

Estimación de la velocidad de flujo del hielo glaciar en la Cordillera Blanca a partir de la correlación de imágenes de satélite

Estimation of the flow velocity of glacier ice in the Cordillera Blanca based on the correlation of satellite images

Juvenal Tordocillo Puchuc ^{1,*}; Pablo Aguilar Marín ²

¹ Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional del Callao, Av. Juan Pablo II 306 – Ciudad Universitaria, Callao, Perú.

² Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

* Autor correspondiente: jtordocillo@gmail.com (J. Tordocillo)

RESUMEN

Para la investigación, se ha utilizado 02 imágenes ASTER de Nivel L1A, del 17 de junio y 04 de agosto de 2002, calibrándose geoméricamente la imagen (imagen base), mediante el proceso de ortorrectificación a través de un DEM, obtenida a partir de las curvas de nivel proporcionada por el IGN. La técnica de correlación consiste en el uso de dos imágenes de fechas distintas, teniendo la primera imagen georreferenciada (imagen base) y la segunda imagen sin georreferenciar (imagen esclava); este proceso, se llevó a cabo mediante el paquete de software COSI-Corr, diseñado para correlacionar imágenes de distintas fechas, y permite cuantificar cambios de desplazamiento y velocidad. En esta investigación, se ha implementado una metodología para imágenes ASTER, lo cual, permite encontrar el análisis de correlación y generar vectores de desplazamiento, y conociendo el intervalo temporal de las imágenes, se obtiene la velocidad del flujo glaciar de dos grupos de nevados de la Cordillera Blanca. Los resultados obtenidos a lo largo de los transectos sobre los nevados permitieron cuantificar velocidades de $\sim 0,5 \text{ m d}^{-1}$, e indican mayor velocidad en las partes bajas de las lenguas glaciares.

Palabras clave: COSI-Corr; correlación de imágenes; imágenes ASTER; dinámica glaciar; velocidad de hielo glaciar.

ABSTRACT

For the research, which had used 02 ASTER images of Level L1A from June 17 and August 4, 2002, it had been calibrating the image geometrically (base image), through the ortho-rectification process with a DEM, which were generated from the level curves of the IGN. The correlation technique allows the use of two different images and dates, having the first geo-referenced image (base image) and the second image without georeferencing (slave image); this process was carried out using the COSI-Corr software package, designed to correlate images of different dates and allow to quantify the displacement and velocity changes. In addition, on this software had been implemented a methodology for ASTER images. Which allow the correlation analysis and generates displacement vectors and to know the temporal interval of the images, they obtain the glacial flow velocity of two groups of snow peaks of the Cordillera Blanca. The results obtained along the transects about the snow permit to quantify velocities around $\sim 0,5 \text{ m d}^{-1}$, and to indicate greater speed in the lower parts of the glacier tongue.

Keywords: COSI-Corr; correlation of images; images ASTER; glacial dynamics; glacier ice velocity.

1. INTRODUCCIÓN

Los Andes peruanos contienen el 71% de los glaciares tropicales de Sudamérica, los cuales están distribuidos en 19 cordilleras nevadas divididos en 3 sectores: Norte, Centro y Sur. La Cordillera Blanca, es la cordillera montañosa cubierta de hielo tropical más extensa del mundo y tiene la mayor concentración de hielo en el Perú

y es parte de la Cordillera Occidental con tendencias en dirección noroeste a lo largo de 200 km entre latitud 8° 08' y 9° 58' S y longitud 77° 00' y 77°52' O (Figura 1). Se hallan por encima de los 5,000 y 5,500 msnm, con lenguas glaciares que descienden a veces hasta por debajo de la línea de nieve (Ames, 1989). Según el inventario de glaciares del Perú, iniciado por INGEMMET en 1978 y concluido por Hidrandina S.A. en 1989, se contabilizó 3,004 glaciares agrupados en dieciocho cordilleras, con una cobertura glaciar de 2041,85 km², con espesores que varían entre 13,90 m a 35,24 m, estimándose un volumen de 56,151 km³ de recurso hídrico congelado, siendo el de mayor extensión La Cordillera Blanca con 723,37 km² para 1970 (Ames, 1989). Según Racoviteanu et al. (2008), estima para el año 2003, una superficie glaciar de la Cordillera Blanca en 569,6 ± 21 km² a partir del análisis y procesamiento de imágenes SPOT, lo cual, comprende una pérdida en masa glaciar del 22,4 % entre los años de 1970-2003 y con aumento promedio en las elevaciones de los extremos del glaciar en 113 m, mostrando un desplazamiento de hielo a elevaciones más altas, especialmente en el lado oriental de la Cordillera, lo que indica la desintegración paulatina de los cuerpos de hielo.

La cuantificación exitosa de los cambios hidrológicos y glaciológicos relacionados con el clima y su impacto en la sociedad exige retos de observar, tanto a escala local, como global de cambios que relacionan los parámetros y características físicas como desplazamiento y velocidad en los glaciares. Por su ubicación los glaciares de la Cordillera Blanca se encuentran en geografías de difícil acceso para realizar mediciones “in situ”, especialmente en altitudes superiores a los 5000 msnm; en estas condiciones la teledetección juega un rol importante y ofrece la posibilidad de cuantificar la velocidad del flujo y el hielo glaciar. Calcular la velocidad del glaciar se realiza directamente desde el glaciar con instrumentos de alta precisión, pero la desventaja es que sólo es medible en partes accesibles de un glaciar, en tales condiciones las nuevas tecnologías como la teledetección con imágenes ópticas y radares permite cuantificar tanto cambios espaciales y temporales de las masas glaciares (Durán-Alarcón et al., 2015; Wigmore y Mark, 2017; Altena et al., 2019; Jawak et al., 2019). La World Glacier Monitoring Service (WGMS) y Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS), son iniciativas mundiales para estudiar las fluctuaciones de los campos de hielo y el seguimiento de inventario glaciar en todo el mundo con técnicas satelitales y complementadas a través de interferometría SAR, les ha permitido caracterizar una amplia cobertura espacial de glaciares y validado con datos de campo.

El uso de imágenes para estimar velocidad y desplazamiento en glaciares, se da inicio a finales de 1980 (siglo XX), para determinar desplazamientos en glaciares antárticos, mediante el uso de imágenes del sensor TM (Thematic Mapper) a bordo del satélite LANDSAT, tanto los manuales y técnicas de seguimiento permitieron reconocer elementos desplazados entre las imágenes. Pero, siendo de mayor importancia el uso de imágenes fue, a principios de 1990 cuando se desarrollaron los primeros sistemas de cálculo automático, denominado “**imageodesy**”, basado en varios niveles de interpolación y del cálculo del índice de correlación lineal. Esta técnica se aplicó para desplazamientos de terremoto de Loma Prieta y a la dinámica de campos en dunas en los EE.UU. con imágenes del satélite francés SPOT. Posteriormente otras técnicas más avanzadas desarrolladas por la National Snow and Ice Data Center (NSIDC), implementa un software llamada IMCORR (Image Correlation), que aplica cálculos de correlación cruzada para estudiar la dinámica glaciar entre los años (1996-1999) y se adaptaron estas técnicas para las imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) con enfoque a estudios glaciológicos (Heid, 2011). Y posteriormente en el 2007 fueron implementadas un paquete informático de Software desarrollado por la California Institute of Technology Tectonics Observatory (CALTECH), denominada Co-Registration of Optically Sensed Image and Correlation (COSI-Corr), diseñado en un principio para la detección de deformaciones co-sísmica por Leprince et al. (2007), bajo el entorno del lenguaje IDL e incorporado en la plataforma ENVI como una extensión. En los últimos 10 años se han realizado varias investigaciones tales como, (Taylor y Leprince, 2008; Racoviteanu et al., 2008; Käab et al., 2017; Altena et al., 2019) que utilizaron esta técnica satelital para estudiar la dinámica glaciar de desplazamiento y velocidad en lenguas glaciares de los principales nevados del mundo.

Estudiar las características cuantificables de los glaciares es de vital importancia, se justifica porque es un indicador de los cambios climáticos tanto local como global. En los últimos años el cambio climático es dramática y continúa causando diversos cambios físicos en la tierra, siendo los glaciares tropicales de mayor impacto en la reducción de su área glaciar (Jawak et al., 2018). El calentamiento global es la causa de la reducción de las masas glaciares y esto tiene importantes consecuencias para la hidroenergía, la hidrología en general y las poblaciones que requieren el uso del líquido vital como la agricultura, se verán afectado con consecuencias

en lo económico y el ecosistema en general (IPCC, 2007a; Jawak et al., 2018).

Por lo mencionado y siguiendo los protocolos y técnicas de la teledetección, el presente estudio tiene como objetivo identificar los patrones dinámicos de velocidad de flujo del hielo glaciar, mediante la implementación de un proceso metodológico del software COSI-Corr, y adaptadas para cuantificar parámetros en los glaciares de la Cordillera Blanca en Perú utilizando imágenes del sensor ASTER a bordo del satélite TERRA, esta técnica de correlación está basado en estimar el desplazamiento de un punto (en la imagen de referencia), respecto a otro punto (imagen esclava), del mismo lugar geográfico. Posteriormente se delimita el entorno del píxel en estudio en una ventana rectangular, y a partir del conocimiento aproximado del margen máximo de desplazamiento, se delimita la región de búsqueda del píxel desplazado con la finalidad de identificar la nueva posición en la imagen de referencia, teniendo en cuenta una ventana de la misma dimensión centrada en cada píxel de la región de búsqueda, la correlación tendrá un valor máximo en su nueva posición, obteniendo finalmente resultados de desplazamiento y que posteriormente permitirá encontrar la estimación de velocidades del flujo de hielo sobre la superficial glaciar.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio corresponde a las lenguas glaciares que abarca dos grupos de nevados, siendo el primer grupo (de norte a sur): Chiqllarahu, Hualcan y Copa, y las lagunas principales se encuentran: las lagunas Llanganuco, 69, 513 y Auquiscocha, y a su vez, estos nevados se encuentran entre las provincias de Carhuaz y Asunción y el segundo grupo de nevados (oeste a este): Palcaraju, Tocllaraju, Qupap, Chinchey y Tullparaju que se encuentra entre la provincia de Huaraz y Huari en Ancash (Departamento y Región Ancash, Perú). También, es necesario recordar que estos nevados son parte del Parque Nacional Huascarán que en 1977, la UNESCO reconoció como Reserva de la Biosfera y declarado en 1985, Patrimonio Natural de la Humanidad (**Figura 1**).

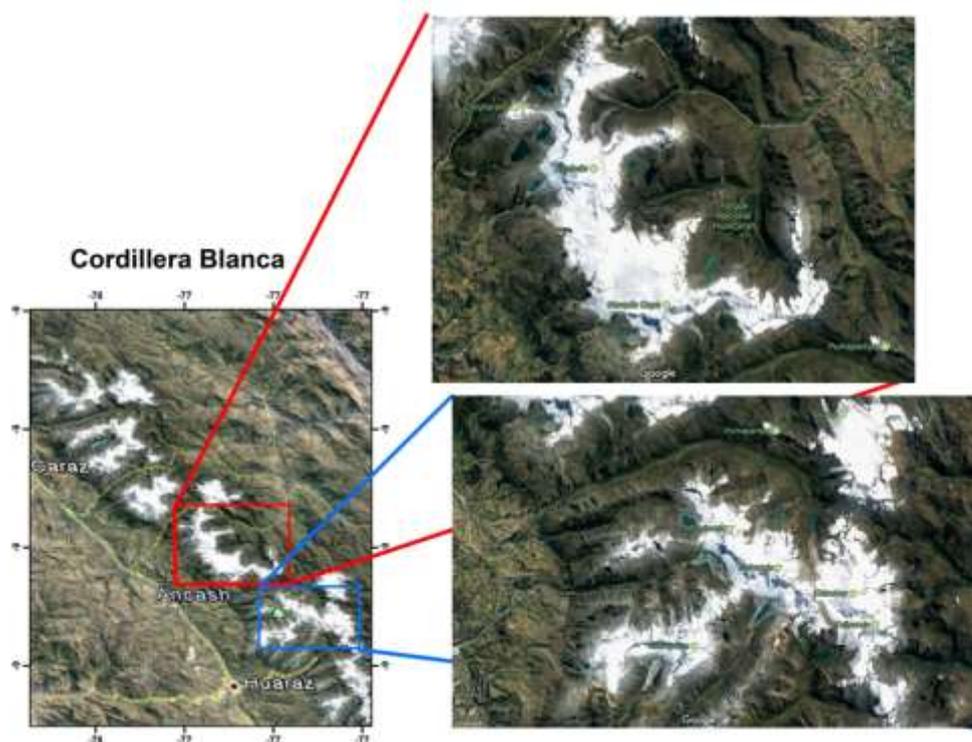


Figura 1. La Cordillera Blanca y encerrado en cuadro superior los nevados que destacan (Chiqllarahu, Hualcan y Copa) y del cuadro inferior los nevados que destacan (Palcaraju, Tocllaraju, Qupap, Chinchey y Tullparaju).

2.2 Imágenes ASTER

El sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a bordo del vehículo espacial TERRA, fue construido por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y obtiene imágenes de la tierra en alta resolución espacial (de 15 a 90 metros de pixel) en 14 bandas (longitudes de onda diferente) del espectro electromagnético que comprende de tres subsistemas ópticos separados: el visible y el infrarrojo cercano (VNIR) con 3 bandas de 15 m y una oblicua con 27,6° posteriores al nadir; el radiómetro infrarrojo de onda corta (SWIR) con 6 bandas de 30 m; y el infrarrojo térmico (TIR) con 5 bandas de 90 m (Abrams et al., 2015).

El satélite TERRA, tiene un ciclo de repetición de 16 días, un promedio de ciclo del 8% y una cobertura de 60 km, las imágenes ASTER y pueden capturar un par de imágenes estereoscópicas cada 44 días aproximadamente (Abrams et al., 2015). Sin embargo, en casos urgentes, como desastres naturales, el periodo de repetición puede reducirse alrededor de 2 días, gracias a los $\pm 8,5^\circ$ de adquisición en paso cruzado del sensor, con una capacidad adicional de una vista a través del paso de $\pm 24^\circ$ solo en las bandas del VNIR (Abrams et al., 2015).

Los tres subsistemas ASTER funcionaron perfectamente hasta abril del 2008, cuando el subsistema SWIR sufrió una falla, probablemente debido a un desacoplamiento del detector, desde entonces, se tiene datos solo en el VNIR y TIR, durante el día, y solo el TIR en la noche. Las imágenes ASTER, se encuentran disponible sin costo a partir del 01 de abril de 2016, y el centro LPDAAC de la NASA distribuye imágenes ASTER Nivel (AST_L1T). Las imágenes ASTER, para este estudio fueron adquiridas del servidor Earthdata de la NASA, con características en la Tabla 1, considerando baja nubosidad y la poca precipitación durante la adquisición de la imagen, evitando así la presencia de nieve temporal.

Tabla 1. Datos imágenes ASTER e información esencial. La imagen adquirida es durante la estación seca (mayo a setiembre).

Datos imagen	Fecha	Acimut solar (°)	Elevación solar (°)	Hora (UTM)
ASTER_L1A	17/06/2002	35,13	50,08	15:35:03
ASTER_L1A	04/08/2002	42,97	53,79	15:30:48

2.3 Información auxiliar

Como elemento adicional se adquirió las curvas de nivel del IGN (Instituto Geográfico Nacional), a través del portal del MINEDU (<http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/>), con cobertura espacial tipo shape (*. shp), descargando los archivos: 19h, 19i, 20h, 20i, estos archivos han sido unidas mediante el software ArcGis 10,4 para transformar en archivo tipo (*. evf) para generar un modelo de elevación digital (DEM, siglas en ingles) de 30 m de resolución espacial que cubre completamente los nevados en estudio.

2.4 Metodología para estimar la velocidad de flujo glaciar mediante COSI-Corr

El programa orientado al manejo de desplazamiento del terreno, extendido también a desplazamiento glaciar, es el Software COSI-Corr, realizado por California Institute of Tecnology (CALTECH), para la descarga se accede al portal: http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/spot_coseis/download_software.html, COSI-Corr, fue diseñado en un principio para la detección de deformaciones co-sísmica (Leprince et al., 2007, 2008). Diseñada en el lenguaje IDL e incorporada a la plataforma ENVI como una extensión de librería, la aplicación permite el procesamiento de fotografías aéreas, así como imágenes ópticas de satélite, incluyendo los sensores ASTER, Quickbird y la familia LANDSAT, y es importante resaltar que los ángulos de toma de las imágenes tienen que ser similares para la obtención de resultados satisfactorios. El diagrama de flujo de la **Figura 2**, muestra los pasos de la metodología implementada en el entorno de COSI-Corr. La descripción detallada de la metodología comprende en lo siguiente:

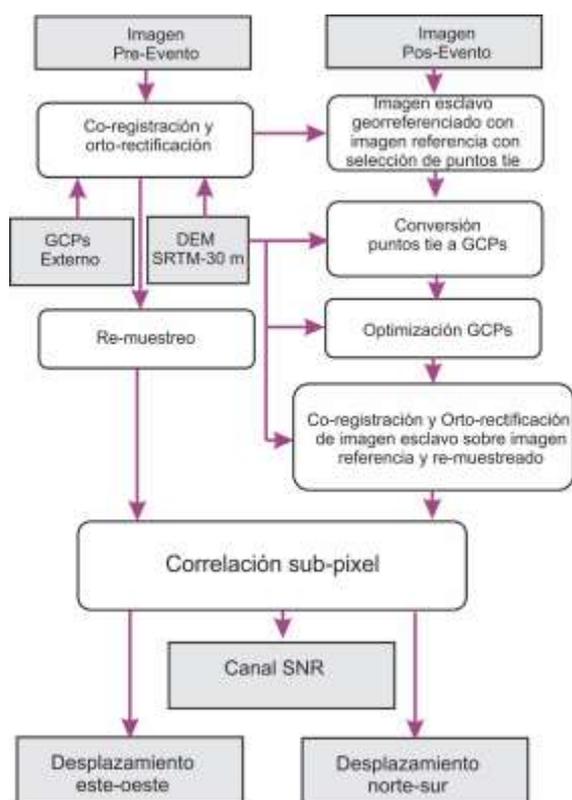


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología para correlación de imágenes mediante COSI-Corr.

Mediante el software ENVI 4.8 se apertura la imagen ASTER que corresponde a la banda VNIR-3N, del 17 de junio del 2002, esta imagen es de 4100x4200 píxeles, con 15 m de resolución espacial es orto-rectificada mediante el DEM de 30 m de resolución espacial, datum WGS84 y proyección vertical EGM96, considerando en adelante imagen base (ortorrectificada). Mientras, la imagen ASTER que corresponde a la banda VNIR-3N, del 04 de agosto del 2002 es la imagen sin georeferenciar llamada imagen esclava (Leprince et al., 2007; Leprince, 2008).

La selección de los puntos de control (GCPs) está separada en dos procesos; el primero es una recopilación de puntos de “empalme” que consiste en el emparejamiento de puntos similares en las dos imágenes, que permite asociar un punto (imagen base) y el punto de la imagen sin la georeferenciación. El resultado es un archivo en formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange), que contiene los valores en píxel de XY, de las imágenes en estudio. El segundo proceso para obtener los puntos de control en tierra, es necesario hacer una conversión del archivo anterior anexando un encabezado, tanto las coordenadas de latitud, longitud, altitud, para valores en píxel de X, y valores en píxel de Y, todo con respecto a la imagen base (ortorrectificada). Para el proceso de la ortorrectificación, se sigue en dos pasos: La primera la construcción de matrices de mapeo entre la imagen esclava y la ortorrectificada, y el segundo es realizar un remuestreo que consiste en una reconstrucción de la imagen con las matrices anteriormente creadas. Por lo general, estos dos pasos se procesan juntos uno después del otro según señala (Leprince et al., 2007; Leprince, 2008).

El resultado es la correlación que emplea COSI-Corr, se basa en un proceso que estima el plano de la fase en el dominio de Fourier. Este análisis produce dos imágenes de correlación, cada una de ellas representando la componente de desplazamiento horizontal del terreno (este-oeste y norte-sur), y una imagen asociada a la relación de señal – ruido (SNR por sus siglas en inglés: Signal-Noise Ratio), como se muestra en la **Figura 3** (Leprince, 2008; Lüttig et al., 2017; Kääb et al., 2017).

A partir de los desplazamientos horizontales este-oeste y norte-sur, se elaboran los vectores de desplazamiento y patrones de flujo de hielo y nieve en la parte superficial del glaciar. Según Leprince (2008) y Yépez et al.

(2012), se utiliza la norma euclidiana para convertida en desplazamientos netos y luego dividir entre la diferencia temporal del par de imágenes para encontrar la velocidad del flujo de hielo glaciar.

$$D = \sqrt{(D_x)^2 + (D_y)^2} \tag{1}$$

$$V = \frac{|D|}{\Delta t} \tag{2}$$

Donde: D es el desplazamiento neto, D_x es el desplazamiento este-oeste, D_y es el desplazamiento norte-sur, V es la velocidad de hielo glaciar, y Δt es la diferencia temporal del par de imágenes.

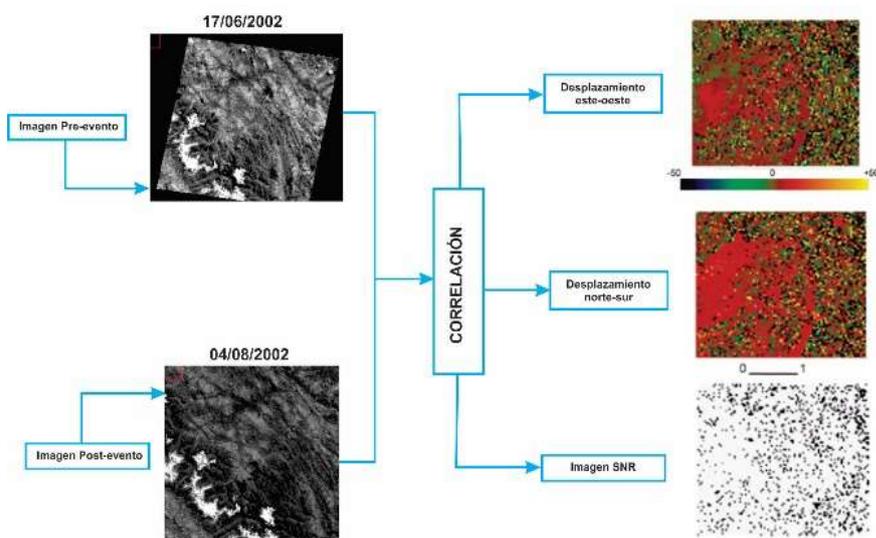


Figura 3. Proceso de correlación entre dos imágenes ASTER con una diferencia en tiempo de 48 días. 3 imágenes son generadas en el análisis: imágenes Norte-Sur, Este – Oeste y de señal-ruido (SNR).

Para la diferencia temporal se normaliza en días, lo cual permite obtener mapas de gradiente de velocidad y finalmente al trazar transectos sobre la superficie glaciar de los nevados en estudio (**Figura 1**), que corresponde a la Cordillera Blanca (**Figura 4, a y b**).

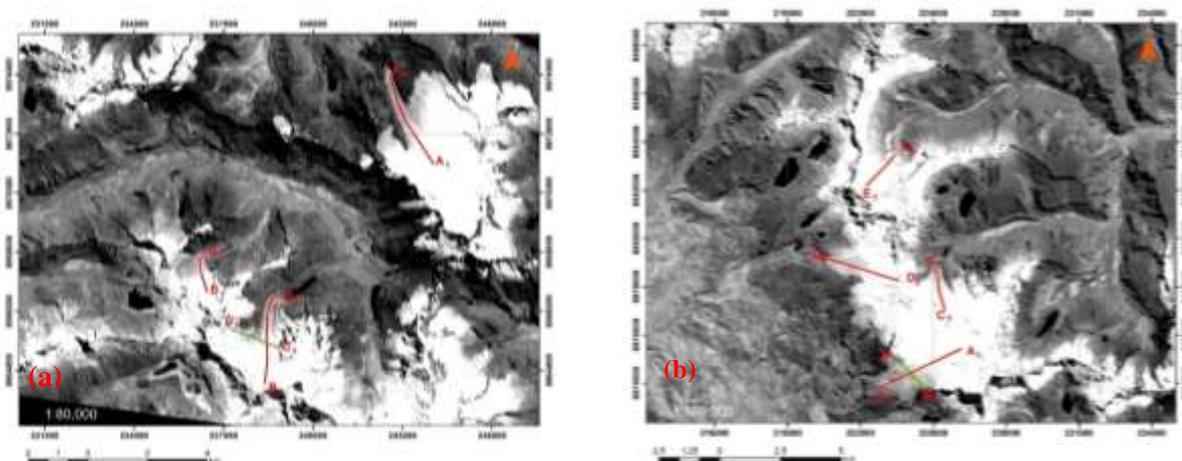


Figura 4. Transectos en las lenguas de los glaciares. (a) primer grupo de nevados: Hualcan, Copa y Chiqllaraju; (b) segundo grupo de nevados Qupap, Chinchey, Tullparaju, Palcaraju y Tocllaraju.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos corresponden a la dinámica glaciara en la Cordillera Blanca, mediante el uso de imágenes ASTER con intervalo de tiempo de 48 días del (17/06 y 04/08 del 2002) y es de estación seca para la región. La metodología se realizó con 24 puntos de control, que corresponden de imagen base a imagen esclava, con un error (RMSE de 0,81), con resultado óptimo y además se aplicó la correlación de frecuencia con tamaño de ventana de 32 a 16 píxeles y una razón de tamaño de 2 píxeles, obteniéndose imágenes de desplazamiento horizontal compuesta en tres componentes: este-oeste, norte-sur, y señal de ruido (SNR), las consideraciones para los valores atípicos fueron tomados de acuerdo a Redpath et al. (2013), que sugiere el rango de ± 20 m. Por tanto, se descartó los valores restantes, mediante el uso de filtros no locales, mediante el motor de búsqueda con áreas de 21x 21 píxeles y tamaño de celdas de 5x5 píxeles, y finalmente el filtro de la mediana de tamaño de ventana de 3x3, basado según las referencias (Taylor y Leprince, 2008; Leprince, 2008; Heid, 2011; Kääb et al., 2017).

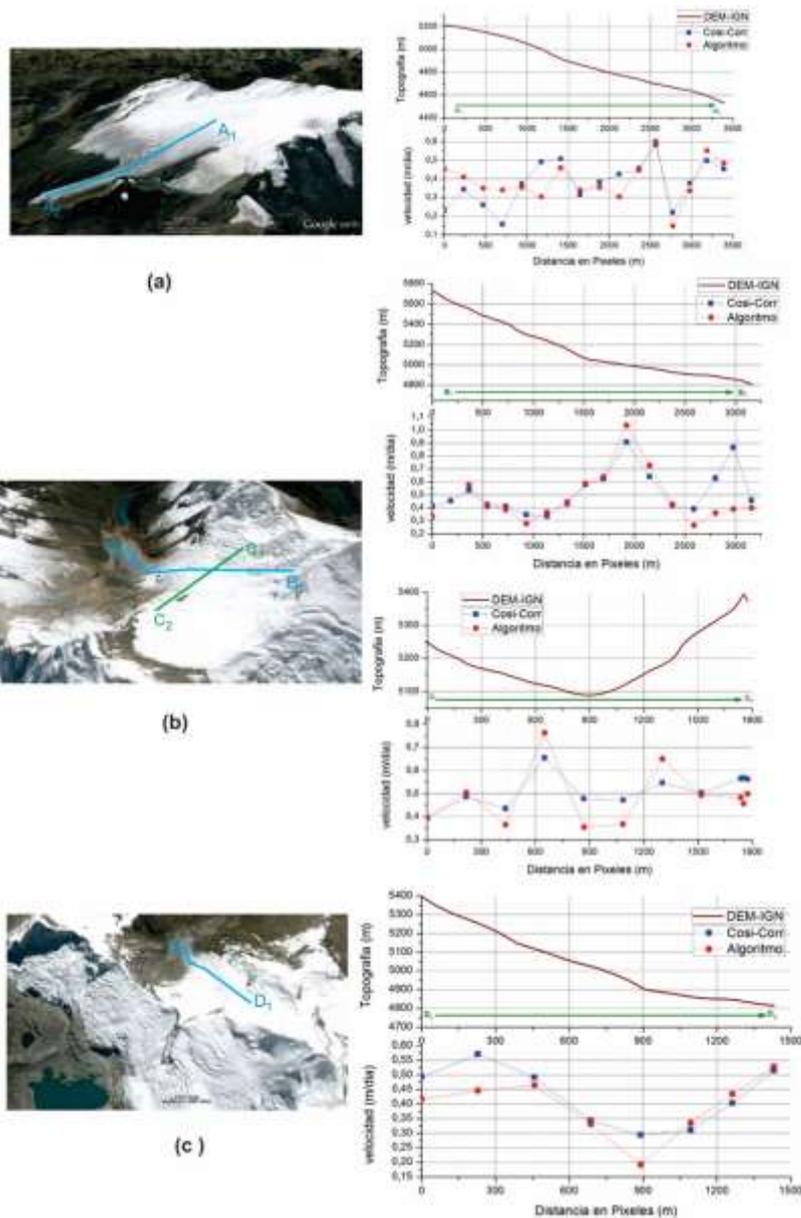


Figura 5. Transectos en lenguas glaciares. (a) nevado Qupap hacia el norte ($A_1 \rightarrow A_2$), (b) nevado Palcaraju orientado al norte ($B_1 \rightarrow B_2$) y ($C_1 \rightarrow C_2$), (c) nevado Tocllaraju orientado al norte ($D_1 \rightarrow D_2$).

Para el análisis cuantitativo se trazan perfiles de velocidad según se recorre en el transecto en las lenguas glaciares de la **Figura 5**, y los datos procesados han sido exportados en un archivo ASCII, para luego ser graficadas en el software ORIGIN 8.3. La **Figura 5 a y b**, contiene el transecto en el glaciar, la pendiente y la gradiente de velocidad mediante el algoritmo de la metodología implementada (**Figura 2**) y mediante la sugerencia del manual COSI-Corr, obteniéndose comparativamente velocidades similares.

Para las variaciones de la velocidad superficial durante el intervalo de tiempo, se consideró en primer lugar, los desplazamientos absolutos a lo largo de un perfil longitudinal ($A_1 \rightarrow A_2$) que comprende 3,4 km de longitud (**Figura 5.a**) de la lengua glaciar Qupap con perfil hacia el norte, con velocidad superficial promedio de 0,37 m/día. Mientras en la (**Figura 5.b**), la lengua glaciar cercano al nevado Palcaraju con perfil orientado al norte, se traza dos transectos la primera con perfil longitudinal ($B_1 \rightarrow B_2$) de 3,2 km, y velocidad promedio 0,52 m/día y el transecto transversal con perfil longitudinal ($C_1 \rightarrow C_2$) de 1,78 km y velocidad promedio 0,51 m/día y finalmente (**Figura 5.c**), la lengua glaciar Tocllaraju con perfil hacia el norte y el perfil longitudinal ($D_1 \rightarrow D_2$) de 1,43 km, y velocidad promedio 0,43 m/día.

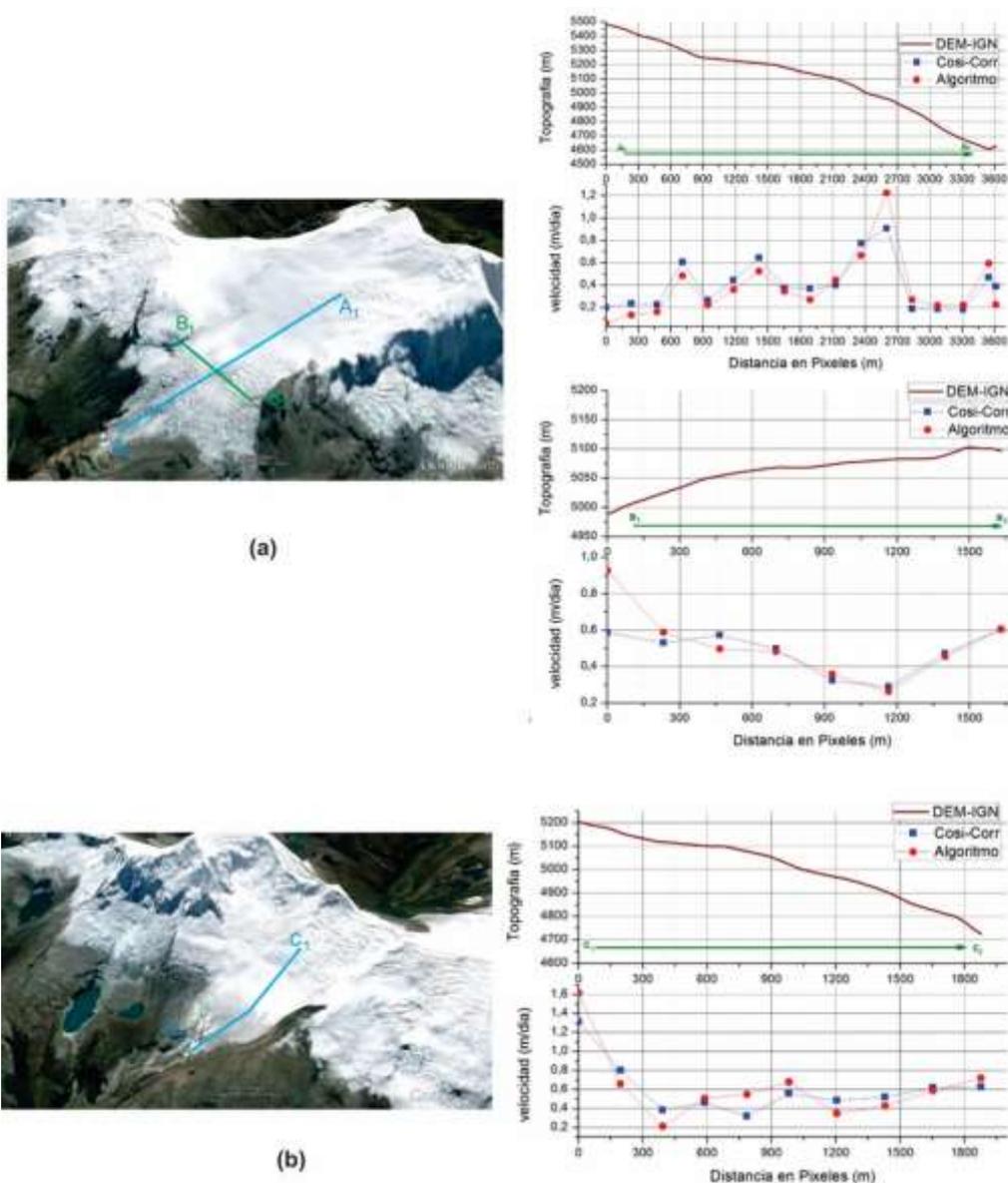


Figura 6. Transectos de lenguas glaciares del nevado Copa. (a) perfil longitudinal (orientación oeste $A_1 \rightarrow A_2$) y ($B_1 \rightarrow B_2$), (b) perfil longitudinal (orientación norte $C_1 \rightarrow C_2$).

En la **(Figura 6, a y b)**. Se trazan dos transectos en la lengua glaciar del nevado Copa, el primer perfil ($A_1 \rightarrow A_2$), de 3,6 km y velocidad promedio 0,40 m/día y la segunda es un trazo transversal con perfil ($B_1 \rightarrow B_2$) de 1,63 km, y velocidad promedio 0,48 m/día, y en las cercanías del mismo nevado hacia el norte se traza el perfil ($C_1 \rightarrow C_2$) de 1,88 km con velocidad promedio de 0,60 m/día. Mientras en la **(Figura 7 c y d)**, en las cercanías del nevado Hualcan se traza transectos con perfil (hacia el sur, $D_1 \rightarrow D_2$), de 3,2 km y el segundo con perfil (hacia el norte, $E_1 \rightarrow E_2$) de 1,73 km hacia el norte y velocidades 0,55 y 0,6 m/día, respectivamente.

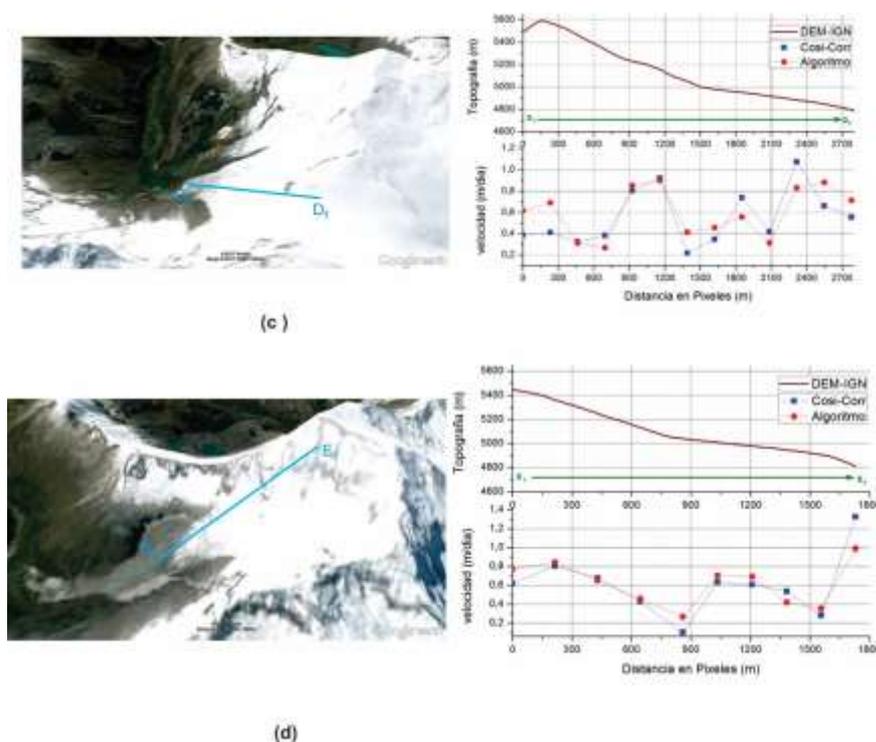


Figura 7. Transectos de lenguas glaciares del nevado Hualcan. (c) perfil longitudinal (orientación al sur $D_1 \rightarrow D_2$), (d) perfil longitudinal (orientación al norte $E_1 \rightarrow E_2$).

El COSI-Corr, y su proceso metodológico fue diseñada por Leprince et al. (2007) y Leprince (2008), aunque originalmente fue utilizado para procesar imágenes ópticas de satélite con enfoque a estudios de terremoto y posteriormente fue adaptado a desplazamiento glaciar. Por tanto, buscar alguna variante metodológica que permita aumentar la precisión se debe principalmente a la buena georreferenciación absoluta de las imágenes y tener en cuenta las limitantes al momento de alinear las imágenes, siendo la principal tarea y buscar estrategias, basado en algoritmos que permita tener resultados confiables, y además la elección de un DEM juega un rol importante en este tipo de estudios. La correlación de dos imágenes tomadas antes y después de un evento producen compensaciones que representa principalmente los desplazamientos horizontales en tierra, y las distorsiones llamadas artefactos (outliers), se corrigen con un proceso de post-procesamiento para obtener mayor precisión en los cálculos cuantitativos de los parámetros de desplazamiento glaciar.

En este proceso de evaluación de desplazamiento, se separó en dos grupos a los nevados, debido que la imagen contiene un sector del nevado de la Cordillera Blanca (escena de la imagen ASTER, 60x 60 km), una vez identificada las lenguas glaciares se realizaron el trazado de los transectos longitudinales desde la parte superior hacia la parte inferior del nevado y dos transectos transversales. A través de los transectos se genero perfil sobre la imagen de velocidades y posteriormente desde el mismo transecto se obtuvo el perfil topográfico; la estrategia es analizar y buscar las fluctuaciones de las velocidades estableciendo relación con los cambios del perfil topográfico, como se puede apreciar en la **(Figura 5, 6 y 7)**.

En algunos segmentos se observaron resultados no coherentes (pendiente ascendente con un aumento de velocidad), lo cual podría ser producto de un efecto inercial de la masa en movimiento. De igual forma, hacia el

segmento transversal se observaron resultados no satisfactorios en cuanto a la correspondencia con el modelo topográfico, tal vez como consecuencia del uso del DEM (por las siglas del inglés digital elevation model) que tiene una resolución espacial de 30m y si se contara con un modelo de elevación del terreno de mayor resolución espacial el porcentaje de coherencia de los datos se incrementaría. Sin embargo, en general los resultados indican una buena coherencia entre las velocidades obtenidas a partir de modelo de correlación con el contorno del terreno modelado a través del DEM.

Además, los resultados, como se muestra en la (Figura 5, 6, 7), para todos los casos indican, que las diferencias entre las velocidades obtenidas, no son de magnitud significativa, y hay mayor velocidad en los bordes de los glaciares y por tanto, es coherente con los parámetros climáticos y se explica que a bajas altitudes del glaciar disminuye el espesor del glaciar, así como, mayor la exposición a temperatura del aire circundante que permite la fusión del hielo glaciar y adquiere mayor velocidad. Además, al comparar los promedios de la velocidad del perfil de los transectos en la **Tabla 2**, presentan tendencias similares.

Tabla 2. Velocidad promedio de los transectos de la figura 5,6 y 7.

Transectos	m d ⁻¹	m a ⁻¹	Transectos	m d ⁻¹	m a ⁻¹
A ₁ → A ₂	0,3786	138,2	A ₁ → A ₂	0,4021	146,8
B ₁ → B ₂	0,5209	190,1	B ₁ → B ₂	0,4838	176,6
C ₁ → C ₂	0,5148	187,9	C ₁ → C ₂	0,6067	221,5
D ₁ → D ₂	0,4276	156,1	D ₁ → D ₂	0,5566	203,2
			E ₁ → E ₂	0,6010	219,4

En cuanto, a los resultados cuantitativos y comparación con otros estudios basado en el mismo proceso metodológico, teniendo en cuenta la resolución de la imagen, la resolución del DEM y el algoritmo metodológico utilizado, puede compararse a nivel de valores de velocidad del hielo glaciar, aunque la Cordillera Blanca es un glaciar tropical y con respuesta climática muy particular frente a los glaciares de otras latitudes, los resultados tienen en común magnitudes próximas entre sí, tal es el caso, los estudios más cercanos a la región realizados por Yépez et al., (2012), mediante el uso de COSI-Corr, con imágenes SPOT, en el glaciar Buenos Aires (Argentina), que al evaluar las estadísticas en el mapa de desplazamiento encontraron que la velocidad mínima y máxima se ubican entre los rangos 0 a 2139 cm/día respectivamente, mientras que la velocidad media en la escena es de 185 cm/día, y al comparar con los promedios de la **Tabla 2**, hay similitud en el comportamiento, del proceso dinámico del glaciar Buenos Aires, con lo obtenido en los nevados tropicales de la Cordillera Blanca.

Analizando el mismo proceso metodológico en glaciar de Nueva Zelanda, Según Redpath et al. (2013) para el glaciar Tasman, con el uso de imágenes ASTER, e intervalos de 416 y 328 días respectivamente, obtuvieron velocidades que variaron alrededor de 150 m/año hasta 200 m/año y cercanas al lago Tasman de ligera elevación, menos de 50 m/ año. De igual manera estudios glaciológicos realizado también en nueva Zelanda por Herman et al. (2017) que cuantificó y representó campos de velocidad de flujo a nivel subpixel (16 días de diferencia) encontrándose velocidades menores de 182 m a⁻¹ que infirió sin cambios significativos en la velocidad y lo consideró debido a su respuesta dinámica de categoría "glaciar de respuesta lenta". En cuanto Nobakht et al., (2014) en glaciares como Kyrgyzstan en el Asia central con imágenes LANDSAT y ASTER indican resultados en regiones de la parte alta del glaciar velocidades de hasta de 0,5 m d⁻¹. Si bien, los estudios de glaciares con imágenes de satélite se dan en distintas latitudes y bajo distintas condiciones, pero los resultados cuantitativos indican que el desplazamiento y velocidad del flujo glaciar son aproximadamente similares, esto lleva comprender que la influencia climática frente a los laboratorios naturales (glaciares) están sometidos al mismo proceso climático.

4. CONCLUSIONES

La metodología empleada basado en parámetros de desplazamiento y velocidad con el software COSI-Corr, y la implementación de un algoritmo metodológico, permitió el análisis de correlación de imágenes y es consistente con los procesos dinámicos en la superficie del glaciar, por lo que concluye que hay una relación con el aumento de velocidad del flujo glaciar y la presencia de pendientes pronunciadas en el perfil topográfico (obtenida del DEM) y en algunos segmentos se observan resultados no coherentes (pendiente ascendente con un aumento de velocidad), esto podría ser producto de un efecto inercial de la masa en movimiento o pequeñas depresiones, usuales en los glaciares tropicales caso de la Cordillera Blanca.

Se ha estimado la velocidad del hielo glaciar mediante la correlación de imágenes ASTER, para los nevados de la Cordillera Blanca, obteniendo para el primer grupo en lenguas glaciares orientado al Norte (Figura 1), que comprende el nevado Qupap con velocidad promedio de 0,378 m/día, mientras para el nevado Palcaraju es de 0,520 m/día y el nevado Tocllaraju 0,427 m/día.

Mientras para el segundo grupo (Figura 1), que comprende el nevado Copa con lengua glaciar orientado al Oeste, se estimó velocidad promedio de 0,402 m/día, mientras para la cara norte la velocidad es de 0,606 m/día y el nevado Hualcan orientado al sur la velocidad es 0,556 m/día. Estimándose en la Cordillera Blanca velocidades promedio de aproximadamente de 0,5 m/día y clasificándose como glaciares poco activo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al centro LP DAAC de la NASA y el Ministerio japonés de Economía, Comercio e Industria (METI) por proporcionar las imágenes ASTER.

Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial, **CONIDA**, por facilitar imágenes y la disposición logística de la presente investigación.

Esta investigación es parte del desarrollo de tesis del Doctorado en la UNT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, M.; Tsu, H.; Hulley, G.; Iwao, K.; Pieri, D.; Cudahy, T.; Kargel J. 2015. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 38: 292–301.
- Altena, B.; Scambos, T.; Fahnestock, M.; Kääb A. 2019. Extracting recent short-term glacier velocity evolution over southern Alaska and the Yukon from a large collection of Landsat data. *The Cryosphere*. 13: 795-814.
- Ames, A. 1989. Inventario de glaciares del Perú. Hidrandina S.A. UGH. Huaraz. Perú. 105 pp.
- Durán-Alarcón, C.; Gevaert, C. M.; Mattar, C.; Jimenez-Muñoz, J. C.; Pasapera-Gonzales, J. Sobrino, J. A.; Silvia-Vidal, J.; Fashe-Raymundo O., Chavez-Espiritu T. W.; Santillan-Portilla, N. 2015. Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery. *Journal of South American Earth Sciences*. 59:19-26.
- Heid, T. 2011. Deriving glacier surface velocities from repeat optical images. ISSN 1501-7710. Thesis. Disponible en: http://www.kiss.caltech.edu/papers/surface/papers/1156_Heid_materie.pdf.
- Herman, F.; Anderson, B.; Leprince, S. 2017. Mountain glacier velocity variation during a retreat/advance cycle quantified using sub-pixel analysis of ASTER images. *J. Glaciol*. 57: 197–207.
- IPCC. 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge: Cambridge University Press.
- Jawak, S. D; Joshi M.; Luis, A.; Pandit, H.; Kumar, S.; Wankhede F.; Somada A. 2019. Mapping velocity of the Potsdam glacier, east Antarctica using LANDSAT -8 data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W13, 2019 ISPRS Geospatial Week, 10-14. The Netherlands.

- Jawak, S.; Kumar, S.; Alvarinho, J.; Bartanwala, M; Tummala, S.; Pandey A. 2018. Evaluation of Geospatial Tools for Generating Accurate Glacier Velocity Maps from Optical Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 2018,2,341, doi: 10.3390/ecrs-2-05154. www.mdpi.com/journal/remotesensing.
- Kääb, A.; Altena, B.; Mascaro J. 2017. Seismic displacements of the 14 November 2016 Mw 7.8 Kaikoura, New Zealand, earthquake using the Planet optical cubesat constellation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17,627-639, doi: 10.5194/nhess-17-627-2017.doi:10.5194/nhess-17-627-2017.www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/17/627/2017.
- Nobakht, M.; Motagh, M.; Hans-Ulrich, W.; Roessner, S.; Kaufmann H. 2014. The Inylchek Glacier in Kyrgyzstan, Central Asia: Insight on Surface Kinematics from Optical Remote Sensing Imagery. *Remote Sens.* 2014, 6: 841-856; doi:10.3390/rs6010841
- Leprince, S. 2008. Monitoring Earth Surface Dynamics With Optical Imagery. California Institute of Technology, Pasadena, California. Thesis of grade. disponible en: ftp://ftp.gps.caltech.edu/pub/leprince/SIAM_08/SIAM_IS_2008.pdf
- Leprince, S.; Ayoub, F.; Avouac, J. 2007. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and sub-pixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE* 45 (6): 1529 – 1558.
- Lüttig, C.; Neckel N.; Humbert, A. 2017. A Combined Approach for filtering Ice Surface velocity Fields Derived from Remote Sensing Methods. *Remote Sens.* 2017,9,1062, doi: 10.3390/rs9101062.
- Racoviteanu, A. E.; Arnaud, Y.; Williams, M. W.; Ordoñez, J. 2008. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing, *J. Glaciol.*, 54(186): 499–510, doi:10.3189/002214308785836922.
- Redpath, T.A.N.; Sirguey, P.; Fitzsimons, S. J.; Kääb A. 2013. Accuracy assessment for mapping glacier flow velocity and detecting flow dynamics from ASTER satellite imagery: Tasman Glacier, New Zealand. *Remote Sensing of Environment.* 133: 90-101
- Taylor, M.; Leprince, S. 2008. Detecting co-seismic displacements in glaciated regions: An example from the great November 2002 Denali earthquake using SPOT horizontal offsets, *Earth and Planetary Science Letters* 270: 209–220.
- Wigmore, O.; Mark, B. 2017. Monitoring Tropical Debris Covered Glacier Dynamics from High Resolution Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry, Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere Discuss.*, doi:10.5194/tc-2017-31.
- Yépez, S.; Torres, W.; Rebolledo, R. 2012. Metodology for flow estimation in the 'Buenos Aires' glacier, hope bay, Antarctic Peninsula. *Interciencia.* 37: 492-497.