbral  $> 0.3$ ) para la Cordillera Apolobamba entre 2016 y 2024 muestra un patrón espacial continuo de reducción y fragmentación del hielo: entre 2016 y 2019 las manchas glaciares son más extensas y conectadas, alcanzando su expresión más amplia hacia 2019; en 2020 se observa un quiebre con pérdida de lenguas periféricas y adelgazamiento de varios núcleos; en 2021–2022 reaparecen algunos parches (recuperación parcial), pero sin restituir la continuidad previa; finalmente, en 2023–2024 predominan polígonos más pequeños, aislados y retraídos respecto a 2016–2019, con desaparición visible de zonas de baja altitud y persistencia relativa en crestas y cabeceras más elevadas. En síntesis, los mapas confirman un retroceso neto del manto glaciar en el periodo 2016–2024, con oscilaciones interanuales pero con un desplazamiento general de los bordes hacia cotas más altas y una marcada pérdida de continuidad superficial en los años finales.



**Figura 04:** Mapa de cambio multitemporal de la cobertura glaciar durante 2016-2024.

En la figura 04. La serie de mapas NDSI (umbral > 0.3) para la Cordillera Apolobamba entre 2016 y 2024 muestra un patrón espacial continuo de reducción y fragmentación del hielo: entre 2016 y 2019 las manchas glaciares son más extensas y conectadas, alcanzando su expresión más amplia hacia 2019; en 2020 se observa un quiebre con pérdida de lenguas periféricas y adelgazamiento de varios núcleos; en 2021–2022

reaparecen algunos parches (recuperación parcial), pero sin restituir la continuidad previa; finalmente, en 2023–2024 predominan polígonos más pequeños, aislados y retraídos respecto a 2016–2019, con desaparición visible de zonas de baja altitud y persistencia relativa en crestas y cabeceras más elevadas. En síntesis, los mapas confirman un retroceso neto del manto glaciar en el periodo 2016–2024, con oscilaciones interanuales pero con un desplazamiento general de los bordes hacia cotas más altas y una marcada pérdida de continuidad superficial en los años finales.

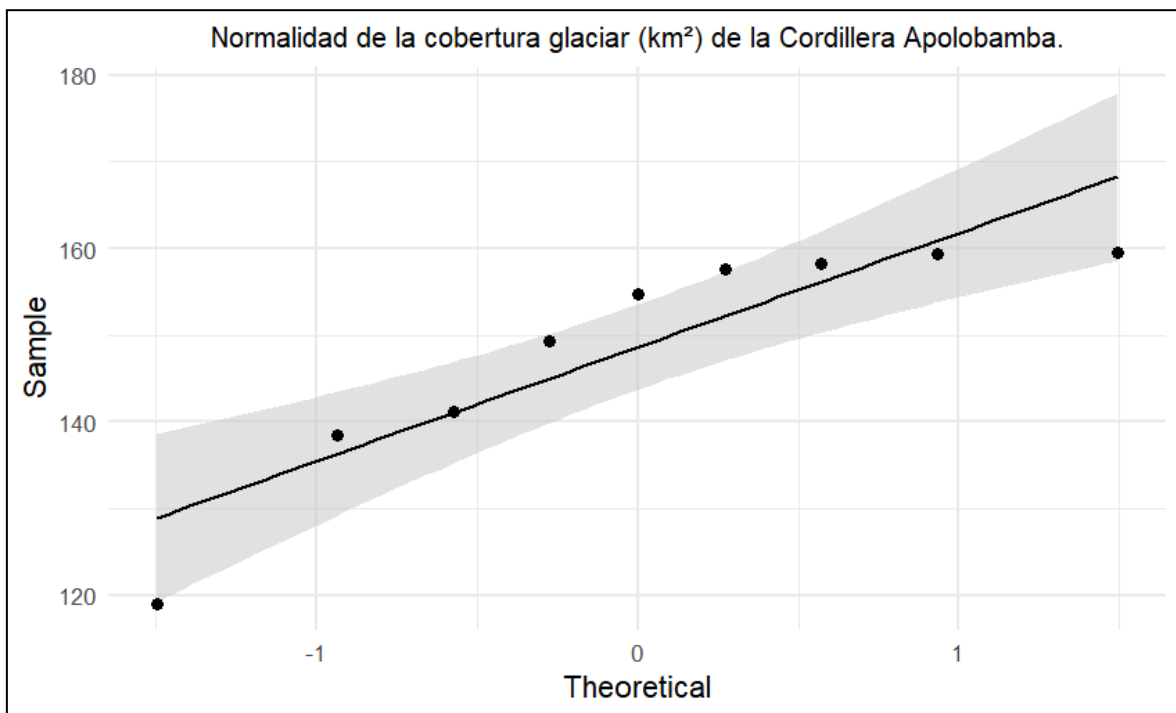


**Figura 05:** Regresión lineal del área de la cobertura glaciar, con respecto al tiempo.

En la figura 05, la línea de tendencia evidencia un descenso global del área glaciada: la pendiente  $-2.6674$  implica una merma aproximada de  $2.67 \text{ km}^2$  por año. El  $R^2 = 0.287$  indica que la relación con el tiempo es débil-moderada y que existe alta variabilidad entre años. El patrón temporal es no lineal: crecimiento hasta 2019, ruptura en 2020, recuperación parcial en 2021–2022 y nuevo retroceso en 2023–2024. El intercepto responde a la codificación del eje temporal y no tiene significado físico directo.

**Tabla 05:** Pruebas de normalidad para la variable de cobertura glaciar

Normalidad de la cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba mediante (Shapiro - Wilk)		
Variable	Estadístico	p-value
Cobertura glaciar	0.819	0.0333

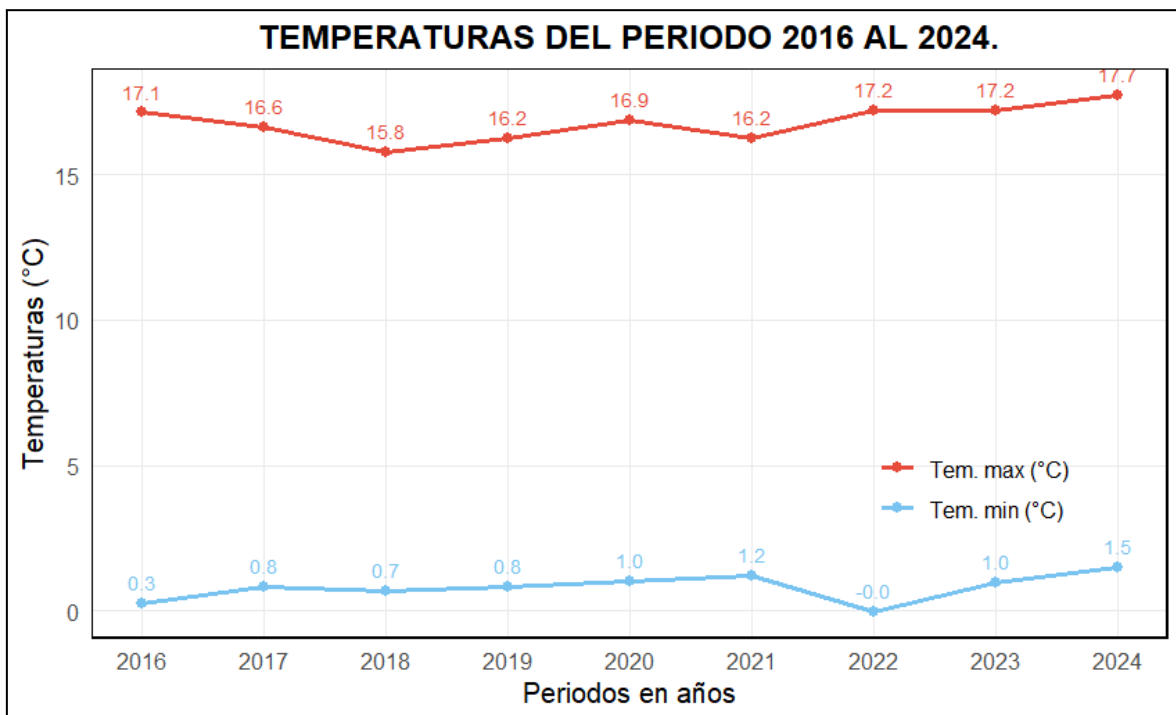


**Figura 06:** Gráfico de normalidad para la variable de cobertura glaciar

En la tabla 05 y Figura 06, la prueba de Shapiro–Wilk muestra un p-value de 0.0333, lo que indica que la cobertura glaciar no se ajusta a una distribución normal. Esta conclusión coincide con el gráfico QQ-Plot, donde los puntos se separan de la línea esperada, sobre todo en los valores más altos y más bajos. La relación entre ambos resultados evidencia que la serie presenta comportamientos irregulares y valores extremos, vinculados a la caída marcada de área en los últimos años, lo que impide que la variable tenga un patrón normal.

## 4.2 EXPOSICIÓN Y ANALISIS DE DETERMINACION DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DE LA CORDILLERA APOLOBAMBA 2016-2024

Clima (temperatura). Para caracterizar el régimen térmico de la cordillera Apolobamba durante 2016–2024, se extrajeron las series de Tmax y Tmin (°C) del sistema NASA POWER. Las series se sintetizaron a escalas mensual y anual previo al análisis estadístico.



**Figura 07:** Grafico de las temperaturas máximas y mínimas en el periodo 2016-2024.

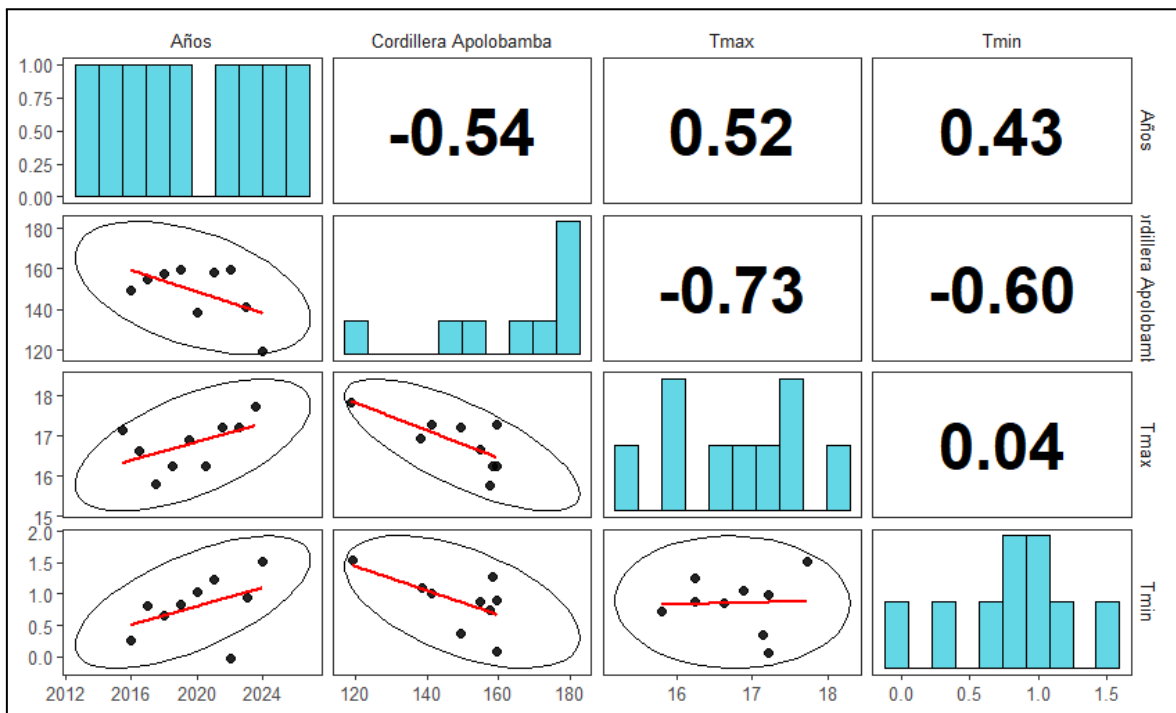
El gráfico muestra que las temperaturas máximas en Apolobamba se mantienen persistentemente altas (entre 15.8 °C y 17.7 °C), con un aumento evidente hacia 2024, lo que sugiere un calentamiento progresivo. Las temperaturas mínimas presentan mayor variabilidad, pero también muestran un repunte hacia el final del periodo, pasando de 0.3 °C en 2016 a 1.5 °C en 2024. En conjunto, ambas curvas indican un ambiente térmico cada vez más cálido, condición que favorece el retroceso glaciar registrado en la cordillera. Vuille et al. (2018) señalan que los Andes tropicales atraviesan un proceso de

aumento térmico sostenido, y destacan que incluso variaciones leves en la temperatura son suficientes para acelerar la pérdida de hielo debido a la alta sensibilidad de los glaciares tropicales. Esta tendencia coincide con los valores obtenidos en este estudio, donde las temperaturas máximas alcanzan hasta 17.7 °C y las mínimas se incrementan gradualmente hacia 1.5 °C en 2024. Estas condiciones térmicas también están en consonancia con lo reportado por Laqui et al. (2023), quienes muestran que Apolobamba registra máximas superiores a 15 °C y un calentamiento progresivo durante las últimas décadas. De manera complementaria, Deza (2024) reporta para Suyuparina un rango térmico de 12–15 °C en las máximas y 0–2 °C en las mínimas, reflejando un comportamiento regional similar. En conjunto, estos estudios refuerzan que el incremento térmico observado en Apolobamba es un factor determinante en la desglaciación acelerada registrada después de 2019.

**Tabla 06:** Distribución descriptiva de las temperaturas (°C) en la Cordillera Apolobamba, 2016–2024.

Estadísticos descriptivos						
Variable	Medi a	Median a	Máxim o	Mínim o	Desviación estándar	Curtos is
Temperatura máxima (°C)	16.78	16.89	17.73	15.790	0.61	5.03
Temperatura mínima (°C)	0.80	0.83	1.51	-0.038	0.47	5.50

En la tabla 06, las temperaturas de Apolobamba entre 2016 y 2024 muestran máximas altas y regulares (media 16.78 °C) y mínimas ligeramente variables (media 0.80 °C), lo que confirma un ambiente térmico persistentemente cálido. La presencia de valores extremos en ambas series indica episodios de mayor intensidad térmica, especialmente hacia los últimos años. Este comportamiento coincide con lo señalado por (Vuille et al., 2018) quienes explican que los Andes tropicales experimentan un calentamiento sostenido que afecta directamente a los glaciares. Asimismo, los rangos térmicos reportados por Laqui et al (2023) en Apolobamba y por Deza (2024) en la Cordillera Vilcanota son similares a los observados en este análisis, lo que refuerza que el aumento de temperatura registrado en este periodo contribuye de manera importante al retroceso glaciar reciente.



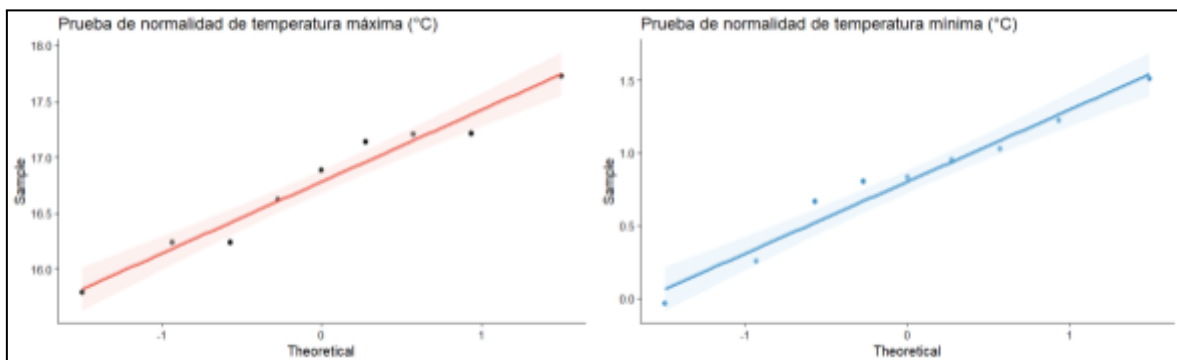
**Figura 08:** Matriz de correlaciones entre cobertura glaciar y temperaturas (2016–2024), Cordillera Apolobamba.

Figura 08, La figura muestra la relación entre los años analizados, la cobertura glaciar de Apolobamba y las temperaturas máxima y mínima. Se observa una correlación negativa

moderada entre el tiempo y el área glaciaria ( $-0.54$ ), lo que indica que la cobertura disminuye conforme avanzan los años. A la vez, existe una correlación positiva entre los años y las temperaturas máxima ( $0.52$ ) y mínima ( $0.43$ ), reflejando un aumento térmico progresivo en el periodo 2016–2024. También se aprecia una correlación negativa fuerte entre la cobertura glaciaria y las temperaturas máxima ( $-0.73$ ) y mínima ( $-0.60$ ), lo cual evidencia que el glaciar se reduce en mayor proporción cuando las temperaturas aumentan. En conjunto, los diagramas de dispersión y las elipses de tendencia confirman que el calentamiento observado está estrechamente asociado al proceso de desglaciación registrado en Apolobamba.

**Tabla 07:** Prueba de normalidad para la variable temperatura

Normalidad de las temperaturas de la Cordillera Apolobamba (2016–2024) mediante Shapiro–Wilk		
Variable	Estadístico	p-value
Temperatura máxima (°C)	0.964	0.00555
Temperatura mínima (°C)	0.958	0.00168

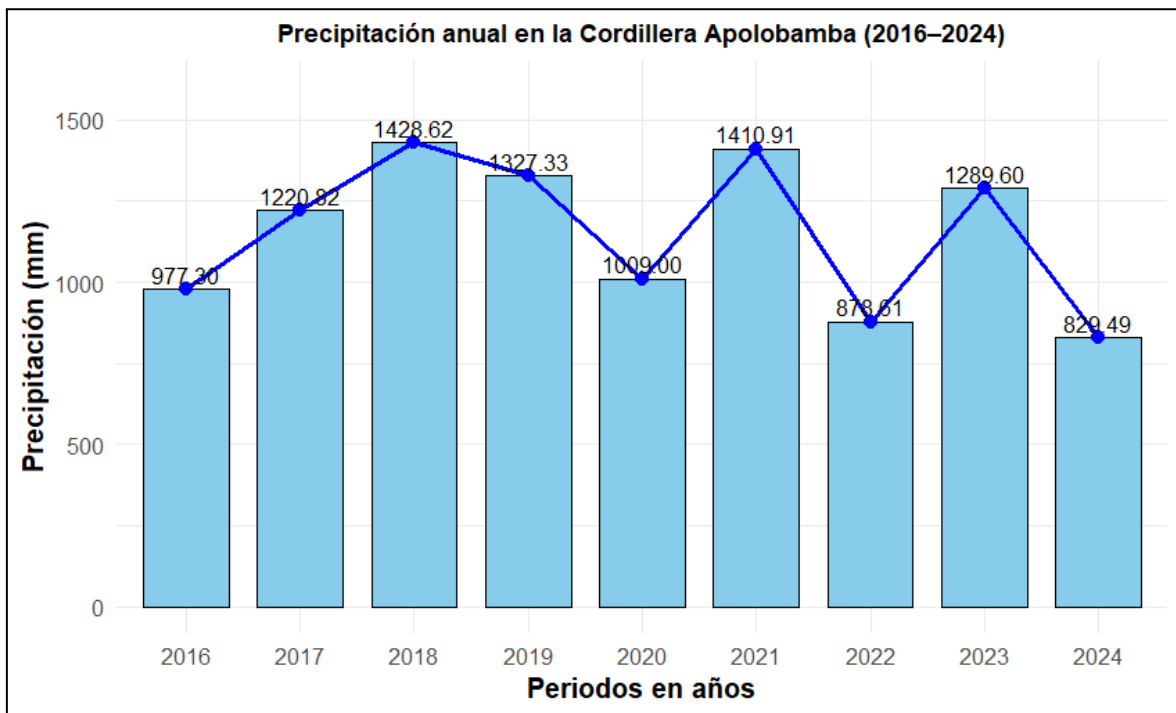


**Figura 09:** Gráfico de normalidad Tmax y Tmin

En la tabla 07 y la figura 09 la prueba de Shapiro–Wilk aplicada a las temperaturas de Apolobamba indica que tanto la temperatura máxima ( $p = 0.00555$ ) como la temperatura

mínima ( $p = 0.00168$ ) presentan valores de  $p$  menores a 0.05, por lo que ninguna de las dos distribuciones se ajusta a la normalidad. Los estadísticos cercanos a 0.96 reflejan ligeras desviaciones respecto a la forma normal, probablemente asociadas a episodios térmicos atípicos durante el periodo analizado. En conjunto, estos resultados muestran que las series de temperatura presentan variabilidad irregular y eventos extremos, lo cual es coherente con el comportamiento climático cambiante observado en Apolobamba entre 2016 y 2024.

#### 4.3. EXPOSICION Y ANALISIS DE DETERMINACION DE LA INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL RETROCESO DE LA COBERTURA DE LA CORDILLERA APOLOBAMBA ENTRE 2016-2024



**Figura 09:** Gráfico de precipitaciones durante el 2016 - 2024

La figura 09 se evidencia una variabilidad notable en la precipitación anual de Apolobamba. Entre 2016 y 2018 la lluvia aumenta progresivamente hasta alcanzar su valor más alto en 2018 (1428.62 mm). Luego disminuye en 2020 (1009 mm) y vuelve a mostrar un pico importante en 2021 (1410.91 mm). Después de ese año, la precipitación

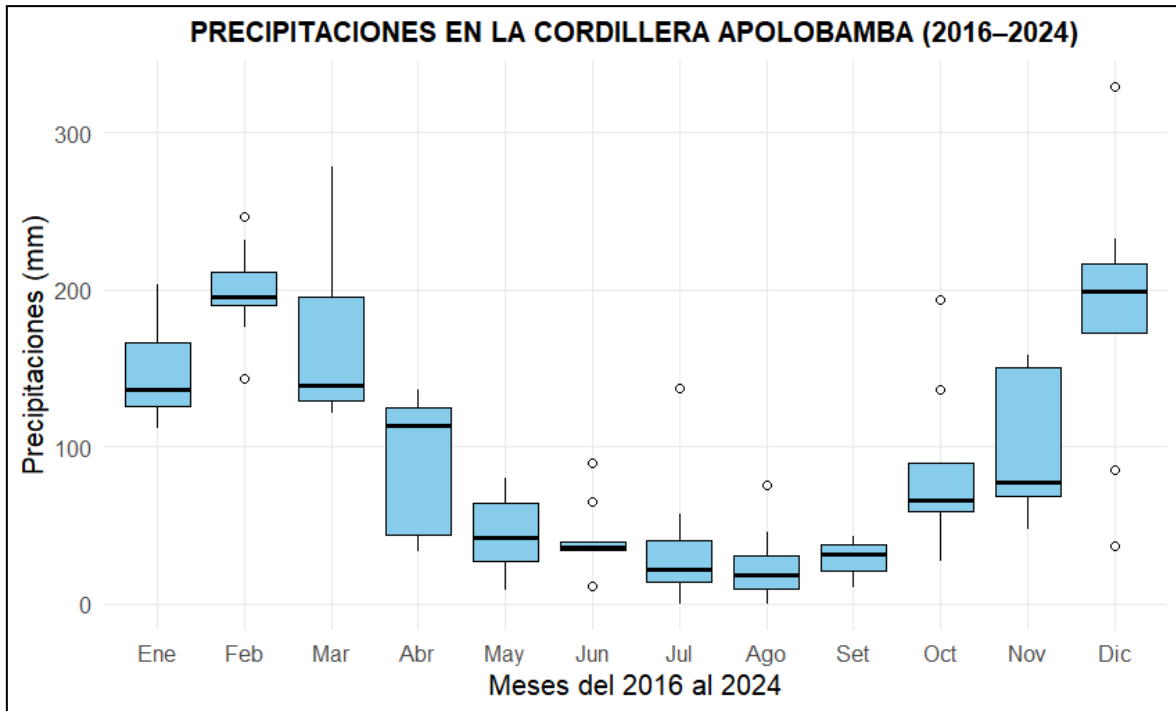
desciende nuevamente, presentando su valor más bajo en 2024 (829.49 mm). En conjunto, el comportamiento de la serie alterna entre años húmedos y secos sin seguir un patrón lineal o progresivo. A pesar de estas fluctuaciones, la precipitación no muestra una relación directa con la pérdida de superficie glaciar. Incluso en los años de mayor lluvia, como 2018 y 2021, el glaciar continúa reduciéndose, lo que indica que el aporte hídrico no genera una recuperación significativa del hielo. Esta falta de correspondencia coincide con lo señalado por Vuille et al. (2018), quienes sostienen que la dinámica de los glaciares tropicales está fuertemente controlada por la temperatura, mientras que los cambios en la precipitación suelen tener impactos más limitados. De igual manera, Laqui et al. (2023) concluye que en Apolobamba la variabilidad en la precipitación no explica el retroceso reciente.

**Tabla 08:** Estadística descriptiva de precipitaciones, periodo 2016 - 2024.

Variable	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Curtosis
Precipitación (mm)	1,224.0	1,308.4	1,428.6	878.61	226.85	4.77

En la tabla 08, analizando la estadística descriptiva de la precipitación anual en la Cordillera Apolobamba, se observa una media de 1,224.01 mm y una mediana de 1,308.46 mm; que la mediana supere al promedio sugiere la presencia de años secos que empujan la media hacia abajo. La desviación estándar (226.85 mm) indica variabilidad interanual marcada, con registros que se alejan de la media en torno a doscientos milímetros. Los extremos del periodo van de 878.61 mm (año más seco) a 1,428.62 mm (año más lluvioso), lo que confirma un rango amplio de condiciones. La curtosis (4.77) describe una distribución leptocúrtica, es decir, con colas más pesadas y eventos extremos (muy húmedos o muy secos) más frecuentes de lo esperable en una

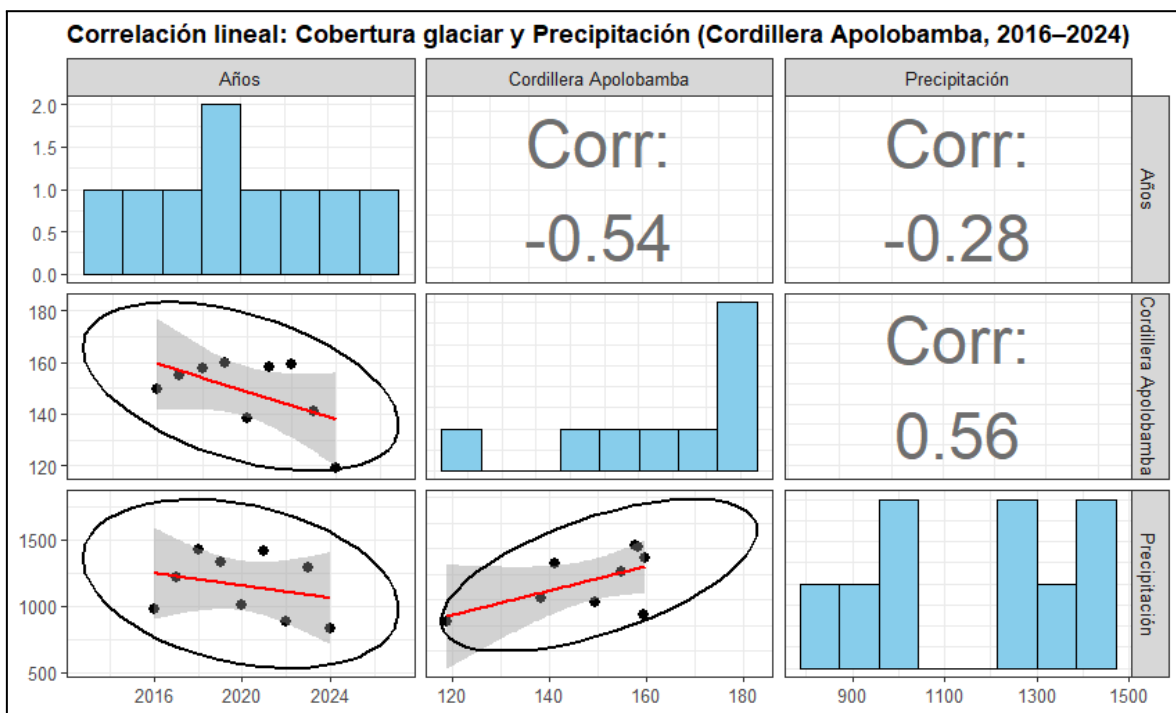
distribución normal. En conjunto, estos indicadores muestran que la precipitación no es estable y alterna años húmedos y secos; por sí sola no permite afirmar un aumento sostenido, por lo que su efecto sobre el balance glaciar debe interpretarse junto con el comportamiento térmico reciente.



**Figura 10:** Boxplot de precipitaciones mensuales durante el 2016-2024

En la figura muestra una marcada estacionalidad en Apolobamba: los meses de enero a marzo concentran las precipitaciones más altas (superando en varios casos los 200 mm), mientras que junio a agosto representan el periodo más seco, con valores generalmente por debajo de 50 mm. Abril, octubre, noviembre y diciembre presentan variabilidad intermedia, evidenciada por cajas más amplias y la presencia de valores atípicos. Esta distribución confirma que la región mantiene un régimen estacional bien definido, con un verano húmedo y un invierno muy seco, aunque la variación de los valores entre años es considerable. A pesar de esta variabilidad mensual marcada, las diferencias en la precipitación no muestran correspondencia con los cambios observados en la cobertura glaciar. Esto coincide con lo expuesto por Vuille et al. (2018) , quienes señalan que en los

Andes tropicales el retroceso glaciar está dominado por el aumento térmico, más que por las fluctuaciones en la precipitación. Asimismo, Laqui et al. (2023) indica que, en Apolobamba, las oscilaciones en el régimen hídrico no explican la magnitud de la pérdida de hielo reciente. Los meses con mayor lluvia —como enero y febrero— no generan una recuperación perceptible del glaciar, mientras que los periodos secos tampoco coinciden necesariamente con un retroceso abrupto. Estos patrones respaldan que, aunque la precipitación presenta una estacionalidad clara, no constituye un factor determinante en la desglaciación.



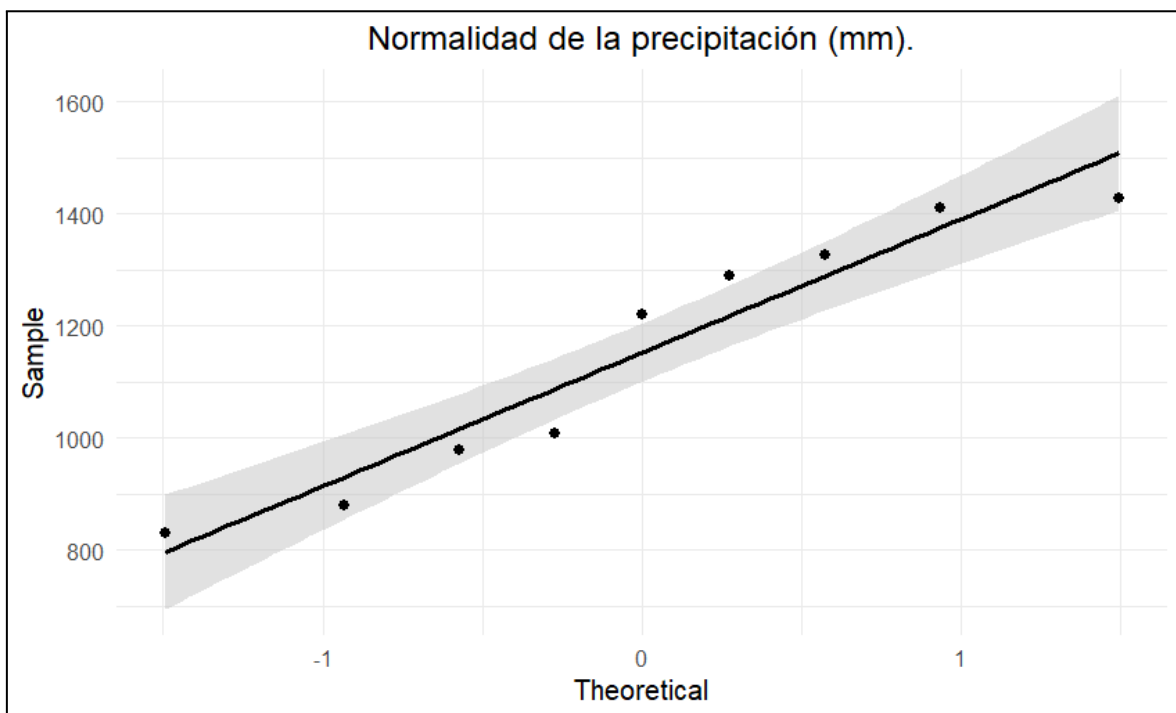
**Figura 11:** Correlación lineal de cobertura glaciar sobre precipitaciones durante 2016-2024

La figura resume tres relaciones clave. Primero, el panel Años vs. Cobertura muestra una nube con pendiente negativa y  $r = -0.54$ : conforme avanza el periodo, la superficie glaciada disminuye de manera apreciable. Segundo, en Años vs. Precipitación la pendiente es ligeramente descendente ( $r = -0.28$ ), señal de una suave reducción de la lluvia a lo largo de los años, con alta variabilidad interanual. Tercero, el cruce Cobertura

vs. Precipitación presenta pendiente positiva ( $r = 0.56$ ): los años más húmedos tienden a acompañarse de mayor área o de pérdidas menos intensas. Los histogramas de la diagonal confirman la asimetría y la presencia de valores extremos, mientras que las líneas rojas y las elipses delimitan la dirección y la dispersión de cada relación. En conjunto, la figura sugiere un retroceso progresivo del glaciar, donde la precipitación actúa como factor atenuante, aunque insuficiente para revertir la tendencia descendente observada en 2016–2024.

**Tabla 09:** Pruebas de normalidad para la variable precipitación del 2016-2024.

Normalidad de las precipitaciones mediante Shapiro–Wilk		
Variable	Estadístico	p-value
Precipitación (mm)	0.903	0.268



**Figura 12:** Gráfico de normalidad para la precipitación.

En la tabla 09 y figura 12, con base en la tabla de Shapiro–Wilk y el gráfico Q–Q, la precipitación (mm) muestra un comportamiento compatible con la normalidad: el estadístico  $W = 0.903$  y el p-valor = 0.268 superan el umbral de 0.05, por lo que no se

rechaza la hipótesis de normalidad; de forma coherente, en la figura los puntos se alinean de manera cercana a la recta teórica, con pequeñas desviaciones en las colas esperables por el tamaño muestral, lo que respalda asumir normalidad.

#### **4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS**

P-valor =  $< \alpha$ , se rechaza la HN (Se acepta la HA).

P-valor =  $> \alpha$ , se acepta la HN (Se rechaza la HA).

Indicando que la hipótesis nula está indicada con (HN) y la hipótesis alterna está indicada con (HA), donde también se indica que el nivel de significancia es  $\alpha = 0.05$ , con un nivel de confianza al 95%.

##### **4.4.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 1**

###### **Formulación de la hipótesis estadística**

HA = La cobertura glaciar de la cordillera Apolobamba ha disminuido con respecto a los periodos 2016 - 2024.

HN = La cobertura glaciar de la cordillera de Apolobamba no ha disminuido con respecto a los periodos 2016 - 2024.

###### **Resultado de la prueba de hipótesis**

En la figura 13, tabla 10, para contrastar la hipótesis sobre el retroceso de la cobertura glaciar, se aplicó una prueba de correlación de Spearman entre el año (variable independiente) y la superficie glaciar en km<sup>2</sup> (variable dependiente), trabajando con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$  por tratarse de una serie corta y posiblemente no normal. El análisis arrojó un coeficiente de Spearman de  $R_s = -0,94$  y un valor  $p = 0,015$ ; al ser este menor que 0,05, se procede a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna, concluyendo que existe una relación inversa fuerte entre el transcurso de los años y la cobertura glaciar, es decir, que la superficie de hielo en la cordillera Apolobamba disminuye de manera estadísticamente significativa en el periodo 2016-2024.

#### 4.4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 2

##### Formulación de la hipótesis estadística

HA = Las altas temperaturas influyen significativamente en el retroceso glaciar de la cordillera Apolobamba entre el (2016 - 2024).

HN = Las altas temperaturas no influyen significativamente en el retroceso glaciar de la cordillera Apolobamba entre el (2016 - 2024).

##### Resultado de la prueba de hipótesis

En la figura 13, tabla 10, en el caso de la temperatura máxima, se estimó la correlación lineal de Pearson entre la cobertura glaciar y la Tmax para el periodo 2016-2024. El coeficiente obtenido fue  $r = -0,73$  con un  $p\text{-value} = 0,03$ , lo que evidencia una asociación negativa y de magnitud alta: conforme aumentan las temperaturas máximas anuales, la superficie glaciar tiende a reducirse. Dado que el valor de  $p$  es menor al nivel de significancia establecido ( $\alpha = 0,05$ ), se descarta la hipótesis nula que planteaba que las altas temperaturas no influyen en el retroceso del glaciar y se respalda la hipótesis alterna, concluyendo que las temperaturas máximas ejercen un efecto estadísticamente significativo sobre la disminución de la cobertura glaciar en la cordillera Apolobamba durante 2016-2024.

#### 4.4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 3

HA = La precipitación no influye significativamente en el retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba entre los periodos (2016-2024).

HN = La precipitación si influye significativamente en el retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba entre los periodos (2016-2024).

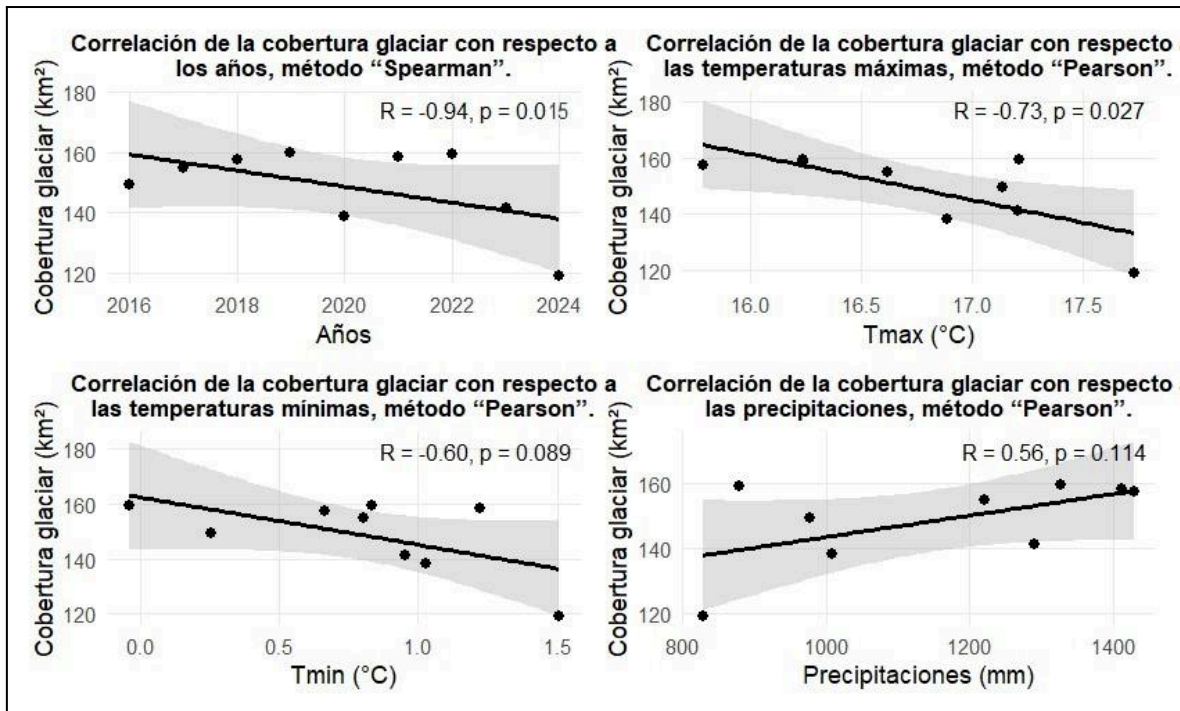
##### Resultado de la prueba de hipótesis

En la figura 13, tabla 10, para analizar la relación entre la precipitación y el retroceso glaciar se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson entre la cobertura glaciar ( $\text{km}^2$ ) y la precipitación anual (mm) para el periodo 2016-2024, considerando un nivel de

significancia de  $\alpha = 0,05$ . El análisis mostró un coeficiente de correlación de  $r = 0,56$  con un  $p\text{-value} = 0,11$ , lo que sugiere una asociación positiva de magnitud moderada, es decir, a mayores valores de precipitación la cobertura glaciar tendería a ser ligeramente mayor. Sin embargo, al ser el valor de  $p$  superior a  $0,05$ , esta relación no alcanza significancia estadística, por lo que no se cuenta con evidencia suficiente para afirmar que la precipitación influya de manera significativa en el retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba durante el periodo estudiado.

**Tabla 10:** Matriz de correlación de Pearson de las variables.

<b>Correlaciones de las variables independientes y dependientes mediante Pearson</b>					
<b>Variable</b>	<b>Métrica</b>	<b>Cobertura glaciar</b>	<b>Tmax</b>	<b>Tmin</b>	<b>Precipitación</b>
Cobertura_glacia r	Método Pearson	1	-0.73	-0.60	0.56
	p-value	<2e-16	0.03	0.09	0.11
Tmax	Método Pearson	-0.73	1	0.04	-0.85
	p-value	0.03	<2e-16	0.92	0.00
Tmin	Método Pearson	-0.60	0.04	1	0.19
	p-value	0.09	0.92	<2e-16	0.63
Precipitación	Método Pearson	0.56	-0.85	0.19	1
	p-value	0.11	0.00	0.63	<2e-16



**Figura 13:** Correlación de la variable independiente con respecto a la variable dependiente

## CONCLUSIONES

**PRIMERA:** El análisis multitemporal realizado en la Cordillera Apolobamba durante el período 2016–2024 permitió determinar un retroceso glaciar sostenido y significativo, evidenciado por la disminución progresiva de la cobertura de hielo y la fragmentación espacial de los glaciares. Asimismo, se estableció que la dinámica del retroceso glaciar se encuentra estrechamente relacionada con el incremento gradual de las temperaturas máximas y mínimas, las cuales actúan como un factor determinante en la pérdida de masa glaciar. En contraste, la variabilidad de la precipitación no mostró una relación significativa con los cambios en la cobertura glaciar, lo que indica que, durante el período evaluado, esta variable no ejerce una influencia directa en la dinámica glaciar de la Cordillera Apolobamba.

**SEGUNDA:** La evaluación multitemporal realizada en la Cordillera Apolobamba evidencia un retroceso glaciar sostenido durante el periodo 2016–2024. A lo largo de estos años, la superficie de hielo experimenta una disminución constante, reflejada en la tendencia descendente de la regresión lineal y en la progresiva fragmentación y retracción observada en los mapas NDSI, donde el glaciar tiende a reducir su continuidad y a desplazarse hacia zonas más elevadas. En conjunto, el análisis confirma que la pérdida glaciar es significativa y mantiene un comportamiento de reducción acelerada en la fase final del periodo estudiado.

**TERCERA:** El comportamiento térmico durante los años analizados revela un incremento gradual en las temperaturas máximas y mínimas, lo que coincide con una disminución más acentuada del área glaciar. Las correlaciones estadísticas establecen una relación

inversa marcada entre ambas variables, donde el calentamiento atmosférico favorece procesos de fusión y limita la permanencia del hielo. De este modo, el análisis sustenta que la temperatura constituye un factor determinante en la dinámica de retroceso glaciar observada en la cordillera.

**CUARTA:** La variabilidad de la precipitación registrada en el periodo evaluado refleja un comportamiento irregular que no guarda correspondencia con los cambios en la cobertura glaciar. Las correlaciones aplicadas ponen en evidencia la ausencia de una relación significativa entre ambos elementos, ya que los años con mayor aporte hídrico no propician una recuperación del hielo ni una ralentización del retroceso. En consecuencia, los resultados permiten establecer que la precipitación no ejerce una influencia directa en la dinámica glaciar de la Cordillera Apolobamba.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda al Ministerio del Ambiente (MINAM) incorporar los resultados del retroceso glaciar observado en la Cordillera Apolobamba en los procesos de formulación de políticas públicas, estrategias de adaptación al cambio climático y planes de gestión ambiental a nivel regional y nacional. La evidencia del retroceso glaciar asociado principalmente al incremento de la temperatura, y no de manera directa a la variabilidad de la precipitación, resalta la necesidad de fortalecer acciones orientadas a la mitigación de los efectos del calentamiento climático y a la planificación territorial en zonas de alta montaña, con el fin de reducir la vulnerabilidad ambiental y socioeconómica de los ecosistemas andinos.
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), Se recomienda incorporar el análisis de las tendencias térmicas en futuras investigaciones sobre la dinámica glaciar, considerando que el incremento sostenido de las temperaturas máximas y mínimas influye de manera directa en el retroceso de la cobertura glaciar. Asimismo, se sugiere integrar estos resultados en evaluaciones de vulnerabilidad climática y planificación ambiental en la cordillera Apolobamba.
- Se recomienda al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) incorporar de manera sistemática el análisis de las tendencias térmicas en futuras investigaciones sobre la dinámica glaciar en la cordillera Apolobamba, considerando que el incremento sostenido de las temperaturas

máximas y mínimas influye de forma directa en el retroceso de la cobertura glaciar. Asimismo, se sugiere integrar estos resultados en evaluaciones de vulnerabilidad climática y en procesos de planificación ambiental, con el fin de fortalecer la gestión y conservación de los ecosistemas de montaña.

- Se recomienda al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) continuar evaluando la variabilidad de la precipitación en la cordillera Apolobamba mediante análisis multitemporales, con el fin de profundizar en su comportamiento espacial y temporal. Asimismo, se sugiere considerar la precipitación como una variable complementaria en los estudios de dinámica glaciar, reconociendo que, durante el período evaluado, no se evidenció una influencia directa ni significativa sobre los cambios en la cobertura glaciar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cansaya, G. (2024). *Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Allincapac (cordillera de Carabaya) y su relación con los elementos climáticos, 2018–2023*.  
[https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/890/Guimar\\_Isauro\\_CANSAYA\\_VARA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/890/Guimar_Isauro_CANSAYA_VARA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ccallata, I. K. (2021). Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Salluyo de la cordillera Apolobamba y la influencia de los elementos climáticos, en el período 1985-2020. *Repositorio Institucional - UCV*.  
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60169>
- Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. (2023). *Análisis del proceso de pérdida y retroceso glaciar a nivel nacional y el impacto a nivel regional*. 28.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático*.  
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Decreto Supremo N.º 004-2016-MINAM: Aprueban el ROF del INAIGEM, Pub. L. No. 004-2016-MINAM., Diario Oficial El Peruano. (2016). Firmado en Lima: 2016-07-08; Publicado en El Peruano: 2016-07-09.  
[https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/DS\\_004-2016-MINAM.pdf](https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/DS_004-2016-MINAM.pdf)
- Deza, D. (2024). *Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Ananea, cordillera Apolobamba por influencia de elementos climáticos, período 2015-2023* [Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad Privada San Carlos]. <https://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/797>
- EOS Data Analytics. (2023). *NDSI Índice Diferencial Normalizado de Nieve*.  
<https://eos.com/es/make-an-analysis/ndsi/>
- Figuroa, W. (2024). *Metodología de tipo de muestreo no probabilístico en el cantón Manta* [Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí].

<https://repositorio.uleam.edu.ec/bitstream/123456789/5560/1/ULEAM-ECO-0053.pdf>

González, M., Cardús, A., & Ruiz, M. (2018). Aporte de la teledetección para contenidos curriculares relacionados con el agua en San Juan: Párrafos Geográficos N° 30. *Párrafos Geográficos*, 17(2), 28-41. <https://www.revistas.unp.edu.ar/index.php/parrafosgeograficos/article/view/751>

Huffman, G., David, B., Braithwaite, D., Sorooshian, Soroosh, & Xie. (2020). *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG): Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*. NASA Global Precipitation Measurement (GPM); NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), Greenbelt, MD. [https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-05/IMERG\\_ATBD\\_V06.3.pdf](https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-05/IMERG_ATBD_V06.3.pdf)

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., & Kääb, A. (2021a). 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>

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., & Kääb, A. (2021b). 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>

INAIGEM. (2017). *Manual metodológico de inventario nacional de glaciares*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. <https://hdl.handle.net/20.500.12748/63>

INAIGEM. (2023). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar 2023*. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/Inventario%20Nacional%20de%20Glaciares%202023.pdf>

- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc). (2021). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Inzunza. (2012). *Metereología descriptiva*. studylib.es. <https://studylib.es/doc/5236690/capitulo-4.-temperatura.-la-temperatura--es-la-propiedad-de>
- Laqui, W., Zubieta Barragán, 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*. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01865-5>
- Laqui, W., Zubieta, R., Laqui, Y., Calizaya, E., & Laqui, C. (2024). *Temporal dynamics of glacier retreat and its relationship with local climate in Cordillera Apolobamba, Peru*. 10, 1647-1656. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01865-5>
- Lara, C., Paredes, Á., & Broitman, B. (2020). Efectos del Cambio Climatico sobre los glaciares del complejo volcánico nevados de Chillán. *ResearchGate*. <https://pure.uai.cl/es/publications/efectos-del-cambio-clim%C3%A1tico-sobre-los-glaciares-del-complejo-vol>
- Ley General del Ambiente, Pub. L. No. Ley N.º 28611, Diario Oficial El Peruano (2005). 13/10/2005 <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf>
- Ley N.º 30286, Ley que crea el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña., Pub. L. No. 30286, Diario Oficial El Peruano. (2014). Aprobada por el Congreso: 2014-12-10; Promulgada: 2014-12-12; Publicada en El Peruano: 2014-12-13. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-30286.pdf>

- Mamani, J. (2022). *Relación de la disminución de la cobertura glaciar del nevado ananea con la temperatura y precipitación entre 1985—2021 utilizando la plataforma gee*. Tesis para optar al título de Ingeniero Topógrafo y Agrimensor, Universidad Nacional del Altiplano]. [https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/19050/Mamani\\_Marca\\_Rudy\\_Joel.pdf?sequence=1](https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/19050/Mamani_Marca_Rudy_Joel.pdf?sequence=1)
- Matthews, D., Zhai, Pörtner, Skea, & Waterfield. (2018). *Calentamiento global de 1,5 °C. Informe especial del IPCC*. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). [https://www.weforest.org/blog/opinion/ipcc-global-warming-15-c-special-report-6-oct-2018/?gad\\_source=1&gad\\_campaignid=1499600339&gbraid=0AAAAADrYVLdvWhumOX-G7kiljiT9lvdfv&gclid=Cj0KCQjwnovFBhDnARIsAO4V7mDTatJyYoyUb1gbbMS2NMJmSPx04EDP6yluySRsexlZryXAw0iAf-QaAmGYEALw\\_wcB](https://www.weforest.org/blog/opinion/ipcc-global-warming-15-c-special-report-6-oct-2018/?gad_source=1&gad_campaignid=1499600339&gbraid=0AAAAADrYVLdvWhumOX-G7kiljiT9lvdfv&gclid=Cj0KCQjwnovFBhDnARIsAO4V7mDTatJyYoyUb1gbbMS2NMJmSPx04EDP6yluySRsexlZryXAw0iAf-QaAmGYEALw_wcB)
- MDRAYMA. (2006). *Plan de manejo del Área Natural de Manejo Integrado Nacional Apolobamba. Volumen I*. Ministerio de Desarrollo Rural, Agropecuario y Medio Ambiente. [https://iicstur.files.wordpress.com/2013/04/pm\\_anmi\\_apolobamba.pdf](https://iicstur.files.wordpress.com/2013/04/pm_anmi_apolobamba.pdf)
- Mendizábal, E., & Quispe, O. (2021). Retroceso de los nevados Salkantay, Tucaruay, Humantay y dinámica en las lagunas adyacentes mediante teledetección del período 1991 al 2021, Cusco. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/87014>
- Montoya, N., Loayza, H., Gutiérrez, R. O., Bueno, M., & Quiroz, R. (2024). Estimación de los cambios en el contorno y volumen de los glaciares en los nevados de la Cordillera de Vilcanota, Perú, utilizando series temporales de Landsat y una combinación de imágenes de radar satelital y LIDAR aéreo. *Remote Sensing*, 16(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/rs16203901>

- Moraes, M., Lara, C., Paredes, Á., & Broitman, B. (2020). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 56(1), 5-13. <https://doi.org/10.23854/07199562.2020561.DeMoraes5>
- NASA ARSET. (2023). *Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota)*. [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-02/Fundamentals\\_of\\_RS\\_Span.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-02/Fundamentals_of_RS_Span.pdf)
- Nocua. (2025). *Guía para el cálculo del área glaciar mediante el uso de productos de sensoramiento remoto. Ideam. IDEAM*. [https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/mapa-de-procesos/gci-cg-g001\\_guia\\_para\\_el\\_calculo\\_del\\_area\\_glaciar\\_v3.pdf?utm\\_source.com](https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/mapa-de-procesos/gci-cg-g001_guia_para_el_calculo_del_area_glaciar_v3.pdf?utm_source.com)
- Pillaca, J. C. (2019). *Retroceso glaciar e impacto ambiental*. <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas-Montanas/9.pdf>
- Pinilla, C. (2020). *Teledetección: Teoría y aplicaciones*. [https://www.researchgate.net/publication/341727281\\_teledeteccion\\_teor%C3%ADa\\_y\\_aplicaciones\\_carlos\\_pinilla](https://www.researchgate.net/publication/341727281_teledeteccion_teor%C3%ADa_y_aplicaciones_carlos_pinilla)
- Posit Software. (2022). *Posit*. Posit. <https://rstudio-desktop.softonic.com/>
- QGIS Development Team. (2025). *About QGIS 3.40 (sección introductoria del manual de entrenamiento, que funciona como prefacio general)*. [https://docs.qgis.org/3.40/pdf/es/QGIS-3.40-TrainingManual-es.pdf?utm\\_source.com](https://docs.qgis.org/3.40/pdf/es/QGIS-3.40-TrainingManual-es.pdf?utm_source.com)
- Quispe, R. J. (2024). *Aplicación de sensores remotos para la estimación de la cobertura glaciar del nevado Allincajac (1970—2022), distrito de Macusani – Carabaya*. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22094>
- Ramirez, J., & Callegas, P. (2020). *Investigacion, Paradigma, Métodos, Enfoques de Investigacion, Cualitativa y Cuantitativa, Tecnica, Instrumentos*.

- <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=W67WDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA8&dq=Investigaci%C3%B3n+No+Experimenta+libro&ots=hR6cCVq1NB&sig=dxboEMzvww0DtDGUWHIK1zDFuos#v=onepage&q&f=false>
- Roca, J. (2022). *Variables climáticas y cobertura nival del nevado Sara Sara, región Ayacucho. Periodo 1985-2020* [Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga].
- <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/864cd3bf-3a56-45e8-b161-005c54cd0777>
- Salinas, R., & Valdez, L. (2024). *Análisis de la disminución de glaciares en los nevados del altiplano de Puno y su relación con los cambios de temperatura entre 1986 y 2022*. [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte].
- [https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/11537/38692/1/TESIS\\_SALINASROSSEL\\_YN\\_VALDEZLUIS\\_PDF\\_TOTAL.pdf](https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/11537/38692/1/TESIS_SALINASROSSEL_YN_VALDEZLUIS_PDF_TOTAL.pdf)
- Seehaus, T., Maíz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Cambios en los glaciares tropicales del Perú entre 2000 y 2016—Balance de masa y fluctuaciones del área. *The Cryosphere*, 13(10), 2537-2556.
- <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Soto, C., Zuñiga, J. J., Paucar, J., Jiménez, W., Ibarra, M. J., Narváez, A., & Paucar, S. (2022). Análisis multitemporal del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales Landsat en el Santuario Nacional Nevado del Ampay, Perú. *[Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems]*, [10]([1]), [1]-[15]. <https://www.sdewes.org/jsdewes/paper.php>
- Vilca, O., & Bustinza, V. (2018). *Estudio de peligros de origen glaciar: Subcuenca Huari Huari, Cordillera Apolobamba* (No. LV01). Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Elison Timm, O., Condom, T., Salzmann, N., & 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>
- Zalazar, L., Ferri, L., Castro, M., Gargantini, H., Giménez, M., Pitte, P., Ruiz, L., Masiokas, M., & Villalba, R. (2020). Glaciares de Argentina: Resultados Preliminares del Inventario Nacional de Glaciares. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 2. <https://doi.org/10.36580/rgem.i2.13-22>
- Zekollari, H., Huss, M., Schuster, L., Maussion, F., Rounce, D. R., Aguayo, R., Champollion, N., Compagno, L., Hugonnet, R., Marzeion, B., Mojtabavi, S., & Farinotti, D. (2024). Twenty-first century global glacier evolution under CMIP6 scenarios and the role of glacier-specific observations. *The Cryosphere*, 18(11), 5045-5066. <https://doi.org/10.5194/tc-18-5045-2024>



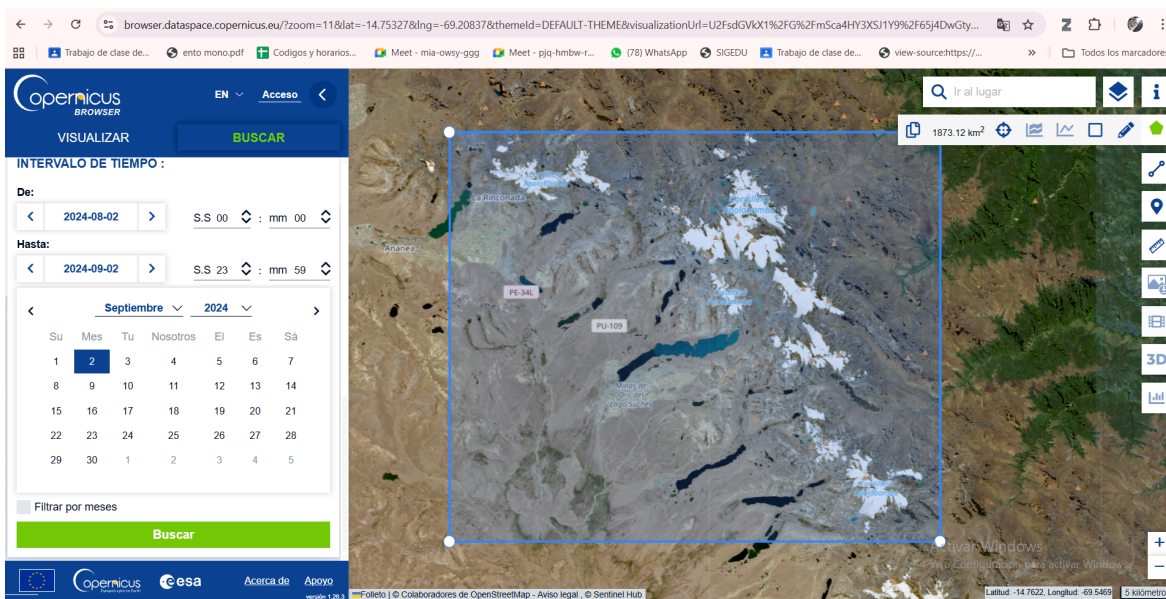
## ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

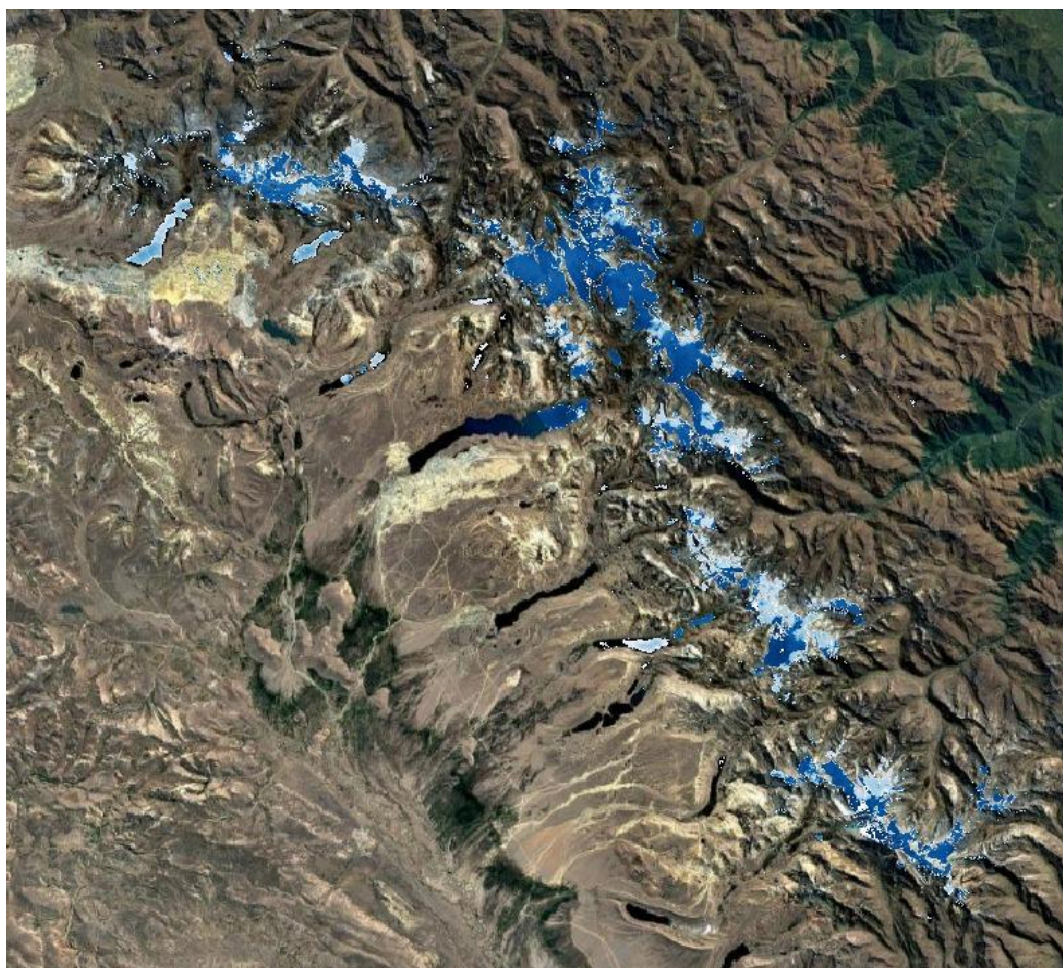
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DE DATOS
<p><b>General</b> ¿En qué medida ha retrocedido la cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba y cómo se relaciona ese retroceso con las variables climáticas en el período (2016-2024)?</p> <p><b>Específicos</b> → ¿Cuanto es la variación de la cobertura glaciar generado en los últimos 8 años en la cordillera Apolobamba en el período (2016-2024)? → ¿Qué relación estadística existe entre el retroceso</p>	<p><b>General</b> Determinar el retroceso glaciar de la Cordillera Apolobamba y su relación con variables climáticas durante el período (2016-2024).</p> <p><b>Específicos</b> → Determinar el retroceso de la cobertura glaciar en los últimos 20 años en intervalos de (4 años) de la cordillera Apolobamba en el período de (2016-2024). → Determinar la relación entre el retroceso glaciar y la temperatura en la cordillera Apolobamba</p>	<p><b>General</b> El retroceso de la cobertura glaciar de la cordillera Apolobamba es significativo por la influencia de las variables climáticas en el período (2016 - 2024).</p> <p><b>Específicos</b> La cobertura glaciar de la cordillera Apolobamba ha disminuido en el período (2016 - 2024) Las altas temperaturas influyen significativamente en el retroceso glaciar de la cordillera Apolobamba entre el (2016 - 2024).</p>	<p><b>Independiente (VI):</b> Influencia de los variables climáticos (precipitación y temperatura) <b>Dependiente (VD):</b> Retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba</p>	<p><b>Temperatura</b> - Mensual - Anual - Mínimas - Máximas <b>Precipitaciones</b> - Mensual - Anual</p> <p><b>Área</b> -km<sup>2</sup></p>	<p><b>Programa de computacionales</b> R.Studio (v4.3.1) Software QGis (v3.38.0) <b>Portal (Power nasa)</b> información meteorológica desde el año 2016-2024</p>	<p>Imágenes aéreas satelitales LANSAD <b>Tipo de Investigación</b> - Descriptivo y correlación al Aplicado de enfoque cuantitativo <b>Diseño de investigación</b> - No experiment al <b>Método</b> -Deductivo -Inductivo <b>Población y Muestra</b> -Cordillera Apolobamba</p>

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	TÉCNICA DE PROCESAMIENTO O DE DATOS
<p>glaciar y la temperatura del aire en la cordillera Apolobamba durante en el período (2016-2024)?</p> <p>→ ¿Qué relación estadística existe entre el retroceso glaciar y la precipitación en la cordillera Apolobamba durante en el período (2016-2024)?</p>	<p>en el periodo de (2016-2024).</p> <p>→ Evaluar la relación entre el retroceso glaciar y la precipitación en la cordillera Apolobamba en el periodo de (2016-2024).</p>	<p>El aumento de las precipitaciones no influye significativamente en el retroceso glaciar en la cordillera Apolobamba entre los periodos (2016-2024).</p>				

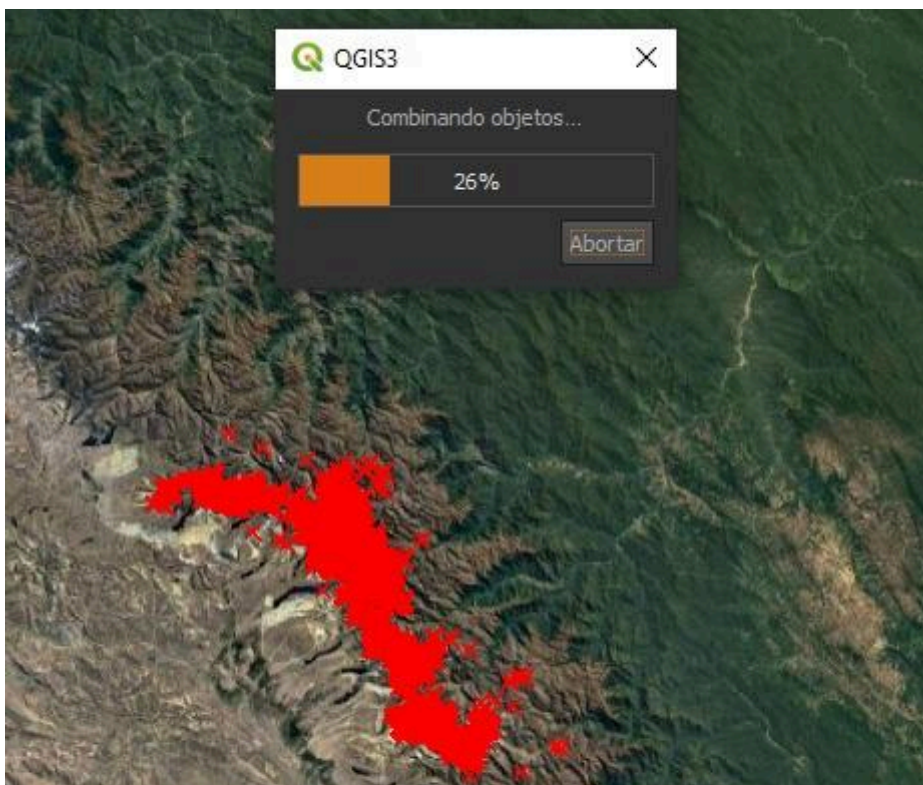
## Anexo 02: Descarga de Imágenes Satelitales en USGS Earth Explorer



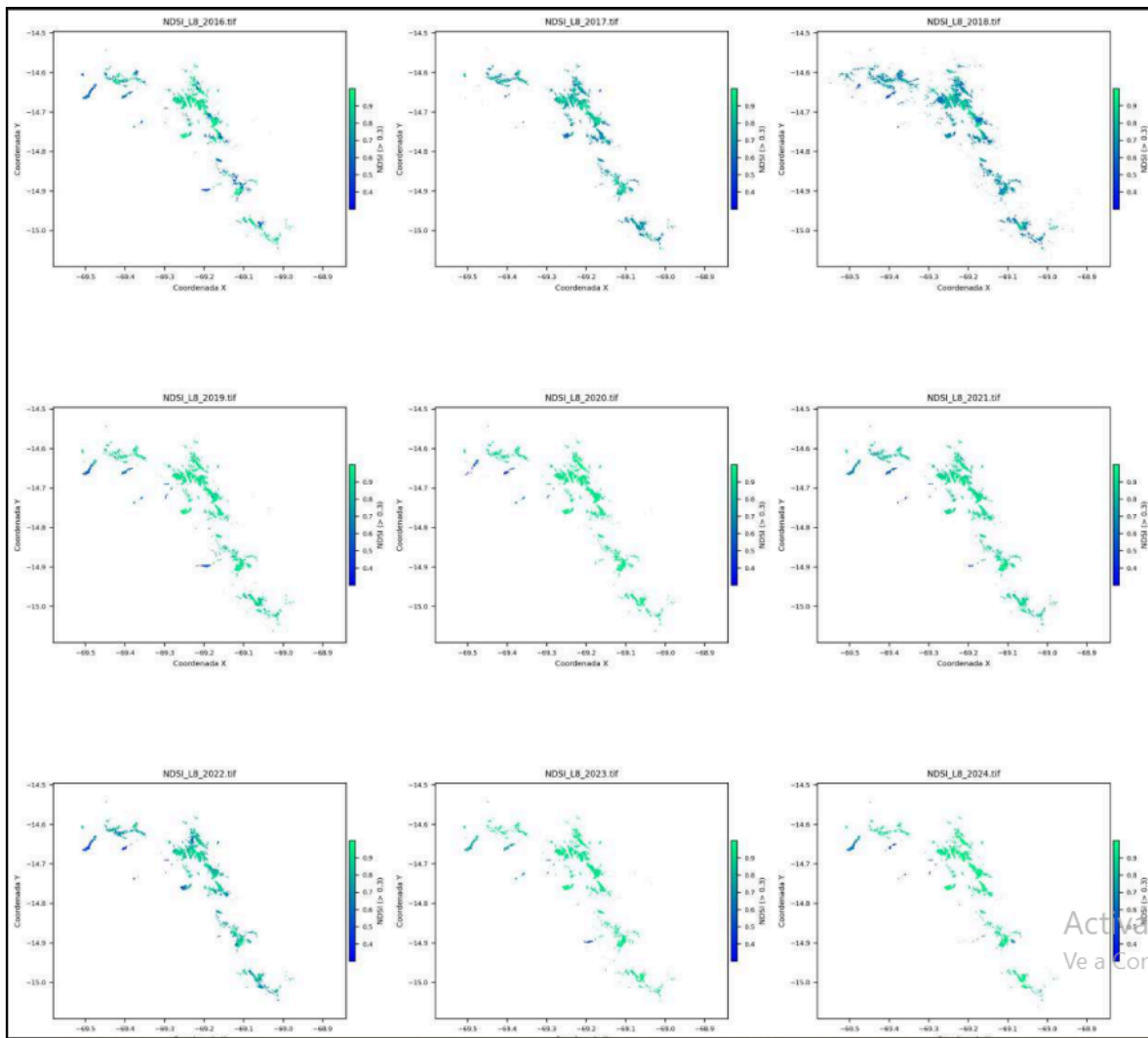
## Anexo 03: Superficie de hielo y nieve en la Cordillera Apolobamba según el índice NDSI



**Anexo 04:** Muestra el proceso de combinación y unificación de polígonos glaciares dentro del software QGIS.



### Anexo 05: Resultado de NDSI de la cordillera Apolobamba



### Anexo 06: La tabla de datos climáticos descargados desde la plataforma NASA POWER

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
2	PRECTOTCOR	2016	125.88	205.88	135.38	113.57	27.72	33.66	36.3	30.73	37.39	90.08	55.62	85.09	977.3
3	PRECTOTCOR	2017	135.14	143.34	221.65	122.17	74.94	36.74	0.15	45.51	32.02	78.88	113.39	216.89	1220.82
4	PRECTOTCOR	2018	200.65	192.62	195.48	85.21	63.77	36.07	22.07	76.04	38.89	193.96	151.78	172.08	1428.62
5	PRECTOTCOR	2019	136.57	195.07	139.05	136.82	79.78	39.95	40.0	0.01	21.47	59.2	150.25	329.16	1327.33
6	PRECTOTCOR	2020	118.41	231.84	121.14	44.08	8.92	35.95	57.01	27.95	24.59	65.68	73.14	200.29	1009.0
7	PRECTOTCOR	2021	203.25	246.8	152.42	132.72	22.77	65.41	14.23	7.09	37.82	136.84	158.76	232.8	1410.91
8	PRECTOTCOR	2022	112.09	176.34	128.94	33.09	26.85	11.09	16.75	18.56	42.97	65.62	47.07	199.24	878.61
9	PRECTOTCOR	2023	166.3	189.84	278.6	125.01	61.12	33.93	137.64	12.58	10.29	27.16	68.19	178.94	1289.6
10	PRECTOTCOR	2024	146.33	211.19	129.64	38.56	42.58	89.89	3.44	9.31	13.98	30.99	77.09	36.49	829.49
11	T2M_MAX	2016	17.78	16.44	18.79	17.85	16.39	16.28	15.78	16.3	17.25	16.24	18.01	18.52	18.79
12	T2M_MAX	2017	16.21	16.44	16.1	15.56	16.13	16.35	16.11	16.68	16.27	18.9	17.0	17.69	18.9
13	T2M_MAX	2018	15.68	14.71	14.78	15.56	15.35	14.81	15.77	15.09	17.09	16.33	17.58	16.73	17.58
14	T2M_MAX	2019	15.86	15.4	15.75	17.14	16.06	15.5	17.24	16.23	16.49	16.61	17.03	15.57	17.24
15	T2M_MAX	2020	17.18	15.75	15.75	17.63	16.27	16.19	15.92	16.35	16.37	19.57	18.05	17.6	19.57
16	T2M_MAX	2021	16.94	15.35	15.26	15.84	16.02	15.77	14.77	16.75	15.78	19.89	16.11	16.35	19.89
17	T2M_MAX	2022	18.1	14.54	15.58	17.09	15.67	15.64	16.91	18.17	18.81	17.89	19.26	18.88	19.26
18	T2M_MAX	2023	17.16	16.82	15.85	16.31	16.83	15.12	17.3	17.43	17.95	18.89	20.26	16.56	20.26
19	T2M_MAX	2024	17.9	16.73	16.65	18.31	17.28	17.25	15.95	18.24	17.94	18.76	19.38	18.36	19.38
20	T2M_MIN	2016	1.18	3.76	1.39	0.02	-1.38	-0.8	-1.1	-2.21	0.07	-0.17	1.08	1.23	-2.21
21	T2M_MIN	2017	2.09	2.3	0.21	0.88	1.16	-0.84	-1.59	-1.35	1.03	-2.09	3.71	4.15	-2.09
22	T2M_MIN	2018	1.94	0.92	3.58	0.13	-1.28	-0.88	-1.49	-1.0	-2.25	3.04	3.33	1.95	-2.25
23	T2M_MIN	2019	3.49	3.8	3.52	0.85	-0.19	-1.02	-0.6	-1.63	0.55	-1.74	-0.21	3.18	-1.74
24	T2M_MIN	2020	3.6	3.98	1.92	1.47	-1.23	-1.36	-1.58	-0.43	0.06	0.49	2.01	3.43	-1.58
25	T2M_MIN	2021	3.47	3.24	0.2	2.55	0.22	0.55	0.02	0.27	0.58	0.04	2.44	3.22	0.02

## Anexo 07: Prueba de normalidad en R

```
> shapiro_test(base$GLACIER)
# A tibble: 1 × 3
  variable      statistic p.value
  <chr>         <dbl>   <dbl>
1 base$GLACIER  0.818  0.0330
> shapiro_test(base$PRECIP)
# A tibble: 1 × 3
  variable      statistic p.value
  <chr>         <dbl>   <dbl>
1 base$PRECIP   0.903  0.268
> shapiro_test(base$Tmax)
# A tibble: 1 × 3
  variable      statistic p.value
  <chr>         <dbl>   <dbl>
1 base$Tmax     0.920  0.393
> shapiro_test(base$Tmin)
# A tibble: 1 × 3
  variable      statistic p.value
  <chr>         <dbl>   <dbl>
1 base$Tmin     0.965  0.849
```