

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Dinámica glaciaria del nevado Huaytapallana y su
relación con la variabilidad climática desde
1993-2023**

Dennis Gustavo Barzola Rivera
Nayely Bright Fretel Vadillo

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Dante Manuel García Jiménez
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 3 de Agosto de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con la variabilidad climática desde 1993-2023

Autores:

1. Dennis Gustavo Barzola Rivera – EAP. Ingeniería Ambiental
2. Nayely Brighit Fretel Vadillo – EAP. Ingeniería Ambiental

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores SI NO
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**):15
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

AGRADECIMIENTO

A nuestro asesor, Ing. Dante Manuel García Jiménez por el acompañamiento constante durante la elaboración del presente trabajo de investigación.

Al Ing. Víctor Henry Pariona Antonio por el apoyo incondicional durante el desarrollo del presente proyecto de investigación.

A la Universidad Continental por brindarnos el acceso a su biblioteca virtual y física, la fuente de información proporcionada fue invaluable para la realización de esta tesis.

DEDICATORIA

A mi padre y madre por el apoyo incondicional que me dieron, sin ello no lo hubiese podido lograr. A todas aquellas personas que me incentivaron a seguir y confiaron en mí, sus ánimos fueron motivo de seguir y no dejar esto atrás.

Con mucho amor,

[Dennis Gustavo Barzola Rivera]

Con todo el amor del mundo y mi más sincera gratitud, este proyecto se lo dedico a mis padres, Nelly Elizabeth Vadillo Rosas y Miguel Angel Fretel Berrospi, quienes son los pilares de mi vida y la luz que ha iluminado mi camino. Su apoyo incondicional, consejos y su ejemplo de perseverancia han sido primordial en cada paso he dado. Este logro no es solo mío, sino, también, es el de ustedes pues cada éxito que tengo en mi vida refleja su amor y dedicación conmigo. ¡Gracias por ser mis padres!

Con todo cariño,

[Nayely Brighit Fretel Vadillo]

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	xi
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1. Problema General	2
1.1.2. Problemas Específicos	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación e importancia	3
1.3.1. Social	3
1.3.2. Ambiental	3
1.3.3. Teórica	4
1.3.4. Metodológica	4
1.3.5. Tecnológica	4
1.3.6. Económica	4
1.4. Delimitación del proyecto	5
1.5. Hipótesis y descripción de variables	5
1.5.1. Hipótesis general	5
1.5.2. Hipótesis específicas	5
1.5.3. Operacionalización de variables	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.1.1. Antecedentes Internacionales	7
2.1.2. Antecedentes Nacionales	11
2.2. Bases teóricas	15
2.2.1. Glaciares	15
2.2.2. Tipos de glaciares	15
2.2.2.1. Inlandsis	15
2.2.2.2. Sabanas de hielo	15
	iii

2.2.2.3.	Glaciares de montaña	15
2.2.3.	Los glaciares y su importancia	16
2.2.4.	Parámetros morfométricos	16
2.2.5.	Cambio climático	17
2.2.6.	Impactos del cambio climático en los glaciares	18
2.2.7.	Retroceso glaciar	18
2.2.8.	Sistemas de Información Geográfica (SIG)	19
2.2.9.	Teledetección	19
2.2.9.1.	Plataformas y sensores	19
2.2.9.2.	Imágenes satelitales	20
2.2.9.3.	Imágenes LANDSAT	20
2.2.9.4.	Diferencias y semejanzas con el Landsat 8	23
2.2.10.	Análisis multitemporal del retroceso glaciar	23
2.2.11.	Normalized Difference Snow Index (NDSI)	24
2.2.12.	Combinación de bandas	25
2.2.13.	Variabilidad climática	25
2.2.13.1.	Variabilidad Intraestacional	25
2.2.13.2.	Variabilidad Interanual	26
2.2.13.3.	Variabilidad Interdecadal	26
2.2.14.	Aplicaciones de SIG en entornos glaciares	26
2.3.	Definición de términos básicos	26
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		29
3.1.	Métodos y alcance de la investigación	29
3.1.1.	Método	29
3.1.2.	Alcance o nivel	29
3.2.	Diseño de la investigación	29
3.3.	Población y muestra	29
3.3.1.	Población	29
3.3.2.	Muestra	29
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	30
3.4.1.	Técnicas de recolección de datos	30
3.4.2.	Instrumentos	30
3.5.	Procedimientos	30
3.5.1.	Evaluar el cambio de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023.	34
3.5.2.	Analizar las variaciones en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023.	38
3.5.3.	Datos climáticos de precipitación y temperatura.	39

3.6.	Análisis de datos	40
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		43
4.1.	Presentación de resultados	43
4.1.1.	Cambio de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023.	43
4.1.2.	Análisis de las variaciones en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993 al 2023.	45
4.1.3.	Identificar la relación que existe entre la temperatura y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023.	46
4.1.4.	Identificar la relación que existe entre la precipitación y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023.	47
4.2.	Discusión de resultados	48
CONCLUSIONES		52
RECOMENDACIONES		53
REFERENCIAS		54
ANEXOS		62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variable.	6
Tabla 2. Características del sensor Thematic Mapper (TM) del Landsat 5.	21
Tabla 3. Características del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) del Landsat 7.22	
Tabla 4. Características de los sensores del Landsat 8.	22
Tabla 5. Características de las imágenes Landsat obtenidas.....	32
Tabla 6. Ecuación de cobertura glaciar.	35
Tabla 7. Combinaciones en color natural de las imágenes Landsat.....	37
Tabla 8. Combinación tierra / agua de las imágenes Landsat.....	37
Tabla 9. Prueba de Mann-Kendall para comparar el cambio de cobertura glaciar	44
Tabla 10. Prueba de Mann-Kendall para comparar el cambio del volumen glaciar	46
Tabla 11. Test de Shapiro-Wilk para Temperatura y Área glaciar.	46
Tabla 12. Prueba de correlación de Pearson para temperatura media y área glaciar.	47
Tabla 13. Test de Shapiro-Wilk para Precipitación acumulada y Área glaciar.	47
Tabla 14. Prueba de relación lineal y correlación de Pearson para precipitación acumulada y área glaciar.....	48
Tabla 15. Área de cobertura glaciar calculado por teledetección.	62
Tabla 16. Cambio relativo entre años consecutivos de la cobertura glaciar.	62
Tabla 17. Volumen glaciar del nevado Huaytapallana calculado por teledetección.....	63
Tabla 18. Cambios absolutos de volumen glaciar para cada año.....	63
Tabla 19. Matriz de consistencia.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formación de los glaciares. Fuente. (42).....	16
Figura 2. Proceso del cambio climático. Fuente. (46)	18
Figura 3. Mapa de ubicación del nevado Huaytapallana.	31
Figura 4. Cálculo del NDSI, año 2023.....	35
Figura 5. Reclasificación del NDSI, año 2023.....	36
Figura 6. Conversión de raster a polígono, año 2023.	36
Figura 7. Resultado de la composición de bandas, año 1993.....	38
Figura 8. Resultado de la composición de bandas (color natural) y el refinado pancromático, año 2023.....	38
Figura 9. Climograma de Walter-lieth	40
Figura 10. Cambio multitemporal de la cobertura glaciar	43
Figura 11. Gráfico de serie de tiempo de volumen glaciar y cambios puntuales.....	45
Figura 12. Serie de tiempo de la precipitación acumulada y las temperaturas desde 1993 hasta el año 2023 de la estación meteorológica Santa Ana del SENAMHI.....	64
Figura 13. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 1993.	67
Figura 14. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 1995.	68
Figura 15. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 1997.	69
Figura 16. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 1999.	70
Figura 17. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2001.	71
Figura 18. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2003.	72
Figura 19. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2005.	73
Figura 20. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2007.	74
Figura 21. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2009.	75
Figura 22. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2011.	76
Figura 23. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2013.	77
Figura 24. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2015.	78
Figura 25. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2017.	79
Figura 26. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2019.	80
Figura 27. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2021.	81
Figura 28. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2023.	82
Figura 29. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 1993.	83
Figura 30. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 1995.	84
Figura 31. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 1997.	85
Figura 32. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 1999.	86
Figura 33. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2001.	87

Figura 34. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2003.	88
Figura 35. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2005.	89
Figura 36. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2007.	90
Figura 37. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2009.	91
Figura 38. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2011.	92
Figura 39. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2013.	93
Figura 40. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2015.	94
Figura 41. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2017.	95
Figura 42. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2019.	96
Figura 43. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2021.	97
Figura 44. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2023.	98

RESUMEN

El presente proyecto fue desarrollado en el nevado Huaytapallana, ubicado políticamente entre las provincias de Huancayo y Concepción, en la región Junín; con el objetivo de evaluar la relación que existe entre la dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y la variabilidad climática desde 1993-2023, la investigación utilizó el método tipo aplicado, el nivel investigativo será correlacional. La metodología empleada se basó en teledetección y uso de SIG, empleando la técnica del Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) para poder calcular el área glaciar del nevado; segundo, la aplicación de la teoría de Bahr para el cálculo de volumen y, por último, el uso de la imputación de datos para completar los valores faltantes de la data de temperatura y precipitación proporcionada por el SENAMHI. El resultado del área fue de 13.32 km² para el año 2023, y de 22.80 km² para el año 1993, presentado una reducción de - 41.58% en un tiempo de 30 años; para el estudio del volumen, arrojó un resultado de 1.689 km³ para el año 2023 y de 3.535 km³ para el año 1993. Asimismo, se encontró una relación significativa entre la temperatura media y el retroceso glaciar; mientras que para la precipitación no hubo evidencia estadística significativa para afirmar la relación con el área glaciar; sin embargo, la prueba de correlación de Pearson sugiere una correlación negativa moderada. Se concluye que, según evidencia científica que hay, una tendencia significativa en el retroceso glaciar del nevado Huaytapallana, así también, las variables climáticas influyen en su reducción.

Palabras claves: variabilidad climática, teledetección, NDSI, temperatura, precipitación.

ABSTRACT

The present project was developed in the Huaytapallana snow-capped mountain, located politically between the provinces of Huancayo and Concepción, in the Junín region; with the objective of evaluating the relationship that exists between the glacial dynamics of the Huaytapallana snow-capped mountain and the climatic variability from 1993-2023. The research used the applied type of method, the research level will be correlational. The methodology used was based on remote sensing and the use of GIS, using the Normalized Differential Snow Index (NDSI) technique to calculate the glacier area of the snow-capped mountain; secondly, the application of Bahr's theory to calculate the volume and finally the use of data imputation to complete the missing values of temperature and precipitation data provided by SENAMHI. The result for the area was 13.32 km² for the year 2023, and 22.80 km² for the year 1993, showing a reduction of -41.58% in 30 years; for the volume study, the result was 1.689 km³ for the year 2023 and 3.535 km³ for the year 1993. Likewise, a significant relationship was found between mean temperature and glacial retreat; while for precipitation there was no significant statistical evidence to affirm the relationship with glacier area, however, Pearson's correlation test suggests a moderate negative correlation. It is concluded that, according to scientific evidence, there is a significant trend in the glacial retreat of Huaytapallana; also, climatic variables influence its reduction.

Key words: climate variability, remote sensing, NDI, temperature, precipitation.

INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más influenciado por el cambio climático, los glaciares actúan como indicadores sensibles de estos cambios que están teniendo lugar en nuestro planeta. La comprensión de los procesos que ocurren en los glaciares se ha vuelto crucial, particularmente en zonas montañosas, donde se utiliza el agua dulce proveniente de estos, para la generación de energía eléctrica, desarrollo de la agricultura, silvicultura y suministro de agua potable (1). Dentro de este contexto, el derretimiento de los glaciares implica una reducción en la fuente principal de riego para la agricultura, ya que suministra agua dulce, energía y alimento; sin embargo, es posible que en las próximas décadas estos activos sean escasos, especialmente en zonas frías y áridas (2).

El nevado Huaytapallana, ubicado en la Cordillera Central de los Andes Peruanos, zona que actualmente es un Área de Conservación Regional en el departamento de Junín, ha presentado una rápida pérdida de su extensión glaciar que, de acuerdo con otros investigadores, este proceso es irreversible y forma parte de muchos otros casos que existen en el Perú.

La presente investigación permite relacionar la dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y la variabilidad climática, centrándose en la influencia que ejerce la temperatura y la precipitación durante el periodo de 1993 hasta el 2023. El interés de este trabajo viene dado por la generación de conocimiento que permita a las autoridades tomar decisiones efectivas para la conservación de este reservorio de agua dulce, así como la concientización de la población sobre el cuidado de este ecosistema tan valioso para el desarrollo de generaciones futuras. Además, se explora el potencial de incorporar tecnología de teledetección, imágenes satelitales y programas actualizados que permitan el procesamiento de estos datos (ArcGIS Pro 3.1. y ArcGIS 10.8), para el análisis de las variaciones del retroceso glaciar y como influyen los factores climáticos.

El desarrollo de la investigación está diseñado en cinco capítulos que aborda de manera sistemática el tema, en donde el primero de ellos se refiere al planteamiento del estudio, donde se describe la realidad problemática y se enfatiza en los problemas de estudio, así como los objetivos de investigación; por lo lado, se indica la justificación e importancia. También, se plantea la delimitación de toda la investigación en materia social, ambiental, teórica, metodológica, tecnológica y económica, así como las hipótesis y variables.

En el capítulo II, se desarrolla el marco teórico, donde se precisa los antecedentes del problema planteado en el capítulo anterior. También, las bases teóricas o científicas reafirman la tesis del estudio, así como la definición de términos básicos para evitar ambigüedades conceptuales y aclarar términos técnicos propios del área de investigación.

En el capítulo III, se desarrolla la metodología de la investigación, determinando el enfoque, tipo, nivel, métodos, diseño, población y muestra de la investigación, así como la descripción de las técnicas e instrumentos de recolección de datos, llegando a desarrollar el plan de análisis de datos considerando en todo momento la ética en la investigación.

En el capítulo IV, se toma en cuenta los resultados y discusión del estudio, mientras que, en el capítulo V, se toma en cuenta las conclusiones y recomendaciones del informe. Finalmente, se enlistan todas las fuentes de información y adjuntan anexos del desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Se prevé que el cambio global y el aumento de la temperatura provoquen importantes cambios ambientales en las regiones montañosas, incluidos cambios importantes a lo largo de los glaciares, así como la capa de hielo y nieve, mayormente, para reducir la cantidad de agua que se escurre durante el verano y alterando los recursos hídricos. Esto podría tener un impacto en la generación de energía hidroeléctrica, la agricultura, la silvicultura, el turismo y los ecosistemas acuáticos (1).

Dentro del ámbito de las regiones montañosas, el derretimiento de la nieve implica la principal fuente crítica de regadío para la agricultura, ya que proporcionan agua dulce, energía y alimento; no obstante, estos activos serán progresivamente escasos en las próximas décadas, particularmente, en las zonas áridas y frías (2). Los glaciares de las montañas de América del Norte comenzaron a retroceder después de que terminó la Pequeña Edad de Hielo a principios del siglo XIX, a partir de ello, se ha experimentado un clima cálido en las últimas décadas, con cambios en los regímenes de precipitación y una disminución de la capa de nieve (3).

Además, se evidenció que el 71 % de los glaciares del mundo con 3 044 mantos de hielo situados sobre una región evaluada de 1 958 km², cada una está ubicada en las alturas de la cordillera de los Andes, cuyo deshielo crea casi el 98% de los recursos de agua que fluyen hacia la vertiente atlántica y menos del 2 % hacia la vertiente del Pacífico (4). Asimismo, la tasa mundial de pérdida de hielo ha aumentado hasta 57 % a partir de 1990, de 0,8 a 1,2 mil millones de toneladas por año. Por lo tanto, entre el período de 1994 y 2017, la disolución de 28 mil millones de toneladas de hielo condujo a que el nivel del océano aumentara en 34,6 mm (5).

El Inventario Nacional de Glaciares del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) destaca una disminución del 48 % del área con cobertura glaciar de 1962 a 2017. Asimismo, las mediciones del balance de masa en glaciares individuales muestran que la topografía es un control clave de la pérdida de hielo. Con base en ello, se estima que los glaciares con una elevación máxima por debajo de los 5400 metros sobre el nivel del mar pierden masa a una tasa (-1,2 m w.e/año) el doble de la de los glaciares con una elevación superior a 5400 metros sobre el nivel del mar (-1,2 m w.e/año) (6).

Por otro lado, los glaciares son considerados como reservas sólidas de agua dulce en el Perú que, luego del proceso de desglaciación, son empleados para la demanda humana de consumo y para operaciones productivas, tales como la agroindustria, producción de energía eléctrica, la minería, entre otros, en cualquier caso el 22% de la superficie de masa helada se ha extraviado dentro de los 35 últimos años (4). Incluso, los que tienen extensiones reducidas son los más

impactados, lo que se agrava aún más dado que el 86 % de los glaciares en Perú tienen una superficie menor a 1 km² (7).

Esta situación demuestra una tendencia que a medida que aumenten las temperaturas planetarias, la mayoría de las capas de hielo peruanas serán extinguidas. Asimismo, los impactos integrados del cambio climático en los caudales de montaña son complejos y, a veces, los cambios en los procesos hidrológicos pueden tener efectos compensatorios en la generación de caudales en un clima cambiante, por ejemplo, una reducción en una contribución se compensa con un aumento en otra contribución (3).

La rápida pérdida de hielo en el Nevado del Huaytapallana, una zona que actualmente es un Área de Conservación Regional en Junín se ha convertido en uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI a raíz del cambio climático ocasionado por las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente generados por la actividad humana. Específicamente, los picos glaciares situados por encima de los 4,000 metros sobre el nivel del mar experimentan temperaturas anormalmente altas, lo que resulta en un aumento del volumen de cuerpos de agua que se desprenden hacia los ríos, seguido de una drástica disminución en el volumen debido a la pérdida durante su recorrido. Esto afecta de manera significativa a las actividades socioeconómicas que dependen de este recurso, como la agricultura, la generación de energía hidroeléctrica y el consumo humano en el valle del Mantaro (8).

En este sentido, los impactos del cambio climático y el cambio de los glaciares en la hidrología deben diagnosticarse por separado y en conjunto. Por otro lado, las mediciones meteorológicas son escasas y principalmente en los valles rurales, lo que introduce una subestimación en las interpolaciones de precipitación en toda la cuenca (9). Por lo tanto, las proyecciones de escorrentía futura en una cuenca glaciar tienen incertidumbres significativas debido al proceso de modelado y la evolución incierta del clima y el retroceso de los glaciares (1).

1.1.1. Problema General

- ¿Qué relación existe entre la dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y la variabilidad climática desde 1993-2023?

1.1.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el cambio de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023?
- ¿Cuál es la variación en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023?
- ¿Cuál la relación que existe entre la temperatura y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023?

- ¿Cuál es la relación que existe entre la precipitación y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Evaluar la relación que existe entre la dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y la variabilidad climática desde 1993-2023

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar el cambio de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023
- Analizar las variaciones en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023
- Identificar la relación que existe entre la temperatura y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023
- Identificar la relación que existe entre la precipitación y el retroceso del nevado Huaytapallana durante periodo 1993-2023

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Social

La reducción de los glaciares afecta directamente a la disponibilidad de agua dulce, importante para el consumo humano, riego de cultivos agrícolas, entre otras actividades. La relación entre las variables climáticas (temperatura y precipitación) y el retroceso del nevado Huaytapallana proporciona información elemental para tomar decisiones acertadas como base para planificación de las estrategias enfocadas a la reducción de los riesgos e impactos negativos del cambio climático en la sociedad, así como en la disponibilidad y seguridad del agua para la población evitando de esta manera potenciales conflictos sociales debido a la escasez hídrica en el futuro (10).

1.3.2. Ambiental

La sensibilidad y vulnerabilidad de las regiones de gran altitud a los efectos de un clima cambiante las convierte en sitios ideales a largo plazo para monitorear el cambio climático (11). Este estudio busca comprender el impacto del cambio climático en el nevado Huaytapallana, a través del tiempo; entender estos cambios es vital para proteger los ecosistemas de montaña, asegurar el acceso al agua, establecer estrategias que nos permita adaptarnos al clima cambiante y prevenir eventos extremos tales como deslizamientos de tierra o inundaciones. Asimismo,

servirá como línea base para la formulación de estrategias de conservación que mitiguen los impactos ambientales.

1.3.3. Teórica

Esta investigación se apoya en la generación de información actualizada y valiosa para la comunidad científica y estudiantil. Entender mejor la relación entre las variables climáticas y la dinámica glaciaria del nevado Huaytapallana no solo permitirá diferenciar los cambios pasados y los presentes, sino realizar pronósticos sobre su comportamiento futuro teniendo en cuenta el comportamiento frente al cambio climático. Esta comprensión es fundamental para la toma de decisiones frente a la gestión y conservación de los recursos hídricos, además de la adaptación al cambio climático en las comunidades cercanas.

1.3.4. Metodológica

Dadas las tasas contemporáneas de recesión, existe una creciente preocupación de que muchas áreas cubiertas por glaciares en el Perú puedan estar libres de hielo para fines de siglo, sin embargo, las mediciones sólidas del cambio de los glaciares aún son escasas. Por lo tanto, esta investigación se justifica metodológicamente en la necesidad de realizar estudios precisos que combinen múltiples datos para evaluar la dinámica de los glaciares con alta resolución espacial y temporal, cuyos resultados pueden ser invaluable para las partes interesadas y los planificadores que trabajan para contrarrestar los efectos del cambio climático (6).

1.3.5. Tecnológica

En este estudio, se explora el potencial de integrar tecnología de teledetección, imágenes satelitales, así como la recopilación y análisis de datos para evaluar las variaciones del retroceso glaciario y su relación con los factores climáticos como la temperatura y la precipitación. Además, es importante que se evalúen las características de los glaciares para comprender las causas de la variación de su área y el potencial de desbordamientos a causa de la desglaciación, así como para ayudar al gobierno a minimizar los riesgos de inundaciones repentinas de lagos glaciares y salvaguardar la disponibilidad hídrica (12).

1.3.6. Económica

El retiro de la capa de hielo influirá en el salario financiero de guías, pequeños comerciantes, posadas, restaurantes, transportistas y organizaciones de viajeros, por lo tanto, es necesario la evaluación del retroceso glaciario para el planteamiento de estrategias que permitan desarrollar un Turismo Sostenible en el nevado de Huaytapallana (13). Por otro lado, los servicios hidrológicos reducirán su volumen de oferta en los grupos altoandinos, especialmente en los

lugares poblados donde este cambio será a condiciones climáticas más secas. Asimismo, las familias rurales en condiciones precarias, como es el caso de los pequeños agricultores, presentan una capacidad limitada para enfrentar la reducción del rendimiento agrícola por lo que podrían caer en pobreza extrema o quedarse sin recursos para afrontar la situación (14).

1.4. Delimitación del proyecto

El sitio de estudio se encuentra definido por el Nevado Huaytapallana que pertenece a la cordillera del mismo nombre, la cual por su morfología se caracteriza como un marco de mantas de hielo que no tiene una enorme cuenca de alimentación, en su lugar, presenta pequeñas masas en todos sus frentes, sus divisores son escarpados y muy empinados. Asimismo, contribuye a la administración del agua de los ríos Shullcas, Pariahuanca, Achamayo (drenaje de sus aguas hacia el río Mantaro) y Tulumayo (drena hacia el río Perené) (15) (4).

El nevado Huaytapallana se encuentra a una altitud promedio de 5557 m s.n.m. y limita entre dos provincias que son Huancayo y Concepción perteneciente a la región Junín - Perú; el proyecto se realiza a base de percepción remota (Método técnico de teledetección con imágenes satelitales), por lo que no será necesario delimitaciones, muestreos, monitoreos, entre otros, que requiera necesariamente la presencialidad del especialista en el sitio de ejecución de la investigación. Asimismo, el análisis de datos se realiza entre los periodos de 1993 hasta el 2023 con un lapso de 2 años entre cada evaluación. También, es imprescindible mencionar que las imágenes satelitales a estudiar serán obtenidas respecto a los meses secos del lugar de estudio previa evaluación, que analiza, además, la no presencia de nubosidad para evitar dificultades o anomalías en su procesamiento y obtención de resultados.

1.5. Hipótesis y descripción de variables

1.5.1. Hipótesis general

- Existe relación significativa entre la dinámica glaciaria del nevado Huaytapallana y la variabilidad climática durante los años de 1993 al 2023.

1.5.2. Hipótesis específicas

- Existe una tendencia significativa en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huaytapallana durante los años de 1993 al 2023.
- Existe una tendencia significativa en las variaciones del volumen glaciario del nevado Huaytapallana durante los años de 1993 al 2023.
- Existe relación significativa entre la temperatura y la disminución del área de cobertura glaciaria del nevado Huaytapallana durante los años de 1993 al 2023.

- Existe relación significativa entre la precipitación y la disminución del área de cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante los años de 1993 al 2023.

1.5.3. Operacionalización de variables

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variable.

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Instrumentos
Variable independiente: Variabilidad climática	Variación en los elementos climáticos como la temperatura y precipitación en escalas temporales que pueden ir desde unos pocos años hasta millones de años (16).	Temperatura	Máxima	°C	Estimación de cálculos
			Mínima	°C	
			Media	°C	
		Precipitación	Mensual	mm	
Variable dependiente: Dinámica glaciar	Evolución y cambio en el área y volumen de los glaciares a lo largo del tiempo, influenciados por factores externos (17).	Cobertura glaciar	Área glaciar	Km ²	Imágenes satelitales Landsat
		Volumen glaciar	espesor	Km ³	

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

En Ecuador, Cabrera y Vega (18), en su tesis, tuvieron como objetivo “Analizar el retroceso de un glaciar en los Andes del norte del Ecuador durante un periodo de 30 años empleando teledetección”. En cuanto a la estructura metodológica, fue de tipo descriptivo, de enfoque cuantitativo, se utilizó el software ArcGIS como herramienta para el mapeo y razonamiento espacial, la población estuvo conformada por la información durante el tiempo longitudinal que son 30 años. Las pruebas estadísticas que utilizaron fueron: Correlación de Pearson, Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks, Prueba de Mann Kendall y la regresión cuadrática. Como hallazgos, obtuvieron que existe un retroceso glaciar del nevado Cayambe; durante 1991, tuvo una superficie de 19.31 Km^2 , durante 1999, se disminuyó a 17.14 Km^2 y en el 2017 la superficie glaciar fue 13.50 Km^2 . Además, demostraron que la temperatura media anual y la precipitación acumulada anual presentan una correlación inversa con la superficie glaciar a razón de $0.008 \text{ }^\circ\text{C}$ y -0.43 mm , respectivamente. En conclusión, se ha perdido gran parte de la superficie glaciar del nevado Cayambe, por lo que es importante realizar constantes mediciones de la superficie glaciar para seguir teniendo información de su evolución al pasar del tiempo.

En Ecuador, Gallegos y Brito (19), en su artículo, se propusieron como objetivo “determinar la variación de la cobertura glaciar del nevado Cayambe (Ecuador), para el periodo 1978-2009 mediante dos fuentes de información complementarias”, en cuanto a la estructura metodológica utilizaron imágenes satelitales y fotografías aéreas; para el análisis de las fotografías aéreas se seleccionaron fotogramas de los años 1978 y 1999, mientras que para el procesamiento de las imágenes satelitales solo seis contaron con la calidad adecuada para su análisis. Utilizaron los programas ArcGIS 10.0 y ENVI para el estudio de las fotografías aéreas e imágenes de satélite. Como resultados, obtuvieron que existe un retroceso glaciar del 25.53 % según el procesamiento de las fotografías aéreas para el periodo de 1978 a 1999 y del 25.58 % sobre las imágenes de satélite desde 1978 al 2009; aunque existe diferencia de diez años entre las imágenes, ambos valores presentan una tendencia de reducción con una tasa de 1.21% y 0.176%, respectivamente. En conclusión, la combinación de fotografías aéreas e imágenes de satélite constituyen una fuente de información relevante en estudios de retroceso glaciar.

En la India, Ahmad et al. (20), en su artículo, tuvieron como objetivo “evaluar la dinámica a corto plazo de los glaciares en la cuenca del río Sid, dentro de la cuenca del río Jhelum en el noreste del Himalaya”. Utilizaron imágenes satelitales del Landsat-5, Sentinel-2, datos de IRS LISS IV que es un sensor de los satélites indios. Además, realizaron observaciones en campo.

Obtuvieron que la superficie glaciar de la cuenca del Sid se redujo de 56.73 km² para el año de 1990 a 43.94 km² para el 2018, experimentando una pérdida de 22.5% en un periodo de 28 años; además, han podido evidenciar que los glaciares que se encuentran en una elevación baja (3800-4200 msnm) son más susceptibles a experimentar la reducción de su extensión glaciar. Por otro lado, para el análisis de tendencias de los factores climáticos como temperatura y precipitación, utilizaron la prueba de Mann-Kendall, y mostraron una tendencia positiva significativa para la temperatura anual y estacional, mientras que para las precipitaciones (anual y estacional) mostraron una tendencia negativa. Por lo tanto, la reducción glaciar de la región se le atribuye a la disminución de las precipitaciones durante los meses de invierno, que abarcan desde noviembre a marzo, y al aumento de las temperaturas medias anuales. Si las condiciones de aumento de temperatura continúan, no solo reducirá significativamente los glaciares, también, afectará el sistema hidrológico.

En la India, Sahu y Gupta (21), en su artículo, su objetivo principal fue “Llevar a cabo la cartografía de glaciares y su análisis de cambio en la cuenca de Chandra, Himalaya occidental, india durante 1971-2016 utilizando datos de satélites”. Utilizaron imágenes del satélite Landsat, Corona KH-4B y Sentinel-2, además de datos meteorológicos del APHRODITE de acuerdo con la disponibilidad. Realizaron un inventario con 395 glaciares con un tamaño mínimo de >0.02 km² que cubren un área de 703.3 +/- 20.4 km², utilizando un subconjunto de 169 glaciares para el análisis de cambios en la cuenca de Chandra. Obtuvieron que existe una pérdida significativa de área glaciar, para el año 1971 se tenía 639.4 +/- 5.8 km², mientras que para el 2016 la superficie disminuyó a 608.1 +/- 10.3 km². Además del análisis específico de retroceso de cinco glaciares, determinaron que la tasa de retroceso es mayor cuando se tiene un lago proglacial en un extremo en comparación con otros glaciares. También, analizaron variables climáticas como temperatura y precipitación y no climáticas (tamaño, pendiente, altitud, cobertura, entre otros), demostrando que ambas regulan el retroceso glaciar. Para el análisis de tendencias de factores climáticos, utilizaron el método de Mann Kendall y la prueba del estimador de pendiente de Sen; los resultados indicaron que la temperatura media anual presenta una tasa de incremento de 0.02 °C para el periodo de 1961 al 2015, lo que sugiere que el incremento de temperatura puede ser uno de los factores de la disminución de glaciares. Con relación a las precipitaciones, se hallaron tendencias decrecientes, lo que indica una disminución gradual en el transcurso del tiempo.

En Polonia Lupikasza et al. (22), en su artículo, tuvieron como objetivo analizar la importancia de la lluvia invernal en la dinámica de los glaciares, su balance de masa y la estructura del manto de la nieve, utilizando como punto de referencia al glaciar Hansbreen en Svalbard durante el periodo 2009-2016. En cuanto a la metodología, se utilizaron datos de una estación meteorológica en Hornsund, además de datos glaciológicos y meteorológicos de tres puntos de

medición en Hansbreen. También, se utilizaron técnicas estadísticas para analizar las tendencias en la climatología y precipitación en la región de Hornsund. Los hallazgos revelan un aumento en la frecuencia de las lluvias invernales, impactando el equilibrio de masa y la dinámica glacial. Sin embargo, la manera en que estos responden varía dependiendo de la cantidad de nieve acumulada y el desarrollo de los sistemas de drenaje. Al inicio del invierno, debido a una capa de nieve inicial bastante delgada y un sistema de drenaje poco eficiente, las lluvias aceleraron la velocidad del glaciar. Por otro lado, cuando las lluvias caen sobre una cobertura de nieve bien establecida, se almacenan eficazmente en el glaciar, contribuyendo a la acumulación invernal. Estos hallazgos muestran la complejidad de las interacciones entre las lluvias invernales y la dinámica glacial.

En Colombia, Monterroso et al. (23), en su artículo, tuvieron como objetivo “determinar los cambios en el área de la superficie glacial que han sufrido los volcanes Nevado del Ruiz, Tolima y Santa Isabel entre 2010 y 2015, mediante el uso y procesamiento de imágenes satelitales y la técnica DinSAR”. Para el mapeo de cobertura nival, se utilizaron Índices Espectrales (IE) que diferencian la cobertura de nieve con otras coberturas, considerando que los valores de los IE sobre 0.4 son áreas glaciares. Los resultados demuestran que existe una reducción de la superficie glacial en los nevados de estudio, el volcán nevado Ruiz presenta una desglaciación del 24%, el nevado Tolima un 42% y el nevado Santa Isabel un 60%. En conclusión, la disminución de la superficie glacial es un indicador del cambio de las condiciones climáticas que amenazan la calidad de vida de las personas que habitan en la zona. Asimismo, se pronostica que si las condiciones persisten es probable que en 30 o 40 años los glaciares colombianos desaparezcan.

En China, Kononova et al. (24), en su artículo, tuvieron como propósito explorar la relación existente entre precipitación estival y los patrones de circulación atmosférica en el glaciar Tuyuksu a partir de datos disponibles de estaciones de la región. La precipitación se midió de forma manual en el estudio. Las formas de precipitación sólida, líquida y mezcla sólido-líquido fueron identificados in situ; la cantidad de precipitación sólida y líquida se midió por separado con el método del peso. Según el estudio, se concluye que los patrones de movimiento del aire influyen en la cantidad de lluvia o nieve que cae. Además, se hallaron que la cantidad y el tipo de precipitación tienen un impacto significativo en los glaciares de montaña; la precipitación líquida tiene efectos negativos sobre la acumulación de glaciares y puede aumentar la ablación del hielo superficial a través de la entrada de calor asociado a la lluvia, lo que conduce a la pérdida de masa glacial.

En Chile, Jara y Casassa (25), en su artículo, tuvieron como objetivo principal “determinar entre los años 1955 al 2021, los cambios que han experimentado el sistema glacial San Francisco en

torno a su área y a partir de ello definir las variaciones de sus volúmenes”. Para llevar a cabo la estimación del área glaciar, utilizaron fotografías aéreas, imágenes Landsat y Sentinel-2, a las cuales se le realizaron las correcciones correspondientes. Además, se empleó la combinación de bandas. Se utilizaron cinco fórmulas ampliamente conocidas para calcular el volumen de los glaciares, donde se observó una disminución significativa en el volumen de todo el sistema glaciar estudiado al aplicar estas fórmulas. La evidencia de esta disminución se respalda con el análisis estadístico de tendencia Mann-Kendall, en cada ecuación usada para estimar el volumen en función de la superficie glaciar. En conclusión, la disminución del área se encuentra estrechamente relacionada con la reducción de volumen del sistema San Francisco.

En Chile, Mardones et al. (26), en su artículo, tuvieron como propósito determinar la relación que existe entre los cambios de los glaciares del campo de hielo norte y las variaciones climáticas de cada década; esto por medio de bibliografías, interpretaciones de documentos de cartografía, imágenes de satélites y levantamientos in situ. Las variaciones del clima por década se abstraen de las estaciones meteorológicas. El análisis de estos glaciares constata un retroceso de forma continua. Aquel retroceso está siendo controlado por medio de parámetros climáticos. Se conocen 3 etapas: 1) hasta el año 1937 hay un incremento de la temperatura media anual, la estación de verano se mantiene fresco e inviernos pluviosos, aquello mantiene el balance glaciar; 2) entre los años 1938-1972 hay considerables cambios en la temperatura media anual, en la primera década hay un incremento de la temperatura de verano y una disminución de precipitaciones en invierno, la cual genera una ablación glaciar y una reducción de volumen de hielo; 3) desde el año 1972 se presenta una disminución de precipitaciones de manera sostenida, y desde 1985 hay un incremento de temperatura media de invierno y verano. A la vez, el ritmo de retroceso glaciar se aligera desde la década de 1980 finalizando con un colapso en los glaciares en los 1990s; aquel colapso de los glaciares se relacionará con el incremento de temperaturas y con el invierno en temas de intensidad de lluvias de verano.

En Chile, Fernández (27) en su tesis, tuvo como objetivo analizar el cambio del área glaciar Grey empleando técnicas como la dendrocronología y variables tales como la temperatura y precipitación, así como relacionar estas dos variables con los cambios del área glaciar mencionada. Para poder determinar si hay o no una relación entre el cambio de área glaciar y las variables climáticas, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson. Se llevaron a cabo cálculos de correlación utilizando variables como la precipitación media mensual y las temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales, los resultados mostraron que la variación del área glaciar estaba mejor relacionada con una de estas variables que es el área. También, las tasas de retroceso glaciar fueron la temperatura máxima y las precipitaciones. Según los resultados obtenidos, las temperaturas máximas y el área glaciar tuvieron una correlación de -0.66; por otro lado, la precipitación y la superficie glaciar tienen una correlación de -0.64. De

acuerdo con esos resultados, determinaron que hay una asociación entre el retroceso glaciar en este caso Grey con la variación de la precipitación y temperatura. De esto se puede deducir que a medida que las temperaturas y precipitaciones se incrementan el área glaciar se reduce o disminuye.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En Cusco, Aedo y Quispe (28) tuvieron como objetivo identificar la evolución del retroceso glaciar y realizar una predicción temporal utilizando el análisis multitemporal en el nevado Chicón durante el periodo 1985-2021 empleando imágenes satelitales Landsat, procesadas mediante el uso de herramientas SIG. La metodología utilizada tuvo un enfoque cuantitativo, de diseño no experimental longitudinal y de tipo aplicada. Los resultados evidenciaron una disminución constante en la extensión de la cobertura glaciar. En 1985, el glaciar ocupada una superficie de 9.14 km², y aunque se han evidenciado fluctuaciones en el área a lo largo del tiempo, no se ha recuperado la magnitud inicial como por ejemplo en el año 2001 el área habría disminuido a 7.01 km², siendo el año con el pico más alto en comparación con los demás años de estudio. Asimismo, para el año 2021, el área habría disminuido a 1.34 km², siguiendo una tendencia negativa y según la estimación de los autores el nevado Chicón podría desaparecer completamente en el 2031. En conclusión, se observaron oscilaciones en el aumento como en la reducción del área glaciar, lo que sugiere que esto puede estar relacionado con las variables meteorológicas.

En Apurímac, Serrano (29) tuvo como objetivo evaluar el impacto del cambio climático en el retroceso glaciar de la subcuenca de Sahuanay para fines de administración de agua durante el periodo 2007-2017, para lo cual se aplicó una estrategia de nivel descriptivo y un diseño no experimental para estudiar una población y una muestra que representaba el área total del glaciar en análisis; de igual forma, para recopilar los datos, se empleó un instrumento de investigación llamado ficha de recolección de datos. En cuanto a la metodología, se descargó imágenes satelitales del USGS y modelos de elevación digital (DEM) para realizar la orto rectificación. Asimismo, se utilizó el índice espectral Índice Normalizado de Diferenciación de Nieve (NDSI) para determinar la cobertura glaciar, para las variables meteorológicas se realizó la interpolación con isoyetas e isotermas. Los resultados del estudio demostraron que los parámetros de temperatura, precipitación y humedad relativa ejercen una influencia significativa en el comportamiento del glaciar Ampay. Durante los últimos 10 años, este glaciar ha perdido aproximadamente 0.48 km² de masa glaciar, aunque se observa una tendencia a recuperarse en ciertos periodos. En conclusión, la tasa más notable de desglaciación de la capa de hielo ocurre en temporadas de ablación donde las temperaturas son más altas, con

precipitación escasa y bajo porcentaje de humedad relativa. Asimismo, se concluyó que la permanencia del nevado Ampay depende de la variación de las variables meteorológicas.

En Lima, Alva y Ramos (30) tuvieron como objetivo determinar la dinámica glaciar de los nevados de la cuenca del río cañete durante el periodo 1990-2015 mediante el uso de herramientas SIG. Mediante una serie histórica de imágenes Landsat, descargado del servidor ESDI, se aplicaron índices espectrales como el NDSI y se determinó de la cobertura de nieve. Por otro lado, para determinar el volumen glaciar, se siguió la metodología propuesta por Bahr en 1997. Entre los resultados, se estimó que los nevados han perdido más del 30% de su área glaciar, mientras que para el volumen se observó una disminución significativa, puesto que en 1990 se superaba los 15 km³ y ha ido disminuyendo progresivamente registrándose para el 2015 9.22 km³, lo que representa un 39.3% de reducción. En conclusión, el retroceso glaciar de los nevados Collquepucre, Llongote, Pariacaca y Ticcla, se le atribuye al cambio climático, puesto que aumenta gradualmente la temperatura, lo que afecta drásticamente a los ecosistemas.

En Junín, De la Cruz (31), en su estudio sobre el nevado Huaytapallana, tuvo como objetivo determinar la variabilidad en la extensión de la cobertura glaciar de dicho nevado y su relación con factores meteorológicos como la precipitación y temperatura durante 1986-2022. Como metodología, se consideró un análisis descriptivo cuantitativo con diseño no experimental y longitudinal, para lo cual se utilizó imágenes satelitales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de la colección Landsat 2 Nivel-2, debido a que estas imágenes ya cuentan con las correcciones atmosféricas, geométricas y radiométricas, se aplicó índices espectrales (NDSI y NDSII) para determinar nieve y hielo de manera independiente. Por otro lado, los elementos climáticos se adquirieron del producto grillado PISCO-SENAMHI, siendo procesados mediante el lenguaje de programación R y Rstudio. En cuanto a los resultados, se evidenció una disminución de 0.69 km²/año para cobertura de nieve/hielo para el periodo 1986-2022, siendo la cobertura de hielo la que menos disminuye en comparación con la nieve. Asimismo, se demostró que el elemento climático temperatura este asociado a la disminución de la cobertura glaciar, mientras que la precipitación resultó no significativo, debido a que, probablemente, en zonas montañosas, la precipitación no es líquida. En conclusión, el retroceso glaciar del nevado Huaytapallana está asociado a factores climáticos.

En Apurímac, Soto et al. (32) tuvieron como objetivo evaluar el retroceso de la superficie glaciar en el Santuario Nacional de Ampay empleando la serie histórica de imágenes Landsat entre los años 1991 al 2017. Asimismo, se han considerado los datos meteorológicos de las estaciones Tamburco y Abancay para un análisis de relación. Los resultados muestran una importante reducción de la superficie del glaciar debido al aumento de la temperatura. En ese sentido, la superficie glaciar en 1991 fue 2,13 km² y en 2017 fue 1,09 km² mostró una pérdida

de 1,04 km² que equivale a 48,92 % de pérdida durante los últimos años debido a la variabilidad climática como temperatura y precipitación. Se concluye que el retroceso glaciar del Santuario Nacional de Ampay, en los últimos 25, años muestra una tendencia al deshielo continuo, poniendo en riesgo el recurso hídrico.

En Lima, Ccallata (33), en su estudio sobre el nevado Salluyo de la cordillera Apolobamba, tuvo como objetivo analizar la influencia de los elementos climáticos en la disminución de la superficie glaciar durante el periodo 1985-2020. Las variables independientes y dependientes de la investigación son la influencia de los elementos climáticos y el retroceso glaciar, respetivamente. De acuerdo con el tipo y diseño de la investigación, es aplicado y no experimental. En cuanto a la metodología para estimar el área de retroceso glaciar, se utilizó la clasificación supervisada en el software libre QGIS. Asimismo, para el análisis de datos climáticos, se extrajo la información de la base de datos del SENAMHI para que, posteriormente, se realice la prueba de regresión lineal y Mann Kendall. Los resultados demuestran que el nevado Salluyo disminuyó en un 28.45%, y que la precipitación y la temperatura son los elementos climáticos que influyen en el retroceso de este nevado. En conclusión, a menor precipitación y mayor temperatura, el retroceso glaciar aumenta.

En Lima, Ramos (34) afirmó que el propósito fue examinar el desarrollo dinámico del Nevado Coropuna en las últimas tres décadas y su relación con las condiciones climáticas circundantes. Para este fin, se examinaron dos variables, temperatura y precipitación, en estaciones ubicadas en áreas cercanas al nevado. En el proceso de calcular el área del nevado y evaluarlo posteriormente, se emplearon imágenes satelitales como Landsat 5 y Landsat 8, y la metodología del Índice de Nieve y Hielo Normalizado (NDSI) para identificar la cobertura de nieve y cuantificar su extensión. Además, se analizaron los datos de precipitación y temperatura de un total de 47 y 38 estaciones respetivamente. Se llevó a cabo un análisis de tendencias, revelando que solo algunas de las estaciones evaluadas mostraron cambios en la precipitación, mientras que la mayoría de las estaciones presentaron una tendencia positiva significativa en la variable de temperatura.

En Lima, Rojas y Tordocillo (35) elaboraron una artículo que tuvo como objetivo calcular la variación del área y volumen del nevado Champará que está ubicado en la cordillera Blanca, haciendo uso de imágenes y modelos de elevación digital (MED) del sensor ASTER que se encuentra a bordo del satélite denominado TERRA. Se utilizaron índices espectrales como el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) y el Índice del Agua del Diferencia Normalizada (NDWI) para calcular el área glaciar. Además, se generaron MED con una resolución de 30 metros para el cálculo de la variación del volumen. Los resultados evidencian que existe un retroceso del área glaciar del 50% respecto al año 2000 y sigue una tendencia de

disminución exponencial, de tal manera que en aproximadamente 41.7 años el glaciar se reduciría a 1 km². Asimismo, de acuerdo con los resultados obtenidos para el volumen glaciar durante el periodo 2003-2010, existe una disminución del volumen a razón de -0.0159 km³/año. En conclusión, es probable que los factores climáticos y ambientales influyan en la reducción del área y volumen glaciar del nevado Champará.

En Ancash, Castillo (17) desarrolló una tesis que tuvo como objetivo evaluar la influencia que tiene la dinámica glaciar en los humedales y lagunas alto andinos de la cordillera Blanca para las unidades hidrográficas Lullán, Quillcay y Yanayacu durante el periodo 1989-2019. La investigación es de tipo explicativa, debido a que tiene una relación causal. Además, presenta dos enfoques: cuantitativo y cualitativo, y adopta un diseño longitudinal al utilizar datos recopilados de 30 años. Para la delimitación del área glaciar, se empleó un análisis multitemporal con imágenes obtenidas de los satélites Landsat, puesto que cuentan con más información a lo largo del tiempo. Además, se utilizó el índice espectral NDSI para determinar los glaciares cubiertos con nieve. Para la obtención multitemporal del volumen glaciar, se utilizó la metodología GlabTop que calcula el volumen a partir de la estimación del espesor promedio del flujo de hielo central. Los resultados evidenciaron que los glaciares, aproximadamente, han perdido entre el 22 y 56% de su área y entre 24 y 63% de su volumen. Asimismo, existe un retroceso de 10 a 18 metros en el frente de los glaciares y línea de equilibrio (ELA) subió entre 137 y 227 metros. Las lagunas y humedales mostraron una tendencia al crecimiento. En conclusión, la dinámica glaciar tiene una relación inversa con la dinámica de las lagunas y humedales.

En Junín, Toribio (36) presentó una investigación que tuvo como objetivo analizar el efecto que tiene la reducción glaciar del famoso nevado Huaytapallana en los bofedales del ACR Huaytapallana. Se aplicó el método científico con un enfoque de investigación descriptivo correlacional, debido a que el estudio busca una relación entre las variables. Asimismo, se utilizaron herramientas SIG y técnicas de teledetección para el cálculo de la superficie glaciar (NDSI y NDWI) y de los bofedales (NDVI). Luego, se llevó a cabo un análisis de correlación lineal entre las variables de estudio. Los resultados evidenciaron la pérdida de la masa glaciar en los últimos 30 años, estimándose para 1990 una cobertura glaciar de 27.73 km² y hacia el año 2020 un área de 15.71 km², reduciéndose a razón de 0.42 km²/año. De igual forma, se estimó la superficie de los bofedales, obteniendo como resultado un área de 0.89 km² para el año de 1990 y de 6.53 km² para el año 2020. En conclusión, el retroceso glaciar del nevado Huaytapallana tiene una relación inversa o negativa con la superficie de los bofedales presentes en el Área de Conservación Regional Huaytapallana.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Glaciares

Los glaciares son considerados ecosistemas formados por grandes porciones de hielo con o sin presencia de agua en las grietas, que son formados en la tierra debido a la transformación del hielo por acumulación de nieve, que, a la vez, este tiene una fluidez por su deformación bajo la influencia de la gravedad. Este se encuentra siempre en estado sólido, con presencia de neviza y así como de nieve superficial (37).

2.2.2. Tipos de glaciares

Según su forma y extensión, los glaciares se clasifican en:

2.2.2.1. Inlandsis

Estas áreas se representan por ubicarse de forma horizontal, así como la pendiente viene a tener un sentido horizontal; un ejemplo de ello se puede encontrar en la Antártida y en Groenlandia. Estos son los lugares donde se encuentra en mayor parte este tipo de glaciario, lugares con menores cantidades de este tipo podemos encontrarlos en el Campo de hielo patagónico, en los glaciares de Islandia, entre otros.

2.2.2.2. Sabanas de hielo

Teniendo en consideración la Antártida, los inlandsis son denominados sabanas de hielo cuando la cubierta de hielo es mayor a 50000 km^3 , tiene la denominación de calota cuando la cubierta de hielo es menor a los 50000 km^3 .

2.2.2.3. Glaciares de montaña

Este tipo de glaciares suelen ser de tamaño pequeño y son representativos en las altas montañas, antes se hacían llamar Alpinos. Estos son observados mayormente en la parte oriental y occidental del Antártida (38). Los glaciares de montaña se forman en las laderas de las montañas a medida que la nieve se acumula y se compacta, convirtiéndose con el tiempo en hielo. Este tipo de glaciares se desplazan lentamente hacia abajo, debido a la gravedad y la presión ejercida por la acumulación de la nieve en la parte superior. Además, son fuentes de agua dulce, que alimentan ríos en muchas regiones. No obstante, son altamente sensibles al cambio climático y muchos están desapareciendo, debido al aumento de la temperatura global, lo que tienen un impacto en el suministro de agua (39).

2.2.3. Los glaciares y su importancia

Los glaciares son amplias extensiones de hielo que se encuentran en las regiones altas de los Andes, generalmente situadas cerca de los 5000 m. s. n. m. que cubren ~10% de la superficie de la Tierra, pero se están reduciendo rápidamente en la mayor parte del mundo, lo que provoca impactos en cascada en los sistemas aguas abajo. Por lo tanto, imparten huellas únicas en el flujo de los ríos en momentos en que otras fuentes de agua están bajas (40).

El espesor promedio de estas capas de hielo oscila entre los 14 y 22 m y su importancia radica en su capacidad y diseminación progresiva del agua a los ambientes aguas abajo. Este beneficio natural es de extrema importancia en regiones con precipitaciones regulares selladas o con pequeñas lluvias, como las montañas y la costa, individualmente. También, las masas heladas tropicales son excelentes indicadores del avance climático y constituyen fuertes ahorros de agua dulce (41).

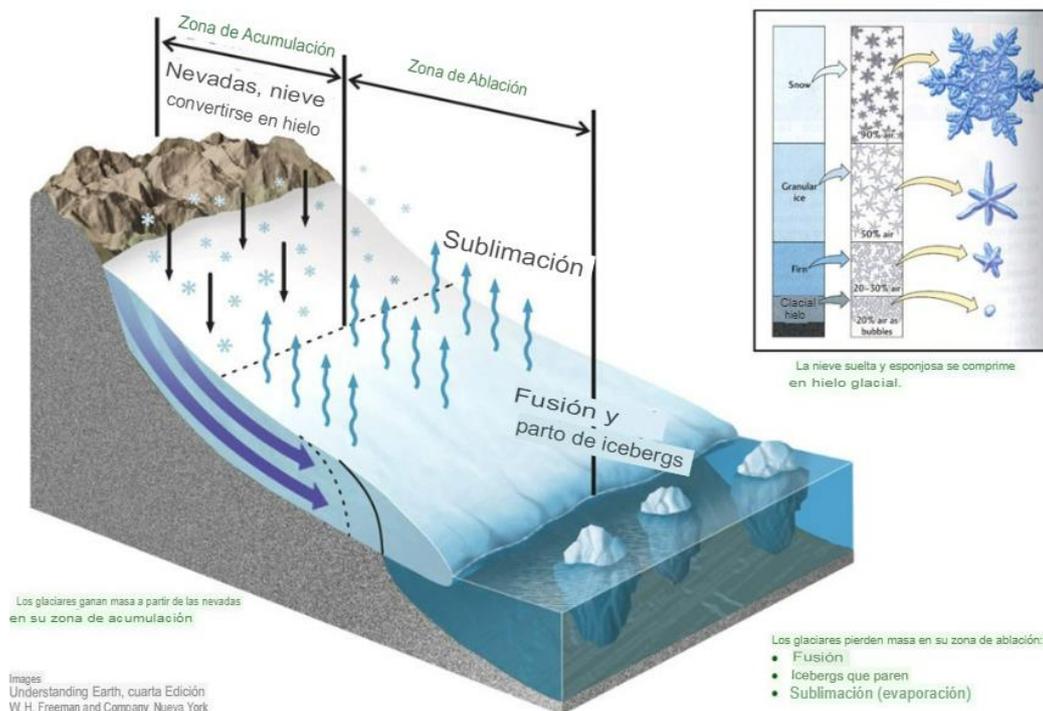


Figura 1. Formación de los glaciares. Fuente. (42)

2.2.4. Parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos van a ayudar a describir la morfología de un glaciar. Estos parámetros están relacionados con el emplazamiento de los glaciares y con los rasgos del área fuente, gracias a estos parámetros se logran identificar factores que controlan el desarrollo de los glaciares. Los lugares dentro de un glaciar vienen a ser la raíz, el área fuente y el frente; la raíz corresponde el punto medio donde inicia el glaciar en altura, mientras que el frente corresponde al punto central donde termina el glaciar cuesta abajo, ambos puntos tienen

diferente altitud y al unir estos puntos obtener la longitud de un glaciar; por otro lado, el área fuente. También, se encuentra en la parte más alta del glaciar, pero, a diferencia de la raíz, el área fuente corresponde al punto de altitud máxima de la divisoria ubicada inmediatamente por encima del glaciar, no necesariamente coincide con el centro de este. El ancho de un glaciar la distancia máxima entre las paredes tomadas siguiendo la línea transversal de la longitud. Entre otros parámetros, se presenta el desnivel del glaciar, la pendiente y la orientación del glaciar (43).

2.2.5. Cambio climático

El cambio climático es un fenómeno que afecta al clima de la Tierra y se caracteriza por el incremento de la temperatura en la atmósfera terrestre. Este aumento se debe a la acumulación de gases de efecto invernadero, tales como, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, que retienen el calor solar en la atmósfera, generando un calentamiento de la capa más baja de la atmósfera, conocida como troposfera (44). Así, el cambio climático afecta el equilibrio de la biosfera y la integridad de los ecosistemas en general, que ocasiona impactos diversos en los procesos vitales de los ciclos biogeoquímicos (45).

Los efectos del cambio climático, en el bienestar humano, se reflejan en el aumento de enfermedades transmitidas por vectores, así como en la mortalidad asociada a estas enfermedades y a las olas de calor. Además, los impactos indirectos en la disponibilidad de alimentos, agua y refugio son a menudo subestimados, pero igualmente significativos (44). Debido a esto, el cambio climático ha suscitado un interés cada vez mayor en ámbitos científicos, políticos, sociales y mediáticos, dado que sus impactos afectan y transforman fundamentalmente todas las actividades humanas (45).

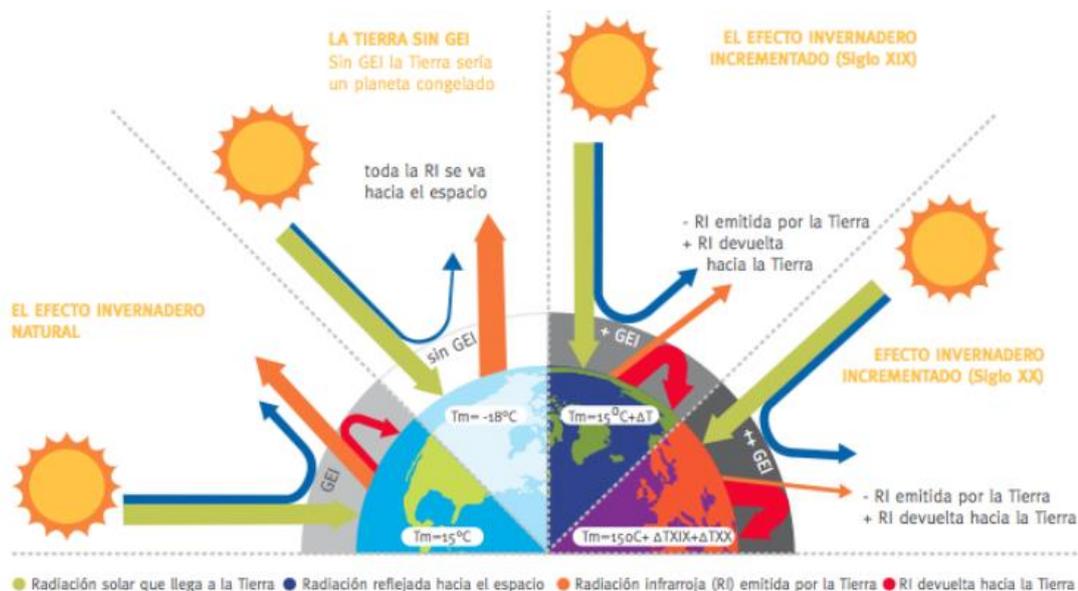


Figura 2. Proceso del cambio climático. Fuente. (46)

2.2.6. Impactos del cambio climático en los glaciares

El Perú tiene el 71% de los glaciares tropicales de todo el mundo, y junto a los países suramericanos vecinos tales como Ecuador, Bolivia y Colombia cuentan con el 99% de los glaciares tropicales del mundo. La importancia de estos glaciares deriva en la actuación en la regulación del clima, así como en su calidad de reserva de agua dulce, ya que los glaciares son fuentes de alimentación a los ríos que abastecen de este recurso vital a la población en términos de consumo humano y abastecimiento productivo. Hoy en día, estos glaciares son amenazados por las consecuencias del cambio climático que estas, a su vez, son generadas por factores naturales y antropogénicas. Se logró constatar a través de diversas investigaciones que los glaciares conforme van pasando el tiempo va perdiendo superficie y volumen de una forma muy rápida. Debido al incremento de la temperatura mundial, se va generando efectos desastrosos como desastres y disminución de recurso hídrico de una forma muy acelerada. (47)

2.2.7. Retroceso glaciar

El balance de energía superficial de los glaciares peruanos está controlado principalmente por la precipitación, que afecta el albedo y, por lo tanto, la recepción de radiación sobre los extremos glaciares bajos, particularmente en los trópicos exteriores. Además, la temperatura del aire controla esta fase de precipitación, de modo que el calentamiento de las temperaturas aumenta la proporción de un glaciar que recibe lluvia en lugar de nevadas, lo que posteriormente. También, afecta su recepción de albedo y radiación (6).

Debido a la alta radiación solar, durante todo el año, la nieve que cae fuera de las áreas glaciares se derrite en unos pocos días. Si bien este deshielo puede contribuir a la descarga inmediata del

río o potencialmente a la recarga de las aguas subterráneas, evita la acumulación de una capa de nieve estacional que puede proporcionar agua al comienzo de la estación seca (48).

Dentro de los últimos cincuenta años, el clima de los Yés tropicales tuvo una variedad de 0.1 °C/década que ha impactado sobre el comportamiento de las capas de hielo, lo cual cambió el balance energético y favoreciendo su pérdida por escorrenría (14). Por otra parte, los lagos que son reforzados por estas capas de hielo son marcadores críticos de cambio climático y su plenitud permite la fundación de sistemas de control para asegurar el suministro de agua y vitalidad a las poblaciones cercanas (48).

2.2.8. *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*

Un sistema de información (SI) está constituido por datos en formato digital y por herramientas informáticas, como programas, diseñados para analizar esta información conforme a objetivos organizacionales específicos (negocios, administración, entre otros). GIS es un caso especial de Sistema de Información cuando la información está georreferenciada; es decir, incluye su posición en el espacio mediante el uso de un sistema de coordenadas estandarizado, habitualmente definido por una proyección cartográfica, como la UTM (Universal Transverse Mercator).

2.2.9. *Teledetección*

La teledetección es una técnica de obtención de datos sobre un objeto a distancia, sin que exista contacto físico entre el sistema observado y el sensor. Los dispositivos de los satélites denominados sensores reciben la información a través de la energía electromagnética que emiten o reflejan (49). Se entiende por datos a los valores crudos obtenidos por el sensor y que pueden ser manipulados por diversos programas de computadora, el resultado de estos datos es interpretado por el ser humano de acuerdo con el objetivo que se tenga. Existen tres formas de adquirir información de los sensores remotos: por reflexión que es la energía reflejada por la luz del sol, por emisión que es la energía emitida por los propios objetos y por reflexión-emisión que se presentan cuando el sensor emite y luego capta la reflexión (50).

2.2.9.1. *Plataformas y sensores*

En la actualidad, los satélites como Landsat, Meteosat, Spot y otros, son las plataformas principales utilizadas para transportar sensores. La distancia entre la plataforma y la superficie terrestre puede variar, desde distancias cortas hasta distancias más largas de cientos de kilómetros. Los aviones suelen emplearse para distancias más cortas, mientras que los satélites tienen una mayor capacidad de alcance. Anteriormente, los aviones se utilizaban como plataformas para montar cámaras y capturar fotografías aéreas, pero, en la actualidad, se utilizan

sensores más avanzados sobre los aviones, lo que mejora la calidad de las imágenes obtenidas. La principal ventaja de utilizar aviones como plataforma para la teledetección radica en su disponibilidad y en el control que se tiene sobre cuándo y dónde se toman las imágenes, mientras que la disponibilidad de los satélites está sujeta a diversos factores. Con relación a las limitaciones, se puede destacar la falta de estabilidad de la plataforma, ya que es dependiente de las condiciones climáticas lo cual puede afectar los resultados y calidad de las imágenes. Debido a que las plataformas aéreas operan a altitudes bajas, su capacidad de cubrir áreas extensas es menor en comparación con los satélites, lo que implica mayor tiempo de vuelo. Por otro lado, el uso de los satélites artificiales resulta altamente beneficioso para la observación de la superficie terrestre (51).

Los sensores son dispositivos capaces de captar la radiación electromagnética reflejada o emitida por la tierra y la atmosfera. Estos dispositivos pueden adoptar la forma de escáneres, radiómetros o las cámaras fotográficas. Su principal función es capturar la radiación electromagnética emitida los objetos en diversos rangos del espectro para obtener información acerca de los fenómenos terrestres y objetos. Los sensores son muy importantes en la teledetección puesto que brindan información esencial para el análisis e interpretación de datos (52).

2.2.9.2. *Imágenes satelitales*

Las imágenes satelitales son una representación visual de la energía electromagnética medida a través de un sensor situado sobre una plataforma. Estos archivos están formados por una matriz de píxeles a las cuales se les asigna un valor digital, lo que representa la reflectividad capturada (47). Estas imágenes proporcionan detalles sobre la composición, las variaciones y la estructura de la superficie terrestre. Además, son ampliamente utilizadas en áreas como la cartografía, monitoreos ambientales, estudios glaciológicos y detección de cambios a lo largo del tiempo (52).

2.2.9.3. *Imágenes LANDSAT*

Las imágenes Landsat son un conjunto de imágenes adquiridas por los satélites de la serie Landsat, los cuales se utilizan para realizar la teledetección de la superficie terrestre. Estos satélites son operados por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) en conjunto con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (52). Desde 1972, la serie de satélites Landsat ha estado en funcionamiento, comenzando con el lanzamiento del satélite Landsat-1 mientras que el satélite Landsat 8 fue puesto en órbita el 11 de febrero del 2013, siendo el más reciente de la serie. Cada uno de estos satélites ha ido mejorando su capacidad de observación y recolección de datos de la tierra. Es relevante resaltar que las imágenes

Landsat son de dominio público y de acceso gratuito a través del portal Earth Explorer del USGS. Esto facilita la investigación por parte de profesiones y el público en general con distintos propósitos académicos o científicos y para la toma de decisiones (53).

- **Landsat 5 – Thematic Mapper (TM)**

El satélite Landsat 5 fue un satélite de observación de la tierra, puesto en órbita el 1 de marzo de 1984. El principal instrumento a bordo del satélite era el Thematic Mapper (TM), un sensor que capturaba imágenes en varias bandas del espectro electromagnético. El TM tenía una capacidad de capturar imágenes con una resolución espacial de 30 metros y operaba en siete bandas espectrales, las cuales incluían el visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo térmico. Estas posibilitan la detección y medición de distintas características de la superficie. Tras una trayectoria de más de 28 años, el satélite Landsat 5-TM fue retirado en junio del 2013 debido a inconvenientes técnicos. A lo largo de su tiempo de servicio, logró recopilar una gran cantidad de datos que se siguen empleando hasta la actualidad (54). En la tabla 2, se muestra las características de las bandas del Landsat 5.

Tabla 2. *Características del sensor Thematic Mapper (TM) del Landsat 5.*

Banda	Longitud de onda (µm)	Resolución (m)
Banda 1 – Azul	0.45 - 0.52	30
Banda 2 – Verde	0.52 - 0.60	30
Banda 3 – Rojo	0.63 - 0.69	30
Banda 4 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.76 - 0.90	30
Banda 5 – Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.55 – 1.75	30
Banda 6 - Infrarrojo térmico	10.40 - 12.50	120
Banda 7 – Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.08 - 2.35	30

Fuente: (54)

- **Landsat 7 – ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)**

El Landsat 7 - ETM (Enhanced Thematic Mapper Plus) fue parte de la serie Landsat y fue lanzado en el año 1999. El instrumento principal a bordo fue el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que capturaba imágenes en ocho bandas espectrales con 30 m de resolución de la banda 1 al 5 y 7, la banda 8 es la pancromática que tiene 15 m de resolución, lo que permitía detectar y medir características de la superficie terrestre como la vegetación, la cobertura del suelo, cuerpos de agua en estado sólido y líquido entre otros usos con fines de profesionales. Aunque presentó fallas en el Scan Line Corrector, que se encargaba de corregir las fallas en las imágenes, el satélite ha sido utilizado ampliamente en

investigaciones científicas (55). Este sensor cuenta con las siguientes bandas espectrales como se muestra en la tabla 3:

Tabla 3. *Características del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) del Landsat 7.*

Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 – Azul	0.45 - 0.52	30
Banda 2 – Verde	0.52 - 0.60	30
Banda 3 – Rojo	0.63 - 0.69	30
Banda 4 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.77 - 0.90	30
Banda 5 – Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.55 – 1.75	30
Banda 6 - Infrarrojo térmico	10.40 - 12.50	60
Banda 7 – Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.08 - 2.35	30
Banda 8 - Pancromática	0.52 – 0.90	15

Fuente: (55)

- **Landsat 8 – OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor)**

El satélite Landsat 8 fue lanzado en el año 2013. Cuenta con dos instrumentos a bordo el OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor). El OLI captura imágenes en nueve bandas que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo de onda corta. Estas bandas proporcionan información sobre la superficie terrestre, vegetación, áreas urbanas, entre otras. Este sensor ofrece una resolución de 30 metros en varias bandas y nueva resolución de 15 metros en la banda pancromática. Por otro lado, el TIRS ha sido diseñado para captar imágenes en el rango del infrarrojo térmico, por lo que cuenta con dos bandas espectrales que posibilitan la medición temperaturas y detección de cambios en la cobertura de hielo (56).

Tabla 4. *Características de los sensores del Landsat 8.*

Sensor	Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)	
OLI	Banda 1 – Aerosol Costero	0.43 - 0.45	30	
	Banda 2 – Azul	0.45 - 0.51		
	Banda 3 – Verde	0.53 - 0.59		
	Banda 4 – Rojo	0.64 - 0.67		
	Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88		
	Banda 6 – Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.57 – 1.65		
	Banda 7 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.11 – 2.29		
	Banda 8 – Pancromático	0.50 – 0.68		15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 – 1.38		30

Sensor	Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
TIRS	Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 – 11.19	100
	Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 – 12.51	

Fuente: (56)

2.2.9.4. Diferencias y semejanzas con el Landsat 8

Como se mencionó anteriormente, el satélite Landsat 8 agrega dos elementos de barrido que son los OLI y los TIRS.

Las bandas espectrales del sensor OLI representan una mejora en los instrumentos en comparación con las misiones Landsat anteriores. Esto se debe a la adición de dos nuevas bandas espectrales: una en el rango azul visible profundo (B1), diseñada específicamente para estudios de recursos hídricos e investigaciones costeras, y un nuevo canal infrarrojo (B9) para detectar nubes cirrus. Además, se ha incorporado una nueva banda de control de calidad en cada conjunto de datos producido, lo que brinda información con mucho más detalle sobre la presencia de características como nubes, agua y nieve.

La calidad de los datos (la relación entre la señal y el ruido) y la resolución radiométrica (12 bits) del sensor OLI y TIRS son superiores a las de los instrumentos Landsat anteriores (8 bits para TM y ETM+). Esto resulta en una mejora considerable en la capacidad para identificar modificaciones en la superficie de la tierra.

2.2.10. Análisis multitemporal del retroceso glaciar

Schoolmeester et al. afirmaron que el retroceso de los glaciares es una realidad que ha ocurrido durante muchos años, y esto se puede observar en varias partes del mundo, siendo causado principalmente por el cambio climático provocado por la actividad humana. El retroceso de los glaciares en los Andes tropicales ha sido particularmente rápido. Por ejemplo, en Venezuela, solo queda un glaciar, y se estima que pronto desaparecerá. En Colombia, también, se ha observado un retroceso acelerado de los glaciares en las últimas décadas. Varios estudios sugieren que para mediados de este siglo es probable que solo queden glaciares en las cimas más altas. En Ecuador, los glaciares se encuentran en las montañas más altas, pero como se mencionó anteriormente, es probable que experimenten una reducción acelerada en tres o cuatro décadas (36).

La teledetección es una herramienta esencial para evaluar los cambios en el medio físico y biológico a lo largo del tiempo. Mediante diferentes métodos y procesos, es posible distinguir formaciones y tipos de cobertura en el entorno mediante el análisis radiométrico y espectral. Uno de los usos de la teledetección es la monitorización de los glaciares tropicales, los cuales

se encuentran amenazados por el calentamiento global. Obtener un conocimiento detallado y realizar un seguimiento constante permitirá a las autoridades comprender su evolución y tomar decisiones sobre cómo enfrentar la pérdida de esta importante fuente de agua. La teledetección desempeñará un papel crucial al proporcionar información sobre la evolución de la cobertura glaciar a lo largo del tiempo, mediante el análisis de imágenes multitemporales del retroceso glaciar (57).

2.2.11. Normalized Difference Snow Index (NDSI)

El índice normalizado de diferencia de nieve (NDSI) es utilizado para detectar y mapear la presencia de nieve. Se calcula a partir de la diferencia normalizada de dos bandas espectrales, típicamente la banda verde del espectro visible (GREEN) y la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR). Esta técnica se basa en el comportamiento espectral de la nieve a diferentes longitudes de onda. Esto se conoce como firma espectral y varía según el tipo de material. La nieve tiene una alta reflectancia en las bandas del espectro visible y una baja reflectancia en la banda del infrarrojo de onda corta. Por ende, al realizar los cálculos, se resalta la presencia de nieve, ya que el valor NDSI será más alto en las áreas con presencia de nieve y bajo en las áreas sin nieve. El resultado de esta operación será un valor que puede variar desde -1 y 1 (58). Tanto la nieve como las nubes presentan comportamientos distintos al interactuar con la radiación incidente, aunque ambos reflejan en gran parte la radiación en la banda visible, la nieve muestra una mayor absorción de radiación en el infrarrojo de onda corta a diferencia de las nubes que no presentan esta característica. Esta diferencia es aprovechada por el NDSI para distinguir entre nieve y nubes en las imágenes satelitales (53). Esta es una de las metodologías más usadas para la detección de cobertura de nieve propuesto por Jeff Dozier que establece que cualquier píxel en una imagen o escena con valor superior a 0.4 se considera como superficie cubierta de nieve.

Por lo tanto, para estimar la cobertura glaciar en imágenes Landsat, se hace uso de la Ec. (1) que no es más que la diferencia de dos bandas espectrales (32):

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

GREEN: Banda verde del espectro visible.

SWIR: Banda del infrarrojo de onda corta.

Para obtener estos valores usando bandas espectrales para cada satélite Landsat, se deben procesar los índices de las bandas de la siguiente manera:

$$\text{Landsat 4 - 7: NDSI} = \frac{\text{Banda 2} - \text{Banda 5}}{\text{Banda 2} + \text{Banda 5}} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\text{Landsat 8: NDSI} = \frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 6}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 6}} \quad \text{Ec. (3)}$$

2.2.12. Combinación de bandas

La composición de bandas es una técnica clave en la teledetección que se utiliza para destacar atributos particulares en las imágenes satelitales. Además, está compuesta por la combinación de tres bandas distintas, siendo cada una asignada a uno de los tres canales de visualización: Rojo (R), Verde (G) y Azul (B). Es importante señalar que para realizar con éxito esta técnica es necesario que se utilicen aquellas bandas que tienen las mismas características e igual resolución (53).

2.2.13. Variabilidad climática

Con el tiempo (meses, años, siglos, otros), muestran ciclos climáticos o Variedades de diferentes longitudes, en diferentes años, diferentes valores climáticos (temperatura d-el aire, lluvia, etc.) difieren de los anteriores o por debajo de lo normal (estado generalmente indicado por el valor variable climática media al menos 30 años), la sucesión de las oscilaciones aleatorias a los valores normales se denomina variabilidad climática y su evaluación se obtiene determinando las anomalías. Al examinar las secuencias históricas de desviaciones de una variable climática específica en un lugar determinado, es factible observar una sucesión de ciclos entrelazados que presentan periodos de duración mensual, anual y decenal. Estos ciclos revelan la variabilidad del clima en las escalas a corto plazo, anual y a largo plazo, respectivamente. Estas variaciones son típicamente causadas por procesos que ocurren en los diferentes elementos del sistema climático, especialmente en el océano y la atmósfera, así como por cambios en la radiación solar recibida.

2.2.13.1. Variabilidad Intraestacional

Durante el transcurso de una estación, ya sea verano o invierno en latitudes medias, o tiempos de lluvias o seca en la zona tropical, se producen fluctuaciones que influyen en la actividad de los sistemas que generan las condiciones climáticas durante períodos de varias decenas de días.

Varios estudios han indicado que, entre las fluctuaciones a corto plazo de la precipitación y otras variables climáticas, se destaca un ciclo con una duración de 30 a 60 días. Este ciclo ha sido observado en la actividad convectiva en el Pacífico Tropical Oriental, en la presión atmosférica, en las anomalías de vientos en altitud y en la precipitación tanto en esta región como en la América Tropical. Muchas de estas oscilaciones están asociadas con las ondas de Madden-Julian, descubiertas en 1971 en relación con los patrones de presión atmosférica en la zona tropical.

2.2.13.2. Variabilidad Interanual

A nivel interanual, se observan fluctuaciones con ciclos que tienen períodos superiores a un año. En términos de precipitación, esta variabilidad se manifiesta en la alternancia entre años más lluviosos de lo normal y años con déficit de lluvias. De acuerdo con investigaciones realizadas hasta el momento, se pueden identificar dos señales en la escala interanual. Una de estas señales está asociada a la influencia de los fenómenos de El Niño y La Niña, mientras que la otra muestra un período aproximado de dos años.

2.2.13.3. Variabilidad Interdecadal

Esta variabilidad se manifiesta en ciclos que superan los diez años de duración. Estas fluctuaciones pueden estar relacionadas con los ciclos observados en el número de manchas solares, las oscilaciones decenales en el océano como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés), o el ciclo lunar de 18.6 años (59).

2.2.14. Aplicaciones de SIG en entornos glaciares

Los SIG juegan un papel importante en el análisis y la visualización de glaciares y paisajes esculpidos por glaciares, de esta manera, las limitaciones del balance de masa son inevitables para comprender el desarrollo de los glaciares y los SIG son ideales para procesar y visualizar datos relacionados. Por ejemplo, los SIG se pueden utilizar para visualizar la extensión de los glaciares mapeada manualmente o incluso para aplicar rutinas de mapeo automatizadas basadas en DEM y datos espectrales (60).

2.3. Definición de términos básicos

- **Área glaciar:** es la extensión de la masa de hielo, normalmente en movimiento en el movimiento de deslizamiento de la zona de agregación por gravedad. Se inicia en la superficie de la tierra por compactación y recristalización de la nieve, apareció probar del pasado o mostrar corriente actual (61).

- **Balance de masa:** el balance de masa de un glaciar se refiere a los cambios en la cantidad de hielo durante un período de tiempo específico. Estos cambios están influenciados por factores locales relacionados con la dinámica del glaciar, así como por variaciones climáticas regionales. Por lo tanto, el balance de masa se considera un indicador de la sensibilidad del glaciar a los cambios ambientales y un parámetro para comparar su estado con otros glaciares en diferentes regiones (62).
- **Cobertura de nieve:** se refiere al manto de nieve que cubre el suelo, el cual es un componente clave del sistema climático mundial por su papel en la modificación de los flujos de energía y humedad entre la superficie, así como la atmósfera, y por su rol como depósito de agua en los sistemas hidrológicos (63).
- **Desglaciación:** es el fenómeno por el cual los glaciares disminuyen su tamaño o desaparecen, como consecuencia del calentamiento global y la disminución de precipitaciones. La desglaciación es motivo de preocupación debido a que tiene el potencial de afectar el suministro de agua dulce y los ecosistemas asociadas al cuerpo glaciar (8).
- **Glaciar de montaña:** son glaciares de tamaño pequeño y representativos en las altas montañas (38). Los glaciares de montaña se forman en las laderas de las montañas a medida que la nieve se acumula y se compacta, convirtiéndose con el tiempo en hielo. Este tipo de glaciares se desplazan lentamente hacia abajo, debido a la gravedad y la presión ejercida por la acumulación de la nieve en la parte superior. Además, son fuentes de agua dulce, alimentando ríos en muchas regiones. No obstante, son altamente sensibles al cambio climático y muchos están desapareciendo debido al aumento de la temperatura global, lo que tienen un impacto en el suministro de agua (39).
- **Precipitación:** el fenómeno natural por el cual cualquier agua líquida o congelada formada en la atmósfera, que vuelve a caer a la superficie de la Tierra se llama precipitación, incluyendo formas de lluvia, aguanieve y nieve (64). Además, el cambio en las precipitaciones ha generado cambios de patrones con respecto a los fenómenos de sequía e inundación (65).
- **Tasa de pérdida de área:** se relaciona con la masa de hielo que se pierde a través de la ablación y la escorrentía del agua de deshielo en elevaciones más bajas por debajo de la línea de equilibrio, y a través del desprendimiento de icebergs y el derretimiento frontal donde el extremo está en contacto con el océano o lagos proglaciales. De esta manera, la tasa de pérdida se está acelerando a pesar de la reducción de las áreas del glaciar (66).

- **Teledetección:** la teledetección es una técnica de obtención de datos sobre un objeto a distancia, sin que haya contacto físico entre lo observado y el sensor. Los sensores de los satélites reciben la información a través de la energía electromagnética que emiten o reflejan (49).
- **Temperatura:** es uno de los parámetros relevantes en la estimación del clima, en base a ello, el cambio climático afecta a los cambios de temperatura como resultado de un complejo equilibrio de energía, debido a la radiación solar, a la composición del ambiente, los cambios en las masas de tierra, corrientes de mar y la tierra, por lo que la desgracia de esta armonía causa cambios climáticos (65).
- **Volumen glaciar:** el volumen del glaciar se puede aproximar más fácilmente midiendo el área de superficie y aplicando una relación de escala de ley de potencia. De esta manera, la importancia de estimar el volumen total del glaciar podría darse cuenta del hecho de que da una idea del almacenamiento total de agua dulce en los glaciares (67).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Métodos y alcance de la investigación

3.1.1. Método

El estudio utilizará métodos de tipo aplicada porque permitirá la aplicación de los conocimientos adquiridos a partir de la investigación desarrollada con el pensamiento crítico (68). Asimismo, será cualitativo porque incluye una metodología de recolección de información no numérica; por ende, se sustenta principalmente con descripciones y observaciones (69). En este sentido, se realizará la identificación de los distintos satélites y programas de modelamiento para el cálculo de pérdidas de cobertura glacial y de predicción de retroceso glacial (70).

3.1.2. Alcance o nivel

El trabajo de investigación según el alcance se definirá de manera correlacional porque se determinará el grado de relación entre las variables (71), por lo tanto, se evaluará la relación entre la variabilidad climática y la dinámica glacial, para lo cual se aportará las evidencias con la finalidad de probar la hipótesis utilizando la estadística (72).

3.2. Diseño de la investigación

El diseño será no experimental por motivo que las variables de estudio no son sometidas a condiciones experimentales, siendo los objetos de ponderación evaluados en su marco común, sin modificación alguna dentro de la circunstancia (73). Al mismo tiempo, es de tipo longitudinal debido a que se obtendrá la información en diferentes momentos de una misma población (74) con la finalidad de evaluar los cambios en un periodo de tiempo comprendido desde 1993 hasta el 2023. En este sentido, se realizó un estudio que pretende evaluar la relación que existe entre la dinámica glacial del nevado Huaytapallana en la región Junín y la variabilidad climática.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población estará constituida por los glaciares de la Cordillera Huaytapallana en Junín.

3.3.2. Muestra

La muestra estará constituida por el nevado Huaytapallana en los periodos de estudio comprendido desde 1993 hasta el 2023.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

La técnica para extraer y cartografiar la capa de nieve en el área de estudio se aplicará Índices Espectrales (IE) que compara la información espectral de una banda con otra para distinguir la cobertura de nieve entre otras coberturas (32). Asimismo, para el mapeo y el análisis espacial, se requerirá de la técnica de la observación que permite un registro visual de la información (69). En este caso, se observará las combinaciones de colores naturales de luz visible al ojo humano para diferenciar la cobertura glaciaria.

Por otro lado, para la interpretación de las tendencias y las circunstancias evolutivas del retroceso glacial, se aplicará la técnica de análisis crítico que permite construir a través de los procesos mentales, desarrollo lógico, síntesis y evaluaciones críticas de lo observado a partir de los datos principales, lo cual sugiere mayores conocimientos, que, a su vez, se traduce en realizar mejores hallazgos a través de una investigación adecuadamente planteada (68).

3.4.2. Instrumentos

Los datos de detección remota utilizados para el mapeo y el análisis espacial se recopilan mediante imágenes satelitales del Landsat y fichas de datos respecto al área del glaciar, datos de temperatura y precipitación, para el período comprendido desde 1993 hasta el 2023 en el entorno SIG utilizando ArcGIS Pro 3.1 (75).

3.5. Procedimientos

Previo al logro de los objetivos, se llevaron a cabo diversos procedimientos en gabinete los cuales se detallan a continuación:

Ubicación del área de estudio: en esta etapa, se establecieron los límites del área de estudio. En la figura 3 se observa la ubicación del nevado Huaytapallana que se encuentra dentro de la cordillera del mismo nombre en las provincias de Huancayo y Concepción, departamento de Junín.

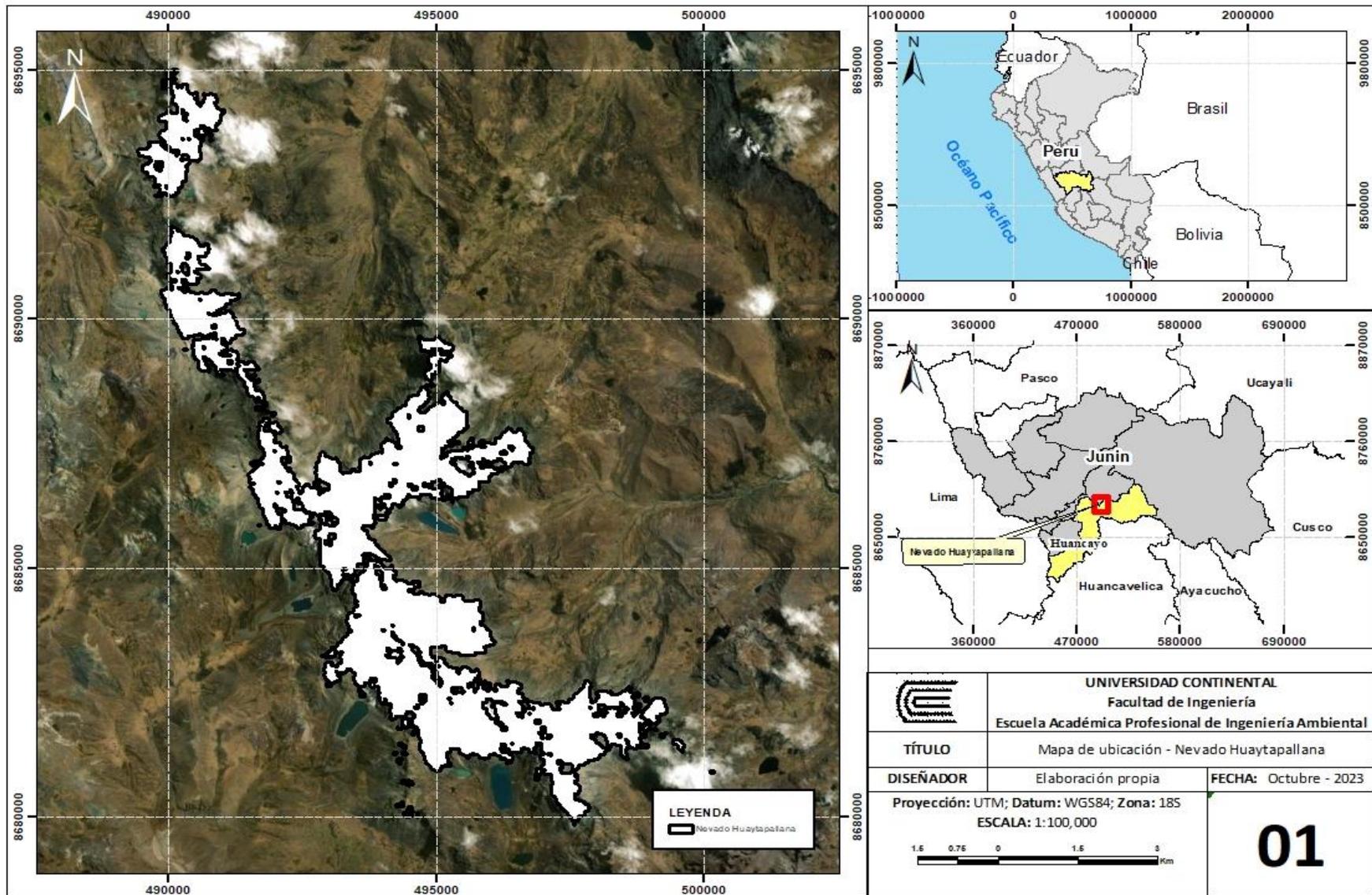


Figura 3. Mapa de ubicación del nevado Huaytapallana.

Obtención de imágenes satelitales: las imágenes satelitales fueron recolectadas de los sensores Landsat 5 – Thematic Mapper (TM) y Landsat 8 – OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor), a partir del año 1993 hasta el 2023 desde la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), en intervalos de dos años, para poder visualizar el cambio en el área de la superficie glaciar del nevado.

En la tabla 5, se muestra las consideraciones para la selección de las imágenes satelitales:

- Porcentaje de nubosidad: la nubosidad de la imagen seleccionada debe ser menor a 10% de tal manera que permita la visualización del área de estudio.
- Fecha de adquisición de la imagen: las imágenes deben ser capturadas dentro de la época seca que se extiende desde el mes de abril hasta setiembre, en esta época las lluvias disminuyen considerablemente, lo que resulta en un clima más seco y soleado.
- Imágenes sin anomalías: se consideró imágenes que no presentaran irregularidades o errores que puedan afectar su calidad o utilidad para el propósito previsto.

Tabla 5. *Características de las imágenes Landsat obtenidas.*

Fecha de adquisición	Código	% de nubosidad	Sensor	Path/Row
06/09/1993	LT05_L2SP_006068_19930906_20200913_02_T1	3.00	TM	006/068
11/08/1995	LT05_L2SP_006068_19950811_20200912_02_T1	9.00	TM	
15/07/1997	LT05_L2SP_006068_19970715_20200910_02_T1	7.00	TM	
06/08/1999	LT05_L2SP_006068_19990806_20200907_02_T1	6.00	TM	
11/08/2001	LT05_L2SP_006068_20010811_20200905_02_T1	5.00	TM	
16/07/2003	LT05_L2SP_006068_20030716_20200904_02_T1	13.00 (*)	TM	
05/07/2005	LT05_L2SP_006068_20050705_20200902_02_T1	33.00 (*)	TM	
09/06/2007	LT05_L2SP_006068_20070609_20200830_02_T1	8.00	TM	
30/06/2009	LT05_L2SP_006068_20090630_20200827_02_T1	10.00 (*)	TM	
07/08/2011	LT05_L2SP_006068_20110807_20200820_02_T1	15.00	TM	
11/07/2013	LC08_L2SP_006068_20130711_20200912_02_T1	16.53 (*)	OLI/TIRS	
02/08/2015	LC08_L2SP_006068_20150802_20200908_02_T1	12.83 (*)	OLI/TIRS	
07/08/2017	LC08_L2SP_006068_20170807_20200903_02_T1	10.69 (*)	OLI/TIRS	

Fecha de adquisición	Código	% de nubosidad	Sensor	Path/Row
12/07/2019	LC08_L2SP_006068_20190712_20200827_02_T1	12.66 (*)	OLI/TIRS	
01/07/2021	LC08_L2SP_006068_20210701_20210708_02_T1	9.22	OLI/TIRS	
05/06/2023	LC08_L2SP_006068_20230605_20230613_02_T1	9.93	OLI/TIRS	

Nota: (*) Valores de porcentaje de nubosidad que no cumplen con el primer criterio de selección de imágenes satelitales, sin embargo, se precisa que en el área de estudio no se observa nubosidad ni ninguna otra anomalía que pueda afectar el procesamiento respectivo.

Preprocesamiento de las imágenes del satélite Landsat

El preprocesamiento de las imágenes satelitales consiste en realizar las correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas con la ayuda de algún software. Sin embargo, las imágenes que se descargaron fueron del satélite Landsat colección 2 nivel 2, las cuales ya tienen la reflectancia superficial corregida y generan un producto científicamente viable. Es preciso señalar que la reflectancia de la superficie permite una comparación precisa entre diversas imágenes capturadas en la misma región al considerar los efectos atmosféricos tales como la dispersión de aerosoles y la presencia de nubes delgadas, lo que puede ser útil para identificar y describir cambios en la superficie terrestre. La reflectancia en la superficie deriva de los datos del nivel 1 que cumplen con el requisito del ángulo cenital solar menor a 76° e incorpora datos auxiliares (76). A continuación, se describen los algoritmos utilizados para la corrección de las imágenes satelitales que se encuentran en la colección 2 nivel 2 – Landsat:

- Landsat 8-9 Operational Land Imager (OLI): los productos de la reflectancia superficial son generados usando el algoritmo Land Surface Reflectance Code (LaSRC) versión 1.5.0, que utiliza la banda de aerosol costera para realizar pruebas de inversión de aerosol, datos climáticos auxiliares de MODIS y un modelo único de transferencia radiativa (76).
- Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM): los productos de reflectancia superficial se generan utilizando el algoritmo Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS), el cual es un conjunto de algoritmos desarrollados para realizar correcciones atmosféricas y preprocesamiento de imágenes capturas por el satélite Landsat (77).

Pansharpening: este proceso se utilizó para mejorar visualmente la claridad de las imágenes satelitales. Esta técnica consiste en combinar la información de una imagen multiespectral que tiene una resolución espacial más baja, con la imagen pancromática, que posee una resolución espacial más alta. Como resultado, se obtiene una imagen mejorada y con mayor nitidez.

3.5.1. *Evaluar el cambio de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023.*

Para evaluar el área de retroceso glaciar en el área de estudio a partir de imágenes satelitales Landsat 5 TM (Thematic Mapper) y Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor) se ha utilizado el ArcGIS Pro 3.1 y se han seguido los siguientes procedimientos:

A. Reproyección de imágenes

Implicar modificar la proyección cartográfica original de una imagen para adaptarla a un sistema de coordenadas diferente. En esta situación, las imágenes ya se encuentran previamente proyectadas en el sistema Universal Transversal Mercator (UTM) con Datum WGS84 y zona 18 del hemisferio norte. Sin embargo, se llevó a cabo una reproyección con el objetivo de adaptarla al hemisferio sur.

Procedimiento: Toolboxes > Data Management Tools > Projections and Transformations > Raster > Project Raster.

B. Recorte del área de estudio

Se delimitó con un polígono el área de estudio, con la finalidad de eliminar la información innecesaria en las imágenes de modo que se pueda centrar la atención en la zona de estudio deseada.

Procedimiento: Toolboxes > Data Management Tools > Raster > Raster Processing > Clip Raster

C. Cálculo del Índice Normalizado de Nieve (NDSI)

Se utilizó la herramienta Raster Calculator, ubicada dentro de la caja de herramientas del software ArcGIS pro. El Índice de Nieve Normalizado (NDSI) se calculó usando la siguiente ecuación para imágenes Landsat:

Procedimiento: Toolboxes > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator.

Tabla 6. Ecuación de cobertura glaciar.

Descripción	Ecuación	Expresión
Cobertura (Índice Diferencial Normalizado de Nieve)	$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$	GREEN: Banda verde del espectro visible. SWIR: Banda del infrarrojo de onda corta.

Fuente. (32)

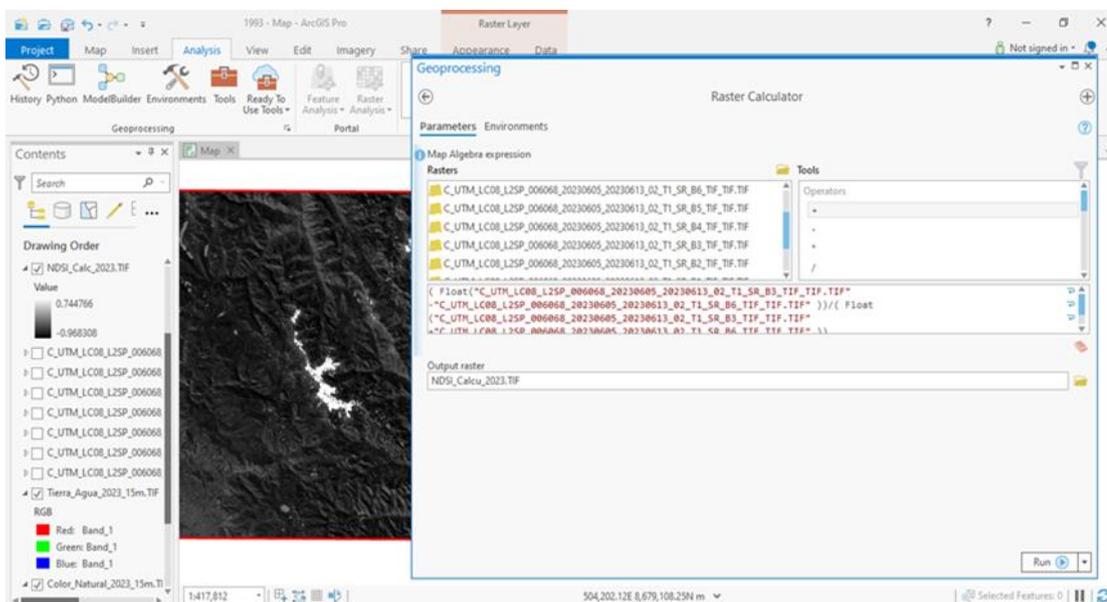


Figura 4. Cálculo del NDSI, año 2023.

D. Reclasificación del raster NDSI

La reclasificación del raster NDSI involucra la asignación de solo dos valores a los píxeles de la imagen original, esto con el objetivo de crear un mapa binario que señale las zonas con nieve y zonas sin nieve. En este escenario, los valores superiores al umbral predefinido (0.4) indican la presencia de nieve, mientras que los valores inferiores al umbral indican ausencia de nieve.

Procedimiento: Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify.

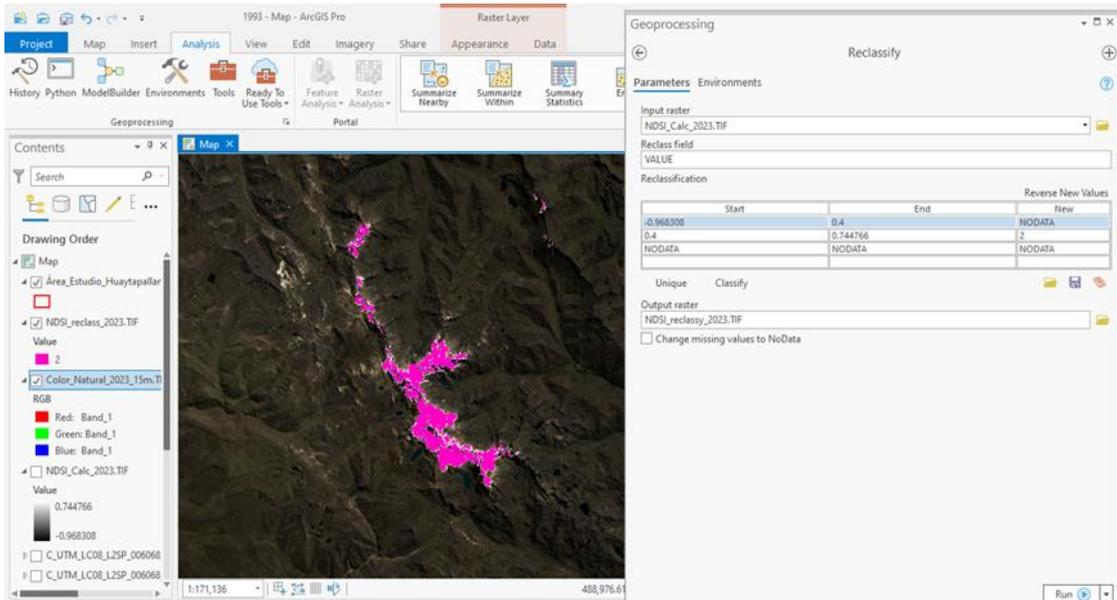


Figura 5. Reclasificación del NDSI, año 2023.

E. Conversión de raster a polígono

La conversión de raster a polígono es el proceso, en el cual una imagen raster se transforma en polígonos vectoriales, con el objetivo de calcular el área a través de la tabla de atributos.

Procedimiento: Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon.

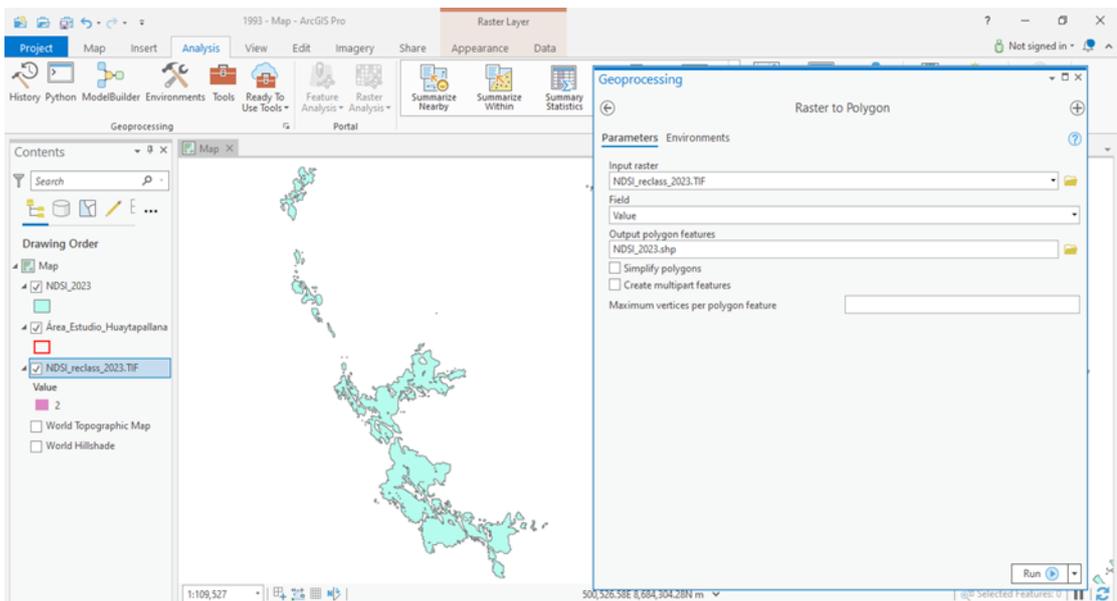


Figura 6. Conversión de raster a polígono, año 2023.

F. Composición de bandas

Una vez obtenido el polígono como resultado de la aplicación del NDSI, es necesario realizar la verificación y corrección de forma manual de los contornos que pudieron ser excluidos, tomando en cuenta la composición de bandas de color natural y tierra / agua para poder mejorar la detección y visualización de áreas cubiertas de nieve. Realizar esta verificación es importante debido a que proporciona resultados más precisos y claros en comparación con el uso de cada técnica por separado. Para ello, se utilizaron las siguientes combinaciones, según el tipo de satélite:

Tabla 7. *Combinaciones en color natural de las imágenes Landsat.*

Satélite	Combinación Color Natural
Landsat 5	321
Landsat 8	432

Fuente: (78)

Tabla 8. *Combinación tierra / agua de las imágenes Landsat.*

Satélite	Combinación Tierra / Agua
Landsat 5	453
Landsat 8	564

Fuente: (78)

Procedimiento: Toolboxes > Data Management Tools > Raster > Raster Processing > Composite Bands.

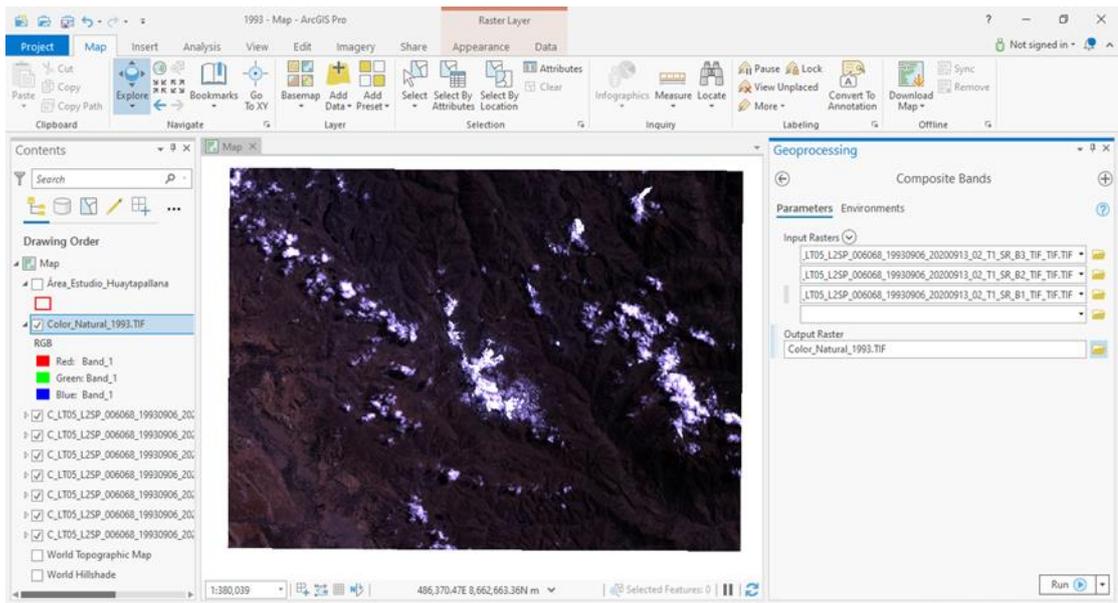


Figura 7. Resultado de la composición de bandas, año 1993.

Se precisa que, para las imágenes satelitales obtenidas del Landsat 8, se realizó el refinado pancromático para mejorar la calidad de resolución.

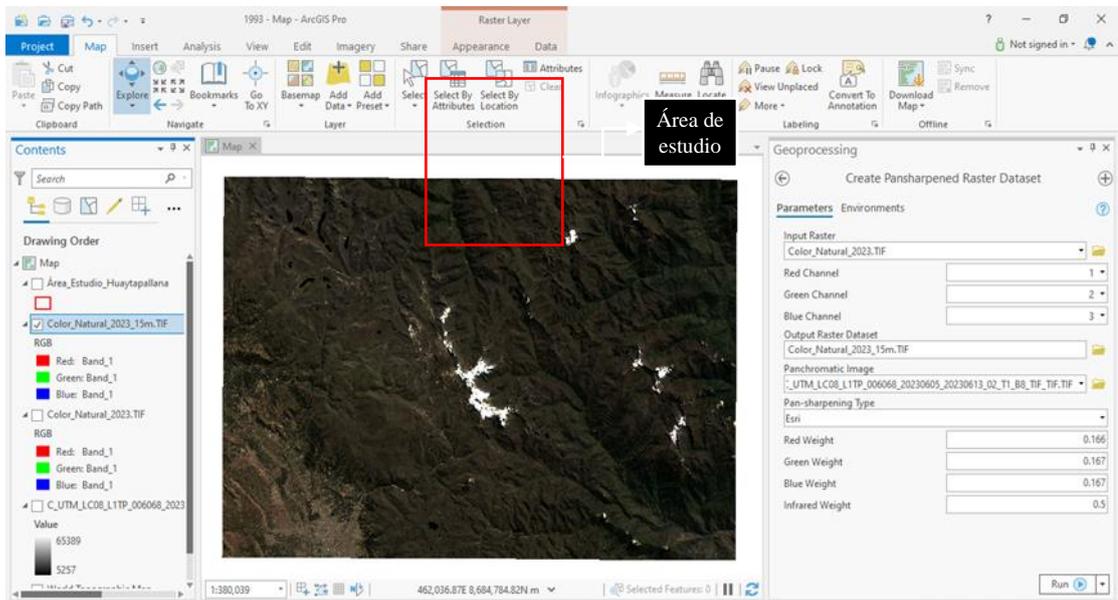
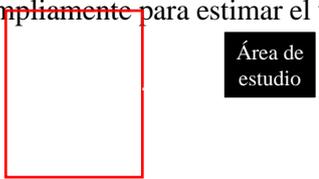


Figura 8. Resultado de la composición de bandas (color natural) y el refinado pancromático, año 2023.

3.5.2. Analizar las variaciones en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023.

Para analizar y estimar el volumen glaciar, se utilizó la relación empírica propuesta por Bahr y Meier, el cual ha sido utilizada ampliamente para estimar el volumen a escala global y regional



(79). La metodología se basa en la relación empírica entre el área y el volumen de los glaciares, fundamentada en la observación de 144 glaciares de distintas partes del mundo. Esta relación, es conocida como la ley de escala volumen - área, que se emplea para calcular el volumen de glaciares a partir de valores del área superficial. De acuerdo con esta ley, el volumen de un glaciar esta proporcionalmente relacionado con el área glaciar elevada a una potencia específica (80), es decir que, a medida de que el área glaciar aumenta, el volumen también aumenta a una tasa más rápida. Este enfoque facilita la estimación del volumen de los glaciares mediante mediciones simples y accesibles.

$$V = cA^y$$

De acuerdo con la ecuación **V**, es el volumen glaciar medido en km³; **A** es la superficie glaciar en km²; **c** es un parámetro que varía según sea necesario (c=0.048), esta variabilidad podría ser por glaciar, tiempo, pendiente, región, parámetros climáticos o por otros factores posibles; **y** es un factor exponencial constante (y=1.375) para glaciares de montaña (81).

3.5.3. Datos climáticos de precipitación y temperatura.

Los datos climáticos de temperatura y precipitación fueron adquiridos de la estación meteorológica Santa Ana, a través de la base de datos proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Los datos proporcionados incluyeron temperatura máxima, mínima, media y precipitación. Se trabajó con los datos de frecuencia diaria con el propósito de obtener una frecuencia más elevada, incrementando así la cantidad de datos y, por ende, fortaleciendo la fiabilidad del análisis. A continuación, se presenta el climograma de la estación meteorológica Santa Ana para el periodo comprendido entre 1993 al 2023.

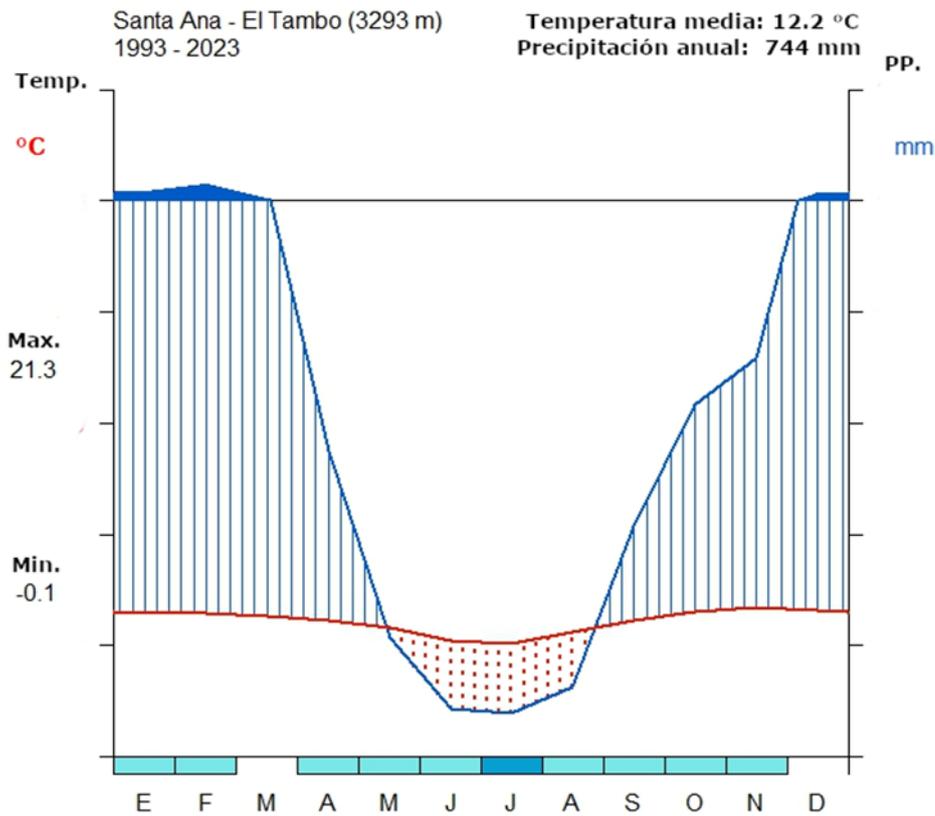


Figura 9. Climograma de Walter-Lieth

De la figura 9, se observa para la provincia de Huancayo, distrito de El Tambo; la abundancia de lluvias inicia desde los meses de diciembre hasta mediados de marzo del año siguiente, los meses secos comienzan desde el mes de mayo hasta mediados de septiembre, la pp acumulada anual es de 744 mm, temperatura máxima 21.3°C registrado en el mes de noviembre y la temperatura mínima promedio es de -0.1°C registrado en el mes de Julio, la temperatura media es de 12.2°C, la ocurrencia de heladas probables y seguras son en los meses de mayo hasta finales del mes de agosto mostrando un clima lluvioso frío.

3.6. Análisis de datos

Para el análisis de cambios en la cobertura y volumen glaciar, se aplicó el estadístico de Tau (τ) de Mann-Kendall, que es una medida de la dirección y la fuerza de tendencia en los datos, cuanto más cerca esté τ de 1 o -1, más fuerte será la tendencia positiva o negativa. La prueba de Mann-Kendall es comúnmente usada en el análisis de tendencias y cambios en series de datos temporales, como el retroceso glaciar.

Esta prueba puede detectar tanto tendencias crecientes como decrecientes en la cobertura y el volumen glaciares a lo largo del tiempo, y es una excelente opción para analizar el cambio de la cobertura glaciario del nevado Huaytapallana desde 1993 al 2023, ya que no hay estacionalidad en los datos (se habla de estacionalidad en el contexto del análisis de datos glaciares, se refiere a la variación cíclica que puede presentar la cobertura glaciario o el volumen glaciario a lo largo del año). En ese caso, la prueba de Mann-Kendall es una excelente opción para analizar el cambio de la cobertura glaciario debido a que los datos fueron obtenidos cada 2 años.

La prueba de Mann-Kendall es una prueba estadística no paramétrica, lo que significa que no requiere suposiciones específicas sobre la distribución de los datos. Esto la hace útil cuando los datos pueden no seguir una distribución normal, como suele ser el caso con datos climáticos y glaciares. Esta prueba es robusta ante valores atípicos y no sensibles a distribuciones no normales. Esto la hace adecuada para analizar datos climáticos y glaciares que pueden contener fluctuaciones y variaciones no lineales; es sensible a las tendencias monótonas en los datos a lo largo del tiempo. Puede detectar cambios graduales o abruptos en la serie temporal, lo que es relevante para analizar el retroceso glaciario; es aplicable a datos de diferentes escalas de tiempo, lo que permite analizar tendencias a corto, mediano y largo plazo en el retroceso glaciario y son fácilmente interpretables. El valor tau (τ) proporciona una medida de la fuerza y dirección de la tendencia, mientras que el valor p indica la significancia estadística de la tendencia observada. Aunque los datos pueden tener una distribución normal, la prueba de Mann-Kendall sigue siendo una herramienta valiosa para analizar tendencias en series temporales de datos, como la cobertura glaciario, debido a su robustez y sensibilidad a las tendencias monótonas.

Se usó la regresión lineal para estimar la tasa de cambio anual del área de cobertura glaciario del nevado Huaytapallana en función del tiempo, así como para estimar la tasa de cambio del volumen glaciario durante el periodo 1993 al 2023. También, se utilizó el método de regresión lineal.

Los datos que fueron recopilados de la estación meteorológica Santa Ana presentaron valores faltantes en el conjunto de datos, específicamente para precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Para estimar estos datos faltantes, se usó el proceso de imputación de datos; con métodos predictivos de la media o pmm (Predictive Mean Matching), método de imputación por regresión lineal, método de imputación usando vecinos más cercanos, método de imputación usando missForest. Después, se evaluó el rendimiento de cada método con el error cuadrático medio (RMSE), siendo seleccionado el método pmm.

El método "pmm" es una técnica de imputación que utiliza la información disponible de las variables no faltantes para predecir y asignar valores a las observaciones con valores faltantes,

se toma en cuenta la distribución de los valores observados y tiende a proporcionar imputaciones más realistas y cercanas a la distribución original de los datos. Es particularmente útil cuando hay relaciones complejas entre las variables. Es una técnica que puede ser adecuada para imputar datos meteorológicos, especialmente cuando hay patrones o relaciones complejas entre las variables y el fenómeno del Niño puede influir en estos patrones.

Para evaluar la distribución gaussiana o test de normalidad de datos se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para datos de área de cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y datos de temperatura y precipitación acumulada. Además, se utilizó la prueba de relación lineal y correlación de Pearson para datos paramétricos.

Para el procesamiento de la información, se utilizó el software R-Project.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

4.1.1. Cambio de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023.

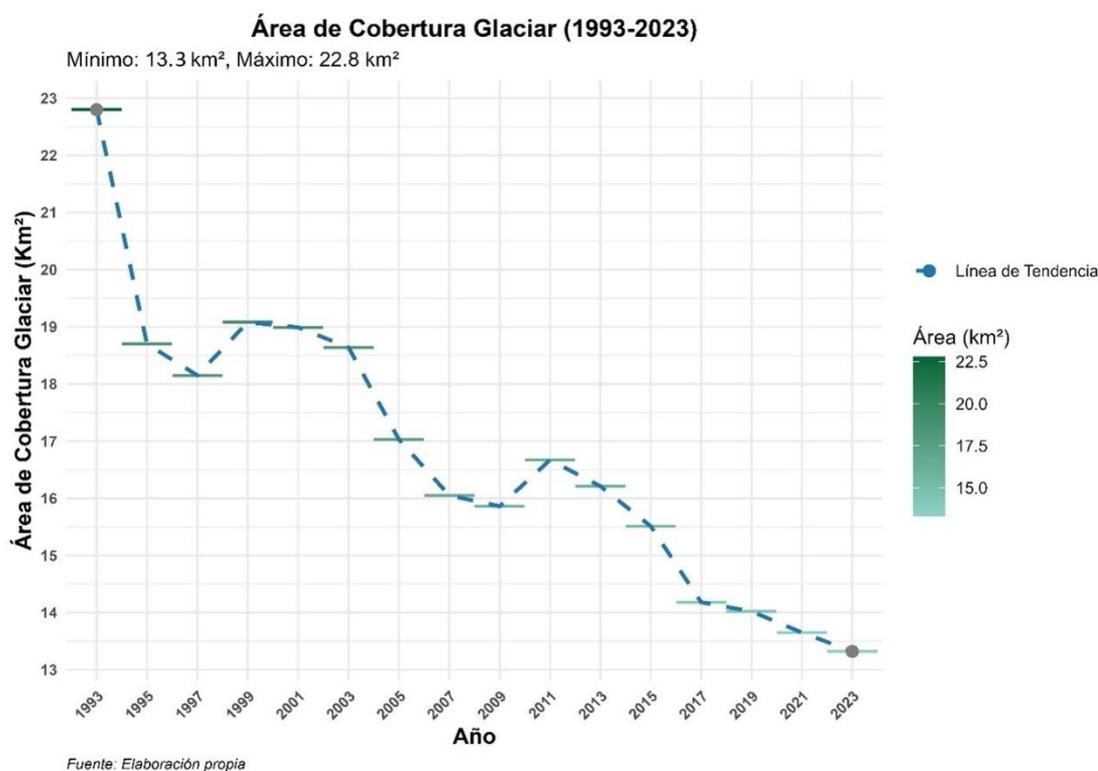


Figura 10. Cambio multitemporal de la cobertura glaciar

De la **figura 10**, el área mínima registrada es de 13.32 km² (año 2023). Este es el valor más bajo de la cobertura glaciar calculada y el valor más alto es 22.80 km², calculado para el año de 1993. Se tiene una disminución significativa de la cobertura glaciar desde 1993 al 2023, siendo -41.58%. Esto indica que el nevado Huaytapallana ha disminuido más del 40% de cobertura glaciar desde 1993 (-9.48 km²). La tasa de cambio promedio desde 1993 hasta 2023 calculado por regresión lineal es de -6.39 km²; este valor negativo indica la disminución de cobertura glaciar por año transcurrido.

Del cambio relativo entre años consecutivos, se tiene -17.98% entre 1993 y 1995, siendo una disminución significativa del área de retroceso glaciar en ese período, seguido de -8.64% entre 2003 y 2005, como se observa en la tabla 16, donde se detalla el cambio relativo entre años consecutivos y proporcionando una visión detallada de la variación de cobertura glaciar año tras año.

Tabla 9. Prueba de Mann-Kendall para comparar el cambio de cobertura glaciar

Score	Var (Score)	Denominator	Tau (τ)	p-value
-102	493.33	120	-0.85	5.4345e-06

Ho: No existe una tendencia significativa en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana.

Ha: Existe una tendencia significativa en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana.

De la **tabla 9**, se observa el análisis de tendencia aplicando la prueba de Mann-Kendall, el valor Score arroja un puntaje negativo (-102). Además, el coeficiente de Kendall's Tau $\tau = -0.85$, sugiere una tendencia negativa o decreciente en el área de retroceso glaciar. Var (Score) indica la dispersión de los datos, un valor alto (493.33) indica variabilidad en los datos. El p-valor es menor al nivel de significancia estadística (< 0.05), habiendo evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula de no existencia de la tendencia en el cambio de cobertura. Por tanto, se afirma que hay una tendencia significativa en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana, que respalda la observación visual de disminución mediante teledetección (figura 13 - figura 44) y como se observa en el gráfico de serie temporal de la figura 10.

4.1.2. Análisis de las variaciones en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993 al 2023.

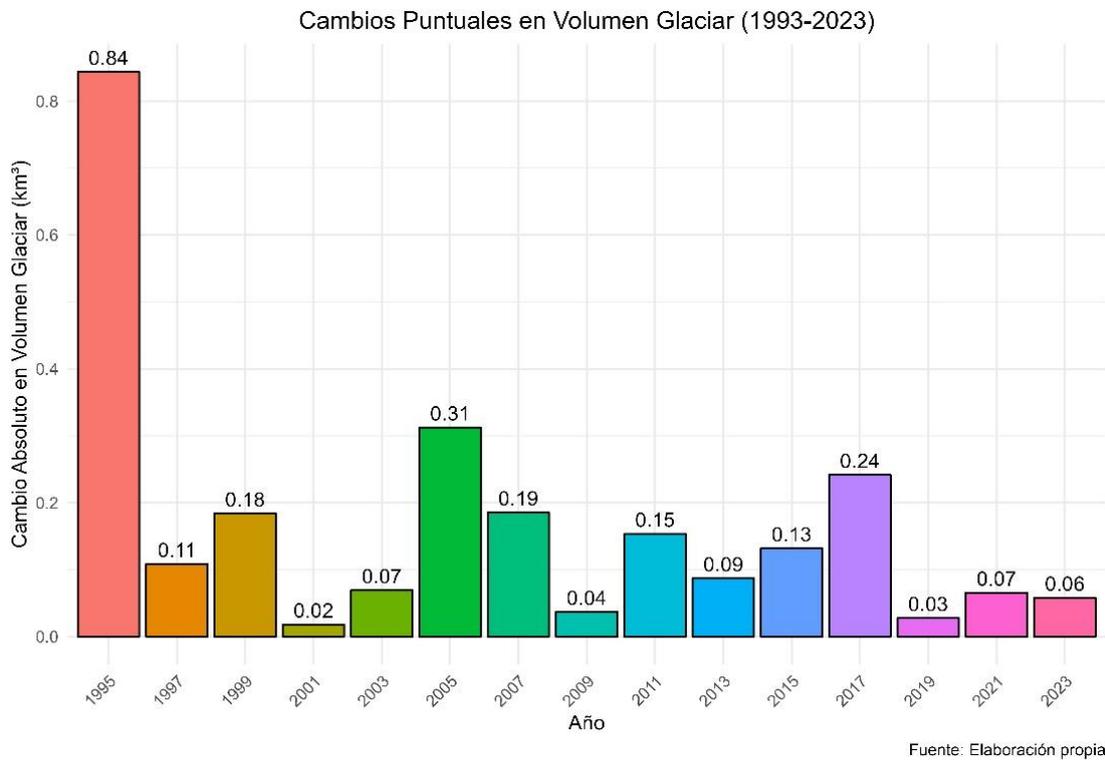
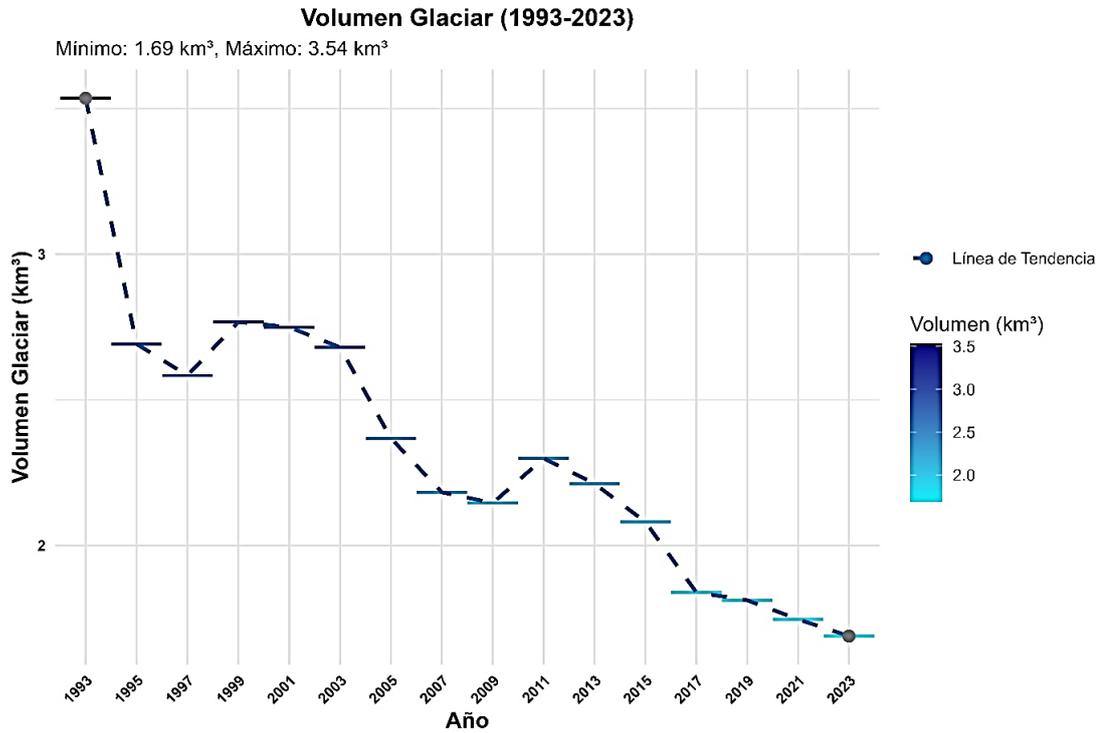


Figura 11. Gráfico de serie de tiempo de volumen glaciar y cambios puntuales.

Tabla 10. Prueba de Mann-Kendall para comparar el cambio del volumen glaciar

Score	Var (Score)	Denominator	Tau (τ)	p-value
-102	493.33	120	-0.85	5.4345e-06

Ho: No existe una tendencia significativa en la disminución del volumen glaciar del nevado Huaytapallana.

Ha: Existe una tendencia significativa en la disminución del volumen glaciar del nevado Huaytapallana.

Del análisis de Tendencias Temporales (Prueba de Mann-Kendall) para el volumen de glaciar, se obtiene un valor de tau= -0.85, este valor indica una tendencia decreciente en el volumen glaciar en los años de evaluación y el p-value = 5.4345e-06 indica una fuerte evidencia estadística para afirmar que existe una tendencia significativa en la disminución del volumen glaciar del nevado Huaytapallana. Se tiene un valor mínimo observado de 1.689 km³ para el 2023, indicando el volumen más bajo calculado; el volumen máximo es 3.535 km³ para el año de 1993, siendo el valor más alto calculado (**figura 11, tabla 18**).

Según la **figura 11**, para el análisis de cambios puntuales, el mayor cambio absoluto en volumen glaciar ocurrió entre los años 1993. El cambio absoluto de 0.84 km³ indica una disminución significativa en el volumen glaciar durante ese período. Entonces, la cantidad de glaciar disminuyó notablemente entre ese año a comparación con los cambios en años siguientes.

Del modelo de regresión usado para estimar la tasa de cambio anual del volumen glaciar es de aproximadamente -0.04713 km³, el valor negativo indica que hay una disminución a lo largo de los años, este cálculo indica que el nevado Huaytapallana está disminuyendo a una tasa aproximada de 0.04713 km³ por año.

4.1.3. Identificar la relación que existe entre la temperatura y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023.

Tabla 11. Test de Shapiro-Wilk para Temperatura y Área glaciar.

Variable	Prueba de normalidad	Interpretación
Área de cobertura glaciar	p-value = 0.3763	No hay evidencia suficiente para rechazar la normalidad
Temperatura media anual	p-value = 0.6758	

Ho: Los datos de área de cobertura glaciar siguen una distribución normal

Ha: Los datos de área de cobertura glaciar no siguen una distribución normal

Ho: Los datos de temperatura media anual siguen una distribución normal

Ha: Los datos de temperatura media anual no siguen una distribución normal

De la tabla 11, se observa que el valor-p es mayor que el nivel de significancia (> 0.05), no se rechaza la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal. Por lo tanto, se asume que los datos del área de cobertura glaciario del nevado Huaytapallana y datos de temperatura media siguen una distribución normal.

Tabla 12. Prueba de correlación de Pearson para temperatura media y área glaciario.

Variable	Prueba de Relación Lineal		Correlación de Pearson
	Estadística F	Valor p	
Temperatura media ~ área glaciario	5.4193	0.03542	Cor = -0.528269

Ho: No existe una correlación significativa entre la temperatura media y el área de cobertura glaciario del nevado Huaytapallana.

Ha: Existe una correlación significativa entre la temperatura media y el área de cobertura glaciario del nevado Huaytapallana

De la tabla 12, se observa que hay una correlación negativa moderada (-0.528269 , $p\text{-value} = 0.03542$) siendo el $p\text{-value}$ es menor que el nivel de significancia (0.05), entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la H_a , entonces decimos que existe una correlación negativa significativa entre la temperatura media y el área de cobertura glaciario del nevado Huaytapallana. Es decir, a medida que la temperatura media aumenta como se observa en la figura 12, el área de cobertura glaciario tiende a disminuir.

4.1.4. Identificar la relación que existe entre la precipitación y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023.

Tabla 13. Test de Shapiro-Wilk para Precipitación acumulada y Área glaciario.

Variable	Prueba de normalidad	Interpretación
Área de cobertura glaciario	$p\text{-value} = 0.3763$	No hay evidencia suficiente para rechazar la normalidad
Precipitación acumulada	$p\text{-value} = 0.05687$	

Ho: Los datos de precipitación acumulada siguen una distribución normal

Ha: Los datos de precipitación acumulada no siguen una distribución normal

De la tabla 13, se observa que el valor-p es mayor que el nivel de significancia (> 0.05); por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal. Por lo tanto, se asume que los datos del área de cobertura glaciario del nevado Huaytapallana y datos de precipitación acumulada siguen una distribución normal.

Tabla 14. Prueba de relación lineal y correlación de Pearson para precipitación acumulada y área glaciar.

Variable	Prueba de Relación Lineal		Correlación de Pearson
	Estadística F	Valor p	
Precipitación acumulada ~ área glaciar	5.4193	0.08199	Cor = -0.4477776

Ho: No hay correlación significativa entre la precipitación acumulada y el área de cobertura glaciar.

Ha: Existe correlación significativa entre la precipitación acumulada y el área de cobertura glaciar.

De la tabla 14, se observa que el valor (p-value) es 0.08199, siendo mayor al nivel de significancia estadística (> 0.05); entonces, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula a un nivel de confianza del 95%.

Hay una correlación negativa moderada (-0.45) entre estas dos variables (precipitación acumulada y área glaciar). Esto significa que cuando la precipitación acumulada líquida aumenta, el área de cobertura tiende a disminuir. Aunque hay una correlación negativa moderada, la prueba de relación lineal no encuentra evidencia estadística suficiente (p-value = 0.08199) para afirmar que la precipitación acumulada tiene un efecto significativo en el área a un nivel de significancia del 5%.

4.2. Discusión de resultados

Referente al objetivo propuesto “Evaluar el cambio de cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993 - 2023”, se evidenció una reducción significativa, obteniendo en el año 1993 un área de 22.8 km² y en el 2023 un área de 13.32 km², que disminuye el área glaciar un total del -41.58% respecto al valor obtenido en el año 1993; y que respalda la efectividad de este resultado con la prueba de Mann Kendall realizado. De esta forma, se estaría coincidiendo con lo investigado por Toribio Quispe (36) donde hace una investigación del mismo campo de estudio y metodología para delimitar la cobertura de nieve (NDSI). En su análisis de 30 años del campo mencionado, determina que en 1990 existía una cobertura nival de 27.73 km² y en el año 2020 un área de 15.71 km²; determinando, de esta manera, que aquel nevado tiene una reducción significativa. Asimismo, presenta una relación con el estudio elaborado por Aedo y Quispe (28), donde realizaron un análisis de retroceso glaciar empleando imágenes Landsat y procesadas mediante técnicas SIG; y que se mostró un resultado de tendencia negativa en cuanto a la reducción de cobertura glaciar. Se pudo comprobar que la reducción glaciar obtenido en aquel frente de estudio es constante, considerándose mediante

análisis estadístico una tendencia negativa significativa y se concluyó que, según aquella estimación, el nevado podría llegar a desaparecer de forma completa para el año 2031. Por su parte, Rojas y Tordocillo (35) realizaron el estudio de un nevado en la cordillera blanca, donde a través del uso de la metodología NDSI y NDWI calculan el área gracias del mencionado nevado, realizado ello concluyen que hay una reducción significativa en el campo estudiado; realizando la cuantificación, se constata que presenta una reducción del 50% respecto al año 2000 y sigue una tendencia de reducción exponencial. De esta manera, se pronostica que, en un aproximado de 41.7 años, aquella fuente de agua en estado sólido disminuirá radicalmente a 1 km².

Para calcular el área glaciar, se usó el método del Índice de nieve diferencial normalizado (NDSI). A través de ello, se logró obtener resultados de área glaciar anteriormente mencionados, aquel resultado tiene una efectividad comprobada a través de los valores arrojados en la prueba estadística de Mann Kendall; coincidiendo así con el estudio que realizaron Monterroso et al. (23), en el que verificaron que el uso del Índice Espectral NDSI delimita apropiadamente sus 3 coberturas glaciares en estudio respecto a las demás; y llegaron a la conclusión que esta metodología a utilizar es la más viable y confiable en cuanto a la delimitación de coberturas de nieve.

Con respecto al objetivo “Analizar las variaciones en el volumen glaciar del Nevado Huaytapallana desde 1993 hasta el 2023”, se realizaron los cálculos propuestos por Bahr y Meier, que arrojó como resultado una reducción de 3.535 km³ a 1.689 km³ en los años de 1993 al 2023 respectivamente; haciéndose un análisis con los resultados de la prueba de Mann Kendall aplicado, se dedujo que existe una tendencia significativa en la reducción del volumen glaciar de este nevado. Coincidiéndose, de esta forma, con lo expuesto por Jara y Casassa (25), en su estudio glaciar San Francisco de periodo 1955 – 2021, donde calculan el volumen a partir del área determinado, y con un análisis de prueba de Mann Kendall concluyen que la disminución del volumen glaciar es significativa y está ajustadamente relacionado con la reducción de área de este. De la misma forma, Alva y Ramos (30) determinan el área glaciar del nevado de la cuenca del río Cañete mediante un análisis aplicando NDSI, y, a partir de ello, hacen uso de la metodología propuesta por Bahr para calcular el volumen de dicho nevado; como resultado se tuvo que los nevados se redujeron de forma significativa, ya que en 1990 se tenía un volumen mayor a 15 km³ y sorpresivamente, para el año 2015, se calculó un volumen de 9.22 km³, lo que demuestra una reducción glaciar del 39.3%. Se concluye que la reducción glaciar de estos nevados se debe al cambio climático, ya que la temperatura del medio va en aumento de manera gradual, lo que es un afecto drástico a los ecosistemas que existen dentro del área.

Respecto a la relación que existe entre la temperatura y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023, se pudo demostrar que, de acuerdo con la prueba de relación lineal y correlación de Pearson para temperatura media y área glaciar, existe una correlación negativa significativa, por lo que se puede afirmar que un aumento en la temperatura está asociado con la disminución del área de cobertura glaciar del nevado Huaytapallana. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Ahmad et al. (20), quienes evaluaron la dinámica glaciar en la cuenca del río Sid al noreste del Himalaya, y obtuvieron del análisis de tendencias para el factor climático temperatura una tendencia significativa. Por ello, la reducción glaciar de la región se le atribuyó al incremento de las temperaturas medias anuales. Del mismo modo, en el estudio realizado por Sahu y Gupta (21) en la cuenca de Chandra, realizaron un inventario y análisis del cambio de los glaciares utilizando datos satelitales, así como datos meteorológicos, estos autores demostraron que si existe un cambio significativo en la temperatura. Esto impactará en la reducción de la superficie glaciar, debido a que tanto el hielo como la nieve reciben mayor energía, lo que conduce a un incremento en la tasa de fusión de estos y como consecuencia la cantidad de ablación supera la cantidad de acumulación de nieve y hielo en un glaciar. Por último, en la investigación de Cabrera y Vega (18), determinaron que la temperatura media anual y la superficie glaciar presentan una correlación negativa, lo que sugiere que un incremento en la temperatura afecta significativamente en la reducción de los glaciares.

Respecto a la relación que existe entre la precipitación y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023, se pudo demostrar que existe una correlación negativa moderada entre ambas variables, lo que sugiere que un incremento en la precipitación acumulada influye en el retroceso del nevado Huaytapallana. Aunque existe una correlación entre las variables, no se encontró suficiente evidencia estadística para afirmar que la precipitación tiene un efecto significativo en el área de cobertura glaciar. Sin embargo, el estudio realizado por Łupikasza et al. (22), en el sistema glaciar de Svalbard, demostró que el impacto de las lluvias está condicionada a la temporada. En otras palabras, al comienzo del invierno, la capa de nieve es aún muy delgada y presenta un sistema de drenaje poco eficiente por lo que la precipitación contribuye a la aceleración del retroceso glaciar, por otro lado, cuando las lluvias caen sobre una cobertura de nieve bien establecida esta favorece a su acumulación. Del mismo modo, en el artículo desarrollado por Kononova et al. (24), analizaron la relación entre la precipitación estival y los patrones de circulación atmosférica en el glaciar Tuyuksu, como resultado obtuvieron que la cantidad y el tipo de precipitación, ya sea líquida o sólida, tienen un impacto en los glaciares de montaña. Además, afirman que la precipitación líquida tiene efectos negativos sobre la acumulación de glaciares y puede aumentar la ablación del hielo superficial mediante el cambio de temperaturas, lo que conduce a la pérdida de la masa glaciar.

Por último, en la investigación realizada por De la Cruz (31), se encuentra que, estadísticamente, no existe relación significativa entre la precipitación y la cobertura glaciar, debido a que, probablemente, en las zonas montañosas, la precipitación no suele ser líquida, además un incremento en las precipitaciones ocasionaría un intercambio de energía con la nieve compactada.

De los estudios revisados, es posible afirmar que el impacto de la precipitación en la reducción de la masa glaciar va a estar condicionada a la temporada y a las características del manto glaciar así como lo señala Łupikasza et al. en su investigación. Asimismo, va a influir la cantidad y el tipo de precipitación ya sea líquida o sólida.

CONCLUSIONES

Concluimos que la cobertura glaciar del Nevado Huaytapallana ha experimentado una fuerte tendencia de retroceso en el área glaciar durante el período analizado (1993 – 2023), teniendo una disminución significativa aproximadamente de 41.58%. Tanto el análisis visual como las pruebas estadísticas, incluida la regresión lineal y la prueba de Mann-Kendall, refuerzan la confianza de la existencia de una tendencia decreciente y sugieren una pérdida constante de área glaciar.

El volumen glaciar del nevado Huaytapallana ha experimentado una tendencia significativa a la disminución desde 1993 hasta 2023. Se tiene una variación considerable en el volumen glaciar a lo largo de los años, con el mayor cambio absoluto ocurriendo entre 1993 a 1995. La tasa de cambio anual estimada indica una disminución promedio de aproximadamente 0.047 km³ por año. Estos hallazgos subrayan la tendencia negativa y la disminución constante en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana.

Durante el período de 1993 al 2023, se ha identificado una relación significativa entre la temperatura y el retroceso del Nevado Huaytapallana. Las pruebas estadísticas revelan que la temperatura media está linealmente relacionada con el retroceso glaciar, respaldando la observación de las líneas de tendencia de que un aumento en las temperaturas se asocia con una disminución en el área de cobertura glaciar. Estos hallazgos proporcionan evidencia sólida de la influencia de las temperaturas en el retroceso glaciar del Nevado Huaytapallana.

Durante el periodo de 1993-2023, se ha evaluado la relación entre la precipitación acumulada líquida y el retroceso del Nevado Huaytapallana. Sin embargo, la prueba de relación lineal y la correlación de Pearson sugieren una correlación negativa moderada entre la precipitación acumulada y el área glaciar, indicando que un aumento en la precipitación líquida se asocia con una disminución en el área de cobertura glaciar. Aunque la correlación es moderada, la falta de significancia estadística en la prueba de relación lineal sugiere que la relación podría no ser lo suficientemente fuerte para ser considerada significativa.

RECOMENDACIONES

1. Para obtener mejores resultados en el cálculo del área glaciar, se recomienda utilizar imágenes satelitales con una resolución menor a 30 m, debido a que brindaría mayor detalle para la delimitación del tipo de cobertura.
2. Las imágenes satelitales obtenidas de la USGS específicamente imágenes Landsat collection 2 level 2 ya no requieren de correcciones previas para su procesamiento, ya que aquellas imágenes ya vienen corregidas radiométrica, geométrica y atmosféricamente según su collection info. Por ello, en futuras investigaciones, se puede trabajar directamente con las imágenes obtenidas de esta fuente para su mayor facilidad en el procesamiento y obtención de resultados.
3. En el trabajo realizado se ha observado que las imágenes satelitales descargadas pueden tener un alto porcentaje de nubosidad siempre y cuando aquella cobertura de nubes no esté presente dentro del área de estudio delimitado en dicha imagen, ya que una imagen puede tener un porcentaje de nubosidad relativamente muy bajo, pero si este intercepta en la zona de estudio aquella imagen no es la adecuada. Por lo tanto, es importante considerar que nuestra zona de estudio debe estar libre de obstáculos que puedan influir en los resultados que se obtenga a través del procesamiento a realizar.
4. En cuanto a la metodología para estimar el volumen glaciar, se recomienda utilizar valores de “c” y “y” mucho más específicos y que vayan de acuerdo con las condiciones actuales del lugar de estudio.
5. Se sugiere utilizar datos de precipitación sólida para comprender de una forma más clara el impacto de las precipitaciones en el retroceso glaciar del nevado Huaytapallana. La incorporación de estos datos adicionales permitiría una exhaustiva evaluación de los impactos asociados con la precipitación.
6. Frente a los resultados obtenidos, se recomienda sensibilizar y concientizar a las personas en el cuidado y preservación de nuestro medio natural que son los glaciares, ya que se ha demostrado la reducción abrupta que se ha tenido a lo largo de 30 años y si esto continúa de forma desconsiderada en unos años no tan lejanos tendremos el gran problema de la adquisición de agua potable, ya que estos glaciares son las fuentes principales del agua de consumo humano de nuestra región.

REFERENCIAS

1. LAURENT, Léa, BUONCRISTIANI, Jean-François, POHL, Benjamin, ZEKOLLARI, Harry, FARINOTTI, Daniel, HUSS, Matthias, MUGNIER, Jean-Louis and PERGAUD, Julien. The impact of climate change and glacier mass loss on the hydrology in the Mont-Blanc massif. *Scientific Reports*. 26 June 2020. Vol. 10, no. 1, p. 10420. DOI 10.1038/s41598-020-67379-7.
2. NÜSSER, Marcus, DAME, Juliane, KRAUS, Benjamin, BAGHEL, Ravi and SCHMIDT, Susanne. Socio-hydrology of “artificial glaciers” in Ladakh, India: assessing adaptive strategies in a changing cryosphere. *Regional Environmental Change*. 1 June 2019. Vol. 19, no. 5, p. 1327–1337. DOI 10.1007/s10113-018-1372-0.
3. PRADHANANGA, Dhiraj and POMEROY, John W. Recent hydrological response of glaciers in the Canadian Rockies to changing climate and glacier configuration. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18 May 2022. Vol. 26, no. 10, p. 2605–2616. DOI 10.5194/hess-26-2605-2022.
4. ALIAGA, Jacinto Arroyo and COSME, Lourdes Artica. Retroceso glaciar del Nevado Huaytapallana como consecuencia del calentamiento global. *Naturaleza y Sociedad*. Online. 30 January 2018. Vol. 1, no. 1. [Accessed 28 June 2023]. Available from: <https://journals.continental.edu.pe/index.php/natsoc/article/view/429>
5. SLATER, Thomas, LAWRENCE, Isobel R., OTOSAKA, Inès N., SHEPHERD, Andrew, GOURMELEN, Noel, JAKOB, Livia, TEPES, Paul, GILBERT, Lin and NIENOW, Peter. Review article: Earth’s ice imbalance. *The Cryosphere*. 25 January 2021. Vol. 15, no. 1, p. 233–246. DOI 10.5194/tc-15-233-2021.
6. TAYLOR, Liam S., QUINCEY, Duncan J., SMITH, Mark W., POTTER, Emily R., CASTRO, Joshua and FYFFE, Catriona L. Multi-Decadal Glacier Area and Mass Balance Change in the Southern Peruvian Andes. *Frontiers in Earth Science*. Online. 2022. Vol. 10. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2022.863933>
7. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. *Reserva hídrica en los glaciares del Perú*. Online. 2021. Autoridad Nacional del Agua. [Accessed 30 April 2024]. Available from: <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4802> Accepted: 2021-05-11T14:40:06Z
8. ECHEGARAY CRISTOBAL, Dafne Zaire. *Efecto de la cobertura vegetal nativa sobre la desglaciación del nevado Huaytapallana en diferentes altitudes*. Online. Huancayo, Perú : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2015. Available from: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3501/Echegaray%20Cristobal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
9. WORTMANN, Michel, DUETHMANN, Doris, MENZ, Christoph, BOLCH, Tobias, HUANG, Shaochun, TONG, Jiang, KUNDZEWICZ, Zbigniew W. and KRYSANOVA, Valentina. Projected climate change and its impacts on glaciers and water resources in the headwaters of the Tarim River, NW China/Kyrgyzstan. *Climatic Change*. 18 April 2022. Vol. 171, no. 3, p. 30. DOI 10.1007/s10584-022-03343-w.
10. PAUCAR ANCCO, John Anthony. *Estudio de retroceso glaciar en el santuario nacional de ampay y determinación de su influencia en la agricultura de la comunidad de huayllabamba, distrito de Abancay, año 2016*. Online. Pregrado. Apurímac : Universidad Tecnológica de los Andes, 2018. [Accessed 30 April 2024]. Available from: <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/113> Accepted: 2018-09-10T19:48:20Z

11. WOOD, Leah R., NEUMANN, Klaus, NICHOLSON, Kirsten N., BIRD, Broxton W., DOWLING, Carolyn B. and SHARMA, Subodh. Melting Himalayan Glaciers Threaten Domestic Water Resources in the Mount Everest Region, Nepal. *Frontiers in Earth Science*. Online. 2020. Vol. 8. [Accessed 18 March 2023]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00128>
12. DAIYROV, Mirlan, KATTEL, Dambaru Ballab, NARAMA, Chiyuki and WANG, Weicai. Evaluating the variability of glacial lakes in the Kyrgyz and Teskey ranges, Tien Shan. *Frontiers in Earth Science*. Online. 2022. Vol. 10. [Accessed 18 March 2023]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2022.850146>
13. CAMAYO, Tiber Cano. Turismo sostenible ante retroceso glaciar, caso Huaytapallana, Junín. *Naturaleza y Sociedad*. Online. 30 January 2018. Vol. 1, no. 1. [Accessed 18 March 2023]. Available from: <https://journals.continental.edu.pe/index.php/natsoc/article/view/424>
14. LOZANO, Arlitt, ALVAREZ, Carlos E. and MOGGIANO, Nabilt. El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*. January 2021. Vol. 12, no. 1, p. 101–108. DOI 10.17268/sci.agropecu.2021.012.
15. ZUBIETA, Ricardo. Biblioteca - Ingemmet Koha › Detalles para: Estudio de la dinámica superficial de glaciares en la Cordillera Huaytapallana por sensoramiento remoto: periodo 1976 - 2006 Huancayo - Perú. Online. 2010. [Accessed 11 March 2023]. Available from: <https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=41795>
16. SILVA VIDAL, Yamina. Para entender la variabilidad climática. *Diario Oficial El Peruano*. Online. 2023. [Accessed 12 January 2024]. Available from: <https://elperuano.pe/noticia/203123-para-entender-la-variabilidad-climatica>
17. CASTILLO VERGARA, Francisco Nemecio. *Análisis multitemporal de la dinámica glaciar y su influencia sobre lagunas y humedales alto andinos en la Cordillera Blanca - Perú, periodo 1989-2019*. Online. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2022. [Accessed 12 January 2024]. Available from: <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5053> Accepted: 2022-06-15T21:42:44Z publisher: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo
18. CABRERA MONTENEGRO, Estefanía Belén and VEGA TAMBA, Joe Carlos. *Análisis del retroceso glaciar en los Andes del Norte del Ecuador durante un período de 30 años empleando teledetección*. Online. bachelorThesis. 2022. [Accessed 10 March 2024]. Available from: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12024> Accepted: 2022-02-03T21:25:46Z
19. GALLEGOS CASTRO, Elvia, BRITO CHASILUISA, Cornelia, SERRANO GINÉ, David and GALARRÁGA SÁNCHEZ, Remigio. Análisis de la variación temporal y espacial de la cobertura glaciar del nevado cayambe, ecuador, mediante fotografías aéreas e imágenes landsat. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*. 2018. No. 22, p. 4.
20. AHMAD, Syed Towseef, AHMED, Rayees, WANI, Gowhar Farooq, SHARMA, Parmanand and AHMED, Pervez. Glacier changes in Sind basin (1990–2018) of North-western Himalayas using earth observation data. *Modeling Earth Systems and Environment*. 1 June 2022. Vol. 8, no. 2, p. 2567–2579. DOI 10.1007/s40808-021-01246-w.

21. SAHU, Rakesh and GUPTA, R. D. Glacier mapping and change analysis in Chandra basin, Western Himalaya, India during 1971–2016. *International Journal of Remote Sensing*. 2020. Vol. 41, no. 18, p. 6914–6945. DOI 10.1080/01431161.2020.1752412.
22. ŁUPIKASZA, Ewa B., IGNATIUK, Dariusz, GRABIEC, Mariusz, CIELECKA-NOWAK, Katarzyna, LASKA, Michał, JANIA, Jacek, LUKS, Bartłomiej, USZCZYK, Aleksander and BUDZIK, Tomasz. The Role of Winter Rain in the Glacial System on Svalbard. *Water*. 2019. Vol. 11, no. 2, p. 334. DOI 10.3390/w11020334.
23. MONTERROSO-TOBAR, Mario Fernando, LONDOÑO-BONILLA, Jhon Makario and SAMSONOV, Sergey. Estimación del retroceso glaciario en los volcanes Nevado del Ruiz, Tolima y Santa Isabel, Colombia a través de imágenes ópticas y Din-SAR. *SciELO*. 2018. Vol. 85, no. 206, p. 329–337. DOI 10.15446/dyna.v85n206.66570.
24. KONONOVA, Nina K., PIMANKINA, Nina V., YERISKOVSAYA, Lyudmila A., LI, Jing, BAO, Weijia and LIU, Shiyin. Effects of atmospheric circulation on summertime precipitation variability and glacier mass balance over the Tuyuksu Glacier in Tianshan Mountains, Kazakhstan. *Journal of Arid Land*. 2015. Vol. 7, no. 5, p. 687–695. DOI 10.1007/s40333-015-0083-3.
25. JARA ORTEGA, Solange Margarita and CASASSA ROGAZINSKI, Gino. Variaciones de área y volumen del sistema glaciario San Francisco en el periodo 1955-2020, a partir de imágenes satelitales y ley de potencias, cuenca del río Volcán, Región Metropolitana. *Aqua-LAC*. 2021. Vol. 13, no. 2, p. 42–52.
26. MARDONES F., María, AGUAYO A., Mauricio, SMITH A., Ernesto and RUIZ L., Paulina. Retroceso glacial reciente en el Campo de Hielo Norte, región de Aysén, Chile: relación con variaciones climáticas. *Revista de geografía Norte Grande*. 2018. No. 69, p. 121–147. DOI 10.4067/S0718-34022018000100121.
27. FERNÁNDEZ GARCÍA, Catalina Muriette. *Cambios del área del glaciar Grey, Parque Nacional Torres del Paine, y su estudio a través de la climatología y la dendrocronología*. Online. Pregrado. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2021. [Accessed 30 April 2024]. Available from: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186656> Accepted: 2022-07-12T20:57:11Z publisher: Universidad de Chile
28. AEDO TAPIA, Jainor Daly and QUISPE CURASCO, Wilson. *Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Chicón mediante el análisis multitemporal entre los años 1985-2021, Cusco*. Online. Universidad César Vallejo, 2022. [Accessed 31 January 2024]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91586> Accepted: 2022-07-13T16:22:39Z
29. SERRANO, María Rosa. Impacto del cambio climático en el retroceso glaciario de la subcuenca del Río Sahuanay, provincia de Abancay en el 2017. *Universidad César Vallejo*. Online. 2018. [Accessed 11 March 2023]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/27194> Accepted: 2019-02-14T14:59:31Z
30. ALVA HUAYANEY, Miguel and RAMOS ALONZO, Robert. Evolución de los glaciares de los nevados Collquepucre, Llongote, Pariacaca y Ticla en la cuenca del río Cañete. *Investigaciones Sociales*. 2017. Vol. 21, no. 38, p. 97–106. DOI 10.15381/is.v21i38.14219.
31. DE LA CRUZ CHAVEZ, Noemi Miriam. *Varibilidad espacio-temporal de la cobertura glaciario del nevado Huaytapallana y su relación con los elementos climáticos precipitación y temperatura durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú*. Online. Junín:

Universidad Privada del Norte, 2023. [Accessed 1 February 2024]. Available from: <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3447308>Accepted: 2023-08-29T16:42:53Zpublisher: Universidad Privada del Norte

32. SOTO CARRIÓN, Carolina, ZUÑIGA NEGRÓN, Juan José, PAUCAR ANCCO, Jhon, JIMÉNEZ MENDOZA, Wilber, IBARRA CABRERA, Manuel J., NARVÁEZ LICERAS, Alejandro and PAUCAR ANCCO, Sheila. Multi-Temporal Analysis of the Glacier Retreat Using Landsat Satellite Images in the Nevado of the Ampay National Sanctuary, Peru. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 30 March 2022. Vol. [10], no. [1], p. [1]-[15].

33. CCALLATA TAYPE, Isabel Karen. *Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Salluyo de la cordillera Apolobamba y la influencia de los elementos climáticos, en el período 1985-2020*. Online. Universidad Cesar Vallejo, 2021. [Accessed 25 June 2023]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60169>Accepted: 2021-05-12T19:57:58Zpublisher: Universidad César Vallejo

34. RAMOS ALONZO, Robert Bartolome. *Evolución de la cobertura glaciar del nevado Coropuna y su relación con el entorno climático*. Online. Postgrado. Lima : Universidad Nacional Agraria La Molina, 2018. [Accessed 30 April 2024]. Available from: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3321>Accepted: 2018-05-25T20:41:57Zpublisher: Universidad Nacional Agraria La Molina

35. ROJAS ACUÑA, Joel and TORDOCILLO PUCHUC, Juvenal. Estimación del Área de la Superficie y el Cambio de Volumen del Glaciar del Nevado Champará (Cordillera Blanca, Perú) a partir de las Imágenes y los Modelos de Elevación Digital del Sensor ASTER / Terra (2000-2010). *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. 2018. P. 21. DOI 10.36580/rgem.i4.23-42.

36. TORIBIO QUISPE, Sonia Magaly. *Análisis del efecto espacio - temporal del retroceso glaciar del nevado Huaytapallana en los bofedales del Área de Conservación Regional Huaytapallana en el periodo de 1990-2020, Junín - 2022*. Online. Universidad Continental, 2023. [Accessed 10 February 2024]. Available from: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13020>Accepted: 2023-06-13T20:27:23Zpublisher: Universidad Continental

37. AGUAS ANDINAS. *Glaciares y cuencas andinas*. Online. Chile : Marc Turrel, 2019. ISBN 978-956-09-2711-8. Available from: <https://sustentabilidad.aguasandinas.cl/documents/33547/34784/Libro+Digital+GLACIARES+Y+CUENCAS+ANDINAS.pdf>

38. ERMOLIN, Evgeniy, SILVA BUSSO, Adrián and GLAZOVSKIY, Andrey. *Ambientes glaciares y periglaciares: formación y desarrollo*. Online. 1era edición. Argentina, 2015. ISBN 978-987-33-7537-8. Available from: <http://www.greencross.org.ar/download/Libro-Glaciares.pdf>

39. MINISTERIO DE L AMBIENTE. Diez claves para conocer más sobre Montañas, Glaciares y Agua. *Montañas, Glaciares y Agua*. Online. 2014. [Accessed 4 November 2023]. Available from: <https://www.minam.gob.pe/glaciares/diez-claves-para-conocer-mas-sobre-montanas-glaciares-y-agua/>

40. MILNER, Alexander M., KHAMIS, Kieran, BATTIN, Tom J., BRITAIN, John E., BARRAND, Nicholas E., FÜREDER, Leopold, CAUVY-FRAUNIE, Sophie, GÍSLASON, Gísli Már, JACOBSEN, Dean, HANNAH, David M., HODSON, Andrew J., HOOD, Eran, LENCIONI, Valeria, ÓLAFSSON, Jón S., ROBINSON, Christopher T., TRANTER, Martyn

and BROWN, Lee E. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 12 September 2017. Vol. 114, no. 37, p. 9770–9778. DOI 10.1073/pnas.1619807114.

41. MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO. Glaciares. Online. 2018. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <https://www.midagri.gob.pe/portal/42-sector-agrario/recurso-agua/328-glaciares>

42. SERVICIO DE PARQUES NACIONALES. Anatomy of a Glacier - Glacier Bay National Park & Preserve (U.S. National Park Service). Online. 2017. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <https://www.nps.gov/glba/learn/nature/anatomy-of-a-glacier.htm>

43. *Análisis de cobertura glaciar*. Online. [mp4]. 2022. Available from: <https://mastergis.com/panel/curso/82720/video/3378>

44. PIÑA, Carlos Enrique. Cambio climático, inseguridad alimentaria y obesidad infantil. *Revista Cubana de Salud Pública*. 13 January 2020. Vol. 45, p. e1964.

45. GONZÁLEZ, Edgar J. and MEIRA, Pablo Á. Educación para el cambio climático: ¿Educar sobre el clima o para el cambio? *Perfiles educativos*. June 2020. Vol. 42, no. 168, p. 157–174. DOI 10.22201/iisue.24486167e.2020.168.59464.

46. SECRETARIA DE AMBIENTE Y CAMBIO CLIMÁTICO. La Secretaria de Ambiente y Cambio Climático rionegrina convocó a Audiencia Pública Virtual. *Ecos de la tierra*. Online. 26 November 2020. [Accessed 16 March 2023]. Available from: <https://ecosdelatierra.com.ar/la-secretaria-de-ambiente-y-cambio-climatico-rionegrina-convoco-a-audiencia-publica-virtual/>

47. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA. *Inventario Nacional de Glaciares Las Cordilleras Glaciares del Perú 2018*. Online. 1era edición. Cusco, Perú, 2018. Available from: <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/69842963-64e0-4de9-9c24-f886a5c5a40d>

48. VUILLE, Mathias, CAREY, Mark, HUGGEL, Christian, BUYTAERT, Wouter, RABATEL, Antoine, JACOBSEN, Dean, SORUCO, Alvaro, VILLACIS, Marcos, YARLEQUE, Christian, ELISON TIMM, Oliver, CONDOM, Thomas, SALZMANN, Nadine and SICART, Jean-Emmanuel. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*. 1 January 2018. Vol. 176, p. 195–213. DOI 10.1016/j.earscirev.2017.09.019.

49. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA. *Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares*. Online. 2017. [Accessed 17 April 2023]. Available from: <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/63411650-3ff1-475e-acc9-a09fdfe2b16d>

50. CHUVIECO, Emilio. *Fundamentos de la teledetección*. Segunda edición. Madrid : Ediciones Rialp S.A., 1995. ISBN 84-321-280-2. Google-Books-ID: aKsNXCVcQC

51. OLAYA, Víctor. *Sistemas de información geográfica*. Online. [s.n.], 2014. [Accessed 26 June 2023]. Available from: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/25452> Accepted: 2021-04-08T13:05:04Z

52. LILLESAND, Thomas and KIEFER, Ralph W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Online. 7th Edition. New York : Wiley, 2015. [Accessed 26 June 2023].

ISBN 978-1-118-34328-9. Available from: <https://www.wiley.com/en-it/Remote+Sensing+and+Image+Interpretation%2C+7th+Edition-p-9781118343289>

53. BRAVO MORALES, Nino Frank. *Teledetección Espacial*. Online. Huánuco : Geomática Ambiental S.R.L, 2018. [Accessed 25 June 2023]. Available from: <https://acolita.com/descargar-libro-pdf-teledeteccion-espacial/>

54. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat 5 | U.S. Geological Survey. Online. 2022. [Accessed 13 July 2023]. Available from: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>

55. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat 7 | U.S. Geological Survey. Online. 2022. [Accessed 13 July 2023]. Available from: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>

56. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Landsat 8 Data Users Handbook | U.S. Geological Survey*. Online. 2019. [Accessed 27 June 2023]. Available from: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook>

57. VILLON, Carmen, VARGAS, Christian and PASAPERA, Jose. Analisis multitemporal del retroceso glaciario con imagenes landsat y sentinel. . 1999. P. 6.

58. SINGH, Vijay, SINGH, Pratap and HARITASHYA, Umesh. *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*. Online. USA : Springer, 2011. ISBN 978-90-481-2641-5. Available from: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-encyclopediaofsnowicean.pdf>

59. IDEAM - UNAL. *La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia*. Online. 1era edición. Bogotá, Colombia, 2018. ISBN 978-958-8067-97-1. Available from: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>

60. OTTO, Jan-Christoph, PRASICEK, Günther, BLÖTHER, Jan and SCHROTT, Lothar. 2.05 - GIS Applications in Geomorphology. In : HUANG, Bo (ed.), *Comprehensive Geographic Information Systems*. Online. Oxford: Elsevier, 2018. p. 81–111. [Accessed 16 March 2023]. ISBN 978-0-12-804793-4.

61. TURABIÁN, José and PÉREZ, Benjamín. Glaciar. *Revista Clínica de Medicina de Familia*. 2022. Vol. 15, no. 1, p. 55–56.

62. LABORATORIO DE GLACIOLOGIA. Glaciares de Chile. Online. Chile, 2020. Available from: <https://glaciologia.cl/glosario/glosario-pag-1/balance-de-masa-2/>

63. BLANCAS, Alexis Nicolás Ibáñez, CORZO, Andrea Ximena Miranda and SÁNCHEZ, Erick Álvarez. Cambios en las áreas nevadas y tendencias en la cobertura de nieve para el 2030 en el sur del Perú. *Terra. Nueva Etapa*. Online. 2020. Vol. XXXVI, no. 59. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.redalyc.org/journal/721/72166221002/html/>

64. LIANG, Shunlin and WANG, Jindi (eds.). Chapter 16 - Precipitation. In : LIANG, Shunlin and WANG, Jindi (eds.), *Advanced Remote Sensing (Second Edition)*. Online. Academic Press, 2020. p. 621–647. [Accessed 20 March 2023]. ISBN 978-0-12-815826-5.

65. CORREA, Luis Carlos, OCAMPO, Olga Lucía and ALBA, Mauricio Fernando. Análisis de tendencia de temperatura y precipitación para el departamento de Caldas (Colombia), mediante wavelets. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. June 2021. Vol. 31, no. 1, p. 37–52. DOI 10.18359/rcin.4900.

66. VAN DER VEEN, C. J. 4.05 - Ice Properties and Glacier Dynamics. In : SHRODER, John (Jack) F. (ed.), *Treatise on Geomorphology (Second Edition)*. Online. Oxford : Academic Press, 2022. p. 63–74. [Accessed 20 March 2023]. ISBN 978-0-12-818235-2.
67. SATTAR, Ashim, GOSWAMI, Ajanta, KULKARNI, Anil V. and DAS, Pritam. Glacier-Surface Velocity Derived Ice Volume and Retreat Assessment in the Dhauliganga Basin, Central Himalaya – A Remote Sensing and Modeling Based Approach. *Frontiers in Earth Science*. Online. 2019. Vol. 7. [Accessed 20 March 2023]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00105>
68. MACKAY, Rubén, FRANCO, Diana Elizabeth and VILLACIS, Pamela Wendy. El pensamiento crítico aplicado a la investigación. *Revista Universidad y Sociedad*. March 2018. Vol. 10, no. 1, p. 336–342.
69. ESCUDERO, Carlos and CORTEZ, Liliana. *Técnicas y métodos cualitativos para la investigación científica*. Online. Machala : Universidad Técnica de Machala, 2018. [Accessed 23 December 2022]. Colección REDES 2018. Available from: <https://universoabierto.org/2020/10/01/tecnicas-y-metodos-cualitativos-para-la-investigacion-cientifica/>
70. JIMÉNEZ, Larry and TECSE, Cesar. Revisión sistemática de desglaciación, extensión superficial y formación de lagos en la cordillera de los Andes-Perú mediante métodos de teledetección, 2020. *Repositorio Institucional - UCV*. Online. 2021. [Accessed 29 March 2023]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60526> Accepted: 2021-05-14T20:41:11Z
71. HERNÁNDEZ, Roberto and MENDOZA, Christian. *Metodología de la investigación*. México, 2018.
72. HUACANI, Walquer. Aplicación de la teledetección en la desglaciación del nevado del ampay relacionado al cambio climático entre 1980 - 2015. Online. 2019. [Accessed 29 March 2023]. Available from: <https://repositorio.uap.edu.pe/xmlui/handle/20.500.12990/9725> Accepted: 2022-07-01T02:01:28Z
73. ARIAS, José Luis and COVINOS, Mitsuo. *Diseño y metodología de la investigación*. Online. Enfoques Consulting EIRL., 2021. [Accessed 27 December 2022]. ISBN 978-612-48444-2-3. Available from: <http://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2260> Accepted: 2021-06-07T17:49:30Z
74. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos and BAPTISTA LUCIO, Pilar. *Metodología de la Investigación*. 6ta. Mexico : McGRAW-HILL, 2014. ISBN 978-1-4562-2396-0.
75. DUTTA, Shruti and RAMANATHAN, AL. Estimation of the glacier cover variation through remote sensing techniques: A study in Ravi and Bhaga Basin, Western Himalayas (1972-2006). *Esri India User Conference*. Online. 2017. Available from: <https://www.esri.in/~media/esri-india/files/pdfs/events/2017/indiauc/papers/UCP043-estimation-of-the-glacier-cover-variation-through-remote-sensing-techniques.pdf>
76. EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER. *Landsat 8-9 Collection 2 Level 2 Science Product Guide*. Online. 2023. [Accessed 10 August 2023]. Available from: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-collection-2-level-2-science-product-guide>

77. EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER. *Landsat 4-7 Collection 2 Level 2 Science Product Guide*. Online. 2021. [Accessed 10 August 2023]. Available from: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-4-7-collection-2-level-2-science-product-guide>
78. FRANCO, Rodolfo. *Composiciones Landsat en ArcGIS. Guía Básica*. Online. 2017. [Accessed 11 September 2023]. Available from: <http://wp.me/p2IwQU-1bh>
79. BANERJEE, Argha. Volume-area scaling for debris-covered glaciers. *Journal of Glaciology*. 2020. Vol. 66, no. 259, p. 880–886. DOI 10.1017/jog.2020.69.
80. BAHR, David B., MEIER, Mark F. and PECKHAM, Scott D. The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. Vol. 102, no. B9, p. 20355–20362. DOI 10.1029/97JB01696.
81. BAHR, David B., PFEFFER, W. Tad and KASER, Georg. A review of volume-area scaling of glaciers. *Reviews of Geophysics*. 2015. Vol. 53, no. 1, p. 95–140. DOI 10.1002/2014RG000470.

ANEXOS

Tabla 15. *Área de cobertura glaciar calculado por teledetección.*

Año	Área (Km²)
1993	22.80
1995	18.70
1997	18.15
1999	19.08
2001	18.99
2003	18.64
2005	17.03
2007	16.05
2009	15.86
2011	16.67
2013	16.21
2015	15.51
2017	14.18
2019	14.02
2021	13.65
2023	13.32

Tabla 16. *Cambio relativo entre años consecutivos de la cobertura glaciar.*

Periodo	Cambio relativo (%)	Situación
1993 - 1995	-17.98	Disminución
1995 - 1997	-2.94	Disminución
1997 - 1999	5.12	Aumento
1999 - 2001	-0.47	Disminución
2001 - 2003	-1.84	Disminución
2003 - 2005	-8.64	Disminución
2005 - 2007	-5.75	Disminución
2007 - 2009	-1.18	Disminución
2009 - 2011	5.11	Aumento
2011 - 2013	-2.76	Disminución
2013 - 2015	-4.32	Disminución
2015 - 2017	-8.58	Disminución
2017 - 2019	-1.13	Disminución
2019 - 2021	-2.64	Disminución
2021 - 2023	-2.42	Disminución

Tabla 17. *Volumen glaciar del nevado Huaytapallana calculado por teledetección.*

Año	Volumen (km³)
1993	3.5352
1995	2.6917
1997	2.5834
1999	2.7672
2001	2.7492
2003	2.6801
2005	2.3677
2007	2.1824
2009	2.1456
2011	2.2991
2013	2.2122
2015	2.0806
2017	1.8391
2019	1.8117
2021	1.7464
2023	1.6887

Tabla 18. *Cambios absolutos de volumen glaciar para cada año.*

Año	Volumen (km³)	Cambio absoluto (km³)
1993	3.5352	
1993-1995	2.69	0.844
1995-1997	2.58	0.11
1997-1999	2.77	0.18
2001-2001	2.75	0.02
2001-2003	2.68	0.07
2003-2005	2.37	0.31
2005-2007	2.18	0.19
2007-2009	2.15	0.04
2009-2011	2.30	0.15
2011-2013	2.21	0.09
2013-2015	2.08	0.13
2015-2017	1.84	0.24
2017-2019	1.81	0.03
2019-2021	1.75	0.07
2021-2023	1.69	0.06

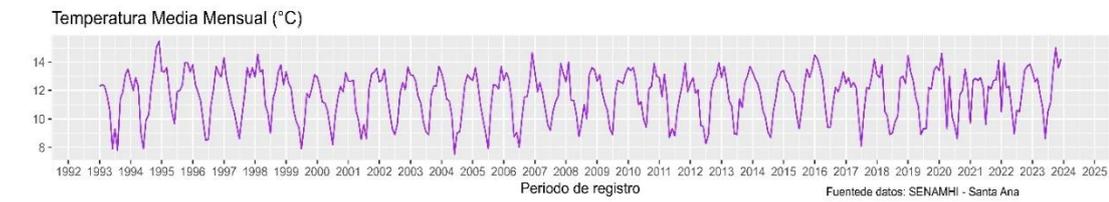
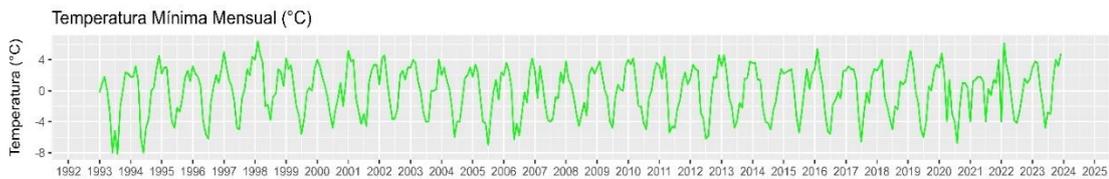
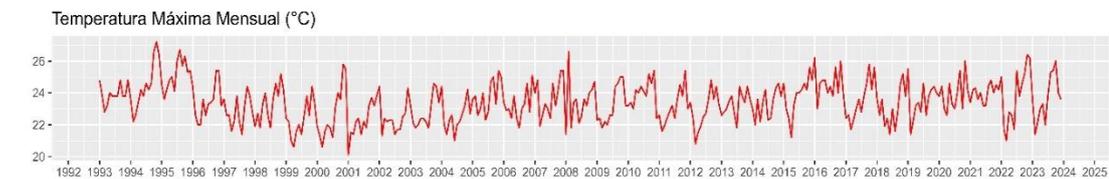
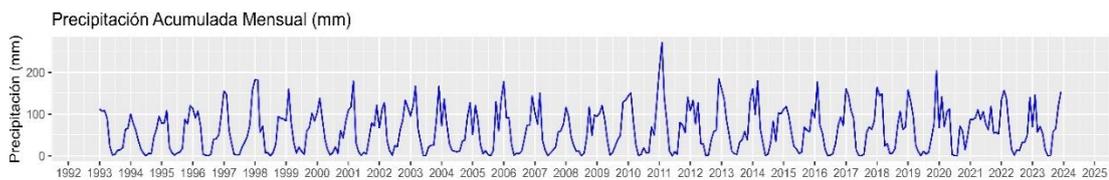
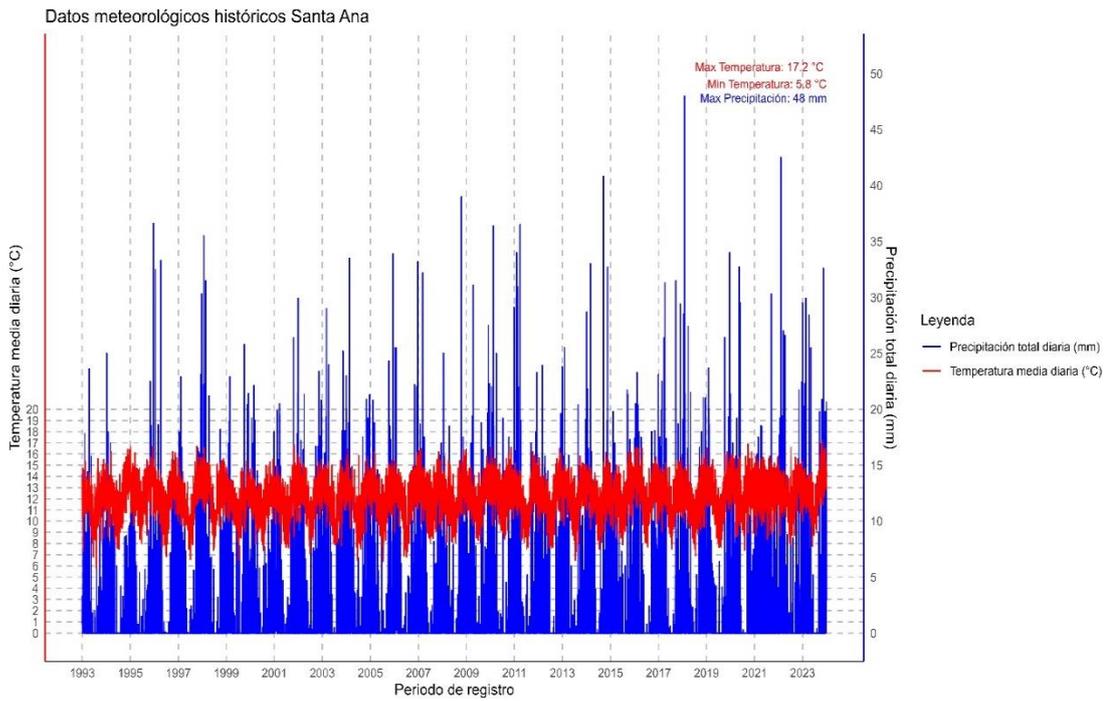


Figura 12. Serie de tiempo de la precipitación acumulada y las temperaturas desde 1993 hasta el año 2023 de la estación meteorológica Santa Ana del SENAMHI.

Tabla 19. *Matriz de consistencia*

Dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con la variabilidad climática desde 1993-2023.				
Titulo	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL		Método: El estudio utilizará el método de tipo aplicada. Asimismo será cualitativo porque incluye una metodología de recolección de información no numérica.
PG: ¿Qué relación existe entre la dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y la variabilidad climática desde 1993-2023?	OG: Evaluar la relación que existe entre la dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y la variabilidad climática desde 1993-2023.	HG: Existe relación significativa entre la dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y la variabilidad climática durante los años de 1993 al 2023.		Alcance o nivel: Correlacional
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICA	V.I.: Variabilidad climática	Diseño: No experimental y longitudinal
PE1: ¿Cuál es el cambio de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023?	OE1: Evaluar el cambio de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023.	HE1: Existe una tendencia significativa en los cambios de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante los años de 1993 al 2023.	V.D.: Dinámica glaciar	Población y muestra: La población constituye los glaciares de la cordillera Huaytapallana en Junín, mientras que la muestra es el nevado Huaytapallana en los periodos de estudio comprendido desde 1993 hasta el 2023.
PE1: ¿Cuál es la variación en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023?	OE2: Analizar las variaciones en el volumen glaciar del nevado Huaytapallana desde 1993-2023.	HE2: Existe una tendencia significativa en las variaciones del volumen glaciar del nevado		
PE1: ¿Cuál la relación que existe entre la temperatura y el retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023?	OE3: Identificar la relación que existe entre la temperatura y el retroceso del nevado			
PE1: ¿Cuál es la relación que existe entre la precipitación y el				

Título Dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con la variabilidad climática desde 1993-2023.				
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
retroceso del nevado Huaytapallana durante el periodo 1993-2023?	<p>Huaytapallana durante el periodo 1993-2023.</p> <p>OE4: Identificar la relación que existe entre la precipitación y el retroceso del nevado Huaytapallana durante periodo 1993-2023.</p>	<p>Huaytapallana durante los años de 1993 al 2023.</p> <p>HE3: Existe relación significativa entre la temperatura y la disminución del área de cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante los años de 1993 al 2023.</p> <p>HE4: Existe relación significativa entre la precipitación y la disminución del área de cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante los años de 1993 al 2023.</p>		

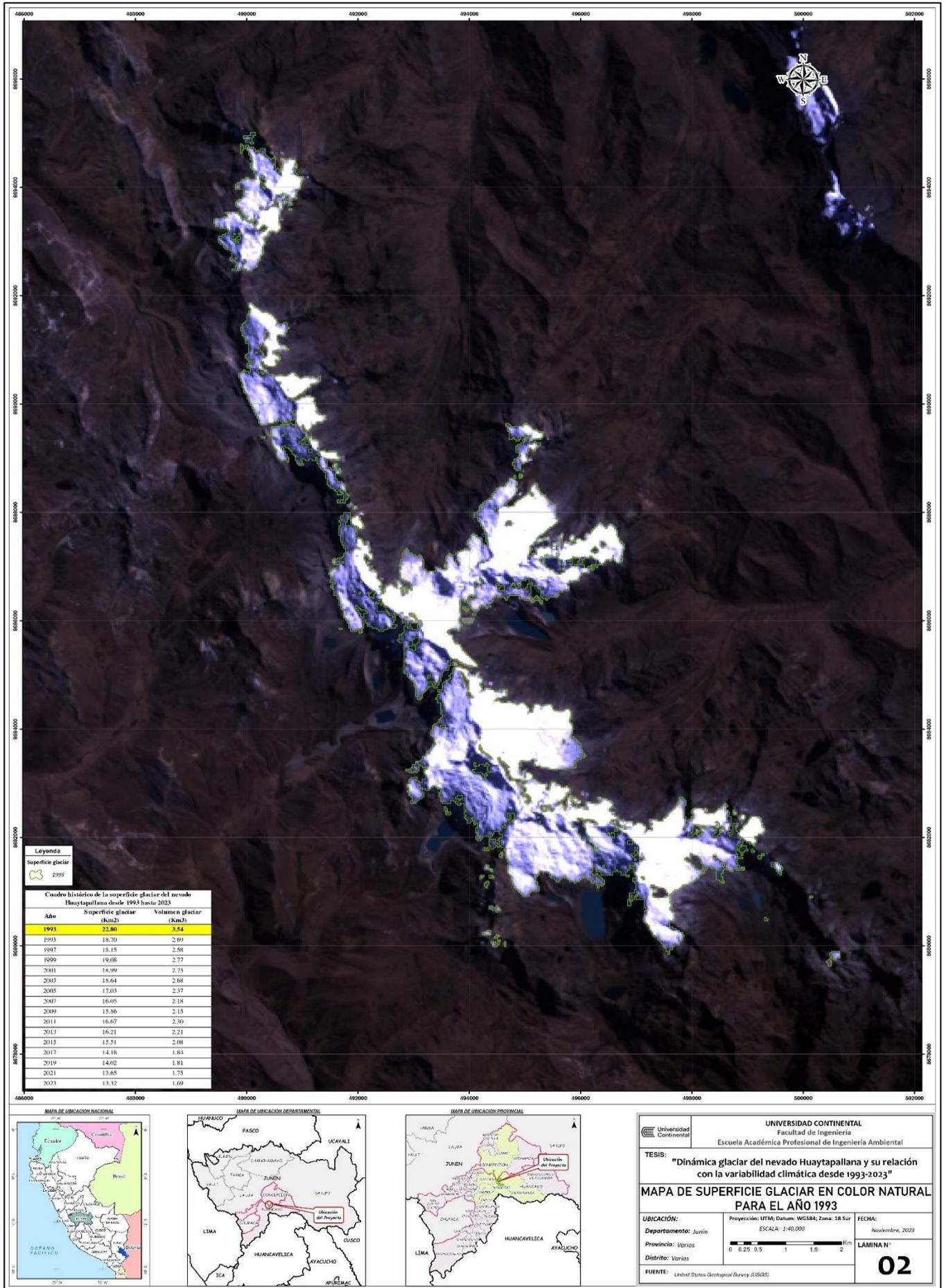


Figura 13. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 1993.

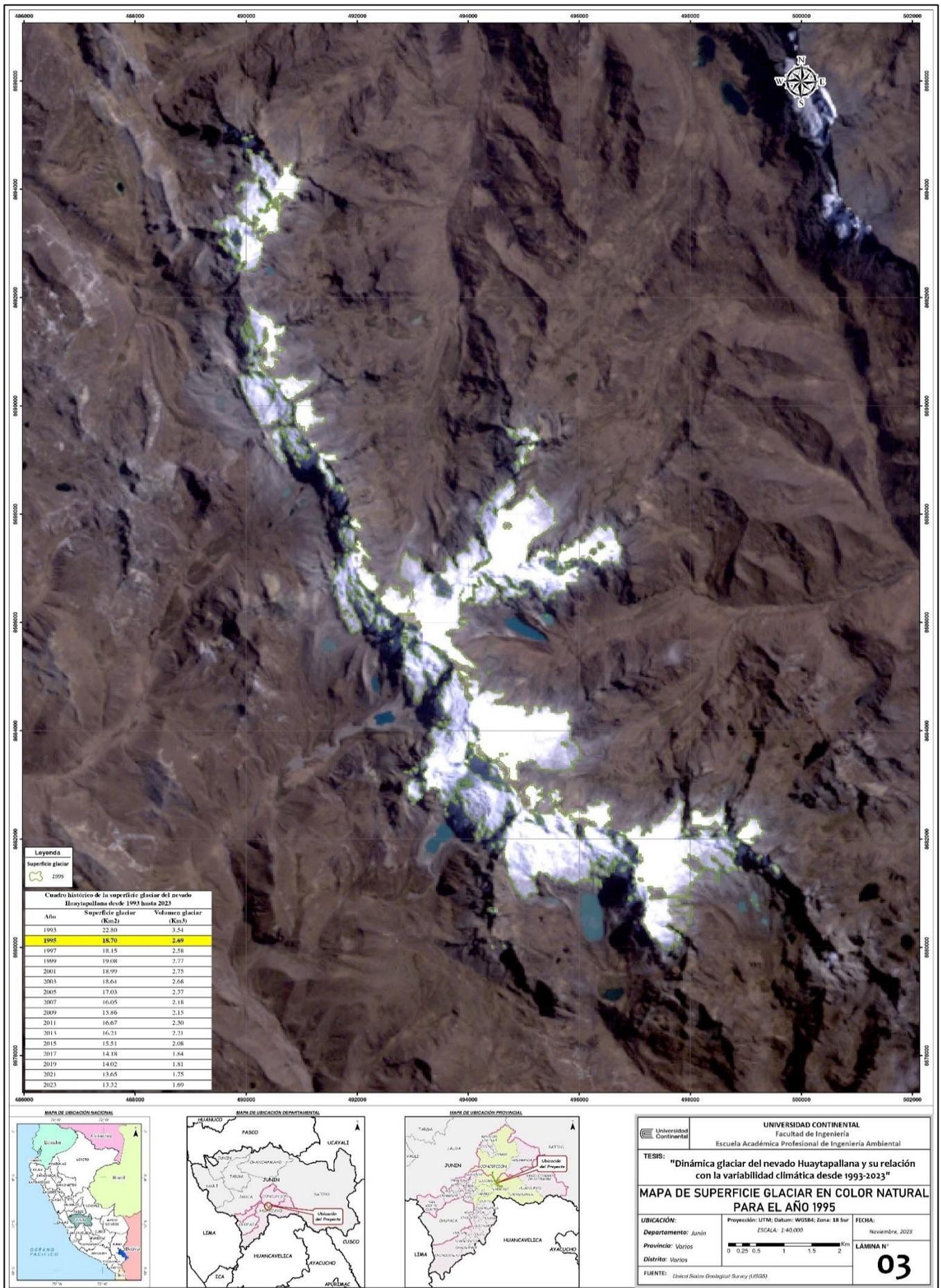


Figura 14. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 1995.

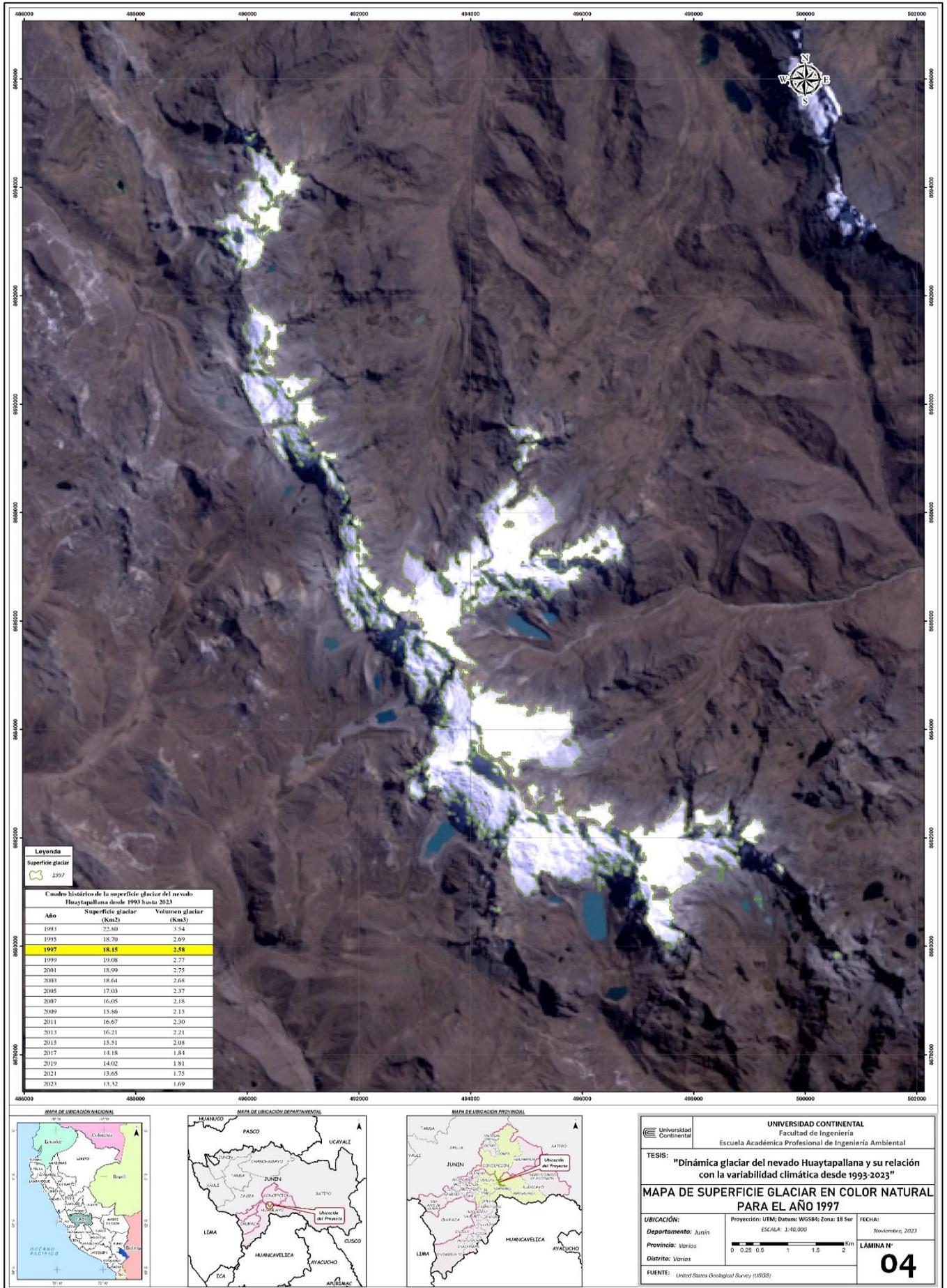


Figura 15. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 1997.

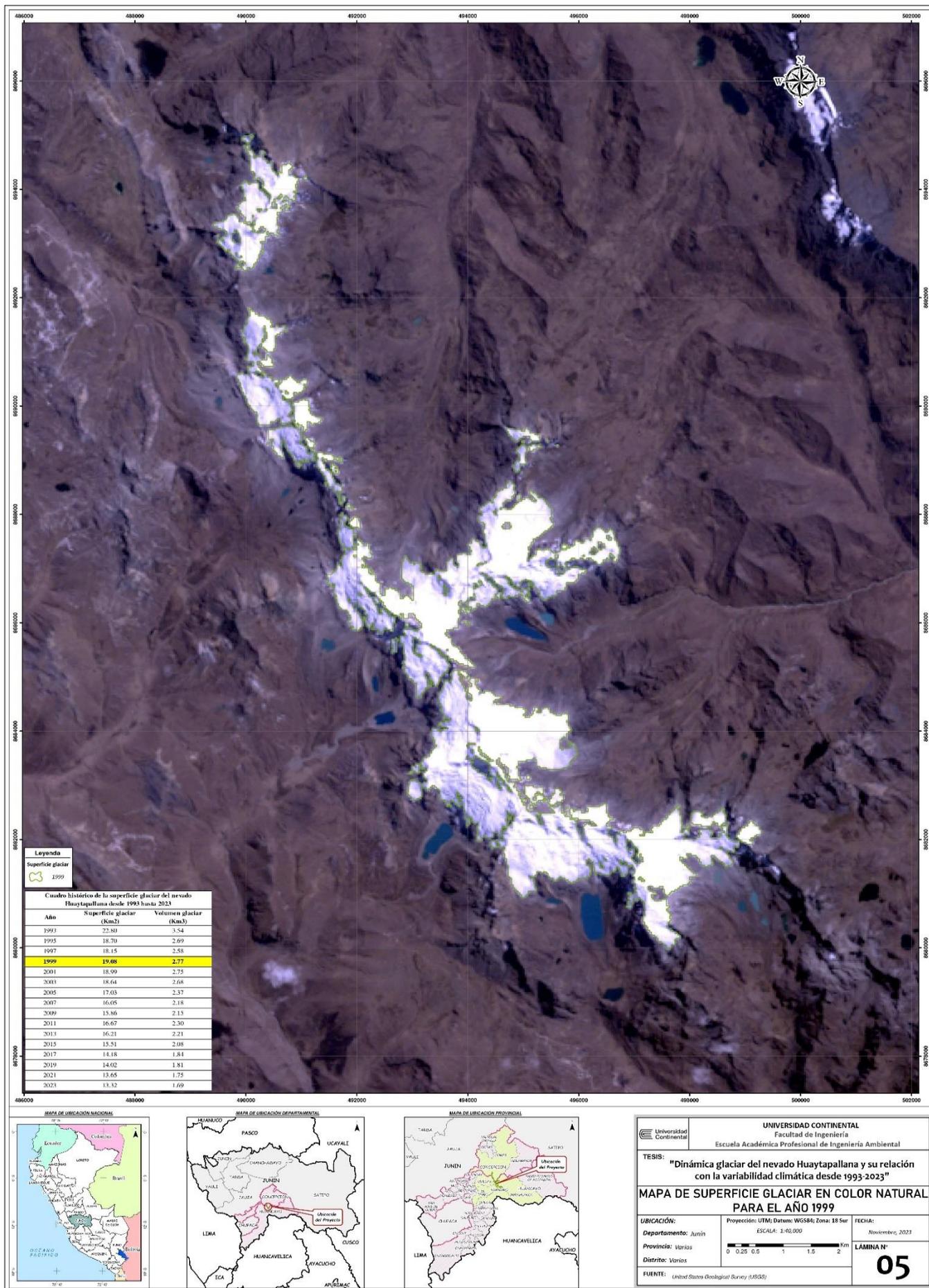


Figura 16. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 1999.

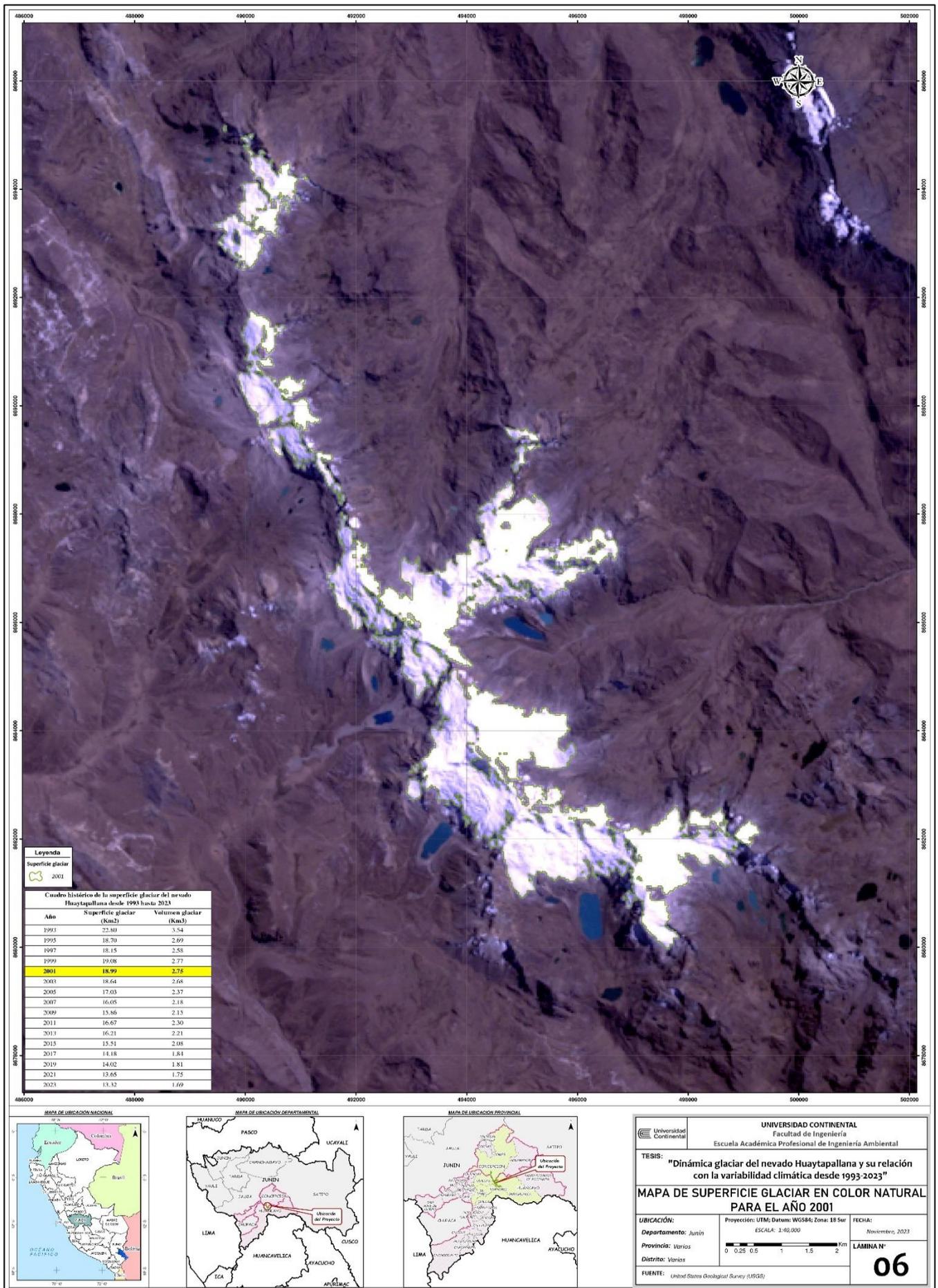


Figura 17. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2001.

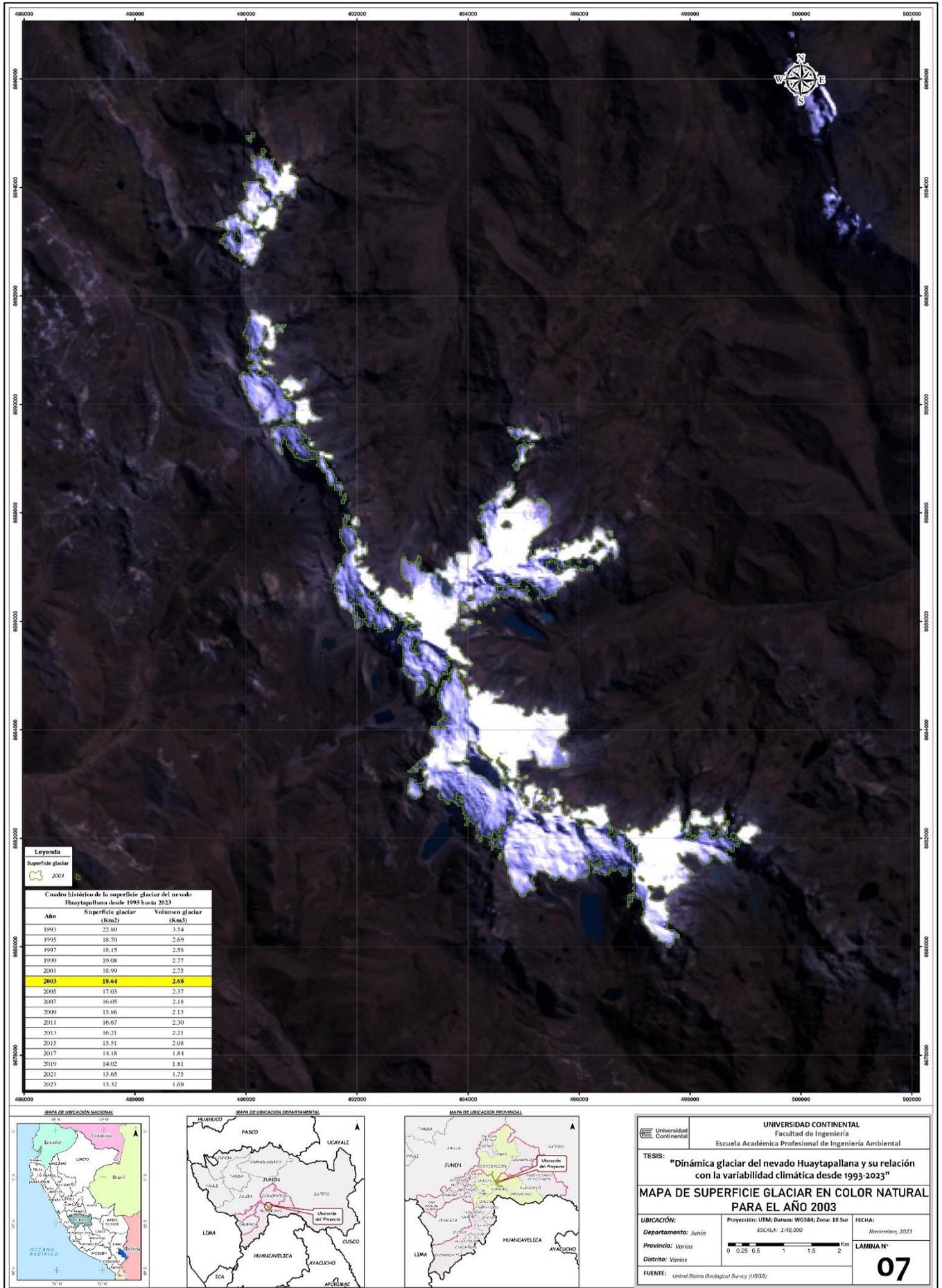


Figura 18. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2003.

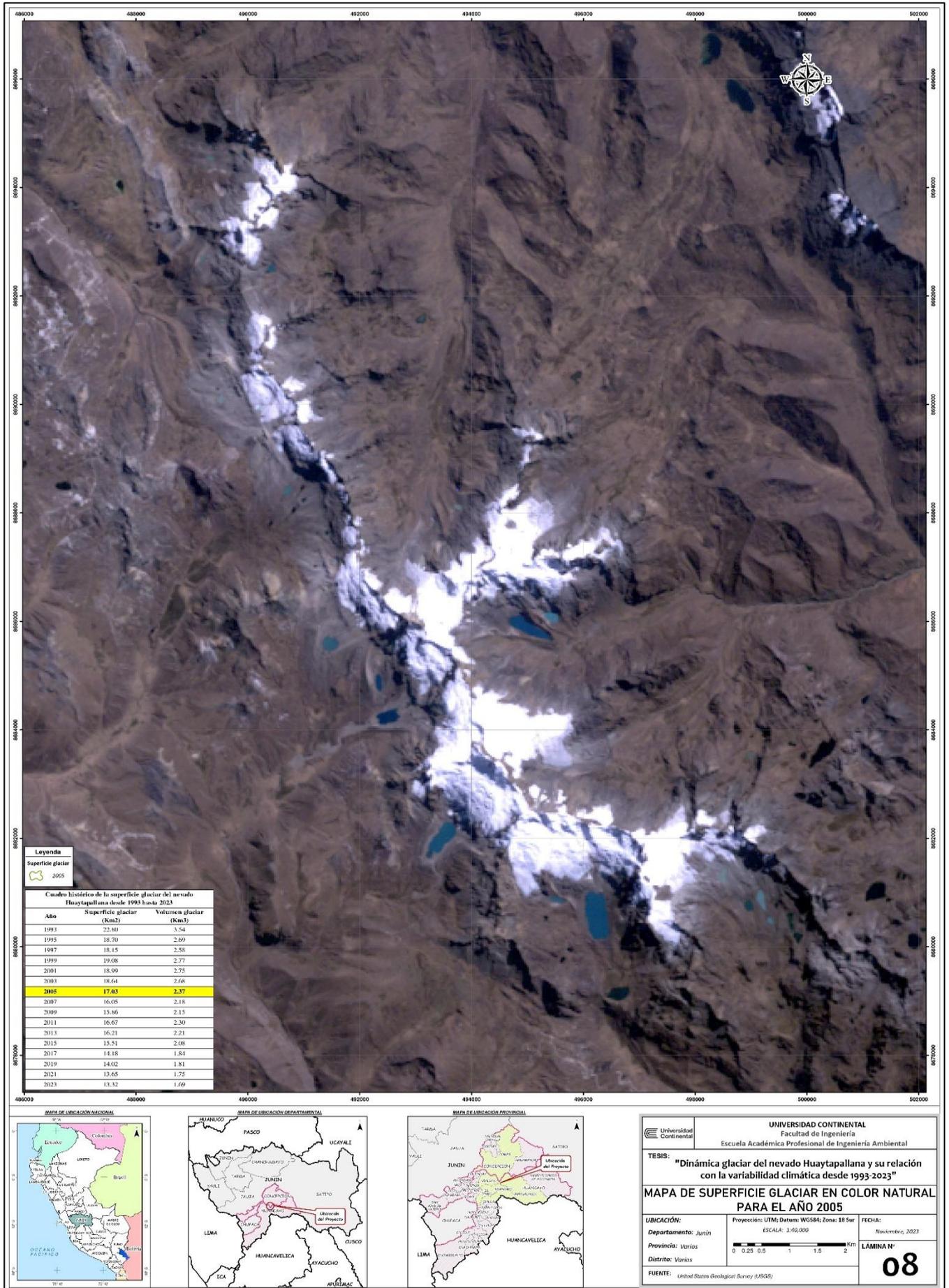


Figura 19. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2005.

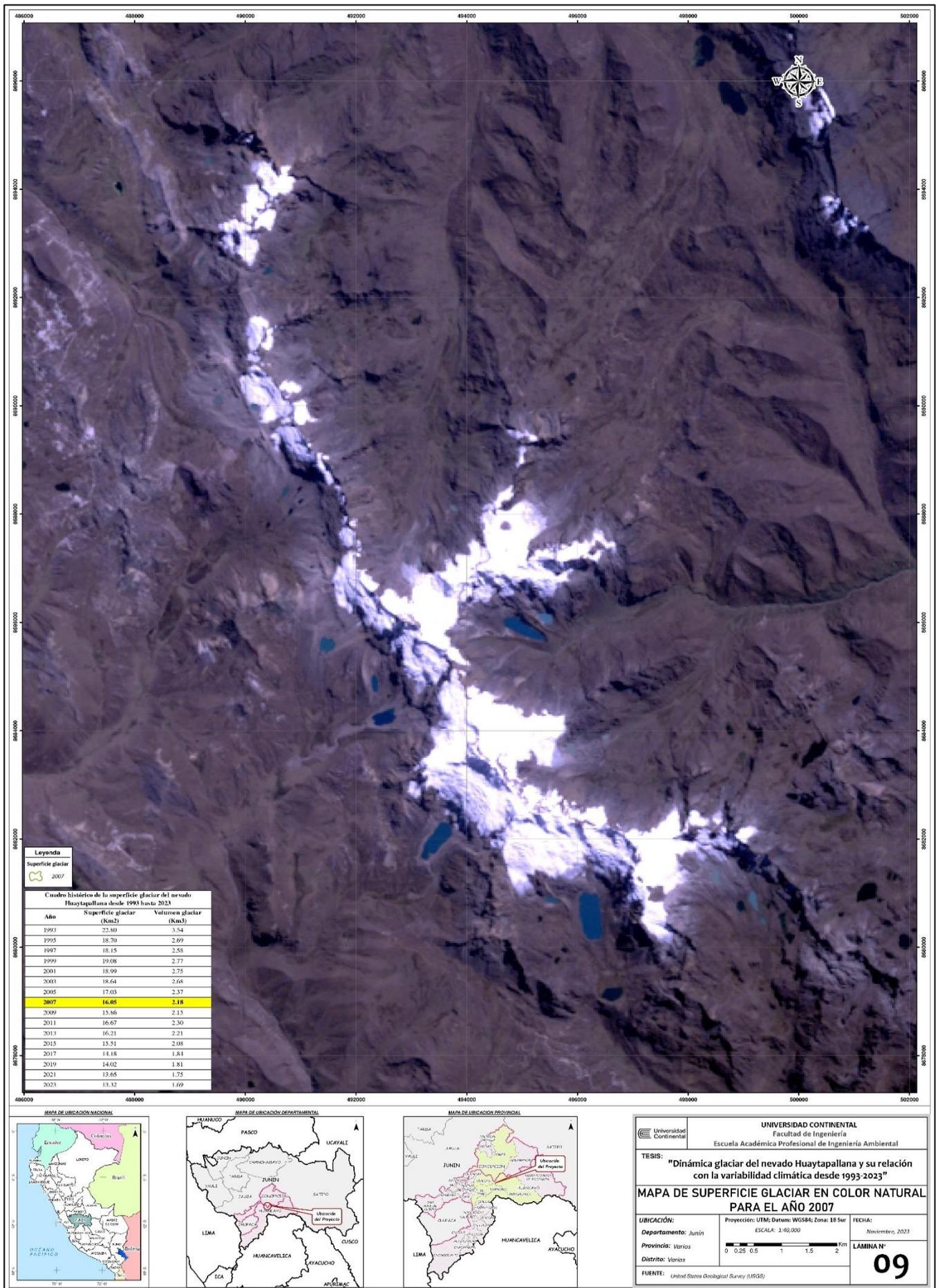


Figura 20. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2007.

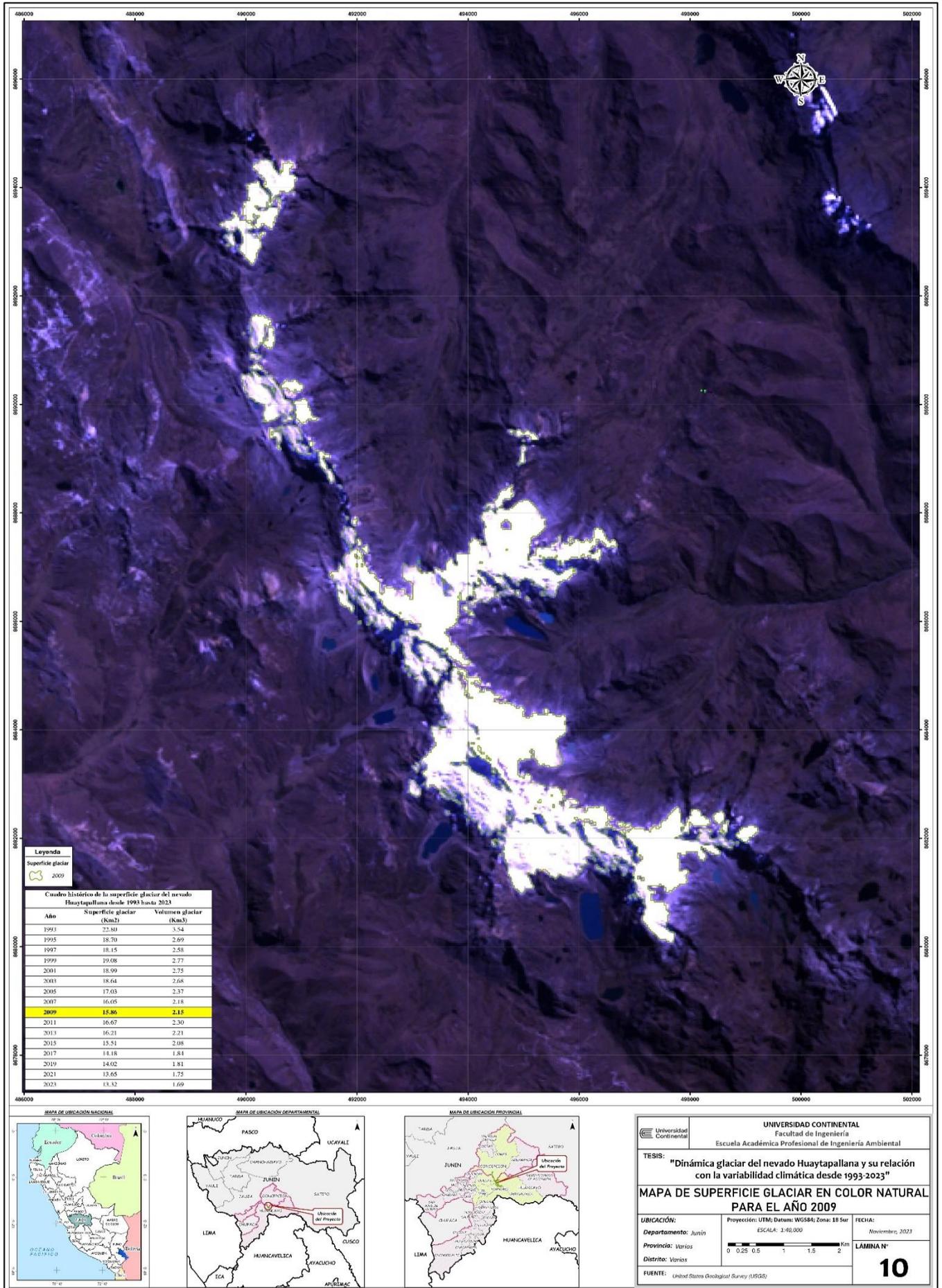


Figura 21. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2009.

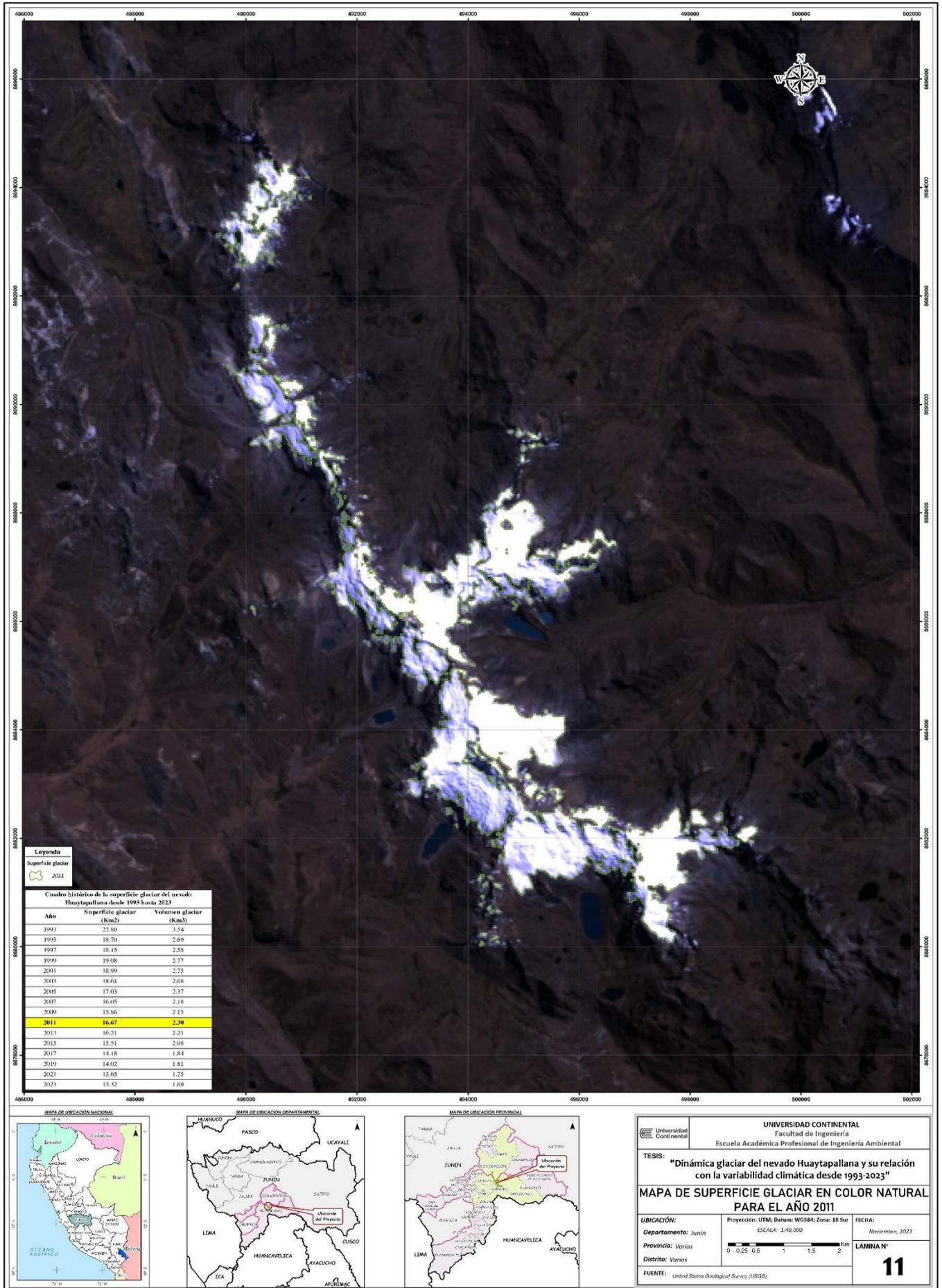


Figura 22. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2011.

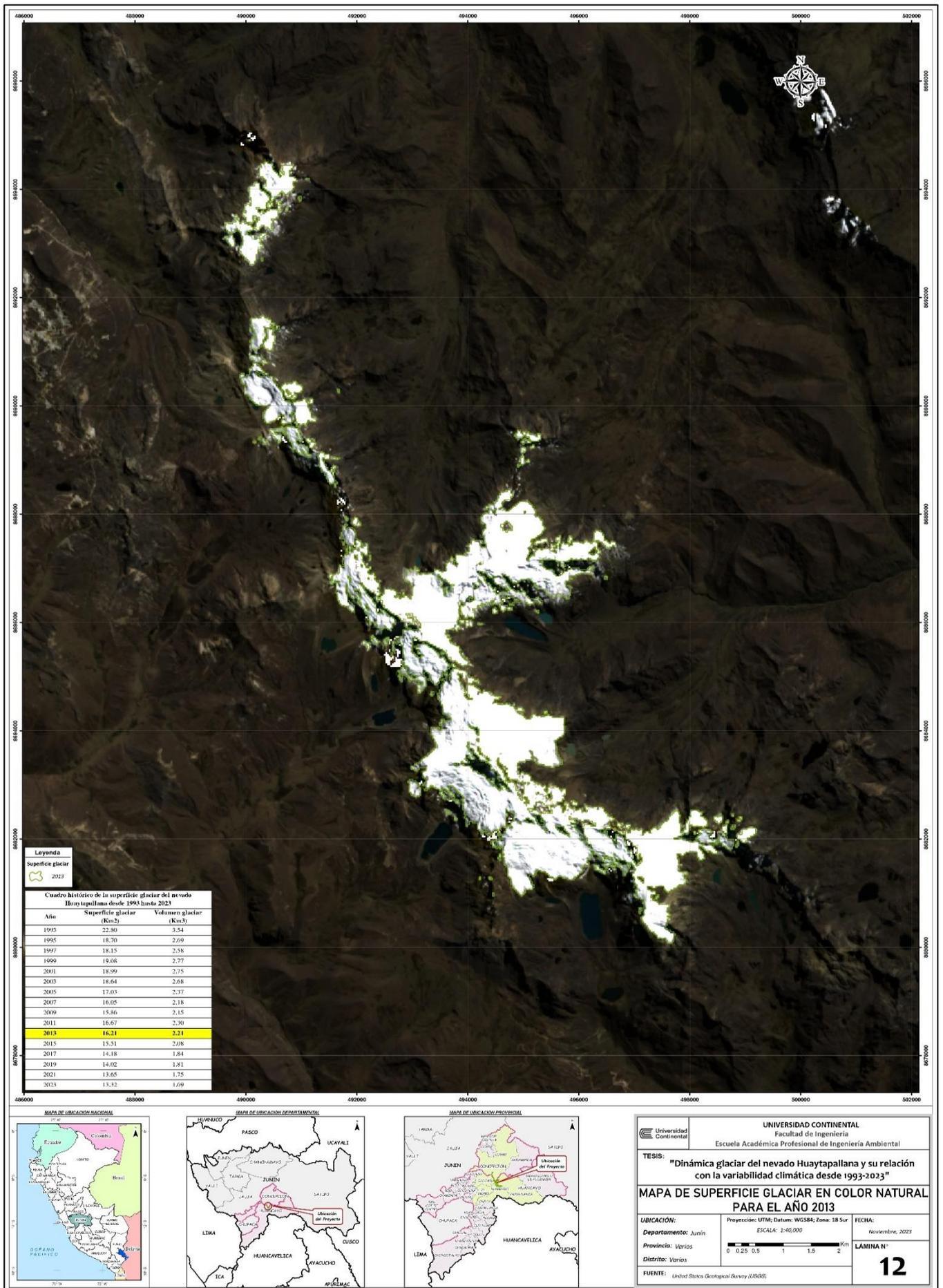


Figura 23. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2013.

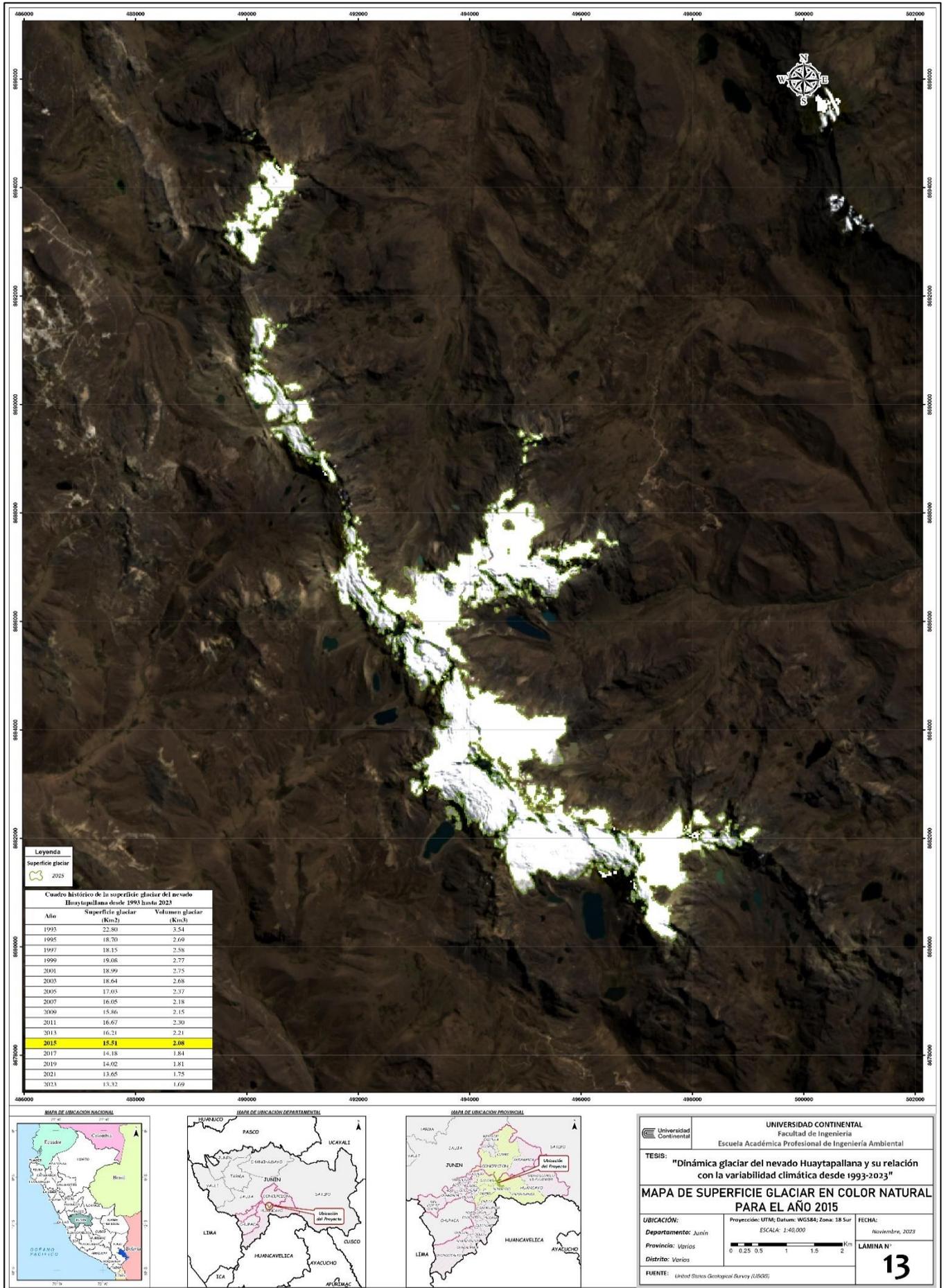


Figura 24. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2015.

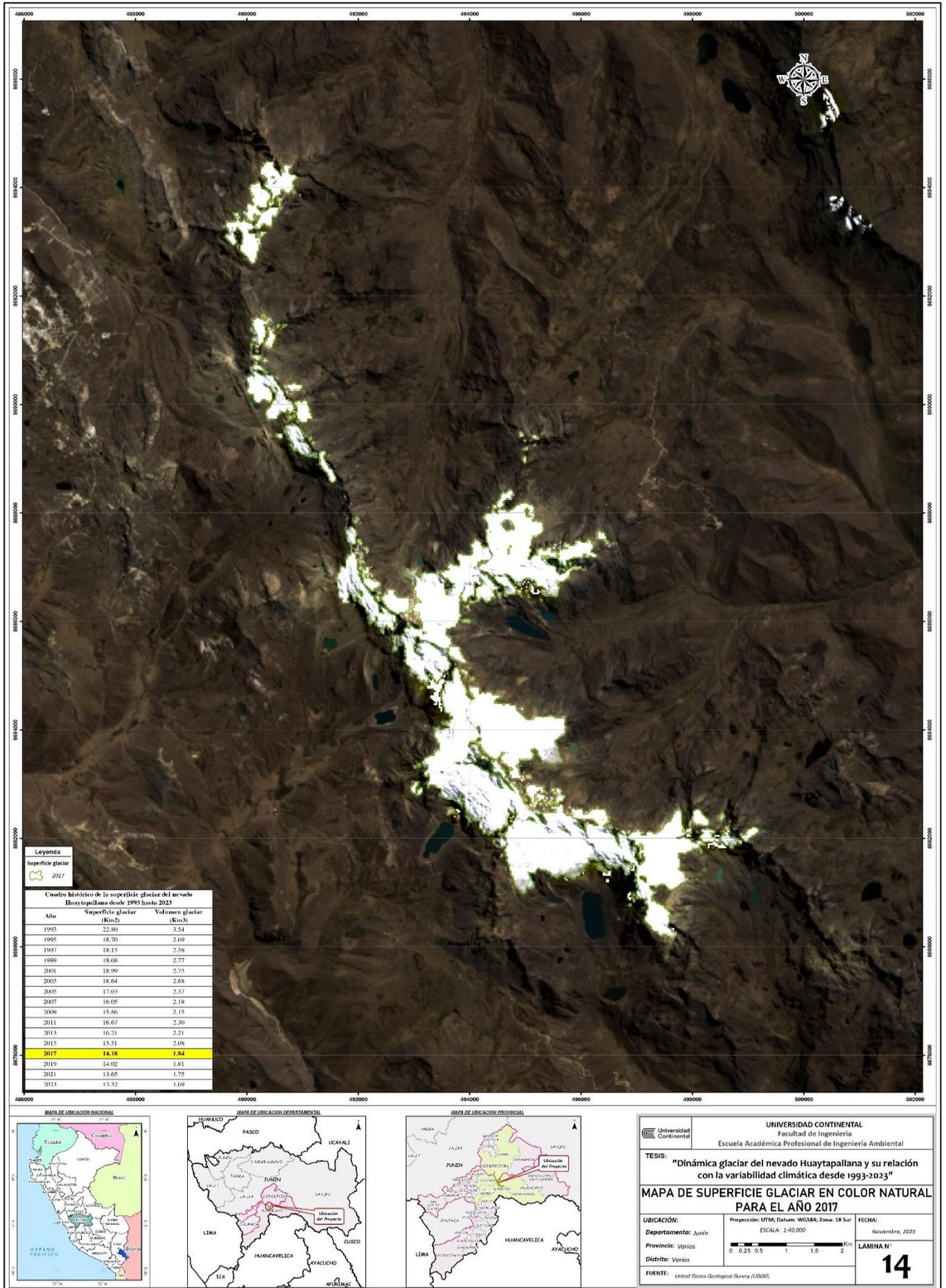


Figura 25. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2017.

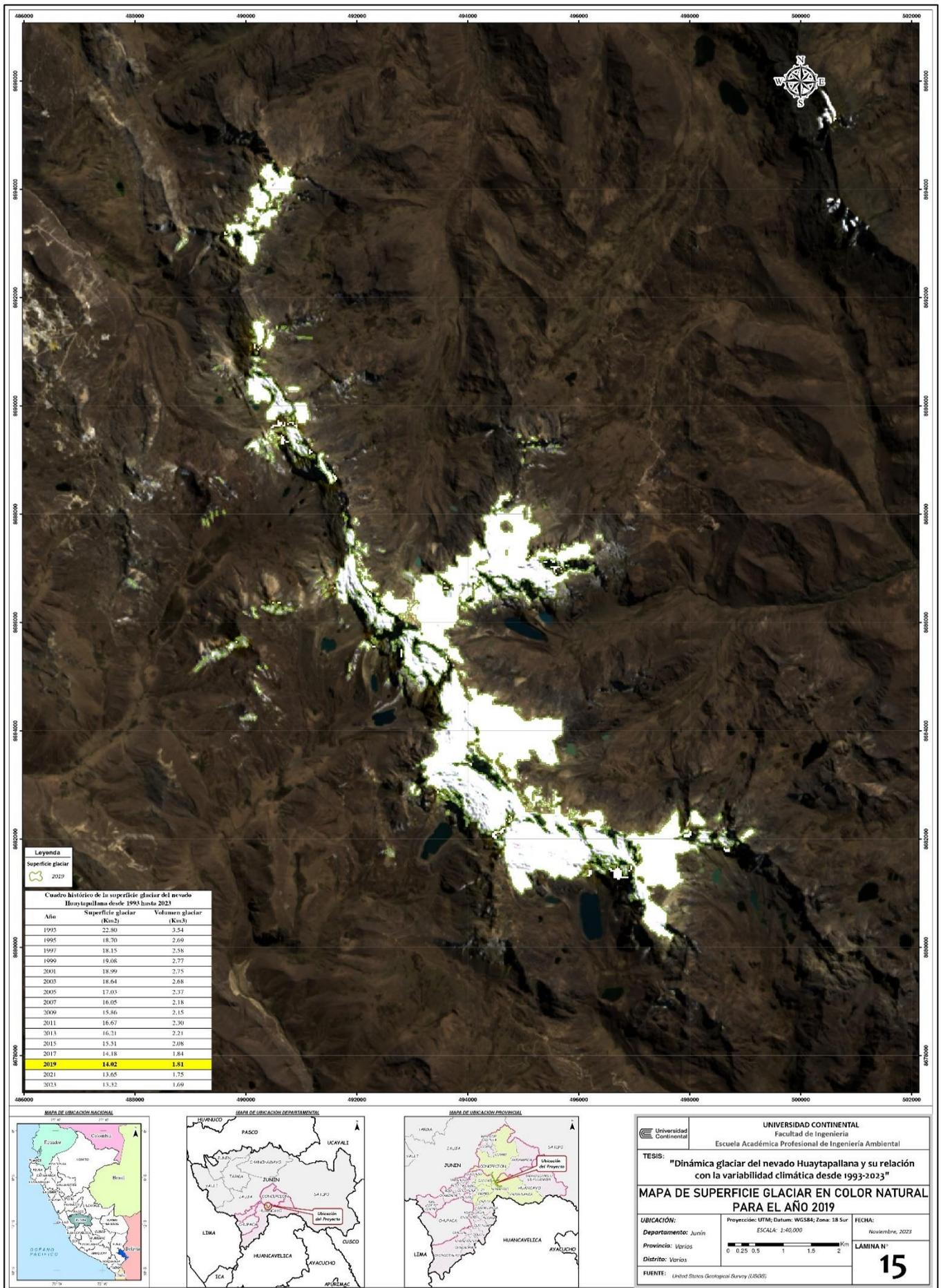


Figura 26. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2019.

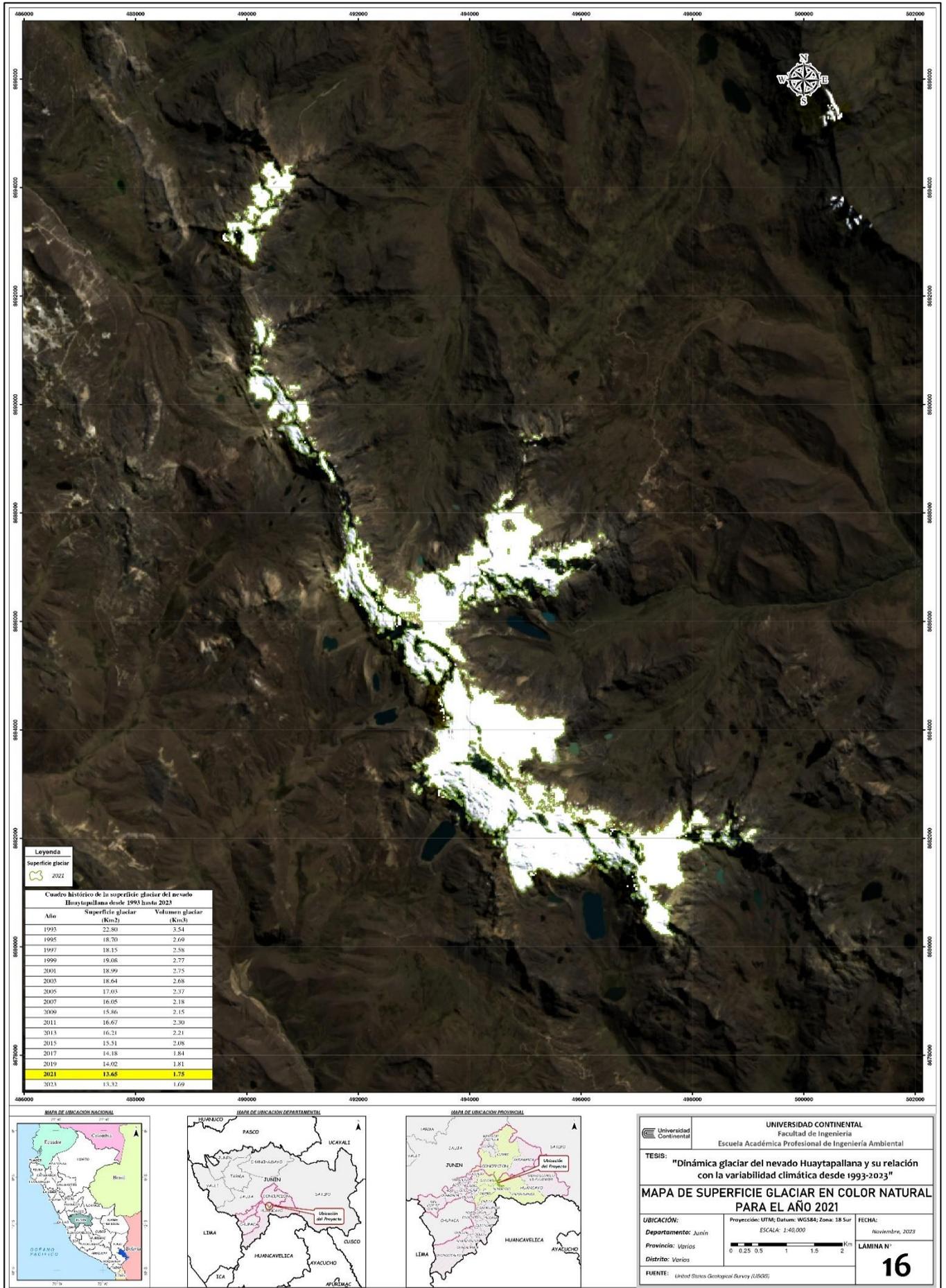


Figura 27. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2021.

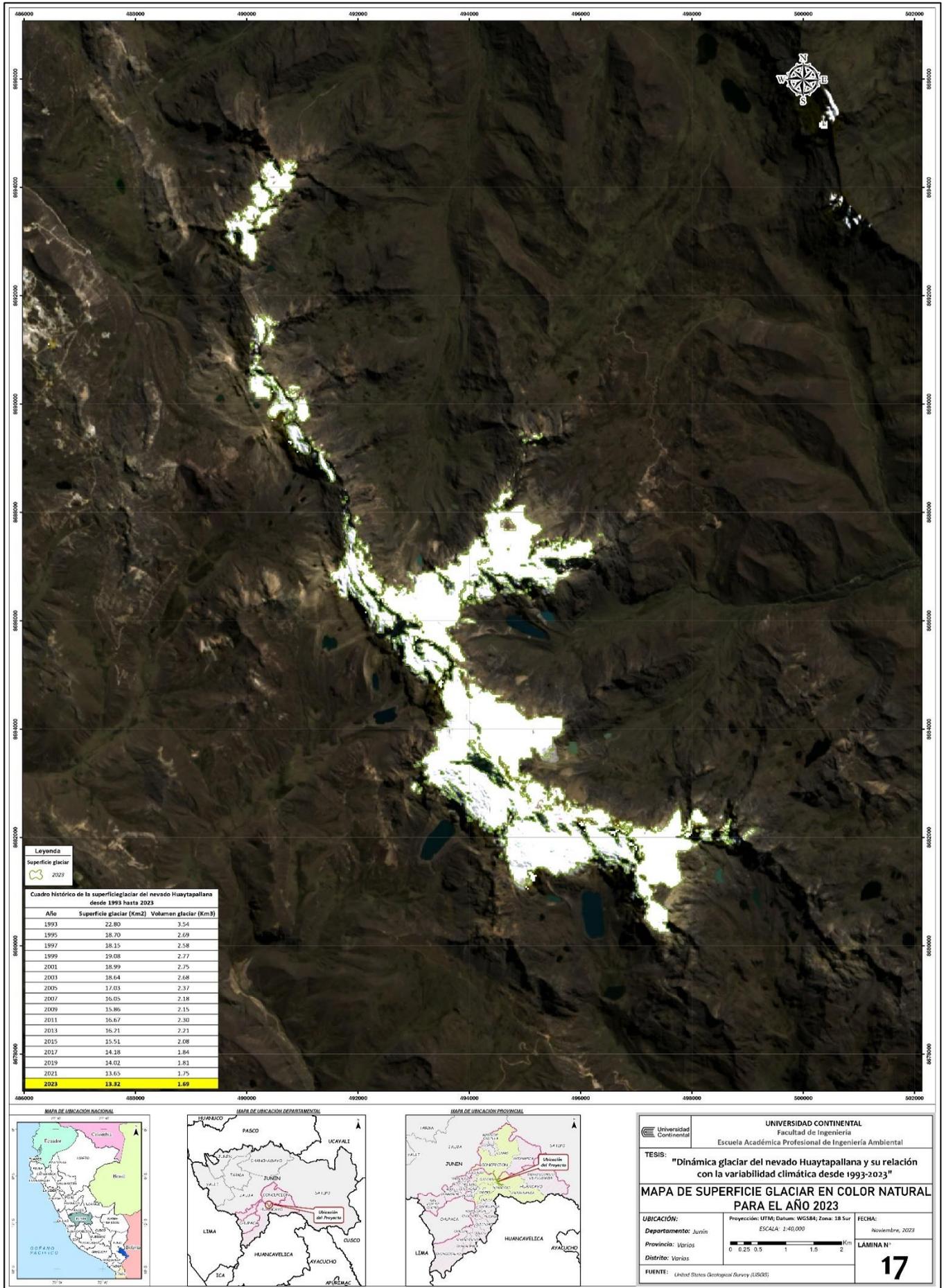


Figura 28. Mapa de superficie glaciar en color natural para el año 2023.

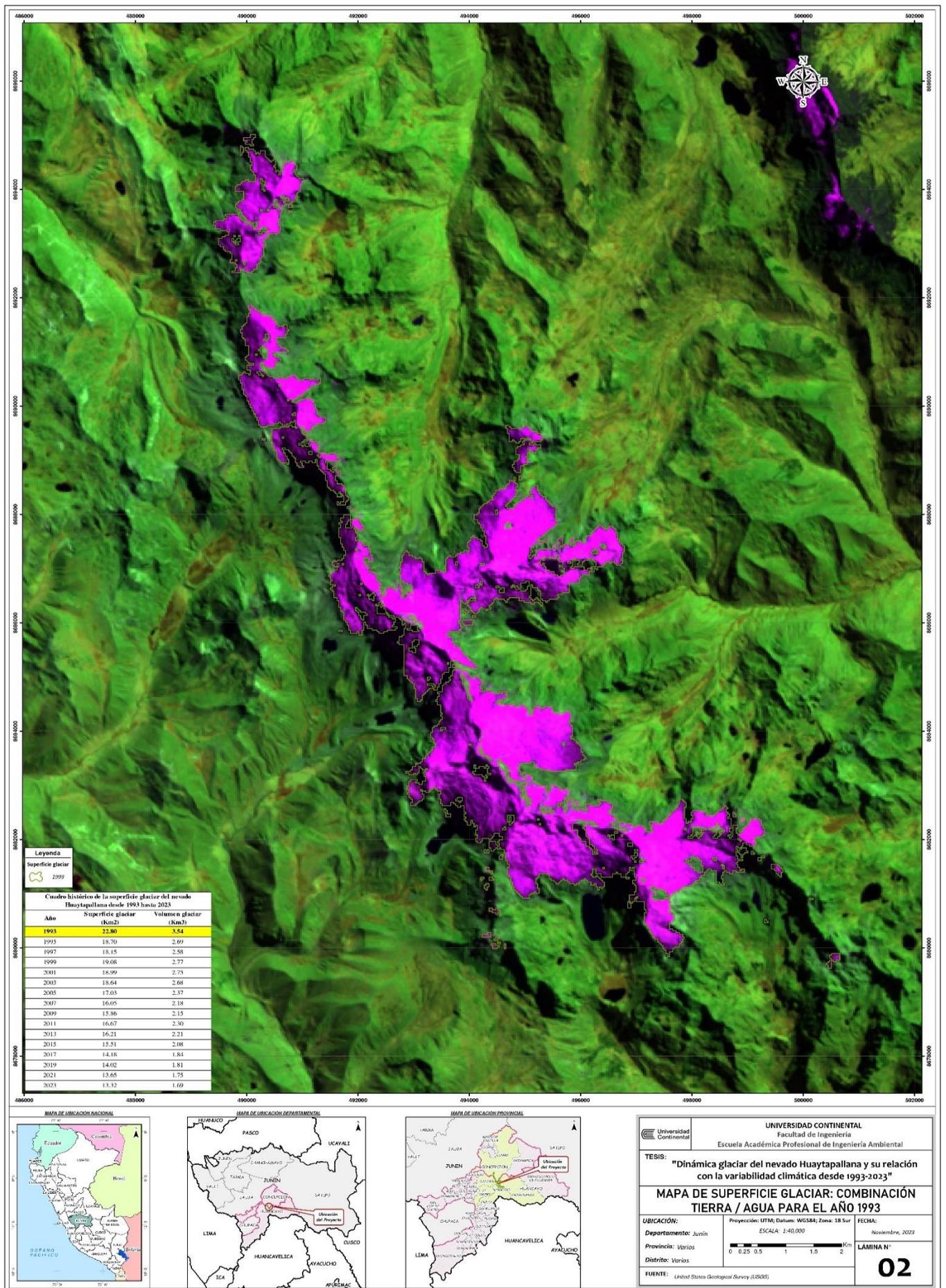


Figura 29. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 1993.

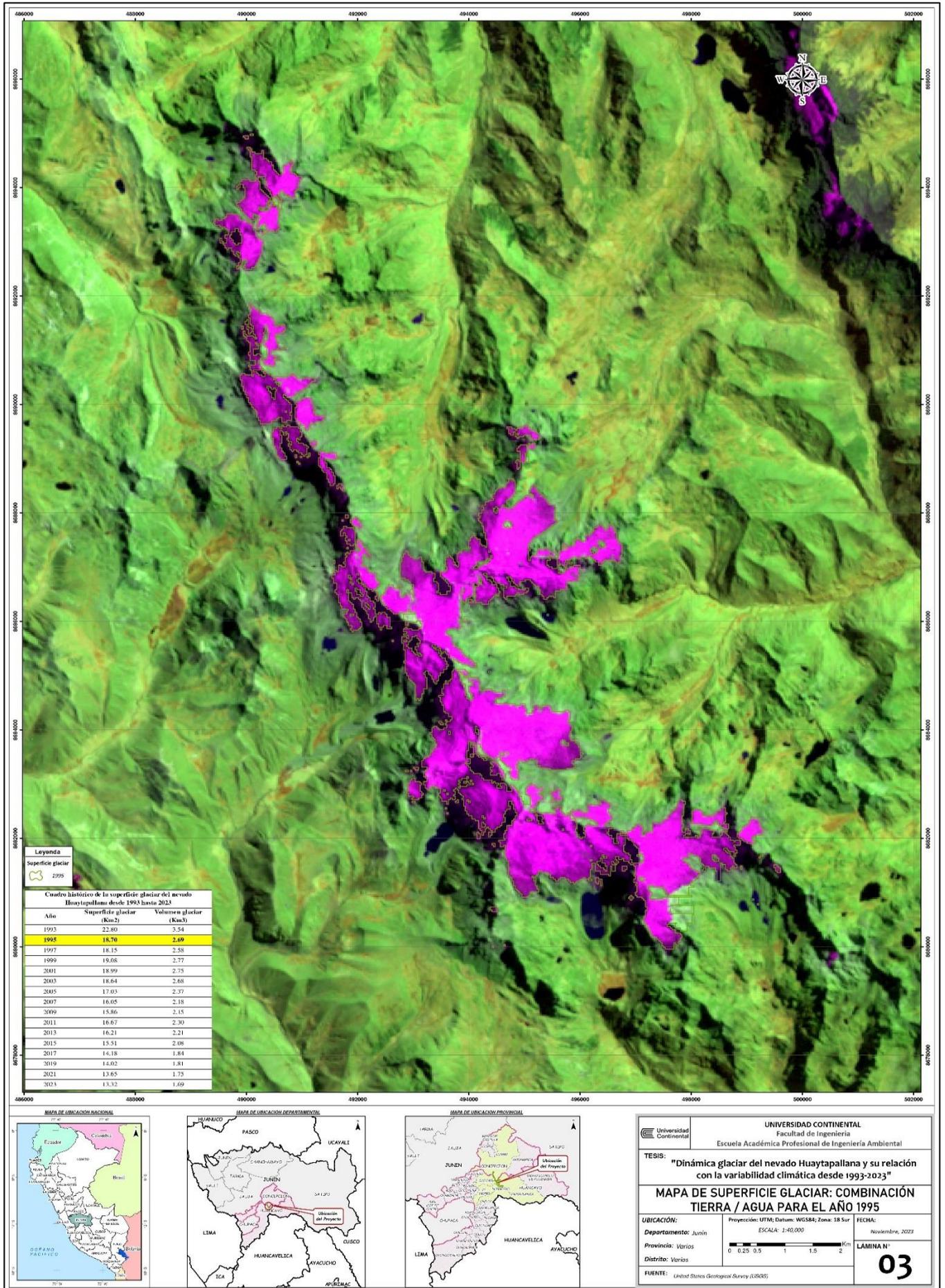


Figura 30. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 1995.

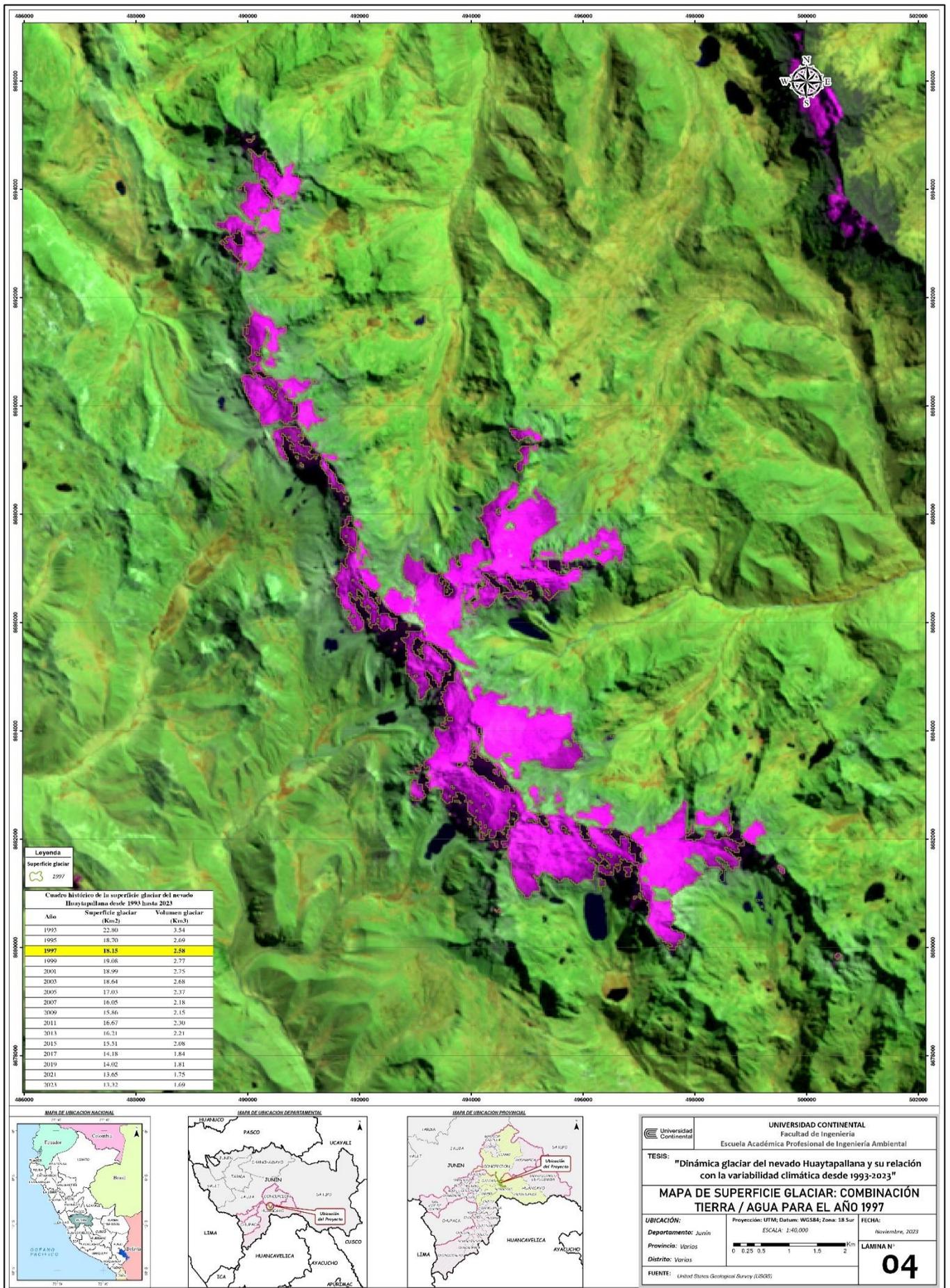


Figura 31. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 1997.

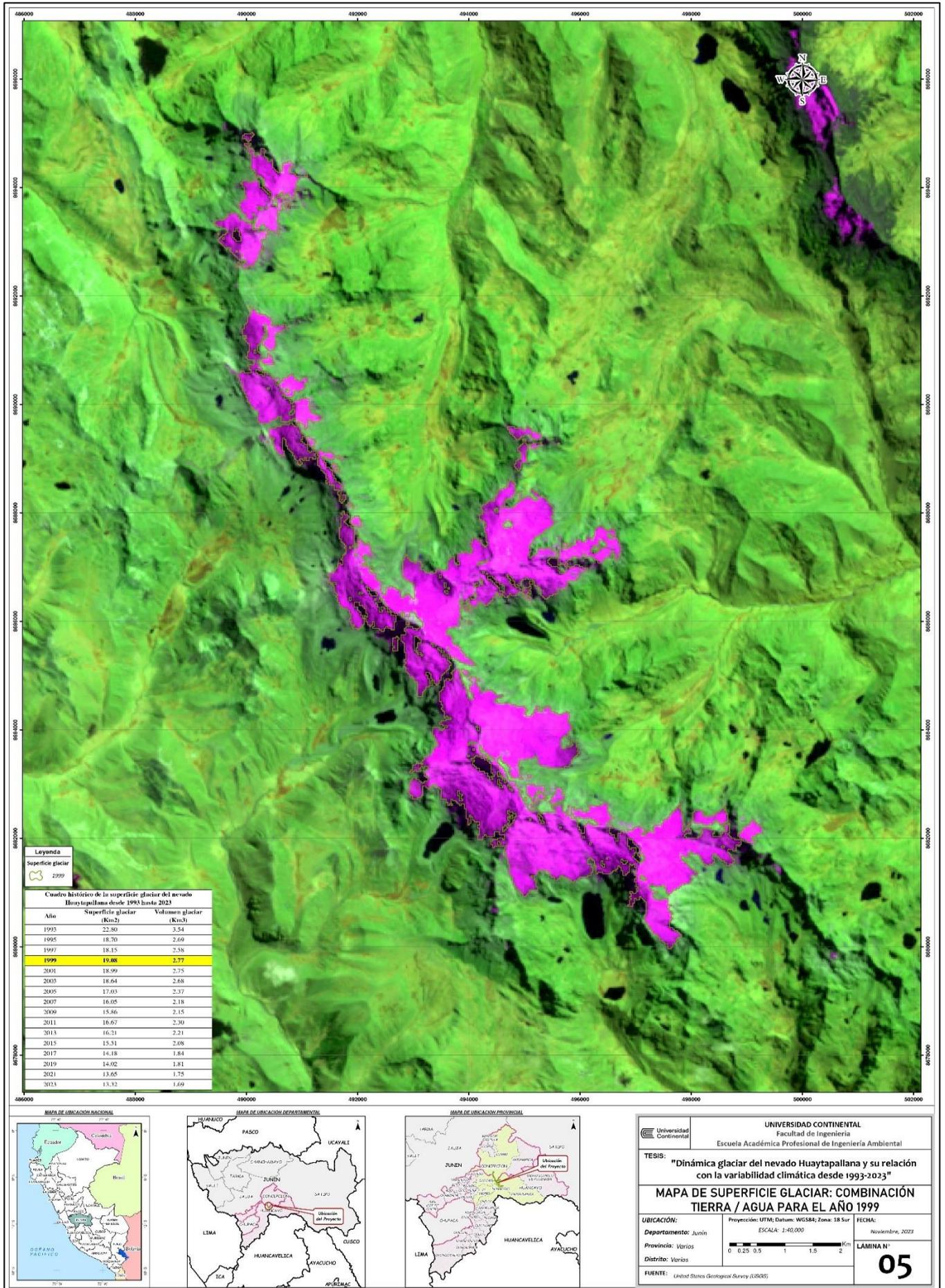


Figura 32. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 1999.

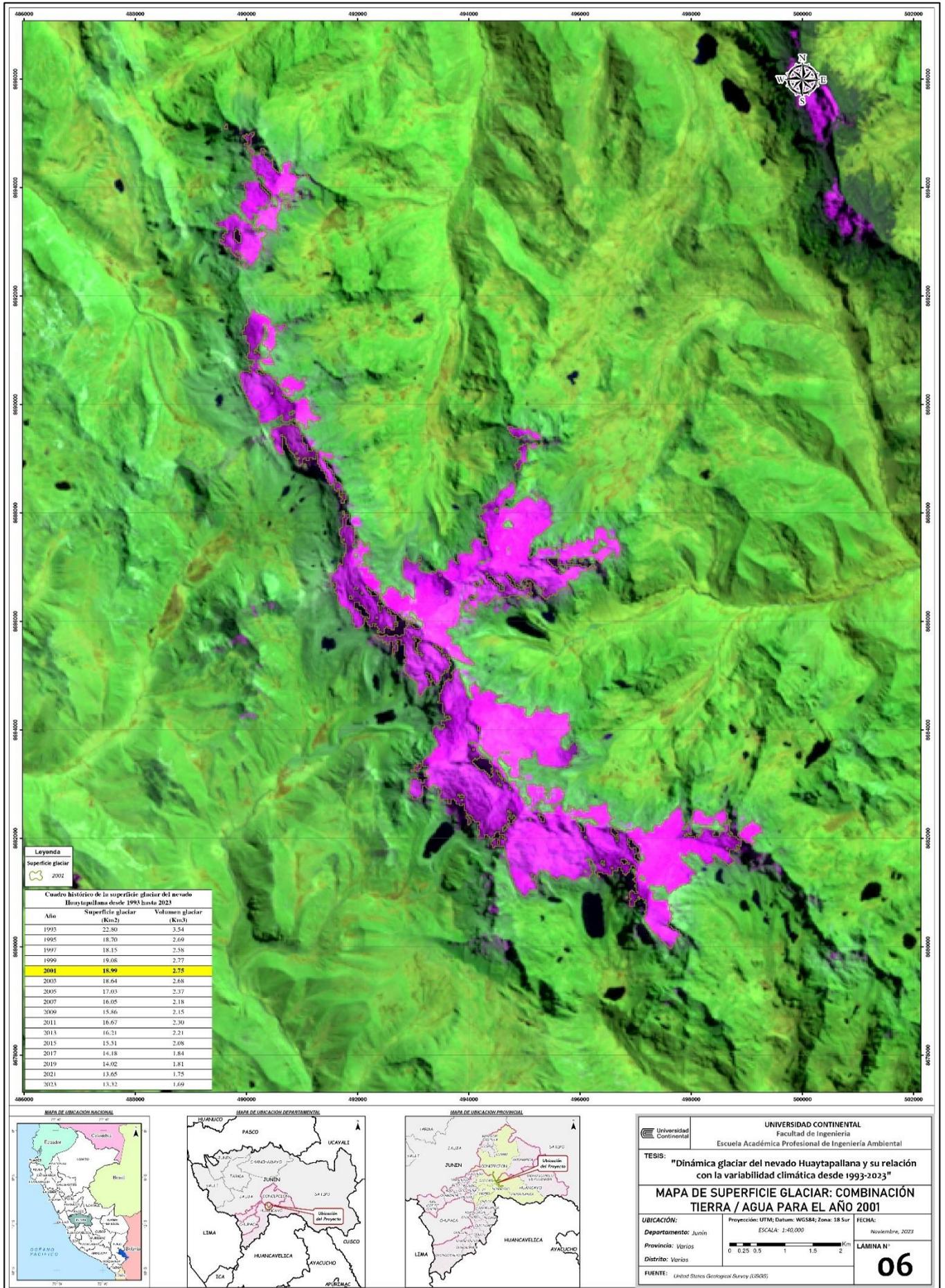


Figura 33. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2001.

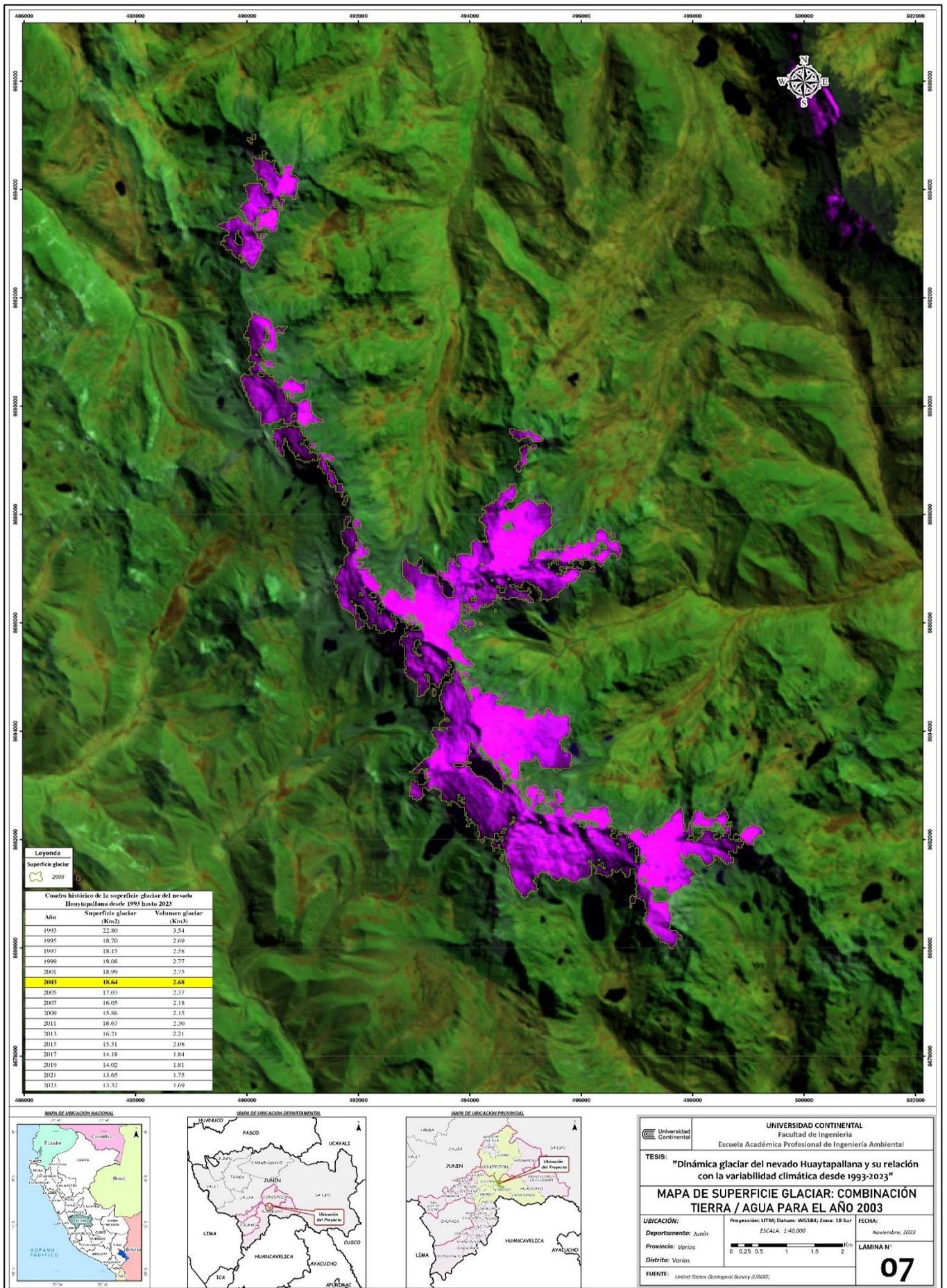


Figura 34. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2003.

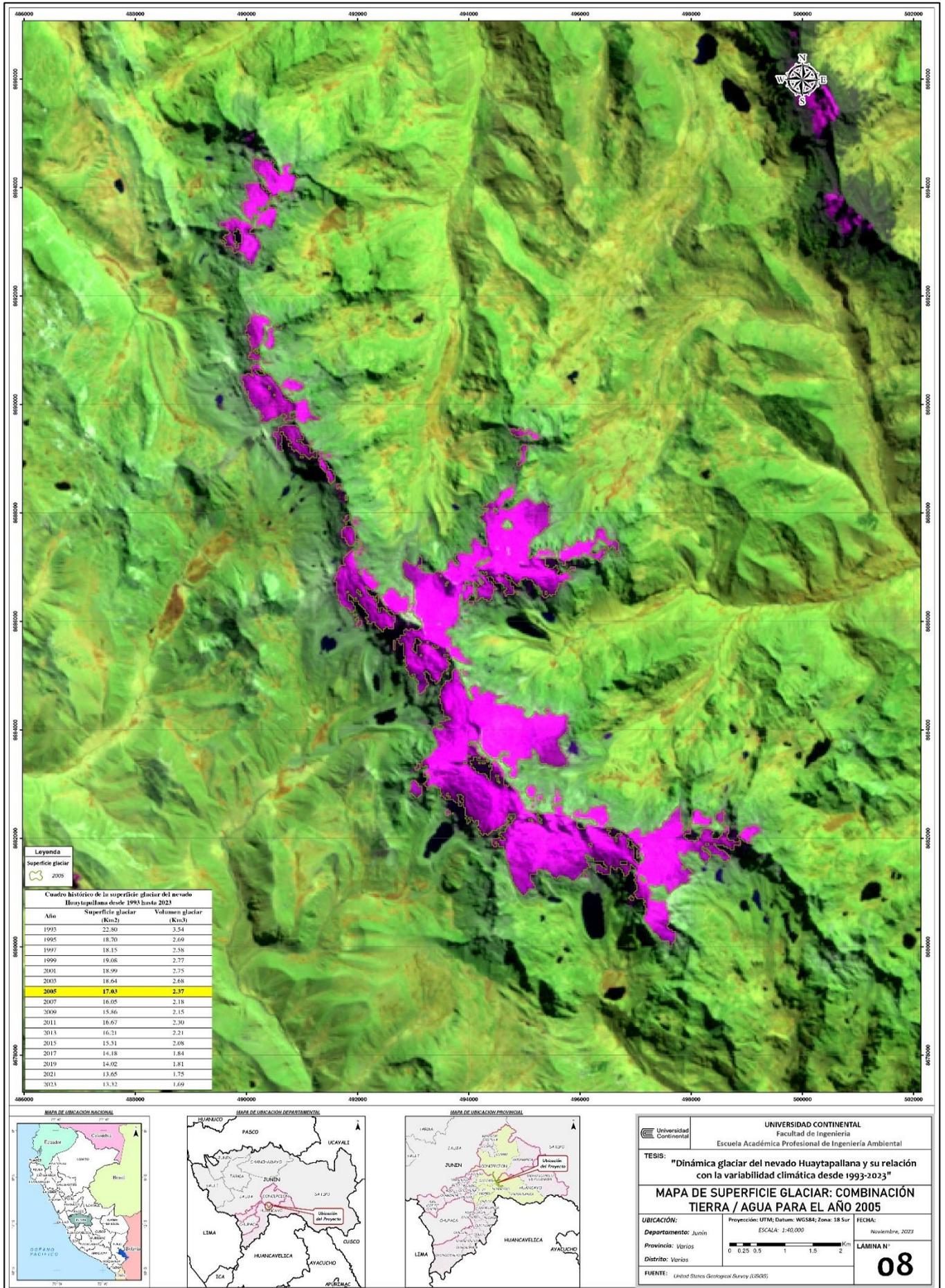


Figura 35. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2005.

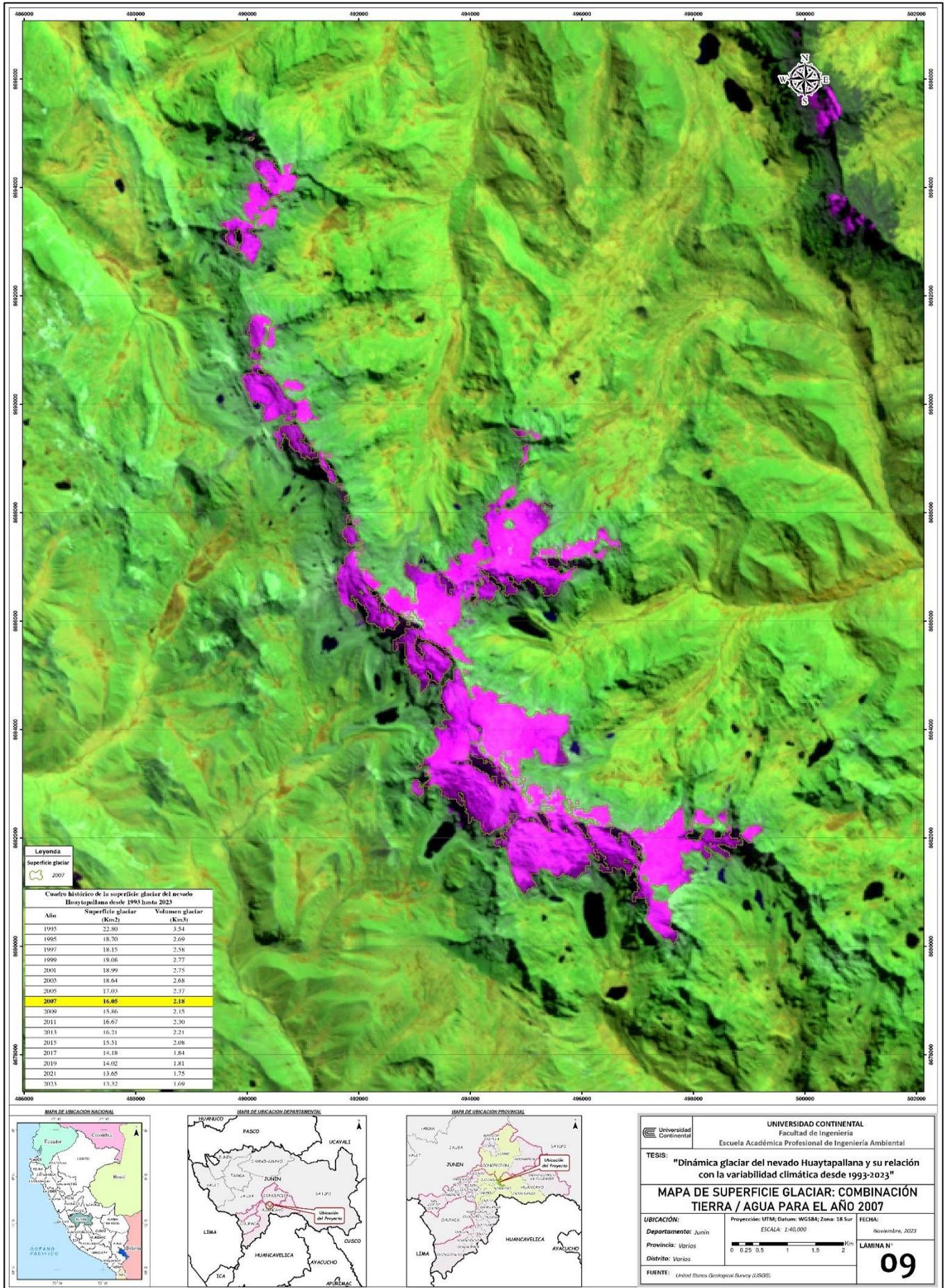


Figura 36. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2007.

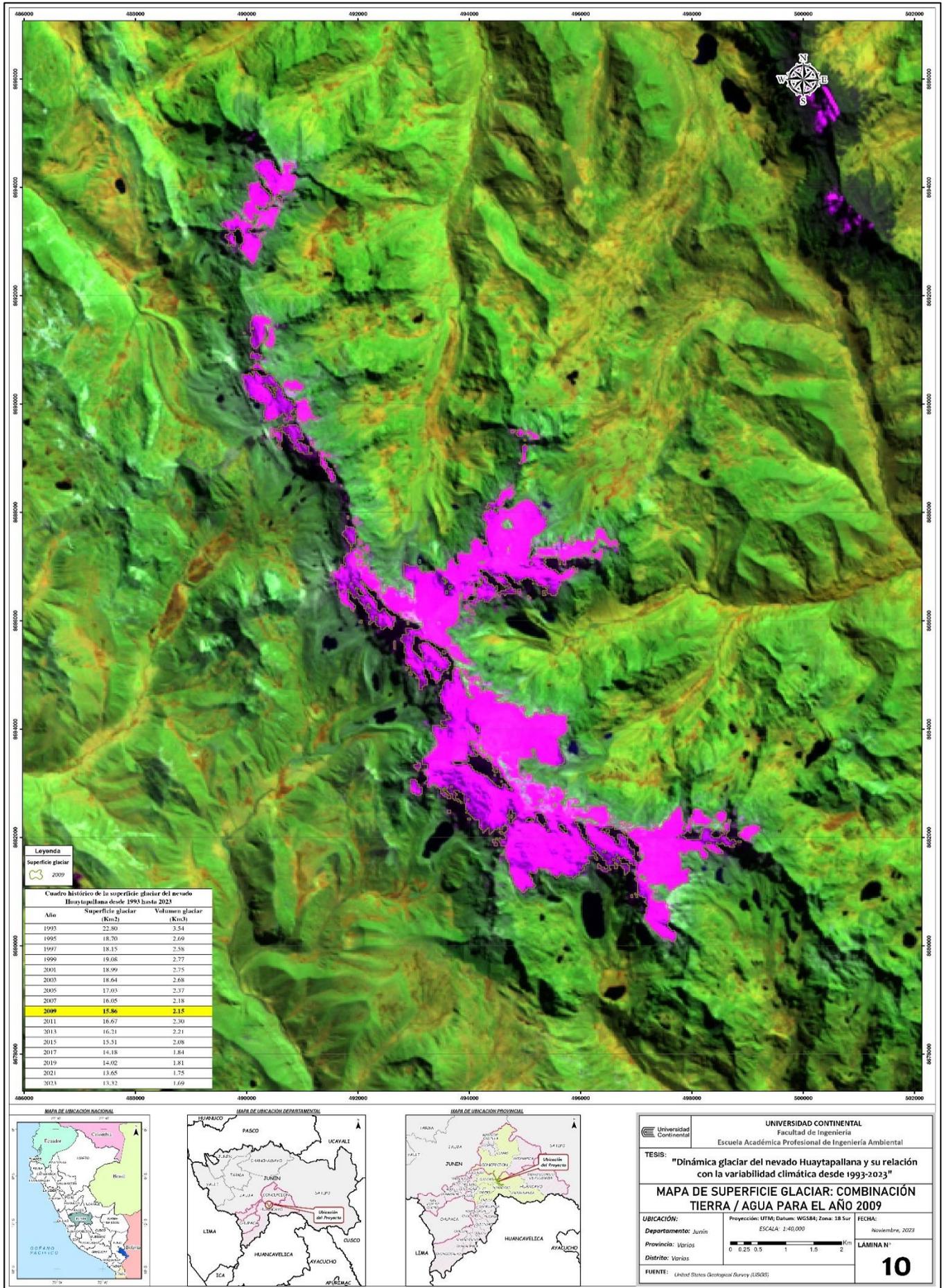


Figura 37. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2009.

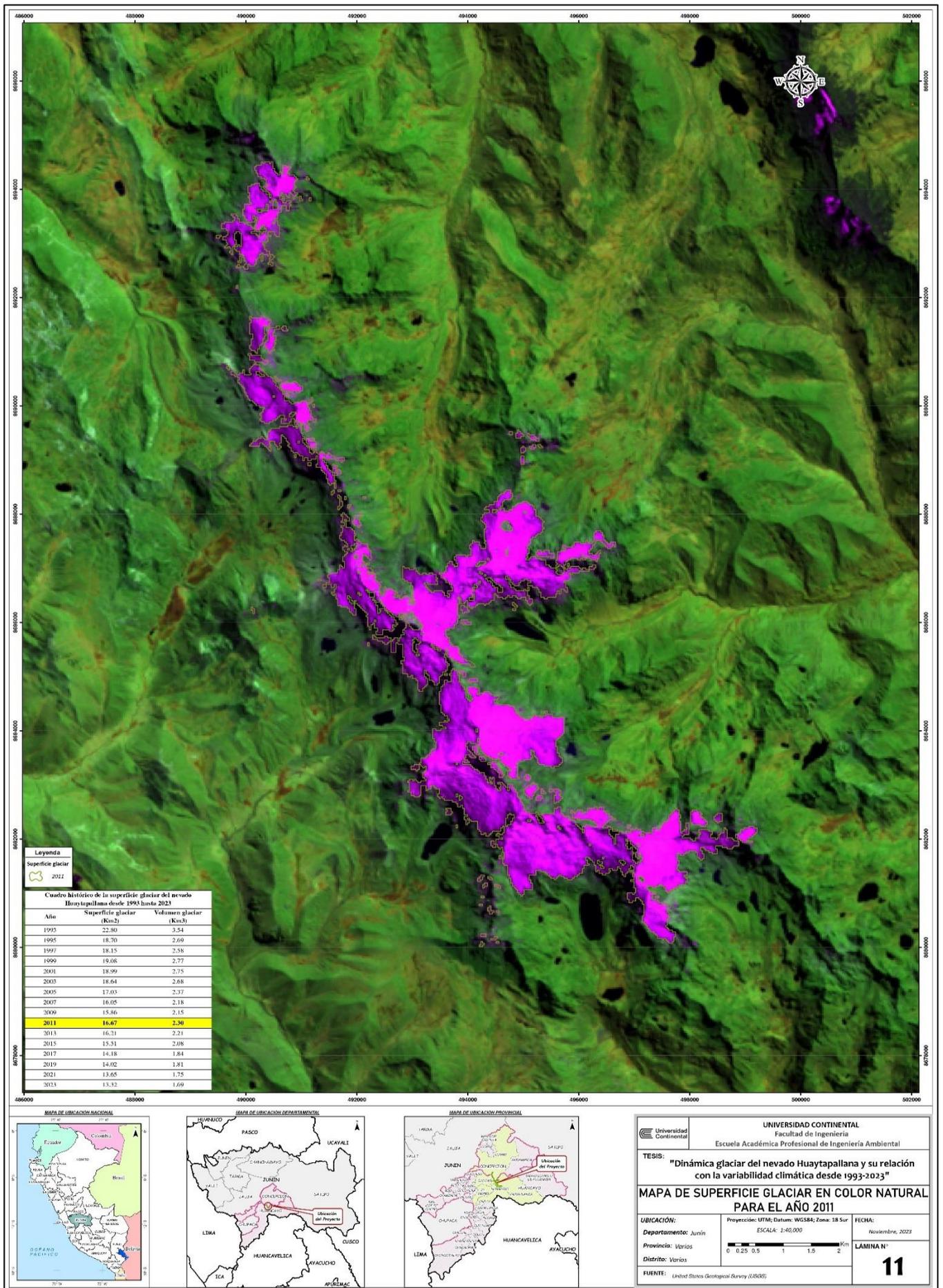


Figura 38. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2011.

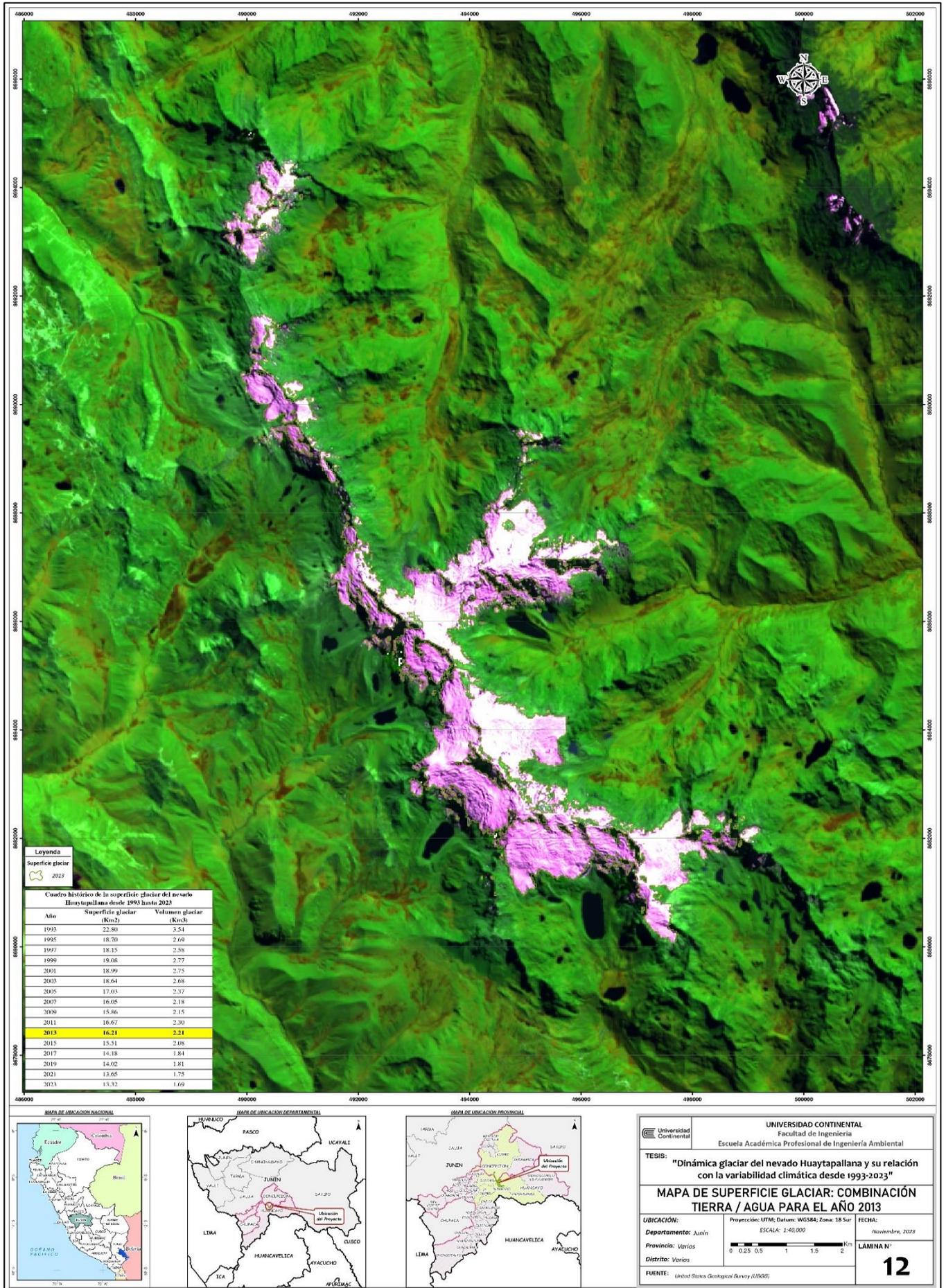


Figura 39. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2013.

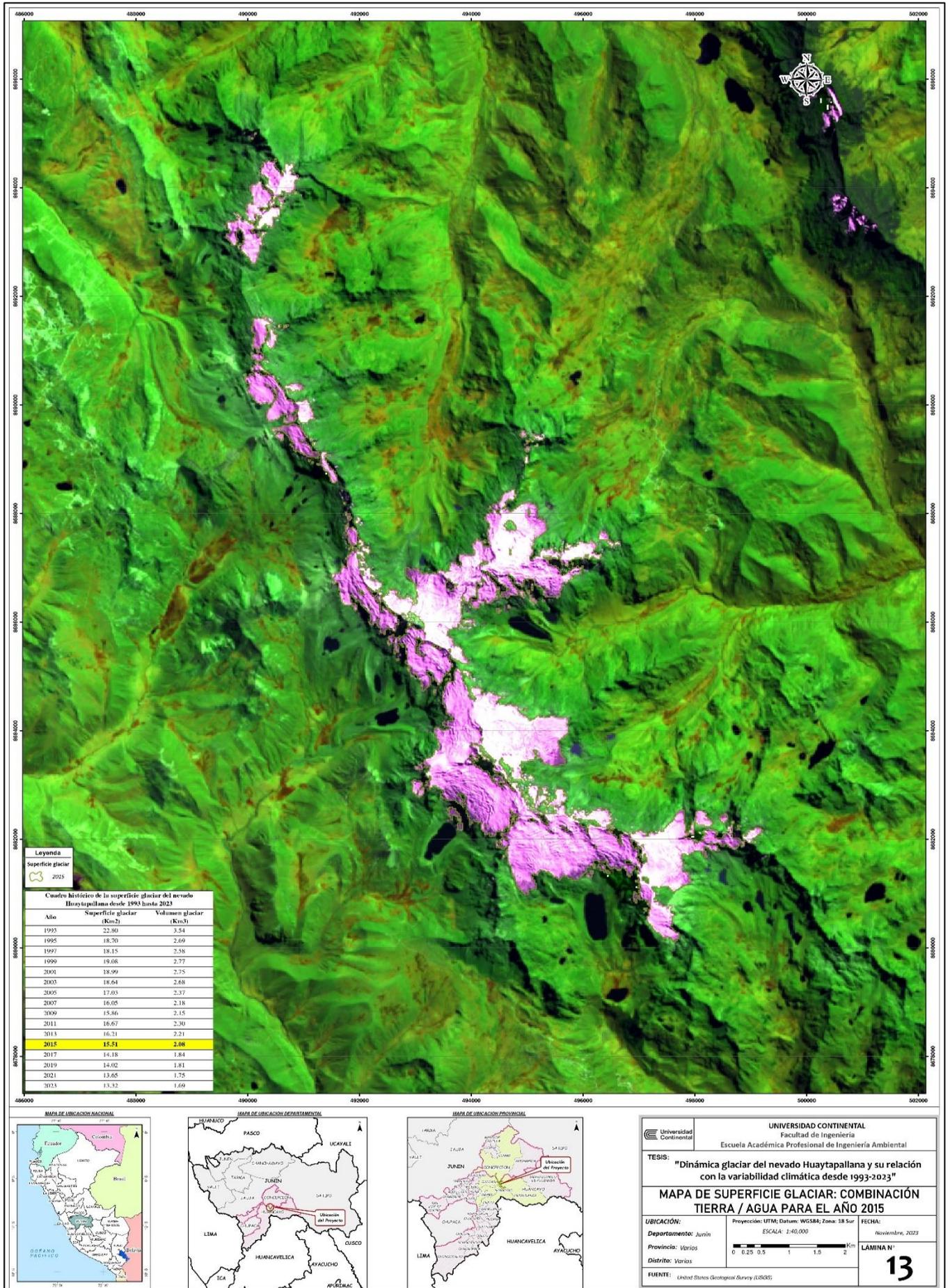


Figura 40. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2015.

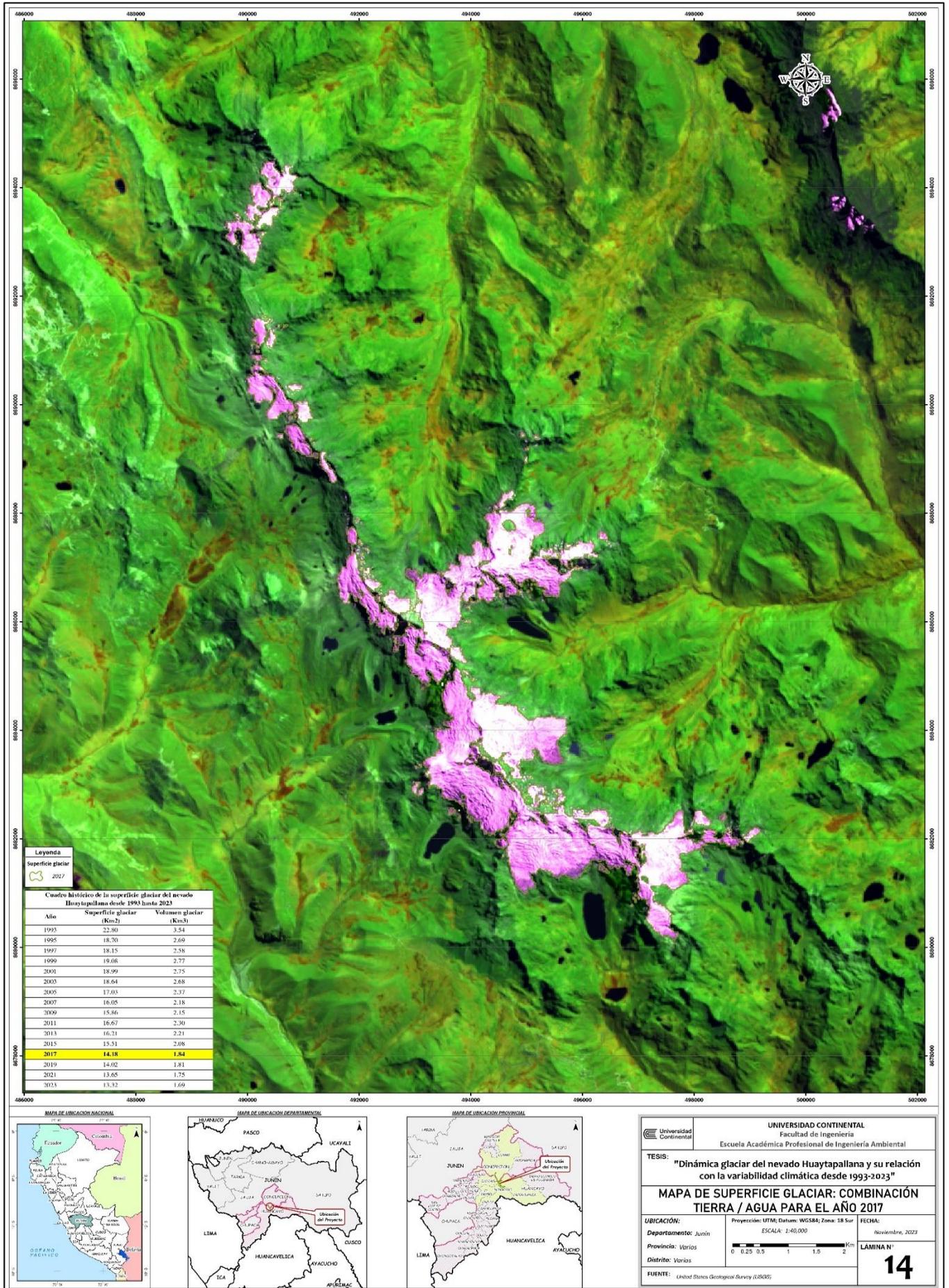


Figura 41. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2017.

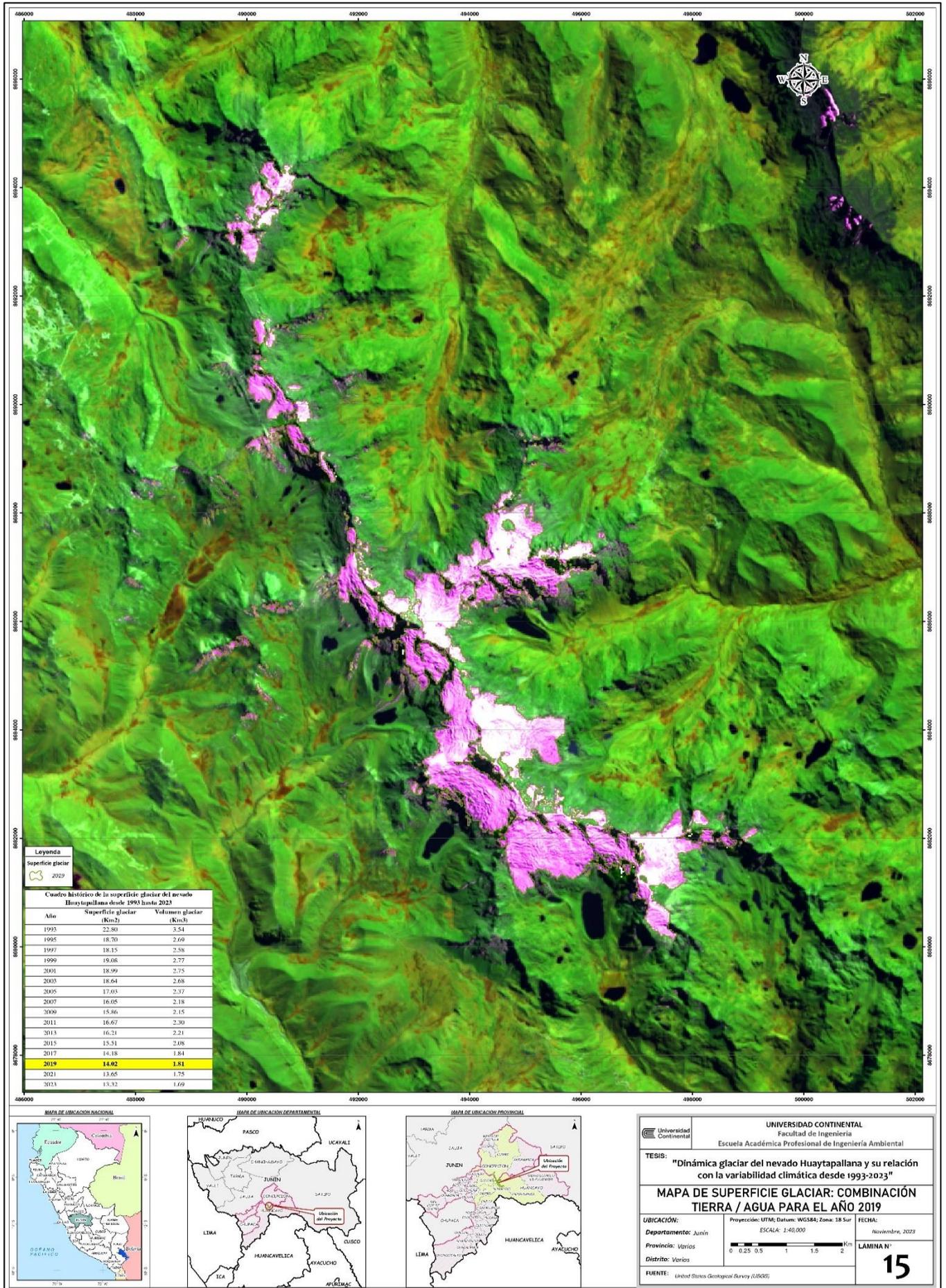


Figura 42. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2019.

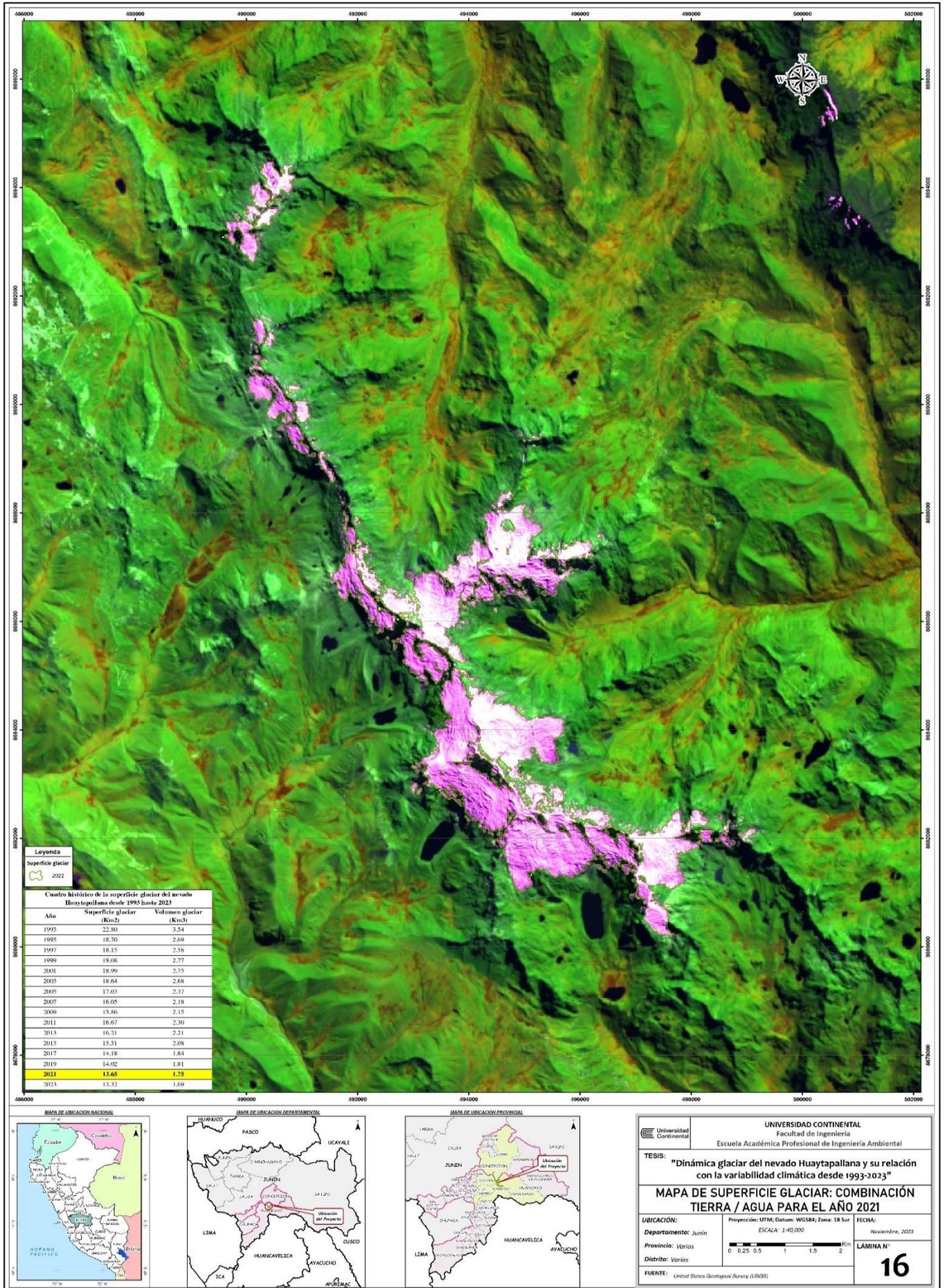


Figura 43. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2021.

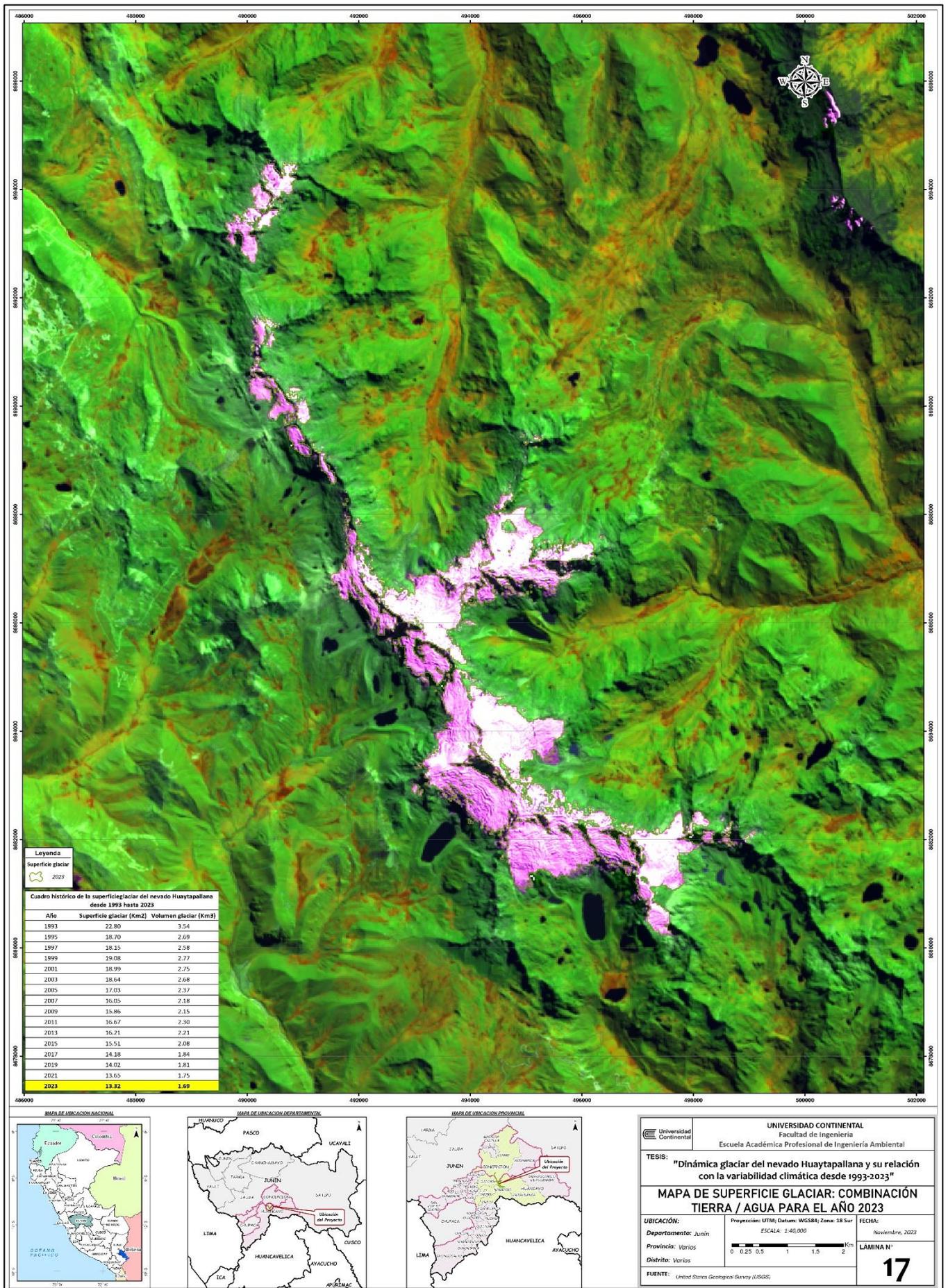


Figura 44. Mapa de superficie glaciar: Combinación Tierra / Agua para el año 2023.