

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES
SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEDALES DEBIDO
A LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA CALLANCOCHA
EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCVELICA DESDE
1988 AL 2017**

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

Renato Lacho Quispe

ASESOR:

Ing. Edgar Quijada Gamarra

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL**

HUANCAYO – PERÚ

2018

ASESOR

Ing. Edgar QUIJADA GAMARRA

DEDICATORIA

- ✓ A mi madre Esperanza por su dedicación, valentía y esfuerzo para educar a sus hijos.
- ✓ A mi padre Aquilino por el apoyo moral, por sus consejos y por su preocupación para llegar a sustentar la presente tesis.
- ✓ A mis hermanos; David y Dali por su valentía y carácter para afrontar los problemas y ser el apoyo principal para terminar mis estudios superiores y realizar la tesis.
- ✓ A mis compañeros, amigos y primos por el apoyo brindado en los 5 años de formación profesional.
- ✓ A mí, por tenerme tanta paciencia.

AGRADECIMIENTOS

A los integrantes de la consultora ECOGIS por las enseñanzas impartidas en el procesamiento digital de imágenes satelitales.

Al Ing. Emerson Salinas por su incondicional apoyo en todo el proceso de la elaboración del trabajo de investigación y por profundizar los conocimientos en aspectos de glaciares y bofedales.

Al Ing. Edgar Q. por el apoyo desde la presentación del plan de tesis hasta la conformidad del trabajo de tesis.

Al Instituto Nacional de Investigaciones en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) y a la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) por el alcance de la información en formato SHP y en JPG de la cordillera Chonta.

Al proyecto BIO-THAW “un proyecto multidisciplinario que propone un marco metodológico para el estudio de los bofedales Altoandinos en un contexto de cambio climático” por el alcance de bibliografías relacionadas al tema de investigación.

A los ponentes del II Congreso Internacional de Sistemas de Información Geográfica (II CONISIG – Huancayo).

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
INDICE DE CONTENIDO.....	iv
GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....	xi
INDICE DE TABLAS.....	xii
INDICE DE ECUACIONES.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
INDICE DE GRÁFICOS.....	xvii
INDICE DE ANEXOS.....	xviii
INDICE DE MAPAS.....	xix
RESÚMEN.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
INTRODUCCIÓN.....	xxii
CAPÍTULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Caracterización de la realidad problemática.....	1
1.2. Formulación del problema.....	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Justificación.....	5
1.5. Importancia.....	6

1.6. Limitaciones.....	6
CAPÍTULO II	7
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.1. Marco referencial.....	7
2.1.1. Antecedentes de la investigación.....	7
2.1.1.1. Antecedentes Internacionales	7
2.1.1.2. Antecedentes Nacionales	9
2.1.1.3. Antecedentes Locales	14
2.1.2. Referencias históricas.....	15
2.2. Marco legal.....	15
2.2.1. Ley	15
2.2.2. Protocolos	16
2.3. Marco conceptual	16
2.4. Marco teórico.....	17
2.4.1. Teledetección.....	17
2.4.1.1. Sistema de Teledetección	18
2.4.1.2. Espectro Electromagnético	19
a) Espectro visible.....	19
b) Infrarrojo cercano.....	20
c) Infrarrojo medio.....	20
d) Infrarrojo lejano o térmico	20
e) Micro – ondas	20
2.4.1.2. Firma Espectral	20
a) Respuesta espectral de la Vegetación	21
b) Respuesta espectral del Agua	24
c) Respuesta espectral de la Nieve	26

2.4.2. Constelación Landsat.....	26
2.4.2.1. Características de los Satélites Landsat en Operación	27
a) Landsat 5.....	27
b) Landsat 8.....	28
2.4.3. Glaciares en los Andes Tropicales.....	29
2.4.3.1. Zonificación teórica de un glaciar de montaña	29
2.4.3.2. Teledetección de los glaciares de montaña	31
a) Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI)	31
2.4.4. Bofedales	32
2.4.4.1. Características de los Bofedales	32
2.4.4.2. Teledetección de los bofedales	34
a) Índices de Vegetación basado en la pendiente	34
b) Pendiente y Altitud de los bofedales.....	36
2.4.5. El Ciclo Hídrico en Cuencas Andinas y Ecosistemas de Montaña.....	37
2.4.5.1. Épocas en el Ciclo Hídrico en Cuencas Andinas	37
a) Ocurrencia de Recarga.....	38
b) Ciclo Hidrológico.....	38
2.4.5.2. Correlación observada entre glaciares y factores climáticos.....	40
CAPÍTULO III.....	42
3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	42
3.1. Metodología.....	42
3.1.1. Localización del área de estudio.....	42
3.1.1.1. Ubicación.....	42
3.1.1.2. Clima	43

3.1.1.3. Geología	43
3.1.1.4. Glaciología	44
3.1.1.5. Recursos Hídricos	45
3.1.1.6. Ecosistemas de montaña	45
3.1.2. Análisis de la revisión bibliográfica	48
3.1.3. Imágenes utilizadas y criterios de selección de imágenes	48
3.1.4. Procesamiento de las imágenes	49
3.1.5. Determinación de coberturas	50
3.1.6. Análisis de las superficies Históricas	51
3.1.7. Análisis de la Variación	51
3.1.8. Análisis de Regresiones entre variables	52
3.1.9. Proyección de escenarios futuros (Glaciar)	52
3.1.10. Modelo Hidrológico Cualitativo.....	53
3.1.11. Interpretación de Resultados	54
3.1.12. Tipo de la investigación	54
3.1.13. Nivel de la investigación	54
3.2. Diseño de la investigación	54
3.3. Hipótesis de la investigación	55
3.3.1. Hipótesis general	55
3.3.2. Hipótesis específicas	55
3.4. Variables.....	55
3.4.1. Variable dependiente	55
3.4.2. Variable independiente	56
3.5. Cobertura del Estudio	56
3.5.1. Universo	56
3.5.2. Población	56

3.5.3. Muestra y Muestreo	56
3.6. Técnicas e instrumentos.....	59
3.6.1. Técnicas de la investigación	59
3.6.2. Instrumentos de la investigación	59
3.7. Procesamiento estadístico de la información	60
3.7.1. Estadísticos.....	60
3.7.2. Representación.....	60
3.7.3. Validación de la extensión de los Bofedales y Glaciares	60
CAPITULO IV.....	61
4. ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
4.1. Resultados.....	61
4.1.1. Cálculo de superficies de bofedales de 1988 al 2017	61
4.1.2. Cálculo de superficies de glaciares de 1988 al 2017	63
4.1.3. Índice de desglaciación del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017.....	67
4.1.4. Índice de variación de los bofedales	69
4.1.5. Análisis de regresiones entre variables.....	71
4.1.6. Proyección de escenarios futuros (glaciar)	73
4.2. Discusión de resultados.....	74
4.2.1. Cálculo de superficies de bofedales de 1988 al 2017	74
4.2.2. Cálculo de superficies de glaciares en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	79
4.2.3. Índice de desglaciación del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017.....	81
4.2.4. Índice de permanencia de los bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	82
4.2.5. Análisis de regresiones entre variables.....	83

4.3. Validación de la extensión de los bofedales y glaciares	90
CONCLUSIONES.	91
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	100
MAPAS	118

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

1. CAN : Comunidad Andina de Naciones
2. SIIA: Sistema Integrado de Información Agropecuaria
3. HAA: Humedales Altoandinos
4. MINAM: Ministerio del Ambiente
5. Band RGB: Banda Roja, Verde y Azul
6. NIR: Banda Infrarrojo Cercano
7. SWIR: Banda Infrarrojo Medio
8. NOAA: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
9. IPCC: Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático
10. USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos
11. DEM: Modelo Digital de Elevación
12. TM: Mapeador Temático
13. TIRS: Banda Infrarrojo Térmico
14. MSS: Sistema de Escaner Multiespectral
15. ELA: Línea de Equilibrio Altitudinal
16. GPS: Sistema de Posicionamiento Global
17. NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
18. NDSI: Índice de Nieve de Diferencia Normalizada
19. TTVI: Índice de Vegetación Transformada de Thiam
20. INAIGEM: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
21. UGRH: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos
22. ANA: Autoridad Nacional del Agua
23. ENOS: El Niño-Oscilación del Sur
24. INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía
25. PP: Precipitación Pluvial
26. SIG: Sistemas de Información Geográfica

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: La constelación Landsat.....	27
Tabla 2: Resoluciones del Satélite Landsat 5	27
Tabla 4: Resoluciones del Satélite Landsat 8 (OLI y TIRS)	28
Tabla 5: Valores de los Índices de vegetación basados en la pendiente	36
Tabla 6: Jerarquización de unidades hidrográficas según la codificación Pfafstetter.....	42
Tabla 7: Formaciones Vegetales.....	45
Tabla 8: Humedales en la Cordillera Chonta.....	46
Tabla 9: Determinación del número de puntos.....	57
Tabla 10: Matriz de confusión para el TTVI	57
Tabla 11: Matriz de confusión para el NDVI.....	58
Tabla 12: Valores históricos de los índices de vegetación en el bofedal Puituco	61
Tabla 13: Superficie anual de bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	62
Tabla 14: Valores históricos del Índice de Nieve (NDSI) en el Glaciar Condoray de 1988 al 2017	63
Tabla 15: Superficie y volumen de glaciares de 1988 al 2017	64
Tabla 16: Datos históricos del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	67
Tabla 17: Cálculo de la tasa de variación del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017.....	67

Tabla 18: Datos Históricos de la cobertura vegetal (bofedal) en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017.....	69
Tabla 19: Cálculo de la tasa de variación de bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	69
Tabla 20: Precipitación acumulada anual para la cuenca Callancocha	71
Tabla 21: Superficie de bofedales dependientes de las fuentes hídricas en la cuenca Callancocha.....	72
Tabla 22: Superficies de cobertura vegetal en la cuenca Callancocha	76
Tabla 23: Fuentes hídricas de bofedales en la cuenca Callancocha	84

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Índice de nieve de diferencia normalizada	32
Ecuación 2: Índice de vegetación de diferencia normalizada.....	35
Ecuación 3: Índice de Vegetación Transformada de Thiam.....	35
Ecuación 5: Ecuaciones de Calibración	49
Ecuación 4: Corrección Geométrica y atmosférica	50
Ecuación 6: Fórmula para reducir a valores de 1 y -1	50
Ecuación 7: Cálculo anual de Variación (%)	52
Ecuación 8. Cálculo anual de Variación (Ha/año).....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de un sistema de teledetección	19
Figura 2. Espectro Electro-Magnético	20
Figura 3 . Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas.....	21
Figura 4: Respuesta espectral de la vegetación	22
Figura 5: Reflectancia de la hoja.....	23
Figura 6: Relación entre contenido de clorofila en agua y valores adquiridos del sensor TM.....	25
Figura 7: Esquema de Zonificación glaciar Línea de Equilibrio.....	29
Figura 8: Esquema general de la zona de acumulación y ablación de un glaciar	30
Figura 9: Modelo numérico de un bofedal y descarga de flujo base para una cuenca andina.....	33
Figura 10: Reflectividad espectral en la vegetación	35
Figura 11: Ciclo de la Vegetación para una cuenca.....	37
Figura 12: Distribución del Flujo en un Río en Escorrentía Superficial, Interflujo y Flujo Base.....	38
Figura 13: Diagrama esquemático de una cuenca y sus entradas climáticas (precipitación, temperatura del aire y radiación solar) simulado por PRMS (modificado de Leavesley y otros, 1983).....	39
Figura 14: Distribución, flujo e interacción del agua en la tierra y en el subsuelo.	39
Figura 15: Correlación observada el retroceso glaciar y el aumento de temperatura.....	40

Figura 16: Correlación observada el retroceso glaciar y la disminución de las precipitaciones.	41
Figura 17: Enfoque metodológico General.....	47
Figura 20: Cicló Hídrico de una cuenca	53
Figura 21: Imágenes históricas del glaciar Condoray	66
Figura 22: Superficie de bofedales mediante el NDVI y TTVI.	76
Figura 23: Superficie de bofedal piloto en el año 2002 empleando el NDVI y TTVI	77
Figura 24: Longitud de la superficie glaciar y la laguna Acchicocha	85
Figura 25: Geología de la cuenca (Mapa 6).....	86
Figura 26: Perfil topográfico de la cuenca Callancocha	87
Figura 27: Balance hídrico cualitativo de un bofedal en época seca.....	88
Figura 28: Balance hídrico cualitativo de un bofedal en época húmeda (Lluviosa)	88
Figura 30: Representación cualitativa del modelo hidrológico de la cuenca Callancocha en la época seca	89

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Variación de los valores promedio del TTVI y NDVI de 1988 al 2017	62
Gráfico 2: Superficie de los bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	63
Gráfico 3: Variación de los valores del NDSI de 1988 al 2017.....	64
Gráfico 4: Superficies del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	65
Gráfico 5: Tendencia histórica del glaciar en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	68
Gráfico 6: Tendencia histórica de los bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017	70
Gráfico 7: Correlación entre el área de bofedales (TTVI) y la precipitación acumulada en 90 días (J, J, A) (TRMM)	71
Gráfico 8: Correlación entre el área de glaciares y la precipitación acumulada desde el inicio del año hidrológico	72
Gráfico 9: Bofedales provenientes de las fuentes hídricas	73
Gráfico 10: Correlación entre el área de glaciares y bofedales dependientes del deshielo glaciar.	73
Gráfico 11: Tendencias de Bofedales	78
Gráfico 12: Tendencias del Glaciar.....	81

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 : Esquema general de la zona de estudio, los cuadros muestran una ampliación de la ubicación del bofedal piloto “Puituco” y los puntos tomados en campo para determinar los valores de TTVI	100
Anexo 2: Descripción detallada de la metodología utilizada para el procesamiento digital de imágenes (PDI)	101
Anexo 3: Descripción detallada de la metodología utilizada para la identificación y delimitación de coberturas glaciarias.	107
Anexo 4: Descripción detallada de la metodología utilizada para la identificación y delimitación de cobertura vegetal (bofedales)	111
Anexo 5: Perfil topográfico de la cuenca Callancocha	117
Anexo 6: Simbología de ODUM de un bofedal en la cuenca Callancocha.....	118

INDICE DE MAPAS

Mapa 1: Unidad hidrográfica	119
Mapa 2: Validación de superficies.....	121
Mapa 3: Límites internos de la cuenca en función de su fuente hídrica.....	123
Mapa 4: Superficies históricas del glaciar Condoray.....	125
Mapa 5: Superficies históricas de los bofedales	127
Mapa 6: Geología.....	129
Mapa 7: Cobertura vegetal (bofedal).....	131
Mapa 8: Perfil topográfico y altitud	133
Mapa 9: Ffisiografía	135
Mapa 10: Pendiente	137
Mapa 11: Puntos de muestreo	139

RESÚMEN

La presente investigación se desarrolló en la Cuenca Callancocha ubicado en el Distrito de Acobambilla, Provincia y Departamento de Huancavelica; se tuvo como objetivo determinar las tasas de variaciones superficiales de glaciares y bofedales debido a la precipitación para el periodo 1988 – 2017 en la cuenca Callancocha. La investigación fue de tipo descriptivo – correlacional, cuya metodología está basada en la aplicación de técnicas de percepción remota para realizar el análisis de superficies por sensoramiento remoto y ser procesado con el software ENVI 5.1, IDRISI SELVA y Arc GIS 10.5 a fin de generar índices de vegetación, de nieve y delimitar las superficies de glaciares y bofedales para el periodo de 1988 - 2017 para luego determinar la relación entre las superficies de glaciares y bofedales con la precipitación pluvial mediante una correlación lineal. También se determinó que la superficie del glaciar para el 2017 llegó a 0.915 Km² teniendo un índice de desglaciación de 0.82 %/año. En el 2016 se dio el índice más crítico de desglaciación llegando a 4.863 %/año y en el 2017 se dio una recuperación de la superficie glaciar en razón de 0.627 Km²/año. Los bofedales tuvieron una superficie de 2.99 Km² para el año 2017 y su índice de permanencia y/o incremento de estos bofedales es de 0.97 %/año. Además se determinó que no existe una dependencia entre la precipitación acumulada en la época seca en los meses Junio, Julio y Agosto y la superficie de bofedales. En relación a la precipitación acumulada durante el año hidrológico con la superficie de glaciares es de 0.51 lo que indica que existe una relación directa positiva cuyo grado es moderado lo que quiere decir que a menor precipitación acumulada menor superficie glaciar y a mayor precipitación acumulada mayor superficie glaciar. Así mismo se determinó que no existe una relación de la superficie glaciar con la superficie de los bofedales y todas estas variaciones que se presentan en distintos años se deben a la presencia del Fenómeno del Niño y la Niña en vista que los reservorios de aguas subterráneas recargados en la época húmeda es la fuente principal para la permanencia de los bofedales en las épocas secas.

Palabras claves: Índices espectrales, Ciclo hidrológico en cuencas andinas, ENSO, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

ABSTRACT

The present investigation was developed in the Callancocha Basin located in the District of Acobambilla, Province and Department of Huancavelica; the objective was to determine the rates of surface variations of glaciers and bofedales due to precipitation for the period 1988 - 2017 in the Callancocha basin. The investigation was descriptive - correlational, whose methodology is based on the application of remote perception techniques to perform the analysis of surfaces by remote sensing and be processed with the software ENVI 5.1, IDRISI SELVA and Arc GIS 10.5 in order to generate indexes of vegetation, of snow and to delimit the surfaces of glaciers and bofedales for the period of 1988 - 2017 to later determine the relation between the surfaces of glaciers and bofedales with the pluvial precipitation by means of a linear correlation. It was also determined that the surface of the glacier for 2017 reached 0.915 km² with a deglaciation index of 0.82% / year. In 2016, the most critical rate of deglaciation was reached, reaching 4,863% / year and in 2017 there was a recovery of the glacier surface by 0.627 km² / year. The bofedales had an area of 2.99 Km² for the year 2017 and their rate of permanence and / or increase of these bofedales is 0.97% / year. It was also determined that there is no dependence between the accumulated precipitation in the dry season in the months June, July and August and the area of bofedales. In relation to the accumulated rainfall during the hydrological year with the surface of glaciers is 0.51 which indicates that there is a positive direct relationship whose degree is moderate, which means that the lower the accumulated precipitation, the smaller the glacier surface and the greater the accumulated precipitation, the greater the glacier surface. . It was also determined that there is no relationship between the glacier surface and the surface of the bofedales, and all these variations that occur in different years are due to the presence of the El Niño and La Niña phenomena in view of the recharged groundwater reservoirs in the wet season it is the main source for the permanence of the bofedales in the dry seasons.

Keywords: Spectral Indices, Hydrological Cycle in Andean Basins, ENSO, Geographic Information Systems and Remote Sensing.

INTRODUCCIÓN

Los glaciares y humedales son dos de las fuentes de agua dulce superficial más importantes en la Tierra, su estudio, conservación y uso sostenible son temas prioritarios a nivel mundial y por una parte los humedales destacan porque cumplen múltiples funciones en el ecosistema. (Vorosmartry, 2009)

El Perú es un país con el mayor porcentaje de glaciares tropicales y por ubicarse en la línea ecuatorial estos glaciares son vulnerables al cambio de temperatura y precipitación generando pérdidas de la cobertura glaciar en la cordillera de los andes y alterando la regulación hídrica en los humedales altoandinos, dichos humedales altoandinos regulan los ciclos hidrológicos, biogeoquímicos, teniendo importancia agropecuaria, paisajística y económica. (Vitt, 2008)

Para (Favier *et.al*, 2004) en los Andes centrales donde las estaciones secas son muy marcadas en los meses de junio, julio y agosto, los reservorios subterráneos llegan a ser las fuentes naturales de agua prioritarias para los humedales altoandinos, (Vorosmartry, 2009) En este contexto, surge la amenaza del cambio climático, cuyos impactos a los ecosistemas tropicales de montaña son diversos y que ponen en riesgo la sostenibilidad de los glaciares y de los humedales.

Frente a esta problemática podemos afirmar que los bofedales tienen una dependencia de los glaciares, ciclo hídrico y el impacto principal a causa del cambio climático en estos humedales alto andinos se estaría dando principalmente en la disponibilidad de agua en época seca y una vez que los glaciares hayan desaparecido, conllevará consecuencias para los bofedales, y con esto, para los animales, plantas y comunidades humanas que dependen de ellos. (TUNUPA, 2010)

Los SIG y la Teledetección son herramientas de gran importancia para realizar estudios cuyo objetivo es la identificación, evaluación, monitoreo y análisis de las tendencias espacio - temporales de los recursos naturales debido a la gran cantidad de información y al análisis que estos ofrecen.

Es por ello que en el marco de la problemática mencionada se realizó la presente investigación que tiene como objetivo determinar la tasa de variaciones superficiales de los glaciares y bofedales debido a la precipitación en la cuenca

Callancocha desde 1988 al 2017 utilizando imágenes satelitales Landsat 5 y 8 descargados de la USGS con **PATH RAW 6/69**.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se describe la caracterización de la realidad problemática, la formulación del problema, sus objetivos, la justificación e importancia de la presente investigación así como las limitaciones encontradas en todo el desarrollo de la investigación, el Capítulo 2 introduce los fundamentos teóricos, antecedentes, marco legal, marco conceptual y marco teórico, el Capítulo 3 incluye la metodología de trabajo donde se detalla las fases metodológicas, el tipo y diseño de la investigación, las variables de estudio, cobertura del estudio, las técnicas e instrumentos y el procesamiento estadístico de la información, finalmente resultados y discusión de resultados se presentan en el capítulo 4.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Caracterización de la realidad problemática

El cambio climático, atribuido a la acción humana sobre la tierra, prevé importantes cambios en los patrones de precipitación y temperatura, para la región de América Latina los diversos modelos pronostican que el cambio climático tendrá un fuerte impacto en la dinámica y sostenibilidad de los glaciares y ecosistemas andinos, llegando en el mediano plazo a la pérdida de un gran número de ellos. (CAN, 2015)

Arenas (2010), citado por la (CAN, 2015) afirma que en América del Sur existen 25.500 km² cubiertos por glaciares, con 75% del área total en Chile y 15 % en Argentina. En cuanto a los glaciares tropicales, un 99% de ellos se encuentran distribuidos en los Andes sudamericanos; de los cuales el 71% se localizan sobre las cordilleras del Perú.

Según el (INAIGEM, 2016) en los estudios realizados desde el 2014 mencionan la drástica reducción del área glaciar en los Andes Peruanos,

donde más del 40% se ha perdido a nivel nacional. De las cuales, 4 cordilleras (Chonta, Chila, La Raya y Huanzo) son las más impactadas debido a que han disminuido su área glaciaria en más del 70% debido al calentamiento global, afectando la disponibilidad de agua y las actividades de la población. Para el 2016 el INAIGEM realizó un estudio del glaciar Condoray donde se estimó un área de 0,4 km² a partir de imágenes de satélite Sentinel-2, el cual indica una pérdida de 17,5 km² que equivale el 98% entre 1970 y 2016.

Sin embargo los bofedales cubren menos del 3% de la superficie de la Tierra y contribuyen hasta el 40% de los servicios ecosistémicos que provee al planeta durante un año” (Zedler & Kercher, 2005). Estos a la vez representan un valor económico muy grande para la población andina, porque desde épocas prehispánicas les proporcionaron pastos por ser zona ganadera de los que dependen millones de personas. (Treacy, 1994)

La provincia de Huancavelica siempre utilizó la meseta para el pastoreo de camélidos y ovinos donde alrededor de 1500 familias habitan el área que alberga una población pecuaria de más de 200 000 cabezas, conformada por alpacas, llamas y ovejas donde los bofedales o humedales de altura son cruciales para el pastoreo de las alpacas, particularmente en la estación seca, de mayo a noviembre y son vitales para la subsistencia de los pastores y la prosperidad económica, pero también son de trascendencia regional (cuenca) y universal (clima) debido a su capacidad para capturar y almacenar lluvias, deshielos de los glaciares y carbono. (CEPES, 2015)

Ante esta situación surgen algunas interrogantes que necesitan ser resueltas como por ejemplo ¿Cuánto han cambiado las superficies de los glaciares y bofedales desde el 1988 hasta el 2017?, ¿Qué relación existe entre la precipitación con los glaciares y bofedales? y ¿Cuánto es el porcentaje de variación de estas coberturas desde el 1988 al 2017?. Frente a este contexto los glaciares y los bofedales aparecen como un modelo ideal de investigación para establecer principios de desarrollo

sostenible en las políticas y los programas nacionales y revertir la degradación ambiental en estos ecosistemas.

Esta investigación se enfoca en resolver estas interrogantes mediante la existencia de un gran número de satélites que proporcionan información espacial y temporal que hace posible cartografiar la cubierta nival y vegetal mejorando el conocimiento sobre su dinámica en un periodo determinado.

“Debido a ello, podemos llegar a acordar que los datos suministrados por esta disciplina, resultan ser una fuente indispensable de información primaria para la evaluación de las cubiertas terrestres”. (Schomwandt, 2015)

“En ese sentido la teledetección, a través del análisis de las imágenes capturadas por los satélites de observación terrestre, han demostrado ser de una herramienta única para generar información espacial sobre humedales alto andinos”. (Quiroz & Saatchi, 1999)

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuáles son las tasas de variaciones superficiales de glaciares y bofedales en la Cuenca Callancocha debido a la precipitación en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuánto es la superficie de glaciares en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica en los años 1988 al 2017?
- b) ¿Cuál es el índice de desglaciación en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica en los años 1988 al 2017?
- c) ¿Cuánto es la superficie de bofedales en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica en los años 1988 al 2017?

- d) ¿Cuál es el índice de evolución de la cobertura de los bofedales en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica entre 1988 al 2017?
- e) ¿Qué relación existe entre la precipitación acumulada en 90 días (Junio, Julio y Agosto) y la superficie de bofedales en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica entre 1988 al 2017?
- f) ¿Qué relación existe entre la precipitación acumulada durante el año hidrológico y la superficie de glaciares en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica entre 1988 al 2017?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la tasa de variaciones superficiales de los glaciares y bofedales debido a la precipitación en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la superficie de glaciares en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.
- b) Determinar el índice de desglaciación del Glaciar Condoray en la Cuenca Callancocha en el Departamento De Huancavelica de 1988 al 2017
- c) Determinar la superficie de bofedales en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.
- d) Determinar el índice de evolución de cobertura de los bofedales en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.
- e) Determinar la relación existente entre la precipitación acumulada en 90 días (Junio, Julio y Agosto) y la superficie

de bofedales en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica entre 1988 al 2017.

- f) Determinar la relación existente entre la precipitación acumulada durante el año hidrológico y la superficie de glaciares en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica entre 1988 al 2017.

1.4. Justificación

Esta investigación se justificó por varias razones. Primero, en el marco del calentamiento global y cambio climático es necesario realizar un monitoreo permanente de los glaciares y bofedales para identificar el comportamiento evolutivo de estos ecosistemas en 29 años.

Segundo, porque genera información cartográfica adicional al inventario realizado por la UGRH (2018) de la ANA ya que en este inventario se realizaron por periodos largos y no se tiene un inventario anual del comportamiento de los glaciares generando vacíos que es abarcado por esta investigación y el INAIGEM que realizó un diagnóstico en el 2016, lo que deja un vacío en años anteriores y recientes, que es abarcada en esta investigación por haberse realizado desde el 1988 hasta el 2017.

Tercero, porque la metodología propuesta en esta investigación puede ser replicada o modificada en otras investigaciones que realizan el monitoreo continuo de las superficies de bofedales y glaciares tropicales.

Cuarto, porque esta investigación está inmerso en la Agenda de Investigación Ambiental del MINAM en el eje temático N° 1 “Conservación y Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales y de la Diversidad Biológica”, componente “Aprovechamiento sostenible de los recursos naturales”, Área Temática “Valoración económica del patrimonio natural” y Línea de Investigación “Evaluación de índices biofísicos aplicables a los sistemas ecológicos” y “Estudio de los factores físicos asociados al balance hídrico en cuencas (precipitaciones, glaciares, agua subterránea, etc.)

1.5. Importancia

Es importante, porque los bofedales o humedales de altura son cruciales para la ganadería alto andina y la regulación de la oferta hídrica disponible en las cuencas, es así que el presente estudio servirá para realizar acciones orientadas a incluir a estos ecosistemas en la gestión de los recursos hídricos por cuenca, dado que son ecosistemas dependientes directamente del agua.

Es importante porque la (Convención de Ramsar, 2010) recomienda el uso de esta tecnología para el desarrollo de inventarios nacionales”

En ese sentido, la investigación ayudará a comprender las dinámicas superficiales de bofedales y glaciares a lo largo de 29 años en marco del cambio climático y protección de fuentes de agua en cabecera de cuencas andinas. Para ello se realizará un análisis multitemporal basado en imágenes de satélite LANDSAT.

1.6. Limitaciones

Las principales limitaciones encontradas al momento de la elaboración de la investigación fueron:

- La selección del satélite a trabajar (Plataforma y sensores)
- Las fechas de adquisición de estas imágenes satelitales.
- La información histórica de datos de precipitación para el área de estudio.
- Poca información cartográfica de humedales y glaciares en la cuenca Callancocha.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Marco referencial

2.1.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1.1. Antecedentes Internacionales

(Zeballos, et al., 2014) Realizaron la investigación “Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia” en donde se tomaron en cuenta las áreas desde 4050 – 6500 m.s.n.m. que incluye los pisos Altoandinos, Subnivales y Nivales. Este estudio planteó un método para el análisis espacial de múltiples factores que afectan su vulnerabilidad frente al cambio climático a través de la variación de la superficie de glaciares y humedales de la Cordillera Real (Bolivia) empleando imágenes Landsat relacionando la variación de estos objetos con factores

externos e internos, tales como la variación de la precipitación y la propia morfometría física de las cuencas de drenaje, donde las imágenes se corrigieron geoméricamente y atmosféricamente previamente a la aplicación de un algoritmo diseñado para la determinación del área de los objetos. Finalmente, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple previo de la evolución de los humedales y nevados en relación con la precipitación y los parámetros morfológicos. Esta variabilidad de las coberturas se relacionó con factores tales como la cantidad de precipitación acumulada desde el inicio del año hidrológico en el caso de la variación de la cobertura glaciaria y en el caso de los humedales, su variación estuvo vinculada a la cantidad de precipitación acumulada en 60 días previo a la fecha de la imagen satelital afirmando que existe una fuerte dependencia de la disponibilidad espacial y temporal de la precipitación.

(Buitro A. & Fernández C., 2012). Realizaron la investigación “Estudio Espacial Multitemporal de variaciones en superficie observadas a través de Imágenes Satelitales Landsat en una Región del Parque Nacional SAJAMA - Bolivia”. El estudio identificó cambios en áreas con cobertura glaciaria y áreas con coberturas de bofedales andinos a través del uso de información remotamente adquirida, técnicas de SIG, técnicas de teledetección e información de campo mediante la siguiente metodología que se realizó en tres fases. En la primera fase se determinó la localización del área de estudio teniendo en cuenta la ubicación, clima y relieve del área de estudio, en la segunda fase se seleccionó las imágenes Landsat teniendo en cuenta sus características técnicas para luego realizar el pre procesamiento de las imágenes Landsat mediante el

Software ENVI, en la tercera fase se realizó la clasificación supervisada para delimitar las áreas cubiertas por glaciares y bofedales teniendo en cuenta la reducción de islas o grupos de pixel aislados, la exportación a formato vectorial y el cálculo del área de glaciares. En la cuarta fase se realizó el cálculo de los índices espectrales (NDVI y NDSI) para delimitar las áreas cubiertas por glaciares y bofedales para su posterior comparación con las áreas delimitadas por clasificación no supervisada donde se obtuvieron variaciones en los valores del NDVI y en las áreas de bofedales a causa de la influencia del fenómeno de El Niño y la Niña, los cuales implican déficit e incremento de lluvias observando que el área total de los bofedales varía a lo largo de los años analizados en el estudio, siendo los años 1992 y 2010 las que muestran los valores más bajos en superficie, por otro lado las imágenes adquiridas en los años 1999 y 2008 muestran que las superficies de los bofedales se incrementaron.

2.1.1.2. Antecedentes Nacionales

(García & Otto, 2015) Realizaron la investigación “Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del Río Santa, Ancash, Perú” que tuvo como objetivo fue validar la metodología desarrollada por Otto et al. (2011) en una región de los Andes del norte del Perú, específicamente en la cabecera de cuenca del río Santa, empleando imágenes satelitales e información meteorológica y la metodología consistió en identificar y delimitar espacialmente los HAA en base a las imágenes Landsat, definiéndose primero los tipos y subtipos de HAA. Luego, la distribución espacial y temporal de los HAA usando las imágenes MODIS para el periodo 2000-2009. Con esta

última información fue posible evaluar la dependencia de la extensión de los HAA con las condiciones climáticas locales, específicamente de la precipitación pluvial y nival estos análisis determinaron estadísticamente que existe una dependencia entre la extensión de los HAA_P y la acumulación de nieve durante la época seca (meses de junio y julio), indicado por el coeficiente de determinación ($r^2 = 0.71$). En el caso de la extensión de los HAA_T, se determinó estadísticamente que existe una dependencia entre la extensión de los HAA_T con la lluvia acumulada durante los meses de marzo a mayo, indicado por el coeficiente de determinación ($r^2 = 0.68$).

(García & Willems, 2015) Realizaron la investigación “Metodología para el estudio de bofedales en Cabeceras de cuenca usando datos de imágenes de los sensores TM, OLI a bordo de los satélites Landsat - Caso Estudio: Bofedal Chunal. La finalidad de la investigación fue establecer una metodología para identificar y cuantificar la extensión de los humedales, bofedales de puna, situados aproximadamente sobre los 3800 msnm, de la cuenca alta del río Chillón, y establecer su efecto en la regulación hídrica del río Chillón, a través de datos de imágenes de los sensores TM, OLI a bordo de los satélites Landsat, como parte de la investigación, se realizó trabajos de campo para la determinación de una zona de estudio, identificación del bofedal piloto y en gabinete el procesamiento digital de imágenes y el modelamiento en el SIG en donde se consideró al índice de vegetación, índice de infrarrojo (NDII) y el índice del agua (NDWI) en vista que tienen la capacidad de zonificar las áreas de los bofedales determinando valores extremos para el NDVI entre 0.43 y 0.899, el NDII entre 0.02 y 0.76 y el NDWI entre -0.87 y -0.027.

(Castro, Vargas, & Bequer, 2014) En los apuntes de su investigación, sobre la “Identificación de los cambios en la superficie de los Bofedales de Apolobamba, utilizando herramientas de análisis geoespacial, del periodo 1984-2013; en Abril – Junio del 2014”, estudiaron las fuerzas que ocasionan el retroceso de los glaciares en los Bofedales, en su estudio se buscó identificar el cambio en la superficie del Bofedal a través del análisis de las imágenes satelitales, lo cual constituyó una herramienta de fácil acceso donde no se encontró una tendencia significativa sino más bien un incremento de la superficie del bofedal evaluados para el período 1984-2013. Este incremento identificado, que no es estadísticamente significativo, puede estar asociado a la mayor disponibilidad de agua en estos humedales proveniente del deshielo de glaciares cercanos.

(Adauto y Willems, 2014). Realizarón la investigación “Estudio de la evolución del ecosistema de bofedales de la Cabecera de las Cuencas Pisco y Pampas (Huancavelica) Empleando Imágenes TM y OLI”. El estudio realizado exploró metodologías para seguir la evolución de ecosistemas de humedales en zonas altoandinas. En donde trabajó con un esquema propuesto con distintas fases metodológicas. La primera fase contempló la recopilación de datos. La siguiente fase consistió en el procesamiento digital de las imágenes teniendo como actividad principal la corrección geométrica y atmosférica. Para finalmente realizar un proceso de clasificación luego se cuantificó el número de hectáreas correspondiente a los bofedales permanentes (inundados y no inundados) en las estaciones seca y húmeda, distinguidas por sus condiciones hidrológicas. La presente metodología cumplió con el objetivo de clasificar los subtipos de bofedales y sus

subclases con el uso de imágenes de satélite, así como su cuantificación, la que deja una clara muestra de la disminución de ecosistemas.

(García & Otto, 2013). Realizaron la investigación "Evaluación de Bofedales en la cabecera de cuenca del Rio Santa" que tuvo como objetivo el de delimitar hidrológicamente y analizar la dependencia de los Humedales Alto Andinos - HAA, de la precipitación pluvial y nival en la cuenca de estudio, con el propósito de clasificar a los Bofedales como punto clave del ciclo hidrológico en los ecosistemas de montaña. La investigación se desarrolló en tres etapas, la primera consistió en el procesamiento digital de imágenes satelitales, la segunda consistió en la delimitación y diferenciación hidrológica de los humedales de altura mediante NDVI, NDII y NDWI, en la tercera etapa se realizó la distribución temporal de los HAA para el periodo 2000-2009, y por último se realizó el análisis de la dependencia de la precipitación pluvial y nival. En esta investigación se demostró estadísticamente que existe una dependencia entre la extensión de los HAA perennes de la cuenca con la acumulación de nieve durante la época seca y una dependencia entre la extensión de los HAA temporales de la cuenca con la lluvia acumulada durante época húmeda, también se determinó que existe una gran extensión de Humedales alto Andinos en la cuenca alta del rio Santa- De las 29128.8 hectáreas mapeadas para el año hidrológico 2011-2012, 7389.2 Ha. corresponden a la cubierta de HAA, que representa la cuarta parte de la superficie de la cuenca en mención (25%). De este 25% de HAA. El 66% fueron clasificados como permanentes y el 34% como temporales.

(P. Peña & T. Mendoza, 2013) Realizaron la investigación "Efecto de la desglaciación del Nevado Huaytapallana sobre

el rendimiento hídrico – Sub Cuenca Shullcas influenciado por la Variación Climática, 1985-2011”. La presente investigación se desarrolló en el Nevado Huaytapallana teniendo como objetivo determinar la influencia de la variación climática sobre la variación de la cobertura glaciar y su efecto en el rendimiento hídrico del río Shullcas para el periodo 1985 - 2011. La investigación tuvo una metodología basada en el análisis del sensoramiento remoto de la cobertura glaciar y la relación con las diferentes variables desarrollándose en tres etapas, en la primera se realizó el pre procesamiento de las imágenes satelitales, en la segunda fase se realizó la determinación de coberturas glaciares y en la última fase se elaboró el modelo y se consideraron las ecuaciones para determinar los cambios de cobertura según las fórmulas establecidas en la investigación llegando a la conclusión que el Nevado Huaytapallana experimentó una reducción de la cobertura glaciar de 31% (0.38 Km²/año) para el periodo 1985-2010 y recuperando, en el periodo 2010-2011, el 35.8% (5.78 Km²/año) de la superficie glaciar perdida anteriormente, la temperatura tiene un incremento de 0.07 °C/año y esta influye directamente a la cobertura glaciar, la precipitación experimenta una reducción de 0.08 mm/año.

Alva y Melendez, (2012). Realizaron la investigación “Aplicación de la teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la cordillera blanca”. El objetivo de esta investigación fue determinar la regresión glaciar en la Cordillera Blanca, en períodos 1989, 1998 y 2005. Para el presente estudio se tomó como referencia los límites políticos de los distritos de Huaraz e Independencia, así como el empleo de distintas imágenes de satélite de los años 1989, 1998 y 2005, lo que nos permitió analizar el

comportamiento de la regresión glaciaria en un período de 16 años y predecir dicho comportamiento para 25 años (2014). La metodología permitió observar las variaciones en la extensión de las lenguas glaciares de la Cordillera Blanca desde 1989 al 2005. Estas variaciones se pueden deber al calentamiento global de la Tierra, al fenómeno del Niño y de la Niña sufridos en los últimos tiempos existiendo un retroceso de las masas glaciares de alta montaña, el cual se comprobó con los resultados obtenidos en el presente trabajo que a su vez confirmó los resultados de otros estudios realizados por otros autores en diferentes lugares del mundo afirmando que la pendiente sí es una variable que influye en gran medida en el retroceso glaciario de la Cordillera Blanca, ya que se aprecia que en las zonas de altas pendientes (mayores a 35°) es donde el retroceso ha sido mayor en comparación a las zonas con pendientes menores (entre 0 -35°).

2.1.1.3. Antecedentes Locales

(INAIGEM, 2016) realizó un “Diagnóstico de la situación actual en el glaciar Condoray – Cordillera Chonta” donde tuvo como objetivo evaluar las características y condiciones actuales del glaciar Condoray donde emplearon una metodología estructurada en tres actividades, la primera consistió en la realización de actividades previas donde se estableció los objetivos, identificación de zonas de estudio y mapa de recorridos luego se realizó las actividades de campo que consistió en la inspección del entorno, reconocimiento y caracterización de la zona de estudio, toma de fotografías y realización de entrevistas para finalmente realizar las actividades de gabinete donde se realizó la revisión de información acopiada, material fílmico y fotográfico, procesamiento de información y la elaboración

del informe, determinando que en el 2009 el área glaciaria era de 1,44 km² con una pérdida de 16,46 km² (92%) según el área base de 1970 (17,9 km²) (HIDRANDINA S.A. , 1989). Al 2016 el INAIGEM estimó un área de 0,4 km² a partir de imágenes de satélite Sentinel-2, el cual indica una pérdida de 17,5 km² que equivale el 98% entre 1970 y 2016. Esto evidencia que si las condiciones climáticas actuales (calentamiento global) continúan, el escenario futuro refleja que los glaciares desaparecerán en un corto tiempo.

2.1.2. Referencias históricas

El glaciólogo (Francou, 2013) en su libro “Glaciares y Ecosistemas de montaña” ha desarrollado muchas concepciones sobre el comportamiento de los glaciares principalmente con el impacto al cambio climático y su relación con el paisaje de los ecosistemas de montaña, donde se encuentran los Bofedales indicando que siempre van juntos, uno debajo del otro complementándose y formando las cuencas en las montañas.

Sin embargo para (Chow, Maidment, & Mays, 1988) el agua es el elemento más importante que poseen los glaciares y ecosistemas de montaña, donde los glaciares son cosechadores y reservas naturales de agua, que contribuyen significativamente con este recurso a los ecosistemas de montaña, y estos a su vez por el proceso de evapotranspiración devuelven el agua en forma de precipitación sobre glaciares y otros lugares.

2.2. Marco legal

2.2.1. Ley

- Constitución Política del Perú de 1993.
- Ley General del Ambiente (Ley N° 28611).
- Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338) y su reglamento.
- Ley N° 30283, “Creación del Instituto Nacional de Investigación y Ecosistemas de Montaña”.
- Ley N° 30754 “Ley Marco sobre Cambio Climático”

2.2.2. Protocolos

- Protocolo de Orto rectificación de Imágenes Satelitales – MINAM.

2.3. Marco conceptual

BANDA ESPECTRAL: Se refiere este término a una selección de longitudes de onda con comportamiento electro-magnéticos similares. (Chuvieco, 1995)

LONGITUD DE ONDA: Es la medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre sucesivas ondas. (Chuvieco, 1995)

PUNTOS DE CONTROL: Se trata de elementos geográficos que pueden ser localizados precisamente en una imagen y en un mapa para ser empleados en la corrección cartográfica de dicha imagen. (Chuvieco, 1995)

RADIACIÓN: El proceso en que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre. (Chuvieco, 1995)

RADIANCIA: Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. (Chuvieco, 1995)

REALCE DE IMÁGENES: Procesos digitales que tiene como fin facilitar la mejora visual de la imagen, mediante el aumento del contraste interno o la creación de nuevas bandas que ilustren mejor sobre sus características originales. (Chuvieco, 1995)

TRANSMISIVIDAD: Relación entre el flujo incidente y el flujo transmitido por una superficie. (Chuvieco, 1995)

REFLECTIVIDAD: Porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie bidimensional. (Chuvieco, 1995)

ABSORTIVIDAD: Relación entre el flujo incidente y el flujo que absorbe una superficie. (Chuvieco, 1995)

BIOMASA: Masa total de organismos vivos presentes en un área o volumen dados. El material vegetal muerto se puede incluir como biomasa muerta. (IPCC, 2001)

ABLACIÓN: Proceso por el cual un glaciar pierde masa, su extensión varía de un año al otro en función del balance de masa. (Francou, 2013)

CAMBIO CLIMÁTICO: Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima

observada durante períodos *La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMCC) distingue entre ‘cambio climático’ atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y ‘variabilidad climática’ atribuida a causas naturales. (Stocker, Quin, Plattner, Boschung, & Nauels, 2013)

DESGLACIACIÓN/TERMINACIÓN DEL PERÍODO GLACIAL: Transiciones desde condiciones completamente glaciales (edad de hielo) a condiciones interglaciales cálidas caracterizadas por el calentamiento global y la elevación en el nivel del mar debidos a la modificación del volumen de hielo continental. (IPCC, 2001)

EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS): Este fenómeno oceánico está asociado a cierta fluctuación de un patrón global de presiones en la superficie tropical y subtropical que se denomina Oscilación del Sur. Este fenómeno atmósfera-océano acoplado, cuya escala de tiempo más habitual abarca entre dos y aproximadamente siete años, es conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Durante un episodio de ENOS, los vientos alisios habituales se debilitan, reduciendo el flujo ascendente y alterando las corrientes oceánicas, con lo que aumenta la temperatura superficial del mar, lo cual debilita a su vez los vientos alisios. Este fenómeno afecta considerablemente a los patrones de viento, de temperatura superficial del mar y de precipitación en el Pacífico tropical. Sus efectos influyen en el clima de toda la región del Pacífico y de muchas otras partes del mundo mediante teleconexiones en toda la extensión del planeta. La fase fría de ENOS se denomina La Niña. (Stocker, Quin, Plattner, Boschung, & Nauels, 2013)

2.4. Marco teórico

2.4.1. Teledetección

Para (Chuvienco, 1995) La teledetección o sensoramiento remoto es aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales existiendo una interacción energética entre el sensor y la superficie terrestre, ya sea por reflexión de la energía solar, artificial o por emisión propia.

El objetivo de estudio de la teledetección es la energía o radiación electromagnética que es detectada por los sensores, debido a que esa energía es determinante al momento de distinguir o evaluar las cubiertas terrestres. (Schomwandt, 2015)

2.4.1.1. Sistema de Teledetección

Un sistema de teledetección espacial, incluye los siguientes elementos:

a) Fuente de energía, puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por este (teledetección activa). La fuente de energía más importante, obviamente es la energía solar.

b) Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

c) Sistema sensor, compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

d) Sistema de recepción – comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.

e) Intérprete, que analiza esa información normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio. (Chuvienco, 1995). (Ver Figura 1)

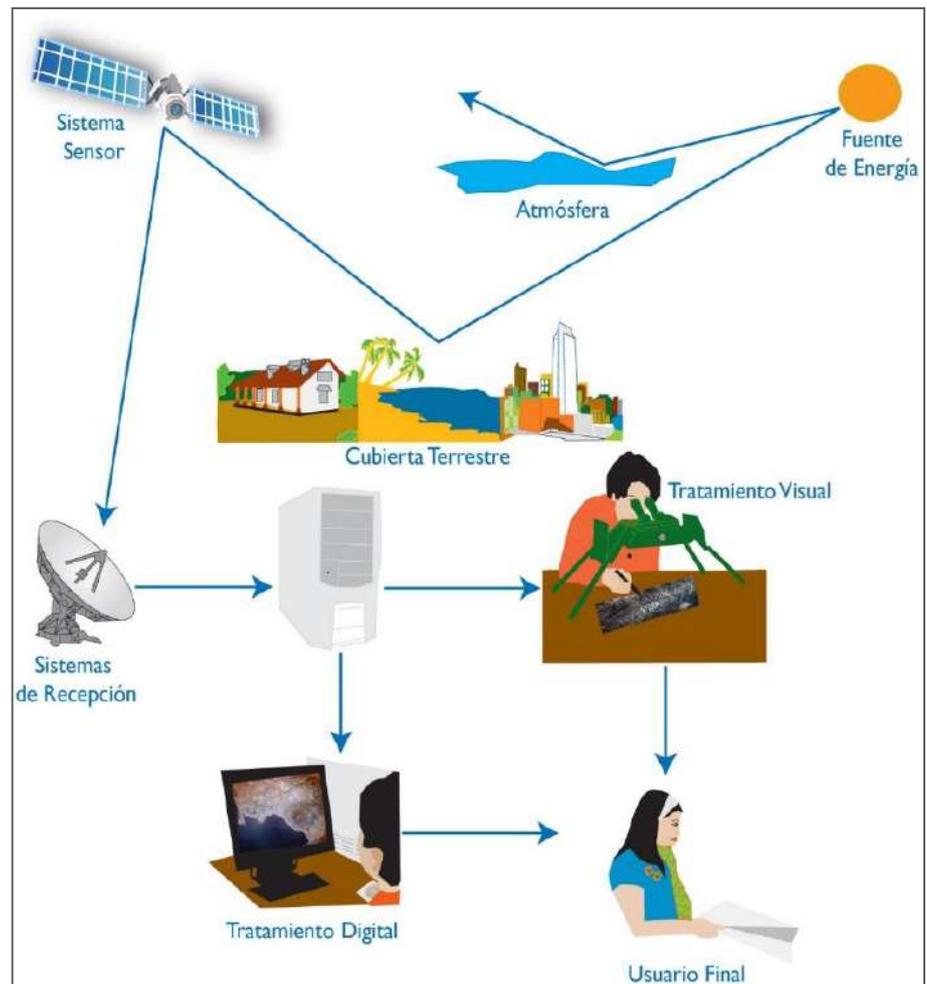


Figura 1: Componentes de un sistema de teledetección
Fuente: (Chuvieco, 1995).

2.4.1.2. Espectro Electromagnético

“Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según distintos autores”. (Chuvieco, 1995).

a) Espectro visible

De $0.4 - 0.7 \mu\text{m}$, se denomina así por tratarse de la única radiación electro-magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de ondas en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul ($0.4 - 0.5 \mu\text{m}$); verde ($0.5 - 0.6 \mu\text{m}$), y rojo ($0.6 - 0.7 \mu\text{m}$), en razón de los colores

elementales asociados a esas longitudes de onda. (Chuvienco, 1995)

b) Infrarrojo cercano

“De 0.7 – 1.3 μm , a veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad”. (Chuvienco, 1995)

c) Infrarrojo medio

“De 1.3 – 8 μm , en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.”

d) Infrarrojo lejano o térmico

De 8 – 14 μm , que incluye la porción emisiva del espectro terrestre.

e) Micro – ondas

“A partir de 1 mm, con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente de la cubierta nubosa”. (Chuvienco, 1995)

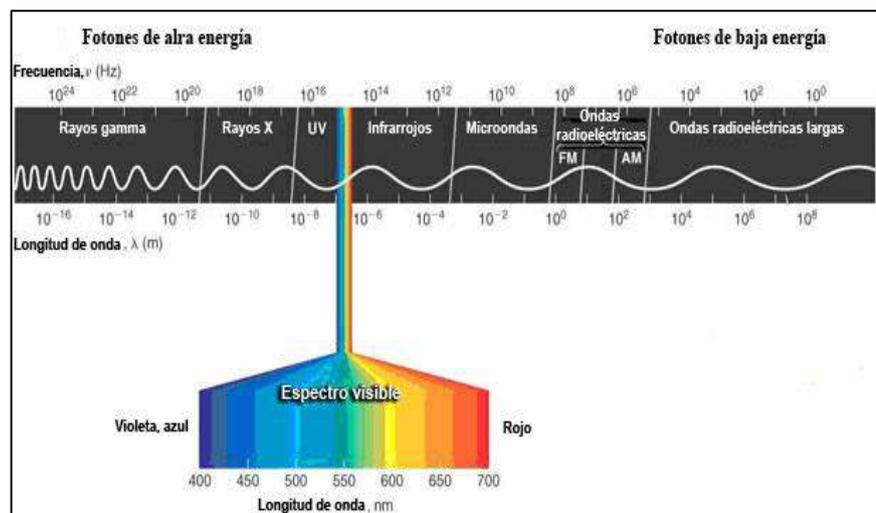


Figura 2. Espectro Electro-Magnético

Fuente: (Chuvienco, 1995)

2.4.1.2. Firma Espectral

La firma espectral se construye a partir de la señal registrada por los sensores en los diferentes rangos del espectro

electromagnético la misma que permite identificar y discriminar diferentes objetos de la naturaleza.

“Es importante considerar que el flujo de energía recibido por el sensor no solo depende de la reflectividad de la cubierta, sino también de otros factores externos. Los más importantes son; las condiciones atmosféricas, el emplazamiento ambiental de la cubierta y la geometría de la observación”. (Chuvienco, 1995).

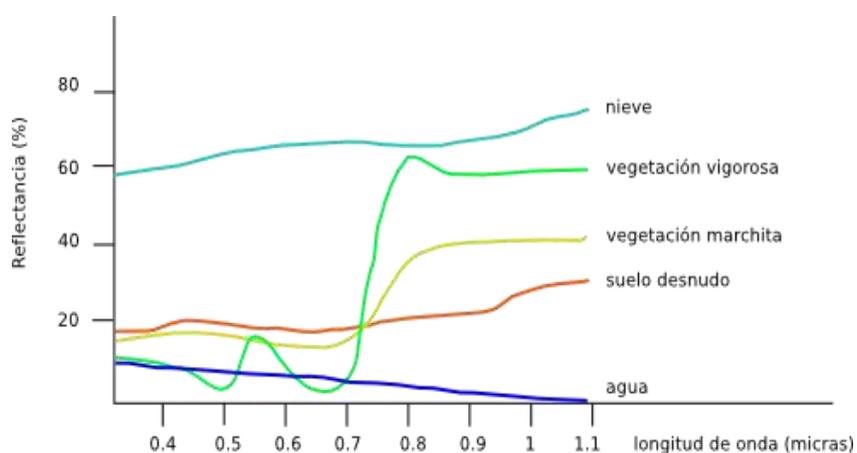


Figura 3 . Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas

Fuente: (Chuvienco, 1995)

a) Respuesta espectral de la Vegetación

Para (Chuvienco, 1995) La caracterización espectral de las masas vegetales es, sin duda, una de las tareas más interesantes en teledetección. Pese a su gran importancia, aún ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor. En primera instancia, ha de considerarse la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad.

Además es preciso tener en cuenta las características morfológicas de la planta: su altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc., que provocan una notable modificación de su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores serían

los derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, geometría de plantación, etc.

El comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a 0.55 μm). Por el contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio.

Estas características espectrales se relacionan, primordialmente, con la acción de los pigmentos fotosintéticos y del agua que almacenan las hojas.

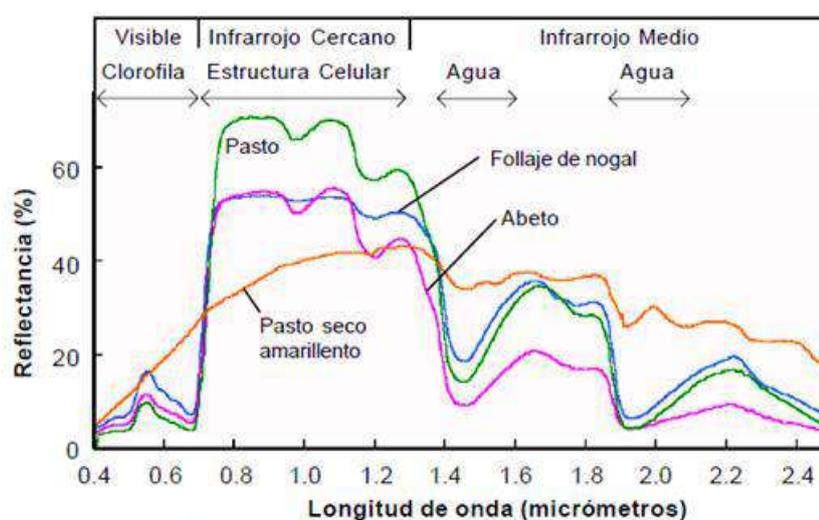


Figura 4: Respuesta espectral de la vegetación

Fuente: (Chuvieco, 1995)

En concreto, la baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja principalmente las clorofilas, xantofilas y carotenos (65,29 y 6%) respectivamente, aunque la proporción puede variar mucho: (Gates, 1965). Todos ellos absorben en la banda del espectro situada en torno a los 0.445 μm , mientras la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno a los 0.645 μm . Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los 0.55 μm , en donde el

efecto absorbente es menor. Por esta causa aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que nuestros ojos perciben la vegetación vigorosa.

Cuando se aproxima la caída otoñal de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia, lo que explica su mayor reflectividad en la banda roja y, en definitiva, su color amarillento (verde + rojo). En algunas especies resulta destacada la acción de otro pigmento, la antiocianina, buen reflector de la porción roja del espectro, que causa ese color en épocas de senescencia.

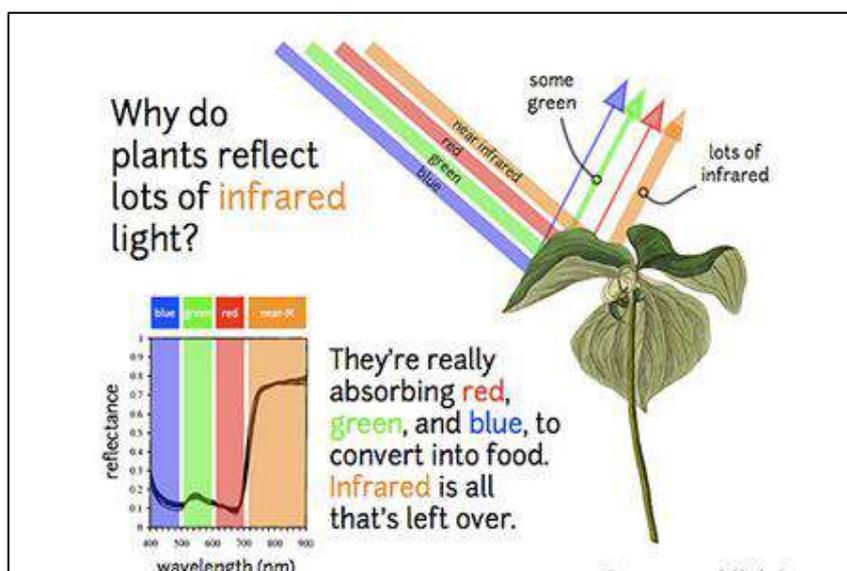


Figura 5: Reflectancia de la hoja

Fuente: Publicabs.org

En cuanto a la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, parece deberse a la estructura celular interna de la hoja. En concreto la capa esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas, ejerce un papel protagonista, al difundir y dispersar la mayor parte de la radiación u otros tipos de cubierta. Queda implícito que cualquier fuente de estrés en la vegetación se mostrará en un comportamiento espectral más o menos alejado del anteriormente expuesto. La hoja senescente o enferma tiende a perder actividad clorofílica y

en consecuencia a ofrecer una menor absorptividad en las bandas azul y roja del espectro visible. El aumento consecuente de la reflectividad en estas bandas elimina el máximo relativo antes situado en el verde, por lo que la hoja tiende a mostrar un color amarillento. Por el contrario, en el infrarrojo medio se produce una reducción de la reflectividad. La curva espectral, por tanto, se hace más plana, menos cromática. (Murtha, 1978).

Según (Knipling, 1970) cuando se va a realizar un análisis de la superficie de la vegetación a través de imágenes de satélite hay que tener en cuenta aspectos como la morfología de la cubierta (proporción de sombras, geometría del follaje, entre otros), el estado fenológico, la ubicación en el relieve y su asociación con otras cubiertas o especies. (Ranga, Forrest G, Piers J, & Marshak, 1995).

b) Respuesta espectral del Agua

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo mayor su absorptividad cuanto mayor sea la longitud de onda. La curva espectral, por tanto, es similar a la del suelo, aunque en sentido contrario. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano, donde ya es prácticamente nula. Por esta razón, la frontera tierra-agua es muy nítida en esta banda.

La variabilidad del agua es mejor detectable en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), que hemos de relacionar con su profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes), y rugosidad de la superficie.

La profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de los materiales de los fondos. En aguas poco profundas la reflectividad aumenta, por cuanto se produce un aporte de las características espectrales de los

fondos. En consecuencia, la absorptividad será tanto mayor cuanto más profunda sea la capa de agua.

En cuanto a su composición, diversos estudios han demostrado la posibilidad de emplear sensores especiales para cartografiar contenido de clorofila en el agua (López & Caselles, 1989). Si el agua ofrece importantes concentraciones de clorofila, la reflectividad en el azul tiende a descender, aumentando en el verde. Esto permite establecer una clara correlación, de signo negativo, entre la reflectividad del agua en la banda azul y el contenido de la clorofila, lo que facilita localizar concentraciones de algas (Robinson, 1985).

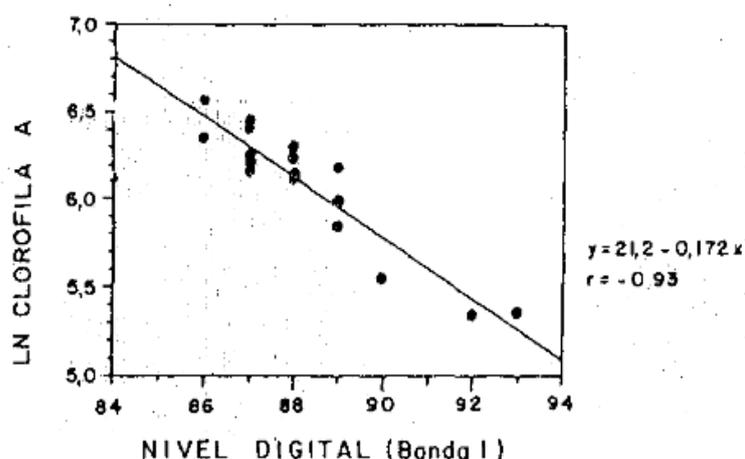


Figura 6: Relación entre contenido de clorofila en agua y valores adquiridos del sensor TM.
Fuente: (López & Caselles, 1989)

El resto de los materiales en suspensión contribuyen también a aumentar la reflectividad, además de presentar una mayor turbidez. Por último, la rugosidad de la superficie favorece la reflexión difusa, y en consecuencia una mayor reflectividad. En caso de aguas muy tranquilas la superficie se comporta de modo espectacular con valores de reflectividad muy variados en función de la localización del sensor. En el caso de las medidas tomadas con sensores espaciales, los valores resultan extremadamente bajos.

“La variabilidad del agua es mejor detectable en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), que hemos de relacionar con su profundidad, contenido de materiales de suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes), y rugosidad de la superficie”. (Chuvienco, 1995)

c) Respuesta espectral de la Nieve

La nieve por su parte, ofrece un comportamiento muy distante de agua. Presenta una reflectividad elevada de bandas visibles, reduciéndose drásticamente hacia el infrarrojo cercano, varios autores han mostrado una disminución de esta reflectividad media, cuando aumenta el diámetro de los cristales (Hall & Martinec, 1985). Otros factores destacados son el grado de compactación de la nieve y la impureza. La reflectividad es mayor para la nieve fresca que para la helada mostrando valores más bajos la nieve sucia.

“La reducción puede llegar hasta el 80% para las bandas visibles”. (Hall & Martinec, 1985)

2.4.2. Constelación Landsat

LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite) fue el primer satélite enviado por los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. Inicialmente se le llamó ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) y posteriormente los restantes recibieron el nombre de LANDSAT.

La constelación LANDSAT está formada por 7 satélites que provenían, tanto conceptual como estructuralmente, de los satélites para fines meteorológicos Nimbus. Llevaron a bordo diferentes instrumentos, siempre con la filosofía de captar mayor información de la superficie terrestre, con mayor precisión y a mayor detalle, de ahí sus mejoras radiométricas, geométricas y espaciales. (INEGI, 2010)

Tabla 1: La constelación Landsat

SATÉLITE	FECHA DE LANZAMIENTO	FIN DE OPERACIÓN
ERTS1	23/07/1972	5/01/1978
LANDSAT 2	22/01/1975	27/07/1983
LANDSAT 3	5/03/1978	7/09/1993
LANDSAT 4	16/06/1982	5/06/1983
LANDSAT 5	1/03/1984	EN OPERACIÓN
LANDSAT 6	3/10/1993	3/10/1993
LANDSAT 7	20/06/1905	EN OPERACIÓN
LANDSAT 8	11/02/2013	EN OPERACIÓN

Fuente: (INEGI, 2010)

2.4.2.1. Características de los Satélites Landsat en Operación

En la actualidad los satélites Landsat son administrados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos conocido por las siglas USGS.

a) Landsat 5

El sensor TM es un avanzado sensor de barrido Multiespectral, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS. Opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal y tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo termal. La escena terrestre registrada por este sensor es también de 185 km. (INEGI, 2010)

Tabla 2: Resoluciones del Satélite Landsat 5

ESPACIAL (m)	ESPECTRAL	RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
30	Banda 1 azul	8 Bits	16 Días
	Banda 2 Verde		
	Banda 3 Rojo		
	Banda 4 Infrarrojo Cercano 1		
	Banda 5 Infrarrojo Cercano 2		

	Banda 7 Infrarrojo Medio		
120	Banda 6 Infrarrojo térmico		

Fuente: (INEGI, 2010)

b) Landsat 8

Los productos del satélite Landsat 8 son accesibles aproximadamente 24 horas después de su adquisición sin ningún costo. Esta información es corregida en tierra y suministrada en escenas de aproximadamente 190 km de ancho y 180 km de alto, la escena está compuesta por 13 archivos: 11 archivos en GeoTIFF correspondientes a cada una de las 11 bandas registradas, un archivo con metadatos (MTL) y uno más con una evaluación de la calidad de la escena (QA). El satélite completa su órbita de 705 km de altura cada 99 minutos, y revisita un mismo punto sobre a superficie de la tierra cada 16 días con un desfase de 8 días con respecto al satélite Landsat 7, del mismo proyecto. Bajo estas condiciones el satélite adquiere cerca de 650 imágenes diariamente.

Tabla 3: Resoluciones del Satélite Landsat 8 (OLI y TIRS)

ESPACIAL (m)	ESPECTRAL	RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
30	Banda 1 Costera - Aerosoles	12 Bits	16 Días
	Banda 2 azul		
	Banda 3 Verde		
	Banda 4 Rojo		
	Banda 5 Infrarrojo Cercano (NIR)		
Banda 6 Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)			
100	Banda 10 TIR 1		
	Banda 11 TIR 2		
30	Banda 7 Infrarrojo de Ponda Corta (SWIR 2)		
15	Banda 8 Pancromático		
30	Banda 9 Cirrus		

Fuente: (INEGI, 2010)

2.4.3. Glaciares en los Andes Tropicales

Un Glaciar es una masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), y está encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; (IPCC, 2001) Los glaciares de montaña son uno de los componentes de la criósfera y son conocidos por su alta sensibilidad a los cambios climáticos a escala decenal. Dada su rapidez de respuesta a estos cambios, se los podría calificar de “centinelas del clima”. (Francou, Rabatel, Soruco, Sicart, & Silvestre, 2015)

“Los glaciares fluyen en forma relativamente lenta (desde algunos centímetros hasta algunos kilómetros por año) principalmente gobernados por la fuerza de gravedad”. (Cuffey & Paterson, 2010)

2.4.3.1. Zonificación teórica de un glaciar de montaña

Un glaciar se divide en dos zonas principales a lo largo de su perfil altimétrico; una “zona de acumulación” (donde se produce ganancia neta de masa al cabo de un año hidrológico) y una “zona de ablación” (caracterizada por la pérdida de masa al final de ese período). (Rivera, Bown, Napoleoni, Muñoz, & Vuille, 2016).



Figura 7: Esquema de Zonificación glaciar Línea de Equilibrio.

Fuente: (Rivera, Bown, Napoleoni, Muñoz, & Vuille, 2016)

Determinar la extensión de la ELA en terreno es la forma más precisa y exacta, pero es una tarea laboriosa que no siempre es factible en glaciares de grandes dimensiones (Kaser, Fountain, & Jansson, 2003). Por este motivo, el uso de imágenes satelitales (fotografías aéreas, LANDSAT, SAR, entre otros) es de gran utilidad, sobre todo cuando el límite inferior del hielo sobreimpuesto y línea de nieve es fácilmente reconocible.

Los procesos de ganancia (acumulación) o pérdida (ablación) de masa se producen tanto en superficie como a nivel intraglacial y basal. Los procesos internos y subglaciales sin embargo, tienden a ser ignorados.

En la superficie del glaciar, el proceso de acumulación incluye la nieve caída, la nieve transportada por el viento, avalanchas, y eventualmente escarcha. La Figura 8 muestra una típica zona de acumulación.

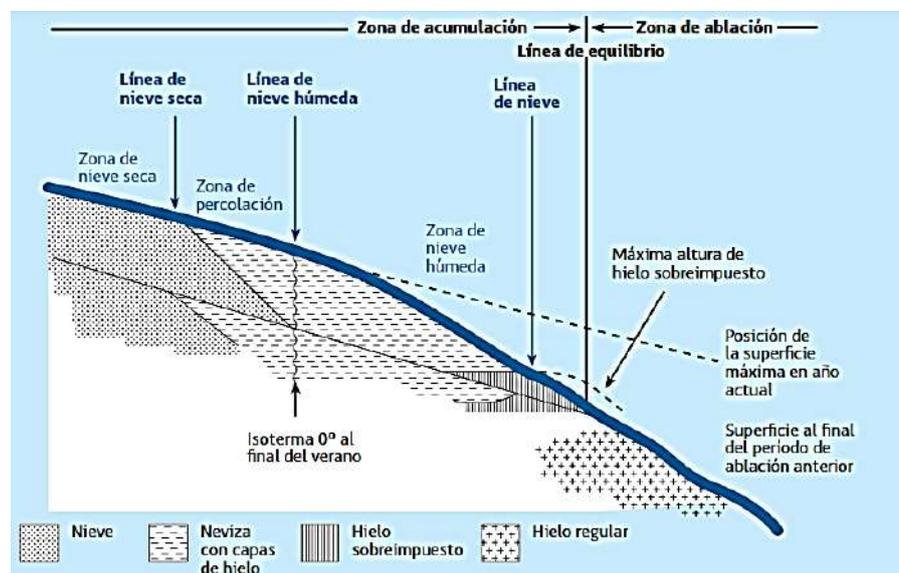


Figura 8: Esquema general de la zona de acumulación y ablación de un glaciar
Fuente: (Menzies, 1995)

Otra característica del glaciar es su desplazamiento, dice (Francou, Glaciares y Ecosistemas de Montaña, 2013)

“Cuando hay un cierto espesor de hielo, a partir de 30 o 50 metros, se produce esta dinámica de deslizamiento y deformación del hielo”.

2.4.3.2. Teledetección de los glaciares de montaña

A través del análisis multitemporal en imágenes satelitales, se puede estudiar la evolución de los glaciares y recolectar datos de gran importancia.

El inventariado de la superficie glaciada es de gran importancia por varias razones. Por una parte permite realizar una estimación de la cantidad disponible de agua sobre la superficie terrestre, y por otra, está demostrando que constituye un indicador válido de la evolución del cambio climático. (Maestro C. & Recio R., 2004).

a) Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI)

Las técnicas más usadas para el cálculo de cobertura glaciar a partir de imágenes de satélite son las clasificaciones, cocientes e índices entre bandas espectrales, técnicas que toman ventaja de la respuesta espectral del hielo y la nieve, al resaltarse las características de absorción y reflectancia propias de estos elementos en sus firmas espectrales. (Buitro A. & Fernández C., 2012).

Tanto la nieve como el hielo tienen valores de reflexión muy altos en las longitudes de onda visibles (0,40 - 0,70 m). Por otro lado, presentan valores bajos de la reflexión en el infrarrojo medio (1,55 m - 1,75 m). Esas características espectrales son las que usa el índice NDSI para detectar superficies con nieve; además estudios previos han demostrado que el *NDSI* varía de -1 a 1, y provee una efectiva forma de permitir la diferenciación entre el término del glaciar y las morrenas. (Silverio & Jaquet, 2005)

“Este índice se calcula como la diferencia normalizada entre la banda del verde y la banda del SWIR”. (Hall et al, 1995)

citado por Pineda et al, 2005). En el caso del Thematic Mapper de Landsat (TM) el NDSI se calcula usando las bandas 2 y 5.

Ecuación 1: Índice de nieve de diferencia normalizada

$$NDSI = \frac{B2 - B5}{B2 + B5}$$

B2= Verde, B5= SWIR (1)

Fuente: (Escuer, 2007)

“Para determinar si más de la mitad de un píxel está cubierto por nieve o hielo, Hall et al (1995) (citado por Pineda et al, 2005) propusieron un umbral de NDSI de 0,40”.

2.4.4. Bofedales

Unidad de vegetación que ocupan los suelos, permanentemente húmedos cumpliendo un papel muy importante para el pastoreo del ganado, además de tener una gran importancia en la conservación de agua para épocas de sequía y entre sus áreas alberga una gran cantidad de flora y fauna. (SERNANP - RPNYC)

Los bofedales son alimentados de diferentes fuentes como manantiales, agua de deshielo, ríos y lluvia. Están ubicados y distribuidos en forma dispersa en las ecorregiones Altiplano y Altoandino. (Alzérreca, Prieto, Cardozo , & Céspedes, 2001)

Los humedales altoandinos son considerados por la (Convención de Ramsar, 2010) como ecosistemas frágiles asociados al calentamiento global, cambio climático, las sequías prolongadas y a la intervención humana reconociendo a estos humedales como ecosistemas estratégicos debido a que regulan y son fuentes de agua para diversas actividades. (Maestro C. & Recio R., 2004)

2.4.4.1. Características de los Bofedales

Los bofedales están relacionados a los manantiales por encontrarse en zonas de descarga de aguas subterráneas por ello ningún bofedal infiltra la las aguas subterráneas y en los bofedales la descarga se da como

evapotranspiración, es decir, las plantas absorben aguas subterráneas y la transpiran a través de sus estomas, descargando el agua como vapor de transpiración y en los manantiales se descargan como flujo de agua superficial pero también existe una descarga de aguas subterráneas como flujo base que aumentan el flujo en los cursos de agua. (Montoya S. , 2016)

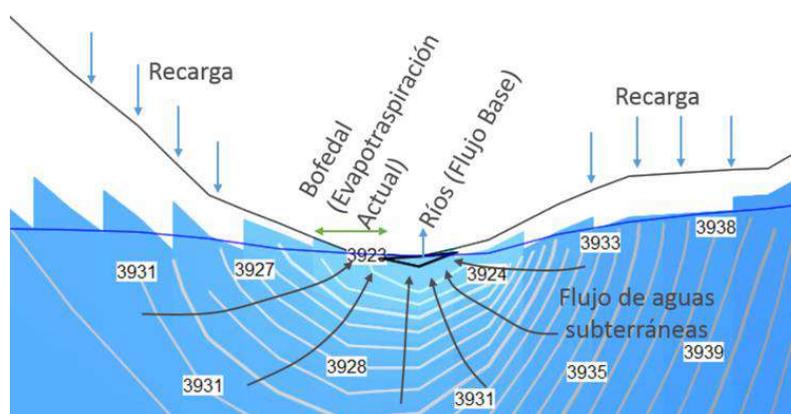


Figura 9: Modelo numérico de un bofedal y descarga de flujo base para una cuenca andina
Fuente: (Montoya S. , 2016)

Al principio de la época seca (Mayo) los bofedales están en su máxima extensión porque el reservorio de aguas subterráneas está lleno luego de la época de lluvias. A medida que transcurre la época seca el reservorio de aguas subterráneas va disminuyendo, los niveles de la napa freática también disminuyen y por ende, la extensión de los bofedales. Los bofedales se encuentran en su mínima extensión en el mes de Octubre, para luego ser vegetados de nuevo por la época de lluvias a partir de Noviembre. (Montoya S. , 2016)

En base de investigación realizada por (GIDAHATARI, 2016), los bofedales grandes asociados con manantiales de más de 1 l/s en cuencas andinas tienen al bicarbonato como

ión principal y en bofedales más pequeños con flujos menores a 0.1 l/s tienen al cloruro como ión principal. Esperamos este comportamiento en el 90% de los bofedales. (Montoya S. , 2016)

2.4.4.2. Teledetección de los bofedales

Para estudiar la cobertura vegetal de una zona mediante imágenes de satélites, se han desarrollado diversas técnicas que permiten tener datos cualitativos y cuantitativos del estado de la vegetación.

Los bofedales se identifican por estar ubicados en un rango de pendiente, tener una cantidad de biomasa (índice de vegetación) y encontrarse a una altitud específica. Estos criterios mencionados nos van a permitir identificar los bofedales mediante el uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG).

a) Índices de Vegetación basado en la pendiente

Estos índices se fundamentan en el fuerte contraste existente entre la reflectancia expresada en rango de valores de menor a mayor.

En las plantas con actividad fotosintética, las moléculas de clorofila responsables de esta función absorben la luz roja, por lo tanto reflejan elementos como nubes, nieve, agua, zonas de suelo sin cobertura y rocas, mientras que las células de las hojas en un estado de turgencia normal reflejan la mayor parte de la radiación infrarroja que reciben (Yager, Resnikowski, & Halloy, 2008).

El NDVI y el TTVI son variables que permiten observar la presencia de vegetación y evaluar el estado de desarrollo de la misma mediante la observación con sensores remotos de la intensidad de radiación reflejada o emitida por esta misma en ciertas bandas del espectro electromagnético. Estos índices han sido y son ampliamente utilizados.

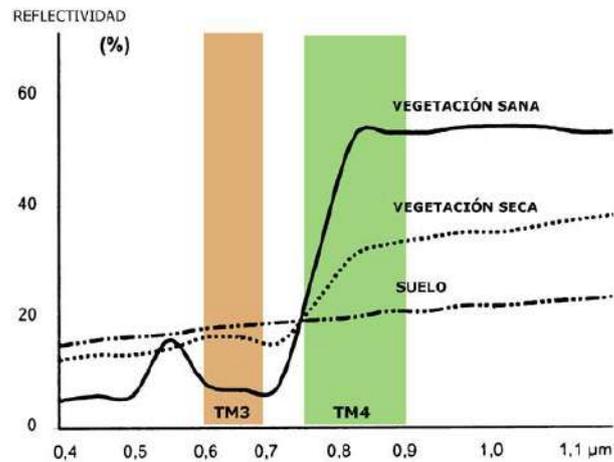


Figura 10: Reflectividad espectral en la vegetación
Fuente: (Rodríguez, 2005)

El NDVI se formula mediante la siguiente expresión:

Ecuación 2: Índice de vegetación de diferencia normalizada

$$NDVI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}$$

B3= Rojo, B4= Infrarrojo Cercano (2)

Fuente: (Escuer, 2007)

El NDVI se relaciona entre otros parámetros con la productividad neta de la vegetación, el contenido en clorofila de la hoja, el LAI, contenido en agua de la hoja, etc. El intervalo de valores obtenido del NDVI, varía entre (-1) y el (+1) de ellos, sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación, sin embargo el rango común para vegetación verde es de 0,2 a 0,8. (Escuer, 2007)

El Índice de Vegetación Transformada de Thiam (TTVI) es un índice derivado del NDVI también basado en la pendiente de acuerdo con (Thiam, 1997) esta ecuación podría sobrestimar el verdor de la vegetación que simplemente toma la raíz cuadrada del valor absoluto del NDVI + 0.5.

Ecuación 3: Índice de Vegetación Transformada de Thiam

$$TTVI: \sqrt{ABS(NDVI + 0.5)}$$

Fuente: (Thiam, 1997)

Tabla 4: Valores de los Índices de vegetación basados en la pendiente

Índice de Vegetación	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio
Ratio	0	1E36	
NDVI	-1	+1	0.0168
TVI	-1	1.2247	0.7173
CTVI	-0.7071	1.2247	0.7173
TTVI	0	1.2247	0.7174
RVI	0	50	0.8377
NRVI	-1	0.9608	-0.1547

Fuente: (Marais, 2006)

b) Pendiente y Altitud de los bofedales

Los bofedales se distribuyen en la región altoandina a partir de los 3800 msnm, principalmente en las zonas sur y central del país y ocupan una superficie de 544 562 Ha que representa el 0.42 % del total nacional. (MINAM, 2015) Estos bofedales se ubican cerca de fuentes de agua y se encuentran bastantes asociadas geográficamente a niveles altitudinales y rangos de inclinación donde un exhaustivo mapeo de campo con la ayuda de imágenes de satélite permitirá identificarlas y diferenciarlas. El rango de pendiente en el que se encuentran los bofedales es de 0 a 10 grados según (Garcia, Willems, & Espinoza, 2015).



Fotografía 1: Bofedales ubicados en el Glaciar Rajuntay ubicados a una altitud de 4700 m.s.n.m.

Fuente: (INAIGEM, 2016)

Este humedal altoandino se encuentra ubicado en los fondos de valle fluvio-glacial, conos volcánicos, planicies lacustres, piedemonte y terrazas fluviales. Se alimentan del agua proveniente del deshielo de los glaciares, del afloramiento de agua subterránea (puquial) y de la precipitación pluvial. (MINAM, 2015)

2.4.5. El Ciclo Hídrico en Cuencas Andinas y Ecosistemas de Montaña

En la época de lluvias las zonas de acumulación del glaciar se incrementan por las precipitaciones nivales y en la época seca en las zonas de ablación se presencia la pérdida de glaciares debido a la escaza precipitación y al aumento de temperatura.

2.4.5.1. Épocas en el Ciclo Hídrico en Cuencas Andinas

En las cuencas andinas se tienen dos estaciones marcadas y son: época seca y de lluvias, aparte de periodos de transición denominados época de humedad por ello las actividades de agricultura en estas zonas se realizan en la época húmeda y en la época de lluvias, mientras que en la época seca la vegetación natural disminuye hasta concentrarse solo en bofedales. (GIDAHATARI, 2016)

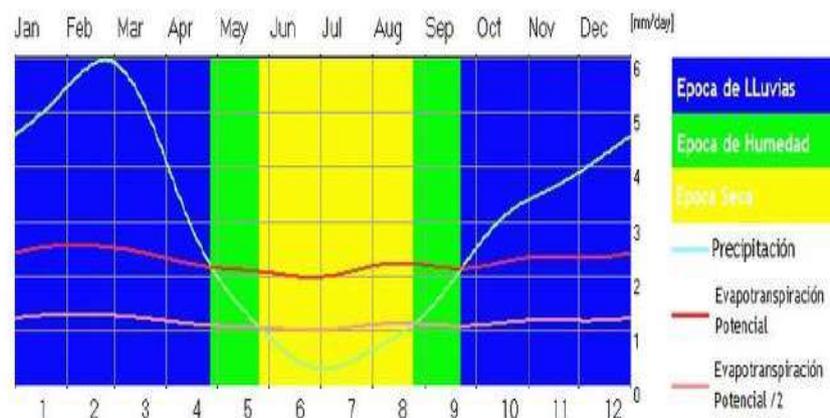


Figura 11: Ciclo de la Vegetación para una cuenca
Fuente: (GIDAHATARI, 2016)

En una cuenca andina durante la época de lluvias no existen restricciones debido a las grandes cantidades de agua

aportadas por la precipitación y el flujo en el río. En la época de humedad todavía hay eventos importantes de precipitación por lo que el río posee descargas intermitentes; en la época seca toda la descarga proviene del almacenamiento de aguas subterráneas ya que los eventos de precipitación son escasos y no llegan a saturar el suelo., (GIDAHATARI, 2016)

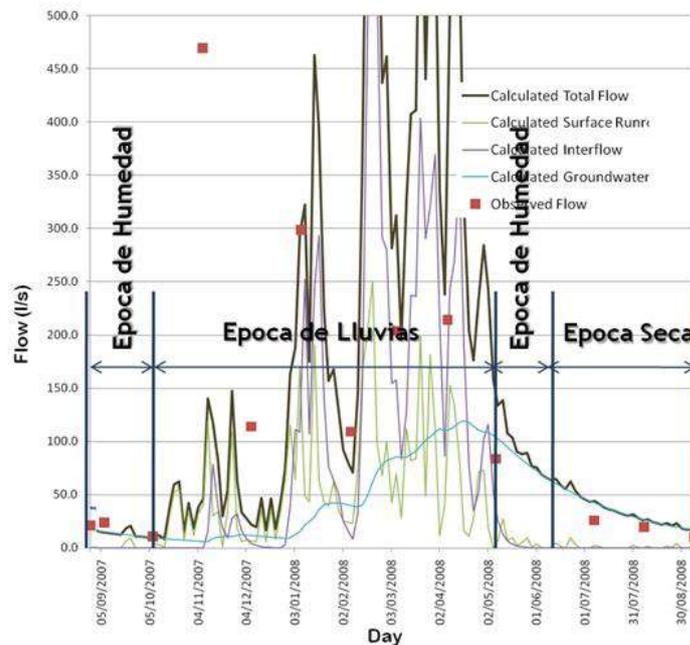


Figura 12: Distribución del Flujo en un Río en Escorrentía Superficial, Interflujo y Flujo Base.
Fuente: (GIDAHATARI, 2016)

a) Ocurrencia de Recarga

La recarga y el escurrimiento está gobernado por la periodicidad y la intensidad de eventos de precipitación y por el tipo de suelo generando flujo superficial, interflujo y flujos subterráneos.

b) Ciclo Hidrológico

Es el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso) como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.).

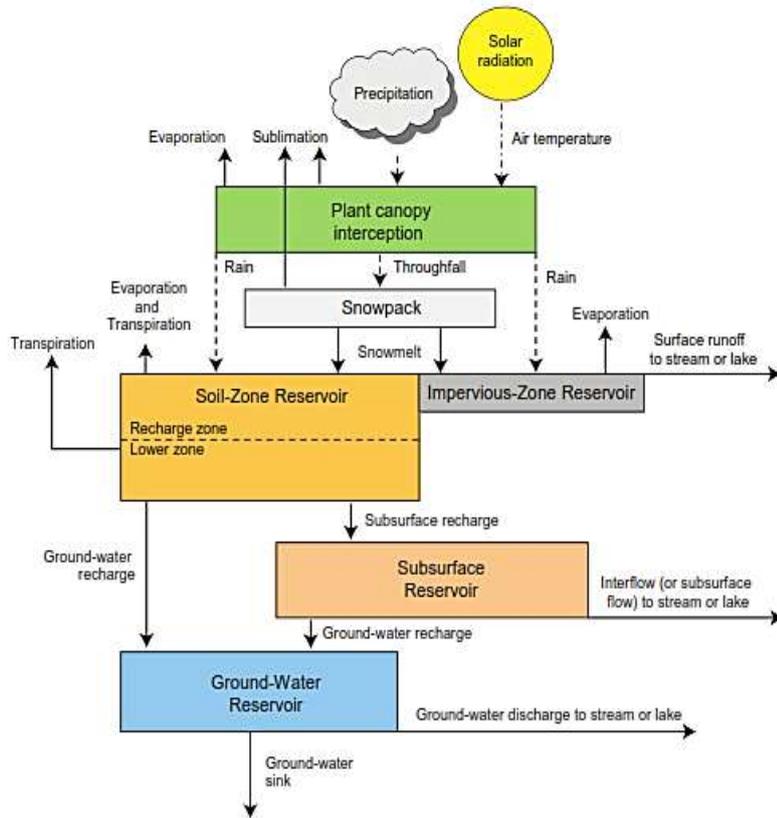


Figura 13: Diagrama esquemático de una cuenca y sus entradas climáticas (precipitación, temperatura del aire y radiación solar) simulado por PRMS (modificado de Leavesley y otros, 1983).
Fuente: (USGS, 2005)

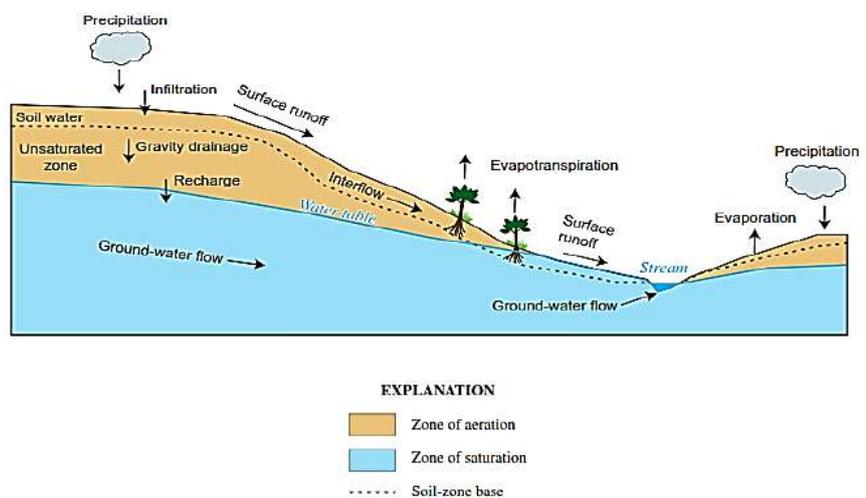


Figura 14: Distribución, flujo e interacción del agua en la tierra y en el subsuelo.
Fuente: (USGS, 2005)

2.4.5.2. Correlación observada entre glaciares y factores climáticos.

Investigaciones recientes, cercioran que el retroceso glaciar tiene una relación directa con el incremento de la temperatura, además que el retroceso glaciar está asociado a una disminución significativa de las precipitaciones. (Arroyo A., 2015)

Los glaciares del mundo acumulan más del 75 por ciento del agua dulce de la Tierra y forman parte del ciclo hidrológico. Además actúan como reservas de agua que retienen parte de las precipitaciones donde el agua líquida de los glaciares puede provenir de dos fuentes: de la fusión de nieve o hielo o directamente de lluvia es por ellos que el sistema hidrológico interno de un glaciar es complejo variando de lugares de percolación (paso lento de fluidos a través de materiales porosos) a sistemas de túneles, grietas y cuevas. (FUNDACIÓN AQUAE, 2015)

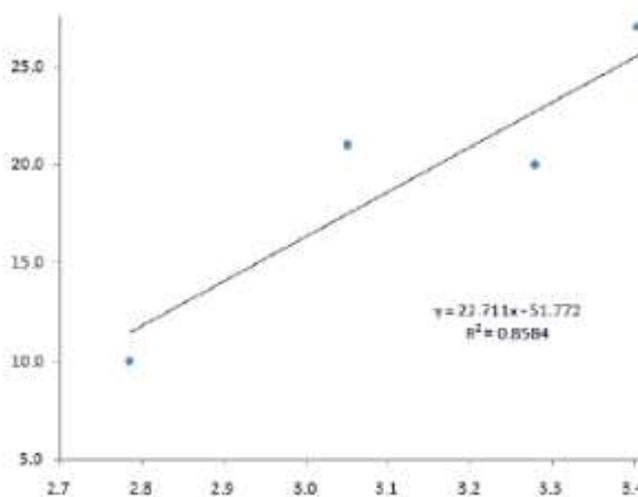


Figura 15: Correlación observada el retroceso glaciar y el aumento de temperatura
Fuente: (Arroyo A., 2015)

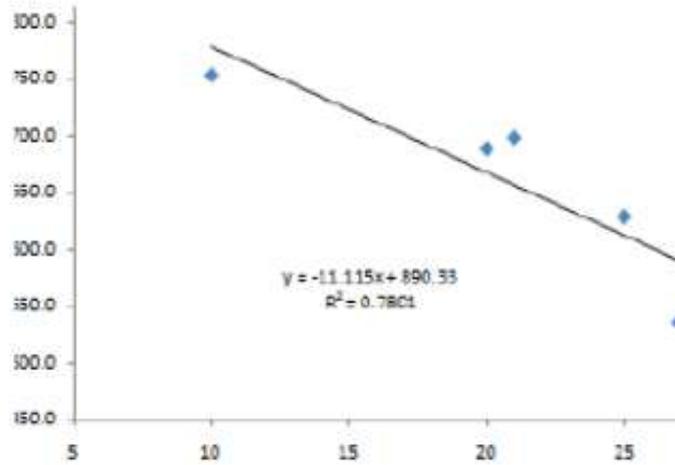


Figura 16: Correlación observada el retroceso glaciar y la disminución de las precipitaciones.
Fuente: (Arroyo A., 2015)

CAPÍTULO III

3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1. Metodología

3.1.1. Localización del área de estudio

3.1.1.1. Ubicación

La cuenca Callancocha hidrográficamente se ubica en la Cuenca del Mantaro dentro de la cordillera Chonta entre las coordenadas geográficas 12°37'40" Sur y 75°28'20" Oeste y políticamente dentro del distrito de Acobambilla, provincia y departamento de Huancavelica. **(Mapa 1)**

Tabla 5: Jerarquización de unidades hidrográficas según la codificación Pfafstetter

NIVEL	CODIFICACIÓN	NOMBRE DE UNIDAD HIDROGRÁFICA
Nivel 1	4	Región Hidrográfica del Amazonas
Nivel 2	49	Cuenca Alto Amazonas
Nivel 3	4999	Cuenca Ucayali
Nivel 4	4996	Cuenca Mantaro
Nivel 5	49966	Cuenca Vilca
Nivel 6	499668	Cuenca Callancocha

Fuente: (INAIGEM, 2016)

3.1.1.2. Clima

Frígido (3518 – 3900 m.s.n.m.): El clima es frío y seco, la temperatura mínima promedio es de -8 °C durante las épocas de helada (junio - agosto) y máximas promedio de 18 °C los meses de (setiembre - enero); siendo una temperatura medio anual de 9 °C.

Muy Frígido (4100 – 4587 m.s.n.m.): El frío es muy riguroso donde las masas de agua se congelan formando películas de hielo, la media anual es de 3 °C, y el mínimo promedio es de -10 °C entre los meses de (setiembre - abril).

Excesivamente Frígido (4587 a más m.s.n.m.): El clima es un frío glacial y la vegetación muy escasa.

3.1.1.3. Geología

En la cuenca afloran rocas sedimentarias compuestas por calizas marmolizadas y areniscas intercaladas con estratos menores de lutitas y hacia la cima del glaciar y al frente de la laguna Acchicocha, sobre la otra margen afloran cuerpos volcánicos compuesto por andesitas y dacitas, agrupadas en unidades de derrames y piroclásticos que alternan con series sedimentario piroclásticas (**Mapa 6**). (INAIGEM, 2016)



Fotografía 2: Secuencia de calizas marmolizadas con orientación dominante NO-SE.
Fuente: (INAIGEM, 2016)



Fotografía 3: Altiplanicies cubiertas de pajonales en el entorno del C. P. de San José de Puituco y próximo al glaciar Condoray.

Fuente: (INAIGEM, 2016)



Fotografía 4: Sistema de colinas altas y montañas bajas, dominantes en los alrededores de la laguna Acchicocha.

Fuente: (INAIGEM, 2016)

3.1.1.4. Glaciología

Según el (INAIGEM, 2016) la cordillera Chonta se localiza en las coordenadas geográficas de $12^{\circ}36'36''$ a $13^{\circ}11'24''$ latitud Sur y $75^{\circ}30'0''$ - $74^{\circ}58'48''$ longitud Oeste, tiene una longitud aproximada de 92 km. En la dirección de Noroeste a Sureste. El área del glaciar Condoray al 2009 fue de 1.44 km^2 con una pérdida del 92% según el área glaciar base de 1970 (17.9 km) (UGRH, 2014). Al 2016 se estimó un área de 0.4 km^2 , el cual indica un pérdida del 98% entre 1970 y 2016.

3.1.1.5. Recursos Hídricos

En la parte alta y media de la margen derecha se localiza el glaciar Condoray, dentro de la cuenca se ubica la laguna Acchicocha con un área de 3.75 km², la laguna Canllacocha con un área de 1.33 km², la laguna Pulococha con un área de 0.08 km² y otras pequeñas lagunas en formación como parte del retroceso de los glaciares. **(Mapa 1)**

3.1.1.6. Ecosistemas de montaña

El pajonal y césped de puna cubren el 82 % de la cuenca y es aprovechado para las actividades de pastoreo.

Se presentan bofedales cuando la inundación es permanente o pajonales húmedos cuando la inundación es estacional o reciente y en el área próxima al glaciar Condoray se presenta la zona alto andina con escasa o sin vegetación.

Tabla 6: Formaciones Vegetales

MACROGRUPO	ECOSISTEMA	LOCACIÓN	CARACTERÍSTICA
Puna alto andina húmeda	Pajonal de puna o alto andino	Formación predominante alrededor de la Cordillera Chonta	Pajonales muy pobres en nutrientes
Humedales	Bofedales	Alrededor de la laguna Acchicocha, mal drenados, saturados de agua	Los bofedales tienen un elevado nivel nutritivo
	Lagunas / Cochas	Alrededor de la cordillera Chonta	Reservorios de agua
Zona alto andina con escasa o sin vegetación	Zona alto andina con escasa vegetación o sin vegetación	Alrededor del glaciar Condoray	Escasa o sin vegetación con abundante material morrénico

Fuente: (INAIGEM, 2016)

Bofedales

Dentro de la cuenca Callancocha este tipo de vegetación se sitúa en lugares de mal drenaje que se encuentran saturados de agua,

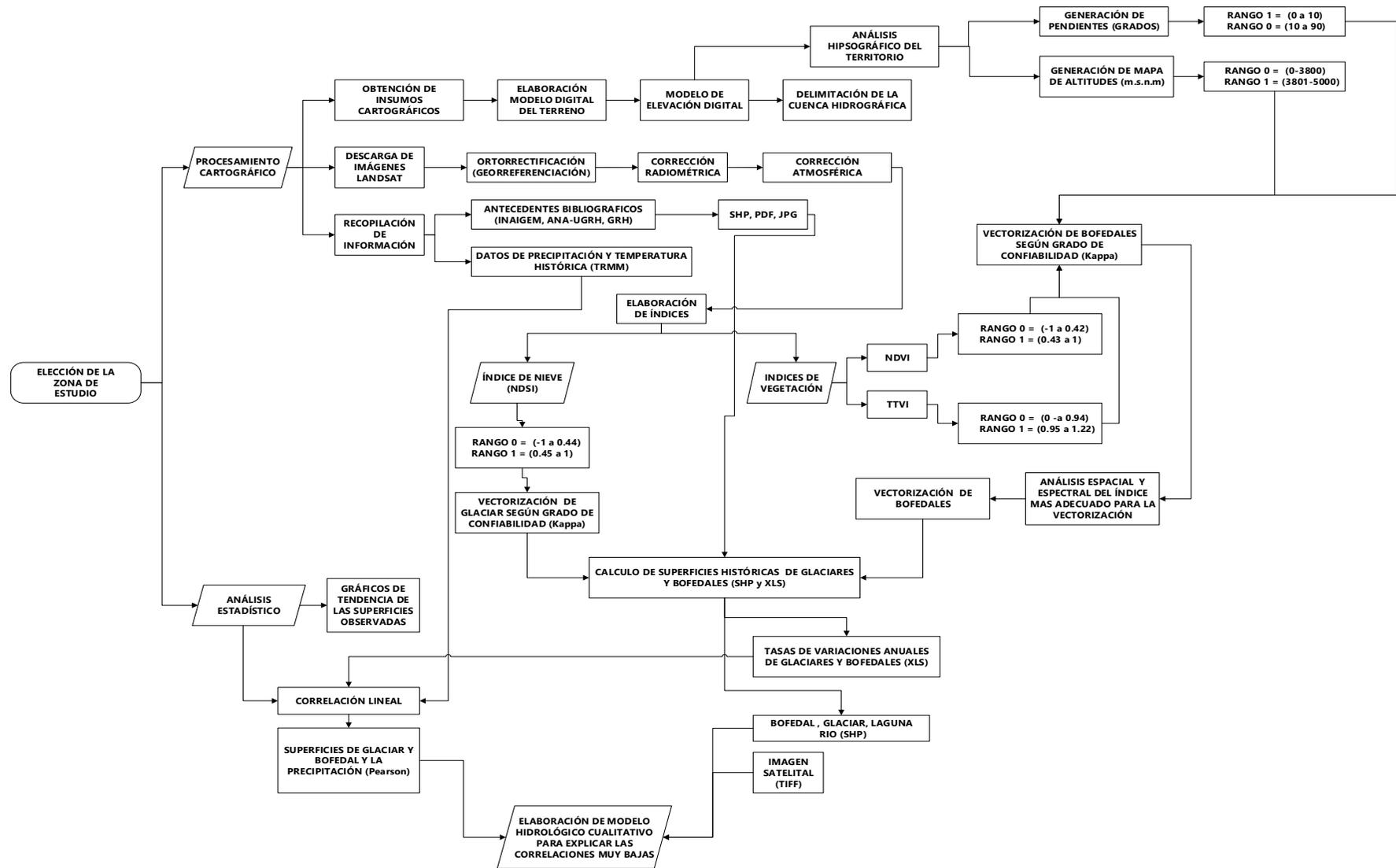
sin embargo, hay que tener en cuenta que los pastos presentes en los bofedales tienen un muy elevado nivel nutritivo en contraste con los pastos del pajonal que son muy pobres en nutrientes.

Tabla 7: Humedales en la Cordillera Chonta

ECOSISTEMA	LUGAR
Bofedales	Alrededor de la laguna Acchicocha, mal drenados, saturados
Lagunas / Cochas	Laguna Acchicocha
	Laguna Huarmicocha
	Laguna Yurajcocha
	Laguna Huisquicocha

Fuente: (INAIGEM, 2016)

Figura 17: Enfoque metodológico General



3.1.2. Análisis de la revisión bibliográfica

Como primera acción a realizar en la investigación fue el de identificar las posibles fuentes de información secundaria relacionados al tema de investigación para tener una idea clara del tema de investigación.

En vista que no existe información histórica del área de estudio se realizó las coordinaciones necesarias para mantener una comunicación con el Instituto Nacional de Investigación en Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), El Proyecto BIO-THAW, Instituto de la Montaña Sede Huaraz, Gobierno Regional de Huancavelica – Sub Gerencia de Recursos Naturales y Áreas Protegidas y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)

Una vez concluida la revisión bibliográfica se identificó los materiales y herramientas a utilizar durante el desarrollo de la presente investigación, de la misma manera se conoció que en el Perú se realizaron inventarios de los glaciares y estudios de cobertura vegetal a nivel nacional realizado por el MINAM en el 2012 utilizando imágenes satelitales.

Este trabajo pretendió de una u otra forma establecer las primeras líneas respecto a cuál podría ser el grado de relación de la precipitación hacia los glaciares y bofedales en un contexto de cambio climático.

3.1.3. Imágenes utilizadas y criterios de selección de imágenes

Para el estudio se requirió contar con información histórica desde el 1988 hasta el 2017 y las plataformas Landsat son las únicas que proporcionan información durante un periodo histórico largo, por esta razón la fuente de información para el análisis de las variables son las imágenes Landsat 5 y 8, de la misma manera se descargó la información de precipitación del satélite TRMM para analizar el grado de relación que existe entre la precipitación y las variables

en estudio.

3.1.4. Procesamiento de las imágenes

a) Pre-Procesamiento digital de las imágenes en ENVI 5.1.

Todas las imágenes se corrigieron y procesaron digitalmente con el mismo procedimiento que se detallan en el Anexo 2.

Con el fin de reducir distorsiones geométricas provocadas por la curvatura de la tierra, ángulo de inclinación del sensor, entre otros, se realizó la corrección geométrica de las imágenes Landsat. Para ello, se estandarizaron las proyecciones geográficas para el caso de las imágenes provenientes del INPE.

Georreferenciación

Imagen a imagen

Se utilizaron datos colectados con los GPS para determinar los puntos de control terrestre que fueron usados para la corrección de la imagen, por lo general este tipo de corrección se aplica a imágenes de alta resolución y que cubren un espacio relativamente pequeño.

Calibración de las imágenes

Las imágenes LANDSAT fueron convertidos de valores ND a valores de radiancia usando las siguientes ecuaciones (Markhan y Barker, 1986).

Ecuación 4: Ecuaciones de Calibración

$$ND = \left(\frac{ND_{max}}{L_{max} - L_{min}} \right) * (L - L_{min})$$

$$L = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{ND_{max}} \right) * ND + L_{min}$$

Donde L es la radiancia en W/m².sr.µm, ND es el número digital para cada pixel de la imagen, L_{max} y L_{min} son las radiancias máxima y mínima (constantes de calibración), ND_{max} es el número

digital máximo de la imagen. Los valores de ganancia y compensación.

Corrección atmosférica

Para la corrección atmosférica de las imágenes se usó el módulo FLAASH que toma como base una ecuación estándar para la radiancia espectral en un pixel en el sensor, L , aplicado para el rango de longitud de onda solar, en materiales lambertianas o equivalentes (Matthew et al., 2000).

Ecuación 5: Corrección Geométrica y atmosférica

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a$$

Para determinar los índices se realizó una conversión de los valores de los pixeles mediante la siguiente fórmula.

Ecuación 6: Fórmula para reducir a valores de 1 y -1

$$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 > 0 \text{ and } b1 \leq 10000) * \text{float}(b1)/10000$$

3.1.5. Determinación de coberturas

Para determinar las coberturas de glaciares se empleó el Índice de Nieve (NDSI) utilizando las bandas del Verde y el Infrarrojo Medio y se consideró valores a partir de 0.45, la metodología desarrollada para la identificación y delimitación de estas superficies se detalla en el Anexo 3.

La metodología desarrollada para la identificación y delimitación de bofedales se detalla en el Anexo 4.

Antes de determinar el rango adecuado del índice de vegetación se realizó un muestreo de puntos y se validó mediante el índice de Kappa donde se consideró los valores más altos del pixel a partir de 0.4 hasta 0.89 en el caso del NDVI y 0.95 hasta 1.22 en el caso del TTVI y como resultados de este análisis el TTVI presento mayor precisión para determinar los bofedales.

Para identificar y delimitar los bofedales se consideró las variables

que influyen en la distribución de los bofedales determinando rangos para cada uno de estas variables (pendiente, altitud y TTVI) Con el software Arc GIS primero se creó el DEM utilizando curvas de nivel seguidamente se hizo el mapa de pendientes para luego reclasificarlos en dos rangos en donde se pueda discriminar fácilmente la información que no cumple con las características de los factores que influyen en la distribución de estos bofedales, todas estas capas se tuvo que trabajar en formato raster en vista que el **NDVI** y **TTVI** se encuentran en formato raster.

Para la reclasificación se determinó el valor de 1 a todos los valores que cumplen con el criterio de identificación de bofedales y valor de 0 a los valores que no cumplan con los criterios establecidos esto con la finalidad de discriminar fácilmente aquellos valores que no se adapten al objetivo del estudio al momento de realizar la superposición de capas. Terminado este proceso se pasó a convertir de raster a polígono para determinar la superficie de cada bofedal, el número de bofedales identificados y discriminar aquellos bofedales que no fueron delimitados correctamente para ello se determinó como superficie mínima para los bofedales un valor de 0.8 Ha.

3.1.6. Análisis de las superficies Históricas

Se realizaron tablas y gráficos con los valores de los índices de vegetación (NDVI – TTVI) y glaciares (NDSI) con la finalidad de ver el comportamiento dinámico de estas superficies para el periodo de estudio.

Se realizaron tablas y gráficos con los valores de las superficies de bofedales y glaciares con la finalidad de ver el comportamiento dinámico de estas superficies para el periodo de estudio.

3.1.7. Análisis de la Variación

a) Cálculo anual de Variación (%)

Para conocer la magnitud y velocidad de la desglaciación se aplicó la relación de tasa de variación propuesta por la FAO (Puyravaud,

2002) relación matemática expresado en porcentaje de la masa glaciaria inicial y variables climáticas iniciales.

Ecuación 7: Cálculo anual de Variación (%)

$$TV = [(S2/S1)^{1/n} - 1] * 100$$

Dónde:

S1: Valor en la fecha 1 (Km2, mm, °C, HS, m3/seg.)

S2: Valor en la fecha 2 (Km2, mm, °C, HS, m3/seg.)

n = Diferencia de años entre la fecha 1 y 2

Tv= Tasa de variación (%)

b) Cálculo anual de Variación (Ha/año)

Para conocer la variación de cada variable de estudio en el tiempo se aplicó la relación propuesta por (Castellanos et al, 2011).

Ecuación 8. Cálculo anual de Variación (Ha/año)

$$Var. Anual = Var. Total / i$$

$$Var. Total (Ha) = V(\text{Área año1} - \text{Área año 2})$$

Dónde:

Var. Anual: Variación anual (unidad/año.)

Var. Total: Variación total (unidad)

i= intervalo de años

3.1.8. Análisis de Regresiones entre variables

Se realizó el análisis de correlación entre la superficie de bofedales y la precipitación acumulada en 90 días de los meses de Junio, Julio y Agosto por ser meses de la época seca.

Se realizó el análisis de correlación entre la superficie de los glaciares y la precipitación acumulada desde el año hidrológico.

Se realizó el análisis de correlación entre las variables de estudio.

3.1.9. Proyección de escenarios futuros (Glaciar)

Se utilizó la siguiente fórmula para poder inferir cual será el retroceso glaciario para el año 2021 para lo cual se realizará una serie de cálculos que permitirán efectuar una aproximación de la cantidad de superficie glaciaria que se perderá. La fórmula fue utilizada por (Alva & Meléndez, 2009).

$$P_x = P_0 + \frac{P_1 - P_0}{n} * t$$

Donde:

P_x = cantidad de hectáreas que se quieren conocer en el año x

P_0 = cantidad de hectáreas para el primer año

P_1 = cantidad de hectáreas para el último año

n = número de años entre P_1 y P_0

t = número de años entre el primer año y el año que se quiere conocer (es decir P_1 y P_0)

3.1.10. Modelo Hidrológico Cualitativo

El modelo hidrológico se realizó teniendo en cuenta los fundamentos teóricos de la (USGS, 2005) considerando a las superficies encontradas en el área de estudio (bofedales, glaciares, lagunas, ríos-quebradas). También se consideró la representación cualitativa del ciclo hídrico planteado por (Villon B., 2002)

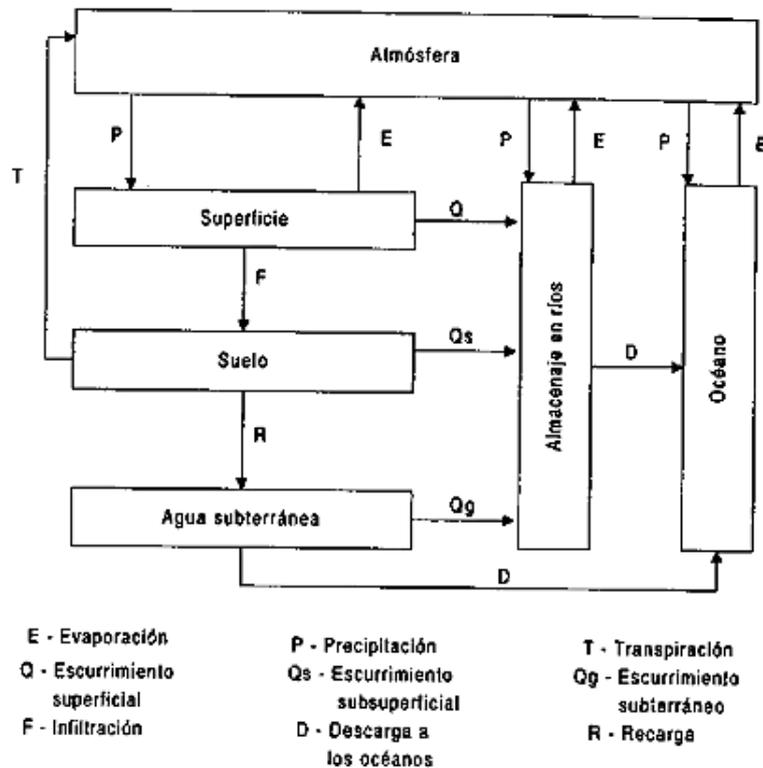


Figura 18: Ciclo Hídrico de una cuenca

Fuente: (Villon B., 2002)

3.1.11. Interpretación de Resultados

Para la interpretación de resultados se consideró las bibliografías encontradas referentes al tema de investigación con la finalidad de justificar los resultados obtenidos en los siguientes análisis:

- Análisis de las superficies de glaciares y bofedales y su relación con la precipitación.
- Análisis de la tasa de variación de los glaciares y bofedales.
- Análisis de la tendencia histórica de las variables estudiadas en un periodo 1988 – 2017.
- Análisis de las proyecciones de escenarios futuros.
- Análisis del balance hídrico cualitativo de un bofedal.

3.1.12. Tipo de la investigación

Es Aplicada debido al uso de los distintos conocimientos de los Sistemas de Información Geográficas (SIG) y el Sensoramiento Remoto (ENVI), en ambientes naturales (de campo) y se basa en estudios ya realizados en diferentes lugares del mundo tal como se describe en los antecedentes.

3.1.13. Nivel de la investigación

Descriptivo y correlacional

Descriptivo: Se describió los datos y características de bofedales y glaciares en el periodo de estudio.

Correlacional: Se determinó el grado de relación existente entre los glaciares y bofedales con la precipitación.

3.2. Diseño de la investigación

Longitudinal de tendencia; porque se tomó como muestra de estudio lo mismo que fue evaluado en 29 años.

$$M \begin{matrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 \\ O_1 & O_2 & O_3 & O_4 \end{matrix}$$

Fuente: (Oseda . G., 2015)

T = Momentos Observados
O = Observaciones Realizadas
M= Muestra de Estudio

3.3. Hipótesis de la investigación

3.3.1. Hipótesis general

Los glaciares y bofedales tienen una tasa de variación mayor al 0.52 %/año debido a la precipitación en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.

3.3.2. Hipótesis específicas

- a) La superficie de glaciares presenta una disminución del 65% de lo existente en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.
- b) El índice de desglaciación del Glaciar Condoray es mayor al 2% anual en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.
- c) Las superficies de bofedales presenta una significativa disminución superando el 25% de lo existente en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.
- d) El índice de evolución de los bofedales tiene un incremento de 1.6 % anual en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.
- e) La relación entre la precipitación acumulada en 90 días (JJA) y la superficie de bofedales es de 0.88 lo que indica que es una relación positiva muy alta en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.
- f) La relación que existe entre la precipitación acumulada durante el año hidrológico y la superficie de glaciares es de -0.69 lo que indica que es una relación moderada negativa en la Cuenca Callancocha en el Departamento de Huancavelica de 1988 al 2017.

3.4. Variables

3.4.1. Variable dependiente

Glaciares

Dimensiones:

- Superficie glaciario
- Índice de desglaciación

Bofedales

Dimensiones:

- Superficie de bofedales
- Índice de evolución de cobertura de los bofedales

3.4.2. Variable independiente

- Precipitación

Dimensiones:

- Precipitación Acumulada durante el año hidrológico
- Precipitación Acumulada durante la época seca

3.5. Cobertura del Estudio

3.5.1. Universo

Los glaciares y bofedales de las cordilleras: Blanca, Huallanca, Huayhuash, Raura, Huagoruncho, La Viuda, Central, Huaytapallana, Chonta, Urubamba, Vilcabamba, La Raya, Vilcanota, Carabaya, Apolobamba y Volcánica. Que se encuentran en el Perú.

3.5.2. Población

La población está constituida por la cantidad de glaciario existente en la Cuenca del río Mantaro de cada año, en el periodo 1988 – 2017.

La población está constituida por la cantidad bofedales existente en la cuenca del río Mantaro de cada año, en el periodo 1988 – 2017.

3.5.3. Muestra y Muestreo

- Cálculo del número de puntos que deben ser visitados para determinar el grado de confiabilidad desconociendo el tamaño de la población.

$$n = \frac{Z_a^2 \times p \times q}{d^2}$$

En donde:

Z = Nivel de confianza

p = Probabilidad de éxito o proporción esperada.

q = Probabilidad de fracaso

d = Precisión (error máximo admisible en términos de proporción)

Para la determinación de valores como d, p y q se consideró la extensión del área de estudio en el cual es aceptable trabajar con un rango de error (1 – 10%) cuando el área de estudio es mayor a 1000 Ha.

Tabla 8: Determinación del número de puntos

Área	d(%)	p(%)	q(%)	Z	n
>1000 ha	6	5	95	1.960	51

Fuente: Elaboración propia

Se consideró 51 puntos que deben ser visitados en campo, para ello se realizó un muestreo dirigido el cual me permitió seleccionar un bofedal piloto con la finalidad de conocer los valores de TTVI (dentro, fuera y en los límites del bofedal) con la finalidad de delimitar con mayor precisión los bofedales tal como lo menciona (UTEC, 2010) el muestreo dirigido bien manejado puede ser de mucha utilidad para los estudios pilotos o sondeos y su confiabilidad de sus resultados muestrales depende en gran medida de la cantidad de conocimientos o del juicio del investigador. (Batista, Delfin, Delgado, & Palacio, 2015)

Los bofedales se identificaron fácilmente en las imágenes satelitales, representando una aproximación inicial en la identificación y delimitación de coberturas vegetales (bofedales).

- Para determinar la fiabilidad de los datos que se procesó con las imágenes satelitales y la visita de campo se realizó una matriz de confusión para determinar el índice de Kappa.

Tabla 9: Matriz de confusión para el TTVI

INDICE DE VEGETACIÓN (TTVI)			
GABINETE/CAMPO	SI	NO	TOTAL
SI	17	3	20
NO	5	26	31
TOTAL	22	31	51

Fuente: Elaboración propia

$$P_o = 0.84$$

$$P_e = 0.51$$

$$IK = 0.68$$

Para la presente investigación el valor de 0.947 del TTVI fue representativo para la identificación de los bofedales por tener un índice de Kappa de 0.68 el cual significó una fuerza de concordancia considerable según (Landis & Koch, 1977).

Tabla 10: Matriz de confusión para el NDVI

INDICE DE VEGETACIÓN (NDVI)			
GABINETE/CAMPO	SI	NO	TOTAL
SI	14	4	18
NO	5	28	33
TOTAL	19	32	51

Fuente: Elaboración propia

$$Po = 0.82$$

$$Pe = 0.53$$

$$IK = 0.61$$

Para la presente investigación el valor de 0.43 del NDVI fue representativo para la identificación de los bofedales por tener un índice de Kappa de 0.61 el cual significó una fuerza de concordancia considerable según (Landis & Koch, 1977).

La intensidad del muestreo estuvo constituida por la cantidad de los glaciares de los años 1988, 1990, 1993, 1996, 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2016 y 2017. (Obtenidas mediante imágenes satelitales), así como la superficie de bofedales de los años 1988, 1990, 1993, 1996, 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2016 y 2017 existente en la Cuenca Callancocha.

La intensidad del muestreo ha sido calculada mediante la siguiente fórmula empleada por (P. Peña & T. Mendoza, 2013).

$$i = \frac{M}{N} * 100$$

i = Intensidad de Muestreo (%)

N = Número total de años en estudio

M = Número de años tomados como muestra

$$i = \frac{12}{29} * 100$$

$$i = 41 \%$$

3.6. Técnicas e instrumentos

3.6.1. Técnicas de la investigación

La técnica para la recolección de información primaria fue la observación directa con las variables de la investigación.

Campo

- Los hechos se captarán tal como se presentaron en el momento de la investigación.
- Mediante el análisis documental se recolectó datos de fuentes secundarias para las variables de interés.

Gabinete (Laboratorio)

Técnicas de Percepción Remota

- Corrección Geométrica, Radiométrica y Atmosférica.
- Elaboración de índices espectrales

Técnicas de SIG

- Determinación de superficies
- Creación de modelos para el análisis multicriterio de la dinámica de bofedales. (pendiente, altitud, NDVI, TTVI)
- Superposición de capas (análisis multitemporal)

Análisis Estadístico

- Determinación de las variaciones y tendencias históricas.
- Determinación del modelo de regresión.

3.6.2. Instrumentos de la investigación

Gabinete

Programa Arc Gis 10.5, Excel, Idrisi SELVA y Programa ENVI 5.1

El programa ArcGis 10.5, Idrisi SELVA y ENVI 5.1 porque son softwares de reconocimiento mundial, potentes y versátiles.

Campo

GPS, Binoculares, Cámara Fotográfica, Cinta Métrica, Mapas Temáticos (DEM, CUM, UAS, GEOLOGIA, HIDROGRÁFICO, COBERTURA VEGETAL)

3.7. Procesamiento estadístico de la información

3.7.1. Estadísticos

- Software Microsoft Excel

Para determinar la relación de la variable dependiente (cobertura de bofedales y glaciares) con la variable independiente (precipitación) se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson.

3.7.2. Representación

Las representaciones de datos en gabinete se realizaron por medio de gráficos y tablas elaborados en el Software Excel siendo de gran utilidad para mostrar tendencias en el tiempo y así poder identificar rápidamente aquellos períodos donde se tiene un crecimiento o una pérdida.

- Las tablas me permitieron acomodar una gran cantidad de datos en un espacio reducido facilitándome su visualización donde se muestran valores numéricos de una manera ordenada por medio de columnas y filas. Conteniendo aquella información que se relacionó de forma concreta con el contenido del trabajo.

3.7.3. Validación de la extensión de los Bofedales y Glaciares

Para la validación de estas coberturas delimitadas en la cuenca de estudio se utilizó lo siguiente:

- Para los bofedales se utilizó la información cartográfica realizada por el Gobierno Regional de Huancavelica a través del estudio de cobertura vegetal de la (ZEE, 2013) donde dicha información se recopiló en formato shp.
- Para los glaciares se utilizó la información cartográfica realizada por la (UGRH, 2018), también se utilizó la información cartográfica realizada por el Gobierno Regional de Huancavelica del proyecto de la (ZEE, 2013), estudio temático recursos hídricos.

CAPITULO IV

4. ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados

4.1.1. Cálculo de superficies de bofedales de 1988 al 2017

Tabla 11: Valores históricos de los índices de vegetación en el bofedal Puituco

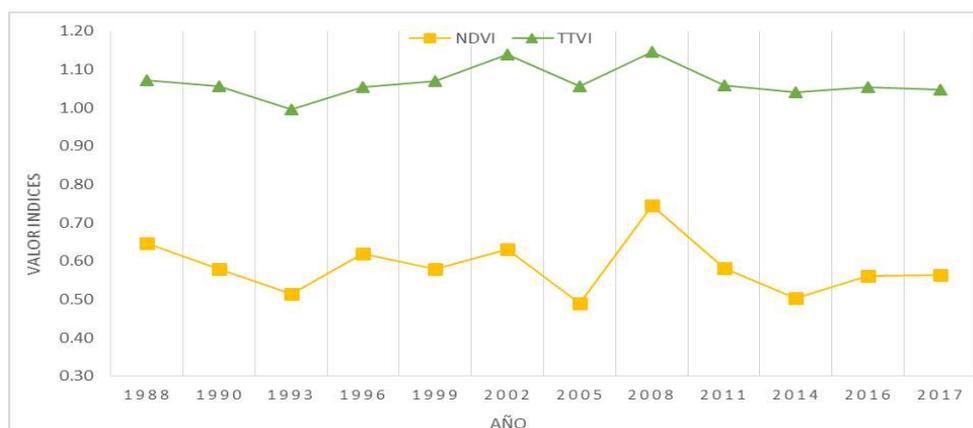
FECHA	NDVI	TTVI
1988	0.55	1.07
1990	0.58	1.06
1993	0.51	1.00
1996	0.62	1.05
1999	0.58	1.07
2002	0.63	1.14
2005	0.49	1.06
2008	0.75	1.15
2011	0.58	1.06
2014	0.50	1.04
2016	0.56	1.05
2017	0.56	1.05

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 12 se muestra los distintos valores de NDVI y TTVI

obtenidos para cada año en el bofedal piloto donde los valores más altos fueron en el año 2008 y los valores más bajos fueron en el año 1993 y 2005.

Gráfico 1: Variación de los valores promedio del TTVI y NDVI de 1988 al 2017



Fuente: Elaboración Propia

El Gráfico 1 muestra como es el comportamiento general de los valores de índices de vegetación evaluados en 29 años.

Tabla 12: Superficie anual de bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017

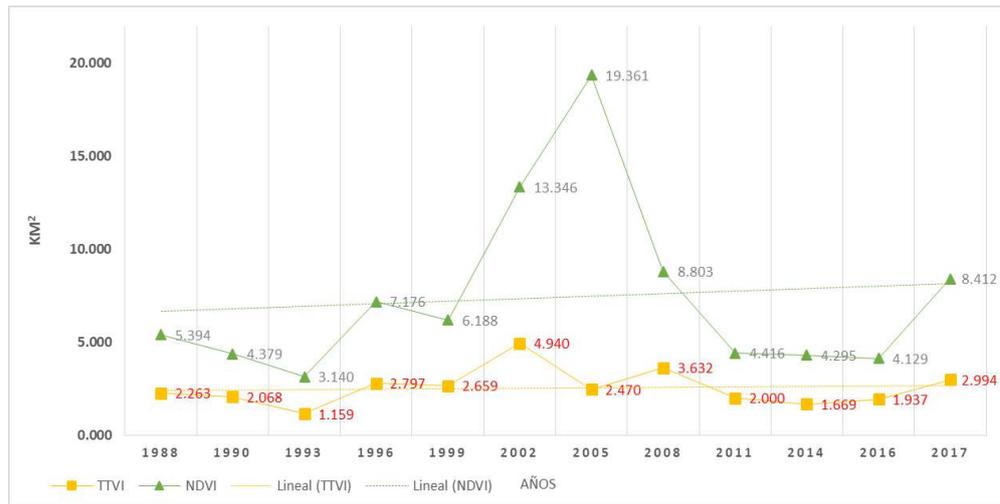
AÑO	BOFEDALES	
	Km ² -TTVI	Km ² -NDVI
1988	2.263	5.394
1990	2.068	4.379
1993	1.159	3.140
1996	2.797	7.176
1999	2.659	6.188
2002	4.943	13.346
2005	2.470	19.361
2008	3.632	8.803
2011	2.000	4.416
2014	1.669	4.295
2016	1.937	4.129
2017	2.994	8.412

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13 se describe las superficies de los bofedales (Km²/año)

obtenidas por índices de vegetación, donde el NDVI muestra una superficie mayor que el TTVI.

Gráfico 2: Superficie de los bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 2 muestra las superficies de bofedales determinadas mediante el TTVI y NDVI visualizando que existe una contradicción de superficies para el 2005 ya que el NDVI muestra mayor superficie ocurriendo lo contrario con el TTVI.

4.1.2. Cálculo de superficies de glaciares de 1988 al 2017

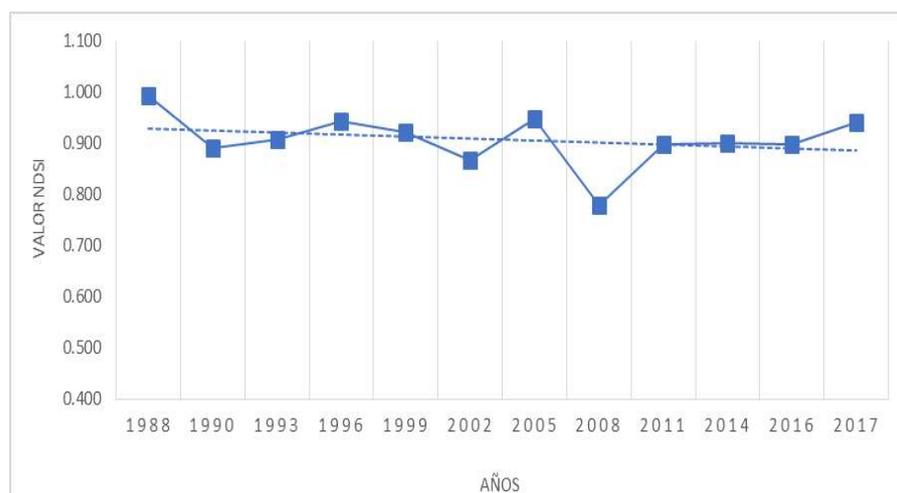
Tabla 13: Valores históricos del Índice de Nieve (NDSI) en el Glaciar Condoray de 1988 al 2017

FECHA	NDSI
1988	0.994
1990	0.891
1993	0.907
1996	0.943
1999	0.922
2002	0.866
2005	0.948
2008	0.779
2011	0.898
2014	0.900
2016	0.898
2017	0.941

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 14 se muestra los distintos valores de NDSI obtenidos para cada año en el glaciar Condoray donde el valor más alto fue de 0.994 en el año 1988 y el valor más bajo de NDSI fue de 0.779 en el año 2008.

Gráfico 3: Variación de los valores del NDSI de 1988 al 2017



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 3 se observa el comportamiento de los valores del NDSI tomados en 29 años teniendo un rango de 0.703 hasta 1.

Tabla 14: Superficie y volumen de glaciares de 1988 al 2017

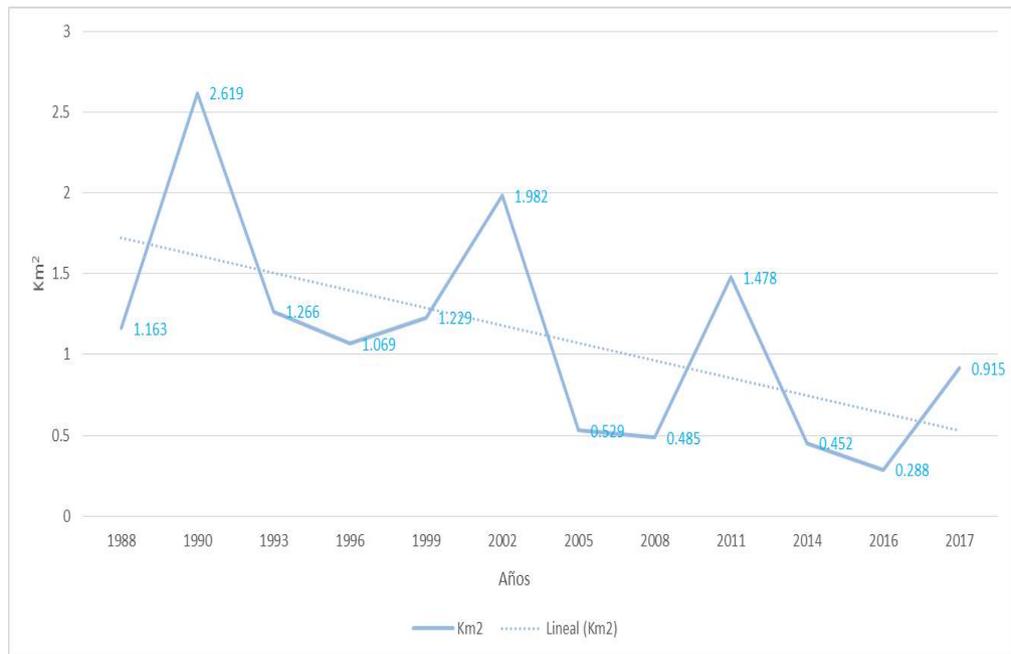
AÑO	GLACIAR		
	Ha	Km2	Km3 ¹
1988	116.282	1.163	0.06
1990	261.864	2.619	0.18
1993	126.600	1.266	0.07
1996	106.902	1.069	0.05
1999	122.917	1.229	0.06
2002	198.201	1.982	0.12
2005	52.909	0.529	0.02
2008	48.538	0.485	0.02
2011	147.764	1.478	0.08
2014	45.159	0.452	0.02
2016	28.795	0.288	0.01
2017	91.537	0.915	0.04

Fuente: Elaboración propia

¹ Obtenida la superficie glaciar, se estimó el volumen medio del glaciar con la siguiente fórmula (Klein & Isacks, 1998). $V = C \cdot A^b$, donde, V es el volumen glaciar en km3, A es la superficie glaciar en km2, C= 0,048 (valor empírico) y b = 1,36 (valor empírico).

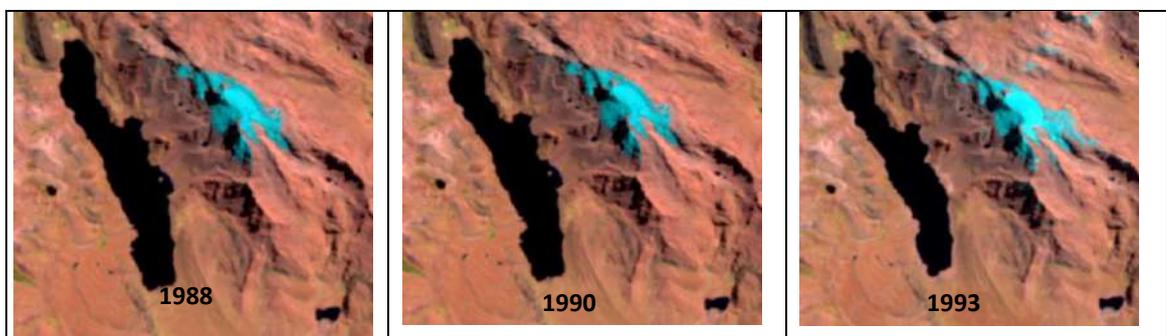
La tabla 15 detalla las superficies de glaciares obtenidas mediante el NDSI donde la superficie mínima de la cobertura glaciar presentada en 29 años es de 0.29 Km² en el 2016 y la superficie máxima de la cobertura glaciar de 2.62 Km² en el 1990.

Gráfico 4: Superficies del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 4 observamos la dinámica de las superficies glaciares para el periodo de estudio y la superficie más alta fue detectada en el año 1990 con 2.62 Km² y la superficie mínima fue en el año 2016 con 0.29 Km².



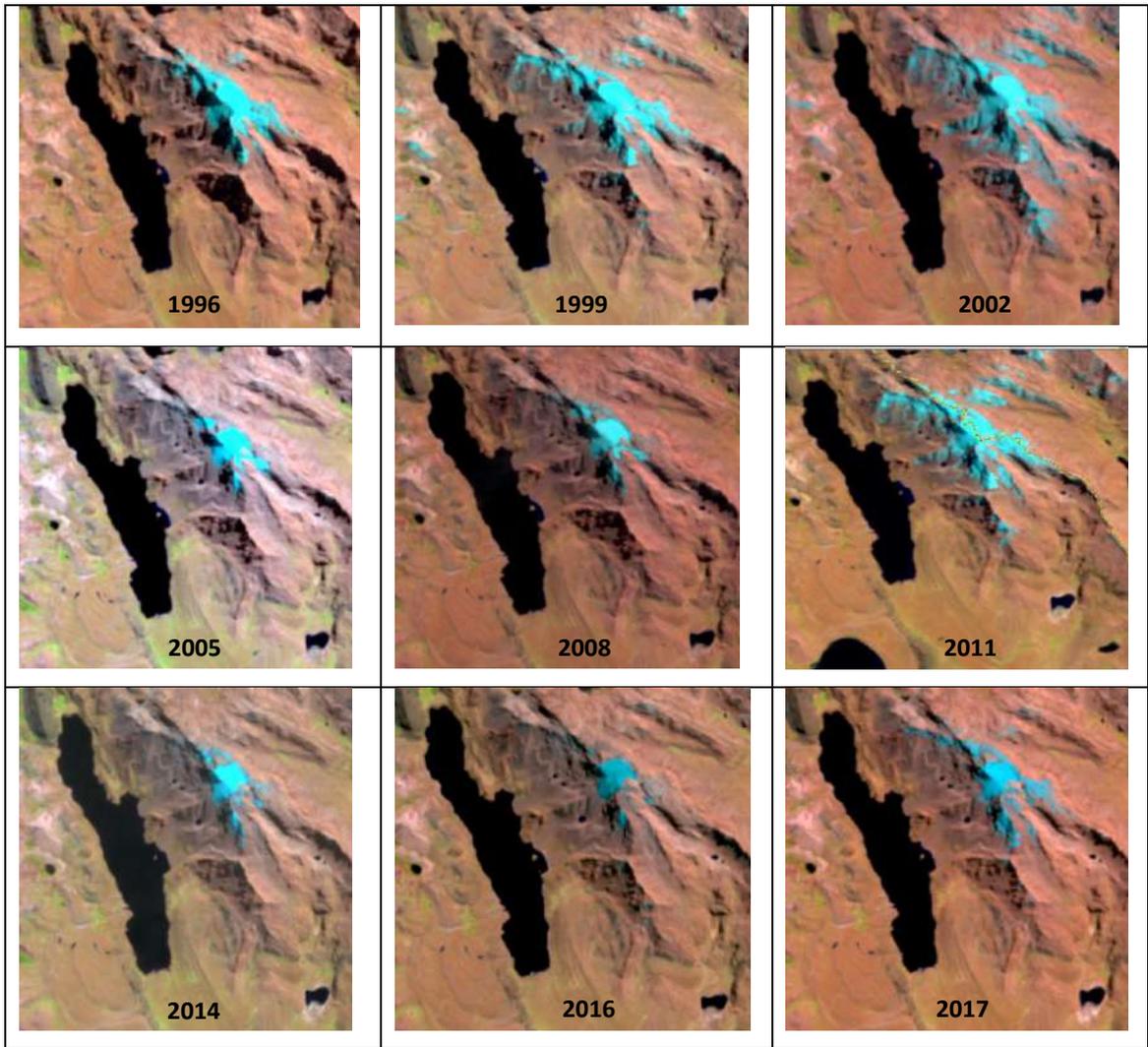


Figura 19: Imágenes históricas del glaciar Condoray
Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Índice de desglaciación del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017

Tabla 15: Datos históricos del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017

Variable	Indicador	FECHA											
		1988	1990	1993	1996	1999	2002	2005	2008	2011	2014	2016	2017
Variación de Cobertura Glaciar	% Glaciar	100	225	109	92	106	170	46	42	127	39	25	79
	Km ²	1.163	2.619	1.266	1.069	1.229	1.982	0.529	0.485	1.478	0.452	0.288	0.915

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 16 se muestra la variación de la cobertura glaciar en base a la superficie determinada (Km²) identificada para los años de estudio desde el 1988 hasta el 2017.

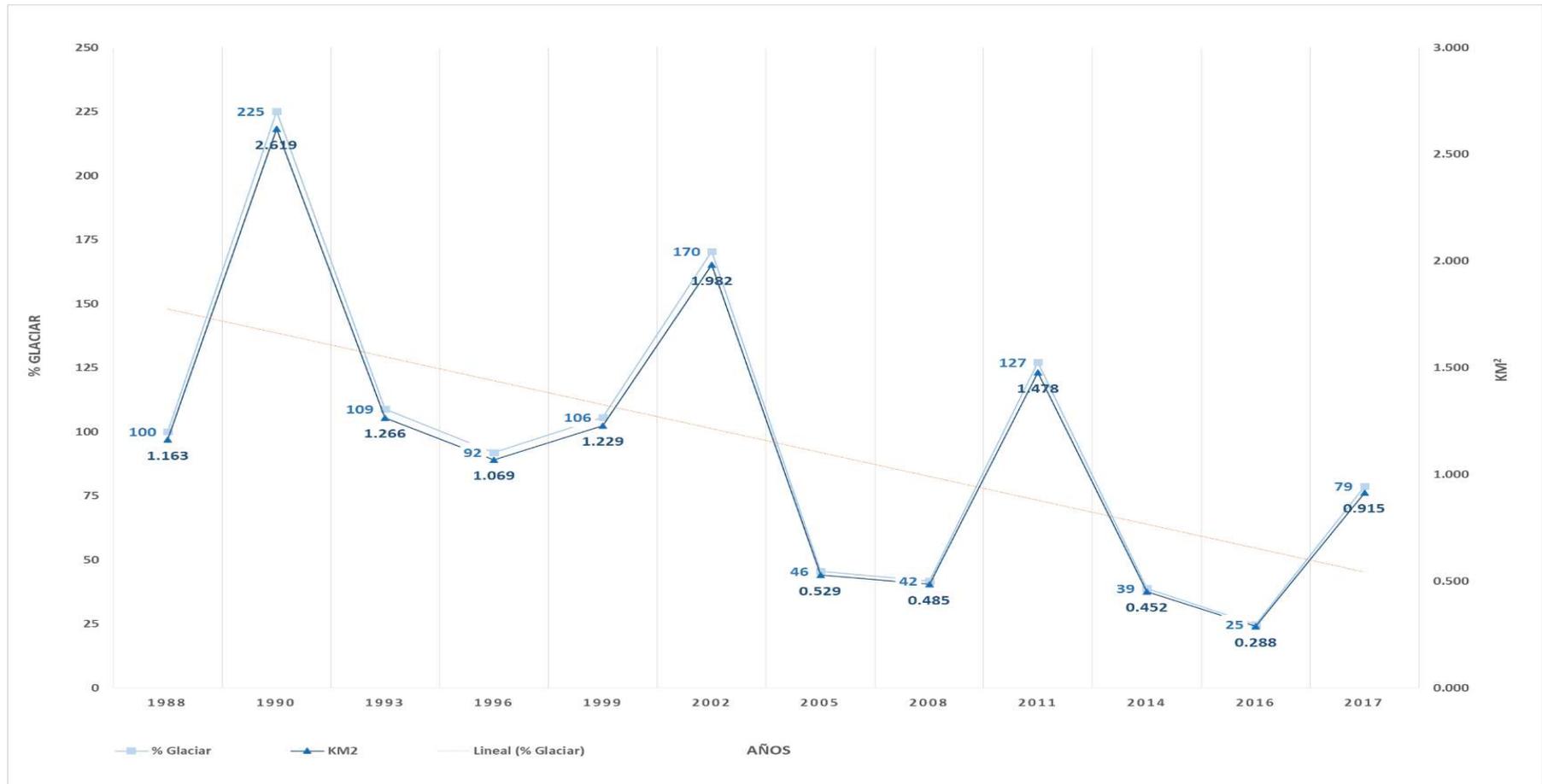
Tabla 16: Cálculo de la tasa de variación del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017

Variable	Unidad	TASA DE VARIACIÓN (Tv)											
		Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv
		1988 - 1990	1988 - 1993	1988 - 1996	1988 - 1999	1988 - 2002	1988 - 2005	1988 - 2008	1988 - 2011	1988 - 2014	1988 - 2016	1988 - 2017	2016 - 2017
Variación de Cobertura Glaciar	% año	50.07	1.71	-1.05	0.51	3.88	-4.53	-4.27	1.05	-3.57	-4.86	-0.82	217.89
	Km ² /año	0.728	0.021	-0.012	0.006	0.059	-0.037	-0.034	0.014	-0.027	-0.031	-0.009	0.627
	Var_Total	1.456	0.103	-0.094	0.066	0.819	-0.634	-0.677	0.315	-0.711	-0.875	-0.247	0.627

Fuente: Elaboración propia

La tabla 17 muestra los datos de la variación anual y la tasa de variación anual de la superficie glaciar en donde se muestran pérdidas y aumentos de estas superficies en 29 años.

Gráfico 5: Tendencia histórica del glaciar en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 5 muestra la tendencia histórica del glaciar en la cuenca Callancocha donde se registró el pico más alto en el 1990 y el punto más bajo en el año 2016.

4.1.4. Índice de variación de los bofedales

Tabla 17: Datos Históricos de la cobertura vegetal (bofedal) en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017

Variable	Indicador	FECHA											
		1988	1990	1993	1996	1999	2002	2005	2008	2011	2014	2016	2017
Variación de Cobertura Vegetal	% /Bofedal	100.00	91.38	51.22	123.59	117.49	218.44	109.13	160.52	88.40	73.77	85.62	132.32
	Km ²	2.263	2.068	1.159	2.797	2.659	4.943	2.470	3.632	2.000	1.669	1.937	2.994

Fuente: Elaboración propia

La tabla 18 muestra la variación de la cobertura de bofedales perennes en base a la superficie determinada (Km²) para los años de muestreo desde el 1988 hasta el 2017.

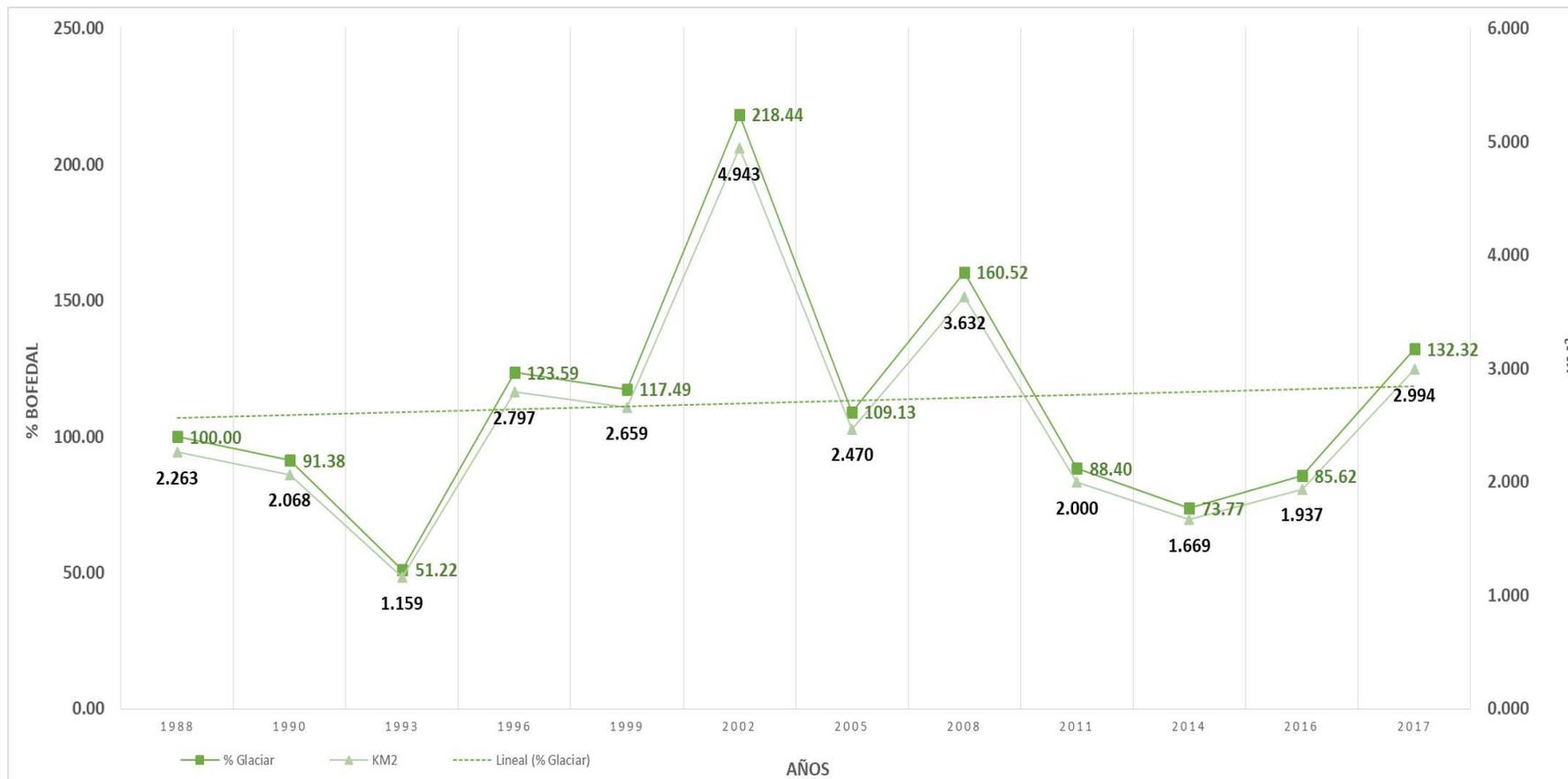
Tabla 18: Cálculo de la tasa de variación de bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017

Indicador	TASA DE VARIACIÓN											
	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv	Tv
	1988-90	1988-1993	1988-1996	1998-1999	1998-2002	1988-2005	1988-2008	1988-2011	1988-2014	1988-2016	1988-2017	2016-2017
% / año	-4.41	-12.52	2.68	1.48	5.74	0.52	2.39	-0.53	-1.16	-0.55	0.97	32.32
KM2/ año	-0.098	-0.221	0.067	0.036	0.191	0.012	0.068	-0.011	-0.023	-0.012	0.025	1.057
Var_Total	-0.195	-1.104	0.534	0.396	2.680	0.207	1.370	-0.262	-0.594	-0.326	0.731	1.057

Fuente: Elaboración propia

La tabla 19 muestra los datos de la variación anual y la tasa de variación anual de la superficie de bofedales perennes en donde se muestran pérdidas y aumentos de estas superficies en 29 años.

Gráfico 6: Tendencia histórica de los bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 6 muestra la tendencia histórica de los bofedales en la cuenca Callancocha donde se registró el pico más alto en el 2002 y el punto más bajo en el año 1993.

4.1.5. Análisis de regresiones entre variables

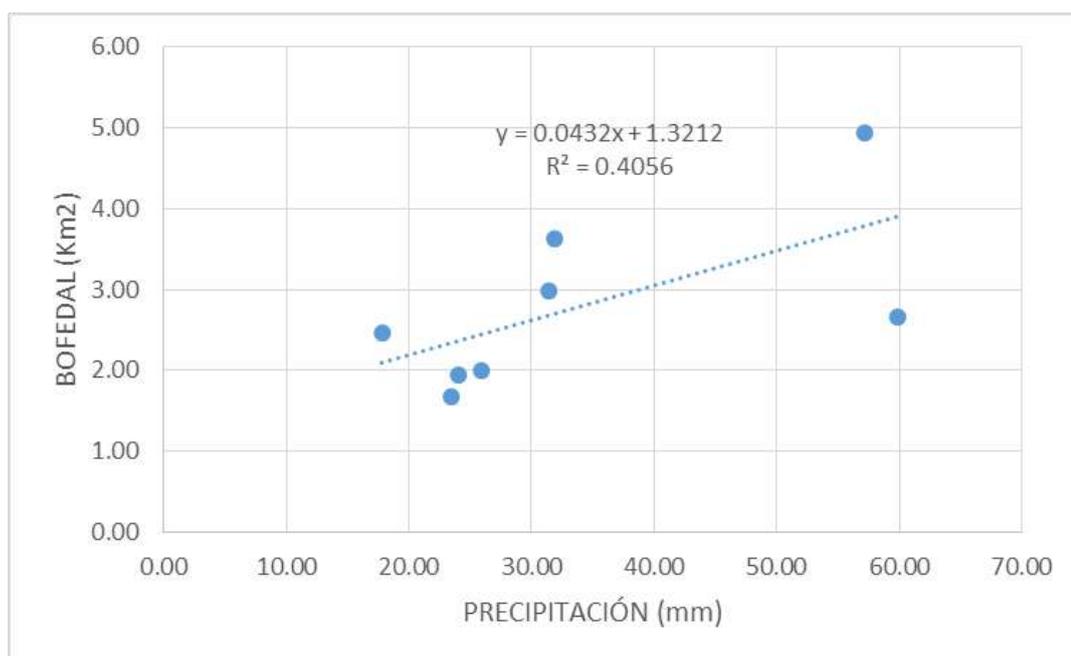
Tabla 19: Precipitación acumulada anual para la cuenca Callancocha

AÑO	PP (mm) ACUMULADA EN (JJA)	PP (mm) ACUMULADA DURANTE EL AÑO HIDROLÓGICO	TEMPERATURA MEDIA °C
1988	N/E	N/E	N/E
1990	N/E	N/E	N/E
1993	N/E	N/E	N/E
1996	N/E	N/E	N/E
1999	59.886	858.38	7.486
2002	57.149	859.28	8.222
2005	17.765	557.33	8.333
2008	31.845	601.84	7.869
2011	25.878	700.38	7.828
2014	23.454	568.62	9.067
2016	23.987	573.60	7.933
2017	31.432	714.86	11.000

Fuente: Satélite TRMM

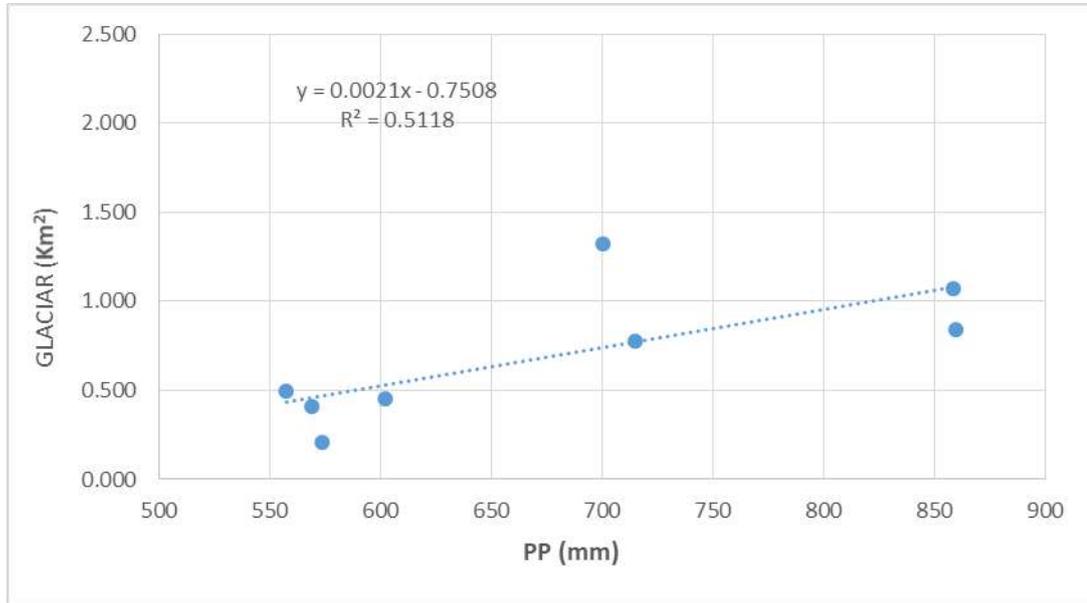
La tabla 20 muestra los valores de precipitación obtenidos del Satélite TRMM desde el 1999 hasta el 2017, datos del 1988 hasta el 1993 no se encontraron por ello se puso N/E.

Gráfico 7: Correlación entre el área de bofedales (TTVI) y la precipitación acumulada en 90 días (J, J, A) (TRMM)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 8: Correlación entre el área de glaciares y la precipitación acumulada desde el inicio del año hidrológico



Fuente: Elaboración propia

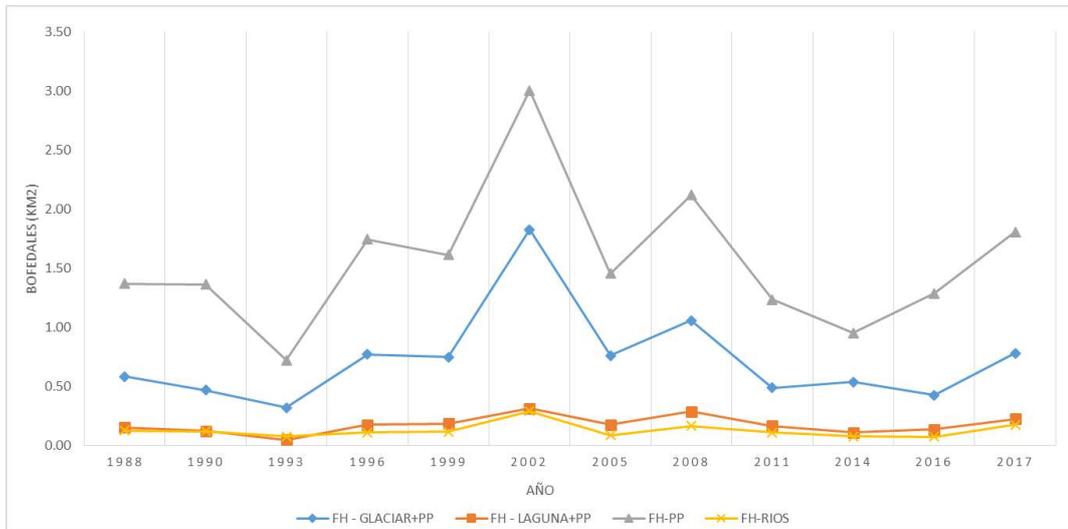
Tabla 20: Superficie de bofedales dependientes de las fuentes hídricas en la cuenca Callancocha

AÑO	FH - GLACIAR+P P	FH - LAGUNA+PP	FH- PP	FH- RIOS	TOTAL
	Km²				
1988	0.58	0.15	1.37	0.12	2.223
1990	0.47	0.12	1.36	0.12	2.068
1993	0.32	0.05	0.72	0.08	1.159
1996	0.77	0.17	1.74	0.11	2.797
1999	0.75	0.18	1.61	0.12	2.659
2002	1.82	0.31	3.00	0.29	5.430
2005	0.76	0.17	1.45	0.08	2.470
2008	1.05	0.29	2.12	0.17	3.623
2011	0.49	0.16	1.23	0.11	1.993
2014	0.53	0.11	0.95	0.08	1.670
2016	0.42	0.13	1.29	0.07	1.916
2017	0.78	0.22	1.81	0.18	2.984
TOTAL	8.7	2.1	18.7	1.5	30.993
%	28.1	6.7	60.0	4.9	99.654

Fuente: Elaboración propia

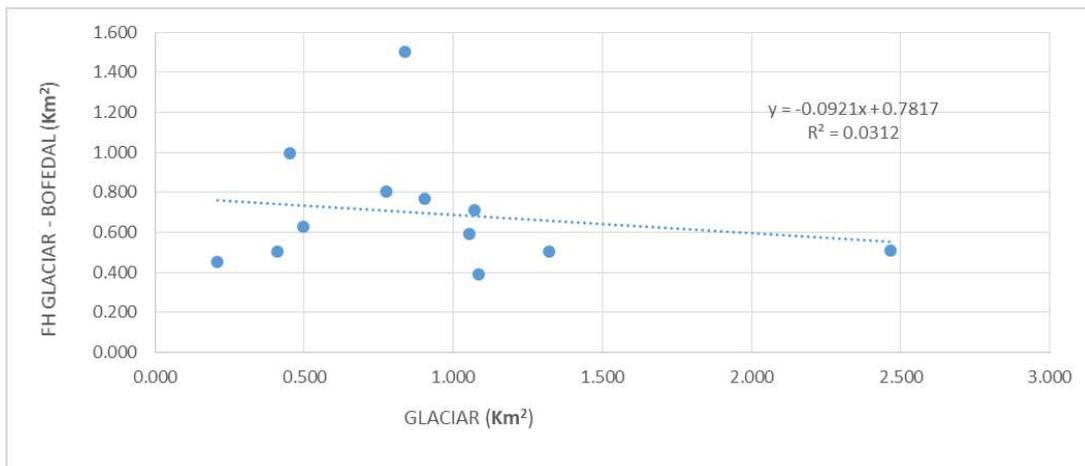
Para poder distribuir las áreas de bofedales dependientes según su fuente hídrica se realizó una delimitación interna mediante microcuencas hidrográficas (**ver mapa 4**)

Gráfico 9: Bofedales provenientes de las fuentes hídricas



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 10: Correlación entre el área de glaciares y bofedales dependientes del deshielo glaciar.



Fuente: Elaboración propia

4.1.6. Proyección de escenarios futuros (glaciar)

$$P_{2025} = 1.163 + \frac{0.288 - 1.163}{29} * 37$$

$$P_{2025} = 0.047 \text{ Km}^2$$

Se estimó la proyección de la cobertura glaciar para el 2025 que llegará hasta 0.047 Km².

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Cálculo de superficies de bofedales de 1988 al 2017

Para determinar las superficies de bofedales es importante determinar un rango óptimo en los índices de vegetación ya que estos valores delimitan la superficie de los bofedales tal como lo describe (García & Willems, 2015) en su investigación relacionada al estudio de bofedales mencionando que los indicadores del NDVI, NDWI y NDII zonifican las áreas de los bofedales.

Como se observa en la tabla 12 el valor promedio del NDVI en el bofedal piloto Puituco es de 0.59 y dicho valor podría llegar a convertirse en una característica particular de los bofedales de la cuenca Callancocha en vista que todas las imágenes utilizadas fueron procesadas bajo un mismo procedimiento estandarizado. Este resultado se respalda por la investigación realizada por (García & Willems, 2015) donde mencionan que los valores extremos para los bofedales están entre 0.43 y 0.89.

La variación de valores de NDVI se debe a la presencia de fenómenos climáticos, por ejemplo en el año 1993 el valor promedio del NDVI fue de 0.51 debido a la presencia del Fenómeno del Niño (Invierno 1992-1993) y en el año 2008 el valor promedio de NDVI fue de 0.75 debido a la presencia del Fenómeno de la Niña (Invierno 2007-2008) lo cual concuerda con el estudio realizado por (Arroyo A., 2015) donde da a conocer que en el 1993 fue una época moderadamente seca y el 2008 fue una época moderadamente lluviosa coincidiendo ambos estudios y resultados con lo obtenido en este estudio.

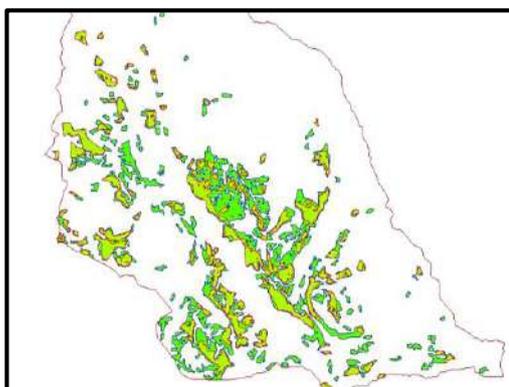
La tabla 12 también muestra los valores del TTVI determinados en la cuenca Callancocha en el bofedal Puituco donde su valor para el 1993 fue de 1.00 que se vio influenciado por la presencia del Fenómeno del Niño, lo contrario ocurre para el año 2008 que el valor de TTVI llega al pico más alto con 1.15 debido a la influencia del Fenómeno de la Niña. Estos resultados tanto para el NDVI y TTVI se respaldan en la investigación realizada por (Buitro A. & Fernández C., 2012) donde

mencionaron que el valor de los índices de vegetación alcanzan los picos más altos debido a la presencia de la Niña, lo contrario se observa cuando estuvo presente el niño.

En la tabla 13 se describe las superficies preliminares de los bofedales ($\text{Km}^2/\text{año}$) identificados con los dos índices de vegetación donde el NDVI muestra una superficie mayor de 19.361 Km^2 para el año 2005 y una superficie menor de 3.140 Km^2 para el año 1993 y el TTVI tiene una superficie mayor de 4.942 Km^2 para el año 2002 y una superficie menor de 1.159 Km^2 para el año 1993. Además se observa un incremento en las dos superficies de bofedales por cada índice de vegetación para cada año, por ejemplo para el NDVI en los años (2002, 2005 y 2008) los valores están entre 8.8 Km^2 y 19.361 Km^2 mientras que para el TTVI en los años (2002, 2005 y 2008) los valores están entre 2.47 Km^2 y 4.94 Km^2 .

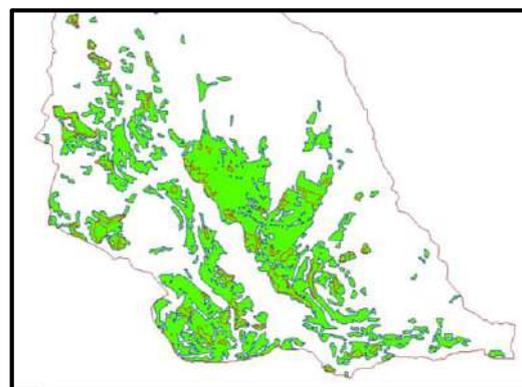
Se realizó una superposición de capas para poder visualizar las dos superficies de bofedales, así pues en la Figura 22; a), b) y c) se muestran los polígonos con borde rojo pertenecientes a superficies de bofedales delimitadas mediante el TTVI y los polígonos con borde azul pertenecientes a las superficies de bofedales delimitadas mediante el NDVI.

a). 2002 (Húmedo)



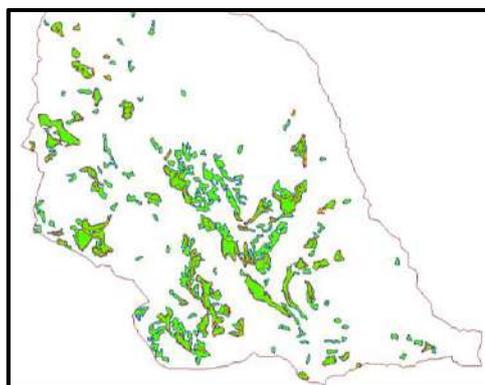
NDVI: 13.34 Km^2
TTVI: 4.94 Km^2

b). 2005 (Seco)



NDVI: 19.36 Km^2
TTVI: 2.47 Km^2

c). 2008



NDVI: 8.80 Km²
TTVI: 3.63 Km²

Figura 20: Superficie de bofedales mediante el NDVI y TTVI.

Fuente: Elaboración propia

Para entender a qué se debe esta variación extrema de ambas superficies realizamos una salida a campo para luego realizar un análisis visual llegando a la conclusión que el NDVI para nuestra área de estudio no es preciso, por encontrarse los pajonales saludables dentro del rango establecido para bofedales.

Esta afirmación se sustenta en la (ZEE, 2013) que realizó un estudio de cobertura vegetal en el Departamento de Huancavelica y para la cuenca Callanchocha se cuantificó las superficies en %/área total afirmando que la cuenca Callanchocha tiene 52.07 Km² ocupados por los pajonales que representa el 59 %, seguido del césped de puna con 20.54 Km² que representa el 23.58% del área total, glaciares con 4.94 Km² que representa el 5.7 %, lagunas con 5.58 Km² que representa el 6.4 %, bofedales con 2.37 Km² que representa 2.7 % y áreas sin vegetación con 1.60 Km² que representa el 1.84 % del área total, (Mapa 7).

Tabla 21: Superficies de cobertura vegetal en la cuenca Callanchocha

DESCRIPCIÓN	Área (Km2)	%
BOFEDAL	2.369	2.720
GLACIARES	4.938	5.669
LAGUNAS	5.578	6.404
PAJONAL	52.07	59.779
CESPED DE PUNA	20.547	23.589
AREA SIN VEGETACION	1.602	1.839
	87.104	100.00

Fuente: Elaboración propia – ZZE - HVCA

En la figura 23 se muestran dos polígonos de diferentes colores, el polígono de color rojo muestra a la superficie de bofedales perennes que fue delimitada mediante el TTVI y los polígonos de color verde muestra la superficie de bofedales y pajonales que fueron delimitados mediante el NDVI en el bofedal piloto.

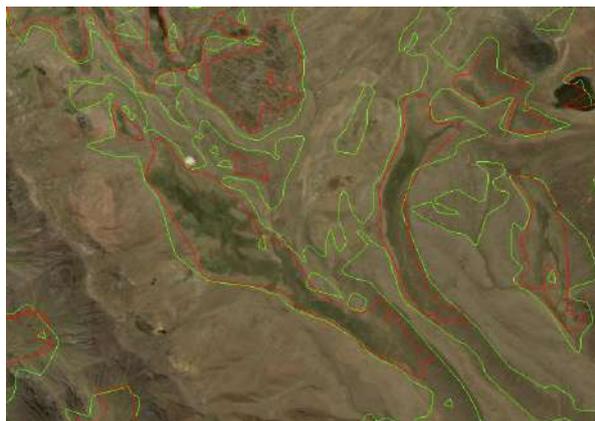


Figura 21: Superficie de bofedal piloto en el año 2002 empleando el NDVI y TTVI

Fuente: Elaboración propia

Viendo esta variación se optó por trabajar con el TTVI por ser más preciso en la identificación de los bofedales.

Al momento de determinar las superficies de bofedales se trabajó con una superficie mínima de 0.008 Km².

Para la cuenca Callancocha se determinó una superficie de 2.263 Km² en el año 1988, en el año 1993 la superficie descendió hasta 1.159 Km², recuperando su superficie y sobrepasando la superficie inicial en el 2002 que llegó a 4.942 Km², descendiendo nuevamente el 2005 hasta 2.470 Km² y en el 2008 incrementa su superficie hasta 3.632, a partir del 2008 la superficie de bofedales comienza a disminuir progresivamente hasta el 2016 que llegó a una superficie de 1.937 Km² para luego recuperar su superficie de 2.994 Km² que se estimó en el 2017.

Esta dinámica que presentan la superficies de los bofedales se debe a la presencia del Fenómeno del Niño y la Niña así pues según (Buitro A. & Fernández C., 2012) afirma que el bofedal en época húmeda presenta mayor superficie y en época seca menor superficie, por

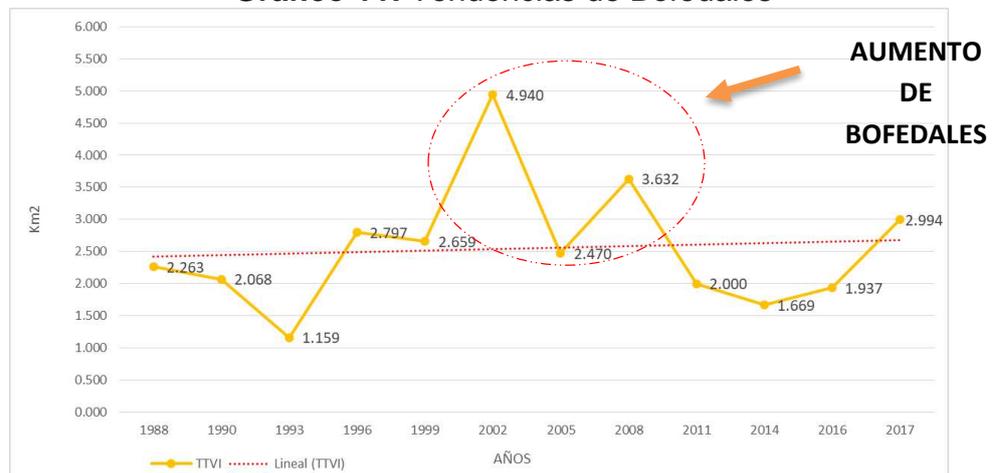
ejemplo en el año 1993 la superficie fue de 1.159 Km² debido a la presencia del Fenómeno del Niño y en el año 2008 la superficie fue de 3.632 Km² debido a la presencia del Fenómeno de la Niña.

Para el año 2002 se tiene una superficie de 4.943 Km² y según los datos de precipitación (tabla 20) el año 2002 es el año más húmedo es por ello que la excesiva superficie de estos bofedales se debió al aumento de la precipitación causando mayor incremento en la superficie de estos bofedales.

En el 2002 la superficie de bofedales provenientes de la precipitación es 3.00 Km² siendo el año en donde se registró mayor superficie (Tabla 21). Esta afirmación se respalda por (Zeballos, Soruco, Cusicanqui, Joffré, & Rabatel, 2014) donde afirman que los humedales tiene una dependencia de la disponibilidad espacio-temporal del agua proveniente de las precipitaciones.

En el gráfico 11 se observa que existe un incremento de superficies de bofedales presenciados en las dos épocas de la cuenca andina (seca, y húmeda)

Gráfico 11: Tendencias de Bofedales



Fuente: Elaboración Propia

En el 2002 se determinó como el año más húmedo (lluvioso) por llegar a una precipitación acumulada de 859.28 mm y en ese año la superficie de bofedales llegó a 4.94 Km², en el 2005 se determinó el año más seco con una precipitación de 557.33 mm y en ese año se registró una superficie de 2.47 Km². Esta afirmación se respalda por

(Zeballos, Soruco, Cusicanqui, Joffré, & Rabatel, 2014) donde afirman que los humedales y glaciares tiene una fuerte dependencia de la disponibilidad espacio-temporal del agua proveniente de las precipitaciones y en algunos casos de las cuencas glaciares.

Los bofedales según sus fuentes hídricas tienen el mismo comportamiento dinámico donde el área mayor de bofedales fue de aquellos que dependen de la precipitación a diferencia de aquellos que provienen de lagunas y ríos. El gráfico 9 muestra a detalle estos comportamientos.

4.2.2. Cálculo de superficies de glaciares en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017

Para la determinación de superficies glaciares se empleó la metodología del NDSI ya que es un índice empleado en estudios multitemporales de Cobertura Glaciar, en concordancia con la afirmación que realiza (Buitro A. & Fernández C., 2012) donde emplearon metodologías para el cálculo de áreas del glaciar y concluyeron que la aplicación del NDSI es la metodología más adecuada, ya que la combinación de bandas permite determinar áreas que la Clasificación No Supervisada no puede alcanzar por un principio de visibilidad y que este NDSI es más efectivo en identificar las áreas de ablación”

La Tabla 14 muestra los valores del NDSI determinados en 29 años donde el valor mínimo fue de 0.779 y el máximo fue de 0.994 este resultado es respaldado por (Hall et al, 1995) que propusieron un umbral de NDSI de 0,40 para la identificación y delimitación de los glaciares, por lo tanto los valores obtenidos en la presente investigación son óptimos para identificar y delimitar las superficies de glaciares en la cuenca Callancocha.

La superficie glaciar mínima presentada en 29 años es de 0.288 Km² en el 2016 y la superficie máxima de la cobertura glaciar de 2.619 Km² en el 1990, afirmando entonces que existe un proceso de desglaciación en el glaciar Condoray a causa de la presencia del

Fenómeno del Niño tal como lo manifiesta (Buitro A. & Fernández C., 2012) que durante la presencia del Fenómeno del Niño se observa mayor pérdida de glaciares que en parte es compensada durante los eventos de la Niña.

La superficie glaciar en el 1988 fue de 1.163 Km² a partir de este año se identificó un aumento hasta llegar a 2.619 Km², en el año 1990 descendió progresivamente hasta llegar a 1.069 Km² para el 1996, a partir de este año se presentaron pérdidas e incrementos de la superficie glaciar llegando hasta una superficie mínima de 0.288 Km². En el 2016 se estimó una superficie de 0.288 Km² para la cuenca Callancocha y para ese mismo año la superficie del Glaciar Condoray fue de 0.408 Km² este resultado se respalda en el estudio realizado por el (INAIGEM, 2016) que determinó un área de 0.4 Km² para el Glaciar Condoray coincidiendo en la superficie y a la vez validando el método utilizado para determinar las coberturas glaciares.

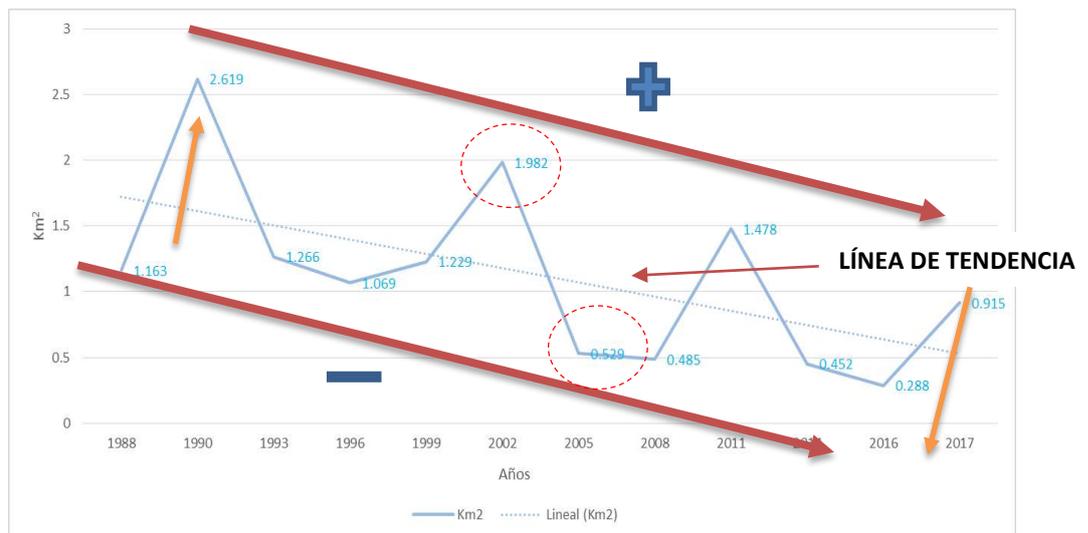
El gráfico 4 muestra las variaciones en el área glaciar en diferentes años; en general se puede observar una pérdida en el área glaciar debido a la influencia de los factores climáticos (1998, 1993, 2002, 2005 y 2014); para este último caso esta observación coincide con comentarios publicados en la distribución de eventos del estudio realizado por (Arroyo A., 2015) en donde realizó una clasificación de los eventos climáticos en secos y lluviosos, donde sugiere que durante el fenómeno de El Niño se observa mayor pérdida de glaciares que en parte es compensada durante los eventos de La Niña.

Estos eventos del Niño y la Niña se caracterizan por los aumentos significativos de la temperatura y el cambio en los patrones de precipitación causando un fuerte impacto en el tamaño y distribución de los glaciares tropicales y como consecuencia en los HAA, así como en la integridad de los ecosistemas. (Hofman & Requena, 2012).

En el siguiente gráfico se observa que existen dos tendencias una de incremento y la otra de pérdida, por ejemplo en los años 1990, 2002,

2011 y 2017 se dio un incremento de las superficie glaciara y en los años 1988, 1993, 1996, 2005, 2008 y 2016 existió una disminución de sus superficies.

Gráfico 12: Tendencias del Glaciar



Fuente: Elaboración Propia

En el 2005 se determinó como el año más seco por llegar a una precipitación acumulada de 557 mm y en ese año la superficie glaciara llegó a 0.529 Km² en el 2002 se determinó el año más húmedo (lluvioso) con una precipitación de 859 mm y en ese año se registró una superficie de 1.982 Km². Esta afirmación se respalda por (Zeballos, Soruco, Cusicanqui, Joffré, & Rabatel, 2014) donde afirman que los humedales y glaciares tiene una fuerte dependencia de la disponibilidad espacio-temporal del agua proveniente de las precipitaciones.

4.2.3. Índice de desglaciación del glaciar Condoray en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017.

Existe una disminución de 0.009 Km²/año de superficie glaciara en el periodo 1988-2017 lo que equivale al 79% de cobertura glaciara para el año 2017. (Tabla 17 y Gráfico 5).

Para el periodo 1988 - 2011 se presentó un aumento de 0.014 Km²/año llegando a una superficie de 1.478 Km², lo cual se respalda

por el estudio realizado por la UNGRH – ANA y recopilado por el (INAIGEM, 2016) donde afirma que para el 2010 se estimó un área glaciar de 1.4 Km² para la cordillera Chonta.

La disminución más crítica se evidencio para el periodo (1988-2016) por registrar una pérdida de 0.031 Km²/año lo que equivale al 25% de cobertura glaciar y es respaldado por el estudio realizado por el (INAIGEM, 2016), donde afirmaron que el Glaciar Condoray presentó una reducción del 98 % entre 1970 – 2016. (Tabla 16 y 17)

Así mismo se evidenció una recuperación de la superficie glaciar en el periodo 2016-2017 en razón de 0.627 Km²/año.

El índice de desglaciación para el periodo de estudio (1988-2017) es de 0.82 %/año y el índice más crítico de desglaciación presentado para el periodo de estudio (1988-2016) fue de 4.86 %/año.

Esta desglaciación se debe a dos factores; primero, al aumento de temperatura y a la presencia de los Fenómenos (Niño y Niña) y la segunda se debe a que las superficies glaciares se encuentran en laderas pronunciadas con pendiente promedio de 22°, esta afirmación se respalda en la investigación realizada por (Alva H. & Meléndez C, 2009) donde afirman que por encima de los 35° la pérdida de los glaciares es mayor debido a la poca compactación de la capa nival y los procesos gravitatorios.

También se respalda por la siguiente afirmación “la desglaciación aumenta durante el fenómeno del Niño por el aumento de las temperaturas en la cuenca acelerando el proceso de fusión del glaciar tal como lo describe” (Francou, Glaciares y Ecosistemas de Montaña, 2013), mencionando que los glaciares son ecosistemas vulnerables a las variaciones climáticas determinadas para una región.

4.2.4. Índice de permanencia de los bofedales en la cuenca Callancocha de 1988 al 2017

Existe un crecimiento leve de 0.025 Km²/año de superficie de bofedales en el periodo 1988-2017 (Tabla 19 y Gráfico 6).aumentando

su superficie en 132 %. También se identificó un aumento de 0.012 Km²/año de superficie de bofedales en el 2017.

Para el periodo 1988 - 2002 se presentó el máximo crecimiento de bofedales llegando a un índice de crecimiento de 0.228 Km²/año. Este crecimiento se debe a la presencia del Fenómeno del Niño y al acelerado proceso de desglaciación.

El índice de permanencia de estos bofedales para el periodo de estudio (1988-2017) es de 0.97%/año.

El índice de permanencia de estos bofedales para el periodo de estudio (1988-2016) es de 0.55%/año.

4.2.5. Análisis de regresiones entre variables

No existe una relación entre la precipitación acumulada en la época seca y los bofedales cartografiados en la época seca porque los bofedales son ecosistemas que se encuentran en las zonas de descargas y están relacionados con las aguas subterráneas. Este resultado se respalda por (Montoya S. , 2016) mencionando que en las épocas secas toda la descarga proviene del almacenamiento de las aguas subterráneas en vista que la precipitación es escasa y no llega a saturar el suelo.

La relación entre la precipitación acumulada durante el año hidrológico y la superficie de glaciares es de 0.51 lo que indica que existe una relación directa positiva cuyo grado es moderado lo que quiere decir que a menor precipitación acumulada menor superficie glaciar y a mayor precipitación acumulada mayor superficie glaciar. (Gráfico 8); este resultado se respalda por la investigación realizada por (P. Peña & T. Mendoza, 2013) mencionando que las variables meteorológicas con interrelación significativa en la variación de la cobertura glaciar, son temperatura máxima y precipitación, discriminando la Temperatura Mínima y horas Sol al ser mínimo su grado de interrelación. También se respalda por la investigación realizada por (Arroyo A., 2015) el cual concluye que la pérdida de

Masa Glaciar está asociado a una disminución significativa de la Precipitación en forma líquida.

Según la tabla 23, los bofedales en la cuenca Callancocha provienen de un 58.04 % por la acumulación de la precipitación en la napa freática, 34.27 % por la presencia del agua proveniente de los glaciares y la precipitación, 3.03 % por la presencia de lagunas y la precipitación y 4.66 % por la presencia de ríos.

Tabla 22: Fuentes hídricas de bofedales en la cuenca Callancocha

FUENTE HÍDRICA	Km ²	%
GLACIAR + PP	30.45	34.27
PP	51.57	58.04
LAG + PP	2.69	3.03
RIOS + PP	4.14	4.66
TOTAL	88.85	100.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 21 se determinó la superficie de los bofedales provenientes según su fuente hídrica (provenientes del deshielo de los glaciares, lagunas, precipitación y ríos) donde el área mayor presentada en la cuenca fue la que es dependiente de la precipitación con 18.7 Km² de bofedales y la menor área fue de 1.5 Km² de bofedales los que son dependientes de los ríos y quebradas. Y en el Gráfico 9 se representa al comportamiento dinámico de estos bofedales cartografiados según su fuente hídrica.

Los bofedales que se encuentran dentro del área de los glaciares no son dependientes del agua proveniente del deshielo de estos glaciares. **(Gráfico 10)**

Análisis Hispsográfico

En base a estos resultados de correlación se realizó un análisis hispsográfico de la cuenca Callancocha a partir de un DEM para llegar a la conclusión que los bofedales en la cuenca Callancocha son zonas de descargas en las épocas secas y que tienen como fuentes hídricas a las aguas subterráneas y a la precipitación mínima que se presenta en esta época.

En la cuenca Callancocha el escurrimiento del agua proveniente del

deshielo de los glaciares no influye en la evolución de los bofedales por encontrarse alrededor de una laguna que mide 5.2 Km de longitud siendo esta laguna el cuerpo receptor del escurrimiento superficial del agua proveniente del deshielo del glaciar a pesar que la longitud de la superficie glaciar mide como máximo 3.3 Km. (Figura 24)

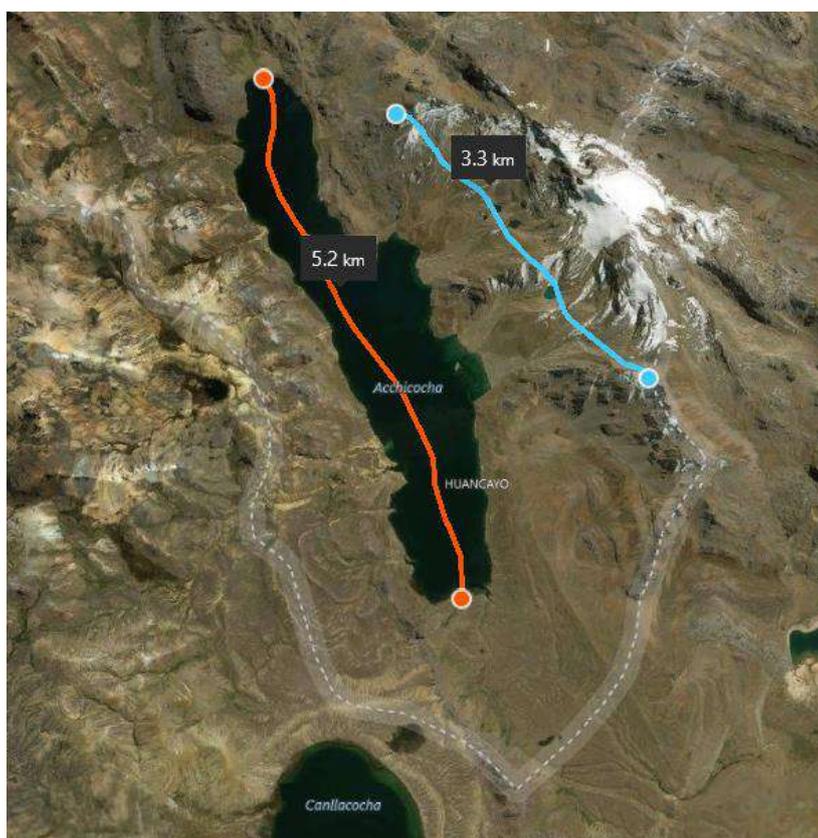


Figura 22: Longitud de la superficie glaciar y la laguna Acchicocha
Fuente: Elaboración propia

También fue necesario realizar el análisis geológico para determinar el tipo de geología de la cuenca Callancocha identificando la presencia de calizas bituminosas: areniscas y lumaquelos y calizas micríticas gris pardas a beiges, en capas medianas a gruesas intercaladas con calizas nodulares con depósitos de morrenas cantos rodados, tales como crestas y arcos. (ZEE, 2013)

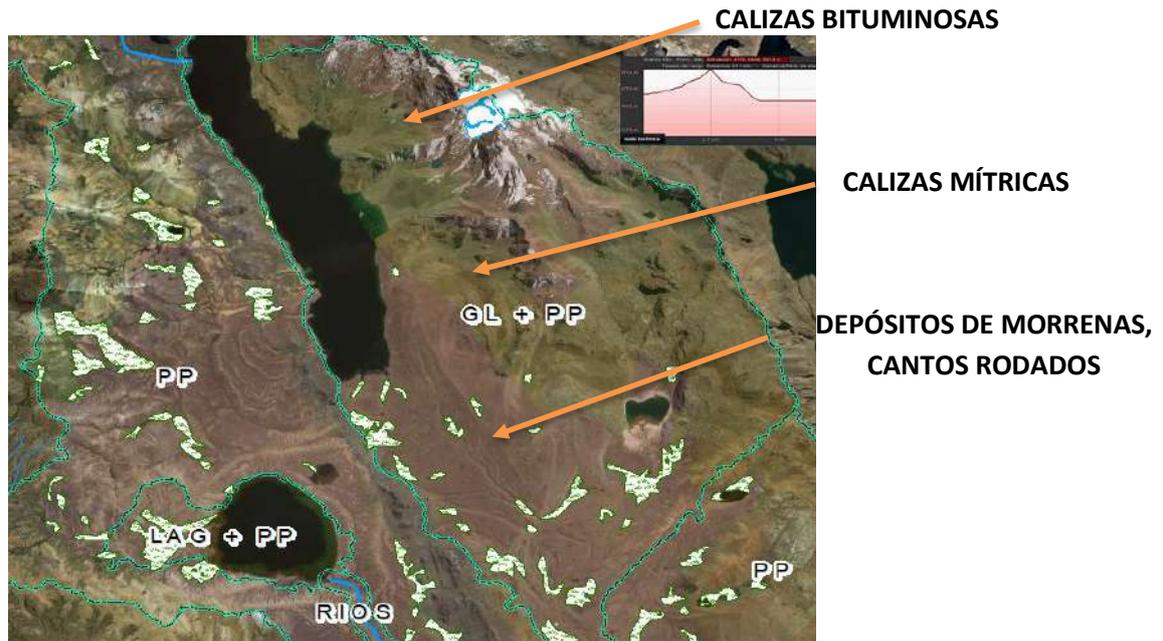


Figura 23: Geología de la cuenca (**Mapa 6**)

Analizando el perfil topográfico de la cuenca Callancocha y conociendo la ubicación de los bofedales cartografiados se observa que los bofedales se encuentran en las zonas planas con pendiente promedio menor a 10° , siendo estas zonas puntos de intersección del nivel freático y superficial zonas en donde se encuentran los manantiales.

Para la época seca, en las partes altas de la cuenca Callancocha, la precipitación máxima registrada durante el año fue de 858 mm (Tabla 20) el cual genera recarga que se transporta hacia las partes bajas de las quebradas donde están los bofedales y manantiales por ser ecosistemas de descarga de aguas subterráneas.

De la misma manera se realizó un análisis para determinar si la laguna Acchicocha tiene una influencia sobre la evolución de los bofedales que se encuentran aguas debajo de la laguna llegando a la conclusión que los bofedales no tienen dependencia del escurrimiento superficial provenientes de esta laguna por estar a una altitud menor al de los bofedales.

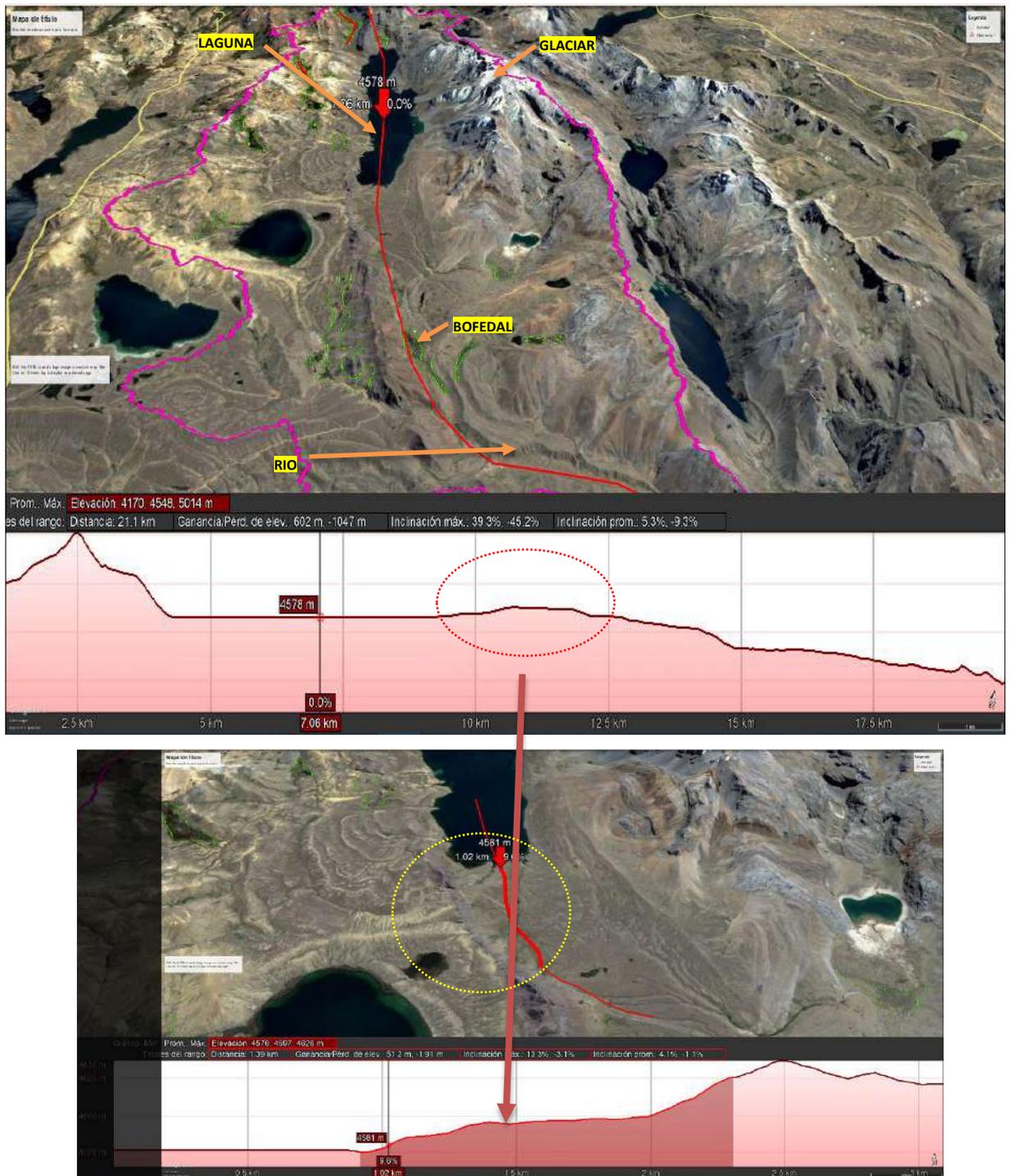


Figura 24: Perfil topográfico de la cuenca Callancocha
Fuente: Elaboración propia

La figura 27 muestra el balance hídrico cualitativo en la época seca donde las fuentes hídricas de ingreso a un bofedal se dan mediante el escurrimiento subterráneo (Q_g), el escurrimiento superficial de las

aguas provenientes de los glaciares (Q) y la precipitación pluvial y las salidas se dan mediante la ETP y el escurrimiento superficial (Q)

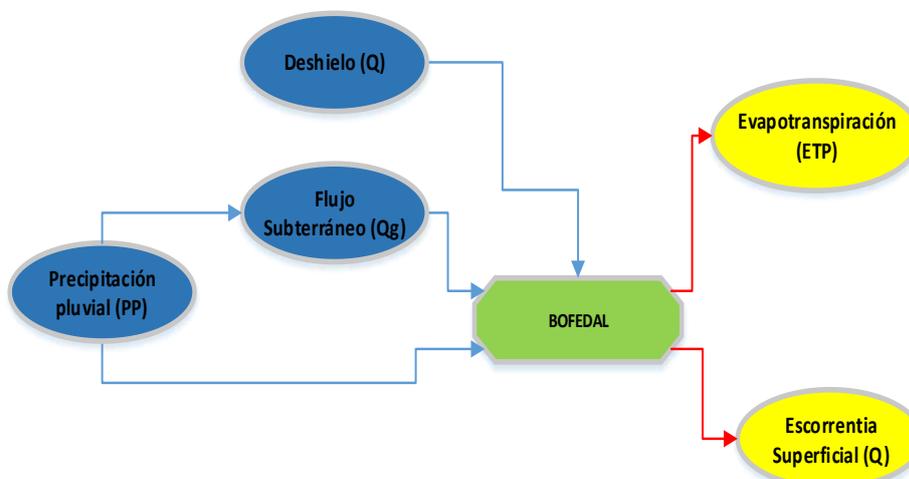


Figura 25: Balance hídrico cualitativo de un bofedal en época seca
Fuente: Elaboración propia

La figura 28 muestra el balance hídrico en la época húmeda (lluviosa) donde las fuentes hídricas de ingreso a un bofedal se dan mediante la precipitación pluvial (PP), el escurrimiento superficial proveniente de la precipitación, lagunas y ríos y las salidas se dan mediante la ETP y el escurrimiento superficial (Q) aguas abajo del bofedal.

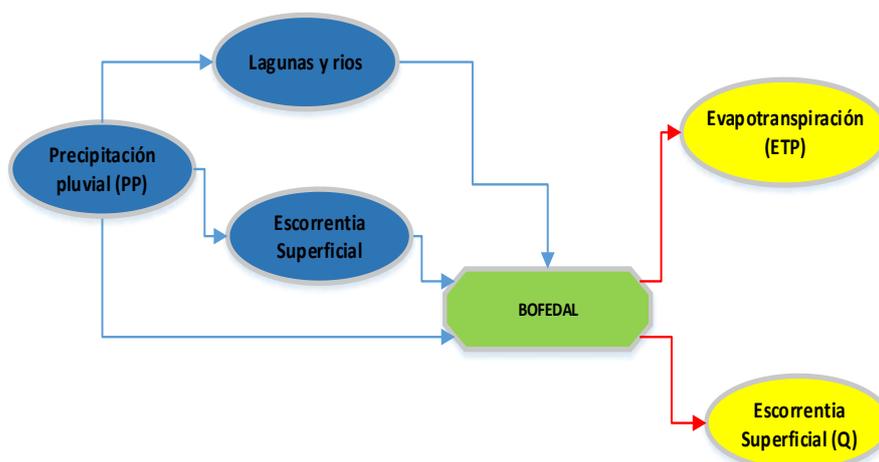


Figura 26: Balance hídrico cualitativo de un bofedal en época húmeda (Lluviosa)
Fuente: Elaboración propia

La creación de estos modelos se sustentan en la investigación realizada por (Montoya S. , 2016) donde afirma que los bofedales son zonas de descarga de aguas subterráneas.

En base a los dos modelos de balances hídricos realizados para las dos épocas podemos afirmar que la oscilación de los bofedales tiene una interacción con el flujo superficial y freático.

Habiendo hecho este análisis se realizó un modelo hidrológico cualitativo para lograr entender el ciclo hídrico en la cuenca Callancocha.

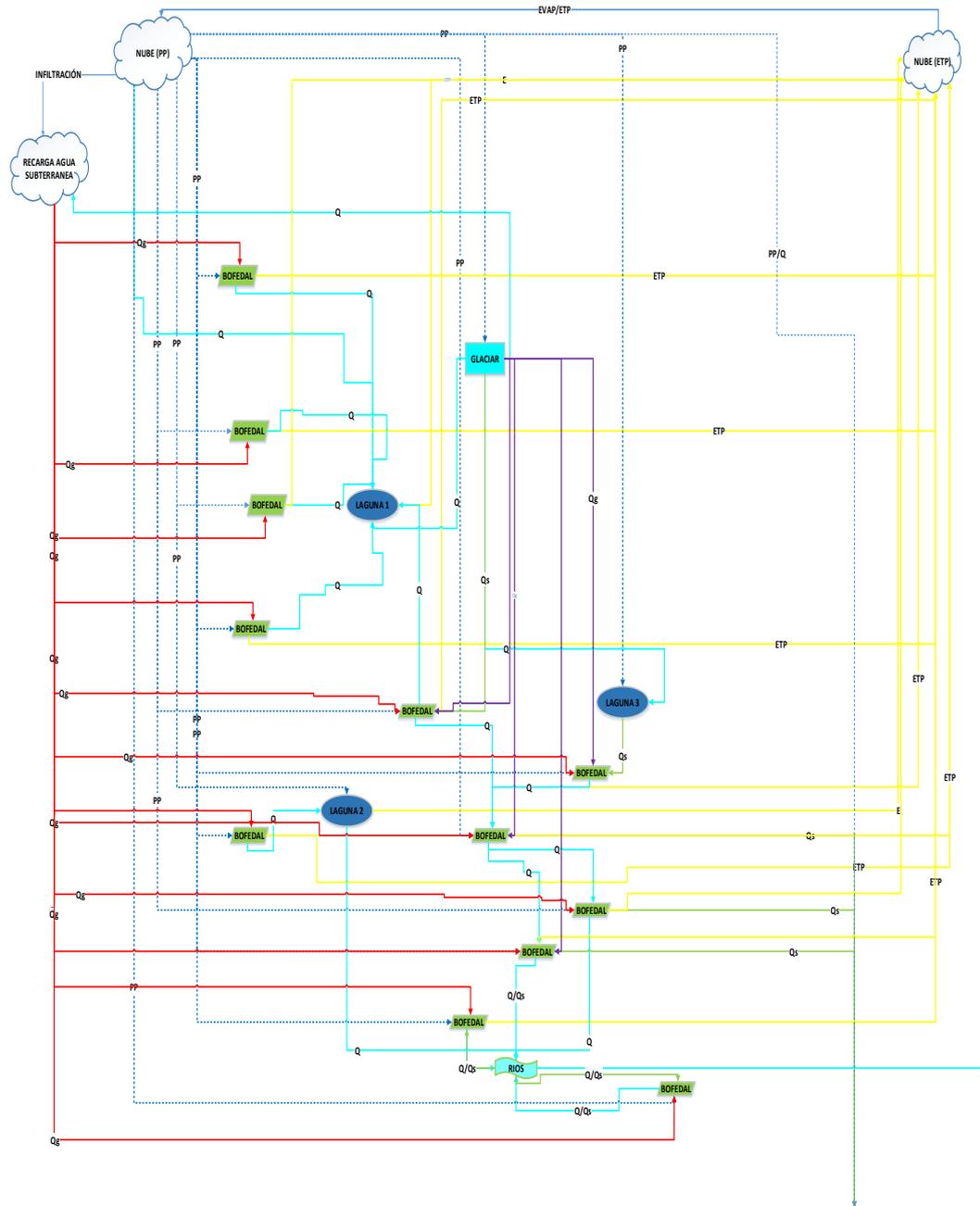


Figura 27: Representación cualitativa del modelo hidrológico de la cuenca Callancocha en la época seca
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en el modelo hidrológico cualitativo en la época seca nos permitieron afirmar que las principales fuentes hídricas de los bofedales cartografiados son los siguientes:

Los reservorios de aguas subterráneas recargados en la época húmeda es la fuente principal para la permanencia de los bofedales porque son humedales de descarga en las épocas secas y porque en la cuenca Callancocha se encuentran bofedales que dependen directamente de la precipitación pluvial ya sea en la época seca y húmeda y representan un 58 % del área total de la cuenca.

La precipitación pluvial de los meses de junio, julio y agosto al ser es máximo de 60 mm y no tiene la capacidad de infiltrarse en el flujo subterráneo pero si podría llegar hasta el flujo subsuperficial (interflujo) perdiéndose en esta zona por evaporación o evapotranspiración. A diferencia de la época húmeda donde la precipitación logra saturar el nivel freático y el suelo hasta generar la escorrentía superficial y recargar los bofedales mediante el flujo superficial.

Se estima que para el 2025 la superficie del glaciar Condoray llegara a 0.047 Km² este resultado se sustenta en la investigación realizada.

4.3. Validación de la extensión de los bofedales y glaciares

Para validar estas superficies se realizó un mapa en donde las superficies cartografiados en la presente investigación se llegaron a comparar con las superficies cartografiados en la (ZEE, 2013), (UGRH, 2018) e (INAIGEM, 2016) (**Mapa 2**)

Coincidiendo ambas superficies en el mismo lugar, lo que si se observó fue la escala a la que fueron cartografiados ambas superficies dificultando la identificación de algunos bofedales que se encuentran menor a la UMC con respecto al estudio realizado por la ZEE.

En la etapa de evaluación de la fiabilidad de los resultados se usaron las imágenes de alta resolución disponibles para el área de estudio en el programa SAS Planet sobre estas imágenes se identificaron visualmente los bofedales que servirían como puntos verdad-terreno a ser usados en la etapa de validación de los resultados.

CONCLUSIONES.

1. La superficie de glaciares en la Cuenca Callancocha para el periodo (1988 - 2017) es de 0.915 Km², el cual presenta una disminución del 79 % de lo existente en la cuenca.
2. El índice de desglaciación del Glaciar Condoray en la cuenca Callancocha para el periodo (1988 al 2017) es de 0.82 %/año encontrándose por debajo del 2%/año, pero es bueno mencionar que hasta el año 2016 se tuvo un índice de desglaciación de 4.86 %/año siendo el índice de desglaciación más crítico en el periodo de estudio.
3. La superficie de bofedales en la Cuenca Callancocha para el periodo de estudio (1988-2017) es de 2.99 Km² teniendo una tendencia de incremento leve desde el 1988 el cual presenta un crecimiento del 132 % de lo existente en la cuenca, además la máxima superficie encontrada en el periodo de estudio fue de 4.943 Km² en el año 2002.
4. El índice de permanencia de cobertura de los bofedales en la Cuenca Callancocha para el periodo (1988 al 2017) es de 0.97%/año presentando una tendencia de incremento en sus superficies.
5. No existe una relación entre la precipitación acumulada en la época seca y los bofedales cartografiados en la época seca porque los bofedales son ecosistemas que se encuentran en las zonas de descargas y están relacionados con las aguas subterráneas.
6. La relación entre la precipitación acumulada durante el año hidrológico y la superficie de glaciares es de 0.51 lo que indica que existe una relación directa positiva cuyo grado es moderado lo que quiere decir que a menor precipitación acumulada menor superficie glaciar y a mayor precipitación acumulada mayor superficie glaciar.
7. Los bofedales que se encuentran dentro del área de los glaciares no son dependientes del agua proveniente del deshielo de estos glaciares.
8. Los reservorios de aguas subterráneas recargados en la época de lluvias y húmeda es la fuente principal para la permanencia de los bofedales por encontrarse en zonas de descarga en las épocas secas y porque en la cuenca Callancocha se encuentran bofedales que dependen directamente

de la precipitación pluvial ya sea en la época seca y húmeda y representan un 58 % del área total de la cuenca.

9. Se estima que para el 2025 la superficie del glaciar Condoray llegara a 0.047 Km²

RECOMENDACIONES

1. Para obtener mejores resultados al momento de cartografiar las superficies de glaciares, se recomienda emplear el Ratio Imagen (b4/b5) juntamente con el NDSI con la finalidad de poder diferenciar la nieve del hielo en las imágenes satelitales.
2. Para determinar el índice de desglaciación se recomienda identificar la superficie mínima registrada en el periodo de estudio con la finalidad de estimar el índice más crítico.
3. Se sugiere utilizar el índice del agua (NDWI) y el índice del infrarrojo (NDII) juntamente con el índice de vegetación (TTVI) al momento de realizar la identificación de los bofedales, con la finalidad de poder cartografiar mejor las superficies y tener valores más exactos que permitan estudiar la caracterización ecohidrológica de estos bofedales para entender su dependencia hídrica.
4. Para entender mejor el comportamiento dinámico de las superficies observadas y su relación con la precipitación se sugiere cartografiar a los bofedales durante dos épocas, uno en la época seca durante los meses de Junio, Julio y agosto y el otro en la época de lluvias durante los meses de Marzo, Abril y Mayo en vista que el factor principal que influye en las superficies es el Fenómeno de la Niña y el Niño.
5. Se recomienda realizar un análisis hidrogeológico para trabajar a nivel de cuenca hidrológica en vista que los bofedales tienen mayor interacción con el flujo subterráneo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alva H., M., & Meléndez C, J. (2009). *Aplicación de la teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciaria en la Cordillera Blanca*. Lima: UNMS - Laboratorio de Teledetección.
- Alva, M., & Meléndez, J. (2009). *Aplicación de la teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciaria en la Cordillera Blanca*. Lima.
- Alzérreca, H., Prieto, G., Cardozo , A., & Céspedes, J. (2001). *Estudio de la capacidad de carga en bofedales para la cría de alpacas en el sistema Titicaca*. Desaguadero.
- Arroyo A., J. (2015). *Efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de Nieve de los glaciares centrales del Perú*. Huancayo: Instituto Geofísico del Perú.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: American Elsevier.
- Buitro A., C., & Fernández C., J. (2012). *Estudio esocial multitemporal de variaciones en superficie observadas a través de imágenes satelitales Landsat en una región del Parque Nacional Sajama*. Bolivia: Edit. Biothaw.
- CAN, C. (2015). *Glaciares Andinos*. Latinoamerica: Nodo Regional de Climate Action Network International .
- Castro, A., Vargas, J., & Bequer, P. (2014). *Identificación de los cambios en la superficie de los bofedales de Apolobamba, utilizando herramientas de análisis geoespacial*. Apolobamba: Solucionaria Prácticas.
- CEPES, C. (2015). *Conflicto entre Ica y Huancavelica por el agua*. Lima: CEPES PERU.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. New York.
- Chuvienco, E. (1995). Madrid: Ediciones RIALP S.A.
- Convención de Ramsar. (2010). *Inventario de humedales: Marco de Ramsar para el inventario y la descripción de las características ecológicas de los humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales*. Suiza: Secretaria de la Convención Ramsar.
- Cuffey, K., & Paterson, W. (2010). *The Physics of Glaciers*. USA: Elsevier.

- Escuer, J. (2007). *Análisis multitemporal mediante el uso de imágenes del satélite Landsat*. Innovación y formación Otoño.
- Favier, V., Wagnon, P., Chazarin, P., Maisincho, L., & Coudrain, A. (2004). *One year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana Glacier*. Ecuador: Journal of Geophysical Research 109.
- Francou, B. (2013). *Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. Francia.
- Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J., & Silvestre, E. (2015). *Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático - PRAA*. America Latina: CAN-PRAA-IRD.
- FUNDACIÓN AQUAE. (2015). *Glaciares, parte esencial del ciclo del agua*.
- García, E., & Llellish, M. (2012). *Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú*. Perú: Revista de Teledetección.
- García, E., & Otto, M. (2013). *Evaluación de bofedales en la cabecera de cuenca del río Santa*. Recuay: Edit. ANA Perú.
- García, E., & Otto, M. (2015). *Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de Cuenca del río Santa*. Lima: UNALM - Departamento Académico de Biología.
- García, J., & Willems, B. (2015). *Metodología para el estudio de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Usando Datos Imágenes Satelitales de los Sensores TM, OLI a bordo de los satélites Landsat - Caso Estudio: Bofedal Chunal, Cuanca Alta del Río Chillón*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lab. Teledetección.
- García, L., Willems, B., & Espinoza, R. (2015). *Metodología para la Teledetección de Bofedales en Cabeceras de Cuenca usando datos imágenes satelitales Landsat*. Lima.
- Gates, D. (1965). *Spectral properties of plants*. Applied Optics.
- GIDAHATARI, C. (2016). *El ciclo hídrico en cuencas andinas*. Lima: Hatari-Tolks.
- Hall, D., & Martinec, J. (1985). *Remote sensing of ice and snow*. London: Chapman and Hall.
- HIDRANDINA S.A. . (1989). Peru.

- Hofman, D., & Requena, C. (2012). *Bolivia en un mundo 4 grados más caliente. Escenarios sociopolíticos ante el cambio climático para los años 2030 y 2060 en el altiplano norte*. La Paz-Bolivia.
- <http://acobambilla.blogspot.pe/2012/10/clima-geografia.html>. (2010).
- INAIGEM, I. (2016). *Diagnóstico de la situación actual en el Glaciar Condoray - Cordillera Chonta*. Huaraz: Dirección de Investigación en Glaciares - MINAM.
- INEGI, I. (2010). *Aspectos Técnicos de las Imágenes Landsat*.
- INGEMMET, I. (1970). *Geología de los cuadrangulos de Mala, Lunahuá, Tupe, Conayca, Chincha, Tantará y Castrovirreyna*. Lima.
- IPCC, G. S. (2001). *Tercer Informe de Evaluación "Impactos, adaptación y vulnerabilidad"*. Nairobi: PNUMA - OMM.
- Kaser, G., Fountain, A., & Jansson, P. (2003). *A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers*. París - Francia: UNESCO.
- Knipling, E. (1970). *Physcal and Physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation*. Remote Sensing of Environment.
- Kohler, T., & Marselli, D. (2009). *Mountains and climate change-from understanding to action*. Berna: Geographica Bernensia.
- Landis, & Koch. (1977). *Valoración de coeficientes Kappa*.
- Leavsley, G., Lichty, R., Troutman, B., & Saindon, L. (1983). *Precipitation-runoff modeling system*. New York: U.S. Geological Survey Water Resources.
- López, M., & Caselles, V. (1989). *A multi-temporal study of chlorophyll A concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain using Thematic Mapper data*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 11.
- Maestro C., I., & Recio R., J. (2004). *Análisis comparativo de los distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragónes a partir de Imágenes Landsat*.
- Marais, K. (2006). *Vegetación Index*.
- Medina, G., & Mejia, A. (2014). *Análisis multitemporal y multifactorial de la deglaciación de la Cordillera Parón en los andes del Perú*. Lima: UNALM.
- Menzies, J. (1995). *Modern Glacial Environments: Processes, Dynamics and Sediments: Glacial Environments*. Oxford, U.K.

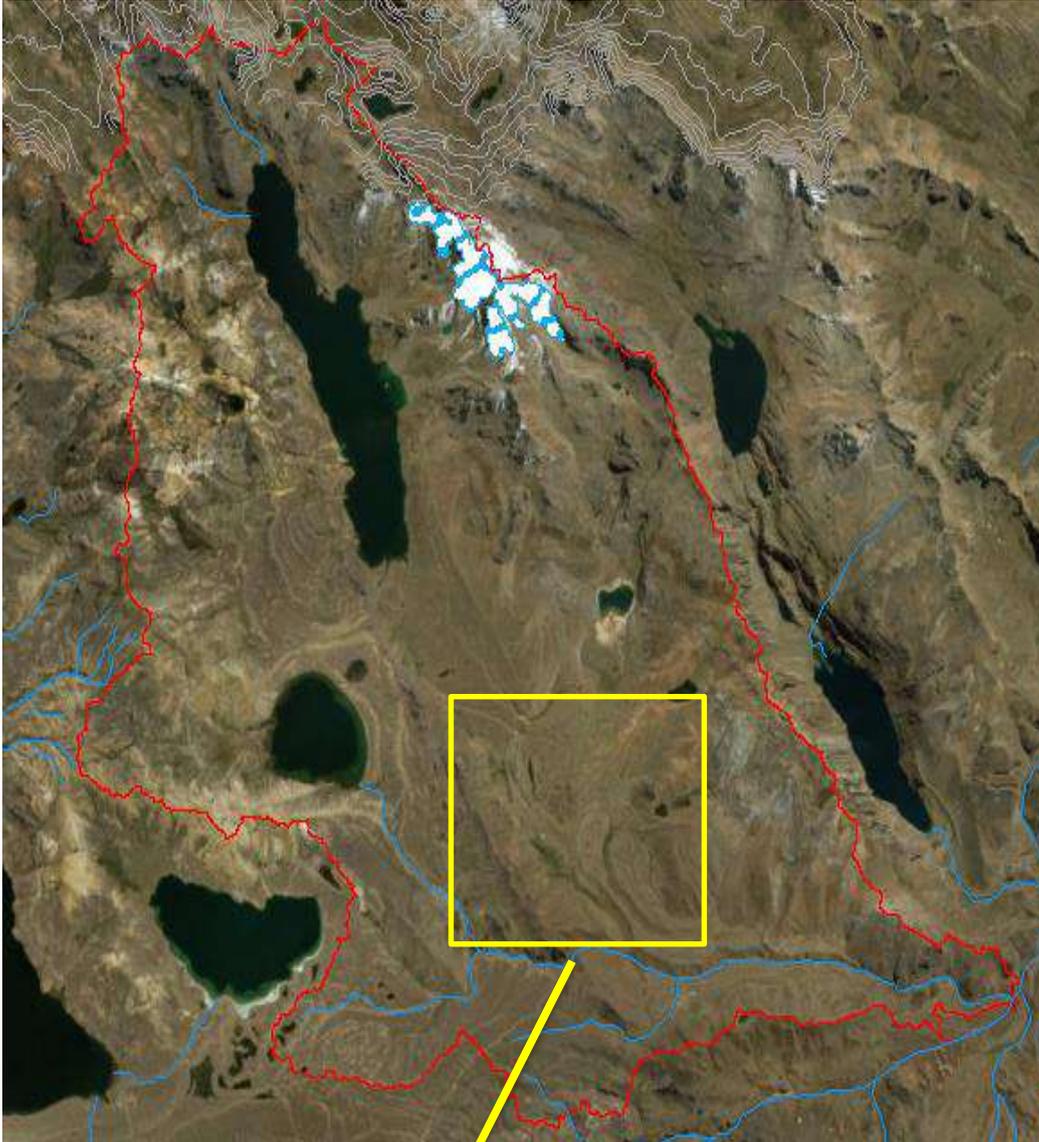
- MINAM, V. R. (2015). *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal - Memoria Descriptiva*. Lima: Imprenta TIPSAL S.A.C.
- Montoya, S. (2016). *5 cosas que no sabias de los bofedales*. Lima: GIDAHATARI.
- Montoya, S. (2017). *8 Claves para hacer tu Tesis en Modelamiento Hidrológico Distribuido*. Lima: GIDAHATARI.
- Murtha, J. (1978). *Remote Sensing and vegetation damage a theory for detection and assessment*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
- Ocaña V., J. (2016). *Análisis Situacional del bofedal de origen glaciar en la quebrada de Santa Cruz, una mirada desde el INAIGEM Huaraz*. Huaraz: Edit. Cesar Vallejo.
- Oseida . G., D. (2015). *Metdologías de la Investigación Científica en estudiantes*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Peru.
- P. Peña, R. O., & T. Mendoza, L. A. (2013). *Efecto de la desglaciación del Nevado Huaytapallana sobre el Rendimiento Hídrico - Sub cuenca Rio Shullcas influenciado por la Variación Climática 1985 - 2011*. Huancayo: UNCP - Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente.
- Pineda, N.; Jorge, J.; Matí, G.; García, C.; Tarruella, R. (2005). *Dinámica del mnto nivoo en el Pirineo: Seguimiento con Spot-Vegetación de los años 1998 - 2003*. Puerto de la Cruz: XI Congreso Nacional de Teledetección.
- Quenta, E., Molina , J., Gonzales, K., Rebaudo, F., Casas, J., Jacobsen, D., & Dangles, O. (2016). *Direct and indirect effects of glaciers on aquatic biodeversity in high Andean peatlands*. Global Change Biology.
- Quiroz, R., & Saatchi, S. (1999). *Mapping Aquatic and Agricultural Vegetación of Altiplano, Agriculture and Agroforestry _Management*. Lima: CIFOR.
- Ranga, B., Forrest G, H., Piers J, S., & Marshak, A. (1995). *The interpretation of pectral vegetation indexes*.
- Richardson, A., & Wiegand, C. (1977). *Distinguishing Vegetation from Soil background information*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2016). *Balance de masa glaciar*. Chile: Ediciones CECs.
- Robinson, I. (1985). *Satellite Oceanography. An Introduction for Oceanographers and Remote Sensing Scientist*. Chichester: Jhon Wiley.

- Rodriguez, A. (2005). *La densidad de dosel forestal, como una nueva alternativa para la estratificación de los bosques en el Valle del Sacta*. Cochabamba - Bolivia: UNMSM.
- Schomwandt, D. (2015). *Teledetección Aplicada a las Ciencias Naturales Agronómicas y Recursos Naturales*. Buenos Aires .
- Selker, J., Keller, C., & McCord, J. (1993). *Vadosre zone processes: Boca Raton*. SERNANP - RPNYC, R. (s.f.).
- Silverio, W., & Jaquet, J. (2005). *Mapeo de cobertura glaciar de la cordillera Blanca (Perú) utilizando imágenes satelitales*. Perú: Teledetección del Medio Ambiente.
- Smith, R., & Hebbert, R. (1983). *Mathematical simulation of interdepent surface and subsurface hydrologic processes*.
- Squeo, F., Warner, G., Aravena , R., & Espinoza, D. (2006). *Bofedales:high altitude peatlands of the Central Andes*. Chile: Revista Chilena de Historia Natural.
- Stocker, T., Quin, D., Plattner, K., Boschung, A., & Nauels, A. (2013). *Glosario "Cambio Climático" Contribución del Grupo de trabajo al Quinto informe de Evaluación dell Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Reino unido: IPCC.
- Thiam, A. (1997). *Geographic Information Systems and Remote Sensing Methods for Assessing and Monitoring Land Degradation in the Sahel*. Massachusetts: Clark University.
- Treacy, J. (1994). *Las chacras de Coporaque, andenería y riego en el Valle del Colca*. Lima: Instituto de Estudios Peruanos.
- TUNUPA. (2010). *Glaciares, Agua y Biodiversidad*. La Paz - Bolivia: Fundación Solón.
- UGRH, U. A. (2018). *Inventario de Glaciares a nivel nacional durante el año hidrológico 2016-2017*. Lima.
- USGS, I. (2005). *GSFLOW - Coupled Ground Water and Surface Wather Flow Model Based on the integratión of the Precipitation Runoff, Modeling System (PRMS) and the Modular Ground Water Flow Model*. Estados Unidos.

- VanderKwaak, J. (1999). *Numerical simulation of flow and chemical transport in integrated surface-subsurface hydrologic systems*. Canada: University of Waterloo.
- Vilacis, M., Condom, T., & Soruco, A. (2002). *LMI Glaciares y Recursos Hídricos en los Andes Tropicales : Indicadores de Cambios Ambientales*. Intitute Research Development.
- Villon B., M. (2002). *Hidrología*. Lima: MaxSoft.
- Vitt, D. (2008). *Peatlands*. Ecosystem Ecology Elsevier.
- Vorosmartry, C. (2009). *The earth´s natural water cycles*. París: UNESCO.
- Yager, K., Resnikowski, H., & Halloy, S. (2008). *Grazing and climatic variability In Sajama National Park*. Bolivia.
- Zeballos, G., Soruco, A., Cusicanqui, D., Joffré, R., & Rabatel, A. (2014). *Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia*. La Paz - Bolivia.
- Zedler, J., & Kercher, S. (2005). *Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability*. Annual Review of Enviromental.
- ZEE, M. H. (2013). *Estudio temático de Cobertura Vegetal*. Huancavelica: Gobierno Regional de Huancavelica.

ANEXOS

Anexo 1 : Esquema general de la zona de estudio, los cuadros muestran una ampliación de la ubicación del bofedal piloto "Puituco" y los puntos tomados en campo para determinar los valores de TTVI



BOFEDAL PILOTO

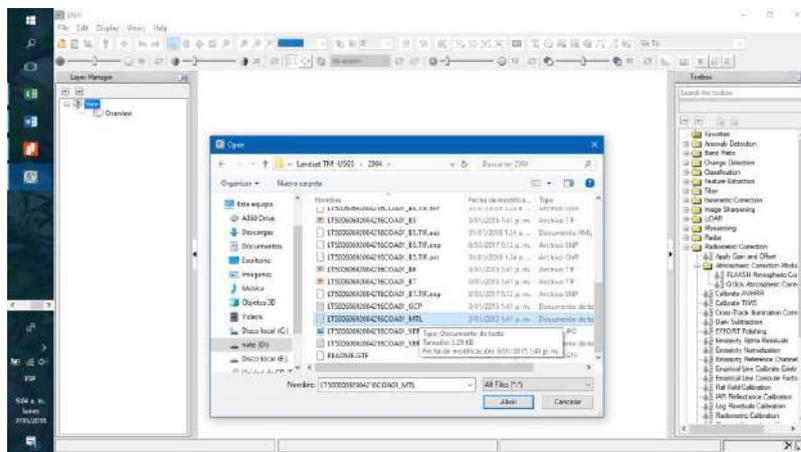
Anexo 2: Descripción detallada de la metodología utilizada para el procesamiento digital de imágenes (PDI)

Fechas de adquisición de las Imágenes Landsat

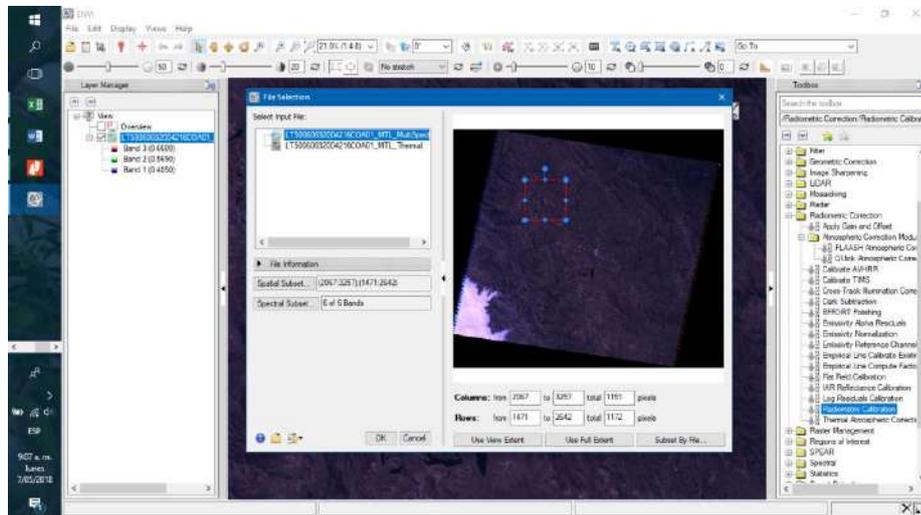
AÑO	FECHA DE ADQUISICIÓN	AÑO	FECHA DE ADQUISICIÓN
1988	7/08/1988	2004	3/08/2004
1989	11/09/1989	2005	3/06/2005
1990	13/08/1990	2006	9/08/2006
1993	5/08/1993	2007	12/08/2007
1994	5/06/1994	2008	27/06/2008
1995	11/08/1995	2009	17/08/2009
1996	26/06/1996	2010	19/07/2010
1997	13/06/1997	2011	7/08/2011
1998	3/08/1998	2013	12/08/2013
1999	6/08/1999	2014	14/07/2014
2001	11/08/2001	2015	2/08/2015
2002	21/07/2002	2016	4/08/2016
2003	1/08/2003	2017	7/08/2017

Fuente: Elaboración propia

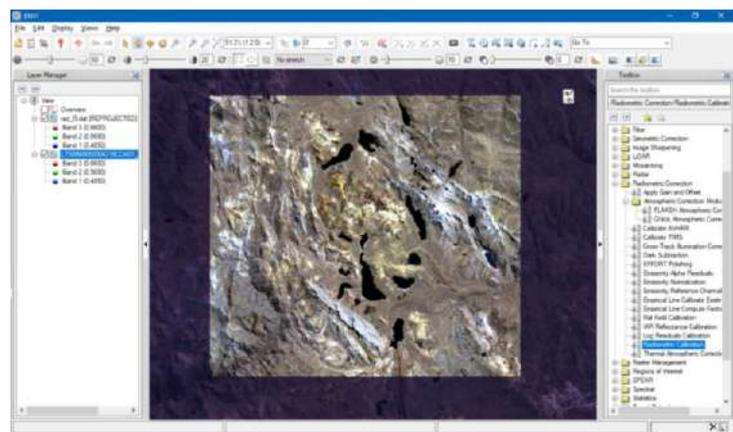
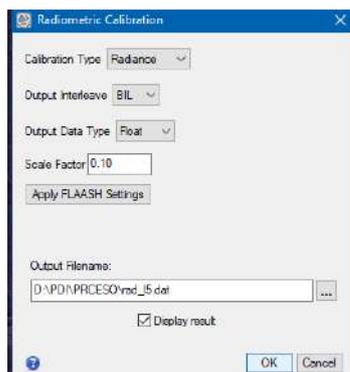
1.- Clic en **FILE / OPEN** y cargamos el archivo **MTL** de la imágenes satelital que queremos corregir.



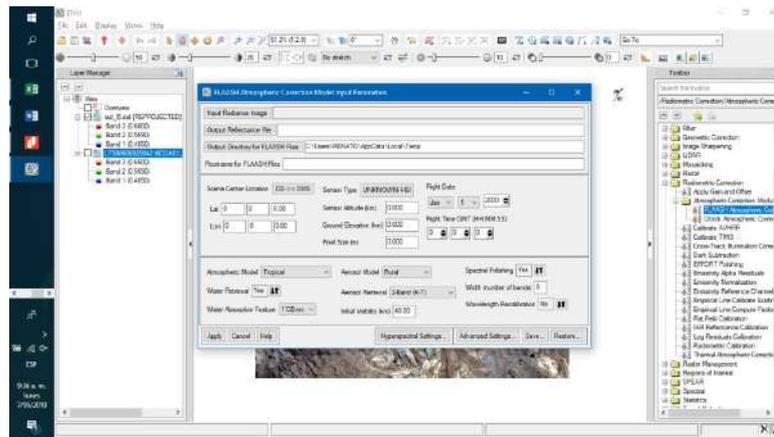
2.- Una vez cargado el **MTL** abrimos la herramienta **RADIOMETRIC CALIBRATION** y para que el procesamiento sea más rápido hacemos clic en **SPATIAL SUBSET** para delimitar nuestra área de estudio, luego clic en **OK**.



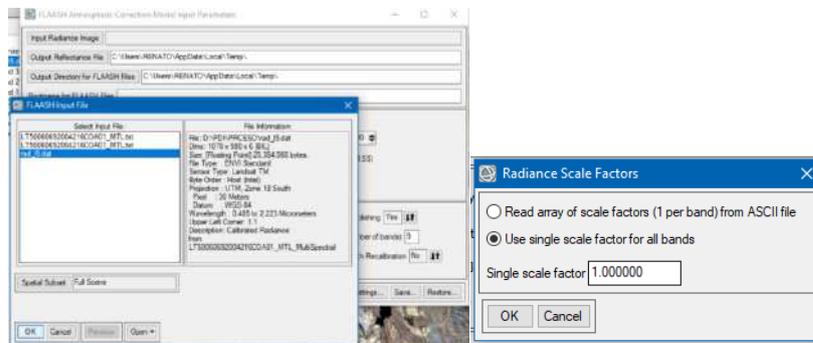
3.- En la siguiente ventana seleccionamos en el siguiente orden **RADIANCE/BIL/FLOAT/0.10** clic en **APPLY FLAASH SETTINGS**, direccionamos la salida de nuestro proceso y finalmente clic en **OK**. Culminado el proceso deberá presentar esta apariencia la imagen.



4.- Para la corrección atmosférica hacemos clic en la herramienta **FLAASH Atmospheric Correction**.



Input Radiance: Seleccionamos la imagen rad_L5 y hacemos clic en **USE SINGLE SCALE FACTOR FOR ALL BANDS**



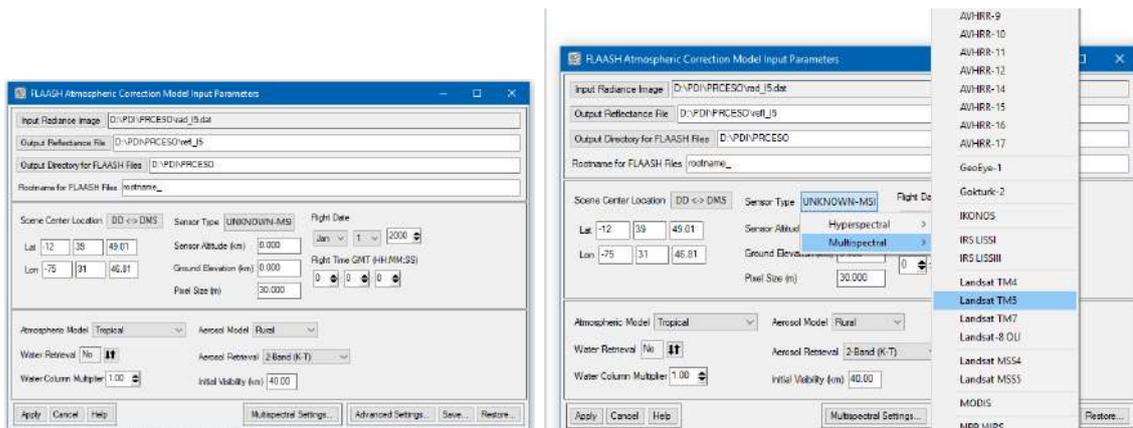
Output Reflectance File: Guardamos con el nombre **reflec_L5**

Output Directory for FLAASH Files: Guardamos con el nombre **FLAASH** en la misma carpeta de **reflec_L5**.

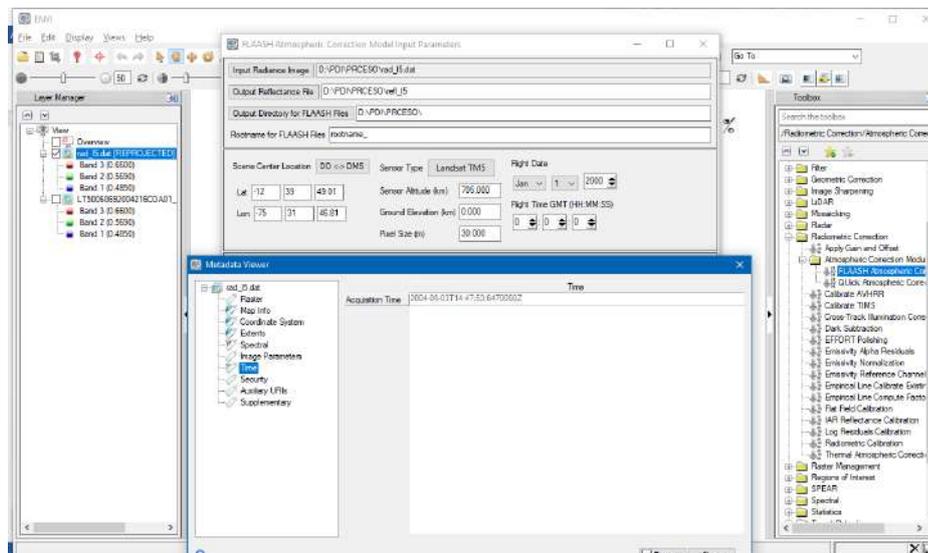
Rootname for FLAASH Files: Escribimos **Rootname_**

5.- **Scene Center Location:** ponemos las coordenadas del área de estudio de preferencia un punto en el medio de la imagen.

6.- **Sensor Type:** Seleccionamos **Multispectral / Landsat TM5** y en **Ground Elevation (Km)** ponemos la altitud promedio del área de estudio, para la presente investigación es **4.2**



7.- Para rellenar **Flig Date** tenemos que ir al Metadata Viewer de la imagen. Y copiamos la fecha y hora de adquisición de la imagen satelital.



8.- En los Datos para determinar el modelo seleccionamos lo siguiente.

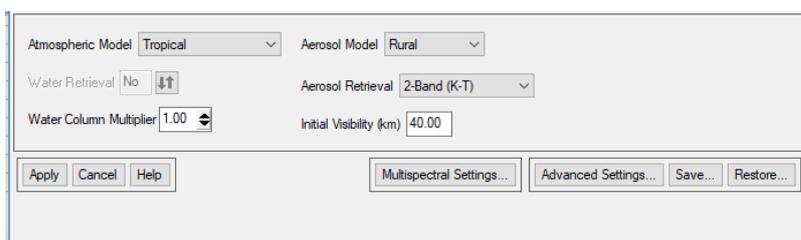
Atmospheric Model: Tropical

Water Column Multiplier: 1.00

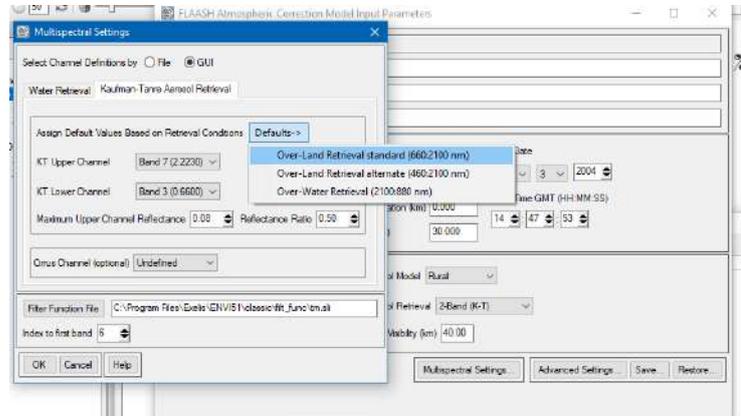
Aerosol Model: Rural

Aerosol Retrieval: 2-Band (K-T)

Initial Visibility (Km): 40.00

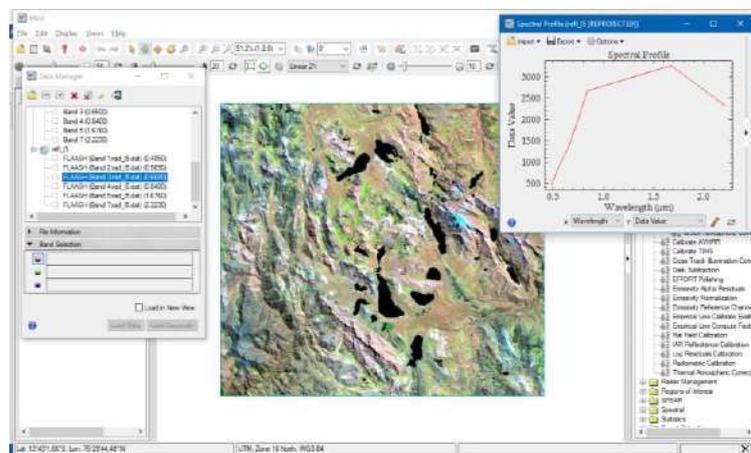


9.- Hacemos clic en **Multispectral Settings** para realizar los ajustes en las bandas espectrales.



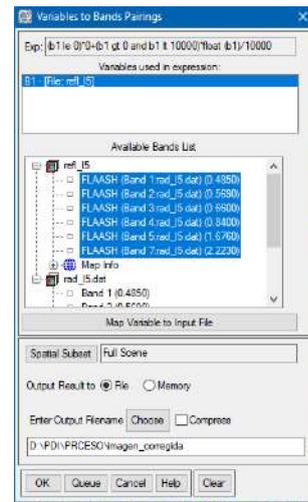
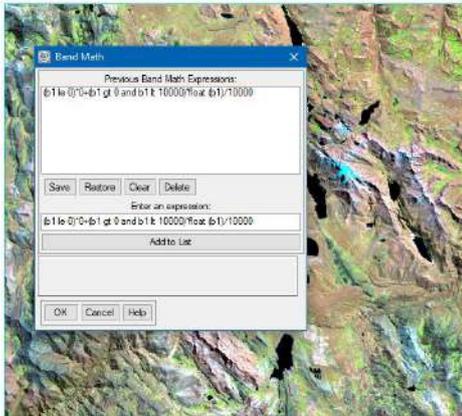
Clic en **Kaufman-Tanre Aerosol Retrieval** y en **Defaults** seleccionamos **Over-Land Retrieval standard (660:2100 nm)** y **OK** y **Apply**.

Apariencia de la ventana al finalizar la corrección.



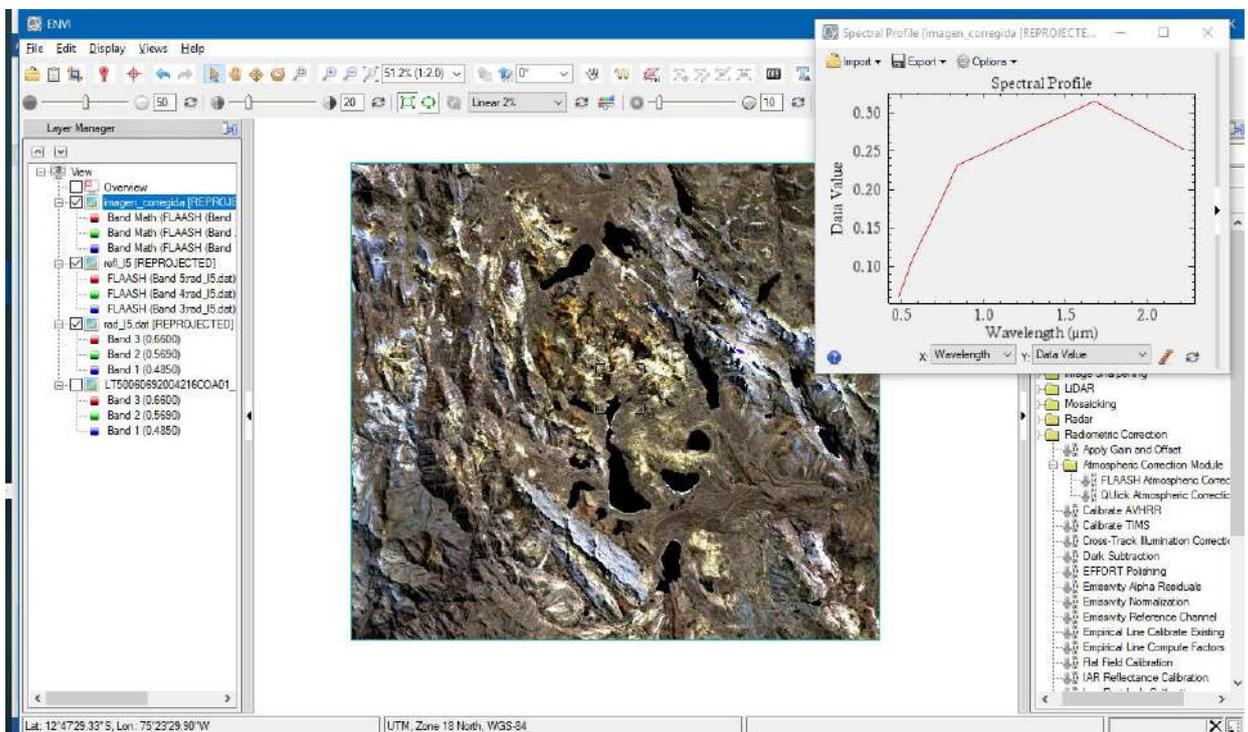
10.- Vemos que los valores de reflectancia nos dan de 0 a 3500 aproximadamente, para trabajar con índices espectrales es necesario realizar una conversión de estos valores para lo cual hacemos clic en la herramienta **BAND MATH** y copiamos la siguiente ecuación.

$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 > 0 \text{ and } b1 \leq 10000) * \text{float}(b1) / 10000$, Clic en **Add List** y **OK**



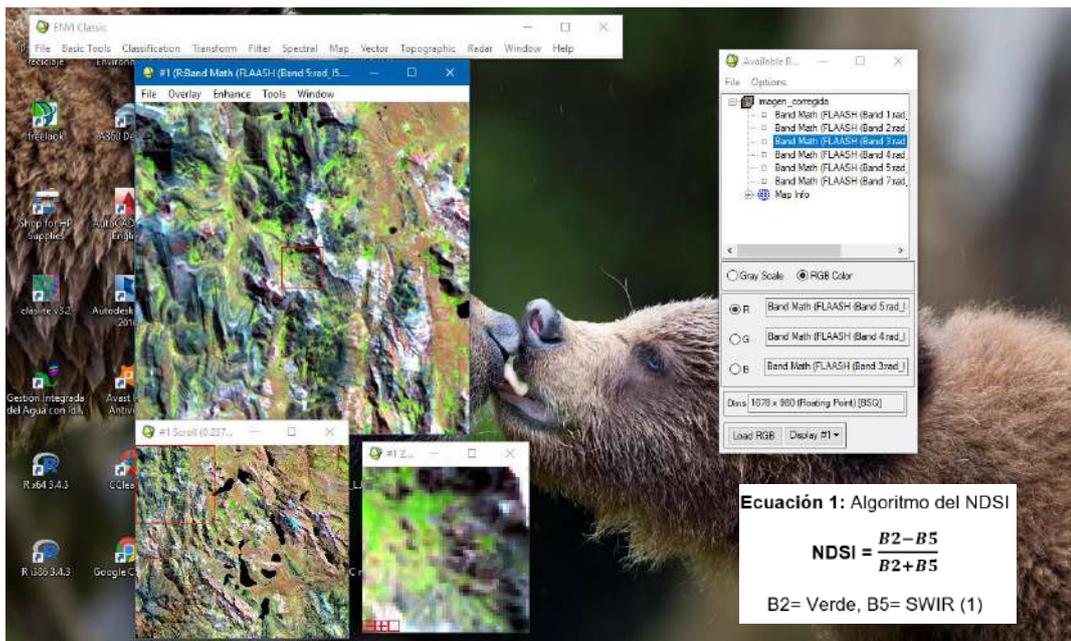
Seleccionamos los datos de reflectancia (refl_L5), y guardamos el proceso en una carpeta asignandole el nombre de (imagen_corregida) y **OK**.

Para verificar el proceso se mostrará la siguiente ventana en donde se muestra que los valores de reflectancia han sido cambiados y se encuentran en un rango de **0 a 1**.

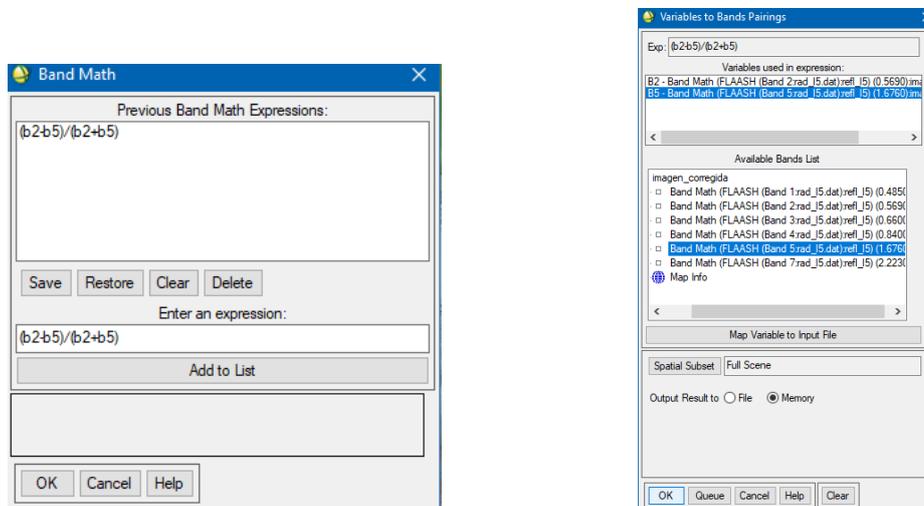


Anexo 3: Descripción detallada de la metodología utilizada para la identificación y delimitación de coberturas glaciar.

1.- Para identificar los Glaciares se utilizó el NDSI y esta ecuación se realizó en el **BAND MATH**. Abrimos el **ENVI CLASSIC** cargamos la imagen corregida (imagen_corregida.hdr) y lo representamos en el **RGB**.

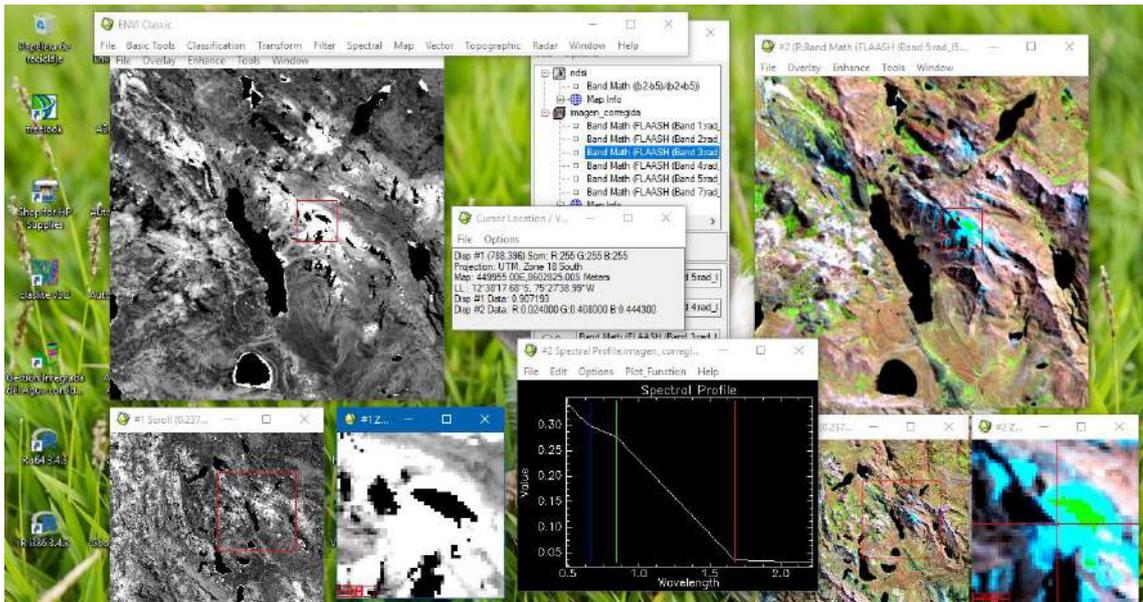


2.- En **BAND MATH** escribimos la ecuación y **Add to List** para seleccionar las bandas correspondientes y **OK** para realizar el proceso.

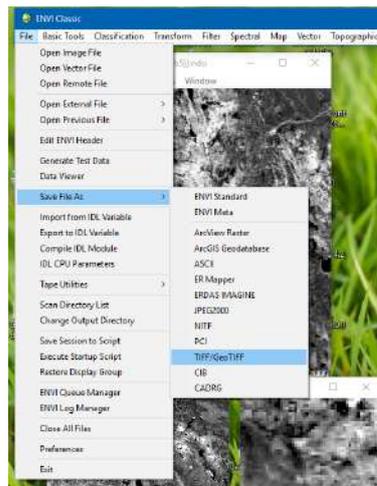


3.- Aquí se muestra el resultado del proceso y las características que debe tener la imagen para poder discriminar otros datos que no correspondan a los valores de reflectancia de los glaciares.

Se muestra en el **CURSOR LOCATION** los valores de reflectancia y en el cuadro se muestra la firma espectral del glaciar.

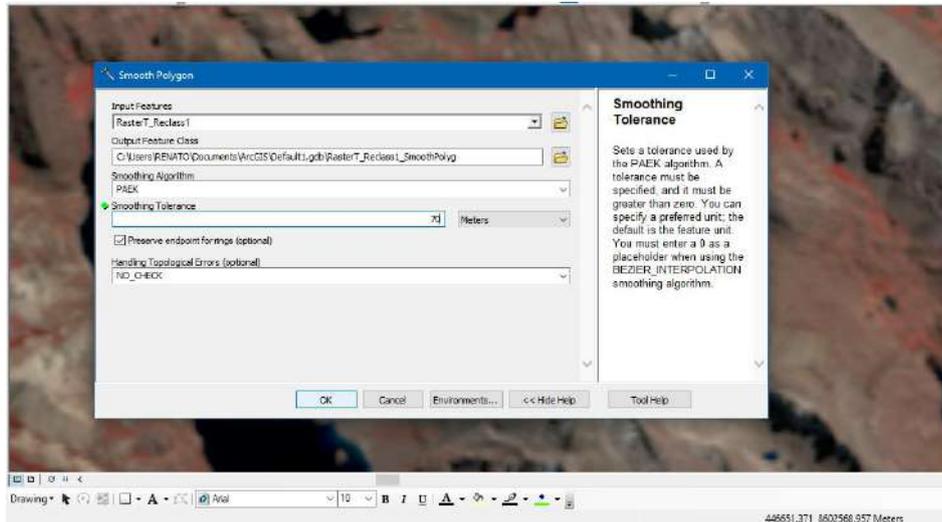


4.- Exportamos en formato **TIFF** o **GEOTIFF** haciendo clic en **FILE/SAVE FILES AS/TIFF-GeoTIFF**.



5.- En el Arc map abrimos la imagen exportada para reclasificar la imagen en dos rangos (-1 a 0.44) y (0.45 a 1) para ello empleamos la herramienta **SPATIAL ANALYST TOOLS/RECLASS/RECLASIFY** luego en **Classify** modificamos a 2

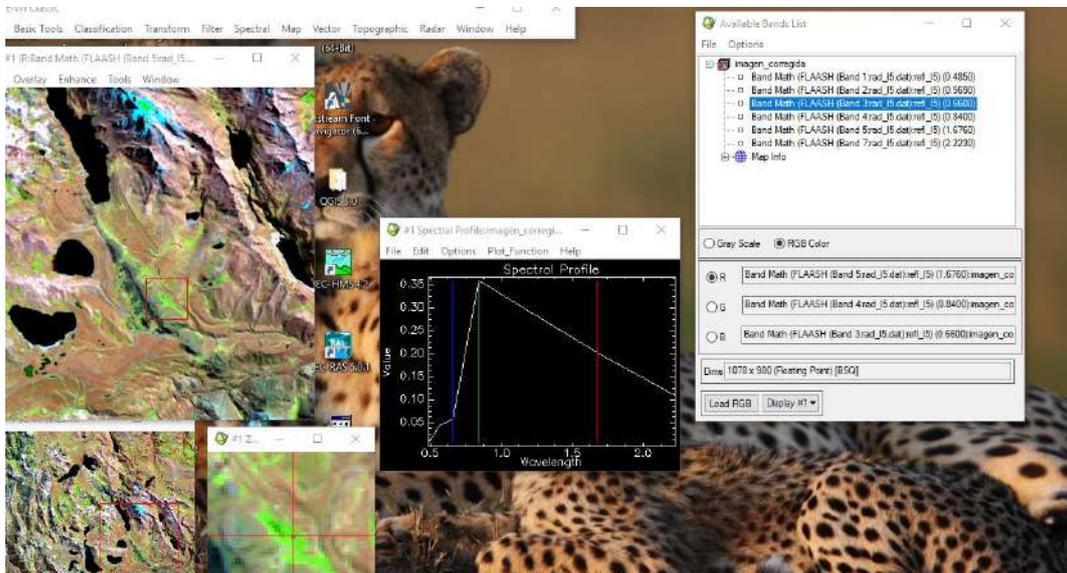
Seguidamente se realizará el suavizado de los poligonos con la herramienta SMOOTH POLYGON estableciendo el valor de 70 m tanto para bofedales y glaciares.



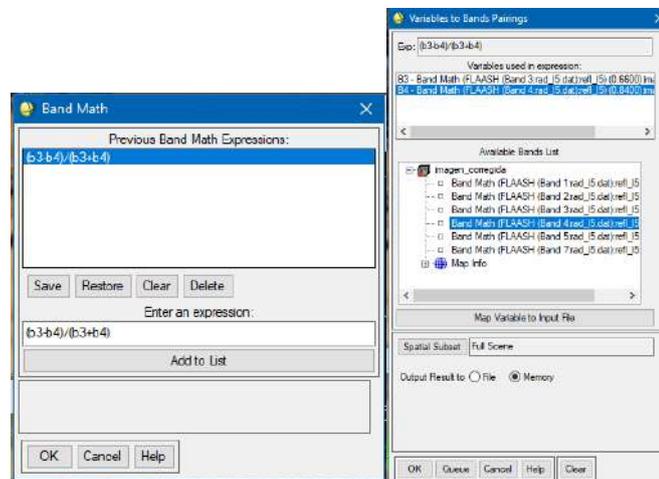
Anexo 4: Descripción detallada de la metodología utilizada para la identificación y delimitación de cobertura vegetal (bofedales)

Para la identificación y delimitación se realizó en base a dos índices espectrales (**NDVI** y **TTVI**) dicho proceso comienza con la aplicación de estos índices en el GIS.

1.- Para identificar los bofedales se utilizó el NDVI y esta ecuación se realizó en el **BAND MATH**. Abrimos el **ENVI CLASSIC** cargamos la imagen corregida (imagen_corregida.hdr) y lo representamos en el **RGB**.

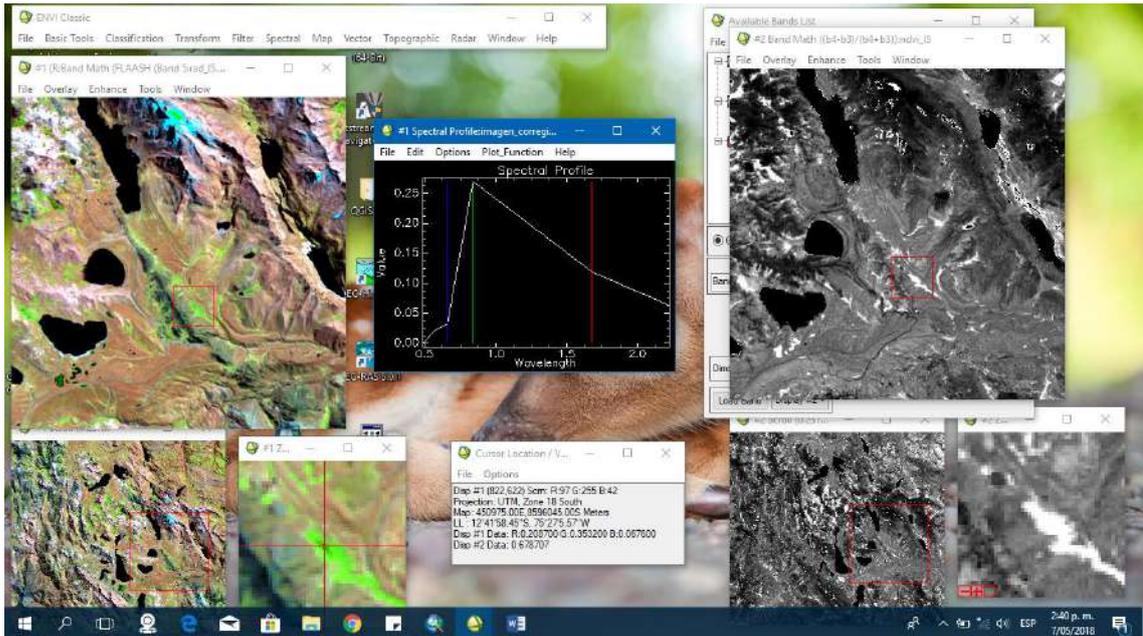


2.- En **BAND MATH** escribimos la ecuación y **Add to List** para seleccionar las bandas correspondientes y **OK** para realizar el proceso.

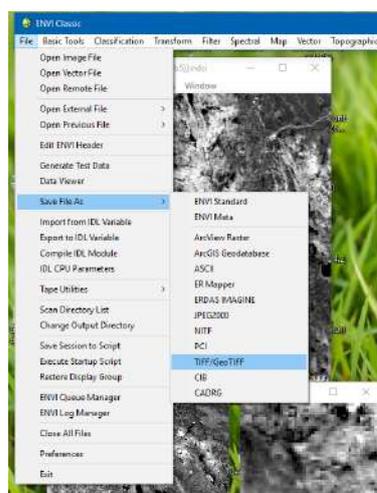


3.- Aquí se muestra el resultado del proceso y las características que debe tener la imagen para poder discriminar otros datos que no correspondan a los valores de reflectancia de los bofedales.

Se muestra en el **CURSOR LOCATION** los valores de reflectancia y en el cuadro se muestra la firma espectral del bofedal.

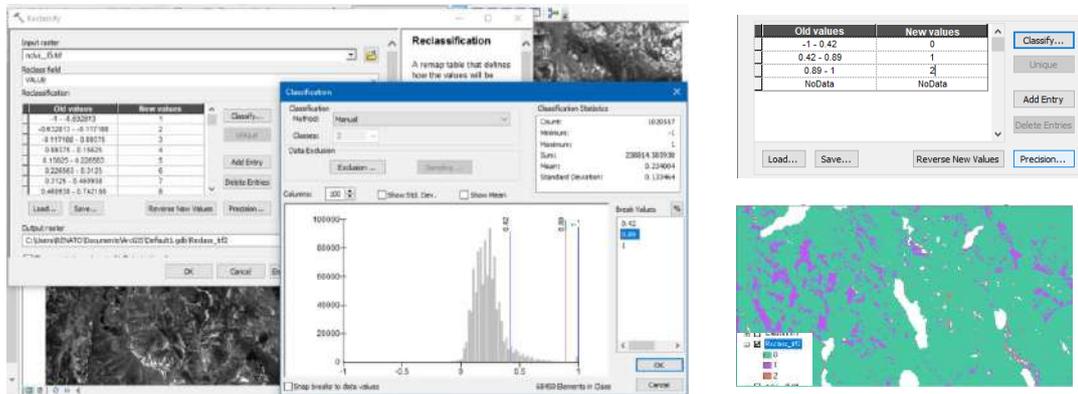


4.- Exportamos en formato **TIFF** o **GEOTIFF** haciendo clic en **FILE/SAVE FILES AS/TIFF-GeoTIFF**.

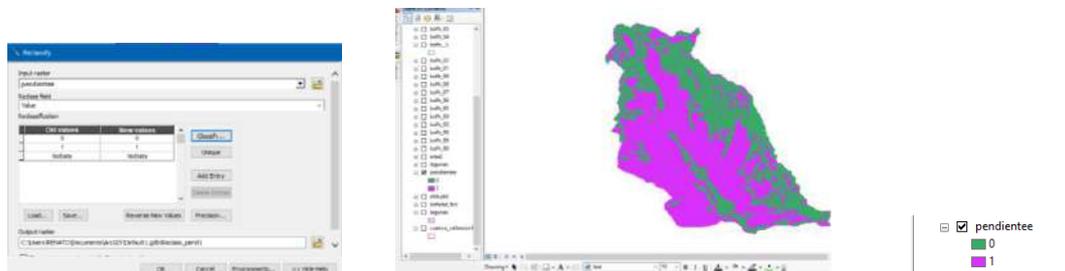


5.- En el Arc Map abrimos la imagen exportada para reclasificar la imagen en tres rangos determinados (-1 a 0.42) valor 1, (0.43 a 0.89) valor y (0.89 a 1) para

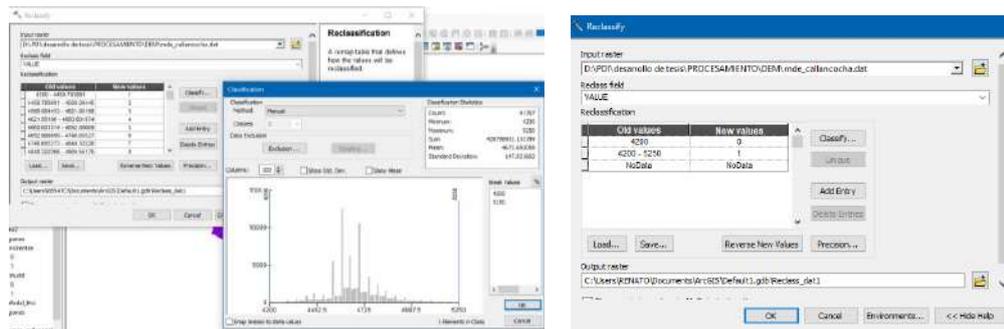
ello empleamos la herramienta **SPATIAL ANALYST TOOLS/RECLASS/RECLASIFY** luego en **Classify** modificamos a 3 y escribimos los rangos establecidos y **OK**.



6.- Otro de los criterios a tener en cuenta para la identificación de bofedales son los factores físicos (pendiente y altitud) para ello se tiene que realizar un mapa de pendientes mediante la herramienta **SLOPE** y luego clasificandolo con el **RECLASSIFY** en dos rangos (0 a 10 grados) valor 1 y de (11 a más) valor 0. Para este mapa es necesario tener listo el **DEM**.



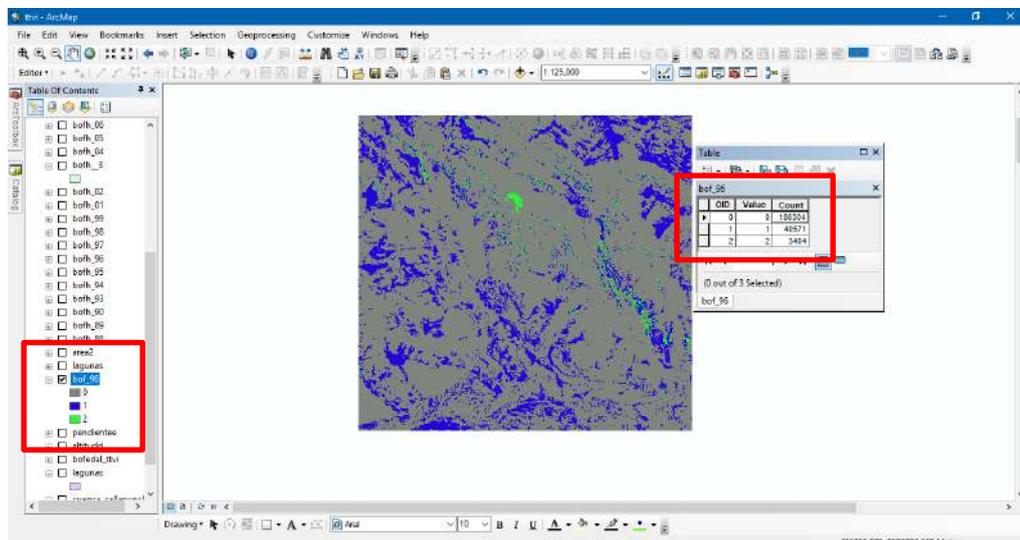
7.- Otro de los criterios a tener en cuenta para la identificación de bofedales son los factores físicos (pendiente y altitud) para ello se tiene que realizar un mapa de altitudes mediante la herramienta **RECLASSIFY** clasificandolo en dos rangos (0 a 3800 m.s.n.m.) valor 0 y de (3801 a más) valor 1. Para este mapa es necesario tener listo el **DEM**.



8.- Abrimos el **RASTER CALCULATOR** y realizamos la siguiente operación **(NDVI/TTVI * ALTITUD*PENDIENTE)**, en este proceso se hace un intersección de las tres capas **(NDVI/TTVI, ALTITUD Y PENDIENTE)** teniendo como resultado a los bofedales que cumplen con los criterios establecidos

```
("altitud" * "pendiente" * "ndvi_15.8f")
```

9.- En la tabla aparecen los valores de 0,1 y 2 y se visualiza en la siguiente figura que indica que todos los poligonos que tiene el valor de 1 cumplen con los criterios para ser bofedales.

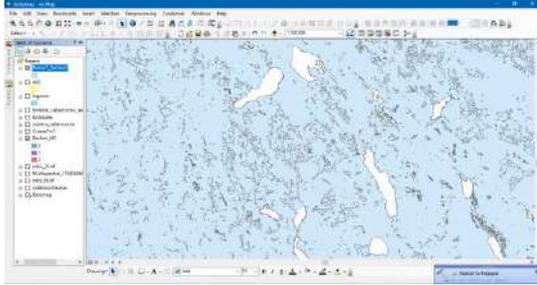


10.- a) Convertimos a **SHP** con la herramienta **RASTER TO POLYGON** para luego b) discriminar los **SHP** que no pertenecen a los bofedales mediante una análisis visual comparando el **SHP** y la imagen satelital y el uso de la tabla de atributos para eliminar aquellos poligonos que tienen el número 0 y 2 en el gridcode.

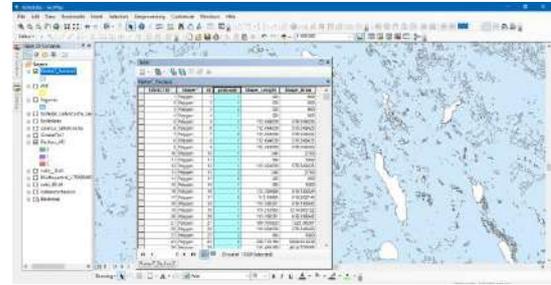
c y d) Para el estudio se establecio como área minima a considerar para la

identificación de bofedales a 0.81 Ha.

a)



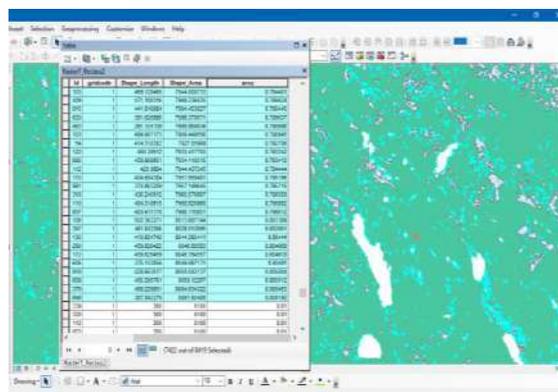
b)



c)

OBJECTID	Shape	ID	grndcode	Shape_Length	Shapo_Area
11250	Polygon	112	1	180	1850
11251	Polygon	112	1	430.498237	9572.252394
11251	Polygon	112	1	940.485437	28045.719933
11262	Polygon	112	1	459.829459	8046.784557
11263	Polygon	112	1	113.186763	616.283482
11264	Polygon	112	1	113.186763	616.283482
11268	Polygon	112	1	267.346954	5211.482091
11270	Polygon	112	1	2765.242554	148148.5819952
11271	Polygon	112	1	685.519305	29518.887243
11277	Polygon	112	1	3719.774208	139628.052048
11286	Polygon	112	1	2643.024841	82833.737113
11282	Polygon	112	1	120	960
11283	Polygon	112	1	112.484812	576.342773
11284	Polygon	112	1	269.303949	5060.825
11296	Polygon	112	1	180	1850
11298	Polygon	112	1	120	960
11298	Polygon	112	1	300	3600
11291	Polygon	112	1	470.977334	18586.290433
11282	Polygon	112	1	300	3600
11294	Polygon	112	1	112.484812	576.342773
11285	Polygon	112	1	112.484812	576.342773
11296	Polygon	112	1	244.999895	2986.888241
11291	Polygon	112	1	470.977334	18586.290433
11298	Polygon	112	1	300	3600
11298	Polygon	112	1	444.059793	19274.979377

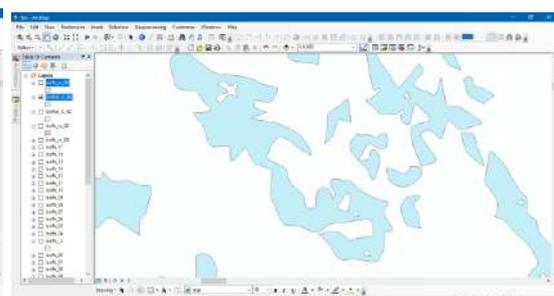
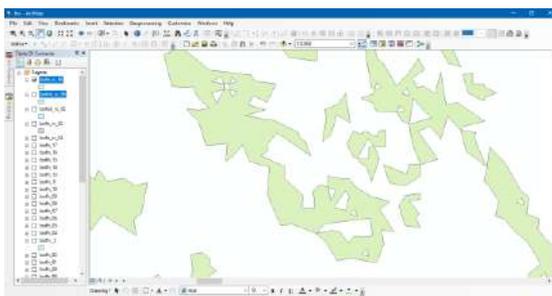
d)



11.- Para suavizar los poligonos se utiliza la herrramien **SMOOTH POLYGON** y finalmente se tiene la cobertura de los bofedales.

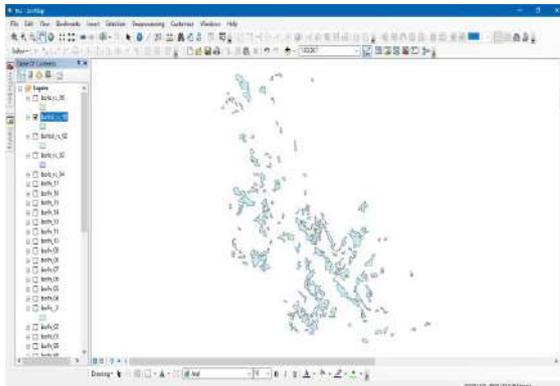
a) Poligono bruto

b) poligono suavizado

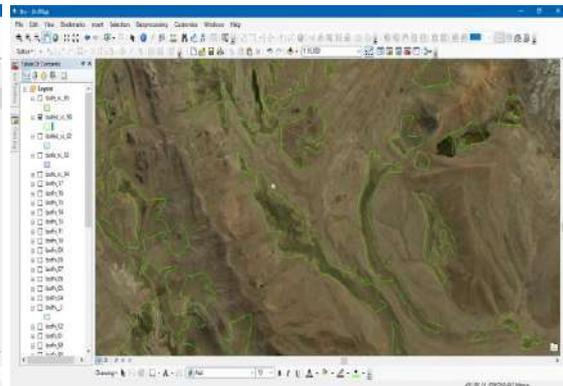


12.- Para validación de la Cobertura de bofedales se debe tener indentificado por los menos 5 bofedales pilotos debidamente georreferenciados y se debe contar con una imagen de alta resolución para realizar la discriminación de algunas áreas que no son bofedales

a)

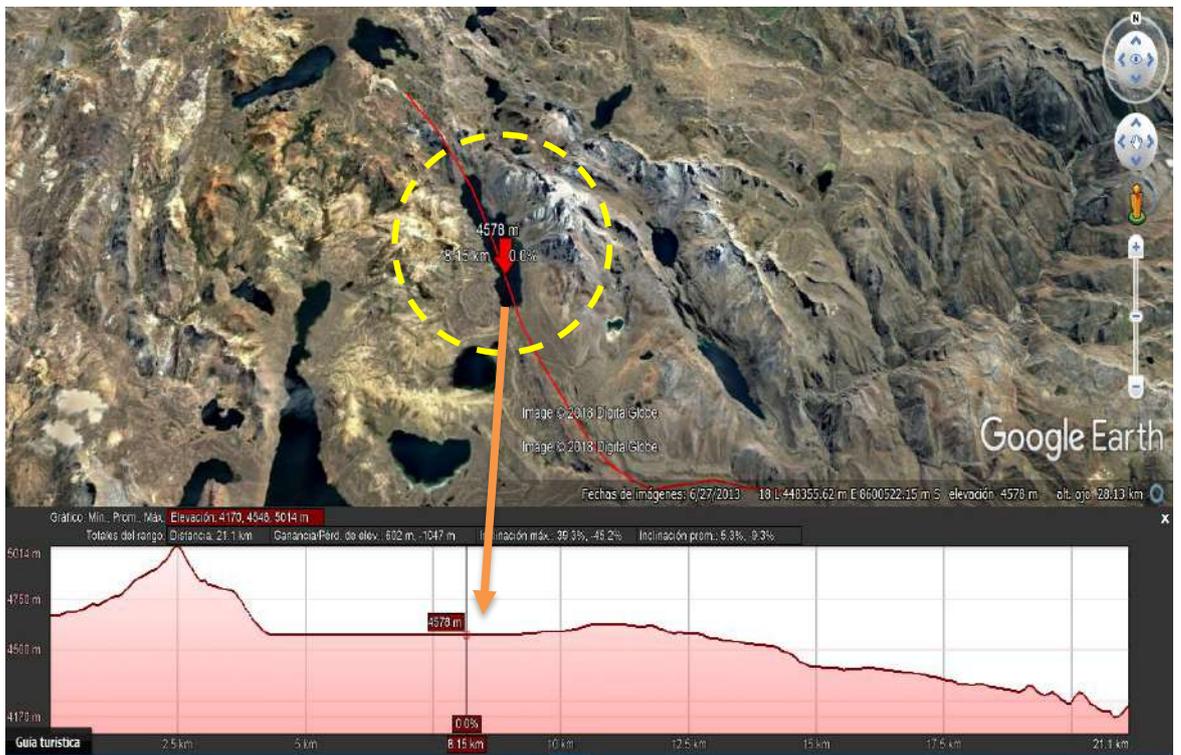
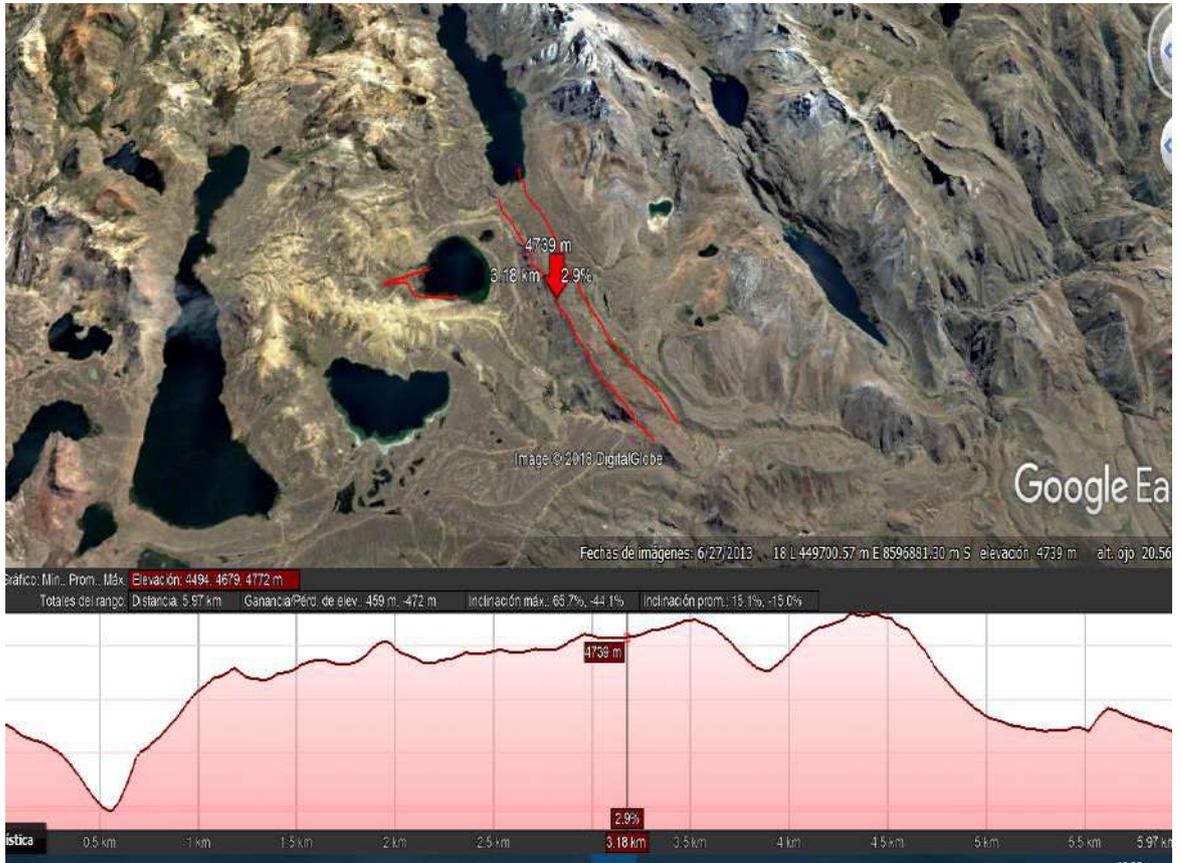


b)

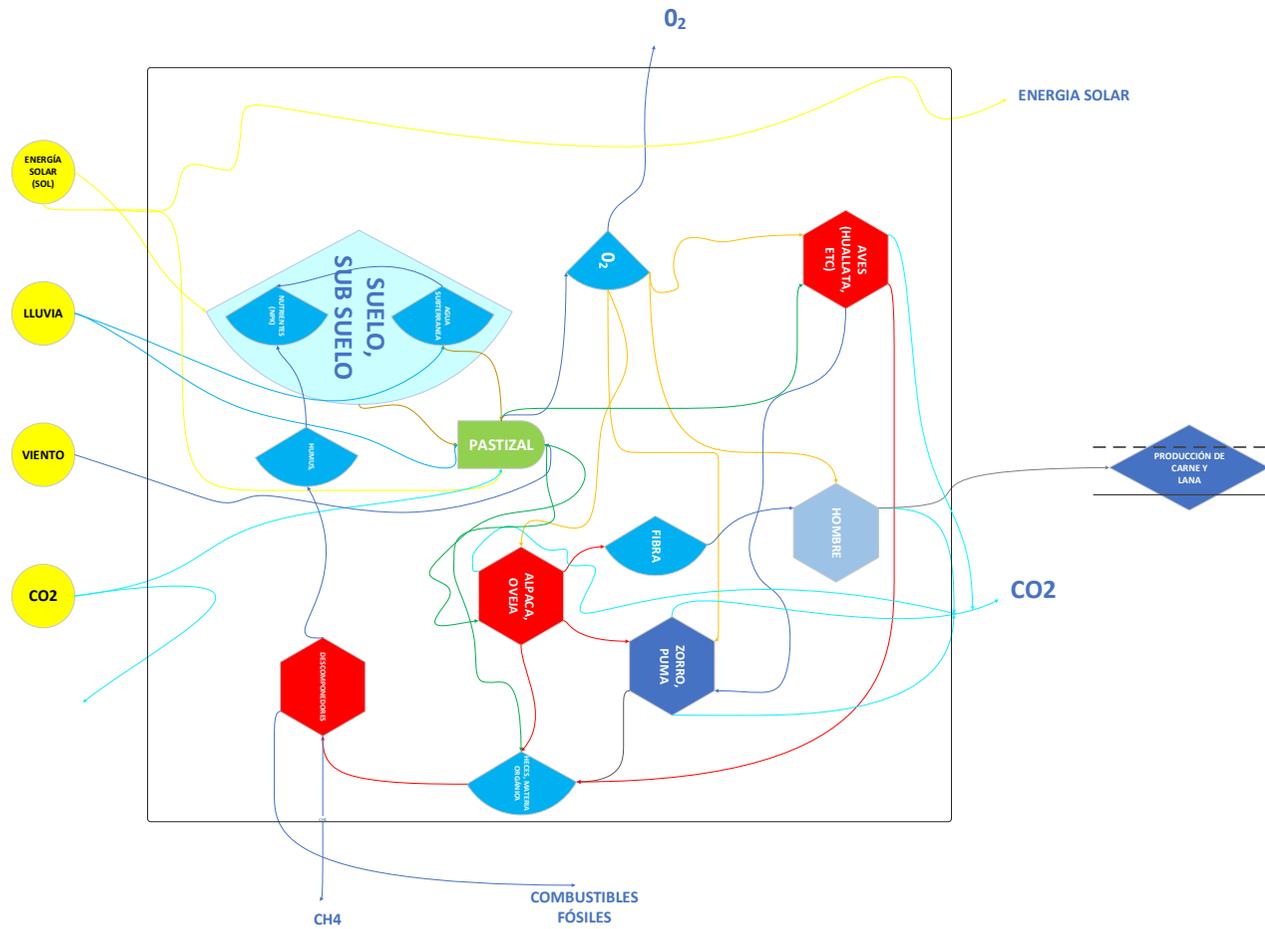


a) se muestra la cobertura total de bofedales identificados por este método, b) los bofedales identificados coinciden con la imagen de alta resolución por lo tanto la delimitación esta bien.

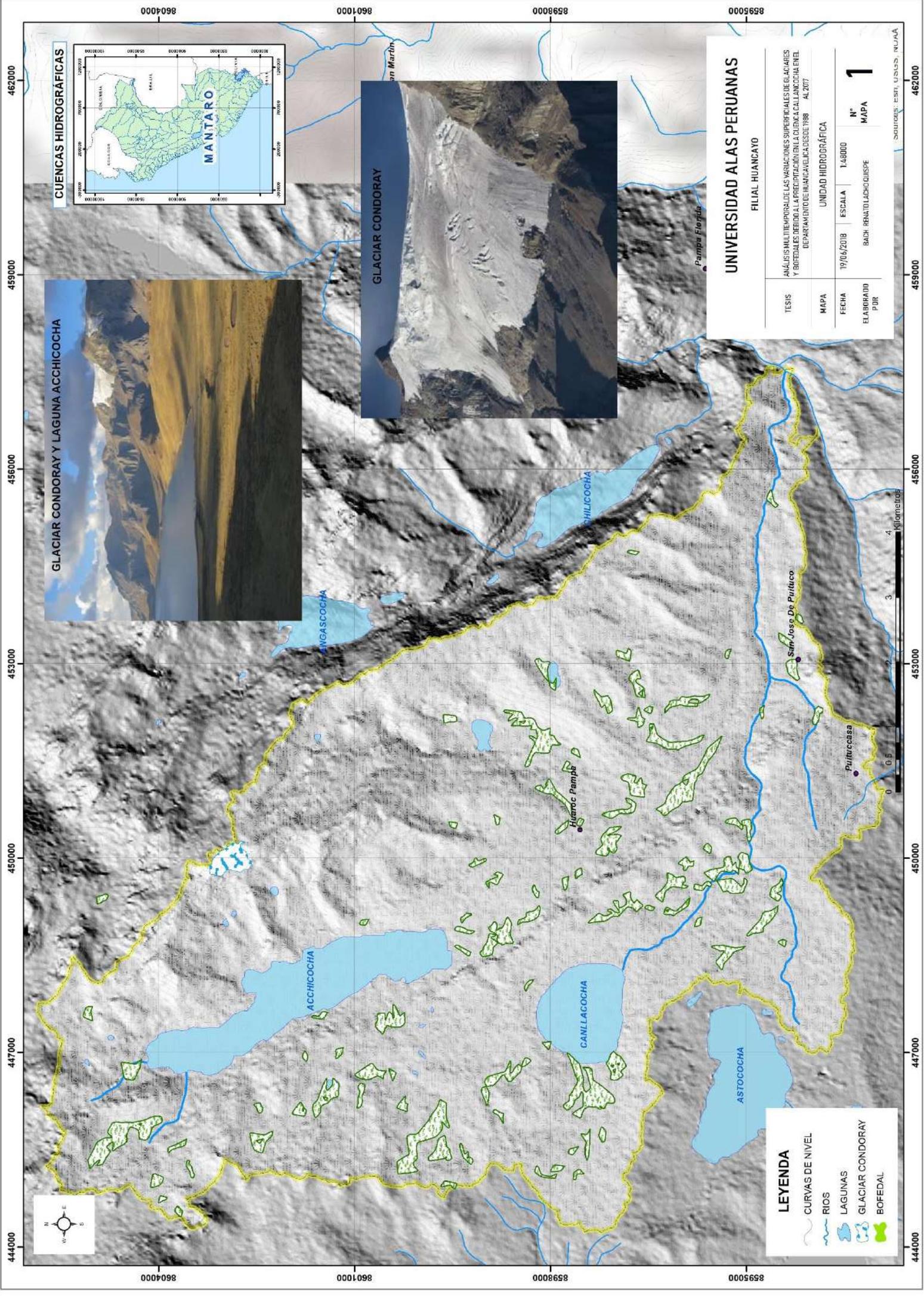
Anexo 5: Perfil topográfico de la cuenca Callancocha



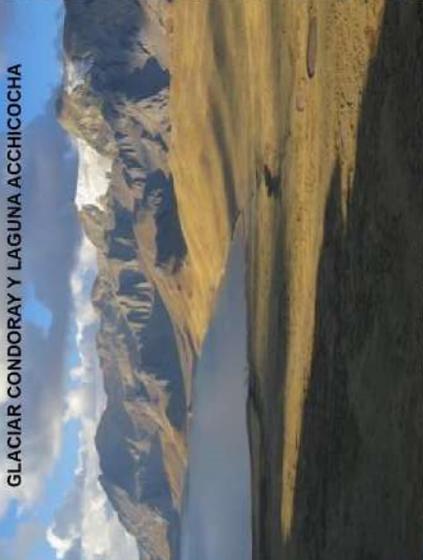
Anexo 6: Simbología de ODUM de un bofedal en la cuenca Callancocha



Mapa 1:
UNIDAD HIDROGRÁFICA



CUENCAS HIDROGRÁFICAS



LEYENDA

- CURVAS DE NIVEL
- RIOS
- LAGUNAS
- GLACIAR CONDORAY
- BOFEDAL

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO

TESIS	ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEDALES DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA CALI LAGUNAS EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCAYO DESDE 1980 AL 2017		
MAPA	UNIDAD HIDROGRÁFICA		
FECHA	19/06/2018	ESCALA	1:48000
ELABORADO POR	BACH. RENATO LACHO QUISPE	N° MAPA	1

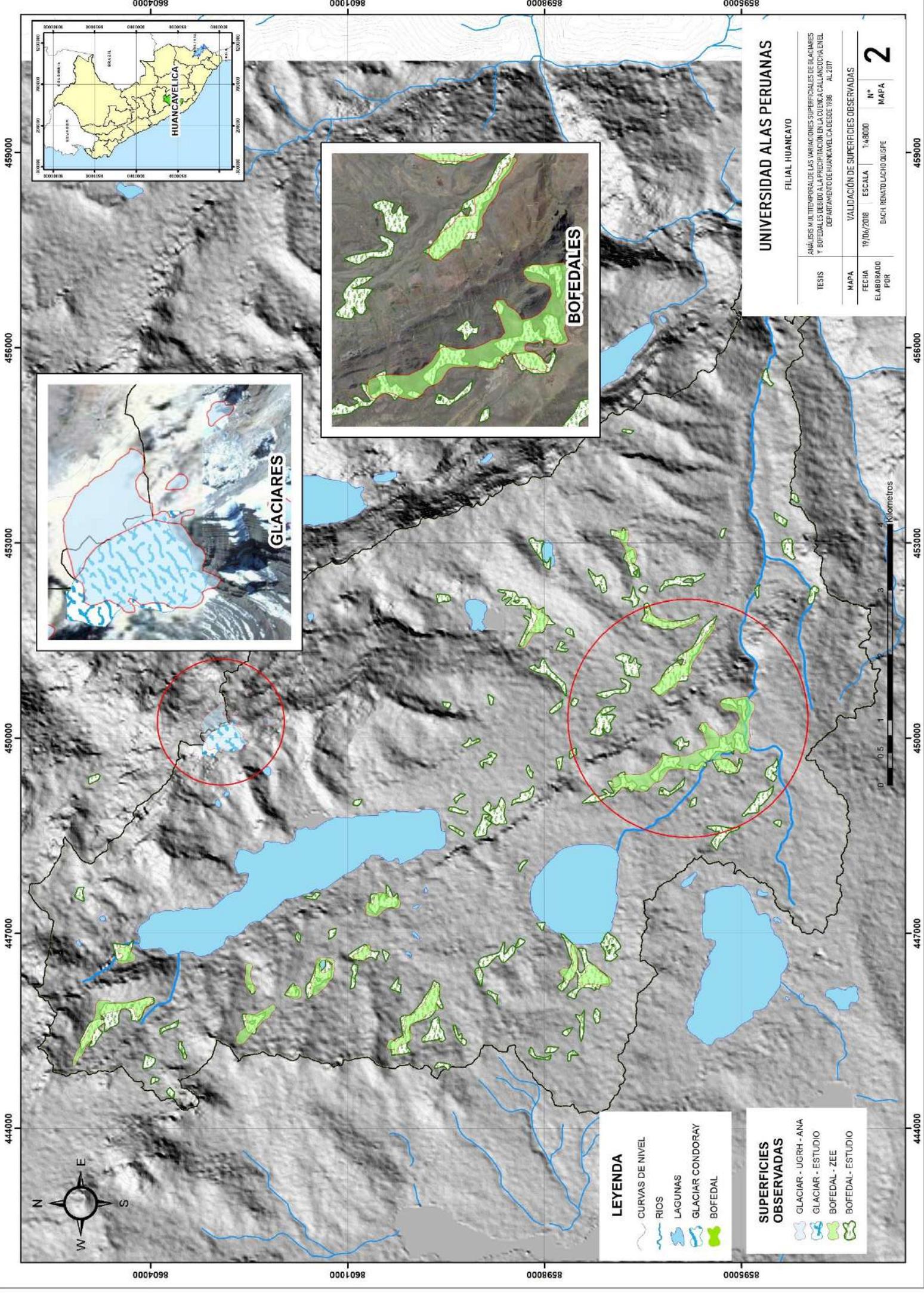
SOURCES: EST. USOS. MUSA



444000 447000 450000 453000 456000 459000 462000

8604000 8601000 8598000 8595000

Mapa 2:
**VALIDACIÓN DE SUPERFICIES
OBSERVADAS**



444000 447000 450000 453000 456000 459000

8604000 8601000 8598000 8595000

LEYENDA

- CURVAS DE NIVEL
- RIOS
- LAGUNAS
- GLACIAR CONDORAY
- BOFEDAL

SUPERFICIES OBSERVADAS

- GLACIAR - UGRH - ANA
- GLACIAR - ESTUDIO
- BOFEDAL - ZEE
- BOFEDAL - ESTUDIO

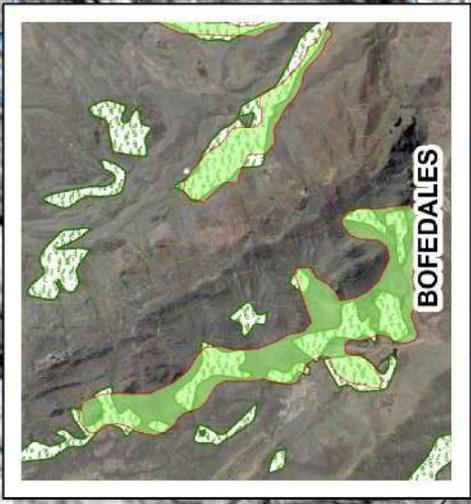
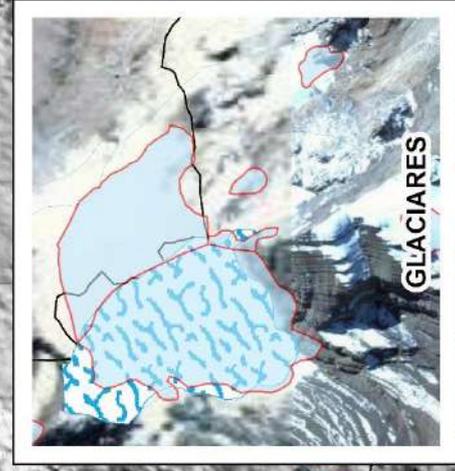
UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO

TESIS	ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEDALES DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA CALLANCHA EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCAYO DESDE 1986 AL 2017		
MAPA ELABORADO POR	19/06/2018	ESCALA	1:48000
		N° MAPA	2

VALIDACIÓN DE SUPERFICIES OBSERVADAS
EACH RENATO LACHO QUSPE

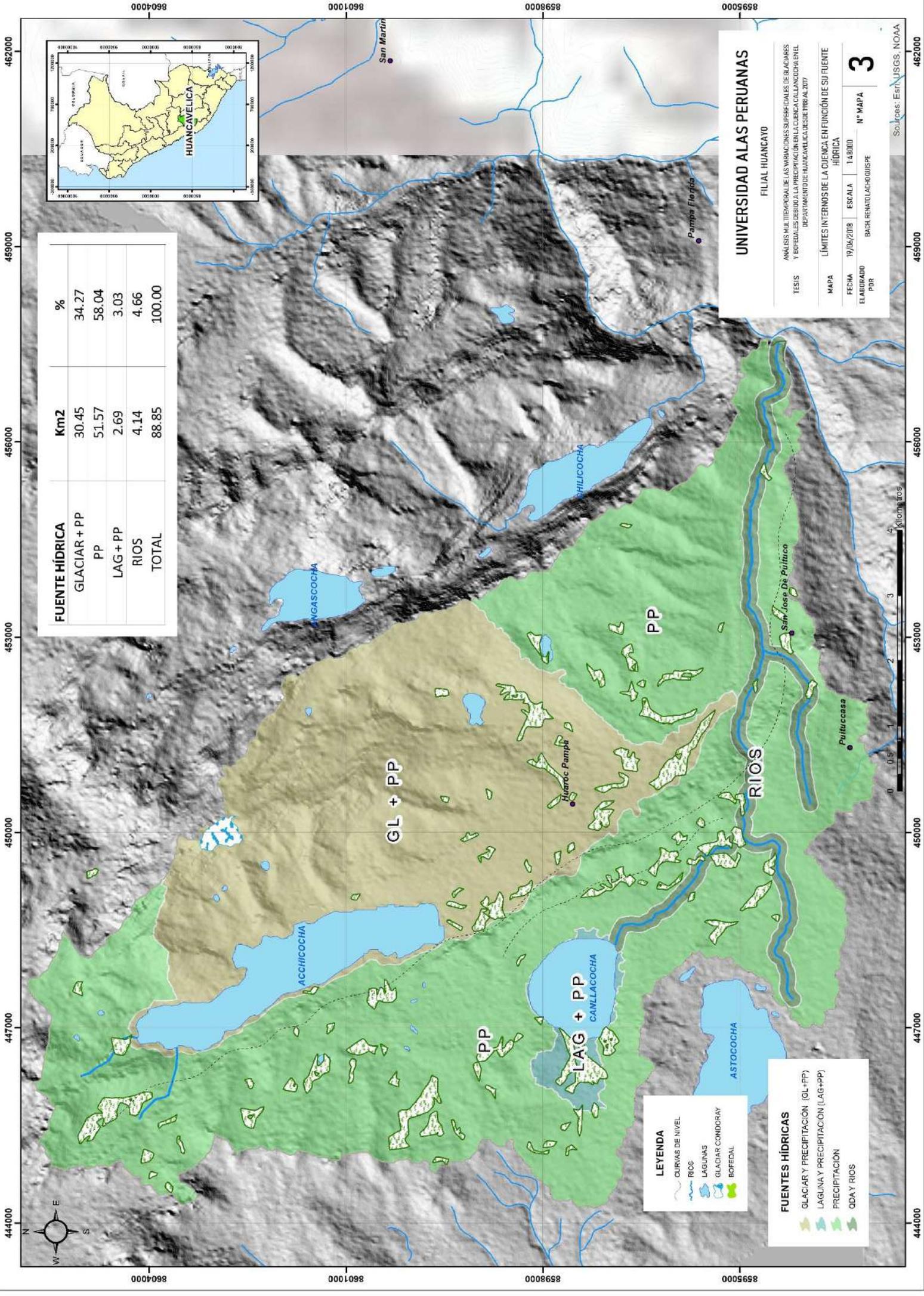


8604000 8601000 8598000 8595000



Mapa 3:

**LÍMITES INTERNOS DE LA CUENCA EN
FUNCIÓN DE SU FUENTE HÍDRICA**



FUENTE HÍDRICA	Km2	%
GLACIAR + PP	30.45	34.27
PP	51.57	58.04
LAG + PP	2.69	3.03
RIOS	4.14	4.66
TOTAL	88.85	100.00

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO

ANÁLISIS MULTITERRESTRA DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE BANCANAS Y BODEGAS DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN EN LA CORDILLERA LONGORAY DEL DEPARTAMENTO DE HUANCAYO (AGOSTO DE 2017)

MAPA: LÍMITES INTERNOS DE LA CUENCA EN FUNCIÓN DE SU FUENTE HÍDRICA
FECHA: 19/06/2018
ELABORADO POR: BACH. RENATO LACHO QUISPE

ESCALA: 1:48000
N° MAPA: **3**

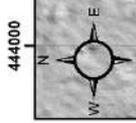
Solicita: Esdrás JUSGSS, INOAA

LEYENDA

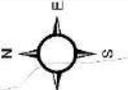
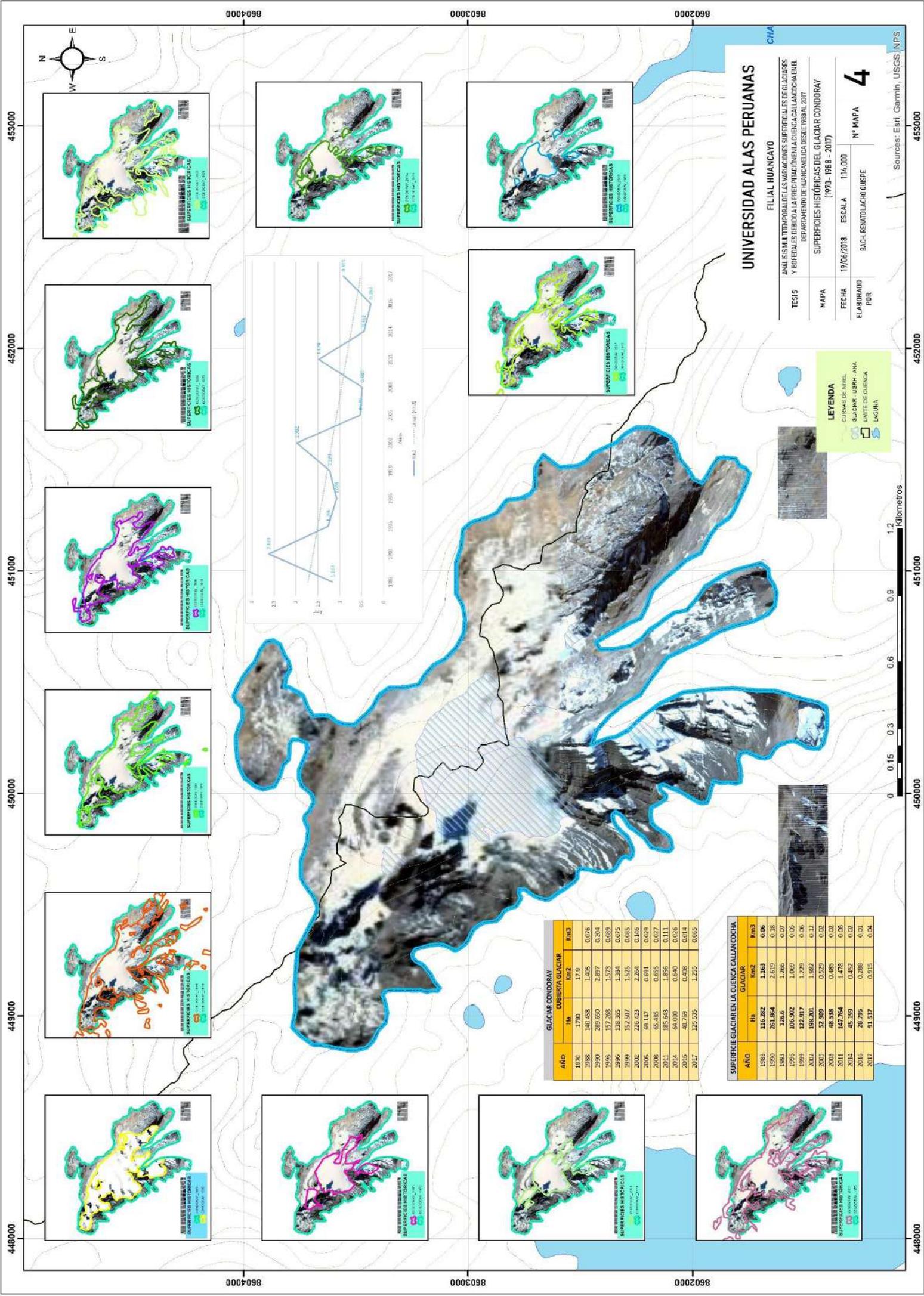
- CURVAS DE NIVEL
- RIOS
- LAGUNAS
- GLACIAR CONDORAY BOFEDAL

FUENTES HÍDRICAS

- GLACIAR Y PRECIPITACIÓN (GL+PP)
- LAGUNA Y PRECIPITACIÓN (LAG+PP)
- PRECIPITACIÓN
- QDA Y RIOS



Mapa 4:
**SUPERFICIES HISTÓRICAS DEL GLACIAR
CONDORAY**



AÑO	GLACIAR CONDORAY	
	Cobertura	Superficie
	Ha	Km ²
1970	1730	17.9
1988	1401.888	14.018
1990	209.000	2.09
1995	157.366	1.573
1996	138.366	1.384
1999	152.907	1.529
2002	226.423	2.264
2005	69.147	0.691
2008	65.485	0.655
2011	185.643	1.856
2014	64.000	0.64
2016	40.769	0.408
2017	125.536	1.255

AÑO	SUPERFICIE GLACIAR EN LA CUENCA CALLANCOCHA	
	Ha	Km ²
1988	110.282	1.103
1990	261.864	2.619
1993	126.6	1.266
1996	106.902	1.069
1999	122.917	1.229
2002	198.201	1.982
2005	52.909	0.529
2008	48.538	0.485
2011	147.764	1.478
2014	45.159	0.452
2016	28.795	0.288
2017	91.537	0.915

LEYENDA

- CURVA DE NIVEL
- GLACIAR - UGRH - ANA
- UNITE DE CUENCA
- LAGUNA

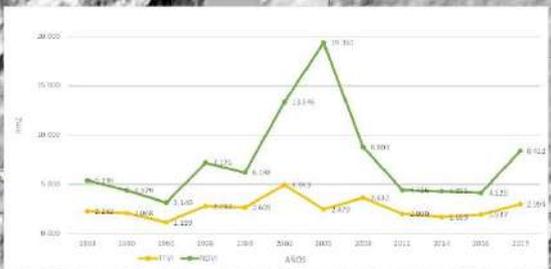
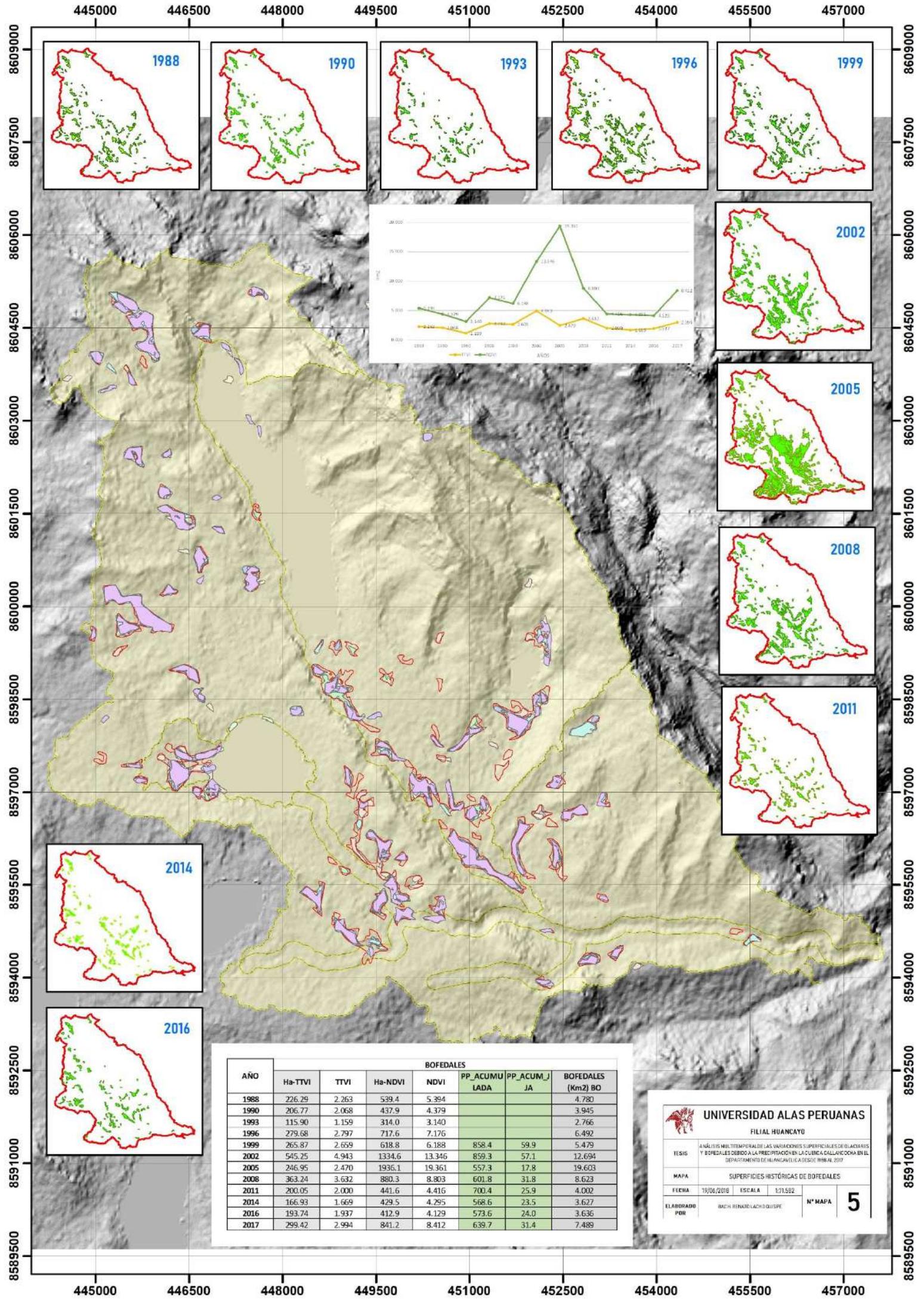
UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO

TESIS	ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DEL GLACIAR Y BORDALES DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA CALLANCOCHA EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCAYO DESDE 1980 AL 2017		
MAPA	SUPERFICIES HISTÓRICAS DEL GLACIAR CONDORAY (1970 - 1988 - 2017)		
FECHA ELABORADO POR	19/05/2018	ESCALA	1:14,000
			Nº MAPA 4



Sources: Ebrl, Garmin, USGS, NPS

Mapa 5:
**SUPERFICIES HISTÓRICAS DE LOS
BOFEDALES**



AÑO	BOFEDALES						
	Ha-TTVI	TTVI	Ha-NDVI	NDVI	PP_ACUMU LADA	PP_ACUMU JA	BOFEDALES (Km2) BO
1988	226.29	2.263	539.4	5.394			4.780
1990	206.77	2.068	437.9	4.379			3.945
1993	115.90	1.159	314.0	3.140			2.766
1996	279.68	2.797	717.6	7.176			6.492
1999	265.87	2.659	618.8	6.188	858.4	59.9	5.479
2002	545.25	4.943	1334.6	13.346	859.3	57.1	12.694
2005	246.95	2.470	1936.1	19.361	557.3	17.8	19.603
2008	363.24	3.632	880.3	8.803	601.8	31.8	8.623
2011	200.05	2.000	441.6	4.416	700.4	25.9	4.002
2014	166.93	1.669	429.5	4.295	568.6	23.5	3.627
2016	193.74	1.937	412.9	4.129	573.6	24.0	3.636
2017	299.42	2.994	841.2	8.412	639.7	31.4	7.489

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO

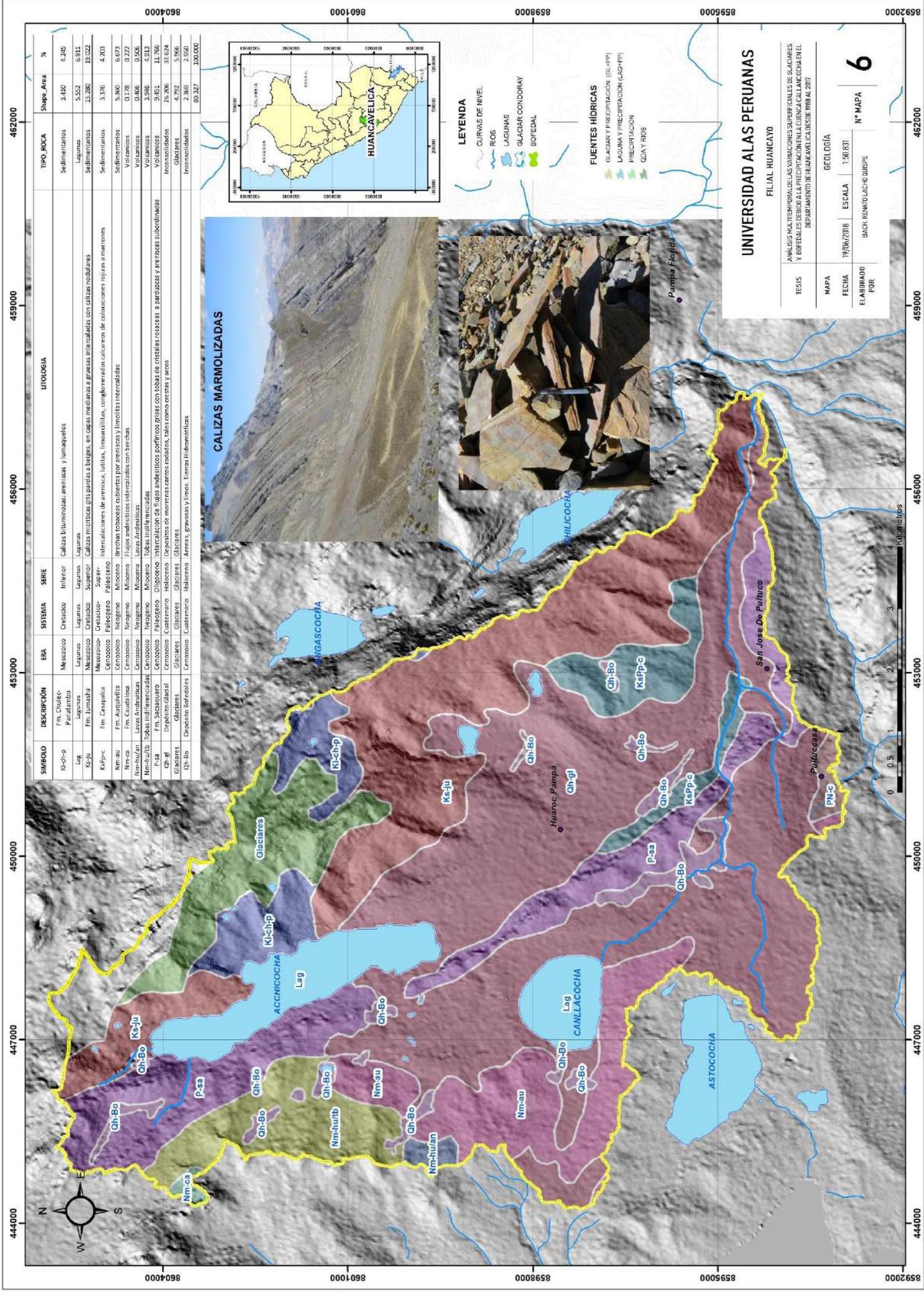
TESIS: ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE OLAJARIAS Y BOFEDALES DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN EN LA CUBIERTA CALLANCOCHA EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCAYO (DESDE 1988 AL 2017)

MAPA: SUPERFICIES HISTÓRICAS DE BOFEDALES

FECHA: 19/06/2018 ESCALA: 1:71,522

ELABORADO POR: INCHA RENATO LACRUZ QUISPE N° MAPA: **5**

Mapa 6:
GEOLOGÍA

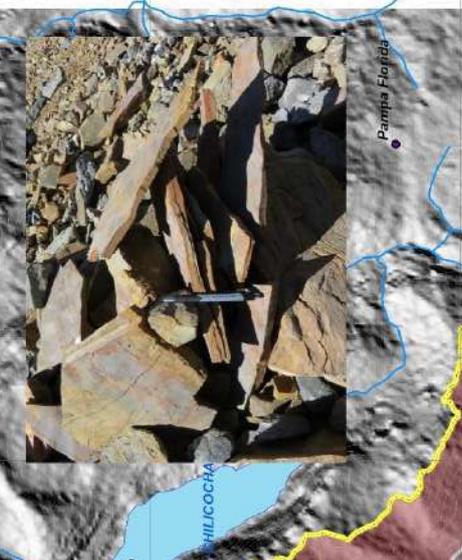
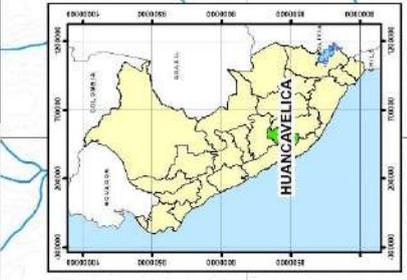


444000 447000 450000 453000 456000 459000 462000

8604000 8601000 8598000 8595000 8592000



SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	EBA	SISTEMA	SERIE	LITOLOGÍA	TIPO_ROCA	Shape_Area	%
Ki-ch-p	Fm. Chilic-Paratambo	Mesozoico	Cretácico	Inferior	Calizas bituminosas; areniscas y limauqueles	Sedimentarios	3.410	4.205
Lag	Lagunas	Mesozoico		Superior	Lagunas		5.522	6.911
Ks-ju	Fm. Jumashá	Mesozoico	Cretácico	Superior	Calizas micriticas gris pardas a beigeas, en capas medianas a gruesas intercaladas con calizas nodulares	Sedimentarios	13.280	10.022
KsPp-c	Fm. Casapalca	Mesozoico	Cretácico	Superior	Intercalaciones de arenisca, lutitas, limonarcillas, conglomeradas calcareas de colaciones, rojizas a marrones	Sedimentarios	3.376	4.203
Nm-au	Fm. Alupivilta	Cenozoico	Mioceno	Mioceno	Brechas tobacacas cubiertas por areniscas y limonarcillas	Sedimentarios	5.360	6.673
Nm-au	Fm. Caudalosa	Cenozoico	Mioceno	Mioceno	Flujos andesíticos intercalados con brechas	Volcanicos	0.176	0.222
Nm-hu/tb	Lavas Andesíticas	Cenozoico	Mioceno	Mioceno	Lavas Andesíticas	Volcanicos	0.806	0.506
Nm-hu/tb	Tobas Indiferenciadas	Cenozoico	Mioceno	Mioceno	Tobas Infiltradas	Volcanicos	3.946	4.913
P-sa	Fm. Sacsayhuamán	Cenozoico	Plioceno	Plioceno	Intercalacion de flujos andesíticos porfiricos grisos con tobas de cristales rosaceas, a pardosces y arenas subdominadas	Volcanicos	9.853	11.766
Qh-#	Depositos coluviales	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depositos de arenas cenizas rosados, tales como arcas y arcos	Incoherentes	76.206	32.624
Qh-#	Glaciares	Cenozoico	Cuaternario	Glaciares	Glaciares	Glaciares	4.792	5.946
Qh-#	Depositos laterales	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Arenas, gravasas y limas. Tierras hidromórficas	Incoherentes	2.146	2.160
Qh-#	Depositos laterales	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Arenas, gravasas y limas. Tierras hidromórficas	Incoherentes	80.327	100.000

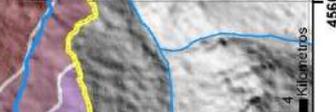


UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEDALES DEBIDO A LA PRECIPITACION EN LA CUENCA CALLANUCO EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCVELICA DESDE 1988 AL 2017

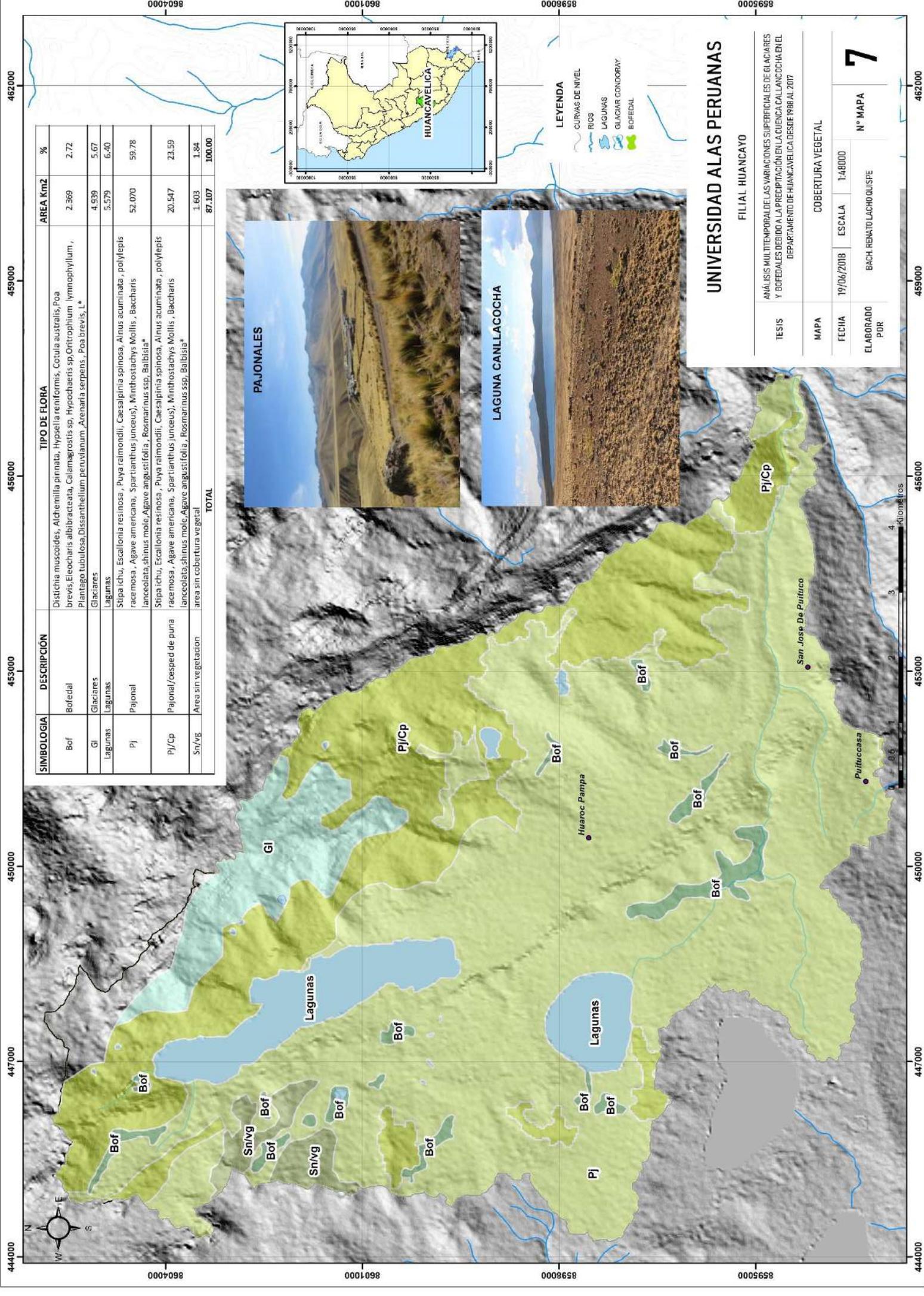
MAPA: GEOLOGÍA
FECHA: 19/06/2018
ESCALA: 1:50.000
ELABORADO POR: SACH, REMATO LACHO QUISPE

N° MAPA: **6**

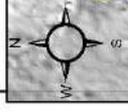


8592000 8595000 8598000 8601000 8604000

Mapa 7:
COBERTURA VEGETAL (BOFEDAL)

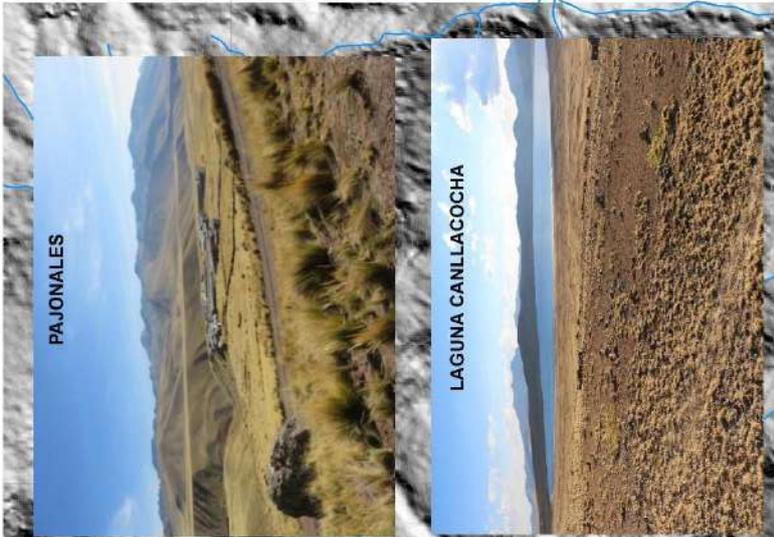


444000 450000 456000 459000 462000



8604000 8601000 8598000 8595000 8592000

SIMBOLOGIA	DESCRIPCIÓN	TIPO DE FLORA	AREA Km2	%
Bof	Bofedal	<i>Distichia muscoides</i> , <i>Alchemilla pinnata</i> , <i>Hypselia reniformis</i> , <i>Cotula australis</i> , <i>Poa brevis</i> , <i>Eleocharis albibractea</i> , <i>Calamagrostis</i> sp., <i>Hypochaeris</i> sp., <i>Oritrophium lymnophyllum</i> , <i>Plantago tubulosa</i> , <i>Disanthellium peruvianum</i> , <i>Arenaria serpenti</i> , <i>Poa brevis</i> , L*	2,369	2.72
Gl	Glaciares		4,939	5.67
Lagunas	Lagunas		5,579	6.40
Pj	Pajonal	<i>Stipa ichu</i> , <i>Escallonia resinosa</i> , <i>Puya raimondii</i> , <i>Caesalpinia spinosa</i> , <i>Alnus acuminata</i> , <i>polylepis</i> race mesa, <i>Agave americana</i> , <i>Spartianthus unceus</i> , <i>Mimnhostachys Molliis</i> , <i>Baccharis lanceolata</i> , <i>shinus mole</i> , <i>Agave angustifolia</i> , <i>Rosmarinus</i> ssp. <i>Balbiaia</i> *	52,070	59.78
Pj/Cp	Pajonal/caesped de puna	<i>Stipa ichu</i> , <i>Escallonia resinosa</i> , <i>Puya raimondii</i> , <i>Caesalpinia spinosa</i> , <i>Alnus acuminata</i> , <i>polylepis</i> race mesa, <i>Agave americana</i> , <i>Spartianthus unceus</i> , <i>Mimnhostachys Molliis</i> , <i>Baccharis lanceolata</i> , <i>shinus mole</i> , <i>Agave angustifolia</i> , <i>Rosmarinus</i> ssp. <i>Balbiaia</i> *	20,547	23.59
Sn/vg	Area sin vegetación	area sin cobertura vegetal	1,603	1.84
TOTAL			87,107	100.00



LEYENDA

- CURVAS DE NIVEL
- RIOS
- LAGUNAS
- GLACIAR CONDORAY
- BOFEDAL

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS

FILIAL HUANCAYO

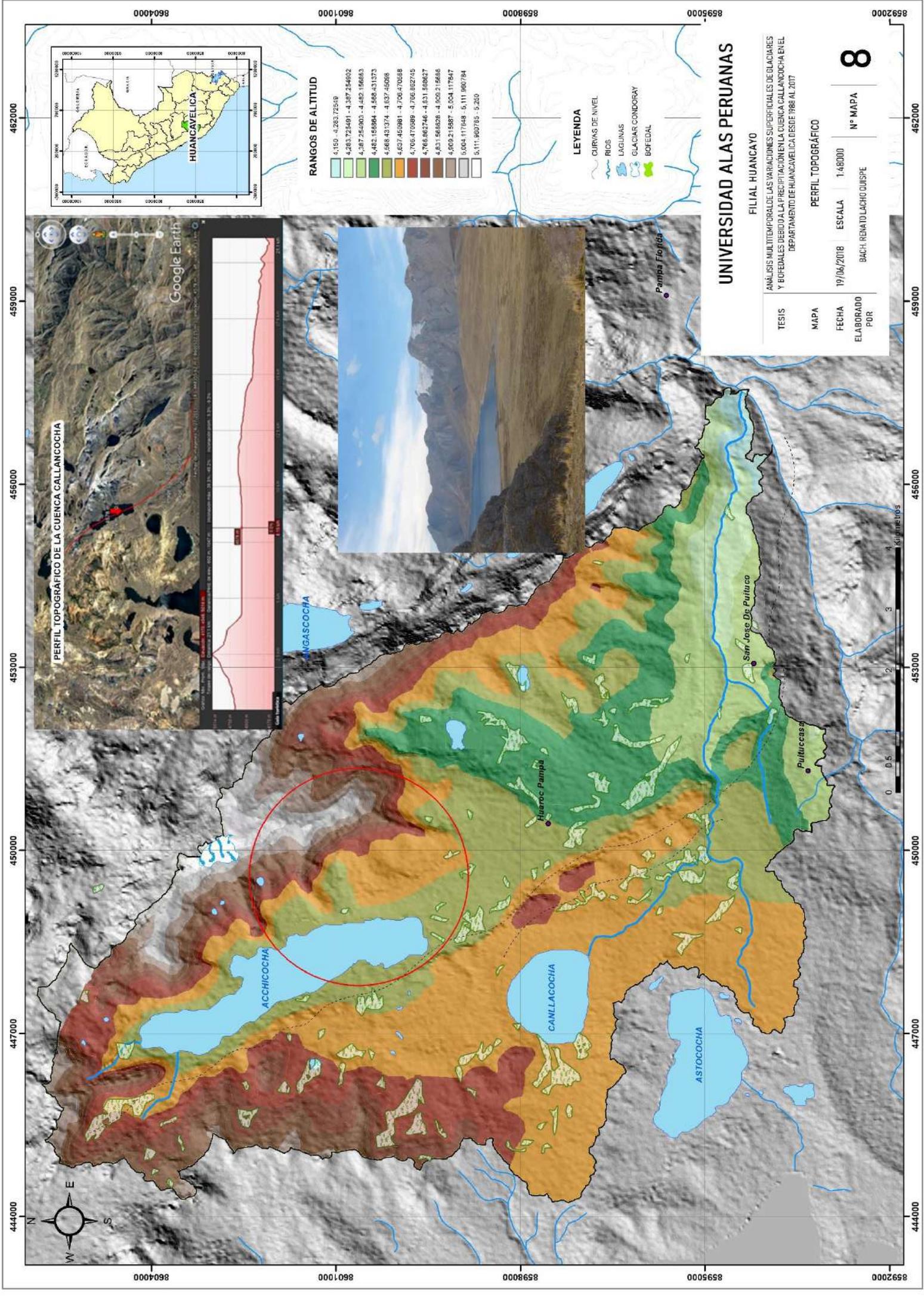
ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEDALES DEBIDO A LA PRECIPITACION EN LA CUENCA CANLLACCOCHA EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCavelica DESDE 1988 AL 2017

MAPA	COBERTURA VEGETAL		
FECHA	19/06/2018	ESCALA	1:48000
ELABORADO POR	BACH. RENATO LACHO QUISPE	N° MAPA	7

4 Kilómetros

444000 450000 456000 459000 462000

Mapa 8:
PERFIL TOPOGRÁFICO Y ALTITUD



RANGOS DE ALTITUD

4,150 - 4,263,72519
4,263,725191 - 4,387,25402
4,387,25403 - 4,485,166863
4,482,166864 - 4,568,431373
4,568,431374 - 4,637,45006
4,637,450081 - 4,706,470588
4,706,470589 - 4,766,862715
4,766,862716 - 4,831,588827
4,831,588828 - 4,909,215686
4,909,215687 - 5,004,117647
5,004,117648 - 5,111,960784
5,111,960785 - 5,250

LEYENDA

- CURVAS DE NIVEL
- RIOS
- LAGUNAS
- GLACIAR CONDORAY
- BOFEDAL

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS

FILIAL HUANCAYO

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEDALES DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA CALLANCOCHA EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCavelica DESDE 1988 AL 2017

TESIS	MAPA	FECHA	ESCALA
ELABORADO POR		19/06/2018	1:48000

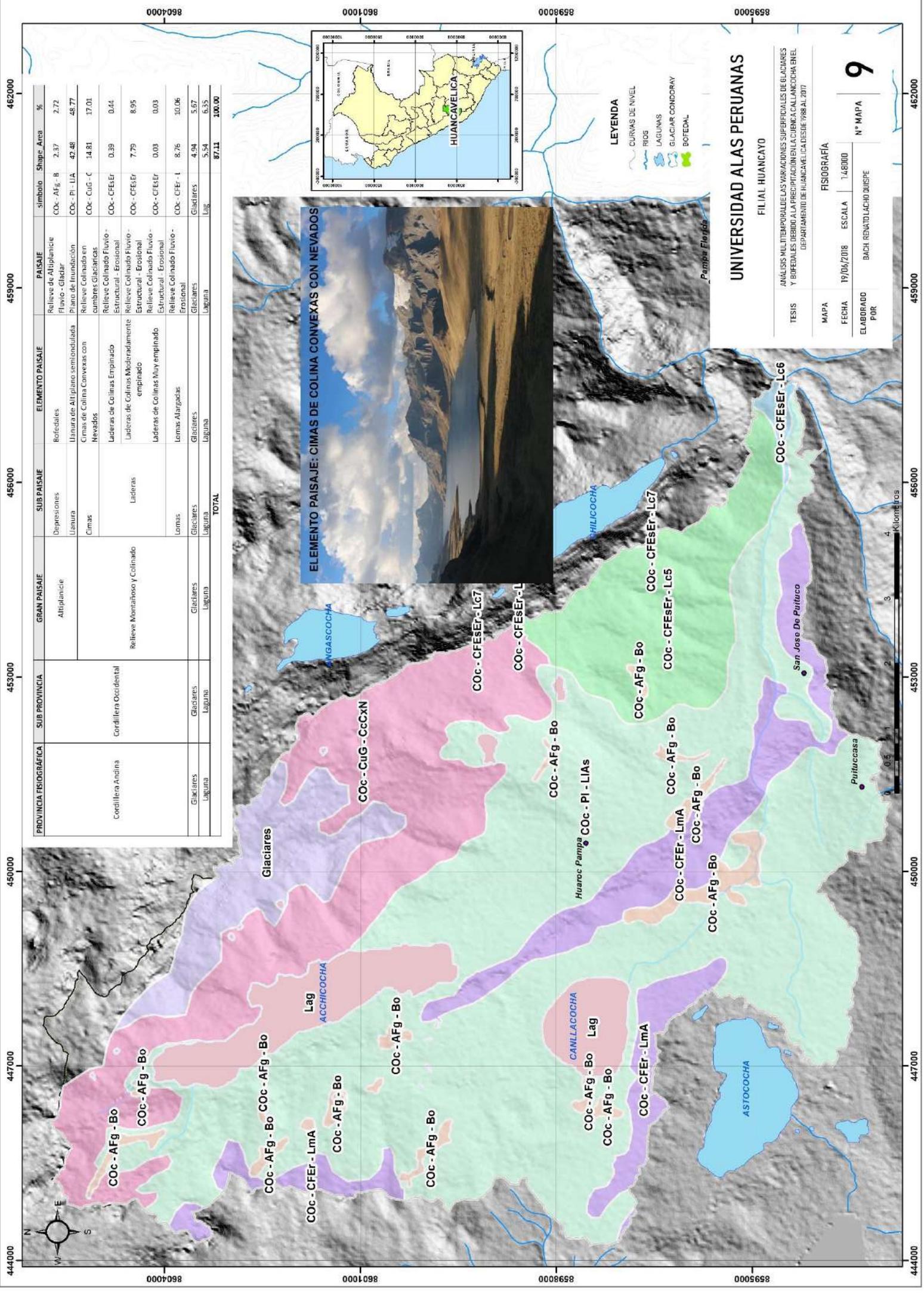
PERFIL TOPOGRÁFICO	
BACH. RENATA LACHO OUSPE	Nº MAPA
	8



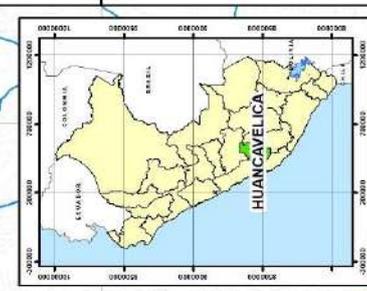
8592000 8595000 8598000 8601000 8604000

444000 447000 450000 453000 456000 459000 462000

Mapa 9:
FISIOGRAFÍA



PROVINCIA FISIOGRAFICA	SUB PROVINCIA	GRAN PAISAJE	SUB PAISAJE	ELEMENTO PAISAJE	PAISAJE	simbolo	Shape	Area	%	
Cordillera Andina	Cordillera Occidental	Altiplanicie	Depresiones	Bofedales	Relieve de Altiplanicie	COc - AFg - B	2.37	2.72		
			Llanura	Ulnurade Altipiano semidegradada	Fluvio - Glaciar	COc - Pl - UA	42.48	48.77		
			Cimas	Cimas de Colinas Convexas con Nevados	Relieve Colinado en cumbres glaciares	COc - CuG - C	14.81	17.01		
				Laderas de Colinas Empinado	Relieve Colinado Fluvio - Erosional	COc - CFESer	0.39	0.44		
				Laderas de Colinas Moderadamente empinado	Relieve Colinado Fluvio - Erosional	COc - CFESer	7.79	8.95		
				Laderas de Colinas Muy empinado	Relieve Colinado Fluvio - Erosional	COc - CFESer	0.03	0.03		
				Lomas	Lomas Alargadas	Relieve Colinado Fluvio - Erosional	COc - CFEr - L	8.76	10.06	
				Glaciares	Glaciares	Glaciares	Glaciares	4.94	5.67	
				Lagunas	Lagunas	Lagunas	Lag	5.54	6.35	
						TOTAL		97.11	100.00	



- LEYENDA**
- CURVAS DE NIVEL
 - RIOS
 - LAGUNAS
 - GLACIAR CONCORDIA
 - BOFEDAL

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEDALES DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA CALLANCOCHA EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCAYO (DESDE 1988 AL 2017)

MAPA: FISIOGRAFÍA
FECHA: 19/06/2018
ESCALA: 1:48000
ELABORADO POR: BACH. RENATO LACHO BUISPE

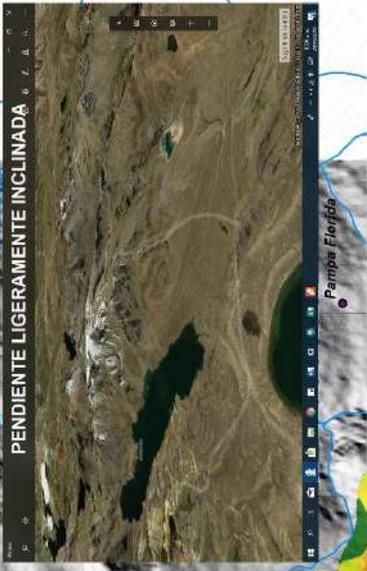
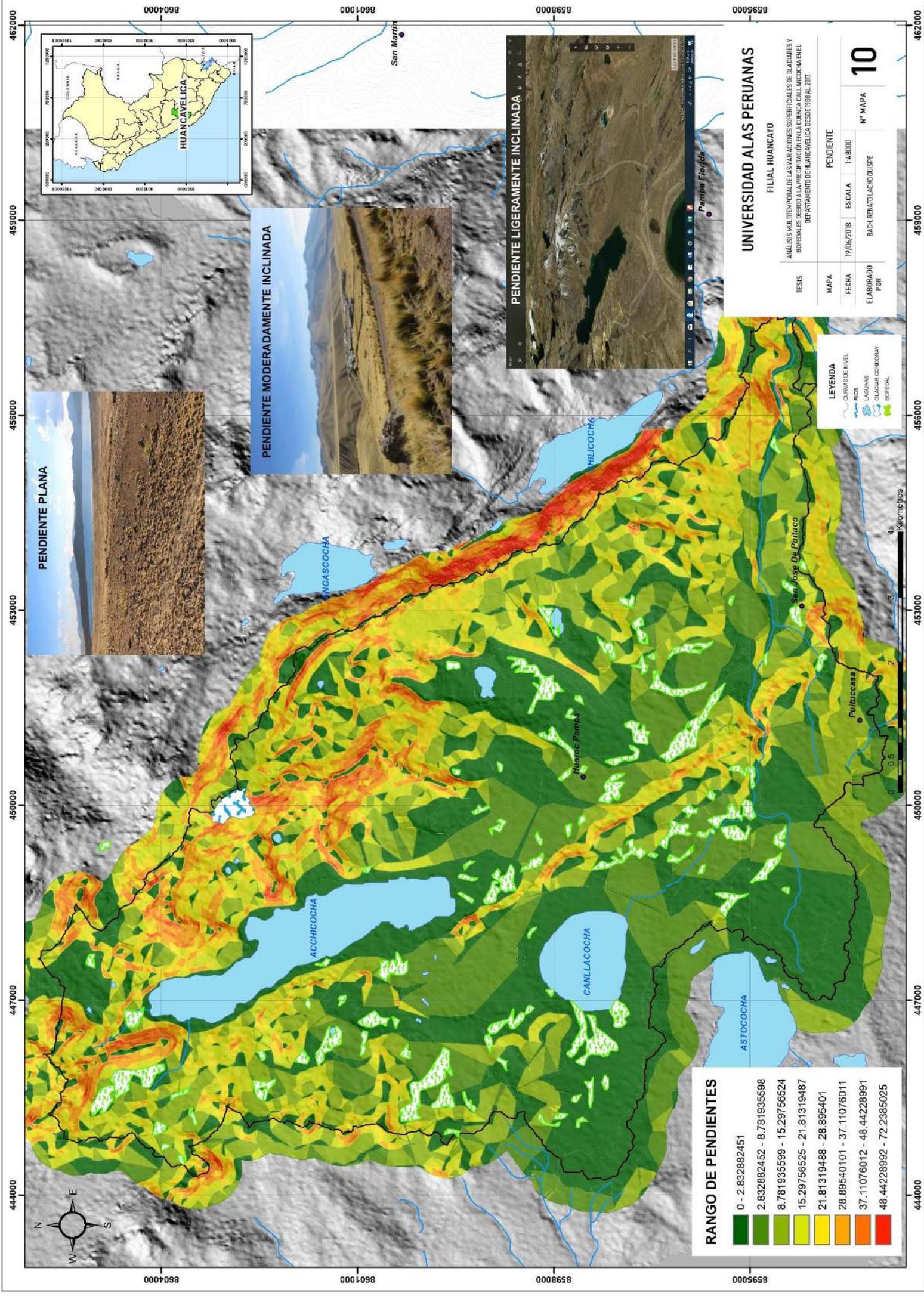
N° MAPA: **9**



444000 447000 450000 453000 456000 459000 462000

8604000 8601000 8598000 8595000

Mapa 10:
PENDIENTE



RANGO DE PENDIENTES

0 - 2.832882451
2.832882452 - 8.781935598
8.781935599 - 15.29756524
15.29756525 - 21.81319487
21.81319488 - 28.895401
28.89540101 - 37.11076011
37.11076012 - 48.44228991
48.44228992 - 72.2885025

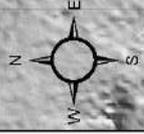
LEYENDA

- CUENCA DE NIVEL
- RIOS
- LAGUNAS
- GLACIAR CONDONARY
- BOFEAL

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEALES DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA CALLACUCHA DEL DEPARTAMENTO DE HUANCAYO DESDE 1998 AL 2017

TESIS	MAPA	PENDIENTE
ELABORADO POR	FECHA	ESCALA
	19/06/2018	1:4.8000
		N° MAPA
		10



444000 447000 450000 453000 456000 459000 462000

8604000 8601000 8598000 8595000

San Martín

ACCHICOCHA

CANLLACOCHA

ASTOCOCHA

HILICOCHA

Huancapampa

San José De Putulco

Putulcassa

Pampa Floribó

4 Kilómetros

0 0.5 1 2 3 4

Mapa 11:
PUNTOS DE MUESTREO



8596455 193030

8596455 193030

8596038 193534

8596038 193534

8595621 194038

8595621 194038

8595204 194542

8595204 194542

8594787 195046

8594787 195046

PUNTOS DE MUESTREO	CLASE	ESTE	NORTE
PM_01	NO	450677	8596398
PM_02	NO	450675	8596332
PM_03	NO	450673	8596277
PM_04	SI	450671	8596223
PM_05	NO	450669	8596173
PM_06	NO	450666	8596113
PM_07	NO	450837	8596374
PM_08	NO	450835	8596325
PM_09	NO	450831	8596290
PM_10	NO	450831	8596234
PM_11	SI	450829	8596185
PM_12	SI	450827	8596136
PM_13	SI	450825	8596093
PM_14	SI	450823	8596041
PM_15	NO	450820	8595981
PM_16	NO	451005	8596227
PM_17	NO	451003	8596163
PM_18	SI	451007	8596110
PM_19	SI	451000	8596054
PM_20	SI	450999	8595999
PM_21	SI	450997	8595941
PM_22	SI	450996	8595890
PM_23	SI	450994	8595829
PM_24	NO	450993	8595778
PM_26	NO	451182	8595826
PM_27	SI	451181	8595867
PM_28	SI	451181	8595820
PM_29	SI	451181	8595766
PM_30	NO	451181	8595717
PM_32	NO	451375	8595828
PM_33	NO	451373	8595779
PM_34	SI	451371	8595727
PM_35	SI	451369	8595674
PM_36	NO	451367	8595620
PM_38	NO	451547	8595702
PM_39	NO	451546	8595657
PM_40	SI	451546	8595615
PM_41	SI	451546	8595572
PM_42	NO	451545	8595534
PM_43	NO	451545	8595486
PM_44	NO	451735	8595587
PM_45	NO	451734	8595547
PM_46	SI	451735	8595518
PM_47	SI	451735	8595476
PM_48	SI	451735	8595443
PM_49	SI	451734	8595410
PM_50	NO	451736	8595372
PM_25	NO	450992	8595726
PM_51	NO	450818	8595928
PM_31	NO	451180	8595674
PM_37	NO	451365	8595565

LEYENDA

- CURVAS DE NIVEL
- RIOS
- LAGUNAS
- GLACIAR CONDORAY
- BOFEDAL

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS

FILIAL HUANCAYO

ANÁLISIS MULTITEMPORALES LAS VARIACIONES SUPERFICIALES DE GLACIARES Y BOFEDALES DEBIDO A LA PRECIPITACION EN LA CUENCA CALLANCOCHA EN EL DEPARTAMENTO DE HUANCAYO DESDE 1988 AL 2017

MAPA PUNTOS DE MUESTREO

FECHA: 19/06/2018 ESCALA: 1:5,166

ELABORADO POR: BACH. RENATO LACHO QUISEP

N° MAPA: **11**