



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU
INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA
CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:
Bch. EDGARD BOLIVAR YAPURA**

**ASESOR:
Dr. ANTONIO BUENO LAZO**

CUSCO, SETIEMBRE 2018

DEDICATORIA

Con todo cariño para mis padres Ricardo Bolívar Medina, Simeona Yapura Condori, mi esposa Catherine Fernández Tohalino y al motor de mi Vida mis hijas Ariadna K. y Daniela K. Bolívar Fernández.

Este trabajo fue elaborado con mucho esmero, aprecio y pasión por el tema; el cual brilla y sigue mostrándonos su majestuosa belleza de naturaleza Apu AUSANGATE.

AGRADECIMIENTO

En este largo camino que significa desarrollar el trabajo de tesis, hubo muchas personas e Instituciones que colaboraron para que este trabajo sea concluido.

En Primer Lugar a la Bióloga Catherine Fernández Tohalino, de quien me considero seguidor, por su ayuda incondicional como esposa, amiga, maestra, quien me brindó todo su apoyo durante toda la formación de mi carrera profesional y nunca dudó en brindarme su ayuda.

A la Bióloga, Norma Quispe Condori, Co-asesor, quien tuvo la gentileza de aceptar y guiar la tesis con todo sus conocimientos experiencias, exigencia y consejos brindados sobre el tema.

Mis hijas Ariadna y Daniela, quienes siempre se mostraron pacientes y comprensión durante mi formación y culminación de mi carrera profesional.

Finalmente a mi hermano Wilber Bolivar Yapura, quien me guio en el esquema de tesis y amigos de siempre: Adolfo Valer Ormachea, quien es como un segundo padre, por su preocupación y entusiasmo en este proceso, Wilberth Ccanquery Haytara, por su colaboración en las salidas de campo. Esfuerzo que ahora deja ver sus frutos.

Así mismo, agradezco a la Autoridad Nacional del Agua - ANA, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI, y al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM, por la información proporcionada para el desarrollo de la Tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	iii

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Caracterización de la realidad problemática.....	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Hipótesis.....	4
1.4.1. Hipótesis general.....	4
1.4.2. Hipótesis específicas.....	4
1.5. Variables.....	4
1.5.1. Variable dependiente.....	4
1.5.2. Variables independientes.....	4
1.6. Justificación.....	5
1.7. Importancia.....	5
1.8. Limitaciones.....	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes de la investigación.....	7
2.1.1. Internacionales.....	7
2.1.2. Nacionales.....	7
2.1.3. Locales.....	8
2.2. Generalidades.....	9
2.2.1. Situación Mundial del retroceso glaciar.....	9
2.2.2. El retroceso glaciar en el Perú.....	10
2.3. Definición de términos básicos.....	11
2.3.1. Glaciares.....	11
2.3.2. Cambio climático y retroceso glaciar (deglaciación).....	12
2.3.3. Formaciones.....	12
2.3.4. Tipos de Glaciares.....	14
2.3.5. Erosión.....	15
2.3.6. Derrubios y detritos.....	17
2.3.7. Morrenas.....	18
2.3.8. Teledetección.....	20
2.3.8.1. Plataformas, Sensores y Canales.....	20
2.3.8.2. Imágenes Satelitales.....	22
2.3.8.3. Imágenes Satelitales LANDSAT.....	23
2.3.8.4. Sistema de Información Geográfica (SIG).....	28
2.3.8.5. Determinación y Mapeo de las Áreas Glaciares.....	30

2.3.9. Disponibilidad de recursos hídricos.....	32
2.3.10. Riesgos asociados al retroceso de los glaciares.....	33

CAPÍTULO III

3. ÁREA DE ESTUDIO.....	35
3.1. Ubicación.....	35
3.2. Accesibilidad.....	35
3.3. Geología y geomorfología.....	38
3.4. Hidrografía e hidrología.....	38
3.5. Suelo.....	38
3.6. Ecología.....	39
3.7. Clima.....	40
3.8. Recursos paisajísticos de interés ambiental, cultural, visual y patrimonial.....	44

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	45
4.1. Método.....	45
4.2. Tipo de investigación.....	45
4.3. Diseño de investigación.....	46
4.4. Procesamiento y análisis de la información.....	47
4.4.1. Análisis del proceso de deglaciación a través del tiempo.....	47
4.4.1.1. Obtención de imágenes.....	47

4.4.1.2.	Procesamiento de imágenes.....	48
4.4.1.3.	Cuantificación del retroceso glaciar.....	52
4.4.2.	Estimación del volumen glaciar.....	53
4.4.3.	Determinación de la productividad hídrica.....	55

CAPÍTULO V

5.	RESULTADOS.....	56
5.1.	Proceso de deglaciación a través del tiempo.....	56
5.1.1.	Imágenes satelitales obtenidas.....	56
5.1.2.	Imágenes satelitales procesadas.....	61
5.2.	Cuantificación del retroceso glaciar.....	65
5.3.	Volumen glaciar estimado.....	74
5.4.	Productividad hídrica en la cuenca.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1	Coeficientes necesarios para obtener valores de energía a partir de los niveles digitales.....	22
Tabla N° 2	Distribución de bandas en OLI y TIRS.....	26
Tabla N° 3	Estaciones meteorológicas de influencia en el área de estudio.....	40
Tabla N° 4	Registros de temperatura y precipitación por estación.....	41
Tabla N° 5	Operación de variables.....	45
Tabla N° 6	Métodos para la estimación de volumen glaciar	54
Tabla N° 7	Características de las imágenes satelitales utilizadas.....	56
Tabla N° 8	Superficie cubierta por el Nevado Ausangate entre 1986 y 2016.....	70
Tabla N° 9	Tasas de retroceso glaciar por periodos.....	73
Tabla N° 10	Volumen glaciar disponible por periodos.....	75
Tabla N° 11	Volumen glaciar para la cuenca 499497869.....	81
Tabla N° 12	Volumen glaciar para la cuenca 499497892.....	81
Tabla N° 13	Caudal por cuenca evaluada.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1	Distribución de agua en el mundo.....	33
Figura N° 2	Ubicación del área de estudio.....	37
Figura N° 3	Especies representativas en la cuenca.....	39
Figura N° 4	Diagrama climático para la Estación Combapata.....	42
Figura N° 5	Diagrama climático para la Estación Sicuani.....	42
Figura N° 6	Diagrama climático para la Estación Pomacanchi.....	43
Figura N° 7	Diagrama climático para la Estación Ccatcca.....	43
Figura N° 8	Composición de bandas de imágenes Landsat.....	49
Figura N° 9	Combinación de bandas de imágenes Landsat	50
Figura N° 10	Clasificación supervisada de coberturas	51
Figura N° 11	Imagen Satelital LandSat – año 1986 (color natural RGB 321)	57
Figura N° 12	Imagen Satelital LandSat – año 1996 (color natural RGB 321)	58
Figura N° 13	Imagen Satelital LandSat – año 2006 (color natural RGB 321)	58
Figura N° 14	Imagen Satelital LandSat – año 2016 (color natural RGB 321)	59
Figura N° 15	Imagen Satelital LandSat – año 1986 (falso color RGB 752)...	59
Figura N° 16	Imagen Satelital LandSat – año 1996 (falso color RGB 752)...	60
Figura N° 17	Imagen Satelital LandSat – año 2006 (falso color RGB 752)...	60
Figura N° 18	Imagen Satelital LandSat – año 2016 (falso color RGB 752)..	61
Figura N° 19	Combinación de bandas RGB 321 color natural.....	62
Figura N° 20	Combinación de bandas RGB 752- falso color.....	63
Figura N° 21	Cobertura de NIEVE y NO NIEVE clasificada.....	64
Figura N° 22	Digitalización de imágenes.....	65

Figura N° 23	Tendencia del retroceso glaciar del Nevado Ausangate.....	73
Figura N° 24	Volumen glaciar disponible por períodos.....	75
Figura N° 25	Disponibilidad hídrica glaciar para la cuenca 499497869.....	82
Figura N° 26	Disponibilidad hídrica glaciar para la cuenca 499497892.....	83

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa N° 1	Mapa de ubicación.....	37
Mapa N° 2	Área glaciar del Nevado Ausangate 1986.....	66
Mapa N° 3	Área glaciar del Nevado Ausangate 1996.....	67
Mapa N° 4	Área glaciar del Nevado Ausangate 2006.....	68
Mapa N° 5	Área glaciar del Nevado Ausangate 2016.....	69
Mapa N° 6	Retroceso glaciar 1986 – 1996 – 2006 - 2016.....	72
Mapa N° 7	Área glaciar por cuenca 1986.....	77
Mapa N° 8	Área glaciar por cuenca 1996.....	78
Mapa N° 9	Área glaciar por cuenca 2006.....	79
Mapa N° 10	Área glaciar por cuenca 2016.....	80

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

- ANA : Autoridad Nacional del Agua
- DEM : Digital Elevation Model (Modelo de Elevación Digital)
- GPS : Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
- PER IMA : Proyecto Especial Regional Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente - PER IMA
- SENAMHI : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
- SIG : Sistema de Información Geográfica

RESUMEN

El estudio intitulado “Evaluación de la deglaciación del Nevado Ausangate y su influencia en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca alta del río Pitumarca – Cusco” fue realizado durante 2017 y 2018, con la finalidad de evaluar la influencia del proceso de deglaciación del Nevado Ausangate, en la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca alta del río Pitumarca para el período 1986-2016 utilizando imágenes satelitales Landsat de los años 1986, 1996, 2006 y 2016, procesadas mediante el uso de herramientas SIG.

La pérdida de cobertura glaciar se determinó por comparación de superficies ocupadas por períodos de 10 años; para cuantificar la disponibilidad hídrica almacenada en el glaciar se usó el método Relación volumen-área según parámetros de escala, así mismo, para cada una de las cuencas de influencia directa de la parte alta del río Pitumarca delimitada por el método Pfafstetter.

Se obtuvo pérdidas de la cobertura nival del orden de 1010 ha en los 40 años, que representa el 34% respecto de la superficie inicial, a una tasa de 32 ha menos por año. Así mismo, el volumen glaciar estimado por períodos mostró reducciones del 43% en su capacidad de proveer recurso hídrico. A nivel de cuenca alta, se identificaron dos cuencas de nivel 9 alimentadas por el Nevado Ausangate, la cuenca 499497869 que presentó pérdidas de 231 ha (24%) y la cuenca 499497892 que perdió 318 ha (37%) de cobertura glaciar en su área de influencia, las pérdidas de volumen por cuenca fueron de 0.07 km³ (31%) para la cuenca 499497869 y 0.42 km³ (47%) para la cuenca 499497892 por su ubicación y pendientes.

ABSTRACT

The study entitled "Evaluation of the deglaciation of the Nevado Ausangate and its influence on the availability of water resources in the upper basin of the Pitumarca River - Cusco" was carried out during 2017 and 2018, with the purpose of evaluating the influence of the deglaciation process of the Nevado Ausangate, in the availability of water resources of the upper Pitumarca river basin for the 1986-2016 period using Landsat satellite images from 1986, 1996, 2006 and 2016, processed through the use of GIS tools.

The loss of glacier coverage was determined by comparison of occupied areas for periods of 10 years; To quantify the water availability stored in the glacier, the volume-area ratio method was used according to scale parameters, as well as for each of the basins of direct influence of the upper Pitumarca River delimited by the Pfafstetter method.

Losses of the snow cover were obtained in the order of 1010 ha in the 40 years, which represents 34% of the surface area, at a rate of 32 ha less per year. Likewise, the glacier volume estimated by periods showed reductions of 43% in its capacity to provide water resources. At the level of the upper basin, two basins of level 9 were identified, fed by the snow, the basin 499497869 that presented losses of 231 ha (24%) and the basin 499497892 that lost 318 ha (37%) of glacier coverage in its area of influence; volume losses per basin were 0.07 km³ (31%) for basin 499497869 and 0.42 km³ (47%) for basin 499497892 due to its location and slopes.

INTRODUCCIÓN

Los glaciares son sistemas muy importantes que deben ser considerados como indicadores claves en la variación del clima, porque son masas sensibles y excelentes indicadores para la interpretación del cambio climático. El cual viene ocasionando cambios significativos en diferentes ecosistemas terrestres y marinos, resaltando el impacto negativo en los glaciares tropicales denominado retroceso glaciar. Este proceso se traduce en modificaciones de las condiciones atmosféricas terrestres a nivel de temperatura del aire, precipitaciones, humedad, nubosidad, entre otros generando cambios en el balance de energía y masa glaciar (UNEP y WMMS 2008).

Los Andes peruanos contienen el 71% de los glaciares tropicales de Sudamérica, los cuales están distribuidos en 19 cordilleras nevadas divididos en 3 sectores: Norte, Centro y Sur, con 2679 glaciares con una superficie de 1298.59 km². En tal sentido, el Perú tiene un gran potencial hídrico en las cuencas hidrográficas. Por lo tanto, es necesario estudiar los glaciares en cuanto a cantidad, distribución, caracterización y dinámica; porque son componentes importantes para el desarrollo de los ecosistemas y la disponibilidad hídrica (Autoridad Nacional del Agua, 2012)

El Inventario de Glaciares realizado por la empresa eléctrica HIDRANDINA S.A., utilizando fotografías aéreas de los años 1962 – 1970, identifica glaciares con superficies mayores a 0,005 km² y un total de 3044 glaciares con una superficie de 20141.85 km² (ANA, 2012)

En la actualidad utilizando tecnologías geoespaciales de percepción remota (Teledetección) verificación de campo, información cartográfica del Sistema de Información Geográfica (SIG) y uso de imágenes satelitales (SPOT5, Aster, Liss III y Landsat) de media resolución, permiten la obtención de la cartografía glaciar, realizando procesamiento de imágenes satelitales y la aplicación del algoritmo Normalized Difference Snow Index (NDSI).

El propósito de esta investigación es evaluar el retroceso glaciar del Nevado Ausangate, para determinar la variación de masa glaciar en los períodos 1986-1996, 1996-2006 y 2006-2016 y su influencia en la disponibilidad hídrica glaciar para abastecer a la cuenca alta del río Pitumarca. Evaluación que se realizó utilizando imágenes satelitales Landsat procesados con herramientas de los Sistemas de Información Geográfica, principalmente con los programas ERDAS y ArcGIS.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 . Caracterización de la realidad problemática

El Perú tiene 19 cordilleras nevadas inventariadas por la ANA, que están siendo afectadas por el Cambio Climático debido al aumento de la temperatura, perdiendo el 57% de sus glaciares (ANA, 2012). En los últimos 40 años han registrado pérdidas en superficie de 42.64%, con respecto a los resultados obtenidos en el inventario del año 1970 (UGRH, 2014). En la Cordillera Vilcanota no se han encontrado cambios glaciares drásticos entre 1962 y 1985, pero se ha producido un pérdida masiva de hielo desde 1985 a 2006, alrededor del 30% de la superficie y 45% de volumen (Salzmann et al., 2013)

Actualmente existen alteraciones en la disponibilidad de agua en las cuencas, lo que afecta los calendarios de producción agrícola, la generación de energía e incrementa los conflictos sociales por el agua (Aliaga, M et. al, 2014); del mismo modo, las cuencas que reciben un importante aporte de agua proveniente de los deshielos, podrían sufrir importantes alteraciones en el futuro. El retroceso

glaciar se refleja en la disminución y pérdida de superficie y volumen glaciar (Colonia y Torres, 2013)

En la Cordillera Vilcanota donde se encuentra el Nevado Ausangate, no hay bastantes investigaciones como en las cordilleras de los Andes Centrales. recién en junio del 2011 se inician labores de monitoreo, con la instalación de una estación climática en la lengua glaciar Quisoquipina a 5180 m s. n. m., un esfuerzo conjunto del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2012). Por tanto, se propone realizar esta evaluación a escala local para determinar la influencia del retroceso glaciar del Nevado Ausangate en la disponibilidad hídrica en la cuenca Alta del río Pitumarca, fuente principal de este recurso para el desarrollo de múltiples actividades productivas que sustentan a la población asentada.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿De qué manera influye el proceso de deglaciación del Nevado Ausangate, en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca alta del río Pitumarca?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo se ha venido presentando el proceso de deglaciación en el Nevado Ausangate de la Cordillera Vilcanota desde 1986 hasta el 2016 expresado en períodos de diez años?

- ¿Cuál es el volumen de agua almacenada en el Nevado Ausangate de la Cordillera Vilcanota y la tasa de cambio desde 1986 hasta el 2016 expresado en períodos de diez años?
- ¿Cuál es la contribución de la escorrentía del Nevado Ausangate al caudal de los ríos de la cuenca alta del río Pitumarca?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia del proceso de deglaciación del Nevado Ausangate de la Cordillera Vilcanota, en la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca alta del río Pitumarca desde 1986 hasta el 2016 expresado en períodos de diez años.

1.3.2. Objetivos específicos

- Describir el proceso de deglaciación a través del tiempo en el Nevado Ausangate de la Cordillera Vilcanota desde 1986 hasta el 2016 expresado en períodos de diez años.
- Estimar el volumen de agua almacenado en el Nevado Ausangate y determinar la tasa de cambio de volumen para períodos de diez años.
- Determinar la productividad hídrica anual (caudal específico) aportado por el Nevado Ausangate a los ríos de la cuenca alta del río Pitumarca

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

El proceso de deglaciación del Nevado Ausangate de la Cordillera Vilcanota, influye significativamente en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca alta del río Pitumarca.

1.4.2. Hipótesis específicas

- El Nevado Ausangate de la Cordillera Vilcanota ha experimentado un proceso de pérdida de superficie glaciar desde 1986 hasta el 2016.
- El Nevado Ausangate de la Cordillera Vilcanota ha experimentado pérdida de volumen glaciar desde 1986 hasta el 2016.
- La productividad hídrica glaciar aportado por el Nevado Ausangate al caudal del río Pitumarca es significativamente importante.

1.5. Variables

1.5.1. Variable dependiente

Disponibilidad hídrica glaciar, expresada en volumen de agua en metros cúbicos.

1.5.2. Variable independiente:

Retroceso glaciar del Nevado Ausangate, expresado en superficie de cobertura de nieve en hectáreas.

1.6. Justificación

Actualmente existen pocas investigaciones realizadas en el Nevado Ausangate que permitan caracterizar el comportamiento hidro glaciológico de las cuencas que reciben las aguas del deshielo de este glaciar, razón por la cual se plantea el presente trabajo de investigación que permitirá conocer las variaciones de la cobertura glaciar, su relación con el caudal que aporta a la cuenca del río Pitumarca y su influencia en la disponibilidad de recursos hídricos.

El retroceso de los glaciares tropicales, como es el caso del Nevado Ausangate de la Cordillera Vilcanota, significará importantes cambios en la disponibilidad de agua para las actividades pastoriles, agrícolas, forestales y en el ámbito de su influencia que necesitan ser estimados adecuadamente, asimismo es necesario determinar la influencia que ejerce el proceso de deglaciación en la disponibilidad hídrica de la Cuenca del río Pitumarca.

1.7. Importancia

La información que se pueda generar servirá para incrementar el conocimiento que se tiene sobre el comportamiento de los glaciares de la Cordillera Vilcanota y pueda ser utilizado para la toma de decisiones en la formulación de planes y proyectos para esta parte de la región.

1.8. Limitaciones

En el presente estudio se delimitará la investigación a la fracción del hielo permanente del Nevado Ausangate, que forma parte de la cuenca alta del río Pitumarca, que aporta con las aguas de su deshielo al caudal de este río. Asimismo, el período de análisis de la evolución de la cobertura glaciar estará

comprendido entre los años 1986 al 2016, de acuerdo a la disponibilidad de imágenes satelitales de calidad y de las mismas épocas.

Las limitantes principales de la investigación son la escasa información hidrológica y climatológica, que permita un análisis adecuado del proceso de deglaciación que se presenta en la zona de estudio, asimismo la accesibilidad a la zona glaciaria del nevado es bastante difícil y no se puede obtener una medición directa de datos topográficos y geográficos, por lo cual se recurrirá a técnica de obtención de información indirectos como la teledetección para estimar el retroceso glaciario.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Internacionales

En el ámbito internacional se han realizado muchas investigaciones sobre el retroceso glaciar de algunos glaciares importantes utilizando métodos indirectos a través de imágenes de satélite, sobre los cuales Suarez et al. (2015) menciona que “el uso de herramientas de percepción remota en los glaciares no es nuevo, ya ha sido ampliamente usado en trabajos de cuantificación de pérdida de volumen glaciar, áreas e inventarios” (p.5).

2.1.2. Nacionales

Salzmann et al. (2013), encuentran que los cambios y las tasas observadas de cambios en el área glaciar y el volumen de la Cordillera Vilcanota son altos, sobre todo desde mediados de 1980, donde han estimado reducciones de aproximadamente 30% para el área y de volumen de aproximadamente 40 a 45% entre 1985 y 2006. Entre 1962 y 1985, los glaciares estaban en punto estables.

Suarez et al. (2015) encuentran para el año 1990 que la cobertura glaciar del Quisoquipina que pertenece a la Cordillera Vilcanota tenía una extensión de 3.66 km² y para el año 2010 se redujo a 3.26 km², lo que representa una pérdida de 0.4 km² (10.9%) de cobertura glaciar. El volumen fue determinado en 0.38 km³ para el año 1990 y 0.32 km³ para el año 2010, lo que representa 0.06 km³ (una disminución de 14.7%)

En 2010/11 se realizaron las primeras mediciones puntuales de balance de masa en el glaciar Suyuparina y el adyacente glaciar Quisoquipina. Las mediciones en el glaciar Suyuparina muestran que la ablación está altamente influenciada por la microtopografía del glaciar, causando un patrón de ablación heterogéneo. (Molina et al., 2015)

2.1.3. Locales

En 2011, Bustamante realiza un análisis multitemporal del conjunto de nevados alrededor del Ausangate encontrando un retroceso aproximado del 47% desde 1975 a 2010 y una incidencia directa con el progresivo aumento de temperaturas. Para la misma área de estudio, Silva en el 2012, tomando imágenes desde 1985 a 2011 encuentra una reducción del 43% desde el año inicial que corresponde a 202 km² a una velocidad referencial de 7.77 km³ por año y dependencia del 93% entre la pérdida nival y la temperatura media.

Asimismo en el 2015 Acassi realiza un análisis multitemporal y generación de escenarios prospectivos de la cobertura nival en la Cordillera Vilcanota utilizando imágenes desde 1990 hasta 2010 por períodos de cinco años, encontrando 63% de pérdida de cobertura nival en 20 años con tasas de 164 km³/año y las altitudes

mínimas se desplazan a razón de 18.3 m/año. Estimando estos parámetros para el año 2020 y 2030 concluyó que los glaciares retrocederán hasta los 4711 y 4933 m s. n. m., respectivamente.

2.2. Generalidades

2.2.1. Situación Mundial del retroceso glaciar

Casi el 97% del hielo del planeta está concentrado en la Antártida (84.5%) y Groenlandia (12%) y se supone menos que el 98% de las reservas de agua dulce, desde el fin de la pequeña edad de hielo alrededor 1850, los glaciares alrededor del mundo han visto decrecer su volumen y ha sido atribuido principalmente al cambio climático global, debido al efecto invernadero. Desde 1980 el retroceso de glaciares se ha acelerado, por lo que muchos glaciares han desaparecido y la existencia de muchos de los restantes está bajo amenaza. Los glaciares más pequeños de latitudes más bajas, parecen ser los más afectados. El mayor glaciar del monte Kenia en África perdió el 92% de su masa en el siglo pasado y los glaciares del monte Kilimanyaro han disminuido un 73% en este mismo período. España tenía 27 glaciares en 1980, ahora su número ha caído a 13; así como el glaciar de Lewis desde 1963 ha perdido 40% de su masa. (Ciencia Popular, 2009; Thompson, 1980)

Por otro lado, al derretirse también las enormes masas de hielo de los polos, reservas del 2% del agua del planeta; el nivel medio del agua de los mares y océanos se eleva a razón de 3 milímetros por año, según científicos de la NASA, lo que provocará la inundación de las zonas costeras de todo el mundo, así

como, de zonas de interiores como es el caso de Holanda. (Ciencia Popular, 2009)

2.2.2. El retroceso glaciar en el Perú

Los andes peruanos poseen todavía importantes masas glaciares entre los 4500 y 6700 m s. n. m., En algunos glaciares representativos se han medido estos últimos decenios un retroceso marcado, lo cual ha ocasionado, y actualmente continua originando, la formación de nuevas lagunas, algunas de ellas con condiciones de peligrosidad latente. Por otro lado, si esta evolución permanece, puede provocar una disminución del recurso hídrico que abastece a los ríos, que sería muy sensible durante la época de estío (Ames M & Francou, 1995)

Desde 1951 los glaciares son objeto de una atención especial de parte de la corporación Peruana del Santa, una compañía del estado que sirve al desarrollo del potencial hidroeléctrico del valle, El interés se refiere sobre todo a las lagunas pro-glaciares que se forman como resultado del retroceso de los glaciares. Algunas de estas lagunas se vaciaron bruscamente y fueron el origen de aluviones catastróficos que causaron numerosas víctimas en el callejón de Huaylas, particularmente entre los años 1941 y 1950 (Ames M& Francou, 1995)

En el año 1968 se instala en Huaraz el servicio de monitoreo de los glaciares, con la creación de la División de Glaciología, Se intenta estudiar los glaciares bajo sus dos aspectos:

1. Por su contribución a los recursos hídricos del Valle.
2. Como Causas impulsoras de aluviones a consecuencia de vaciados intempestivos de lagunas de represas morrénicas.

Así fueron elegidos cuatro glaciares en la Cordillera Central, para efectuar un monitoreo prolongado.

1. Safuna
2. Broggi al Centro
3. Uruashraju
4. Yanamarey Al Sur

Al comienzo de los años 1980, 3 nuevos glaciares se suman al programa:

1. Huarapasca
2. Pastoruri y
3. Gajap

Todos situados al sur de la Cordillera Central (Ames A., 1985)

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Glaciares

Los glaciares son grandes masas de hielo, con o sin agua intersticial, de límites bien establecidos, originados sobre la tierra por metamorfismo a hielo de acumulaciones de nieve (un proceso denominado sinterización de la nieve), y que fluyen lentamente (GEOESTUDIOS, 2008). Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001) se define al glaciar como: "masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie.

Un glaciar subsiste merced a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar".

2.3.2. Cambio climático y retroceso glaciar (deglaciación)

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como: "Cualquier cambio climático en el transcurso del tiempo, ya sea debido a su variabilidad natural o como resultado de la actividad humana" (IPCC, 2007)

El quinto informe de evaluación AR5 del IPCC (2013) refiere que el retroceso glaciar es un hecho prácticamente global a causa del incremento de la temperatura; además, las regiones que han tenido las mayores tasas de reducción son: el oeste canadiense y norte americano, Europa central y en las latitudes bajas. En estas regiones más de 600 glaciares han desaparecido en las últimas décadas. Mientras que los glaciares que aún persisten han sufrido una disminución de su área y volumen.

2.3.3. Formaciones

Las principales formas de acumulación son la precipitación directa de nieve, el congelamiento de agua líquida, nieve transportada por vientos, nieve y hielo traídos por avalanchas, cencelladas y el congelamiento de agua en las capas basales. En los glaciares se suele trazar una línea imaginaria llamada línea de equilibrio la cual divide al glaciar en cuestión en dos zonas, una de acumulación y una de ablación en términos netos. (Strahler, 1999)

a. Grietas

El hielo es un sólido cristalino, pero sometido a una presión. Permanente, puede deformarse y fluir. En los glaciares este movimiento se produce por un deslizamiento de cristales de hielo, lubricados en sus bordes por una delgada película de agua líquida, fundida a causa de la presión. El movimiento hacia abajo del glaciar se puede observar en sus inicios, donde queda separado de la zona de nieves perpetuas por una profunda grieta llamada rimaya. El movimiento del hielo es diferencial, avanza más rápidamente en el centro del glaciar que en sus bordes laterales donde lo frena la fricción. En un perfil vertical la velocidad es mayor en la zona superficial que se comporta como rígida y se rompe formando grietas y disminuye hacia el fondo.

Las grietas hacia el eje de la lengua glaciar y también por el ensanchamiento de este mientras la grietas transversales se forman donde la pendiente bruscamente se empina. En las zonas de Intersección de grietas longitudinales y trasversales. (Derruau, 1991), la topografía es espectacular por la formación de bloques o pináculos de hielo llamados seracs (Duque, 2002)

b. Nieve, Neviza y Hielo

La nieve es una masa ligera y esponjosa con cristales hexagonales individuales siendo cada uno forma caprichosa; no es lluvia congelada si no condensación del vapor de agua por debajo del punto de congelamiento, La Neviza es una maza de estructura granular fruto de la sublimación inversa de la nieve (Paso de Vapor ha Solido), ella se forma a partir del vapor de agua que escapa de los bordes de la partículas de nieve, para unirse al centro del copo a nieve y

aumentar el tamaño de los granos de ceniza. El Hielo se produce del siguiente modo (a partir de la neviza), aumentando el espesor de la capa de neviza, la del fondo queda sometida a presión y los obliga a su fusión obteniéndose agua, que luego se congela formando un sólido con cristales interconectados llamados hielo cuyo color gris, azul o verde se explica por polvo y aire contenido en la masa. En consecuencia los copos de nieve son agregados de cristales de hielo de muy baja densidad (0.1 de la del agua)

La presión causada por el peso de nuevos aportes hace que a expensas de los primitivos cristales se origine la neviza con mayor tamaño, menos espacios huecos y mayor densidad (0.5 la del agua). El aumento de la presión hace que por debajo de la neviza se forme hielo blanco menos poroso y más denso, y más abajo donde los espesores superan los 60 metros, se forma el hielo glaciar de color azulado, comportamiento plástico y mayor densidad (0.92 % la del Agua) (Duque 2002)

2.3.4. Tipos de Glaciares

- a) Casquete Helado.** Masa de hielo que cubre terrenos islas y mares en altas latitudes, como el Vatnajökull (Islandia) con una longitud de 150 km y un espesor de 230 m.
- b) Polar.** Típico del Polo norte donde no hay continente, allí el sustrato es agua, el espesor es de 2 a 4 metros, su papel es proteger el fondo marino. El agua fósil congelada es fundamentalmente de origen marino.
- c) Continental.** Típico del Polo Sur y Groenlandia, allí el sustrato es tierra (La Antártida y Groenlandia) por lo que el espesor máximo

llega a 4.5 y 3 km, respectivamente; las aguas son combinadas y de los tempranos desprendidos y en deriva primero se fusiona el agua dulce, quedando registrados en el hielo de agua salada paleo ambientes de playa.

d) Glaciares de Montaña. Los tres primeros son el 96% de los glaciares es solo el 4%. Los de montaña aparecen en latitudes bajas sobre altas montañas, se subdividen en Glaciar de Valle (como un río), Glaciar de pie de Monte (como la unión de dos ríos) y manto de hielo (estructura radial)

2.3.5. Erosión

Las rocas y sedimentos son incorporados al glaciar por varios procesos. Los glaciares erosionan el terreno principalmente de dos maneras:

c. Abrasión y Arranque

A medida que el glaciar fluye sobre la superficie fracturada del lecho de roca, ablanda y levanta bloques de roca que incorpora al hielo, este proceso conocido como arranque glaciar se produce cuando el agua de deshielo penetra en las grietas y las diaclasas del lecho de roca y del fondo glaciar y se hiela recristalizándose. Conforme el agua se expande, actúa como una palanca que suelta la roca levantándola. De esta manera sedimentos de todos los tamaños entran a formar parte de la carga del glaciar.

La abrasión ocurre cuando el hielo y la carga de fragmentos rocosos se deslizan sobre el lecho de roca y funcionan como un papel de lija que alisa y pule la

superficie situado debajo. La roca pulveriza por la abrasión recibe el nombre de harina de roca.

Esta harina está formada por granos de roca de un tamaño del orden de los 0,002 a 0,00625mm. A veces la cantidad de harina de roca producida es tan elevada que las corrientes de agua de fusión adquieren un color grisáceo (Longwell, Flint & Leet, 1996)

Una de las características visibles de la erosión y abrasión ,glaciar son las estrías glaciares producidas sobre las superficies rocosas del lecho como las observables en el Nevado Ausangate; fragmentos de roca con afilados bordes contenidos y el hielo marcan surcos a modo de arañazos finos. (Derruau, 1991)

d. Velocidad de Erosión

La velocidad de erosión de un glaciar es muy variable. Esta erosión diferencial llevada a cabo por el hielo está controlado por cuatro factores importantes:

Velocidad del Movimiento del Glaciar.

1. Espesor del hielo
2. Forma, abundancia y dureza de los fragmentos de roca contenidos en el hielo en la base del glaciar
3. Erosionabilidad de la superficie por debajo del glaciar.

En el Caso particular de Ausangate la velocidad de erosión se incrementa por las cenizas producto de las fogatas que hacen en lugares aledaños que son transportadas por el viento y depositados sobre la capa superior del glaciar.

2.3.6. Derrubios y detritos

En ambientes de alta montaña, los glaciares pueden presentar una cobertura detrítica superficial continua. Esta capa produce tanto en la zona de acumulación, como en la zona de ablación, un proceso progresivo de adelgazamiento de masa que genera una importante acumulación de detritos en ambientes supra glaciales (Holmlund & Jansson, 2002)

El origen de los detritos supra glaciales se asocia a la existencia de una secuencia: cara libre, talud en laderas con escarpes rocosos, que presentan alta sensibilidad a la meteorización y descargan detritos en forma directa sobre la superficie glacial. La acumulación de detritos supra glaciales influye directamente sobre los procesos de ablación y de flujo de hielo, debido a alteraciones en el albedo y e al conductividad térmica del glaciar. En este sentido, Strem (1959), Nakawo & Yongng (1981, 1982) y Benn & Evans (1998) citado por Silva (2012), definen un umbral inferior a 1 cm en a capa de detritos como el espesor que favorece la fusión del hielo y una capa de detritos de 1 cm o más como aislante del hielo subyacente.

Los procesos de fusión del hielo pueden favorecer el aumento en la capa detrítica supraglaciar, debido a la incorporación de material intraglaciario al manto de la cobertura detrítica glaciario. Esta situación puede generar fenómenos de ablación diferencial, generando procesos de inversión del relieve, caracterizados por la fusión in situ del hielo intersticial de la cobertura detrítica en las zonas recubiertas del glaciar; este proceso es conocido con el nombre de Karst Glacial o Criokarst (Derruau, 1991)

El incremento de detritos sobre la superficie glacial, puede provocar un mayor desarrollo de morrenas mediales y centrales. Una vez que el material es incorporado al glaciar, puede ser transportado varios kilómetros antes de ser depositado en la zona de ablación. Todos los depósitos dejados por los glaciares reciben el nombre de derrubios glaciares se dividen por los geólogos en dos tipos. (Derruau, 1991)

- Materiales depositados directamente por el glaciar, que se conocen como tilles o barro glaciar.
- Los sedimentos dejados por el agua de fusión del glaciar, denominados derrubios estratificados.

2.3.7. Morrenas

Morrena es el nombre más común para los sedimentos descabalados de los glaciares. El término tiene origen francés y fue acuñado por los campesinos para referirse a los rebordes y terraplenes de derrubios encontrados cerca de los márgenes de glaciares en los Alpes Franceses. Actualmente el término es más amplio, porque se aplica a una serie de formas, todas ellas compuestas por till. En muchos glaciares de valle se pueden distinguir los siguientes tipos de morrenas (Holmlund & Jansson, 2002)

a. Morrena Terminal

Una morrena terminal es un montículo de material removido previamente y que se deposita al final de un glaciar. Este tipo de morrena se forma cuando el hielo se está fundiendo y evaporando cerca del hielo del extremo del glaciar a una velocidad igual a la de avance hacia delante del glaciar desde su región de

alimentación. Aunque el extremo glaciar esta estacionario, el hielo sigue fluyendo depositando sedimento como una cinta transportadora.

b. Morrena de Fondo

Cuando la ablación supera a la acumulación, el glaciar empieza a retroceder a medida que los hace, el proceso de sedimentación de la cinta transportadora continua dejando un depósito de till en forma de llanuras onduladas, esta capa de till suavemente ondulada se llama morrena de fondo. Las morrenas terminales que se depositaron durante las estabilizaciones ocasionales del frente de hielo durante los retrocesos se denominan morrenas de retroceso.

c. Morrena Lateral

Los glaciares alpinos producen dos tipos de morrenas que aparecen exclusivamente en los valles de montaña. El primero de ellos se llama Morrena lateral. Este tipo de morrena se produce por el deslizamiento del glaciar respecto a las paredes del valle en el que está confinado; de esta manera los sedimentos se acumulan en forma paralela a los laterales del valle.

d. Morrena Central

Este tipo de morrena es exclusiva de los glaciares alpinos y se forma cuando dos glaciares se unen para formar una sola corriente de hielo. En este caso las morrenas laterales se unen para formar una franja central oscura.

e. Morrena Superficial

Están situadas en la superficie del Glaciar

f. Morrena de Frente

Está situado en la parte delantera del glaciar

2.3.8. Teledetección

Es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material, en nuestro caso se trata de objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación sea posible es necesario que aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre objetos y el sensor, En este caso la interacción va ser un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor. Este flujo puede ser, en cuanto a su origen de tres tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (Luz visible e infrarrojo reflejado).
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojos térmico)
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar)

Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva y la última como teledetección activa (Campbell, 2003)

2.3.8.1. Plataformas, Sensores y Canales

Se entiende por plataforma los satélites como (LANDSAT, METEOSAT, SPOT, NOAA) o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia, La resolución temporal indica el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por la plataforma.

Un Sensor es el dispositivo que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia. Puede captar información para diferentes regiones del

espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda. Los diferentes canales se pueden caracterizar en función de variables (Cori, 2012).

Los sensores tienen cualidades cuando trabaja con información espacial es fundamental el concepto de escala que hace referencia a la relación y proporción existente entre un documento (mapa, foto, imagen) y en las imágenes captadas por radiómetros o radares hablaremos de resolución habilidad de registrar y discriminar información de detalle lo que depende del efecto combinado de sus distintos componentes (Sobrino& Raissouni 2000). En la práctica se habla de 5 tipos de resoluciones:

- **Resolución Espectral:** Número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, región del espectro para la cual capta datos.
- **Resolución Radiométrica:** Número de intervalos de intensidad que puede captar para discriminar niveles o intensidad de radiancia.
- **Resolución Espacial:** Tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen: tamaño de pixel sobre el terreno.
- **Resolución Temporal:** Mide el tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto. Con ello se determina la periodicidad de adquisición de imágenes de una misma zona.
- **Resolución Angular:** Capacidad del sensor de tomar imágenes oblicuas. Esta propiedad permite acortar los ciclos de temporales de recubrimiento y posibilita la generación de imágenes estereoscópicas y por tanto la reconstrucción del relieve.

Los principales satélites y sensores utilizados hoy en día en teledetección son LANDSAT, SPOT, METEOSAT, NOAA, IRS, IKONOS.

2.3.8.2. Imágenes Satelitales

La imagen de satélite resultante consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en el caso de Landsat que tiene una resolución radiométrica tiene 8 bits, es decir 2 elevado a la potencia 8 (2^8) que en la escala de grises se extiende de 0 al 255. El cero (0) es el primer valor, donde no capta ninguna respuesta espectral y el 255 es el máximo valor, donde se registra el máximo de la respuesta espectral.

Estos valores se denominan niveles digitales y será necesario transformarlos en algún tipo de variable física. La transformación suele ser a través de una ecuación lineal cuyos parámetros se suministran junto con la imagen. Ver tabla, aparecen los parámetros para las 6 bandas más utilizadas del sensor LANDSAT-TM, junto con la irradiancia solar extraterrestre, cantidad de energía solar que llega al límite de la atmosfera que se utiliza para calcular la reflectividad (Campbell, 2003).

Tabla Nro. 01 Coeficientes necesarios para obtener valores de energía a partir de los niveles digitales mediante la ecuación $E=a_0+a_1ND$			
Banda	a0	a1	E0 (W/m2)
1 (Azul)	-0.06662095	0.04197408	138.25
2 (Verde)	-0.1573225	0.10345120	139.04
3 (Rojo)	-0.1126937	0.06499743	89.1
4 (Infrarrojo A)	-0.23285630	0.11705160	147.7
5 (Infrarrojo B)	-0.08640033	0.02726504	44.6
6 (Infrarrojo termico)			
7 (Infrarrojo C)	-0.05113922	0.01692211	21.33

Fuente: <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/>

Las seis matrices pueden verse individualmente, asignando a cada valor un tono más claro u oscuro, en niveles de gris o de algún otro color, o bien formando una combinación de colores. Puesto que se trata de imágenes rectangulares formados por píxeles resultan muy apropiadas para su tratamiento visual y los sistemas de información Geográfica para el análisis numérico y para su combinación con otro tipo de información espacial (Murcia, 2006). Nótese que la banda 6 no se considera ya que es una banda térmica con otro rango de respuesta espectral almacenada en sus píxeles, dentro del rango del infrarrojo termal, razón por la cuales es utilizado para hallar fluctuaciones de temperatura.

2.3.8.3. Imágenes Satelitales LANDSAT

Las plataformas LANDSAT son una serie de satélites construidos y puestos en órbita por Estados Unidos de Norteamérica, para la observación en alta resolución de la superficie terrestre (Fernandez & Herreo, 2006). Los Landsat orbitan alrededor de la tierra en órbita circular helio sincrónica, a 705 km de altura, con una inclinación de 98.2° respecto del Ecuador y un período de 99 minutos. La órbita de los satélites está diseñado de tal modo que cada vez que estos cruzan el Ecuador lo hacen de Norte a sur entre las 10:00 a. m. y 10:15 a. m. hora local. Los Landsat están equipados con instrumentos específicos para la teledetección multiespectral (Fernandez & Herreo, 2006). El primer satélite Landsat 1, fue lanzado el 23 de julio de 1972, y el último fue el satélite Landsat 8 que fue lanzado el 11 de febrero del 2013, es un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es proporcionar información para las actividades relacionadas con la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y también en el ámbito estatal. Es un satélite más completo con funciones mejoradas para

monitorizar la calidad del agua y nubes atmosféricas altas. Este satélite contiene dos sensores: *Sensor operacional de imagen de tierra (OLI)* y un *sensor infrarrojo Térmico (TIRS)*.

Serie de satélites Landsat y año de su lanzamiento.

- ✓ Landsat 1: 1972
- ✓ Landsat 2: 1975
- ✓ Landsat 3: 1978
- ✓ Landsat 4: 1982
- ✓ Landsat 5: 1985
- ✓ Landsat 6: 1993 Lanzamiento fallido
- ✓ Landsat 7: 1999
- ✓ Landsat 8: 2013

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

El satélite Landsat 5 fue puesto en órbita el 1 de marzo de 1984 portando el sensor TM (Mapeador Temático) que opera en siete bandas espectrales diferentes, estas bandas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas. El Landsat 5 pertenece al programa LANDSAT financiado por el gobierno de los Estados Unidos y operado por la NASA.

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

El ETM+ es un sensor multiespectral radiométrico a bordo del satélite Landsat 7. Este sensor ha adquirido información casi ininterrumpida desde julio de 1999 con un período de revisita de 16 días. El 31 de mayo del 2003 ocurrió una falla de un

instrumento dando como resultado que todas las escenas de Landsat 7 adquiridas desde el 14 de julio de ese año hayan sido colectadas en modo "SLC-off". El sensor ETM+ provee imágenes con 8 bandas espectrales. La resolución espacial es de 30 metros en las bandas visibles infrarroja cercana (Bandas 1-5 y 7). La resolución de la banda pancromática (Banda 8) es de 15 metros, la banda infrarroja termal (Banda 6) es de 60 metros, el tamaño aproximado de la escena es de 170 x 183 km (Fernandez & Herreo, 2006)

- **Landsat 8**

El satélite LANDSAT-8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite óptico de resolución media, contiene dos sensores: OLI (siglas en inglés para Operational Land Imager) formado por 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojo hasta el espectro de radiación de bajas ondas; TIRS (Thermal Infrared Sensor) está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojo térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra.

- **Bandas Espectrales**

Las bandas espectrales se refieren a la capacidad del satélite de recibir información en rangos definidos del espectro electromagnético. Las longitudes de onda y los valores exactos dependen de los instrumentos del satélite particular. En la tabla N°2 se muestran las características de las bandas de las imágenes Landsat 8:

Tabla N° 2. Distribución de bandas en OLI y TIRS

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

(USGS, 2013)

Fuente: <https://landsat.usgs.gov/>

A continuación se describen los tipos de cobertura que cada banda espectral permite distinguir:

- ✓ **Banda 1:** (0.45 a 0.52 micrones – azul) Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo coníferas y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.
- ✓ **Banda 2:** (0.52 a 0.60 micrones verde) Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y al igual que la banda 1 para detectar presencia o no de limonita.
- ✓ **Banda 3:** (0.63 a 0.69 micrones – rojo) Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.
- ✓ **Banda 4:** (0.76 a 0.90 micrones – infrarrojo cercano) Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

- ✓ **Banda 5:** (1.55 a 1.75 micrones – Infrarrojo medio) Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.
- ✓ **Banda 6:** (10.40 a 12.50 micrones – Infrarrojo Termal) El Infrarrojo termal es útil en el análisis del stress de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y el mapeo termal.
- ✓ **Banda 7:** (2.08 a 2.35 micrones – infrarrojo medio) Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidroxilos (OH) y la absorción de agua.
- ✓ **Banda 8:** (0.51 a 0.68 micrones - Pancromática) Funciona como una película en blanco y negro; en vez de coleccionar colores visibles por separado, combina en un solo canal.
- ✓ **Banda 9:** (1.36 a 1.38 Micrones. Cirrus) Es la que muestra menos, pero es una de las características más interesantes de Landsat 8, cubre una rebanada muy fina de longitudes de onda, solo 1370 +- 10 nanómetros, pocos instrumentos espaciales recogen esta parte del espectro, porque la atmosfera absorbe casi todo.
- ✓ **Banda 10:** (10.60 a 11.19 micrones – TIR 1) Esta en el infrarrojo térmico, o TIR lo que le permite ver el calor. En lugar de medir la temperatura del aire, como lo hacen las estaciones meteorológicas, informan en el suelo mismo, que a menudo es mucho más caliente.
- ✓ **Banda 11:** (11.50 a 12.51 micrones – TIR 2) Cumple funciones similares a la banda 10.

2.3.8.4. Sistema de Información Geográfica (SIG)

El National Center for Geographic Information and Analysis de USA, los define como sistema de Hardware, Software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión. (NCGIA, 1988)

La base de un Sistema de Información Geográfica, es una serie de mapas digitales representando diversas variables, o bien mapas que representan diversos objetos a los que corresponden varias entradas de una base de datos, Esta estructura permite combinar, en un mismo sistema, información con orígenes y formatos muy diversos lo que permite incrementar el grado de conocimiento (Chuvieco, 1990)

Para el tratamiento de este tipo de sistemas, se han desarrollado un tipo específico de aplicaciones informáticas que popularmente se conocen como SIG (Erdas, ArcGis, Idrisi, etc.), pero que realmente constituyen tan solo un componente de los que es realmente un SIG, Podríamos considerar que en un sentido amplio que SIG está constituido por:

- ✓ **Bases de datos espaciales**, en las que la realidad se codifica mediante unos modelos de datos específicos.
- ✓ **Bases de datos temáticos**, cuya vinculación con la base de datos cartografía permite asignar a cada punto, línea o área del territorio unos valores temáticos.

- ✓ **Conjunto de herramientas**, que permiten manejar estas base de datos de forma útil para diversos propósitos de investigación, docencia o gestión.
- ✓ **Conjunto de ordenadores, periféricos de entrada y salida**, que constituyen el soporte físico del SIG, Estas incluyen tanto el programa de gestión de SIG como otros programas de apoyo.
- ✓ **Comunidad de usuarios**, que pueda demandar información espacial.
- ✓ **Administradores del Sistema**, encargados de resolver los requerimientos de los usuarios bien utilizando las herramientas disponibles o bien produciendo nuevas herramientas.

- **Escala de trabajo**

La escala y el nivel de desagregación están íntimamente relacionados. La escala de trabajo condiciona también la unidad más pequeña de información que se puede incluir en un mapa temático, que se denomina mínima unidad cartografiada según la Asociación Cartográfica Internacional, la escala límite más idónea para los sensores Landsat TM es de 1:100 000. Se debe considerar además la diferencia entre identificación que se refiere al reconocimiento de características de un objeto y la detección que solo determina su existencia. (Chuvieco, 2010)

- **El modelo Raster**

El modelo Raster divide el área de estudio en una agrupación de celdas cuadradas ordenadas en una secuencia específica. Cada de estas celdas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la celda, por tanto se considera que el modelo raster cubre la totalidad del

espacio. Un conjunto de celdas, junto con sus valores de denomina una capa raster (Murcia, 2006)

Este modelo responde a una concepción del mundo como un continuo que puede describirse mediante un número de variables (altitud, pendiente, temperatura media de julio, tipo de suelo, etc.), que toman valores diferentes localizaciones definidas por un sistema de coordenadas, cada variable se representa así mediante una capa. El modelo vectorial responde a una concepción del mundo basada en objetos con límites definidos (Murcia, 2006).

2.3.8.5. Determinación y Mapeo de las Áreas Glaciales

Actualmente el monitoreo de los glaciares en alta montaña está siendo tratado con base en nuevas técnicas, Ya que las altas montañas son sistemas naturales que involucran superficies de hielo que cambian a tasas históricamente no se habrían registrado (Kääb, 2005), es necesario que el monitoreo y las medidas de prevención estén a la par de los cambios presentes, considerando estudios y medidas cada vez más precisos sobre la evolución temporal y dinámica de los glaciares.

Las nuevas tecnologías para la observación de la tierra y la aplicación de la percepción remota y los SIG, permite a los investigadores adaptarlas al monitoreo de zonas de difícil acceso.

De lo anterior, un aspecto muy importante en el estudio glaciológico y evolutivo de los glaciares es el mapeo y monitoreo de los límites y extensiones glaciales. Por medio de estos mapeos, es posible contar con inventarios glaciológicos que

abarquen tanto los cambios físicos como morfológicos de los glaciares en interacción con el medio.

La firma espectral que es el comportamiento de un objeto al interactuar con la radiación, absorbiendo y reflejando esta en ciertas longitudes de onda; describe e identifica los diferentes tipos de superficies y coberturas, Mediante el procesamiento de las imágenes satelitales, se pueden clasificar los diferentes tipos de coberturas y superficies (Schowengerdt, 1997) aplicando alguno de los siguientes métodos:

- ✓ **Clasificación Dura y Suave.** Basada en la identificación y definición digital de forma visual de clases o coberturas en el terreno, estableciendo sitios de entrenamiento para cada una de las clases (Kääb, 2005)
- ✓ **Clasificación Manual Supervisada y No Supervisada.** Basadas en el agrupamiento de forma digital de las clases espectrales naturales presentes en la imagen (reconocimiento espectral de patrones), las cuales posteriormente son clasificadas por interpretación humana mediante las firmas espectrales de las diferentes coberturas (Kääb, 2005)
- ✓ **Clasificación Paramétrica y No Paramétrica.** Basadas en la distribución estadística de alguna clase en particular. Cuando existe el conocimiento de esta distribución se realiza una clasificación paramétrica y cuando no existe tal, se realiza una clasificación no paramétrica (Kääb, 2005)
- ✓ **Segmentación Espectral y Espacial.** Basadas en la relación existente entre pixeles vecinos y pixeles con las misma respuesta espectral (Kääb, 2005)

- ✓ **Clasificación Espectral.** Basada en la respuesta espectral de las diferentes coberturas presentes en la imagen (Kääb, 2005)

2.3.9. Disponibilidad de recursos hídricos

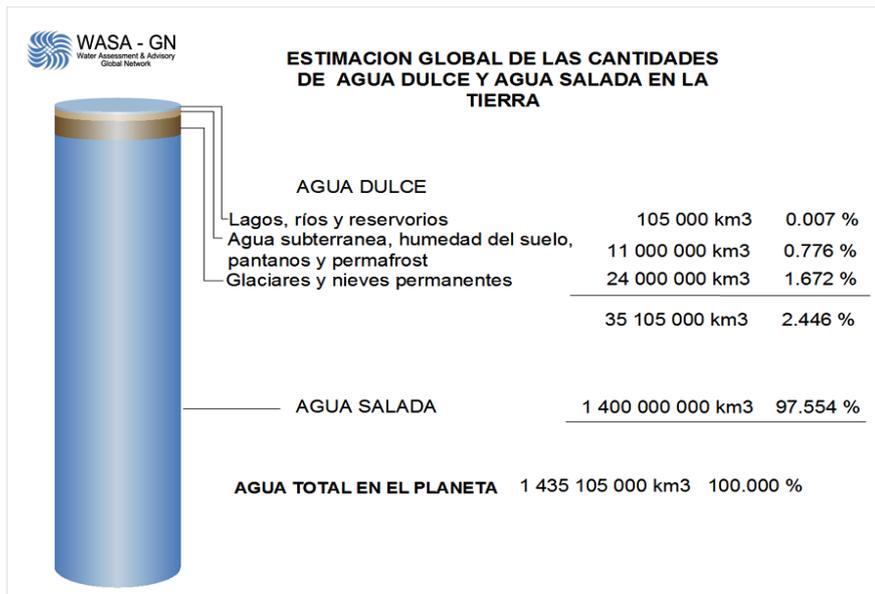
El agua se encuentra naturalmente en varias formas y lugares: en la atmósfera, en la superficie, bajo tierra y en los océanos. El 97.554% del agua de la tierra es salada y se encuentra en los océanos, y el agua dulce representa solo el 2.446% del total de agua del planeta, los glaciares contienen el 1.672% del total de agua del planeta (ver Figura 1). El resto se presenta principalmente en forma de agua subterránea, y solo una pequeña fracción se localiza en la superficie o en la atmósfera.

Los Andes tropicales son sede de más del 99% de todos los glaciares tropicales del planeta (Vuille, 2008 y Kaser, 1999) entre Perú (71%), Bolivia (20%), Ecuador (4%) y Colombia-Venezuela (4%). La Cordillera Vilcanota concentra aproximadamente el 21.52% de superficie glaciar de todo el territorio peruano (UGRH, 2014)

Para conocer la disponibilidad hídrica a nivel de cordilleras se realiza el inventario de glaciares, siendo el primero realizado por la empresa eléctrica HIDRANDINA S.A., donde se conformaron brigadas de reconocimiento de campo y se utilizaron las fotografías aéreas de los años 1962/1970, llegando a identificar glaciares con una superficie mayor a los 0.005 km², determinándose en las cordilleras un total de 3044 glaciares con una superficie de 2041.85 km² (UGRH, 2014). Para el año 2014, en su tercera actualización del inventario de glaciares de las 19 cordilleras nevadas del Perú, se muestran un total de 2679 glaciares con una superficie de 1 298.59 km². Las cordilleras con mayor cantidad de glaciares y superficie glaciar

son: La Cordillera Blanca en los Andes del Norte, con 755 glaciares y 527.62 km², en los Andes del Centro la Cordillera Vilcanota con 374 glaciares y 279.40 km²; y la Cordillera Vilcabamba con 355 glaciares y una superficie de 129.15 km².

Figura 1. Distribución de agua en el mundo



Fuente: WATER ASSESSMENT AND ADVISORY- GLOBAL NETWORK (WASA-GN), 2009

WASA-GN es una Organización Internacional cuya función es de crear nuevas Sinergias de gestión de los recursos hídricos a nivel mundial. Esta organización propone el estudio de las causas de la crisis global de Agua que hoy vivimos y formulación de modelos de gestión hídrica de mayor racionalidad.

2.3.10. Riesgos asociados al retroceso de los glaciares

Las actuales características climáticas que afectan a los glaciares así como su emplazamiento sobre zonas tectónicas, topografías abruptas y materiales no consolidados suponen un riesgo natural. Las partes más altas de los nevados se corresponden con elevaciones prominentes, estando expuestas a pendientes

muy fuertes que son susceptibles de sufrir aludes y desprendimientos. Este retroceso y fusión de los glaciares implica una pérdida muy importante del volumen de agua, por lo que la disponibilidad de este bien necesario se reducirá considerablemente. Perú es un país que, bien por el abastecimiento a la población o por actividades económicas como la agricultura, depende en su gran mayoría de territorio de los regímenes y caudales de los ríos que tienen un origen glaciar. La deglaciación también está favorecida por la topografía ya que las crestas agudas y los flancos irregulares con fuertes pendientes contribuyen a ello.

En un primer momento la fusión de glaciares provocaría el aumento de los recursos hídricos a corto plazo, pero posteriormente se producirían sequías y estiajes. Además, se aumentaría el riesgo de desastres naturales al incrementarse las probabilidades de inundaciones y aluviones. Las lagunas que quedarían colgadas, actuarían como diques naturales, pudiendo suceder un desembalse violento de estos diques naturales.

CAPÍTULO III

3. ÁREA DE ESTUDIO

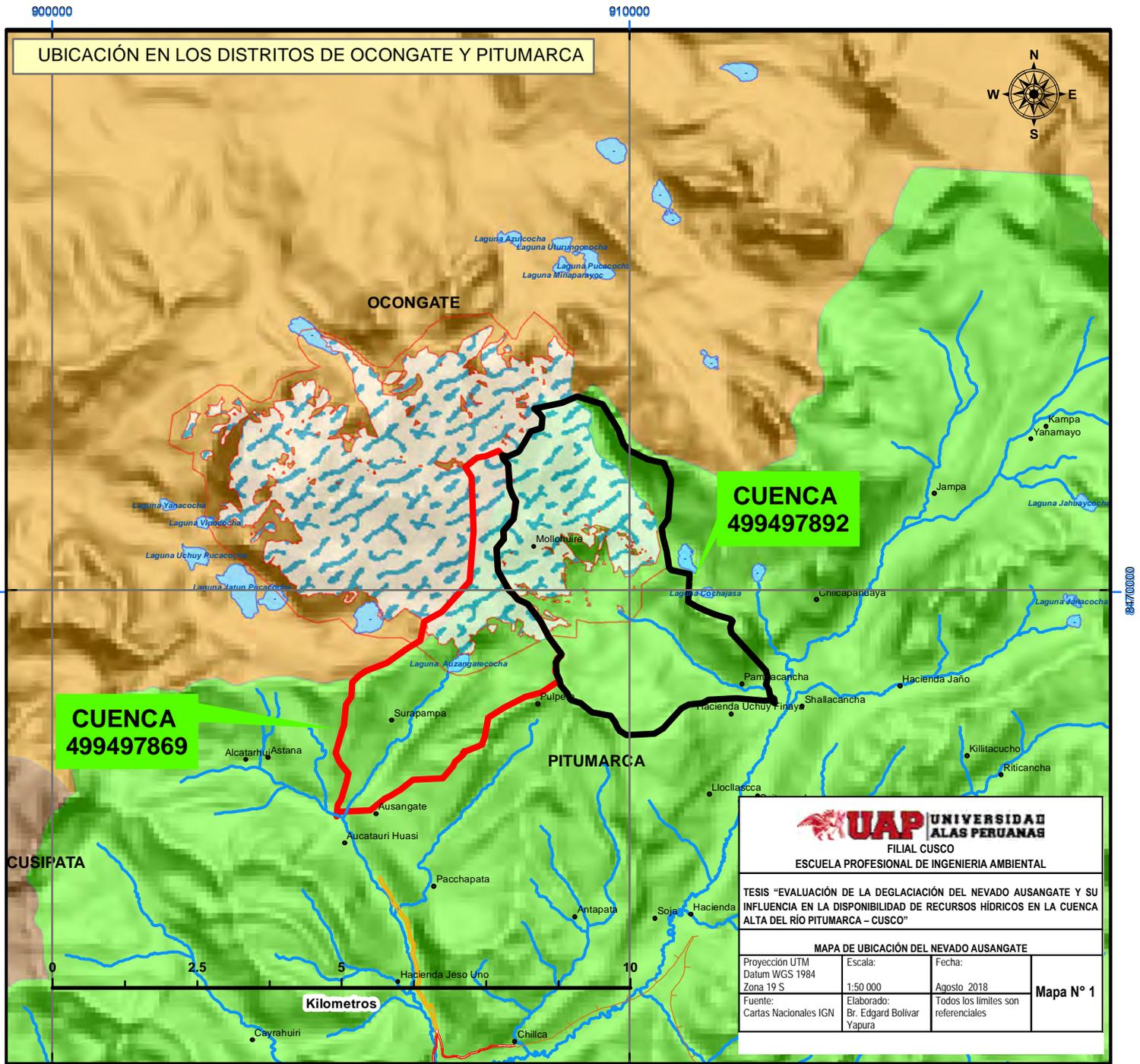
3.1. Ubicación

El Nevado Ausangate se ubica dentro del distrito de Ocongate provincia de Quispicanchis y de Pitumarca provincia de Canchis (Figura N°2); el presente estudio y evaluación se realizó desde el distrito de Pitumarca, ubicado dentro de la Cordillera Vilcanota en las coordenadas 13° 47' 19" Latitud Sur, 71° 13' 52' Longitud Oeste; 8 474 532 m Norte y 258 788 m Este de Coordenadas UTM zona 19L, con altitud máxima: 6372 m s. n. m., En el mapa N°1 se muestra la ubicación del área de estudio.

3.2. Accesibilidad

Existen dos vías de acceso al Nevado Ausangate, una por el distrito de Ocongate, centro poblado de Tinki a unos 114 km de la ciudad del Cusco, por la vía interoceánica, y la otra por la vía Cusco – Pitumarca a 142 km. es la cuarta montaña más alta del Perú y la decimoséptima de la Cordillera de los Andes, con una altitud de 6372 m s. n. m., Durante los últimos años se ha incrementado las visitas a este nevado por 2 motivos la primera por ascensión al Ausangate y la

segunda por visitar a los cerros de Vinicunca (o cerro de Colores) que se encuentra muy cercano al Nevado Ausangate.



UBICACIÓN EN LOS DISTRITOS DE OCONGATE Y PITUMARCA



CUENCA
499497892

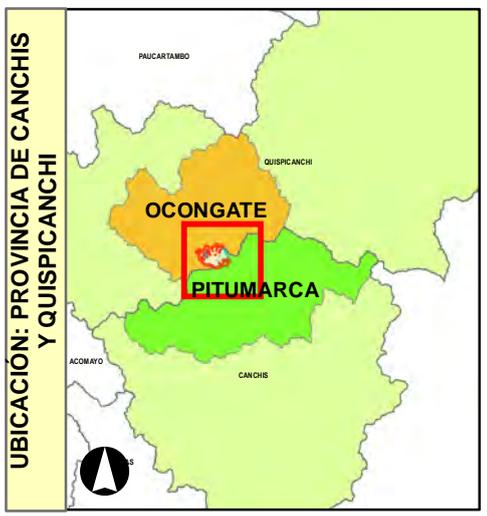
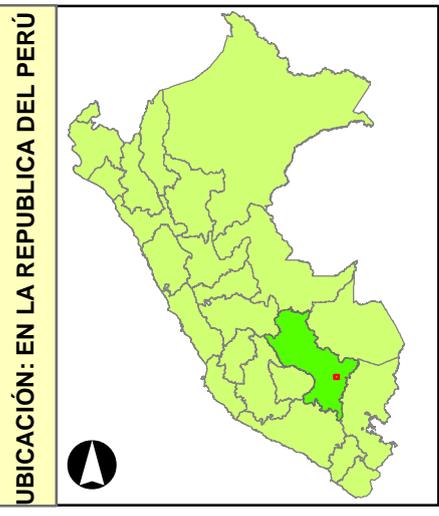
CUENCA
499497869

UAP UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO"

MAPA DE UBICACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE

Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:50 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 1
Fuente: Cartas Nacionales IGN	Elaborado: Br. Edgard Bolívar Yapura	Todos los límites son referenciales	



3.3. Geología y geomorfología

De acuerdo a la zona de estudio que es el flanco izquierdo de la Cordillera Vilcanota, exactamente Pitumarca se puede distinguir tres unidades de relieves: Ladera o Vertientes montañosas, altiplanicies y fondos de valle. Asociados a la cordillera principal, la cual tiene su parte más elevada el Nevado Ausangate con 6372 m s. n. m.

Las partes altas están constituido por diversos depósitos morrénicos de origen fluvio-glaciar, litológicamente compuesto por materiales caóticos como los cuarzos, areniscas blancas, aglomerados volcánicos, calizas, lutitas, areniscas e intrusitos granitoides.

3.4. Hidrografía e hidrología

La fuente hídrica es el Río Pitumarca que atraviesa la comunidad a las largo de 7.50 km con una caudal de 7.00 m³/seg para el mes de estiaje (sequia).

La oferta hídrica en las partes altas de las comunidades de Pitumarca está dado fundamentalmente a la presencia de la deglaciación del Nevado Ausangate, que luego forman Lagunas, Bofedales y acuíferos que drenan a través de las quebradas.

3.5. Suelo

De acuerdo a la clasificación de suelos, por su capacidad de uso, los suelos de mayor importancia para la comunidad son ideales para el desarrollo de pastos naturales, en términos de superficie estas áreas no son significativas ya que

abarcan solo 90.58 ha que hacen el 2.76% del total de tierras de la comunidad; el otro uso de tierras es para el pastoreo de ganado camélido (Alpacas, Llamas)

3.6. Ecología

Las características morfológicas, ubicación, condiciones climáticas y la presencia de glaciares dan lugar a una red hídrica y dan lugar a la existencia de un completo de formaciones biológicas. La zona de estudio tiene una variedad de ecosistemas y alta diversidad de características físicas ambientales.

Las comunidades cercanas que se encuentran en la cuenca alta y media presentan una cobertura vegetal variada, diferenciándose dos tipos de vegetación: una constituida por matorrales de ladera y bosques nativos asociados a pastizales.

Los pastizales identificados en la comunidad son: crespillo (*Calamagrostis vicunarum*), grano ichu (*Stipa brachiphylla*), grama (*Muhlenbergia fastigiata*), *Luzula peruviana*, pilly pilli (*Hypochoeris Taraxacoide*), kunkuna (*Disticha muscoides*), *Plantagulo tubuloso*, sillo (*Allchemilla pinnata*)

Figura N° 3. Especies representativas en la cuenca



Paco (*Acichne pulvinata*)(Fuente propia)



Kunkuna (*Disticha muscoides*) (Fuente propia)

3.7. Clima

El clima en el ámbito de estudio está definido por dos épocas estacionales bien marcadas, una época seca y una época lluviosa. Debido a que no se cuenta con una estación meteorológica en el área del nevado, se tomó datos de referencia de parámetros de temperatura y precipitación de las estaciones más cercanas que permitan caracterizar las condiciones climáticas del área de estudio. En la tabla N° 3 se detallan las características de ubicación de las estaciones meteorológicas administradas por el SENAMHI en el entorno del área de estudio.

Tabla N° 3. Estaciones meteorológicas de influencia en el área de estudio

N°	Nombre	Coordenadas		Ubicación geográfica		Altitud
		Longitud Oeste	Latitud Sur	Distrito	Provincia	
1	Pomacanchi	71° 34' 22"	14° 01' 41"	Pomacanchi	Acomayo	3200 m
2	Combapata	71° 14' 03"	14° 10' 02"	Combapata	Canchis	3474 m
3	Sicuani	71° 14' 14"	14° 15' 13"	Sicuani	Canchis	3574 m
4	Ccatcca	71° 33' 37"	13° 36' 36"	Ccatcca	Quispicanchi	3729 m

Fuente: Datos obtenidos de SENAMHI, 2017

Las cuatro estaciones meteorológicas consideradas son de tipo convencional, de los que se tomaron los registros de precipitación y temperaturas máximas y mínimas a partir del año 1965 hasta 2016, con los cuales se determinaron promedios de precipitación mensual y temperaturas medias mensuales para cada estación de referencia, los que se resumen en el cuadro N° 4.

Tabla N° 4. Registros de temperatura y precipitación por estación

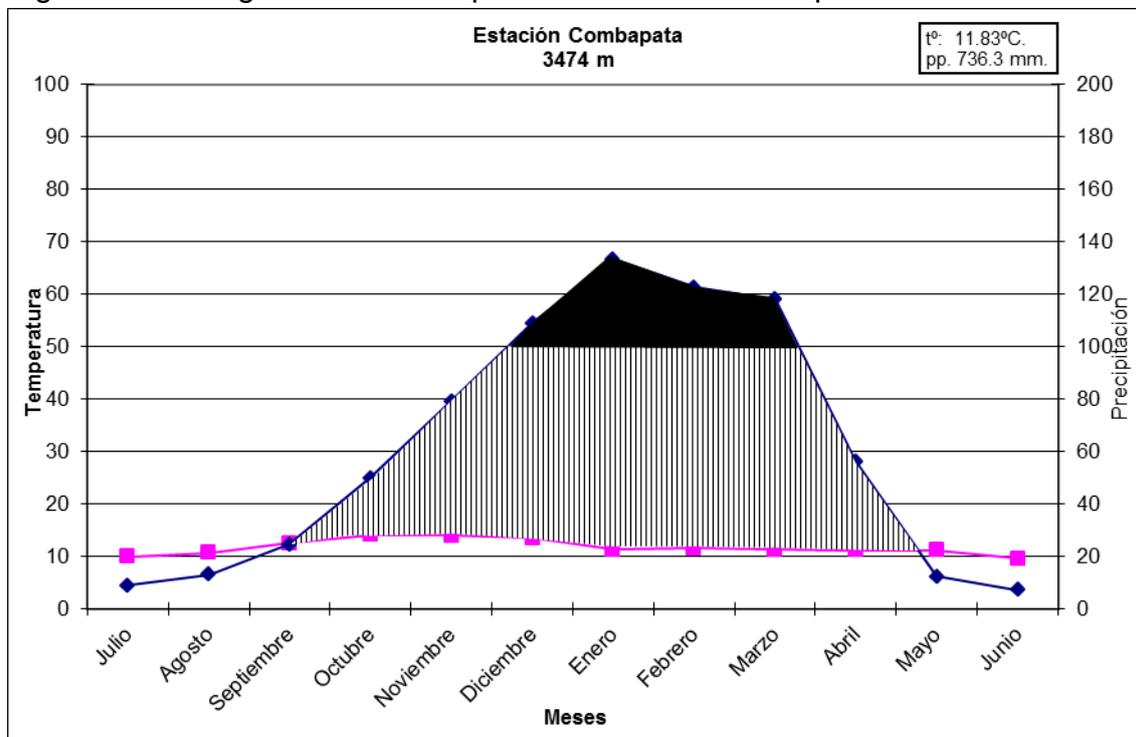
Estación	Combapata		Sicuani		Pomacanchi		Ccatcca	
	T (°C)	Pp (mm)	T (°C)	Pp (mm)	T (°C)	Pp (mm)	T (°C)	Pp (mm)
Enero	11.41	133.5	12.22	135.0	10.40	163.7	9.14	125.4
Febrero	11.65	122.8	12.11	133.0	10.26	147.3	9.17	118.7
Marzo	11.44	118.0	12.07	118.6	10.39	120.0	8.87	99.9
Abril	11.27	56.4	11.37	51.5	9.95	59.6	8.70	38.9
Mayo	11.24	12.6	9.62	11.8	8.71	15.5	7.59	7.7
Junio	9.65	7.4	8.05	5.5	7.59	4.1	6.51	4.7
Julio	10.02	9.1	7.90	7.7	7.31	5.0	5.89	5.5
Agosto	10.72	13.2	9.33	11.1	8.68	9.2	6.98	9.2
Setiembre	12.65	24.6	11.41	22.4	10.26	29.3	8.21	15.8
Octubre	14.20	50.1	12.57	51.9	11.12	66.9	9.86	39.0
Noviembre	14.10	79.4	12.70	75.0	11.09	84.5	9.75	58.3
Diciembre	13.59	109.1	12.56	109.7	10.92	142.4	9.42	102.5
Promedio	11.83	-	10.99		9.72	-	8.34	-
Total	-	736.3		733.3	-	847.5		625.4

Fuente: Datos obtenidos del SENAMHI, 2017

Con los datos de la tabla N° 4 se elaboraron diagramas climáticos para cada una de las estaciones meteorológicas de referencia. Según la Figuras N° 4, 5, 6 y 7 se puede distinguir que en todas las estaciones se presenta una época seca de escasa precipitación entre los meses de mayo a setiembre, un período de precipitación abundante que supera los 100 mm entre los meses de diciembre a

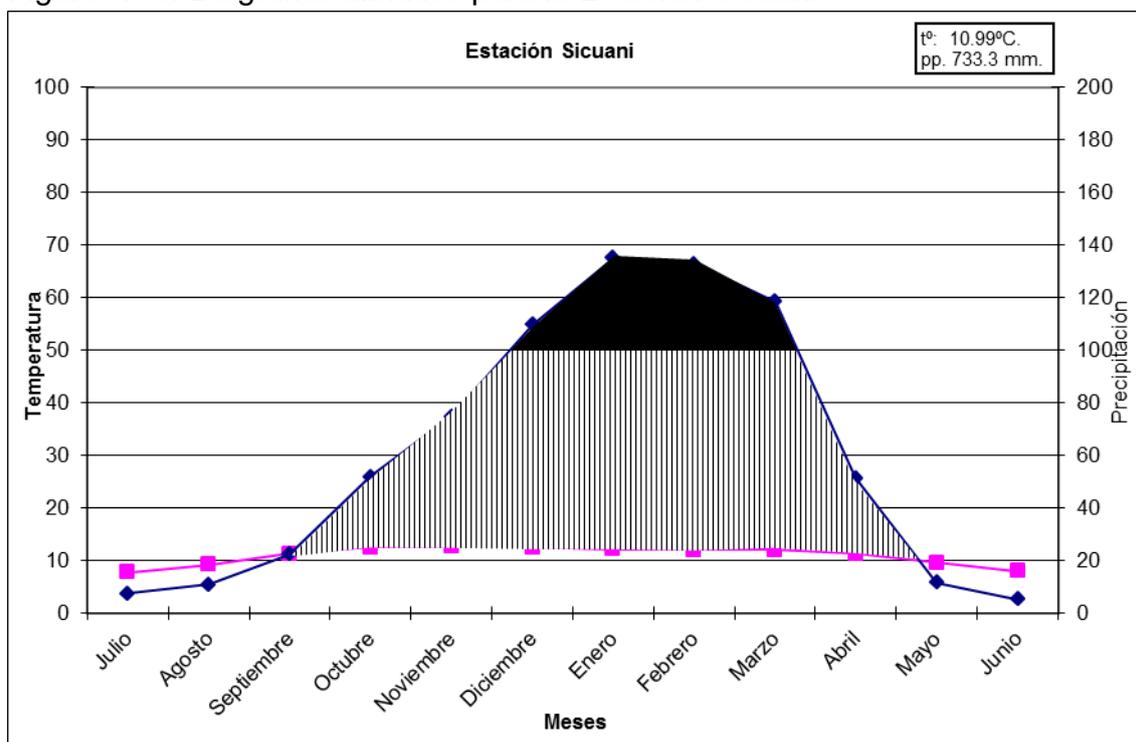
marzo, y los meses restantes presentan lluvias moderadas por debajo de los 100 mm de precipitación.

Figura N° 4. Diagrama climático para la Estación Combapata



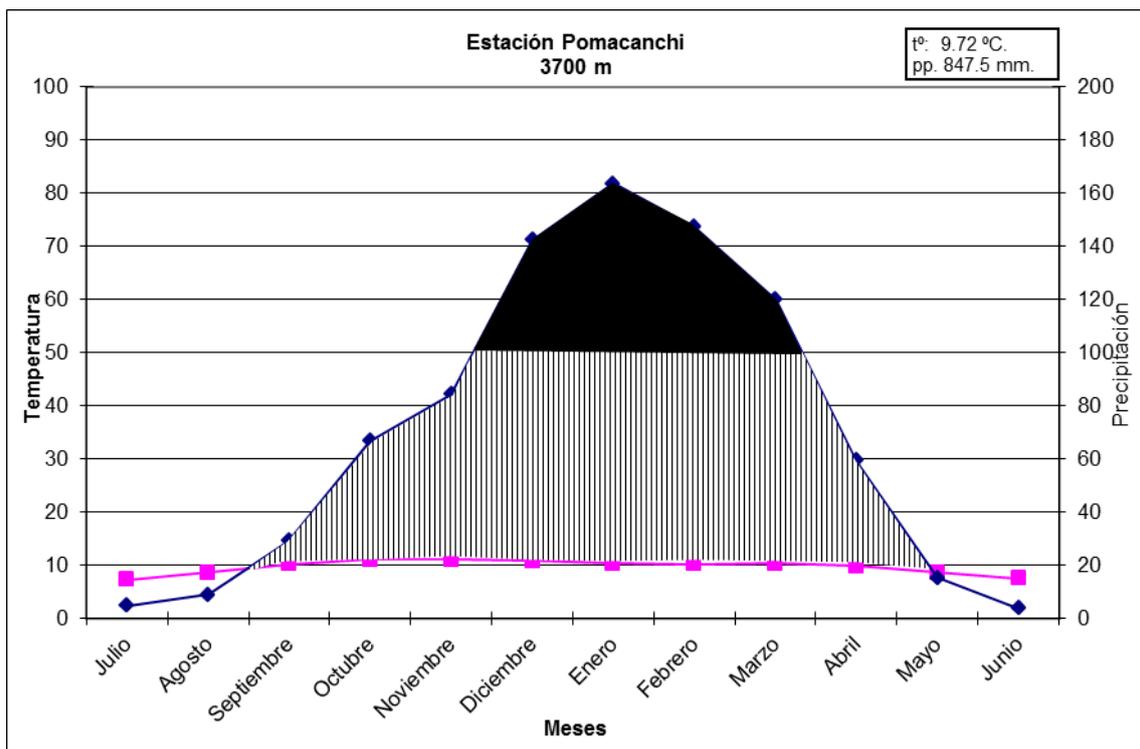
Fuente: Elaborado en base a los datos de la tabla N° 4 (tabla anterior)

Figura N° 5. Diagrama climático para la Estación Sicuani



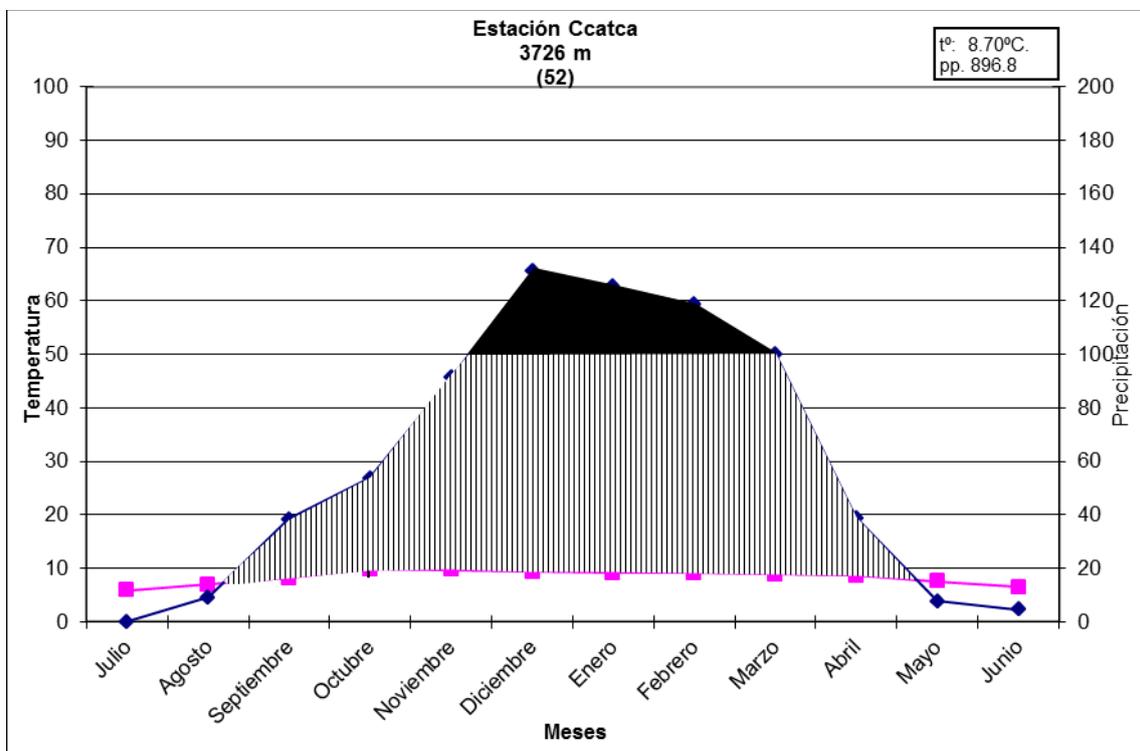
Fuente: Elaborado en base a los datos de la tabla N° 4 (tabla anterior)

Figura N° 6. Diagrama climático para la Estación Pomacanchi



Fuente: Elaborado en base a los datos de la tabla N° 4 (tabla anterior)

Figura N° 7. Diagrama climático para la Estación Ccatcca



Fuente: Elaborado en base a los datos de la tabla N° 4 (tabla anterior)

3.8. Recursos paisajísticos de interés ambiental, cultural, visual y patrimonial

El Nevado Ausangate es un atractivo natural con una altura de 6372 m s. n. m., considerado un APU o deidad protectora de los pueblos que lo rodean, es así una de las montañas más representativas de la región, es apreciado desde la ciudad del cusco, especialmente desde las partes más altas, tiene espejos de agua como el Sivinacocha de aguas color turquesa, bosques de piedras y es un atractivo turístico de interés por los deportes de aventura.

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Método

Método de investigación no experimental y de nivel comparativo y explicativo.

4.2. Tipo de investigación

La investigación es de tipo cuantitativo, relacionando las variables que se describen en la tabla N° 5.

Tabla N° 5. Operación de variables

Variable	Definición Operacional	Dimensión	Técnicas	Instrumentos
Disponibilidad hídrica glaciar	Variación del volumen de agua almacenado en el glaciar	Volumen de agua en km ³	Estimación de volumen por método de escala	Leyes de escala: relación área y volumen
Retroceso glaciar	Cobertura glaciar por períodos de análisis	Superficie glaciar en hectáreas	Procesamiento de Imágenes, índices espectrales NDSI	Imágenes satelitales Landsat y datos de campo.

Fuente: Propia

4.3. Diseño de investigación

La presente investigación se desarrolló en tres fases, con el propósito de ordenar los procedimientos y la recolección de información cualitativa y cuantitativa para el logro de los objetivos propuestos.

i) Fase preliminar: se desarrollará en dos etapas:

- Etapa 1: Revisión de información secundaria, obtención de imágenes satelitales, solicitud de autorizaciones para visitar las comunidades, y las visitas exploratorias a la zona de estudio.
- Etapa 2: Pre-procesamiento de imágenes satelitales, obtención preliminar de superficie mediante clasificación supervisada de imágenes, y el volumen glaciar a través de la aplicación de fórmulas con el método Relación volumen área según parámetros de escala.

ii) Fase de campo: Se realizaron visitas de campo con la finalidad de obtener mediciones directas, obtener puntos de control con GPS para validación de los límites de cobertura nival y diferenciación de otros tipos de cobertura.

iii) Fase de análisis: En esta fase se desarrolló las siguientes etapas:

- Etapa 1: Estimación de superficie glaciar y volumen glaciar multitemporal y por períodos de diez años, mediante el procesamiento de imágenes satelitales, estimación de disponibilidad hídrica glaciar.
- Etapa 2: Describir el proceso de retroceso glaciar a través del tiempo en el Nevado Ausangate, para el período 1986 – 2016, mediante la obtención de tasas de cambio de superficie glaciar y volumen glaciar.

- Etapa 3: Estimación de la productividad hídrica glaciar.
- Etapa 4: Evaluación de la problemática asociada a la deglaciación del Nevado Ausangate, sobre la disponibilidad de los recursos hídricos.
- Etapa 5: Evaluar las tendencias del aporte hídrico del glaciar y su influencia en la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca.

4.4. Procesamiento y análisis de la información

El procesamiento de la información recolectada en campo y la obtenida de fuentes secundarias y primarias fueron tratadas de acuerdo a los objetivos planteados en la presente investigación.

4.4.1. Análisis del proceso de deglaciación a través del tiempo

4.4.1.1. Obtención de imágenes

Las imágenes satelitales tipo Landsat fueron obtenidas de la base de datos del servidor USGS (United States Geological Survey) donde se puede encontrar un catálogo de imágenes satelitales de todo el planeta a partir del año 1985, las imágenes obtenidas cuentan con un ancho de barrido de 185 kilómetros y 30 metros de resolución en cada pixel, capturado desde una altitud de 705 km. De los cuáles se seleccionaron imágenes de los años 1986, 1996, 2006 y 2016 en época seca (julio y agosto) con ausencia de nubes y otro tipo de errores.

Para descargar las imágenes que corresponden a la zona se utiliza la grilla mundial que se identifica cada imagen de forma unívoca por un Path (franja vertical) y un Row (fila horizontal), en este caso se ubica en el Path 3 y Row 70.

4.4.1.2. Procesamiento de imágenes

Una vez obtenidas las imágenes y validados in situ de los límites inferiores de la cobertura de nieve, ubicación de lagunas y otros puntos de referencia se realizó la corrección de las imágenes, ortorrectificación, composición de bandas y clasificación de coberturas para cada período.

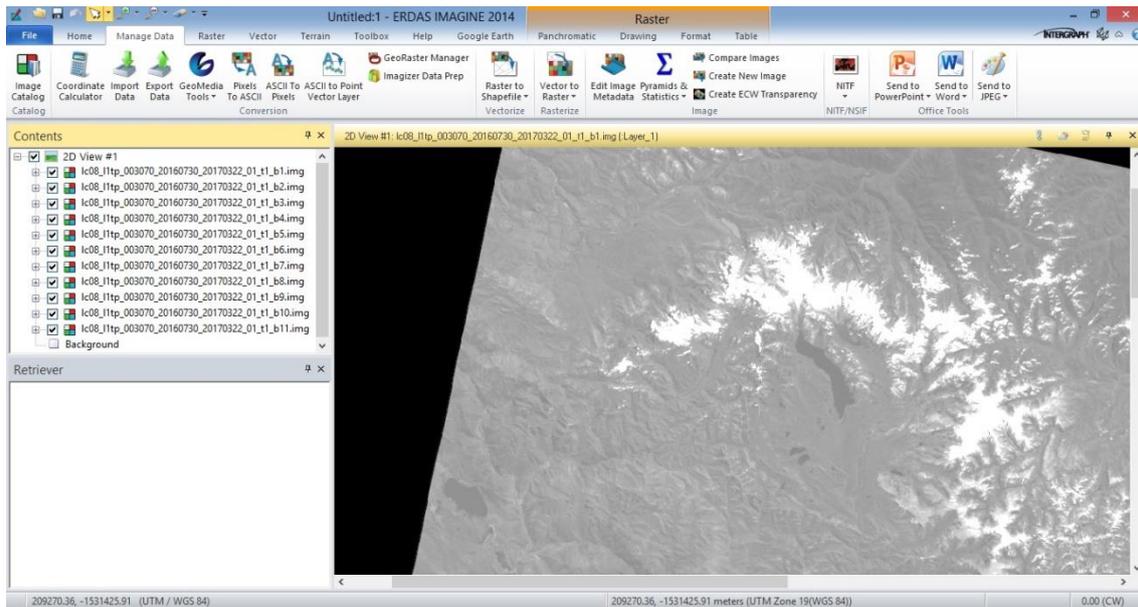
a. Reproyección

Consiste en proyectar los datos en un plano en base a un sistema de proyección cartográfica, en este caso la imagen ya está en proyección Universal Transversal Mercator, con Datum WGS84 y zona 19 del hemisferio Norte y se reproyectó para el hemisferio Sur.

b. Composición de bandas

Utilizando el Software ERDAS 2014 se importaron los datos descargados (uno por cada banda) para reconstruir la imagen mediante la unión de todas las bandas, con la ayuda de la herramienta Composite Bands se introducen las imágenes por orden de bandas para luego procesarlas y obtener una imagen compuesta para cada año evaluado, este proceso también se conoce como apilamiento de las bandas dependiendo del Programa que se utilice. En la figura 8 se muestra el procedimiento realizado en el Programa ERDAS Imagine 2014.

Figura N° 8. Composición de bandas de imágenes Landsat

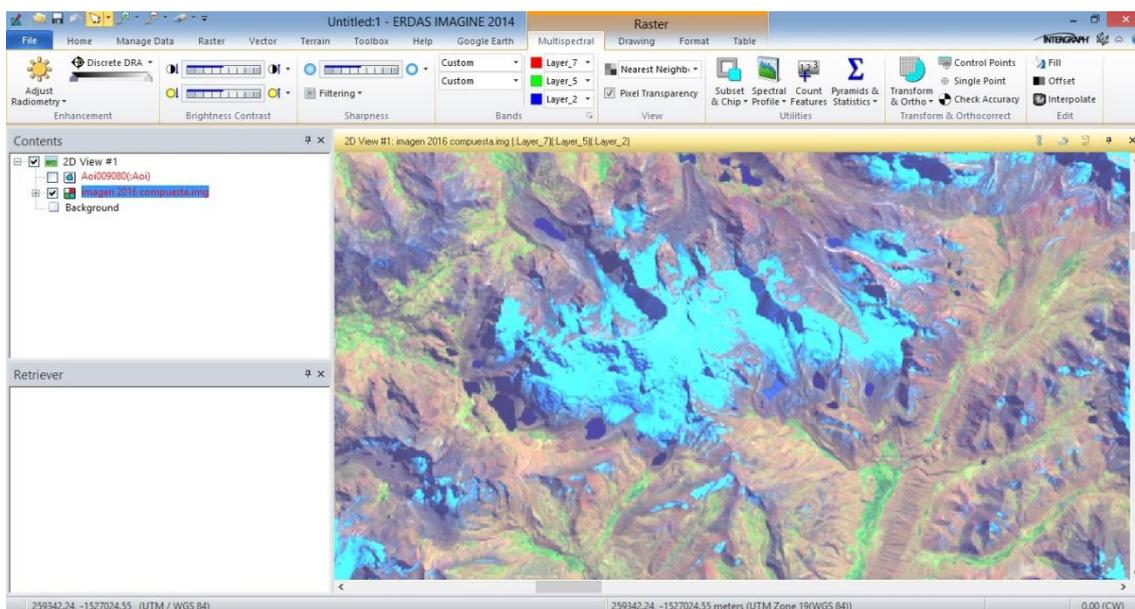


Fuente: Propia

c. Combinación de bandas

Permite analizar elementos de específicos de la superficie terrestre en función de su espectro de emisión e interpretar aspectos como la vegetación, los usos del suelo y masas de agua. Utilizando el Software ArcGIS versión 10.1 se extrajo un polígono conteniendo el área de estudio con la herramienta Clip, en el cual se procedió a realizar una serie de combinaciones de bandas que resalten y discriminen mejor los diferentes tipos de cobertura, así distinguir claramente y delimitar el área glaciar por períodos mostrando las cubiertas con diferentes colores dependiendo de las bandas tomadas en cada combinación. En este caso se utilizó la combinación en falso color RGB 752, de acuerdo a la de Acasi (2015), como se observa en la figura 9.

Figura N°9. Combinación de bandas de imágenes Landsat

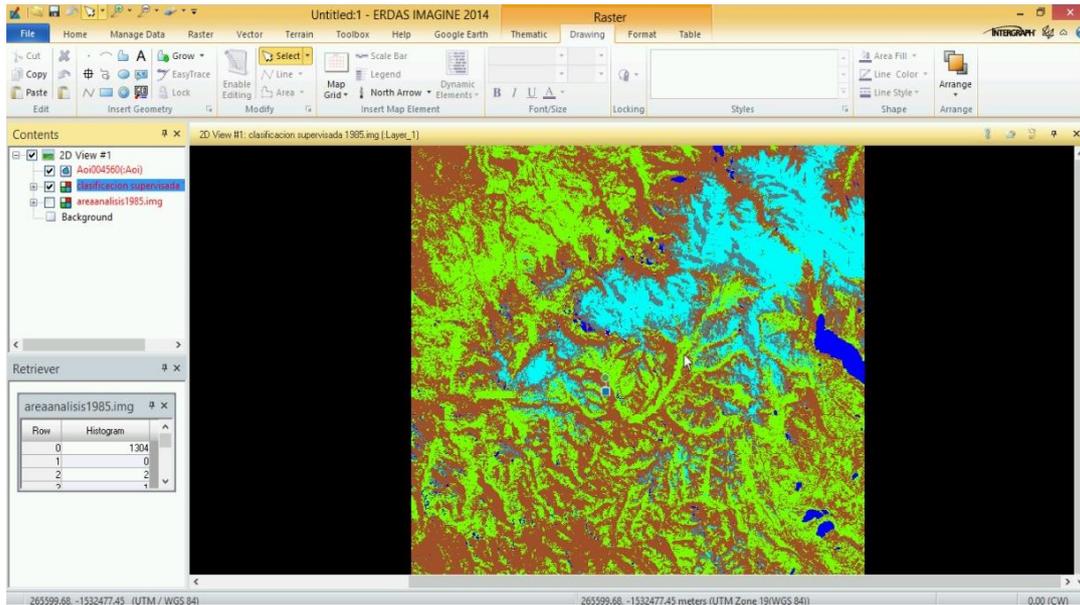


Fuente: Propia

d. Clasificación de coberturas

Determinada la combinación que mejor caracteriza la cobertura de nieve y no nieve en cada período de análisis se realizó un proceso de clasificación a través del método no supervisado, supervisado y delimitación manual para poder cuantificar la cobertura de nieve para cada año evaluado. Para este caso se tomó el método supervisado por ser el que brinda mayor confianza, ya que toma en cuenta áreas de entrenamiento, firmas espectrales y datos obtenidos en campo, cuyos valores de pixel se extrapolan a todo el ámbito de estudio. El proceso para la clasificación supervisada en el Programa ERDAS Imagine 2014 se muestran en la figura 10.

Figura N°10. Clasificación supervisada de coberturas



Fuente: Propia

Así mismo, se han aplicado operaciones con las bandas 2 y 5 con álgebra de mapas empleando el Índice de diferencia Normalizado de Nieve (NDSI de sus siglas en inglés) y el no normalizado SI para comparar resultados.

$$\text{NDSI} = \frac{(b2 - b5)}{(b2 + b5)}$$

Dónde:

NDSI: Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (traducido del inglés)

b2: Banda 2

b5: Banda 5

Fuente: The physical basis of glacier volumen-área scaling

$$SI = TM2 - TM5$$

Fuente: Alonso & Moreno, 1996

4.4.1.3. Cuantificación del retroceso glaciar

Hasta este paso anterior del procedimiento, las imágenes y productos obtenidos se encuentran en formato raster (matriz de celdas o píxeles) que no reconocieron todas las áreas cubiertas por nieve sobre todo en las sombras generadas por las empinadas cumbres por lo que se tuvo que transformar en formato vector (que utiliza puntos, líneas o polígonos para representar variables) para abarcar todas las áreas cubiertas por nieve manualmente, habiendo sido corroboradas con imágenes de google earth y en campo.

En esta etapa se realizaron correcciones y validaciones del proceso de transformación de formato y finalmente se obtienen las superficies de cobertura de nieve en términos de área para cada período. Con los cuales se hizo el análisis de coberturas a través de sobreposición de mapas y tasa de retroceso con la siguiente fórmula:

$$T_D = \frac{(A_i - A_f)}{n_a}$$

Donde:

T_D = Tasa de deglaciación

A_i = superficie año inicial

A_f = superficie año final

n_a = número de años del período

Fuente: Hernandez, 2002

4.4.2. Estimación del volumen glaciar

Para estimar el volumen glaciar, existen diversos métodos directos e indirectos. Según Soruco, Vincent, Francou y Rabatel (2014), se puede medir el balance de masa por los siguientes métodos:

- **Método glaciológico**

Estima la pérdida o ganancia de masa de un glaciar en un periodo de tiempo determinado a partir de mediciones de campo, balizas en la zona de ablación y pozos/perforaciones de nieve/hielo en la zona de acumulación.

- **Método hidrológico**

El balance de masa es obtenido a partir de la medición de la precipitación (P) (P en metros por año) y la medición del caudal (D) de fusión del glaciar (D en l/s) utilizando la ecuación de continuidad.}

- **Método geodésico (fotogramétrico)**

Método cartográfico comúnmente conocido como el método volumétrico o geodésico, es calculado a partir de la diferencia entre modelos de topografía superficial de un glaciar en dos o más épocas. Se emplean Modelos Digitales de Elevación (MDE), que pueden ser obtenidos mediante la digitalización de mapas topográficos escaneados, de las restituciones fotogramétricas aéreas, a partir de una estereo correlación satelital automática, de datos topográficos (GPS o estaciones totales) o mediante datos LiDAR (Light Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) aerotransportados o terrestres.

Según Fuente y Colonia (2013), los métodos indirectos más utilizados se son los que se detallan en la tabla N° 6.

Tabla N° 6. Métodos para la estimación de volumen glaciar.

Nombre	Cita	Ecuación	Ventajas	Desventajas
Relación Volumen - Área según parámetros de escala	Bahr et al. 1997	$V = cA^y$	Aplicación sencilla y rápida	La correlación es baja entre área y espesor. El espesor o es principalmente determinado por el área
Estimación del espesor dependiente - pendiente	Haeberli y Hoelzle, 1995	$V = A * h_{prom}$ $h_{prom} = 1 + \frac{r}{fpgsina}$	Es usado para datos tabulados de inventario de glaciares	La pendiente promedio calculada con el actg (AH/L) = pendiente promedio del Modelo Digital de Elevación (MDE)
Modelo de distribución de espesor de hielo	linsbauer et al., 2012	Modelo	Estima Profundidades del glaciar en varios puntos a lo largo de las líneas de flujo	Consume mucho tiempo para preparar los datos de entrada

Fuente: Colonia y Torres, 2013

El método “Relación volumen – área según parámetros de escala” de Bahr et al. (1997) es el más ampliamente utilizado método de escala, que aplica leyes de escala entre el área (A) y el volumen (V), $c = 0.048$ (valor empírico) con $y = 1.36$ (valor empírico). Basado en la calibración de medición de 144 glaciares.

$$V = cA^y$$

Dónde:

V: Volumen Glaciar en km^3

A: Superficie Glaciar km^2

C: 0.048 Valor Empírico

Y: 1.36 Valor Empírico

Fuente: Bahtr, 1997

4.4.3. Determinación de la productividad hídrica

Para esta etapa se identificaron y codificaron las cuencas involucradas y dependientes del Nevado Ausangate a través del método de delimitación y codificación de cuencas según Pfafsteter (1989) a partir de la Cuenca del río Pitumarca de Nivel 7. Posteriormente se determinó la porción del nevado que corresponde a cada cuenca y la disponibilidad hídrica expresada en términos de volumen glaciar existente en cada período y en la actualidad. Así mismo se realizó la medición caudales que se producen en cada cuenca por el método convencional y calculado con la siguiente fórmula:

$$Q = V \times A \times F$$

Donde:

Q: caudal (m³)

V: velocidad (m/s)

A: área de sección transversal (m²)

F: factor de conversión

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

5.1. Proceso de deglaciación a través del tiempo

5.1.1. Imágenes satelitales obtenidas

Las imágenes satelitales obtenidas por cada período propuesto con sus respectivas características se muestran en la tabla N°7.

Tabla N°7. Características de las imágenes satelitales utilizadas

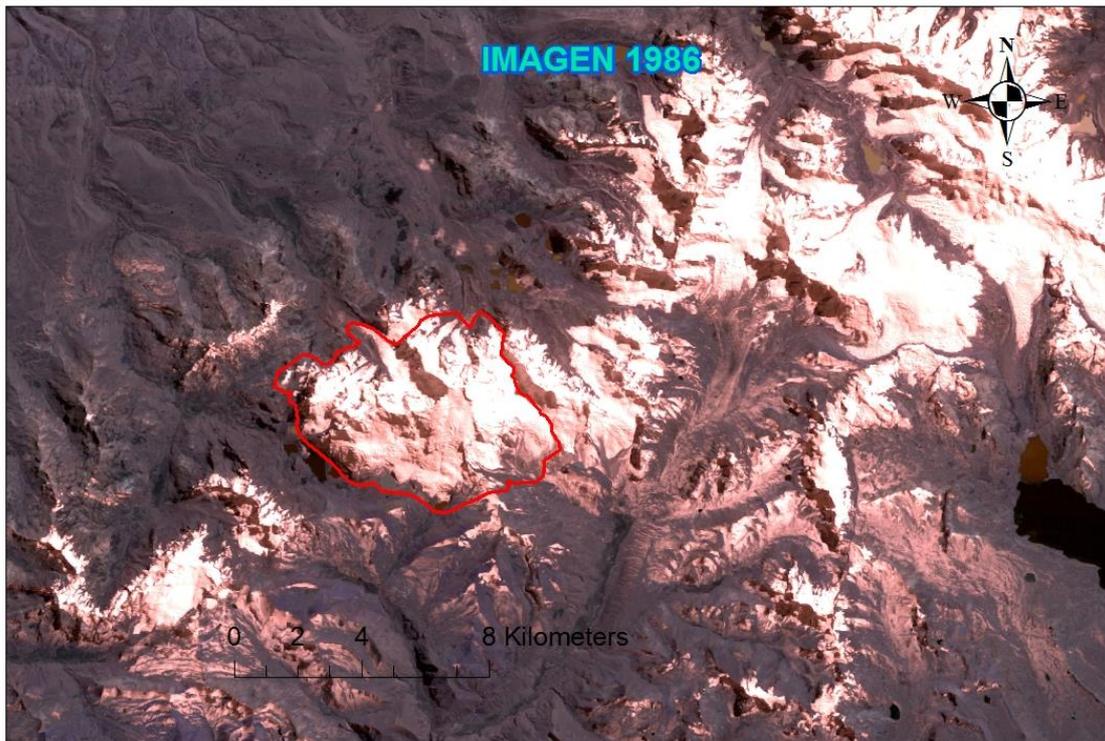
Tipo sensor	Fecha	Resolución (m)	Proyección	Formato	Fuente
Landsat 5 TM	12/07/1986	30	UTM	Geotiff	USGS (1)
Landsat 5 TM	23/07/1996	30	UTM	Geotiff	USGS (1)
Landsat 5 TM	06/07/2006	30	UTM	Geotiff	USGS (1)
Landsat 8 OLI/TIRS	16/07/2016	30	UTM	Geotiff	USGS (1)

Fuente: United States Geological Survey disponible en <https://earthexplorer.usgs.gov/>

En las figuras N° 11, 12, 13 y 14 se muestran en la combinación de bandas RGB 321 color natural, en donde se ha delimitado el área correspondiente al Nevado

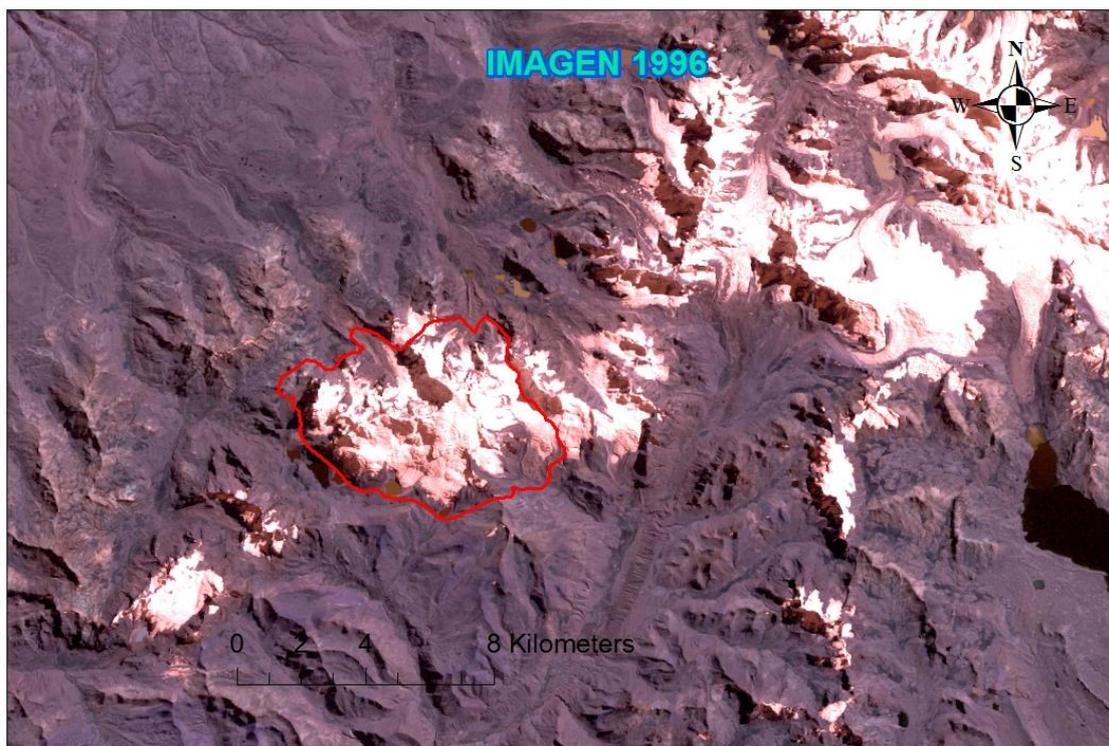
Ausangate. Asimismo, en las figuras 15, 16, 17 y 18 se muestra la cobertura de nieve en falso color RGB 752.

Figura N° 11. Imagen Satelital LandSat – año 1986 (color natural RGB 321)



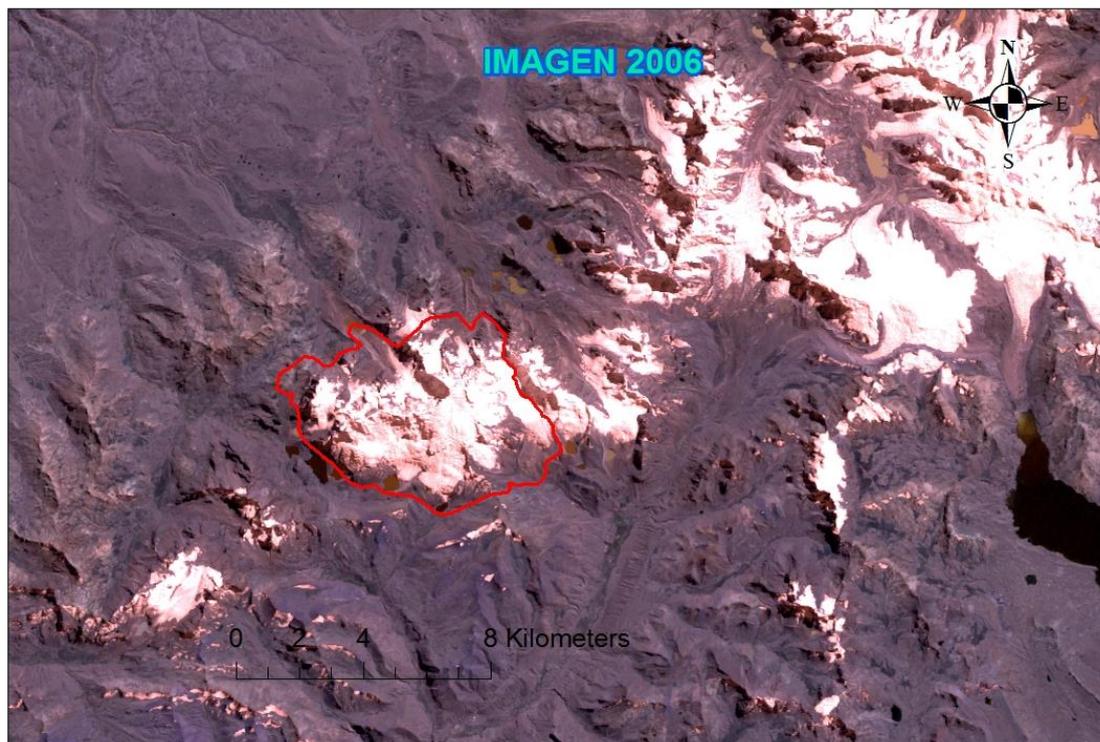
Fuente: Propia

Figura N° 12. Imagen Satelital LandSat – año 1996 (color natural RGB 321)



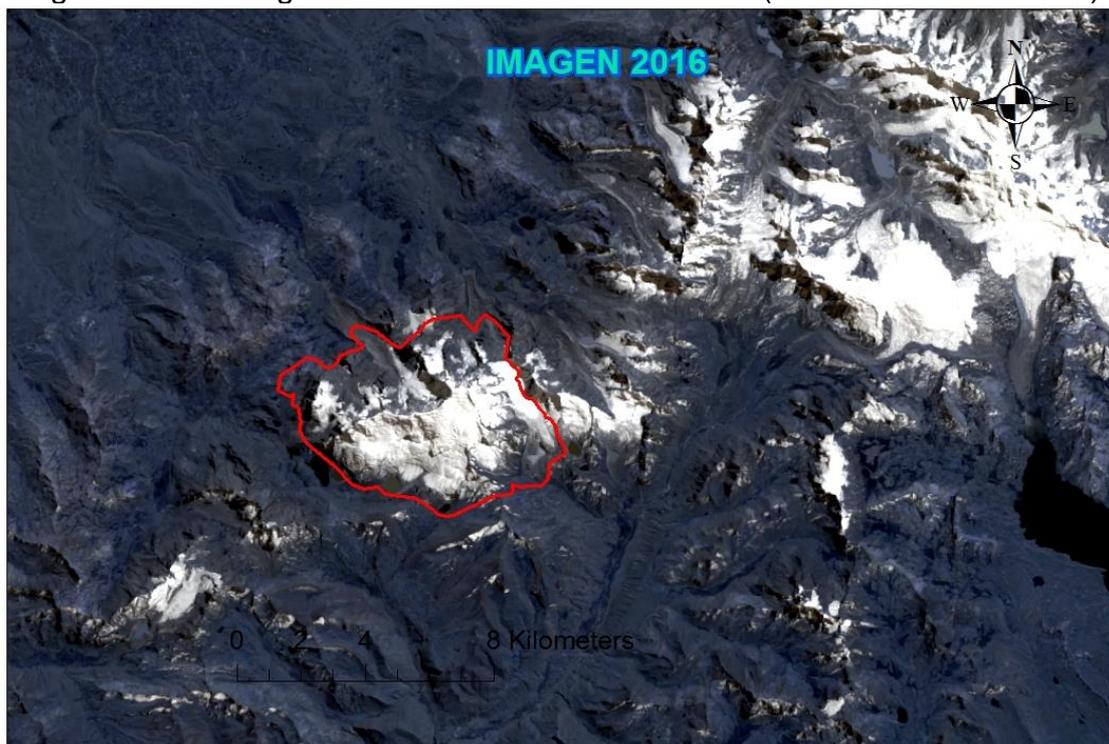
Fuente: Propia

Figura N° 13. Imagen Satelital LandSat – año 2006 (color natural RGB 321)



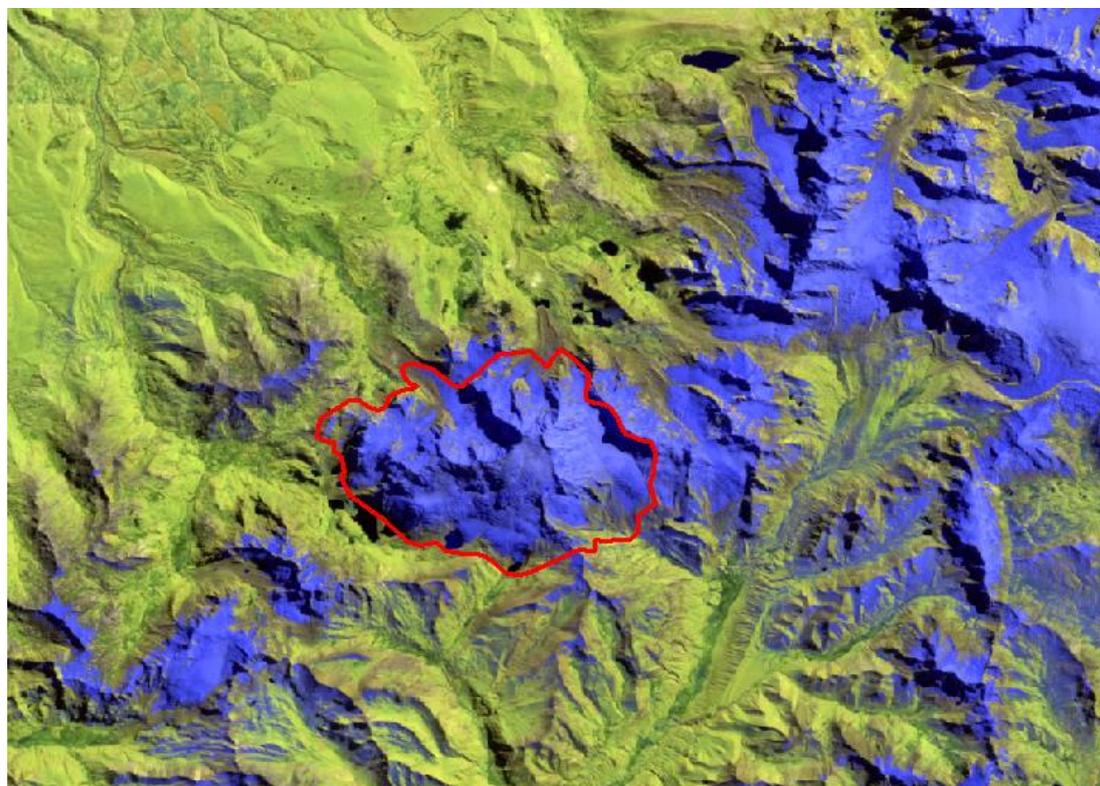
Fuente: Propia

Figura N° 14. Imagen Satelital LandSat – año 2016 (color natural RGB 321)



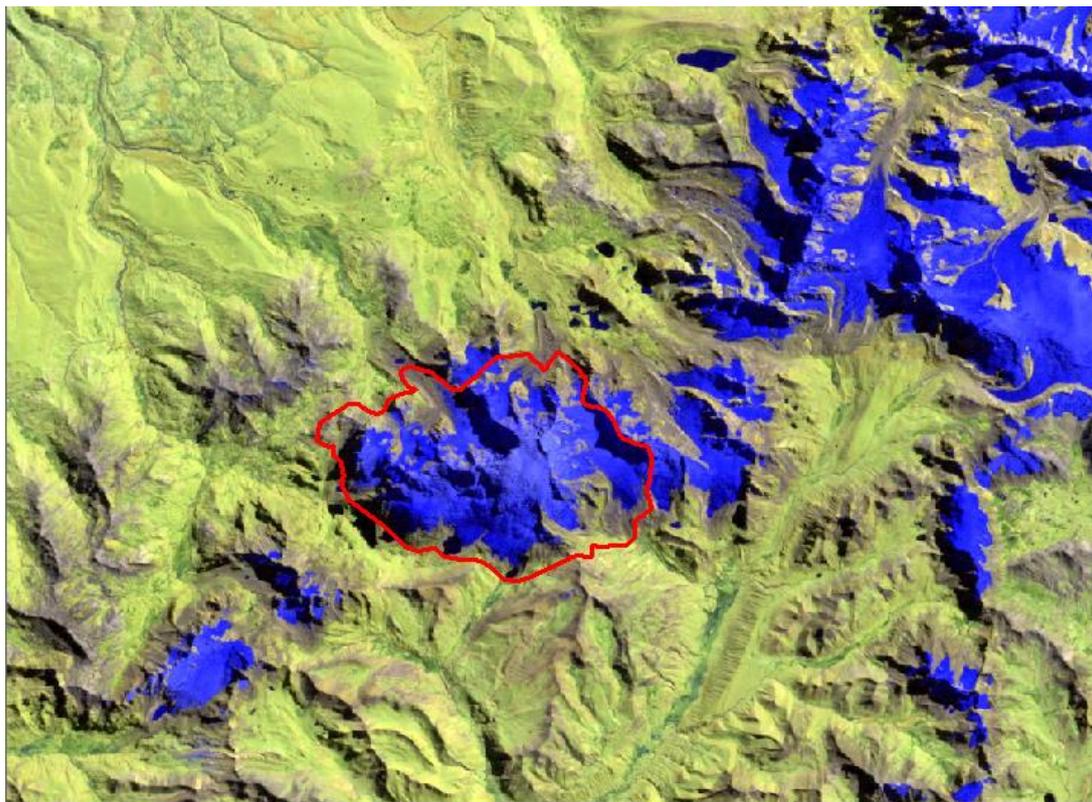
Fuente: Propia

Figura N° 15. Imagen Satelital LandSat – año 1986 (falso color RGB 752)



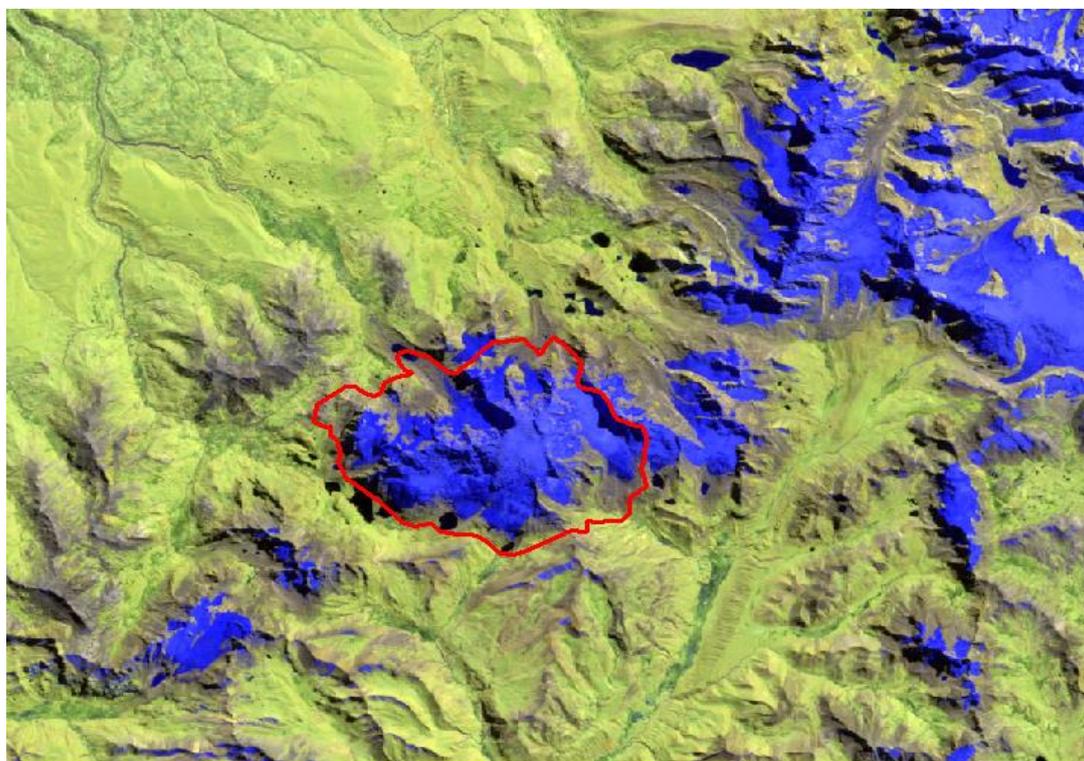
Fuente: Propia

Figura N° 16. Imagen Satelital LandSat – año 1996 (falso color RGB 752)



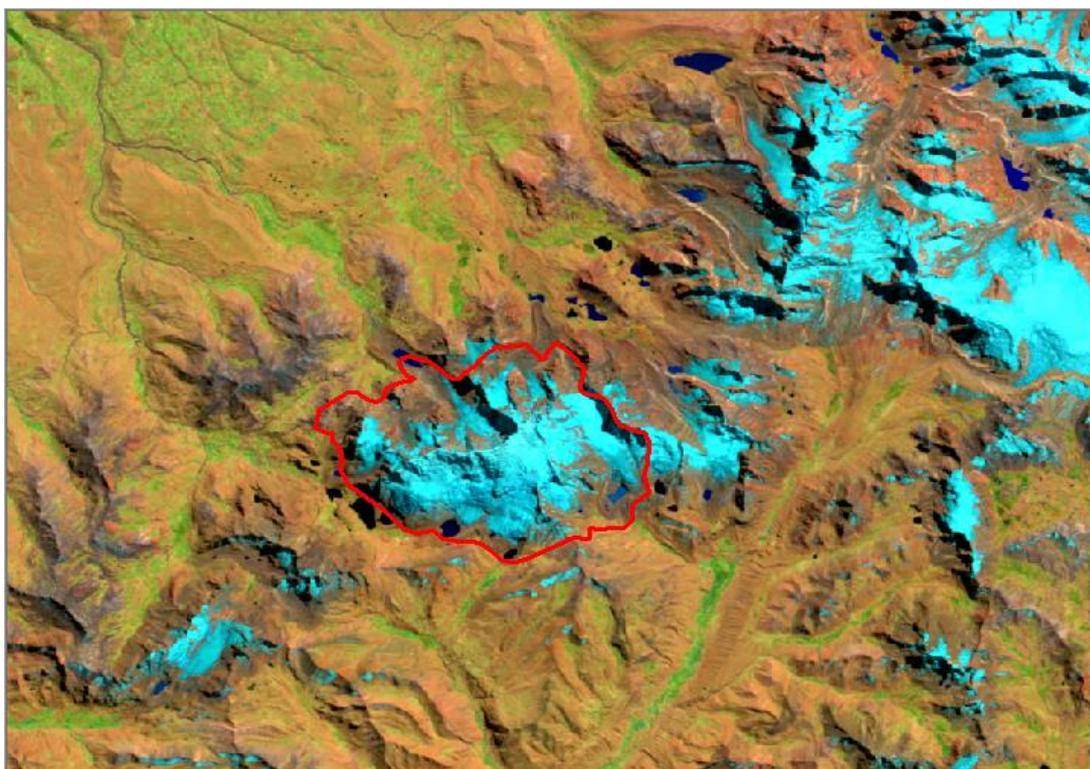
Fuente: Propia

Figura N° 17. Imagen Satelital LandSat – año 2006 (falso color RGB 752)



Fuente: Propia

Figura N° 18. Imagen Satelital LandSat – año 2016 (falso color RGB 752)

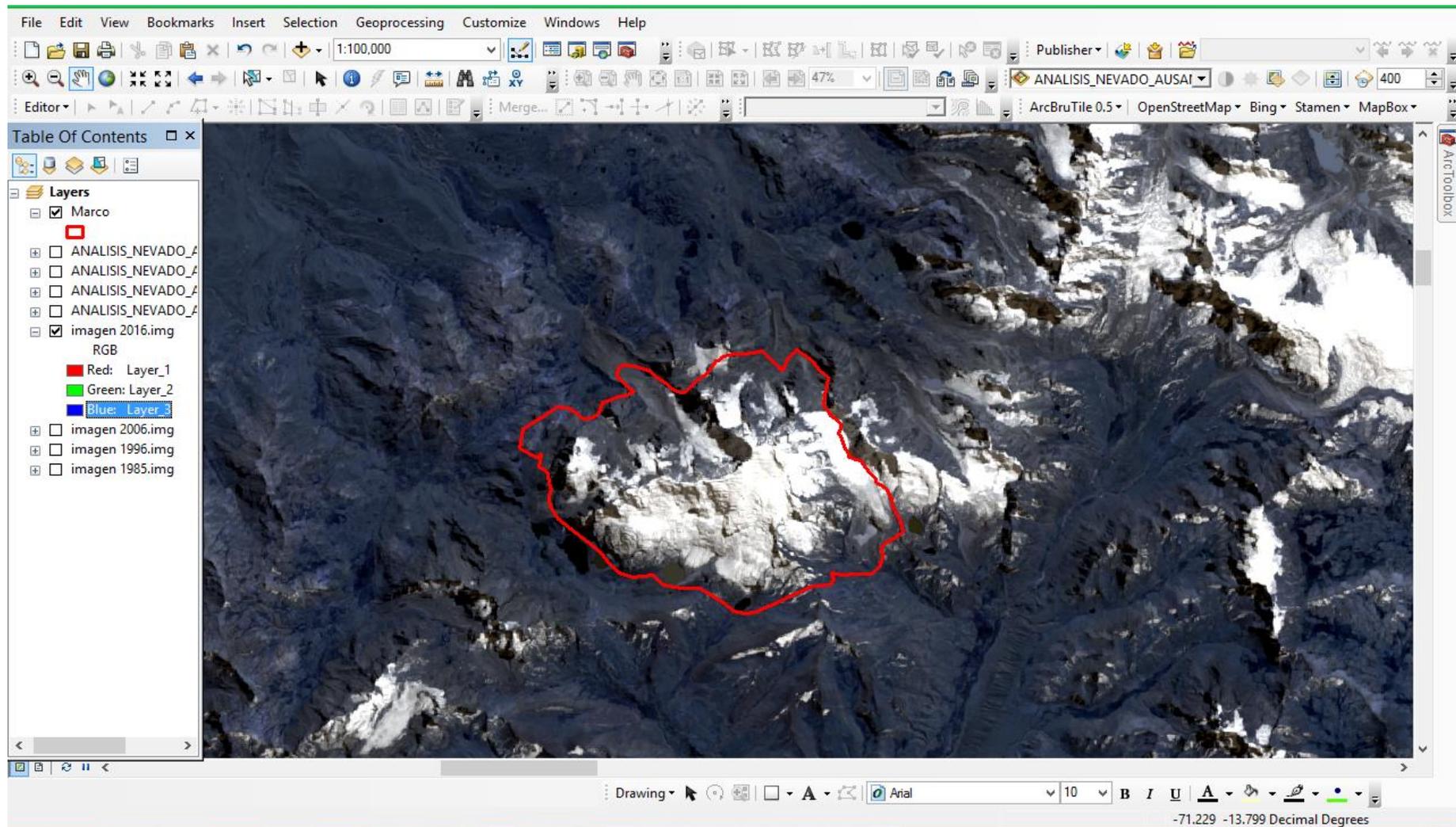


Fuente: Propia

5.1.2. Imágenes satelitales procesadas

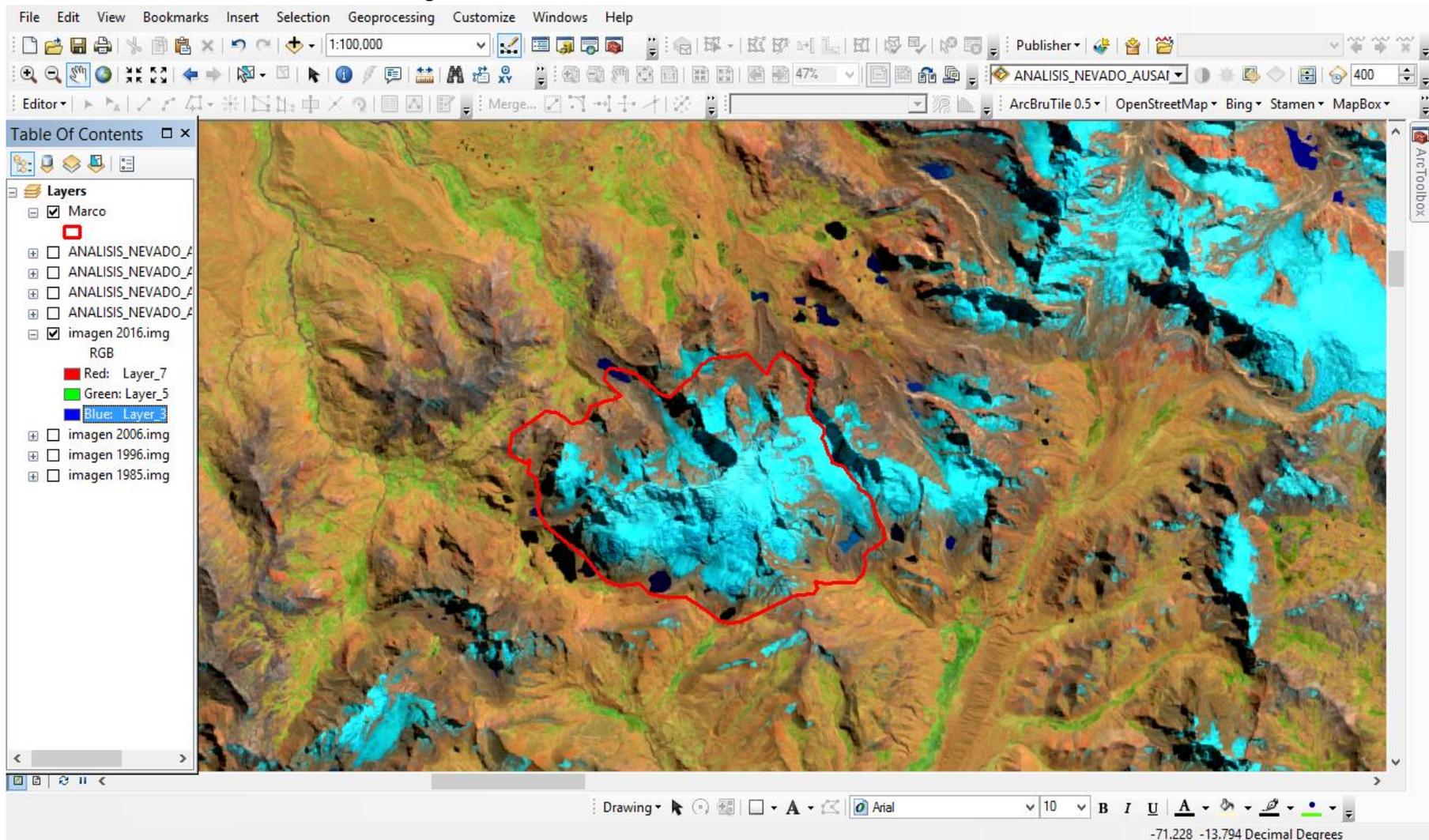
El resultado de la combinación de bandas en color natural RGB 321 muestra las diferentes coberturas del suelo: vegetación, agua, nieve y suelo descubierto, como se puede observar en la figura N° 19. Sin embargo, la combinación en falso color RGB 752 permite distinguir de mejor manera las coberturas, sobre todo permite diferenciar las nubes de la cobertura de nieve (Acasi, 2015) como se muestra en la figura N° 20.

Figura N° 19. Combinación de bandas RGB 321 color natural



Fuente: Propia

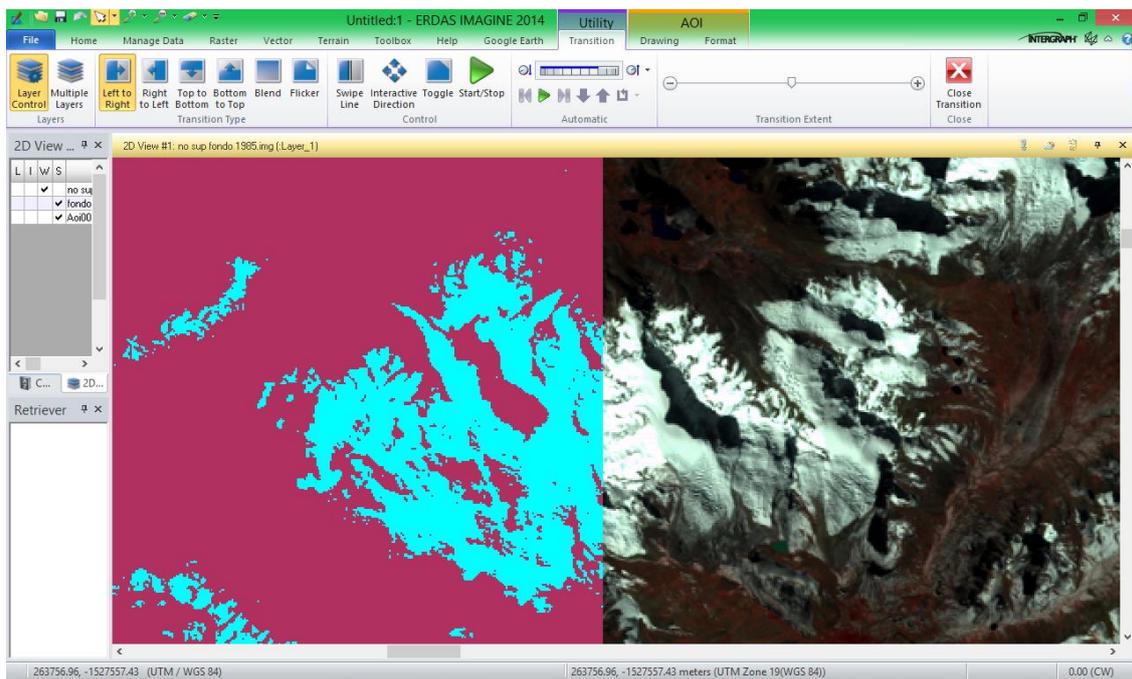
Figura N° 20. Combinación de bandas RGB 752- falso color



Fuente: Propia

El proceso de clasificación supervisada genera el siguiente resultado que se puede visualizar en la figura N° 21. Por medio de la herramienta swipe las dos categorías de cobertura clasificadas: NIEVE y NO NIEVE (que caracteriza a los demás tipos de cobertura que no sea nieve) se corresponden exactamente con la imagen satelital.

Figura N° 21. Cobertura de NIEVE y NO NIEVE clasificada



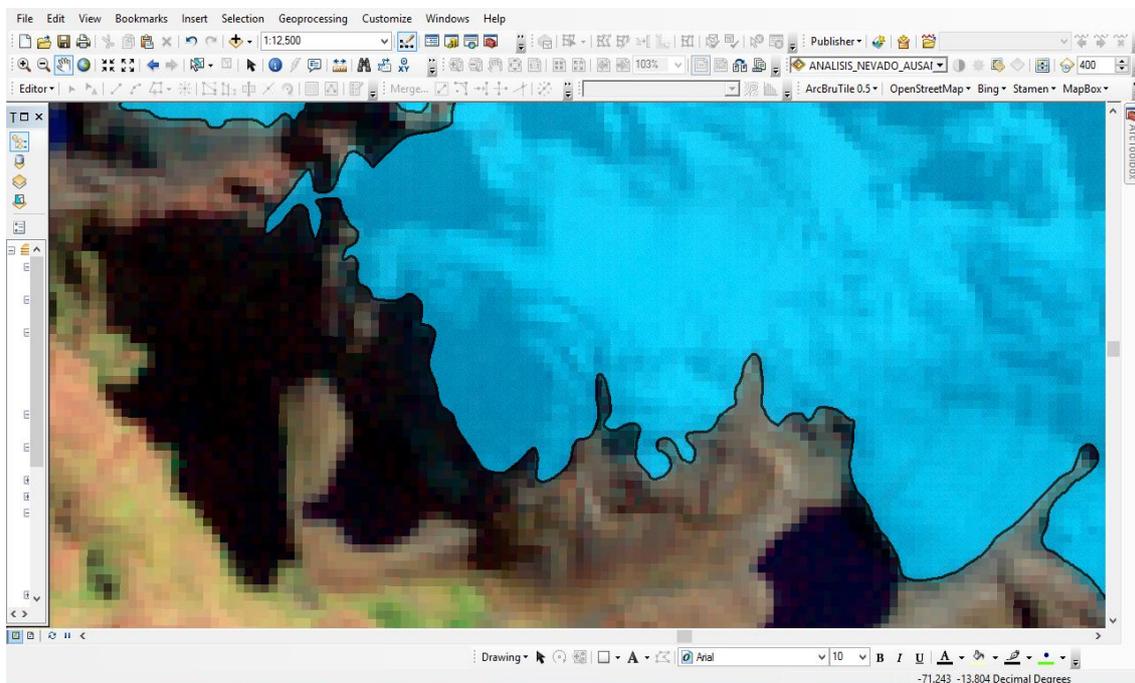
Fuente: Propia

En la figura N° 21 se muestra el resultado del proceso de digitalización o vectorización que consiste en convertir las imágenes que están en formato raster conformadas por píxeles a información tipo vectorial que posee una geometría específica asociada a la forma y posición de las áreas cubiertas por nieve de para determinar fácilmente la superficie que ocupa el nevado en cada período de análisis.

La digitalización se realizó utilizando las herramientas que ofrece el Programa ArcGIS y complementada manualmente para corregir o unir áreas menores,

debido a que los resultados de la clasificación supervisada realizado en el Programa ERDAS y las operaciones algebraicas con las bandas 2 y 5 realizadas con ArcGIS no reconocieron totalmente las zonas con cubierta de nieve que se encuentran bajo las sombras de las cumbres empinadas que se producen en las imágenes, las mismas que fueron verificadas con imágenes de alta resolución de Google Earth y corroboradas con las visitas de campo, cuyo registro de puntos de verificación con GPS se encuentran en el anexo 2.

Figura N° 22. Digitalización de imágenes



Fuente: Propia

5.2. Cuantificación del retroceso glaciar

En los mapas N° 2, 3, 4 y 5 se puede distinguir visualmente como se ha ido reduciendo la cobertura glaciar del Nevado Ausangate resaltado en color azul, así como lo que sucede con los nevados que se encuentran alrededor.

ÁREA GLACIAR DEL NEVADO AUSANGATE - 1986

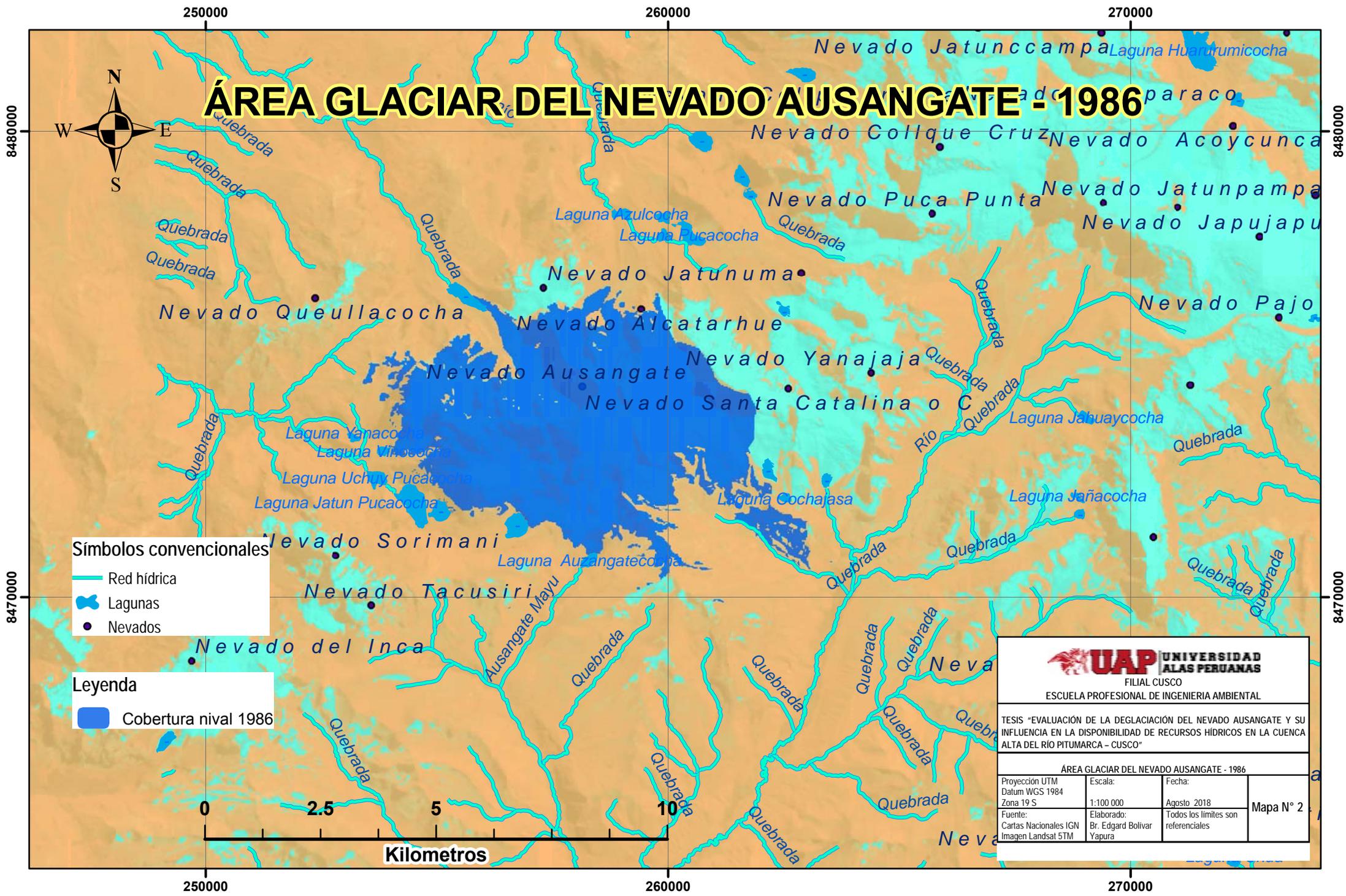


Símbolos convencionales

-  Red hídrica
-  Lagunas
-  Nevados

Leyenda

-  Cobertura nival 1986



FILIAL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO"

ÁREA GLACIAR DEL NEVADO AUSANGATE - 1986

Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 2
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 5TM	Elaborado: Br. Edgard Bolívar Yapura	Todos los límites son referenciales	

ÁREA GLACIAR DEL NEVADO AUSANGATE - 1996



Simbolos convencionales

-  Red hidrica
-  Lagunas
-  Nevados

Leyenda

-  Cobertura nival 1996

8470000

8480000

250000

260000

270000

0

2.5

5

10

Kilometros

250000

260000

270000



FILIAL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HIDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO"

ÁREA GLACIAR DEL NEVADO AUSANGATE - 1996

Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 3
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 5TM	Elaborado: Br. Edgard Bolivar Yapura	Todos los limites son referenciales	

ÁREA GLACIAR DEL NEVADO AUSANGATE - 2006



Simbolos convencionales

-  Red hidrica
-  Lagunas
-  Nevados

Leyenda

-  Cobertura nival 2006

8470000

8480000

250000

260000

270000

0

2.5

5

10

Kilometros

250000

260000

270000



FILIAL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HIDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO"

ÁREA GLACIAR DEL NEVADO AUSANGATE - 2006

Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 4
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 5TM	Elaborado: Br. Edgard Bolivar Yapura	Todos los limites son referenciales	

ÁREA GLACIAR DEL NEVADO AUSANGATE - 2016

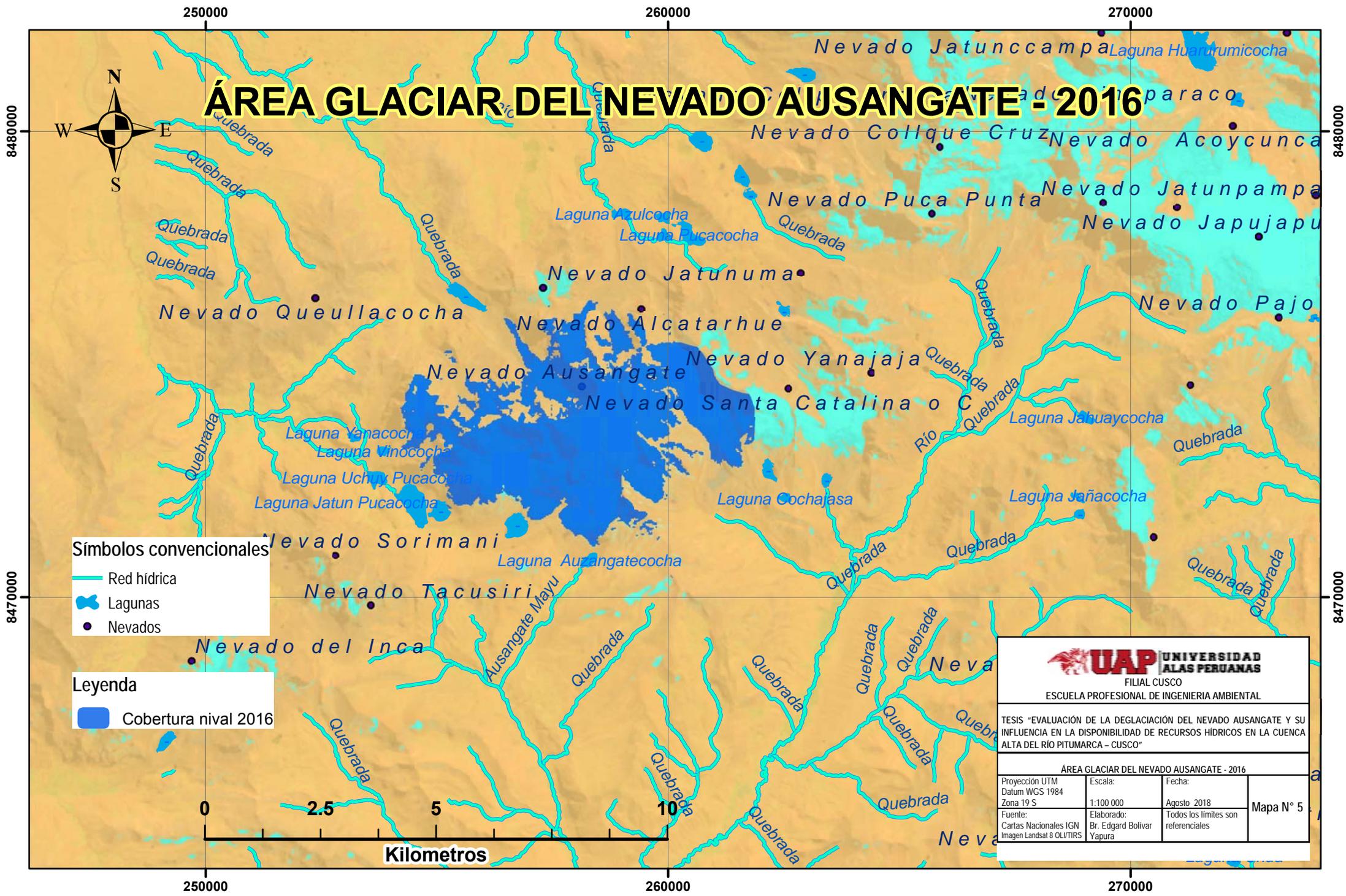


Símbolos convencionales

-  Red hídrica
-  Lagunas
-  Nevados

Leyenda

-  Cobertura nival 2016



UAP UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL CUSCO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO"

ÁREA GLACIAR DEL NEVADO AUSANGATE - 2016

Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 5
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 8 OLI/TIRS	Elaborado: Br. Edgard Bolívar Yapura	Todos los límites son referenciales	

Sobre poniendo los mapas obtenidos para cada período evaluado, asignándole un color diferente a sus áreas de cobertura se obtiene el mapa N° 6 donde se puede distinguir que para el período 1986 y 1996 se tiene mayor pérdida de área glaciar representada en color rojo, que en los siguientes períodos 1996-2006 y 2006-2016. Sin embargo, la permanencia de cobertura nival es importante dentro de los 40 años.

En la tabla N° 8 se detallan las superficies de cobertura de nieve en cada período y las áreas pérdidas así como la proporción que representa en cada año en base al área inicial en el año 1986.

Tabla N° 8. Superficie cubierta por el Nevado Ausangate entre 1986 y 2016

Año	Perímetro (km)	Área (ha)	% Cobertura	Pérdida (ha)	% Retroceso
1986	116.73	2936.69	100%	-	-
1996	80.65	2396.51	82%	-540.18	-18 %
2006	93.24	2188.39	75%	-208.12	-25 %
2016	109.87	1926.29	66%	-262.11	-34 %

Fuente: Propia

Del cuadro anterior se tiene que en el primer período se produjo la mayor pérdida en más de 540 hectáreas desde 1986 a 1996 que representa el 18% de la cobertura inicial en el primer año; mientras que en los siguientes períodos las pérdidas de cobertura son similares del orden de 208 y 262 hectáreas para que representan el 7% y 9% respectivamente para 2006 y 2016. Con una reducción total de 1010 hectáreas desde el primer al último período y un 34% respecto del

área inicial. En la figura N° 23 se muestra gráficamente una tendencia de la reducción de cobertura nival.

RETROCESO GLACIAR 1986 - 1996 - 2006 - 2016



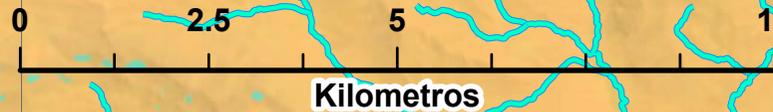
Símbolos convencionales

- Red hídrica
- Lagunas
- Nevados

Leyenda

- Cobertura nival 2016
- Cobertura nival 2006
- Cobertura nival 1996
- Cobertura nival 1986

AÑO	PERIMETRO (KM)	AREA (HA)	RETROCESO (HA)	PÉRDIDA (%)
1986	116.73	2936.69	-	-
1996	80.65	2396.51	540.18	18%
2006	93.24	2188.39	208.12	7%
2016	109.87	1926.29	262.11	9%
TOTAL	-	-	1010.41	34%



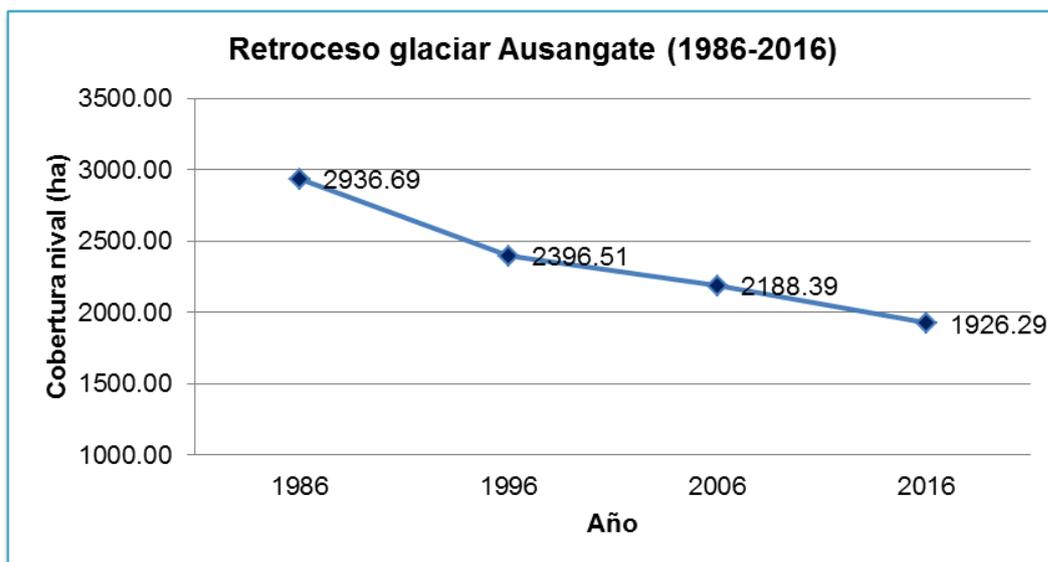
UAP UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
 FILIAL CUSCO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACION DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HIDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RIO PITUMARCA - CUSCO"

RETROCESO GLACIAR 1986 - 1996 - 2006 - 2016

Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 6
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 8 OLI/TIRS	Elaborado: Br. Edgard Bolivar Yapura	Todos los limites son referenciales	

Figura N° 23. Tendencia del retroceso glaciar del Nevado Ausangate



Fuente: Propia

En la tabla N° 9 se detalla las tasas de retroceso glaciar para cada período. Siendo la tasa más alta 54 hectáreas por año en el primer período y la menor de 20 hectáreas por año en período 1996-2006, con una razón media de 32 hectáreas por año en los 40 años con un coeficiente de ajuste del 95%.

Tabla N° 9. Tasas de retroceso glaciar por períodos

Período	Área (ha)	% Cobertura	Tasa de deglaciación
1986 - 1996	-540.18	-18.39%	54.02 ha/año
1996 - 2006	-208.12	-8.68%	20.81 ha/año
2006 - 2016	-262.11	-11.98%	26.21 ha/año
1986 - 2016	-1010.41	-34.41%	32.39 ha/año

Fuente: Propia

Los resultados obtenidos difieren en gran medida con el estudio de Acasi (2015) ya que las tasas de retroceso que reporta superan las 250 hectáreas por año para los 20 años evaluados debido a la gran extensión de los nevados de la Cordillera Vilcanota y haber realizado el análisis en conjunto. Comparado con los

resultados de Bustamante (2011), la proporción de pérdida obtenida es menor a 47% para el período 1975-2010 debido a que consideró una imagen de 1975 que presenta menor resolución de 60 metros por pixel que las imágenes posteriores que son de 30 m, además que incluyó dentro del área de estudio los nevados aledaños al Ausangate. Así mismo, los valores obtenidos por Silva en 2012 para el conjunto de nevados alrededor del Ausangate, encontró un porcentaje mayor de pérdidas 46% en 26 años de 1985-2011 debido a que los nevados vecinos y los considerados en los estudios antes mencionados tenían su límite inferior inicialmente a menores altitudes incluso a 4068 m que el Ausangate propiamente, cuyo límite inferior al año inicial 1986 alcanza los 4600 m por lo que el retroceso obtenido es menor.

5.3. Volumen glaciar estimado

El retroceso glaciar obtenido para el Nevado Ausangate permitió calcular el volumen glaciar disponible para alimentar a las fuentes de agua que dependen de él. El volumen glaciar disponible para el año 1986 era de 4.76 km³ reduciéndose hasta 2.68 km³ para el año 2016 como se puede observar en la tabla N° 10, con una reducción total de 2.08 km³ que representa el 43.7% de su capacidad inicial de provisión de recurso hídrico.

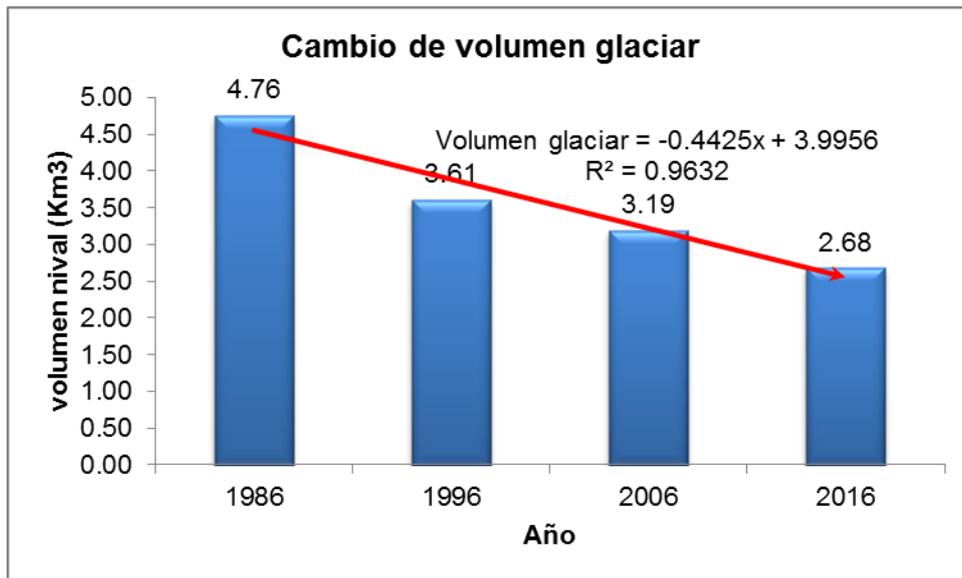
Tabla N° 10. Volumen glaciar disponible por períodos

Año	Área (Ha)	Área (km ²)	Volumen (km ³)	Pérdida de Volumen (km ³)	% respecto del año inicial
1985	2936.69	29.37	4.76	-	100%
1996	2396.51	23.97	3.61	1.15	24%
2006	2188.39	21.88	3.19	0.42	8%
2016	1926.29	19.26	2.68	0.51	11%

Fuente: Propia

El volumen glaciar disponible en el Nevado Ausangate se pierde a razón de 0.44 km³ por año o 4.4 km³ por década según los resultados de la gráfica de tendencia representada en la Figura N° 24.

Figura N° 24. Volumen glaciar disponible por períodos



Fuente: Propia

Los resultados obtenidos son similares a los valores encontrados en el estudio de Colonia y Torres (2013) para la Cordillera Blanca y de Salzmann (2013) para la Cordillera Vilcanota; sin embargo no se cuenta con otros estudios de un nevado en particular para poder comparar los resultados.

5.4. Productividad hídrica en la cuenca

La cuenca alta del río Pitumarca que corresponde al Nivel 7 según la codificación del Sistema Pfafstetter, fue dividida en cuencas de menor nivel, llegando hasta el nivel 9, para Identificar las cuencas que dependen directamente del Nevado Ausangate. Asimismo se delimitó la proporción del nevado que forma parte de la vertiente de cada cuenca, el área de cobertura para cada año representados en los mapas N° 7, 8, 9 y 10.

ÁREA GLACIAR POR CUENCA - 1986



Símbolos convencionales

-  Red hídrica
-  Lagunas
-  Nevados

Leyenda

gridcode

-  Cobertura nival
-  Intercuenca 499497869
-  Cuenca 499497892

Año	Cuenca	Código	Área	% Ausangate
1986	Ausangate Mayu	499497869	304.21	10%
1986	Ausangate Mayu	499497892	855.79	29%





UAP UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RIO PITUMARCA - CUSCO"

ÁREA GLACIAR POR CUENCA - 1986

Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 7
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 5TM	Elaborado: Br. Edgard Bolívar Yapura	Todos los límites son referenciales	



ÁREA GLACIAR POR CUENCA - 1996



Símbolos convencionales

-  Red hídrica
-  Lagunas
-  Nevados

Leyenda

-  Cobertura nival
-  Intercuenca 499497869
-  Cuenca 499497892

Año	Cuenca	Código	Área	% Ausangate
1996	Ausangate Mayu	499497869	242.98	10%
1996	Ausangate Mayu	499497892	598.41	25%





UAP UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIALCUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HIDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO"

ÁREA GLACIAR POR CUENCA - 1996			
Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 8
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 5TM	Elaborado: Br. Edgard Bolívar Yapura	Todos los límites son referenciales	



ÁREA GLACIAR POR CUENCA - 2006



Símbolos convencionales

-  Red hidrica
-  Lagunas
-  Nevados

Leyenda

-  Cobertura nival
-  Intercuenca 499497869
-  Cuenca 499497892

Año	Cuenca	Código	Área	% Ausangate
2006	Ausangate Mayu	499497869	224.24	10%
2006	Ausangate Mayu	499497892	561.19	26%

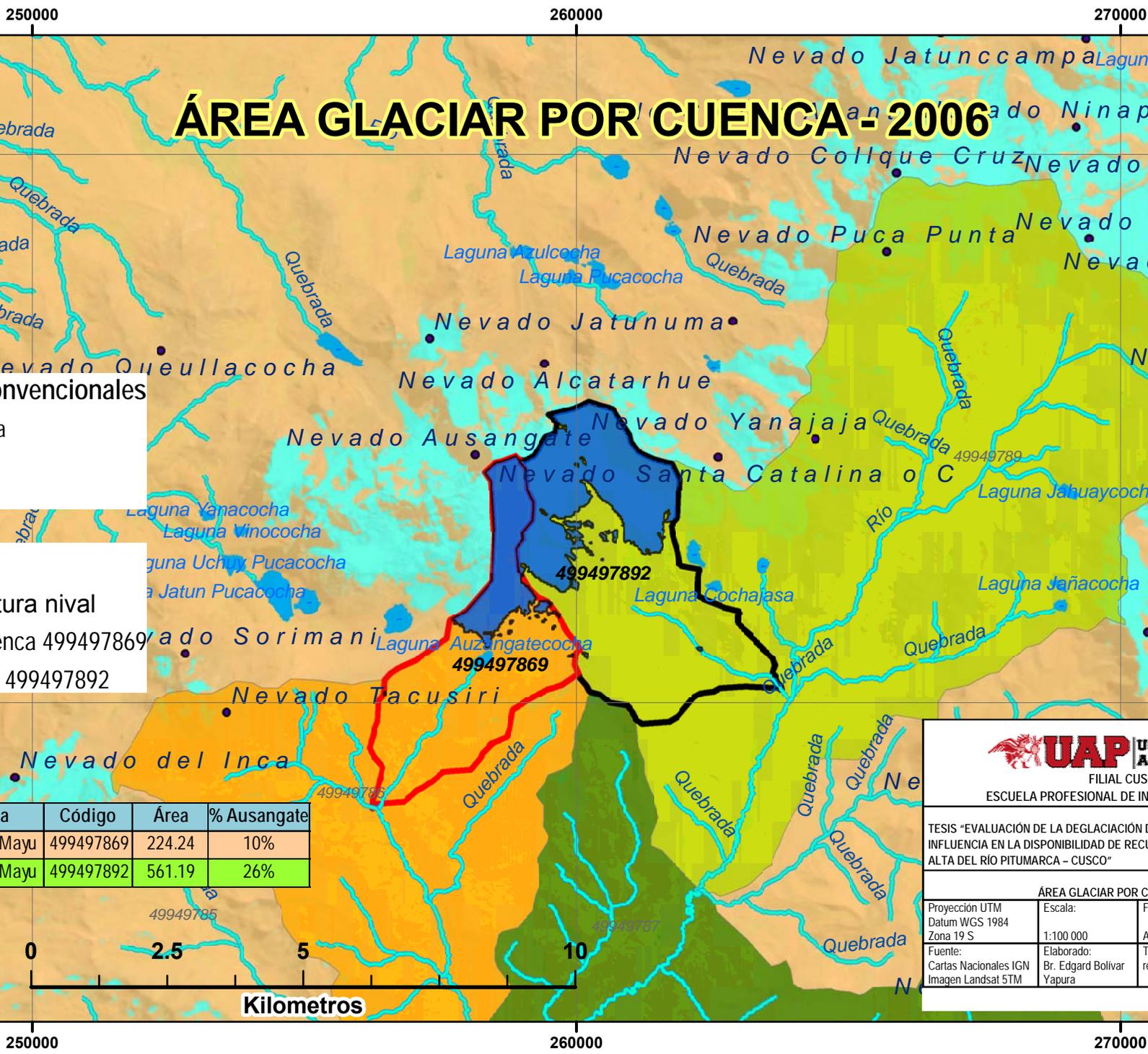




UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIALCUSO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HIDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO"

ÁREA GLACIAR POR CUENCA - 2006			
Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N° 9
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 5TM	Elaborado: Br. Edgard Bolivar Yapura	Todos los limites son referenciales	



ÁREA GLACIAR POR CUENCA - 2016



Símbolos convencionales

-  Red hídrica
-  Lagunas
-  Nevados

Leyenda

-  Cobertura nival
-  Intercuenca 499497869
-  Cuenca 499497892

Año	Cuenca	Código	Área	% Ausangate
2016	Ausangate Mayu	499497869	230.96	12%
2016	Ausangate Mayu	499497892	538.13	28%

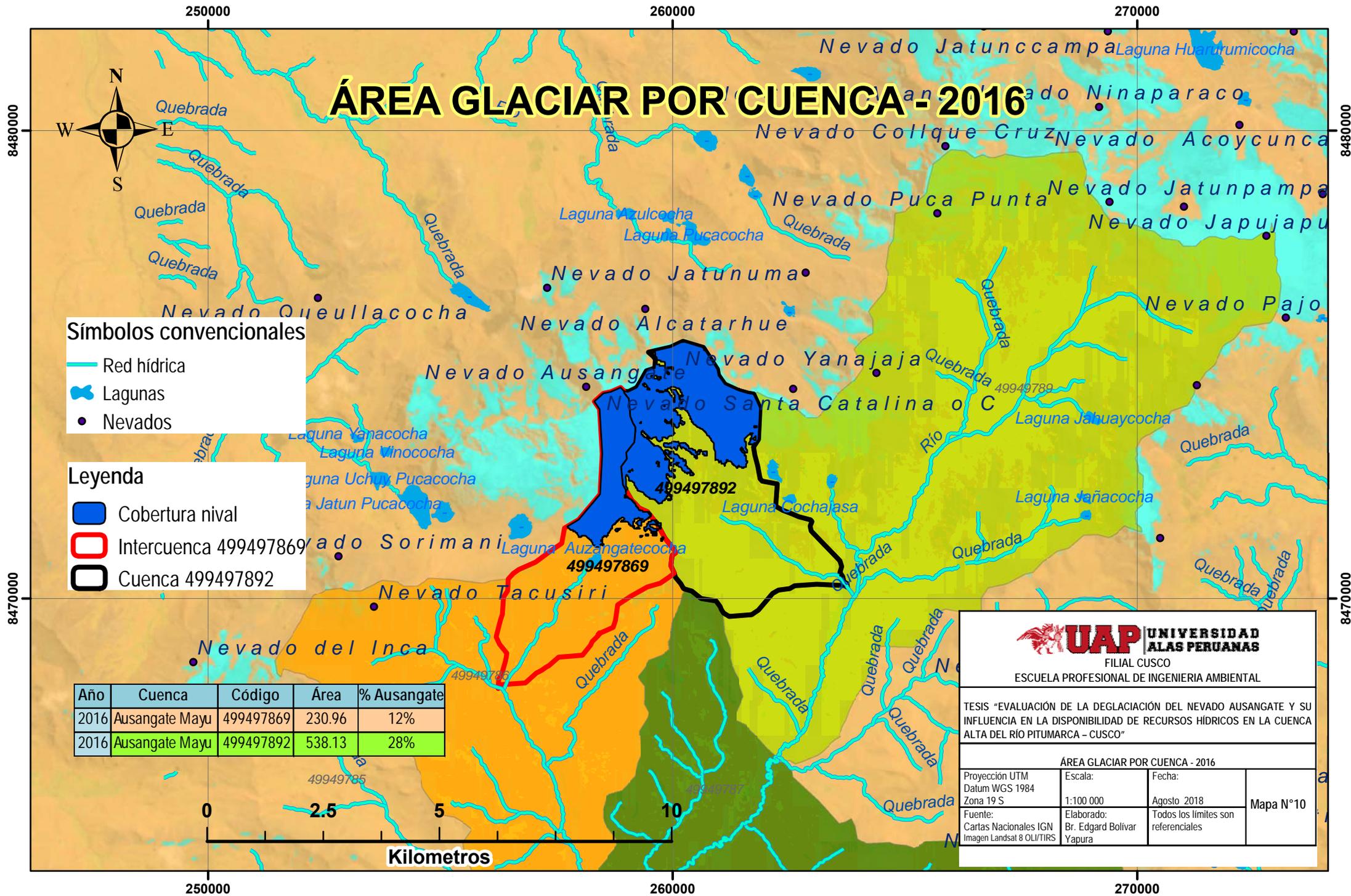




UAP UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIALCUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS "EVALUACIÓN DE LA DEGLACIACIÓN DEL NEVADO AUSANGATE Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PITUMARCA - CUSCO"

ÁREA GLACIAR POR CUENCA - 2016			
Proyección UTM Datum WGS 1984 Zona 19 S	Escala: 1:100 000	Fecha: Agosto 2018	Mapa N°10
Fuente: Cartas Nacionales IGN Imagen Landsat 8 OLI/TIRS	Elaborado: Br. Edgard Bolívar Yapura	Todos los límites son referenciales	



La cuenca que posee menor proporción de cobertura nival en su vertiente es la cuenca 499497869 con 304 hectáreas en el año inicial 1986 reduciéndose hasta 231 hectáreas para el año 2016, con una pérdida total de 73 hectáreas e superficie nival que representa el 24% del área inicial, siendo el primer período donde se perdió la mayor cantidad y una pequeña ganancia de 6 ha. para el último período 2006-2016 como se puede observar en la tabla N° 11.

Tabla N° 11. Volumen glaciar para la cuenca 499497869

Año	Área (Ha)	Área (km²)	Volumen (km³)	Pérdida de Volumen (km³)
1986	304.21	3.04	0.22	-
1996	242.98	2.43	0.16	0.06
2006	224.24	2.24	0.14	0.02
2016	230.96	2.31	0.15	-0.01

Fuente: Propia

La cuenca 499497869 cuenta con 856 hectáreas en el año inicial 1986 reduciéndose hasta 538 hectáreas para el año 2016, con una pérdida total de 318 hectáreas de superficie nival que representa el 37% del área inicial, siendo el primer período donde se perdió la mayor cantidad y mucho menores en los dos últimos períodos como se puede observar en la tabla N° 12.

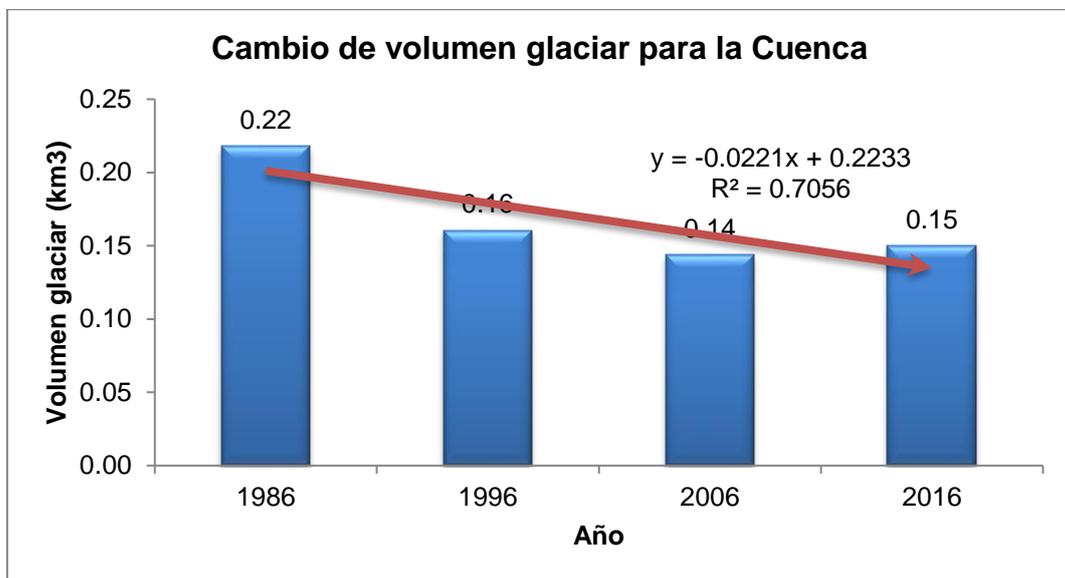
Tabla N° 12. Volumen glaciar para la cuenca 499497892

Año	Área (Ha)	Área (km²)	Volumen (km³)	Pérdida De Volumen (km³)
1986	855.79	8.56	0.89	-
1996	598.41	5.98	0.55	0.34
2006	561.19	5.61	0.50	0.05
2016	538.13	5.38	0.47	0.03

Fuente: Propia

De igual manera, se calculó el volumen glaciar disponible para cada cuenca, encontrando que inicialmente la cuenca 499497869 tenía disponibles 0.22 km³ de volumen glaciar reduciéndose hasta 0.15 km³ al 2016, con pérdida total de 0.07 km³ que implica un 31% menos en su capacidad de provisión de recurso hídrico para esta cuenca. La tendencia de reducción para esta cuenca es de 0.02 km³ por año según la figura N° 25.

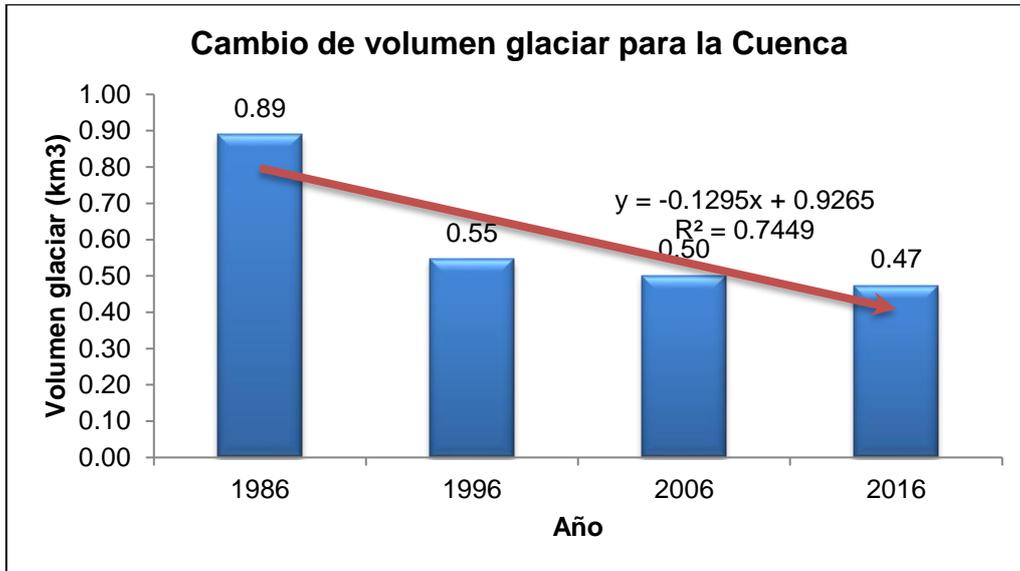
Figura N° 25. Disponibilidad hídrica glaciar para la cuenca 499497869



Fuente: Propia

El volumen glaciar para la cuenca 499497892 tenía disponibles 0.89 km³ de volumen glaciar reduciéndose hasta 0.47 km³ al 2016, con pérdida total de 0.42 km³ que implica un 47% menos, casi la mitad en su capacidad de provisión e recurso hídrico para esta cuenca. La tendencia de reducción para esta cuenca es de 0.13 km³ por año según la figura N° 26.

Figura N° 26. Disponibilidad hídrica glaciar para la cuenca 499497892



Fuente: Propia

Los resultados obtenidos para la cuenca 499497869 a pesar de contener la menor proporción de cobertura nival presenta menores pérdidas que la otra cuenca, pueden deberse a que presenta pendientes muy fuertes y menor exposición solar hacia el lado oeste. En cambio, la cuenca 499497892 pierde mayor proporción de cobertura y volumen debido a las pendientes moderadas y mayor exposición solar por ubicarse hacia el lado este del Nevado Ausangate.

Los caudales obtenidos para el Río principal de cada cuenca se presentan en la tabla N° 13 donde se distingue que la cuenca 499497892 presenta mayor caudal con 32.47 metros cúbicos por segundo, que la cuenca 499497869 con 13.52 metros cúbicos por segundo en época seca.

Tabla N° 13. Caudal por cuenca evaluada

Cuenca Principal	Código Cuenca Evaluada	Longitud de Cause	Promedio Ancho de Cause	Caudal cm³/seg.	Caudal l/seg.	Caudal m³/seg.
Rio Pitumarca	499497869	25 m	1.85 m	1092544.98	1092.54	1.09
	499497892	25 m	2.90 m	4056510.93	4056.51	4.06

Fuente: Propia

CONCLUSIONES

Primera. El Nevado Ausangate registró pérdidas crecientes de la cobertura nival desde 1986 hasta 2016, la mayor superficie perdida se dio en el período 1986-1996 con 540 ha menos (18%) y un total de 1010 ha en los 40 años, representando una reducción del 34% respecto de la superficie inicial a una tasa de 32 hectáreas menos por cada año.

Segunda. El volumen glaciar estimado por períodos mostró reducciones del orden de 2.08 km³ que representa el 43% en su capacidad de proveer recurso hídrico con una tendencia decreciente a razón de 0.44 km³ por año o 4.4 km³ por década.

Tercera. A nivel de cuenca alta del río Pitumarca, se identificó 2 cuencas de nivel 9 con influencia directa del nevado, la cuenca con código 499497869 que presentó pérdidas en cobertura y volumen de 231 ha (24%) y 0.07 km³ (31%) por su ubicación y pendientes, mientras que en la cuenca 499497892 las pérdidas en superficie y volumen estimado fueron mayores del orden de 318 ha (37%) y 0.42 km³ (47%) durante los últimos 40 años.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda instalar una Estación de monitoreo en el área del nevado Ausangate y alrededores para realizar evaluaciones por lo menos una vez cada año, con la finalidad de llevar un control del retroceso glaciar. A través de estos registros de monitoreo y con el soporte de los Sistemas de Información geográfica, estimar los escenarios futuros de la reserva de agua en este y otros glaciares alrededores de importancia.
- Los resultados obtenidos por el método de Relación área-volumen con parámetros de escala deben ser confirmados, ajustados o complementados con otros métodos de estimación de volúmenes glaciares, que permita determinar la disponibilidad hídrica actual y futura. A partir del cual, los actores locales y autoridades tomen decisiones e implementen acciones de adaptación y mitigación frente a estos efectos del cambio climático que garanticen la disponibilidad del recurso hídrico para las actividades productivas y el uso poblacional.
- Se recomienda seguir realizando investigaciones, para las otras zonas de estudio del glaciar, de tal manera pueda ratificarse la perspectiva de la investigación.
- Debería realizarse una instalación de una estación meteorológica e hidrológica a fin de generar información climática y generación de caudales (fusión) e la zona de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Acasi, D. J. (2015). Análisis multitemporal y generación de escenarios prospectivos de la cobertura nival en la Cordillera Urubamba - Cusco. Tesis de Investigación, UNSAAC – Cusco.
- Aliaga, M.; Choquevilca, W.; Chirinos, Z.; Fernandez, F.; Frey, H. et al (2014). Proyecto glaciares – Línea de Base. CARE Perú.
- Alonso, C., & Moreno, V. (1996). Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica. *Revista de Teledetección*, 1-12.
- Ames, A. (1985). Estudio de mediciones glaciológicas efectuadas en la Cordillera Blanca por Electroperú S.A.: Variación y balance de masas de los glaciares y su contribución en el caudal de las cuencas. *Laboratoire de Glaciologie & de Géophysique*, 81.
- Ames M, A., & Francou, B. (1995). Cordillera Blanca Glaciares En La Historia. *Bull. Inst. fr. études andines*, 37-64.
- Autoridad Nacional del Agua (2012). Inventario de glaciares de las cordilleras Vilcanota y Carabaya. Unidad de glaciología y recursos hídricos. Ministerio de Agricultura.
- Bahr, D., Meier, M., and Peckham, S. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling, *J. Geophys. Res.*, 102 (B9), 20,355–20,362, doi:10.029/97JB01696.
- Benn, D., & Evands, D. (1998). *Glaciers and glaciation*. Arnold.

Bustamaníe, A. (2011). Estudio de Los efectos del cambio Climático en la Capa Nival Permanente y Sistema de Bofedales del Glaciar Ausangate. UNSAAC – Cusco.

Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically_corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. Remote Sensing of Environment, 140, 165_178. doi:10.1016/j.rse.2013.08.026.

Campbell, J. (2003). Introduction to Remote Sensing. Guilford Press.

Ciencia Popular, (25 de Enero de2009). Ciencia Popular, recuperado el 4 de Enero de 2012 de Ciencia Popular: http://cienciapopular.com/n/ecologia/retroceso_de_los_Glaciares/Retroceso_de_los_Glaciares.php

Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de Teledetección espacial. Rialp.

Colonia Ortiz D. y Torres Castillo J., 2011. Determinación del retroceso glaciar en la microcuenca de llanganuco, a través del análisis multitemporal en el período 1987-2007, Disertación de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú, 209 p.

Colonia Ortiz D. y Torres Castillo J., (2013). Disponibilidad hídrica glaciar en la subcuenca Quillcay, teniendo en cuenta el retroceso glaciar y el cambio climático, 1970-2013-2050. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú, 48 pp.

Cori, J. (2012) Satélites y plataformas de adquisición de datos, caracterizaciones, comparaciones, principales aplicaciones y dos

ejemplos de aplicaciones. Tesis de Licenciatura en Topografía y Geodesia - Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

Cuadrat, J. y Pita, F. (2011). Climatología. Ediciones Cátedra. Madrid.

Derruau, M. (1991). El sistema de Erosion glacial. Barcelona: Ariel, 2ª ed.

Dirección General de Aguas (2008). Manual de Glaciología. Volumen 2 GEOESTUDIOS. Chile.

Dozier, Jeff. 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. Remote Sensing Environmental. 28:9-22.

Duque, G. (2002). Manual de Geología para Ingenieros. SE

Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and Truffer, M. (2009). A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers, J. Glaciol., 55, 422–430.

Fernández, A., & Herreo, E. (2006). Análisis Visual de Imágenes Obtenidas del Sensor ETM+ - Satelite LandSat. Valladolid: Universidad de Valladolid.

Haerberli, W. and Hoelzle, M., (1995), Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps, Ann. Glaciol., 21, 206–212.

Hernández, P. A. (2002). Análisis espacio-temporal de la desertificación, usando los sensores NOAA-AVHRR y Landsat – TM. 34-37. San Cristóbal de la Laguna, Tenerife, España: Universidad de la Laguna.

Holmlund, P., & Jansson, P. (2002). Glaciología. Revista de la Universidad de Estocolmo, 17-49.

Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente – IMA. (2009). Zonificación Ecológica Económica de la Región Cusco.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2001). Parte de la contribución del Grupo de trabajo I al Tercer Informe de Evaluación.

IPCC (2007). Cambio climático 2007 Informe de síntesis, contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working. +Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535 p

Juen, I., Kaser, G., & Georges, C. (2007). Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change*, 59(1_4), 37_48. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.038.

Kaáb, A. (2005). Rapid Aster imaging facilitates timely assessments of glacier hazards and disasters. *EOS: Transactions, American Geophysical Union*. Kaser, G. 1999. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers, *Global Planet. Change*, 22(1–4), 93–103.

Linsbauer, A., Paul, F., and Haeberli, W. (2012) Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach, *J. Geophys. Res.*, 117, F03007, doi:10.1029/2011JF002313, 2012.

Longwell, Flint, & Leet. (1996). Geofísica de Glaciares.

Molina, E., Schauwecker, S., Huggel, C., Haeberli, W., C. Alejo, Condom, T., Drenkhan, F., Giraldez, C., Salzmann, N., J. L., Montoya, N., Rado, M, CH. Nicacio, Samata, J., Suarez, W., Arias, S., S. Felipe. (2015). Iniciación de un monitoreo de balance de masa en el glaciar Suyuparina, Cordillera del Vilcanota, Perú. *Climate Change in the Tropical Andes Vol. 2* (2015).

Murcia, U. d. (junio de 2006). SIGMUR. Recuperado el 7 de Enero de 2012, de SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia: <http://www.um.es/geograf/sigmur/index.html> UNEP y WGMS

NCGIA. (1988). The National Center for Geographic Information and Analysis. Recuperado el 7 de Enero de 2012, de The National Center for Geographic Information and Analysis: <http://www.ncgia.ucsb.edu/>

Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota región, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7(1), 103_118. doi:10.5194/tc_7_103_2013.

Silva, A. C. (2012) Evaluación del retroceso glaciar del nevado de Ausangate – Cusco mediante el uso de imágenes LandSat TM-ETM. Seminario de Investigación, UNSAAC – Cusco.

Sobrino, J., Raissouni, N. (2000) Teledetección, 42-44

- Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., Rabatel, A. (2014) Comparación de métodos para estimar el balance de masa del glaciar de Zongo, Bolivia (16° S, 68° O). GEOACTA 39(1): 154-165 (2014). Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. ISSN 1852-7744
- Strahler, A. (1999). Formation and characteristics of glacier ice. Londres: Academic Edition.
- Suarez, W., Macedo, N., Montoya, N., Arias, S., Schauwecker, S., Huggel, C., Rohrer, M., Condom, T. (2015). Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado Quisoquipina en la región de Cusco (1990-2010). Revista Peruana Geo-atmosferica, 80_92 pp.
- Thompson, L.G. (1980). Glaciological Investigations of the Tropical Quelccaya Ice Cap, Peru. Journal of Glaciology, Vol. 25, N° 91, 69-84
- UGRH (2014). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas. Ministerio de Agricultura y Riego, Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. UGRH-ANA-MINAGRI, Lima, 81 pp.
- Vuille, M., Francou B., Wagnon P., Juen I., Kaser G., Mark B. G., and Bradley R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers—Past, present and future. Earth Science Reviews 89: 79–96.
- Walsh Perú. 2007. Estudio de Impacto Socioambiental del Corredor Vial Interoceánico Sur, Perú-Brasil Tramo 3. Lima.

Páginas web

- Coeficientes necesarios para obtener valores de energía a partir de los niveles digitales mediante la ecuación $E=a_0+a_1ND$
<http://www.um.es/geograf/sig/teledet/> 03/11/2017.
- Distribución de bandas en OLI y TIRS <https://landsat.usgs.gov/>
03/11/2017.
- Distribución agua en el mundo, Imagen obtenido de <http://www.wasagn.net/index.php?id1=18&id2=13> 13/06/2017.
- Resolución de sensores,
<http://atlasorbisterrarum.blogspot.com/2014/10/las-imagenes-satelitales.html> 10/10/2014
- Resolución Radiométrica, <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/satelites-resolucion-radiometrica.htm> 03/11/2017.

ANEXOS

Anexo 1. Panel fotográfico

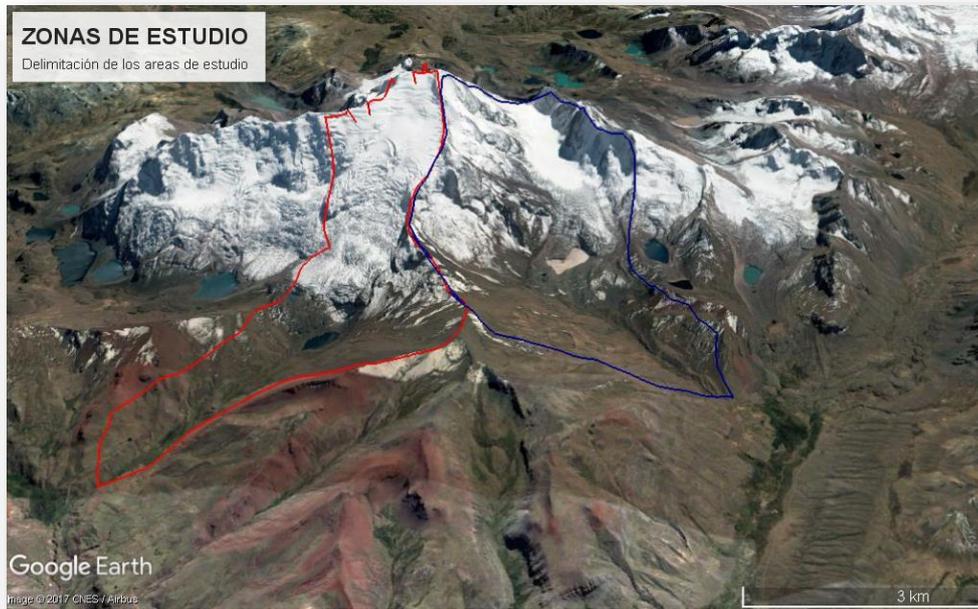


Imagen Nro. 01 delimitaciones de área de estudio



Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo



Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo



Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo



Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo



Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo

Materiales y Herramientas para la Medición de Caudal método convencional



Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo



Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo



Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo

Anexo 2. Puntos de verificación con GPS en el nevado Ausangate

Puntos	Descripción	Coordenadas	Este	Norte	Cota ms.n.m.	Fecha
14	1° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257705	8471592	4939	10/07/2017 10:38
15	2° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257721	8471577	4939	10/07/2017 10:44
16	3° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257734	8471551	4937	10/07/2017 10:45
17	4° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257755	8471537	4943	10/07/2017 10:52
18	5° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257764	8471532	4945	10/07/2017 10:54
19	6° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257774	8471516	4946	10/07/2017 11:02
20	7° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257783	8471509	4947	10/07/2017 11:04
21	8° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257797	8471500	4947	10/07/2017 11:06
22	9° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257822	8471497	4947	10/07/2017 11:07
23	10° Punto de límite inferior del Glaciar	19L	257823	8471484	4945	10/07/2017 11:08
24	Bordé 1er lag. Sup.	19L	257700	8471320	4904	10/07/2017 11:19
25	Bordé 2do lag.Sup.	19L	257739	8471301	4899	10/07/2017 11:20
26	Bordé 3ro lag.Sup.	19L	257751	8471266	4898	10/07/2017 11:22
27	Bordé 4to lag.Sup.	19L	257781	8471252	4898	10/07/2017 11:23
28	Cobertu parte baja	19L	257713	8470854	4791	10/07/2017 11:37
29	Lag. Inf. abajo1	19L	258095	8470720	4690	10/07/2017 11:49
30	Lag. Inf. Abajo2	19L	258101	8470690	4687	10/07/2017 11:50
31	Lag. Inf. Abajo3	19L	258100	8470666	4687	10/07/2017 11:51
32	Lag. Inf. Abajo4	19L	258091	8470630	4687	10/07/2017 11:52
33	Lag. Inf. Abajo5	19L	258127	8470626	4688	10/07/2017 11:54
34	Lag. Inf. Abajo6	19L	258160	8470647	4688	10/07/2017 11:55
35	Lag. Inf. Abajo7	19L	258187	8470660	4688	10/07/2017 11:55
36	Húmedal. 1	19L	258126	8470517	4684	10/07/2017 12:01
37	Húmedal. 2	19L	258088	8470520	4682	10/07/2017 12:02
38	Húmedal. 3	19L	258071	8470529	4682	10/07/2017 12:03
39	2Do húmedal. 1	19L	258066	8470532	4693	10/07/2017 12:13
40	2Do húmedal. 2	19L	258066	8470532	4692	10/07/2017 12:15
41	2Do húmedal. 3	19L	258066	8470532	4689	10/07/2017 12:18
42	2Do húmedal. 4	19L	258066	8470532	4684	10/07/2017 12:21

Fuente: Elaboración propia en base a datos colectados en campo

Anexo 3. Procesamiento de imágenes

