

Influence of Climate Factors on Huayhuash Glacier Cover Changes, 1988-2022, Ancash

Haniel Josue Torres Joaquín, MSc.¹, Aurora Shessira Hoyos García Eng.²
^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, Haniel.torres@upn.pe, n00092551@upn.pe

ABSTRACT

The objective of the present study was to explain the influence of precipitation, temperature and evapotranspiration on the changes of the glacier cover of the Huayhuash snow-capped mountain during the period 1988-2022, Ancash. For this, a study of longitudinal explanatory level was carried out, since the period from 1988 to 2022 was analyzed. The applied technique was remote sensing and the use of the NDSI index (Normalized Differential Snow Index), for glacier recognition, bar fragmentation and manual editing were considered. The climatic information of precipitation (1988-2022), temperature and evapotranspiration (1988-2016) was acquired from the PISCO-SENAMHI gridded product. The results showed a decrease in glacier cover at a rate of 0.74 km²/year. The statistical analysis of ANOVA and regression showed that temperature is the only factor influencing changes in glacier cover, statistically speaking; precipitation and evapotranspiration are part of the glaciological balance system, but their influences are not significant in the surface changes of Huayhuash snow-capped mountain. Regarding climatic variability, it is evident that precipitation and evapotranspiration show very varied behaviors; however, temperature shows a homogeneous behavior.

Key words: Temperature, precipitation, potential evapotranspiration, glacier cover and remote sensing.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Influencia de Factores Climáticos en los Cambios de la Cobertura Glaciar del Nevado Huayhuash, 1988-2022, Ancash

Haniel Josue Torres Joaquín, MSc.¹, Aurora Shessira Hoyos García Ing.²

^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, Haniel.torres@upn.pe, n00092551@upn.pe

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue explicar la influencia de la precipitación, temperatura y evapotranspiración en los cambios de la cobertura glaciar del nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022, Ancash. Para ello, se realizó un estudio de nivel explicativo longitudinal, ya que se analizó el periodo comprendido entre 1988 y 2022. La técnica aplicada fue la teledetección y el uso del índice NDSI (Índice Normalizado de Nieve Diferencial), se consideró para el reconocimiento de glaciares, fragmentación de barras y edición manual. La información climática de precipitación (1988-2022), temperatura y evapotranspiración (1988-2016) se adquirió del producto gridded de PISCO-SENAMHI. Los resultados mostraron una disminución en la cobertura glaciar a una tasa de 0.74 km²/año. El análisis estadístico de ANOVA y regresión mostró que la temperatura es el único factor que influye en los cambios de cobertura glaciar, estadísticamente hablando; la precipitación y la evapotranspiración forman parte del sistema de balance glaciológico, pero sus influencias no son significativas en los cambios superficiales del nevado Huayhuash. Respecto a la variabilidad climática, es evidente que la precipitación y la evapotranspiración muestran comportamientos muy variados; sin embargo, la temperatura presenta un comportamiento homogéneo.

Palabras clave: Temperatura, precipitación, evapotranspiración potencial, cobertura glaciar y teledetección.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha generado una alteración notable en los glaciares tropicales, destacando su vulnerabilidad ante las variaciones atmosféricas y terrestres. Estos glaciares son indicadores sensibles de los cambios climáticos, ya que su masa es altamente susceptible a las fluctuaciones del clima [11]. En el caso de los glaciares de los Andes peruanos, situados en los trópicos externos, experimentan dos estaciones claramente diferenciadas: la época de precipitaciones (diciembre a marzo) y la época seca (abril a noviembre). Ambas estaciones influyen en los procesos de ablación y acumulación, siendo la ablación constante a lo largo del año y la acumulación concentrada en la temporada de precipitaciones. Sin embargo, estos procesos se ven afectados de manera variable por las condiciones climáticas [43]. Los glaciares, en este contexto, actúan como reservas de agua, regulando su caudal a lo largo del año y liberando agua durante la época seca [31].

Los glaciares tropicales, al encontrarse en los trópicos, son especialmente sensibles a cambios en la temperatura del aire, precipitaciones, humedad y nubosidad. Su constante

ablación [15] a lo largo del año los convierte en excelentes indicadores de los procesos climáticos [19].

Los glaciares de montaña son los más afectados, pues debido a su ubicación por encima de los 4000 msnm [61], los impactos de las variables climáticas como la temperatura, cambios en las precipitaciones y las radiaciones, son más significativos [18]. La disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas, coincidiendo en el tiempo, aceleran el retroceso glaciar y pueden llevar a la desaparición irreversible de la masa glaciar [32], sin posibilidad de restauración [63].

La cobertura glaciar del nevado Huayhuash no es ajena a los problemas mencionados, ya que se encuentra ubicada en la zona norte de los nevados del Perú, dentro del departamento de Ancash a una altitud de 4150 msnm [12]. Este nevado en estudio es el principal proveedor de agua para los centros poblados de Huallapa, Huramasa, Llamac y Llaclla [92]. Asimismo, el glaciar alimenta quebradas, manantiales y acuíferos, permitiendo el desarrollo de actividades productivas en la población rural [87].

II. METODOLOGÍA

El tipo de investigación es aplicada, ya que se busca aplicar el conocimiento de la teledetección y el sistema de información geográfica en la evaluación espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huayhuash [53]. El nivel es explicativo, puesto que se busca dar a conocer la influencia de los elementos climáticos como la precipitación, temperatura y evapotranspiración en los cambios de la cobertura glaciar [71].

El diseño es no experimental de corte longitudinal, ya que no hubo manipulación ni control de las variables; por el contrario, las variables están bajo el enfoque de la observación temporal, para luego ser descritas y analizadas. El corte longitudinal se debe al periodo de estudio 1988-2022 [71].

Se dispuso de datos tabulados durante el periodo 1988 hasta 2022, que incluyen la cobertura glaciar, precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial. Los análisis estadísticos consistieron en procesos descriptivos, inferenciales y cartográficos. En el proceso inferencial, se consideró la prueba de normalidad de tipo Shapiro Wilk, puesto que la muestra temporal es inferior a 50 unidades. Luego se realizó la prueba de ANOVA de una sola vía, con el fin de conocer la influencia de los elementos climáticos de forma independiente en los cambios de la cobertura glaciar;

la decisión se basó en el valor p-value, donde magnitudes inferiores a 0.05 indican una influencia significativa entre dos variables.

Posteriormente, se aplicó la prueba de regresión lineal simple y múltiple, para conocer el coeficiente de determinación R², el cual permite explicar en magnitud la influencia determinada en la prueba de ANOVA.

III. RESULTADOS

A. Dinámica espacio-temporal de la cobertura glaciár del nevado Huayhuash

En la Figura 1, se observan los cambios en la cobertura glaciár durante el periodo 1988-2022. Es evidente que, en la proyección lineal, la disminución de la cobertura se produce a un ritmo de 0.74 km²/año. La cobertura glaciár era de 70 km² en 1988 y disminuyó a 45 km² en 2022, lo que representa una pérdida de 25 km².

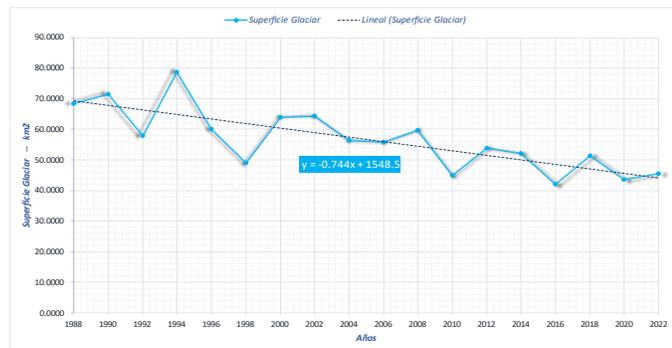


Fig. 1. Cambio superficial del nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022

La Figura 2 muestra los cambios superficiales del nevado Huayhuash. Las áreas donde ha descendido la cobertura se reflejan mediante marcas vacías internas dentro del nevado, así como una pérdida periférica de la formación glaciár.

En la Figura 3, se presentan los mapas de detección de cambio entre dos periodos. En la comparación del primer periodo (1988 – 2006), se observa en tonalidad roja todas las superficies de glaciár perdidas y en tonalidad verde las áreas de incremento de cobertura glaciár. Se aprecia que la pérdida se desarrolló en todo el nevado. En el segundo periodo (2006 – 2022), se mantiene el mismo patrón: las áreas rojas indican pérdida de cobertura glaciár, mientras que las áreas verdes muestran ganancia. En la detección de cambio de todo el periodo (1988 – 2022), se observa que, en general, la pérdida es significativa en comparación con la ganancia de cobertura glaciár, ya que las áreas de descenso son más extensas.

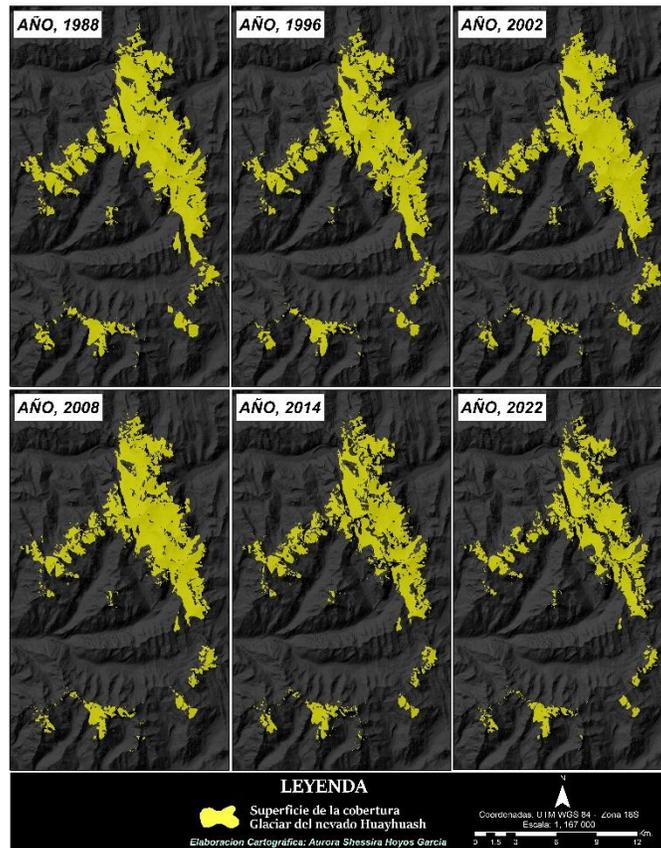


Fig. 2. Mapa temporal de la cobertura glaciár

Con relación a los cambios previstos de la cobertura glaciár durante el periodo 1988-2022, se dio por complemento la estimación de este cambio para los años 2030, 2035 y 2040, mediante una regresión lineal.

- Para X= 2030:

$$Cobertura\ Glaciár_{2030} = 1548.45 - 0.744 * 2030$$

$$Cobertura\ Glaciár_{2030} = 38.13\ km^2$$

- Para X= 2035:

$$Cobertura\ Glaciár_{2035} = 1548.45 - 0.744 * 2035$$

$$Cobertura\ Glaciár_{2035} = 34.41\ km^2$$

- Para X= 2040:

$$Cobertura\ Glaciár_{2040} = 1548.45 - 0.744 * 2040$$

$$Cobertura\ Glaciár_{2040} = 30.69\ km^2$$

B. Comportamiento de los elementos climáticos en el nevado Huayhuash

En la Figura 4, se muestra el comportamiento temporal de la precipitación en el nevado Huayhuash. Se observa un comportamiento muy variado, con una tendencia media de incremento aproximado de 6.9 mm de agua por año.

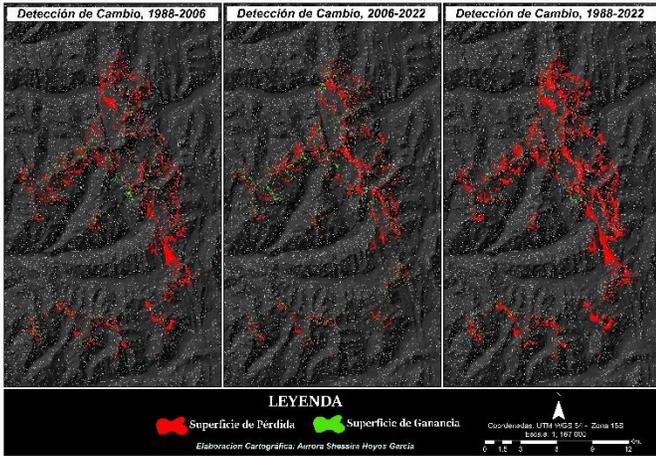


Fig. 3. Variación temporal de la precipitación

La Figura 5 presenta el comportamiento de las temperaturas en el nevado Huayhuash. Se observa un comportamiento más uniforme en comparación con la precipitación. La temperatura máxima muestra un incremento lineal aproximado de 0.027 °C por año, la temperatura mínima aumenta a razón de 0.017 °C por año, y el promedio es de 0.022 °C por año.

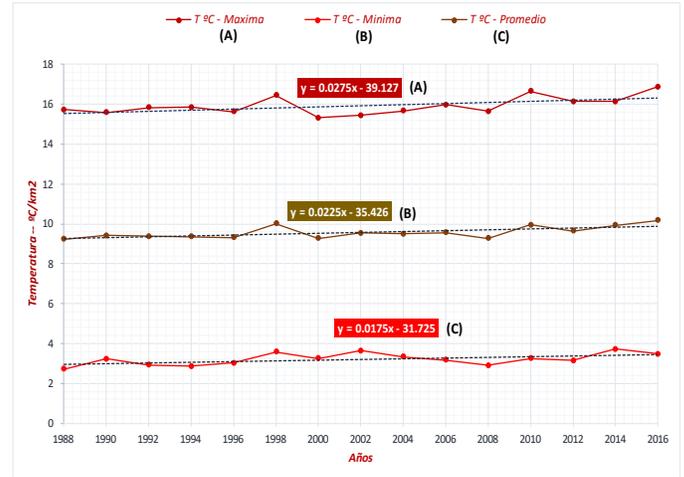


Fig. 5. Variación temporal de la temperatura

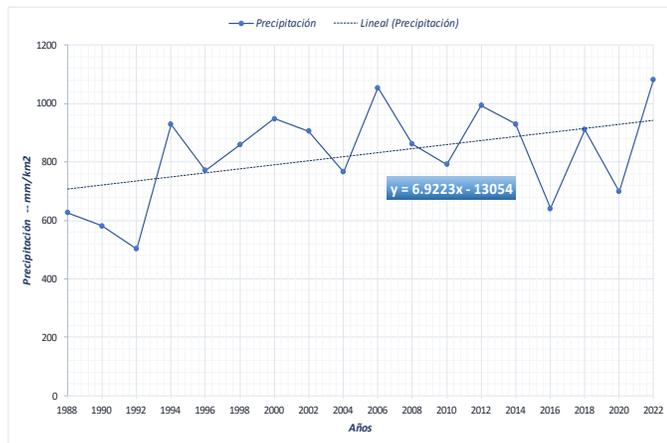


Fig. 4. Variación temporal de la precipitación.

En la figura 6, se observa el comportamiento de la evapotranspiración potencial, el cual presenta una dinámica muy variada con una tendencia ligera de descenso a una magnitud de 0.0084 mm de agua/km².

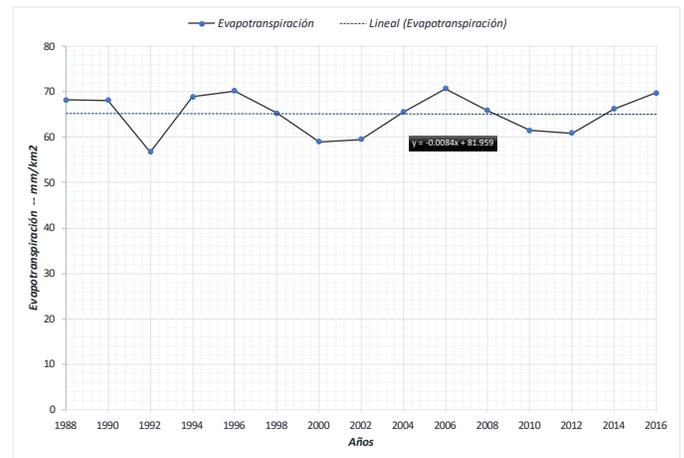


Fig. 6. Variación temporal de la evapotranspiración

C. Análisis estadísticos de la cobertura glaciar, precipitación, temperatura y evapotranspiración

Prueba de ANOVA:

La precipitación no influyó en los cambios de la cobertura glaciar, ya que el valor de p en la prueba ANOVA fue mayor que 0.05. Por otro lado, tanto la temperatura máxima, mínima y promedio demostraron influencia significativa en los cambios de la cobertura glaciar, dado que los valores de p fueron menores que 0.05. En contraste, la evapotranspiración potencial no afectó los cambios en la cobertura glaciar, ya que el valor de p fue mayor que 0.05.

TABLA I
PRUEBA ANOVA PARA PRECIPITACIÓN

ANOVA de un Factor					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-value
Entre grupos	1736.562	17	102.151	2.763	0.62
Dentro de grupos	0.000	0	31.45		
Total	1736.562	17			

Nota. Dependiente: Glaciar / Factor 1: Precipitación

TABLA 2
PRUEBA ANOVA PARA DETERMINAR INFLUENCIA DE
TEMPERATURA MÁXIMA

ANOVA de un Factor					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-value
Entre grupos	1358.53	14	97.03	5.63	0.012
Dentro de grupos	0.000	0	36.23		
Total	1358.53	14			

Nota. Dependiente: Glaciar / Factor 2a: Temperatura Máxima

TABLA 3
PRUEBA ANOVA PARA DETERMINAR INFLUENCIA DE
TEMPERATURA MÍNIMA

ANOVA de un Factor					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-value
Entre grupos	146.321	14	73.85	15.07	0.023
Dentro de grupos	2102.87	0	4.56		
Total	2251.56	14			

Nota. Dependiente: Glaciar / Factor 2b: Temperatura Mínima

TABLA 4
PRUEBA ANOVA PARA DETERMINAR INFLUENCIA DE
EVAPOTRANSPIRACIÓN

ANOVA de un Factor					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-value
Entre grupos	91.46	17	47.53	4.56	0.21
Dentro de grupos	276.4	0	10.56		
Total	698.68	17			

Nota. Dependiente: Glaciar / Factor 3: Evapotranspiración

Prueba de Regresión Lineal y Múltiple:

Tras realizar la prueba de ANOVA, se identificó que la temperatura es el único factor influyente en las variaciones de la cobertura glaciar del nevado Huayhuash.

Posteriormente, se llevó a cabo una prueba de regresión lineal independiente, considerando tanto la temperatura máxima como la mínima en relación con la variación de la cobertura glaciar. Los resultados mostraron que el R^2 ajustado para la temperatura máxima fue de 0.548, lo que indica que el 54.8% de los cambios observados en la cobertura glaciar se explican por las variaciones en la temperatura máxima. En contraste, el R^2 para la temperatura mínima fue de 0.202, sugiriendo que el 20.2% de los cambios en la cobertura glaciar se deben a variaciones en la temperatura mínima. En resumen, la temperatura máxima ejerce una influencia significativamente mayor en los cambios de la cobertura glaciar.

En cuanto a los resultados de la regresión múltiple, que analiza de manera conjunta la temperatura máxima y mínima en relación con los cambios en la cobertura glaciar, el R^2 obtenido fue de 0.607. Esto indica que el 60.7% de las variaciones en la cobertura glaciar se pueden explicar

mediante la combinación de la temperatura máxima y mínima. En resumen, se destaca una mayor capacidad explicativa cuando se consideran ambas temperaturas en conjunto, en comparación con su análisis de forma independiente.

IV. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Durante el período de 1988 a 2022, se observó un descenso en la cobertura glaciar del Nevado Huayhuash a un ritmo de 0.74 km² por año. La principal causa de este fenómeno es la variabilidad climática, que representa una amenaza significativa para los glaciares en zonas de alta montaña [13]. Este fenómeno se reflejó en un aumento de la temperatura de 0.022 °C en el Nevado Huayhuash, lo que ha llevado a una mayor fusión de la masa glaciar, tanto de nieve como de hielo [58]. La cobertura glaciar compuesta principalmente por nieve es más vulnerable a la fusión en comparación con la masa de hielo, debido a la estructura ordenada de las moléculas de agua en el hielo cristalino y la mayor resistencia a la fusión que esto conlleva [51, 93, 15].

La presencia frecuente de nieve se concentra en las zonas de ablación, situadas entre los 4500 y 5200 metros sobre el nivel del mar en el Nevado Huayhuash. Además, la cobertura glaciar con mayor acumulación de nieve se encuentra en las masas de menor espesor, que son inferiores a 1.5 metros. Esto indica que las zonas más vulnerables a la fusión debido al aumento de la temperatura son aquellas compuestas principalmente por nieve y que suelen estar ubicadas en altitudes más bajas en la montaña glaciar [17, 31, 87].

En cuanto a la fase de evaporación del agua, el incremento de temperatura no tiene un impacto significativo, ya que las montañas glaciares no experimentan temperaturas lo suficientemente altas como para provocar evaporación. Esto se debe al calor latente requerido para la evaporación, que no se alcanza con las temperaturas promedio en estas zonas [35, 48, 112]. En el Nevado Huayhuash, la temperatura promedio alcanzó solo 9.5°C y la evapotranspiración fue baja, con una magnitud de 65 mm/km².

Las precipitaciones son fundamentales para la formación de nieve y hielo, especialmente cuando se trata de precipitaciones en forma de granizo. Sin embargo, parte de estas precipitaciones se pierden debido a la escorrentía y la infiltración en suelos rocosos y meteorizados. Esto se debe a que no toda la cobertura glaciar está presente en el 100% de la montaña, lo que lleva a una pérdida de precipitaciones, especialmente en pendientes pronunciadas [92]. En el Nevado Huayhuash, esto se refleja en una disminución de las precipitaciones y una menor formación de nieve [5, 20].

Los fenómenos de El Niño y La Niña también tienen un impacto significativo en el clima del Nevado Huayhuash. El Niño, caracterizado por un aumento de la temperatura del aire en el Pacífico costero, provoca un aumento de las precipitaciones en los Andes, mientras que La Niña, que

resulta en temperaturas más frías en el litoral del Pacífico, conlleva a una disminución de las precipitaciones. Estos fenómenos son temporales y provocan cambios temporales en la cobertura glaciar [86, 94].

El descenso en la cobertura glaciar registrado en los años 1996 y 2010 se atribuye al fenómeno de La Niña de clase moderada-fuerte [86]. Este fenómeno conlleva a una disminución de la temperatura en el litoral del Pacífico, lo que resulta en una menor formación de vapor de agua en las nubes y, por consiguiente, en una reducción de las precipitaciones [31, 97, 103]. En el Nevado Huayhuash, se observaron descensos en las precipitaciones con magnitudes de 150 mm y 70 mm, respectivamente, lo que se tradujo en una menor formación de nieve [100]. Es importante destacar que estos fenómenos son temporales, lo que significa que los cambios también son de naturaleza temporal [26].

El análisis cartográfico de detección de cambio reveló un descenso en la cobertura glaciar en todo el Nevado Huayhuash, con una pérdida del 33.5 % de cobertura durante el período de 1988-2022. Esta disminución se reflejó en el aumento de lagunas superficiales alrededor del nevado. Las mayores pérdidas de cobertura glaciar ocurrieron en las zonas de ablación, correspondientes a altitudes más bajas de la montaña del Nevado Huayhuash. Se ha señalado que las zonas de ablación son más susceptibles a la fusión debido a la inestabilidad de su estado de cristalización y su mezcla con detritos [9, 21]. Esta observación es relevante, ya que se identificaron superficies de morrena glaciar con detritos o sedimentos rocosos, provenientes de avalanchas o erosiones en las cumbres altas [88, 96]. Por lo tanto, esto indica que el Nevado Huayhuash está experimentando un aumento en la zona de ablación y una disminución en la zona de acumulación, lo que se traduce en una pérdida de cobertura glaciar [17, 2]. Además, teniendo en cuenta la gradiente térmica altitudinal en la cordillera de los Andes, se observa que la temperatura ambiental es mayor en las zonas bajas que en las zonas altas [63].

En cuanto al comportamiento de las precipitaciones en el Nevado Huayhuash, se ha observado una dinámica variada con incrementos y descensos, pero con una tendencia general al aumento a un ritmo de 6.9 mm/km². Se registraron bajas precipitaciones en los años 1992, 2016 y 2020. La variabilidad de las precipitaciones se debe a la ubicación del nevado en las cadenas montañosas de la cordillera de los Andes, que impiden la salida de los vientos húmedos del Pacífico. Sin embargo, la presencia de un clima frígido en el Nevado Huayhuash incrementa el grado de humedad relativa en la zona, lo que favorece la condensación líquida [1, 105]. Además, la precipitación en el nevado también se ve influenciada por la radiación solar, que aumenta con la altitud. La evaporación resultante de las superficies hídricas, como las lagunas de origen glaciar y los suelos húmedos, es retribuida con la precipitación, lo que contribuye a un ciclo hídrico local [117, 109].

La variabilidad en el comportamiento climático también está influenciada por los fenómenos del Niño y la Niña, especialmente en sus clases moderada, fuerte y muy fuerte [73]. Estas anomalías afectan la temperatura ambiente, aumentando la evaporación y la humedad relativa, lo que puede resultar en un posterior incremento o descenso de las precipitaciones debido a la alta concentración de agua en las nubes [55]. Como se mencionó anteriormente, el fenómeno del Niño en el Nevado Huayhuash conlleva un aumento temporal de las precipitaciones, mientras que el fenómeno de la Niña provoca una disminución de las mismas [39].

En cuanto al comportamiento de las temperaturas en el nevado, se observa una dinámica más uniforme con una tendencia al incremento a un ritmo promedio de 0.022 °C/km², siendo la temperatura máxima la que presenta el mayor aumento. La variabilidad e incremento de la temperatura en el Nevado Huayhuash se atribuye a la radiación directa del sol en las montañas, con una alta magnitud media de 2191 kWh/m² [64]. A mayor altitud, la capa atmosférica de protección frente a la radiación solar es menor, lo que resulta en una mayor incidencia solar en las montañas [33]. Además, los suelos desnudos y rocosos contribuyen al incremento de la temperatura ambiental debido a su bajo albedo de 0.22 [87], lo que indica una mayor capacidad para retener la radiación solar y, por lo tanto, aumentar la temperatura y la capacidad conductora de calor [28]. Un ejemplo ilustrativo es el Nevado Quisoquipina de Cusco, donde se observó un aumento de la temperatura superficial en un 25% ante la pérdida de 10 km² de cobertura glaciar debido al incremento de suelo desnudo [48]. Por lo tanto, el aumento de la temperatura ambiental en Huayhuash se verá reflejado a medida que se exponga más suelo [84, 29].

En lo que respecta al comportamiento de la evapotranspiración potencial en el nevado, se observa una variabilidad significativa con una ligera tendencia a la disminución, con un ritmo de -0.0084 mm/km², destacando un descenso significativo en 1992. La evapotranspiración es un proceso físico en el que el agua pasa de estado líquido a gaseoso [58]. En el caso del Nevado Huayhuash, la baja evapotranspiración se refleja en el aumento del espejo de agua de las lagunas adyacentes al nevado, lo que explica únicamente el proceso físico de fusión [38]. Un estudio hidrológico en el nevado demostró un aumento del caudal del 10% entre los años 2007 y 2015, lo que sugiere un incremento del agua escurrida por las redes de drenaje de las montañas [43].

Los resultados del estudio indicaron que la precipitación no ejerció influencia significativa en los cambios de la cobertura glaciar, ya que el valor de p en el estadístico de ANOVA fue superior a 0.05. Esta falta de asociación estadística sugiere que la variabilidad de las precipitaciones no está relacionada con los cambios en la cobertura glaciar. Sin embargo, es importante destacar que, en un balance de masa glaciar, las precipitaciones son componentes fundamentales para la formación de nieve y hielo [82]. Aunque este estudio se centró en los cambios superficiales de la cobertura glaciar, es

decir, a nivel de la superficie, y no en su dimensión volumétrica, lo cual habría sido significativo en caso de una variabilidad pronunciada en las precipitaciones [66]. Además, es importante considerar que cuanto mayor sea el espesor de un glaciar, más tiempo tomará para que se evidencien cambios en su superficie debido a las capas de hielo que lo componen. Por ejemplo, el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) determinó que el espesor del glaciar en la Cordillera Blanca de Ancash varía entre 2.5 m y 8 m [69], lo que podría explicar por qué la variabilidad de las precipitaciones no influye estadísticamente en los cambios superficiales de la cobertura glaciar, dada su considerable masa de hielo.

Por otro lado, los resultados revelaron que la temperatura sí tuvo una influencia significativa en los cambios de la cobertura glaciar, ya que el valor de p en el estadístico de ANOVA fue inferior a 0.05. La temperatura es, sin duda, el factor climático más influyente en los cambios de la cobertura glaciar debido a la relación de proporcionalidad: a mayor temperatura del aire, mayor será el flujo de calor turbulento, lo que se traduce en la pérdida de cobertura glaciar, ya sea por fusión líquida [67] o por desprendimiento de masa, este último más común en las cumbres y laderas empinadas de las montañas [93], donde la temperatura desestabiliza la estructura sólida del glaciar [111]. En el Nevado Huayhuash, la pérdida de cobertura glaciar se ha manifestado tanto en forma líquida, reflejada en el aumento de lagunas superficiales, aproximadamente 11.5 km² [78], como en forma de desprendimientos, como se observó en 2018 con una superficie de 22 km² de lenguas glaciares que se desprendieron de las zonas de acumulación en las altas cumbres y terminaron en los valles [73], donde se producen las erosiones glaciológicas de montaña [120]. Es importante destacar que la temperatura es más intensa a altitudes más bajas en los glaciares, lo que indica que su impacto es más pronunciado en las zonas inferiores.

Finalmente, los resultados también indicaron que la evapotranspiración potencial no tuvo una influencia significativa en los cambios de la cobertura glaciar, ya que el valor de p en el estadístico de ANOVA fue superior a 0.05. Si bien la evapotranspiración potencial es un factor en el balance de masa de la cobertura glaciar, actuando como un componente de salida [105], su magnitud no es determinante para los cambios en la cobertura glaciar. Se ha observado una baja intensidad de aproximadamente 65 mm/km² [35], y estudios sugieren que una evapotranspiración potencial significativa para impactar la cobertura glaciar debería ser de al menos 150 mm/km², lo que generaría la evaporación de masa glaciar [54]. La baja magnitud de este fenómeno en los ecosistemas de montañas glaciares se debe al clima frío predominante en los nevados [103].

Conclusiones:

- Se demostró un descenso de 0.74 km²/año en cobertura glaciar de durante el periodo 1988-2022, estos descensos estuvieron influenciados por cambios físicos del hielo y la

nieve, que pasan a estado líquido y desprendimiento de masa en las laderas accidentadas de las montañas.

- Las precipitaciones muestran una dinámica muy variada con un incremento promedio a ritmo de 6.9 mm/km². La variabilidad de las precipitaciones se debe a los fenómenos meteorológicos La Niña y El Niño. Asimismo, se encuentra involucrada la cadena montaña de los andes tropicales, los cuales retienen las nubes cargadas de agua.
- La temperatura media ambiental en el nevado Huayhuash demostró un incremento a un ritmo de 0.022 °C/km². Este incremento se debió a la alta radiación solar y la mayor presencia de suelos desnudos/rocosos, los cuales retienen el calor y su conducción térmica ambiental.
- La evapotranspiración potencial mostró alta variabilidad en el tiempo con una tendencia ligera a descenso con ritmo de -0.0084 mm/km². El descenso se debe a que la cobertura glaciar se pierde más por fusión que por evaporación.
- La precipitación no tuvo influencia estadística en los cambios presentados de la cobertura glaciar, esto debido a su posible espesor amplio de la masa glaciar.
- La temperatura si tuvo influencia estadística en los cambios presentados de la cobertura glaciar, puesto que un incremento de la temperatura afecta la estructura de los glaciares, creando fusión líquida y desprendimiento de masa de las laderas.
- La evapotranspiración potencial no tuvo influencia estadística en los cambios presentados de la cobertura glaciar, porque su magnitud promedio solo llega a 65 mm/km² y requiere de mayor impacto para presenciar cambios en la cobertura glaciar.

REFERENCIAS

- [1] J. Alcalá-Reygosa (2019). Rock glaciers of the mountains of Mexico; a review of current knowledge and paleoclimatic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 96, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102321>.
- [2] R. Stern, Charles, Navarro H, Ximena, Pino N, Jimena D, & Vega S.M., Rodrigo M.(2008). New Obsidian Source In The Araucanía Región (South Central Chile): Chemical And Archaeological Context Of The Black Riolitic Obsidian From The Nevados De Sollipulli. *Magallania (Punta Arenas)*, 36(2), 185-193. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-22442008000200014>
- [3] G. Martínez-Alva, Y. Gheno-Heredia, P. Vieyra-Reyes (2020). Geodisponibilidad De Elementos Potencialmente Tóxicos En Suelos Agrícolas Que Representan Riesgo Para El Ambiente Y La Salud De La Población Del Nevado De Toluca, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(4), 847-856. Epub 13 de septiembre de 2021. <https://doi.org/10.20937/rica.53614>
- [4] C. Jasso-Castañeda, J. Gama-Castro, E. Solleiro-Rebolledo, J. Elizabeth, & Díaz-Ortega. (2012). Morfogénesis, procesos y evolución del horizonte Bw cámbico en tefrapaleosuelos del volcán Nevado de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1), 37-47. Recuperado en 04 de marzo de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222012000100004&lng=es&tlng=es.

- [5] L. Hernán (2022). Eventos hidrometeorológicos de lluvia sobre nieve en los Andes de Chile Central. Uchile.cl. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188859>
- [6] D. Falaschi, M. Lenzano, V. Tadono, A. Ismael, & L. Lenzano. (2017). Balance de masa geodésico 2000-2011 de los glaciares de la Cuenca Del Río Atuel, Andes Centrales de Mendoza (Argentina). *Geoacta*, 42(2), 7-22. Recuperado en 04 de marzo de 2023, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-77442017000200002&lng=es&tlng=es.
- [7] C. Dafne. (2015). Efecto de la cobertura vegetal nativa sobre la desglaciación del nevado Huaytapallana en diferentes altitudes. *Unep.edu.pe*. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3501>
- [8] H. Fernández Navarro & F. Ferrando Acuña. (2018). Glaciares rocosos en la zona semiárida de Chile: relevancia de un recurso hídrico sin protección normativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(2). <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n2.63370>
- [9] ANA. (2014). Inventario de glaciares del Perú. Huaraz.
- [10] M. Carezno, F. Pellicciotti, J. Mabilard & B. Brock (2016). An enhanced temperature index model for debris-covered glaciers accounting for thickness effect. *Advances in Water Resources*, 94, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.001>
- [11] D. Jones, S. Harrison & K. Anderson. (2019). Mountain glacier-to-rock glacier transition. *Global and Planetary Change*, 181, 102999. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102999>
- [12] A. Brenning, S. Long & P. Fieguth (2012). Detecting rock glacier flow structures using Gabor filters and IKONOS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 125, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.005>
- [13] K. Laute & A. Beylich. (2012). Influences of the Little Ice Age glacier advance on hillslope morphometry and development in paraglacial valley systems around the Jostedalbreen ice cap in Western Norway. *Geomorphology*, 167-168, 51–69. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.010>
- [14] N. Karimi, A. Farokhnia, S. Shishangosht, M. Elmi, M., Eftekhari (2012). Elevation changes of Alamkough glacier in Iran since 1955, based on remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.009>
- [15] O. Calskan, G. Gürgen, E. Yılmaz & S. Yeşilyurt. (2014). Debris-covered Glaciers During Glacial and Interglacial Periods on the Taurus Mountains (Turkey). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 120, 716–721. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.02.154>
- [16] W. Immerzeel, P. Kraaijenbrink, J. Shea, A. Shrestha, F. Pellicciotti, M. Bierkens & S. Jong. (2014). High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment*, 150, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.025>
- [17] H. Purdie, B. Anderson, T. Chinn, I. Owens, A. Mackintosh & W. Lawson. (2014). Franz Josef and Fox Glaciers, New Zealand: Historic length records. *Global and Planetary Change*, 121, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.06.008>
- [18] E. Joya, M. Bromand, K. Murtaza, & R. Dar. (2021). Current glacier status and ELA changes since the Late Pleistocene in the Hindu Kush Mountains of Afghanistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 219, 104897. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2021.104897>
- [19] D. Jones, S. Harrison, K. Anderson, H. Selley, J. Wood, & R. Betts. (2018). The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya. *Global and Planetary Change*, 160, 123–142. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.11.005>
- [20] A. Stefaniak, B. Robson, S. Cook, B. Clutterbuck, N. Midgley, & J. Labadz. (2021). Mass balance and surface evolution of the debris-covered Miage Glacier, 1990–2018. *Geomorphology*, 373, 107474. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107474>
- [21] A. Lovell, J. Carr & C. Stokes. (2018). Topographic controls on the surging behaviour of Sabche Glacier, Nepal (1967 to 2017). *Remote Sensing of Environment*, 210, 434–443. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.036>
- [22] E. Lokas, A. Zaborska, M. Kolicica, M. Różycki, & K. Zawierucha. (2016). Accumulation of atmospheric radionuclides and heavy metals in cryoconite holes on an Arctic glacier. *Chemosphere*, 160, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.051>
- [23] P. Garg, A. Shukla, & A. Jasrotia. (2017). Influence of topography on glacier changes in the central Himalaya, India. *Global and Planetary Change*, 155, 196–212. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.07.007>
- [24] J. López-Moreno, S. Fontaneda, J. Bazo, J., Revuelto, C. Azorin-Molina, B. Valero-Garcés, E. Morán-Tejada, S. Vicente-Serrano, R. Zubietta, & J. Alejo-Cochachín. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010>
- [25] A. Pope & G. Rees. (2014). Using in situ spectra to explore Landsat classification of glacier surfaces. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.08.007>
- [26] I. Ali, A. Shukla & S. Romshoo. (2017). Assessing linkages between spatial facies changes and dimensional variations of glaciers in the upper Indus Basin, western Himalaya. *Geomorphology*, 284, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.005>
- [27] R. Pizarro-Tapia, C. Cabrera-Jofre, C. Morales-Calderón, & J. Flores-Villanelo. (2011). Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glacial en la producción de agua (1963–2006). *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 05–19. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000300001&lng=es&tlng=es.
- [28] G. Zeballos, A. Soruco, D. Cusicanqui, R. Joffré, & A. Rabatel. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 49(3), 14–26. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282014000300003&lng=es&tlng=es.
- [29] A. Rivera, G. Casassa, C. Acuña & H. Lange. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Investigaciones Geográficas*, 34, 29. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2000.27709>
- [30] B. Kozhikkodan Veetil, S. Pereira, S. Wang, P. Valente, A. Grondona, A. A. Rondón, I. Rekowsky, S. De Souza & J. Simões. (2016). Un análisis comparativo del comportamiento diferencial de los glaciares en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investigaciones Geográficas*, 51, 3. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2016.41215>
- [31] L. Zalazar, F. Hidalgo, M. Castro, H. Gargantini, M. Giménez, P. Pitte, P. & R. Villalba. (2018). Glaciares de Argentina: Resultados preliminares del Inventario Nacional de Glaciares. *Conicet.gov.ar*. <https://doi.org/2519-7649>
- [32] D. Hoffmann. (2015). La contribución de los glaciares al agua de La Paz. https://www.cambioclimatico-bolivia.org/pdf/cc-20150608-la_contrib___pdf
- [33] P. Groeber. (2021). Bosquejo paleogeográfico de los glaciares del Diamante y Atuel. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 9(2), 89–108. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1377>
- [34] J. Arroyo, P. Gurmendi, & E. Machuca. (2015). Efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de nieve de los glaciares centrales del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 05(01). <https://doi.org/10.18259/acs.2015022>
- [35] A. Brenning. (2003). La Importancia de los Glaciares de Escombros en los Sistemas Geomorfológico e Hidrológico de la Cordillera de Santiago: Fundamentos y Primeros Resultados. *Revista de Geografía Norte Grande*, (30), 7-22.
- [36] B. Pouyaud, B. Francou, P. Ribstein, P. Wagnon & P. Berton. (1998). Programa "nieves y glaciares tropicales" (NGT): resultados (1991-1996) obtenidos en Bolivia. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3).
- [37] A. Melissa. (2022). Identificación de eventos meteorológicos asociados a la ocurrencia de precipitación en patrones de vientos horizontales en la tropósfera para el Altiplano peruano boliviano en invierno. *Unmsm.edu.pe*. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12672/18296>
- [38] M. Huayaney, & R. Ramos Alonzo. (2018). Evolución de los glaciares de los nevados Collquepucre, Llongote, Pariacaca y Ticla en la cuenca del río Cañete. *Investigaciones Sociales*, 21(38), 97–106. <https://doi.org/10.15381/is.v21i38.14219>
- [39] L. Anderson & R. Anderson. (2018). Debris thickness patterns on debris-covered glaciers. *Geomorphology*, 311, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.014>
- [40] R. Aparicio. (2003). Salud pública y enfermería comunitaria. *Dialnet*. <https://doi.org/84-486-0490-3>.
- [41] J. Arroyo & L. Artica. (2017). Retroceso glacial del Nevado Huaytapallana como consecuencia del calentamiento global. *Instituto Geofísico del Perú*.
- [42] J. Arroyo & P. Gurmendi. (2011). Cambios en el régimen hídrico de la laguna Lasuntay Chuspicocha por variaciones en el Nevado Huaytapallana. *Revista IGP*, (2):141-150, 2011. ISSN: 2225-5141

- [43] C. Asenjo Riquelme. (2009). Navegación Y Operación En. Tesis para optar al Título de: Ingeniero Naval, Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Naval, Valdivia.
- [44] Autoridad Nacional del Agua (2012). Inventario de glaciares de las cordilleras Vilcanota y Carabaya. Unidad de glaciología y recursos hídricos. Ministerio de Agricultura.
- [45] N. Batra. (2005). Estimation and comparison of evapotranspiration from multiple satellites for clear sky days. Cincinnati: Tesis Master of Science in Environmental Engineering, Universidad de Cincinnati
- [46] S. Bellaire, B. Jamieson, S. Thumlert, J. Goodrich & G. Statham. (2016). Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada. *Cold Regions Science and Technology*, 121, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.10.010>
- [47] J. Boquez & K. Uribe Peña. (2007). La “reagrupación familiar” como concepto y límite a los poderes del Estado de Chile en materia migratoria. *Revista de Derecho*, 34(2), 225–246. <https://doi.org/https://dialnet.unirioja.es/servlet/dcart?info=link&codigo=8269402&orden=0>
- [48] P. Brown. (2013). Climate News Network. Andes Tropical Glaciers going fast (en línea). Consultado en Julio 2015. Disponible en: <http://www.climate-news-network.net/andes-tropical-glaciers-going-fast/>
- [49] N. Campos, L. Tanarro, D. Palacios & J. Zamorano. (2019). Slow dynamics in debris-covered and rock glaciers in Hofsdalur, Tröllaskagi Peninsula (northern Iceland). *Geomorphology*, 342, 61–77. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.005>
- [50] CAN (CLIMATE ACTION NETWORK), (2014). Glaciares Andinos: La necesidad de una agenda transversal. Climate Action Network, pp. 27.
- [51] CAN. (2013). Glaciares andinos: La necesidad de una agenda transversal.
- [52] M. Careno, F. Pellicciotti, J. Mabilard & B. Brock. (2016). An enhanced temperature index model for debris-covered glaciers accounting for thickness effect. *Advances in Water Resources*, 94, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.001>
- [53] G. Casassa. (2007). Current status of Andean glaciers. *Global and Planetary Change*, Volumen 59, pp. 1-9.
- [54] F. Castillo (1996). *Agrometeorología*. Ediciones Mundi – Prensa. Barcelona, Esp. 517 pp
- [55] E. Castillo Palma. (2017). “Factores ambientales de temperatura y precipitación que inciden en la dinámica de la montaña glaciar Pastoruri”. S.l.: s.n.
- [56] E. Castillo. (2017). Factores ambientales de temperatura y precipitación que inciden en la dinámica de la montaña glaciar Pastoruri. Tesis (Titulación en Ingeniería Ambiental). Lima: Universidad Cesar Vallejo. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3507>
- [57] R. Chisolm, D. McKinney, J. Gomez, K. Vos (2012). Emerging Glacial Lakes in the Cordillera Blanca, Peru: A Case Study at Arteson Glacier. American Geophysical Union Conference
- [58] E. Chuvieco Salnero, (1990). Fundamentos de teledetección espacial. S.l.: s.n. ISBN 8432126802.
- [59] E. Chuvieco. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. Primera edición. Madrid. Editorial Rialph.
- [60] E. CHUVIECO. (2002). Teledetección ambiental. 2002. S.l.: s.n.
- [61] M. Collet. (2010). Suivi spatio-temporel des calottes glaciaires De l'Antisanet du Cotopaxi (équateur): Analyse par télédétection dans un contexte de changement climatique. Tesis Universidad de Rennes 2-Haute Bretagne. Rennes, Francia.
- [62] Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1992). Climate Change Secretariat (UNFCCC). pp. 1-44. ISBN: 922190466
- [63] C. Cortés & H. López Gama. (2011). Factores que afectan el desempeño académico de los estudiantes de nivel superior en Rioverde, San Luis Potosí, México. CPU-e, Revista de Investigación Educativa, (12), 1-18.
- [64] A. Coudrain, B. Francou & Z. Kundzewicz. (2005). Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources. *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques*, 50(6), pp. 925-932.
- [65] B. Cuadros Amanqui. (2014). Evolución de la cobertura glaciar del Nevado Ananea entre 1985 - 2010. *Investigación Andina*, vol. 14, pp. 11
- [66] B. Cuadros-Amanqui. (2019). Evolución de la Cobertura Glaciar del Nevado Ananea entre 1985-2010. Concytec.gov.pe. https://alicia.concytec.gov.pe/vufind/Record/UANT_123d18acab58e463f3de58a7f2a0eac8
- [67] K. Cuffey. & W. Paterson. (2010). *The Physics of Glaciers*. 4 ed. USA: Elsevier.
- [68] A. De Fina, A. Arevalo. (1983). *Climatología y Fenología Agrícola*. 2 ed. Editorial Universitaria. Buenos Aires, Arg. Pp 48-50.
- [69] H. Díaz & V. Markgraf. (2000). *El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale variability and global and regional impacts*. Cambridge University Press, New York, pp. 496.
- [70] D. Din Shangguan (2019). “Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015, *Advances in Climate Change Research*, vol. 10, no. 4, pp. 203–213, doi:10.1016/J.ACCRE.2020.03.003.
- [71] S. Dingman. (2002). *Physical Hydrology* (Segunda ed.). New Jersey: Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.
- [72] V. Favier, P. Wagnon, J. Charazin, L. Maisincho, & A. Coudrain. (2004). One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 109, 1-15. doi:10.1029/2003JD004359
- [73] A. Flores. (2020). Análisis cuantitativo de variabilidad climática en relación a la pérdida superficial con datos Landsat en nevados peruanos 2010-2020. Upeu.edu.pe. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/20.500.12840/5414>
- [74] B. Francou. (2015). The Guardian. Global warming spells disaster for tropical Andes glaciers (en línea). Disponible en: <http://www.theguardian.com/science/2015/jan/27/global-warming-glacier-depletion-andes>
- [75] B. Pouyaud. (2008). Glaciares: ¿cómo y dónde estudiarlos? *Revista Virtual REDESMA*, 2(3), 9-17.
- [76] D. Fugazza, D. Senese, A. Azzoni, R. Maugeri, M. Maragno & Diolaiuti, G. (2019). New evidence of glacier darkening in the Ortles-Cevedale group from Landsat observations. *Global and Planetary Change*, 178, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.014>
- [77] S. Funaki, & Y. Asaoka. (2016). Long-term Change in Ablation Area of Tropical Glaciers by Landsat Data. *Procedia Engineering*, 154, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.438>
- [78] R. Garreaud. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, Volumen 22, pp. 3-11.
- [79] Geoestudios. (2008). *Industria Minera; Industria Minera*. <https://www.industriaminera.cl/producto/geoestudios-ltda-evaluacion-geotecnica-general-alternativas/>
- [80] L. Gonzales Ferro. (2015). Estudio Multitemporal del Nevado Ampay en el Contexto del Cambio Climático: 1986 – 2011. Auspiciado por el Instituto de Investigación Universidad y Región. Monografía 24 páginas, Cusco
- [81] M. Gutiérrez. (2000). *Teledetección Nociones y aplicaciones*. Madrid - España. 431p.
- [82] J. Hemingway, R. Spencer, D. Podgorski & V. Galy. (2019). Glacier meltwater and monsoon precipitation drive Upper Ganges Basin dissolved organic matter composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 244, 216–228. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.10.012>
- [83] R. Hock. (2005). Glacier melt: a review of processes and their modeling. *Progress in Physical Geography*, 29, 3, 362-391.
- [84] M. Huayaney & J. de la Cruz. (2009). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca. *Investigaciones Sociales*, 13(22), 71-83.
- [85] D. Huddart & T. Stott. (2010). *Earth Environment. Present, past and future*. S.l.: Wiley & Sons
- [86] INAIGEM. (2017). “Informe de la Situación de los Glaciares y Ecosistemas de montaña.
- [87] INAIGEM. (2016). Ministerio del Ambiente. Disponible en: <http://www.inaigem.gob.pe/>
- [88] INAIGEM. (2017). MANUAL metodológico de inventario nacional de glaciares. Disponible en: <http://www.inaigem.gob.pe/biblioteca/publicaciones/compiladoISSN:2017-12673>
- [89] INAMHI, (2001). Estudio sobre el cambio climático, Detección de cambio climático en el Ecuador. www.inamhi.gov.ec/meteorologia/ecambio.htm
- [90] Instituto Nacional De Investigación En Glaciares Y Ecosistemas Demontaña, 2020. Inventario nacional de glaciares. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796. Disponible en: www.inaigem.gob.pe
- [91] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014): Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Contribución del Grupo de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático”. IPCC, Ginebra, Suiza.

- [92] IPCC, 2013. Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- [93] IPCC, 2014. Climate Change (2014): Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York: University Cambridge Press.
- [94] IPCC. (2001). Segundo informe de evaluación, Cambio Climático 2001: Efectos, adaptación, y vulnerabilidad. Los ecosistemas y la diversidad biológica.
- [95] IPCC. Cambio climático. (2014). Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. ISBN: 9789291693436
- [96] J. Janke, A. Bellisario & F. Ferrando. (2015). Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. *Geomorphology*, 241, 98–121. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.034>
- [97] J. Janke, & A. Bellisario, A. (2017). An inventory and estimate of water stored in firm fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. *Geomorphology*, 296, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.002>
- [98] G. Kaser & H. Osmaston, (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge: s.n
- [99] G. Kaser. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, pp. 93-103.
- [100] P. Knight. (1999) *Glaciers*. Primera edición. Cheltenham: Stanley Thornes, 261pp.
- [101] M. Kuhn. (1989). The response of the equilibrium line altitude to climatic fluctuations: theory and observations. In Oerlemans, J., ed. *Glacier fluctuations and climatic change*. Dordrecht, etc., Kluwer Academic Publishers, 407–417.
- [102] M. Kuhn. (1995). The mass balance of very small glaciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 31, 171–179
- [103] F. Lehmkuhl. (2000). Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International* (65-66): 15-29
- [104] F. Lehmkuhl. (2006). Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International* (65-66): 15-29
- [105] Li, G., Lin, H., & Ye, Q. (2018). Heterogeneous decadal glacier downwasting at the Mt. Everest (Qomolangma) from 2000 to ~ 2012 based on multi-baseline bistatic SAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 206, 336–349. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.032>
- [106] A. Lo Vecchio, M. Lenzano, M. Durand, E. Lannutti, R. Bruce & L. Lenzano. (2018). Estimation of surface flow speed and ice surface temperature from optical satellite imagery at Viedma glacier, Argentina. *Global and Planetary Change*, 169, 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.08.001>
- [107] J. López Avendaño, T. Díaz Valdés, C. Watts Thorp, J. Rodríguez, A. Castellanos Villegas, L. Partida Ruvalcaba & A. Alcaraz. (2015). Evapotranspiración Y Coeficientes De Cultivo De Chile Bell En El Valle De Culiacán, México. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 209-219.
- [108] A. López. (2021). Los glaciares de todo el mundo se están derritiendo rápidamente, confirma el estudio más amplio hasta la fecha - National Geographic en Español. *National Geographic En Español*. <https://www.ngenespanol.com/ecologia/los-glaciares-de-todo-el-mundo-se-están-derritiendo-rapidamente/>
- [109] P. Lundgren, S. Samsonov, L. Lopez and Ordoñez, M. (2015). Deep source model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, constrained by interferometric synthetic aperture radar observations. *Geophysical Research Letters*. 42(12), pp. 4816-4823. Available at: Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015GeoRL..42.4816L> DOI :10.1002/2015GL063858
- [110] G. Magrin, J. Gay García, A. Cruz Choque, L. Giménez, Moreno, M. Nagy & A. Villamizar. (2007). *Latin America*. pp. 581-615. In: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- [111] N. Mantua & S. Hare. (2002). The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35–44.
- [112] M. Mardones, M. Aguayo, E. Smith & P. Ruiz, (2018). Retroceso glacial reciente en el Campo de Hielo Norte, región de Aysén, Chile: relación con variaciones climáticas. *Revista de Geografía Norte Grande*, 121-147.
- [113] M. Villón. (2004). *Hidrología*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica. 474 pp. ISBN: 9977661596
- [114] M. Vuille, B. Francou, P. Wagnon, P. Juen, I. Kaser, G., Mark, B. y Bradley, R. (2008). “Climate Change and Tropical Andean Glaciers: Past, present and future” *Earth Science Reviews*. Volumen 89, p. 79-96.
- [115] M. Vuille, G. Diaz y W. Vergara, W. (2018) “Threats to Water Supplies in the Tropical Andes” *Science*. Volumen 312. Número 5781, p. 1755-1756
- [116] C. atson, O. King, E. Miles, E. S., & D. Quincey (2018). Optimising NDWI supraglacial pond classification on Himalayan debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 217, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.020>
- [117] Wortmann, M., T. Bolch, B. Su & V. Krysanova, V. (2019). An efficient representation of glacier dynamics in a semi-distributed hydrological model to bridge glacier and river catchment scales. *Journal of Hydrology*, 573, 136–152. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.006>
- [118] X. Xiang & Y. He. (2018). Features of climate change and their effects on glacier snow melting in Xinjiang, China. *Comptes Rendus Geoscience*, 345(2), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.01.005>