Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

Determinación de impactos hidrometeorológicos en el sistema glaciar Huaytapallana

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Geógrafa

AUTOR

Valeria Patricia LLACTAYO PEÑA

ASESOR

Dr. Francisco Alejandro ALCÁNTARA BOZA

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Llactayo, V. (2023). *Determinación de impactos hidrometeorológicos en el sistema glaciar Huaytapallana*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geografía, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Valeria Patricia Llactayo Peña
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72169019
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3267-7775
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Francisco Alejandro Alcántara Boza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	27074721
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9127-4450
Datos del co-asesor	
Nombres y apellidos	Stephany Magaly Callañaupa Gutierrez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	7239898
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0353-189X
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dante Horacio Loayza Alatrista
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07564915
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Máximo Ayala Gutiérrez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25704431
Datos de investigación	
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y Medioambientales
Grupo de investigación	GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA

Agencia de financiamiento	Perú. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica y ProCiencia. Contrato N.º 082-2021-FONDECYT.
Ubicación geográfica de la investigación	Sistema Glaciar Huaytapallana Coordenadas 11°56’18.06" Latitud sur; 75° 4’9.44" Longitud oeste País: Perú Departamento: Junín Provincia: Huancayo Distrito: Huancayo
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Octubre 2021- diciembre 2022
URL de disciplinas OCDE	Sensores remotos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04 Meteorología y ciencias atmosféricas https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.09

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día jueves 23 de marzo del 2023, siendo las 16:30 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. DANTE HORACIO LOAYZA ALATRISTA	Presidente
Ing. MÁXIMO AYALA GUTIERREZ	Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la Tesis titulada: **«DETERMINACIÓN DE IMPACTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EN EL SISTEMA GLACIAR HUAYTAPALLANA»,** presentada por la Bachiller **VALERIA PATRICIA LLACTAYO PEÑA,** para optar el Título Profesional de Ingeniera Geógrafa.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a la Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas por la tesista a: SATISFACCION.....

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue: DIECIOCHO (18) APROBADO SOBRESALIENTE

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA GEÓGRAFA, a Doña VALERIA PATRICIA LLACTAYO PEÑA.

Siendo las 17:45 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Ciudad Universitaria, 23 de marzo del 2023

Ing. DANTE HORACIO LOAYZA ALATRISTA
PRESIDENTE

Ing. MÁXIMO AYALA GUTIERREZ
MIEMBRO

Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA
ASESOR DE TESIS

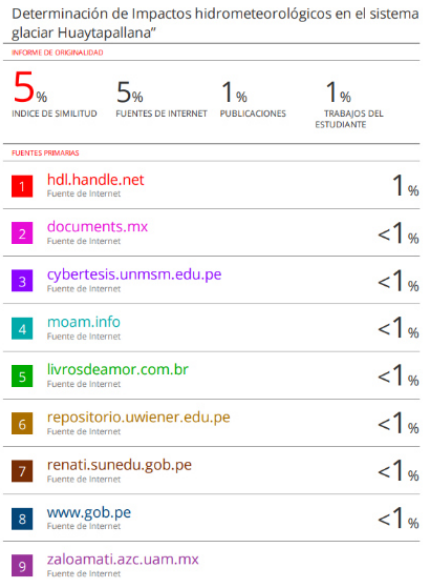
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

INFORME DE ORIGINALIDAD

DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL INGENIERIA GEOGRÁFICA
Dr. Francisco Alejandro Alcantara Boza
OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES
Evelyn Jhuliana Valdez Tapia
DOCUMENTO EVALUADO:
Tesis para optar el Grado Académico de INGENIERA GEÓGRAFA titulado: **«DETERMINACIÓN DE IMPACTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EN EL SISTEMA GLACIAR HUAYTAPALLANA»**
AUTORA DEL DOCUMENTO:
Bach. Valeria Patricia Llactayo Peña
FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:
06/02/2023
FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:
06/02/2023
SOFTWARE UTILIZADO
Turnitin
CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecomillados
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 35 palabras

PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES
Cinco por ciento (05%)
FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS


Determinación de Impactos hidrometeorológicos en el sistema glaciar Huaytapallana"

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%	5%	1%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	documents.mx Fuente de Internet	<1%
3	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
4	moam.info Fuente de Internet	<1%
5	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.uwiener.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1%
8	www.gob.pe Fuente de Internet	<1%
9	zaloamati.azc.uam.mx Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	repositoriotec.tec.ac.cr Fuente de Internet	<1%
12	Submitted to Organismo de Evaluación y Fiscalización Trabajo del estudiante	<1%
13	doczz.net Fuente de Internet	<1%
14	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
15	documentop.com Fuente de Internet	<1%
16	origin.magrama.gob.es Fuente de Internet	<1%
17	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1%
18	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1%
19	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
20	vsip.info Fuente de Internet	

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA



OBSERVACIONES
Ninguna
CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
06/02/2023

Atentamente,

UNMSM
Firmado digitalmente por ALCANTARA BOZA Francisco Alejandro FAU 20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 06.02.2023 21:40:42 -05:00

Dr. Francisco Alejandro Alcantara Boza
Director
E.P. de Ingeniería Geográfica
FIGMMG - UNMSM

Resumen

La Cordillera Huaytapallana, ubicada en los Andes centrales representa una fuente de provisión de agua e ingresos económicos en la región Junin. Sin embargo, al igual que los glaciares a nivel tropical y mundial, se ve afectada por la variabilidad climática de las últimas décadas. Es por ello que, el objetivo de este estudio fue identificar los impactos generados por la interacción de las variables hidrometerológicas (temperatura, precipitación y humedad relativa) en el Sistema Glaciar Huaytapallana (SGH) haciendo uso de imágenes satelitales radar de apertura sintética Sentinel-1, información meteorológica y datos del tipo de precipitación (nieve, granizo, lluvia) durante los meses de abril, agosto, septiembre y octubre del 2022.

Mediante un análisis estadístico se determinó que la ocurrencia de precipitación sólida (nieve y granizo) representa un 90 % de la precipitación total recopilada y es más frecuente a temperaturas por debajo de 1.7°C. Se encontró que la ocurrencia de granizo y lluvia se daba en su mayor durante el día mientras que la caida de nieve tuvo registros nocturnos. Las imágenes Radar Sentinel-1 permitieron construir una serie temporal libre de nubosidad que permitió discriminar las zonas de ablación/acumulación y observar los cambios en la superficie glaciar durante la ocurrencia de precipitación encontrando patrones estacionales que son explicados por la presencia de gruesas capas de nieve húmeda durante la temporada de lluvias (DEF) y delgadas capas de cristales y bloques de hielo expuestos durante la temporada seca (JJA). Se encontró una mayor correlación entre la humedad relativa y dichos cambios estacionales (-0.54 <R <-0.62) que con la temperatura (-0.10 <R <-0.37). Los principales impactos hidrometeorológicos encontrados fueron (1) la fase y la fracción de precipitación como principales contribuidores a los procesos de acumulación de masa glaciar; (2) la temperatura como variable decisiva en la determinación del umbral de separación de la fase de precipitación; (3) la ausencia de humedad como responsable de los procesos de sublimación de la superficie glaciar durante la ausencia de lluvias.

Agradecimientos

Deseo comenzar esta tesis expresando un profundo agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que estuvieron conmigo e hicieron posible esta investigación.

A ProCiencia y al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) por el financiamiento brindado mediante el Proyecto titulado *"Impactos de la precipitación, registrados con un radar meteorológico, en los cuerpos glaciares Andinos: nevado Huaytapallana"- Proyecto TAMYA* con contrato N.º 082-2021-FONDECYT.

Al Instituto Geofísico del Perú (IGP), por acogerme en sus instalaciones del Observatorio de Huancayo y brindarme asesoría cada vez que lo necesitaba.

A mi co-asesora, Stephany Callañaupa, quien labora en el INAIGEM, a Elver Villalobos, Jairo Valdivia y Christian Yarleque por acompañarme cada semana y abrirme las puertas al mundo de la investigación.

A a mi asesor Dr. Alejandro Alcántara Boza y a mis profesores de la universidad, Primo de la Cruz, Julio Gutierrez, Anggelo Tenna, Máximo Ayala, José Quispe, José Sandoval, Luis Huamán, Walter Arévalo, Rosa Medina, Luis Garnica, Dante Loayza, y José Osejo.

Debo agradecer también a Cesar Aybar, Roy Yali, Fernando Prudencio y Antony Barja quienes estuvieron conmigo desde el inicio de esta tesis, por ser referentes muy importantes desde mis años universitarios y por siempre estar dispuestos a ayudar y compartir sus conocimientos conmigo de manera incondicional.

Y por último, a mis amigos, a mi hermana, mis dos abuelos, a Dios y a mi madre por siempre creer en mí. Sinceramente, ¡Muchas Gracias!

A Tito y a Toto ...

Índice general

Indice de tablas **XVI**

Indice de figuras **XXVIII**

1. Introducción **1**

1.1. Planteamiento del problema 1

1.2. Formulación del problema 3

1.2.1. Pregunta general 3

1.2.2. Preguntas específicas 3

1.3. Objetivos de la investigación 4

1.3.1. Objetivo general 4

1.3.2. Objetivos específicos 4

1.4. Justificación de la investigación 4

1.5. Limitaciónes en la investigación 5

2. El marco teórico **7**

2.1. Antecedentes de la investigación 7

2.2. Bases teóricas 9

2.2.1. Precipitación 9

2.2.2. Tipos de precipitación 10
2.2.3. Precipitación en los Andes Centrales 15
2.2.4. Estacionalidad y microfísica de la precipitación en los Andes centrales 17
2.2.5. Temperatura y Humedad 18
2.2.6. Conceptos básicos de teledetección 20
2.2.7. Radar de Apertura Sintética (SAR) 25
2.2.8. Mecanismos de interacción de la señal radar con la superficie 28
2.2.9. Efectos de la topografía en las imágenes radar 29
2.2.10. Retrodispersión 31
2.2.11. Glaciar 32
2.3. Defininción de términos 37
2.3.1. Impactos hidrometeorológicos 37
2.3.2. Fase de precipitación 37
2.3.3. Radar de Apertura Sintética 38
2.3.4. Retrodispersión 38
2.3.5. Altura de línea de nieve 38

3. Hipótesis y variables **39**

3.1. Hipótesis 39
3.1.1. Hipótesis general 39
3.1.2. Hipótesis específicas 39
3.2. Variables 40
3.2.1. Variable Dependiente 40

3.2.2. Variable Independiente 40

4. Materiales y metodología **41**

4.1. Descripción del área de estudio 41

4.1.1. Ubicación 41

4.1.2. Accesibilidad 43

4.1.3. Aspectos físicos 44

4.1.4. Aspectos biológicos 48

4.1.5. Aspecto socioeconómico 51

4.1.6. Aspecto cultural 53

4.2. Instrumentos y recolección de información 54

4.2.1. Datos meteorológicos 54

4.2.2. Datos Satelitales 56

4.3. Metodología 58

4.3.1. Procesamiento de datos del CEMGEM 58

4.3.2. Obtención de datos del tipos de precipitación 59

4.3.3. Procesamiento de datos de la estación automática Huaytapallana - SENAMHI 60

4.3.4. Obtención de imágenes radar SENTINEL 1 y definición de líneas de estudio 61

4.3.5. Determinación de la altura de la línea de nieve 63

5. Resultados y discusión **65**

5.1. Caracterización de los eventos y tipos de precipitación 65

5.1.1. Eventos registrados 65

5.1.2. Comparación de información meteorológica 67

5.1.3. Casos de estudio 67

5.1.4. Ocurrencia de los tipos de precipitación 76

5.1.5. Análisis de ocurrencia según temperatura y humedad relativa 77

5.1.6. Análisis de ocurrencia según el ciclo diurno 78

5.1.7. Discusión de la caracterización de eventos de precipitación 80

5.1.8. Caracterización de las variables hidrometeorológicas . . 83

5.1.9. Análisis mensual de las variables hidrometeorológicas . 86

5.1.10. Discusión de la caracterización de las variables hidrometeorológicas a nivel mensual 88

5.2. Analisis de la dinámica superficial y los procesos de ablación / acumulación en el Sistema Glaciar 91

5.2.1. Descripción visual del Sistema Glaciar Huaytapallana . 91

5.2.2. Análisis de imágenes Radar de Apertura Sintética SAR 94

5.2.3. Identificación de la línea de nieve con imágenes SAR e imágenes ópticas 99

5.2.4. Análisis del comportamiento entre las zona de ablación y acumulación 101

5.2.5. Discusión del análisis de la dinámica superficial y los procesos de ablación / acumulación en el Sistema Glaciar Huaytapallana 104

5.3. Correlación entre variables hidrometeorológicas y valores de retrodispersión 105

5.4. Determinación de impactos 108

6. Conclusiones **111**

7. Recomendaciones **115**

8. Referencias Bibliográficas **117**

Referencias Bibliográficas **132**

A. Anexo de Fotografías **133**

B. Anexo de Gráficos **139**

C. Anexo de Tablas **159**

Índice de tablas

2.1. **Bandas de la región microondas más utilizadas en teledetección** 26

4.1. **Variables registradas por los equipos de CEMGEM. DSD : Disdrómetro; EMC: Estación meteorológica compacta; OTT Pluv: Pluviometro** 59

4.2. **Clasificación de los tipos de precipitación según la Tabla 4680** 60

4.3. **Imágenes ópticas Sentinel-2 utilizadas** 63

5.1. **Tabla de contingencia entre los días de ocurrencia de nieve/lluvia registrados por el equipo de vigilancia y los registros respectivos realizados por el disdrómetro** 66

5.2. **Contribución a la precipitación (en mm) y proporción porcentual de los tipos de precipitación en su respectiva fase (sólida-líquida)** 77

5.3. **Altura de la línea de separación entre la zona de ablación y acumulación para los años 2019, 2020 y 2021** . . 99

5.4. **Rangos altitudinales de las zonas de ablación y acumulación** 102

5.5. **Coeficientes de correlación de Pearson (R) para las respectivas zonas de acumulación y ablación en las laderas de estudio** 106

C.1. **Comparación de registros realizados por el disdrómetro, pluviómetro de alta precisión y estación automática** 160

Índice de figuras

2.1. **Formación de una gota de lluvia a partir de un núcleo de condensación.** 10

2.2. **Comparación entre los diferentes tamaños de partículas de aerosol y gotas de lluvia. Adaptado de UCAR Center for Science Education** 11

2.3. **Proceso de formación de los copos de nieve. Elaboración propia** 12

2.4. **Temperatura de formación de los copos de nieve. La línea roja: temperatura de formación heterogénea (con núcleo de condensación) Línea azul: temperaturas óptimas para la formación homogénea (sin núcleo de condensación). Fuente: Wallace y Hobbs, 1977** 12

2.5. **Esquema de la precipitación orogénica. Adaptado de: Britannica** 13

2.6. **Estructura vertical de un sistema convectivo con un núcleo de 16 km de altura y sistemas estratiformes a los lados con 10 km de altura. La tonalidad roja indica gotas de mayor diámetro, un posible indicador de granizo Fuente: Villalobos-Puma et al., 2019** 14

2.7. **Estructura de un sistema estratiforme, a comparación de la figura, este sistema solo alcanza los 10 km de altura y se observa con mayor claridad la banda brillante o "melting layer" a unos 5 km de la superficie. Fuente: Cortesía de Elver E. Villalobos** 15

2.8. **Esquema básico de los principales conductores de humedad y precipitación en los Andes centrales. Alta de Bolivia (AB) ubicada a altos niveles (200 hPa) y el Flujo de Humedad Nor Oeste (FHNO) a bajos niveles (800 hPa)** 16

2.9. **Nube "bandera" característica en los picos de las montañas con hielo perenne, son factores que contribuyen a las precipitaciones en estas zonas. Fuente (Houze, 2014)** 17

2.10. **Variación diurna de la distribución del tamaño de las partículas en los Andes Centrales en función de las clases de lluvia (lluvia ligera (L), lluvia media (M) y lluvia fuerte (H)), (a) 15-20 LST, (b) 21-02 LST, (c) 03-08 LST, (d) 09-14 LST.Fuente: Villalobos-Puma et al., 2019** 18

2.11. **Diagrama vertical de la tierra y atmósfera donde la capa límite o boundary layer se ubica en la parte inferior de la troposfera. Adaptado de: Stull y Ahrens, 2000.** 19

2.12. **Componentes de la teledetección. Elaboración propia** . 22

2.13. **Espectro electromagnético Fuente: Graciani et al., (2011)** 23

2.14. **Atenuación de la atmósfera en los diferentes rangos del espectro electromagnético. Los bajos niveles de atenuación en el rango de las microondas (1 – 100 GHz) explican la transparencia de nubes, humo, lluvia en los radares. Fuente: Woodhouse, 2017** 24

2.15. **Estructura de un sistema Radar de Apertura Sintética. Adaptado** 25

2.16. **Estructura de un sistema Radar de Apertura Sintética. Adaptado** 26

2.17. **Polarización vertical y horizontal de una onda radar** . 27

2.18. **Efecto de *escorzo* o *foreshortening* en imágenes SAR** . 28

2.19. **Principales tipos de interacción de las ondas radar en distintas superficies. Fuente: European Space Agency, 2007** 29

2.20. **Principales tipos de interacción de las ondas radar en distintas superficies. Elaboración propia** 30

2.21. **Efecto *layover* en las imágenes SAR** 30

2.22. **Efecto de *sombra* en imágenes radares** 31

2.23. **Diferentes áreas utilizadas para la normalización de backscatter y futura visualización en las imágenes SAR en unidades de decibeles (dB). Beta nought β - plano del suelo proyectado en la dirección de adquisición; Sigma nought σ – plano de la Tierra modelado usando un elipsoide de referencia; Gamma nought γ – plano perpendicular a la dirección de adquisición local Fuente: Small, 2011.** 32

2.24. **Esquema de los principales componentes de un sistema glaciar, esta estructura puede variar según la topografía y factores climáticos. Adaptado de Candas, 2017** 34

2.25. **Esquema de los valores que toma la constante dieléctrica en diferentes materiales de la naturaleza. Podemos observar el alto contraste entre los materiales secos (entre 0 y 10) y el agua (80). Fuente: Adaptado de Podest, 2017** 36

2.26. **Diferencia de rugosidad entre la nieve fresca (arriba) y el hielo seco o firn (abajo) la cual puede ser percibida por el sensor SAR. Fuente: Winsvold et al., 2018** . . . 37

4.1. **Mapa de ubicación del sistema glaciar Huaytapallana, ubicado en la parte oeste de la cordillera Huaytapallana (circulo negro en el panel de la parte inferior derecha) y en la región Junin (recuadro celeste en el panel de parte superior derecha), nuestra zona de estudio de encuentra resaltada con un contorno negro en el panel principal de la parte izquierda.** 42

4.2. **Mapa de Accesibilidad al Sistema Glaciar Huaytapallana desde la Plaza Constitución Huancayo hasta el Refugio "Virgen de las Nieves" pasando por los anexos Uñas, Molino, Vilcacoto y los centros poblados de Añaspampa, Acompalca. El Sistema Glaciar Huaytapallana se ubica dentro del Área de Conservación regional Huaytapallana.** 43

4.3. **Temperatura media y precipitación mensual para el periodo de 2014-2022, elaborado con datos de la estación automática Huaytapallana - SENAMHI y eliminando los años 2015 y 2017 por falta de información.** . 44

4.4. **Mapa geológico correspondiente al cuadrángulo 24m-2 de Jauja - escala 1:50 000 elaborado por INGEMMET y adaptado para señalar la zona de estudio. Fuente: Portal web Geocatmin** 46

4.5. **Mapa geomorfológico de la zona de estudio con datos obtenidos de INGEMMET.** 47

4.6. **Mapa de ubicación de las principales subcuencas hidrográficas que nacen en el Sistema Glaciar Huaytapallana Fuente: INAIGEM** 48

4.7. **Mapa de ecosistemas presentes en el ACR Huaytapallana construido con información del Mapa Nacional de Ecosistemas MINAM, 2019** 50

4.8. **Parte de la fauna presente en la ACR Huaytapallana** . 51

4.9. **Evolución del Índice de Desarrollo Humano para el periodo 2003-2019 de los cinco distritos involucrados en el ACR Huaytapallana. Fuente: Elaboración propia con información de PNUD, 2022** 52

4.10. **Las "apachetas" son sonsideradas una forma de pago o "pagapu" en símbolo de agradecimiento y respeto hacia los espíritus de las montañas. El nevado Huaytapallana es conocido por recibir numerosos pagapus durante el año. Fotografía propia** 54

4.11. **Estación Meterológica Automática Huaytapallana - SENAMHI, la cual brinda información sobre temperatura, humedad relativa, precipitación, presión atmosférica y velocidad-dirección del viento** 55

4.12. **Ubicación y fotografías del refugio y entrada a la zona de estudio "Virgen de las Nieves", Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CEMGEM - Proyecto TAMYA) y la Estación Meteorológica Automática (EMA) Huaytapallana (SENAMHI)** . . 57

4.13. **Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (izquierda), instrumentos de medición utilizados para el estudio (derecha). De izquierda a derecha en la figura (b): pluviómetro de alta precisión OTT Pluvio2, disdrómetro OTT Parsivel, Estación Meteorológica Compacta.** 58

4.14. **Líneas y puntos de estudio en la zona este, sur y oeste del sistema glaciar Huaytapallana** 62

4.15. **Imágenes satelitales ópticas Sentinel 2 de los años 2019, 2020 y 2021** 63

5.1. **Comparación de los datos de (a) Temperatura (°C) y (b) Humedad relativa (%) a escala horaria registrados por la estación meteorológica compacta (línea negra) y la estación meteorológica Huaytapallana – SENAMHI (línea azul)** 68

5.2. **Desarrollo temporal del evento de precipitación ocurrido el 25 de abril del 2022 a las 14:06 horas de la tarde. Panel (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia registrada por el pluviómetro Pluvio2 (línea azul) y el disdrómetro (línea negra); Panel (b): temperatura; Panel (c): humedad relativa; Panel (d): velocidad de viento en (m/s)** 70

5.3. **Rosa de viento generada a partir de los registros de velocidad y dirección del viendo durante el evento del 25 de abril del 2022. Se observa que los vientos más fuertes (2.5 - 5 m/s) provienen de sureste y en menor medida del sur** 71

5.4. **Desarrollo temporal del evento de precipitación ocurrido el 30 de agosto del 2022 a las 5:17 horas de la mañana. Panel (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia registrada por el pluviómetro Pluvio2 (línea azul) y el disdrómetro (línea negra). Panel (b): evolución temporal de la temperatura. Panel (c): evolución temporal de la humedad relativa; Panel (d): velocidad de viento en (m/s)** 73

5.5. **Rosa de viento generada a partir de los registros de velocidad y dirección del viendo durante el evento del 30 de agosto del 2022. Se observa que la totalidad de los vientos provienen del este, sureste y sur con velocidades de hasta 5 m/s.** 74

5.6. **Desarrollo temporal del evento de precipitación ocurrido el 20 de octubre del 2022 a las 18:03 horas de la mañana. Panel (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia registrada por el pluviómetro Pluvio2 (línea azul) y el disdrómetro (línea negra).** 75

5.7. **Rosa de viento generada a partir de los registros de velocidad y dirección del viendo durante el evento del 20 de octubre del 2022. Para este caso, los vientos se originaron en el sur con velicidades máximas de 6.5 m/s.** 76

5.8. **Gráfico de torta para las proporciones de los tres tipos de precipitación ocurridos en el Sistema Glaciar Huaytapallana.** 77

5.9. **Distribución de los datos de los tipos de precipitación según la temperatura (panel superior) y humedad relativa (panel inferior) mediante histogramas y graficos de densidad.** 79

5.12. **Ciclo diurno de la ocurrencia de granizo, lluvia y nieve de los eventos registrados durante los meses de abril, agosto, septiembre y octubre 2022** 79

5.10. **Identificación de umbrales de temperatura para la precipitación de tipo granizo y nieve. Las lineas punteadas indican el valor de temperatura corrwspondiente al percentil 95 para la ocurrencia de nieve (1.7°C) y granizo (3.3°C)** 80

5.11. **Rosa de viento representativas para cada tipo de precipitación** 81

5.13. **Ciclo diurno de la temperatura y humedad relativa para las temporadas húmedas (septiembre – marzo) y seca (abril-agosto) obtenido con datos de la estación meteorológica Huaytapallana - SENAMHI para los años 2013- 2021** 84

5.14. **Ciclo diurno de la velocidad y dirección del viento. Fuente: Estación meteorológica Huaytapallana - SENAMHI** 85

5.15. **Ciclo diurno de la precipitación acumulada promedio mensual con datos registrados por el pluviómetro de la Estación Meteorológica Huaytapallana – SENAMHI a temperaturas mayores a 3°C** 87

5.16. **Ciclo diurno de la precipitación acumulada promedio mensual con datos registrados por el pluviómetro de la Estación Meteorológica Huaytapallana – SENAMHI a temperaturas menores a 1.7°C** 88

5.17. **Variabilidad mensual de la Precipitación (a), Temperatura (°C) (b) y Humedad relativa (c). Fuente: Estación Meteorológica. La línea roja en el panel (b) representa el umbral de 1.7°C mientras que la línea azul en el panel (c) representa el umbral de 80 % de humedad relativa** 89

5.18. **Rosa de vientos del comportamiento mensual de la velocidad y dirección del viento. Fuente: Estación Meteorológica Huaytapallana - SENAMHI** 90

5.19. **Fotografía de la lengua Glaciar Oeste del Sistema Glaciar Huaytapallana tomada el día 30 de abril del 2022. Fuente: David Guizado** 92

5.20. **Capa de nieve de la lengua glaciar oeste. Foto tomada el día 30 de abril 2022. Fuente David Guizado.** 92

5.21. **Fotografía de la lengua glaciar Oeste tomada el 25 de agosto del 2022. Fotografía propia** 93

5.22. **Textura de la superficie de la lengua glaciar Oeste. Se puede observar los cristales de hielo y pequeñas deposiciones de lodo. Fotografía tomada el 25 de agosto del 2022 (temporada seca).** 94

5.23. **Los números indican las características glaciares detectadas por las imágenes SAR: (1) Inicio de la temporada de lluvias; (2) Disminución de valores de retrodispersión por la acumulación de las capas de nieve; (3) capas de nieve; (4) zona de cumbre en temporada húmeda; (5) inicio de la temporada seca; (6) aumento de valores de retrodispersión por el derretimiento y/o solidificación de la nieve; (7) capa de hielo superficial; (8) capa de roca y nieve; (9) cumbre en temporada seca; (10) limite glaciar a 4900 msnm. Las líneas punteadas en las cotas 5000 y 5200 son los límites entre la zona de ablación y acumulación respectivamente.** . . 96

5.24. **Serie temporal de retrodispersión para las laderas (a) oeste, (b) sur, (c) este con su respectivo perfil topográfico al lado derecho. El panel (d) muestra la serie temporal de precipitación acumulada diaria para el periodo de estudio 2019 – 2021. Las flechas de color negro indican la zona de cumbre para cada ladera mientras que las flechas naranjas indican los puntos de mayor pendiente para los paneles (a) y (c) y de menor pendiente para la el panel (b)** 98

5.25. **Mapa de ubicación de las líneas de nieve representativas para cada ladera del Sistema Glaciar Huaytapallana. Panel (a): Vista total de las tres laderas en el Nevado Huaytapallana; panel (b): Ladera Oeste; Panel (c) Ladera Sur; Panel (d) Ladera Este** 100

5.26. **Ubicación de la altura de línea de nieve representadas con los triángulos negros obtenidas con imágenes ópticas para los años 2019, 2020 y 2021. Panel (a): Ladera Oeste; Panel (b): Ladera Sur; Panel (c): Ladera Este** . 101

5.27. **Evolución temporal de los valores de retrodispersión promedio para los rangos altitudinales de la zona de ablación (líneas rojas) y acumulación (líneas azules) para las laderas (a) Ladera Oeste, (b) Ladera Sur, (c) Ladera Este** 103

5.28. **Serie temporal con resolución 12 días de las variables de (a) precipitación, (b) temperatura, (c) humedad relativa, (d) valores de retrodispersión radar para las zonas de acumulación y (e) valores de retrodispersión radar para las zonas de ablación** 107

5.29. **Gráficos de correlación (p-value <0.05) entre los valores de retrodispersión radar de las zonas de ablación (paneles a, b y c) y acumulación (paneles d, e y f) con los registros de precipitación (mm), temperatura (°C) y humedad relativa (%) de la Ladera Oeste.** 108

A.1. **Registros de eventos, obtenidos por observación del personal de vigilancia y miembros del proyecto TAMYA** 134

A.2. **Evento de nevada ocurrido el 25 de abril del 2022. Fotografía tomada por miembros del equipo TAMYA** . 135

A.3. **Evento de nevada y granizada ocurrido el 16 de septiembre del 2022. Fotografía tomada por miembros del equipo TAMYA.** 136

A.4. **Evento de nevada ocurrido el 4 de octubre del 2022, Fotografía tomada por miembros del equipo TAMYA** . 137

A.5. **Evento de nevada ocurrido el 21 de octubre del 2022, Fotografía tomada por miembros del equipo TAMYA** . 138

B.1. **Registros anuales de temperatura con datos del año 2013 al 2022. Fuente: Estación meteorológica Automática Huaytapallana - SENAMHI** 140

B.2. **Registros anuales de humedad relativa con datos del año 2013 al 2022. Fuente: Estación meteorológica Automática Huaytapallana - SENAMHI** 141

B.3. **Registros anuales de precipitación con datos del año 2013 al 2022. Fuente: Estación meteorológica Automática Huaytapallana - SENAMHI** 142

B.4. **Información del evento de precipitación ocurrido el 25 de abril del 2022 a las 04:46 horas. (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia; (b), (c) y (d): evolución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento** 143

B.5. **Rosa de viento para el evento ocurrido el 25 de abril del 2022 a las 04:46 horas** 144

B.6. **Información del evento de precipitación ocurrido el 16 de septiembre del 2022 a las 10:36 horas. (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia; (b), (c) y (d): evolución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento** 145

B.7. **Rosa de viento del evento de precipitación ocurrido el 14 de septiembre del 2022 a las 17:15 horas** 146

B.8. **. Información del evento de precipitación ocurrido el 16 de septiembre del 2022 a las 12:19 horas. (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia(b), (c) y (d): evolución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.** 147

B.9. **Rosa de viento del evento de precipitación ocurrido el 16 de septiembre del 2022 a las 12:19 horas** 148

B.10. **I. Información del evento de precipitación ocurrido el 27 de septiembre del 2022 a las 17:18 horas. (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia(b), (c) y (d): evolución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. N.D = sin registro** 149

B.11. **Rosa de viento del evento de precipitación ocurrido el 27 de septiembre del 2022 a las 19:21 horas** 150

B.12. **Ciclo diurno de la temperatura elaborado con los registros de la Estación meteorológica Huaytapallana - SENAMHI** 151

B.13. **Ciclo diurno de la humedad relativa elaborado con los registros de la Estación meteorológica Huaytapallana – SENAMHI** 152

B.14. **Rosas de viento durante el día y noche para cada estación del año. Elaborado con los registros de la Estación meteorológica Huaytapallana – SENAMHI** 153

B.15. **Gráfico de calor de valores de retrodispersión obtenidos con las imágenes SAR para la lengua glaciar Oeste para el periodo 2019-2021. T.H: temporada húmeda (lluvias) en los Andes centrales. T.S: temporada seca. Líneas punteadas de abajo hacia arriba representan (1) el límite glaciar, (2) separación de las zonas de ablación y acumulación y (3) zona de cumbre** 154

B.16. **Gráfico de calor de valores de retrodispersión obtenidos con las imágenes SAR para la lengua glaciar Sur para el periodo 2019-2021. T.H: temporada húmeda (lluvias) en los Andes centrales. T.S: temporada seca. Líneas punteadas de abajo hacia arriba representan (1) el límite glaciar, (2) separación de las zonas de ablación y acumulación y (3) zona de cumbre** 155

B.17. **Gráfico de calor de valores de retrodispersión obtenidos con las imágenes SAR para la lengua glaciar Este para el periodo 2019-2021. T.H: temporada húmeda (lluvias) en los Andes centrales. T.S: temporada seca. Líneas punteadas de abajo hacia arriba representan (1) el límite glaciar, (2) separación de las zonas de ablación y acumulación y (3) zona de cumbre** 156

B.18. **Gráficos de correlación (p value <0.05) entre los valores de retrodispersión y las variables meteorológicas para las zonas de acumulación (paneles (a), (b) y (c)) y ablación (paneles (d), (e), (f)) de la Ladera Sur** . . . 157

B.19. **Gráficos de correlación entre los valores de retrodispersión y las variables meteorológicas para las zonas de acumulación (paneles (a), (b) y (c)) y ablación (paneles (d), (e), (f)) de la Ladera Este** 158

Capítulo 1

Introducción

Esta sección está dedicada a exponer la problemática que gira en torno a los glaciares tropicales, su dinámica hidrometeorológica y el estudio de los mismos con técnicas de sensoramiento remoto y equipos de medición in-situ. Así mismo, se plantea las preguntas y objetivos de investigación sobre los cuales la presente tesis ha sido construida. Finalmente, se resalta la importancia de esta investigación y las limitaciones encontradas a lo largo de su desarrollo.

1.1. Planteamiento del problema

Los glaciares son variables clave para las estrategias de detección temprana en los estudios relacionados con el clima mundial por su alta sensibilidad a los cambios de las condiciones climáticas, las cuales están relacionados con el retroceso y la pérdida de masa glaciar (Paul et al., 2015; Steiner et al., 2008). Por ejemplo, durante el período 1980 - 2015, la tasa de contracción del área de los glaciares mundiales fue del 0,18 % al año y la pérdida de masa de los glaciares mundiales fue de 0,25 m al año (Li et al., 2019). Los glaciares tienen distintos comportamientos y respuestas según la ubicación latitudinal en la que se encuentran, es así que, los glaciares tropicales resultan ser los más sensibles a la variabilidad climática. El último informe de The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) se resaltó que la pérdida de masa máxima del 82-95 % del área total de los glaciares tropicales andinos se alcanzó antes de 2019 (estudios durante el periodo 2000-2016) y que esta pérdida seguiría incluso si la temperatura global se estabilizara.

El Perú cuenta con el 68.3 % de los glaciares tropicales andinos (Veettil y Kamp, 2019) los cuales tienen un importante papel en los servicios ecosistémicos, en el turismo, los riesgos naturales, la cultura y cosmovisión de las comunidades (Yarleque et al., 2018). La cordillera Blanca ha sido uno de los sistemas glaciares cuya dinámica ha sido una de las más estudiadas (Motschmann et al., 2020), con la mayor cobertura de glaciares en los trópicos y una historia documentada de impactos y desastres relacionados con los glaciares que datan desde el siglo XVII (Vuille et al., 2008). Le sigue la cordillera de Vilcanota, (Salzmann et al., 2013) donde se encuentra el nevado Quelccaya ubicada al sur de Perú (Thompson et al., 1979; Yarleque et al., 2018). Para ambos casos, los escenarios previstos para finales del siglo XXI sugieren la existencia de superficie glaciar solo por encima de los 5800 msnm.

Una de las cordilleras de gran importancia para estudiar es la Cordillera Huaytapallana, la cual ayuda como recurso hídrico en épocas de estiaje a la ciudad altoandina de Huancayo, donde habitan alrededor de doscientos mil habitantes (INEI, 2022) y representa una fuente de ingresos a las comunidades mediante la actividad turística (MINCETUR, 2018). Además, la cordillera Huaytapallana tampoco es ajena al cambio climático y al retroceso glaciar. Para el año 2011, el nevado Huaytapallana tenía solo el 42 % de la cobertura glaciar que tenía en 1984 (de 26,5 km2 a 14,9 km2, mientras que la cota del límite glaciar aumentó en 115 m (López-Moreno et al., 2014). Bulege-Gutiérrez y Custodio, 2020 estimaron la reducción de cobertura glaciar para del 2011 al 2016 de 11,3 km2. a 14,9 km2. Se prevé que la temperatura siga aumentando durante las próximas décadas, tanto en la estación húmeda (+1,3°C) como en la seca (+1,2°C), lo cual repercutiría directamente en la pérdida de masa y extensión glaciar del nevado (López-Moreno et al., 2014). Los estudios que se han realizado en esta zona (Aliaga y Cosme, 2018; Bulege-Gutiérrez y Custodio, 2020; Clark y Barrand, 2020), han aportado valiosa información que confirma la evidente pérdida de masa glaciar. No obstante, aun no se tiene suficiente conocimiento sobre la forma en la que las principales variables hidrometeorológicas (temperatura, precipitación y humedad relativa) interactúan e impactan con el Sistema Glaciar Huaytapallana.

Otro punto a destacar es que muchas de las variables incluidas en los estudios sobre el cambio de los glaciares se suelen cartografiar y analizar mediante imágenes ópticas (Burns y Nolin, 2014; Silverio y Jaquet, 2005; Veettil et al., 2018). Sin embargo, este tipo de imágenes se ven limitadas debido a las condiciones meteorológicas (principalmente la nubosidad) y de luminosidad, lo cual se convierte en un obstáculo importante, sobre todo si se desea estudiar

los regímenes de precipitación en las regiones glaciares que, durante los periodos de mayor ocurrencia de precipitación, suelen estar cubiertos de nubes dificultando la visibilidad y evitando los estudios temporales con series de tiempo robustas (Nagler et al., 2015).

Por otro lado, los sistemas glaciares presentan tanto precipitación sólida (nieve, granizo, etc.) como líquida (lluvia, llovizna, etc). Las precipitaciones sólidas, generalmente no son detectadas adecuadamente por los pluviómetros instalados en las estaciones meteorológicas, las cuales solo proporcionan información sobre la cantidad (mm). Así mismo, para aplicar metodologías de estimación del tipo de precipitación utilizando datos de temperatura, humedad relativa, entre otras variables, necesitan de datos observados para poder ser calibrados (Sims y Liu, 2015; Sun et al., 2022). El uso de equipos de alta sensibilidad y con la capacidad de detectar los diferentes tipos de precipitación como el disdrómetro OTT Parsivel ayuda a resolver este problema, permitiendo conocer la microfísica de los eventos de precipitación y facilitar la detección de cambios de fase, etc (Tokay et al., 2014). Es por eso que los objetivos de la presente investigación están dedicados al entendimiento del comportamiento de las principales variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura y humedad) sobre el sistema glaciar Huaytapallana y sus posibles impactos. Se abordarán los problemas mencionados líneas arriba mediante la generación una serie temporal de imágenes radar de apertura sintética SAR y el análisis de las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa y datos del tipo de precipitación registrados por el disdrómetro OTT Parsivel adquirido en el marco del proyecto TAMYA.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Pregunta general

- ¿Cuales son los impactos generados por las variables hidrometeorológicas en el Sistema Glaciar Huaytapallana?

1.2.2. Preguntas específicas

- ¿Qué características tienen los eventos de precipitación en el Sistema Glaciar Huaytapallana?

- ¿Qué cambios presenta la superficie glaciar Huaytapallana en una escala estacional?
- ¿Cómo cambia el sistema glaciar Huaytapallana ante la variación de las principales variables hidrometeorológicas (temperatura, precipitación y humedad relativa)?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Identificar los posibles impactos generados por las variables hidrometeorológicas en el sistema glaciar Huaytapallana mediante técnicas de sensoramiento remoto y datos observados.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los eventos de precipitación ocurridos en el Sistema Glaciar Huaytapallana en el año 2022
- Analizar la dinámica de la superficie glaciar y los procesos de ablación / acumulación del nevado Huaytapallana mediante imágenes satelitales de radar de apertura sintética (SAR).
- Determinar la relación de la temperatura, precipitación y la humedad relativa del aire en el comportamiento de las zonas de ablación/acumulación observada mediante imágenes de radar de apertura sintética (SAR) y datos meteorológicos.

1.4. Justificación de la investigación

El nevado Huaytapallana abastece de agua a las subcuencas de los ríos Shullcas y Pariahuanca que son parte del valle del Mantaro. Esta región juega un papel importante en la economía nacional ya que sus aguas son utilizadas en la producción agrícola, el abastecimiento del agua para el consumo humano de las ciudades de Concepción y Huancayo y para la generación hidroeléctrica, la cual suministra el 35 % de la capacidad nacional (Silva et al., 2008). Al tener varios sistemas socioeconómicos que dependen del sistema

glaciar Huaytapallana y estar localizado en una zona tropical, lo que lo hace altamente sensible a los cambios globales del clima, resulta importante el poder entender los impactos presentes y futuros producidos por las variables hidrometeorológicas en esta área de estudio.

Por otro lado, gracias a la tecnología de sensoramiento remoto, el estudio del retroceso glaciar se ha ido facilitando, repotenciando y haciendo sinergia con las variables meteorológicas, tal como se demuestra en el estudio de López-Moreno et al., 2014. Los instrumentos radar de apertura sintética SAR, tienen la ventaja de operar en longitudes de onda que no se ven obstaculizadas por la nubosidad o la falta de iluminación y puede adquirir datos sobre un sitio durante el día o la noche en todas las condiciones climáticas (Bermudez et al., 2018; Nagler et al., 2015).

Esta investigación utiliza gráficos de calor generados con la metodología propuesta en el estudio de Winsvold et al., 2018, que nos permiten observar de manera novedosa la evolución de los valores de retrodispersión, tanto desde la dimensión temporal, como altitudinal en zonas de lengua glaciares. De la misma forma, se cuenta con sofisticados equipos como el disdrómetro OTT PARSIVEL que permiten la identificación de los distintos tipos de precipitación el cual nos brinda la oportunidad de entender la microfísica en las dinámicas que ocurren en un sistema glaciar-temperatura-precipitación como en Valdivia et al., 2020 y Villalobos-Puma et al., 2019, pudiendo obtener mas investigaciones futuras, facilitar pronósticos y precisar mejores medidas de mitigación a favor del bienestar futuro de las comunidades.

1.5. Limitaciónes en la investigación

La presente investigación se vio limitada en sus inicios por problemas logísticos que retrasaron la instalación de los equipos de medición de la precipitación. Debido a esto, no se pudo tener registros de los eventos de precipitación durante la temporada de diciembre 2021 a febrero 2022 como se esperaba; es por ello que los análisis para la caracterización de la precipitación están basados en registros obtenidos durante el mes de abril, agosto y septiembre del 2022.

La segunda limitación está relacionada con la metodología; la compleja topografía del sistema glaciar Huaytapallana dificultó el hallazgo de las lenguas glaciares más adecuadas para la generación de la serie temporal de los valores de retrodispersión; esto se vio reflejado en la presencia de ruido y cambios

bruscos en los valores observados en los gráficos de calor producidos por la presencia de grietas y/o picos rocosos en las líneas de estudio. Por otra parte, las zonas de alta montaña o relieve accidentado necesitan pasos adicionales en el procesamiento de las imágenes SAR que incrementan el costo computacional y el tiempo. Para esta investigación se optó por el procesamiento automático desde plataformas basadas en la nube, lo cual nos permitió el ahorro de tiempo, pero que omitió algunos pasos de corrección lo cual se evidencian en la presencia de ruido en nuestras imágenes SAR.

Por último, la accesibilidad a las zonas de estudio también representó un aspecto en contra; de las tres zonas de estudio, solo una contaba con caminos seguros y de fácil acceso, la cual se visitó durante una sola temporada (junio-agosto) dejando pendiente una visita durante la temporada de lluvias (diciembre-marzo). A pesar de ello, se considera posible subsanar las limitaciones mencionadas en futuras investigaciones para aumentar la calidad de los resultados.

Capítulo 2

El marco teórico

Esta sección desarrollamos el marco teórico necesario para comprender esta investigación. En primer lugar, damos un recorrido conciso sobre las investigaciones que sirvieron de antecedentes para luego pasar a las bases teóricas, donde se detallan las variables hidrometeorológicas como la precipitación, temperatura, humedad, sistemas glaciares y los sensores radar de apertura sintética (SAR).

2.1. Antecedentes de la investigación

En la investigación de Lhte et al., 2005 titulada: *Relación entre la fase de precipitación y la temperatura del aire: comparación entre los Andes bolivianos y los Alpes suizos*, se observó y comparó la relación entre la fase de precipitación determinada y la temperatura del aire en los Andes Bolivianos y los Alpes Suizos. Utilizando datos de temperatura del aire ventilado a paso semi horario y datos de eventos de precipitación sólida, líquida y mixta se obtuvo una ocurrencia de precipitación líquida al 100 % para temperaturas entre 2.5 y 3°C mientras el rango de temperatura para los eventos de nieve se ubicaron entre los -1°C y -0.5°C en los Andes bolivianos. Así mismo, las diferencias de temperatura para la ocurrencia de precipitación sólida o líquida entre los Andes bolivianos y los Alpes Suizos osciló entre 0,25-0,5 °C lo que significó una buena similitud a pesar de la ubicación geográfica y condiciones

climáticas distintas.

Por otro lado, López-Moreno et al., 2014 analizó una serie temporal de 19 imágenes Landsat Thematic Mapper desde 1984 hasta 2011 para determinar los cambios de la superficie glaciar y la elevación de la línea de nieve en seis zonas montañosas de la Cordillera Huaytapallana. Utilizando el Índice Normalizado de Nieve NDSI y la metodología de detección de nieve propuesta por Dozier, 1989 se obtuvo la altura de línea de nieve para cada imagen que fue analizada en conjunto con datos de precipitación y temperatura. Los resultados arrojaron una pérdida del 56 % de la superficie glaciar en toda la cordillera, pasando de 50,2 km2 en 1984 a 22,05 km2 en 2011 mientras que la línea de nieve sufrió un aumento de entre 93 y 157 m. Los datos de temperatura registraron un aumento de 0,22°C por década dejando abierta la posibilidad de una relación entre el retroceso glaciar y la variabilidad de la temperatura. Por otro lado, se encontró también una asociación entre las disminuciones de cubierta de hielo y los eventos del El Niño mientras que la estabilidad o ligeros incrementos de la cubierta glaciar se vieron asociados con la ocurrencia de La Niña.

Bulege-Gutiérrez y Custodio, 2020, en la investigación titulada: *Cambio climático y retroceso glaciar en la Cordillera Huaytapallana, Perú*, tuvo como objetivo describir y determinar la relación entre la temperatura mínima y el retroceso de la superficie glaciar para el periodo 1986-2016. Con datos meteorológicos proporcionados por el SENAMHI y reportes de la superficie glaciar obtenidos del IGP se obtuvo un aumento de la temperatura mínima media anual que osciló entre 3.435 a 5.227 °C mientras que la pérdida de la superficie glaciar ocurrido entre 1986 y 2016 fue de 15.54 km^2.

En ese mismo año Clark y Barrand, 2020 realiza un estudio del balance de masa para la cordillera Blanca y la cordillera Huaytapallana para el periodo 1978-2018 utilizando imágenes Landsat y modelos de elevación digital (DEM). Los resultados indicaron una pérdida de masa de -0.48 $\pm$ 0.12 m por año destacando a la temperatura y la fase de precipitación como los factores más importantes para dicha pérdida en el Huaytapallana.

En el aspecto de la teledetección radar, utilizando imágenes de Sentinel-1A y B y RADARSAT, Winsvold et al., 2018 buscó cartografiar las propiedades de dos glaciares cerca de Ny-Ålesund en Svalbard y cinco glaciares en el sur de Noruega analizado las series temporales de los valores de retrodispersión en estadísticas de apilamiento en cinco escenarios de aplicación: (1) rastreo de la línea de nieve transitorias con series temporales de las imágenes SAR

y sus valores de retrodispersión, (2) representación de series temporales de facies glaciares de la zona para una delineación más precisa de las zonas y sus variaciones en el tiempo; (3) evolución de la facie flacier firn y su contenido de aire y humedad; (4) detección de eventos de lluvia invernal y (5) mapeo de la superficie glaciar. En este estudio, el uso de imágenes ópticas se redujo al proceso de validación y verificación, junto con datos in-situ. La consistencia de las series temporales permitió recuperar información detallada sobre la superficie y la subsuperficie del glaciar en el tiempo, así como detectar el comportamiento del glaciar ante eventos de precipitación y una mayor precisión en el cartografiado de los glaciares.

Así mismo, Scher et al., 2021 utilizó series temporales de imágenes SAR en zonas de alta montaña para la caracterización del deshielo estacional en los glaciares del Hindu Kush Himalayas (HKH) a lo largo de los años 2017-2019, encontrando que las señales de deshielo persisten durante más de dos tercios del año en elevaciones inferiores a 4000 m.s.n.m. y durante casi la mitad del año natural en elevaciones superiores a 7000 m.s.n.m. Así mismo los datos in situ y los modelos de balance de energía en superficie revelaron la ocurrencia de derritiendo a temperaturas del aire en superficie inferiores a -10 °C.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Precipitación

La precipitación es un fenómeno atmosférico que consiste en la llegada de cualquier meteoro proveniente de la atmósfera hacia la superficie de la tierra (Sarochar, 2009). En términos generales, la precipitación se forma por el ascenso de una masa de aire y su posterior condensación en forma de nubes que, al llegar al punto de saturación máximo, comienza a descargar el exceso en gotas de lluvia, nieve o granizo (Yiğit, 2015). Según Sarochar, 2009, para que ocurra la precipitación, se debe contar con tres factores principales:

- *La temperatura:* al aumentar, genera mayor movimiento entre partículas permitiendo su ascenso hacia capas superiores en la atmósfera
- *Nucleos de condensación:* generalmente partículas o aerosoles que permiten la formación de la gota alrededor suyo.

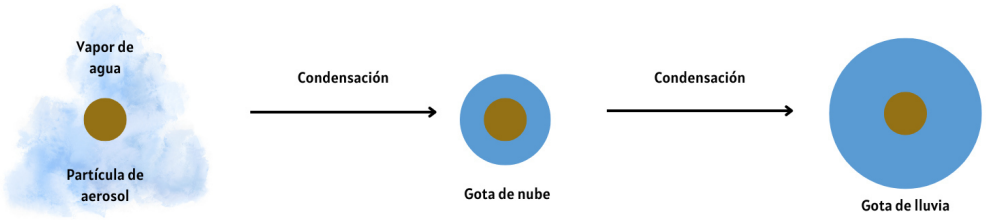


Figura 2.1: **Formación de una gota de lluvia a partir de un núcleo de condensación.**

- *Contenido de humedad:* a mayor contenido de agua en la nube condensada, mayor probabilidad de precipitación debido a la saturación que se produce. El contenido de agua necesario para alcanzar el nivel de saturación dependerá de la temperatura, siendo directamente proporcional a esta.

2.2.2. Tipos de precipitación

Precipitación líquida

La precipitación líquida son gotas de agua que caen con un diámetro de entre 0,5 mm y 2 mm; aquellas gotas con diámetros menores a 0,5 mm se denominan llovizna (Barry y Chorley, 2009). Las gotas de lluvia comienzan a formarse cuando el aire se enfría hasta el punto de no poder mantener el agua en forma de vapor y, junto con la presencia de los núcleos de condensación, permite la formación de gotas (Yiğit, 2015) (Figura 2.1). Sin embargo, para que la precipitación líquida se efectúe, las gotas deben alcanzar un tamaño mayor al de las gotas de nube que se encuentran suspendidas (Figura 2.2), así mismo, se requiere que las gotas de nube de diferentes tamaños choquen y se fusionen en gotas más grandes a temperaturas superiores a - 15°C tal como se indica en Whiteman, 2000).

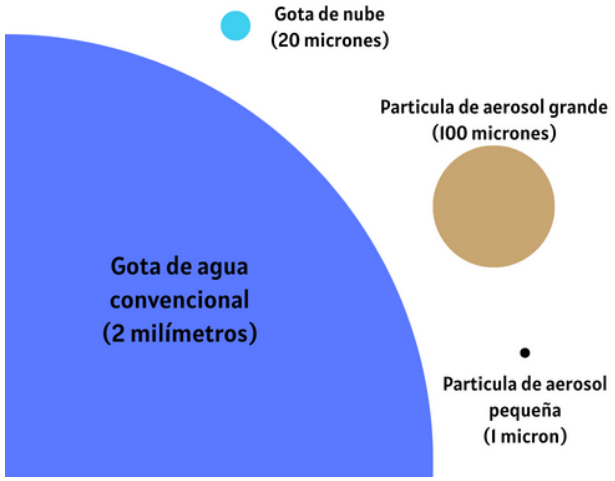


Figura 2.2: **Comparación entre los diferentes tamaños de partículas de aerosol y gotas de lluvia. Adaptado de UCAR Center for Science Education**

Precipitación sólida

Barry y Chorley, 2009 define a la nieve como cristales de hielo que caen en racimos ramificados como copos de nieve; mientras que el granizo son bolas o grumos irregulares de hielo de al menos 5 mm de diámetro formados por capas alternas de hielo opaco y transparente. Similar a la formación de la precipitación líquida, explicado por Wallace y Hobbs, 1977, la precipitación sólida inicia su proceso con la existencia de un núcleo de congelación el cual al incrementar su tamaño comienza a formar las partículas de hielo (Figura 2.3); este núcleo de condensación puede ser de tipo aerosol (congelación heterogénea) o partícula de aire (congelación por deposición). Según Wallace y Hobbs, 1977 la temperatura óptima para la formación de cristales de hielo es entre -35 °C y -15°C. Estos cristales caen a la Tierra en forma de nieve, granizo o lluvia, dependiendo de la temperatura dentro de la nube y en la superficie de la Tierra (Figura 3). La mayor parte de la lluvia comienza como nieve en lo alto de las nubes y a medida que los copos caen en el aire más caliente, se fusionan y se convierten en gotas de lluvia (National Geographic Society, 2019)

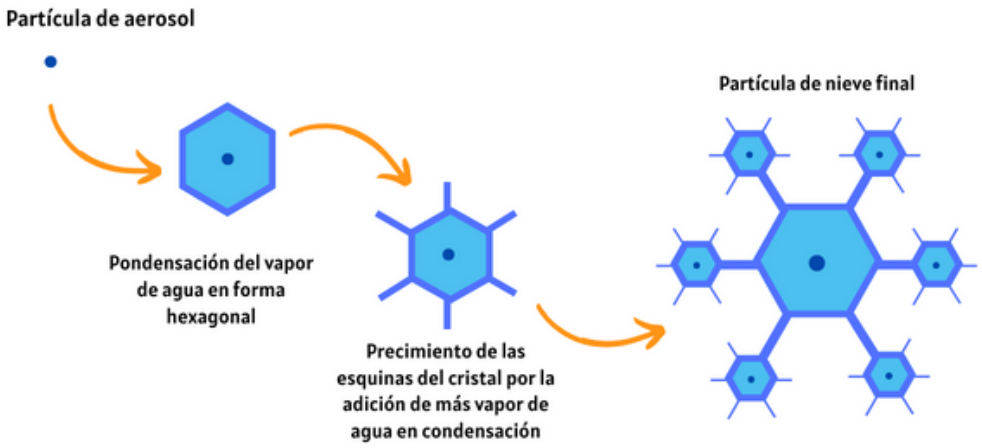


Figura 2.3: **Proceso de formación de los copos de nieve. Elaboración propia**

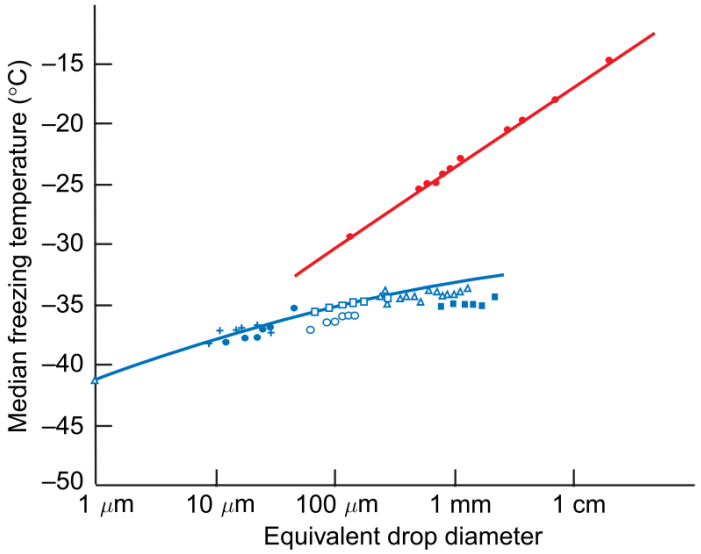


Figura 2.4: **Temperatura de formación de los copos de nieve. La línea roja: temperatura de formación heterogénea (con núcleo de condensación) Línea azul: temperaturas óptimas para la formación homogénea (sin núcleo de condensación). Fuente: Wallace y Hobbs, 1977**

Precipitación orogénica

Se produce en las regiones montañosas, las cuales actúan como una barrera que modifica la dinámica de las masas de aire (Figura 2.5). El ascenso forzado en una ladera de la montaña, produce enfriamiento adiabático que condensa el vapor de agua y produce precipitación (Barry y Chorley, 2009). Así mismo, puede formarse por el calentamiento diurno de las laderas y los vientos ascendentes que generan un proceso de convección (Whiteman, 2000).

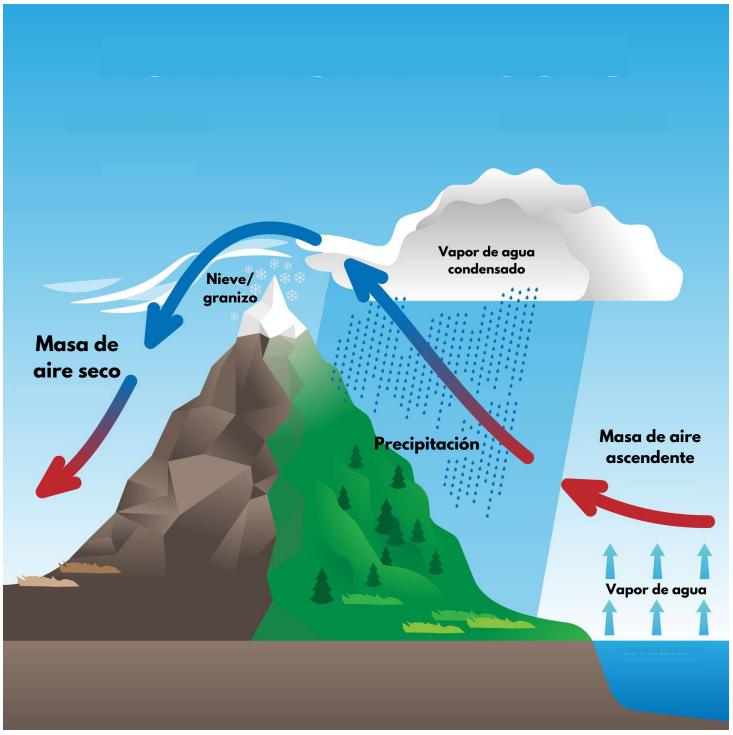


Figura 2.5: **Esquema de la precipitación orogénica. Adaptado de: Britannica**

Precipitación convectiva

Se asocia principalmente a las nubes de tipo cúmulos elevados (cúmulos congestus) y a los cumulonimbos, donde las precipitaciones pueden ser chubascos de lluvia y que, a menudo, incluyen nieve o granizo blando (Barry y Chorley, 2009). Su formación se debe por el fuerte calentamiento de la superficie terrestre en verano o por la presencia del aire frío, húmedo e inestable

que pasa sobre una superficie más cálida; esto genera fuertes corrientes ascendentes que condensan rápidamente el vapor, produciendo grandes concentraciones de agua líquida o hielo en las nubes; estas partículas van creciendo y ascendiendo dentro de la nube hasta que se vuelven lo suficientemente grandes como para caer (Houze Jr, 1997). En la figura 2.6 se puede apreciar el perfil vertical de un sistema convectivo ocurrido en los Andes centrales.

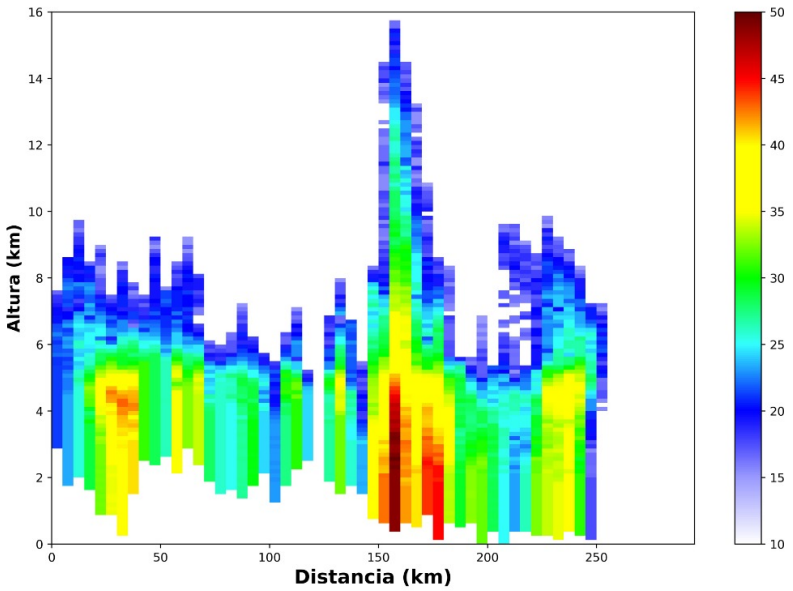


Figura 2.6: **Estructura vertical de un sistema convectivo con un núcleo de 16 km de altura y sistemas estratiformes a los lados con 10 km de altura. La tonalidad roja indica gotas de mayor diámetro, un posible indicador de granizo Fuente: Villalobos-Puma et al., 2019**

Precipitación estratiforme

Houze Jr, 1997 define el término estratiforme como un conjunto de procesos micro físicos que se producen en movimientos verticales ascendentes del aire más débiles que los movimientos convectivos. La precipitación estratiforme es bastante homogénea en el plano horizontal, es por ello que es fácilmente diferenciable de la precipitación convectiva en los radares meteorológicos. Así mismo, a menudo se observa una capa pronunciada de alta reflectividad

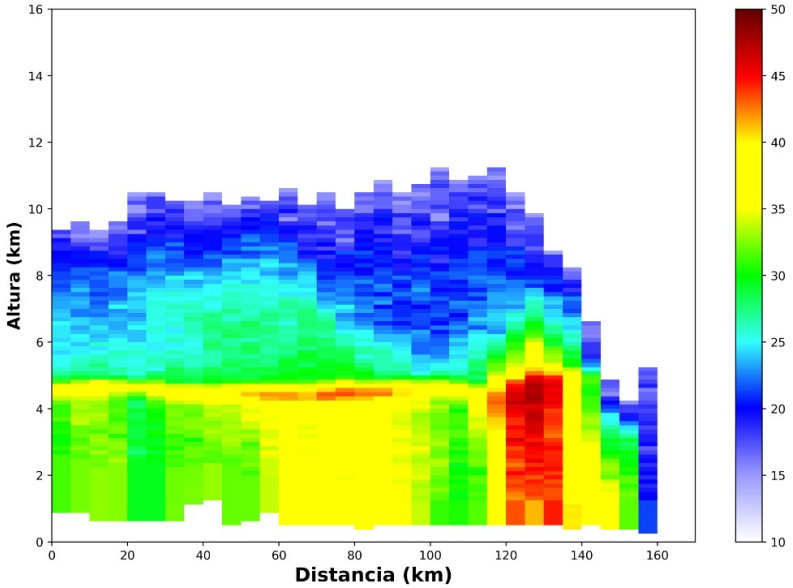


Figura 2.7: **Estructura de un sistema estratiforme, a comparación de la figura, este sistema solo alcanza los 10 km de altura y se observa con mayor claridad la banda brillante o "melting layer" a unos 5 km de la superficie. Fuente: Cortesía de Elver E. Villalobos**

llamada "banda brillante"(Figura 2.7), que marca la capa de fusión partículas de hielo que van descendiendo como gotas líquidas.

2.2.3. Precipitación en los Andes Centrales

La variabilidad de las precipitaciones en la alta montaña tropical es un factor fundamental que está siendo investigado cada vez más, ya que influye en la dinámica del clima local y en diversos procesos ambientales, como el comportamiento de los glaciares, ecosistemas y recursos hídricos (Schauwecker et al., 2017). A escala regional, las precipitaciones en los Andes se ven influenciadas por controladores climáticos que se desarrollan a niveles de alta atmósfera (200 hPa) como el Alta de Bolivia (AB en la Figura 2.8) (Garreaud, 2009); a una escala más local, la distribución espacial de la precipitación orográfica está asociada al flujo de humedad del oeste (FHNO en

la Figura 2.8) a altos niveles (1000-800 hPa) (Flores-Rojas et al., 2021).

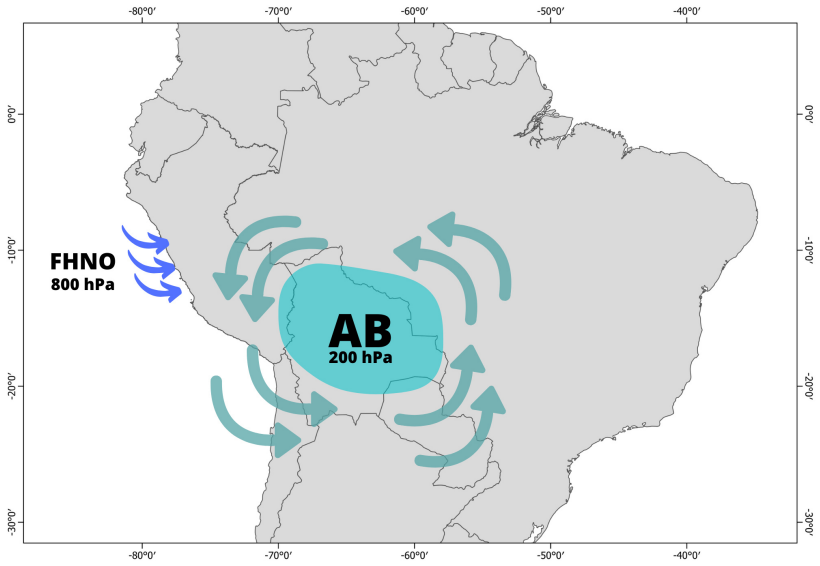


Figura 2.8: **Esquema básico de los principales conductores de humedad y precipitación en los Andes centrales. Alta de Bolivia (AB) ubicada a altos niveles (200 hPa) y el Flujo de Humedad Nor Oeste (FHNO) a bajos niveles (800 hPa)**

En los Andes, la componente orográfica actúa como mecanismo de forzamiento, produciendo nubes más profundas y activas que en las zonas de la región de transición entre los Andes y la Amazonía (Villalobos et al., 2019). Los picos de montaña con hielo perenne también favorecen la formación de nubes productoras de precipitación, como se observa en la Figura 2.9 (Senamhi, 2020). Así mismo en el caso de las regiones montañosas y valles centrales, el ciclo diurno de la precipitación se ve condicionada por las circulaciones locales, haciendo que la mayor parte de las precipitaciones se observen durante la noche y la madrugada (Chavez et al., 2020). Por la tarde, las precipitaciones están dadas por las células convectivas de corta duración, y por la noche, predominan los sistemas de precipitación estratiformes de mayor duración (Perry et al., 2017)



Figura 2.9: **Nube "bandera" característica en los picos de las montañas con hielo perenne, son factores que contribuyen a las precipitaciones en estas zonas. Fuente (Houze, 2014)**

2.2.4. Estacionalidad y microfísica de la precipitación en los Andes centrales

La precipitación de la región de los Andes centrales se caracteriza por tener una estación seca, entre mayo y julio; y una estación húmeda, entre septiembre y marzo. Según (Saavedra y Takahashi, 2017), la estación seca en la zona presenta acumulaciones medias mensuales de lluvia inferiores a 0,5 mm/día mientras que, en la estación lluviosa, las precipitaciones pueden llegar a 5 mm/día en los meses de enero y febrero. Además, los autores encontraron que los porcentajes de ocurrencia de la precipitación convectiva y estratiforme en las áreas de los Andes son de 30 % y 70 % mientras que sus contribuciones acumuladas a la precipitación son de 54 % y 46 %, respectivamente. El forzamiento orográfico de los Andes fortalece el crecimiento de los hidrometeoros (Villalobos et al., 2019). Estudios de microfísica de la precipitación a través de Raindrop Size Distribution (RSD) muestran que en los Andes Centrales del Perú tienen patrones marcados durante el ciclo diurno. En el estudio de (Villalobos-Puma et al., 2019), se encontró que los mayores diámetros de las partículas de precipitación (nieve y/o granizo) ocurren en la mañana (09-14 LST (d) Figura 2.10) y la tarde (15-20 LST (a) Figura 2.10) y son produc-

to de tormentas de desarrollo temprano y máximo desarrollo de convección respectivamente. Dichas precipitaciones, que ocurren con diámetros grandes, están asociadas a las circulaciones térmicas y mecánicamente forzadas por la orografía, ambos en horas de la tarde favorecen una convección importante que permite el desarrollo de tormentas convectivas en el interior de los Andes.

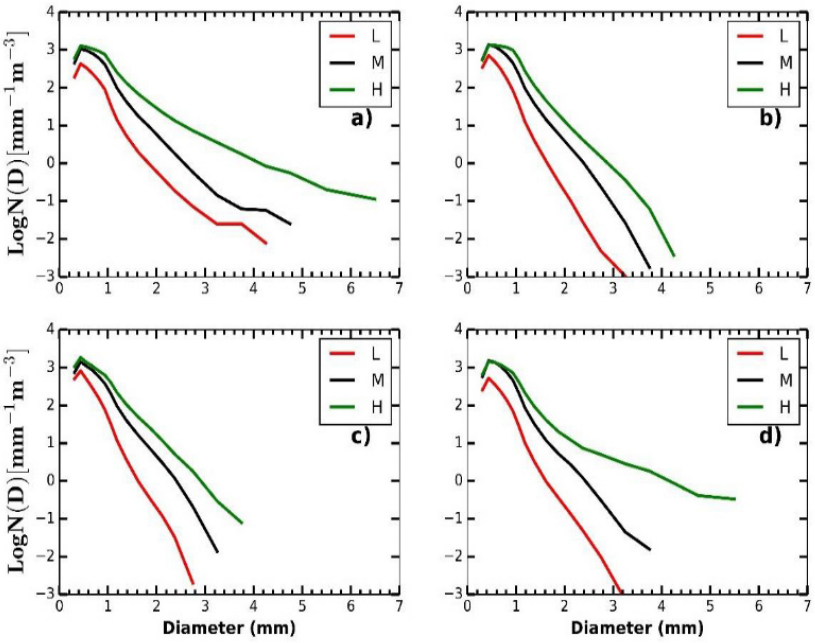


Figura 2.10: **Variación diurna de la distribución del tamaño de las partículas en los Andes Centrales en función de las clases de lluvia (lluvia ligera (L), lluvia media (M) y lluvia fuerte (H)), (a) 15-20 LST, (b) 21-02 LST, (c) 03-08 LST, (d) 09-14 LST.Fuente: Villalobos-Puma et al., 2019**

2.2.5. Temperatura y Humedad

La temperatura y la humedad relativa tienen conceptos bastante conocidos y se asume que el lector ya está familiarizado con ellos. Mientras la temperatura es la cantidad de movimiento molecular de los cuerpos en un tiempo dado, la humedad es la cantidad de vapor de agua en el aire (Geer, 2013). Es por ello que esta sección está dedicada a explicar la interacción de estos dos parámetros con la superficie glaciar y su intervención en los procesos de

ablación y acumulación.

Interacción atmósfera-superficie

La superficie de la tierra es el límite inferior de la atmósfera y ejerce su influencia en los primeros kilómetros de troposfera; esta capa se denomina capa límite o boundary layer (Figura 2.11) la cual puede tener entre 1 y 2 km de espesor según el lugar y en el tiempo donde se mida (Wallace y Hobbs, 1977). Dentro de esta capa, los procesos de difusión mecánica y convectiva transportan masa y energía, además de intercambiar aerosoles y sustancias químicas entre la atmósfera inferior y la superficie terrestre (Barry y Chorley, 2009).

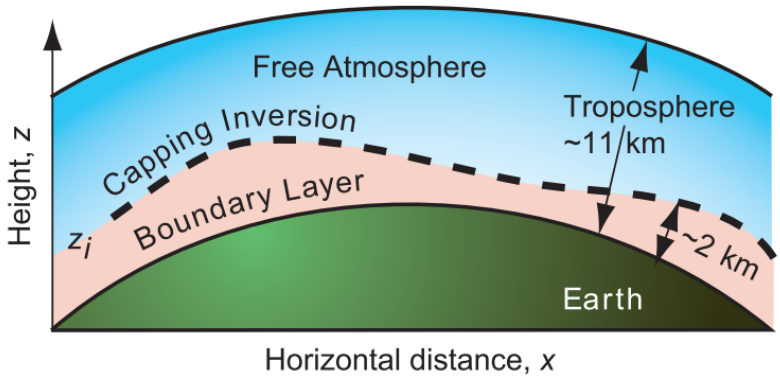


Figura 2.11: **Diagrama vertical de la tierra y atmósfera donde la capa límite o boundary layer se ubica en la parte inferior de la troposfera. Adaptado de: Stull y Ahrens, 2000.**

Balance de energía superficial

El intercambio de energía entre la capa límite atmosférica y la superficie se llama balance de energía superficial y se mide en watts por metro cuadrado (W/m^2). El flujo que cuantifica el intercambio de calor debido a la diferencia de temperatura entre la capa límite de la atmósfera y la superficie glaciar se llama flujo turbulento de calor sensible mientras que el flujo producido debido a la diferencia de contenido de vapor de agua entre la atmosfera y el glaciar

que favorecen los procesos de sublimación y condensación se denomina flujo turbulento de calor latente (Bishop et al., 2011).

Interacción atmósfera-criósfera

Las superficies de la nieve y el hielo tienen propiedades que generan condiciones particulares para el intercambio de calor radiativo y turbulento en comparación con otras superficies terrestres (Bishop et al., 2011). Un balance positivo para una superficie glaciar indica ganancia de energía lo que significa, en la mayor parte de los casos, derretimiento o ablación mientras que la perdida de energía se relaciona con los procesos de acumulación (Cuffey y Paterson, 2010). En síntesis, lo que determina este intercambio de energía son la diferencia de temperatura entre la superficie glaciar y la atmósfera adyacente en el caso del calor sensible y la diferencia de contenido de vapor agua entre la superficie glaciar y la atmósfera en el caso de calor latente; además, el viento es el motor de este intercambio de energía y por su carácter turbulento facilita el intercambio vertical de masas de aire (Cuffey y Paterson, 2010). Otro punto a destacar es que los flujos netos de energía importantes se producen con los ciclos diarios y estacionales de las condiciones atmosféricas (Cuffey y Paterson, 2010). Así mismo, las condiciones superficiales del glaciar como la nieve húmeda o hielo seco, también son factores que influyen en los procesos de intercambio de energía y estos varían en el espacio-tiempo. Finalmente, diversos estudios realizados en glaciares tropicales (Fyffe et al., 2021; Gurgiser et al., 2013; Schaefer et al., 2020) han encontrado como principales conductores de energía a los ya mencionados flujos turbulentos de calor sensible y latente con patrones estacionales marcados y condicionados por el ciclo diurno de cada sistema glaciar.

2.2.6. Conceptos básicos de teledetección

Se entiende por teledetección cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella, en el ámbito de las Ciencias de la tierra, la teledetección se entiende como la técnica de captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales (Perez y Muñoz, 2006). Según Chuvieco, 2002 un sistema de teledetección espacial reúne las siguientes características:

- *Fuente de energía:* es el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Se puede hablar de teledetección pasiva, cuando el foco de radiación es externo al sensor, o activa cuando existe un haz energético emitido por el sensor.
- *Cubierta terrestre:* son los distintos objetos, ya se vegetación, suelo, agua, nieve, construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan, emiten o retrodispersión en función de sus características, físicas geométricas y dieléctricas.
- *sistema sensor:* compuesto por el sensor y su plataforma que lo alberga
- *Sistema de recepción-comercialización:* segmento terreno donde se recibe la información y se la graba en formato adecuado para su manejo.
- *Interprete:* convierte los datos satelitales en información temática de interés.
- *Usuario final:* encargado de analizar el documento fruto de la interpretación.

Tipos de sensores en teledetección

Los sensores pueden clasificarse según el método de obtención de la fuente de energía que utilizan, de acuerdo con ello, existen los siguientes tipos de sensores Chuvieco, 2002: Sensores pasivos: cuya fuente de energía proviene de fuentes naturales tales como el sol, la tierra y otros cuerpos calientes. Estos reciben la energía emitida por los componentes de la escena (infrarrojo) o aquella que es reflejada por otra fuente (albedo). Los satélites ópticos son los ejemplos más conocidos.

- *Sensores pasivos:* cuya fuente de energía proviene de fuentes naturales tales como el sol, la tierra y otros cuerpos calientes. Estos reciben la energía emitida por los componentes de la escena (infrarrojo) o aquella que es reflejada por otra fuente (albedo). Los satélites ópticos son los ejemplos más conocidos.
- *Sensores activos:* son aquellos que producen su propia energía hacia los objetos para luego medir las señales reflejada por ellos de vuelta al sensor. Ejemplos claros de sensores activos son los radares y sensores LIDAR (Podest, 2018).

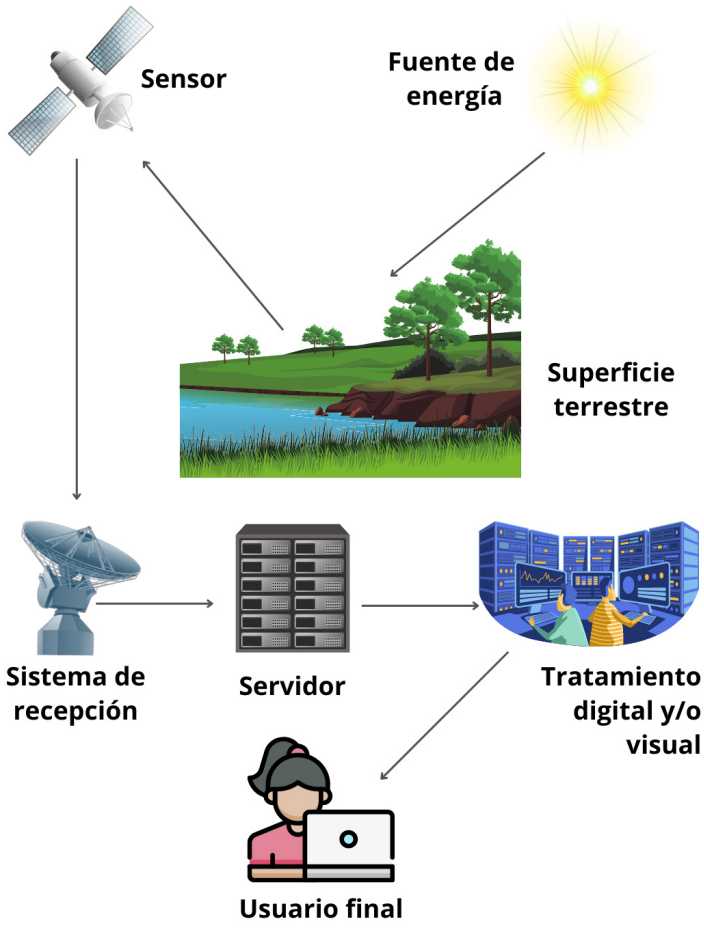


Figura 2.12: **Componentes de la teledetección. Elaboración propia**

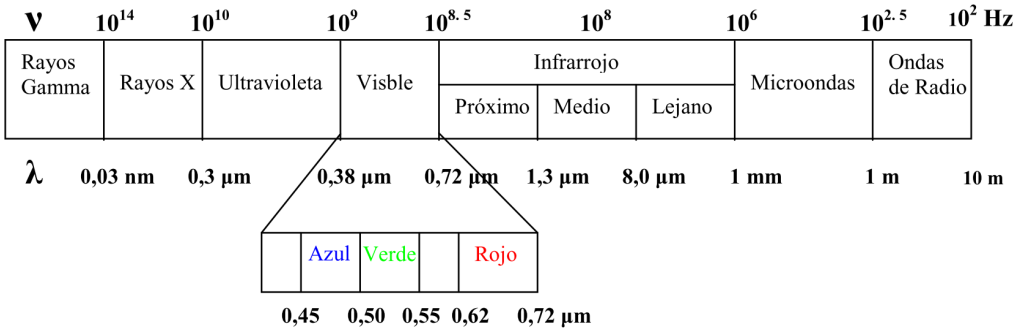


Figura 2.13: **Espectro electromagnético Fuente: Graciani et al., (2011)**

Espectro electromagnético

Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Esta interacción es el flujo energético entre sensor y objeto y constituye una forma de radiación electromagnética (Chuvieco, 2002) La energía electromagnética es el medio por el cual esta información se transmite de un objeto hacia el sensor a bordo de un satélite, avión o plataforma terrestre. Esta información se propaga a la velocidad de la luz por radiación electromagnética directamente desde la fuente a través del espacio libre o indirectamente por reflexión, dispersión o radiación hacia el sensor. La interacción de las ondas electromagnéticas con las superficies naturales y la atmósfera depende fuertemente de la frecuencia de las ondas. Las ondas en las diferentes bandas espectrales tienden a excitar los diferentes mecanismos de interacción electrónicos, moleculares o conductivos. A este conjunto de longitudes de ondas se le llama Espectro Electromagnético observado en la Figura 2.13 (Sobrino, 2001)

La región microondas

Las microondas son ondas electromagnéticas con longitud de onda mayores que el infrarrojo, pero menores que las ondas de radio (Figura 2.13). Las microondas tienen longitud de onda aproximadamente en el rango de 30 cm (frecuencia = 1GHz) a 1 mm (300 GHz) (Fontal, 2005). La mayor ventaja del uso de microondas es que es prácticamente transparente a la influencia atmosférica (Figura 2.14), debido que trabaja con longitudes de onda supe-

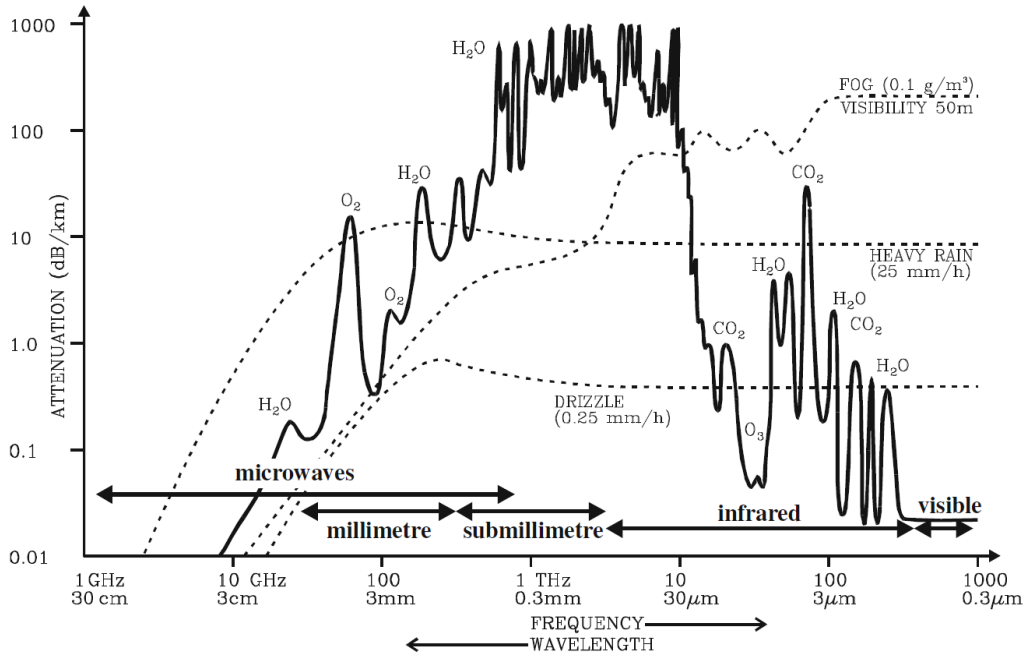


Figura 2.14: **Atenuación de la atmósfera en los diferentes rangos del espectro electromagnético. Los bajos niveles de atenuación en el rango de las microondas (1 – 100 GHz) explican la transparencia de nubes, humo, lluvia en los radares. Fuente: Woodhouse, 2017**

riores al tamaño habitual de las gotas de agua, 0.1 mm (Bustos et al., 2004). Al utilizar la región de las microondas del espectro electromagnético (EM) obtenemos capacidades que complementan los métodos de teledetección utilizados en otras regiones espectrales, las interacciones de las microondas, en general, se rigen por parámetros físicos diferentes a los que afectan a otras formas de radiación EM (Woodhouse, 2017), y nos proporcionan información vertical de los objetos por sus propiedades penetrantes (Areu y de Toda, 2005). Entre las desventajas, las longitudes de onda más largas hacen que se necesiten antenas de gran tamaño (alrededor de un metro o más). Además, los sistemas activos como el radar de apertura sintética (SAR), suelen ser pesados, grandes, con mayor consumo de energía (Woodhouse, 2016)

2.2.7. Radar de Apertura Sintética (SAR)

El Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés) es un sistema de radar de barrido lateral (SLR) aerotransportado o espacial que genera su propia señal (sensor activo) y transmite secuencialmente pulsos de radiación de microondas sobre la superficie de la Tierra (Moreira et al., 2013). Utiliza la trayectoria de vuelo de la plataforma para estimular electrónicamente una gran antena o apertura, lo que ayuda a generar imágenes de alta resolución (Jawak et al., 2015). Los sistemas de radar envían pulsos de ondas microondas hacia la Tierra y registra la intensidad de los ecos devueltos para cada unidad de área o píxel. La estructura, el tamaño, el material y la distribución de los objetos en el suelo determinan cómo se dispersa un determinado pulso de microondas y, por tanto, qué intensidad de señal se devuelve al sensor (Woodhouse, 2016). El sistema de un radar de apertura sintética se observa en la Figura 2.15.

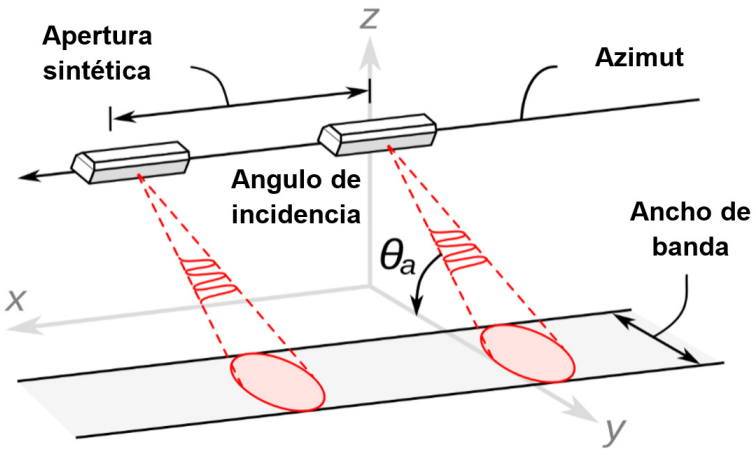


Figura 2.15: **Estructura de un sistema Radar de Apertura Sintética. Adaptado**

Longitud de onda

La longitud de onda define la interacción de la señal con la superficie y está inversamente relacionada con la frecuencia, es decir, una mayor longitud de onda emitida por el radar tendrá una menor frecuencia (European Space Agency, 2007). La Tabla 2.1 muestra las bandas utilizadas en los sensores

SAR y la Figura 2.16 muestra la ubicación de las bandas radar en el espectro electromagnético. Es importante tener en cuenta que la penetración en los cuerpos se incrementa con la longitud de onda y de este principio se puede derivar distintas aplicaciones que se acomodan a cada tipo de banda. Esta propiedad nos permite obtener información vertical de la superficie a evaluar (vegetación, suelo, nieve, etc.) (Podest, 2017).

Banda	Longitud de onda (cm)	Frecuencia (GH)
Ka	0.8 - 1.1	40 - 26.5
K	1.1 - 1.7	26.5 - 18.0
Ku	1.7 - 2.4	18.0 - 12.5
X	2.4 - 3.8	12.5 - 8.0
C	3.8 - 7.5	8.0 - 4.0
S	7.5 - 15	4.0 - 2.0
L	15 - 30	2.0 - 1.0
P	30 - 100	1.0 - 0.3

Tabla 2.1: **Bandas de la región microondas más utilizadas en teledetección**

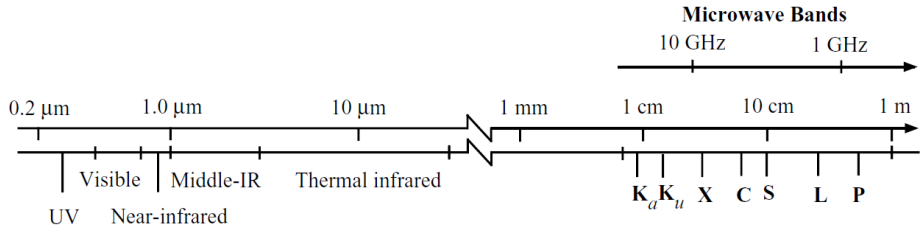


Figura 2.16: **Estructura de un sistema Radar de Apertura Sintética. Adaptado**

Polarización

Es el plano de propagación del campo eléctrico de la señal del radar. Los SAR, pueden emitir y recibir la señal de manera horizontal, vertical o de ambas maneras (Figura 2.17). El tipo de polarización permitirá obtener información de los componentes verticales y horizontales de la superficie (Podest, 2017). Los SAR pueden trabajar con cuatro tipos de polarizaciones principales, los cuales se mencionan a continuación:

- HH: Transmitida Horizontalmente, Recibida Horizontalmente
- HV: Transmitida Horizontalmente, Recibida Verticalmente
- VH: Transmitida Verticalmente, Recibida Horizontalmente
- VV: Transmitida Verticalmente, Recibida Verticalmente

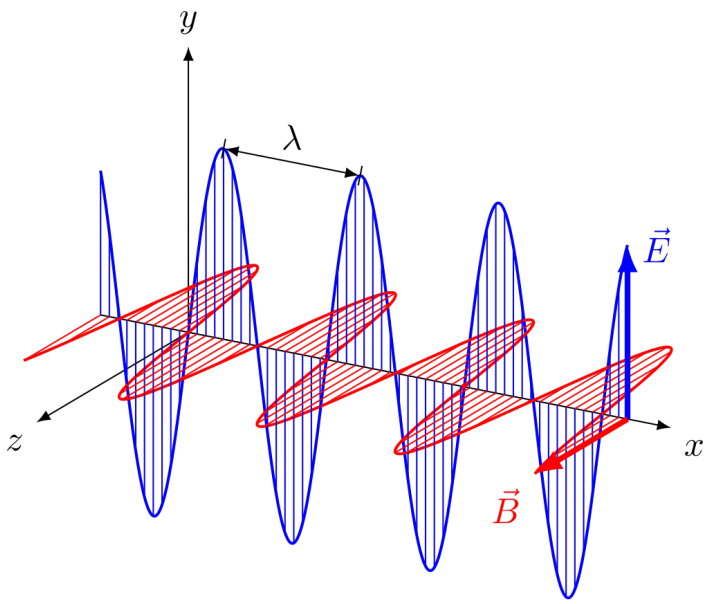


Figura 2.17: **Polarización vertical y horizontal de una onda radar**

Ángulo de incidencia

El ángulo de incidencia se define como el ángulo formado por el haz de radar y una línea perpendicular a la superficie en el punto de incidencia (Figura 2.18 (a)) (Brown, 1967). Es importante tomar en cuenta sobre todo si se trabaja en una zona de relieve accidentado, ya que las altas pendientes al interactuar con las ondas radar, modifica el ángulo de incidencia y alterando la superficie proyectada sobre la imagen (Figura 2.18 (b)). Cuando el ángulo es mayor que la pendiente, la imagen muestra las distancias reales como acortadas (Buemi, 2012). La imagen SAR resultante mostrará que gran parte de la

ladera brillante de la montaña fue mapeada en unos pocos píxeles, mientras que la ladera más oscura orientada hacia atrás se consideró que cubría muchos más píxeles. Por lo tanto, parece que las montañas están tumbadas (European Space Agency, 2007).

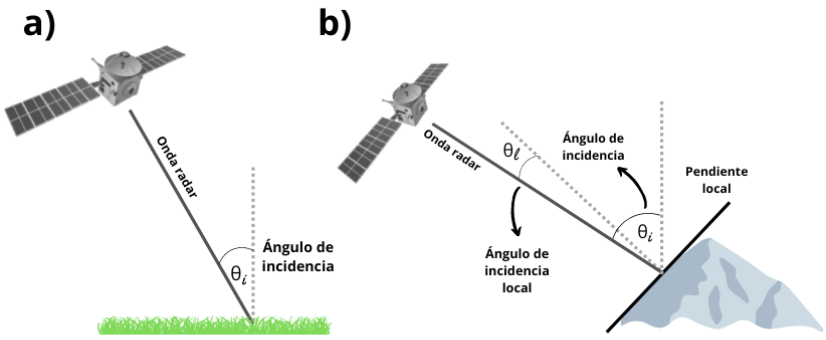


Figura 2.18: **Efecto de *escorzo* o *foreshortening* en imágenes SAR**

2.2.8. Mecanismos de interacción de la señal radar con la superficie

Se ha descubierto que los principales factores que influyen en la intensidad de la señal de retorno de un objeto son sus características geométricas y eléctricas, así como su composición general (ESA, 2022). Es decir, las ondas de radar interactúan de forma diferente con el suelo, la vegetación, el agua, el hielo o los objetos artificiales (Buemi, 2012). Los cuatro principales tipos de dispersión pueden apreciarse en la Figura 2.19

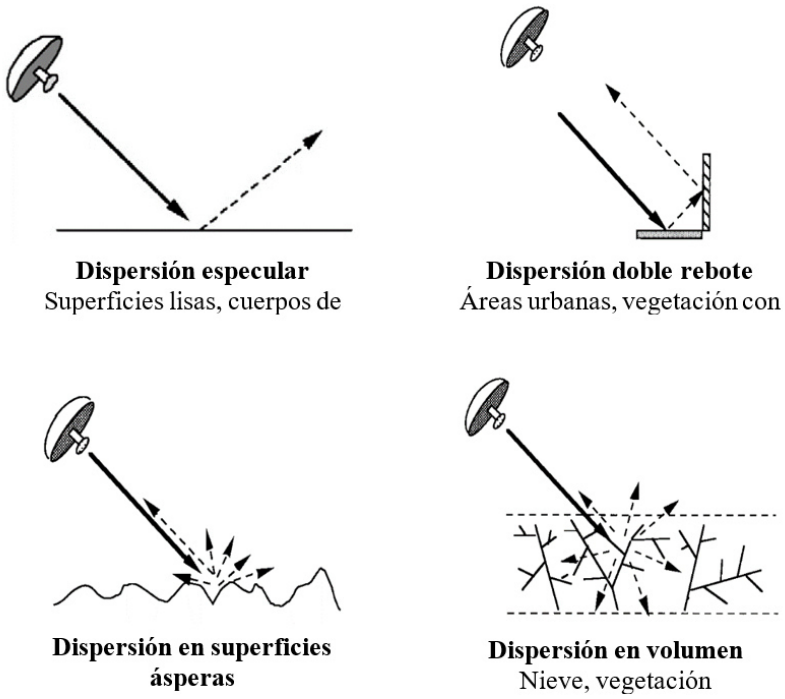


Figura 2.19: **Principales tipos de interacción de las ondas radar en distintas superficies. Fuente: European Space Agency, 2007**

2.2.9. Efectos de la topografía en las imágenes radar

La geometría lateral del radar puede producir distorsiones en terrenos con relieve complejo como las montañas; El foreshortening (Figura 2.20) es la distorsión espacial que produce la inclinación hacia el radar de las pendientes del terreno apareciendo a una escala comprimida en relación con el aspecto que tienen en la realidad (Woodhouse, 2017). El efecto es más pronunciado a mayor pendiente y con ángulos de incidencia más bajos. El efecto Layover es el desplazamiento de las cumbres de la montaña hacia el radar las cuales aparecen antes que las bases (Figura 2.21). El efecto se intensifica en los radares que tienen un ángulo de incidencia menor (González, 2022). Por último, la sombra radar es producida por la ausencia de iluminación radar en alguna zona de la escena debido a la disposición de objetos reflectantes o absorbentes que impiden la llegada de la onda transmitida; se caracteriza por valores muy bajos y la tonalidad oscura (Figura 2.22) (Woodhouse, 2016).

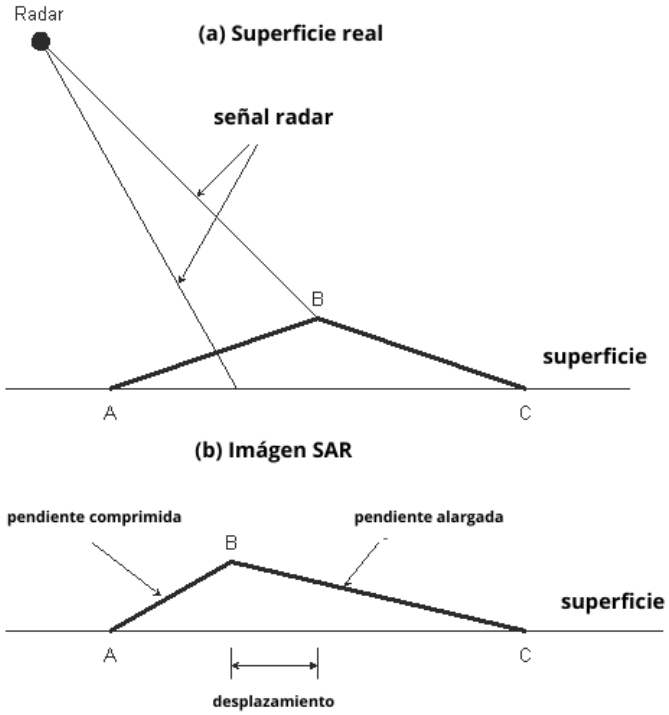


Figura 2.20: **Principales tipos de interacción de las ondas radar en distintas superficies. Elaboración propia**

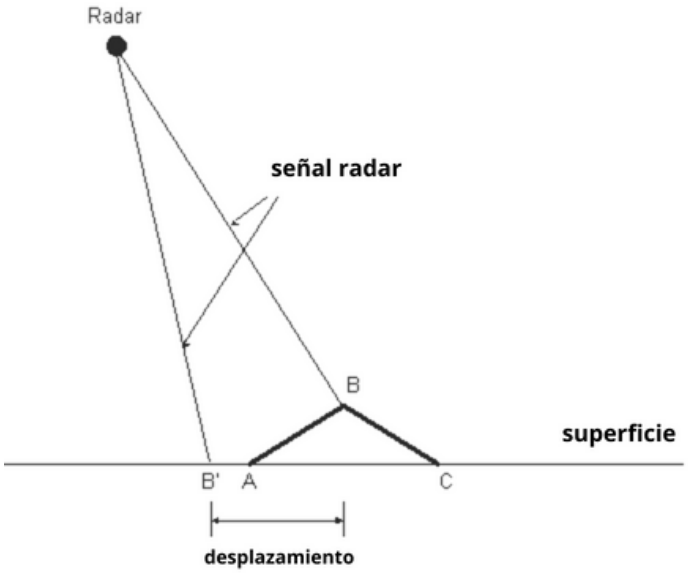


Figura 2.21: **Efecto *layover* en las imágenes SAR**

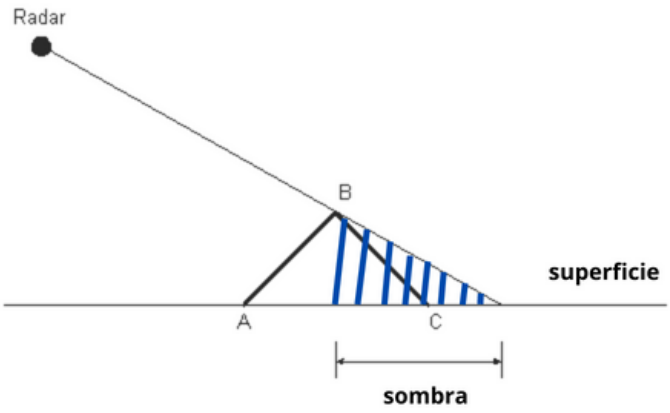


Figura 2.22: **Efecto de *sombra* en imágenes radares**

2.2.10. Retrodispersión

La retrodispersión o backscattering es el tipo de información que contiene una imagen SAR, esta se produce cuando el sensor radar emite pulsos de ondas microondas hacia la superficie y para luego ser devueltas hacia el sensor después de su interacción con la superficie (González, 2022). Esta energía recibida por el sensor se denomina en principio como sección radar equivalente (σ en la ecuación 2.1) y tiene unidades de área (m^2) (González, 2022). Debido a que las imágenes SAR cuentan con un tamaño de pixel definido, se utiliza la sección radar normalizada/sigma nought (σ)/intensidad, que es la división de los valores de la sección radar equivalente entre el área del pixel (A en la ecuación 2.1) (Salcedo, 2011).

$$\sigma^o = \frac{\sigma}{A} \tag{2.1}$$

Debido a que el sigma nought (σ^o) varía en muchas órdenes de magnitud, para ello, se usa la escala logarítmica y es representada en decibelios (dB) (ecuación 2.2.

$$\sigma^o(dB) = 10log_{10}(\sigma^o) \tag{2.2}$$

No obstante, existen otros términos análogos al sigma nought σ^o que de-

penden del tipo de área que utilizan para su normalización. Es así que en la Figura 2.23 tenemos al Beta Nought (β^o) o Gamma Nought (γ^o) como los más conocidos (Woodhouse, 2016). El uso de estas tres expresiones de la retrodispersión en las imágenes SAR dependerán del tipo de superficie (relieve accidentado o llano) ya que permiten una mejor corrección de los efectos topográficos que se presentan debido al ángulo de incidencia del radar (Small, 2011) La retrodispersión obtenida es el resultado de una mezcla compleja de una variedad de influencias como la rugosidad de la superficie, la constante dieléctrica, la profundidad de penetración, las características del subsuelo, la presencia de agua líquida, la geometría de visualización, las pendientes de la superficie, etc (Woodhouse, 2016).

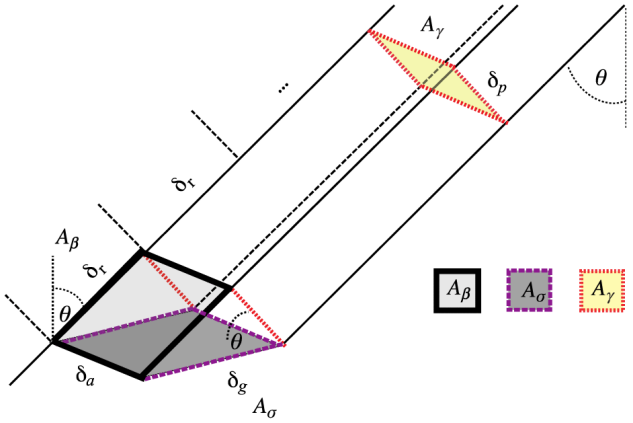


Figura 2.23: **Diferentes áreas utilizadas para la normalización de backscatter y futura visualización en las imágenes SAR en unidades de decibeles (dB). Beta nought β - plano del suelo proyectado en la dirección de adquisición; Sigma nought σ – plano de la Tierra modelado usando un elipsoide de referencia; Gamma nought γ – plano perpendicular a la dirección de adquisición local Fuente: Small, 2011.**

2.2.11. Glaciar

D. P. Dobhal Wadia del Institute of Himalayan Geology, Dehradun, India (Bishop et al., 2011) define un glaciar como una masa de hielo dura, gruesa y compacta sobre la tierra que se forma por la recristalización de la nieve. Su formación y permanencia dependerá de la latitud, la altitud, topografía y la precipitación anual. La nieve, a medida que se acumula, comprime la nieve

subyacente y crea así una capa densa, llamada firn que irá compactándose hasta convertirse en hielo glaciar sólido (Johansen et al., 2019). Así mismo, un glaciar es un cuerpo de hielo dinámico, caracterizado por dos componentes básicos:

- *Zona de acumulación:* Es la parte de un glaciar que está permanentemente cubierta de nieve. El proceso de ganancia de nieve ocurre a través de una variedad de procesos que incluyen la precipitación, el transporte de nieve por el viento, etc.
- *Zona de ablación:* Es la zona en la que el hielo y la nieve se pierden a través de diversos procesos, como la fusión, la escorrentía, la evaporación, etc.

Sistema Glaciar

Los sistemas de los glaciares son entradas, almacenes, transferencias y salidas, donde se puede ganar masa en forma de precipitaciones sólidas (nieve) y /o líquidas (lluvia) en las zonas de acumulación o perder masa mediante procesos de fusión y/o sublimación en las zonas de ablación (Singh et al., 2011b) (Figura 2.24). Así mismo, están en constante movimiento y pueden estar conectados con otros glaciares (Seehaus et al., 2015) donde reciben masa de avalanchas y las drenan mediante escorrentía (Beedle et al., 2008). La temperatura de los glaciares es un factor importante a la hora de considerar el sistema glaciar, ya que las tasas de fusión, erosión y deposición están directamente relacionadas con el comportamiento térmico del sistema glaciar (Bishop et al., 2011).

Parámetros glaciológicos: SLA, ELA

La estabilidad de un cuerpo glaciar, usualmente es realizado midiendo el balance de masa (BM) que es el cambio en la masa de un glaciar, o parte de un glaciar, durante un período determinado (Hooke, 2011). También es definido como la suma de la acumulación y la ablación en un lapso de tiempo dado, donde la acumulación representa una entrada o ganancia de masa y será representada con un signo positivo; por el contrario, la ablación representa la salida de flujo del sistema, o pérdida de masa, y será representada con un

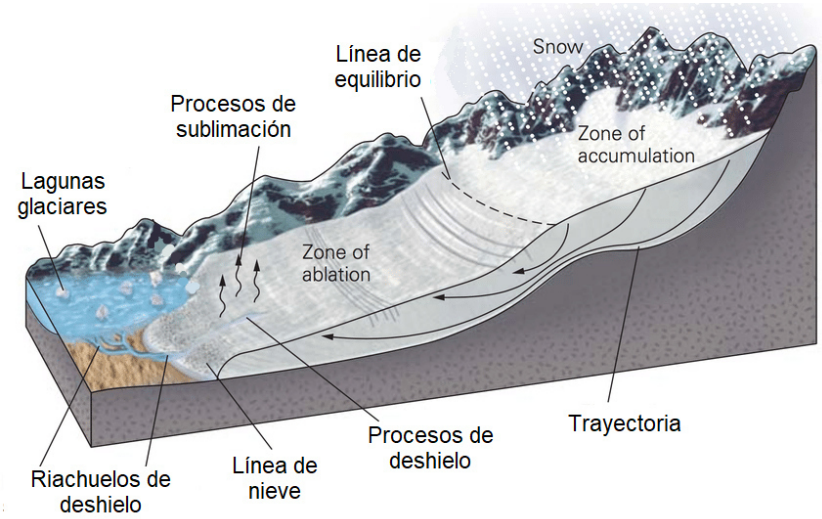


Figura 2.24: **Esquema de los principales componentes de un sistema glaciar, esta estructura puede variar según la topografía y factores climáticos. Adaptado de Candas, 2017**

signo negativo (Rivera et al., 2017). Un indicador de esta estabilidad del cuerpo glaciar es la elevación de la línea imaginaria que separa la zona de ablación y acumulación de un cuerpo glaciar, llamada altitud de línea de equilibrio o ELA, por sus siglas en inglés. Cuando el ELA promedio anual para un año hidrológico de un cuerpo glaciar es negativo (positivo) muestra un estado de BM negativo (positivo) y por ende pérdida (ganancia) de la masa glaciar en ese año hidrológico (Rivera et al., 2017). Dado que no existen mediciones de balance de masa de superficie a largo plazo de la cordillera Huaytapallana, existe un método indirecto con imágenes satelitales para determinar el ELA propuesto por (Rabatel et al., 2012). Este método se basa en el hecho de que, en los glaciares de los trópicos exteriores, la mayor altitud de la línea de nieve (SLA) alcanzada durante la estación seca es aproximadamente igual a la ELA anual del mismo año hidrológico.

Propiedades de la nieve y el hielo en el rango de las microondas

Para comprender el comportamiento de la nieve y el hielo en el rango de las microondas es importante tener en cuenta varios factores físicos que afectan la señal recogida por el sensor SAR como la constante dieléctrica, la rugosidad, las diferentes facies de un glaciar y la estación del año. La constante

dieléctrica nos da información sobre la manera en que las ondas microondas interactúan con los materiales y la cantidad de energía que es reflejada cuando una onda incide sobre él (González, 2022). Según ESA, 2022, la mayoría de los materiales naturales tienen una constante dieléctrica en el rango de 3 a 8 cuando están secos, mientras que el agua tiene una constante dieléctrica de aproximadamente 80 (Figura 2.25). Esto hace que, en la región del espectro de las microondas, la constante dieléctrica genere un fuerte contraste en la retrodispersión emitida por la nieve húmeda (baja retrodispersión) y los mantos secos de nieve o hielo (alta retrodispersión) (Fahnestock et al., 1993). Por otro lado, la rugosidad de la nieve o el hielo también afectan a la intensidad de la señal de retrodispersión (Shi y Dozier, 1995). Según Rott y Mätzler, 1987, las capas secas de hielo y nieve, presentan una mayor rugosidad lo que se traduce en unos mayores valores de retrodispersión, situación contraria a lo que pasa con la presencia de capas de nieve húmeda temporal, que son de carácter más liso y generan una reflexión especular, tal como se observa en la Figura 2.26 tomada de Winsvold et al., 2018. El tipo de dispersión también es una variable importante en el análisis de las propiedades de la nieves y hielo en las imágenes SAR. Cuando la nieve está húmeda, la retrodispersión total procede principalmente de la dispersión de volumen, mientras que para un manto de nieve seco la dispersión dominante es superficial (Rott y Mätzler, 1987).

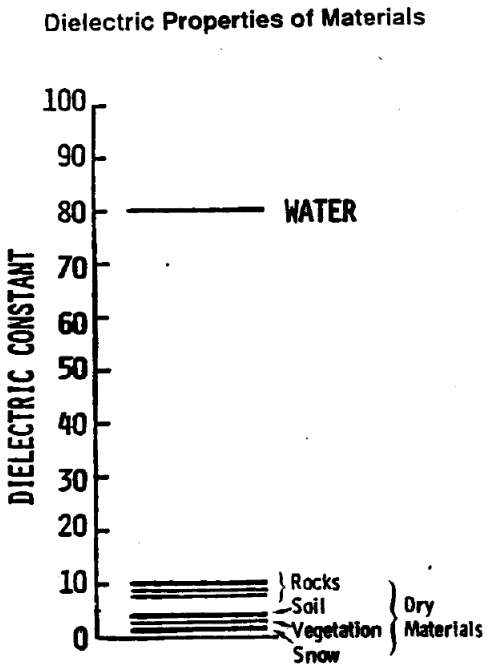


Figura 2.25: **Esquema de los valores que toma la constante dieléctrica en diferentes materiales de la naturaleza. Podemos observar el alto contraste entre los materiales secos (entre 0 y 10) y el agua (80). Fuente: Adaptado de Podest, 2017**



Figura 2.26: **Diferencia de rugosidad entre la nieve fresca (arriba) y el hielo seco o firn (abajo) la cual puede ser percibida por el sensor SAR. Fuente: Winsvold et al., 2018**

2.3. Definición de términos

2.3.1. Impactos hidrometeorológicos

Efectos producidos por la interacción de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura y humedad) entre la atmósfera y la superficie terrestre (Service, 2009; W. M. O. WMO et al., 2012). Dichos impactos están ligados principalmente a los cambios de fase de la precipitación (sólida - líquida) que repercuten en el deshielo, evaporación y escorrentía superficial, etc (Britannica, 1998; Sene, 2016.

2.3.2. Fase de precipitación

Es el estado físico en el que se encuentra la precipitación al llegar a la superficie. La nieve y el granizo se clasifican en la fase sólida, la cual contri-

buye a los procesos de acumulación en zonas glaciares, mientras que la lluvia y llovizna se clasifica en la fase líquida, la cual contribuye a los procesos de escorrentía e infiltración (Ding et al., 2014; Jennings et al., 2018; Kienzle, 2008)

2.3.3. Radar de Apertura Sintética

El SAR es un sistema de radar de barrido lateral (SLR) aerotransportado o espacial que genera su propia señal (sensor activo) y transmite secuencialmente pulsos de radiación de microondas sobre la superficie de la Tierra (Jawak et al., 2015). La información obtenida dependerá de ciertos parámetros propios del radar y de las propiedades de la superficie (European Space Agency, 2007).

2.3.4. Retrodispersión

También conocido como backscattering, es la señal reflejada hacia el sensor del radar después de interactuar con la superficie. La energía de backscattering contiene información sobre las propiedades de la superficie terrestre y su unidad es el decibelio (dB) (Richards et al., 2009)

2.3.5. Altura de línea de nieve

Conocida como Snow Line Altitude (SLA), es la cota transitoria en una región glaciar en la que por encima de esta se produce una ganancia anual neta (área de acumulación) mientras que en la región inferior se produce una pérdida anual neta de masa de hielo (área de ablación) (Rivera et al., 2017)

Capítulo 3

Hipótesis y variables

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

- Las variables hidrometeorólogicas son factores significativos para la comprensión de los procesos de ablación y acumulación y/o consiguientes impactos del Sistema Glaciar Huaytapallana.

3.1.2. Hipótesis específicas

- El sistema glaciar Huaytapallana presenta tipos de precipitación tanto en fase sólida como en fase líquida.

- Los valores de retrodispersión percibidos por los sensores radares son explicados por las condiciones meteorológicas, topográficas y superficiales del Sistema Glaciar Huaytapallana

- La temperatura, precipitación y humedad relativa influyen en la variabilidad estacional de los valores de retrodispersión asociados a los procesos de ablación / acumulación en el sistema glaciar Huaytapallana.

3.2. Variables

3.2.1. Variable Dependiente

- Sistema Glaciar Huaytapallana

3.2.2. Variable Independiente

- Impactos hidrometeorológicas

Capítulo 4

Materiales y metodología

Este capítulo se centra en la descripción del área de estudio donde se considera la ubicación geográfica, accesibilidad, aspectos físicos (clima, geología, hidrografía), biológicos (ecosistemas, flora y fauna) y sociales (actividades económicas, IDH e identidad cultural). Seguidamente, se describe los equipos utilizados para la recolección de datos tanto de caracter meteorológico (precipitación, humedad, temperatura) como satelital (descarga y procesamiento de imágenes radar de apertura sintética (SAR) e imágenes ópticas). Es importante acotar que en esta investigación, se hace uso de dos puntos de recolección de datos meteorológicos: la estación meteorológica Huatapallana (EMA Huaytapallana), proporcionada por el SENAMHI y el Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CEMGEM) los cuales serán descritos en esta sección.

4.1. Descripción del área de estudio

4.1.1. Ubicación

El sistema Glaciar Huaytapallana forma parte de la cordillera Huaytapallana, ubicada en los Andes centrales del Perú. Es un sistema de glaciares

de circo, los cuales se caracterizan por estar localizados en áreas montañosas y en cabeceras de valle, como es el caso del valle del Mantaro. (Echegaray Cristobal, 2015). Así mismo, está conformada por otras seis montañas glaciares: Pitita, Marairazo, Utcohuarco, Azulcocha y Chapico (López-Moreno et al., 2014). Nuestra zona de estudio se encuentra en la parte sur oeste de la cordillera Huaytapallana, en la región Junín, entre las provincias de Huancayo y Concepción, al noreste de la ciudad de Huancayo (Figura 4.1). Está conformado por los nevados Talvez y Huaytapallana que, para fines de esta investigación, se decidió denominarlos en conjunto Sistema Glaciar Huaytapallana. A nivel de cuenca, se encuentra en la Vertiente Hidrográfica del Amazonas en cuenca Hidrográfica del Mantaro. Tiene un área aproximada de 800 hectáreas y una altura máxima de 5546 msnm. (INAIGEM, 2018).

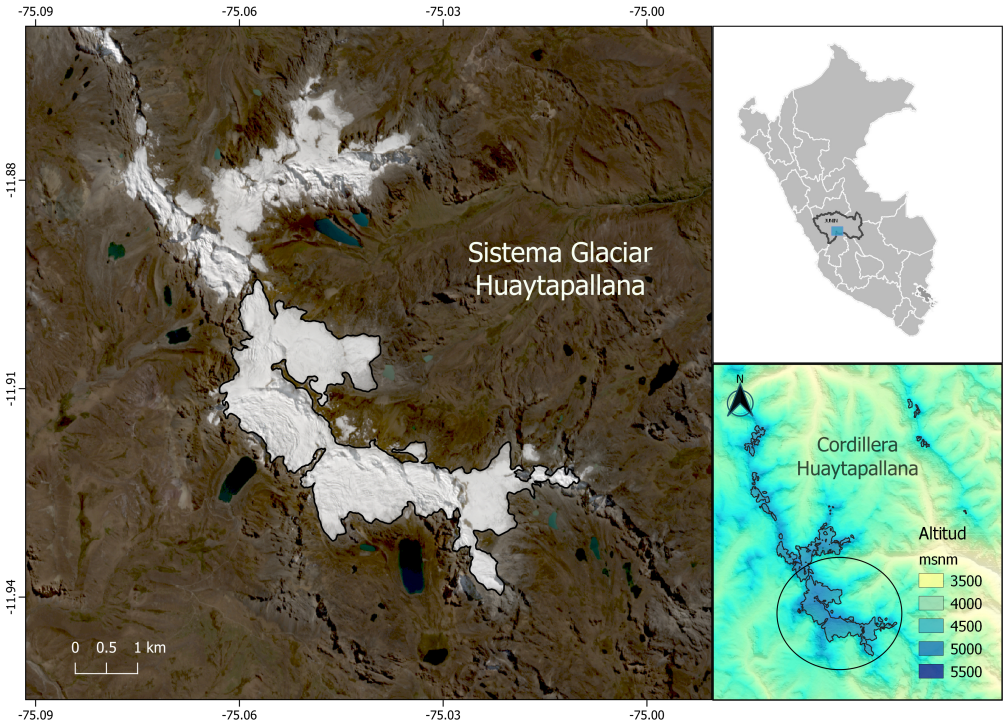


Figura 4.1: **Mapa de ubicación del sistema glaciar Huaytapallana, ubicado en la parte oeste de la cordillera Huaytapallana (circulo negro en el panel de la parte inferior derecha) y en la región Junin (recuadro celeste en el panel de parte superior derecha), nuestra zona de estudio de encuentra resaltada con un contorno negro en el panel principal de la parte izquierda.**

4.1.2. Accesibilidad

Para llegar a la zona de estudio, se puede partir desde La Plaza Constitución de Huancayo tomando la avenida Palián hacia el centro poblado de Acopalca pasando por los distritos de Uñas, Molinos, Vilcacoto y Añas Pampa. Desde Acopalca se debe viajar por la carretera Pariahuanca hasta llegar al refugio Virgen de las Nieves donde se encuentra la entrada al Área de Conservación regional Huaytapallana. El recorrido total desde la ciudad hasta el refugio suma 28 km y se puede observar en la Figura 4.2.

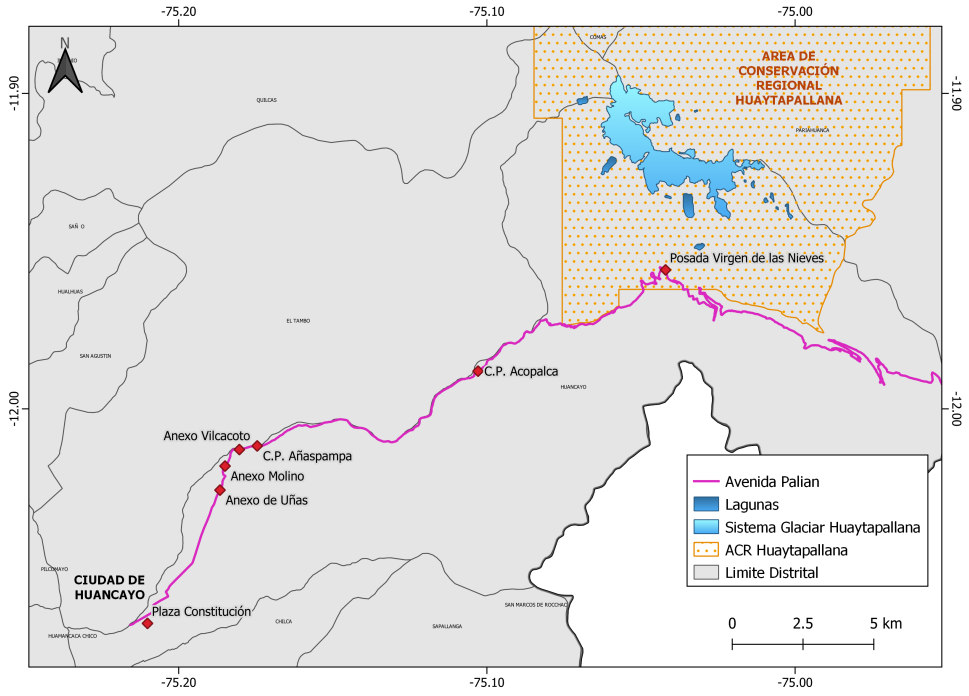


Figura 4.2: **Mapa de Accesibilidad al Sistema Glaciar Huaytapallana desde la Plaza Constitución Huancayo hasta el Refugio "Virgen de las Nieves" pasando por los anexos Uñas, Molino, Vilcacoto y los centros poblados de Añaspampa, Acompalca. El Sistema Glaciar Huaytapallana se ubica dentro del Área de Conservación regional Huaytapallana.**

4.1.3. Aspectos físicos

Clima

Según la clasificación de climas del Perú (Senamhi, 2020), el nevado Huaytapallana presenta un clima glaciar con hielo perenne en casi toda su extensión y en las altitudes menores presenta el clima A (r) D', semirrígido, muy lluvioso, con humedad abundante todas las estaciones del año. Tomando los datos de la Estación Meteorológica Huaytapallana, las precipitaciones en el sistema glaciar llegan a una media anual de 860 mm, 80 % del cual cae en los meses de verano (diciembre, enero y febrero en la Figura 4.3) y son de tipo orográficas (INAIGEM, 2018). Así mismo, la temperatura media anual es de 3°C con valores mínimos de 5°C y máximos 12°C alcanzados generalmente en enero y agosto respectivamente.

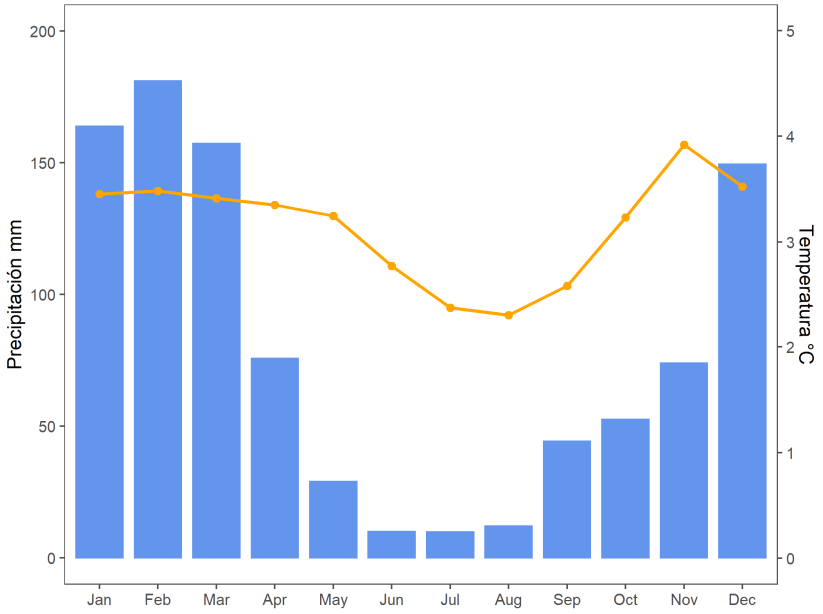


Figura 4.3: **Temperatura media y precipitación mensual para el periodo de 2014-2022, elaborado con datos de la estación automática Huaytapallana - SENAMHI y eliminando los años 2015 y 2017 por falta de información.**

Geología

Para la descripción geológica, se utilizó la Carta Geológica Regional del cuadrángulo 24m - 2 de Jauja del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET (escala 1:50000) e informes realizados en la zona por el Instituto Nacional De Defensa Civil (CEPIG - INDECI, 2016).

Nuestra zona de estudio se encuentra en el Complejo Metamorfico Huaylla-patana - Marairazo (Figura 4.4), formado en el proterozoico (hace 541 M.A) conformado principalmente por rocas metamorficas que varían de gneis, cuarcita sericitoesquistos, ortogneises granítico y algunas migmatitas. Las lagunas y sus alrededores se encuentran rodeadas de depósitos glaciares (Q-g2 y Q-g3), fluvioglaciares (Qr-fg) y morrenas (Q-mo) constituidos principalmente por conglomerados angulosos.

La tectónica en la zona está controlada por la falla Huaytapallana (señalada en la Figura 4.4), la cual se ubica a lo largo de toda la cordillera Huaytapallana, a una altitud aproximada de 4500 m.s.n.m. Esta falla tuvo una última activación debido al sismo ocurrido el 1ero de octubre de 1969 donde fueron afectados centros poblados como Acolpaca, Uñas, Vilcacoto y Cajas Chico (ver Figura 4.2)

Geomorfología

La descripción geomorfológica se realizó tomando como referencia el Análisis Geomorfológico de la Cuenca Shullcas realizado por INAIGEM, 2021 y visitas de campo. El sistema glaciar Huaytapallana se encuentra en una zona montañosa que ha sido modelada por las masas glaciares a través del tiempo. Las principales zonas que rodean el área de estudio son consideradas como glaciar y peri-glaciar. En la zona glaciar, se pueden observar morrenas, las cuales son indicadores de la existencia de antiguos avances glaciares, y till indiferenciado, definidos como depositos rocosos producto del arraste y abrasión del hielo que no tienen una estructura definida. En las zonas periglaciares se observan las llanuras lacustres, formadas por antiguos lagos producto del deshielo glaciar; superficies de abrasión, caracterizados por ser lisas y poco accidentada, lo cual se explica por la fricción entre el hielo y la superficie rocosa y laderas de gelifractos, formadas por la fragmentación mecánica de las rocas al estar sometidos a repetidos ciclos de congelación y descongelación.

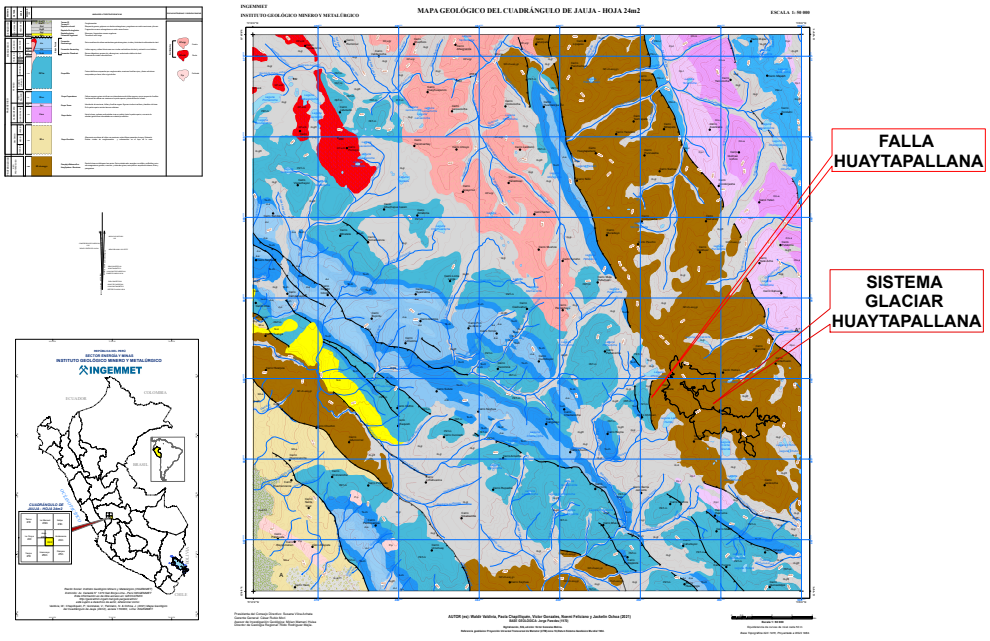


Figura 4.4: **Mapa geológico correspondiente al cuadrángulo 24m-2 de Jauja - escala 1:50 000 elaborado por INGEMMET y adaptado para señalar la zona de estudio. Fuente: Portal web Geocatmin**

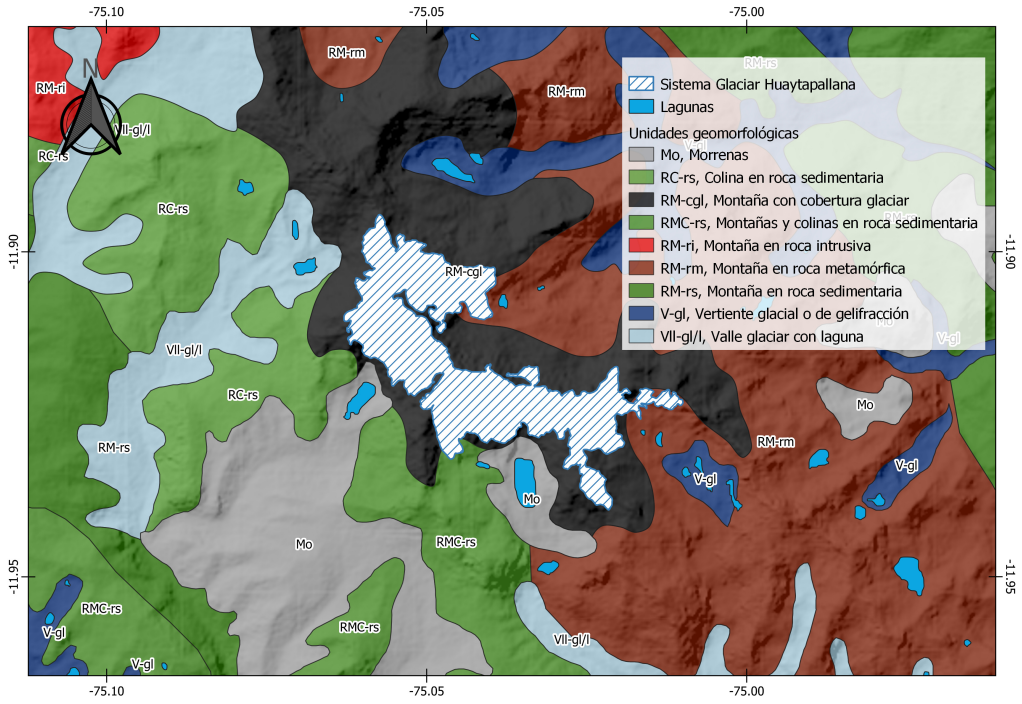


Figura 4.5: **Mapa geomorfológico de la zona de estudio con datos obtenidos de INGEMMET.**

Hidrografía e hidrología

El sistema glaciar Huaytapallana se ubica entre las subcuencas del río Shullcas y Pariahuanca dentro de la cuenca del río Mantaro (Figura 4.6).

El principal río que recibe aportes directos de la escorrentía superficial provenientes del Sistema Glaciar es el río Shullcas. En la sub cuenca del río Shullcas, se desarrolla el crecimiento urbano de la ciudad de Huancayo lo que le da una gran importancia económica tanto en el uso energético, industrial, agropecuario y doméstico. Tiene un área de 217.95 km2 y una longitud de recorrido de 31 km, desde sus nacientes más elevados hasta su desembocadura en el Río Mantaro Instituto Nacional de Defensa Civil, 2011.

El río Pariahuanca nace en el lado Oriental del nevado de Huaytapallana, tiene una longitud de 30 km aproximadamente; es de régimen regular que beneficia principalmente al Distrito de Pariahuanca en el uso agrícola y do-

méstico; a 1100 msnm desenboca en el río Mantaro. Tiene una superficie de 685.58 km2 Instituto Nacional de Defensa Civil, 2011.

Así mismo, el nevado Huaytapallana presenta doce lagunas importantes donde destacan la Laguna Chuspicocha, la Laguna Cocha Grande y la Laguna Lazo Huntay. Esta última es regulada mediente embalses (INAIGEM, 2018). Tanto la laguna Chuspicocha como la Laguna Lazo Huntay son suceptibles a deslizamientos y aluviones por recibir la influencia de la falla Huaytapallana (MINAGRI, 2008)

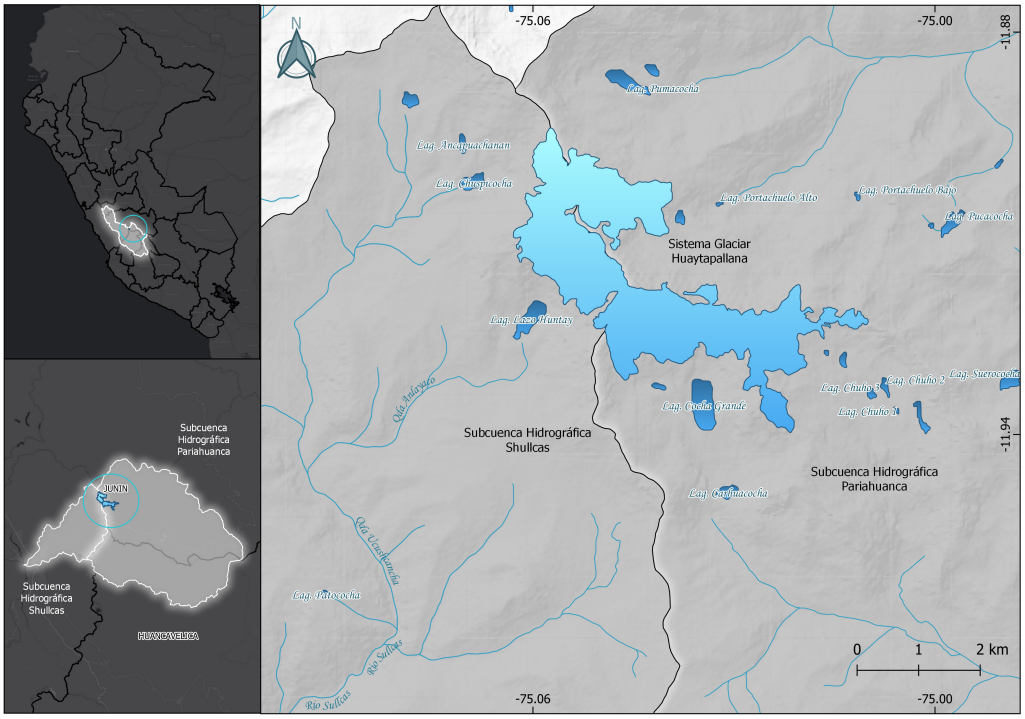


Figura 4.6: **Mapa de ubicación de las principales subcuencas hidrográficas que nacen en el Sistema Glaciar Huaytapallana Fuente: INAIGEM**

4.1.4. Aspectos biológicos

El nevado Huaytapallana se encuentra dentro del Área de Conservación Regional Huaytapallana (ACR Huaytapallana) que fue creado por DECRETO SUPREMO Nº 018-2011-MINAM. Su principal objetivo es contribuir

con la conservación de la diversidad biológica y paisajística presentes en su jurisdicción. En el libro de Maldonado Oré et al., 2022 se hace un exhaustivo registro de flora y fauna de la zona la cual resumiremos a continuación.

Ecosistemas

Dentro de la ACR Huaytapallana se pueden encontrar 4 tipos de ecosistemas según MINAM, 2019 los cuales se observan en la Figura 4.7.

Ecosistema peri glaciar y glaciar: Ecosistema altoandino ubicado por encima de 4500 msnm. Presenta suelos crioturbados y descubiertos producto del deshielo con vegetación baja y dispersa de Gramíneas, Asteráceas, líquenes, plantas almohadilladas entre otras.

Ecosistema acuático: lagunas Las lagunas son depósitos naturales de agua de menor profundidad que los lagos. Desde el punto de vista de los recursos hídricos, estas no presentan corriente continua y corresponden a aguas en estado léntico. El nevado Huaytapallana alimenta seis lagunas las cuales son el origen de las subcuencas hidrográficas Shullcas y Pariahuanca (Maldonado Oré et al., 2022).

Ecosistema pajonal Ecosistema altoandino con vegetación herbácea constituida principalmente por céspedes dominados por gramíneas y pajonales. Puede ocupar terrenos planos u ondulados o colinas de pendiente suave a moderada. El pajonal es uno de los recursos que sirve de sustento a la actividad de pastoreo de camélidos, vacunos y ovinos.

Ecosistema bofedal: Ecosistema andino hidromórfico, conocido como humedal andino, presenta vegetación herbácea de tipo hidrófila, están permanentemente inundados o saturados de agua corriente (mal drenaje), con vegetación densa y compacta de porte almohadillado o en cojín. Son importantes almacenes de turba (MINAM, 2019). Los bofedales son importantes para la provisión de agua en tiempos de sequía, anidamiento de aves y para la alimentación de camélidos, ya que reciben la descarga de las lluvias, de la escorrentía y de los glaciares.

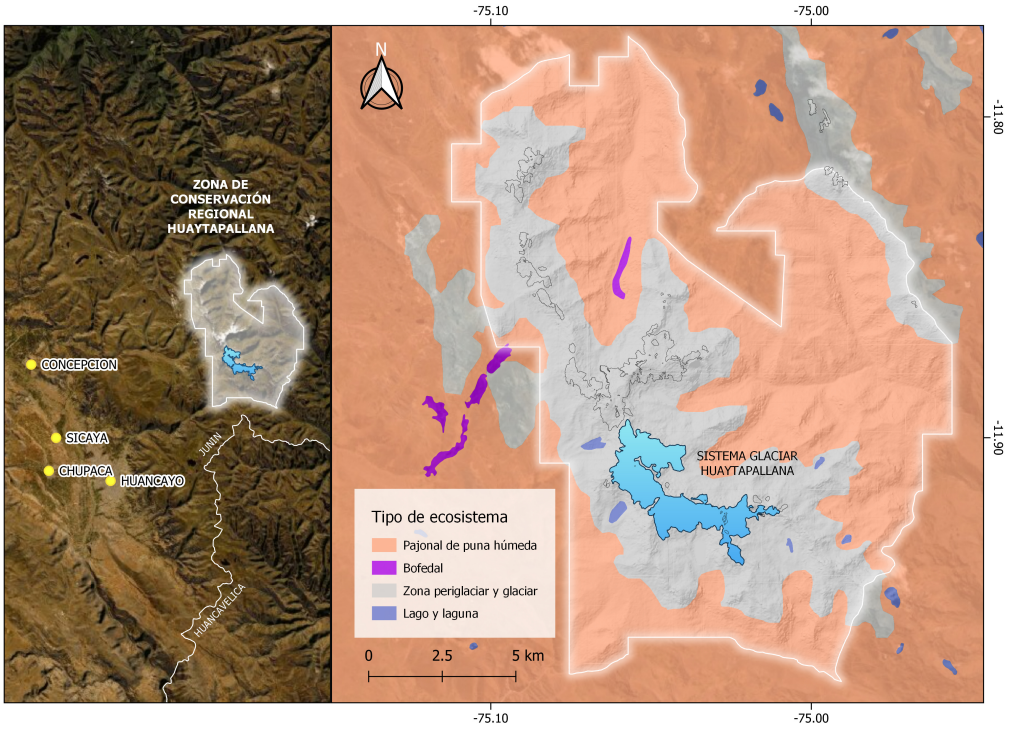


Figura 4.7: **Mapa de ecosistemas presentes en el ACR Huaytapallana construido con información del Mapa Nacional de Ecosistemas MINAM, 2019**

Flora

Según Maldonado Oré et al., 2022, la ACR Huaytapallana registró 27 especies de flora las cuales se encuentran distribuida en asociaciones vegetales como los pajonales, césped de puna, con especies de porte almohadilla; bofedales u oconales, con plantas que sirven de piso forrajero y plantas de suelos crio turbados. Entre las especies reportadas se encuentran ejemplares de Lupinus, Baccharis, Senecio, Stipa Ichu, etc.

Fauna

Según el Plan Maestro del Área de Conservación Regional Huaytapallana Gobierno Regional de Junin, 2014 y Maldonado Oré et al., 2022 se tiene registrado entre 12 y 19 especies de aves donde destaca el Jilguero cara gris,

Gaviota andina, Pato cordillerano, Huallata ((a) de la Figura 4.8, etc. Entre las especies mamíferas, se encuentra la vizcacha, así como también encontramos ejemplares de fauna doméstica nativa y exótica. La fauna doméstica nativa está conformada por los camélidos sudamericanos (CSA): la alpaca, la llama y la vicuña ((b) en la Figura 4.8 mientras que la fauna exótica la conforman especies ovinas y vacunas importantes para la actividad ganadera.



(a) aves "Huallatas" (b) camelidos sudamericanos

Figura 4.8: **Parte de la fauna presente en la ACR Huaytapallana**

4.1.5. Aspecto socioeconómico

Tomando información del Gobierno Regional de Junin, 2014, el ACR Huaytapallana cuenta con comunidades campesinas concentrados en su área de influencia. Las comunidades campesinas son organizaciones tradicionales que comparten un territorio y están ligados por vínculos ancestrales socioeconómicos y culturales donde desarrollan múltiples actividades productivas, entre las que incluyen el manejo de recursos naturales. En los alrededores del ACR existen 5 comunidades, pertenecientes a los distritos de Pariahuanca, Comas, Quilcas, El Tambo y Huancayo, las cuales son: Quilcas, Racracalla, Marancocha Aychana, LLacsapirca y Acopalca.

Índice de desarrollo humano

El Índice de Desarrollo Humano mide el progreso conseguido por una comunidad en las dimensiones básicas de salud, educación y nivel de vida (PNUD, 2022). Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), los distritos en los cuales se encuentran las comunidades campesinas del ACR Huaytapallana presentaron un IDH promedio de 0.428 en el año 2019 siendo Huancayo el distrito con mayor índice (0.608), seguido de El Tambo (0.575), Quilcas (0.415), Comas (0.342) y Pariahuanca (0.202). La Figura 4.9 muestra la evolución del IDH para el periodo 2003-2019.

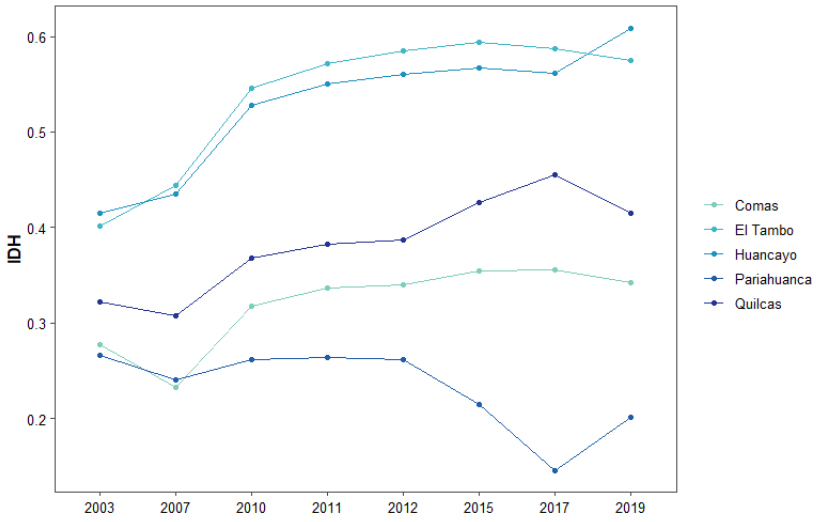


Figura 4.9: **Evolución del Índice de Desarrollo Humano para el periodo 2003-2019 de los cinco distritos involucrados en el ACR Huaytapallana. Fuente: Elaboración propia con información de PNUD, 2022**

Actividades económicas

Las comunidades aledañas del ACR Huaytapallana, desarrollan actividades relacionados a la agricultura, ganadería, acuicultura y artesanía textil, muchas de estas acciones son realizadas para el autoconsumo de cada familia de dichas comunidades. Producto de la agricultura, las comunidades producen alrededor de 500 especies de papas nativas y tubérculos como la oca, mashua y el olluco. La ganadería es extensiva y se cría tanto camélidos como

ganado ovino y vacuno para la producción de lácteos como leche y queso. Por otro lado, la crianza de peces, en especial de la trucha, es una actividad que tiene años realizándose en el área de influencia del ACR Huaytapallana; no obstante, es considerada una actividad complementaria al igual que la actividad textil, producto de la crianza de animales cuyo pelaje se utiliza para la elaboración de mantos típicos, frazadas, abrigos, etc.

Según el Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR, 2018), la actividad turística en el ACR Huaytapallana se encuentra entre los diez lugares más visitados por turistas en la región. Así mismo, se ha ido incrementando la promoción de rutas y circuitos donde el Nevado se encuentra incluido en la Zona de Desarrollo Turístico de Junín permitiendo que se destine presupuestos para proyectos de mejora de los servicios en la zona (MINCETUR, 2019). Sin embargo, estudios de (Aliaga y Cosme, 2018) sostienen que actividades como el andinismo y turismo vivencial tienen una influencia en la variación en los procesos de acumulación de capas glaciares mientras que (Maldonado Oré et al., 2022) resalta los altos niveles de contaminación producto de los rituales y ceremonias espirituales que se realizan en el ACR Huaytapallana.

4.1.6. Aspecto cultural

"Huaytapallana" proviene de las voces del quechua Wanka Huayta – "Flor" y Pallana – "Recolecta" que en conjunto significa "lugar donde se recogen flores" (Echegaray Cristobal, 2015) Extraído de (Gobierno Regional de Junin, 2014) La cordillera Huaytapallana es considerada como un centro espiritual, los Wancas, antiguos pobladores de la zona creían que en ella moraba el dios tutelar, llamado Huallallo Carhuancho. Debido a esto, tres días antes del calendario agrícola andino, se realiza una ceremonia ritual andina se ofrenda en honor a la madre tierra y al Dios Huallallo Carhuancho a través de pagos realizados por chamanes (médicos tradicionales), brujos y layas (sacerdotes andinos) Actualmente, se siguen realizando pagos y ofrendas al nevado (Figura 4.10).



Figura 4.10: **Las "apachetas" son sonsideradas una forma de pago o "pagapu" en símbolo de agradecimiento y respeto hacia los espíritus de las montañas. El nevado Huaytapallana es conocido por recibir numerosos pagapus durante el año. Fotografía propia**

4.2. Instrumentos y recolección de información

4.2.1. Datos meteorológicos

Estación meteorológica Huaytapallana - SENAMHI

Los datos meteorológicos fueron obtenidos a través del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi, 2020). Se trabajó con la estación meteorológica automática Huaytapallana (11°55'36" latitud sur; 75°3'42" longitud oeste), ubicada a orillas la laguna Lazo Huntay a 4684 msnm (Figura 4.11). La EMA Huaytapallana registra datos a escala horaria desde el año

2013 de las variables precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento.



Figura 4.11: **Estación Meterológica Automática Huaytapallana - SENAMHI, la cual brinda información sobre temperatura, humedad relativa, precipitación, presión atmosférica y velocidad-dirección del viento**

Equipos de medición de los tipos de precipitación

Para fines del proyecto TAMYA, se instaló una estación compuesta por el disdrómetro OTT Parsivel2, el pluviómetro de peso de alta precisión OTT Pluvio2 y una estación automática compacta (Figura 4.13). Los tres equipos se encuentran en el Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CEMGEM) con coordenadas 11°56'18.06"Latitud sur; 75° 4'9.44"Longitud oeste a una distancia de 2.5 km del sistema Glaciar Huaytapallana (Figura 4.12).

Disdrómetro óptico OTT Parsivel

El OTT PARSIVEL es un disdrómetro óptico-láser que mide el tamaño y la velocidad de los hidrometeoros (Battaglia et al., 2010). Actualmente se

utiliza la segunda generación denominado PARSIVEL2. El rango de tamaño que se puede medir es de 0 a 25 mm y el tamaño mínimo detectable es de aproximadamente 0,25 mm (Valdivia et al., 2020). Las velocidades de caída detectables están entre 0,2 y 20 m / s; toda esta información proporciona el número de gotas estructurado en una matriz de tamaño 32x32 de diámetro versus velocidad de caída y con una resolución de un minuto (Battaglia et al., 2010). Además, el software interno Parsivel2 calcula la tasa de precipitación, la reflectividad del radar, el índice de lluvia y los tipos de hidrometeoros que están codificados según las tablas 4680 y 4677 de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Valdivia et al., 2020).

Pluviómetro de peso OTT Pluvio2

El Pluviómetro de peso Pluvio2, tiene una resolución de un minuto y puede medir intensidades de lluvia y precipitación acumulada en tiempo real y no real que sean iguales o mayores a 6mm/h con una precisión del +-1 % (OTT HydroMet, 2022). La ventaja de OTT Pluvio2 es que puede medir las precipitaciones en todas las condiciones meteorológicas, incluida las condiciones de congelación gracias al líquido anticongelante que impide la acumulación de granizo y nieve en la cámara de captación. Como resultado, el OTT Pluvio2 puede ofrecer un rango de medición de - 40 a +60 °C (Nemeth, 2008).

4.2.2. Datos Satelitales

Imágenes Radar de Apertura Sintética Sentinel-1

La misión Sentinel 1 fue desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) representando el componente espacial del programa Copernicus de la Unión Europea (Nagler et al., 2015). Dicha misión está compuesta por una constelación de dos satélites: Sentinel1-A y Sentinel 1-B que fueron lanzados en abril de 2014 y 2016, respectivamente (Scher et al., 2021). Ambos satélites recogen información en la banda C (frecuencia de 5,405 GHz y 5,5 cm de longitud de onda) y admite cuatro tipos o modos de imagen operativa diferentes (Interferometric Wide swath (IW) mode, Extra Wide swath (EW) mode, Strip-Map (SM) mode y Wave (WV) mode) que proporcionan distinta resolución, cobertura, y enfoques de aplicación (Torres et al., 2012). Así

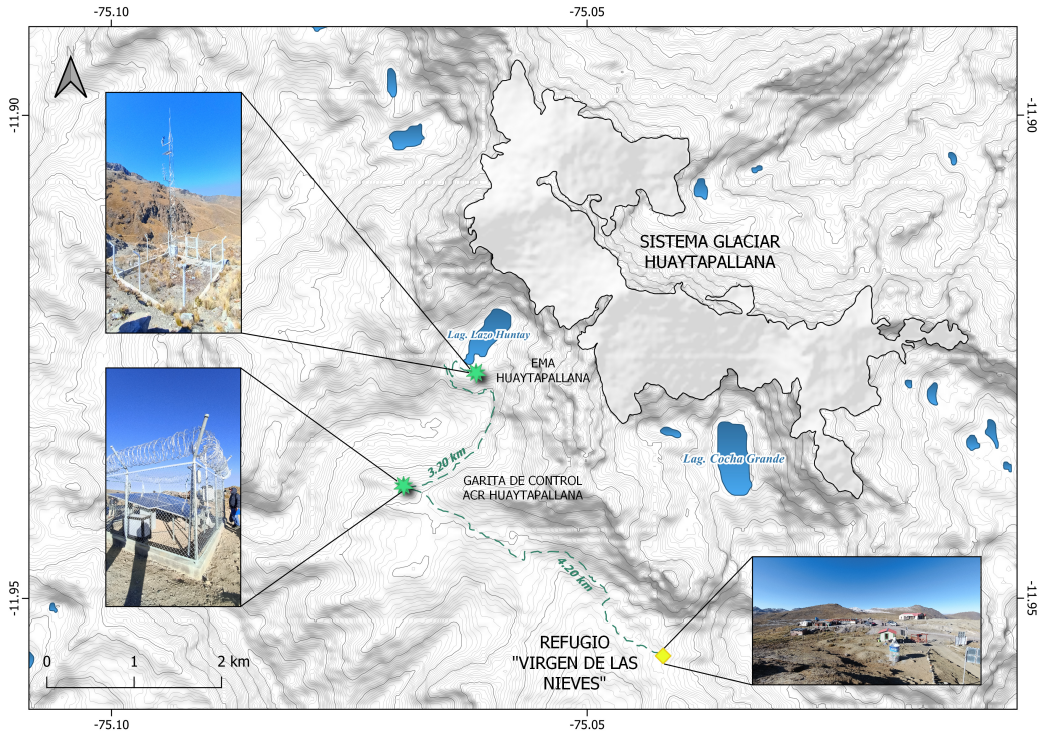


Figura 4.12: **Ubicación y fotografías del refugio y entrada a la zona de estudio "Virgen de las Nieves", Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CEMGEM - Proyecto TAMYA) y la Estación Meteorológica Automática (EMA) Huaytapallana (SENAMHI)**

mismo, Sentinel-1 adquieren datos en polarización simple o dual (HH+HV, VV+VH) con un tiempo de revisita de 6 días y son de acceso abierto bajo dos tipos de productos: Ground Range Detected (GRD) y Single Look Complex (SLC) (Filipponi, 2019). Para el presente estudio se utilizó series temporales de imágenes Sentinel-1A y B IW GRD con una franja de 250 km de barrido, una separación de cuadrículas de 10 m y un ángulo de incidencia de entre 29.1° - 46.0° (ESA, 2022). Se escogió la polarización cruzada VH por tener una mayor sensibilidad que la polarización VV (Nagler et al., 2015). La serie temporal se extiende desde agosto 2019 a diciembre 2021.



(a) Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CEMGEM)

(b) Equipos de medición

Figura 4.13: **Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (izquierda), instrumentos de medición utilizados para el estudio (derecha). De izquierda a derecha en la figura (b): pluviómetro de alta precisión OTT Pluvio2, disdrómetro OTT Parsivel, Estación Meteorológica Compacta.**

4.3. Metodología

4.3.1. Procesamiento de datos del CEMGEM

Los datos correspondientes al disdrómetro óptico OTT Parsivel, pluviómetro OTT Pluvio2 y estación meteorológica compacta nos permitirán caracterizar los eventos de precipitación durante el año 2022 (Objetivo específico N°1). Fueron descargados directamente desde la base de datos instalada en la zona de estudio. Se contó en total con veintinueve variables de las cuales se escogieron ocho (ver Tabla 4.1). El procesamiento consistió en leer los archivos en formato .txt y .csv los cuales fueron ordenados y estructurados en un solo marco de datos con las fechas a escala a nivel de minutos. Para el caso del Parsivel, la precipitación acumulada se obtuvo convirtiendo la intensidad de lluvia (canal 100 de la Tabla 4.1) de mm/h a mm. Para el caso del Pluvio2, se utilizó la precipitación acumulada en tiempo no real (canal 166 de la Tabla 4.1) restando los valores de precipitación finales con los valores iniciales de cada evento. Para el caso de los datos de la estación meteorológica compacta (canales 1011,1012,1014 y 1015 de la Tabla 4.1), estos se utilizaron para la descripción de las condiciones meteorológicas durante los eventos de precipitación, aquellos valores calificados como outliers fueron convertidos a

NA y omitidos en los análisis.

Canal	Variable	Equipo
100	Intensidad de lluvia (mm/h)	DSD
106	Cantidad de lluvia (mm)	
98	Código Materológico Synop 4680	
252	Numero de partículas	
255	Reflectividad del radar (dBz)	
1011	Temperatura del aire (°C)	EMC
1011	Humedad relativa (%)	
1012	Presión del Aire (hPa)	
1013	Velocidad del Aire (m/s)	
1014	Dirección del Viento (°)	
104	Intensidad de lluvia (mm/min)	OTT Pluv
166	Precipitación acumulada (mm)	
108	Almacenamiento en cubeta (mm)	

Tabla 4.1: **Variables registradas por los equipos de CEMGEM. DSD : Disdrómetro; EMC: Estación meteorológica compacta; OTT Pluv: Pluviometro**

4.3.2. Obtención de datos del tipos de precipitación

Los códigos SYNOP (surface synoptic observations / observaciones sinópticas en superficie) son códigos utilizados para clasificar las observaciones realizadas por un observador o equipos meteorológicos en un determinado periodo de tiempo y están agrupados en tablas (WMO, 2019). La clasificación de los tipos de precipitación sigue la codificación de la tabla 4680 compuesto por 99 variables de las cuales, se seleccionaron las 21 más representativas mostradas en la Tabla 4.2. Los criterios de identificación y clasificación utilizados por el disdrómetro Parsivel se detallan mejor en el manual del equipo citado como OTT, 2016.

Tipo de precipitación	**Código SYNOP 4680**
Sin precipitación	00
Drizzle (Llovizna)	
light (ligera)	51
moderate (moderada)	52
heavy (intensa)	53
Drizzle with rain (Llovizna con lluvia)	
light (ligera)	57
moderate (moderada)	58
heavy (intensa)	58
Rain (Lluvia)	
light (ligera)	61
moderate (moderada)	62
heavy (intensa)	63
Rain, drizzle with snow (Lluvia, llovizna y nieve)	
light (ligera)	67
moderate (moderada)	68
heavy (intensa)	68
Snow (Nieve)	
light (ligera)	71
moderate (moderada)	72
heavy (intensa)	73
snow grains (granos de nieve)	77
Soft hail (Granizo blando)	
light (ligero)	87
moderate/heavy (moderado/intenso)	88
Granizo	
light (ligero)	89
moderate/heavy (moderado/intenso)	89

Tabla 4.2: **Clasificación de los tipos de precipitación según la Tabla 4680**

4.3.3. Procesamiento de datos de la estación automática Huaytapallana - SENAMHI

Los datos de la estación meteorológica automática se obtuvieron mediante el SENAMHI y se utilizaron para (1) la validación de los datos obtenidos por

los nuevos equipos del CEMGEM; (2) caracterización climática del periodo de estudio a escala diaria, mensual y estacional y (3) determinar la influencia de las variables temperatura y humedad sobre los valores de retrodispersión obtenidos de las imágenes SAR mediante análisis de correlación. Debido a que los años 2013, 2015 y 2017 tuvieron una falta considerable de datos (B.1, B.2 y B.3), se trabajó con el periodo 2019-2021. Como paso previo al análisis de datos, se realizó el control de calidad para eliminar valores nulos y outliers.

4.3.4. Obtención de imágenes radar SENTINEL 1 y definición de líneas de estudio

Se construyó la serie temporal con las imágenes SAR Sentinel-1, donde se observaran los cambios estacionales de la superficie glaciar de nuestra zona de estudio (Objetivo específico N°2); así como tambien su interacción con las variables hidrometeorológicas (Objetivo específico N°3). Dichas imágenes fueron obtenidas a través de Google Earth Engine, plataforma de computación en la nube que permite a los usuarios el acceso a grandes archivos de datos de teledetección a escala de petabytes («Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review», 2020). Google Earth Engine proporciona los productos pre-procesados por el paquete de herramientas Sentinel-1 Toolbox (ESA, 2022), el cual incluye los siguientes procesos:

- Eliminación del ruido térmico (thermal noise removal)
- Calibración radiométrica (radiometric calibration)
- Corrección del terreno (Terrain correction) usando el modelo digital de elevación SRTM 30m
- Obtención de valores de retrodispersión en decibelios mediante escalado logarítmico ($10 * log10(x)$)

Los productos obtenidos no incluyen el proceso de filtrado de ruido o "speckle", por lo que se espera ver un margen de error o valores por encima/debajo de la media.

Se utilizó la librería 'RGEE' (Aybar et al., 2020) para acceder y procesar 71 imágenes en el software R eliminando el costo computacional que implica un procesamiento en un entorno local. Para poder comparar los píxeles en el tiempo, se aplicó un corregistro a toda la serie temporal utilizando la primera escena del 19 de agosto del 2019 como imágen de referencia para encadenar a las otras 70 imágenes. Se utilizó estadísticas en pila y gráficos de calor (Winsvold et al., 2018) para generar una firma temporal de tres zonas en el sistema Huaytapallana (Figura 4.14), las cuales consisten en una línea central y cuatro líneas paralelas cada 25 m que se intersecan con curvas de nivel cada 10m para recojer la información altitudinal. Se buscó que las líneas de estudio estuvieran ubicadas tanto en la vertiente oriental como en la occidental para poder observar si existe alguna diferencia significativa en los valores de retrodispersión de las imágenes SAR. Así mismo, se priorizó aquellas zonas con menor complejidad topográfica como las lenguas glaciares debido a la alta sensibilidad que tienen los sensores radares ante las altas pendientes.

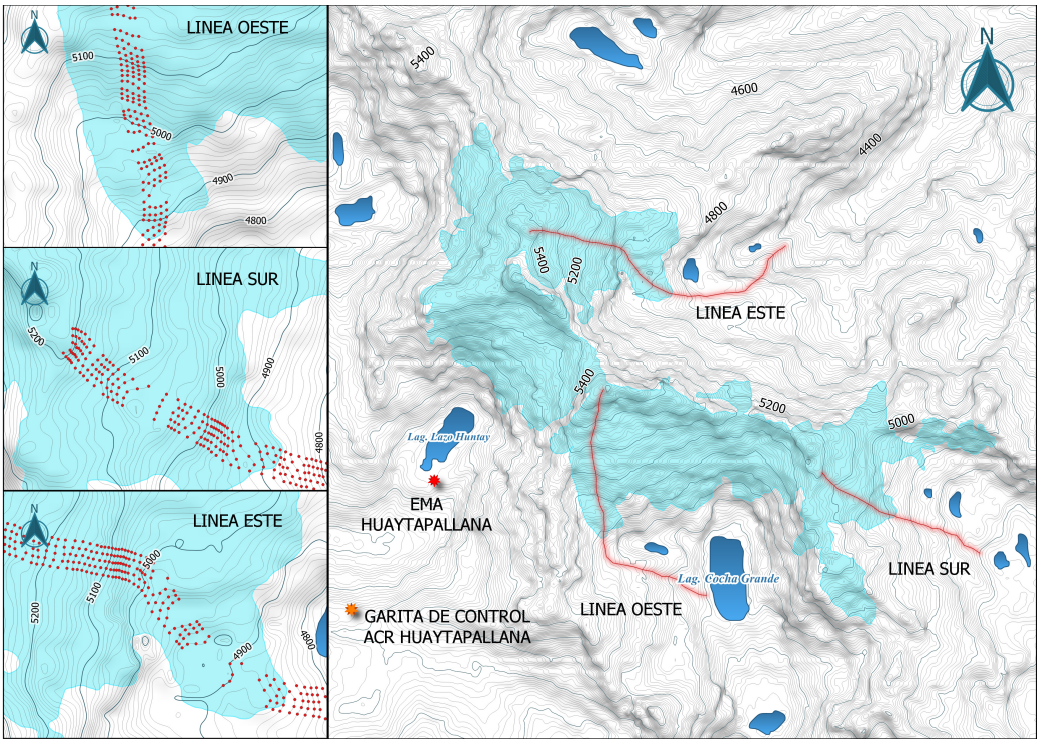


Figura 4.14: **Líneas y puntos de estudio en la zona este, sur y oeste del sistema glaciar Huaytapallana**

4.3.5. Determinación de la altura de la línea de nieve

Con el objetivo de determinar si las imágenes radares son capaces de diferenciar la zona de ablación y acumulación (procesos de pérdida y ganancia de masa glaciar respectivamente). Se procesaron imágenes ópticas Sentinel 2 para los años 2019, 2020, 2021 para asi extraer el valor del límite entre dichas zonas (Figura 4.15). Se escogió la imagen con menor cobertura de nubes tomada en las últimas semanas de la temporada seca de cada año (ver Tabla 4.3), puesto que en dichas fechas se puede apreciar mejor la separación entre estas dos zonas (Rabatel et al., 2012). Se realizó un trabajo combinado entre inspección visual y configuración de umbrales para obtener las cotas finales (Vuille et al., 2018) para luego ser promediadas y obtener una sola cota para cada una de las líneas de estudio las cuales fueron utilizadas para los análisis posteriores.

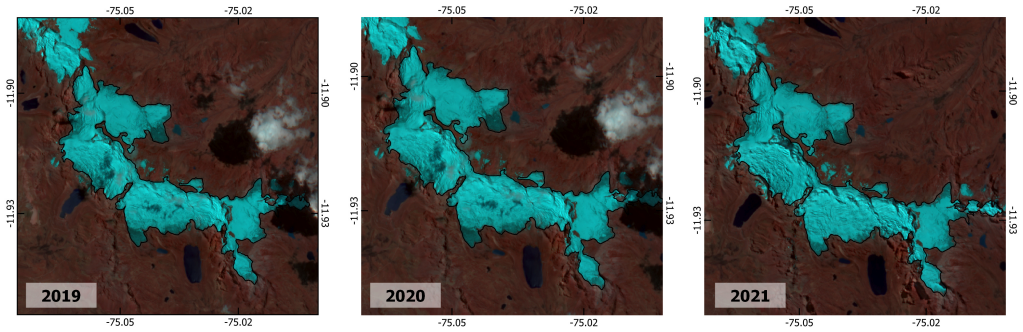


Figura 4.15: **Imágenes satelitales ópticas Sentinel 2 de los años 2019, 2020 y 2021**

2019	$COPERNICUS/S2_SR/20190918T151701_20190918T151704_T18LVM$
2020	$COPERNICUS/S2_SR/20200828T151709_20200828T152025_T18LVN$
2021	$COPERNICUS/S2_SR/20210808T151711_20210808T151707_T18LVM$

Tabla 4.3: **Imágenes ópticas Sentinel-2 utilizadas**

Capítulo 5

Resultados y discusión

En este capítulo se muestra los resultados del procesamiento de la información de los equipos de medición de los tipos de precipitación y sus condiciones meteorológicas. Asi mismo se muestra la serie temporal construida con los valores de retrodispersión obtenidos por las imágenes radar. Estos resultados, nos permitirán entender lo que ocurre durante un evento de precipitación y cómo estos eventos repercuten en las condiciones superficiales vistas desde las imágenes radares a lo largo del tiempo y a diferentes escalas (horaria, mensual y estacional) lo cual nos permitirá determinar los impactos hidrometeorológicos en la superficie del Sistema Glaciar Huaytapallana.

5.1. Caracterización de los eventos y tipos de precipitación

5.1.1. Eventos registrados

Desde el 30 de agosto al 20 de octubre del 2022 el personal de vigilancia del (CEMGEM) realizó registros sobre los eventos de precipitación observados in-situ (Anexo A.1). Como complemento, se utilizaron registros fotográficos

(Vease Anexos A.2, A.3, A.4 y A.5) y asi poder identificar los eventos de precipitación de los datos obtenidos por el disdrómetro OTT Parsivel2 y medir la precisión de los equipos (Tabla 5.1). Como resultado, se obtuvo una precisión de 80 % y 73 % para la identificación de nieve y lluvia respectivamente.

	Nieve		**Lluvia**	
Fecha	Disdrómetro	Observaciones	Disdrómetro	Observaciones
25/4/2022	x	x	x	
30/08/2022	x	x	x	x
12/09/2022	x	x	x	x
14/09/2022			x	x
15/09/2022		x	x	x
16/09/2022			x	
27/09/2022			x	x
3/10/2022	x		x	x
4/10/2022	x	x		x
17/10/2022	x			x
19/10/2022	x	x		x

Tabla 5.1: **Tabla de contingencia entre los días de ocurrencia de nieve/lluvia registrados por el equipo de vigilancia y los registros respectivos realizados por el disdrómetro**

Selección de eventos de precipitación

El criterio utilizado para la selección de eventos fue tomar aquellas fechas que contaban con registros tanto del código SYNOP 4680 (tipo de precipitación descrito en la sección 4.3.2) como de la intensidad de lluvia en mm/h. Se compararon los datos del disdrómetro, pluviómetro (OTT Pluvio2) y la estación meteorológica automática SENAMHI, (mayor detalle en el Anexo C.1). Una inspección rápida permitió notar que la ocurrencia de los eventos se dió antes del amanecer (25 de abril, 30 de agosto) y en las horas cercanas al medio día (31 de agosto, 16 de septiembre), con algunos eventos nocturnos (12 y 15 de septiembre). Estos registros dan una idea preliminar sobre el ciclo diurno de los eventos de precipitación los cuales serán expuestos en la sección 5.1.6. La duración de la mayoría de los eventos registrados va desde los 8 a 39 minutos mientras que los eventos ocurridos el 25 de abril (1:44 h, 3:14 h) y el 30 de agosto (3:17 h) fueron los de mayor duración. Los registros de precipitación acumulada difieren significativamente entre los tres equipos (R =

0.09 entre el disdrómetro (DSD) y Pluviómetro (OTT Pluvio2)), se cree que las diferencias entre el disdrómetro y el pluviómetro se pueden explicar por las condiciones ambientales y características propias de los sensores, así como en la configuración de la toma de datos. Si bien es cierto que el pluviómetro posee una mayor sensibilidad, no puede discriminar entre precipitación sólida o líquida de la forma en la que el disdrómetro lo hace.

5.1.2. Comparación de información meteorológica

La estación meteorológica compacta ubicada en el CEMGEM brinda datos de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. Se realizó la comparación de dichas variables a escala horaria con los registros de la estación meteorológica Huaytapallana (SENAMHI) y asi observar su precisión. Para las variables de temperatura y humedad, ambos equipos presentan una alta correlación ($R = 0.92$ y $R = 0.86$ respectivamente en la Figura 5.1)). Con esta certeza, los datos de la estación compacta fueron utilizados para monitorear el cambio de la temperatura y humedad durante el desarrollo de los eventos de precipitación por su mayor resolución (1 minuto) lo cual nos permite observar los cambios a lo largo del evento con mayor detalle. No se realizó una comparación entre los datos de velocidad y dirección del viento puesto que ambas estaciones están ubicadas a 4 km de distancia y estan influenciados por los factores locales. La alta similitud de los datos ($R>0.85$, Figura 5.1) tomando en cuenta valores horarios (de muy alta variabilidad), reflejan un comportamiento homogéneo en la zona de estudio, lo cual implica que la variabilidad ambiental del sistema climático del Huaytapallana puede ser estudiado desde los sensores ubicados en el CEMGEM, por lo que los resultados del presente análisis son regionalmente representativos.

5.1.3. Casos de estudio

Se registró un total 18 eventos de precipitación que ocurrieron durante los meses de abril, agosto y octubre del 2022 en el sistema Glaciar Huaytapallana (Anexo C.1). Se escogieron tres eventos para ser expuestos en esta sección. Se realizó la descripción de los tipos de precipitación y las condiciones atmosféricas los cuales se observan en las Figuras 5.2, 5.4 y 5.6. Cada evento cuenta con gráficos que muestran (1) los tipos de precipitación, clasificados según la

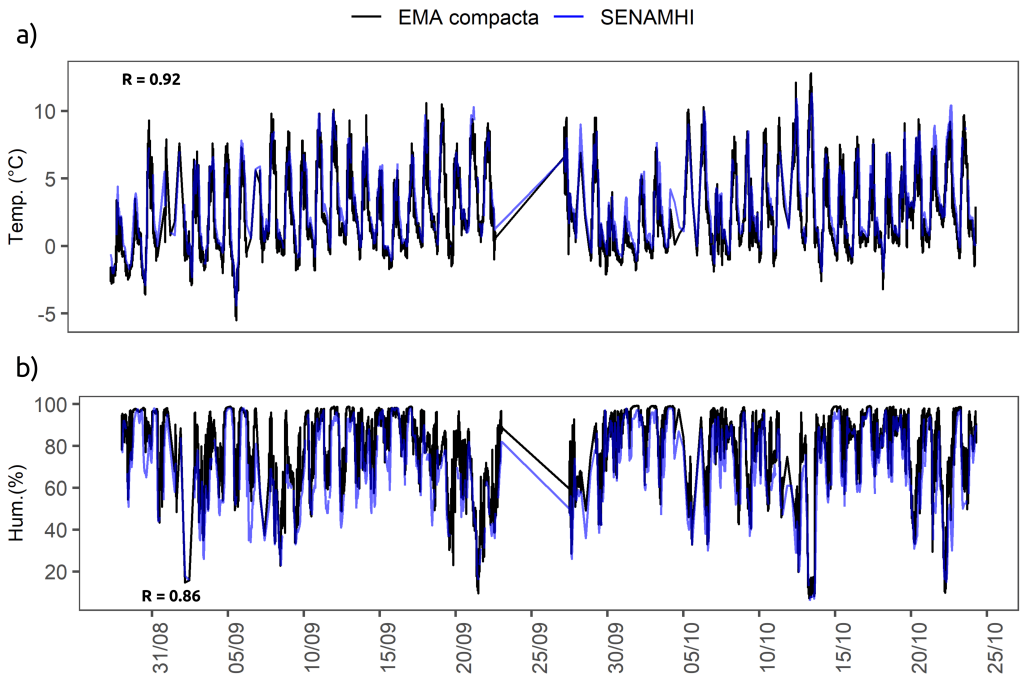


Figura 5.1: **Comparación de los datos de (a) Temperatura (°C) y (b) Humedad relativa (%) a escala horaria registrados por la estación meteorológica compacta (línea negra) y la estación meteorológica Huaytapallana – SENAMHI (línea azul)**

tabla SYNOP 4680 (Tabla 4.2); (2) la intensidad de lluvia, registrada por el disdrómetro Parsivel y Pluviometro; (3) registros de temperatura y humedad brindados por la estación meteorológica compacta y por último, (4) información sobre la velocidad y dirección del viento al momento del evento. Se debe acotar que, se decidió incluir la información brindada por el Pluviómetro para observar su desempeño ante la ocurrencia de precipitación sólida o líquida a pesar de mostrar una baja coherencia entre los registros de intensidad de precipitación con el disdrómetro.

Evento de precipitación del 25 de abril del 2022

La Figura 5.2 muestra el evento de precipitación ocurrido el 25 de abril del 2022 entre las 14:02 y 17:19 horas de la tarde con una duración de 3 horas 17 minutos y 2.73 mm de precipitación acumulada (OTT Pluvio2). Durante

la primera hora, los valores de temperatura estuvieron por encima de 0°C para luego bajar y mantenerse entre 0°C y -0.5°C (panel (b) Figura 5.2). La cantidad de humedad al inicio del evento fue de 96 % luego sufrió un descenso cerca de las 14:40 horas y finalmente fue incrementando su valor hasta por encima de 97 % (panel (c) Figura 5.2). Durante el evento, los vientos vinieron predominantemente del sureste (Figura 5.3) con velocidades pico de 4 m/s que se registraron en los minutos iniciales para luego ir descendiendo paulatinamente. La precipitación de los primeros veinte minutos es líquida de tipo llovizna y lluvia (SYNOP = 57, 58 y 59) con cortos periodos de granizo (SYNOP = 88 y 89) coincidiendo con las temperaturas sobre 0°. A las 14:30 horas, la precipitación comienza a ser sólida de tipo granizo y nieve (SYNOP = 71, 72 y 73). Podemos notar cómo el cambio de fase (líquido – sólido) alrededor de las 14:20 horas coincide con un descenso brusco de la humedad y una temperatura de 0.5°C la cual desciende por debajo de cero para mantenerse así hasta las 17:00 horas, momento en el cual la precipitación vuelve a ser de tipo mixta (lluvia, llovizna y nieve) con temperaturas ligeramente por encima de 0°C. Así mismo, la intensidad registrada presenta dos picos a las 15:20, 16:00 y 16:40 horas con valores de 3, 42 y 43 mm/h las precipitaciones de tipo granizo y nieve.

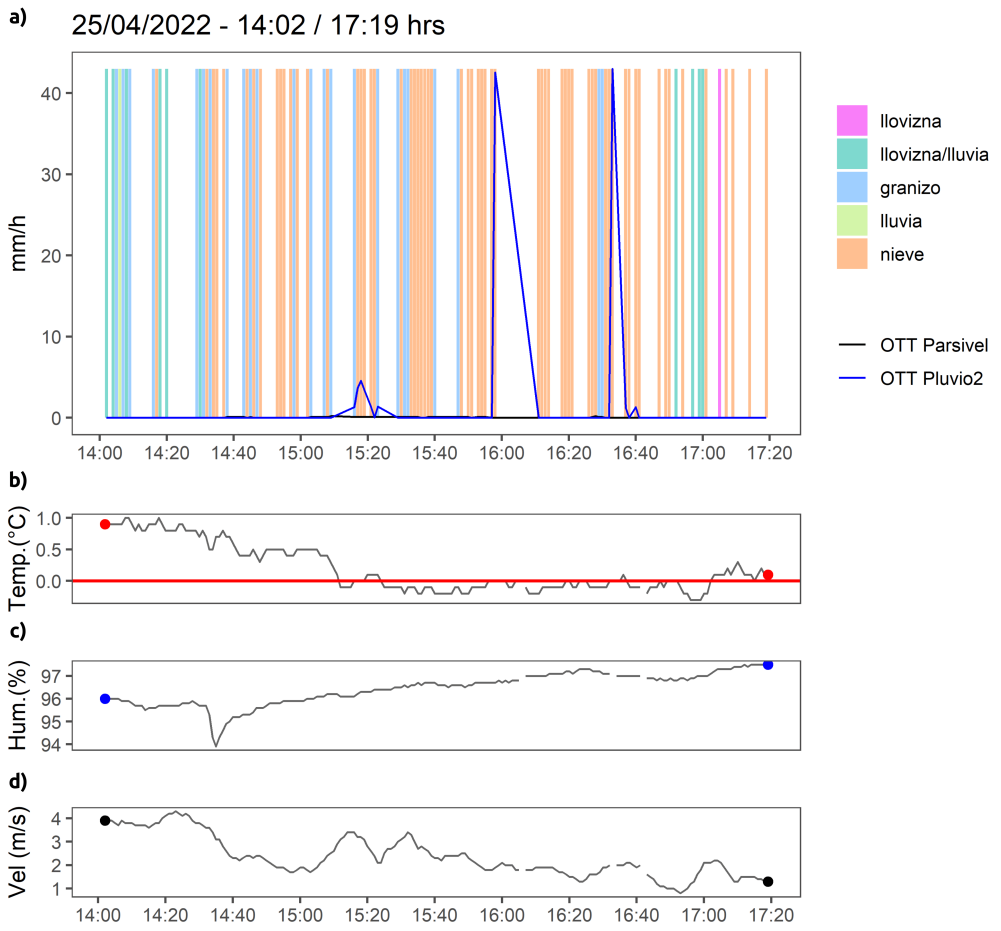


Figura 5.2: **Desarrollo temporal del evento de precipitación ocurrido el 25 de abril del 2022 a las 14:06 horas de la tarde. Panel (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia registrada por el pluviómetro Pluvio2 (línea azul) y el disdrómetro (línea negra); Panel (b): temperatura; Panel (c): humedad relativa; Panel (d): velocidad de viento en (m/s)**

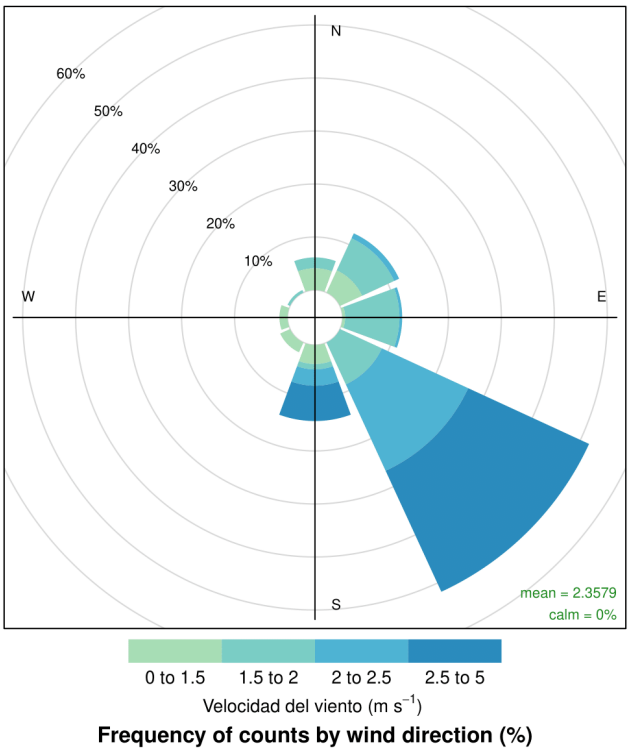


Figura 5.3: **Rosa de viento generada a partir de los registros de velocidad y dirección del viendo durante el evento del 25 de abril del 2022. Se observa que los vientos más fuertes (2.5 - 5 m/s) provienen de sureste y en menor medida del sur**

Evento de precipitación del 30 de agosto del 2022

El evento ocurrido el 30 de agosto del 2022 mostrado en la Figura 5.4 comenzó a las 5:17 horas de la madrugada, tuvo una duración de 3 horas 14 minutos y una precipitación acumulada de 0.8 mm (Pluvio2). La temperatura (panel (b) Figura 5.4) se mantuvo por debajo de 0°C con un comportamiento ascendente de -2°C a -1.5°C. Del mismo modo, el contenido de humedad se mantuvo estable con una pequeña variación de 97 % a 97.5 % (panel (c) Figura 5.4). Los pocos registros disponibles para la velocidad y dirección del viento indican que estos vinieron en su mayor parte del sureste (Figura 5.5), con velocidades promedio de 2.37 m/s y valores máximos de 3 m/s. se observa en el panel (a) de la Figura 5.4 que durante la primera hora se registró precipitación de tipo llovizna (SYNOP = 51,52 Y 53) en combinación

con lluvia (SYNOP = 61, 62 y 63) con bajas intensidades (1 mm/h según los registros del OTT Parsivel) alrededor de las 6:30 horas se observa una pequeña pausa para luego registrar un incremento en la intensidad de lluvia a partir de las 7:00 horas, los picos de intensidad (5 mm/h) coinciden con breves minutos de nieve (SYNOP = 71, 72 y 73) y granizo (SYNOP = 88 y 89) entre las 7:20 y 8:20 horas. Los últimos diez minutos se vuelve a registrar precipitación de forma líquida (llovizna y lluvia, SYNOP = 57, 58 Y 59) con intensidades menores a 1 mm/h.

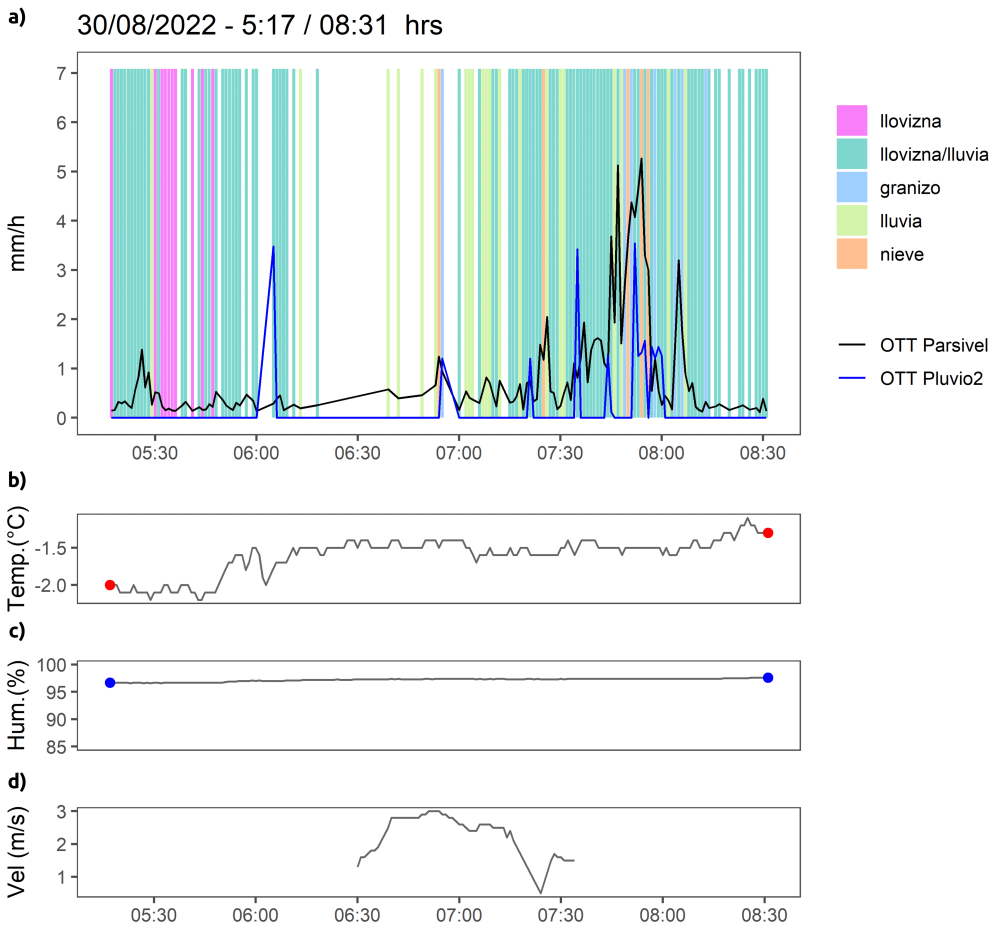


Figura 5.4: **Desarrollo temporal del evento de precipitación ocurrido el 30 de agosto del 2022 a las 5:17 horas de la mañana. Panel (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia registrada por el pluviómetro Pluvio2 (línea azul) y el disdrómetro (línea negra). Panel (b): evolución temporal de la temperatura. Panel (c): evolución temporal de la humedad relativa; Panel (d): velocidad de viento en (m/s)**

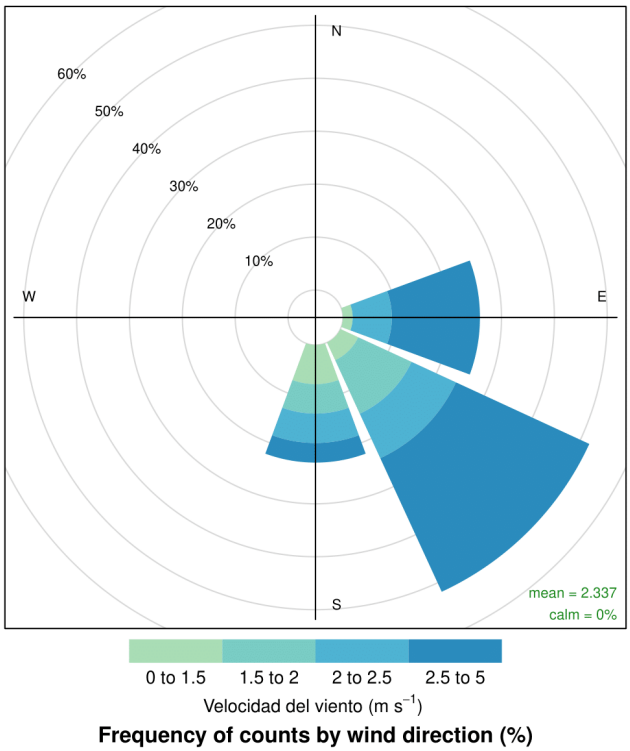


Figura 5.5: **Rosa de viento generada a partir de los registros de velocidad y dirección del viendo durante el evento del 30 de agosto del 2022. Se observa que la totalidad de los vientos provienen del este, sureste y sur con velocidades de hasta 5 m/s.**

Evento de precipitación del 20 de octubre del 2022

La Figura 5.6 muestra el evento ocurrido el 20 de octubre del 2022 que comenzó a las 18:03 horas de la tarde y tuvo una duración de 1 horas 47 minutos. La precipitación acumulada total fue de 9.73 mm (Pluvio2). La temperatura (panel (b) Figura 5.6) tuvo un comportamiento descendente de 2.8 a -0.1 °C. La humedad descendió de 98 % a 88 % durante los primeros 45 minutos para luego aumentar y llegar a valores cercanos a 100 % (panel (c) Figura 5.6. Se observa en el panel (a) de la Figura 5.6 que durante la primera hora se registró precipitación de tipo granizo (SYNOP = 89) a temperaturas mayores a 0°C, pero con humedad rondando valores de 96 %, luego de un periodo de intermitencia, entre las 18:20 y las 19:00 horas, Se observa la ocurrencia de nieve y granizo en conjunto que persiste hasta el final del evento

(19:50 horas); se puede destacar los altos valores de humedad y temperaturas cercanas a 0° durante este periodo. En este caso, la velocidad del viento, vino mayormente del sur (Figura 5.7 alcanzando valores por encima de 6 m/s durante los primeros minutos de granizada para luego descender durante la ocurrencia de nieve. De la misma forma, la intensidad registrada por ambos sensores indica picos de 40-30 mm/h en la primera hora (caída de granizo) y luego disminuye a 10 mm/h que coincide con la caída de nieve.

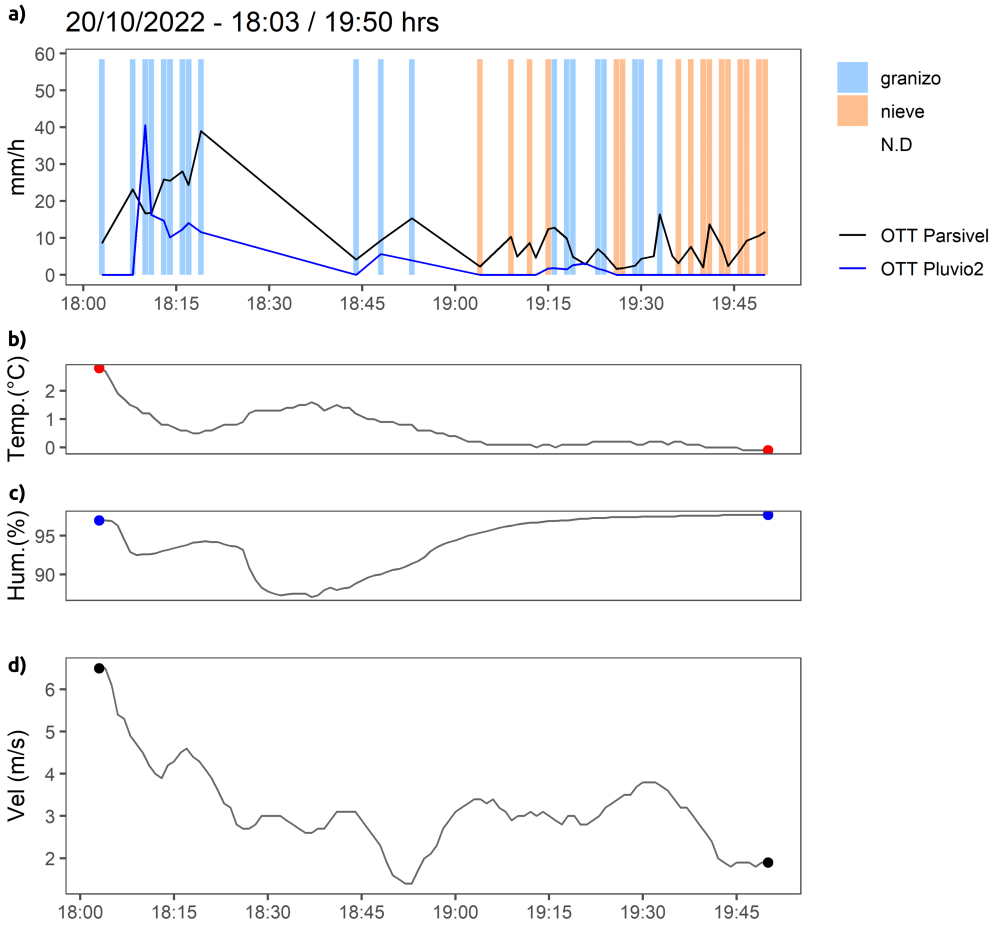


Figura 5.6: **Desarrollo temporal del evento de precipitación ocurrido el 20 de octubre del 2022 a las 18:03 horas de la mañana. Panel (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia registrada por el pluviómetro Pluvio2 (línea azul) y el disdrómetro (línea negra).**

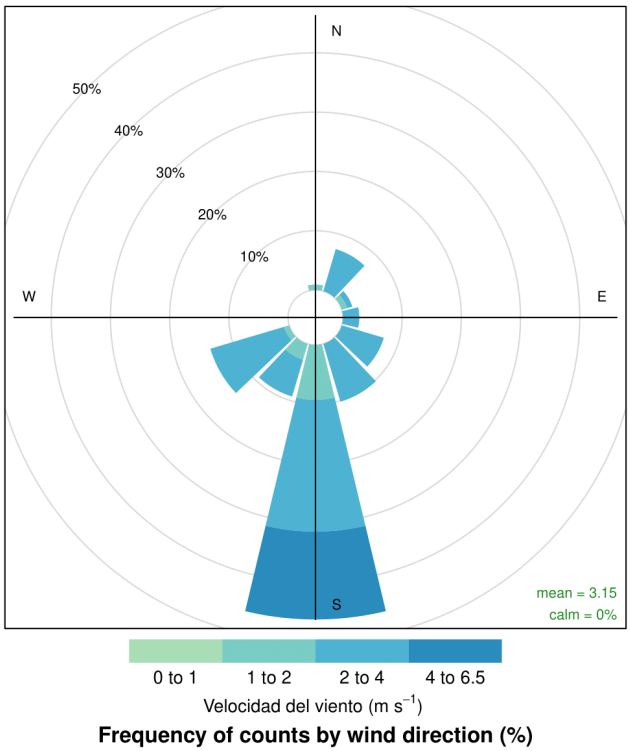


Figura 5.7: **Rosa de viento generada a partir de los registros de velocidad y dirección del viendo durante el evento del 20 de octubre del 2022. Para este caso, los vientos se originaron en el sur con velicidades máximas de 6.5 m/s.**

5.1.4. Ocurrencia de los tipos de precipitación

Los 17 eventos registrados tuvieron un total de 53 mm acumulados repartidos entre la fase sólida (nieve y granizo) y líquida (lluvia, que incluye llovizna) (Tabla 5.2 y Figura 5.8). Los registros indican que la mayor contribución de precipitación fue dada por el granizo (36 mm), seguido por la nieve (11.7 mm) que en conjutno representan el 91.1 % del total. La lluvia tuvo un registro de 4.73 mm (8.94 %) siendo la fase líquida la que menor contribución presentó en el periodo de estudio.

Fase	Tipo	Precipitación (mm)	%
Sólida	Granizo	36.5 mm	68.9 %
	Nieve	11.7 mm	22.1 %
Líquida	Lluvia	4.73 mm	8.94 %

Tabla 5.2: **Contribución a la precipitación (en mm) y proporción porcentual de los tipos de precipitación en su respectiva fase (sólida-líquida)**

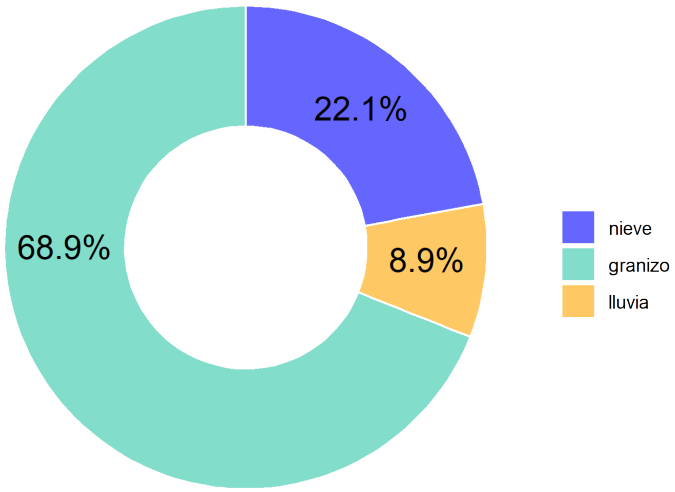


Figura 5.8: **Gráfico de torta para las proporciones de los tres tipos de precipitación ocurridos en el Sistema Glaciar Huaytapallana.**

5.1.5. Análisis de ocurrencia según temperatura y humedad relativa

Se analizó la distribución de los registros de los tipos de precipitación ocurridos en los diferentes eventos según la temperatura y la humedad relativa al momento de su ocurrencia. Los tipos de precipitación se aguparon en tres categorías: lluvia, nieve y granizo (vease 4.2) apreciado en la Figura 5.9. Se puede observar que el rango de temperaturas se encuentra entre -2 y 7°C.

El panel inferior de la Figura 5.9 muestra la ocurrencia de los tres tipos de precipitación en rangos de humedad relativa que van desde 55 % a 100 %. Se observa, en general, una mayor ocurrencia a partir de 85 % de humedad. Por otro lado, se generaron las rosas de viendo representativas para los cuatro tipos de precipitación. Para este caso, los vientos más suaves (entre 2.5 y 5 m/s) provienen del sureste mientras que los más intensos (entre 12 y 15 m/s) provienen del noroeste registrados durante la ocurrencia de granizo y lluvia (Figura 5.11).

La Figura 5.9, muestra las distribuciones de los tres tipos de precipitación. Se utilizó el percentil 95 para detectar un umbral de temperatura a partir de el cual la ocurrencia de nieve y granizo aumentan o descienden. Para el caso de la nieve, se encontró el umbral a 1.72°C mientras que para el granizo el valor umbral fue de 3.3°C.

5.1.6. Análisis de ocurrencia según el ciclo diurno

La figura 5.12 muestra las horas de ocurrencia de los tres principales tipos de precipitación (granizo, lluvia, nieve). Se observa un ciclo diurno similar entre el granizo y la lluvia; su ocurrencia se da a partir de las 6 horas con bajas intensidades de precipitación (mm/h). Los eventos más intensos ocurren entre las 15 y 21 horas. Por otro lado, la ocurrencia de nieve tiene un carácter más nocturno, presentando registros solo durante la madrugada y a partir de las últimas horas de la tarde mientras que las intensidades máximas de nevada se han registrado entre las 18 y 21 horas de la noche.

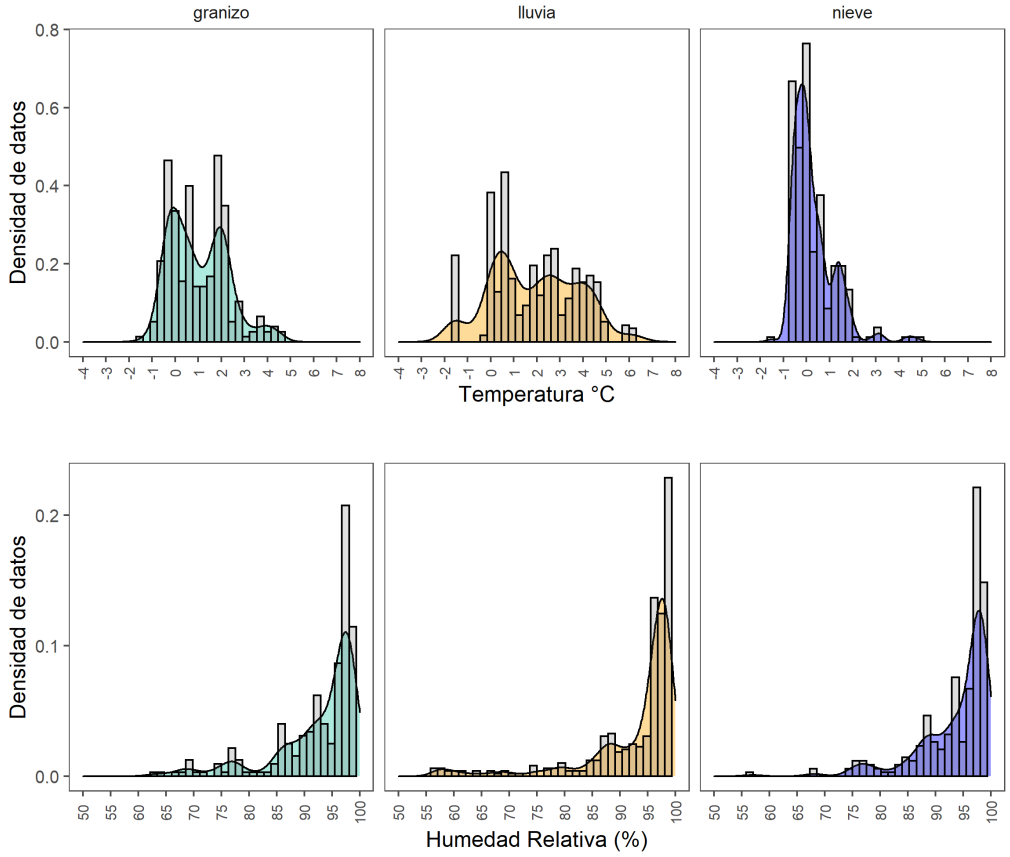


Figura 5.9: **Distribución de los datos de los tipos de precipitación según la temperatura (panel superior) y humedad relativa (panel inferior) mediante histogramas y graficos de densidad.**

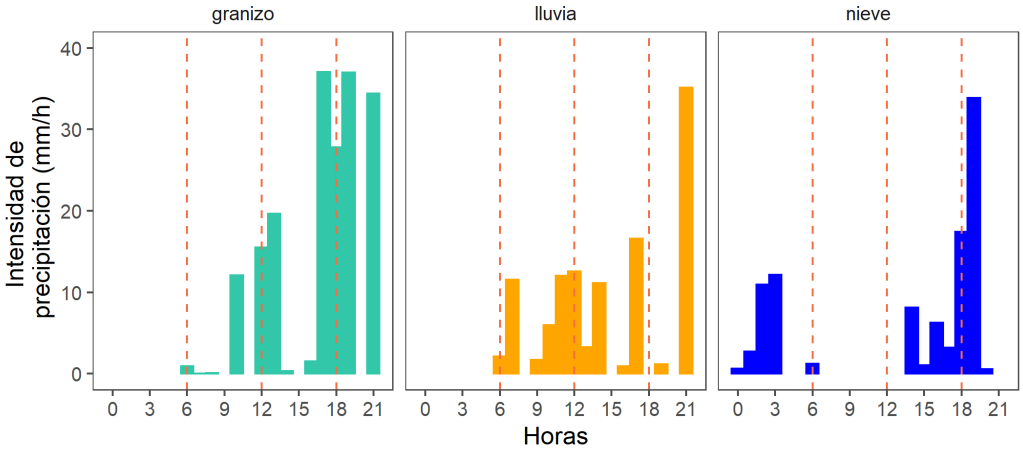


Figura 5.12: **Ciclo diurno de la ocurrencia de granizo, lluvia y nieve de los eventos registrados durante los meses de abril, agosto, septiembre y octubre 2022**

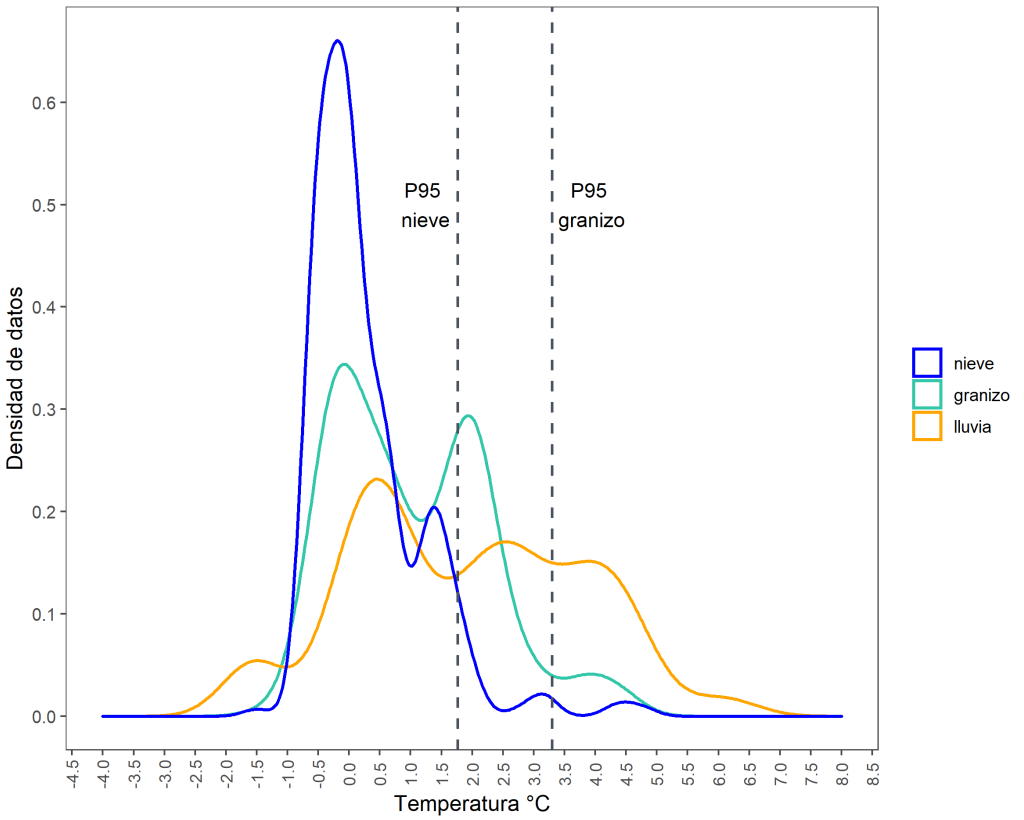


Figura 5.10: **Identificación de umbrales de temperatura para la precipitación de tipo granizo y nieve. Las lineas punteadas indican el valor de temperatura corrwspondiente al percentil 95 para la ocurrencia de nieve (1.7°C) y granizo (3.3°C)**

5.1.7. Discusión de la caracterización de eventos de precipitación

La información anterior ha permitido inferir características sobre cómo se desarrollan los eventos de precipitación en el Sistema Glaciar Huaytapallana. De los gráficos temporales, se puede observar que la ocurrencia de precipitación sólida (nieve o granizo) implica el descenso de la temperatura a valores bajo cero y el ascenso de la humedad a valores cercanos a 100 % de manera simultánea (Ver Figura 5.2 y 5.6 y Anexo B.4). En el caso de eventos con precipitación líquida (Figura 5.4) se observa el mismo comportamiento, pero a temperaturas mayores a 0°C. Analizando la diferencia entre los registros de intensidad de precipitación brindados por el disdrómetro Parsivel y

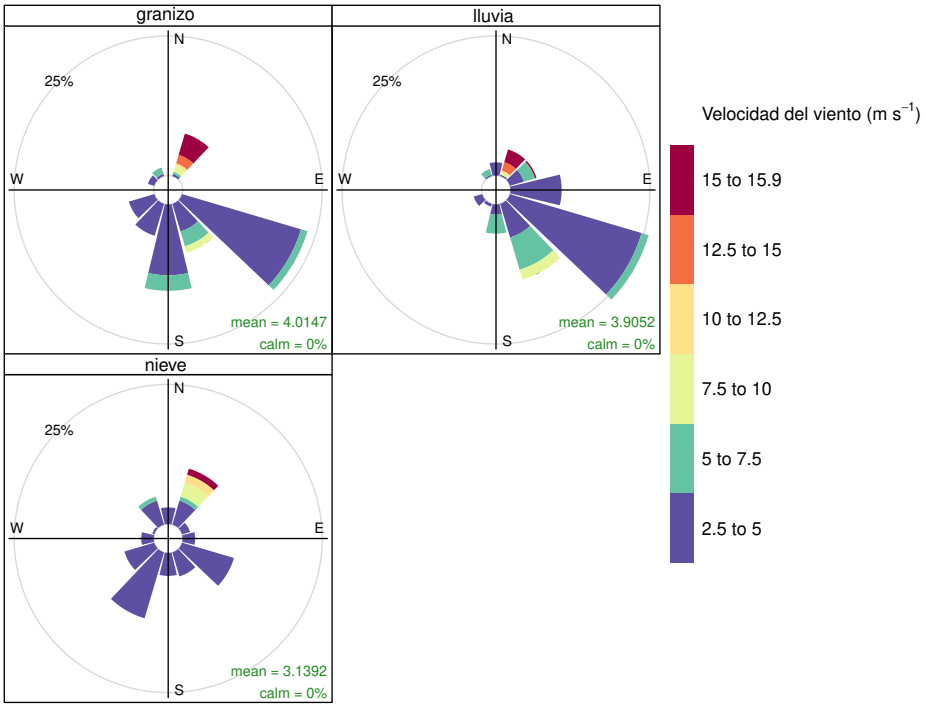


Figura 5.11: **Rosa de viento representativas para cada tipo de precipitación**

el Pluviometro, se observa que estos difieren más al momento de registrar precipitación sólida (Figura 5.2 y 5.6) que líquida (Figura 5.4).

A pesar de no tener registros completos sobre la velocidad y dirección del viento durante los eventos de precipitación, los datos disponibles indican que las velocidades del viento son siempre mayores ante la ocurrencia de granizo y que van disminuyendo conforme este se va desarrollando y va cambiando de fase como, por ejemplo, en el Anexo B.6. En esa misma línea, el cambio de fase de nieve a granizo observado en la figura del Anexo B.10 implicó un aumento de la velocidad del viento mientras que, un caso contrario se muestra en la Figura 5.6, donde la velocidad fue disminuyendo de 6 a 2 m/s conforme el granizo iba pasando a nieve. Los vientos provenientes del este son más frecuentes en nuestros registros, lo cual podría deberse a la contribución de la vertiente oriental que trae masas de humedad desde la Amazonía. No obstante, si se toma en cuenta la ubicación de los equipos de medición, existe una posibilidad de que las rosas de viento mostradas sean el

reflejo de condiciones más locales que regionales.

Se detectó que el 90 % de la precipitación cae en la fase sólida (nieve, granizo) mientras que el 10 % cae en la fase líquida (lluvia). Lo cual indica que en un sistema glaciar como el Huaytapallana la precipitación líquida puede ir aumentando conforme las condiciones climaticas se tornen favorables como un aumento de las temperaturas. Se necesita mayores estudios para determinar los factores que contribuyan a modificar esta fracción de precipitación debido a los efectos que la fase de precipitación produce. Mientras que la precipitación sólida contribuye a los procesos de acumulación de masa y aumento de albedo, la precipitación líquida favorece los procesos d eescorrentía e inflitración mas no acumulación de masa glaciar (Ding et al., 2014; Kienzle, 2008).

Otro punto a destacar es el umbral de separación de las fases líquidas y sólidas que se ubicado entre 1.7 y 3°C. Se sabe que este umbral varía con la ubicación geográfica. Para la Meseta Tibetana, se encontró un umbral de 4.5 °C, esto se explica por la baja humedad de la zona; en Europa, el umbral térmico de las regiones como los Alpes y Pirineos se aproximan a los de las zonas polares (1°C), mientras que para las regiones que reciben la influencia oceánica presentan umbrales más bajos que aquellos lugares de caracter continental (Jennings et al., 2018). Para las montañas de Quilian, en China, Liu y Chen, 2016 encontraron que la precipitación sólida tomaba lugar a temperaturas bajo 0° pero la precipitación mixta (sólida-líquida) se mantenia hasta los 7.2°C y que este umbral varía significativamente con la altura. Otros estudios como los de Kienzle, 2008; Lhte et al., 2005 y Sun et al., 2022 tambíen definieron metodologías para la predicción o modelamiento de las condiciones del cambio de fase sólido – líquido de la precipitación que necesitan ser validados con datos in-situ. Aunado a esto, el ciclo diurno obtenido para cada tipo de precipitación nos da mayores luces sobre las condiciones que propician precipitación sólida o líquida. La ocurrencia de nieve esta relacionado a mecanismos estratiformes que son más comunes durante la noche (Fyffe et al., 2021), donde la atmósfera se estabiliza y las temperaturas bajan a sus valores minimos trayendo como consecuencia estas nevadas; por otro lado, las lluvias y granizadas están más ligadas a los mecanismos convectivos, donde se necesita mayor energía y temperaturas más altas, las cuales se alcanzan con un mayor calentamiento de la superficie durante el día (Allen et al., 2020).

Hemos utilizado estos hallazgos para entender los registros de los años anteriores y serán mejor discutidos en la sección 5.1.9. Atendiendo a estas

consideraciones, se espera que conforme la base de datos de los equipos como el OTT Parsivel se vuelva más robusta, se pueda aplicar y calibrar dichas metodologías y nuevos modelos para la definición del umbral adecuado de temperatura-humedad específico y un ciclo diurno más significativo para la zona de estudio y los glaciares de los Andes centrales.

5.1.8. Caracterización de las variables hidrometeorológicas

Se utilizó la data horaria de la estación SENAMHI - Huaytapallana desde septiembre 2019 hasta octubre 2022. Contando con la información de los tipos de precipitación expuestos en la sección anterior, se buscó comprender mejor las variables a una escala diaria y mensual. Se analizó, para ello, las variables meteorológicas de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento.

Análisis del ciclo diurno de la temperatura y la humedad

La Figura 5.13 muestra los ciclos diurnos para la temperatura y la humedad relativa. El ciclo diurno de la temperatura se caracteriza por presentar los valores más bajos durante la madrugada (0h-6h), con temperaturas mínimas justo antes del amanecer para luego comenzar su ascenso durante la mañana (6h-11h) producto del calentamiento por la radiación solar. Existe una ligera diferencia estacional en los picos de temperatura donde el máximo valor en la estación seca (abril-agosto) se alcanza a las 11 horas mientras que en la estación húmeda (septiembre-marzo) las máximas temperaturas ocurren a partir de las 15 horas, lo cual se explica por el efecto termorregulador del vapor de agua cuya ausencia en los meses secos acelera el calentamiento de la superficie. En ambos casos, las horas de la tarde (18h-23h) se caracterizan por un descenso constante llegando hasta los -2°C (Figura 5.13). Por otro lado, el ciclo diurno de la humedad relativa presenta un comportamiento opuesto al de la temperatura, presentando los mayores valores de humedad durante la noche (18h-23h) y la madrugada (0h-6h); en temporada de lluvias, la humedad se mantiene por encima de 80 % mientras que en época seca se reduce llegando a valores promedio de 50 % en horas cercanas al medio día. Los valores más bajos se dan entre las 10h y 17h en ambas temporadas

llegando a valores inferiores a 60 % entre las 11 y 12 pm.

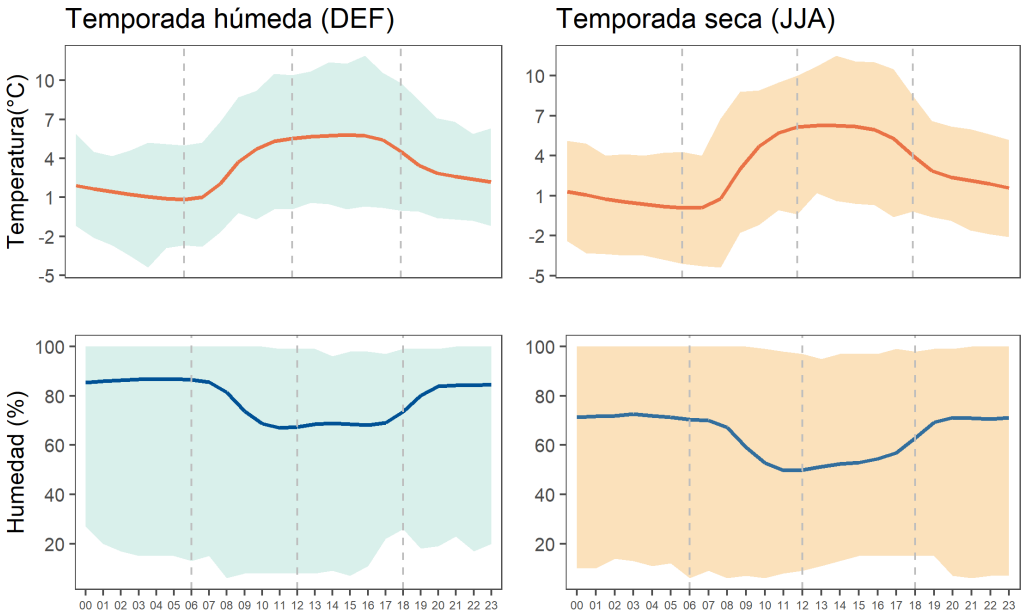


Figura 5.13: **Ciclo diurno de la temperatura y humedad relativa para las temporadas húmedas (septiembre – marzo) y seca (abril-agosto) obtenido con datos de la estación meteorológica Huaytapallana - SENAMHI para los años 2013- 2021**

Análisis del ciclo diurno de la velocidad y dirección del viento

El ciclo diurno de la velocidad y dirección del viento se observa en la Figura 5.14. Las velocidades comienzan a aumentar a partir de las 9h para llegar a los valores más significativos entre las 12h y 18h; durante estas horas, los vientos provenientes del noroeste son los que toman mayor protagonismo llegando a su pico de máxima velocidad (entre 10 y 20 m/s) al llegar las 16h donde comienzan su descenso paulatino alcanzando su mínimo valor antes del amanecer (5h).

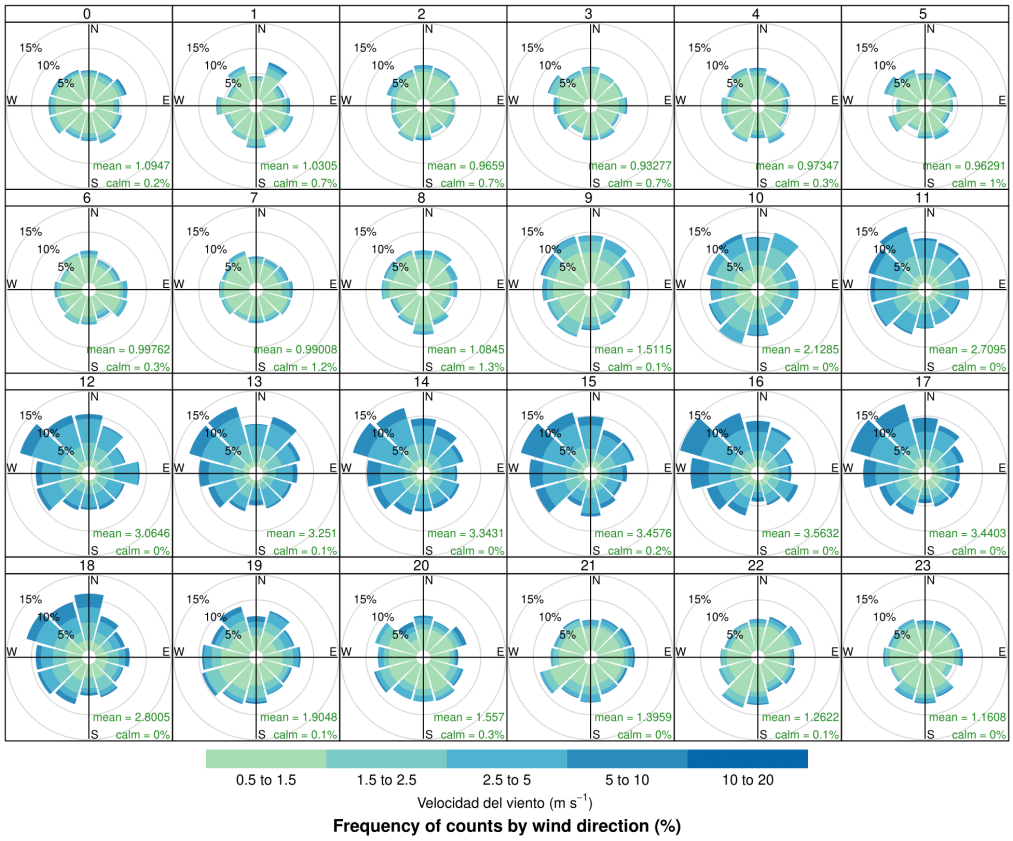


Figura 5.14: **Ciclo diurno de la velocidad y dirección del viento. Fuente: Estación meteorológica Huaytapallana - SENAMHI**

Análisis del ciclo diurno de la precipitación

Para describir el ciclo diurno de la precipitación, se utilizó el umbral de temperatura de 1.7 °C y humedad relativa mayor a 80 % obtenidos con la información de los eventos de precipitación en la sección 5.1.3 se generaron los ciclos diurnos de la ocurrencia de precipitaciones líquidas (temperatura >3°C) y sólidas (temperatura <1.7) las cuales se muestran en las figuras 5.15 y 5.16. Durante los meses de verano, o temporada húmeda (Figura 5.15) la ocurrencia de precipitación líquida se da durante el medio día y horas de la

tarde (10h – 18h) mientras que las precipitaciones de tipo sólido (Figura 5.16) ocurren en mayor cantidad durante la madrugada, las primeras horas de la mañana (00h – 9h) y las primeras horas de la noche (18h-21h). Los meses más secos (junio, julio y agosto), también presentan registros de precipitación líquida y sólida en las horas cercanas al medio día, pero con un aporte inferior a los 10 mm. Es importante acotar que estos datos fueron registrados con un pluviómetro que no está configurado para discriminar el tipo de precipitación (sólida o líquida) que ocurre en cada evento, lo cual explicaría la mayor contribución de precipitación líquida ante la precipitación sólida.

5.1.9. Análisis mensual de las variables hidrometeorológicas

El comportamiento mensual de las variables hidrometeorológicas principales se muestra en la Figura 5.17. El régimen de precipitación (panel (a) de la 5.17) obedece al régimen característico de las regiones altoandinas donde los meses de invierno (junio-agosto) los cuales presentan los mínimos de precipitación acumulada (entre 0 y 20 mm) mientras que los mayores registros de precipitación ocurren entre los meses de diciembre, enero y febrero. Las temperaturas (panel (b) de la 5.17) tienen una variabilidad pequeña cuyos promedios oscilan entre los 2.5 y 4°C con mínimos de -5 °C alcanzados entre julio y agosto y máximos de 10°C durante los meses de enero y febrero. En el caso de la humedad relativa (panel (c) de la Figura 5.17), se observa una la variabilidad más marcada similar a la precipitación, siguiendo el mismo patrón de máximos en la estación de verano y mínimos en invierno.

Es importante destacar el rol que tiene la humedad en la ocurrencia de precipitaciones, un alto contenido de vapor de agua en la atmósfera (valores mayores a 80 %) favorece la condensación de nubes que al sobrepasar sus niveles máximos de capacidad y propicia las precipitaciones de tipo nieve, lluvia o granizo según la temperatura. En otras palabras, la precipitación puede ocurrir en un rango amplio de temperatura, pero en un rango reducido de valores altos de humedad. Los meses más secos se caracterizan por tener valores de humedad relativa menores a 70 % lo cual no solo disminuye la probabilidad de precipitación, sino que genera un fuerte descenso de temperatura coincidiendo con los valores mínimos observados en el panel (b) de la Figura 5.17. En cuanto a los comportamientos mensuales de la velocidad y dirección del viento (Figura 5.18), los vientos más intensos ocurren

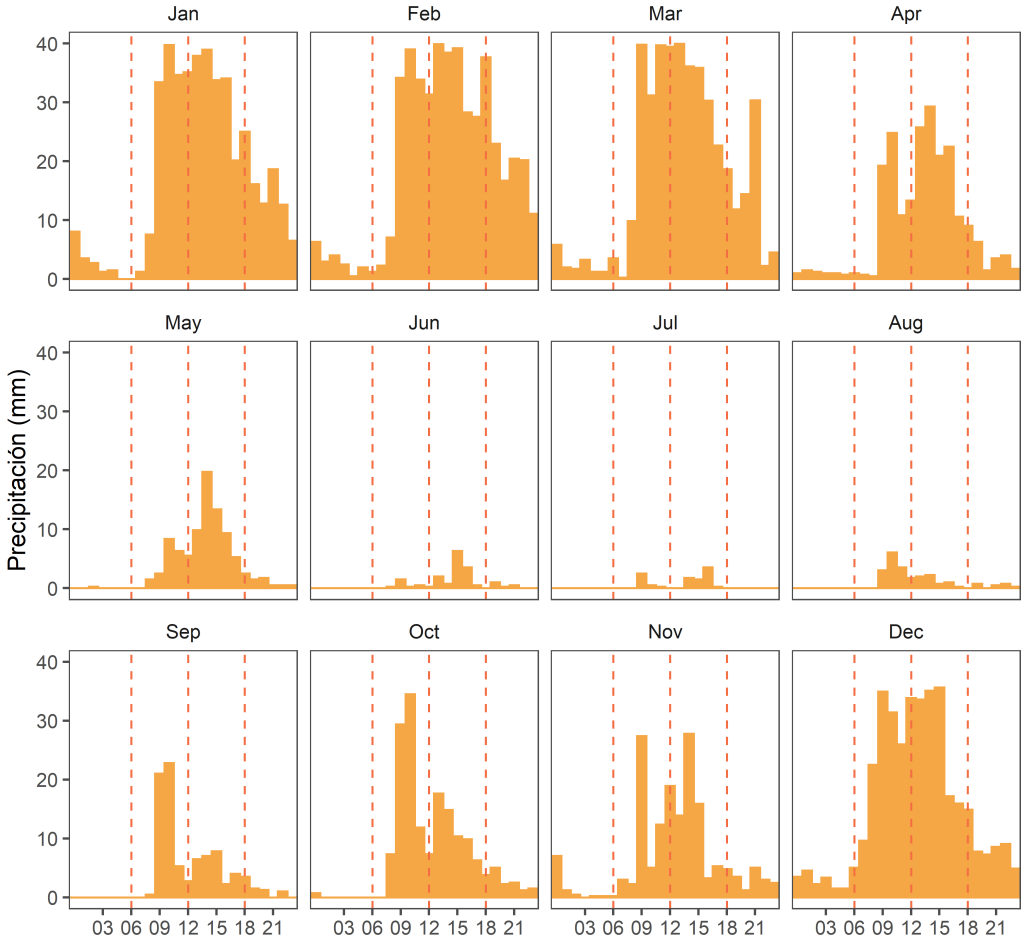


Figura 5.15: **Ciclo diurno de la precipitación acumulada promedio mensual con datos registrados por el pluviómetro de la Estación Meteorológica Huaytapallana – SENAMHI a temperaturas mayores a 3°C**

en invierno (julio-agosto) y en primavera (septiembre-noviembre) alcanzando máximos de hasta 18 m/s. Aunque se registra vientos provenientes de todas las direcciones, apreciado sobre todo en los meses de enero a abril durante los meses de invierno y primavera se observa una mayor contribución de los vientos del noroeste y en menor medida del sur.

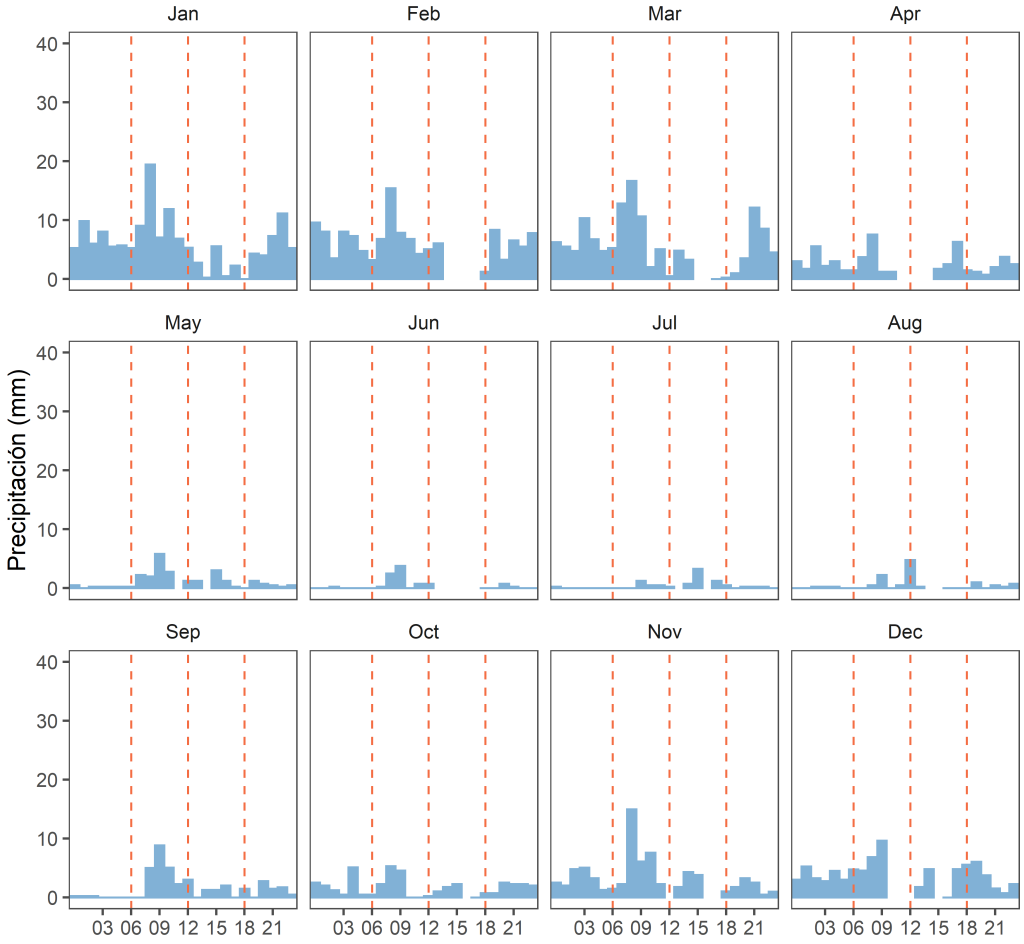


Figura 5.16: **Ciclo diurno de la precipitación acumulada promedio mensual con datos registrados por el pluviómetro de la Estación Meteorológica Huaytapallana – SENAMHI a temperaturas menores a 1.7°C**

5.1.10. Discusión de la caracterización de las variables hidrometeorológicas a nivel mensual

En esta sección se utilizó la información particular (datos del tipo de precipitación e información por minuto) para comprender la información general (registros anuales y mensuales a escala horaria), de tal forma que se pueda

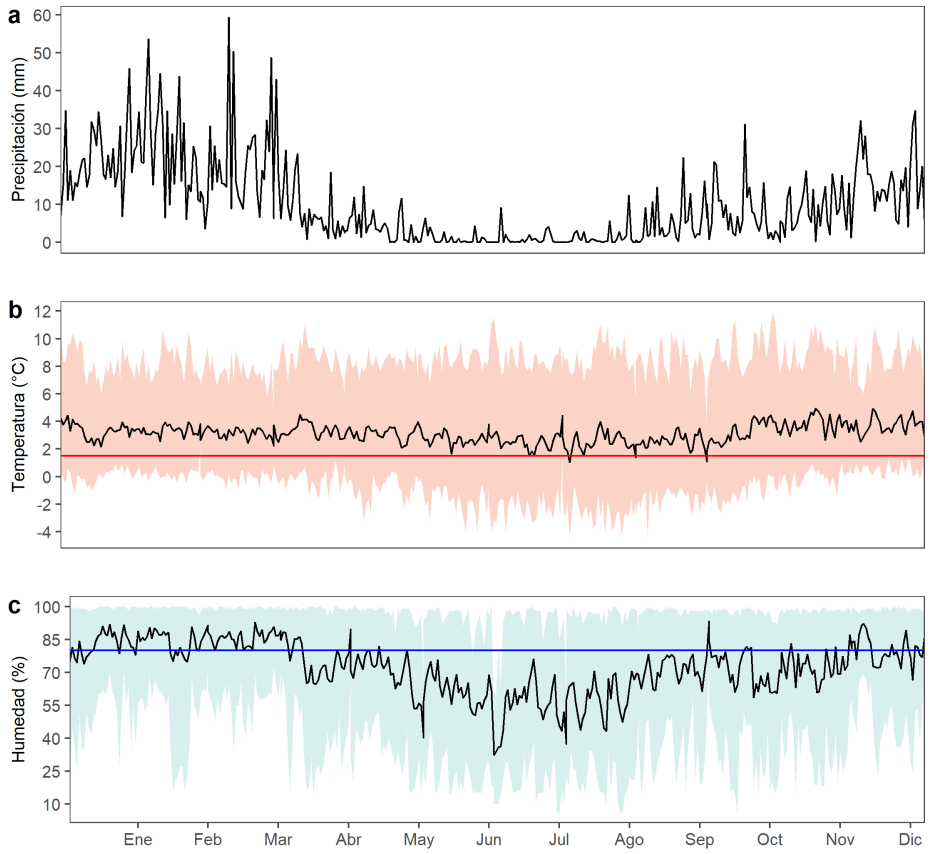


Figura 5.17: **Variabilidad mensual de la Precipitación (a), Temperatura (°C) (b) y Humedad relativa (c). Fuente: Estación Meteorológica. La línea roja en el panel (b) representa el umbral de 1.7°C mientras que la línea azul en el panel (c) representa el umbral de 80 % de humedad relativa**

obtener una caracterización más detallada de las series temporales pasadas y futuras.

Los resultados mostrados en la sección anterior nos permite hacer comparaciones entre el ciclo diurno de las precipitaciones en el sistema glaciar Huaytapallana con el de las zonas de valle, donde los eventos ocurren principalmente en horas de la tarde después de las 15 horas tal como se indica en el estudio de (Callañaupa Gutierrez, 2016). El ciclo diurno muestra las temperaturas más bajas y los niveles de humedad máximos durante la madrugada y la noche, que son a su vez, las condiciones encontradas para la generación de precipitación sólida, especialmente de tipo nieve expuestos en

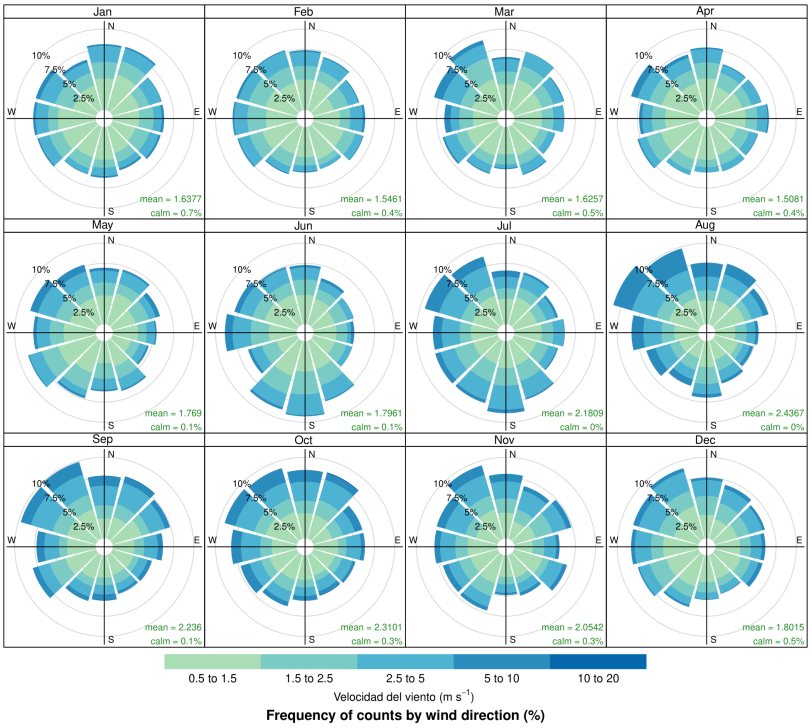


Figura 5.18: **Rosa de vientos del comportamiento mensual de la velocidad y dirección del viento. Fuente: Estación Meteorológica Huaytapallana - SENAMHI**

las Figuras 5.2 y 5.6; esto refuerza lo obtenido en la Figura 5.12 donde los datos observados del tipo de precipitación muestran una ocurrencia de la nieve y el granizo en los mismos rangos horarios; un caso similar es expuesto en el estudio de Villalobos-Puma et al., 2019 donde aquellos hidrometeoros con mayor diámetro como el granizo tienen una frecuencia mayor entre las últimas horas de la tarde y noche (15-21 hr). En cuanto a la precipitación líquida, se observa una mayor incidencia durante las horas cercanas al medio día (10h-16h), donde se alcanzan las temperaturas máximas y mayores procesos convectivos. La tendencia mensual mostrada en la Figura 5.17 indica una poca variabilidad de la temperatura durante el año, sin embargo, las temporadas de baja precipitación concuerdan con valores de humedad relativa por debajo del umbral de 80 % de expuesto en la Figura 5.10.

5.2. Analisis de la dinámica superficial y los procesos de ablación / acumulación en el Sistema Glaciar

5.2.1. Descripción visual del Sistema Glaciar Huaytapallana

Para poder comprender los cambios observados en las imágenes satelitales radares, se realizó la descripción visual de la superficie de la lengua glaciar oeste del nevado Huaytapallana. Las condiciones de textura, composición, elementos externos, contribuyen a la interpretación de los valores de retrodispersión obtenidos por el sensor radar. La descripción fue hecha basada en dos salidas de campo realizadas el 30 de abril (temporada húmeda) y el 25 de agosto (temporada seca) del año 2022.

Superficie glaciar en temporada húmeda

En la temporada húmeda, la lengua glaciar oeste está cubierta por una capa de nieve de textura suave y húmeda al tacto. Según las muestras recolectadas para otros fines de estudio, la capa de nieve puede alcanzar una profundidad de 40 cm y se va compactando con el tiempo mientras va quedando cubierta por nuevas capas producto de las constantes precipitaciones. En esta temporada del año, no se puede distinguir zonas de hielo o grietas; además, las avalanchas son frecuentes debido al incremento de nieve y/o masa glaciar sobre zonas de alta pendiente (Figura 5.19 y 5.20).



Figura 5.19: **Fotografía de la lengua Glaciar Oeste del Sistema Glaciar Huaytapallana tomada el día 30 de abril del 2022. Fuente: David Guizado**



Figura 5.20: **Capa de nieve de la lengua glaciar oeste. Foto tomada el día 30 de abril 2022. Fuente David Guizado.**

Superficie glaciar en temporada seca

En temporada seca, la capa de nieve es inexistente. En las zonas más bajas se observa una delgada capa compuesta por cristales de hielo sueltos, muy agresivos al tacto y una capa inferior de hielo macizo muy resbaloso. Se puede observar la presencia de escombros de tierra, pequeños pozos de agua, escorrentía y grietas en constante aparición. En las partes más altas cercanas a la cumbre, la superficie es similar, sin embargo, se observa una superficie más limpia debido a la ausencia de escombros de tierra como en las partes más bajas (Figura 5.21 y 5.22).



Figura 5.21: **Fotografía de la lengua glaciar Oeste tomada el 25 de agosto del 2022. Fotografía propia**



Figura 5.22: **Textura de la superficie de la lengua glaciar Oeste. Se puede observar los cristales de hielo y pequeñas deposiciones de lodo. Fotografía tomada el 25 de agosto del 2022 (temporada seca).**

5.2.2. Análisis de imágenes Radar de Apertura Sintética SAR

Obtención de la Serie temporal de imágenes SAR

Se generaron gráficos de calor o "heatmaps" de las tres líneas de estudio siguiendo la metodología de Winsvold et al., 2018 (ver Sección 4.3.4) Obtuvimos valores menores a -35 dB producto del efecto ruido o "speackle" los cuales fueron omitidos.

La Figura 5.23 representa un esquema explicativo del comportamiento temporal y altitudinal de los valores de retrodispersión obtenidos tras el procesamiento de las imágenes SAR. El esquema contempla la información desde

el 28 de agosto del 2020 hasta el 21 de diciembre del 2021 (Las series temporales completas se pueden encontrar en los Anexos B.15, B.18 y B.17). Sin embargo, se utilizó las escenas desde el año 2019 para los análisis presentados a lo largo de esta sección.

Interpetación de los valores de retrodispersión

El inicio y fin de las temporadas húmeda y seca (correspondiente a los números 1 y 5 de la Figura 5.23) son indicados de forma aproximada de los verdaderos inicios de temporada señalados en (Silva et al., 2008). Se realizó una inspección visual mediante salidas de campo e imágenes ópticas para obtener una ubicación referencial de las líneas de ablación y acumulación cuyos límites se ubican entre las cotas 5000 y 5220 respectivamente (mayor detalle en la sección 5.2.3). Se observa un patrón estacional por encima de los 5000 msnm donde los valores más bajos de retrodispersión representados en tonalidades azules indican la presencia de humedad o condiciones húmedas de las capas superficiales del glaciar, los cuales comienzan a ser detectados a partir de la primera semana de septiembre (número 2 Fig. 5.23) y se intensifican durante los meses de diciembre a febrero producto de la mayor ocurrencia de precipitación (número 3 Fig. 5.23). Este comportamiento se debe a que la presencia de agua/humedad en las capas de nieve provoca una drástica disminución en los valores de retrodispersión debido a que el contenido de agua líquida afecta a las propiedades dieléctricas de la nieve, regidas por la constante dieléctrica (Woodhouse, 2016). Además, los valores bajos de retrodispersión responden también a la baja rugosidad de las capas de nieve húmeda lo que favorece a la ocurrencia de una baja reflexión difusa o reflexión quasi-especular de la capa superficial Rott y Mätzler, 1987. Con la llegada de la temporada seca, los valores sufren un aumento de -25 dB a -15 dB (número 6 Fig. 5.23) paulatinamente hasta alcanzar un rango entre -15 dB y -8 dB en el mes de julio (número 7 Fig. 5.23).

La retrodispersión en esta época del año se explica por el derretimiento y/o solidificación de la nieve temporal húmeda dejando al descubierto una capa de hielo con menor constante dieléctrica por la pérdida de agua. Así mismo, la mayor rugosidad característica del hielo favorece la mayor dispersión de las señales del radar (Hall et al., 2000). Para la zona de ablación, ubicada entre las cotas 4900 (número 10 Fig.5.23) y 5000 m, se encontró un valor promedio de -23 dB para todo el año con un ligero aumento de -15dB para los meses de julio y agosto; se cree que se debe a la presencia de humedad todo el año

debido a que en la zona de ablación ocurren procesos de pérdida de masa glaciar constante o ganancia de calor sensible asociados al deshielo, procesos de retroalimentación por el bajo albedo y en otras palabras, condiciones húmedas. Los valores ubicados por encima de los 5220 msnm corresponden a aquellas zonas con pendientes elevadas y la retrodispersión es explicada tanto por la presencia de las capas de nieve o hielo como por la morfología de la capa rocosa y su temperatura (número 8 Fig.5.23).

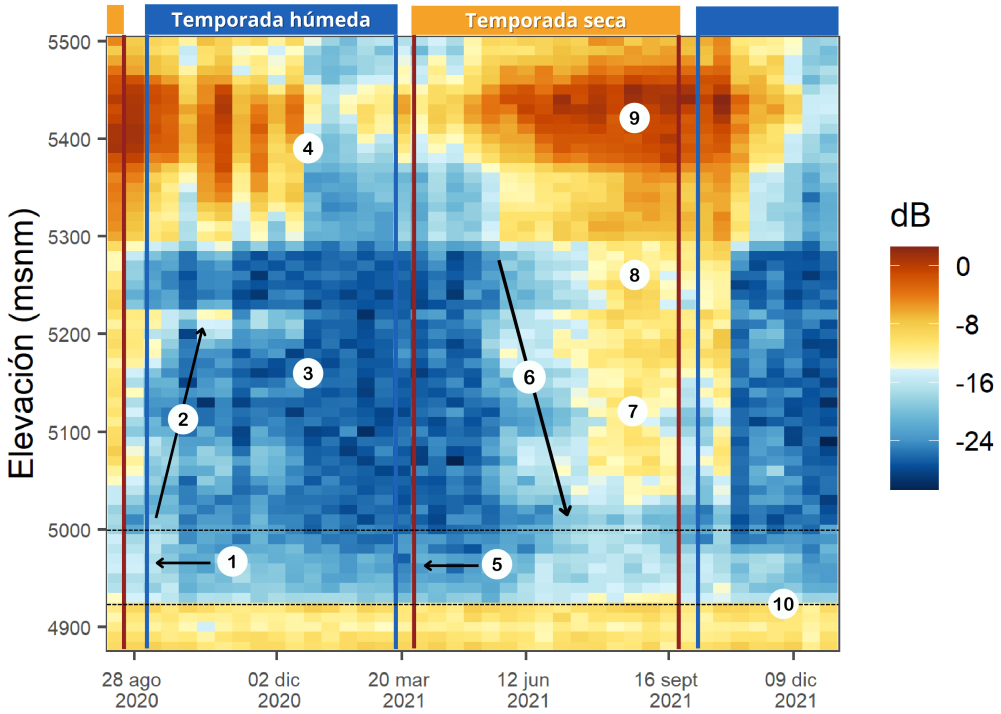


Figura 5.23: **Los números indican las características glaciares detectadas por las imágenes SAR: (1) Inicio de la temporada de lluvias; (2) Disminución de valores de retrodispersión por la acumulación de las capas de nieve; (3) capas de nieve; (4) zona de cumbre en temporada húmeda; (5) inicio de la temporada seca; (6) aumento de valores de retrodispersión por el derretimiento y/o solidificación de la nieve; (7) capa de hielo superficial; (8) capa de roca y nieve; (9) cumbre en temporada seca; (10) limite glaciar a 4900 msnm. Las líneas punteadas en las cotas 5000 y 5200 son los límites entre la zona de ablación y acumulación respectivamente.**

Influencia de las condiciones topográficas

Para entender mejor la influencia de la topografía en los valores de retrodispersión obtenidos, se compararon los gráficos de calor de las tres laderas de estudio (serie temporal comprendida entre agosto 2019 y diciembre 2021) con los perfiles topográficos generado a partir del modelo digital de elevación SRTM 30 (Paneles a, b y c de la Figura 5.24). Se destaca que, en aquellas zonas donde existe un relieve escarpado o alta pendiente como picos rocosos, zonas de cumbre, grietas y pendientes entre 20-30 % (Flechas rojas en los paneles (a) y (c) de la Figura 5.24) se refleja en valores de retrodispersión mayores producidos por los tipos de reflexión difusa o doble rebote característicos en zonas rugosas (European Space Agency, 2007). Por otro lado, en las zonas de pendiente suave como pequeñas terrazas (flecha roja en el panel (b) de la Figura 5.24) se observa una zona de valores bajos posiblemente porque se permite una mayor acumulación de capas de nieve con mayor presencia de agua y/o humedad durante la temporada húmeda y que se retienen mejor en temporada seca a comparación de aquellas zonas con mayor inclinación. El panel (d) de la Figura 5.24 muestra los registros de precipitación acumulada a escala diaria evidenciando la influencia que estos tienen sobre los valores de retrodispersión de las tres series temporales SAR.

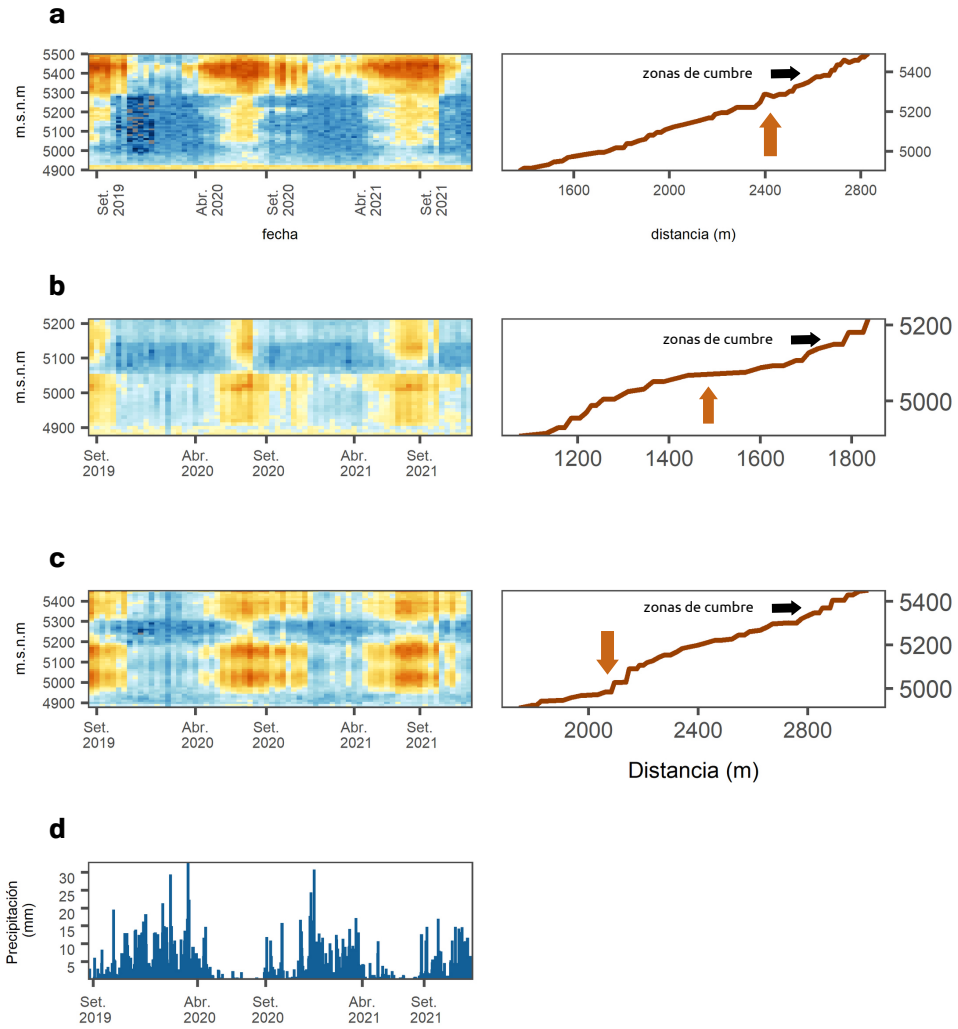


Figura 5.24: **Serie temporal de retrodispersión para las laderas (a) oeste, (b) sur, (c) este con su respectivo perfil topográfico al lado derecho. El panel (d) muestra la serie temporal de precipitación acumulada diaria para el periodo de estudio 2019 – 2021. Las flechas de color negro indican la zona de cumbre para cada ladera mientras que las flechas naranjas indican los puntos de mayor pendiente para los paneles (a) y (c) y de menor pendiente para la el panel (b)**

5.2.3. Identificación de la línea de nieve con imágenes SAR e imágenes ópticas

La Tabla 5.3 muestra las cotas altitudinales obtenidas mediante inspección visual y con imágenes ópticas Sentinel-2. La Ladera Este presenta niveles más bajos, posiblemente por la mayor exposición a las masas de aire que llegan desde la vertiente oriental generando condiciones más húmedas que permiten conservar mejor las masas glaciares. Para los tres casos, se utilizó el promedio y fueron utilizados como un valor representativo de la separación entre las zonas de ablación (tendencia a la pérdida de masa) y acumulación (tendencia a la ganancia de masa) para el periodo de estudio 2019-2021. Las líneas finales de separación se observan en los paneles (b), (c) y (d) de la Figura 5.25. Al superponer las cotas obtenidas por año y la línea final de separación en las series temporales SAR (Figura 5.26), se encontró que las Ladera Este y Oeste son las que mejor evidencian un cambio en los valores de retrodispersión que se encuentran por encima de las cotas 5000 y 4960 respectivamente (panel (a) y (c) de la Figura 5.26). se cree que la complejidad del relieve es el principal factor que influye en el rastreo de las líneas temporales de nieve en las imágenes SAR. Observando los perfiles topográficos de la Figura 5.24, la Ladera Oeste posee una topografía más uniforme que las dos laderas análogas, con menos picos y discontinuidades lo que se traduce en valores más uniformes y menos ruidosos. Por el contrario, al observar las imágenes ópticas de la Figura 5.25 estas permiten una discriminación más directa de las zonas de acumulación y ablación funcionando como buenos complementos en la interpretación de los datos SAR.

Año	**Ladera oeste**	**Ladera sur**	**Ladera este**
2019	5020	4960	4970
2020	5020	4960	4970
2021	4980	4920	4920
promedio	5006.7	4946.6	4953.7

Tabla 5.3: **Altura de la línea de separación entre la zona de ablación y acumulación para los años 2019, 2020 y 2021**

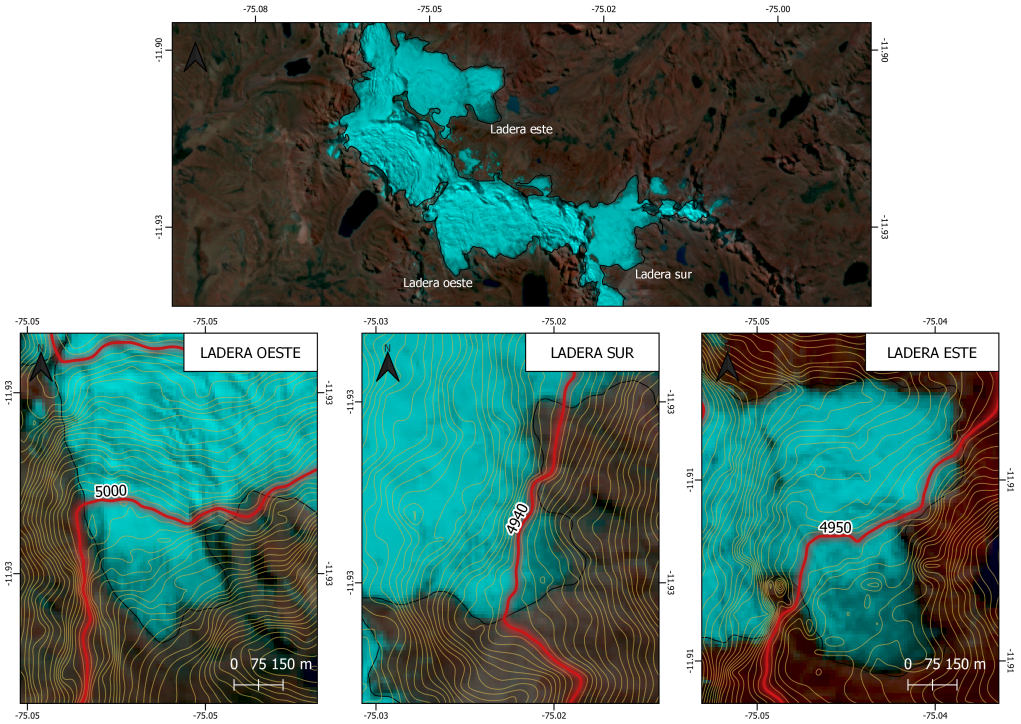


Figura 5.25: **Mapa de ubicación de las líneas de nieve representativas para cada ladera del Sistema Glaciar Huaytapallana. Panel (a): Vista total de las tres laderas en el Nevado Huaytapallana; panel (b): Ladera Oeste; Panel (c) Ladera Sur; Panel (d) Ladera Este**

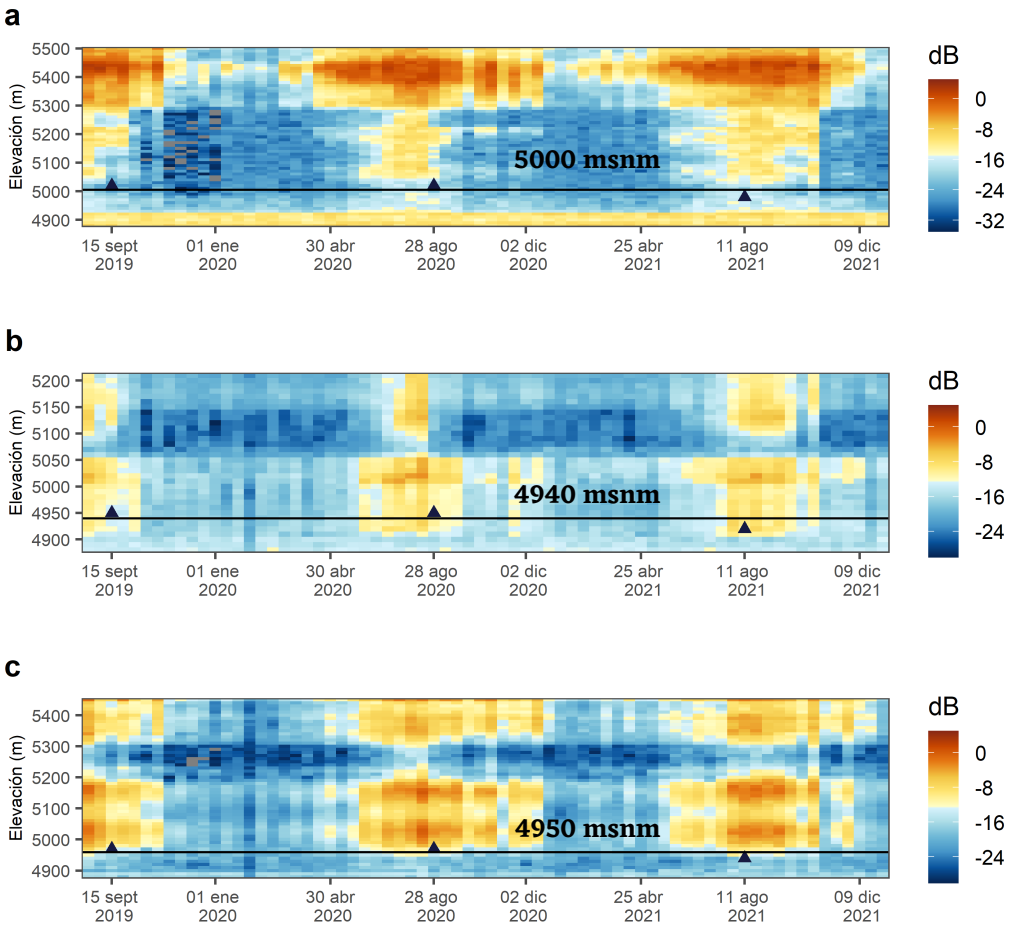


Figura 5.26: **Ubicación de la altura de línea de nieve representadas con los triángulos negros obtenidas con imágenes ópticas para los años 2019, 2020 y 2021. Panel (a): Ladera Oeste; Panel (b): Ladera Sur; Panel (c): Ladera Este**

5.2.4. Análisis del comportamiento entre las zona de ablación y acumulación

La tabla 5.4 muestra los rangos altitudinales utilizados como referencia de las extensiones de la zona de ablación y acumulación. Solo se consideró la extensión glaciar hasta 100 metros por debajo de las cumbres de cada lengua

glaciar para evitar la influencia de las altas pendientes observadas en los perfiles topográficos mostrados en la Figura 5.24. Estos rangos se utilizaron para construir la firma temporal de los valores de retrodispersión de cada ladera apreciadas en la Figura 5.27.

A nivel general, las zonas de acumulación en las tres laderas (líneas azules en la Figura 5.27) presentan las variaciones estacionales más marcadas con valores picos durante los meses de invierno (julio y agosto) que luego disminuyen con la llegada de los meses de primavera y verano (septiembre-febrero). Esta variación se encuentra dominada por factores como la topografía, altitud y la diferencia de rugosidad entre la nieve humeda y fresca en los meses de verano (DEF) y las capas de hielo descubiertas en los meses de invierno (JJA) (Hall et al., 2000).

El comportamiento en las zonas de ablación (líneas rojas en la Figura 5.27), por el contrario, evidencian una mayor estabilidad en sus valores, lo cual puede deberse al constante estado de pérdida de energía y masa que presenta la zona de ablación que lo lleva a registrar siempre valores bajos de retrodispersión, explicados por la nieve húmeda en temporada de lluvia y hielo en proceso de derretimiento en temporada seca. Sin embargo se puede observar que los valores de las zonas de acumulación y ablación durante la temporada de lluvias (DEF) alcanzan valores similares mientras que en la temporada seca (JJA) la diferencia se hace más pronunciada permitiendo una mejor discriminación entre ambas zonas.

	Ladera Oeste	**Ladera Sur**	**Ladera Este**
Acumulación (msnm)	5080-5450	4900-5150	5000-5350
Ablación (msnm)	4950-5000	4880-4940	4880-4950

Tabla 5.4: **Rangos altitudinales de las zonas de ablación y acumulación**

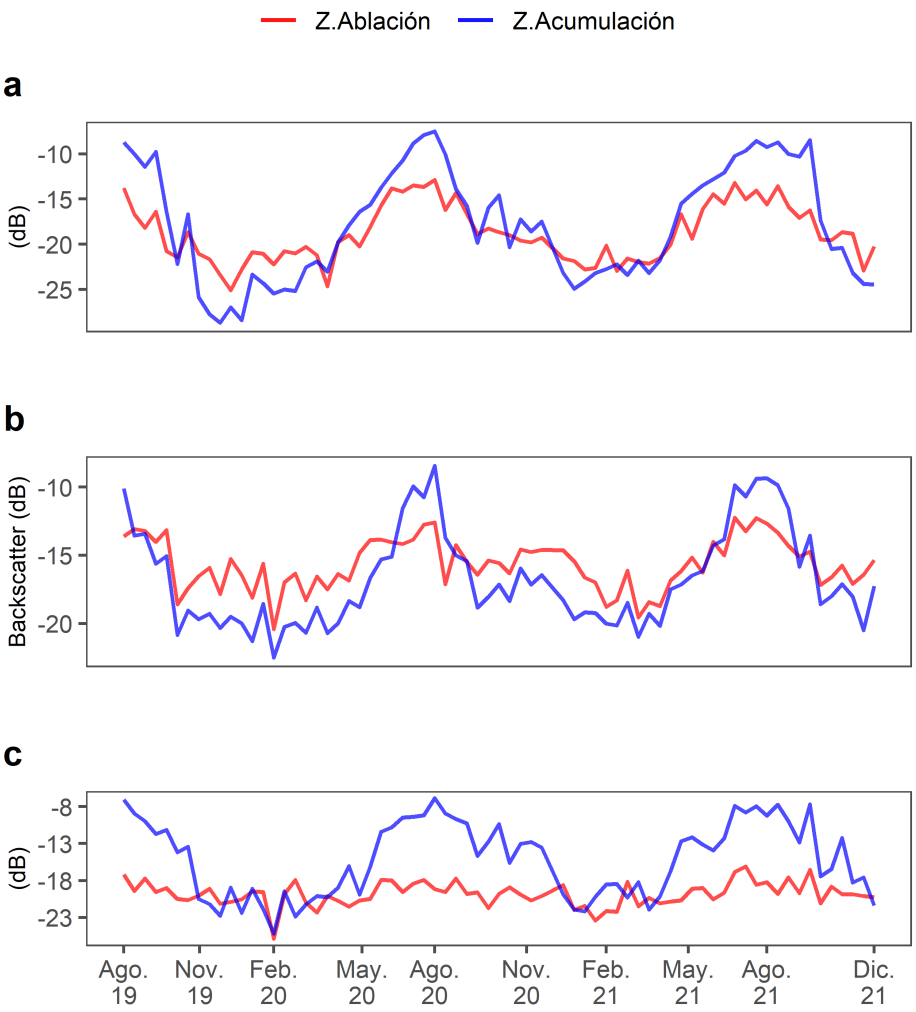


Figura 5.27: **Evolución temporal de los valores de retrodispersión promedio para los rangos altitudinales de la zona de ablación (líneas rojas) y acumulación (líneas azules) para las laderas (a) Ladera Oeste, (b) Ladera Sur, (c) Ladera Este**

5.2.5. Discusión del análisis de la dinámica superficial y los procesos de ablación / acumulación en el Sistema Glaciar Huaytapallana

Esta sección estuvo dedicada a observar y analizar la información obtenida de las imágenes radar de apertura sintética SAR. Su capacidad para trabajar en el rango de las ondas microondas nos facilitó la observación del sistema glaciar y las laderas de estudio durante la temporada de lluvias en los Andes Centrales; periodo en el cual estas zonas permanecen cubiertas de nubes que dificultan su visibilidad con imágenes ópticas.

Utilizar plataformas basadas en la nube como Google Earth Engine aminoró el costo computacional al momento de descargar y procesar las imágenes. No obstante, al tratarse de una zona con compleja topografía, obtuvimos mucha presencia de ruido lo que condujo a obtener valores muy bajos y poco significativos. Existen metodologías como la de Small, 2011 que proponen procesamientos para este tipo de superficies, mientras que Mahdavi et al., 2018 y Nuthammachot et al., 2017 analizan los mejores filtros de ruido y que se recomienda automatizar para estudios posteriores.

Mediante los gráficos de calor (Figura 2.15) se observa el comportamiento de las líneas de estudio a través del tiempo y la altura (factor importante sobre todo en zonas montañosas donde el ambiente tiende a variar rapidamente conforme se asciende). Las imágenes radares permitieron una buena diferenciación de las condiciones superficiales del sistema glaciar durante la época de lluvia y la época seca, las cuales fueron complementadas con observaciones in-situ para una mejor interpetación, observando que, la acumulación de nieve fresca y profunda producto de las precipitaciones se traduce en valores de retrodispersión más bajos (-15 dB/-25 dB) que los valores obtenidos en la época de estiage (-16 dB / -8 dB) explicados por la detección de hielo y ausencia de nieve.

La topografía compleja, característica de las regiones montañosas, dejo mostrar sus efectos mediante cambios más rápidos en los valores de retrodispersión, lo cual tambien fue observado por Winsvold et al., 2018. Los perfiles topográficos reflejan que las laderas presentaron ciertas zonas más planas lo que permitía la acumulación de capas de nieve que permanecían más tiempo que en aquellas zonas escarpadas donde la retención se hace más complicada.

Las imágenes ópticas obtenidas durante los días más secos del año ayudaron a identificar la linea de separación entre las zonas de acumulación y ablación encontrando que las imágenes radar también pueden discriminar estas zonas de manera aceptable 5.26, esta separación es más sencilla de identificar durante la época seca que en la época húmeda, ya que, durante la ocurrencia de lluvias, las capas de nieve cubren la superficie en su totalidad adoptando los mismos valores en todos sus rangos altitudinales (ver 5.27).

5.3. Correlación entre variables hidrometeorológicas y valores de retrodispersión

La Figura 5.28 muestra los registros de precipitación, temperatura, humedad relativa y valores de retrodispersión a lo largo del periodo de estudio 2019-2021 que han sido escalados de una resolución horaria a a una resolución de 12 días para poder compararlos con los datos de las imágenes SAR.

Las correlaciones obtenidas entre los datos meteorológicos correspondientes a la misma fecha de obtención de las imágenes SAR son plasmadas en la Tabla 5.5. Para los seis casos se encontró una relación inversa siendo la humedad relativa la que mayor nivel de correlación presenta (R máximos de 0.62 y 0.58 y R mínimos de 0.54 y 0.42 para las zonas de acumulación y ablación respectivamente) seguido de la precipitación (R máximos de 0.60 y 0.52 y R mínimos de 0.47 y 0.36 para las zonas de acumulación y ablación respectivamente); la temperatura presentó los valores de correlación más bajos (R máximos de 0.35 y 0.27 para las zonas de acumulación y ablación respectivamente). Esto indicaría que los procesos de pérdida y ganancia de energía en el sistema glaciar están regidos en su mayor parte por la humedad relativa más que por la temperatura.

Los altos valores de humedad durante los meses de verano generan condiciones propicias para los eventos de precipitación y para la permanencia de la nieve húmeda en las capas superficiales del glaciar; un escenario distinto a lo que sucede en los meses de invierno o temporada seca (abril-agosto), la baja cantidad de vapor de agua en la atmósfera aceleraría los procesos de sublimación en la zona de acumulación generando un aumento gradual de los valores de retrodispersión (número 6 de la Figura 5.23). Este comportamiento también fue encontrado en otros glaciares tropicales como glaciar

Shallap en la cordillera Blanca y Artesonraju (Gurgiser et al., 2013; Winkler et al., 2009). Caso contrario a lo observado en los glaciares de latitudes más altas como la Patagonia (Smith et al., 1997) o el Himalaya (Scher, 2019), donde la fusión es más significativa que la sublimación ya que el principal conductor es la temperatura. Así mismo, en la estación húmeda, el aumento de la nubosidad en las altitudes mayores (zona de acumulación) y un mayor albedo superficial debido a la cubierta de nieve evitan que el glaciar gane energía para el derretimiento, caso contrario en las altitudes más bajas como la zona de ablación y en estación seca donde la ausencia de nubes y bajo albedo permiten los procesos de ganancia de energía y por ende, la fusión de masa glaciar (Fyffe et al., 2021). Los gráficos de dispersión de la Ladera Oeste, Sur y Este son mostrados en la Figura 5.29 y Anexos B.18 y B.17.

Zona	Ladera	Precipitación	Humedad	Temperatura
Acumulación	Oeste	**-0.54**	**-0.54**	-0.35
	Sur	-0.47	**-0.59**	-0.27
	Este	**-0.60**	**-0.62**	-0.31
Ablación	Oeste	**-0.52**	**-0.58**	-0.24
	Sur	-0.37	-0.42	-0.27
	Este	-0.36	-0.42	-0.10

Tabla 5.5: **Coeficientes de correlación de Pearson (R) para las respectivas zonas de acumulación y ablación en las laderas de estudio**

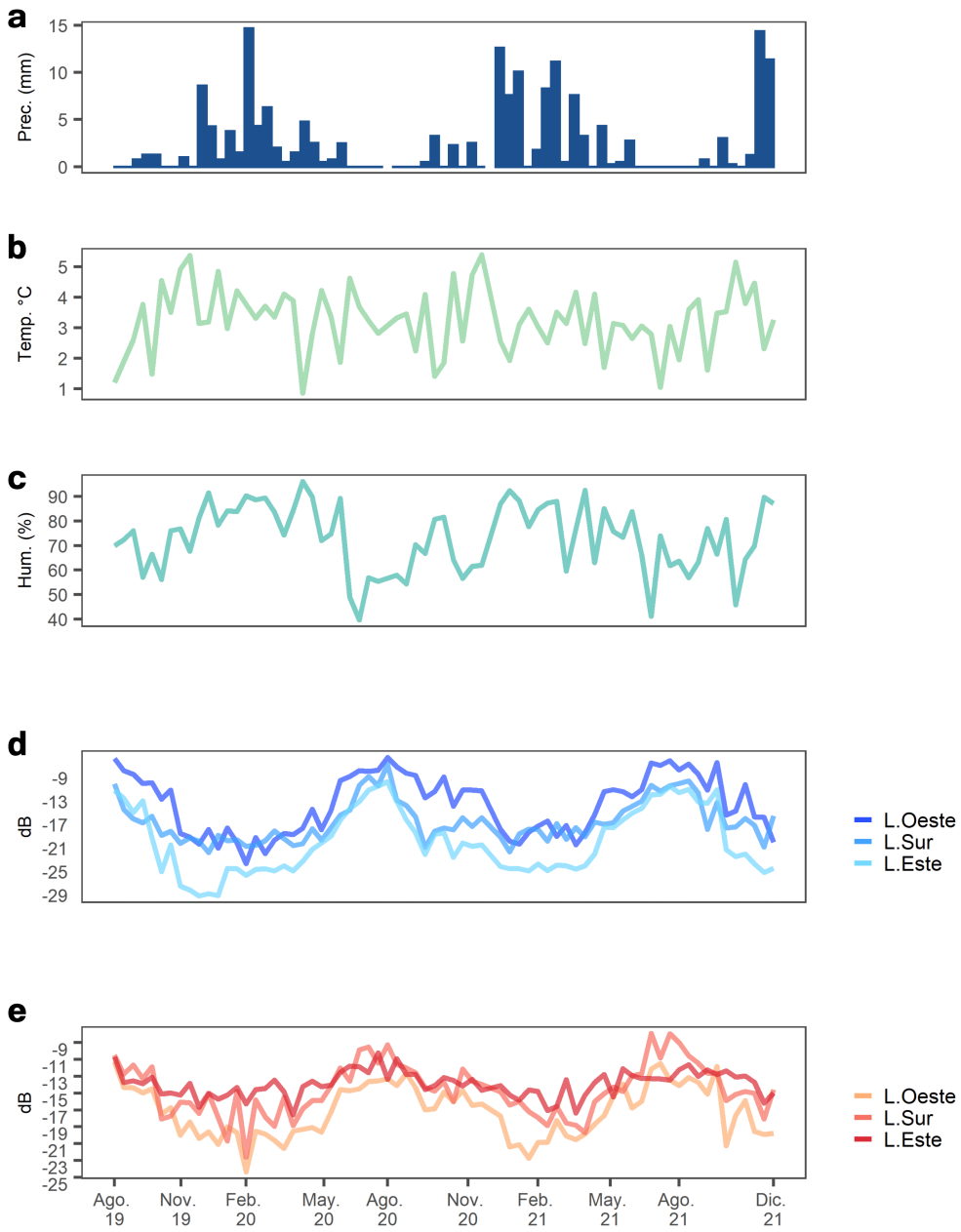


Figura 5.28: **Serie temporal con resolución 12 días de las variables de (a) precipitación, (b) temperatura, (c) humedad relativa, (d) valores de retrodispersión radar para las zonas de acumulación y (e) valores de retrodispersión radar para las zonas de ablación**

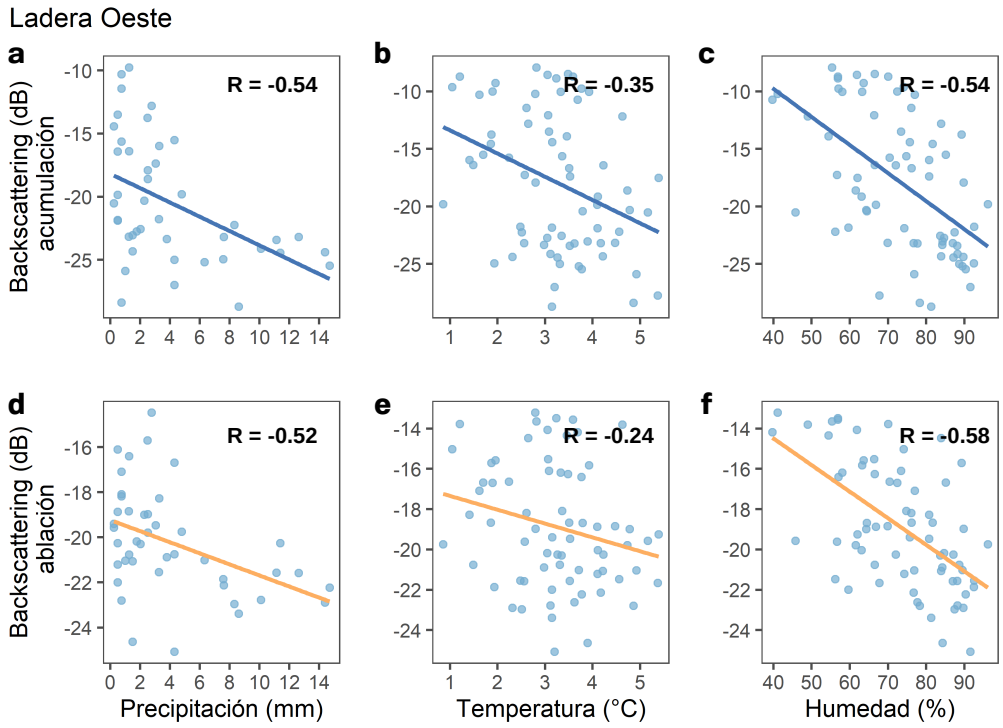


Figura 5.29: **Gráficos de correlación (p-value <0.05) entre los valores de retrodispersión radar de las zonas de ablación (paneles a, b y c) y acumulación (paneles d, e y f) con los registros de precipitación (mm), temperatura (°C) y humedad relativa (%) de la Ladera Oeste.**

5.4. Determinación de impactos

Las secciones anteriores de este capítulo nos permitieron obtener conocimientos sobre la dinámica atmosférica y superficial del sistema glaciar Huaytapallana, basandonos en los resultados y análisis previos, se plantean los impactos que las principales variables hidrometeorológicas generan en nuestra zona de estudio.

El impacto de la precipitación está ligado a la fase con la que cae a la superficie glaciar (precipitación sólida/líquida) ya que de eso dependerá si el glaciar acumulará o perderá masa. En el periodo de estudio, la fase sólida aporto un 90 % del total de precipitación, mientras que un 10 % fue aportado

por la fase líquida. La variación de esta fracción podría afectar no solo los procesos de acumulación de masa, sino tambien tendría consecuencias en los procesos hidrológicos involucrados en la provisión de agua.

La temperatura determina la fase de precipitación. Para nuestra zona de estudio, a temperaturas menores a 1.7°C, se produce mayor cantidad de precipitación sólida mientras que a temperaturas mayores a 1.7°C se produce mayor precipitación de tipo líquida. Las condiciones más óptimas para la generación de precipitación sólida en el sistema Glaciar Huaytapallana es en horas de la noche y madrugada antes del amanecer. Mientras que durante el día, la temperatura es más óptima para la precipitación líquida. Por ende, un aumento de la temperatura promedio en la zona podría conllevar al aumento de la cantidad de precipitación líquida lo que significaria menor aporte de nieve / granizo y menor acumulación de masa glaciar.

En nuestra zona de estudio, los cambios superficiales detectados por el radar estuvieron relacionados con la fluctuación estacional de la humedad relativa. Esto es un indicador de que la humedad como responsable del flujo turbulento de calor latente, favorece los procesos de sublimación (evaporación) de la superficie glaciar (pérdida de masa) cuando la atmosfera alcanza por centajes bajos de humedad durante la temporada seca (Julio-Agosto).

Capítulo 6

Conclusiones

La presente investigación tuvo como finalidad identificar los impactos de las variables hidrometeorológicas sobre el Sistema Glaciar Huaytapallana, utilizando imágenes Radar de Apertura Sintética y datos meteorológicos de temperatura, humedad y tipo de precipitación. Los principales impactos hidrometeorológicos encontrados fueron (1) la fase sólida de precipitación como principales contribuidores a los procesos de acumulación de masa glaciar; (2) la temperatura como variable decisiva en la determinación del umbral de separación de la fase de precipitación; (3) la ausencia de humedad como responsable de los procesos de sublimación de la superficie glaciar durante la ausencia de lluvias. Asi mismo, las consecuencias futuras que se esperarían en el Sistema Glaciar Huaytapallana ante un incremento de temperaturas contribuiría al aumento de las precipitaciónes líquidas y disminución de las precipitaciones sólidas, menor acumulación y aumento de la linea de nieve (SLA) y el incremento de los procesos de sublimación relacionados con mayor pérdida de masa glaciar durante la temporada seca.

Para lograr la determinación de dichos impactos hidrometeorológicos, se plantearon tres objetivos específicos que son descritos a continuación:

Objetivo específico 1: Caracterizar los eventos de precipitación ocurridos en el Sistema Glaciar Huaytapallana en el año 2022.

Se realizó la caracterización de los eventos de precipitación en el año 2022, estos presentaron fases de tipo líquida (lluvia y llovizna; 8.9 %) y sólida (nieve

y granizo; 90 %). El umbral térmico encontrado para la separación de dichas fases se ubica entre 1.7°C y 3.3°C. Los vientos del este son los que más contribuyen durante estos eventos con valores mínimos de 2.5 m/s y máximos de 15 m/s, estos últimos alcanzados durante la ocurrencia de granizo o cambio de fase. No obstante, no se tiene certeza de la influencia de los vientos en los procesos de acumulación/ablación. Las precipitaciones de tipo lluvia y granizo tienen un ciclo diurno similar desde las horas de la mañana hasta la noche. Mientras que las precipitaciones del tipo nieve son más ocurrentes durante la noche y madrugada, muy probablemente por las bajas temperaturas y altos contenido de humedad.

Objetivo específico 2: Analizar la dinámica de la superficie glaciar y los procesos de ablación / acumulación del nevado Huaytapallana mediante imágenes satelitales de radar de apertura sintética (SAR)

Se construyó la serie temporal con las imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR) en tres lenguas glaciares del Sistema Glaciar Huaytapallana, la cual reveló un comportamiento estacional en su superficie, se encontró valores promedio de -17 dB durante la temporada húmeda (septiembre-marzo), explicados por la presencia de capas de nieve húmeda acumulada durante las precipitaciones y una media de -12 dB durante la temporada seca (abril – agosto) explicado por la ausencia de nieve y hielo expuesto. Las líneas de separación entre la zona de acumulación (ganancia de másа) y la zona de ablación (pérdida de masa) fueron obtenidas mediante imágenes radar y ópticas (Sentinel-1 y Sentinel-2) y se ubicaron en las cotas 5000, 4940 y 4950 para las laderas oeste, sur y este respectivamente. Mientras que la zona de acumulación presentó variaciones estacionales más marcadas, la zona de ablación mantuvo los mismos valores encontrados en la temporada húmeda (-17 dB), siendo un indicador de presencia de agua por el constante derretimiento de la capa de hielo expuesto durante todo el año.

Objetivo específico 3: Determinar la relación de la temperatura, precipitación y la humedad relativa del aire en el comportamiento de las zonas de ablación/acumulación observada mediante imágenes de radar de apertura sintética (SAR) y datos meteorológicos

Se obtuvieron correlaciones negativas entre los valores de retrodispersión y las variables meteorológicas para cada lengua glaciar. La humedad relativa presentó un mayor nivel de correlación (R en zona de acumulación = -0.54, 0.59, -0.62 y R en zona de ablación = -0.42, -0.42 y -0.58) seguido de la precipitación (R en zona de acumulación = -0.54, -0.47 y -0.59 y R en zona

de ablación = -0.52, -0.37 y -0.36); la temperatura presentó los valores de correlación más bajos (R en zona de acumulación = -0.31, -0.27, -0.35 y R en zona de ablación = -0.24, -0.27 y -0.10). Indicando que las variaciones de los valores de retrodispersión obtenidos de las imagenes SAR son más sensibles a los flujos de calor latente que a los flujos de calor sensible. Sin embargo, la temperatura es la variable que determina la fase sólida/líquida de la precipitación que cae en el Sistema Glaciar Huaytapallana.

Capítulo 7

Recomendaciones

El presente estudio deja abierta nuevas líneas de investigación, aspectos por corregir y omisiones que se mencionan a continuación para conseguir que el estudio de los impactos de hidrometeorológicos en los sistemas glaciares de los Andes Centrales pueda ser mejor desarrollado en las proximas investigaciones.

Basado en las limitaciones desarrolladas en la sección 1.5, se plantean las siguientes recomendaciones:

- **Aumento de los registros del tipo de precipitación:** Es necesario continuar con los registros obtenidos por el Disdrómetro OTT Parsivel durante las próximas temporadas de lluvia para obtener umbrales y ciclos diurnos más significativos.

- **Optimizar el sistema de registro de datos:** Al contar con datos a escala del minuto, se debe priorizar la optimización del sistema de descarga y almacenamiento de estos datos mediante herramientas basadas en la nube o la automatización de procesos.

- **Facilitar la accesibilidad a la zona de estudio:** las mediciones in-situ solo pudieron ser efectuadas en la zona oeste del Sistema Glaciar Huaytapallana. Al tratarse de la cordillera de los Andes, sabemos que la parte oriental se comporta distinto que la parte occidental lo cual

podría estudiarse con mayor profundidad si se tuviera acceso a esta área de la zona de estudio.

- **Instalar equipos de medición dentro de las zonas glaciares:** Esto permitiría obtener datos meteorológicos más precisos y característicos de la zona glaciar, así como también facilitaría la comparación de las características meteorológicas entre zonas periglaciares y glaciares.
- **Mayor aplicación de las imágenes radar en zonas glaciares:** Las imágenes radar son conocidas por su amplia aplicación en campos donde el área de estudio tiene una baja complejidad topográfica como las zonas glaciares polares, agricultura o estudios oceanográficos. Esto deja un poco desarrollo en zonas glaciares y alta montaña como los Andes. Investigaciones que permitan mejorar el procesamiento basado en las distorciones topográficas y la interpetación de la superficie glaciar asi como su automatización son necesarias para continuar con el avance en este campo y para explotar el potencial de los sensores radares.
- **Ampliar financiamiento:** Una investigación como la presente, no hubiera podido ser posible sin el financiamiento obtenido, la cual cubrió el costo de los equipos, transporte, personal de seguridad, administración, etc. Por ello, tanto las universidades como las instituciones del Estado deberían fomentar más proyectos científicos. Estas inversiones no solo ayudan a cerrar la brecha de conocimiento, sino que tambien abren las puertas para que los jóvenes se desarrollen en la ciencia y en su profesión.

Capítulo 8

Referencias Bibliográficas

Bibliografía

Aliaga, J. A., & Cosme, L. A. (2018). Retroceso glaciar del Nevado Huaytapallana como consecuencia del calentamiento global. *Naturaleza y Sociedad*, *1*(1).

Allen, J. T., Giammanco, I. M., Kumjian, M. R., Jurgen Punge, H., Zhang, Q., Groenemeijer, P., Kunz, M., & Ortega, K. (2020). Understanding Hail in the Earth System. *Reviews of Geophysics*, *58*(1), 1-49. https://doi.org/10.1029/2019RG000665

Areu, A. L., & de Toda, S. S. M. (2005). Apoyo de los sensores ópticos y de radar de apertura sintética a la información forestal. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (19), 135-140.

Aybar, C., Wu, Q., Bautista, L., Yali, R., & Barja, A. (2020). rgee: An R package for interacting with Google Earth Engine. *Journal of Open Source Software*, *5*(51), 2272.

Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.

Battaglia, A., Rustemeier, E., Tokay, A., Blahak, U., & Simmer, C. (2010). PARSIVEL snow observations: A critical assessment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *27*(2), 333-344.

Beedle, M., Dyurgerov, M., Tangborn, W., Khalsa, S., Helm, C., Raup, B., Armstrong, R., & Barry, R. (2008). Improving estimation of glacier volume change: a GLIMS case study of Bering Glacier System, Alaska. *The Cryosphere*, *2*(1), 33-51.

Bermudez, J., Happ, P., Oliveira, D., & Feitosa, R. (2018). SAR to optical image synthesis for cloud removal with generative adversarial networks. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, *4*(1).

Bishop, M. P., Björnsson, H., Haeberli, W., Oerlemans, J., Shroder, J. F., & Tranter, M. (2011). *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*. Springer Science & Business Media.

Britannica. (1998). hydrometeorology. En *Encyclopedia Britannica*.

Brown, W. M. (1967). Synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (2), 217-229.

Buemi, M. E. (2012). *Tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética mediante filtros stack* (Tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Bulege-Gutiérrez, W., & Custodio, M. (2020). Cambio climático y retroceso glaciar en la Cordillera Huaytapallana, Perú/Climate change and glacier retreat in the Huaytapallana Mountain Range, Peru. *Tecnologıéa y ciencias del agua*, *11*(2), 229-261.

Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, *140*, 165-178.

Bustos, O. H., Frery, A. C., Lamfri, M. A., & Scavuzzo, C. M. (2004). Técnicas Estadıésticas en Teledetección Espacial. *Instituto de Altos Estudios Espaciales 'Mario Gulich', CONAE*.

Callañaupa Gutierrez, S. M. (2016). Caracterización de la evapotranspiración en los cultivos alrededor del observatorio de Huancayo usando la técnica Eddy Covariance.

Candas, A. (2017). Reconstruction of the paleoclimate on Dedegöl Mountain with paleoglacial records and numerical ice flow models. *Department of Solid Earth Sciences*, 116.

CEPIG - INDECI. (2016). Probable desembalse de la la Laguna Chuspicocha, en el Nevado de Huaytapallana y su immpacto en la ciudad de Huancayo - JUnín, 84.

Chavez, S. P., Silva, Y., & Barros, A. P. (2020). High-Elevation Monsoon Precipitation Processes in the Central Andes of Peru. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *125*(24). https://doi.org/10.1029/2020JD032947

Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental. *La observación de la Tierra desde el espacio*, *1*.

Clark, D., & Barrand, N. (2020). Half a century of glacier mass balance at Cordilleras Blanca and Huaytapallana, Peruvian Andes.

Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers*. Academic Press.

Ding, B., Yang, K., Qin, J., Wang, L., Chen, Y., & He, X. (2014). The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization. *Journal of Hydrology*, *513*, 154-163.

Dozier, J. (1989). Estimation of properties of alpine snow from landsat thematic mapper. *Advances in space Research*, *9*(1), 207-215.

Echegaray Cristobal, D. Z. (2015). Efecto de la cobertura vegetal nativa sobre la desglaciación del nevado Huaytapallana en diferentes altitudes.

ESA. (2022). Sentinel Aplication Software. https://step.esa.int/main/download/snap-download/

European Space Agency. (2007). ASAR Product Handbook. *Wiley-ISTE*, (2.2). https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR1-1-2.html

Fahnestock, M., Bindschadler, R., Kwok, R., & Jezek, K. (1993). Greenland ice sheet surface properties and ice dynamics from ERS-1 SAR imagery. *Science*, *262*(5139), 1530-1534.

Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. *Multidisciplinary digital publishing institute proceedings*, *18*(1), 11.

Flores-Rojas, J. L., Moya-Alvarez, A. S., Valdivia-Prado, J. M., Piñas-Laura, M., Kumar, S., Abi Karam, H., Villalobos-Puma, E., Martıénez-Castro, D., & Silva, Y. (2021). On the dynamic mechanisms of intense rainfall events in the central Andes of Peru, Mantaro valley. *Atmospheric Research*, *248*, 105188.

Fontal, B. (2005). The Electromagnetic Spectrum and its Applications. *Química-Ciencias-ULA*, 1-151.

Fyffe, C. L., Potter, E., Fugger, S., Orr, A., Fatichi, S., Loarte, E., Medina, K., Hellström, R. Å., Bernat, M., Aubry-Wake, C., et al. (2021). The energy and mass balance of Peruvian glaciers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(23), e2021JD034911.

Garreaud, R. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, *22*, 3-11.

Geer, I. (2013). Weather & Environmental Terms Glossary. *Bulletin of the American Meteorological Society*.

Gobierno Regional de Junin. (2014). *Plan Maestro del Área de Conservación Regional Huaytapallana* (inf. téc.).

González, A. A. (2022). Principios básicos de la Retrodispersión Radar. https://eo-college.org/%20https://eo-college.org/courses/principios-basicos-de-la-retrodispersion-radar/

Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. (2020). *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *13*, 5326-5350.

Gurgiser, W., Marzeion, B., Nicholson, L., Ortner, M., & Kaser, G. (2013). Modeling energy and mass balance of Shallap Glacier, Peru. *The Cryosphere*, *7*(6), 1787-1802.

Hall, D., Williams, R., Barton, J., Sigurđsson, O., Smith, L., & Garvin, J. (2000). Evaluation of remote-sensing techniques to measure decadal-scale changes of Hofsjökull ice cap, Iceland. *Journal of Glaciology*, *46*(154), 375-388.

Hooke, R. (2011). Glossary of glacier mass balance and related terms. *Journal of Glaciology*, *57*(206).

Houze, R. A. (2014). Types of clouds in earth's atmosphere. *International Geophysics*, *104*, 3-23. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374266-7.00001-9

Houze Jr, R. A. (1997). Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox? *Bulletin of the American Meteorological Society*, *78*(10), 2179-2196.

INAIGEM. (2018). Inventario Nacional de Glaciares, 354.

INAIGEM. (2021). Analisis geomorfológico, subcuenca shullcas, cordillera Huaytapallana-Junin, 1-28.

INEI. (2022). *INEI* (inf. téc.). https://www.inei.gob.pe/

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2011). Mapa De Peligros, Plan De Usos Del Suelo Ante Desastres Y Medidas De Mitigacion De La Ciudad De Huancayo. *Indeci*, 182.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen. *Cambridge University Press*, (In Press), 3949. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

Jawak, S. D., Bidawe, T. G., Luis, A. J., et al. (2015). A review on applications of imaging synthetic aperture radar with a special focus on cryospheric studies. *Advances in Remote Sensing*, *4*(02), 163.

Jennings, K. S., Winchell, T. S., Livneh, B., & Molotch, N. P. (2018). Spatial variation of the rain–snow temperature threshold across the Northern Hemisphere. *Nature communications*, *9*(1), 1-9.

Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., Schoolmeester, T., Verbist, K., et al. (2019). *El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hıédricos*. UNESCO Publishing.

Kienzle, S. W. (2008). A new temperature based method to separate rain and snow. *Hydrological Processes: An International Journal*, *22*(26), 5067-5085.

Lhte, Y., Chevallier, P., Coudrain, A., Lejeune, Y., & Etchevers, P. (2005). Relationship between precipitation phase and air temperature: comparison between the Bolivian Andes and the Swiss Alps/Relation en-

tre phase de prcipitation et temprature de lair: comparaison entre les Andes Boliviennes et les Alpes Suisses. *Hydrol. Sci. J*, *50*.

Li, Y.-J., Ding, Y.-J., Shangguan, D.-H., & Wang, R.-J. (2019). Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015. *Advances in Climate Change Research*, *10*(4), 203-213.

Liu, J., & Chen, R. (2016). Discriminating types of precipitation in Qilian Mountains, Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *5*, 20-32.

López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés, B., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Zubieta, R., & Alejo-Cochachıén, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, *112*, 1-11.

Mahdavi, S., Salehi, B., Moloney, C., Huang, W., & Brisco, B. (2018). Speckle filtering of Synthetic Aperture Radar images using filters with object-size-adapted windows. *International Journal of Digital Earth*, *11*(7), 703-729.

Maldonado Oré, E. M., Aguilar Cáceres, M. A., & Rodrıéguez Cerrón, M. (2022). Area de conservación regional Huaytapallana.

MINAGRI. (2008). *Afianzamiento hídrico en el Valle del Río Shullcas con fines agrícolas* (inf. téc.).

MINAM. (2019). Mapa Nacional de Ecosistemas. *Ministerio del Ambiente*, 120. www.minam.gob.pe

MINCETUR. (2018). Movimiento turístico en junín. *Ministerio de Comercio Exterior y Turismo*, 8-9.

MINCETUR. (2019). PERTUR Junín 2020 -2025. *Plan estratégico regional de turismmo*.

Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, *1*(1), 6-43.

Motschmann, A., Huggel, C., Carey, M., Moulton, H., Walker-Crawford, N., & Muñoz, R. (2020). Losses and damages connected to glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, *162*(2), 837-858.

Nagler, T., Rott, H., Hetzenecker, M., Wuite, J., & Potin, P. (2015). The Sentinel-1 mission: New opportunities for ice sheet observations. *Remote Sensing*, *7*(7), 9371-9389.

National Geographic Society. (2019). Precipitation. https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/precipitation/

Nemeth, K. (2008). OTT Pluvio2: Weighing precipitation gauge and advances in precipitation measurement technology. *WMO Technical Conf. on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation*.

Nuthammachot, N., Phairuang, W., & Stratoulias, D. (2017). Removing Speckle noise in Sentinel-1A radar satellite imagery using filtering techniques. *Journal of Remote Sensing and GIS Association of Thailand:RESGAT*, *18*, 80-92.

OTT, H. (2016). Operating instructions Present Weather Sensor OTT Parsivel 2. 52.

OTT HydroMet. (2022). Technical Data OTT Pluvio2 S Compact universal weighing precipitation gauge Technical Data OTT Pluvio2 S, 8-10.

Paul, F., Bolch, T., Kääb, A., Nagler, T., Nuth, C., Scharrer, K., Shepherd, A., Strozzi, T., Ticconi, F., Bhambri, R., et al. (2015). The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation

change and velocity products. *Remote Sensing of Environment*, *162*, 408-426.

Perez, C., & Muñoz, A. L. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. carlos perez.

Perry, L. B., Seimon, A., Andrade-Flores, M. F., Endries, J. L., Yuter, S. E., Velarde, F., Arias, S., Bonshoms, M., Burton, E. J., Winkelmann, I. R., et al. (2017). Characteristics of precipitating storms in glacierized tropical Andean Cordilleras of Peru and Bolivia. *Annals of the American Association of Geographers*, *107*(2), 309-322.

PNUD. (2022). Indice de Desarrollo Humano. http://desarrollohumano.org.gt/desarrollo-humano/calculo-de-idh/

Podest, E. (2017). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética.

Rabatel, A., Bermejo, A., Loarte, E., Soruco, A., Gomez, J., Leonardini, G., Vincent, C., & Sicart, J. E. (2012). Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics? *Journal of Glaciology*, *58*(212), 1027-1036.

Richards, J. A., et al. (2009). *Remote sensing with imaging radar* (Vol. 1). Springer.

Rivera, A., Bown González, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., Vuille, M., et al. (2017). Manual Balance de masa glaciar.

Rott, H., & Mätzler, C. (1987). Possibilities and limits of synthetic aperture radar for snow and glacier surveying. *Annals of Glaciology*, *9*, 195-199.

Saavedra, M., & Takahashi, K. (2017). Physical controls on frost events in the central Andes of Peru using in situ observations and energy flux models. *Agricultural and Forest Meteorology*, *239*, 58-70.

Salcedo, A. P. (2011). *Estimación de área cubierta de nieve en cuencas con elevado aporte de fusión utilizando datos ERS-2* (Tesis de maestría).

Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, *7*(1), 103-118.

Sarochar, H. (2009). Introducción a la meteorologıéa general. *Universidad Nacional de la Plata*.

Schaefer, M., Fonseca-Gallardo, D., Farıéas-Barahona, D., & Casassa, G. (2020). Surface energy fluxes on Chilean glaciers: measurements and models. *The Cryosphere*, *14*(8), 2545-2565.

Schauwecker, S., Rohrer, M., Huggel, C., Endries, J., Montoya, N., Neukom, R., Perry, B., Salzmann, N., Schwarb, M., & Suarez, W. (2017). The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(10), 5172-5189.

Scher, C. (2019). Snowmelt Detection on Alpine Glaciers using Synthetic Aperture Radar Time Series.

Scher, C., Steiner, N. C., & McDonald, K. C. (2021). Mapping seasonal glacier melt across the Hindu Kush Himalaya with time series synthetic aperture radar (SAR). *The Cryosphere*, *15*(9), 4465-4482.

Seehaus, T., Marinsek, S., Helm, V., Skvarca, P., & Braun, M. (2015). Changes in ice dynamics, elevation and mass discharge of Dinsmoor–Bombardier–Edgeworth glacier system, Antarctic Peninsula. *Earth and Planetary Science Letters*, *427*, 125-135.

Senamhi. (2020). *Climas del Perú Mapa de Cllasificación Climática Nacional* (Vol. 53).

Sene, K. (2016). *Hydro- meteorology*.

Service, N. N. W. (2009). Glossary. https://w1.weather.gov/glossary/

Shi, J., & Dozier, J. (1995). Inferring snow wetness using C-band data from SIR-C's polarimetric synthetic aperture radar. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, *33*(4), 905-914.

Silva, Y., Takahashi, K., & Chávez, R. (2008). Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Advances in Geosciences*, *14*, 261-264.

Silverio, W., & Jaquet, J.-M. (2005). Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, *95*(3), 342-350.

Sims, E. M., & Liu, G. (2015). A parameterization of the probability of snow–rain transition. *Journal of hydrometeorology*, *16*(4), 1466-1477.

Small, D. (2011). Flattening gamma: Radiometric terrain correction for SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *49*(8), 3081-3093.

Smith, L. C., Forster, R. R., Isacks, B. L., & Hall, D. K. (1997). Seasonal climatic forcing of alpine glaciers revealed with orbital synthetic aperture radar. *Journal of Glaciology*, *43*(145), 480-488.

Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de Valencia.

Steiner, D., Pauling, A., Nussbaumer, S. U., Nesje, A., Luterbacher, J., Wanner, H., & Zumbühl, H. J. (2008). Sensitivity of European glaciers to precipitation and temperature–two case studies. *Climatic Change*, *90*(4), 413-441.

Stull, R. B., & Ahrens, C. D. (2000). *Meteorology for scientists and engineers a technical companion book to C. Donald Ahrens' Meteorology today* (2nd ed). Brooks Cole.

Sun, F., Chen, Y., Li, Y., Li, Z., Duan, W., Zhang, Q., & Chuan, W. (2022). Incorporating relative humidity improves the accuracy of precipitation

phase discrimination in High Mountain Asia. *Atmospheric Research*, *271*, 106094. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106094

Thompson, L. G., Hastenrath, S., & Arnao, B. M. (1979). Climatic ice core records from the tropical Quelccaya Ice Cap. *Science*, *203*(4386), 1240-1243.

Tokay, A., Wolff, D. B., & Petersen, W. A. (2014). Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel 2. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *31*(6), 1276-1288.

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., et al. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote sensing of environment*, *120*, 9-24.

Valdivia, J. M., Contreras, K., Martinez-Castro, D., Villalobos-Puma, E., Suarez-Salas, L. F., & Silva, Y. (2020). Dataset on raindrop size distribution, raindrop fall velocity and precipitation data measured by disdrometers and rain gauges over Peruvian central Andes (12.0 S). *Data in brief*, *29*, 105215.

Veettil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers: observations, causes, and challenges. *Geosciences*, *9*(5), 196.

Veettil, B. K., Wang, S., Simões, J. C., Ruiz Pereira, S. F., & de Souza, S. F. (2018). Regional climate forcing and topographic influence on glacier shrinkage: eastern cordilleras of Peru. *International Journal of Climatology*, *38*(2), 979-995.

Villalobos, E. E., Martinez-Castro, D., Kumar, S., Silva, Y., & Fashe, O. (2019). Estudio de tormentas convectivas sobre los Andes Centrales del Perú usando los radares PR-TRMM y KuPR-GPM. *Revista Cubana de Meteorologıéa*, *25*(1), 59-75.

Villalobos-Puma, E., Martinez-Castro, D., Flores-Rojas, J. L., Saavedra-Huanca, M., & Silva-Vidal, Y. (2019). Diurnal cycle of raindrops size distribution in a valley of the Peruvian Central Andes. *Atmosphere*, *11*(1), 38.

Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., et al. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes–Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-science reviews*, *176*, 195-213.

Vuille, M., Kaser, G., & Juen, I. (2008). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, *62*(1-2), 14-28.

Wallace, J. M., & Hobbs, P. (1977). Atmosphere science-an introductory survey. *Atmosphere science-an introductory survey*, V.

Whiteman, C. D. (2000). *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press.

Winkler, M., Juen, I., Mölg, T., Wagnon, P., Gómez, J., & Kaser, G. (2009). Measured and modelled sublimation on the tropical Glaciar Artesonraju, Perú. *The Cryosphere*, *3*(1), 21-30.

Winsvold, S. H., Kääb, A., Nuth, C., Andreassen, L. M., Van Pelt, W. J., & Schellenberger, T. (2018). Using SAR satellite data time series for regional glacier mapping. *The Cryosphere*, *12*(3), 867-890.

WMO. (2019). *Manual on Codes* (Vol. 1).

WMO, W. M. O., UNESCO, U. N. E., & Organization, S. (2012). *International Glossary of Hydrology*.

Woodhouse, I. H. (2016). Introduction to RADAR Remote Sensing. https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/

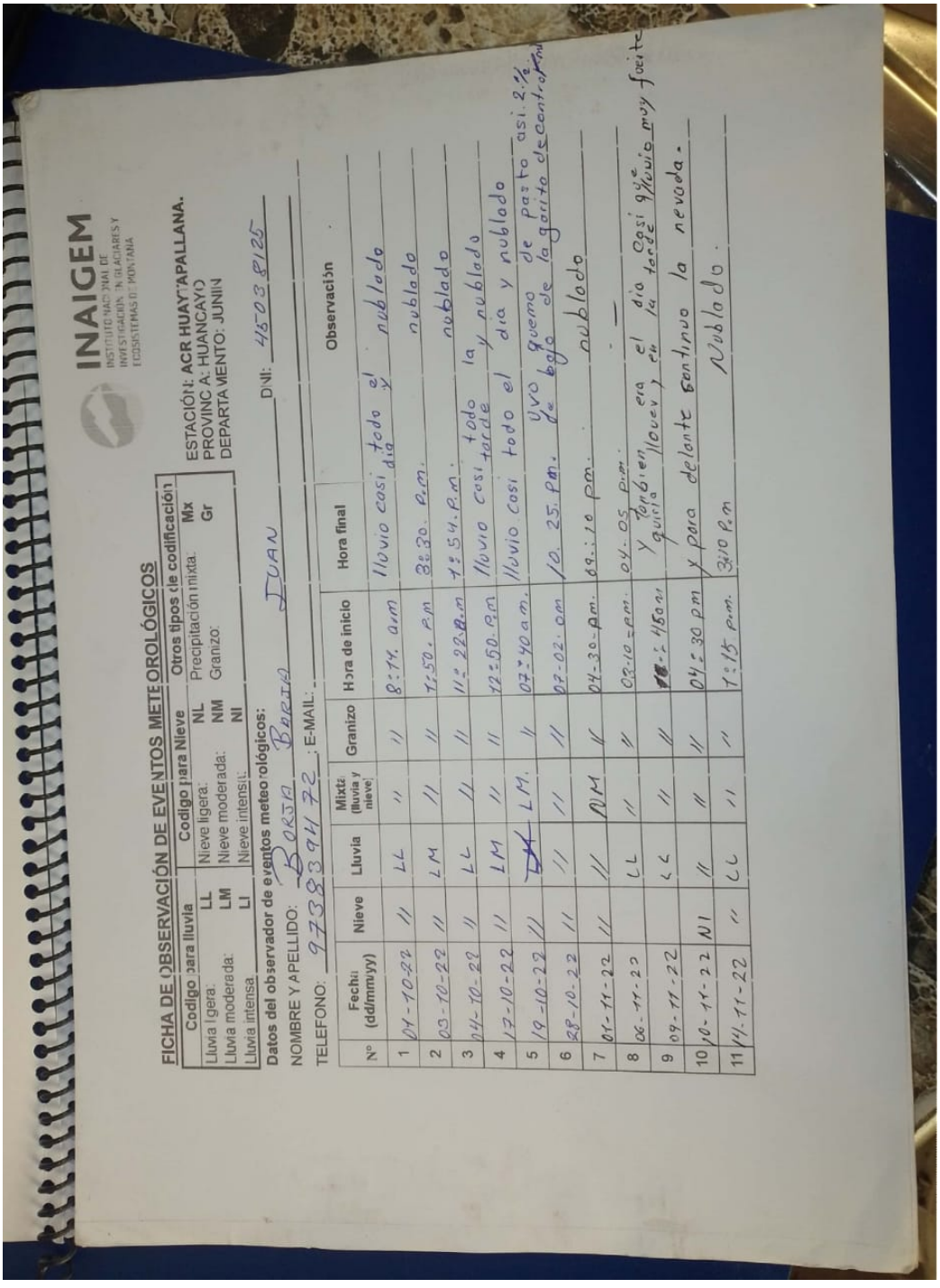
Woodhouse, I. H. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press.

Yarleque, C., Vuille, M., Hardy, D. R., Timm, O. E., De la Cruz, J., Ramos, H., & Rabatel, A. (2018). Projections of the future disappearance of the Quelccaya Ice Cap in the Central Andes. *Scientific reports*, *8*(1), 1-11.

Yiğit, E. (2015). Introduction to Atmospheric Physics. En *Atmospheric and Space Sciences: Neutral Atmospheres* (pp. 9-28). Springer.

Apéndice A

Anexo de Fotografías



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

FICHA DE OBSERVACIÓN DE EVENTOS METEOROLÓGICOS

Codigo para lluvia		Codigo para Nieve		Otros tipos de codificación	
Lluvia ligera:	LL	Nieve ligera:	NL	Precipitación mixta:	Mx
Lluvia moderada:	LM	Nieve moderada:	NM	Granizo:	Gr
Lluvia intensa:	LI	Nieve intensa:	NI		

ESTACIÓN: ACR HUAYTAPALLANA.
PROVINCIA: HUANCAYO
DEPARTAMENTO: JUNIN

Datos del observador de eventos meteorológicos:
NOMBRE Y APELLIDO: Boris Juan DNI: 45038125
TELEFONO: 973838472 ; E-MAIL:

N°	Fecha (dd/mm/yy)	Nieve	Lluvia	Mixta (lluvia y nieve)	Granizo	Hora de inicio	Hora final	Observación
1	04-10-22	//	LL	//	//	8:14 am	llovio casi todo el dia y	nublado
2	03-10-22	//	LM	//	//	7:50. pm	8:30. p.m.	nublado
3	04-10-22	//	LL	//	//	11:22 p.m	7:54 p.m.	nublado
4	17-10-22	//	LM	//	//	12:50 p.m	llovio casi todo la tarde	y nublado
5	19-10-22	//	LM.	//	//	07:40 a.m.	llovio casi todo el dia y nublado	
6	28-10-22	//	//	//	//	07:02: am	10. 25. p.m. Uvo quema de pasto asi. 2 de bajo de la garita descentro	
7	01-11-22	//	//	NM	//	04:30 pm	09:10 pm.	nublado
8	06-11-22		LL	//	//	03:10 pm:	04: 05 p.m.	
9	09-11-22		LL	//	//	1:150 p.m	Y tambien llovio y era el dia casi 9 de la tarde quinua	muy fuerte
10	10-11-22	NI	//	//	//	04:30 pm	y para delante continuo la nevada.	
11	11-11-22	//	LL	//	//	1:15 p.m.	3:10 p.m Nublado.	

Figura A.1: **Registros de eventos, obtenidos por observación del personal de vigilancia y miembros del proyecto TAMYA**



Figura A.2: **Evento de nevada ocurrido el 25 de abril del 2022. Fotografía tomada por miembros del equipo TAMYA**



Figura A.3: **Evento de nevada y granizada ocurrido el 16 de septiembre del 2022. Fotografía tomada por miembros del equipo TAMYA.**



Figura A.4: **Evento de nevada ocurrido el 4 de octubre del 2022, Fotografía tomada por miembros del equipo TAMYA**



Figura A.5: **Evento de nevada ocurrido el 21 de octubre del 2022, Fotografía tomada por miembros del equipo TAMYA**

Apéndice B

Anexo de Gráficos

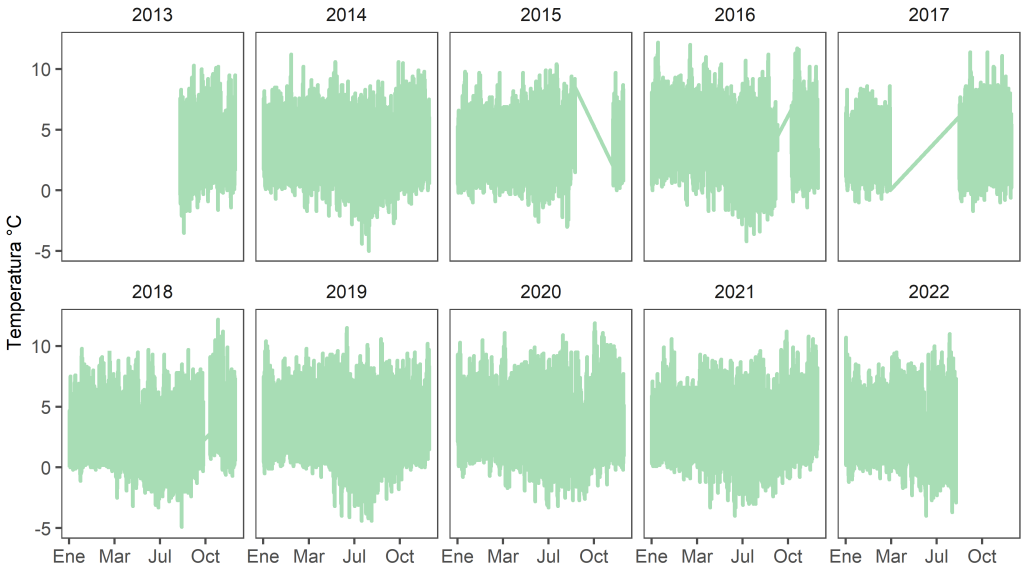


Figura B.1: **Registros anuales de temperatura con datos del año 2013 al 2022. Fuente: Estación meteorológica Automática Huaytapallana - SENAMHI**

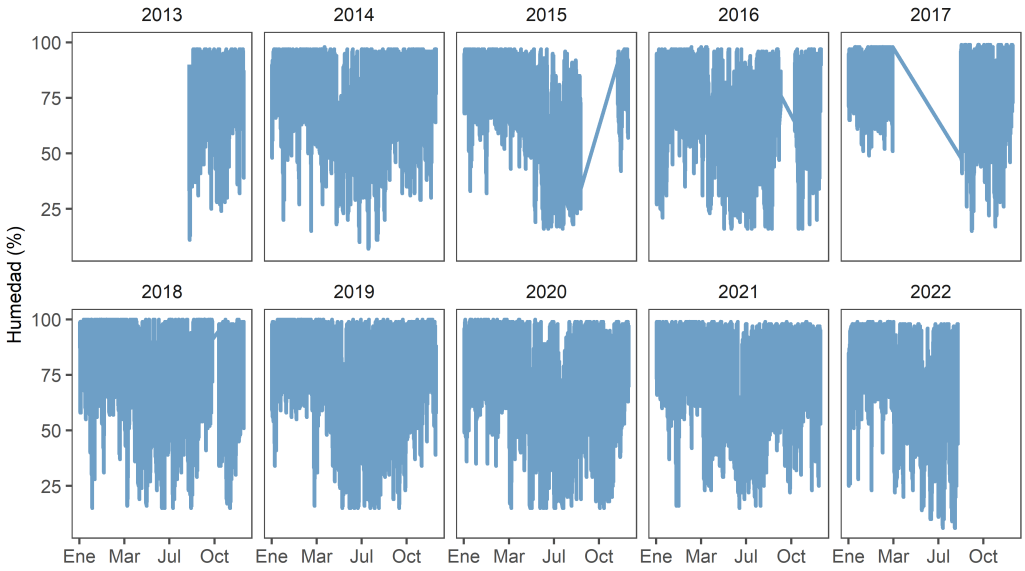


Figura B.2: **Registros anuales de humedad relativa con datos del año 2013 al 2022. Fuente: Estación meteorológica Automática Huaytapallana - SENAMHI**

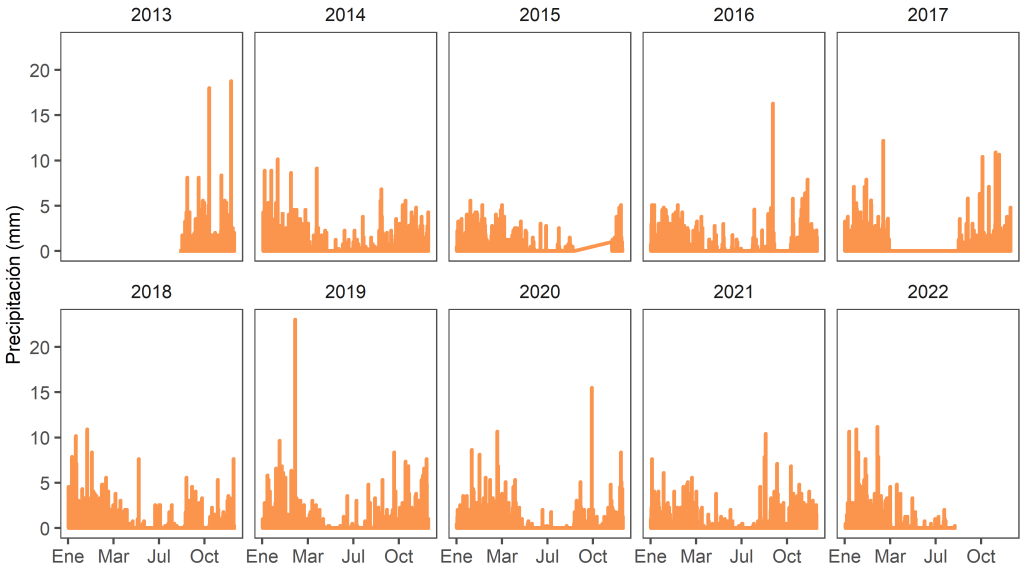


Figura B.3: **Registros anuales de precipitación con datos del año 2013 al 2022. Fuente: Estación meteorológica Automática Huaytapallana - SENAMHI**

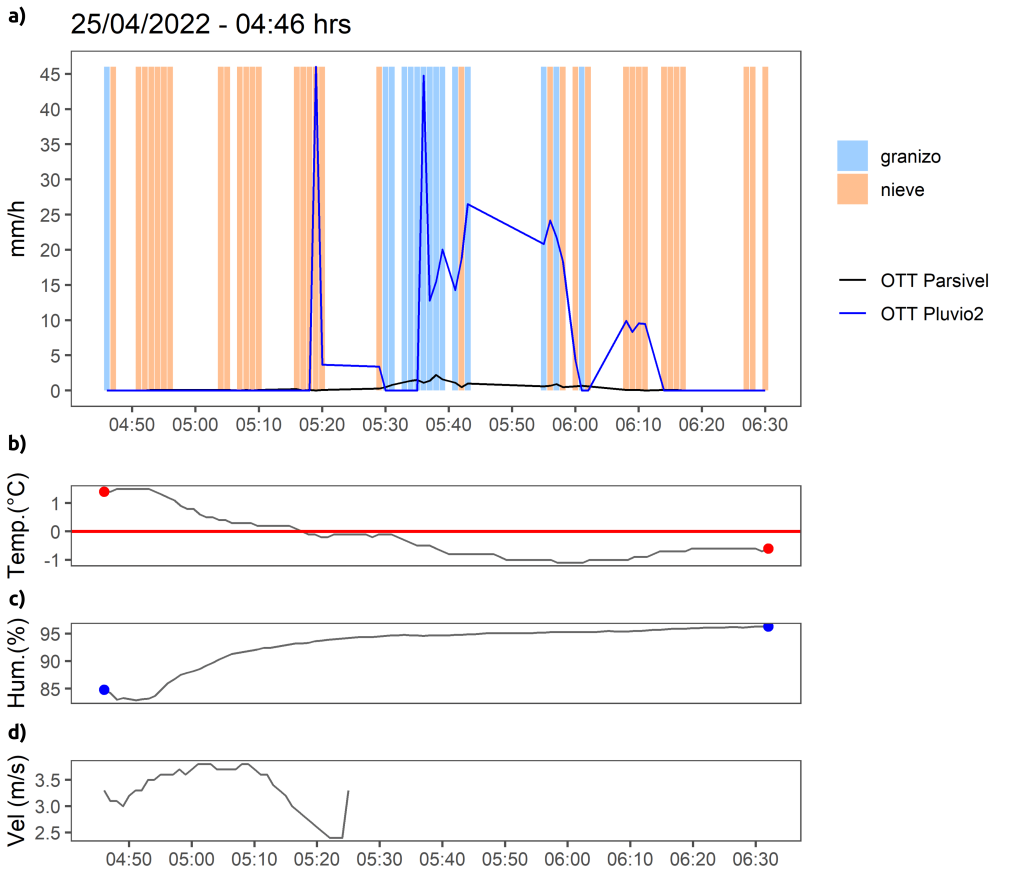


Figura B.4: **Información del evento de precipitación ocurrido el 25 de abril del 2022 a las 04:46 horas. (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia; (b), (c) y (d): evolución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento**

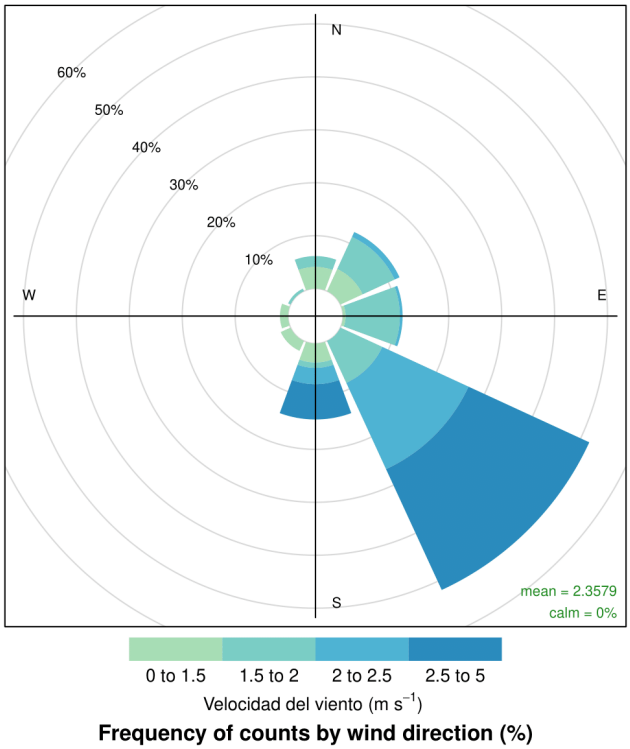


Figura B.5: **Rosa de viento para el evento ocurrido el 25 de abril del 2022 a las 04:46 horas**

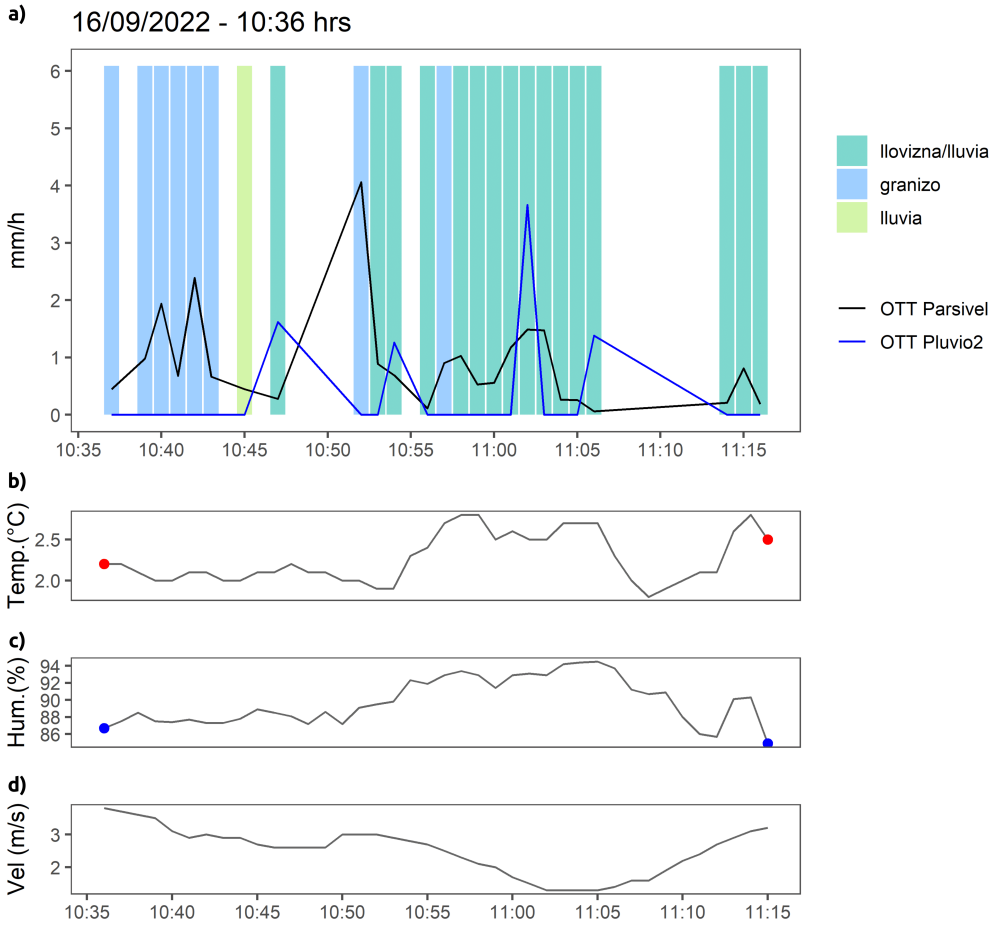


Figura B.6: **Información del evento de precipitación ocurrido el 16 de septiembre del 2022 a las 10:36 horas. (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia; (b), (c) y (d): evolución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento**

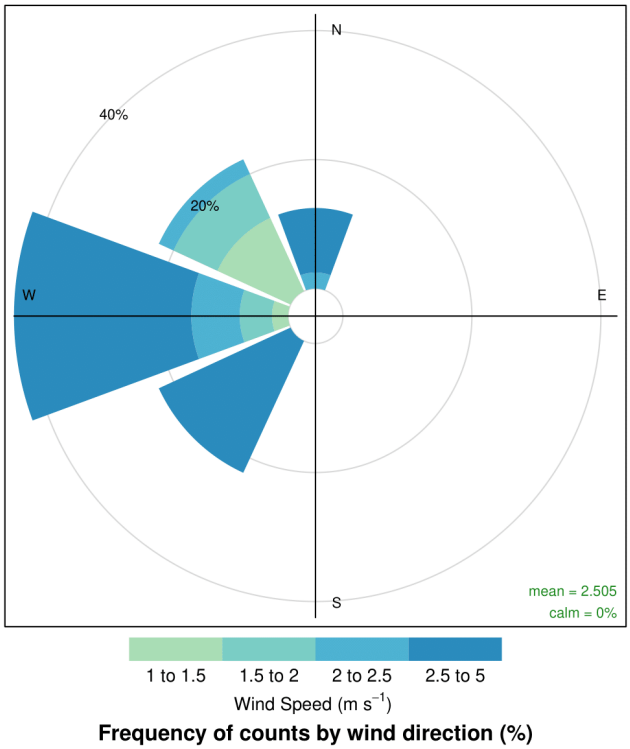


Figura B.7: **Rosa de viento del evento de precipitación ocurrido el 14 de septiembre del 2022 a las 17:15 horas**

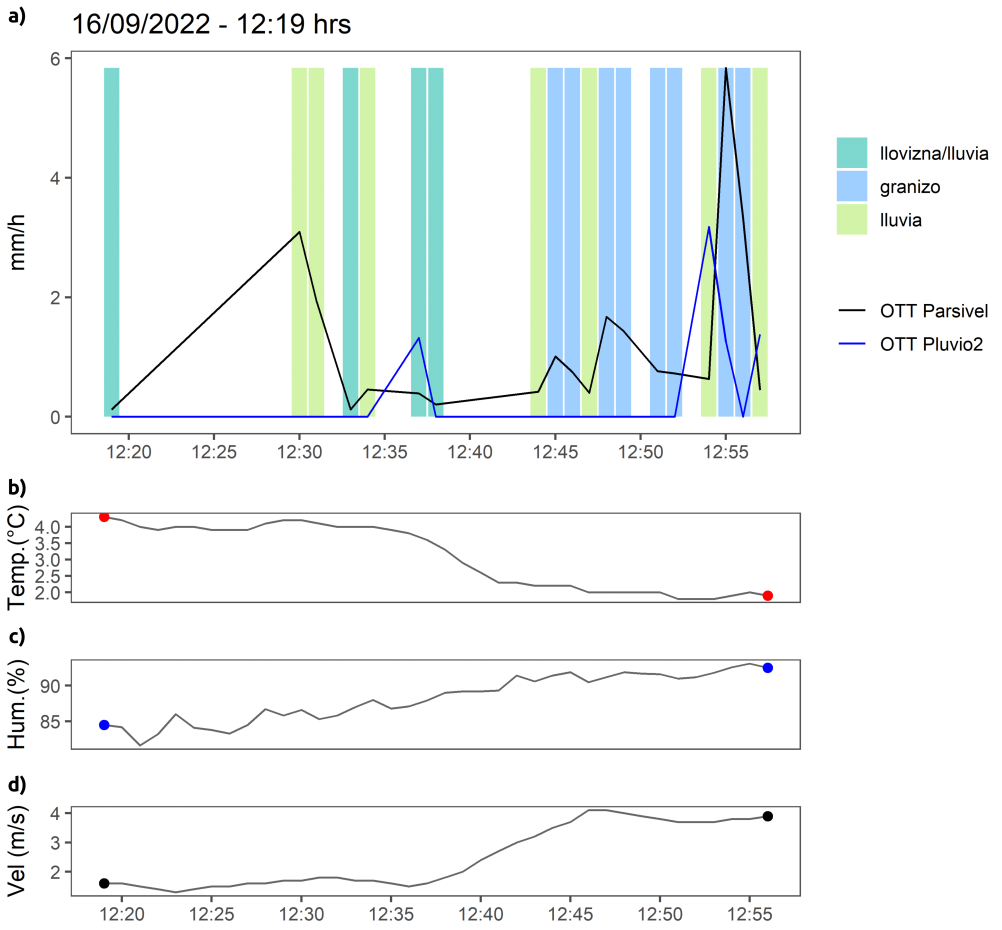


Figura B.8: . **Información del evento de precipitación ocurrido el 16 de septiembre del 2022 a las 12:19 horas. (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia(b), (c) y (d): evolución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.**

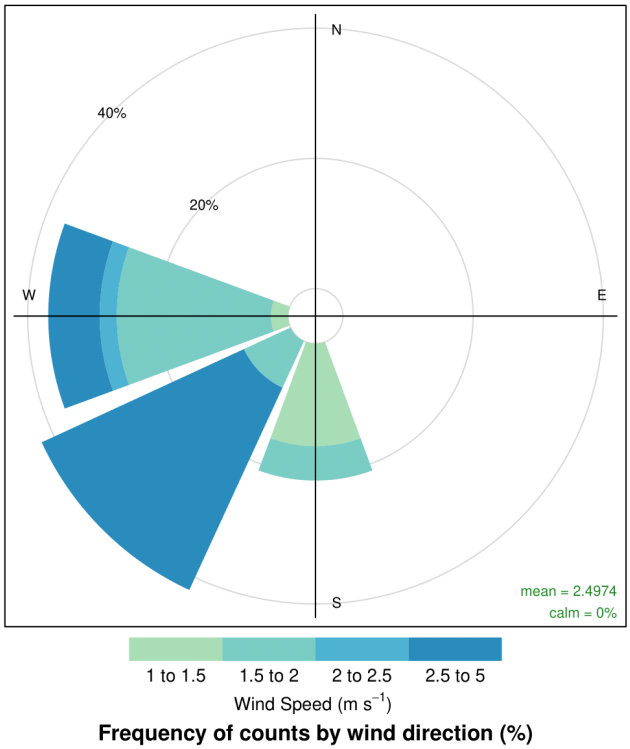


Figura B.9: **Rosa de viento del evento de precipitación ocurrido el 16 de septiembre del 2022 a las 12:19 horas**

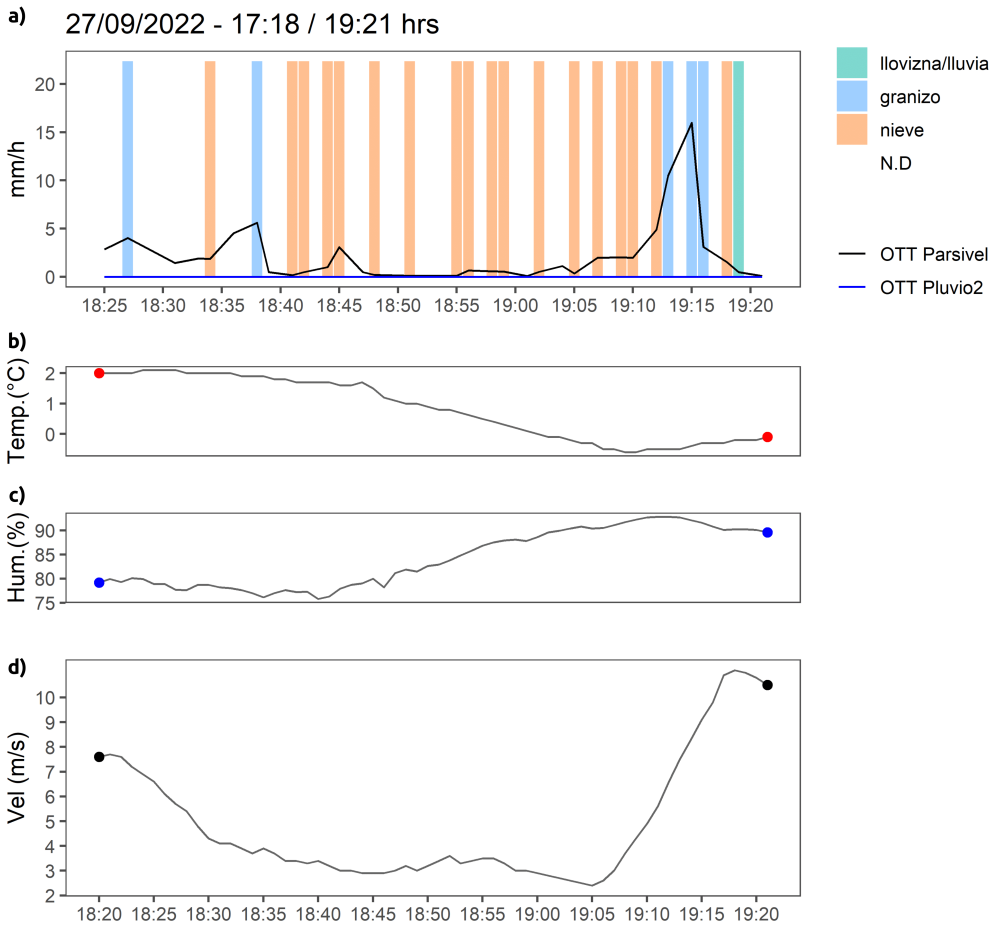


Figura B.10: **I. Información del evento de precipitación ocurrido el 27 de septiembre del 2022 a las 17:18 horas. (a): tipos de precipitación e intensidad de lluvia(b), (c) y (d): evolución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. N.D = sin registro**

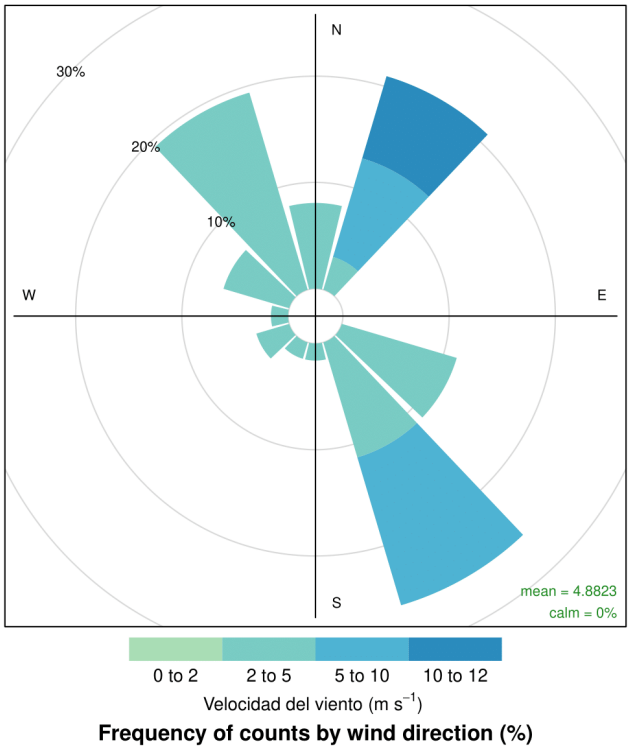


Figura B.11: **Rosa de viento del evento de precipitación ocurrido el 27 de septiembre del 2022 a las 19:21 horas**

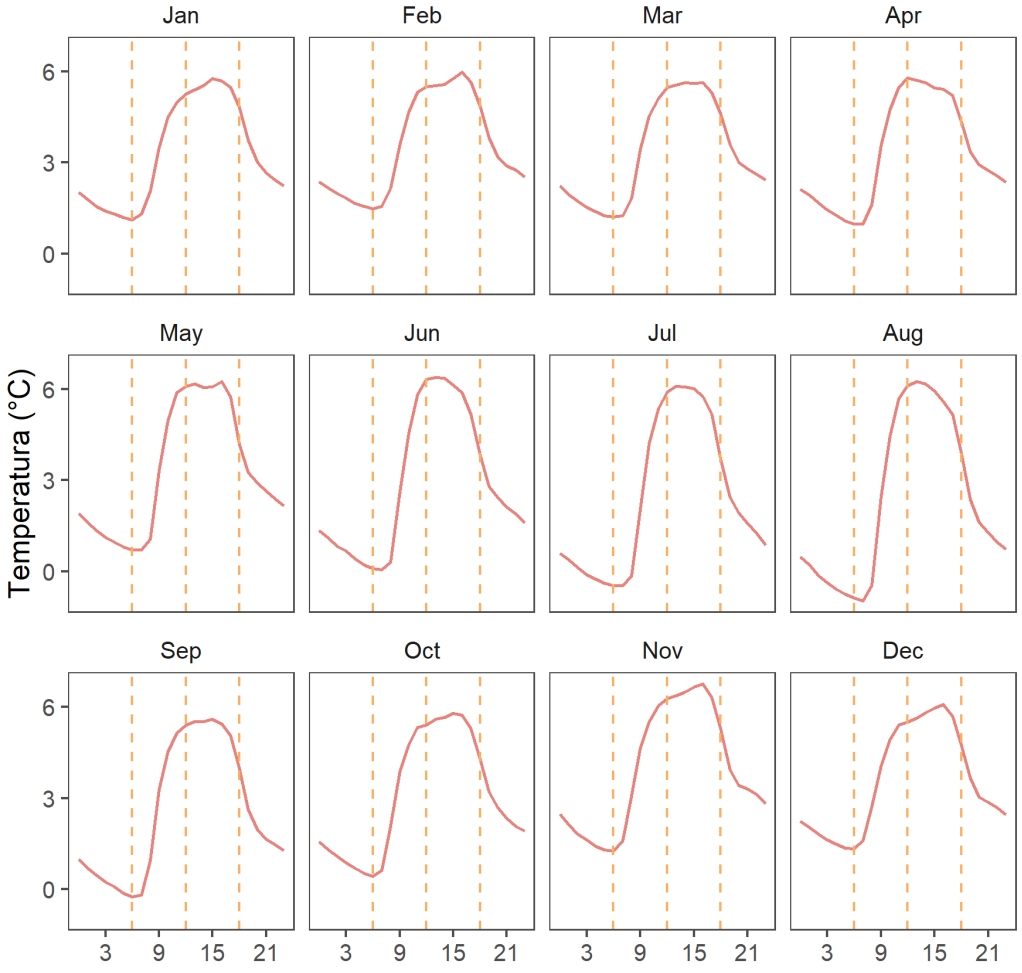


Figura B.12: **Ciclo diurno de la temperatura elaborado con los registros de la Estación meteorológica Huaytapallana - SENAMHI**

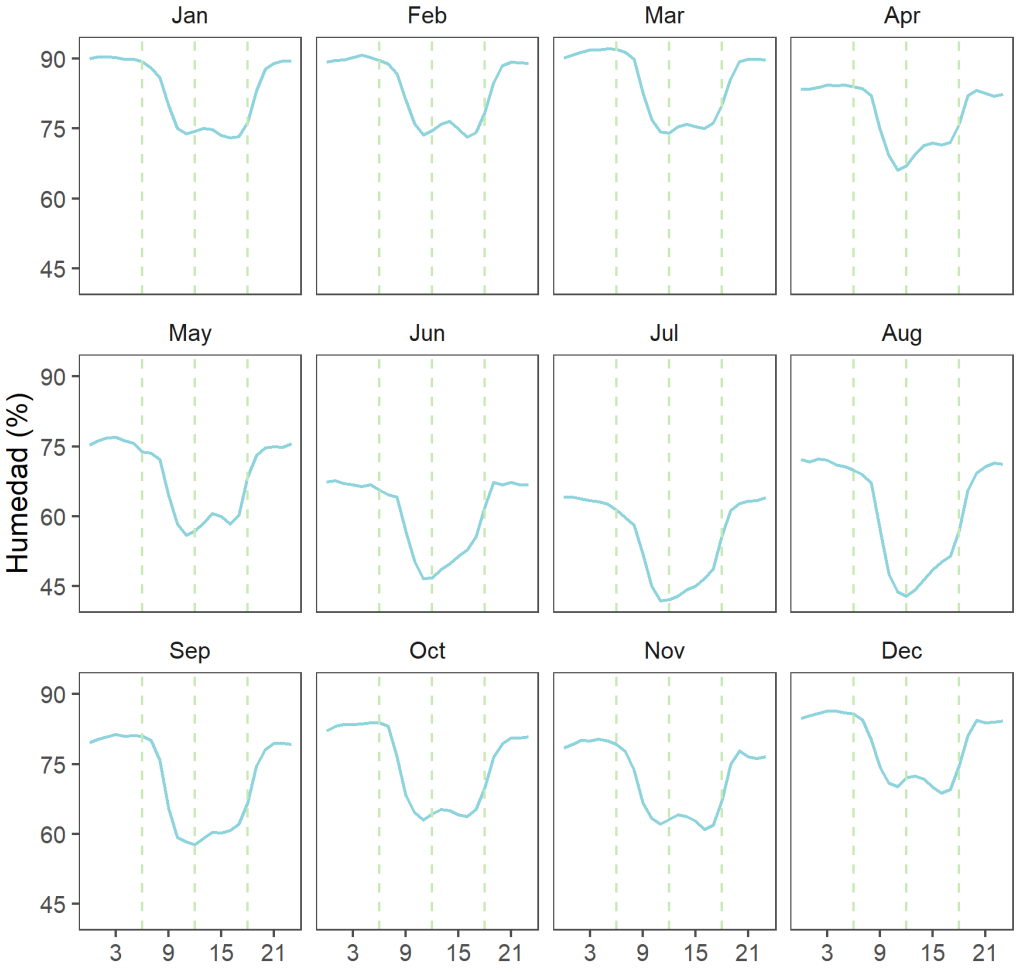


Figura B.13: **Ciclo diurno de la humedad relativa elaborado con los registros de la Estación meteorológica Huaytapallana – SENAMHI**

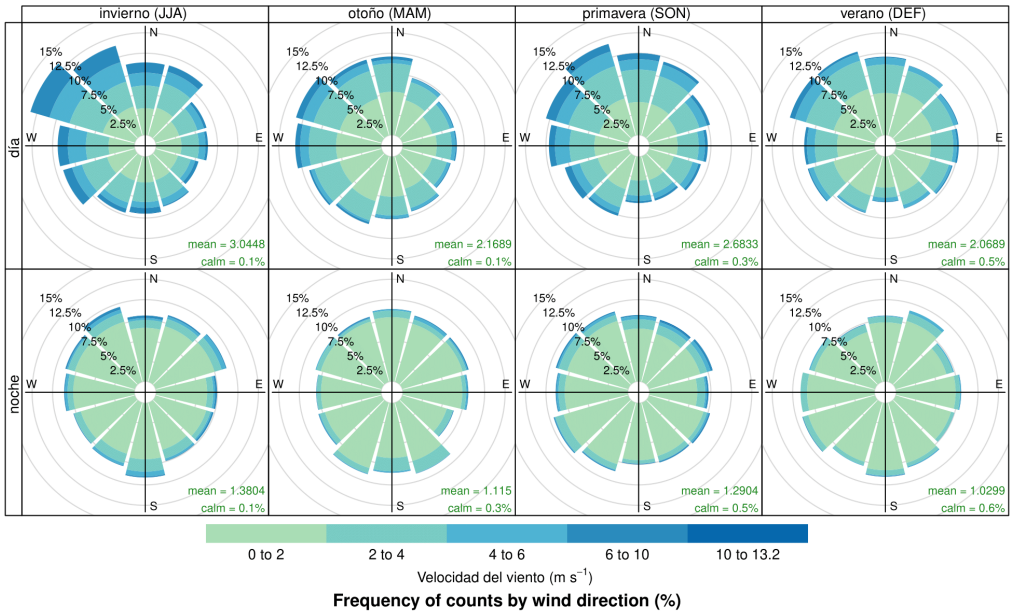


Figura B.14: **Rosas de viento durante el día y noche para cada estación del año. Elaborado con los registros de la Estación meteorológica Huaytapallana – SENAMHI**

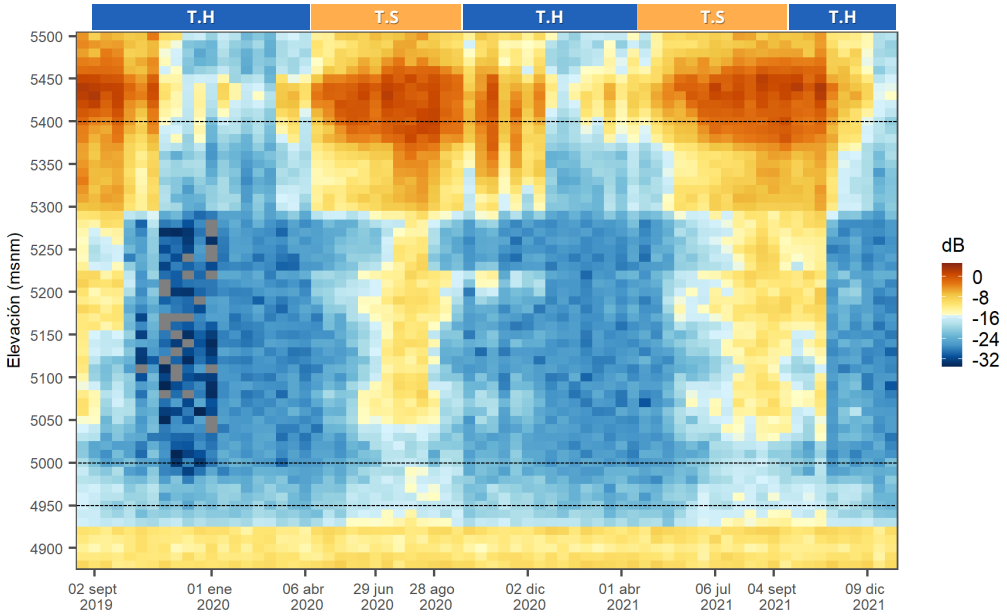


Figura B.15: **Gráfico de calor de valores de retrodispersión obtenidos con las imágenes SAR para la lengua glaciar Oeste para el periodo 2019-2021. T.H: temporada húmeda (lluvias) en los Andes centrales. T.S: temporada seca. Líneas punteadas de abajo hacia arriba representan (1) el límite glaciar, (2) separación de las zonas de ablación y acumulación y (3) zona de cumbre**

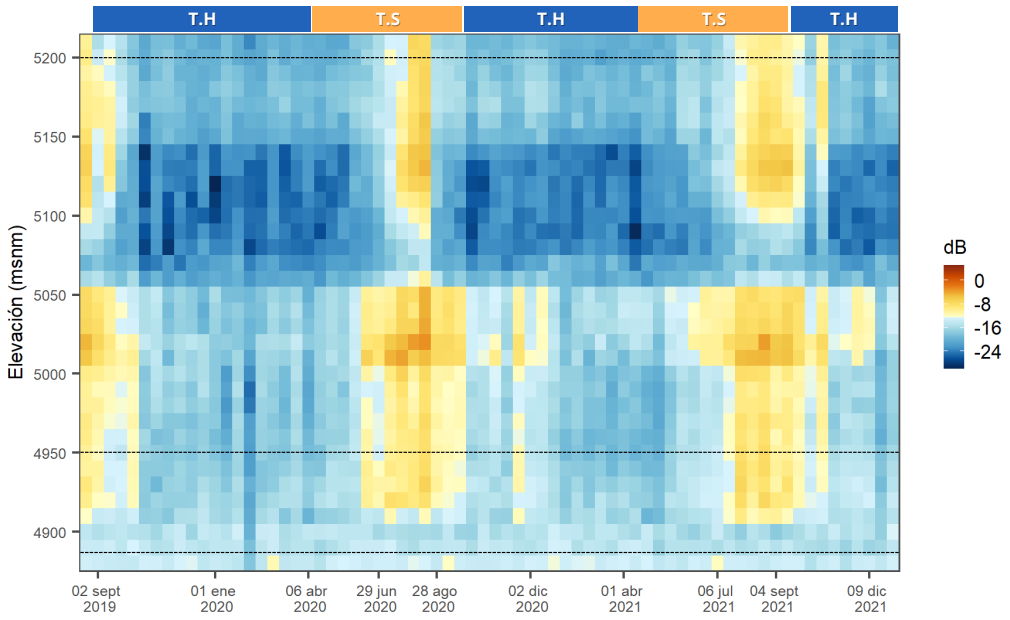


Figura B.16: **Gráfico de calor de valores de retrodispersión obtenidos con las imágenes SAR para la lengua glaciar Sur para el periodo 2019-2021. T.H: temporada húmeda (lluvias) en los Andes centrales. T.S: temporada seca. Líneas punteadas de abajo hacia arriba representan (1) el límite glaciar, (2) separación de las zonas de ablación y acumulación y (3) zona de cumbre**

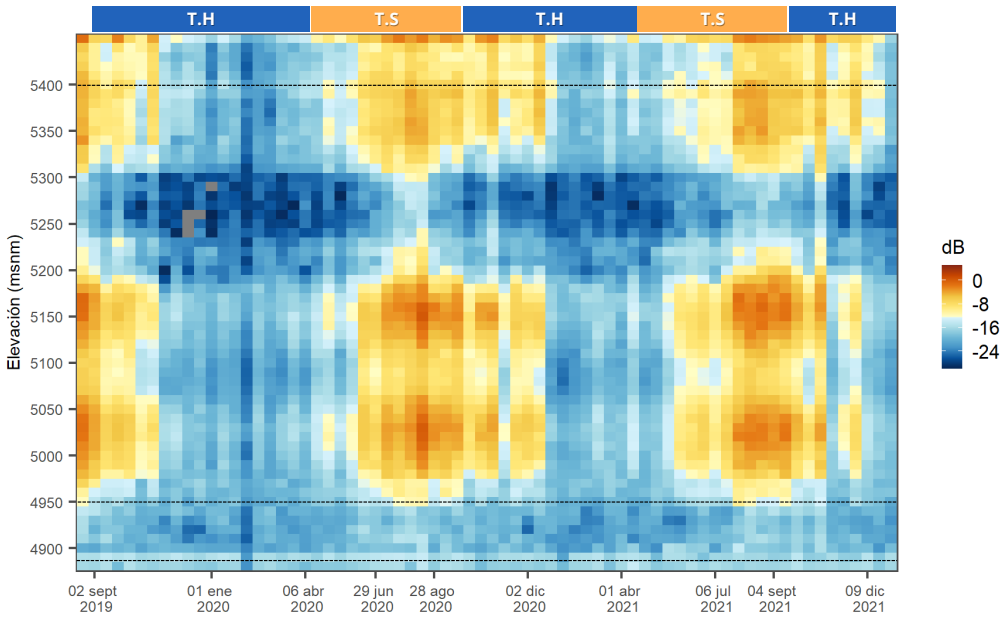


Figura B.17: **Gráfico de calor de valores de retrodispersión obtenidos con las imágenes SAR para la lengua glaciar Este para el periodo 2019-2021. T.H: temporada húmeda (lluvias) en los Andes centrales. T.S: temporada seca. Líneas punteadas de abajo hacia arriba representan (1) el límite glaciar, (2) separación de las zonas de ablación y acumulación y (3) zona de cumbre**

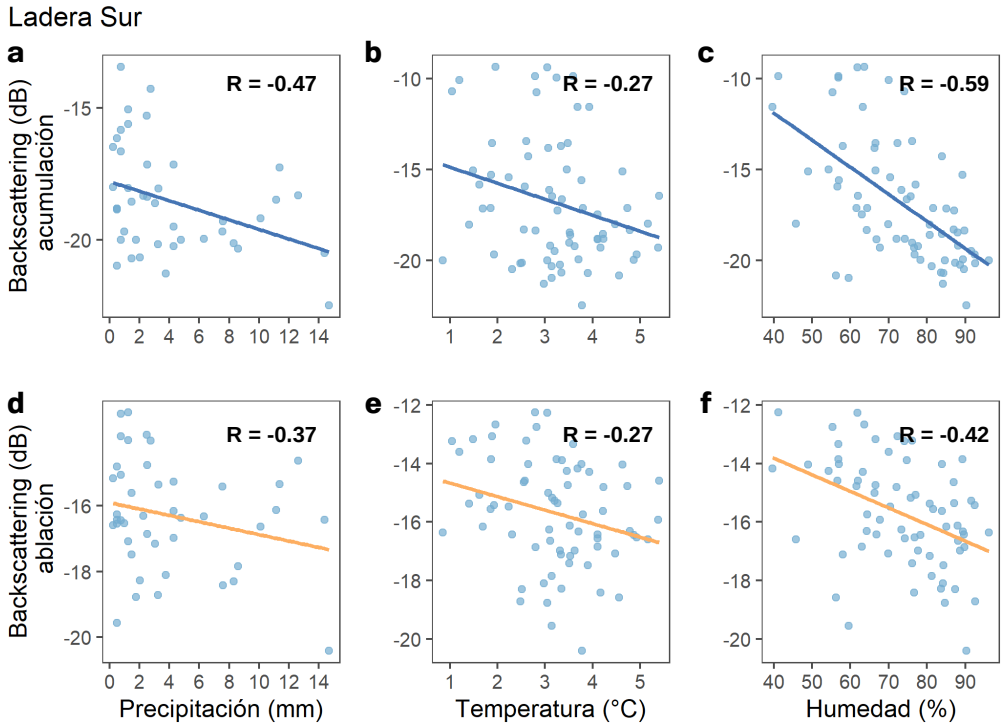


Figura B.18: **Gráficos de correlación (p value <0.05) entre los valores de retrodispersión y las variables meteorológicas para las zonas de acumulación (paneles (a), (b) y (c)) y ablación (paneles (d), (e), (f)) de la Ladera Sur**

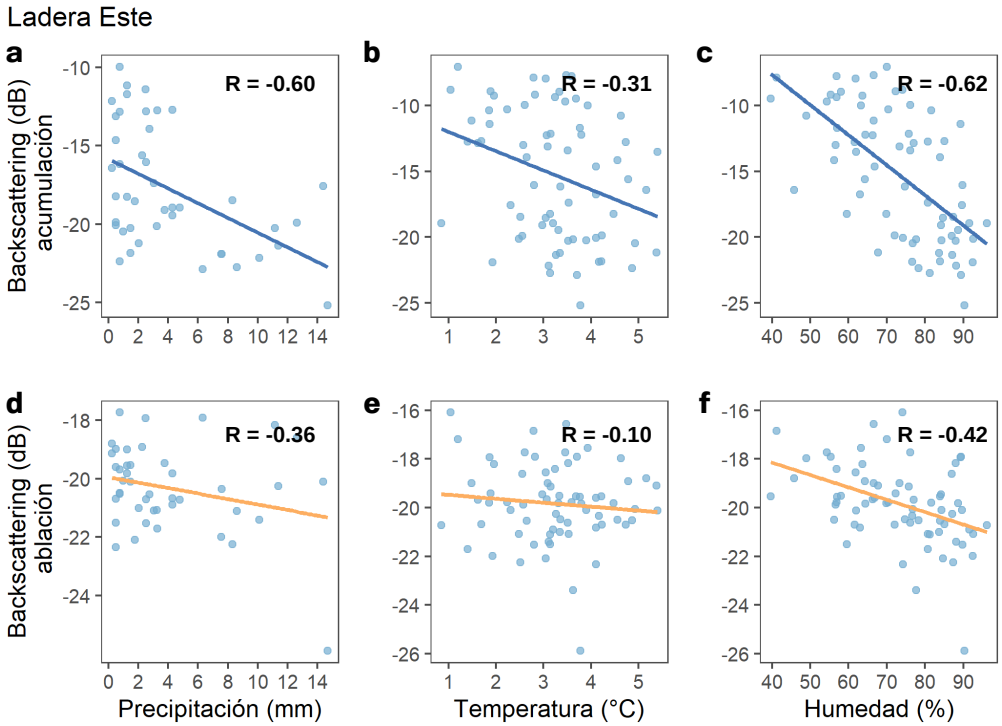


Figura B.19: **Gráficos de correlación entre los valores de retrodispersión y las variables meteorológicas para las zonas de acumulación (paneles (a), (b) y (c)) y ablación (paneles (d), (e), (f)) de la Ladera Este**

Apéndice C

Anexo de Tablas

Fecha	Inicio	Fin	Duración	DSD	Pluv	EMA
25/4/2022	04:46	06:30	01:44:00	0.35	11.43	12.16
25/4/2022	14:02	17:19	03:17:00	0.06	2.731	N.D
30/8/2022	05:17	08:31	03:14:00	1.818	0.799	0.25
31/8/2022	13:39	14:15	00:36:00	0.0657	0.469	N.D
12/9/2022	14:29	14:37	00:08:00	0.0322	0.432	0.76
12/9/2022	21:03	21:28	00:25:00	4.6363	3.66	N.D
14/9/2022	17:15	17:37	00:22:00	0.166	0.227	0.5
15/9/2022	21:03	21:28	00:25:00	4.6363	3.66	N.D
16/9/2022	10:36	11:15	00:39:00	0.0017	0.875	5.06
16/9/2022	12:19	12:56	00:37:00			
27/09/2022	18:25	19:21	00:56:00	1.86	0	0.25
3/10/2022	14:04	14:42	00:38:00	0.143	0.118	2.78
4/10/2022	00:55	03:19	02:24:00	0.495	11.214	13.93
17/10/2022	12:59	13:18	00:19:00	0.525	3.37	10.86
17/10/2022	16:54	17:14	00:20:00			
19/10/2022	12:25	12:39	00:14:00	0.158	3.57	6.31
19/10/2022	19:30	19:38	00:08:00			
20/10/2022	18:03	19:50	01:47:00	10.2	9.73	0.5

Tabla C.1: **Comparación de registros realizados por el disdrómetro, pluviómetro de alta precisión y estación automática**