

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES



Tesis

Retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas del Nevado

Ausangate – Cusco en el periodo 1986 – 2023

Asesor

Mag. Choquevilca Lira, Walter Florencio

Autor

Zaa Castro, Magaly

Para optar el Título Profesional de

Ingeniero Ambiental

Cusco - Cusco – Perú

2024



**ACTA DE SUSTENTACIÓN ORAL DE LA TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**

Modalidad de Titulación: Presentación, Sustentación y Aprobación de Tesis Profesional.

En la ciudad del Cusco siendo las 11:00 horas del día 16 de septiembre del año dos mil veinticuatro, en concordancia con el Reglamento General de Grado Académico y Título de la Universidad Tecnológica de los Andes, y en mérito a la RESOLUCIÓN SUB DIRECTORAL Nº 110-2024-UTEA-FI-EPIARN-SD del 06 de septiembre del 2024, se realiza el acto académico de sustentación de la tesis, intitulada “**RETROCESO GLACIAR Y SU RELACIÓN CON LA FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAGUNAS DEL NEVADO AUSANGATE – CUSCO EN EL PERÍODO 1986 – 2023**”, presentado por la Bachiller señorita ZAA CASTRO MAGALY; como Asesor del trabajo de investigación Mg. Choquevilca Lira, Walter Florencio.

Habiéndose nombrado a los Miembros del Jurado con RESOLUCIÓN SUB DIRECTORAL Nº 110-2024-UTEA-FI-EPIARN-SD, el cual está conformada por los señores Docentes:

- Presidente : Mg. Cynthia Cecilia Arrieta Concha
- Replicante : Mg. Ángela Fiorella Sota Cano.
- Dictaminante : Mg. José Salustio Pozo Gonzales.

El acto académico se realiza de la siguiente manera:

Primero: el docente secretario designado dio lectura de la RESOLUCIÓN SUB DIRECTORAL Nº 110-2024-UTEA-FI-EPIARN-SD en el que se señala la fecha y hora y el jurado correspondiente para la sustentación de la tesis antes mencionada, así como el artículo 19 del Reglamento General de Grados Académicos y títulos de la Universidad Tecnológica de los Andes.

Segundo: se procedió con la sustentación de la tesis por la señorita Bachiller aspirante al Título de Ingeniero Ambientales y Recursos Naturales.


Tercero: se procedió con las preguntas y repreguntas por parte del jurado calificador quienes en una ficha de observaciones hacen conocer por escrito sus apreciaciones y observaciones al trabajo de investigación (tesis).


Cuarto: El Presidente del jurado invita a la señorita Bachiller y al público en general para que se sirvan desocupar el salón de grados para que el jurado dilucide las calificaciones y determine la nota calificadora de la aspirante al Título Profesional.


Quinto: culminada con la calificación de parte de los señores integrantes del jurado se da a conocer públicamente la nota obtenida por la señorita Bachiller, la misma que fue de 17 diecisiete puntos.


El presidente del jurado calificador hará llegar a la Bachiller las fichas de observaciones del jurado para que puedan levantar las observaciones en los plazos previstos.

Siendo las 12:20 horas se dio por concluido el acto de sustentación, firmando los señores integrantes del jurado y la señorita Bachiller en señal de conformidad.


.....
Mg. Cynthia Cecilia Arrieta Concha
Presidente


.....
Mg. Ángela Fiorella Sota Cano
Replicante


.....
Mg. José Salustio Pozo Gonzales
Dictaminante


.....
Bach. Magaly Zaa Castro

Retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas del Nevado Ausangate – Cusco, en el periodo 1986 – 2023.doc

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	5%
2	repositorio.inaigem.gob.pe Fuente de Internet	4%
3	www.repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	3%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
5	Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
6	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	1%
8	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	1%

Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y nombres	: Zaa Castro, Magaly
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 72148572
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0005-5626-9329
Datos del Asesor	
Apellidos y nombres	: Mag. Choquevilca Lira, Walter Florencio
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 23829600
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0002-2144-5781
Datos de la Investigación	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	: Calidad Ambiental
Rango de años en que se realizó la investigación	: septiembre 2023 – julio 2024
Fuente de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 24%
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Dedicatoria

A mi querida madre, Grimalda Castro,
por brindarme su amor incondicional y
ser ejemplo de lucha de perseverancia.

Ahora desde el cielo, me cuida y protege.

A mi padre, Amílcar Zaa, por darme la
mejor herencia que una persona puede
desear: la educación, el apoyo moral y la
enseñanza de valores que me hacen una
mejor persona cada día.

A mis hermanos Yeny, Florencio,
Cristian y Rufo, por sus consejos, afecto
y comprensión en todo momento.

A Willian Araujo, por su amor
incondicional, comprensión y apoyo, en
cada momento desde que la conocí.

Con amor, Magaly

Agradecimiento

Agradecerle de manera especial, a mi asesor de tesis, el Mag. Walter F. Choquevilca Lira, por haberme corregido, guiado y asesorado a lo largo de los estudios y en la finalización de la tesis de investigación.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi amigo Artemio, por sus valiosos consejos, sugerencias y, sobre todo, por su leal y sincera amistad, que han sido fundamentales para el desarrollo de mi investigación.

De igual forma, a mi co-asesor, el Ing. Ricardo E. Vila Garrafa, por su disposición para absolver mis dudas y apoyo constante.

Con amor, Magaly

Resumen

El retroceso glaciar acelerado está afectando a los ecosistemas adyacentes debido a la pérdida de cobertura glaciar y su impacto en la disponibilidad de agua. Bajo esta circunstancia, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas en el Nevado Ausangate, en el periodo 1986 - 2023. A través de las imágenes Satelitales de Landsat 5 y 8 y Sentinel-2, se hizo un análisis multitemporal. Para tal fin se desarrolló un proceso semiautomático con los índices de bandas, Índice Normalizado de Diferencia de Nieve e Índice Normalizado de Diferencia de Agua (ambos por sus siglas en inglés NDSI y NDWI), con la finalidad de determinar los cambios de superficie glaciar, número y superficie de lagunas. Los resultados demuestran que el Nevado Ausangate presentó un retroceso de 46.83 % en los último 37 años (1986 – 2023). Al inicio del período de estudio en (1986) se identificó 15 lagunas, con una superficie de 0.98 km² y en el 2023 se registraron 32 lagunas con una superficie de 2.8 km². Lo que implica que se formaron 17 nuevas lagunas y se incrementó 1.81 km² de la superficie de lagunas de origen glaciar. En conclusión, el Nevado Ausangate experimenta un retroceso constante debido al aumento de las lagunas glaciares, lo que está estrechamente relacionado con la reducción de la superficie glaciar.

Palabras claves: Retroceso glaciar, glaciar cubierto por detrito, análisis multitemporal, lagunas de origen glaciar, evolución de lagunas de origen glaciar.

Abstract

Due to the accelerated glacial retreat experienced in recent decades, loss of glacier cover is affecting other components of adjacent ecosystems due to their water relationship. Under these circumstances, the purpose of this research was to evaluate glacier melt retreat and its relationship with the formation and evolution of lagoons in the Nevado Ausangate, in the period 1986 - 2023. Using the satellite images from Landsat 5 and 8 and Sentinel-2, a multitemporal analysis was made. For this purpose, a semi-automatic process was developed with the band indices, Normalized Snow Difference Index and Normalized Water Difference Index (both NDSI and NDWI), in order to determine changes in glacier surface, number and area of lagoons. The results show that the Nevado Ausangate showed a 46.83% decline in the last 37 years (1986 - 2023). At the beginning of the study period (1986) 15 gaps were identified, with an area of 0.98 km² and in 2023, 32 lagoons with an area of 2.8 km² were recorded. This means that 17 new lagoons were formed and the surface of glacier lagoons increased by 1.81 km². In conclusion, Nevado Ausangate is experiencing a steady decline due to the increase of glacial lagoons, which is closely related to the reduction of the glacier surface.

Keywords: Glacier retreat, debris-covered glacier, multitemporal analysis, glacier lagoons and glacier lagoons evolution.

Índice

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
Índice	ix
Índice de tablas	xii
Índice de figuras	xiii
Acrónimos	xv
I. Introducción	16
II. Planteamiento del problema	18
2.1. Descripción y formulación del problema.....	18
2.2. Objetivos de la Investigación.....	21
2.2.1. Objetivo General.....	21
2.2.2. Objetivo Especifico.....	21
2.3. Justificación e importancia	22
2.4. Variables.....	25

III.	Marco Teórico.....	26
	3.1. Antecedentes.....	26
	3.1.1. A nivel internacional	26
	3.1.2. A nivel nacional	28
	3.1.3. A nivel regional y local.....	31
	3.2. Bases teóricas.....	32
	3.2.1. Glaciares: Conceptos generales	32
	3.2.2. Los glaciares tropicales.....	33
	3.2.3. Balance de masa glaciar.....	36
	3.2.4. Clasificación de los glaciares tropicales	39
	3.2.5. Retroceso glaciar.....	40
	3.2.6. Formación de laguna glaciares	47
	3.2.7. Evolución de lagunas glaciares.....	52
	3.3. Definición de términos.....	55
IV.	Metodología.....	58
	4.1. Tipo y nivel de investigación	58
	4.2. Ámbito temporal y espacial	59
	4.2.1. Ámbito temporal.....	59
	4.2.2. Ámbito Espacial.....	59
	4.3. Población y Muestra	64
	4.4. Instrumentos.....	64

4.5. Procedimientos.....	64
4.5.1. Fase 1: Recopilación de datos cartográficos y satelitales	66
4.5.2. Fase 2: Preprocesamiento de imágenes	69
4.5.3. Fase3: Procesamiento y análisis multitemporal.....	73
4.5.4. Fase 4: Obtención de parámetros.....	85
4.6. Análisis de datos	85
4.7. Consideraciones éticas	85
V. Resultados y discusión	86
5.1. Resultados	86
5.1.1. Objetivo general: Retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas del Nevado Ausangate.....	86
5.2. Discusión de resultados.....	101
5.2.1. Objetivo general: Retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas del Nevado Ausangate.....	101
VI. Conclusiones	109
VII. Recomendaciones.....	111
VIII. Referencias.....	113
IX. Anexos.....	135

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Clasificación del Nevado Ausangate</i>	33
Tabla 2	<i>Registro de precipitación y temperatura</i>	62
Tabla 3	<i>Características de las escenas Landsat utilizadas en el estudio</i>	67
Tabla 4	<i>Características de escenas Sentinel2 que se emplearon en la investigación</i>	68
Tabla 5	<i>Datos del ALOS-PALSAR DEM</i>	69
Tabla 6	<i>Umbrales e NDSI para las escenas Landsat</i>	74
Tabla 7	<i>Umbrales de NDSI para las escenas Sentinel-2</i>	74
Tabla 8	<i>Umbrales de NDWI para las imágenes de Landsat 5 y 8</i>	80
Tabla 9	<i>Umbrales de NDWI para las escenas Sentinel-2</i>	81
Tabla 10	<i>Superficie y porcentaje del retroceso glaciar del Nevado Ausangate (1986 – 2023)</i>	93
Tabla 11	<i>Tasa de cambio anual de la superficie glaciar del Nevado Ausangate</i>	94
Tabla 12	<i>Inventario de lagunas de origen glaciar del Nevado Ausangate al 2023</i>	95
Tabla 13	<i>Variación en el número total de lagunas y de nuevas lagunas, así como, las tasas de incremento por periodo y anual en porcentaje</i>	97
Tabla 14	<i>Variación de la superficie total de lagunas de origen glaciar, tasa de incremento por periodo y tasa de incremento anual.</i>	98
Tabla 15	<i>Superficie glaciar tasa de reducción por periodo y tasa de reducción anual (1986 – 2023)</i>	99

Índice de figuras

Figura 1 <i>Delimitación y distribución de los Glaciares en los Trópicos de acuerdo con los</i>	35
Figura 2 <i>Comparación de los regímenes glaciares internos y externos</i>	36
Figura 3 <i>Subsistema del glaciar</i>	38
Figura 4 <i>Retroceso glaciar a nivel nacional de 1962-2020</i>	44
Figura 5 <i>Presencia de carbono negro en el Nevado Ausangate 2023</i>	45
Figura 6 <i>Mapa de ubicación del Nevado Ausangate</i>	60
Figura 7 <i>Valeriana nivalis, especie encontrada en el Nevado Ausangate</i>	61
Figura 8 <i>Diagrama de proceso y manejo de insumos técnicos</i>	66
Figura 9 <i>Escalamiento de imagen Landsat 5 (1989)</i>	70
Figura 10 <i>Imagen Landsat 5</i>	70
Figura 11 <i>Imagen de Landsat 5</i>	71
Figura 12 <i>Imagen compuesta (1989)</i>	72
Figura 13 <i>Se visualizan a) imagen sin escalar, b) imagen escalada</i>	72
Figura 14 <i>Herramienta utilizada en el cálculo del Índice Diferencial Normalizado de Nieve</i>	75
Figura 15 <i>Llenado de campo para la herramienta Raster Calculator</i>	76
Figura 16 <i>Información de ingreso en el campo de la herramienta Reclassify</i>	77
Figura 17 <i>La imagen a) en formato ráster sin reclasificar y la imagen b) reclasificada</i> ...77	
Figura 18 <i>Llenado de campo para de la herramienta Raster to Polygon</i>	78
Figura 19 <i>Conversión del formato raster al formato shapefile tipo polígono</i>	78
Figura 20 <i>Glaciar cubierto de detrito del Nevado Ausangate 2023</i>	79
Figura 21 <i>a) Presencia de sombra como cobertura glaciar b) combinación de banda RGB: 321 color natural</i>	83

Figura 22 a) <i>Combinación de banda RGB: 752 falso color b) combinación de banda RGB: 543 color de nieve</i>	83
Figura 23 <i>Nevado Ausangate, glaciar libre de detrito a), glaciar cubierto por detrito b).</i>	82
Figura 24 <i>Correlación (R^2) entre el retroceso glaciar con la formación de lagunas de origen glaciar</i>	86
Figura 25 <i>Correlación (R^2) entre el retroceso glaciar con el incremento de área lagunar</i>	87
Figura 26 <i>Coeficiente de correlación de las áreas del retroceso en función de los años</i>	88
Figura 27 <i>Retroceso glaciar libre de detritos y cubierto por detritos del Nevado Ausangate de 1986 – 1992 y 1986-1</i>	87
Figura 28 <i>Retroceso glaciar libre de detritos y cubierto por detritos del Nevado Ausangate de 1986 – 2005 y 1986 – 2010</i>	90
Figura 29 <i>Retroceso glaciar libre de detritos y cubierto por detritos del Nevado Ausangate de 1986 – 2016 y 1986 – 2023</i>	91
Figura 30 <i>Retroceso glaciar libre de detritos y cubierto por detritos del Nevado Ausangate en los diferentes años en función del año 1986</i>	92
Figura 31 <i>Tipos de lagunas de origen glaciar en el Nevado Ausangate al 2023</i>	95
Figura 32 <i>Gráfico comparativo entre el número de lagunas, área total lagunar y lagunas nuevas 1986- 2023</i>	99
Figura 33 <i>Reducción de la superficie glaciar y mayor formación de lagunas (1986 - 2023)</i>	100
Figura 34 <i>Reducción de la superficie glaciar e incremento de la superficie lagunar (1986- 2023)</i>	100

Lista de acrónimos

ACCA	: Asociación Para la Conservación de la Cuenca Amazónica
ACR	: Área de Conservación Regional
ANA	: Autoridad Nacional del Agua
DEM	: Digital Elevación Model
ELA	: Altitud de Equilibrio de Línea de Nieve
GEI	: Gases de Efecto Invernadero
GLOF	: Glacial Lakes Outburst Flood
GPS	: Global Positioning System
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
INAIGEM	: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña
LIA	: Pequeña Edad de Hielo
MINAM	: Ministerio del Ambiente
NDSI	: Normalized Differen Snow Index
NDWI	: Normalized Differen Water Index
NIR	: Near InfraRed
OLI	: Operational Land Imager (Landsat 8)
SEDACUSCO	: Entidad Municipal Prestadora de Servicios de Saneamiento del Cusco
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SIG	: Sistema de Información Geográfica
TM	: Thematic Mapper (Landsat 5)
UGRH	: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos
UNEP	: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

I. Introducción

A nivel mundial, especialmente en las regiones tropicales, los glaciares están experimentando un retroceso acelerado en las últimas décadas debido al calentamiento global, que aumenta la temperatura global y contribuye al cambio climático. Como resultado de la reducción de la cobertura glaciaria, también se observa un incremento en la formación y evolución de lagunas de origen glaciario.

El estudio de los glaciares y lagunas de origen glaciario proporcionan información significativa para comprender cómo la reducción de la superficie glaciaria influye en la aparición y expansión de lagunas de origen glaciario. Además, se examinaron los impactos que ocasionarían estos cambios en los ecosistemas y en las comunidades cercanas al Nevado Ausangate.

Frente al cambio climático evolutivo, los ecosistemas de montaña son los más sensibles. Estos ecosistemas tienen un alto valor ecológico, científico y económico. Con el acelerado retroceso glaciario, la biodiversidad se ve actualmente afectada; la formación y el crecimiento de lagunas implican riesgos de inundaciones repentinas de lagos glaciares (GLOF). A su vez, la disminución a mediano plazo del recurso hídrico afectaría drásticamente la provisión de agua en las zonas rurales y urbanas, así como la agricultura y la generación hidroeléctrica.

La presente investigación tiene como objetivo fundamental evaluar el retroceso glaciario y relación con la formación y evolución de lagunas de origen glaciario en el Nevado

Ausangate durante el periodo 1986 – 2023. A través del análisis multitemporal y con este fin se utilizaron imágenes Satelitales de Landsat 5 y 8 que corresponden a los sensores (TM y OLI), para los años 1986 al 2016, y Sentinel-2 para el año 2023. Para determinar el retroceso glaciar, se aplicó el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI), y para la detección de las lagunas de origen glaciar se utilizó el Índice Normalizado de diferencia de Agua (NDWI). Ambos procedimientos fueron desarrollados de manera semiautomática, con el software ArcGIS 10.3.

Para un mayor entendimiento del trabajo realizado, la presente investigación se ha dividido en las siguientes secciones:

Sección I: Introducción.

Sección II: Planteamiento de problema, este ítem comprende la descripción y formulación del problema, objetivos, justificación e importancia, hipótesis y variables.

Sección III: Marco teórico, incluye los antecedentes de investigación, las bases teóricas y definición de términos.

Sección IV: Metodología, incluye el tipo y nivel de investigación, ámbito temporal y espacial, población, instrumentos, procedimiento y análisis de datos.

Finalmente: Resultados y discusión, conclusiones, recomendaciones y anexos más relevantes.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

El retroceso glaciar es un fenómeno mundial, resultado del incremento de la temperatura del planeta como consecuencia del cambio climático, del incremento de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Este fenómeno, tiene impactos negativos sobre los recursos hídricos y los ecosistemas de montañas (Castillo, 2022), afectando la calidad ambiental de las cuencas glaciares. Uno de los efectos adversos es la fusión del hielo, que aumenta el espejo de agua de un gran número de lagunas de origen glaciar y la acumulación de agua sobre las altas montañas (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos [UGRH], 2013) lo que está “conduciendo al desarrollo de todo tipo de lagos glaciares potencialmente peligrosos” (Gonzales, 2023, p.19). La peligrosidad de estas lagunas se debe a su evolución acelerada.

Al respecto, los glaciares se comportan como importantes indicadores del clima mundial (Oerlemans, 2001; Zemp et al., 2019), en virtud de su alta sensibilidad a los cambios a nivel mundial y regional. Como reacción al calentamiento global, los glaciares están experimentado un retroceso y pérdida de superficie y masa importante a nivel mundial (Burns & Nolin, 2014; Hanshaw & Bookhagen 2014), ocasionando modificaciones en la escorrentía superficial de ecosistemas acuáticos, lo que, a su vez, tendría un impacto en el suministro de agua de las personas que habitan río abajo y que dependen del agua de las montañas glaciares para el abastecimiento (Rabatel et al., 2018).

Armstrong et al. (2019) resalta que el agua producto del derretimiento, es un aporte importante al caudal de un río. Igualmente, el Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC, 2019) indican que la constante reducción del volumen de las masas de glaciares plantean desafíos para la provisión de agua para el consumo doméstico, la agricultura, la generación de energía hidroeléctrica, turismo y podría afectar la estabilidad política (Vuille et al., 2008; Bernauer & Siegfried, 2012; Denzinger et al., 2021).

Como señala Li et al. (2019) “los glaciares antárticos y subantárticos mostraron una tasa de reducción (-0,11 % por año), mientras, que los glaciares de la Cordillera de los Andes exhibieron la tasa más rápida de reducción del área de glaciares (-1,6 % por año)” (p.1), asimismo, de acuerdo con resultados publicados por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montañas (INAIGEM, 2023c) demuestran que desde 1962 al 2020 la Cordillera de los Andes en el Perú perdió 1348.75 km² de superficie glaciar, lo cual equivale al 56 % de área total. La cordillera Vilcanota en el mismo periodo, perdió 251.76 km² (más del 50.86 %) de su área glaciar, en 58 años, y en los últimos cuatro años de 2016 al 2020 la pérdida fue de 12.22 km² equivalente al 4.78 % de superficie glaciar (INAIGEM, 2023). En el Nevado Ausangate, el área glaciar disminuyó con una tasa de retroceso en más 34 % desde su estado inicial (Bolivar, 2018), esta es la montaña más alta de la Cordillera Vilcanota y lleva consigo las consecuencias del cambio climático, con pérdida de su área glaciar en aumento en las últimas décadas; como consecuencia, hay pérdida de los recursos hídricos en su estado sólido, pérdida de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos; la provisión de agua (Cook et al., 2020), la regulación del clima (Grima y Campos 2020) y los servicios culturales (Cook et al. 2021), lo que genera variaciones en el paisaje natural (Cauvy & Dangles, 2019). Todos ellos afectados por el cambio climático.

De seguir este problema global, es inevitable la desaparición gradual de los glaciares andinos más bajos, como indican en su investigación (Rabatel et al., 2018). Los estudios de modelado sugieren una reducción futura continua de los glaciares de los Andes tropicales, y algunos desaparecerán por completo a fines del siglo XXI (Vuille et al. 2018), lo que reducirá significativamente la escorrentía de la estación seca (Baraer et al., 2012; Kaser et al., 2010; Soruco et al., 2014).

El proceso acelerado de retroceso glaciar dentro del Nevado Ausangate y los glaciares próximos de la Cordillera Vilcanota podría agravarse si no se toman medidas de control (implantar instrumentos de prevención y reducción del riesgo de desastre asociados a los glaciares) y conservación (siembra y cosecha de agua y recuperación de sistemas ancestrales *construcción de amunas*), que es vital para la supervivencia de todos los seres vivos asociados a los glaciares y ecosistemas de montaña, ya que para las comunidades alto andinas, en la época de estiaje (invierno austral) de mayo a septiembre, puede generar el 100 % de escorrentía producto del derretimiento de los glaciares (Juen et al., 2007).

Este hecho, causa una profunda preocupación y en especial para las comunidades alto andinas que son vulnerables a la escasez de agua, las cuales, se verían afectadas en su calidad ambiental y por consiguiente en su calidad de vida en el corto y largo plazo, debido a su dependencia a los servicios ecosistémicos que brindan los glaciares, especialmente en la época de estiaje; así mismo, son propensas a desastres naturales a consecuencia del desprendimiento de bloques de hielo que pueden causar desbordes en las lagunas que alimentan, como el ocurrido con el Nevado Ausangate en mayo y agosto de 2022, por el desprendimiento de rocas, que provocaron el desborde de la laguna Upiscocha (INAIGEM, 2022a y 2022b).

En este contexto, los resultados de esta investigación servirán para generar instrumentos de gestión y planificación, prevención y reducción del riesgo de desastres, en

los gobiernos locales y regionales y para la implementación de medidas para la conservación del recurso hídrico mediante la formulación y ejecución de proyectos de inversión, para la siembra y cosecha de agua.

En este sentido, la presente investigación se planteó como problemas de investigación, las siguientes:

Problema general

¿Cuál es el retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de las lagunas de origen glaciar del Nevado Ausangate - Quispicanchi, Canchis del Departamento del Cusco, en el periodo 1986 – 2023?

Problemas específicos

1. ¿Cuál es el retroceso glaciar del Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023?
2. ¿Cuántas lagunas de origen glaciar existen, en el Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023?
3. ¿Cómo es la formación y evolución de las lagunas de origen glaciar asociadas al Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023?

2.2. Objetivos de la investigación

2.2.1 *Objetivo general*

Evaluar el retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas de origen glaciar del Nevado Ausangate – Quispicanchi, Canchis del Departamento del Cusco, en el periodo 1986 – 2023.

2.2.2. *Objetivo específico*

1. Determinar el retroceso glaciar del Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023.

2. Inventariar la cantidad de lagunas de origen glaciar existentes en el Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023.
3. Analizar la formación y evolución de las lagunas de origen glaciar asociadas al Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023.

2.3. Justificación e importancia

La presente investigación es pertinente, porque aborda una problemática vigente y de mucha actualidad, ya que busca determinar el avance del retroceso glaciar en el Nevado Ausangate y determinar el número de lagunas de origen glaciar que existen para el año 2023, así como su formación y evolución, en el contexto del cambio climático.

En las últimas décadas, el aumento de la temperatura en el planeta viene acelerando el retroceso glaciar con una velocidad de 14 a 15 metros por año en la Cordillera Vilcanota, Thomson, L. (comunicación personal, 5 de septiembre de 2023), al ritmo del proceso de retracción que estamos viviendo, es evidente que el retroceso glaciar en los próximos años será mayor. Esto, afectará la calidad de los ecosistemas asociados a los glaciares, poniendo en riesgo el futuro de las poblaciones altoandinas que dependen de estos ecosistemas. La ausencia de reservas de agua sólida no solo provocaría un cambio significativo en el paisaje y geografía, ya que según Emmer et al. (2020) su desaparición reduciría considerablemente la oferta hídrica de las localidades altoandinas, que son las más vulnerables al proceso de retroceso y a los desafíos de los nevados, puesto que son ellos los encargados de balancear los aportes de agua en época de estiaje y alteraciones en los ecosistemas, Drenkhan et al. (2018) indica que también está asociada con la formación y evolución de los lagos glaciares y va acompañada de preocupaciones sobre los riesgos cambiantes de los deslizamientos de tierra y de inundaciones repentinas de lagos glaciares (GLOF) que pueden plantear graves riesgos para los medios de vida locales, incluyendo pérdida de infraestructuras y de vidas humanas.

Respecto a la relevancia social del estudio, el Nevado Ausangate alberga seis ecosistemas que brindan servicios ecosistémicos importantes dentro de sus áreas de influencia. Estos son: “bofedales, bosque relicto altoandino, bosque xérico interandino, cardonal, matorral arbustivo y pajonal andino” (INAIGEM, 2018, pág. 66). El área de estudio es una gran reserva de agua dulce, que está orientada al mantenimiento de la biodiversidad, secuestro de carbono, belleza paisajística, formación de suelos y a la regulación hídrica (INAIGEM, 2018), para la provisión de agua para el consumo de las poblaciones aledañas. El sistema Vilcanota provee un 53.56 % de agua potable para la ciudad de Cusco (Entidad Municipal Prestadora de Servicios de Saneamiento del Cusco [SEDACUSCO], 2018), y la Subcuenca de Pitumarca - que nace en el Nevado Ausangate-, es el segundo afluente a la cuenca del río Vilcanota, con un caudal de 122.2 m³/s (Tacusi & Hacha, 2015). Otro aspecto importante, es que el Nevado Ausangate, según la Asociación Para la Conservación de la Cuenca Amazónica (ACCA, 2019), es el hábitat de una variedad de fauna y flora, algunas clasificadas bajo distintos grados de amenaza, además, alberga tres aves endémicas y un roedor. Ante un inminente retroceso glaciar, la formación de numerosas lagunas y la evolución de estas podrían generar el deterioro y próximamente la pérdida de la biodiversidad; esta problemática afecta la calidad ambiental de los factores bióticos, abióticos y de las comunidades altoandinas, por consiguiente, afecta al entorno ambiental del Nevado y sus ecosistemas asociados.

Entre las implicancias prácticas, los resultados de la presente investigación generarán información de interés para los Organismos No Gubernamentales, instituciones públicas como INAIGEM, ANA, ACR Ausangate, Gobierno Regional, Gobiernos Provinciales y Distritales (Ocongate y Pitumarca), y los pobladores de las comunidades contiguas al Nevado Ausangate. Asimismo, servirán para implementar medidas que contribuyan a la gestión de los ecosistemas de montañas asociados al Nevado Ausangate. Se espera también

que puedan funcionar como línea de base para futuras investigaciones, contribuir a orientar las medidas y acciones pertinentes de la conservación y uso sostenible de los ecosistemas asociados y para la gestión del riesgo de desastres y ordenamiento territorial en un modelo de planificación de corto, mediano y largo plazo.

El valor teórico de la investigación radica en que los resultados contribuirán al conocimiento del estado actual de la dinámica glaciar, la cantidad de lagunas existentes al 2023 y la formación y evolución de estas lagunas, aportando de este modo al conocimiento teórico de las ciencias glaciológicas.

Metodológicamente, el uso de tecnologías de teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite estudiar los glaciares y lagunas de origen glaciar de manera eficiente, porque la información que brindan los satélites “permite su investigación sin la necesidad de contacto directo” (Guardamino, 2014, pp. 4). Además, según Huggel et al. (2002) mediante la teledetección es posible abarcar extensas áreas geográficas, lo que permite estudiar todo el Nevado Ausangate. En comparación con llevar a cabo un trabajo de campo, la utilización de estas técnicas implica un considerable ahorro de tiempo y recursos económicos, lo cual hace factible la realización de estudios en zonas montañosas (Guardamino & Drenkhan, 2016).

Bajo esta perspectiva, la presente investigación se planteó como hipótesis de la investigación, las siguientes:

Hipótesis general

Existe una relación significativa entre el retroceso glaciar con la formación y evolución de lagunas.

Hipótesis específicas

Existe una relación significativa entre retroceso glaciar con la formación y evolución de lagunas de origen glaciar.

Existen más de treinta lagunas de origen glaciar alrededor del Nevado Ausangate.

Existe un incremento significativo en la formación y evolución de las lagunas de origen glaciar asociadas al Nevado Ausangate.

2.4. Variables

Según Oloya (2021) existe una relación entre las variables en una investigación dado que la variable independiente influye en la aparición de la variable dependiente. Para ello en este estudio, se definieron las siguientes variables de investigación.

- **Independiente:** Retroceso glaciar.
- **Dependiente:** Formación de lagunas y evolución de lagunas

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. *A Nivel internacional*

Xiao et al. (2023) realizaron un estudio sobre análisis del retroceso de los glaciares en la meseta tibetana del sudeste a través de datos de teledetección de múltiples fuentes, en la cual plantearon como objetivo combinar conjunto de datos de fotogrametría, teledetección óptica y radar de apertura sintética. Aplicaron la metodología de datos de sensores remotos de múltiples fuentes, interpretación visual y un método de aprendizaje profundo. Tuvieron como resultado que los glaciares perdieron su cobertura desde la década de 1970 hasta 2020, y durante este tiempo se degradó un área total de glaciares de 2759,14 km², con una tasa de derretimiento anual promedio del 0,45% año. Llegaron a las principales conclusiones de: 1) en la década de 1970 se identificaron 11.648 glaciares con una área de 13.372,08 km² utilizando un conjunto de datos KH-9 y Landsat 1-3; 2) en el año 2000 se identificaron en total 12 993 glaciares con una extensión de 11 692,31 km² a partir de datos de ERS-2, Landsat-5 y Landsat-7 y 3) se identificaron un total de 11 875 glaciares con una superficie total de 10 612,94 km² identificado a partir de los datos de Sentinel-1, Sentinel-2 y Landsat-8 en 2020.

Lesi et al. (2022) estudiaron el conjunto de datos sobre lagos glaciares derivados de Landsat y Sentinel en el corredor económico China-Pakistán de 1990 a 2020. Plantearon

como objetivo, crear una base de datos actualizada de lagos glaciares en el CPEC en 2020, utilizando imágenes de Landsat 8 y Sentinel-2 para mapear detalladamente su distribución. Emplearon la metodología de cartografía basada en umbrales y llevaron a cabo una revisión visual exhaustiva. Los resultados revelaron que en 2020 se identificaron 2234 lagos utilizando imágenes de Landsat, abarcando un área total de aproximadamente $86,3 \text{ km}^2$, mientras que 7560 lagos glaciares se derivaron de las imágenes Sentinel-2 con un área total de $103,70 \text{ km}^2$. Finalmente llegaron a una conclusión importante que: los lagos en el área de estudio permanecen relativamente estables con un ligero aumento en número y área entre 1990 y 2020 según las observaciones de Landsat, el conjunto de datos revela que en 1990 había 2.154 lagos que cubrían $85,1 \text{ km}^2$ y aumentaron a 2.234 lagos con una superficie total de $86,31 \text{ km}^2$.

Moussavi et al. (2020) efectuaron una investigación acerca de la detección de lagos supra glaciares antárticos mediante imágenes Landsat 8 y Sentinel-2: hacia la generación continental de volúmenes de lagos. Formularon como objetivo, producir un producto de volumen y área de lago en toda la Antártida. Donde se utilizó datos de los satélites Landsat 8 y Sentinel-2 para desarrollar un método basado en umbrales para detectar lagos que se encuentran en las plataformas de hielo de la Antártida, calcular sus profundidades y, por tanto, sus volúmenes. Los resultados demuestran que se proporcionó verificación adicional mediante la inspección manual de los resultados de casi 1000 imágenes Landsat 8 y Sentinel-2. Finalmente llegaron a la conclusión que, las inspecciones visuales de casi 1000 imágenes L8 y S2 revelan delineaciones consistentes y confiables del área del lago para imágenes adquiridas en elevaciones solares superiores a 20° .

Jiang et al. (2018) determinaron un estudio, acerca de cambio de glaciares, expansión de escombros supraglaciares y evolución de lagos glaciares en la cuenca del río Gyirong, Himalaya central, entre 1988 y 2015, propusieron como objetivo, investigar la distribución

más reciente de glaciares y lagos glaciares utilizando métodos de mapeo avanzados en toda la cuenca del río Gyirong (GRB). Utilizaron imágenes Landsat de archivo y un método de mapeo automatizado para entender cómo los glaciares y los lagos glaciares evolucionaron en ese período. Como resultado del análisis se identificaron 467 glaciares en 1988, con una superficie total de 614,09 km². Los investigadores concluyeron que la expansión de los lagos glaciares probablemente aceleró el retroceso de los glaciares, conectados a través de transmisiones térmicas, y que la interacción entre glaciares y lagos glaciares complica el desprendimiento de glaciares.

Williamson et al. (2018) en la investigación titulada teledetección de lagos supraglaciares en Groenlandia mediante satélites duales (Sentinel-2 y Landsat 8). Formularon como objetivo desarrollar un método automatizado para monitorear la evolución y el drenaje de los lagos en la capa de hielo de Groenlandia utilizando imágenes de Sentinel-2 y Landsat 8. Su metodología incluyó la creación y aplicación de un método que utiliza dos tipos de sensores para seguir los cambios en áreas y volúmenes de lagos con alta resolución espacial (entre 10 y 30 metros). Con la combinación de datos de Sentinel-2 y Landsat 8, identificaron 184 lagos que se estaban drenando rápidamente, más que utilizando solo imágenes de Sentinel-2 (93 lagos) o Landsat 8 (66 lagos). Los investigadores concluyeron que el algoritmo FASTER permitió calcular las áreas y volúmenes de los lagos con alta precisión a partir de imágenes de Sentinel-2.

3.1.2. A Nivel nacional

Silverio y Jaquet (2017) Plantearon un su artículo científico la “Evaluación de las fluctuaciones de los glaciares en la Cordillera Blanca (Perú) mediante teleobservación entre 1987 – 2016 en el contexto de (ENOS)” (p. 1) El Niño. Con el objetivo de ampliar la serie temporal de mapas de cobertura glaciar obtenidos por satélite hasta el año 2016, a partir de las imágenes de los instrumentos Landsat 8-OLI y documentarlos mediante observaciones

de campo y comparar los resultados determinados de dos índices espectrales (NDSI y relación NIR/SWIR) para 1987, 1996 y 2002. Los investigadores, aplicaron la metodología de la relación de bandas (TM4/TM5) de las imágenes Landsat 5 TM, ETM+4/ ETM+5 de las imágenes Landsat 7 ETM+ y OLI5/OLI 61 de las imágenes Landsat 8. Los resultados indican que desde 1930, cuando los glaciares cubrían unos 830 km², la Cordillera Blanca ha perdido el 46% de su cobertura en 86 años. Llegaron a la conclusión que las imágenes satelitales tienen la capacidad de brindar información de cómo se encuentran los glaciares, también permite visualizar de manera general el mapeo cartográfico glaciar con cierta incertidumbre de $\pm 10\%$ (Silverio & Jaquet, 2017).

Emmer et al. (2020) realizaron un artículo científico de “70 años de evolución de lagos y desbordamientos de lagos glaciares en la Cordillera Blanca (Perú) y su implicancia para el futuro” (p. 2). Con la finalidad de proporcionar información detallada sobre la evolución de los lagos durante el período 1948-2017. Aplicando la técnica de la teledetección específicamente con las imágenes de Landsat e imágenes de alta resolución. Llegaron a la conclusión de que el número total de lagunas de origen glaciar y la superficie de estas se incrementó desde 1948 al 2017, como resultado del retroceso glaciar generado por el cambio climático en terrenos con topografías adecuadas (terrenos unidos) (Emmer et al., 2020).

Castillo (2022) efectuó una tesis sobre:

El análisis multitemporal de la dinámica glaciar y su influencia sobre lagunas y humedales altoandinos en la Cordillera Blanca - Perú, periodo 1989-2019. [Se planteó como objetivo], analizar la influencia de la dinámica glaciar sobre las lagunas y humedales altoandinos en la Cordillera Blanca, dentro de las unidades hidrográficas Lullán, Quillcay y Yanayacu. [Utilizó la metodología] de los SIG y teledetección se realizó un análisis multitemporal [aplicando imágenes satelitales de Landsat y

Sentinel-2. Como fruto de la investigación demostró que los glaciares experimentaron una reducción de aproximadamente] un ~22-30-56% en su área. [Llegó a la conclusión que] el área glaciaria para las unidades hidrográficas Lullán, Quillcay y Yanayacu representa una reducción del ~22, 30 y 56% con una tasa de retroceso de 0.23, 0.43 y 0.25 km² /año (pp. 4-17).

Emmer et al. (2016) en la investigación que estudiaron de 882 lagos de la Cordillera Blanca: Inventario, clasificación, evolución y evaluación de la susceptibilidad a inundaciones repentinas. Plantearon como objetivo proporcionar un inventario completo de los lagos ubicados en la Cordillera Blanca del Perú, con una descripción cuantitativa y cualitativa de cada uno. También se analizó la evolución de los lagos a lo largo del tiempo, prestando especial atención a aquellos situados en cuencas glaciares. Para llevar a cabo esto, se realizó un análisis manual de imágenes de alta resolución para inventariar los lagos en la Cordillera Blanca y se verificó durante estudios de campo. Obteniendo como resultado que la mayoría de estos cuerpos de agua se clasificaron como lagos represados por morrenas, representando el 35,2%, seguidos de lagos represados con lecho de roca que comprendieron un 31,3%, mientras que los lagos represados por hielo y deslizamientos de tierra fueron poco comunes, constituyendo tan sólo un 3,5% y un 2,6% respectivamente. Los investigadores llegaron a la conclusión que, entre los años 1948 y 2017, hubo un aumento tanto del número total de lagos como de su superficie total en la Cordillera Blanca. Este aumento se debió principalmente a la influencia del cambio climático sobre los terrenos topográficamente adecuados, lo que hizo que los lagos actuales fueran más profundos.

Por otro lado Colonia et al. (2017) estudiaron en los Andes peruanos una compilación de un inventario de sobre profundizaciones del lecho rocoso de los glaciares y posibles nuevos lagos en áreas de desglaciación. Donde se plantearon como objetivo identificar los posibles nuevos lagos en los Andes del Perú es importante para evaluar los cambios en el

agua almacenada y en las condiciones de peligro. Emplearon la metodología del modelo de Elevación Digital (DEM). Obteniendo como resultado un número total de 201 sobre profundizaciones de lechos glaciares que excedían los 10000 m² de área a lo largo de las cordilleras peruanas, con un volumen total estimado de aproximadamente 260 millones de m³. Llegaron a la conclusión que la formación de lagos y sus geometrías en partes tan profundas de los lechos de los glaciares que quedan expuestas por el retroceso del hielo.

3.1.3. A Nivel regional y local

Drenkhan et al. (2018) realizaron una investigación de “evaluación actual y futura de glaciares y lagos en la cuenca desglaciada de Vilcanota-Urubamba, Andes peruanos” (p.1). Plantearon como objetivo identificar cambios actuales y potenciales en las tendencias futuras en glaciares y lagos. Para ello, utilizaron datos adquiridos de satélites ópticos multiespectrales (en concreto Landsat 5 TM y Sentinel-2 MSI), cada uno con un intervalo de 6 años. Los investigadores demostraron como resultados que la superficie total de los glaciares redujo un 37,3% (20,5%), en el año 1988 tenía una superficie de 226,1 km² y para el año 2016 contaba con una superficie de 141,7 km². Finalmente llegaron a conclusión que, tanto en términos de superficie de los glaciares disminuyó significativamente en un 37% (21%) entre 1988 y 2016 (Drenkhan et al., 2018).

Guardamino y Drenkhan (2016) en la investigación titulada “evolución y potencial amenaza de lagunas glaciares en la Cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú) entre 1991-2014” (p.2). Con el propósito de señalar la cantidad de lagunas recién formadas y que estaban formándose durante la elaboración de un proceso semi automático que funciona de forma secuencial. Emplearon la metodología de análisis multitemporal con los sensores (TM-OLI) de las imágenes Landsat 5 y 8, dentro 1991 y 2014. Los resultados demostraron un notable derretimiento de la superficie glacial de un 51%, en el año 1991 contaba con una cobertura de 201 km² y para 2014 se redujo a 98.9 km². En el mismo tiempo,

la cantidad de lagunas y el área lagunar se incrementaron, en 1991 contaba con 247 lagunas con un área total de 4.1 km² y para el año 2014 se identificaron 329 lagunas con una superficie de 5.2 km². Llegaron a la conclusión que las lagunas que se formaron recientemente demuestran un alto grado de evolución en altitudes de 4400 a 4800 m.s.n.m.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Glaciares: Conceptos generales

Según la definición de Tarbuck y Lutgens (2005) “Un glaciar es una gruesa masa de hielo que se origina sobre la superficie terrestre por la acumulación, compactación y recristalización de la nieve” (p.506). Esta masa de hielo está constituida “por cristales de hielo, nieve, neviza, agua, aire y detritos de rocas que se acumulan en una masa de nieve durante muchos años, se compactan y se convierten en glaciar” (Carenas et al., 2005, p. 310).

Tabla1*Clasificación del Nevado Ausangate*

Parámetro de clasificación	Tipo	Descripción
Morfología	Montaña	Grandes formaciones de hielo pegado a las rocas, donde la parte frontal está alejado de los valles, comúnmente se encuentran en laderas escarpadas.
Temperatura	Templados	La temperatura del glaciar llega hasta 0 °C. Por la presencia de agua en los orificios de la masa de hielo se generan desprendimiento y estos glaciares se mueven sobre la escorrentía de la base.
Dinámica	Activo	Glaciares con desplazamiento considerable y expulsión de restos de material rocoso.
Contenido de impurezas	Limpio y cubierto	Glaciares libres de detritos tienen la cobertura libre de impurezas, a diferencia de los glaciares cubiertos están recubiertos en partes o completamente por restos de rocas.
Localización	Intertropicales externos	Localizadas dentro del trópico, con elevaciones altas y lejanas a la línea ecuatorial (como es el caso del Nevado Ausangate).

Nota. La clasificación de la tabla 1 corresponde al Nevado Ausangate. Adaptado de “*Un análisis comparativo del retroceso glaciar en los Andes Tropicales usando teledetección*”, por K. Bijeesh, R.F. Sebastián, W. Shanshan., & T. Pedro, 2016, *Investig Geogr, Chile.*, 51(3 – 36), p 34. (<https://www.researchgate.net/publication/305730330>)“*inventario Manual metodológico de inventario nacional de glaciares*”, por INAIGEM, 2017.

3.2.2. Los Glaciares tropicales

La distribución de estos glaciares a nivel global está determinada básicamente por tres factores que va a establecer su ubicación: en primer lugar, debe encontrarse dentro del

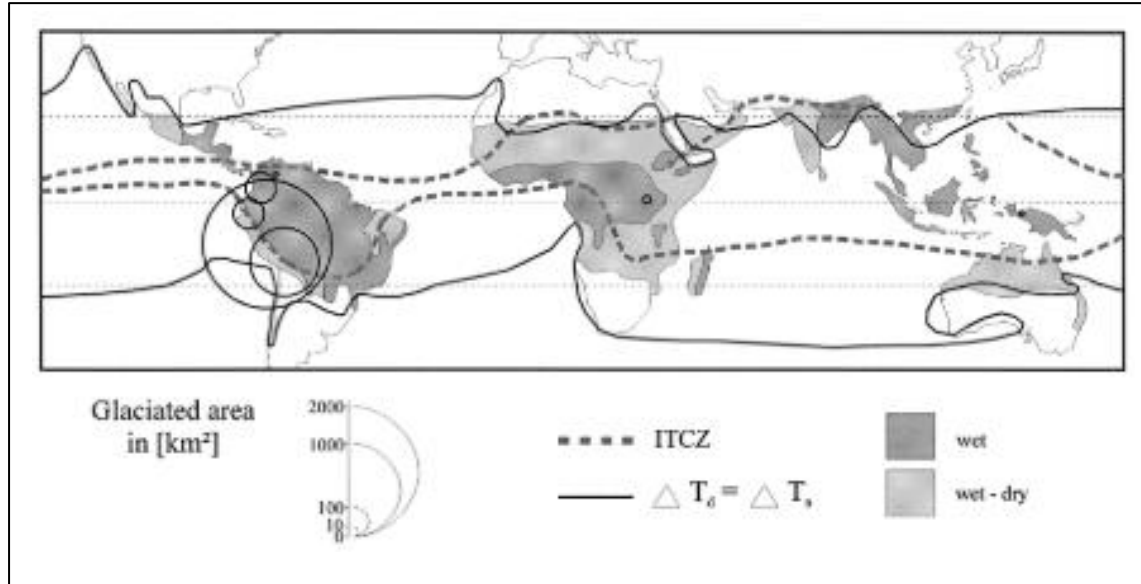
trópico de Cáncer 23.7° al Norte y trópico de Capricornio 23.7° al Sur; en segundo lugar, cuando la temperatura promedio de todos los días varía igual o mucho más que la temperatura durante todo el año; y finalmente, deben estar dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), la humedad es baja en latitudes medias y altas, mientras que en las latitudes bajas es alta, como se muestra en la Figura 1 (Kaser, 1999).

El 99% de los glaciares tropicales del mundo están situados en la Cordillera de los Andes de Sudamérica (Yap, 2016) como se muestra en la Figura 1, el Perú es poseedor de un aproximadamente de 68% (Veettil & Kamp, 2019) de estos glaciares, en su mayoría ubicados en los departamentos de “Áncash y Cusco poseen el 42 % y 33 % del total de superficie glaciaria” (INAIGEM, 2023c, p.3).

De acuerdo con Kaser y Osmaston (2002) en latitudes medias o zonas templadas, el régimen glaciar se distingue por dos estaciones bien diferenciadas: una cálida, en la cual prevalece la ablación, y la otra fría, en la cual prevalece la acumulación. Mientras que el trópico presenta dos zonas lluviosas con patrones de precipitación bien marcadas: una con lluvias más o menos continuas (zona tropical interna) y otra la zona tropical externa que posee dos temporadas bien marcadas, la primera húmeda, cuando la acumulación supera a la ablación y la segunda seca, en la cual no hay acumulación y la ablación es mínima, como se muestra en la Figura 2. Rabatel et al. (2013) señalan que (Perú-Bolivia) forman parte de los trópicos externos, mientras que (Ecuador-Colombia) integran los trópicos internos.

Figura 1

Delimitación y distribución de los Glaciares en los Trópicos de acuerdo con los países



Nota. Tomado de “A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. Global and Planetary Change”, por G. Kaser, 1999, *Global and Planetary Change*, 22(1-4):93-103, p. 94 ([https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4)).

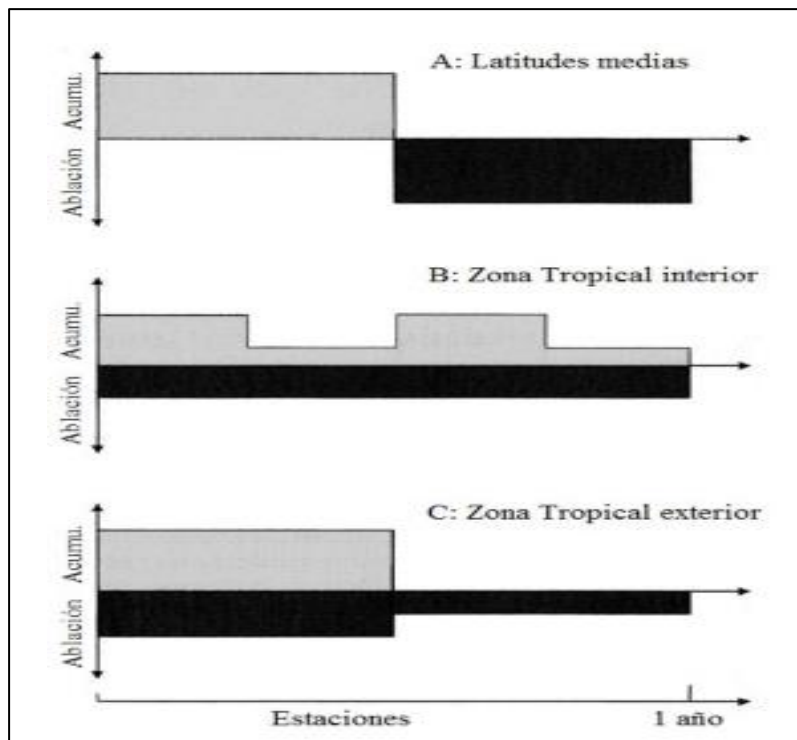
Parte de la cordillera de los Andes, ubicadas en la zona tropical exterior, la época húmeda empieza:

En noviembre y finaliza en abril, periodo en los que predominan las condiciones tropicales, en cambio el periodo seco va desde mayo a octubre, cuando las condiciones climáticas se asemejan a las condiciones subtropicales. Esto se debe a que existe una ligera variación de la temperatura, de 1° a 2° C más alta entre los meses de octubre a marzo, durante el verano húmedo, que durante los meses secos entre mayo y septiembre; sin embargo, esta variación sigue siendo poco significativa en comparación a lo que ocurre en latitudes medias, es decir, por encima de los 30° (Garreaud, 2009; Rabatel et al., 2013, como se cita en Yap, 2015, pp.17-18).

El Nevado Ausangate pertenece al régimen de la zona tropical exterior, ya que presenta dos temporadas: la primera, húmeda, en la que la acumulación supera a la ablación, y la segunda, seca, en la cual no hay acumulación y la ablación es mínima durante todo el año, al igual que otros glaciares peruanos y bolivianos, según Kaser en el año (1999) y Rabatel y su equipo en (2013) indican que los países como Colombia, Ecuador y Venezuela cuentan con glaciares que integran el sistema de la zona tropical interior.

Figura 2

Comparación de los regímenes glaciares internos y externos



Nota: Tomado de Tropical glaciers. Por, G. Kaser., H, Osmanton, 2002, Cambridge University Press, https://books.google.com.pe/books?id=ZEB-I3twN_gC&printsec=frontcover#v=onepage&q&=false.

3.2.3. Balance de masa glacial

El “estado de salud de un glaciar se puede conocer a través de su balance de masa. El balance de masa de un glaciar indica si ha habido un incremento, una reducción o si el

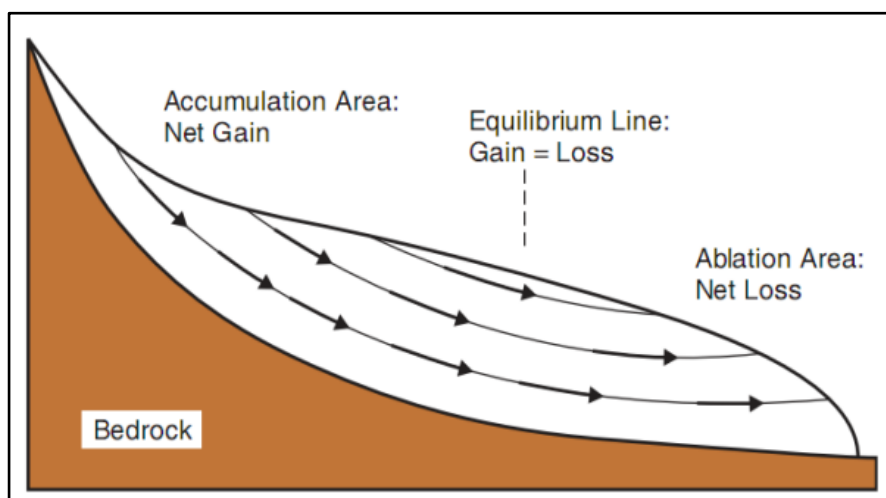
glaciar se encuentra en estado de equilibrio” (Knight, 1999; Benn & Lehmkuhl 2000, como se cita en Guardamino, 2014, p.14).

Hay dos tipos de factores que provocan las variaciones en el equilibrio de la masa de hielo: los climáticos y los mecánicos. Los factores climáticos, en particular la temperatura y las precipitaciones, constituyen la mayoría, mientras que los aspectos mecánicos implican cosas como los deslizamientos y la desintegración de bloques glaciares que redistribuyen el hielo dentro del glaciar (Knight, 1999). Los estudios indican que los factores climáticos son los que más influyen en este fenómeno (Huddart y Stott, 2010).

Es posible separarse “el sistema glaciar en dos subsistemas, el subsistema de acumulación y el de ablación, [los dos se dividen por una] línea conceptual llamada línea de equilibrio o ELA que representa el límite altitudinal entre ambos subsistemas y donde la acumulación es igual a la ablación” (Huddart & Stott, 2010 citado por Yap, 2015, p.18), a lo largo del año, como se observa en la Figura 3.

Para el UNEP (2007), el balance de masa se refiere al equilibrio existente entre la ablación y acumulación de un glaciar. La ablación implica pérdida de masa glaciar a través de procesos como la sublimación, el desprendimiento de bloques de hielo y derretimiento. Si la ablación es superior, en consecuencia, el balance de masa es deficitario. Por otra parte, la acumulación se da por la ganancia de masa por medio de la precipitación sólida básicamente, por lo tanto, el balance de masa es positivo. Si la cantidad de hielo que se derrite y la cantidad de esta que se acumula son idénticos esto implica que el glaciar se encuentra en equilibrio (Yap, 2015).

Cuffey y Paterson (2010) indican que el balance de masa analiza las modificaciones que se ocasionan tanto como en la ablación y acumulación, debido a que la superficie, volumen y la estructura del glaciar cambiaran con el pasar del tiempo. Por lo tanto, los estudios de balance de masa evalúan estos cambios para entender los procesos relacionados.

Figura 3*Subsistema del glaciar*

Nota. Tomado de Los subsistemas de acumulación y ablación divididos por la Línea de Equilibrio. De *Earth Environments. Past, present and future* (504), por D. Huddard & T. Stott, 2010, Asociación Americana de Bibliotecas.

En el “subsistema de acumulación predominan todos los procesos en los que la nieve, neviza y hielo se agregan al glaciar, mientras que en el subsistema de ablación aquellos en los que el hielo se remueve; [tal como], fusión, sublimación, desmembramiento (calving), avalanchas” (Huddart & Stott, 2010; Cuffey & Paterson, 2010 citado por Guardmino 2015, pp.25.26).

Huddart y Stott (2010) dan a conocer, que la línea de equilibrio (ELA) corresponde al clima típico y a la morfología del terreno, ya que la altitud donde se ubican no es similar en todos los glaciares. “La distinción entre la ELA y la isoterma de 0°C que divide el glaciar en una zona superior donde la precipitación es sólida y una zona inferior donde la precipitación es líquida no debe pasarse por alto, ya que ambas pueden no coincidir necesariamente” (Guardamino, 2014, p.15). De acuerdo Kaser y Osmaston (2002) en las zonas tropicales, la ELA está ligeramente por debajo de la isoterma de 0°C.

Las mediciones mensuales del “balance de masa realizadas en Bolivia, Ecuador y Colombia muestran que la variabilidad de la temperatura de la superficie del Océano Pacífico es el principal factor que rige la variabilidad del balance de masa en la escala de tiempo decenal” (Rabatel et al., 2013, p. 1).

3.2.4. Clasificación de los glaciares tropicales

Debido a su estructura, localización y dinámica, cada uno de los glaciares tienen características específicas, los expertos en glaciología intentaron clasificar a los glaciares a nivel mundial, tomando en cuenta los diversos parámetros tales como la temperatura, morfología, dinámica y tipos de superficie, que no se excluyen unos a otros (Rivera et al., 2017). El INAIGEM (2023c), empleo la clasificación según el tipo de superficie: glaciar libre de detritos (GLD) y cubierto por detritos (GCD) en el inventario nacional de glaciares y lagunas al 2020.

a) Glaciar libre de detritos

Son glaciares que no tienen una considerable cantidad de material particulado o impureza sobre su capa externa. Poseen zona de ablación y zona de acumulación. Lliboutry (1956) menciona que, en algunas ocasiones, podrían mostrar cantidades mínimas de material detrítico, impureza o cenizas. Este tipo de material se deposita en la capa glaciar, ya sea por efecto del viento o caída de restos de roca (INAIGEM, 2023c).

b) Glaciar cubierto por detritos

Está cubierto parcial o completamente por una capa de escombros proveniente en su mayoría de la ruptura de rocas a causa de la meteorización, originando diferentes tamaños, de partículas finas que son transportadas por el viento a grandes fragmentos rocosos como resultado de avalanchas de rocas (Anderson y Anderson, 2016).

Este tipo de glaciar es probable que tenga su origen en un glaciar blanco, después de un proceso de retroceso y adelgazamiento gradual de la capa de hielo, empieza a quedar

tapado por una capa de material de escombros o detrítico, el que aumenta progresivamente de grosor y superficie a lo largo del tiempo. Además, es importante mencionar que, en ciertas ocasiones, los glaciares cubiertos y rocosos muestran dos fases dentro de un mismo desarrollo evolutivo. Por lo tanto, un glaciar inicialmente cubierto puede transformarse en un glaciar rocoso con el tiempo, influenciados por factores geomorfológicos, climático y topográficos particulares (Janke et al., 2015).

3.2.5. Retroceso glaciar

Según la definición proporcionada por Gil (2012):

Se conoce como retroceso glaciar al ascenso de la línea inferior de las nieves persistentes de alta montaña cada vez a mayor altitud, hasta desaparecer por completo en muchos casos como consecuencia del deshielo o fusión glaciar. Entre las causas concurrentes en la fusión glaciar acelerada y el consecuente retroceso, adelgazamiento del espesor, disminución de la extensión y el volumen de la masa glaciar (p.1).

Por otro lado Zemp et al. (2019) la determinan como la reacción de los glaciares al calentamiento atmosférico global, donde, se evidencia una pérdida de masa, “cobertura glaciar y aumento de la superficie de lagunas glaciares“ (Che et al., 2004, como se cita en Castillo, 2022, p. 51).

De acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2022) los cambios pronosticados en la temperatura y la precipitación provocan que los glaciares de montaña retroceden aún más de lo esperado, durante el siglo XXI y también, afectará significativamente la fusión de glaciares y la disponibilidad de agua (Sun et al., 2015). Es importante considerar, que la tierra ha experimentado un cambio significativo en la temperatura en los últimos 100 años (Kong & Pang, 2012).

- **Principales causas del retroceso glaciar**

Cambio climático

Según el IPCC (2022) es la variación en el estado del clima que evidencia una modificación en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que perdura a lo largo de periodo. Por lo general, se describe en periodos de décadas o intervalos más largos. En ese contexto, “el cambio climático repercute en las variaciones de temperatura, los cambios en los patrones de precipitación e incrementa la intensidad y frecuencia de los eventos climáticos extremos a nivel global” (INAIGEM 2023c) (p.41).

Uno de los principales componentes del cambio climático actual es el calentamiento global que incrementa la temperatura atmosférica relacionada a un aumento, desde el año 1950 provocado fundamentalmente por la actividad humana (Francou et al. 2010), como producto de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI): dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), entre otros gases presentes en la atmósfera (Rado et al. 2022). El retroceso glaciar es un fenómeno prácticamente mundial, debido al impacto causado por el cambio climático en las últimas décadas, donde los glaciares en todo el mundo están sufriendo una reducción constante (IPCC, 2022).

El quinto informe de evaluación (5AR) reporta que, en la última década, las mayores pérdidas se han registrado en los glaciares de Alaska, el Ártico canadiense, Groenlandia, los Andes del sur y las montañas asiáticas. En conjunto, estos glaciares representan más del 80% de la pérdida total de hielo (IPCC, 2013). Además, se ha observado que las extensiones actuales de los glaciares no están en equilibrio con las condiciones climáticas actuales, lo que, “indica que los glaciares continuarán disminuyendo en el futuro, incluso sin un mayor aumento de la temperatura, lo que, afectará consecuentemente la disponibilidad de los recursos hídricos mundiales” (Castillo, 2022, p. 37).

Se ha tomado en cuenta el importante papel de los glaciares de montaña como indicadores clave del cambio climático (Lemke et al., 2007; Vuille et al., 2008; Francou, 2010). Sin embargo, los glaciares tropicales son especialmente los más sensibles al cambio climático (Kaser & Osmaston, 2002). A diferencia de las latitudes medias y altas donde la acumulación se da en la larga temporada de invierno y la ablación, en verano (Kaser y Georges 1999); en los glaciares tropicales, la ablación se mantiene durante todo el año por debajo de la línea de equilibrio. Por esa razón, un cambio en el clima traería consigo una respuesta a corto plazo por parte de la zona de ablación del glaciar (Rabatel et al. 2013).

El retroceso glaciar en los Andes Tropicales ha comenzado a reducir la cobertura glaciar a una magnitud sin precedente desde el Periodo de Máxima Extensión glaciar (PME) de la Pequeña Edad del Hielo (LIA), a mediados del siglo XVII y principios del XVIII (Tanner et al., 2024). A partir de 1840, el retroceso glaciar comenzó a ser más notable y se aceleró aún más a finales del siglo XIX (desde aproximadamente 1870 hasta principios del siglo XX) tanto en los trópicos internos como externos (Jomelli et al., 2009).

Según Rabatel et al. (2013) en los Andes tropicales, la temperatura se incrementó a un ritmo significativo de 0,10 °C por década en los últimos 70 años. Mientras que los glaciares frente a un cambio en el clima comienzan con el ajuste de la línea de equilibrio (ELA). A medida que las temperaturas se incrementan la ELA sube en altitud. Este cambio implica que la zona de acumulación se reduce, mientras que la zona de ablación se incrementa lo que conlleva a un retroceso del glaciar (IPCC, 2013).

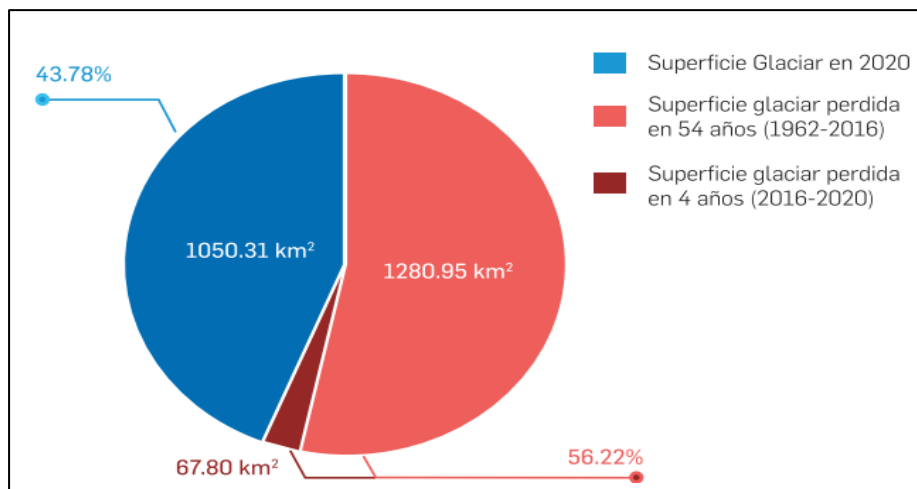
Dado el contexto climático actual, y los cambios futuros en la temperatura atmosférica proyectados por modelos climáticos globales y regionales, muchos glaciares en los Andes tropicales podrían desaparecer durante el siglo XXI, y los situados por debajo de los 5400 m.s.n.m. son los más vulnerables (Rabatel et al., 2013).

Las cordilleras de los Andes peruanos son probablemente el área glaciaria mejor documentada de los trópicos. En la Cordillera Blanca, según Kinzl (1969) informó que el retroceso de los glaciares se aceleró a finales del siglo XIX; no obstante, durante la primera mitad del siglo XX el proceso desaceleró, coincidiendo con un pequeño avance glaciario en la década de 1920 posteriormente, entre las décadas de 1930 y 1940 el retroceso se aceleró nuevamente (Georges, 2004). Seguidamente, entre 1950 y 1970 el retroceso volvió a desacelerar (Hastenrath y Ames, 1995), para luego acelerar con más fuerza en las últimas décadas, hasta el punto de superar el ritmo alcanzado por la LIA, pero a escalas decadales (Rabatel et al. 2013).

El retroceso de los frentes glaciares a nivel nacional, desde el primer inventario realizado por Hidrandina en la década 1989, hasta el último inventario nacional realizado por el INAIGEM, evidencia un retroceso acelerado de superficie glaciaria en el Perú respecto a las décadas anteriores, como se muestra en la Figura 4, según los resultados de la memoria descriptiva del inventario nacional de glaciares y lagunas de origen glaciario, desde 1962 los glaciares peruanos perdieron 1348.75 Km² de superficie glaciaria, lo que equivale al 56 % de pérdida en 58 años. A partir del inventario del año 2016, en los últimos cuatro años se ha registrado una disminución de 67.80 km² de superficie glaciaria en todo el territorio peruano (INAIGEM, 2023c).

Figura 4

Retroceso glaciar a nivel nacional de 1962-2020



Nota. Tomado de “Memoria descriptiva del inventario nacional de glaciares y lagunas de origen glaciar”. INAIGEM, 2023c.

La Cordillera Blanca, en 2016 tenía una superficie de 448.81 km² (INAIGEM, 2018) y en su último inventario el INAIGEM (2023c) determinó una superficie de 424.86 km². La pérdida de la superficie glaciar en los últimos cuatro años de 2016 al 2020 fue de 23.95 km². La Cordillera Vilcanota, la segunda cordillera más grande del Perú, después de la Cordillera Blanca, es poseedora de la cuarta montaña más alta del Perú y la más alta de Cusco: el Nevado Ausangate, con 6,384 m.s.n.m. (Perry et al., 2014) y el glaciar Quelccaya que es la capa de hielo tropical más grande de la Tierra (Thompson et al. 2021), que tiene un diámetro de 17 Km y cubre una extensión de 54 Km² (Vittor, 2008). En el 2016 esta cordillera tenía una superficie de 255.44 km² (INAIGEM, 2018) y en su último inventario el INAIGEM (2023c) determinó una superficie 216.27 km². La pérdida de superficie glaciar en los últimos cuatro años de 2016 al 2020 fue de 12.22 km².

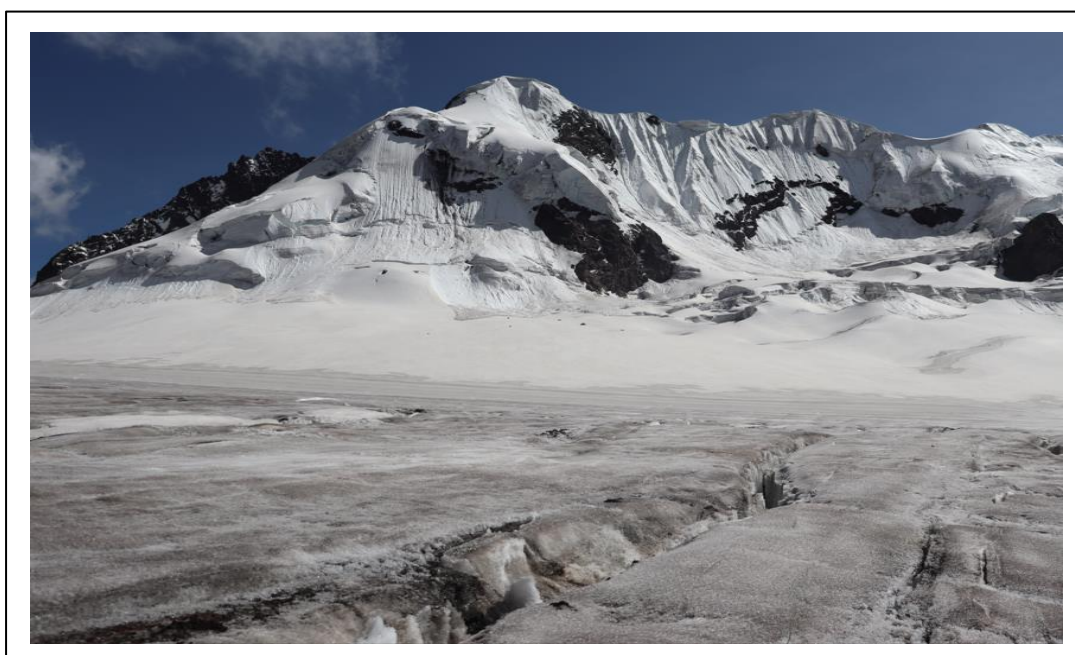
Contaminación antrópica por partículas absorbentes de luz

Los glaciares están siendo afectados, por las partículas absorbentes de luz, conocidas como partículas oscuras, que contienen carbono negro, carbono orgánico y aerosoles de polvo mineral, Estas partículas son transportadas por el viento desde su fuente de origen y se depositan en la superficie de los glaciares (Gertler et al., 2016), las partículas oscuras tienen un impacto negativo sobre la superficie glaciar afectando directamente al albedo de la nieve, Este efecto provoca una mayor absorción de energía solar, lo que a su vez aumenta la temperatura y acelera el proceso de fusión glaciar (Gilardoni et al., 2022).

El carbono negro, como se muestra en la Figura 5, tiene un impacto significativo en los glaciares. De todo el grupo de partículas absorbente de luz, incluso en cantidades mínimas, puede alterar el balance de energía en la superficie de nieve (Flanner et al., 2007). Las partículas de carbono negro se producen a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa, lo que ocurre en las emisiones generadas por el parque automotor e industrias y en los incendios forestales (Bond et al., 2013).

Figura 5

Presencia de carbono negro en el Nevado Ausangate 2023



- **Consecuencias del retroceso glaciar**

En un entorno marcado por el cambio climático, “el acelerado derretimiento de los glaciares tropicales generó que se perdiera el 56 % de la masa glaciar en 58 años” (INAIGEM, 2023c, p.44). Durante la etapa inicial de mayor pérdida de glaciares, por el derretimiento y desprendimiento de bloque de hielo pueden provocar inundaciones (Mark & Mckenzie, 2007), donde las cuencas depende de la esorrentía generada por el derretimiento de los glaciares durante la época de estiaje, y retraso o reducción de las precipitaciones (Vuille, 2013).

La disminución de la esorrentía glaciar, producto del alcance del pico hídrico (aumento temporal de la esorrentía por deshielo) (Huss & Hock, 2018), generan impactos en las cuencas con glaciares como el río Santa, donde la contribución glaciar constituye de 10 a 20 % del escurrimiento total anual y excede el 40 % en época seca (Mark et al. 2005) (Mark et al., 2005).

El derretimiento acelerado de los glaciares tiene graves implicaciones para los sistemas aguas abajo (Wang et al., 2019) contribuye al aumento del nivel del mar (Gardner et al., 2013) y regula los recursos hídricos globales y regionales (Huss y Hock 2018), principalmente en Perú y Bolivia considerados como países andinos (Rabatel et al. 2013). Los glaciares y lagunas desempeñan un rol importante al ser proveedores de agua, directa o indirectamente, para el 62 % de la población que se ubica en ciudades tanto andinas como costeras del territorio peruano (INAIGEM, 2023c). En esta región, la provisión de agua se basa en los ríos que reciben agua de las precipitaciones y del derretimiento de nieve y del glaciar. Aun cuando estas fuentes solo representan el 2 % del suministro de agua del país, son cruciales para evitar que la región se convierta en un desierto (Painter 2007). La región alto andina, habitada por pueblos originarios, se ve afectada por diversos peligros durante la época de lluvias (avalanchas, desbordes de lagunas, y derrumbes) (Rado et al. 2022).

- **Herramienta de medición para la superficie glaciar**

Salomonson y Appel (2024) señalan que una de las principales ventajas de NDSI es su resiliencia a los efectos atmosféricos y las influencias causadas por la geometría visual. Por ende, el NDSI ha sido ampliamente adoptado por la comunidad de teledetección obteniendo resultados valiosos para la planificación, manejo y mitigación de procesos biofísicos y sociales adversos (Sibandze et al., 2014).

El (NDSI) es empleado a nivel internacional para determinar áreas de nieve y se define de acuerdo Hall y Riggs (1995) como (ecuación 1):

Ecuación 1

$$NDSI = \frac{B_{visible} - B_{infrarojo}}{B_{visible} + B_{infrarojo}}$$

En el que NDSI representa el valor del índice de nieve, Banda visible es la banda verde del espectro visible y Banda infrarrojo es la banda infrarroja cercana comprendida entre los 1.55 - 1.75 μm en la imagen satelital.

El INAIGEM (2017) y Hall et al. (1995) recomiendan que se debe utilizar un umbral mayor o igual a 0.4 para resaltar la presencia de nieve y diferenciar de otros tipos de cobertura. No obstante, debido a la variabilidad de las condiciones de la imagen (ángulo de elevación del sol, condiciones atmosféricas, estacionalidad, etc.), no es posible establecer el umbral NDSI (Castillo, 2022).

3.2.6. Formación de laguna glaciares

La formación de lagunas de origen glaciar es el resultado de la desglaciación reciente o antigua (Lesi et al., 2022), alimentadas principalmente por la escorrentía producida durante la fusión glaciar. Según Huddart y Stott (2010), las lagunas pueden ser marginales, represadas por los glaciares en valles libres de hielo, formándose cerca al borde de los glaciares o en depresiones descubiertas (Guardamino & Drenkhan 2016). Uno de los

parámetros es la pendiente, según Emmer et al. (2020) los lagos se forman preferentemente en terrenos generalmente planos con una pendiente de 5° a 10°. Dicho evento es provocado por el cambio climático global que viene impactando negativamente a todos los glaciares a nivel mundial y en especial a los glaciares tropicales desde el final de la (LIA) (Emmer et al., 2020).

Tal como señala Yap (2015) los procesos de erosión y deposición causados por glaciares crean una variedad de paisajes y formas geomorfológicas únicas. Uno de estos paisajes es conocido como lagunas glaciares.

Una de las características cualitativas de las lagunas, según Emmer et al. (2016) son los tipos de represas: morrena, lecho rocoso, represas combinadas (lecho rocoso con cubierta morrena delgada) y represas de hielo (lagos supraglaciales). El ritmo en la que se forman las lagunas de origen glaciar va a depender de diversos factores que determinan las condiciones del clima, glaciológicos, topográficos y geológicos, entre otras (Haeberli et al., 2013).

Cuando los glaciares se desplazan hacia adelante, es posible la formación de lagunas en valles donde se han formado diques de escombros (Guardamino y Drenkhan 2016). Al replegarse los glaciares, también se pueden formar nuevas lagunas en los espacios que se generan entre las morrenas frontales o laterales y el hielo glaciar que se encuentra en retroceso (Kaltenborn et al., 2010). Es importante mencionar que la formación de lagunas proglaciares no solamente responde a la existencia de morrenas detrás de las cuales se forman las lagunas, sino también a depresiones que hayan quedado expuestas por la desglaciación (Frey et al. 2010).

Por otro lado, para la ANA (2019) gran parte de lagunas se forman en depresiones del lecho rocoso y, por ende, presentan represas estables. Sin embargo, se constituyen cerca de pendientes de roca o morrenas y de picos empinados por sobre los 5000 m.s.n.m., donde en muchos casos es notorio el derretimiento paulatino del glaciar. A largo plazo, este entorno

cambiante e inestable en las altas montañas pueden aumentar la probabilidad de grandes avalanchas de roca o hielo hacia las lagunas. Esto a su vez incrementa los riesgos de olas, inundaciones y daños a poblaciones e infraestructuras situadas a una distancia considerable río abajo (Haerberli et al., 2017).

Por otra parte, Frey et al. (2010) indican los efectos que tiene la formación de estas nuevas lagunas, que pueden ser positivos desde la perspectiva de atractivo (turístico) que le agregan al paisaje, lo cual compensa la pérdida de valor paisajístico que genera el derretimiento glaciar. Simultáneamente INAIGEM (2023c) considera que las lagunas de origen glaciar son ecosistemas valiosos que están ubicados en la parte altoandina, son reservorios naturales, debido a su almacenamiento proveniente del derretimiento de los glaciares y de la precipitación en la temporada húmeda. Actúan como reguladores del ciclo hidrológico en la época de estiaje, suministrando agua a los medios de vida que dependen de estas fuentes y a las numerosas actividades de sustento como el pastoreo de camélidos sudamericanos, riego, energía, electricidad, turismo, agua potable, etc.

En la memoria descriptiva del inventario nacional de glaciares y lagunas de origen glaciar se identificaron 8466 de estas lagunas, su superficie total corresponde a 1082 Km², estas lagunas de altas montañas se encuentra repartidas en catorce departamentos a nivel nacional y en las veinte cordilleras glaciares (INAIGEM, 2023c).

La Cordillera Vilcanota posee 552 lagunas de origen glaciar. Cubriendo un área 63.66 Km² la mayoría de estas lagunas son periglaciares (INAIGEM, 2023c).

- **Clasificación de lagunas de origen glaciar**

Haerberli et al. (2010) clasifican las lagunas de origen glaciar en cinco tipos: englaciares, subglaciares, supraglaciares, proglaciares y periglaciares. De acuerdo al INAIGEM (2023c) las lagunas supraglaciares, proglaciares y periglaciares son de fácil detección mediante métodos de teledetección.

Lagunas proglaciares

Las lagunas proglaciares son cuerpos de agua que se encuentran en los márgenes de los glaciares (Tweed & Carrivick, 2015). Se caracteriza por tener contacto directo con el glaciar y normalmente sus bordes están conformados por morrenas laterales y terminales (Kumar & Narayan, 2017), estos cuerpos de agua están represados por el glaciar, detritos escombros, lechos de roca y morrenas (INAIGEM, 2023).

Lagunas periglaciares

Son depósitos de agua, alguna vez ocupados por los glaciares, a la fecha ya no están en contacto directo con el glaciar (Haeberli et al., 2010). Estos reservorios naturales son alimentados por la precipitación (sólida y líquida) en la época de lluvia y en la época de estiaje, el principal aporte son las escorrentías como resultado del derretimiento glaciar. El dique de este tipo de lagunas está formado principalmente de material morrenico (INAIGEM 2023c).

Lagunas supraglaciares

Este tipo de lagunas se forman en las zonas donde el glaciar retrocede con más rapidez, en la parte terminal o frente glaciar, y se forman por la acumulación de la lluvia y agua del deshielo en depresiones sobre los glaciares (Wendleder et al., 2021).

El llenado y drenaje de la laguna están influenciados por las precipitaciones, pues provocan un incremento en la velocidad de movimiento del glaciar. Esta aceleración puede provocar la formación de grietas en el glaciar, especialmente si el agua llega al lecho del glaciar. Como consecuencia, las vías de drenaje del agua de la laguna se expanden (Wendleder et al., 2021).

Los lagos supraglaciales pueden calentarse por la radiación solar entrante y, por tanto, puede ser responsable de un considerable derretimiento subacuático. Estudios

anteriores han indicado que los lagos podrían ser responsables de 1/8 de la pérdida total de hielo en el valle de Langtang, Nepal (Miles et al., 2018).

- **Herramienta para identificar lagunas**

El índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI, por sus siglas en inglés) es un método para identificar lagunas mediante imágenes digitales de percepción remota (McFeeters, 1996). Este índice es usado para determinar el grado de humedad o cuerpos de agua aplicando el contraste en los niveles de reflectancia en el color verde del espectro visible y baja reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR), en el que los valores varían entre 1 y -1, donde 1 es una superficie con agua y -1 es una superficie cubierta por vegetación (CIREN, 2011).

El NDWI utiliza las bandas verde e infrarroja cercana y se calcula mediante la siguiente ecuación (McFeeters, 1996) ecuación 2:

Ecuación 2

$$NDWI = \frac{\text{BandGreen} - \text{BandNIR}}{\text{BandGreen} + \text{BandNIR}}$$

Donde, “NDWI es el valor del índice de agua, BG es la banda verde del espectro visible y BNIR es la banda infrarroja cercana comprendida entre los 0.84-0.88 μm de la imagen satelital” (McFeeters, 1996 citado por Castillo, 2022. p.39).

Wang et al. (2020) menciona que los valores de -0.05 a 0.20 son considerados para el inventario de las lagunas glaciares en todo el mundo. El INAIGEM (2017) recomienda la aplicación del umbral mayor de 0.40. Ji et al. (2009) sugiere que el umbral de NDWI aplicado deberá ser ajustado según las situaciones reales de estudio porque este valor no es una constante.

Al emplear el índice, es recomendable realizar correcciones manuales con el apoyo de imágenes satelitales de alta resolución (como Google Earth, BING, etc.) para depurar sombras, zonas rocosas y ajustar la geometría de las lagunas (INAIGEM, 2017).

3.2.7. Evolución de lagunas glaciares

Desde finales de la LIA, el retroceso de los glaciares de todas las montañas a nivel mundial ha originado la formación de las lagunas de origen glaciar (Haeberli et al., 2013), de ese modo, se denomina a la última pulsación fría observada en la Tierra, así lo indican los estudios de isótopos de oxígeno del glaciar Quelccaya (ANA, 2015). La evolución de las lagunas inicia con la aparición gradual de charcos sobre la superficie de la lengua glaciar por la contracción y fusión de los glaciares que descienden de los nevados, a su paso encuentran una barrera natural lo que permite la acumulación y el crecimiento de agua, para la formación de lagos de altas montañas (UGRH, 2013), como los vasos actuales de las lagunas existentes en todas las cordilleras nevadas. Uno de los factores importantes que influyen en la evolución de estas lagunas de origen glaciar, es el cambio de temperatura; los nacimientos e incrementos de las lagunas de origen glaciar están directamente ligados con la acelerada fusión de los glaciares (ANA, 2018).

El cambio climático, la alteración repetida de los períodos de avance de los glaciares y su consiguiente retroceso están provocando cambios ambientales a largo plazo. En este contexto del cambio ambiental general, se forman, evolucionan y también se extinguen distintos tipos de lagos de alta montaña de forma sucesiva (Clague & Evans 2000). Comprender mejor la distribución y evolución de las lagunas de origen glaciar y la comprensión de los procesos relacionados es de gran interés científico y puede (Emmer et al., 2020) i) ayudar en la gestión eficaz del agua una necesidad resultante del cambio de las condiciones hidrológicas en las cuencas hidrográficas de altas montañas (Drenkhan et al., 2015), ii) ayudar en el análisis de peligros y la gestión de riesgos de inundaciones en lagos

(Carey et al., 2012), y, iii) ayudar retroactivamente a comprender mejor el cambio ambiental en curso (Emmer et al., 2020).

Haeberli et al. (2013) señala que la reducción de la cobertura glaciar no solo está generando nuevas lagunas, sino que también provoca la inestabilidad de las pendientes debido al efecto erosivo a medida que el glaciar retrocede. Actualmente, ya se han registrado varios casos de avalanchas de hielo y roca en diferentes lugares del mundo, relacionados con el derretimiento glaciar.

De acuerdo con Huggel et al. (2002) las lagunas que cuentan con dique morrénico han generado más desastres a nivel mundial, debido al material no consolidado que las constituye; según McKillop y Clague (2007) ocasiona daños materiales por mil millones de dólares y pérdidas de vidas humanas. El desborde de las lagunas ocurre por una falla en el dique morrénico o de hielo, por la presencia de otros factores catalizadores como son la actividad sísmica y derrumbes de tierra o avalanchas (Kaltenborn et al., 2010).

La mayoría de los GLOF se originaron en lagos en una fase proglaciar (es decir, en contacto con un glaciar) (Emmer et al., 2020), como el desborde de la laguna Upiscocha, suscitado en los días 14 mayo y 09 de agosto del 2022, esta última, según referencia de los pobladores que habitan en las inmediaciones, tuvo origen en el sector posterior del flanco derecho, zona inestable donde se reportaron los últimos eventos de caídas de roca (INAIGEM, 2022a y 2022b).

- **Consecuencias de la formación y evolución de lagunas de origen glaciar**

- Inundación por desbordamiento de lagos glaciares (GLOF)**

Desde el final de la LIA, el retroceso de los glaciares en los Andes peruanos dio lugar a la formación y evolución de varias lagunas, que podrían provocar inundaciones repentinas de los lagos glaciares, también conocido como (GLOF) (Bařka et al., 2020). Estos, se caracterizan por el desborde violento de lagunas (Emmer et al., 2020). Estos desbordes son

generados por el desprendimiento de bloques o avalanchas de hielo, rocas que golpean la laguna y terremotos (INAIGEM, 2023c).

Se pueden identificar diversos factores determinantes que influyen en la dimensión y frecuencia del suceso, entre los que se encuentran: volumen de la laguna y el material, el régimen hidrológico y la dinámica glaciar, como las avalanchas en la zona de contacto del glaciar o la laguna (Carey et al., 2012). Además, la pendiente del glaciar es un parámetro crucial; según el Grupo de Trabajo Permanente sobre Amenazas Glaciales y Permafrost en Alta Montaña (GAPHAZ, 2017), si los glaciares se ubican en laderas que superan los 25° o 46,6 % de inclinación, pueden representar una amenaza haciéndolos propensos a generar avalanchas. También los eventos de GLOFs representan un peligro para las poblaciones y centros poblados que se encuentran en las zonas bajas de las cuencas, ocasionando pérdidas de vidas humanas (Haeberli et al., 2017).

El Perú ocupa el puesto tres a nivel mundial en exposición al peligro como resultado de inundaciones repentinas de las lagunas de origen glaciar (Taylor et al., 2023).

- **Herramientas para identificar lagunas en evolución**

Para determinar el proceso evolutivo de una laguna, se utiliza la ecuación 2, INAIGEM (2017), y se recomienda que la aplicación de los valores de umbral sea superior a 0.40. Seguidamente, se debe de realizar una corrección manual con el apoyo de imágenes satelitales de alta resolución para depurar sombras, zonas rocosas y ajustar la geometría de las lagunas.

Determinar el volumen de algunas es difícil. La teledetección proporciona datos solo el área, más no el volumen de una laguna (Huggel et al., 2002). Estos ecosistemas lacustres de montañas, están situadas la gran parte en áreas remotas y son de difícil acceso, lo que limita su investigación (Cook & Quincey, 2015). Es por esa razón que la mayoría de los inventarios existentes sólo incluyen datos básicos como la superficie, área, longitud y ancho.

Debido a la inaccesibilidad, no es posible obtener información batimétrica para calcular el volumen y la profundidad de estas lagunas de origen glaciar (Muñoz et al., 2020).

3.3. Definición de términos

- **Balance de masa glaciar**

Hace referencia a la relación que existe entre la ganancia y la pérdida neta de hielo en un glaciar. La ganancia se produce mediante la acumulación de nieve y hielo (es positivo cuando la ganancia es mayor que la pérdida y por lo tanto el área glaciar aumenta), y la pérdida se produce por la fusión y la evaporación (es negativo cuando la pérdida es mayor que la ganancia, lo que lleva a una disminución neta del área glaciar) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente ([UNEP], 2007).

- **Cambio climático**

El cambio climático se define como cambios duraderos y notables en las condiciones climáticas, que pueden comprender variaciones en la media de la temperatura, en los modelos de lluvia y en los fenómenos climáticos extremos. Estos cambios pueden ser resultado de procesos naturales internos, influencias externas o actividades humanas que afectan la composición atmosférica y el uso de la tierra a lo largo del tiempo (IPCC, 2007).

- **Casquete glaciar**

Masa de hielo de cúpula que cubre una zona alta, y que es considerablemente más pequeña que una placa de hielo (INAIGEM, 2018).

- **Criósfera**

Este concepto engloba todo el sistema terrestre que alberga una cantidad significativa de agua en forma sólida, incluyendo elementos como la nieve, ríos y lagos congelados, hielo marino, placas de hielo, plataformas de hielo, glaciares, capas de hielo y suelos congelados (Ding, Zhang, Zhao, Li, & Kang (2019).

- **Cuenca glaciar tropical**

Es un sistema glaciar que se desarrolla en zonas tropicales, se caracteriza por una alta tasa de precipitación, alta humedad y temperatura. Lo que lleva a una dinámica glaciar única, a través de procesos tal como la ablación, la fusión y la formación de nuevas lagunas de origen glaciar (Pouyaud, 2005).

- **Ecosistemas de montañas**

Son ecosistemas que se desarrollan en regiones montañosas y se caracterizan por una gran diversidad de condiciones climáticas, topográficas y geológicas. Estas condiciones originan una variedad de hábitats y medios de vida únicos y frágiles, que brindan servicios ecosistémicos y son importantes para el suministro de agua, conservación de la biodiversidad (INAIGEM, 2024).

- **Efecto invernadero**

Es un proceso natural que se produce en la atmósfera terrestre, en el cual algunos gases, tal como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (NO₂), absorben el calor de sol y mantienen la temperatura promedio de la tierra dentro de un intervalo apropiado para la vida (IPCC, 2021).

- **Fenómeno climático**

Son alteraciones en el clima, que suceden en la atmósfera, incluye todos los acontecimientos que se pueden producir ligados a la dinámica de la atmósfera (IPCC, 2007).

- **Glaciar**

Cuerpo constituido de hielo y nieve ubicado en las cabeceras de cuenca que tiene un movimiento por efecto de la gravedad (INAIGEM, 2018).

- **Frente glaciar**

Es el límite frontal delantero de un glaciar, donde el hielo se encuentra con el entorno circundante. Este punto marca el límite del glaciar y entra en contacto con el aire, agua u

otras formaciones terrestres. La forma y las características del frente glaciar pueden variar de acuerdo con factores como la topografía del terreno, la temperatura y la rapidez con la que el glaciar se desplaza (UGRH, 2014).

- **Morrena**

Es una acumulación de materiales, sedimentos y tierra que se acumula en la base y en los costados de los glaciares a medida que retroceden. Se forman por la acción de los sedimentos que son transportados por el hielo glaciar y se van depositando a lo largo de su recorrido (INAIGEM, 2018).

- **Sistema de información geográfica**

Son programas tecnológicos que proporcionan instrumentos para el procesamiento, gestión, análisis y visualización de datos que implican la ubicación geográfica, se conocen como programas informáticos con un componente cartográfico (INAIGEM, 2017).

- **Teledetección espacial**

Método mediante el cual se obtiene información a través de la observación, análisis y la interpretación de la superficie terrestre. Esto implica que, a través de sensores remotos ubicados en plataformas como drones, naves espaciales y satélites se obtiene información de una imagen superficial a distancia sin la intervención humana (Chuvienco, 1990).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Por su enfoque, la presente investigación cumple con las características de tipo cuantitativo, porque la información utilizada es de tipo numérico y por consiguiente medible; las conclusiones obtenidas son exactas y están respaldadas por los datos y la estadística (Bernal, 2010), en la investigación se determinó el área, se inventarió la cantidad de lagunas y se determinó la evolución de lagunas de origen glaciar.

Según Hernández (2014) el estudio es de alcance correlacional, porque pretende responder a las preguntas de investigación que buscan asociar variables mediante un modelo probable para un grupo o población. “tiene como la finalidad conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más conceptos” (p.93), es utilizada para asociar a dos o más variables (Tam, Vera & Oliveros 2009). Este tipo de estudios, “al evaluar el grado de asociación entre dos o más variables, miden cada uno de ellos y después cuantifican y analizan el vínculo” (Fernández, 2014, p.93). En la presente investigación se describe las variables mediante el método analítico. Puesto que la formación y evolución de lagunas dependen del retroceso glaciar.

Según Fernández (2014) el diseño de la investigación se refiere a la estrategia generada para conseguir la información que se desea con el propósito de responder al planteamiento del problema. Para el presente estudio se aplicó el diseño no experimental,

porque la investigación se realizó sin manipular deliberadamente las variables, es decir, se trata de estudios donde no se hace variar en forma intencional las variables dependientes para observar los efectos sobre otras variables.

El diseño no experimental aplicado es longitudinal, puesto que se analizó el cambio de la cobertura glaciaria y superficie lagunar a través del estudio multitemporal (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Ámbito temporal

La presente investigación se realizó con una duración de 11 meses, iniciando la investigación en el mes de septiembre del 2023 y culminando en el mes de julio de 2024, siendo este el tiempo necesario para finalizar la investigación.

4.2.2. Ámbito espacial

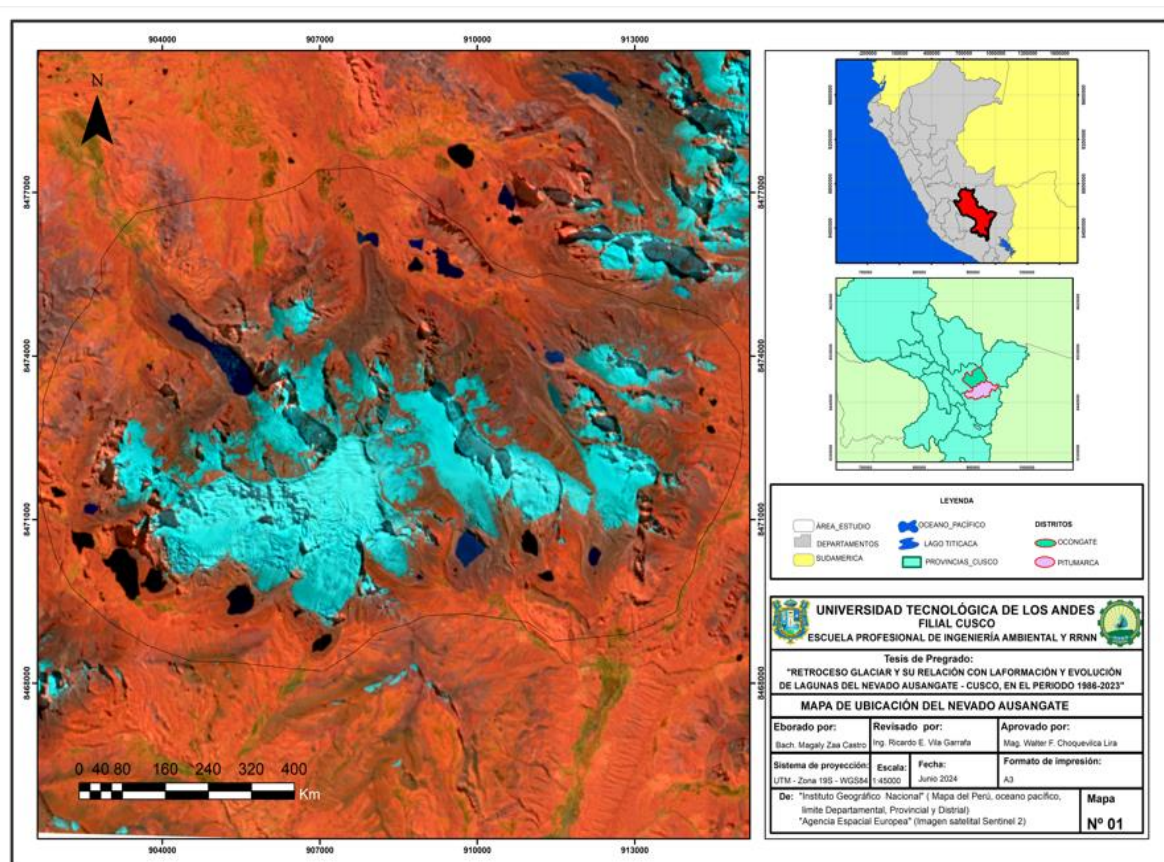
El área de estudio abarca el Nevado Ausangate, que está situado políticamente en el departamento del Cusco, específicamente entre las provincias de Canchis y Quispicanchi y dentro de los distritos de Pitumarca y Ocongate. Se sitúa en la Cordillera de los Andes, en un tramo denominado Cordillera Vilcanota (ver Figura 6).

Hidrográficamente, el área de estudio pertenece a las microcuencas (Pitumarca, Pinchimuro mayo y Lauramarca), a las subcuencas (Yavero y Vilcanota), de la cuenca Urubamba Vilcanota, perteneciente a la gran vertiente del océano Atlántico (ANA, 2019; INAIGEM, 2023c).

Geográficamente el ámbito de la investigación se encuentra en las coordenadas de la zona de interés en UTM Zona 19S/ WGS84, son: Este 256,451; Norte 8,475,813 y Latitud 13°47'39.77"S; Longitud: 71°13'46.32"O

Figura 6

Mapa de ubicación del Nevado Ausangate



Nota. En la presente figura se señala la ubicación del Nevado Ausangate.

• Flora

En el área de estudio, existen diversas especies de flora. Uno de ellos es la *Valeriana nivalis*, que se caracteriza por ser una planta de alta montaña que se debilita por la aceleración del cambio climático (Almeida et al., 2013). La gran mayoría de plantas migran a las zonas cerca de un glaciar para evitar su desaparición debido a una mayor competencia con las diferentes plantas en la parte baja (Francou et al., 2010). Estas especies poseen estrategias particulares, principalmente cuentan con un alto grado de propagación de semillas, empleando el viento como medio (“anemocoria”). Por esa razón, las especies anemocoria son más comunes en lugares nuevos, mientras que las especies que no utilizan esta estrategia para su propagación corren un riesgo de extinguirse (Almeida et al., 2013).

Figura 7

Valeriana nivalis, especie encontrada en el Nevado Ausangate



Nota. Muestra de especie colonizadora en espacios de desglaciación reciente, producto de la dispersión de semillas gracias al viento (*Valeriana nivalis*; Nevado Ausangate).

Las siguientes especies también se desarrollan como resultado del retroceso glaciar en áreas libres de glaciación: *Achillea erba-rota*, *Saxifraga aizoides* y *Saxifraga paniculata* (Tu et al. 2024).

- **Fauna**

En glaciares tropicales, como el Nevado Ausangate, se encuentran diversas especies de fauna, incluyendo insectos, colémbolos y lombrices de tierra. En particular, los escarabajos terrestres (*Coleoptera: Carabidae*) son algunos de los primeros colonizadores de terrenos recientemente desglaciados (Moret et al., 2020).

- **Factores climáticos**

Los factores climáticos dentro de la zona de influencia de la investigación están diferenciados entre dos temporadas (húmeda y seca). Según Perry et al. (2014), la cantidad de lluvia que se produce en promedio cada año en la región del altiplano es de alrededor de 700 mm, basado en datos recopilados de 7 estaciones meteorológicas durante el período de 2005 a 2010. De acuerdo con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, 2017), en las 4 estaciones automática (Ccatcca, Combapata, Sicuani, y Pomacanchi) registraron desde el año 1965 hasta el año 2016 (ver Tabla 2).

Tabla 2

Registro de precipitación y temperatura

Estación	Ccatcca		Combapata		Sicuani		Pomacanchi	
Meses	T	Pp	T	Pp	T	Pp	T	Pp
Enero	9.14	125.4	11.1	133.5	12.22	135	10.4	163.7
Febrero	9.17	118.7	11.65	122.8	12.11	133	10.26	147.3
Marzo	8.87	99.9	11.44	118	12.07	118.6	10.39	120
Abril	8.7	38.9	11.27	56.4	11.37	51.5	9.95	59.6
Mayo	7.59	7.7	11.24	12.6	9.62	11.8	8.71	15.5
Junio	6.51	4.7	9.65	7.4	8.05	5.5	7.59	4.1
Julio	5.89	5.5	10.2	9.1	7.9	7.7	7.31	5
Agosto	6.98	9.2	10.72	13.2	9.33	11.1	8.68	9.2
Setiembre	8.21	15.8	12.65	24.6	11.41	22.4	10.26	29.3
Octubre	9.86	39	14.2	50.1	12.57	51.9	11.12	66.9
Noviembre	9.75	58.3	14.1	79.4	12.7	75	11.09	84.5
Diciembre	9.42	102.5	13.59	109.1	12.56	109.7	10.92	142.4
Promedio	8.34		11.83		10.99		9.72	
Total		6245.4		736.2		733.2		847.5

Nota. * Temperatura (T) en grados (°C); Precipitación (PP) en milímetros (mm). Adaptado de SENAMHI 2017. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

- **Generalidades**

La Cordillera Vilcanota, que alberga al nevado Ausangate, según Salzman et al. (2013) se localiza en una región climáticamente compleja ubicada en el límite sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Esta ubicación geográfica hace que la región esté influenciada por patrones climáticos tanto tropicales como subtropicales (Salzman et al., 2013) y “está situado en un región que está potencialmente influenciada por patrones de variabilidad interanual causados por la Oscilación El Niño-Sur (ENSO)” (Salzman et al., 2013, p.17), con un alto grado de humedad que transporta del este durante El Niño y con patrones de flujo del oeste más secos durante La Niña (Perry et al., 2014). Estas anomalías tienen un influencia en el balance de masa de los glaciares en los Andes peruanos, con un derretimiento potencialmente fuerte debido a una mayor ablación durante El Niño y un balance de masa más estable o incluso positivo durante La Niña (Drenkhan et al., 2018).

La denominación del nevado Ausangate “proviene de la palabra quechua *Awsangati*, que significa el que puede” (Muña, 2011, p.17). Los pobladores andinos “adoran a la *Pachamama* (madre-tierra) y a los Apus, que son los espíritus de las montañas y quienes proveen de agua y determinan el clima. Existen muchos rituales de agradecimiento a la *Pachamama* por todo lo que les ha otorgado” (Rado et al., 2022, p.4) . Estas ofrendas que realizan, no es un pago, sin embargo sirve para recuperar la armonía y el equilibrio para con la naturaleza (Lindemann y Morra 2007). También, representa valores culturales en la cosmovisión andina (Drenkhan et al., 2015), incluidos deidades de la montaña, con ofrendas y actividades de peregrinación (Drenkhan et al., 2018). El Ausangate es considerado una de las montañas representativas de la región y está ubicada muy cerca de la Ciudad del Cusco, lo que la hace un destino muy accesible y poseedor de espejos de agua de color turquesa como 7 lagunas, laguna Yawarcocha y vistas turístico maravillosas como sacados de un cuento.

Su altitud es de 6384 m.s.n.m. y ocupa la cuarta posición en cuanto a montañas más altas del Perú y la decimoséptima en la cadena montañosa de los Andes (Perry et al., 2014). Además en 1953, los alpinistas H. Harrer, H. Steinmetz, F. Marz y J. Wellenkamp lograron realizar la primera ascensión de esta montaña (Muña, 2011).

4.3. Población y muestra

De acuerdo con (Bernal 2010) la población se define como el conjunto de todos los elementos a los cuales se refiere la investigación. También se define la totalidad de elementos o individuos que tiene ciertas características similares y sobre las cuales se desea hacer inferencia. En este contexto, la población está compuesta por el Nevado Ausangate y lagunas de origen glaciar del área de estudio.

4.4. Instrumentos

Valderrama (2019) menciona que los instrumentos son herramientas que sirven para la recopilación de la información en documentos y que permite al investigador medir la variable para que la herramienta sea válida. Las herramientas utilizadas fueron:

- Imágenes satelitales tipo Landsat 5 y 8
- Imágenes satelitales Sentinel-2
- Google Earth
- DEM ALOS PALSAR de Resolución 12.5 metros
- Hardware: Laptop Dell, GPS Garmin GPSMAP 64s y Cámara fotográfica
- Software: ArcGis 10.3, Excel 2013 y Microsoft Word
- Cuaderno de notas
- Materiales de Escritorio

4.5. Procedimientos

El procedimiento se refiere al conjunto de pasos y técnicas aplicadas por el investigador con el propósito de recopilar la información necesaria para conseguir los

objetivos de la investigación (Valderrama, 2019). En el presente trabajo investigativo, la técnica de recopilación de la información fue la observación.

a) La observación

Hernández et al. (2014) Indican que la observación investigativa no se enfoca exclusivamente en la vista, se refiere a todos los sentidos y realizan objetivos múltiples en un estudio.

Como se mencionó, la presente investigación es cuantitativa y correlacional, y la técnica de observación fue el elemento clave para la recolección de la información, que permitió señalar la problemática de retroceso glaciar y formación de lagunas en los ecosistemas de montañas del Nevado Ausangate.

- **Técnicas de recolección de datos**

Cabe mencionar, que en esta investigación se utilizó la técnica en sus dos formas; indirecta y directa.

Indirecta: Se utilizó la observación indirecta, en la etapa de procesamiento de imágenes satelitales de Lansat (5 y 8) y Sentinel-2, a través del uso de herramientas de ArcGIS 10.3, DEM Alos Palsar y Google Earht, los cuales fueron los principales insumos, en la determinación del retroceso glaciar, identificación de lagunas y la evolución en el Nevado Ausangate.

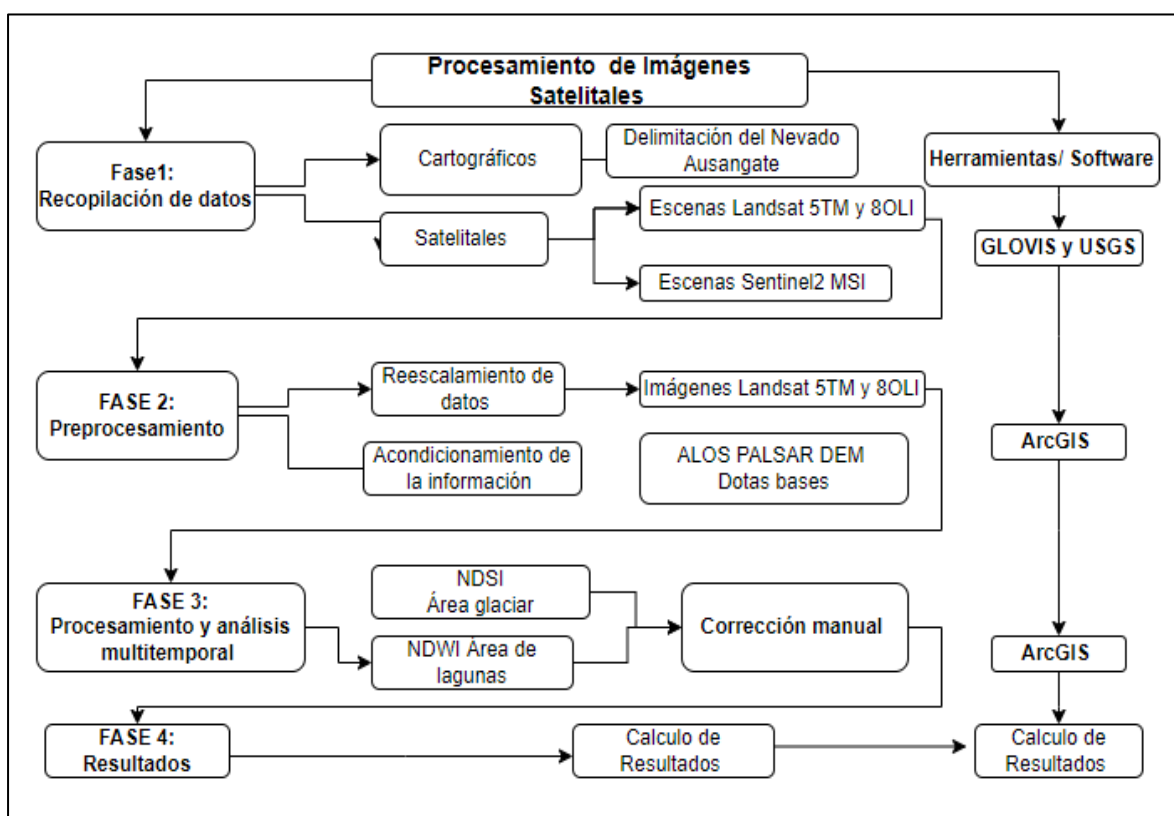
Directa: Se aplicó la observación directa en la fase de salida de investigación de campo, a través del uso de herramientas de obtención de datos (como cuaderno de campo, cámara fotográfica, GPS), que permitió conocer la problemática presente en el Nevado Ausangate.

La técnica utilizada en esta investigación comprende cuatro fases como se puede apreciar en la Figura 8, donde se muestra el diagrama de trabajo que representa de manera resumida las técnicas utilizadas. En la primera etapa se recopiló información cartográfica y

satelital, información requerida para determinar las áreas de la superficie glaciar, lagunar e inventariar los ecosistemas lacustres. La segunda etapa fue el preprocesamiento de imágenes satelitales y evaluación de calidad de los productos para la elección con menor error geométrico. En la etapa tres, empleando la aplicación de índices espectrales, se pudo delimitar la cobertura nival, cuantificar la cantidad de los polígonos correspondientes a glaciares, lagunas y enumerarlas. En la etapa cuatro, se obtuvieron los parámetros de área glaciar - lagunar, altitud lagunar y período de aparición.

Figura 8

Diagrama de proceso y manejo de insumos técnicos



4.5.1. Fase 1: Recopilación de datos cartográficos y satelitales

Esta etapa consistió en la recolección de la información cartográfica y satelital, que fue utilizada para determinar la variación de la superficie glaciar, inventariar la cantidad de lagunas formadas y analizar la evolución de lagunas, como se observa en la Tabla 3, las

escenas de imágenes satelitales Landsat TM y OLI, en la Tabla 4, las imágenes de Sentinel-2 y la Tabla 5 modelo de elevación digital.

Para la recolección de datos satelitales, se utilizaron imágenes de Landsat 5 y 8 debido a su facilidad de adquisición y disponibilidad histórica. El acceso a las imágenes Landsat 5TM está disponible desde 1984. El acceso a las imágenes es a través del portal web del USGS Global Visualización Viewer (GLOVIS) <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Para la elección de las escenas se consideró el tiempo de captura de las imágenes, que en cuanto a la presente investigación debe considerarse los meses de estiaje (mayo – agosto), el cual facilita definir con precisión los contornos glaciares y prevenir confusiones con nieve temporal (INAIGEM, 2017). De la misma forma, la nubosidad se filtró hasta un 15%, para evitar alterar los resultados. Las escenas ya se encuentran corregidas radiométrica y geoméricamente con un nivel de calidad 9 y de corrección L1T. En total se descargaron 6 imágenes satelitales principales de Landsat, como se observa en la Tabla 3, se especifica a mayor detalle las propiedades de cada escena que se emplearon en la investigación.

Tabla 3

Características de las escenas Landsat utilizadas en el estudio

Fecha	Código	Sensor	Calidad / Nivel de corrección
12/07/1986	LT05_L2SP_003070_19860712_20200917_02_T1	5TM	9/LT1
10/06/1992	LT05_L2SP_003070_19920610_20200914_02_T1	5TM	9/LT1
29/07/1998	LT05_L1TP_003070_19980729_20200909_02_T1	5TM	9/LT1
11/06/2005	LT05_L2SP_003070_20050817_2020902_02_T1	5TM	9/LT1
12/06/2010	LT05_L2SP_003070_20100612_20200823_02_T1	5TM	9/LT1
30/07/2016	LC08_L2SP_003070_20160730_20200906_02_T1	8OLI	9/LT1

Nota: Adaptado de earthexplorer.usgs.gov, por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, 1984 (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

Para complementar los datos satelitales, se utilizaron las imágenes satelitales de Sentinel-2 debido a su resolución de alta calidad de 20 m, de libre acceso hasta la fecha a través de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. “El nivel de corrección (geométrica y atmosférica) y la disponibilidad temporal (cada 5 días) de las imágenes satelitales Sentinel-2 nivel L1C” (Castillo, 2022, p.56), poseen corrección geométrica y radiométrica (INAIGEM, 2017), lo que hizo que se utilice para la presente investigación (ver Tabla 4).

Tabla 4

Características de escenas Sentinel2 que se emplearon en la investigación

Satélite	Tipo	Año	Mes	Código
Sentinel2	S2MSI2A	2023	julio	S2A_MSIL2A_20230723T145731_N0509_ R039_T19LBE_20230723T211750

Nota: Adaptado de Agencia Espacial Europea (ESA), por Copernicus Open Access Hub, 2016 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Cabe mencionar, que en la presente investigación se tomó múltiples años de estudio (1986-2023), con intervalos de 5, 6 y 7 años. Desde 1986 a 2010 con las imágenes Landsat 5 TM, del 2016 con Landsat 8 OLI y finalmente del 2023 con Sentinel-2.

Todas las imágenes satelitales se re-proyectaron a la zona 19 sur (en cuanto a las imágenes Landsat) y recortadas a la zona de estudio, para después, determinar la cobertura glaciar.

En cuanto a la información topográfica (altitud) se trabajó con modelo digital de elevación (DEM), descargando la escena de ALOS-PALAR del portal Vertex: <https://search.asf.alaska.edu/#/> (ver Tabla 5). Este DEM tiene una resolución espacial de 12.5 m; a partir de este modelo se obtuvo la altitud (INAIGEM 2018).

Tabla 5*Datos del ALOS-PALSAR DEM*

Fecha	Código	Sensor	Tipo
10/06/2009	ALPSRP179866910	ALOS - PALSAR	Hi-Res Terrain Corrected

Nota: Adaptado de portal Vertex, por Alaska Earthdata, (<https://search.asf.alaska.edu/#/>).

4.5.2. Fase 2: preprocesamiento de imágenes

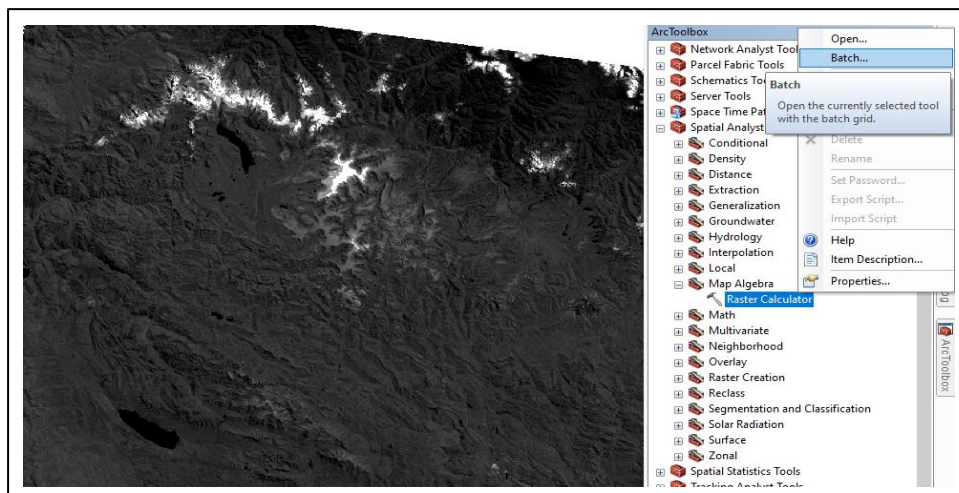
Para la presente investigación se utilizó las imágenes satelitales de Landsat 5 TM y 8 OLI de la Colección 2 y Nivel-2, esto ya que han pasado por un proceso previo de corrección radiométrica y geométrica (M. Valladares, comunicación personal, 28 de enero de 2024), con respecto a la colección 1, y, por consiguiente, una metodología diferente al momento de procesar la imagen para que pueda ser usada. En ese aspecto, para obtener los datos de reflectancia de una imagen Landsat se debe realizar un escalamiento de datos, ya no es necesario la corrección atmosférica (J. Peña, comunicación personal, 13 febrero de 2024). Para el Servicio Geológico de EE. UU. (USGS, 2020) la reflectancia de la superficie “mide la fracción de la radiación solar entrante que se refleja desde la superficie de la Tierra hasta el sensor Landsat” (párr. 3). Los algoritmos de reflectancia de superficie Landsat Ecosisten Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) y Land Surface Reflectance code (LaSRC) corrigen los “efectos de dispersión y absorción que varían temporal, espacial y espectralmente de los gases atmosféricos, aerosoles y vapor de agua, lo cual es necesario para caracterizar de manera confiable la superficie terrestre de la Tierra” (párr. 4).

a) Escalamiento de datos de imágenes Landsat 5 y 8

Para el escalamiento de datos, primero se adjuntó al programa de software ArcGIS 10.3, las imágenes Satelitales Landsat 5 (bandas 1-5, 7), la 6 no se agregó, porque es la banda termal, no es de reflectancia de superficie como el resto de las bandas (ver Figura 9).

Figura 9

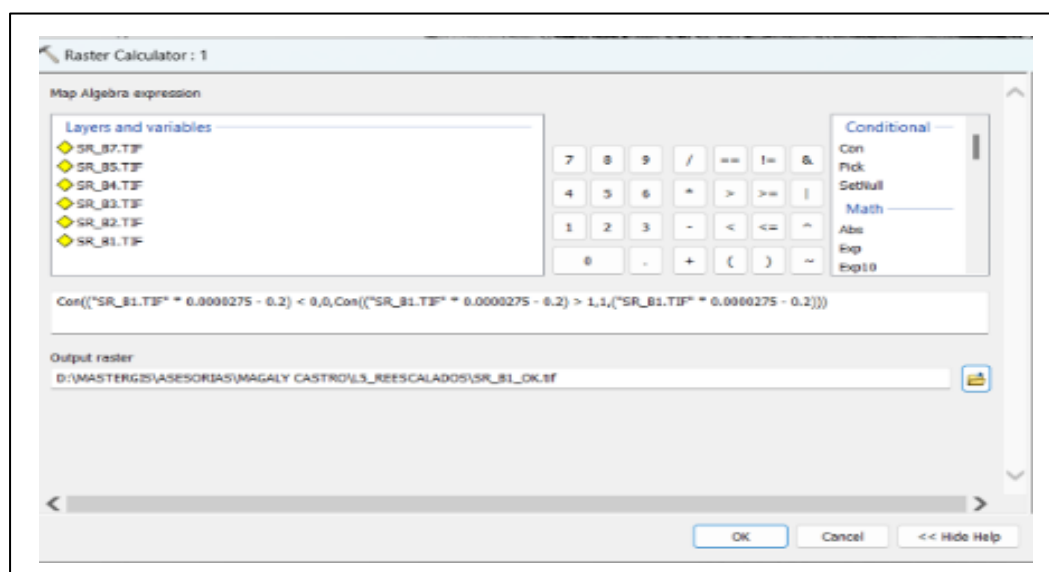
Escalamiento de imagen Landsat 5 (1989)



Como se trabajó con 6 bandas, se dio clic al icono + (Addrow) 5 veces. Luego doble click en la intersección de la columna Map algebra expresión y fila 1. Se abrió la ventana de Raster Calculator y se introdujo la fórmula: $\text{Con}((\text{"SR_B1.TIF"} * 0.0000275 - 0.2) < 0,0, \text{Con}((\text{"SR_B1.TIF"} * 0.0000275 - 0.2) > 1,1, (\text{"SR_B1.TIF"} * 0.0000275 - 0.2)))$ (J. Peña, comunicación personal, 20 de febrero de 2024). Luego para finalizar se dio OK (ver Figura 10).

Figura 10

Imagen Landsat 5

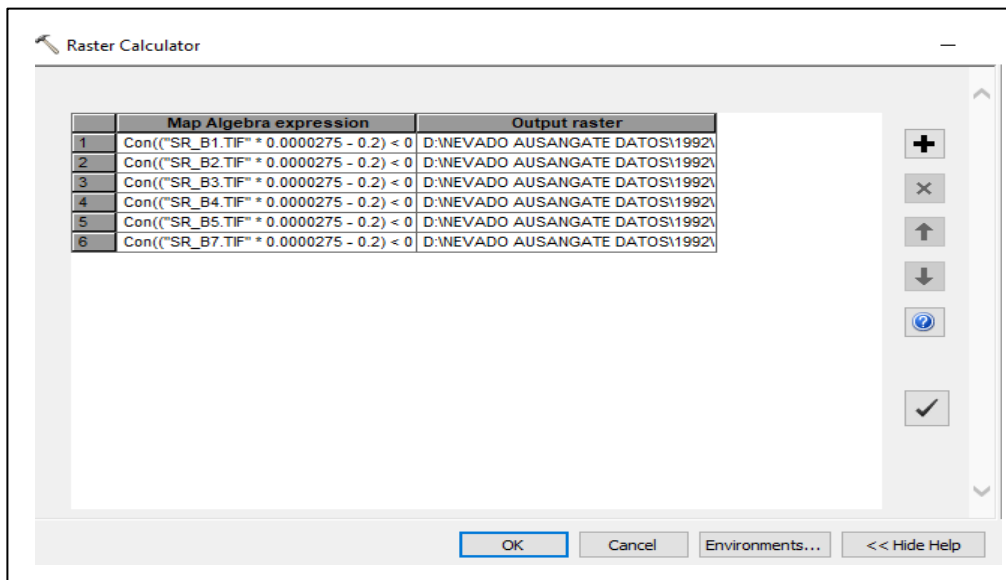


Seguidamente. Se seleccionó toda la ruta que se encuentra en la columna “Output Raster” y se borró. Después, con doble clic, se seleccionó la carpeta de salida. Necesariamente debe tener la terminación .tif (ver Figura 11).

Una vez ruteada la carpeta de salida, se debe repetir el mismo procedimiento para todas las bandas. Una vez que está listo, se dio clic en OK, y finalmente se obtuvo las bandas corregidas entre valores 0 y 1.

Figura 11

Imagen de Landsat 5

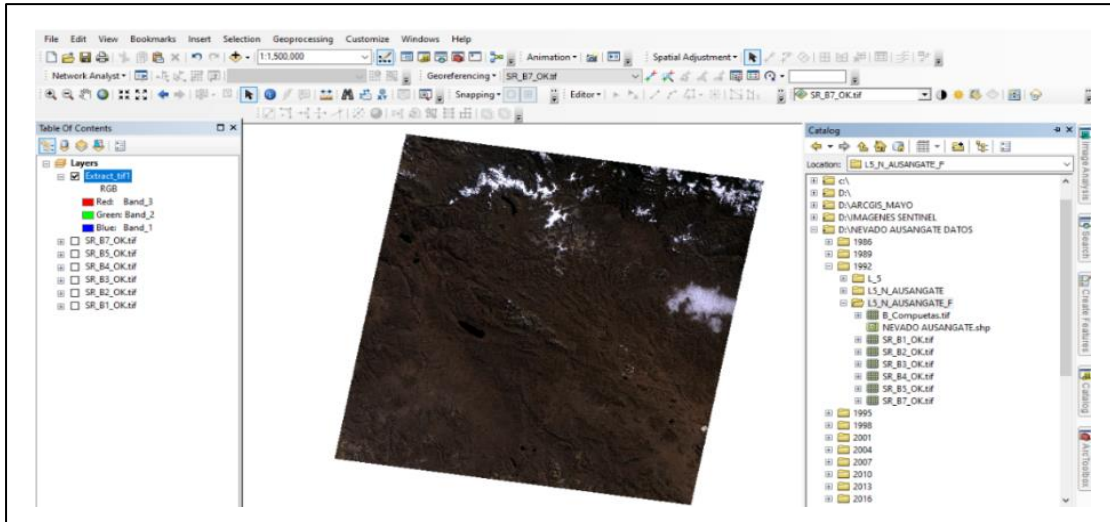


Después de tener las bandas listas, se realizó la combinación de bandas con la “Composite Bands”. Esta se encuentra en Data Management Tools/ Raster/ Raster Processing/ Composite Bands. Se agrego todas las bandas como se muestra en la Figura 12.

Finalmente se muestra la imagen compuesta y con valores de reflectancia.

Figura 12

Imagen compuesta (1989)

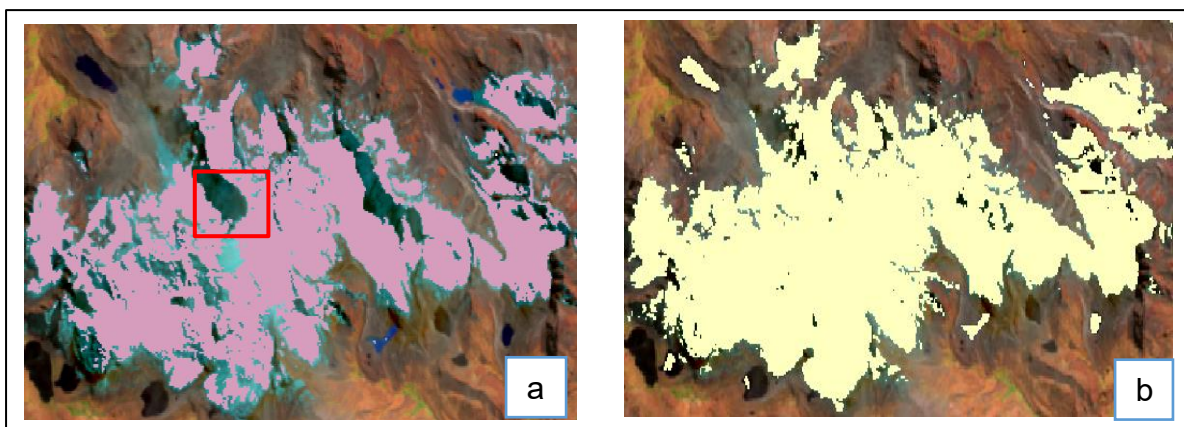


El mismo proceso se replicó para la imagen Landsat 8, solo que esta vez se utilizaron las bandas desde la banda 2 hasta la banda 7.

Cuando no se realiza el proceso de escalamiento de datos, la reclasificación se hace mediante la herramienta “Reclassify”. Esta se encuentra en Spatial Analyst Tools/, Reclass. Omite la sombra, a pesar de que está cubierto por glaciar como se muestra en la Figura 13 a. En cambio, al realizar el proceso de escalamiento de datos, la diferencia es notoria, como se observa en la Figura 13 b. la reclasificación cubre toda la superficie glaciar incluyendo la parte de sombra.

Figura 13

Se visualizan a) imagen sin escalar, b) imagen escalada



En el preprocesamiento de las imágenes de Sentinel-2 nivel L1C, no es necesario ningún tipo de corrección. Porque ya cuenta con las correcciones requeridas, para este tipo de estudio. Este nivel de colección se encuentra listo para ser usado.

4.5.3. Fase3: Procesamiento y análisis multitemporal

4.5.3.1. Delimitación multitemporal del área glaciar. Habiendo realizado el proceso de escalamiento de datos (imágenes satelitales de Landsat 5 TM y 8 OLI) y seleccionado el insumo satelital de Sentinel-2, se llevó a cabo la fase de procesamiento, a través del programa de Software ArcGIS 10.3.

4.5.3.1.1. Glaciar libre de detritos. Esta etapa de procesamiento consiste en resaltar y diferenciar los elementos de la imagen mediante índices espectrales (resaltar la nieve respecto al suelo rocoso), para ello se empleó el NDSI. Este índice se define como la diferencia de reflectancia entre banda verde espectro visible y la banda infrarroja de onda corta SWIR dividido en la suma de ambos, (ecuación 1) (Dozier, 1998). El umbral radiométrica de acuerdo con los siguientes autores Hall et al. (1995) y INAIGEM (2017), se consideró aproximadamente igual o superior a 0.4. En este ejemplo el umbral vario entre 0.4 y 1. En las Tablas 6 y 7 se muestran los umbrales usados en el área de estudio en base a la observación de las imágenes satelitales.

Tabla 6*Umbrales e NDSI para las escenas Landsat*

Código	Fecha	NDSI
LT05_L2SP_003070_19860712_20200917_02_T1	12/07/1986	0.4 a 1
LT05_L2SP_003070_19920610_20200914_02_T1	10/06/1992	0.4 a 0.92
LT05_L1TP_003070_19980729_20200909_02_T1	29/07/1998	0.4 a 1
LT05_L2SP_003070_20050817_2020902_02_T1	11/06/2005	0.4 a 1
LT05_L2SP_003070_20100612_20200823_02_T1	12/06/2010	0.4 a 1
LC08_L2SP_003070_20160730_20200906_02_T1	30/07/2016	0.4 a 1

Nota: Adaptado de earthexplorer.usgs.gov, por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, 1984 (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

Tabla 7*Umbrales de NDSI para las escenas Sentinel-2*

Código	Fecha	NDSI
S2A_MSIL2A_20230723T1047231_N0509_ R039_T19LBE_20230723T211750	23/07/2023	0.4 a 0.87

Nota: Adaptado de Agencia Espacial Europea (ESA), por Copernicus Open Access Hub, 2016 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

A fin de delimitar las áreas glaciares, se empleó el NDSI desarrollado por Doizer.

Ecuación 1

$$NDSI = \frac{BG - BSWIR}{BG + BSWIR}$$

- Green = Banda verde del espectro visible
- SWIR = Banda del infrarrojo de onda corta

Se identificaron las superficies glaciares utilizando el índice NDSI. En ArcGIS 10.3, se utilizó como ejemplo la imagen satelital de Landsat 5 TM, teniendo en cuenta la banda verde del espectro visible (banda 2) y banda infrarroja de onda corta (banda 5), con una distancia de 30 m de resolución espacial. Seguidamente se muestra las bandas utilizadas, en el cálculo del NDSI de la presente investigación (USGS, 2020):

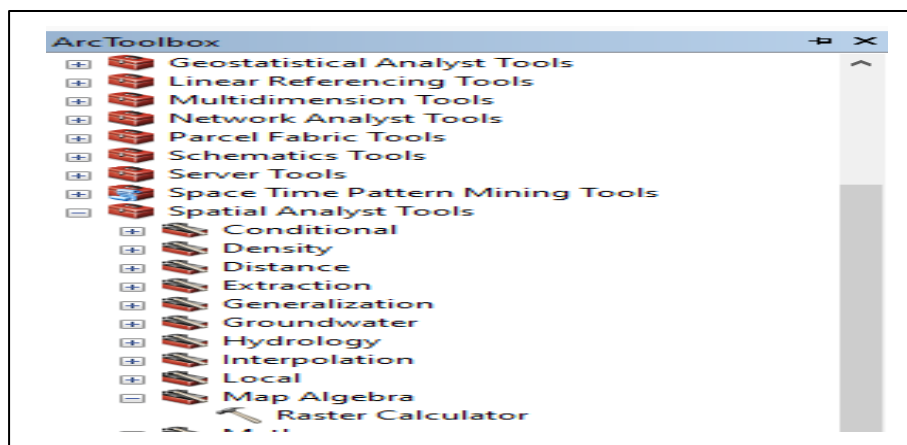
- Landsat 4-7: $(\text{Banda 2} - \text{Banda 5}) / (\text{Banda 2} + \text{Banda 5})$
- Landsat 8: $(\text{Banda 3} - \text{Banda 6}) / (\text{Banda 3} + \text{Banda 6})$
- Sentinel 2: $(\text{Banda 3} - \text{Banda 11}) / (\text{Banda 3} + \text{Banda 11})$ (USGS,2020. párr. 11)

Mediante el uso del programa de Software de ArcGIS se desarrollaron los siguientes procedimientos.

- Se insertó en ArcMap las bandas 2 y 5 para aplicar el NDSI. Luego, utilizando la herramienta Ráster Calculator. Esto en Arc Toolbok/ Spatial Analyst Tools/ Map Algebra (ver Figura 14).

Figura 14

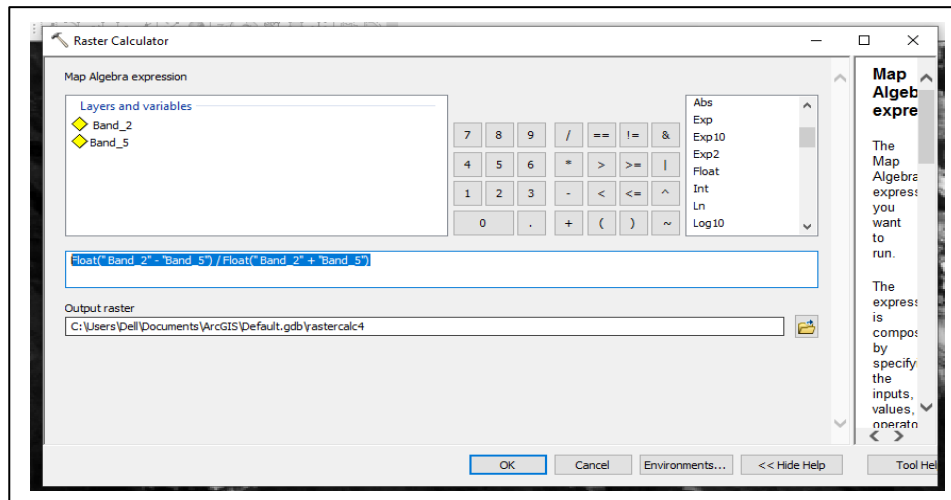
Herramienta utilizada en el cálculo del Índice Diferencial Normalizado de Nieve



- “En el campo Map Algebra Expression se selección las bandas correspondientes y en el campo en blanco se escribió la función matemática de NDSI” (INAIGEM, 2017. p.53) (ver Figura 15).

Figura 15

Llenado de campo para la herramienta Raster Calculator

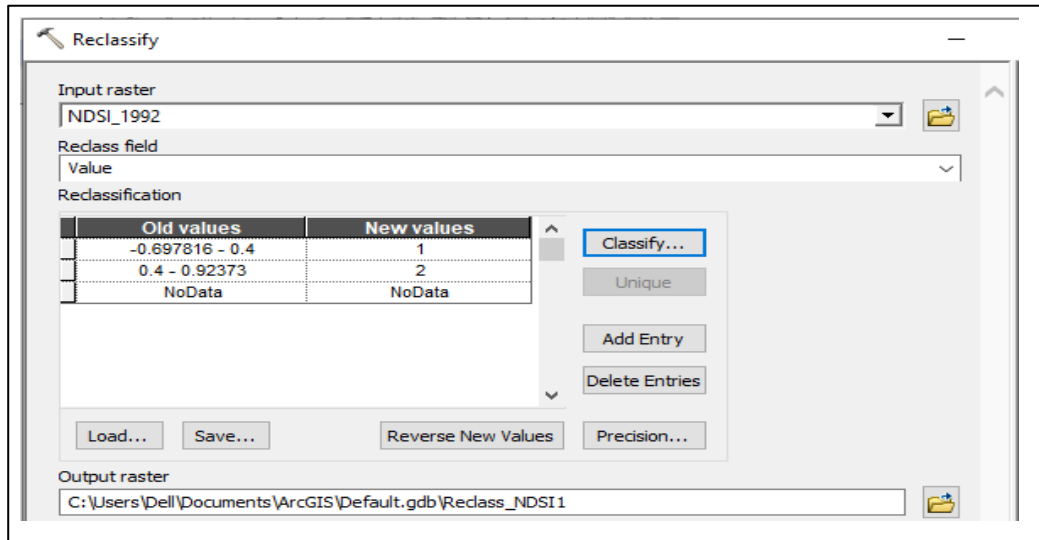


Nota: En el campo se introdujo la siguiente formula ($Float("Band_2" - "Band_5") / Float("Band_2" + "Band_5")$). Float permite que los valores de salida sean en formato decimal.

- c) Se obtendrá un archivo de tipo ráster de NDSI.
- d) Haciendo uso de la herramienta Reclassify, se reclasificaron los valores del ráster, teniendo como mínimo el rango de interés mínimo 0.4 el máximo por defecto (verificar en la Tabla 7 y 8 el umbral de los demás años de estudio). En el campo de Raster de entrada se agregó el archivo de salida de la calculadora ráster (Archivo ráster NDSI). En el campo de reclasificación de la columna de Old values, se colocó el rango de interés [-0.67 – 0.4] que indica área sin cobertura glaciar y el rango [0.4- 0.923] que indica área con cobertura glaciar; finalmente se estableció un nombre de salida al archivo de salida en el campo Output ráster (INAIGEM, 2017) (ver Figura 16).

Figura 16

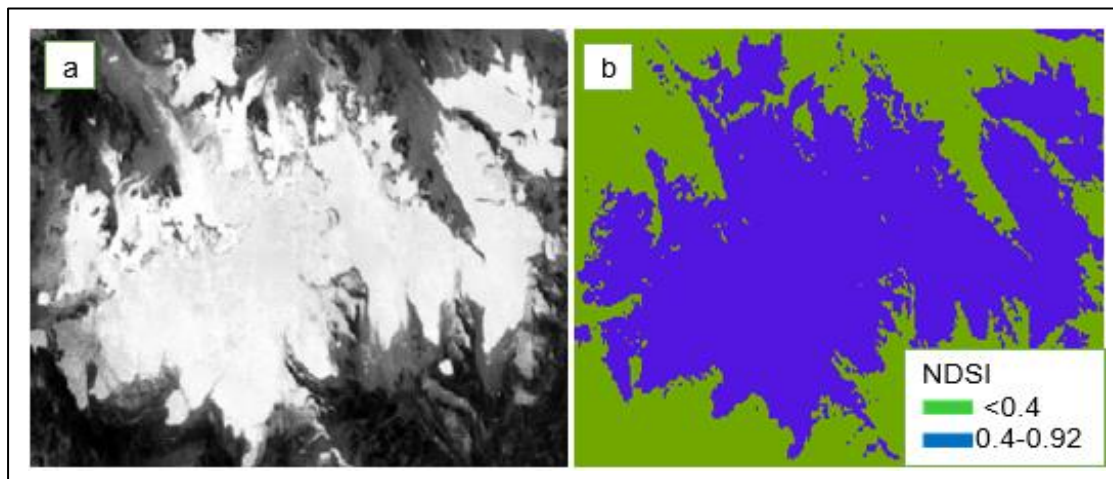
Información de ingreso en el campo de la herramienta Reclassify



- e) En el proceso de reclasificación del NDSI, se determinaron los valores como se observa en la Figura 17.

Figura 17

La imagen a) en formato ráster sin reclasificar y la imagen b) reclasificada



Nota: El índice umbral < 0.4 , es área sin cobertura glaciar y $\geq 0.4 - 0.92$, es área con cobertura glaciar.

- f) “El archivo tipo ráster se ha convertido en un archivo tipo vector (polígono) con la herramienta Raster to Polygon. En el campo input Raster se añadió el archivo de

salida de la reclasificación y en el campo Output polygon features, se estableció el nombre al archivo de salida” (INAIGEM, 2017, p.54) (ver Figura 18).

Figura 18

Llenado de campo para de la herramienta Raster to Polygon

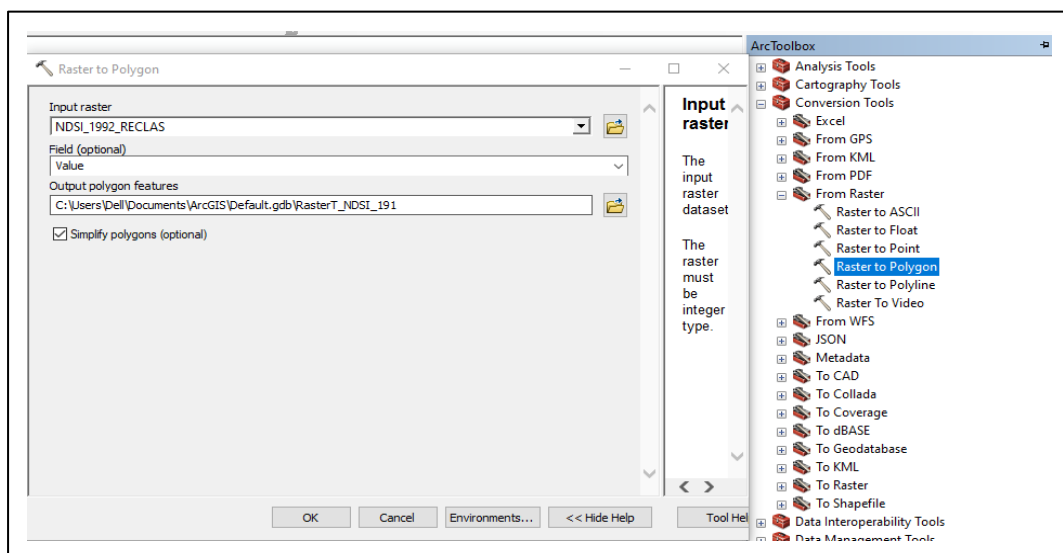
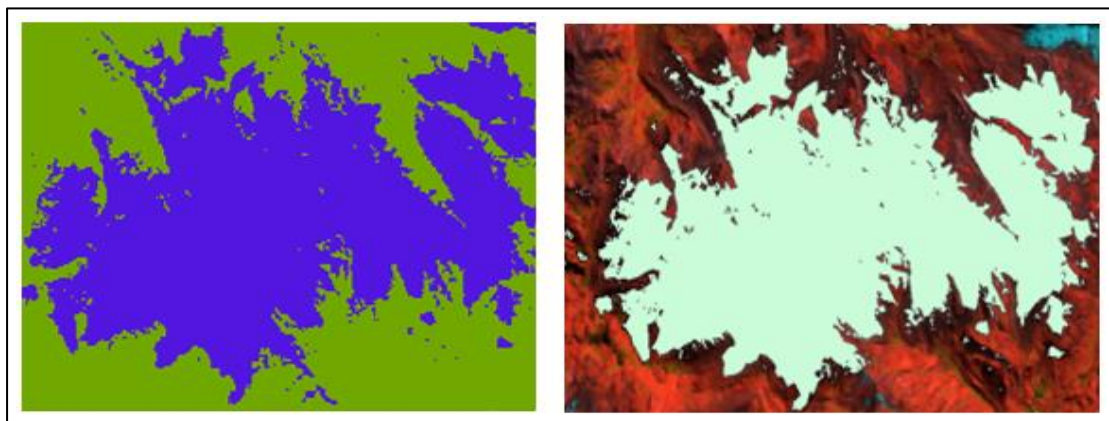


Figura 19

Conversión del formato raster al formato shapefile tipo polígono

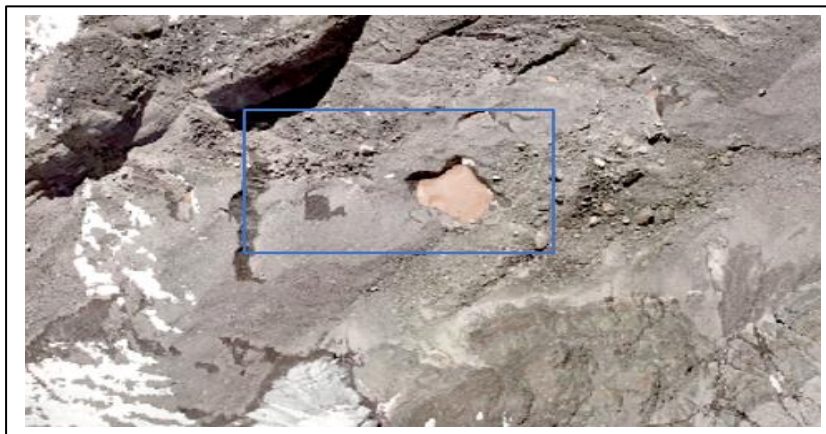


4.5.3.1.2. Glaciares cubiertos por detritos. En el área de estudio, se localizó en 5 sectores los glaciares cubiertos por detritos. La delimitación de esta cobertura se digitalizó de manera manual a través de la observación visual de las imágenes satelitales. Mediante combinación de bandas: RGB (color natural 321 TM, 432 OLI y 543 Sentinel-2). También se realizó la detección de glaciar cubierto, complementado con fotografías de drones facilitado por el INAEGEM como se observa en la Figura 20 e imágenes de alta resolución

espacial del Google Earth. Además, fue corroborada con las inspecciones de especialista del INAEGEM y la visita al área de estudio del investigador.

Figura 20

Glaciar cubierto de detrito del Nevado Ausangate 2023



Nota. Tomado del, INAIGEM, 2023.

4.5.3.2. Enumeración e identificación multitemporal de áreas lagunares.

Habiendo ejecutado el preprocesamiento de imágenes satelitales. Esta etapa de procesamiento consiste en la enumeración y detección de la superficie de lagunas. Para ello, se empleó el NDWI elaborado por (Huggel et al., 2002).

- **Identificación de áreas lagunares**

Los mismos insumos satelitales que se utilizaron en el cálculo de la cobertura glaciar fueron empleados para la identificación de lagunas glaciares, a través del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). Este índice determina el grado de humedad o cuerpo de agua entre -1 a +1 (CIREN, 2011) aplicando el contraste en los niveles de reflectancia entre banda azul espectro visible y la banda infrarroja de onda cercana (NIR) dividido en la suma de ambos, (ecuación 2) (Huggel et al., 2002).

Después de conseguir las imágenes obtenidas tras aplicar los índices, como resultado a definir los umbrales. Los valores de los pixeles que representa a la superficie lagunar con

el paso del tiempo son dependientes de su ubicación. Esto ocurre por la presencia de un alto grado de turbidez como resultado del aporte de sedimentos hacia la laguna, el nivel de la profundidad acuática y la procedencia del agua confinada en la laguna presenta datos espectrales variados que varía de turquesa hasta un verde oscuro casi negro. Así mismo, en la investigación realizado por Frey et al. (2010), estos cuerpos de agua tienen resultados de NDWI bajos que fluctúan alrededor de -0.6 a -0.85. En el Nevado Ausangate representa valores más altos de reflectividad. Para las escenas TM, el valor mínimo se fijó en -0.75, y el máximo se estableció en -0.04, para la escena OLI el valor mínimo se fijó en -1, y el valor máximo se estableció en -0.50. A diferencia para Sentinel-2 los valores mínimo y máximo se estableció entre (-0.32 y 0.07) debido a la mayor resolución radiométrica que posee, como se observa en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8

Umbral de NDWI para las imágenes de Landsat 5 y 8

Código	Fecha	NDWI
LT05_L2SP_003070_19860712_20200917_02_T1	12/07/1986	-0.75 a -0.33
LT05_L2SP_003070_19920610_20200914_02_T1	10/06/1992	-0.41 a -0.04
LT05_L1TP_003070_19980729_20200909_02_T1	29/07/1998	-0.72 a -0.11
LT05_L1TP_003070_20050611_20230211_02_T1	11/06/2005	-0.72 a -0.13
LT05_L2SP_003070_20100612_20200823_02_T1	12/06/2010	-0.74 a -0.10
LC08_L2SP_003070_20160730_20200906_02_T1	30/07/2016	-1 a -0.15

Nota: Adaptado de earthexplorer.usgs.gov, por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, 1984 (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

Tabla 9*Umbral de NDWI para las escenas Sentinel-2*

Código	Fecha	NDWI
S2A_MSIL2A_20230723T1047231_N0509_ R039_T19LBE_20230723T211750	23/07/2023	-0.33 a 0.073

Nota: Adaptado de Agencia Espacial Europea (ESA), por Copernicus Open Access Hub, 2016 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Ecuación 2

$$NDWI = \frac{B_{Blue} - B_{NIR}}{B_{Blue} + B_{NIR}}$$

- Blue = Banda azul del espectro visible
- NIR = Banda de infrarrojo de onda cercano

Los cuerpos de agua se identificaron mediante el NDWI en ArcGis 10.3, se utilizó la imagen satelital de Landsat 8 OLI, teniendo en cuenta la banda azul del espectro visible (banda 2) y la banda infrarroja de onda cercana (banda 4) con una distancia de 30 m en escenas de TM OLI y en Sentinel2, 20m de resolución espacial.

- Landsat 4-7: (Banda 1 – Banda 4) / (Banda 1+ Banda 4)
- Landsat 8: (Banda 2 – Banda 4) / (Banda 2 + Banda45)
- Sentinel 2: (Banda 2 – Banda 8) / (Banda 2 + Banda 8) (USGS,202. párr. 12).

Mediante el programa de Software de ArcGIS se desarrolló el mismo procedimiento para el NDSI. Con la diferencia de la introducción de la ecuación 3 a través del Raster Calculator. Cabe señalar que “float permitió convertir los valores de los píxeles de enteros a decimal entre un rango de -1 a +1” (Guardamino, 2014.p.32).

$$NDWI = \frac{\text{flot(Blue)} - \text{flot(NIR)}}{\text{flot(Blue)} + \text{flot(NIR)}}$$

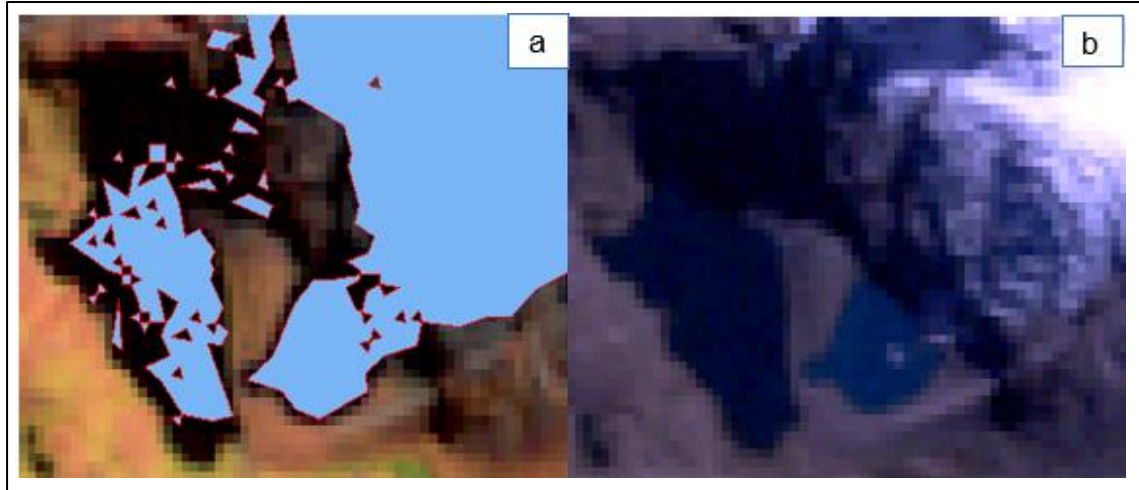
La asignación de umbrales para delimitar la cobertura glaciar e identificar lagunas glaciares requirió de la “combinación de bandas SWIR, NIR, Blue y Green; imágenes satelitales base disponibles en ArcGIS 10.3 y Google Earth. Después de fijar los umbrales se convirtieron las áreas identificadas” [como área glaciares y lagunares a polígonos con la] “herramienta Ráster to polígono; y se cortaron la extensión de la imagen en función del área de estudio con la herramienta Clip obteniendo solo los polígonos de los glaciares y lagunas” (Guardamino, 2014, p.35) de la zona de estudio del Nevado Ausangate.

La digitalización se efectuó empleando las herramientas que brinda el software ArcGIS 10.3. Después de obtener los polígonos necesarios del área glaciar libre de detritos, glaciar cubierto por detritos y área lagunar, se procedió a purificar los datos. Se estableció un filtro mínimas unidades cartografiable, con los cuales se excluyeron los polígonos que tenían una superficie menor a 5000 m², tanto para glaciares y lagunas. Estas unidades mínimas cartografiable fue establecida por e (INAIGEM, 2017) y fueron aplicados en el último inventario de glaciares y lagunas de 2020.

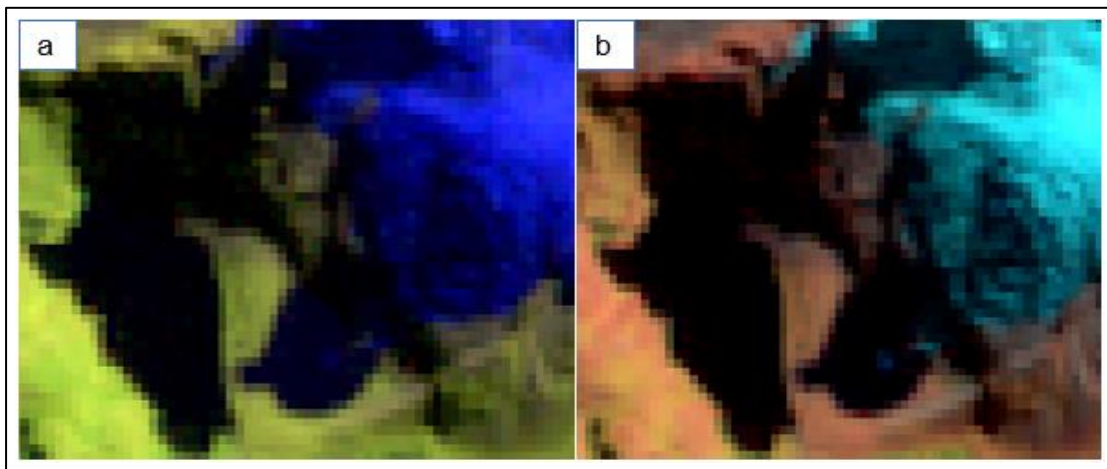
Adicionalmente la corrección de los polígonos en formato shapefile editable, se complementó con la corrección manual. El programa reconoció las sombras de las cumbres empinadas como zonas con cobertura glaciar (Figura 21 a), las cuales fueron corregidas manualmente con la combinación de bandas RGB; 321 color natural; 752 falso color; 543 color de nieve (Figuras 21a; 22 a y b), en las imágenes de Landsat 5 TM, estas imágenes presentaron inconvenientes por la presencia de sombra. Sin embargo, el resto de los insumos como Landsat 8 OLI y Sentinel2, no presenciaron la sombra, la combinación de bandas (RGB en color de nieve; 543 y 863). Otro de los insumos utilizados, fue el Google Earth para la delimitación minuciosa de los glaciares cubiertos, así como para la corrección de los polígonos de superficie glaciar y áreas lagunares.

Figura 21

a) *Presencia de sombra como cobertura glaciara* b) *combinación de banda RGB: 321 color natural*

**Figura 22**

a) *Combinación de banda RGB: 752 falso color* b) *combinación de banda RGB: 543 color*



- **Verificación e inspección de investigación de campo**

La salida de campo se llevó a cabo en octubre del año 2023, donde, se realizaron inspecciones visuales de las coberturas glaciares (libre y cubierta por detritos) y lagunas, tomando puntos de GPS para corroborar y hacer la corrección de las coberturas obtenidas automáticamente (ver Figura 23).

Figura 23

Nevado Ausangate, glaciar libre de detrito a), glaciar cubierto por detrito b) y la laguna Roja c) 2023



4.5.4. Fase 4: Obtención de parámetros

- Después del estudio multitemporal, se determinaron los parámetros. Para el cálculo de los aspectos principales geométricas de los glaciares y de las lagunas, se generó un campo nuevo con la herramienta Add Field en la tabla de atributos y luego se determinaron las áreas y perímetros con la herramienta Calculate Geometry del shapefile. Este parámetro se calculó para cada año de análisis.
- Otro parámetro que se determinó es la altitud a partir del centroide de cada laguna que primeramente se obtuvo con el Feature to point y el SRTM DEM. A través de la herramienta Add Surface Information. La altitud también se consideró para todos los años de estudio.

4.6. Análisis de datos

Con relación al análisis de datos, esto se efectuó considerando Microsoft Excel 2013, para el cálculo de superficie glaciar y superficie de lagunas de origen glaciar, así como para determinar el coeficiente de correlación, cálculos matemáticos variados y elaboración de gráficas.

4.7. Consideraciones éticas

La presente investigación se basa en principios éticos y legales, empleando información legítima y verificable proveniente de fuentes confiables. Respetando los derechos de autor según las normas APA de séptima edición, se citan todas las referencias pertinentes. Así mismo, se sigue la estructura detallada por la Universidad.

V. Resultados y discusión

En esta sección se muestran los resultados obtenidos, los cuales están organizados de acuerdo con los objetivos, y el análisis de los hallazgos.

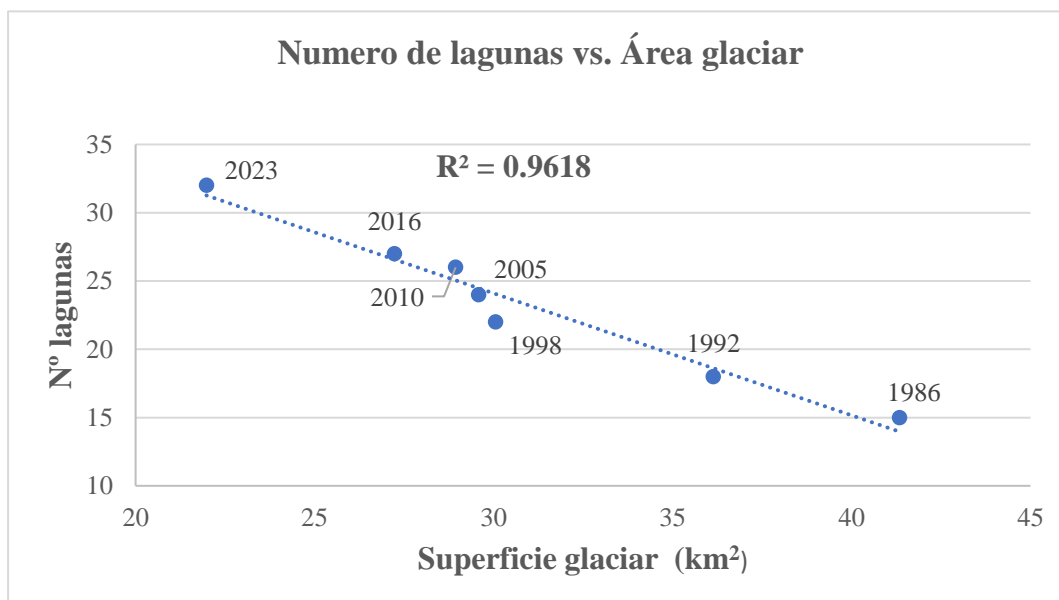
5.1. Resultados

5.1.1. *Objetivo general: Retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas del Nevado Ausangate*

Respecto a la correlación entre el retroceso glaciar y la formación de lagunas, el cálculo del coeficiente de correlación demostró un valor de $r = -0.98$, al ser negativo indica una correlación inversamente proporcional y al ser un valor cercano al 1, es una correlación casi perfecta, lo que demuestra que el número de formación de lagunas de origen glaciar se debe al retroceso glaciar, como se demuestra en la Figura 24.

Figura 24

Correlación (R^2) entre el retroceso glaciar con la formación de lagunas de origen glaciar

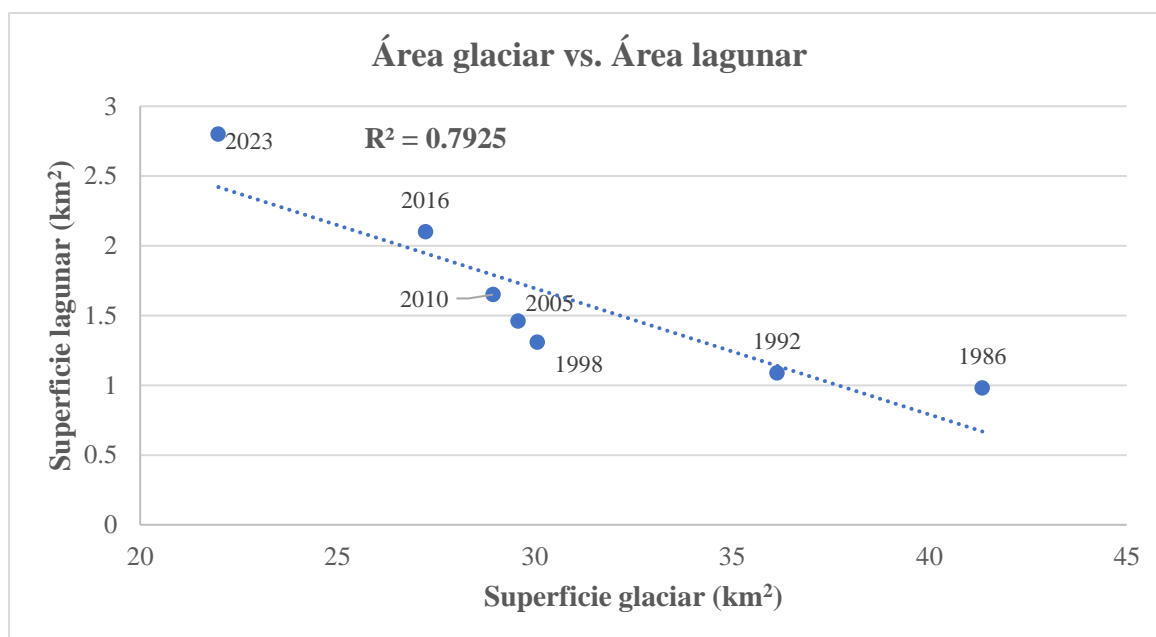


Nota: Desde 1986 al 2023, el 96 % de la formación de lagunas de origen glaciar, es producto del retroceso glaciar.

Con respecto a la correlación entre el retroceso glaciar y la evolución de las lagunas, el análisis de correlación demostró un resultado de $r = -0.89$ cuando es negativo indica una correlación inversa, y cuando se acerca a 1, señala una correlación casi perfecta, lo que demuestra que el incremento en la superficie de lagunas de origen glaciar se debe al retroceso glaciar (ver Figura 25).

Figura 25

Correlación (R^2) entre el retroceso glaciar con el incremento de área lagunar

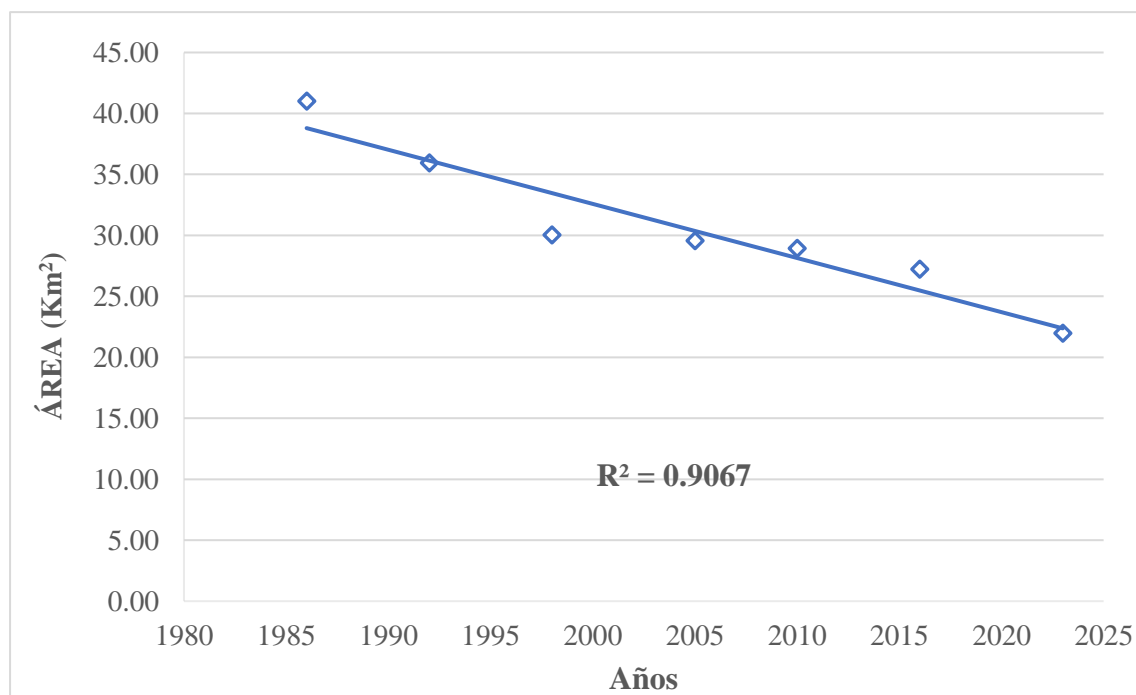


Nota: Desde 1986 al 2023, el 79% del incremento en la superficie de lagunas de origen glaciar, se debe al retroceso glaciar.

5.1.1.1. Objetivo específico 1: Retroceso glaciar del Nevado Ausangate periodo 1986 – 2023. Respecto a la estimación del retroceso glaciar para el periodo de estudio (37 años), el cálculo del coeficiente de correlación demostró un valor de $r = -0.953$ al ser negativo indica una correlación inversamente proporcional y al ser un valor cercano al 1, es una correlación casi perfecta, lo que demuestra que el retroceso glaciar se presenta con el pasar de los años, como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Coefficiente de correlación de las áreas del retroceso en función de los años



Los resultados del análisis del retroceso glaciar multitemporal muestran los cambios ocurridos a través del tiempo en los parámetros físicos del glaciar en estudio, en el que, se demuestra la evolución del paisaje, marcada por los cambios en la extensión de esta evolución del paisaje glaciar.

El análisis inicial del retroceso glaciar fue sobre el cambio del área total. Los resultados reflejan la evolución del retroceso glaciar libre de detritos (GLD) y glaciar cubierto por detritos (GCD), en el periodo comprendido entre 1986 hasta el año 2023, tal como se observa en las Figuras 27, 28, 29 y 30. El mapa generado y gráfico de barras muestran la superficie glaciar de los diferentes años, mediante el uso de una variedad de colores. Esta evolución se realizó sobre imágenes satelitales Landsat 5 y 8 e imágenes satelitales de Sentinel-2.

Figura 27

Retroceso glaciar libre de detritos y cubierto por detritos del Nevado Ausangate de 1986

– 1992 y 1986 - 1998

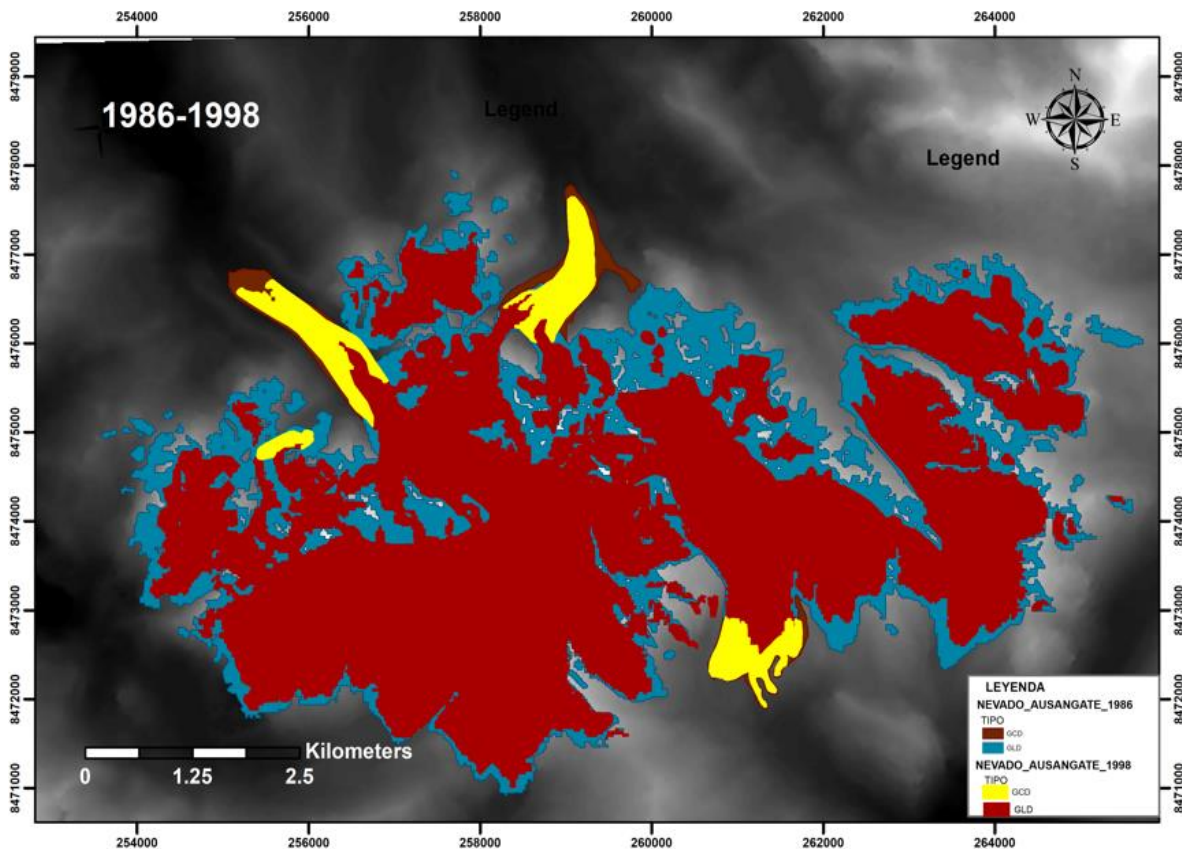
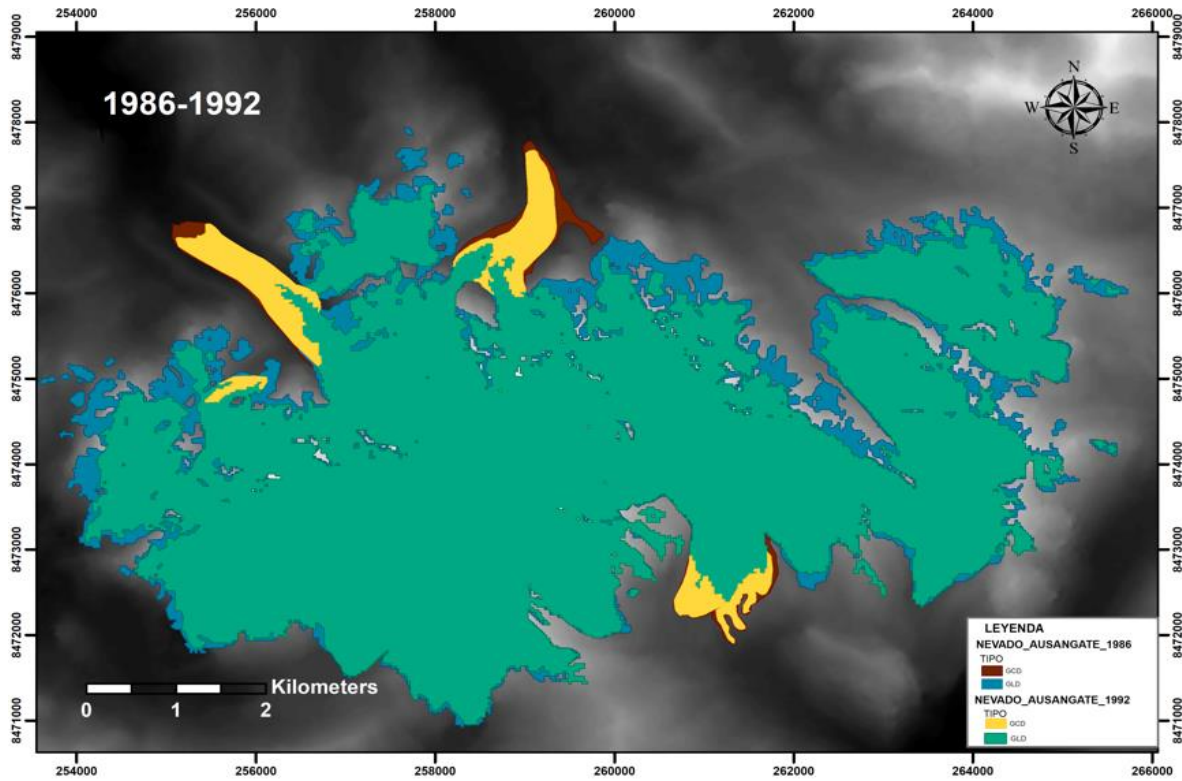


Figura 28

Retroceso glaciar libre de detritos y cubierto por detritos del Nevado Ausangate de 1986 – 2005 y 1986 – 2010.

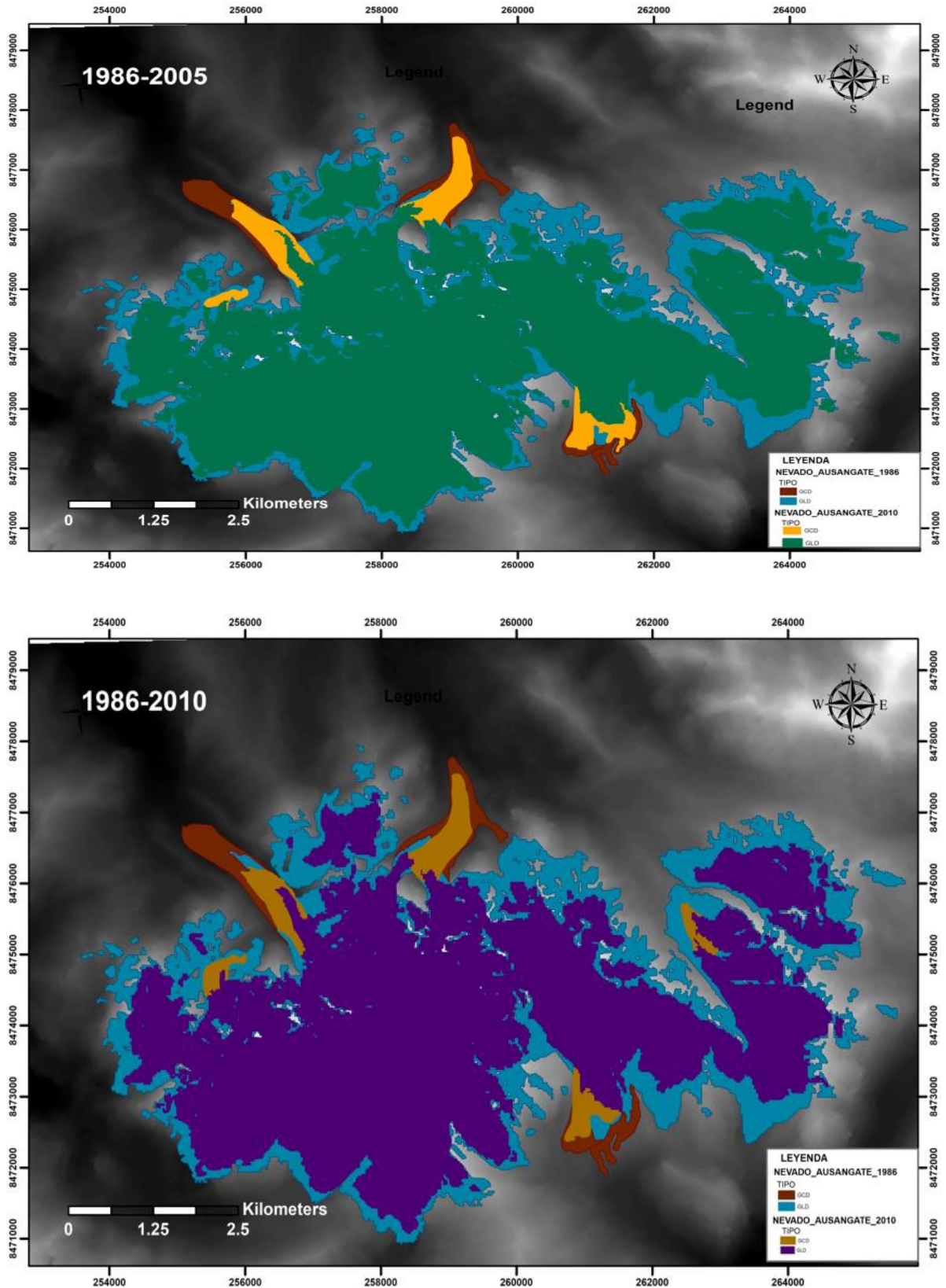


Figura 29

Retroceso glaciar libre de detritos y cubierto por detritos del Nevado Ausangate de 1986 – 2016 y 1986 – 2023.

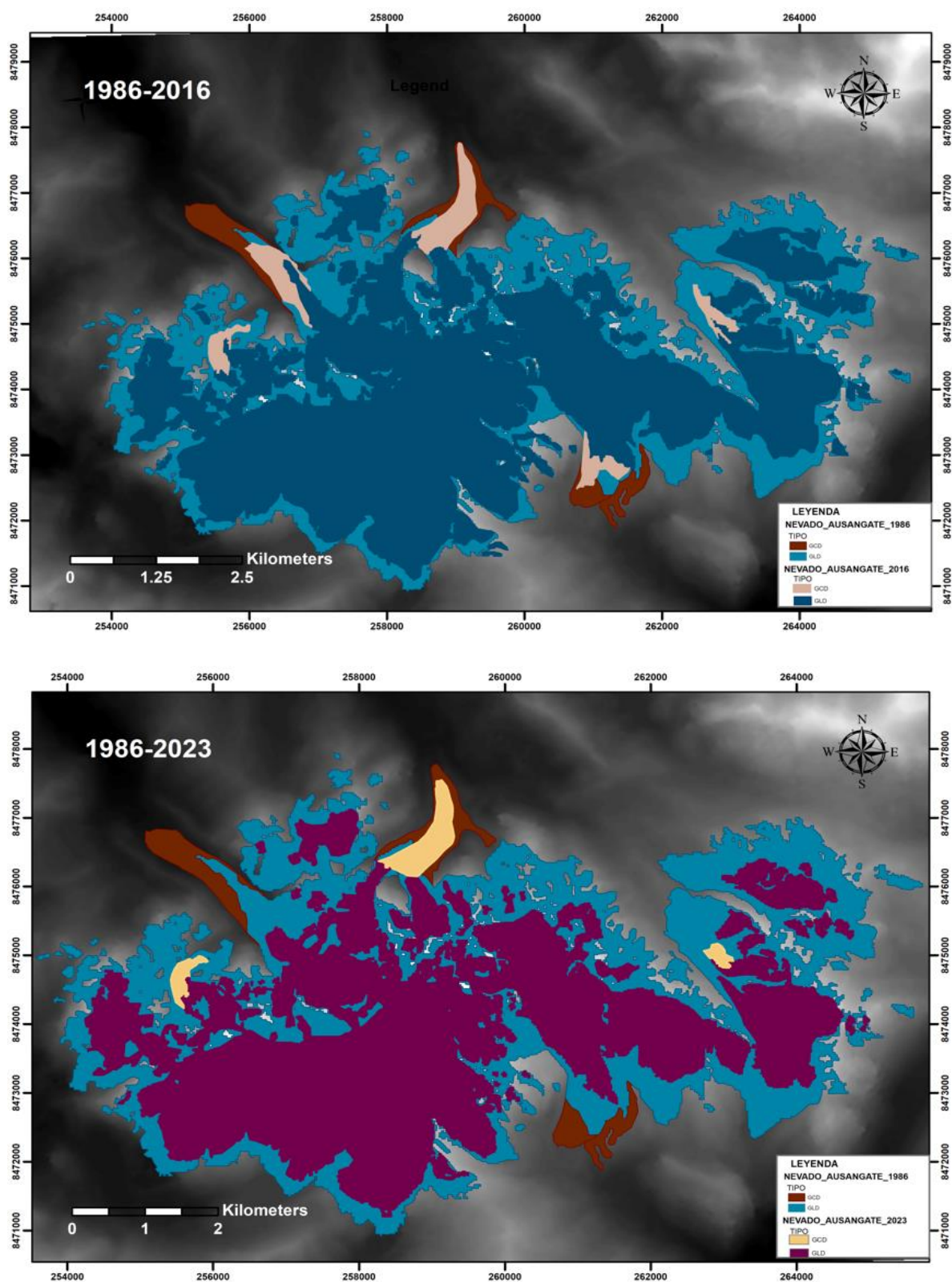
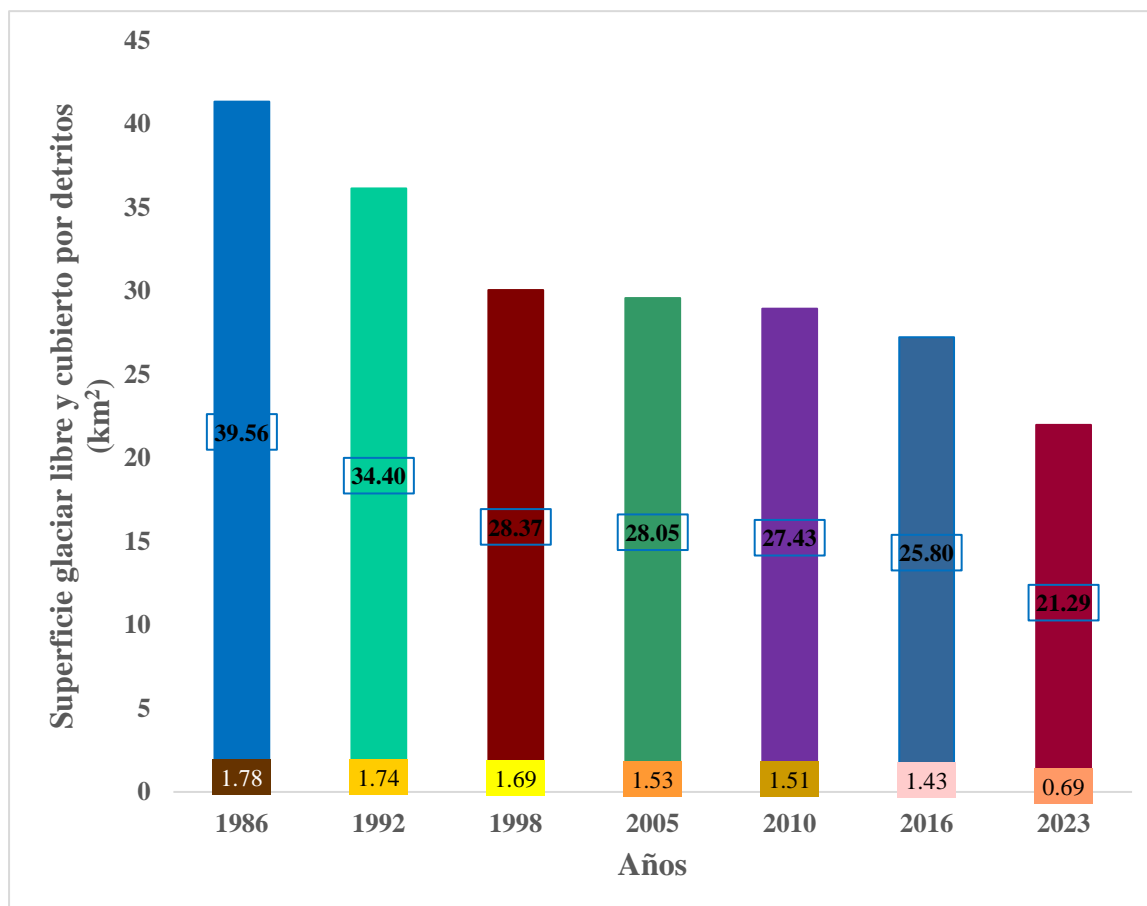


Figura 30

Retroceso glaciar libre de detritos y cubierto por detritos del Nevado Ausangate en los diferentes años en función del año 1986



Nota: Las superficies de 1.78, 1.74, 1.69, 1.53, 1.51, 1.43 y 0.69 km² corresponde a glaciares cubiertos por detritos, mientras las superficies de mayor extensión corresponden a glaciares libres de detritos. El INAIGEM clasifico los glaciares en: glaciares libres detritos y glaciares cubiertos por detritos y a partir del Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas del año 2020 se reconocen los glaciares cubiertos por detritos.

El Nevado Ausangate, en relación con su cobertura glaciar, durante el periodo de estudio (1986-2023) alcanzo un retroceso glaciar de 46.83 % (19.36 km²). La evolución de este retroceso fue la siguiente: el año base es 1986, el año 1992 el retroceso fue del 12.58 %, en 1998 fue de 27.29 %, el 2005 fue 28.45 %, el 2010 fue 29.99 %, el 2016 fue 34.13 % y

el año 2023, fue el que presentó el mayor porcentaje de retroceso con 46.83 % (ver Tabla 10).

Tabla 10

Superficie y porcentaje del retroceso glaciar del Nevado Ausangate (1986 – 2023)

Año	Área (km²)	Área de pérdida en relación con 1986 (km²)	Porcentaje de retroceso (%)
1986	41.34	-	-
1992	36.14	5.2	12.58
1998	30.06	11.28	27.29
2005	29.58	11.76	28.45
2010	28.94	12.4	29.99
2016	27.23	14.11	34.13
2023	21.98	19.36	46.83

- **Cálculo de tasa de cambio anual**

Para determinar la tasa de cambio anual se empleó la ecuación (4).

Ecuación 4

$$r = [(N/N_0)^{1/t} - 1] * 100$$

r = Tasa de cambio anual

N₀ = Superficie de la cobertura glaciar en el tiempo “0”

N = Superficie de cobertura en el tiempo 1

t = Diferencia del tiempo en años (Colonia y Torres, 2012. P. 593).

A continuación, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11.

Tabla 11*Tasa de cambio anual de la superficie glaciar del Nevado Ausangate*

Periodo	Tasa de cambio	Tasa de cambio (1986 - 2023)
1986 - 1992	-2.22 %	
1992 - 1998	-3.02 %	
1998 - 2005	-0.23 %	
2005 - 2010	-0.44 %	-1.69 %
2010 - 2016	-1.01 %	
2016 - 2023	-3.01 %	

Las tasas de cambios anual obtenidas, al ser cifras negativas, confirman la innegable retracción del glaciar (Colonia y Torres, 2012), en los seis periodos estudiados (1986 – 1992, 1992 – 1998, 1998 – 2005, 2005 – 2010, 2016, 2016 - 2023). La mayor tasa de cambio anual identificada fue en el periodo 1992 – 1998 y la menor tasa se dio en el periodo 1998 – 2005, como se muestra en la Tabla 11. Del mismo modo, el valor promedio obtenido en los últimos 37 años (1986 – 2023) corresponde a una tasa de -1.69 % anual.

Para ilustrar el retroceso glaciar, durante los años de estudio, en el Anexo 3 se muestra la evolución del nevado Ausangate mediante las imágenes satelitales de Sentinel-2.

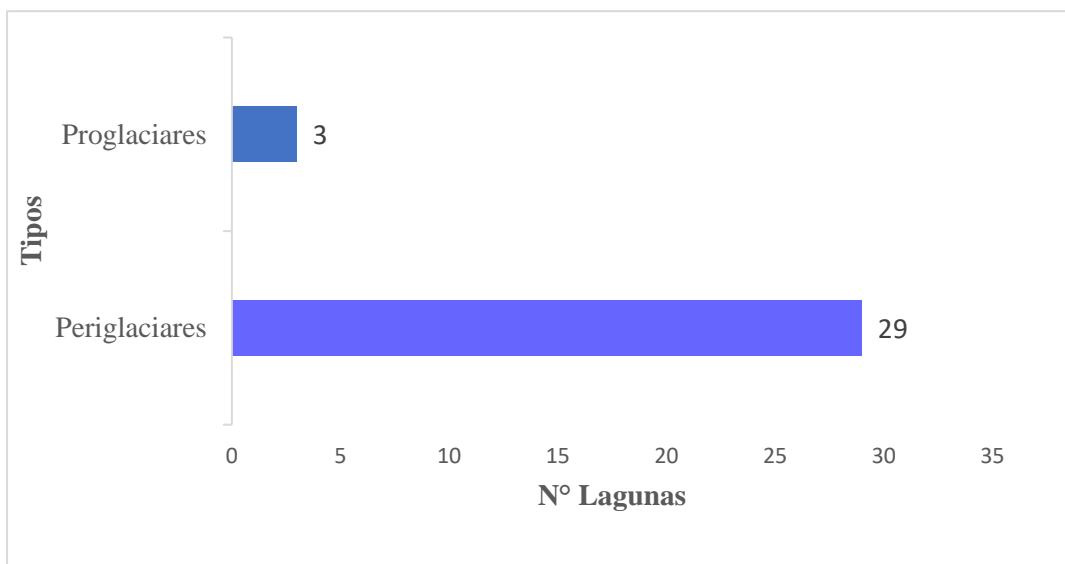
5.1.1.2. Objetivo específico 2: Inventario de lagunas de origen glaciar existentes en el Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023. Para el año 2023, en el estudio se registraron 32 lagunas de origen glaciar, con una superficie total de 2.8 km², como se detalla en la Tabla 12. Estas lagunas se encuentran distribuidas en el entorno del nevado Ausangate, en las microcuencas Pitumarca, Lauramarca y Pinchimuro mayo (subcuencas Yavero y Vilcanota), de la cuenca Urubamba Vilcanota (INAIGEM, 2023c).

Se identificaron dos tipos de lagunas de origen glaciar: periglaciares (lagunas sin contacto glaciar) y lagunas proglaciares (lagunas que se encuentran en contacto con los

glaciares). Hay predominio de lagunas periglaciares con un total de 29 lagunas, mientras que 3 lagunas son proglaciares, tal como se observa en la Figura 31.

Figura 31

Tipos de lagunas de origen glaciar en el Nevado Ausangate al 2023



La mayor cantidad de lagunas periglaciares (20 lagunas), se encuentran en el distrito de Ocongate y el resto se encuentran en el distrito de Pitumarca (9 lagunas periglaciares). Mientras que las lagunas supraglaciares se hallan ubicadas en el distrito de Ocongate (las 3 lagunas).

Una laguna periglacial se encuentra compartida entre los dos distritos, ya que el límite político administrativo atraviesa la laguna. Esta laguna cubre un área de 1.48 ha.

Tabla12

Inventario de lagunas de origen glaciar del Nevado Ausangate al 2023

Código	Nombre	Subcuenca	Microcuenca	Provincia	Distrito	Coordenadas		Altitud	Área_ha	Periodo de formación	Tipo de lagunas
						Este	Norte				
4994894_1	Upiscocha	Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	256479	8475724	4723	61.85	1986-1992	proglaciar
4994894_13		Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	254891	8475775	4703	0.63	1992-1998	periglaciar
4994894_14		Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	253222	8473973	4724	0.65	2010-2016	periglaciar
4994894_3	Yanacocha	Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	253194	8473438	4603	3.95	<1986	periglaciar
4994894_5	Vinococha	Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	253830	8473151	4589	4.34	<1986	proglaciar
4994894_4	Uchuy Pucacocha	Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	253689	8472561	4577	11.99	<1986	periglaciar
4994894_6	Jatun Pucacocha	Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	254502	8472013	4612	37.64	<1986	periglaciar
4994894_7	Jatun Pucacocha	Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	255067	8471851	4623	14.52	<1986	proglaciar
4994894_8		Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	256713	8471542	4787	22.05	<1986	proglaciar
4994894_15		Yavero	Lauramarca	Quispicanchi	Ocongate	256652	8471080	4807	0.52	2016-2023	periglaciar
4994978_14		Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	257814	8471353	4935	1.47	1992-1998	proglaciar
4994978_15	Ausangatecocha	Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	258291	8470804	4683	8.28	<1986	proglaciar
4994978_16		Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	260115	8472061	4948	1.13	1986-1992	proglaciar
4994978_17	Yawarcocha	Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	261032	8472606	4868	22.79	1998-2005	proglaciar
4994978_19		Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	262198	8472739	4924	11.28	1986-1992	proglaciar
4994978_18	Cochajasa	Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	262542	8472144	4885	4.38	<1986	periglaciar
4994978_20		Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	263422	8472519	4816	6.19	1992-1998	proglaciar
4994978_21	Senca 3	Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	265587	8474903	4937	2.18	<1986	periglaciar
4994978_22	Senca 2	Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	265625	8475404	5000	1.55	<1986	periglaciar
4994978_23		Vilcanota	Pitumarca	Canchis	Pitumarca	265389	8475597	5008	1.40	<1986	periglaciar
4994896_13	Laguna roja	Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	262611	8475430	5014	10.93	1998-2005	periglaciar
4994896_12		Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	262571	8476168	4971	8.50	2005-2010	proglaciar
4994896_11		Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	262141	8476332	4903	0.99	1992-1998	periglaciar
4994896_20		Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	262023	8476647	4878	0.85	2005-2010	periglaciar
4994896_21		Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	261419	8477126	4818	0.96	2016-2023	periglaciar
4994896_9	Pucacocha	Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	260517	8477741	4672	16.78	<1986	periglaciar
4994896_22		Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	260125	8477997	4674	0.54	2016-2023	periglaciar
4994896_8	Minaparayoc	Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	259896	8477760	4646	6.00	<1986	periglaciar
4994896_10	Uturungococha	Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	259906	8478162	4687	5.14	<1986	periglaciar
4994896_7	Azulcocha	Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	258970	8478255	4605	8.16	<1986	periglaciar
4994896_17		Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	257197	8477138	4843	1.36	2016-2023	proglaciar
4994896_16		Yavero	Pinchimuro Mayo	Quispicanchi	Ocongate	258475	8478800	4542	0.94	2016-2023	periglaciar

Nota: Adaptado de INAIGEM 2023c, * la codificación de las nuevas lagunas identificadas es una secuencia al inventario del INAIGEN, de cada microcuenca.

5.1.1.3. Objetivo específico 3: Formación y evolución de las lagunas asociadas al Nevado Ausangate. Respecto a la formación de lagunas de origen glaciar, de 15 lagunas identificadas se pasó a 32 lagunas registradas en el año 2023, esto implica la formación de 17 nuevas lagunas de origen glaciar en el período de 37 años. Además, la formación de estos cuerpos de agua se ha acelerado, sobre todo, en el periodo 2016 – 2023 con 5 nuevas lagunas, a diferencia del periodo 2010 al 2016 donde solo se formó una laguna de origen glaciar (ver Tabla 13).

Tabla 13

Variación en el número total de lagunas y de nuevas lagunas, así como, las tasas de incremento por periodo y anual en porcentaje

Año	Nº lagunas	Tasa de incremento por periodo (%)	Tasa de incremento anual (%)	Nº nuevas lagunas
1986	15			0
1992	18	20	3.33	3
1998	22	22.22	3.70	4
2005	24	9.09	1.29	2
2010	26	8.33	1.67	2
2016	27	3.85	0.64	1
2023	32	18.52	2.65	5

Respecto a la evolución de la superficie de las lagunas de origen glaciar, se ha registrado un aumento que va de 0.98 km² a 2.80 km² en el periodo 1986 – 2023. Esto implica que en solo 37 años hubo un incremento de 1.82 km² en la superficie lagunar, la tasa de crecimiento anual de menor incremento se presentó entre los periodos 1986 – 1992 y 1998 – 2005 siendo menor al 1.63%, en cambio, en el periodo 2016 – 2023, la tasa de incremento anual de la superficie lagunar presento un crecimiento significativo de 4.76 % (ver Tabla 14).

Tabla 14

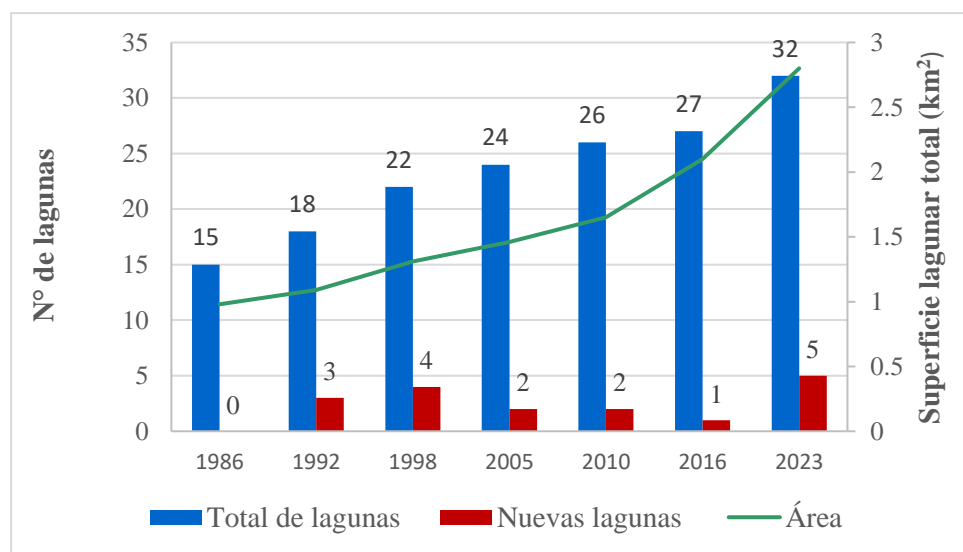
Variación de la superficie total de lagunas de origen glaciar, tasa de incremento por periodo y tasa de incremento anual.

Año	Área (km²)	Tasa de incremento por periodo (%)	Tasa de incremento anual (%)
1986	0.98		
1992	1.09	11.98	1.99
1998	1.31	20.18	3.33
2005	1.46	11.45	1.63
2010	1.65	13.01	2.60
2016	2.10	27.27	4.55
2023	2.80	33.33	4.76

De forma similar al incremento del número de lagunas de origen glaciar y la cobertura superficial total de estos cuerpos de agua, la formación de lagunas nuevas también ha mostrado un aumento. En el periodo 2016 – 2023 se formaron la mayor cantidad de lagunas, mientras que en el periodo 2010 – 2016 se registró la formación de menor cantidad de lagunas de origen glaciar como se muestra en la Figura 32 y Tablas 13 y 14.

Figura 32

Gráfico comparativo entre el número de lagunas, área total lagunar y lagunas nuevas 1986- 2023



Para determinar el retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas de origen glaciar. En la Tabla 15 se presentan los resultados de la reducción de la superficie de áreas glaciares, la cual en el periodo (1986 – 2023) tuvo una reducción de 41.34 km² a 21.98 km², la tasa de reducción avanzó con mayor rapidez en el periodo (1992 – 1998) con una tasa de reducción anual de 2.81%; mientras que en el periodo (1986 – 2005) la tasa de reducción anual fue mucho menor con 0.22%.

Tabla 15

Superficie glaciar tasa de reducción por periodo y tasa de reducción anual (1986 – 2023)

Año	Área glaciar (km ²)	Tasa de reducción por periodo (%)	Tasa de reducción anual (%)
1986	41.34		
1992	36.14	12.58	2.09
1998	30.06	16.82	2.81
2005	29.58	1.60	0.22
2010	28.94	2.16	0.44
2016	27.23	5.90	0.98
2023	21.98	19.28	2.75

Por un lado, se aprecia mayor incremento en la cantidad y en la superficie de lagunas de origen glaciar durante los años de estudio (1986 – 2023) y, por el contrario, se aprecia un retroceso glaciar del 46.81% como se observa en las Figuras 33 y 34.

Figura 33

Reduccion de la supercie glaciar y mayor formacion de lagunas (1986 - 2023)

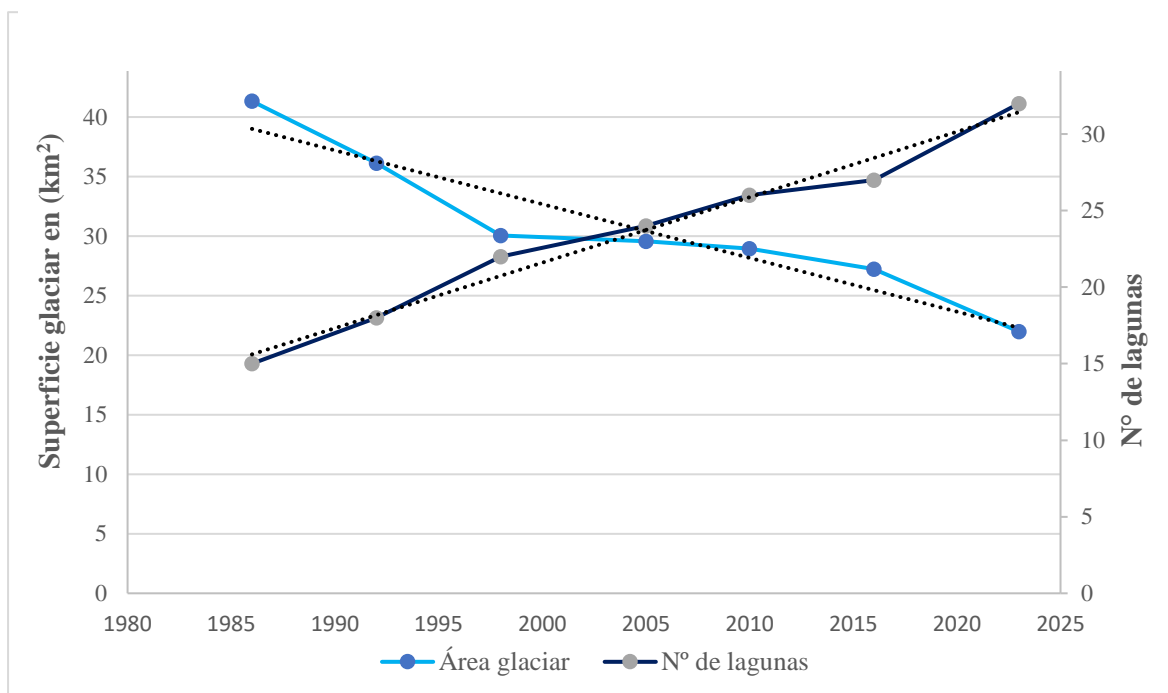
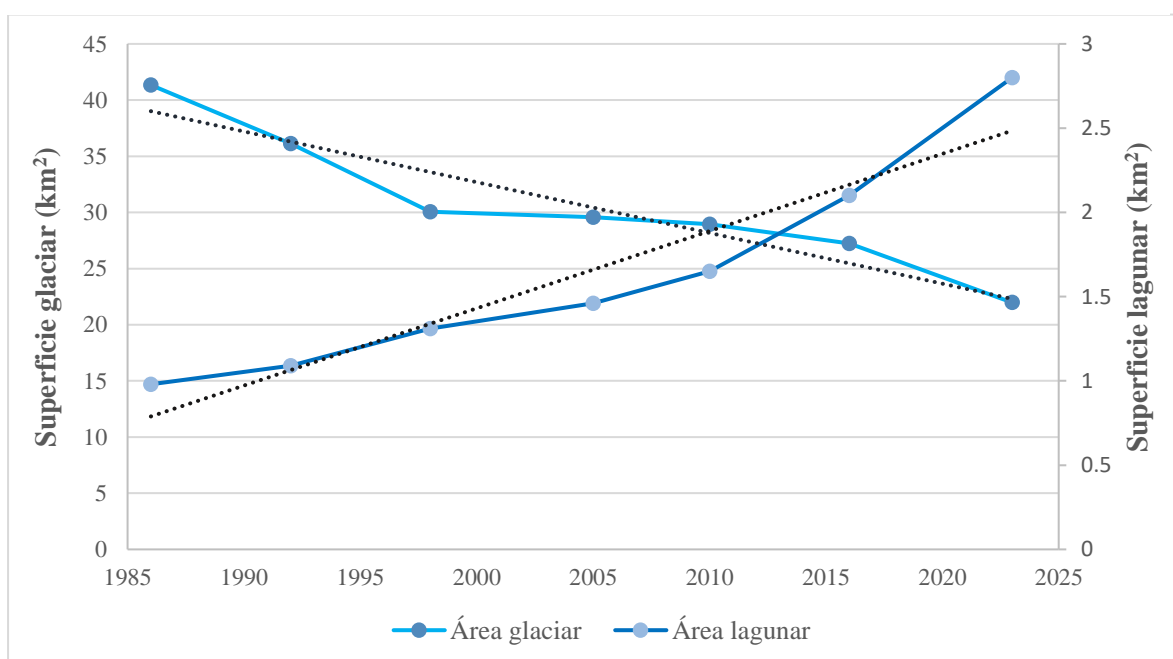


Figura 34

Reducción de la superficie glaciar e incremento de la superficie lagunar (1986-2023)



5.2. Discusión de resultados

5.2.1. *Objetivo general: Retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas del Nevado Ausangate.*

En el estudio realizado por Guardamino (2014), para el periodo 1991 -2024, se determinó que existe una alta correlación de ($R^2 = 0.8$) entre la superficie glaciar y el número de lagunas. Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que existe una alta correlación ($R^2 = 0.96$) entre el retroceso glaciar con la formación de lagunas de origen glaciar; también existe una alta correlación de ($R^2 = 0.76$) entre retroceso glaciar con la evolución de estas lagunas. Los resultados con la investigación de Guardamino son parecidos, aunque no idénticos. Esta diferencia podría deberse al uso de imágenes satelitales de la Colección 2 y Nivel 1, empleadas por dicho autor y que analizó una mayor extensión de área. En cambio, en la presente investigación se emplearon imágenes de la Colección 2 y Nivel 2, abarcando un área de menor extensión.

5.2.1.1. Objetivo específico 1: Retroceso glaciar del Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023. En la investigación realizada por Bolívar (2018), en el nevado Ausangate se demostró un retroceso de 34.23 % para el periodo 1986 al 2016. Asimismo, Quille (2021), en su estudio de la misma área, pero en distintos periodos (1975-2017), obtuvo un retroceso glaciar del 45 %. En comparación, los resultados obtenidos en la presente investigación muestran valores similares, pero no iguales, registrando un retroceso glaciar del 46.83 % para un periodo de 37 años (de 1986 al 2023). Las variaciones pueden deberse al método utilizado y a la resolución espacial de las imágenes satelitales Landsat. Los autores mencionados utilizaron la clasificación supervisada y las imágenes satelitales de Landsat de la Colección 2 y Nivel 1; mientras que, en esta investigación se empleó el índice diferenciado de nieve (NDSI) y las imágenes de la Colección 2 y Nivel 2, que son más actualizados y con mayor resolución que las de la Colección 2 y Nivel 1.

Asimismo, en otras investigaciones realizadas en la Cordillera Vilcanota, según Salzmann et al. (2013), se estimaron reducciones de cobertura glaciar de 30 % del área, producidas en el periodo 1985 – 2005, de igual forma Drenkhan et al. (2018) determinaron una disminución de cobertura glaciar de 37.33 % en el periodo 1988 – 2016. En la presente investigación, entre los periodos 1986-2023, se obtuvo un retroceso del 46.83 %. Aunque los resultados son similares, las variaciones podrían deberse a que el área de estudio en las investigaciones anteriores es más extensa, mientras que la presente investigación es más restringida, con un área de menor tamaño.

Lo interesante de la presente investigación es la incorporación de glaciares cubiertos por detritos, un aspecto que no fue considerado en investigaciones anteriores. Cabe señalar que el primer autor solo determinó la cobertura glaciar correspondiente a la demarcación del distrito de Ocongate. Se observa un mayor retroceso en los glaciares cubiertos por detritos debido a la presencia de material particulado, impurezas y detritos, que interfieren en la actividad del albedo. Estas impurezas incrementan la absorción de calor, ya que los detritos absorben la radiación solar, calentando la superficie del glaciar y acelerando la fusión del hielo.

El nevado Ausangate presentó una mayor pérdida de superficie glaciar en el periodo 1992 – 1998, debido al fenómeno de El Niño. En cambio, en el periodo 1998 – 2005, el retroceso glaciar fue menor debido al fenómeno de La Niña. Los resultados de esta investigación coinciden con los resultados de Castillo (2022), quien señala que durante el periodo 1992 – 1998 se evidenció mayor retroceso glaciar a causa del fenómeno de El Niño, mientras que en el periodo 1998 – 2005 la reducción de la superficie glaciar fue menor debido al fenómeno de La Niña.

En cuanto a la tasa de cambio anual, este es un parámetro que representa un valor de suma importancia en las investigaciones de retroceso glaciar, ya que el valor del retroceso

por año. De acuerdo con Quille (2021), la tasa de cambio anual en la misma área de estudio fue de -1.44 %, lo cual es similar al valor obtenido en la presente investigación (-1.69%). Esto demuestra el acelerado retroceso de la cobertura glaciar en el Nevado Ausangate. Sin embargo, aunque la metodología aplicada en el estudio realizado por Quille es diferente, la tendencia del retroceso glaciar es similar en ambas investigaciones, puesto que los glaciares son sensibles a la variación del clima.

Durante el período 1992-1996, se observa una mayor tasa de cambio anual en el nevado Ausangate, atribuida al fenómeno de El Niño y al aumento de la temperatura causado por el cambio climático. Los resultados de esta investigación coinciden con los de Quille (2021), quien señala que durante el período 1985-1995 se evidenció una mayor tasa de cambio anual, atribuida al cambio climático por el aumento de la temperatura atmosférica a causa de los gases de efecto invernadero (GEI) (Stocker et al., 2013), generados principalmente por la actividad antrópica.

5.2.1.2. Objetivo específico 2: Inventario de lagunas de origen glaciar existentes en el Nevado Ausangate, en el periodo 1986 – 2023. Hasta el año 2020, en el área de estudio se habían detectado 26 lagunas de origen glaciar (INAIGEM, 2023c). En la presente investigación, al año 2023 se identificaron 32 lagunas de origen glaciar; es importante destacar que en tres años se incrementaron 6 de estas lagunas. La variación en la cantidad de lagunas se debe a que la reciente formación y la menor profundidad que presentan estas se confunde con la superficie del suelo, lo que resultan en valores más altos de reflectividad. Este tipo de lagunas requieren un estudio de campo para la verificación de estos cuerpos de agua, ya que con las imágenes satelitales es complicado determinar su existencia. Por eso, en octubre del año 2023, se validó la existencia de cada una de las lagunas inventariadas, tomando en cuenta la referencia que el INAIGEM estableció en su último inventario, considerando lagunas de origen glaciar de \geq a 5000 m².

5.2.1.3. Objetivo específico 3: Análisis de la formación y elución de lagunas de origen glaciar. Respecto a la formación y evolución de lagunas de origen glaciar, el incremento en las tasas de formación, la superficie total y la aparición de nuevas lagunas durante el periodo de estudio indican un mayor desarrollo de lagunas y expansión de su extensión. Las superficies totales identificadas (2.8 km²), concuerdan en mayor medida con las obtenidas en el inventario del INAIGEM (2.43 km²). Cabe destacar que las diferencias observadas pueden atribuirse al tiempo de tres años transcurridos y a las variaciones en los criterios de campo utilizados para su consideración de lagunas de origen glaciar.

En la investigación realizada por Guardamino y Drenkhan (2016), para el período 1991 al 2014, se determinó que el número de lagunas y la superficie lagunar total había experimentado un incremento del 0.77 % y 0.48 % en el año 1991, mientras que, para el año 2014 el incremento fue del 2.31 % y 2.49 % en la tasa de cambio anual. Por otro lado, los hallazgos de la presente investigación muestran que el número de lagunas y la superficie lagunar total, también se incrementaron en su tasa anual del 3.3 % y 1.74 % en 1986 a 2.65 % y 4.79 % en el año 2023. Los resultados indican tasas anuales de cambio similares, pero no iguales. Cabe señalar que las diferencias pueden deberse a la escala del área de estudio, ya que los investigadores cubrieron una extensión más amplia, mientras que esta investigación se limitó a una extensión menor.

Implicancias

- **Análisis de la evolución acelerada de lagunas de origen glaciar**

De las 17 nuevas lagunas formadas entre 1986 y 2023, se observaron tres lagunas con una evolución particularmente notable.

La laguna de mayor extensión, Upiscocha con código 4994894_1, que se encuentra en la microcuenca Lauramarca, en el año 2010 tenía una extensión de 19.82 ha (a.1), en 2016

alcanzó los 20.74 ha (b.1) y para 2023 se expandió a 61.85 ha (c.1), incrementando en más del doble en 7 años (ver Anexo 6).

La siguiente laguna destacada es la laguna Roja (4994896_13), que se encuentra en la microcuenca Pinchimuro mayo. En 2010 tenía una extensión de 1.33 ha (a.2), en 2016 aumento a 5.13 ha (b.2) y para 2023 alcanzó los 10.93 ha (c.2), incrementándose también más del doble en 7 años (ver Anexo 6).

Finalmente, la laguna Yawarcocha (4994978_17), situada en la microcuenca Pitumarca, en el año 2010, su extensión era de 2.23 ha (a.3), en 2016 creció a 13.98 ha (b.3) y en 2023 alcanzó los 22.80 ha (c.3), duplicando su superficie en los últimos 7 años como se observa en el anexo 6.

De manera particular, se observó que la laguna Upiscocha presenta una evolución más rápida que otras lagunas en el área de estudio. Tiene una superficie de 61.85 hectáreas y un volumen de 17,864,016 m³ (INAIGEM, 2023b). Esta evolución acelerada representa un peligro latente debido a su considerable volumen. Además, según INAIGEM (2023a), se identificaron 15 zonas potencialmente peligrosas, incluyendo 4 áreas propensas a deslizamiento de suelo, 5 a caídas o avalanchas de roca y 6 zonas potenciales de avalancha de hielo. El material del dique es un depósito morrénico y la laguna no tiene borde libre INAIGEM (2022a). Estas características aumentan el riesgo de inundaciones por desbordamiento de lagunas glaciares (GLOFs por sus siglas en inglés), como los eventos ocurridos en esta laguna en los meses de mayo y agosto según reportes de INAIGEM (2022a y 2022b).

Existe alta probabilidad de incrementos repentinos del caudal en el río Upismayo, lo cual podría generar impactos adversos aguas abajo, incluyendo pérdida de infraestructura y de vidas humanas en los sectores cercanos al río Upismayo y en el centro poblado de Tinki.

- **Análisis de la variación de la superficie lagunar, respecto a la superficie glaciar**

La tasa de incremento anual en la superficie lagunar (Tabla 14) y la tasa de reducción anual en el área glaciar (Tabla 15), mostrados en el ítem 5.1.1.3, deberían de coincidir. Sin embargo, difieren debido a que el comportamiento de las lagunas de tipo proglaciares es diferente al de las lagunas periglaciares. En las lagunas proglaciares, la evolución es más rápida, ya que la absorción de la radiación solar en el agua conduce a mayor derretimiento del glaciar (Wendleder et al. 2021). Esto es aún más evidente cuando el glaciar está cubierto por detritos en comparación con un glaciar libre de detritos, debido a una mayor absorción de la radiación solar (Nicholson y Benn, 2006).

Un ejemplo de esto es la laguna Yawarcocha, que estuvo en contacto con un glaciar cubierto por detritos durante el periodo 2010-2016. Mientras tanto, las lagunas Upiscocha, Roja y la laguna con código 4994896_17 permanecen en contacto hasta la actualidad. La superficie de las dos últimas siguen expandiéndose con el tiempo, mientras que la laguna Upiscocha ya alcanzó su expansión máxima.

Sucesión ecológica primaria

La sucesión ecológica primaria en los glaciares se refiere al proceso de colonización y establecimiento de comunidades biológicas en áreas recién expuestas tras el retroceso de un glaciar. La sucesión primaria comienza en sustratos desnudos y sin vida preexistente, como rocas y sedimentos glaciares (Knoflach et al., 2021). Esta sucesión es debido al retroceso mundial de los glaciares, provocado por el calentamiento global, lo que está generando cambios en la diversidad de especies, la composición de las comunidades y las interacciones entre especies (Pothula & Adams, 2022).

- **Etapas de la sucesión primaria en zonas descubiertos de glaciares**

Colonización de pioneros, las primeras especies en establecerse suelen ser organismos resistentes, como líquenes y musgos (*Racomitrium canescens*) comienzan a

establecerse. Estas plantas son capaces de sobrevivir en condiciones difíciles, con suelos pobres en nutrientes y expuestos a la erosión. A medida que pasa el tiempo, las plantas pioneras modifican el suelo, enriqueciendo los nutrientes y facilitando la llegada de otras especies como pastos y arbustos pequeños (Tanner et al., 2024; Walther, 2021). En algunos casos el retroceso glaciar aporta nutrientes en el suelo, como fósforo y nitrógeno, proviene del desprendimiento de laderas montañosas, restos supraglaciares, y materia orgánica antigua enterrada bajo el hielo (Khedim et al., 2021). Estos nutrientes son esenciales para desencadenar la formación de comunidades tempranas de microorganismos y otros organismos pioneros (Ficetola et al., 2024).

Estos paisajes proglaciares se convierten rápidamente en el hogar de una gran variedad de organismos (Palomo, 2017)

- a) Comunidad microbiana: Diversidad de bacterias, hongos, protistas y la asociación de diversas plantas vasculares.
- b) Macrofauna de suelo: Diversidad de insectos, colémbolos, lombrices de tierra y diversidad de otros animales

Desarrollo del suelo, con el tiempo, la descomposición de estas especies pioneras contribuye a la formación de un suelo rudimentario, permitiendo la llegada de plantas herbáceas.(Walther, 202; Tu et al., 2024)

Diversificación de la comunidad: A medida que las condiciones del suelo mejoran, se pueden establecer especies más complejas, como arbustos (Finch et al., 2021).

Este proceso de sucesión es crucial para la restauración ecológica de las áreas afectadas por el cambio climático y el derretimiento glaciar, ya que también contribuye al secuestro de carbono y al establecimiento de nuevos ecosistemas resilientes (Jones & Henry, 2023).

Alteración de ecosistemas acuáticas

Debido al retroceso glacial acelerado, el suelo libre de cobertura glacial es propenso a la formación de:

Soluciones acidas con presencia de metales pesados, producto de la meteorización y reacciones bioquímicas en presencia de agua y oxígeno. Como la generación de drenaje ácido de roca libera diferentes compuestos químicos, como el ácido sulfúrico, y solubiliza cantidades importantes de metales pesados. Este proceso disminuye el valor del pH del agua¹, llegando a valores entre 1,5 a 5. En algunos casos, la presencia del ion férrico (Fe^{3+}) se evidencia por la coloración café-rojiza, y si hay presencia de ion ferroso (Fe^{2+}) se observa un color azul verdoso (INAIGEM, 2022c. Pag.2).

VI. Conclusiones

Conclusiones sobre el problema de investigación.

El retroceso glaciar es un factor importante en la formación y evolución de nuevas lagunas en el nevado Ausangate. La relación entre retroceso glaciar y formación y evolución de lagunas de origen glaciar es significativa, ya que existe una alta correlación ($R^2= 0.96$ y $R^2= 0.79$ respectivamente).

Conclusiones sobre las preguntas de investigación

1. El retroceso glaciar en el nevado Ausangate es acelerado. En el período 1986 – 2023, registró una pérdida de cobertura de superficie glaciar de 19.36 km² (46.83 %), con una tasa de cambio anual de -1.69 %, donde los glaciares libres de detritos con una tasa de cambio anual de -1.66 % y los glaciares cubiertos por detritos con una tasa de cambio anual de -2.53 %. Asimismo, este retroceso glaciar está siendo más acelerado con el paso del tiempo, siendo los glaciares cubiertos por detritos, los que tienen un retroceso más acelerado, respecto a los glaciares libres de detritos, debido a que están cubiertos por material detrítico donde la actividad del albedo es nula. Además, los glaciares cubiertos y que están en contacto con lagunas, presentan una mayor tasa de retroceso.
2. En el área de estudio del nevado Ausangate, el inventario de lagunas glaciares registra 32 lagunas con una superficie total de 2.8 km². De este total, 3 corresponden a lagunas proglaciares o lagunas en contacto con los glaciares y 29 corresponden a lagunas periglaciares o lagunas sin contacto glaciar.
3. El incremento del número de lagunas, así como de la superficie total ocupada por estas, indican un mayor desarrollo de lagunas de origen glaciar y la expansión de la superficie de estos cuerpos de agua. Tanto el número como la superficie de las lagunas periglaciares están en crecimiento con el paso del tiempo. Particularmente,

la evolución de las lagunas del tipo proglaciares es acelerada. Casos destacados constituyen tres lagunas que en siete años han mostrado incrementos superiores al 100 % en su superficie, lo que las hace peligrosas debido a su cada vez mayor volumen de almacenamiento.

VII. Recomendaciones

1. Continuar con el estudio del retroceso glaciar, utilizando imágenes satelitales que brinden mayor resolución espacial (SPOT, MODIS, PLEIDES).
 - a) Realizar investigaciones de retroceso glaciar y su relación con la formación y evolución de lagunas de una mayor cantidad de nevados y/o áreas de estudio de la cordillera Vilcanota para realizar la comparación.
 - b) Realizar investigación sobre la relación que existe el retroceso glaciar con los humedales.
 - c) Realizar investigaciones sobre la formación de nuevos ecosistemas y las especies asociados que emergen como consecuencia del retroceso glaciar.
2. Se recomienda que las entidades pertinentes y las autoridades empiecen a implementar políticas y proyectos de conservación en ecosistemas de montaña y la gestión hídrica. También proyectos que contrarresten las consecuencias en las regiones afectadas. Estas zonas deben estar preparadas para enfrentar cambios futuros como desbordes de lagunas y deslizamientos.
 - a) Restauración de humedales y pastizales
 - b) Rehabilitación de infraestructura hídrica
 - c) Adaptación de sistemas ancestrales “construcción de amunas”
3. Se recomienda continuar con las investigaciones sobre la evolución de lagunas de origen glaciar y posteriormente el análisis de amenaza que pueden representar para las poblaciones adyacentes al nevado Ausangate.
4. Los glaciares libres de detritos, glaciares cubiertos por detritos y las lagunas de origen glaciares siempre presentarán limitaciones en su cartografiado a través de sensores remotos, por lo que se recomienda realizar trabajos continuos de

verificación directa de campo, a fin de contar con una información válida para investigaciones futuras.

5. Implementar medidas de mitigación frente al acelerado retroceso glaciar como:

La propuesta de la revista *Nature* fue construir un dique de 100 metros de altura frente al glaciar Jakobshavn en Groenlandia, el más afectado por el deshielo en el Ártico, con la finalidad de frenar su erosión y reducir su deterioro (CICS UST, 2022).

Un arquitecto indonesio llamado Faris Rajak Kotahatuhaha fue premiado por su innovador proyecto "Recongelar el Ártico". La idea principal de su proyecto es recolectar el agua de los glaciares que se ha derretido, desalinizarla y luego volver a congelarla para crear grandes bloques de hielo con forma hexagonal. Estos bloques, gracias a su diseño, podrían unirse entre sí para formar nuevas masas de hielo en el Ártico (CICS UST, 2022).

La Universidad de Arizona propuso una idea sencilla: crear más hielo. La idea es usar bombas de energía eólica para extraer agua de debajo del glaciar y esparcirla sobre las capas superiores de hielo. Al congelarse en la superficie, se fortalecería el grosor y la consistencia del glaciar (CICS UST, 2022).

VIII. Referencias

- Almeida, JP., Montúfar, R., & Anthelme, F. (2013). Patterns and origin of intraspecific functional variability in a tropical alpine species along an altitudinal gradient. *Plant Ecology & Diversity*, 6(3-4), 423-433.
<https://doi.org/10.1080/17550874.2012.702137>
- Anderson, L. S., & Anderson, R. S. (2016). Modeling debris-covered glaciers: response to steady debris deposition. *The Cryosphere*, 10(3), 1105-1124. 10.5194/tc-10-1105-2016
- ANA. (2014a). *Inventario de Glaciares del Perú (segunda actualización)*.
<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3646>
- ANA. (2014b). *Inventario nacional de glaciares y lagunas: Dirección de conservación y planeamiento de recursos hídricos unidad de glaciología y recursos hídricos*.
 Repositorio de ANA.
<https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/199/ANA0000015.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- ANA. (2015). *Evolución de la glaciación laguna Palcacocha. Repositorio digital de Recursos Hídricos*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2423>
- ANA. (2019). *Proyección de lagunas futuras en las cordilleras glaciares del Perú*.
 Repositorio digital de Recursos Hídricos.
<http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/3597>
- Armstrong, RL., Rittger, K., Brodzik, MJ., Racoviteanu, A., Barrett, AP., Khalsa, SJS., Raup, B., Hill, AF., Khan, AL., Wilson, AM., Kayastha, RB., Fetterer, F., & Armstrong, B. (2019). Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: Separating melt water sources in river flow. *Regional Environmental Change*, 19, 1249-1261.
<https://doi.org/10.1007/s10113-018-1429-0>

- Baraer, M., Mark, B.G., McKenzie, J.M., Condom, T., Bury, J., Huh, K.-I., Portocarrero, C., Gómez, J., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134-150. <https://doi.org/DOI:10.3189/2012JoG11J186>
- Benn, D.I., & Lehmkuhl, F. (2000). Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International* 65-66, 15-29. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(99\)00034-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1040-6182(99)00034-8)
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la Investigación* (3a ed.). Universidad de La Sabana, Colombia.
- Bernauer, T., & Siegfried, T. (2012). Climate change and international water conflict in Central Asia. *Journal of Peace Research*, 49(1), 227-239. <https://doi.org/10.1177/0022343311425843>
- Bijeesh, K., Sebastián, R. F., Shanshan, W., & Pedro, T. (2016). Un análisis comparativo del retroceso glaciar en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investig. Geogr. Chile*, 51, 3 - 36.
- Bolívar, E. (2018). *Evaluación de la deglaciación del Nevado Ausangate y su influencia en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca alta del río Pitumarca - Cusco* [Tesis de grado, Universidad Alas Peruanas]. Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación UAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/2855>
- Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140(2014), 165-178. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.026>
- Carenas, M., Giner, J., González, J. & Pozo, M., 2014. *Geología: Geología. 2º Bachillerato Lomce (E-BOOK)*. Parainfo. 9788428347433
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeblerli, W. (2012). An integrated socio-

- environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3), 733-767. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8>
- Castillo, F.N. (2022). *Análisis multitemporal de la dinámica glaciar y su influencia sobre lagunas y humedales alto andinos en la Cordillera Blanca - Perú, periodo 1989-2019* [Tesis de maestría, Universidad Nacional San Antúnez de Mayolo]. Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación UNASAM.<http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5053>
- Cauas, D. (2015). *Definición de las variables, enfoque y tipo de investigación*. Bogotá: biblioteca electrónica de la universidad Nacional de Colombia, 2,1-11.
- Cauvy, S., & Dangles, O. (2019). A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology & Evolution* 3, (12), 1675-1685. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1042-8>
- Cook, D., Davíðsdóttir, B., Malinauskaite, L. (2020). A cascade model and initial exploration of co-production processes underpinning the ecosystem services of geothermal areas *Renewable Energy* 161:917-927. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.155>
- Cook, D., Malinauskaite, L., Davíðsdóttir, B., Ögmundardóttir, H. (2021). Co-production processes underpinning the ecosystem services of glaciers and adaptive management in the era of climate change. *Ecosystem Services* 50:101-342. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101342>
- CICS UST. (2022). *Deshielo de los polos*. <https://www.ipn.mx/assets/files/cics-sto/docs/conocenos/comites/ConcienciaVerde25.pdf>
- Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). *The Physics of Glaciers*. (4a ed). Prensa académica.

- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos Físico de la Teledetección* (2da ed). Ediciones Rialp, S.A. Madrid.
- CIREN. (2011). *Proyecto Mantenición del Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos SITHA : análisis multitemporal de cambios ocurridos en humedales utilizando imágenes satelitales. Período 1984 - 2011*. Biblioteca digital CEDOC. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/6380>
- Clague, J.J., & Evans, S.G. (2000). A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews*, 19(17), 1763-1783. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00090-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00090-1)
- Colonia, D., & Torres, J. (2012). Determinación del retroceso glaciar en la microcuenca de Llanganuco, a través del análisis multitemporal en el periodo 1987- 2007. *Proceedings of the 4th GEOBIA*, 593- 579. <http://mtcm16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-18/2012/05.14.18.05/doc/165.pdf>
- Colonia, D., Torres, J., Haeberli, W., Schauwecker, S., Braendle, E., Giraldez, C., & Cochachin, A. (2017). Compiling an inventory of glacier-bed overdeepenings and potential new lakes in de-glaciating areas of the peruvian Andes: approach, first results, and perspectives for adaptation to climate change. *Water*, 9(5), 336. <https://doi.org/10.3390/w9050336>
- Cook, S.J., & Quincey, D.J. (2015). Estimating the volume of Alpine glacial lakes. *Earth Surf Dynam*, 3(4), 559-575. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-559-2015>
- Denzinger, F., Machguth, H., Barandun, M., Berthier, E; Girod, L., Kronenberg, M., Usubaliev, R., & Hoelzle, M. (2021). Geodetic mass balance of Abramov Glacier from 1975 to 2015. *Journal of Glaciology*, 67(262), 331-342. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.108>
- Ding, Y., Zhang, S., Zhao, L., Li, Z., & Kang, S. (2019). Global warming weakening the

- inherent stability of glaciers and permafrost. *Science Bulletin*, 64(4), 245-253.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.12.028>
- Dozier, J. (1998). Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sens*, 43(3), 131-136
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Oré, MT. (2015). The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *WIREs Water*, 2(6),715-733. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1105>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., & Frey, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 169, 105-118.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Emmer, A., Harrison, S., Mergili, M., Allen, S., Frey, H., & Huggel, C. (2020). 70 years of lake evolution and glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for the future. *Geomorphology*, 365, 107178.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107178>
- Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilímek, V., & Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *Catena*, 147, 269-279.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.032>
- Flanner, M.G., Zender, C.S., Randerson, J.T. y Rasch, P.J. (2007). Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research*, 112. 10.1029/2006JD008003
- Ficetola, GF., Marta, S., Guerrieri, A., Cantera, I., Bonin, A., Cauvy-Fraunié, S., Ambrosini, R., Caccianiga, M., Anthelme, F., Azzoni, RS., Almond, P., Alviz Gazitúa, P., Ceballos Lievano, JL., Chand, P., Chand Sharma, M., Clague, JJ., Cochachín Rapre,

- JA., Compostella, C., Encarnación, RC., Dangles, O., Deline, P., Eger, A., Erokhin, S., Franzetti, A., Gielly, L., Gili, F., Gobbi, M., Hågvar, S., Kaufmann, R., Khedim, N., Meneses, RI., Morales-Martínez, MA., Peyre, G., Pittino, F., Proietto, A., Rabatel, A., Sieron, K., Tielidze, L., Urseitova, N., Yang, Y., Zaginaev, V., Zerboni, A., Zimmer, A., Diolaiuti, GA., Taberlet, P., Poulénard, J., Fontaneto, D., Thuiller, W., & Carteron, A. (2024). The development of terrestrial ecosystems emerging after glacier retreat. *Nature* 632(8024):336-342. doi.org/10.1038/s41586-024-07778-2
- Finch, DM., Butler, JL., Runyon, JB., Fettig, CJ., Kilkenny, FF., Jose, S., Frankel, SJ., Cushman, SA., Cobb, RC., Dukes, JS., Hicke, JA., Amelon, SK. (2021). Effects of Climate Change on Invasive Species BT - Invasive Species in Forests and Rangelands of the United States: A Comprehensive Science Synthesis for the United States Forest Sector. In Poland, TM; Patel-Weynand, T; Finch, DM; Miniati, CF; Hayes, DC; Lopez, VM (eds.). *Cham, Springer International Publishing*. p. 57-83 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45367-1_4
- Francou, B. R., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J.E., Silvestre, E.E., Ginot, P., Cáceres, B; Condom, T., Villacís, M., Ceballos, J.L., Lehmann, B., Anthelme, F., Dangles, O; Gomez, J., Favier, V., Maisincho, L., Jomelli, V., Vuille, M., Wagnon, P., L; Y., Ramallo, C., & Mendoza, J. (2010). *Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático. Comunidad Andina. PRAA;IRD.* <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Libro-Glaciares.pdf>
- Frey, H., Huggel, C., Paul, F., & Haeberli, W. (2010). *Detección automatizada de lagos glaciares basada en teledetección con vistas a evaluar los riesgos potenciales asociados. Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, 45, 261-272.* <https://doi.org/10.5167/uzh-128917>

- GAPHAZ (2017). *Evaluación de peligros por glaciares y permafrost en regiones de montaña – Documento técnico de orientación*. Elaborado por Allen, S., Frey, H., Huggel, C. et al. Grupo de Trabajo Permanente sobre Peligros Glaciares y Permafrost en Alta Montaña (GAPHAZ) de la Asociación Internacional de Ciencias de la Criósfera (IACS) y la Asociación Internacional de Permafrost (IPA). Zurich, Suiza / Lima, Perú, 72 pp.
- Gardner, AS., Moholdt, G., Cogley, JG., Wouters, B., Arendt, AA., Wahr, J., Berthier, E., Hock, R., Pfeffer, WT., Kaser, G., Ligtenberg, SRM., Bolch, T., Sharp, MJ., Hagen, JO., Van den Broeke, MR., & Paul, F. (2013). A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. *Science*, 340(6134), 852-857. <https://doi.org/10.1126/science.1234532>
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather, *Advances in Geosciences. European Geosciences Union*, 22, 3-11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- Georges, C. (2004). Fluctuaciones de los glaciares del siglo XX en la Cordillera Blanca Tropical, Perú. *Investigación ártica, antártica y alpina*, 36 (1), 100–107. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0100:TGFITT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0100:TGFITT]2.0.CO;2)
- Gertler, CG., Puppala, SP., Panday, A., Stumm, D., Shea, J. (2016). Black carbon and the Himalayan cryosphere. *Atmospheric Environment*, 125, 404-417. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.078>
- Gil, J. (2012). *Retroseso glaciar y cambio climático en los Andes Peruanos: Principales Impactos*. *BioDiversidadLA*, 1-9. https://www.biodiversidadla.org/Documentos/Retroseso_glaciar_y_cambio_climatico_en_los_andes_peruanos_principales_impactos
- Gilardoni, S., Di Mauro, B., & Bonasoni, P. (2022). Black carbon, organic carbon, and mineral dust in South American tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 213,

103837. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103837>
- Gonzales, G. (2023). *Simulación de la amenaza de avalancha y su riesgo físico sobre la laguna Palcacocha en la microcuenca Paria, Huaraz 2016-2017* [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional de Tesis de Investigación de UNASAM. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5539>
- Grima, N & Campos, N. (2020). A farewell to glaciers: Ecosystem services loss in the Spanish Pyrenees. *Journal of Environmental Management* 269:110789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110789>
- Guardamino, L. (2014). *Análisis de la evolución de las lagunas de alta montaña en la Cordillera del Vilcabamba (Cusco y Apurímac) entre los años 1991-2014 mediante métodos de sensoramiento remoto y SIG* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/7268>
- Guardamino, L., & Drenkhan, F. (2016). Evolución y potencial amenaza de lagunas glaciares en la cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú) entre 1991 y 2014. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 1(1), 21-36. <https://doi.org/10.36580/rgem.i1.21-36>
- Haerberli, W., Clague, J. J., Huggel, C. & Käab, A. (2010). Hazards from lakes in high-mountain 172 Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña glacier and permafrost regions: climate change effects and process interactions. *Centre Tecnològic Forestal de Catalunya*, 10. <http://seg2010.ctfc.cat/documentacio.htm>
- Haerberli W., Huggel C., Paul F. & Zemp M. (2013). Respuestas glaciales al cambio

- climático. *Tratado de Geomorfología*, 13, 152-175. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00350-X>
- Haerberli, W., Schaub, Y., & Huggel, C. (2017). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293, 405-417. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009>
- Hanshaw, MN., & Bookhagen, B. (2014). Áreas glaciares, áreas de lagos y líneas de nieve de 1975 a 2012: estado de la Cordillera Vilcanota, incluida la capa de hielo de Quelccaya, Andes centrales del norte, Perú. *The Cryosphere*, 8, 359-376. <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>, 2014
- Hågvar, S., Gobbi, M., Kaufmann, R., Ingimarsdóttir, M., Caccianiga, M., Valle, B., Pantini, P., Fanciulli, P.P., & Vater, A. (2020). Ecosystem Birth near Melting Glaciers: A Review on the Pioneer Role of Ground-Dwelling Arthropods. *Insects*, 11, 644. doi.org/10.3390/insects11090644
- Hall, DK., Riggs, GA., & Salomonson, V V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127-140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)
- Hastenrath, S., & Ames, A. (1995). Recesión del glaciar Yanamarey en la Cordillera Blanca, Perú, durante el siglo XX. *Journal of Glaciology*, 41(137), 191-196. <https://doi.org/10.3189/S0022143000017883>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. D. (2014). *Metodología De La Investigación (6ta ed.)*. (S. D. McGRAW-HILL / Interamericana Editores, Ed.) México: Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. <https://www.uca.ac.cr/wpcontent/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>.

- Huddart, D. & Stott, T., (2010). *Earth Environment. Present, past and future*. Wiley & Sons.
- Huggel, C., Kääb, A., Haeblerli, W., Teysseire, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2):316-330. <https://doi.org/10.1139/t01-099>
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135-140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- INAIGEM. (2017). *Manual metodológico de inventario nacional de glaciares*. Repositorio del INAIGEM. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/63411650-3ff1-475e-acc9a09fdfe2b16d>
- INAIGEM. (2018). *Inventario Nacional de Glaciares Las Cordilleras Glaciares del Perú 2018*. Repositorio del INAIGEM. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/57>.
- INAIGEM.(2022a). *Reporte de Inspeccion del dia 14 de mayo: Laguna Upiscocha*
- INAIGEM. (2022b). *Reporte de Inspección 10 de agosto:Laguna upiscocha*.
- INAIGEM. (2022c). *El drenaje ácido de roca y su potencial impacto ambiental*.
- INAIGEM. (2023a). *Identificación de Zonas Potencialmente Peligrosas Laguna Upiscocha y cara noroeste del Nevado Ausangate*
- INAIGEM. (2023b). *Batimetría Laguna Upiscocha agosto 2023*
- INAIGEM. (2023c). *Memoria descriptiva del inventario nacional de glaciares y lagunas de origen glaciar*. Repositorio del INAIGEM. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/499>
- INAIGEM (2024). *Revista Científica de Glaciares y Ecosistemas de Montaña 8*.
- IPCC. (2013). *Climate change 2013 the physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1-1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

- IPCC. (2019). *Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 oC con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir.* https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- IPCC (2021). *Cambio climático 2021: La base científica física.*
- IPCC. (2022). High Mountain Areas. In: *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press*, 131-202. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.004>
- James Painter. (2007). *Deglaciation in the Andean Region. Human Development Occasional Papers*, HDOCPA-2007-55, Human Development Report Office (HDRO), United Nations Development Programme (UNDP), 21. RePEc:hdr:hdocpa:hdocpa-2007-55
- Janke, J.R., Bellisario, A.C., & Ferrando, F.A. (2015). Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. *Geomorphology*, 241, 98-121. [10.1016/j.geomorph.2015.03.034](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.034)
- Ji, L., Zhang, L., & Wylie, BK. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(11), 1307-1317. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.11.1307>
- Jiang, S., Nie, Y., Liu, Q., Wang, J., Liu, L., Hassan, J., Liu, X., & Xu, X. (2018). Glacier change, supraglacial debris expansion and glacial lake evolution in the Gyirong River Basin, Central Himalayas, between 1988 and 2015. *Remote Sensing*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/rs10070986>
- Jomelli, V., Favier, V., Rabatel, A., Brunstein, D., Hoffmann, G., & Francou, B. (2009). Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and palaeoclimatic implications: *Palaeogeography*, 281(3), 269-282.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.10.033>
- Jones, G & Henry, G. (2023). Primary plant succession on recently deglaciated terrain in the Canadian High Arctic. *Journal of Biogeography* 30:277-296. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2003.00818.x>
- Jori, G. (2009). *El cambio climático como problema y el diálogo social como solución. Investigaciones Geográficas*, 48, 125-160.
- Juen, I., Kaser, G., & Georges, C. (2007). Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change*, 59(1), 37-48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.038>
- Kaltenborn, BP., Nellesmann, C., & Vistnes, II. (2010). *Glaciares de alta montaña y cambio climático: desafíos para los medios de vida humanos y la adaptación*. UNEP, Birkeland Trykkeri, 56 pp.
- Kaser, G., & Georges, C. (1999). Sobre el balance de masa de los glaciares de bajas latitudes con especial consideración de la Cordillera Blanca del Perú. *Geografiska Annaler*, 81(4), 643–651. [10.1111/1468-0459.00092](https://doi.org/10.1111/1468-0459.00092)
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1-4), 93-103. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4)
- Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical glaciers*. Cambridge: *University Press*.
- Kaser, G., Großhauser, M., & Marzeion, B. (2010). Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(47), 20223-20227. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008162107>
- Khedim, N., Cécillon, L., Poulenard, J., Barré, P., Baudin, F., Marta, S., Rabatel, A., Dentant, C., Cauvy-Fraunié, S., Anthelme, F., Gielly, L., Ambrosini, R., Franzetti, A., Azzoni,

- R.S., Caccianiga, M.S., Compostella, C., Clague, J., Tielidze, L., Messenger, E., Choler, P. and Ficaretola, G.F. (2021). Topsoil organic matter build-up in glacier forelands around the world. *Glob. Change Biol.*, 27: 1662-1677. <https://doi.org/10.1111/gcb.15496>
- Kong, Y., & Pang, Z. (2012). Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge. *Journal of Hydrology*, 434-435, 121-129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.029>
- Kinzl, H., (1969). La glaciacion actual y pleistocena en los Andes Centrales. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, 89, 89-100.
- Knight, P. G. (1999) *Glaciers*. Primera edición. Cheltenham: Stanley Thornes.
- Knoflach, B., Ramskogler, K., Talluto, M., Hofmeister, F., Haas, F., Heckmann, T., Pfeiffer, M., Piermattei, L., Ressler, C., Wimmer, M.H., Geitner, C., Erschbamer, B., Stötter, J. (2021). Modelling of Vegetation Dynamics from Satellite Time Series to Determine Proglacial Primary Succession in the Course of Global Warming—A Case Study in the Upper Martell Valley. *Eastern Italian Alps*. vol.13. <https://doi.org/10.3390/rs13214450>
- Kumar, R. & Narayan, M. (2017). Changes of glacier lakes using multi-temporal remote sensing data: A case study from India. *Geographica Pannonica*, 21(3), 132–141. [10.5937/GeoPan1703132K](https://doi.org/10.5937/GeoPan1703132K)
- Lemke, P., J. Ren, R. B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R. H. Thomas & T. Zhang. *En: Climate Change (2007): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, 48.
- Lesi, M., Nie, Y., Shugar, D.H., Wang, J., Deng, Q., Chen, H., & Fan, J. (2022). Landsat- and Sentinel-derived glacial lake dataset in the China-Pakistan Economic Corridor from 1990 to 2020. *Earth System Science Data* 14(12), 5489-5512.

<https://doi.org/10.5194/essd-14-5489-2022>

- Li, Y-J., Ding, Y-J., Shangguan, D-H., & Wang, R-J. (2019). Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015. *Advances in Climate Change Research*, 10(4), 203-213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.03.003>
- Lliboutry, L. (1956). *Nieves y glaciares de Chile: fundamentos de glaciología*. Ediciones de la Universidad de Chile. <https://libros.uchile.cl/1339>
- FAO. (2007). *Afrontando Cambio Climático y Globalización en los Andes Peruanos*. Food and Agriculture Organization of the United Nation. <https://www.fao.org/climatechange/270010a8aaa7df373cbb9b691d6e3ba2712e14.pdf>
- Mark, BG., & Mckenzie, JM. (2007). Tracing Increasing Tropical Andean Glacier Melt with Stable Isotopes in Water. *Environmental Science & Technology* 41(20), 6955-6960. <https://doi.org/10.1021/es071099d>
- Mark, BG., McKenzie, JM., & Gómez, J. (2005). Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru / Evaluation hydrochimique de la contribution évolutive de la fonte glaciaire à l'écoulement fluvial: Callejon de Huaylas, Pérou. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 987. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.975>
- McFeeters, SK. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Miles, ES., Willis, I., Buri, P., Steiner, JF., Arnold, NS., & Pellicciotti, F. (2018). Surface Pond Energy Absorption Across Four Himalayan Glaciers Accounts for 1/8 of Total Catchment Ice Loss. *Geophysical Research Letters*, 45(19), 10,410-464,473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018GL079678>

- MINAM. (2015). Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. <https://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/MAPA-NACIONAL-DE-COBERTURA-VEGETAL-FINAL.compressed.pdf>
- Moussavi, M., Pope, A., Halberstadt, ARW., Trusel, LD., Cioffi, L., & Abdalati, W. (2020). Antarctic Supraglacial Lake Detection Using Landsat 8 and Sentinel-2 Imagery: Towards Continental Generation of Lake Volumes. *Remote Sensing*, 12(1), 134. <https://doi.org/10.3390/rs12010134>
- Moret, P., Barragán, Á., Moreno, E., Cauvy-Fraunié, S., Gobbi, M. (2020). When the Ice Has Gone: Colonisation of Equatorial Glacier Forelands by Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae). *Neotropical Entomology* 49(2):213-226. <https://doi.org/10.1007/s13744-019-00753-x>
- Muña, MP. (2011). II diplomado en ciencia y gestión frente al cambio climático. <https://keneamazon.net/Documents/Publications/VirtualLibrary/Ecosistemas-Zonas-Aridas/11.pdf>
- Muñoz, R., Huggel, C., Frey, H., Cochachin, A., & Haerberli, W. (2020). Glacial lake depth and volume estimation based on a large bathymetric dataset from the Cordillera Blanca, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(7), 1510–1527. <https://doi.org/10.1002/esp.4826>
- NSIDC. (2019). Glaciers. National Snow and Ice Data Center. <https://nsidc.org/>
- Oerlemans, J. (2001). Glaciares y cambio climático: la visión de un meteorólogo. *Journal of Glaciology*, 48, 160-2002. <https://doi.org/10.3189/172756502781831557>
- P. Kumar, VN. (2017). Changes of glacier lakes using multi-temporal remote sensing data: A case study from India. *Geographica Pannonica*, 21, 132-141. <https://doi.org/10.5937/GeoPan1703132K>

- Perry, LB., Seimon, A., & Kelly, GM. (2014). Precipitation delivery in the tropical high Andes of southern Peru: New findings and paleoclimatic implications. *International Journal of Climatology*, 34(1), 197-215. <https://doi.org/10.1002/joc.3679>
- Pothula & Adams (2022). Community assembly in the wake of glacial retreat: a meta-analysis. *Global Change Biology*. 28, 6973–6991. <https://doi.org/10.1111/gcb.16427>
- Palomo, I. (2017). Climate Change Impacts on Ecosystem Services in High Mountain Areas: *A Literature Review*. *Mountain Research and Development* 37(2):179-187. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00110.1
- Pouyaud, B., Zapata, M., Yerren, J., Gomez, J., Rosas, G., Suarez, W., and Ribstein, P. (2005). Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques*, 50, 999-1021. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.999>
- Quille, L.E. (2021). Análisis multitemporal del retroceso glaciar del Nevado Ausangate entre los años 1975 – 2017, distrito de ocongate - cusco2019 [Tesis de maestría, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación.
- Rabatel, A., Ceballos, JL., Micheletti, N., Jordan, E., Braitmeier, M., González, J., Mölg, N., Ménégos, M., Huggel, C., & Zemp, M. (2018). Toward an imminent extinction of Colombian glaciers *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 100(1), 75-95. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1383015>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, JL., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, JE., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R; Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Ménégos, M., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M., & Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century

- perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1),81-102.
<https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rado, M; Zuliga, H., Mattos, E., & Rado, B. (2022). Variabilidad pluviométrica y saber andino en la Cordillera del Vilcanota Cusco-Perú. *Revista científica Guacamaya*, 6(2), 1-17. <https://revistas.up.ac.pa/index.php/guacamaya/article/view/2826>
- Réveillet, M., Rabatel, A., Gillet-Chaulet, F., & Soruco, A. (2015). Simulations of changes to Glaciar Zongo, Bolivia (16° S), over the 21st century using a 3-D full-Stokes model and CMIP5 climate projections. *Annals of Glaciology*, 56(70), 89-97.
[https://doi.org/DOI: 10.3189/2015AoG70A113](https://doi.org/DOI:10.3189/2015AoG70A113)
- Rivera, A., Bown F., Napoleoni F., Muñoz C. y Vuille M. (2017). Manual Balance de masa glaciar. Ediciones CECs, Valdivia.
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/2924>
- Salomonson, V V; & Appel, I. (2004). Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index (en línea). *Remote Sensing of Environment*, 89(3), 351-360. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.016>
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, BG., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *Cryosphere*, 7(1),103-118. <https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>
- Schmidt, S., Nüsser, M., Baghel, R., & Dame, J. (2020). Cryosphere hazards in Ladakh: the 2014 Gya glacial lake outburst flood and its implications for risk assessment. *Natural Hazards*, 104(3), 2071-2095. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04262-8>
- SEDACUSCO. (2018). Memoria Anual 2018 Seda.
<https://www.sedaayacucho.pe/archivos/79-45-memoria-anual-2018.pdf>
- SENAMHI. (2017). Datos Hidrometeorológicos.

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

- Sibandze, P., Mhangara, P., Odindi, J., & Kganyago, M. (2014). A comparison of Normalised Difference Snow Index (NDSI) and Normalised Difference Principal Component Snow Index (NDPCSI) techniques in distinguishing snow from related land cover types. *South African Journal of Geomatics*, 3(2), 197–209. 10.4314/sajg.v3i2.6
- Silverio, W., & Jaquet, JM. (2017). Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca (Peru) by remote sensing between 1987 & 2016 in the context of ENSO. *Archives des Sciences*, 69(2):145-162. <https://archive-ouverte.unige.ch//unige:98197>
- Soruco, A., Vincent, C., Rabatel, A., Condom, T., & Francou, B. (2014). Impacts of glacier shrinkage on water resources of La Paz city , Bolivia (16 ° S) over the last four decades. *Asamblea General de EGU*, 16(1), 6420. 2014EGUGA..16.6420S
- Sun, M., Li, Z., Yao, X., Zhang, M., & Jin, S. (2015). Modeling the hydrological response to climate change in a glacierized high mountain region, northwest China. *Journal of Glaciology*, 61(225), 127-136. <https://doi.org/10.3189/2015JoG14J033>
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., y Midgley, P. (2013). Resumen técnico de Cambio climático y sus bases físicas. IPCC y PNUMA. 978-92-9169-338-2
- Tacusi, C., & Hacha, E. (2015). Modelación Hidrológica en la subcuenca de Pitumarca del modelo WEAP (sistema de evaluación y planeación del Agua) Canchis-Cusco [Tesis de grado, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional de Tesis y Trabajos de Investigación UNSAAC. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/130>
- Tanner, L., Kikukawa, G & Weits, K. (2024). The Temporal and Spatial Dynamics of Succession in a Glacial Foreland in Southern Iceland: *The Effects of Landscape Heterogeneity*. vol.13. <https://doi.org/10.3390/land13071055>

- Tarbutck & Lutgens. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física* (8 ed). Pearson.
- Taylor, C., Robinson, TR., Dunning, S., Rachel Carr, J., & Westoby, M. (2023). Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*, 14(1), 487. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x>
- Tweed, F.S. & Carrivick, J.L. (2015). Deglaciation and proglacial lakes. *Geology Today*. 31(3), 96–102. 10.1111/gto.12094
- Tu, BN., Khelidj, N., Cerretti, P., de Vere, N., Ferrari, A., Paone, F., Polidori, C., Schmid, J., Sommaggio, D., Losapio, G. (2024). Glacier retreat triggers changes in biodiversity and plant–pollinator interaction diversity. *Alpine Botany*. <https://doi.org/10.1007/s00035-024-00309-9>
- UGRH. (2013). Evolution 10 glacial lakes in the Cordillera Blanca and its relation to climate change during the past 4 decades. Hih Mountains Adaptation Partnership, 1-12. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/3367/ANA0001834.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- UGRH, 2014. *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas*. Huaraz. Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú. UNEP, (2007). *Global Outlook for Ice & Snow*. Birkeland.
- USGS. (2020). Landsat Collection 2 incluye productos científicos de temperatura de superficie y reflectancia de superficie de nivel 2 global basados en escenas. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>
- Valderrama, S. (2019). *Pasos para elaborar proyectos de investigación científica*. San Marcos E.I.R.L.
- Veettil, BK., & Kamp, U. (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers:

- Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences*, 9(5), 196.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>
- Vittor, L. (2008). Región Andina: El cambio climático y efectos sobre los pueblos indígenas de los Andes. *Servindi*. <https://www.servindi.org/actualidad/3778>
- Vuille, M. Cambio climático y recursos hídricos en los Andes Tropicales. Nota Técnica del Banco Interamericano de Desarrollo No. IDB-TN-515, Banco Interamericano de Desarrollo.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Alison Timm, O., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, JE. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, BG., & Bradley, RS. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3), 79-96.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- Wang, X., Guo, X., Yang, C., Liu, Q., Wei, J., Zhang, Y., Liu, S., Zhang, Y., Jiang, Z., & Tang, Z. (2020). Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images. *Earth Syst*, 12(3), 2169-2182. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2169-2020>
- Wang, X., Liu, S-W., & Zhang, J-L. (2019). A new look at roles of the cryosphere in sustainable development. *Advances in Climate Change Research*, 10(2), 124-131.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.06.005>
- Walther (2021). *In Iceland, Melting Glaciers Give Way to Plant Life*. State of the Planet.
<https://news.climate.columbia.edu/2021/02/24/iceland-melting-glaciers-succession/>

- Wendleder, A., Schmitt, A., Erbertseder, T., D'Angelo, P., Mayer, C., & Braun, MH. (2021). Seasonal Evolution of Supraglacial Lakes on Baltoro Glacier From 2016 to 2020. *Fronte. Ciencias de la Tierra*, 9, 725394. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.725394>
- Williamson, AG., Banwell, AF., Willis, IC., & Arnold, NS. (2018). Dual-satellite (Sentinel-2 and Landsat 8) remote sensing of supraglacial lakes in Greenland. *Cryosphere*, 12(9), 3045-3065. <https://doi.org/10.5194/tc-12-3045-2018>
- Xiao, Y., Ke, CQ., Cai, Y., Shen, X., Wang, Z., Nourani, V., & Lhakpa, D. (2023). Glacier retreating analysis on the southeastern tibetan plateau via multisource remote sensing data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16,2035-2049. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3243771>
- Yap, AA. (2015). Análisis multitemporal de glaciares y lagunas glaciares en la Cordillera Blanca e identificación de potenciales amenazas GLOFs [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/7268>
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, SU., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, JG. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382-386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>