

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES  
SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN GLACIOLÓGICA

# INFORME DEL BALANCE DE MASA DEL GLACIAR SHALLAP POR MÉTODO GEODÉSICO 2019-2024

Provincia de Huaraz, Áncash



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



**INAIGEM**

INSTITUTO NACIONAL DE  
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y  
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Título: INFORME DEL BALANCE DE MASA DEL GLACIAR SHALLAP POR MÉTODO GEODÉSICO  
2019-2024

Autor: Alexzander Santiago Martel

Editado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña -  
INAIGEM

Dirección de Investigación en Glaciares

Subdirección de Riesgos Asociados a Glaciares

Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia, Huaraz, Áncash, Perú

Teléfono: +51 (043) 643460

Web: <https://www.gob.pe/inaigem>

Junio, 2025.

DEPÓSITO LEGAL N° 2025-07233

## ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
<b>III. ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>6</b>
<b>IV. METODOLOGÍA</b> .....	<b>6</b>
4.1. Generación del Modelo digital de Superficie.....	6
4.2. Generación de cartografía base .....	7
4.2.1. Obtención de área Glaciar.....	7
4.2.2. Georreferenciación de información Raster.....	9
4.3. Corrección del modelo digital de terreno .....	10
4.4. Co-registro.....	11
4.5. Balance de masa .....	12
<b>V. RESULTADOS</b> .....	<b>13</b>
5.1. Análisis de cambios de manera puntual .....	13
5.1.1. Co-registro.....	13
5.1.2. Estimación de pérdida de volumen Glaciar.....	14
5.2. Análisis a nivel general del Glaciar Shallap .....	15
5.2.1. Periodo de análisis 2022 - 2024 .....	15
<b>VI. CONCLUSIONES</b> .....	<b>17</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Secuencia para la obtención del DSM y ortofotografía, haciendo uso del software fotogramétrico. ....	7
Figura 2. Resultados esperados mediante la secuencia de obtención de productos (a) Ortofotografía y (b) DSM.....	7
Figura 3. En la imagen a) se observa el proceso de búsqueda y descarga de imagen satelital de la plataforma EO Browser, mientras que en la imagen b) se aprecia la combinación de bandas SWIR. ....	8
Figura 4. Se aprecia el proceso de obtención de la cobertura de glaciares en formato vectorial (b), mientras que en la imagen a) se aprecia la obtención de información mediante la clasificación automática de información y en la imagen c) se observa el área glaciar depurado.8	
Figura 5. Digitalización de las áreas glaciares según registro fotogramétrico realizados para los periodos 2019 (izquierda) y 2024 (derecha). ....	9
Figura 6. Georreferenciación de los productos fotogramétricos, en la figura a) se muestra la ortofoto patrón del año 2018, mientras que la figura b) muestra la información del periodo 2024 donde se aprecia el desplazamiento del marcador verde evidenciando así el desplazamiento de la información, mientras que en la figura c) se muestra la información 2024 posicionado donde se aprecia el marcado verde correctamente ubicado.....	10
Figura 7. En la imagen de la izquierda se muestra el randomizado de puntos en la zona de no movimiento (izquierda), mientras que en la derecha se aprecia el proceso de co-registro. ....	10
Figura 8. Ilustración de la ecuación en relación a ( $dh$ , $\alpha$ y $\psi$ ). ....	12
Figura 9. En la imagen de la izquierda se muestra el ajuste planimétrico realizado en el co-registro, mientras que en la imagen de la derecha se aprecia los resultados propios del co-registro del periodo 2024 respecto al año patrón 2019. ....	13
Figura 10. En la imagen se aprecia la pérdida de espesor glaciar en el periodo 2019 – 2024 5 años de análisis .....	14
Figura 11. Análisis de variación del DEM SPOT respecto a la información fotogramétrica obtenida en campo. ....	15
Figura 12. Identificación del ELA, mediante la reconstrucción del DEM y diferencia respectiva de los valores.....	16

### **Lista de ecuaciones**

Ecuación 1. Balance geodésico, para la estimación de la pérdida de masa glaciar. .... 12

### **Lista de Mapa**

Mapa 1. Ubicación del área de estudio, correspondiente al glaciar Shallap. .... 6

## **I. INTRODUCCIÓN**

El Perú posee el 68 % de glaciares tropicales del mundo, los cuales están experimentando un retroceso acelerado, como lo evidencian los datos del INAIGEM (2023) basados en el Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar (INGLOG). Según este inventario, los glaciares tropicales del Perú han perdido 1348.75 km<sup>2</sup> (56%) de su superficie en los últimos 58 años, tomando como referencia el estudio realizado por Hidrandina en 1989.

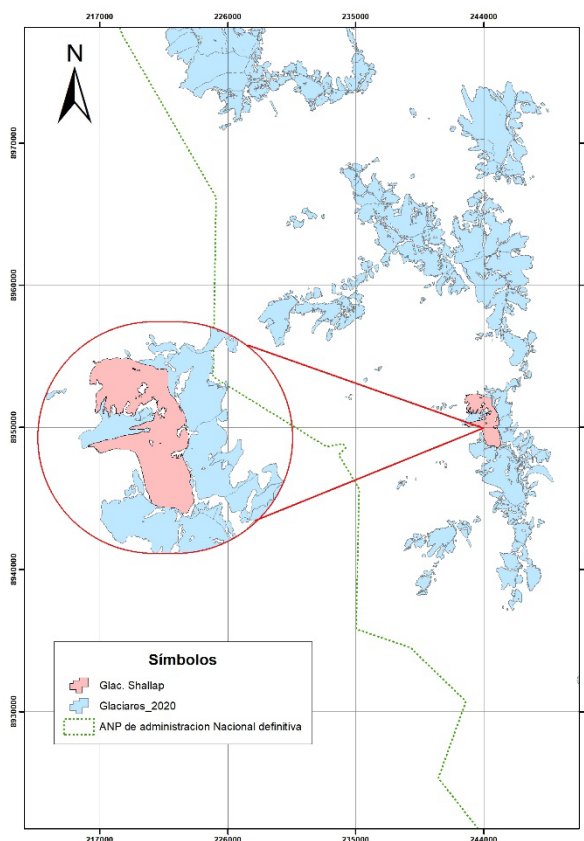
Para analizar el comportamiento y los cambios de los glaciares a consecuencia del cambio climático, el INAIGEM realiza estudios en el glaciar con el método directo el cual consta de medición topográfica por el método convencional, instalación de balizas y medición de pozos. Mediante este método se estima el balance de masa realizando interpolaciones con los datos de las balizas colectados en campo. No obstante, este método es el propuesto por estudios desarrollados por (Francou & Pouyaud, 2004). No obstante, el INAIGEM propone desarrollar el estudio por el método indirecto mediante la topografía de precisión haciendo el uso de Tecnología de Sistema de Aeronave Pilotado Remotamente (siglas en inglés RPAS). Para lo cual, desde el año 2018 el INAIGEM realiza los primeros registros fotogramétricos del glaciar Shallap liderado por la subdirección de Investigación Glaciológico, generando así información de gran precisión y resolución espacial para así reconstruir la superficie glaciar y estimar la pérdida de volumen glaciar del área de estudio y así innovar y cambiar el método de las balizas por el fotogramétrico.

## **II. OBJETIVOS**

- Estimar la pérdida y/o ganancia de volumen de agua de fusión del glaciar Shallap, durante el periodo de estudio 2019 - 2024.
- Analizar la pérdida del área glaciar durante el periodo 2019 – 2024.

### III. ÁREA DE ESTUDIO

El glaciar Shallap, ubicado en la cordillera Blanca en las coordenadas 09°29 '23.35"S y 77°19 '56.85"W, cuyas aguas drenan hacia la subcuenca del Quillcay para luego desembocar en el Pacífico. Políticamente se ubica en el Departamento de Ancash, provincia de Huaraz distrito de Huaraz.



Mapa 1. Ubicación del área de estudio, correspondiente al glaciar Shallap.

### IV. METODOLOGÍA

#### 4.1. Generación del Modelo digital de Superficie

La generación de los modelos digitales de superficie se desarrolló siguiendo los criterios de la reconstrucción fotogramétrica como se describe a continuación.

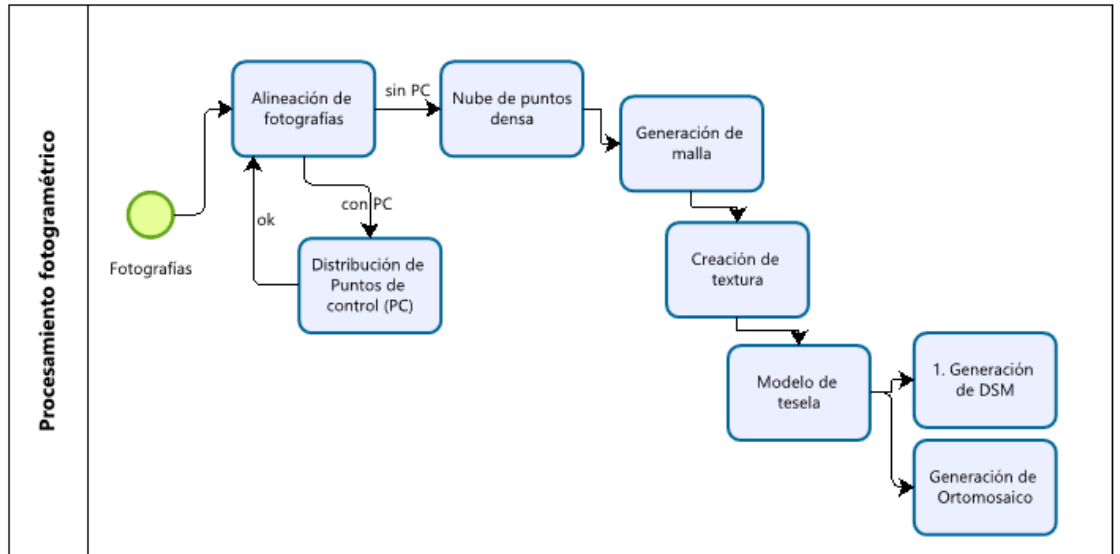


Figura 1. Secuencia para la obtención del DSM y ortofotografía, haciendo uso del software fotogramétrico.

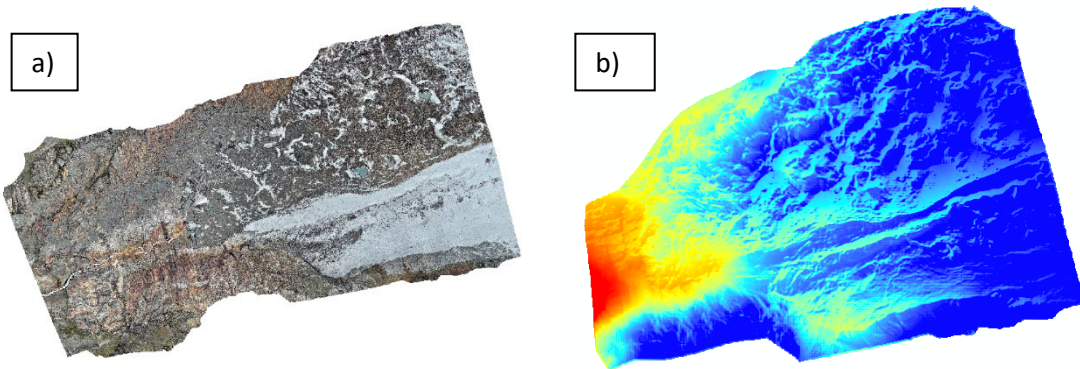


Figura 2. Resultados esperados mediante la secuencia de obtención de productos (a) Ortofotografía y (b) DSM

## 4.2. Generación de cartografía base

### 4.2.1. Obtención de área Glaciar

Para la obtención del área glaciar, se usó como base las imágenes satelitales Sentinel-2 de resolución espacial 10 metros. Estas imágenes satelitales fueron adquiridas del portal web EO Browser, plataforma donde se encuentran almacenadas las imágenes satelitales de la misión Sentinel. Para elaborar la estructura de información geoespacial se buscó data del Sentinel-2 la cual provee imágenes con buena resolución de la cobertura glaciar, se descargaron todas las imágenes satelitales necesarias con respecto a los glaciares y años correspondientes a ser estudiados, los cuales fueron después

almacenadas para su posterior análisis. En este proceso de búsqueda de información la plataforma nos permite descargar imágenes en diferentes combinaciones de bandas siendo una de ellas el SWIR el cual nos identifica la cobertura glaciaria, además complementario a ello se descargó la imagen raster del NDSI, información que nos permitió generar de manera rápida la cobertura glaciaria por cada año de estudio.

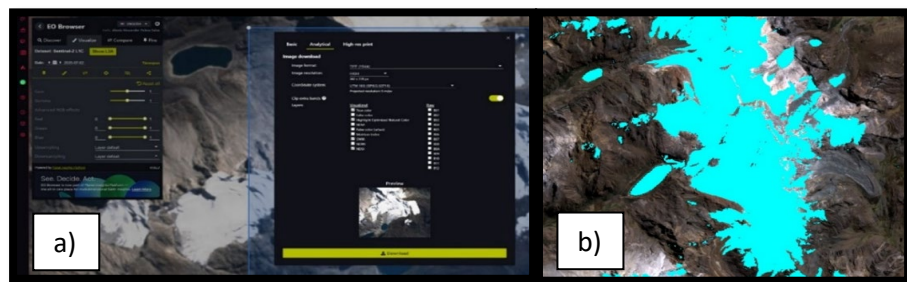


Figura 3. En la imagen a) se observa el proceso de búsqueda y descarga de imagen satelital de la plataforma EO Browser, mientras que en la imagen b) se aprecia la combinación de bandas SWIR.

La imagen NDSI y/o SWIR, se realizó la clasificación automática, obteniendo así el área glaciaria para los periodos de estudio, este procesamiento de datos se generó en la plataforma de sistema de información geográfica, obteniendo así los polígonos de áreas glaciarias respectivamente.

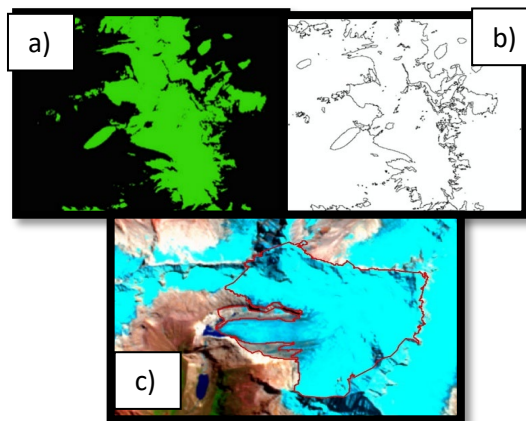


Figura 4. Se aprecia el proceso de obtención de la cobertura de glaciarias en formato vectorial (b), mientras que en la imagen a) se aprecia la obtención de información mediante la clasificación automática de información y en la imagen c) se observa el área glaciaria depurado.

Para la segmentación de los polígonos se usó como base la información vectorial del INAIGEM publicado en el geportal (<https://visor.inaigem.gob.pe>).

Para las áreas de estudio, se posee ortofotografías que nos brinda mayor información respecto a las dimensiones y extensiones de los glaciares, mediante la cual se realizó la digitalización de manera visual de los datos, los cuales complementarán la información geoespacial obtenida con imagen satelital Sentinel-2, definiendo mejor el área glaciar en la zona de fusión glaciar.

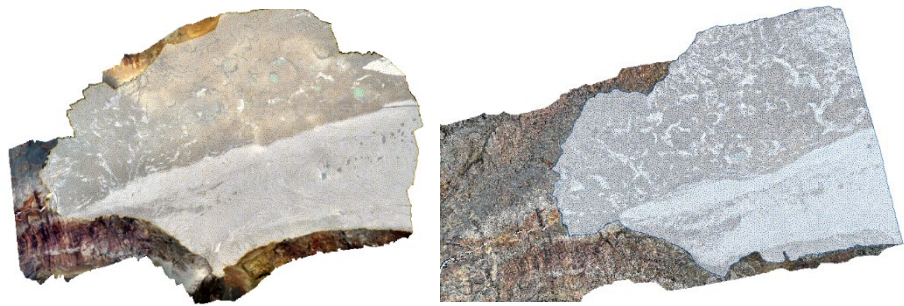


Figura 5. Digitalización de las áreas glaciares según registro fotogramétrico realizados para los periodos 2019 (izquierda) y 2024 (derecha).

#### ***4.2.2. Georreferenciación de información Raster***

El proceso de georreferenciación se realizó el posicionamiento de la información ráster en base a un año patrón, este proceso se realiza con el objetivo de poseer el menor sesgo de error espacial en x, y. La georreferenciación se realizó en base al uso de sistema de información geográfica mediante la identificación de puntos en común en las áreas de no movimiento, este proceso se realiza debido al desplazamiento que se genera en el procesamiento fotogramétrico. El producto final tendrá una similitud espacial entre los periodos de estudio y así evitar iteraciones excesivas en el proceso de co-registro.



Figura 6. Georreferenciación de los productos fotogramétricos, en la figura a) se muestra la ortofoto patrón del año 2019, mientras que la figura b) muestra la información del periodo 2024 donde se aprecia el desplazamiento del marcador verde evidenciando así el desplazamiento de la información, mientras que en la figura c) se muestra la información 2024 posicionado donde se aprecia el marcado verde correctamente ubicado.

### 4.3. Corrección del modelo digital de terreno

La corrección del DEM, es empleado para el balance de masa a nivel de todo el glaciar, que contempla la zona de ablación y acumulación, este proceso de reconstrucción se realiza para obtener datos de la zona de acumulación debido que la información fotogramétrica, no abarca todo el sistema glaciar por las limitaciones de la tecnología RPAS. Para mejorar la información general (DEM), se realizó en 2 etapas: Etapa 1) análisis de la zona de no movimiento, donde la información proporcionada por CONIDA que corresponde al DEM de SPOT, debería tener la misma altitud respecto al DSM del INAIGEM que se trabajó para el año 2024, para mejorar la precisión en vertical se realizó el ajuste mediante el corregistro, tomando como patrón base la zona de no movimiento de la ortofotografía.

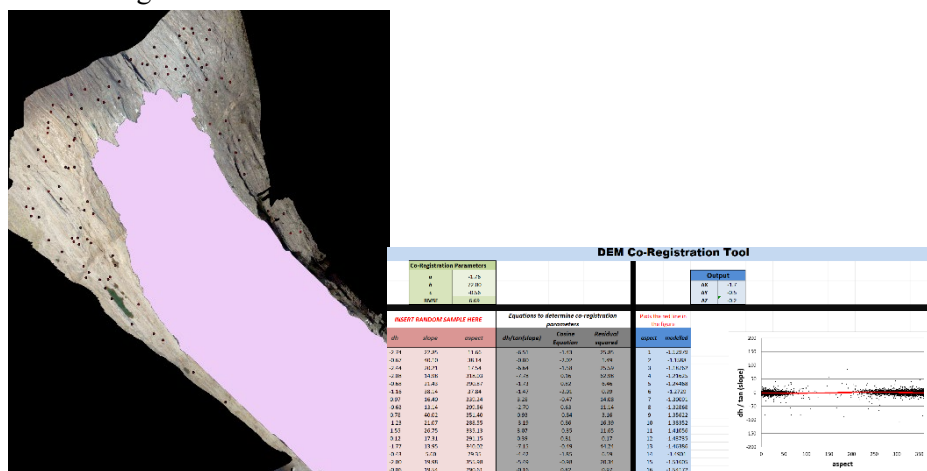


Figura 7. En la imagen de la izquierda se muestra el randomizado de puntos en la zona de no movimiento (izquierda), mientras que en la derecha se aprecia el proceso de co-registro.

En esta etapa, se logró disminuir el sesgo de error en planimetría de x: -10.3, y: 3.6 y z: -4.4 a un total de error de x: -1.7, y: -0.5, z: -0.2, esto en el co-registro 2. Con ello determinando que los valores en zona de movimiento lleguen a 0.

Etapa 2) En esta etapa se realizó el ajuste de la zona glaciar en base al registro de los valores altitudinales del DSM, mediante el co-registro como en la etapa 1, donde se simulará que la zona glaciar es el área de no movimiento, para obtener resultados del sector glaciar.

Para el caso de estudio se usará el DEM SPOT7 proporcionado por la CONIDA de 5 metros de resolución espacial, que será trabajado en base a la información del DSM obtenido con tecnología RPAS.

#### 4.4. Co-registro

Es usado para posicionar espacialmente dos modelos digitales de terreno (siglas en inglés DEM) o superficie, cuando se identifican incongruencias espaciales de la misma área de interés, donde los dos DEM o DSM no poseen una alineación perfecta en horizontal como en vertical. El co-registro analiza el desplazamiento espacial en relación con la pendiente y orientación del terreno. Es así que cualquier desplazamiento en el plano horizontal y vertical existente entre dos Modelos de Elevación Digital (DEM) utilizados para calcular un balance de masa geodésico puede resultar en sesgos o desvíos en las diferencias de elevación entre los mismos en función de la orientación y la pendiente (Nuth & Kääb, 2011). El proceso de co-registro está basado en la relación de la diferencia de elevación ( $dh$ ) respecto a la pendiente del terreno ( $\alpha$ ) y la orientación ( $\Psi$ ), el cual es representado mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{dh}{\tan \alpha} = a * \cos \cos (b - \Psi) + c$$

Donde:

$$c = \frac{d_h}{\tan \alpha}$$

“a” es la magnitud de desplazamiento, “b” es la dirección del vector de desplazamiento y “c” es el sesgo de elevación media dividido por la tangente de la pendiente media de la muestra (Figura 3).

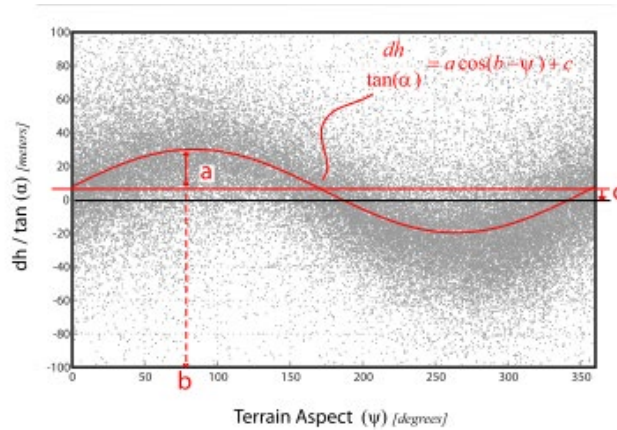


Figura 8. Ilustración de la ecuación en relación a ( $dh$ ,  $\alpha$  y  $\Psi$ ).

**Nota.** Fuente (Nuth & Kääb, 2011, p. 5).

La información de entrada ( $dh$ ,  $\alpha$  y  $\Psi$ ) proviene del área que no sufre variaciones en los dos periodos de análisis (zona de no movimiento, fuera del área glaciar), el cual posee información variable de la pendiente y orientación.

#### 4.5. Balance de masa

La cuantificación del balance de masa para el área de estudio fue desarrollada mediante la Ecuación 1, que consiste en la diferencia de los dos DSM correspondiente al periodo de estudio. Este cambio de elevación es transformado a cambio de volumen que puede ser ganancia o pérdida. Para esta conversión es necesario conocer la densidad promedio  $\rho$ , tamaño de píxel  $r$ , cambio de superficie  $\Delta h_n$  y el promedio del área de estudio  $S$ , los cuales figuran en la Ecuación 1.

$$B_{geod}(Mes1-mes2) = \frac{\rho \times r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n}{S}$$

Ecuación 1. Balance geodésico, para la estimación de la pérdida de masa glaciar.

Donde:

$\rho$  = Densidad promedio de cambio de volumen.

$r$  = Tamaño de píxel.

$\Delta h_n$  = Cambio en la superficie de elevación por cada pixel.

n = Número de píxeles que cubren el glaciar en estudio

S = Área promedio de los glaciares durante el periodo de estudio (mes de agosto – mes de noviembre)

## V. RESULTADOS

Los resultados serán mostrados en 2 nivel de análisis; (1) en forma puntual se analizarán los cambios en la zona de registro de información con tecnología RPAS y (2) el análisis de manera más general a nivel de todo el glaciar en base a la reconstrucción del DEM, teniendo como base el DEM SPOT 7 de la CONIDA.

### 5.1. Análisis de cambios de manera puntual.

#### 5.1.1. Co-registro

El proceso de corrección de información se desarrolló para los periodos del 2019 al 2024, para el estudio se considera como año patrón al periodo 2019, respecto al cual se corrigió la información de los periodos 2024, haciendo el uso del co-registro propuesto por (Nuth & Kääb, 2011); en este caso se realizó el co-registro mediante programación, siguiendo las siguientes líneas de código (`dem_align.py DEM_REF_for_ASP.tif DEM_20030713.tif -slope_lim 0.5 30 -mask glaciers -outdir coreg_SRTM_ASTER2003_5`), mediante la cual se realizó la corrección planimétrica y se redujo el sesgo de error en vertical (z), considerando la zona de no movimiento como se describe en el capítulo 4.4.

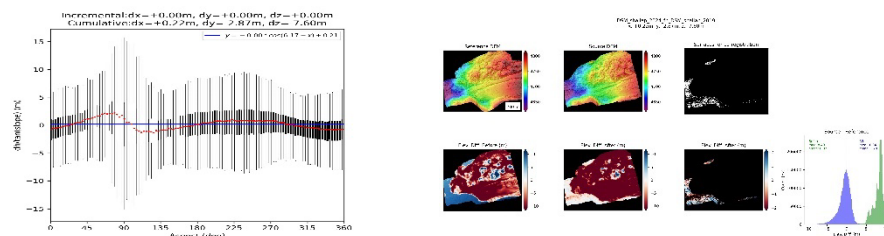


Figura 9. En la imagen de la izquierda se muestra el ajuste planimétrico realizado en el co-registro, mientras que en la imagen de la derecha se aprecia los resultados propios del co-registro del periodo 2024 respecto al año patrón 2019.

### 5.1.2. Estimación de pérdida de volumen Glaciar

Una vez realizada la corrección del DSM mediante el co-registro, la información es analizada para los periodos del 2019 - 2024, obteniendo los siguientes resultados.

#### Shallap (zona de ablación) 2019 -2024

$\rho =$	0.87 gr cm <sup>-3</sup>
$r =$	0.04 m <sup>2</sup>
$\sum \Delta h_n =$	-270611158.3 m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	-10824446.33 m <sup>3</sup> hielo
m3 agua	-9417268.310 m <sup>3</sup>
Área de análisis =	631232.6513 m <sup>2</sup>

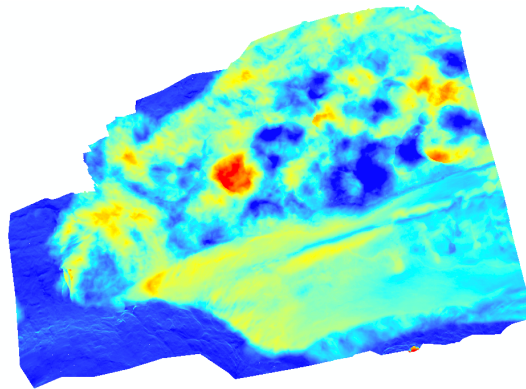


Figura 10. En la imagen se aprecia la pérdida de espesor glaciar en el periodo 2019 – 2024 5 años de análisis

En el periodo de análisis del 2019 al 2024, el glaciar Shallap perdió un volumen de -10824446.33 m<sup>3</sup> de hielo, lo cual equivale a -9417268.310 m<sup>3</sup> de agua, en el periodo de estudio no se presenta ganancia en el área de estudio, lo cual representa una gran pérdida de masa glaciar.

La mayor pérdida de masa de hielo es en la parte frontal del glaciar y en las zonas donde hay la presencia de lagunas supra-glaciares que contribuyen en la fusión glaciar.

## 5.2. Análisis a nivel general del Glaciar Shallap

El análisis se realizó teniendo como insumo el DEM SPOT que se reconstruyó en base a la información fotogramétrica que se posee de la zona de fusión, para lo cual se analizó la pérdida de área glaciar, generando así DEM para el periodo 2019 y 2024, para este proceso se realizó el co-registro de la información para el periodo 2019 el cual fue el patrón, mediante la cual se generó la ecuación de estimación de pérdida de espesor glaciar para el periodo 2019 – 2024..

### 5.2.1. Periodo de análisis 2022 - 2024

El análisis se desarrolló mediante el uso del DEM SPOT proporcionado por la CONIDA, el cual corresponde al año base de 2022. Para esta información se analizó la información donde se verificó que en la zona de no movimiento poseía una diferencia de 20 metros con la información obtenida en campo, para ello se realizó el ajuste del DEM mediante la ecuación lineal (ver Figura 11)

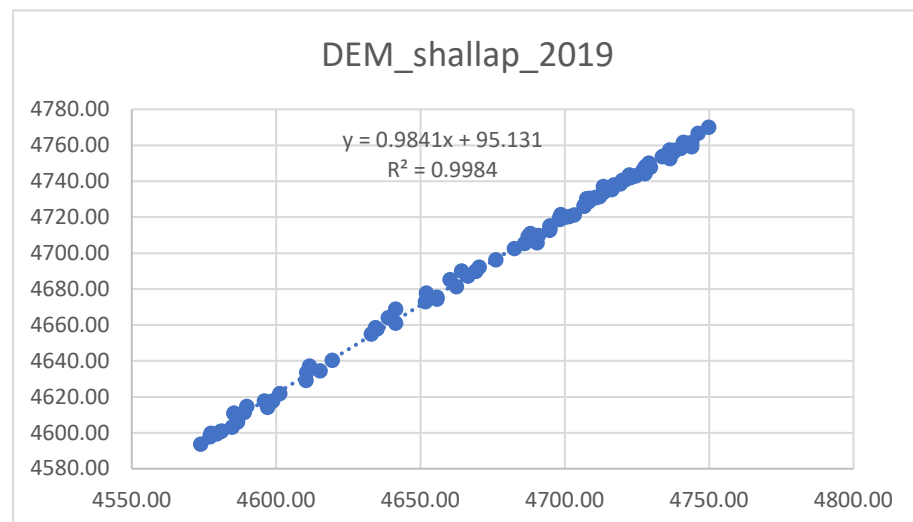


Figura 11. Análisis de variación del DEM SPOT respecto a la información fotogramétrica obtenida en campo.

Obteniendo así, el DEM ajustado con menor margen de error respecto al DSM reconstruido en base a la información colectada en campo. Mediante esta información de reconstrucción del DEM, se logró obtener la cota

donde el glaciar no gana ni pierde el cual esta ubicado a la altitud de 5000 msnm,

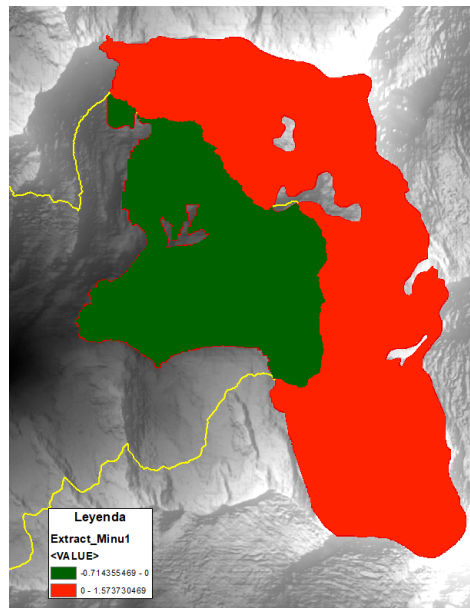
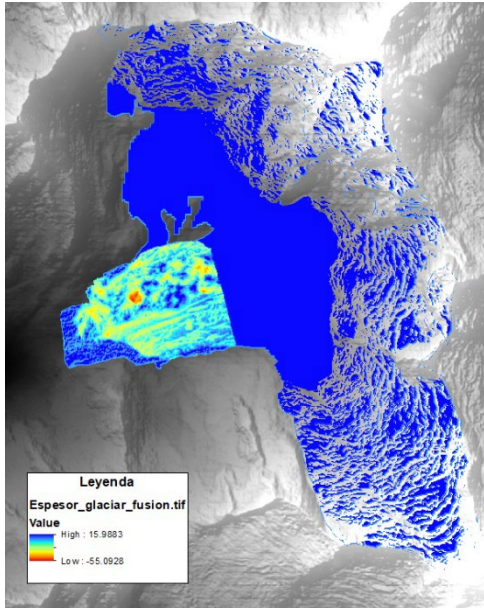


Figura 12. Identificación del ELA, mediante la reconstrucción del DEM y diferencia respectiva de los valores.

Una vez realizado la corrección del DEM, se analiza la variación de espesor respecto a las cotas, para así ver la relación y obtener la diferencia de espesor en el periodo de estudio 2019 – 2024.

Para el presente estudio se consideró la densidad de 0.53 para la nieve y para el glaciar de 0.87 gr/cm<sup>3</sup>. Estos valores deberán ser registrados en estudios de medición directa en campañas de campo.

<b>Shallap 2019-2024</b>		
<b>ZONA DE FUSIÓN</b>		
$\rho =$	0.87	gr cm <sup>-3</sup>
$r =$	25	m <sup>2</sup>
$\sum \Delta h_n =$	-447435.912	m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	-11185897.8	m <sup>3</sup> hielo
m3 agua	-9731731.09	m <sup>3</sup>
<b>ZONA DE ACUMULACION</b>		
$\rho =$	0.53	gr cm <sup>-3</sup>

$r =$	25	$m^2$	
$\sum \Delta h_n =$	28258.6362	m	
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	706465.906	$m^3$ hielo	
m <sup>3</sup> agua	374426.93	$m^3$	

La pérdida de m<sup>3</sup> de agua en la zona de fusión glaciario es de -9 731 731.09, mientras que en la zona de acumulación poseemos una ganancia de 374 426.93 m<sup>3</sup> de agua, si realizamos la sumatoria de ello. A nivel de todo el glaciario se posee una pérdida de -9 357 304.158 m<sup>3</sup> de agua que nos indica que el estado de salud del glaciario está orientado a la mayor fusión y no se posee ganancia significativa que contribuya a la recuperación de este sistema criogénico.

## VI. CONCLUSIONES

Mediante la reconstrucción de la información (DEM) para realizar el cálculo a nivel general se logró obtener información referencial de la zona de acumulación, lo cual nos muestra que el glaciario Shallap, posee una gran pérdida de -9 357 304.158 m<sup>3</sup> de agua en 5 años de estudio, como se evidencia la mayor fusión glaciario se distribuye en la lengua del glaciario. Así mismo, en el estudio se identificó la ELA a la cota de 5000 msnm, mostrándonos así que la tendencia del glaciario es perder mayor área glaciario y

volumen, los cuales serán evaluados en siguientes expediciones que se realicen.

Para mejorar el estudio es indispensable contar con información respecto a densidad de la nieve y glaciar, debido que estas condiciones son distintas según glaciares, además también es necesario complementar el estudio Geodésico con mediciones de campo que contribuyan a espacializar y comprender la acumulación debido que con la tecnología que se posee no se puede obtener la topografía de manera general de toda el área glaciar.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

Francou, B., & Pouyaud, B. (2004). Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. *Great Ice, IRD*, 1(May). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4220.8164>

Francou, B., Ribstein, P., Saravia, R., & Tiriau, E. (1995). Monthly balance and water discharge of an inter-tropical glacier: Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *Journal of Glaciology*, 41(137), 61–67.  
<https://doi.org/10.1017/S0022143000017767>

INAIGEM. (2023). BALANCE DE MASA DEL GLACIAR HUILLCA PERIODO HIDROLOGICO SET 2022 - OCT 2023. In *Informe*.

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2023). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar 2023*.  
<https://doi.org/10.36580/inaigem.document17>

Nuth, C., & Kääb, A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5, 271 - 290, 5(1), 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>