

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Análisis cuantitativo de variabilidad climática en relación a la
pérdida superficial con datos Landsat en nevados peruanos
2010-2020**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Assael Anthony Flores Kancha
Jair Efraín Torres Agüero

Asesor:

Milda Amparo Cruz Huaranga

Lima, abril del 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

Milda Amparo Cruz Huaranga, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“ANÁLISIS CUANTITATIVO DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN RELACIÓN A LA PÉRFIFA SUPERFICIAL CON DATOS LANDSAT EN NEVADOS PERUANOS 2010-2020”** constituye la memoria que presenta el (la) / los Bachiller(es) Assael Anthony Flores Kancha y Jair Efraín Torres Agüero para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 25 días del mes de abril del año 2022.



Milda Amparo Cruz Huaranga

ACTA DE SUSTENTACIÓN

079

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los 25 días día(s) del mes de abril del año 2022 siendo las 09:30 horas, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Mg. Jackson Edgardo Perez Carpio, el secretario: Ing. Cesar Asbel Aranda Castillo, y los demás miembros: Mg. Iliana Del Carmen Gutierrez Rodriguez y el Ing. Orlando Alan Poma Porras, y el asesor Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: “Análisis cuantitativo de Variabilidad climática en relación a la pérdida superficial con datos Landsat en nevados peruanos 2010-2020” de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **ASSAEL ANTHONY FLORES KANCHA**
.....b) **JAIR EFRAIN TORRES AGÜERO**

conducente a la obtención del título profesional de INGENIERO AMBIENTAL
con-mención

en.....
El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato-(a): **ASSAEL ANTHONY FLORES KANCHA**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	19	A	Excelente	Excelencia

Candidato-(b):**JAIR EFRAIN TORRES AGÜERO**.....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	19	A	Excelente	Excelencia

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.



Presidente
Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio


Secretario
Ing. Cesar Asbel Aranda Castillo



Asesor
Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga

Miembro
Mg. Iliana Del Carmen Gutierrez Rodriguez

Miembro
Ing. Orlando Alan Poma Porras



Candidato/a (a)
Assael



Candidato/a (b)
Jair Efraín

Análisis cuantitativo de variabilidad climática en relación a la pérdida superficial con datos Landsat en nevados peruanos 2010-2020

Anthony Flores Kancha^{1*}[0000-0002-8248-4066], Jair Torres Agüero²[0000-0002-8035-2676]

^{1,2} escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión, Lima Perú

Resumen.

El cambio climático está afectando al planeta por falta de información respecto a sus temperaturas, precipitaciones y disminución del área superficial de los nevados, lo que ocasiona un alto impacto sobre el deshielo de los nevados, por ello es importante tener modelos predictivos de regresiones multivariantes que permitan pronosticar en el tiempo el área superficial de nevados. En la investigación se utilizó el modelo de regresión multivariada por cada nevado en estudio teniendo como variables regresoras a la temperatura y precipitación, y como variable dependiente al área superficial del nevado con datos obtenidos por medio de imágenes Landsat 4-5, 7 y 8 durante los años 2010-2020. Se obtuvo un modelo del nevado Huaytapallana de la forma $Y = 34.274 - 2.3197X_1 + 0.135X_2$ con p-valor = 0.034 de significancia y el nevado Coropuna con modelo de forma $Y = 101.3487 - 6.720X_1 + 0.331X_2$ teniendo p-valor = 0.036 siendo significativos para su predicción. La media de área superficial más alta fue del Coropuna (53.92 km²) con un SD de 14.94, y la más baja fue del nevado Verónica (16.16 km²) con un SD de 37.77. El nevado Huaytapallana mostró la menor reducción de área superficial disminuyendo en 7%, mientras que el nevado Verónica se redujo en 52%, siendo el más afectado de los 4 nevados, por el deshielo en estudio durante los 10 años de data analizada.

Palabras clave: regresión múltiple, variabilidad climática, retroceso glaciar, imágenes Landsat, nevados peruanos.

1 Introducción

Las temperaturas a nivel global debido al cambio climático se han incrementado en 0.85°C desde el año 1880 hasta la última década [1];[2]. Todo esto ha ocasionado variaciones anormales sobre la precipitación, clima, factores ambientales, entre otros [1]. Frente a esta situación, los glaciares de alta montaña presentan una elevada vulnerabilidad al cambio climático, como respuesta a la alteración de la temperatura del aire y la precipitación, responsables de mantener el volumen del glaciar [3]. Esta sensibilidad a la variación climática hace de los glaciares un indicador indispensable del calentamiento global [4];[5];[6]. A nivel mundial, los efectos del cambio climático no son uniformes, sino que varían de un punto a otro [4]. Tales efectos son más evidentes en las

regiones montañosas ubicadas en las zonas tropicales del planeta, donde se ha observado pérdida significativa del volumen glacial [6];[7].

El Perú posee una serie de nevados, glaciares, y montañas quienes se están viendo afectados por el incremento de la temperatura y variaciones de precipitación [8];[9]; [10]. Gutiérrez B. [11] reportó la disminución que el 71% de los glaciares incluyendo el nevado Huaytapallana en un periodo de 27 años registró una pérdida de 446 km². Silverio [12] reportó en el estudio del nevado Coropuna desde el año 1962 a 2010 que éste disminuyó un 43% de su área superficial.

Debido a que la reacción de los glaciares frente al cambio climático es diferente, se complica la comprensión de su comportamiento a nivel general [13]. Esta comprensión facilita la aplicación de métodos adecuados de gestión para disminuir los efectos del cambio climático [3]. Por lo cual, el Perú es una región apta para estudios del retroceso de glaciares relacionado con el tipo de ecosistema que presenta por región, ya que estas diferencias propician las condiciones de variación climática tan marcada [9]. De este modo se podrá determinar la influencia de la variabilidad climática del Perú sobre el retroceso de los nevados de estudio, en periodos de tiempos determinados.

Actualmente para medir si un glaciar incrementó o redujo su superficie se utilizan datos provenientes de satélites, esto debido a su efectividad y facilidad tecnológica para identificar el retroceso de los glaciares y su relación con valores climáticos [2]. Díaz et al. [14] usaron datos del satélite Landsat 2, Landsat 5, Landsat 8 OLI/TIRS, reportando la pérdida del 67% del área cubierta en los últimos 40 años realizados en los nevados Allin Capac y Chichi Cápac de la cordillera Caraballa.

Es por ello, que el objetivo de esta investigación es analizar cuantitativamente la variabilidad climática y pérdida superficial de cuatro nevados ubicados en el Perú por un periodo de 10 años (2010-2020) con modelos predictivos de regresión multivariada con la temperatura y precipitación como variables regresoras.

2 Revisión de la Literatura

2.1 Antecedentes

En un estudio realizado por Tang [15], se evaluó de qué manera actúa el cambio climático y cómo afecta éste en el retroceso de los glaciares de Xinjiang en los últimos 50 años. Utilizaron valores climatológicos de 49 estaciones meteorológicas ubicadas en los alrededores de las montañas Tianshan y zonas al norte y sur de esta región, empleando métodos como el diagnóstico estadístico meteorológico, modelos climáticos de la región, teledetección y sistema de información geográfica. En otoño e invierno se mostró una tendencia ascendente en cuanto a la temperatura mientras que la precipitación tuvo un resultado similar en el área de estudio, todo esto en los últimos 50 años. El balance material de los glaciares mostró ser negativo, lo cual denota un aumento de las temperaturas en las regiones montañosas, y a su vez un incremento de las precipitaciones, mas no en el área glaciar, sino en la cuenca circundante. Lo que incrementará la velocidad de ablación en Xinjiang.

La investigación realizada por Kobierska [16] de modelado en hidrología en una represa hidroeléctrica en Suiza, en donde se hizo una evaluación de un modelo de balance de energía y un sistema de escorrentía que contiene un patrón de deshielo en relación a la temperatura. Los datos provenientes de las estaciones meteorológicas fueron repartidos como datos de reforzamiento, además se emplearon predicciones climáticas provenientes de ENSEMBLES en un periodo que abarca desde los años 30 hasta el siglo XXI. El caudal de abastecimiento de agua de la central hidroeléctrica fue utilizado como dato para valorar la reacción al cambio climático. Los resultados muestran que el caudal de abastecimiento es menor, cada primavera, durante el tiempo de estudio. Esto demuestra que, la cantidad de agua disponible irá en disminución por causa del derretimiento de los nevados donde se originan, que a su vez están siendo afectados por el cambio climático.

2.1.1 Variabilidad climática

A nivel global, el clima no presenta uniformidad, dependiendo del área geográfica, éstos suelen variar desde un punto a otro, lo que da como resultado un abanico de climas diversos en todo el mundo [4]. Todo esto como resultado de factores tales como cordilleras, corrientes marinas, la latitud y longitud geográfica, entre otros; generando una cantidad de 32 climas diferentes en todo el planeta [17].

2.1.2 Retroceso de Nevados

El retroceso a gran escala en los últimos 10 años de los glaciares de montaña es un claro indicador del aumento de las temperaturas globales, que es provocado por el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera como resultado de las actividades humanas generando a su vez cambios sobre el clima y afectando la capacidad de supervivencia de los seres humanos y las especies no humanas en el planeta [11].

2.2 Situación de los Glaciares de Montaña en el Perú

La formación de glaciares en el Perú está asociada a la cordillera de los Andes y que se esparce con una extensión larga alrededor de la zona. En el Perú se cuenta con dieciocho cordilleras nevadas, dos de ellas extintas, distribuidas en el norte, centro y sur [18]. La situación de deshielo de estas montañas afecta no sólo a la disponibilidad de agua en la zona, sino al sector económico y agrícola del país [19].

2.2.1 Clima de la Región Andina

Las condiciones climatológicas en la región andina están determinadas principalmente por la altitud de la zona variando drásticamente según el piso altitudinal, teniendo influencia además de las corrientes marinas [20]. Estas condiciones son influyentes en los nevados, teniendo un régimen por patrones que circulan en el ambiente, forzados por variaciones de radiación solar

y topografía [18]. Este comportamiento del clima tiene como responsable a la cantidad de humedad que dirigen las condiciones meteorológicas y la cantidad de los vientos [21].

2.3 Análisis de Regresión

El análisis de regresión pertenece a uno de los procedimientos metodológicos más útiles y recurrentes para la comparación estadística de datos. Mediante este procedimiento se pueden analizar las relaciones entre variables distintas y averiguar si una determinada variable está siendo influida; este método puede aplicarse en búsqueda de una verdad, buscar explicaciones y en realizar predicciones. Por lo tanto, el análisis de regresión es determinante para todas las ciencias empíricas [22].

2.3.1. Regresión Múltiple

La regresión multivariada es eficaz para concretar un conjunto de variables importantes, con una alternativa que se centra en un método de selección de modelos que no se ejecute secuencialmente, sino que estime cada modelo por su propio derecho [23].

Sengupta [24] destacó que en la regresión multivariada en estudios medioambientales sobresalen modelos predictores, circulares y lineales.

2.3.2. Validación de los modelos de regresión

Para la validación de un modelo de regresión multivariada, se analiza la reacción entre variables con la intención de generar un modelo, seleccionando los mejores valores predictores y validar si se encuentra en una condición óptima para su uso. Culminando con la identificación de posibles valores atípicos [25].

3 Materiales y Métodos

3.1 Área de Estudio

En total fueron evaluadas cuatro nevados ubicados en las cordilleras: Huaytapallana (Lat: 11°54'40.36''S, Long: 75°03'08.18''O), Urubamba (Lat: 13°09'55.17''S, Long: 72°19'31.44''O), Ampato (Lat: 13°09'55.17''S, Long: 72°19'31.44''O) y Blanca (Lat: 9°07'20.57''S, Long: 77°22.85''O), pertenecientes a la cadena montañosa de los Andes centrales en el Perú [26]. Esta selección de los nevados se realizó en base a las características climatológicas propias del lugar y según el tipo de vegetación que lo rodeaba.

Las cordilleras seleccionadas presentan climas muy diferentes entre sí; la cordillera del Urubamba está rodeado por un ecosistema de selva alta, con un clima altamente húmedo y lluvioso [27], en tanto que la cordillera de Ampato está rodeada de un ecosistema desértico con un clima seco y con pocas precipitaciones, mientras que la cordillera del Huaytapallana está rodeado de un ecosistema de valle andino.

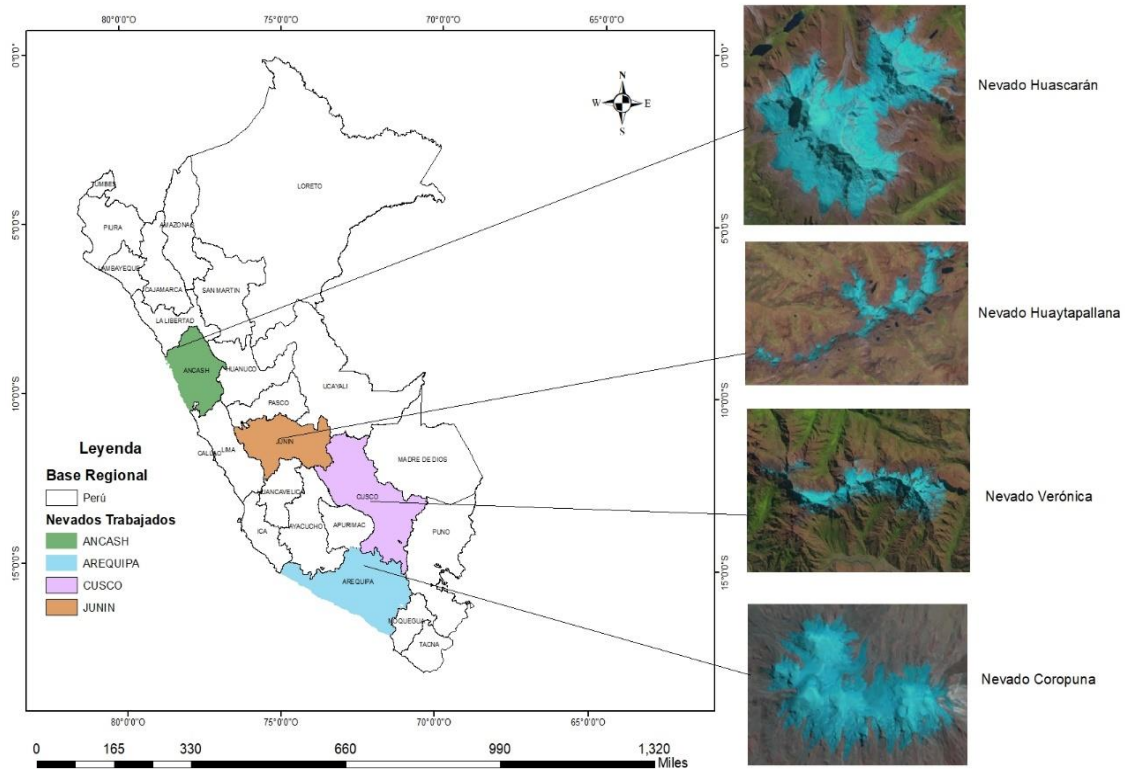


Fig. 1. Ubicación geográfica de los nevados de estudio en el Perú

3.2 Metodología de extracción de la data

Los datos de temperatura y precipitación fueron extraídos en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) y milímetros (mm) respectivamente a través del portal NASAPOWER (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) mediante el satélite Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA-2).

La información utilizada con respecto al área se basa en imágenes Landsat 4-5 TM (Thematic Mapper), Landsat 7 ETM (Enhanced Thematic Mapper), Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imagery/ Thermal Infrared Sensor). Con resolución espacial comprendidos entre los años 2010-2020, tomando muestras mensuales por año en donde la imagen estuviera libre de nubosidad. Cada imagen satelital se extrajo de la página del consorcio internacional ESA, Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) [14].

3.3 Análisis de Datos y Procesamiento

En el procesamiento de las imágenes Landsat se procedió a usar el programa QGIS desktop 3.22.1 [28], teniendo como objetivo hallar el área de cada nevado, donde se

determinó siguiendo el cálculo de Índice de Nieve Diferencial Normalizado, NDSI mostrado en la ecuación (1) [14], [29], para trabajar en la poligonización del nevado en la imagen y posteriormente determinar su superficie en Ha, que se transformó luego a km², aplicando este procedimiento a todas las imágenes ráster extraídas. Por cada nevado en evaluación, se insertaron estas 3 variables (temperatura, precipitación y área superficial), para poder determinar la influencia del clima en el periodo establecido.

$$NDSI = \frac{(Green-Swir)}{(Green+Swir)} \quad (1)$$

Donde Green representa a la banda 3 en el satélite Landsat 7 y 8 y en el satélite 4-5 representa el número 2, mientras tanto que Swir corresponde a la banda 6 en el Landsat 7 y 8 y en el Landsat 4-5 corresponde a la banda 5.

3.4 Diseño experimental

Se utilizó una estadística descriptiva para el análisis de datos entre temperatura y precipitación sobre el área superficial, mediante el uso del método de regresión multivariada para evaluar el grado de influencia entre estos parámetros en los nevados Huaytapallana, Verónica, Coropuna y Huascarán durante el periodo 2010-2020. Además, se analizó la normalidad sobre los datos de cada variable (precipitación, temperatura y área superficial) para confirmar la técnica estadística obteniendo un p-valor dentro del parámetro establecido, dando validez a la aplicación del método de regresión multivariada y así determinar la correlación entre las variables estudiadas.

Teniendo la data trabajada se propuso crear un modelo estadístico de regresión multivariada para cada nevado en un periodo de 10 años, con el objetivo de predecir el área superficial futura en base a la precipitación y temperatura estimada.

4 Resultados

4.1 Estadísticos descriptivos por nevados de la variable temperatura

En la tabla 1 se muestra la variable regresora temperatura; en primer lugar, tenemos el nevado verónica con un promedio de 13.64 °C con un error de 0.69 en un intervalo de confianza del 95% correspondiente a [13.52;13.75], teniendo una temperatura mínima de 11.96 °C y una temperatura máxima de 15.21 °C, en segundo lugar, se tiene el nevado Huaytapallana con un promedio de temperatura de 8.82 °C con un error de 0.73 en un intervalo de confianza del 95% correspondiente a [8.70;8.95] y con una un valor de temperatura mínimo de 6.92 °C y uno de temperatura máxima de 10.°C. Las cifras de temperatura más bajas se presentaron en el nevado Coropuna, con una media de 7.56 °C con un error de 0.97 en un intervalo de confianza del 95% correspondiente a [7.30;7.62]. teniendo valores de temperatura mínima de 5.47°C y máxima de 9.56 °C.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de la temperatura en los nevados estudiados

Nevados	Media aritmética	SD	Mínimo	Máximo	95% LCL Media	95% UCL Media
Verónica	13.637	0.688	11.96	15.21	13.52	13.75
Huaytapallana	8.823	0.734	6.92	10.25	8.70	8.95
Huascarán	8.364	0.880	5.81	10.14	8.21	8.51
Coropuna	7.562	0.970	5.47	9.56	7.30	7.62

4.2 Estadísticos descriptivos por nevados de la variable precipitación

En la tabla 2 se observa la variable regresora precipitación: primero destaca el nevado Verónica con una media de 60.97 mm, con un error de 59.66 para un intervalo de confianza del 95% que corresponde a [50.70;71.23], donde se aprecia un valor de precipitación mínimo de 0.02 mm y un valor de precipitación máximo de 287.82 mm, en segundo lugar se encuentra el nevado Huascarán que muestra una media de 45.87 mm. El valor promedio más bajo en cuanto a precipitación se aprecia en el nevado Coropuna, ya que posee una media de 21.52 mm con un error de 26.18 en un intervalo de confianza de 95% correspondiente a [17.01;26.02], se destaca un valor mínimo de 0 mm, y un valor máximo de 122.31 mm, siendo los valores más bajos de todos los nevados estudiados.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de la precipitación en los nevados estudiados

Nevados	Media aritmética	SD	Mínimo	Máximo	95% LCL Media	95% UCL Media
Verónica	60.97	59.66	0.02	287.82	50.70	71.23
Huascarán	45.87	46.90	0.86	256.67	37.79	53.94
Huaytapallana	30.29	29.15	0.17	163.23	25.27	35.30
Coropuna	21.52	26.18	0	122.31	17.01	26.02

4.3 Estadísticos descriptivos por nevados de la variable área

Los estadísticos descriptivos de la variable dependiente área superficial mostrada en la tabla 3 muestran que el nevado Coropuna tiene una media superior a los demás nevados con una superficie promedio 53.92 km² con un error de 14.94 en un intervalo de confianza del 95% que corresponde a [49.38;58.46]; El nevado Huascarán y el nevado Verónica presentaron una media de 47.68 km² y 21.49 km² respectivamente. Por último, el valor promedio en superficie más bajo fue del nevado Huaytapallana con una

media de 16.16 km² y un error de 3.77 en un intervalo de confianza del 95%, con valores máximo y mínimo de 25.33 km² y 10.71 km² respectivamente.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos del área superficial en los nevados estudiados

Nevados	Media aritmética	SD	Mínimo	Máximo	95% LCL Media	95% UCL Media
Coropuna	53.92	14.94	37.41	111.02	49.38	58.46
Huascarán	47.68	9.76	35.9	61.51	45.55	49.81
Verónica	21.49	8.48	12	50.61	18.74	24.24
Huaytapallana	16.16	3.77	10.71	25.33	14.95	17.37

4.2. Interpretación estadística gráfica por nevados

En la Figura 2 se muestra el diagrama de cajas entre la temperatura y los nevados, la cual muestra que en el nevado Verónica la temperatura es mayor con respecto a los demás con un valor promedio de 13.64 °C. Esto se complementa con el hecho de que este nevado se encuentra cercano a un clima tropical selvático, con temperaturas muy elevadas en temporada de verano, contrastando con las condiciones climatológicas propias de las regiones altoandinas en donde la temperatura máxima suele alcanzar los 10°C [29], y la temperatura media mostrada por el nevado Verónica supera esta cuota.

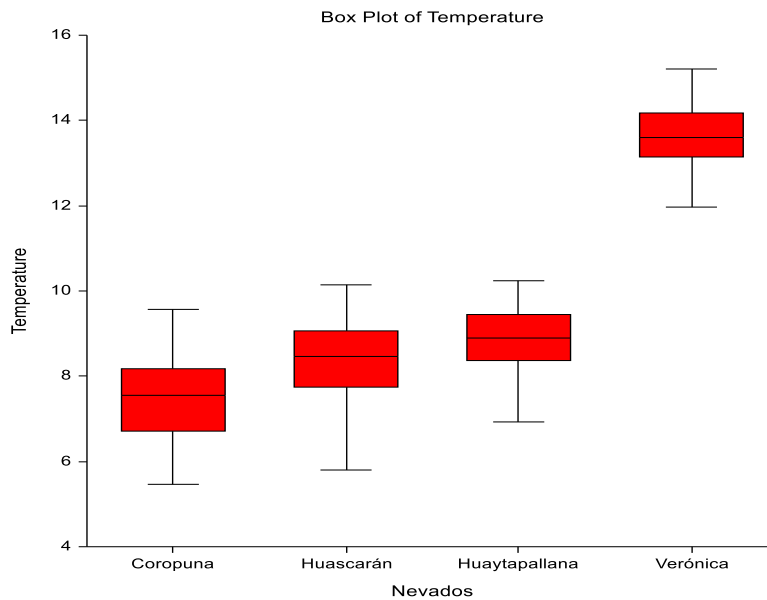


Fig. 2. Diagrama de cajas presentando el valor máximo, la mediana y el valor mínimo de la temperatura en relación a los nevados

En la Figura 3 se muestra el diagrama de cajas entre la precipitación y los nevados de estudio, donde se presentan ciertos valores espurios en los nevados, destacando el Huascarán y el Verónica, los cuales corresponden al mes de diciembre en donde se tuvo un fenómeno anómalo que ocasionó estas cifras excedentes.

El nevado Huascarán muestra un valor espurio de 256.67 mm de precipitación, mientras que en el nevado Verónica se aprecian 2 valores espurio que sobrepasan los 250 mm; con 262.96 mm y 287.82 mm.

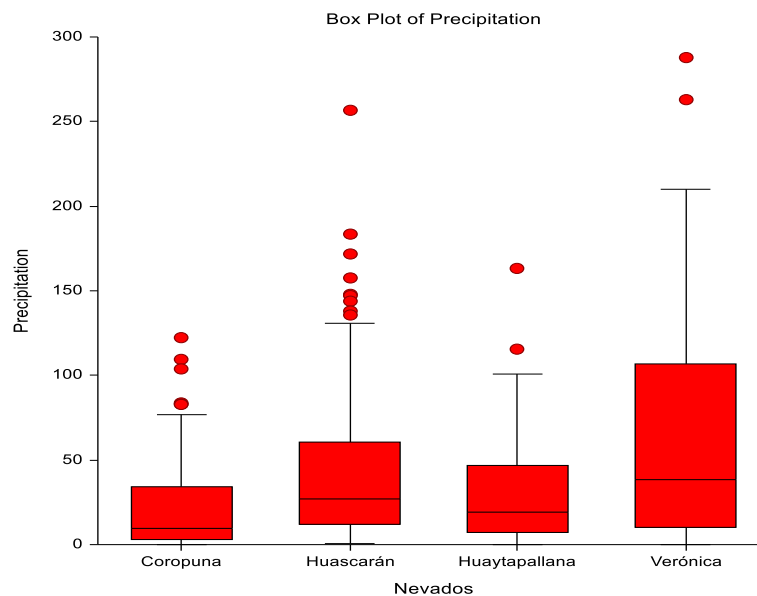


Fig. 3. Diagrama de cajas presentando el valor máximo, la mediana y el valor mínimo de la precipitación en relación a los nevados

El diagrama de cajas que se presenta en la figura 4, muestra los valores de la superficie en km^2 , de los cuales los valores espurios se presentan sólo en los nevados Coropuna y Verónica.

El nevado Verónica tienen un valor espurio de 40.74 km^2 (Ago, 2013) y 50.61 km^2 (Jul, 2018) mientras que el nevado Coropuna presenta 3 valores espurio; de 97.38 km^2 (May, 2011), de 83.95 km^2 (Ago, 2012) y el más alto de 111.02 km^2 (May, 2012). Estas cifras corresponden al fenómeno del niño ocurrido en ese mismo año [30].

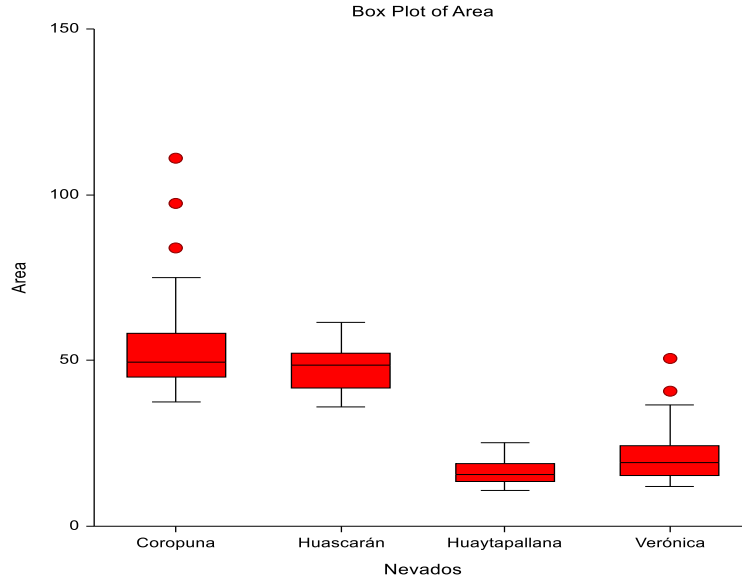


Fig. 4. Diagrama de cajas presentando el valor máximo, la mediana y el valor mínimo del área en relación a los nevados

4.4 Modelos estadísticos de predicción multivariable por nevado

Un modelo de regresión multivariada tiene n variables regresoras y una variable dependiente [22]. En la investigación, se analizaron dos variables regresoras, la primera es la temperatura en los nevados y la segunda es la precipitación que son datos recogidos con Landsat durante 10 años y una variable dependiente que es el área superficial de los nevados cuyo modelo de predicción para los nevados se muestra en la ecuación (2).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (2)$$

Donde y = Área superficial (variable dependiente), X_1 = Temperatura y X_2 = Precipitación

4.4.1. Modelo de regresión del nevado Huaytapallana

El modelo estadístico de la ecuación (3) en base a los análisis estadísticos de regresión multivariada nos permite hacer una predicción a futuro sobre el comportamiento del área superficial del nevado Huaytapallana considerando valores de temperatura y precipitación estimada.

$$Y = 34.274 - 2.3197X_1 + 0.135X_2 \quad (3)$$

El modelo de regresión múltiple mostrado en la ecuación (3) indica que cada aumento de una unidad de la temperatura multiplicado con su coeficiente de regresión (2.3197 °C) provocan la disminución del área superficial del nevado Huaytapallana, por otro lado, por cada aumento de la unidad de precipitación multiplicado con su coeficiente de regresión (0.135 mm) ocasiona el aumento del área superficial del nevado.

Tabla 4. Análisis de detalle de varianza del modelo estadístico del nevado Huaytapallana

Fuente	R ² perdido si se eliminan los términos	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Relación F	P-valor	Nivel de confianza
Intercepto		10447.44	10447.44			
Modelo	0.1671	92.75925	46.37962	3.712	0.034	0.6447
Temperatura	0.1411	78.29988	78.29988	6.266	0.0168	0.6837
Precipitación	0.0899	49.90654	49.90654	3.994	0.053	0.4947
Error	0.8329	462.3154	12.49501			
Total (Ajuste)		555.0746	14.23268			

En la tabla 4 el modelo de regresión multivariada es confiable en su predicción ya que su p-valor es igual 0.034 que por ser menor al nivel de confianza $\alpha = 5\%$ permite predecir el área superficial del nevado Huaytapallana. Así mismo la temperatura tiene un p-valor 0.0168 que hace significativo la variable regresora, además la precipitación tiene un p-valor de 0.053 que es igual al nivel de significancia el cual también contribuye a que el modelo sea confiable.

4.4.2. Modelo de regresión del nevado Verónica

El modelo estadístico mostrado en la ecuación (4) basado en los análisis estadísticos de regresión multivariada está diseñado para hacer una predicción a futuro sobre el comportamiento de la superficie del nevado Verónica considerando valores estimados de temperatura y precipitación.

$$Y = 74.7531 - 4.128X_1 + 0.164X_2 \quad (4)$$

Según el modelo de regresión multivariada que se muestra en la ecuación (4) indica que cada aumento de una unidad de la temperatura multiplicado con su coeficiente de regresión (4.128 °C) produce la disminución del área superficial del nevado Verónica, por otro lado, por cada aumento de la unidad de precipitación multiplicado con su coeficiente de regresión (0.164 mm) ocasiona el incremento del área superficial del nevado.

Tabla 5. Análisis de detalle de varianza del modelo estadístico del nevado Verónica

Fuente	R ² perdido si se eliminan los términos	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Relación F	P-valor	Nivel de confianza
Intercepto		18010.55	18010.55			
Modelo	0.0897	245.1246	122.5623	1.774	0.1841	0.3468
Temperatura	0.0841	229.7504	229.7504	3.326	0.0765	0.4268
Precipitación	0.0352	96.23923	96.23923	1.393	0.2456	0.2096
Error	0.9103	2486.617	69.07269			
Total (Ajuste)		2731.741	71.88793			

En la tabla 5 el modelo de regresión no es confiable para su predicción pues tiene un p-valor de 0.184 que al ser mayor al nivel de confianza $\alpha = 5\%$ la predicción del área superficial del nevado Verónica no es segura. Así mismo, el p-valor de la temperatura y precipitación superan el nivel de confianza del 5% con cifras de 0.0765 y 0.245 respectivamente. Esto demuestra que la temperatura casi no tiene influencia sobre la superficie del nevado mientras que la precipitación no afecta en nada a la disminución del área del nevado Verónica.

4.4.3. Modelo de regresión del nevado Coropuna

El modelo estadístico mostrado en la ecuación (5) está basado en análisis de regresión multivariada, este modelo permite hacer una predicción sobre la superficie del nevado Coropuna para años futuros, considerando datos estimados de las variables climáticas de temperatura y precipitación.

$$Y = 101.3487 - 6.720X_1 + 0.331X_2 \quad (5)$$

Según el modelo de regresión multivariada que se muestra en la ecuación (5) indica que cada aumento de una unidad de la temperatura multiplicado con su coeficiente de regresión (6.720 °C) produce la disminución del área superficial del nevado Coropuna, por otro lado, por cada aumento de la unidad de precipitación multiplicado con su coeficiente de regresión (0.331 mm) ocasiona el incremento del área superficial del nevado.

Tabla 6. Análisis de detalle de varianza del modelo estadístico del nevado Coropuna

Fuente	R ² perdido si se eliminan los términos	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Relación F	P-valor	Nivel de confianza
Intercepto		127936	127936			
Modelo	0.1492	1431.975	715.9874	3.596	0.0364	0.6337
Temperatura	0.1474	1414.36	1414.36	7.103	0.011	0.7397
Precipitación	0.0411	394.7534	394.7534	1.983	0.1667	0.2798
Error	0.8508	8163.729	199.1153			
Total (Ajuste)		9595.704	223.1559			

Según la tabla 6 el modelo de regresión es confiable en su predicción ya que muestra un p-valor de 0.036 siendo mayor al nivel de confianza $\alpha = 5\%$. Esto permite predecir el área superficial futura del nevado Coropuna. Del mismo modo la temperatura tiene un p-valor de 0.011 lo que hace significativo la variable regresora. En cambio, la precipitación posee un valor de 0.1667, lo cual indica la poca influencia de la precipitación sobre el cambio superficial del nevado; sin embargo, esto no afecta con la confiabilidad del modelo.

4.4.4 Modelo de regresión del nevado Huascarán

El modelo estadístico mostrado en la ecuación (6) está basado en análisis de regresión multivariada, este modelo permite hacer una predicción sobre la superficie del nevado Huascarán para años futuros, considerando datos estimados de las variables climáticas de temperatura y precipitación.

$$Y = 35.5226 + 1.352X_1 + 0.042X_2 \quad (6)$$

Según el modelo de regresión multivariada que se muestra en la ecuación (6) indica que cada aumento de una unidad de la temperatura multiplicado con su coeficiente de regresión (1.352 °C) produce el aumento del área superficial del nevado Huascarán, así mismo, por cada aumento de la unidad de precipitación multiplicado con su coeficiente de regresión (0.042 mm) ocasiona el incremento del área superficial del nevado.

Tabla 7. Análisis de detalle de varianza del modelo estadístico del nevado Huascarán

Fuente	R ² perdido si se eliminan los términos	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Relación F	P-valor	Nivel de confianza
Intercepto		93203.91	93203.91			
Modelo	0.1198	218.9204	109.4602	2.587	0.0884	0.4849
Temperatura	0.0437	79.86727	79.86727	1.888	0.1775	0.2679
Precipitación	0.0424	77.50047	77.50047	1.832	0.1839	0.2614
Error	0.8802	1607.89	42.31289			
Total (Ajuste)		1826.81	45.67026			

La tabla 7 muestra que el modelo de regresión no es tan confiable para la predicción, pues posee un p-valor de 0.088 siendo moderadamente mayor al nivel de confianza $\alpha = 5\%$. Esto se corrobora con el p-valor de la temperatura que tiene una cifra de 0.178 mostrando una baja influencia de la temperatura sobre el área superficial, lo mismo con la variable de precipitación, con un p-valor de 0.18, que en conjunto hacen que el modelo para este nevado no sea tan confiable.

5 Conclusiones

Todos los glaciares del estudio muestran una reducción de su superficie con respecto a su área inicial en el periodo 2010-2020. Siendo el nevado Huaytapallana el que mostró menor retroceso superficial con respecto a los demás nevados, ya que sólo se redujo un 7%, mientras que el nevado Verónica fue el que tuvo mayor pérdida superficial, ya que se redujo un 52% desde el año 2010; esto se complementa que a menor superficie glaciar más propenso está a perder área superficial frente al calentamiento global [31], [32] lo cual explica por qué las variables de investigación temperatura y precipitación no tienen influencia sobre el aumento/reducción del área superficial del nevado Verónica, evidenciando que su reducción es ocasionada por otros factores, como el carbono negro debido a una carretera cercana; esto reduce la capacidad de albedo tan importante en los nevados y aumenta su retroceso de área superficial [31]–[33].

Sin embargo, lo mencionado en estas investigaciones respecto al área y el retroceso de los nevados [31], [32] no se cumple con el nevado Huaytapallana, el cual posee una superficie similar al Verónica y tuvo el menor porcentaje de reducción de los 4 nevados estudiados, mostrando a su vez estar influenciado por las variables meteorológicas, sobre todo por la temperatura. Esta poca reducción de su área superficial podría deberse a la presencia de lagunas de tamaño medio alrededor del nevado, lo cual disminuye el efecto reductor de la temperatura [34], la topografía podría influir también en la poca

reducción en el albedo del glaciar, pues el Huaytapallana se encuentra bajo un relieve muy pronunciado [32], [35].

En el Caso del nevado Coropuna, se presenta una reducción considerable desde el 2010-2020. Según Bolch [4] un glaciar de tamaño mediano a grande no se ve afectado considerablemente en su área por los cambios en el clima que pudieran suceder, en cambio, este nevado que presenta esas características superficiales, muestra ser afectado enormemente por las condiciones climatológicas, principalmente por la temperatura.

La variable temperatura mostró tener una gran influencia sobre la reducción de los nevados Huaytapallana ($\bar{x} = 8.8^{\circ}C$) y Coropuna ($\bar{x} = 7.56^{\circ}C$), mientras que la precipitación, mostró igualmente una influencia considerable sobre los nevados Huaytapallana ($\bar{x} = 30.29\text{ mm}$) y Coropuna ($\bar{x} = 21.52\text{ mm}$), esta variable es muy importante debido a que sus efectos sobre el deshielo son más pronunciados en latitudes bajas [2], [34].

Los modelos de regresión multivariada que se encontraron confiables por su p-valor menor al nivel de significancia ($\alpha=5\%$) en primer lugar fue el nevado Huaytapallana (p-valor = 0.034) y en Segundo lugar el nevado Coropuna (p-valor = 0.036). Estos modelos de regresión en el estudio los hace eficientes en su predicción del área superficial según la variabilidad que se pueda presentar, en cuanto a los modelos que no resultaron confiables, amerita una mayor investigación, siendo su p-valor son mayores a $\alpha=5\%$.

Con los dos modelos predictivos que se han mostrado eficientes por su p-valor contribuyen a los esfuerzos para reducir el deshielo de los nevados producto del cambio climático, ya que permiten predecir áreas futuras teniendo en cuenta sus condiciones climáticas (temperatura y precipitación), que son muy variadas en cada lugar.

REFERENCES

- [1] R. Gan, Y. Luo, Q. Zuo, and L. Sun, "Effects of projected climate change on the glacier and runoff generation in the Naryn River Basin, Central Asia," *Journal of Hydrology*, vol. 523, pp. 240–251, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2015.01.057.
- [2] Y. J. Li, Y. J. Ding, D. H. Shangguan, and R. J. Wang, "Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015," *Advances in Climate Change Research*, vol. 10, no. 4, pp. 203–213, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.ACCRE.2020.03.003.
- [3] Y. Liu *et al.*, "Analyzing effects of climate change on streamflow in a glacier mountain catchment using an ARMA model," *Quaternary International*, vol. 358, pp. 137–145, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.QUAINT.2014.10.001.
- [4] T. Bolch, "Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data," *Global and Planetary Change*, vol. 56, no. 1–2, pp. 1–12, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.GLOPLACHA.2006.07.009.
- [5] J. Brown, J. Harper, and N. Humphrey, "Cirque glacier sensitivity to 21st century warming: Sperry Glacier, Rocky Mountains, USA," *Global and Planetary*

- Change*, vol. 74, no. 2, pp. 91–98, Nov. 2010, doi: 10.1016/J.GLOPLACHA.2010.09.001.
- [6] A. Emmer *et al.*, “Glacier retreat and associated processes since the Last Glacial Maximum in the Lejiamayu valley, Peruvian Andes,” *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 109, p. 103254, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JSAMES.2021.103254.
- [7] G. Singh, D. Bandyopadhyay, B. R. Nela, S. Mohanty, R. Malik, and A. v. Kulkarni, “Anomalous glacier thinning due to climate feedback mechanism in the Himalaya and evidences in other mountain ranges,” *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 22, p. 100512, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.RSASE.2021.100512.
- [8] J. Moat *et al.*, “Seeing through the clouds – Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 103, p. 102468, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jag.2021.102468.
- [9] P. C. Salazar, R. M. Navarro-Cerrillo, G. Cruz, and R. Villar, “Intraspecific leaf functional trait variability of eight *Prosopis pallida* tree populations along a climatic gradient of the dry forests of northern Peru,” *Journal of Arid Environments*, vol. 152, pp. 12–20, May 2018, doi: 10.1016/j.jaridenv.2018.01.010.
- [10] D. H. Sandweiss, K. A. Maasch, F. Chai, C. F. T. Andrus, and E. J. Reitz, “Geoarchaeological evidence for multidecadal natural climatic variability and ancient Peruvian fisheries,” *Quaternary Research*, vol. 61, no. 3, pp. 330–334, May 2004, doi: 10.1016/j.yqres.2004.02.008.
- [11] Gutierrez Wilfredo, “Effects of cultural patterns in ecosystem degradation Huaytapallana Snowy,” 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/263265360>
- [12] W. Silverio, “Impacto del Cambio Climático en el Nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Arequipa, Perú) y en el Recurso Hídrico,” *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, no. 4, Jun. 2018, doi: 10.36580/rgem.i4.43-56.
- [13] E. Joya, M. T. Bromand, K. O. Murtaza, and R. A. Dar, “Current glacier status and ELA changes since the Late Pleistocene in the Hindu Kush Mountains of Afghanistan,” *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 219, p. 104897, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JSEAES.2021.104897.
- [14] R. D. Díaz Aguilar, S. V. Sanchez Larico, E. Lujano Laura, and A. Lujano Laura, “Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciaria en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú,” *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, vol. 19, no. 3, pp. 265–274, Sep. 2017, doi: 10.18271/RIA.2017.291.
- [15] X. ling Tang, X. Lv, and Y. He, “Features of climate change and their effects on glacier snow melting in Xinjiang, China,” *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 345, no. 2, pp. 93–100, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.CRTE.2013.01.005.
- [16] F. Kobierska *et al.*, “Climate change effects on snow melt and discharge of a partly glacierized watershed in Central Switzerland (SoilTrec Critical Zone Observatory),” *Applied Geochemistry*, vol. 26, no. SUPPL., pp. S60–S62, Jun. 2011, doi: 10.1016/J.APGEOCHEM.2011.03.029.

- [17] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, “World map of the Köppen-Geiger climate classification updated,” *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 15, no. 3, pp. 259–263, Jun. 2006, doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- [18] INAIGEM, “Informe de la Situación de los Glaciares y Ecosistemas de montaña,” 2017.
- [19] S. Gubler *et al.*, “Twinning SENAMHI and MeteoSwiss to co-develop climate services for the agricultural sector in Peru,” *Climate Services*, vol. 20, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.CLISER.2020.100195.
- [20] G. Obregón *et al.*, “CLIMATE SCENARIOS FOR PERU TO 2030,” 2009. [Online]. Available: <http://www.senamhi.gob.pe><http://www.senamhi.gob.pe>
- [21] M. Saavedra, M. Calvo, and Y. César Jiménez, “Caracterización climática de la circulación atmosférica en América del Sur,” 2011.
- [22] K. Backhaus, B. Erichson, S. Gensler, R. Weiber, and T. Weiber, “Multivariate Analysis,” 2021.
- [23] R. H. Shumway and D. S. Stoffer, “Time Series Analysis and Its Applications,” 2017, doi: 10.1007/978-3-319-52452-8.
- [24] A. SenGupta and F. I. Ugwuowo, “Asymmetric circular-linear multivariate regression models with applications to environmental data,” *Environmental and Ecological Statistics*, vol. 13, no. 3, pp. 299–309, Sep. 2006, doi: 10.1007/s10651-005-0013-1.
- [25] Ruiz Gazen Anne, “advances-in-contemporary-statistics-and-econometrics-2021,” 2021.
- [26] P. C. Salazar, R. M. Navarro-Cerrillo, G. Cruz, and R. Villar, “Intraspecific leaf functional trait variability of eight *Prosopis pallida* tree populations along a climatic gradient of the dry forests of northern Peru,” *Journal of Arid Environments*, vol. 152, pp. 12–20, May 2018, doi: 10.1016/j.jaridenv.2018.01.010.
- [27] C. Ponce, “Intra-seasonal climate variability and crop diversification strategies in the Peruvian Andes: A word of caution on the sustainability of adaptation to climate change,” *World Development*, vol. 127, p. 104740, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.WORLDDEV.2019.104740.
- [28] B. Sebbah, O. Yazidi Alaoui, M. Wahbi, M. Maâtouk, and N. ben Achhab, “QGIS-Landsat Indices plugin (Q-LIP): Tool for environmental indices computing using Landsat data,” *Environmental Modelling and Software*, vol. 137, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.envsoft.2021.104972.
- [29] J. I. López-Moreno *et al.*, “Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru,” *Global and Planetary Change*, vol. 112, pp. 1–11, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.GLOPLACHA.2013.10.010.
- [30] MINAM, “El fenómeno EL NIÑO en el Perú,” 2014.
- [31] M. J. Beedle, B. Menounos, and R. Wheate, “Glacier change in the Cariboo Mountains, British Columbia, Canada (1952-2005),” *Cryosphere*, vol. 9, no. 1, pp. 65–80, Jan. 2015, doi: 10.5194/TC-9-65-2015.
- [32] J. F. Calleja *et al.*, “Snow Albedo Seasonal Decay and Its Relation with Shortwave Radiation, Surface Temperature and Topography over an Antarctic ICE Cap,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and*

- Remote Sensing*, vol. 14, pp. 2162–2172, 2021, doi: 10.1109/JSTARS.2021.3051731.
- [33] S. Rodríguez, “INFORME DE RESULTADOS ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DEL CARBONO NEGRO A LA FUSIÓN DE NIEVE DE LOS GLACIARES YANAPACCHA Y SHALLAP, PARA EL PERÍODO ENTRE OCT-2015 HASTA AGO-2016. (Dpto. Ancash) Trabajo presentado por: Huaraz-diciembre de 2016,” 2016.
- [34] M. Yalcin and N. Polat, “The Impact of Glacier Surface Temperature on the Glacier Retreat of Ağrı Mountain,” *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 48, no. 10, pp. 1433–1441, Oct. 2020, doi: 10.1007/S12524-020-01167-8.
- [35] F. Taripanah and A. Ranjbar, “Quantitative analysis of spatial distribution of land surface temperature (LST) in relation Ecohydrological, terrain and socio-economic factors based on Landsat data in mountainous area,” *Advances in Space Research*, vol. 68, no. 9, pp. 3622–3640, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ASR.2021.07.008.