

Mapeo espacial-temporal de la cobertura nival en la Sierra del Aconquija, provincias de Tucumán y Catamarca, Argentina, de 2014 a 2021

Spatial-temporal mapping of snow cover in the Aconquija mountain range, Tucumán and Catamarca provinces, Argentina, from 2014 to 2021

Mario Arnaldo Toledo¹

Gloria Patricia Ibañez Palacios²

Ana Lía Ahumada³

Recibido 16 de junio de 2023; aceptado 16 de enero de 2024

RESUMEN

El clima de montaña desempeña un papel significativo en la distribución de los recursos hídricos, debido a la altitud y a la circulación atmosférica regional. En estas áreas, las temperaturas promedio son más bajas y se presentan con frecuencia precipitaciones en forma de granizo y/o nieve. Estas condiciones climáticas tienen una marcada influencia en la preservación de los glaciares de escombros emplazados en las cumbres y que contienen importantes reservorios de recursos hídricos congelados conocidos como “permafrost de montaña”. El presente trabajo tuvo como objetivo delimitar espacialmente y temporalmente las áreas cubiertas por nieve entre los años 2014 y 2021, con el propósito de identificar zonas criogénicas nivales estacionales, que favorecerían su permanencia. Para el mapeo de la nieve se consideró el índice NDSI (Índice de Nieve de Diferencia Normalizada) de las escenas satelitales Landsat 8 OLI-TIRS

¹ Instituto de Geología del Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo, Argentina, correo electrónico: matoledo@lillo.org.ar ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1138-7089>

² Instituto de Geología del Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo, Argentina, correo electrónico: gpibanezpalacios@lillo.org.ar ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9256-5558>

³ CONICET, Argentina, correo electrónico: anaa.gavri@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9256-5558>

y Sentinel 2A y el producto MOD10A2. Estas escenas se circunscriben a la sierra del Aconquija, límite natural entre las provincias de Tucumán y Catamarca. Se obtuvieron las áreas cubiertas de nieve para cada año y las alturas máximas y mínimas, con software libre Qgis 3.12.1 y el Modelo Digital de Elevación SRTM1S28W066V3 con resolución de 1segundo de arco. Los mapas obtenidos muestran que las nevadas se presentaron entre los meses de enero a mayo. La mayor nevada cubrió un área total de 46569,7 ha y un Área Máxima de 4 3030,3 ha. Las Alturas Máximas de nieve no han tenido grandes variaciones, presentándose entre los 4998 y 5534 msnm, pero las Alturas Mínimas han variado notablemente, entre los 4347 y 2649 msnm. Los resultados proporcionan datos innovadores y significativos para comprender de manera más exhaustiva la distribución de la cobertura nival en la Sierra del Aconquija. Los mismos pueden constituir la fundamentación de diversos estudios hidrológicos en la alta cuenca.

Palabras clave: *Sierra del Aconquija, Cobertura nival, Índice NDSI, Glaciares de escombros, Sensores remotos.*

ABSTRACT

Mountain climate plays a significant role in the distribution of water resources due to altitude and regional atmospheric circulation. In these areas, average temperatures are lower, and hail and/or snowfall frequently occur. These climatic conditions have a marked influence on the preservation of rock glaciers located on the summits, which contain important frozen water resources known as "mountain permafrost." The objective of this study was to spatially and temporally delimit the snow-covered areas between 2014 and 2021 to identify seasonal snow cryogenic zones that would support their persistence. The Normalized Difference Snow Index (NDSI) of Landsat 8 OLI-TIRS and Sentinel 2A satellite scenes, as well as the MOD10A2 product, were used for snow mapping. These scenes are located in the Aconquija mountain range, a natural boundary between the provinces of Tucumán and Catamarca. Snow-covered areas for each year and maximum and minimum elevations were obtained using specific open-source software QGIS 3.12.1 and the SRTM1S28W066V3 Digital Elevation Model with a 1-second arc resolution. The maps obtained show that snowfall occurred between January and May. The largest snowfall covered a total area of 46569,7 ha, with a maximum area of 43030,3 ha. Maximum snow heights have not varied significantly, ranging from 4998 to 5534 masl, but minimum heights have varied notably, between 4347 and 2649 masl. The results provide innovative and significant data to better understand snow cover distribution in the Aconquija Mountain Range, serving as the foundation for various hydrological studies in the upper basin.

Key words: *Aconquija mountain range, Snow cover, NDSI index, Rock glaciers, Remote sensors.*

1. Introducción

La posibilidad de obtener los cambios estacionales de la cobertura de nieve en las áreas cumbreales es importante para estudios hidrológicos. Los sensores remotos que trabajan en el rango de longitud de onda del visible e infrarrojo son una excelente herramienta para el monitoreo de nieve en condiciones libres de nubosidad. Las precipitaciones níveas son componentes de la criósfera, que es la parte de la Tierra que incluye las regiones con permafrost, suelo permanentemente congelado, áreas con hielo al descubierto y regiones sujetas a temperaturas por debajo de 0° C gran parte del año (Trombotta Liaudat *et al.*, 2005). Las precipitaciones níveas juegan un rol fundamental en la preservación de los glaciares de escombros, los cuales son una variable que suma reservorio al registro de recursos hídricos conocidos y son importantes en la regulación de caudales de alta y media montaña (Ahumada *et al.*, 2013). Los glaciares de escombros sirven como reservorios de agua a largo y corto plazo y también juegan un papel crucial en la regulación del flujo de los ríos (Brenning, 2003). Durante el invierno temprano, retienen agua en forma de hielo subterráneo, principalmente de la fusión diurna, que se libera en el verano siguiente. Este proceso contribuye al ciclo del agua líquida, y también hay cambios diarios de congelación y descongelación (Brenning, 2003).

El avance de la geoinformática permite actualmente implementar el monitoreo continuo de la criósfera, tanto a nivel anual como mensual a alta resolución espacial y en donde los softwares gratuitos asociados a la BigData se presentan como herramientas útiles para propósitos de observación de los recursos naturales (Leal Parra, 2020).

El uso de la teledetección con un amplio abanico de sensores con diferente resolución espacial y temporal, proporcionan una información muy amplia para su conocimiento (Cea López *et al.*, 2006). En efecto, la utilización de la teledetección ha resultado ser una herramienta metodológica ideal para el monitoreo sistemático de grandes extensiones de terreno por lo general inaccesibles, como es el caso que aquí se analiza. Además, ha abierto la posibilidad de adquirir datos en intervalos regulares proporcionando información sobre el estado y la cobertura de la nieve. Por lo tanto, el uso de información satelital permite registrar algunos de estos cambios e inclusive expresarlos en mapas e índices de cobertura de nieve (Ariza, 2006).

Los métodos para el estudio de la cobertura nívea por teledetección han dado lugar a numerosas publicaciones. Por ejemplo, Dozier (1989) analiza la firma espectral de la capa de nieve alpina utilizando el mapeador temático Landsat; Klein *et al.* (2002) mapean la capa de nieve en los bosques mediante la reflectancia del dosel; Cea *et al.* (2007) determinan la superficie nivosa del Pirineo Catalán mediante el uso de imágenes Landsat y MODIS. El producto MOD10A2 de MODIS de alta resolución fue utilizado por Hall *et al.* (2006); Hall *et al.* (2007) evalúan la precisión de los productos de nieve MODIS; Paudel y Andersen (2011) monitorean la variabilidad de la cubierta de nieve en un área de la región transhimalaya de Nepal utilizando datos MODIS; Huang *et al.* (2011)

validan los productos MODIS con imágenes Landsat y mediciones terrestres en Xinjiang, China; Dahri *et al.* (2011) estudian la distribución altitudinal, espacial y temporal de la cubierta de nieve en el Himalaya paquistaní, Rittger *et al.* (2013) evalúan metodologías para mapear la capa de nieve con el sensor MODIS; Telesca *et al.* (2014) caracterizan la dinámica temporal del manto de nieve en las cadenas montañosas del Líbano; Tahir *et al.* (2015) estudian y comparan las capas de nieve de las cuencas Astore (Himalaya occidental) y Hunza (región de Karakoram); Thapa y Muhammad (2020) analizan los cambios de nieve en la región de Karakoram entre 2003 y 2018.

Trabajos referidos a la temática se llevaron a cabo en Argentina por autores como Ostertag *et al.* (2008), quienes analizan el estado nival de las cuencas Limay y Neuquén por teledetección y SIG; Cogliati *et al.* (2013) realizan estudios de la cubierta de nieve en el norte de la provincia de Neuquén a partir de productos MOD10A2; Cogliati *et al.* (2015) realiza estudios en la cuenca alta del río Neuquén; Cara *et al.* (2016) estudian la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza con imágenes MODIS; Finessi y Cogliati (2018) estudian el área cubierta de nieve en el norte de Neuquén con información satelital; Aumassanne *et al.* (2019) estudian la cobertura de nieve en las cuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y Aumassanne *et al.* (2022) analizan la dinámica anual e interanual de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado.

En esta investigación se realiza el cálculo de las áreas cubiertas de nieve, y se analiza su importancia en la preservación de los glaciares de escombros en la sierra del Aconquija, desde enero 2014 hasta abril de 2021. Para llevar a cabo este estudio se emplearon sensores remotos Landsat 8, Sentinel 2A y el producto de nieve MOD10A2, debido a las dificultades de acceso al área y su gran extensión territorial.

2. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en las cumbres de la sierra del Aconquija, abarcando los sectores más elevados de las cuencas ubicadas en las laderas orientales, occidentales y sur. Esta sierra que se extiende en dirección NE-SW, según se muestra en la Figura 1.a, se encuentra ubicada aproximadamente entre las latitudes 26° 41'13" y 27° 41'31" sur. Es la elevación más prominente de la provincia de Tucumán y límite tanto político como natural con la provincia de Catamarca. Su extremo septentrional es el Abra del Infiernillo y el Alto del Rumiarco, con una altitud de 3039 msnm. Hacia el sur, se encuentran las altas cumbres del Cerro Muñoz, que superan los 4000 msnm (Alderete, 1998). La Sierra presenta un marcado relieve topográfico, alcanzando su punto más elevado en el cerro El Bolsón, con una altitud de 5552 msnm, mientras que su punto más bajo se encuentra en la transición entre el piedemonte inferior y la llanura, a una altitud de 400 msnm.

2.1 Geología

La sierra del Aconquija forma parte del Sistema de Sierras Pampeanas, está constituida por un basamento cristalino, compuesto de rocas metamórficas, ígneas y mixtas, del Precámbrico y Cámbrico Inferior (Aceñolaza y Alonso, 2001). En el piedemonte se encuentran sedimentitas cretácicas, paleógenas y neógenas. Los bloques de basamento que constituyen esta sierra fueron levantados por grandes fallas inversas lítricas, según el esquema propuesto por González Bonorino (1950).

2.2 Suelos

En la cuenca alta la intensa meteorización, producto del clima frío y seco se traduce en el predominio de suelos Torriortentes Xéricos (Leptosoles Eútricos) en las áreas de relieve glaciar/periglacial y de Torriortentes Líticos (Leptosoles Líticos), desarrollados sobre depósitos coluviales y laderas descubiertas (Sayago *et al.*, 1998). En esta área las pendientes son tan fuertes que predomina la erosión sobre los procesos pedogenéticos (Puchulu, 2000).

2.3 Vegetación

Según Santillán de Andrés y Ricci (1980), por arriba de los 2000 msnm crecen pastizales de altura. Las siringas, cortaderas y los chaguares tapizan las paredes rocosas desde de los 3 000 msnm, estos se mezclan con plantas leñosas como la yareta, las gentianas, líquenes y musgos a partir de los 3600 msnm. Por arriba de los 4500 msnm desaparecen las matas gramíneas, solo se encuentran líquenes y musgos hasta el dominio de los afloramientos rocosos.

2.4 Clima

Las masas de aire cálido y húmedo ascienden por la influencia orográfica de la sierra del Aconquija, produciéndose un enfriamiento adiabático, con un primer nivel de condensación entre los 1500 y los 2000 msnm, por lo que es muy grande el aumento de las precipitaciones sobre sus laderas orientales, el piedemonte y la llanura (Bianchi *et al.*, 2005). Dando lugar a una de las zonas más húmedas de la provincia de Tucumán, con registros que superan los 1000 y 1200 mm anuales, alcanzándose en ciertos lugares por su exposición más favorable, registros cercanos a los 2 000 mm anuales. Una vez transpuesta la alta barrera montañosa (de lado catamarqueño), se produce un importante efecto orográfico negativo, disminuyendo bruscamente las lluvias, que alcanzan valores menores a 100 mm en el bolsón Campo del Arenal (Bianchi *et al.*, 2005).

Debido a que los registros térmicos en la región están directamente relacionados con la altitud, las temperaturas medias anuales descienden hacia las cumbres con un gradiente térmico regional de 0,55° C cada 100m. En función de este gradiente y tomando como referencia la temperatura media anual de 17,1° C de la estación meteorológica de Tafí del Valle (la de mayor altura en la región: 1976 msnm), la temperatura media anual extrapolada para 4000 msnm

sería de 2,1° C (Ahumada *et al.*, 2013). La toporregión desde los 4000 hasta los 5 000 msnm o más, corresponde a un clima seco de alta montaña o polar de altura, EB de tipo I de la clasificación de Köppen (1923), que sería equivalente al clima de Tundra, ET de la clasificación de Köppen (1931). En este tipo de clima el suelo está frecuentemente congelado hasta considerables profundidades. La temperatura mínima media de enero se encuentra cercana a 0° C y la de julio en el orden de los -10° C, con más de 200 días con heladas al año (Minetti *et al.*, 2005). En la zona cumbre de la sierra de Aconquija las precipitaciones níveas son esporádicas o ausentes en invierno y las precipitaciones de granizo y/o graupel se registran desde diciembre a marzo. No existen mediciones de estos eventos (Ahumada *et al.*, 2013). La radiación global fue estimada a partir de la radiación entrante en el borde superior de la atmósfera y la medición de la heliofanía relativa, con un valor para la región de altura en estudio de 180Kcal/cm² al año (Minetti *et al.*, 2005). La evapotranspiración potencial media anual calculada por Minetti *et al.* (2005) está entre los 900 y 1000 mm para la franja altitudinal de trabajo.

2.5 Los glaciares de escombros de la Sierra del Aconquija

Durante el Holoceno se desarrollaron los glaciares de escombros de la sierra por arriba del límite inferior de las morenas y por debajo del límite de la línea de nieve permanente actual (Ahumada *et al.*, 2013).

Ibañez Palacios (2007), siguiendo los conceptos de Corte (1983) y Haeberli (1983), evaluó las formas geocriogénicas de la Sierra del Aconquija como parámetros para determinar permafrost de montaña definiendo dos asociaciones geomorfológicas con actividad criogénica: (1) entre los 2000 y 4 000 msnm con procesos periglaciares estacionales, y (2) por encima de los 4000 msnm con permafrost, marcado por la base de los glaciares de escombros activos, caracterizado por la presencia de permafrost discontinuo y por intensos procesos de criofragmentación y crioflujo de laderas. Con el ascenso de la línea de nieves permanentes, a través del tiempo, también fue elevándose progresivamente el límite inferior del permafrost (Ahumada *et al.*, 2013).

El primer inventario de glaciares de escombros en la sierra de Aconquija, utilizado en este trabajo, fue publicado por Ahumada *et al.* (2013). La distribución, localización y dimensiones de estas geoformas fueron determinadas en el ámbito de cuencas mayores y subcuencas. Mediante la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales de la zona. Se reconocieron glaciares de escombros intactos y glaciares cubiertos. Los resultados mostraron que el límite inferior de permafrost de montaña en la sierra de Aconquija es indicado por los glaciares de escombros intactos que ocurren en los 4000 ± 200 msnm.

Los glaciares de escombros de la sierra de la sierra del Aconquija se ubican en las cabeceras de las subcuencas situadas en las laderas, produciendo aportes hídricos a los cauces, debido al descongelamiento estacional de la capa activa.

En la ladera oriental (provincia de Tucumán) se ubican las subcuencas: Pisavil, Las Cañas, Cochuna, Conventillo, Solco y Pueblo Viejo, en la ladera

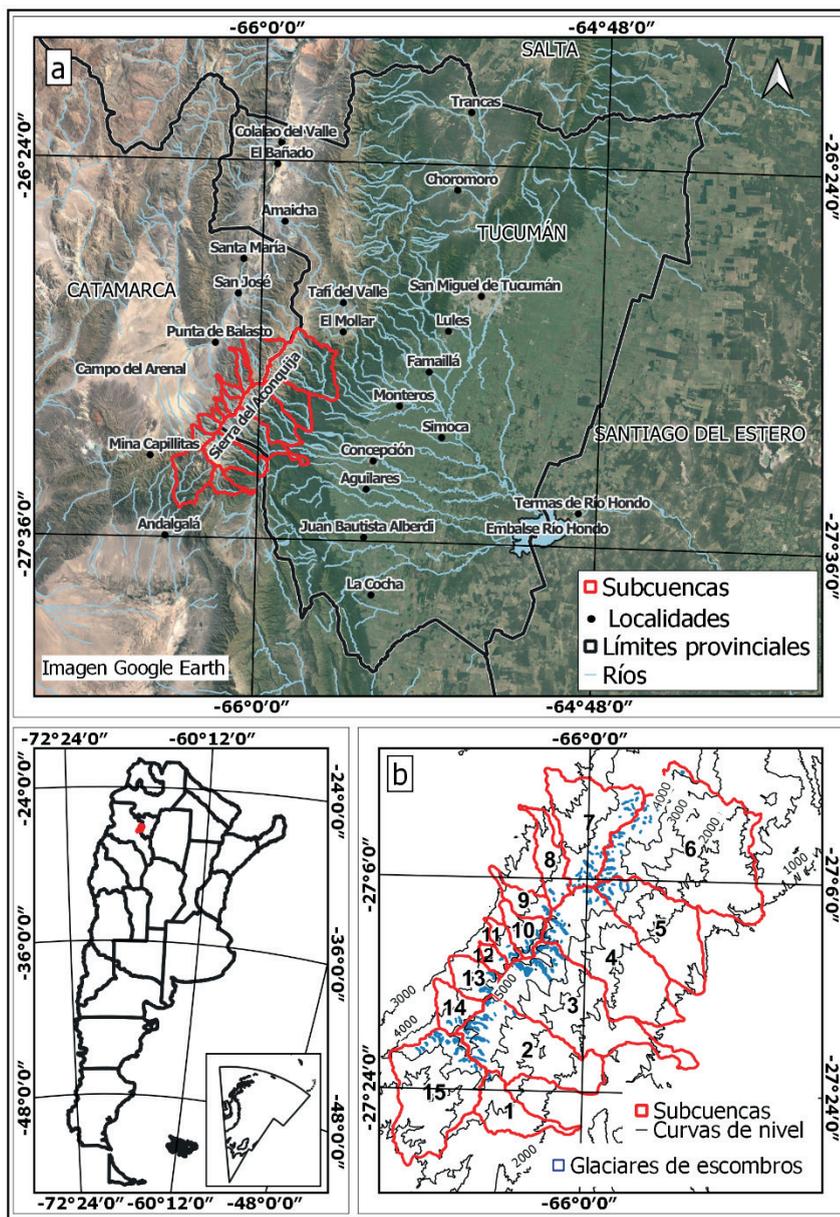


Figura 1.a) Ubicación de las subcuencas en el contexto regional, b) Sub. orientales: 1-Pisavil, 2-Las Cañas, 3-Cochuna, 4-Conventillo, 5-Solco, 6-Pueblo Viejo. Sub. occidentales: 7-La Horqueta, 8-Pajanguillo, 9-Chiflón, 10-Cerrillos, 11-Buey Muerto, 12-El Zarzo, 13-Potrerillos, 14-El Arenal. Sub. Sur. 15-Andalgalá.

occidental (provincia de Catamarca), las subcuencas: La Horqueta (Ampajango), Pajanguillo, Chiflón, Cerrillos, Buey Muerto, El Zarzo, Potrerillos y Arenal y en la ladera sur la subcuenca Andalgalá (Figura 1.b).

La altura y orientación de la Sierra del Aconquija (NNE-SSW) condiciona la entrada de los vientos húmedos de dirección Norte, Sur y Sureste, originando condiciones de humedad diferentes entre las laderas orientales, occidentales y sur.

Las subcuencas orientales reciben las mayores precipitaciones, por lo que el aporte hídrico estacional de los glaciares de escombros hacia los cauces fluviales es mínimo en relación a los caudales generados por las precipitaciones, las cuales alimentan a los principales sistemas fluviales que discurren aguas abajo por el piedemonte, llanura aluvial y deprimida, hasta desaguar en el Embalse río Hondo.

Por el contrario, las subcuencas occidentales y sur reciben menores precipitaciones por lo que tienen deficiencia de agua, los arroyos presentan caudales irregulares en los períodos de sequía, con volúmenes bajos. Ocasionalmente se presentan lluvias intensas. Los arroyos son fuente de aprovisionamiento hídrico básico en esta región (Ahumada *et al.*, 2013), para los pobladores que dependen de este recurso para la cría de ganado y consumo personal. El agua de estos arroyos es embalsada en represas, y si no es aprovechada se insume en los sedimentos cuaternarios del pie de la Sierra.

3. Metodología

Se analizó la cobertura nival en la cuenca alta de la Sierra del Aconquija a través del índice NDSI (Índice de Nieve de Diferencia Normalizada) de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS y Sentinel-2A, descargadas de la plataforma <https://eos.com/landviewer> y el producto denieve MOD10A2, descargado de la plataforma <https://search.earthdata.nasa.gov/search>.

El índice NDSI (Normalized Difference Snow Index), es una medida de la magnitud relativa de la diferencia de reflectancia entre el rango visible del espectro (verde) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). Este índice controla la varianza de dos bandas (una en el infrarrojo cercano o en el infrarrojo de onda corta y otra en las partes visibles del espectro). El NDSI es útil para el mapeo de nieve, la cual no solo es muy reflectante en las partes visibles del espectro electromagnético sino también muy absorbente en el infrarrojo cercano (NIR) o en la parte infrarroja de onda corta del espectro electromagnético, mientras que la mayor parte de la reflectancia de las nubes sigue siendo alta en las mismas partes del espectro, lo que permite una buena separación de la mayoría de las nubes y la nieve (Earth Observing System, 2021).

Durante el proceso de selección de las imágenes, se observó que las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A presentan dificultades para determinar correctamente el índice NDSI debido a la constante nubosidad sobre las cumbres de sierra y la resolución temporal de las imágenes (16 días para Landsat 8 y 10 días para Sentinel 2A), lo que implica un amplio rango de días sin observaciones. Se

seleccionaron y descargaron solo las bandas b3 y b6 del satélite Landsat 8, y las bandas b3 y b11 del satélite Sentinel2A, de las escenas libres de nubosidad, lo que permitió el cálculo de la extensión de la cobertura nívea a través del índice NDSI y las alturas máximas, medias y mínimas de nieve. En la Tabla 1, se detallan las fechas de adquisición de las escenas, y su resolución espacial y temporal.

Tabla 1. Fechas y resoluciones de las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A)
(Re:Resolución espacial; Rt: Resolución temporal)

Landsat 8 (Path:231; Row:079)				Sentinel 2A		
Año	Día / Mes	Año	Día / Mes	Año	Tilin grid	Día/Mes
2014	27 / Enero	2017	25 / Abril	2019	19JGK	06 / Abril
	27 / Noviembre		12 / Junio		20JKR	
2015	30 / Enero		05 / Diciembre	2021	19JGK	30 / Abril
	04 / Abril	22 / Enero	20JKR			
	10 / Agosto	23 / Febrero	Landsat 8: Re=30m; Rt=16 días Sentinel 2A: Re=10m; Rt:10 días			
	30 / Noviembre	2020 29 / Diciembre				
2016	02 / Febrero	2021	15 / Febrero			

La metodología empleada para procesar las bandas de los satélites Landsat 8 y Sentinel2A se encuentra detallada en el diagrama de flujo de la Figura 2.

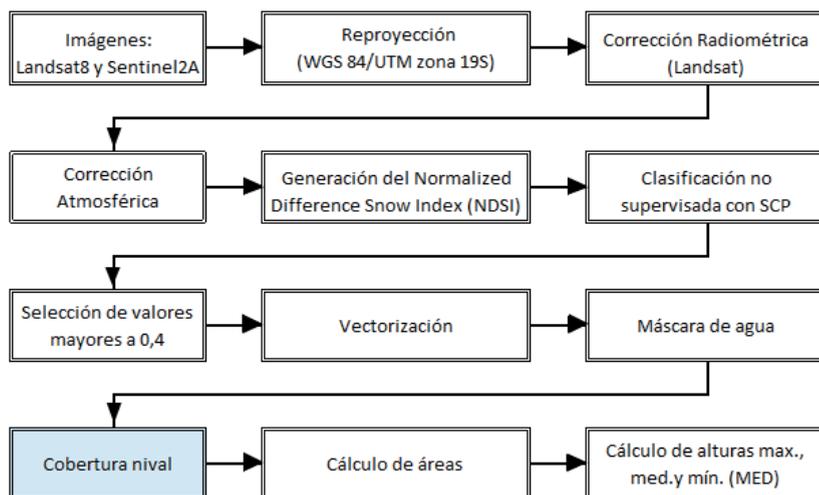


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología aplicada.

Descripción de la metodología:

Reproyección: Las escenas fueron reproyectadas al sistema WGS 84/UTM zona 19S, para ubicarlas en el espacio geográfico de trabajo e integrarlas con otras capas de información en un entorno SIG, utilizando el método cúbico (polinomio de grado 3). **Corrección radiométrica:** con el complemento SCP (Semi-Automatic Classification Plugin del software libre Qgis) se realizó la conversión de DN a niveles de reflectancia TOA solo en las imágenes Landsat 8, dado que los productos Sentinel 2A contienen niveles de reflectancia BOA, que ofrecen datos de reflectancia más próximos a la realidad y niveles de color más realistas. **Corrección atmosférica:** se llevó a cabo con SCP. **Generación del Índice NDSI:** se generó con la calculadora raster, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{NDSI} = (\text{Green-SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR})$$

Para las imágenes Landsat 8 el canal Green corresponde a la banda 3 y el canal SWIR a la banda 6 y para las imágenes Sentinel 2A el canal Green corresponde a la banda 3 y el canal SWIR a la banda 11. El Índice NDSI toma valores entre -1 y 1, fueron clasificados como nieve aquellos píxeles cuyos valores son mayores a 0,4, propuesto por Dozier, (1989), para la determinación de la cubierta nival mediante datos de teledetección. **Clasificación no supervisada:** se realizó con el módulo SCP. *Selección de valores >0,4:* se seleccionó como cubierta nival todas las celdas cuyo valor es superior a 0,4 del índice NDSI. Este procedimiento discrimina la superficie nevada de otras cubiertas. **Vectorización:** se realizó con la herramienta Conversión "Poligonizar Raster a Vectorial" y con las herramientas de Filtro y Edición se discriminaron las áreas cubiertas con nieve en formato SHP para cada escena. **Máscara de agua:** con la capa vectorial de cursos fluviales, vegas y lagunas (digitalizada previamente sobre imágenes ópticas combinación tierra/agua), se eliminaron zonas clasificadas erróneamente durante el proceso como cobertura nieve, utilizando la herramienta "Diferencia", para obtener la cobertura nival. El **Cálculo de áreas** que ocuparon las coberturas nievas para el período considerado se realizó con la herramienta calculadora de campos. **Cálculo de alturas máximas, medias y mínimas:** Se procesaron los polígonos que representan las áreas en formato shape (.shp) para calcular las alturas máximas, medias y mínimas de las superficies cartografiadas. En el proceso se excluyeron valores menores a 0,09 ha, ya que la resolución espacial de Landsat 8 y Sentinel 2A (30m y 10m respectivamente) identifican áreas mayores a este valor. Para este propósito, se utilizó la herramienta "Estadística de zona" utilizando el Modelo Digital de Elevación Shuttle Radar Topography Mission SRTM1S28W066V3 con resolución espacial de 1segundo de arco, aproximadamente 30 metros.

Con los datos obtenidos en el procedimiento anterior, y el propósito de determinar las máximas coberturas de nieve relacionadas a las fechas de las observaciones realizadas sobre las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A, se procesó el producto de nieve MOD10A2 del sensor MODIS. Este producto, de nivel 3, estima la extensión máxima de la cubierta de nieve de ocho días (Hall *et al.*, 2001; 2006), con una resolución espacial de 500 metros y temporal

de dos días. Cada píxel indica de manera cualitativa la presencia o ausencia de nieve, registrada al menos en uno de los ocho días considerados. Se procesó el archivo "Maximum Snow Extent" del producto MOD10A2, disponible en formato de archivo multiobjeto.hdf (formato de datos jerárquicos), que contiene datos y metadatos. Los archivos se convirtieron a formato GeoTIFF con el software Hdf-Eos to GIS Conversion Tool (HEG) descargado de <https://hdfeos.org/software/heg.php>, para ser procesados de forma similar al diagrama de flujo de la Figura 2, el cual se resume de la siguiente manera: **Reproyección (WGS 84/UTM zona 19S)-Clasificación no supervisada -Vectorización-Máscara de agua-Cálculo de áreas-Cálculo de alturas máximas, medias y mínimas.**

Además, se generaron tablas y gráficas complementarias al texto utilizando Microsoft Excel (2013). Las tablas obtenidas incluyen las siguientes métricas: el Área Total (que suma todos los polígonos de nieve), el Área Media, el Área Máxima (la mayor extensión de una cobertura), el Área Mínima (la menor extensión de una cobertura), la Altura Máxima (mayor altura alcanzada por la nieve), la Altura Mínima (la menor altura que alcanzó la nieve) y la Altura media. Los gráficos representan los valores sobresalientes de las tablas, tales como: Área total, Área máxima, Altura máxima, Altura media y Altura mínima.

4. Resultados y Análisis

4.1 Distribución de las áreas nevadas

La Figura 3, Figura 4 y Figura 5, muestran la distribución espacial de las coberturas néveas obtenida a partir de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A (en color blanco), las obtenidas de imágenes MODIS (en color celeste) y los glaciares de escombros (representados por polígonos de color azul). La máxima extensión de cobertura névea se observó el 06 de abril de 2019, la cual cubrió toda la superficie cumbre.

En segundo lugar, en términos de extensión se encuentra la fecha 10 de agosto de 2015, caracterizada por una distribución más uniforme hacia ambas laderas. La mínima cobertura de nieve se observó en fecha 30 de noviembre de 2015 con 652,8 ha. El área con mayor frecuencia de nevadas se localizó en el sector centro-sur de la cumbre y cuenca alta.

4.2 Cálculo de áreas y alturas

4.2.1 Imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos durante el proceso descrito en la sección de Metodología y en la Figura 6 se pueden apreciar las relaciones entre las Áreas Totales y las Áreas Máximas. La fecha con la mayor de Área Total registrada (36,459 ha) corresponde al 06 de abril de 2019, con un valor de Área Máxima de 30503,6 ha. Por otro lado, la fecha con la menor Área Total (652,8 ha) es el 30 de noviembre de 2015, con un Área Máxima de 125,9ha.

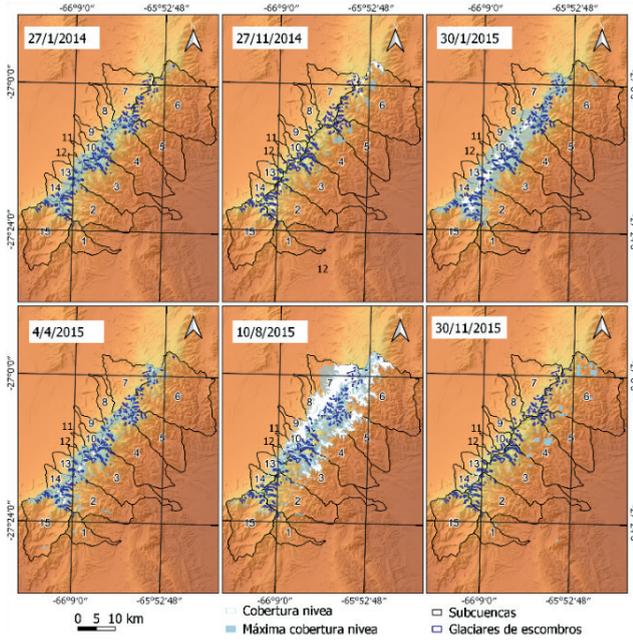


Figura 3. Mapas de coberturas nivales (enero 2014-noviembre 2017).

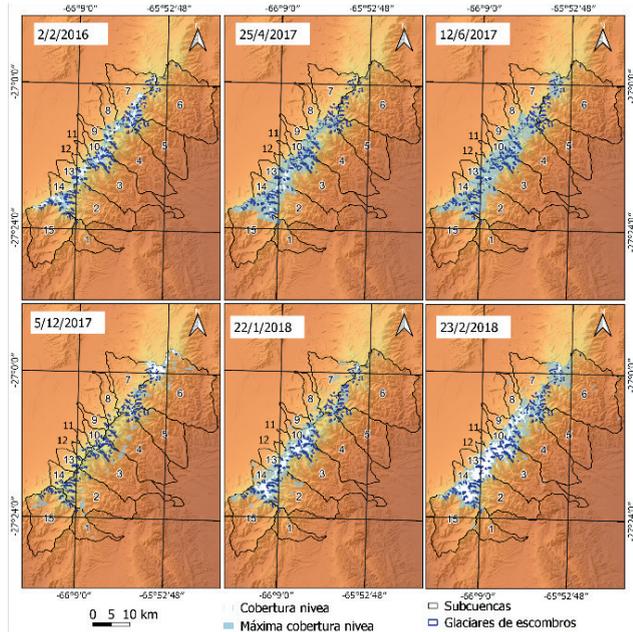


Figura 4. Mapas de coberturas nivales (febrero 2016- febrero 2018).

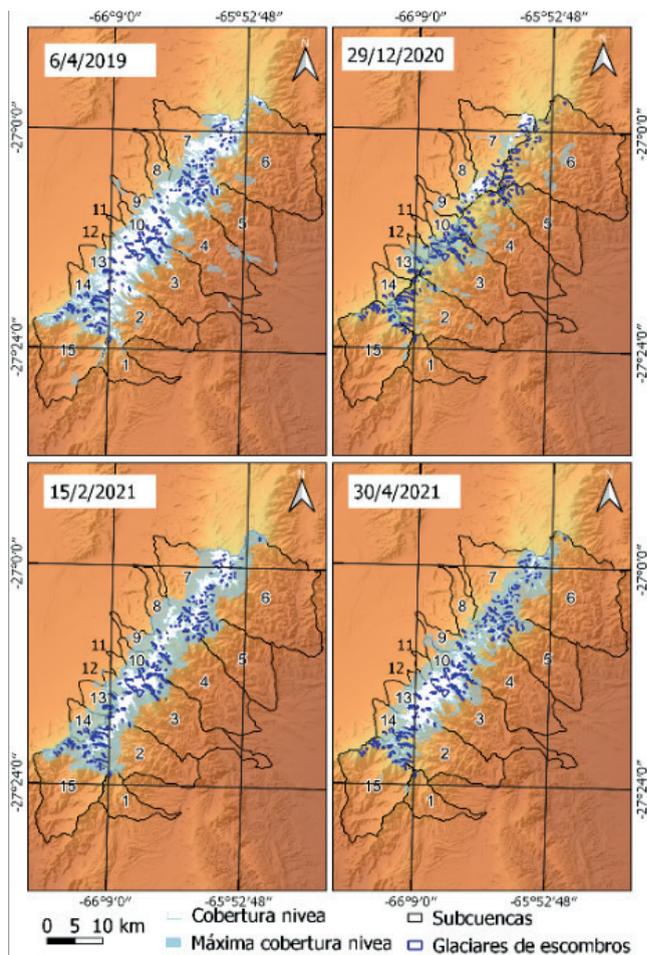


Figura 5. Mapas de coberturas nivales (abril 2019-abril 2021).

En cuanto a las alturas Máximas, estas no han experimentado grandes variaciones, y tienden a manifestarse en las áreas cumbreales, con una altura promedio de 5476,25 msnm. En contraste, las Alturas Mínimas han experimentado notables fluctuaciones. Destaca la Altura Mínima de 2544 msnm observada el 10 de agosto de 2015, en contraposición a la altura mínima de 4622 msnm observada el 22 de enero de 2018.

Durante la máxima nevada que tuvo lugar el 06 de abril de 2019, la cobertura nievea se extendió principalmente en las zonas cumbreales, con una altura mínima de 3467 msnm.

Tabla 2. Fechas, áreas (ha) y alturas (msnm) de las coberturas níveas obtenidas de las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A

Fecha	Area Total	Area Máxima	Area Media	Area Mínima	Altura Máxima	Altura Media	Altura Mínima
27/01/2014	1162,5	379,0	20,39	0,81	5302	4252,0	3202
27/11/2014	1617,3	678,8	9,29	0,64	5500	4631,0	3762
30/01/2015	3160,0	746,2	65,83	1,49	5500	4839,5	4179
04/04/2015	1215,5	228,6	15,99	1,57	5534	5069,5	4605
10/08/2015	30605,7	19925,1	28,9	0,63	5506	4025,0	2544
30/11/2015	652,8	125,9	9,74	1,15	5100	4672,5	4245
02/02/2016	4752,9	810,2	21,7	0,36	5503	4918,0	4333
25/04/2017	3056,3	707,4	10,64	0,7	5534	4719,5	3905
12/06/2017	3458,5	194,7	4,08	1,21	5503	4459,5	3416
05/12/2017	3007,5	2292,8	19,66	0,42	5534	4763,5	3993
22/01/2018	4584,2	1733,4	52,09	0,36	5534	5078,0	4622
23/02/2018	13111,0	8674,0	51,01	0,63	5534	4820,0	4106
06/04/2019	36459,0	30503,6	19,87	0,16	5537	4502,0	3467
29/12/2020	2573,0	857,3	31	0,64	5430	4703,0	3976
15/02/2021	16379,8	14630,6	57,27	0,36	5534	4660,0	3786
30/04/2021	14478,2	10031,0	10,74	0,16	5535	4635,0	3735

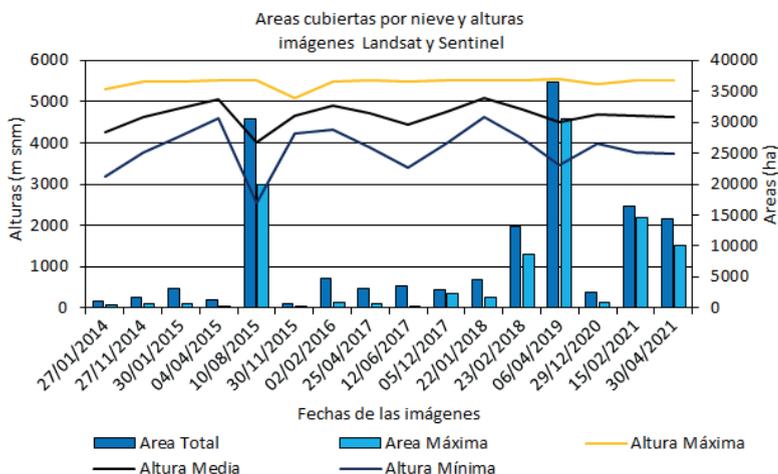


Figura 6. Áreas y alturas de nieve (imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A).

En la Tabla 3 se muestran las áreas que ocupan los glaciares de escombros en las laderas de la sierra, así como los sectores de estas que fueron cubiertos por eventos de nieve. La elaboración de la Tabla 3 se basó en la selección de siete fechas específicas, elegidas en función de extensión superficial y distribución espacial de las coberturas níveas.

Tabla 3. Áreas que ocupan los glaciares de escombros (ha), fechas de los eventos de nieve y superficie cubierta por nieve sobre los glaciares de escombros (ha)

Sierra del Aconquija	Area GE	Nieve 10/08/2015	Nieve 23/02/2018	Nieve 22/01/2018	Nieve 06/04/2019	Nieve 29/12/2020	Nieve 15/02/2021	Nieve 30/04/2021
CN/GE Ladera Sur	197,07	2,19	57,19	8,85	93,61		43,71	2,54
CN/GE Ladera Occidental	484,23	347,64	220,86	43,61	381,35	58,29	181,31	221,8
CN/GE Ladera Oriental	1337,95	211,19	298,97	72,38	1078,73		551,21	692,29

En la Figura 7 se presentan los datos extraídos de la Tabla 3. A partir de la interpretación de los mismos, se desprende que, en la fecha 6 de abril de 2019, la cobertura nívea máxima alcanzó un área de 1078,73 ha, lo cual representa el 80,68% de las 1337,95 ha que abarcan los glaciares de escombros en la ladera oriental. En contraste, la cobertura nívea mínima se registró en fecha 22 de enero de 2018, con una extensión de 72,38 ha. La media de cobertura nívea fue de 484,13 ha.

Los glaciares de escombros de la ladera occidental abarcan una superficie total de 484,23 ha. La máxima extensión de cobertura nívea se alcanzó el 06 de abril de 2019, con un área de 381,35 ha, mientras que la cobertura mínima se registró el 22 de enero de 2018, con tan solo 43,61 ha. En promedio, la cobertura nívea fue de 207,84 ha. Por otro lado, los glaciares de escombros en la ladera sur ocupan una superficie de 197,07 ha. La máxima cobertura nívea se observó el 6 de abril de 2019, alcanzando 93,67 ha, en contraste con la mínima registrada el 10 de agosto de 2015, que fue de 2,19 ha. La cobertura media en esta zona se situó en 29,73 ha.

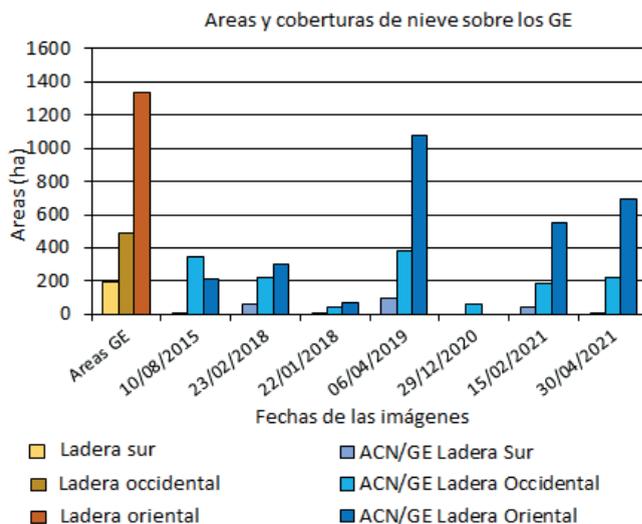


Figura 7. Áreas (ha) GE (Glaciares de Escombros), y ACN/GE (Áreas Cubiertas de Nieve/GE).

4.2.2 Producto de nieve MOD10A2

La Tabla 4 relaciona las fechas de las nevadas observadas en imágenes de Landsat 8 y Sentinel 2A con periodos de ocho días del producto MOD10A2. Se han excluido tres de los 16 periodos analizados (27 de noviembre de 2014, 30 de noviembre de 2015 y 5 de diciembre de 201), debido a su distribución espacial dispersa y su mínima influencia en los glaciares de escombros. En la Figura 8 se representan gráficamente los valores de Área total y Máxima de

la Tabla 4. El período con el mayor valor de Área Total (46569,7 ha) fue del 30 de marzo al 6 de abril de 2019, que incluyó la mayor nevada registrada en las cuencas, observada en imagen Sentinel 2A, con un Área Máxima de 43030,3 ha. El período con menor Área Total (10030,9 ha) fue del 26 de diciembre de 2019 al 2 de enero de 2020, con un Área Máxima de 4451,6 ha.

Las alturas Máximas se mantuvieron constantes en 5534 msnm, cerca de la máxima altitud de la sierra (cerro El Bolsón, 5 550 msnm). Las Alturas Mínimas variaron desde 2740 msnm en el período de 5 al 12 de agosto de 2015 hasta 4347 msnm en el período 30 de marzo al 6 de abril de 2015. La mayor nevada del período 30 de marzo al 6 de abril de 2019 tuvo una Altura Mínima de 3421 msnm.

Tabla 4. Fechas, áreas (ha) y alturas (msnm) de las coberturas níveas, obtenidas con el producto de nieve MOD10A2

Imágenes Landsat y Sentinel	Producto (8días) MOD10A2	Orden	Area Total	Area Máxima	Area Media	Area Mínima	Altura Máxima	Altura Media	Altura Mínima
27/01/2014	25/01-01/02-2014	1	14187,8	13930,6	1418,78	21,43	5534,0	4245,00	3696,00
30/01/2015	25/01-01/02-2015	2	30942,4	30428,4	3094,24	20,96	5534,0	4336,00	3481,00
04/04/2015	30/03-06/04-2015	3	19080,7	16467,1	657,95	19,04	5534,0	4772,23	4347,00
10/08/2015	05/08-12/08-2015	4	25934,2	23654,3	1037,37	18,47	5534,0	4373,38	2740,00
02/02/2016	02/02-09/02-2016	5	22639,6	754,7	359,36	0,2	5534,0	4830,14	3847,00
25/04/2017	23/04-30/04-2017	6	20630,7	20459,2	2947,24	21,43	5534,0	4552,98	3624,00
12/06/2017	10/06-17/06-2017	7	22663,5	20739,3	2060,32	5,59	5534,0	4552,85	3875,00
22/01/2018	17/01-24/01-2018	8	15021,0	11423,0	357,64	14	5534,0	4669,93	3913,00
23/02/2018	18/02-25/02-2018	9	24838,1	19918,5	887,07	0,92	5534,0	4497,44	3554,00
06/04/2019	30/03-06/04-2019	10	46569,7	43030,3	1225,5	13,26	5534,0	4531,32	3421,00
29/12/2020	26/12-02/01-2020	11	10030,9	4451,6	218,06	21,43	5534,0	4396,50	3260,00
15/02/2021	10/02-17/02-2021	12	45216,9	44485,2	1965,95	21,43	5534,0	4540,41	3376,00
30/04/2021	23/04-30/04-2021	13	31628,9	30692,9	1437,68	0,9	5534,0	4388,42	3237,00

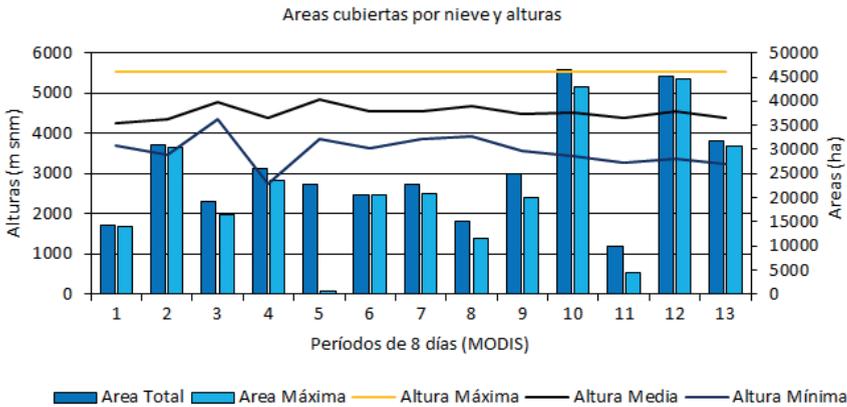


Figura 8. Áreas y alturas de nieve (producto de nieve MOD10A2).

En relación con la extensión máxima de nieve detectada mediante el producto MOD10A2 sobre los glaciares de escombros, se presentan los valores de cobertura en la Tabla 5 y se ilustra gráficamente en la Figura 9.

Tabla 5. Áreas que ocupan los glaciares de escombros (ha), fechas de los eventos de nieve y superficie cubierta por nieve sobre los glaciares de escombros (ha)

Sierra del Aconquija	Áreas GE	MODIS (Períodos de 8 días)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ACN/GE Ladera Sur	197,07	47,59	169,3	132		30,55	193,01	121,54	85	150,5	168,17	33,23	181,8	58,98
ACN/GE Ladera Occidental	484,23	262,7	389,3	306,7	306,6	144,16	265,83	345,71	195	357,5	468,38	94,67	468,4	348,6
ACN/GE Ladera Oriental	1337,95	523,3	988,5	708,6	211,2	157,91	818,14	748,85	508	720,4	1215,5	232,9	1197	855,2

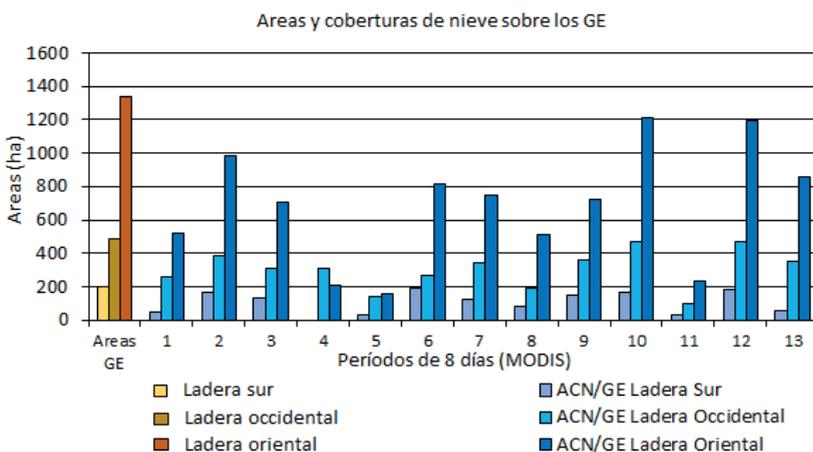


Figura 9. Áreas (ha) GE (Glaciares de Escombros), y ACN/GE (Áreas Cubiertas de Nieve / GE).

Las coberturas de nieve registradas a través del producto MOD10A2 han tenido un impacto más significativo en los glaciares de escombros en la ladera oriental de la sierra. Durante el período de mayor extensión superficial, del 30/03-06/04-2019, se cubrieron 1215,52 ha de las 1337,95 ha que ocupan los glaciares de escombros en esta ladera. La cobertura mínima se registró en el período del 2 al 9 de febrero de 2016, con 157,91 ha cubiertas, mientras que la cobertura promedio fue de 683,53 ha. En lo que respecta a los glaciares de escombros en la ladera occidental, que ocupan 484,23 ha, la cobertura máxima alcanzó las 468,38 ha, mientras que la mínima se observó en el período del 26 de diciembre de 2019 al 2 de enero de 2020, con solo 94,67 ha cubiertas. La cobertura media fue de 304,11 ha.

Por último, en el caso de los glaciares de escombros en la ladera sur, que abarcan 197,07 ha, la máxima cobertura se registró en el período del 23 al 30 de abril de 2017, con 193,01 ha cubiertas, mientras que la se dio en el período del 2 al 9 de febrero de 2016, con solo 30,55 ha. La cobertura media fue de 105,52 ha.

4.2.3 Comparación de cubiertas de nieve entre las imágenes

Landsat 8 y Sentinel 2A y el producto de nieve MOD10A2

En la Tabla 6. se compara en porcentaje (%) las cubiertas de nieve entre las imágenes Landsat 8, Sentinel 2A y el producto MODIS. Los valores positivos

indican el porcentaje en que la cobertura nival de MODIS supera a Landsat 8 y Sentinel 2A, mientras que los valores negativos indican lo contrario. Como puede observarse, entre los años 2014-2021 solo en tres eventos de nieve (valores negativos en celda de color naranja) la cobertura de MODIS fue inferior a la cobertura de Landsat 8 y Sentinel 2A.

Tabla 6. Comparación entre las coberturas obtenidas con imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 A con el producto de nieve MOD10A2

Landsat y Sentinel		MODIS		%
Fecha	Áreas Totales	Período	Área Total	
27/01/2014	1162,5	25/01-01/02-2014	14187,8	91,81
27/11/2014	1617,3	25/11-02/12-2014	1114,8	-31,07
30/01/2015	3160,0	25/01-01/02-2015	30942,4	89,79
04/04/2015	1215,5	30/03-06/04-2015	19080,7	93,63
10/08/2015	30605,7	05/08-12/08-2015	25934,2	-15,26
30/11/2015	652,8	25/11-02/12-2015	1664,0	60,77
02/02/2016	4752,9	02/02-09/02-2016	22639,6	79,01
25/04/2017	3056,3	23/04-30/04-2017	20630,7	85,19
12/06/2017	3458,5	10/06-17/06-2017	22663,5	84,74
05/12/2017	3007,5	03/12-10/12-2017	2871,9	-4,51
22/01/2018	4584,2	17/01-24/01-2018	15021,0	69,48
23/02/2018	13111,0	18/02-25/02-2018	24838,1	47,21
06/04/2019	36459,0	30/03-06/04-2019	46569,7	21,71
29/12/2020	2573,0	26/12-02/01-2020	10030,9	74,35
15/02/2021	16379,8	10/02-17/02-2021	45216,9	63,78
30/04/2021	14478,2	23/04-30/04-2021	31628,9	54,22

5. Discusión

La cobertura nival es un elemento físico esencial en las cuencas altas de los sistemas hídricos y constituyen importantes reservorios de agua, especialmente en estado sólido. Los glaciares de escombros acumulan el agua infiltrada que proviene de la fusión diurna de la nieve, lo que contribuye al crecimiento del permafrost durante el invierno (Brenning, 2003). Por lo tanto, el monitoreo del estado de la cobertura de nieve es fundamental para evaluar la existencia del permafrost de montaña.

Este estudio se centró en analizar la extensión de la cobertura de nieve y su relación espacial con los glaciares de escombros, con el objetivo de determinar hasta qué punto las precipitaciones nivas influyen en la preservación de estas geoformas. Aunque el período bajo consideración (2014-2021) no abarca un lapso extenso, el análisis realizado permitió obtener información preliminar de la cobertura nival en la sierra del Aconquija.

La creación de cartografía se logró mediante técnicas de teledetección, aprovechando la respuesta espectral característica de la nieve que la distingue de otras cubiertas. Los resultados obtenidos a partir de la metodología aplicada con imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A han sido altamente satisfactorios. Se seleccionaron imágenes con sumo cuidado, priorizando escenas libres de nubes y sin sombras de nubes sobre las cumbres. Sin embargo, es importante destacar que debido a la resolución temporal de las imágenes (16 días para Landsat

8 y 10 días para Sentinel 2A), además de la exclusión de numerosas escenas debido a la presencia de nubes, se han generado intervalos prolongados sin observaciones disponibles.

Una vez realizados los cálculos de superficie se comprobó como la resolución espacial de las imágenes influyó en la calidad de la información gráfica obtenida. En el caso de las imágenes Landsat 8, que cuentan con una resolución espacial de 30m, se lograron excelentes resultados. Sin embargo, los resultados obtenidos con las imágenes Sentinel2A, que poseen una resolución espacial de 10m, superaron de manera significativa a los de Landsat 8. La aplicación de la metodología con imágenes Sentinel 2A ofrece una clasificación de mayor calidad. Además, el uso de máscaras de agua contribuye significativamente a una diferenciación precisa, reduciendo así la posibilidad de confusiones en la clasificación.

El producto de nieve MOD10A2 de 8 días tiene una resolución espacial de 500 metros y una resolución temporal de 1 a 2 días, lo que facilitó la obtención de una mayor cantidad de información sobre la superficie. Sin embargo, su clasificación es menos detallada, lo que puede dar lugar a errores notables al calcular la extensión de la cobertura de nieve. Los mayores errores se presentaron en la detección de cubiertas de nieve menores, a causa de su resolución espacial, lo que afectan los resultados finales. A pesar de lo mencionado, se utilizó este producto para analizar la extensión máxima que tuvieron las precipitaciones níveas, relacionadas con las fechas de ocurrencia de los eventos de nieve registrados en las imágenes de Landsat8 y Sentinel 2A. Aunque no es posible una comparación perfecta de las superficies obtenidas con estos satélites debido a sus diferentes resoluciones espaciales, en la mayoría de los casos, la superficie calculada utilizando el producto MOD10A2 resultó ser mayor que la calculada con las imágenes de Landsat 8 y Sentinel 2A. Los datos de la Tabla 6 muestran que solo en tres ocasiones la cobertura de nieve detectada por Landsat 8 y Sentinel 2A superó a la del producto MOD10A2.

El estudio destaca una alta correlación espacial entre la ubicación de los glaciares escombros en la cuenca alta de la Sierra del Aconquija y las áreas de máxima extensión de nieve durante el año. Esto sugiere que los glaciares de escombros no solo recibieron el aporte hídrico de la fusión de la nieve acumulada en su superficie, sino también de la nieve acumulada aguas arriba en los sectores que drenan hacia estos, tales como sus áreas de aporte.

Los datos recopilados sobre la evolución y distribución de nieve enriquecen nuestro entendimiento de las precipitaciones níveas en la sierra del Aconquija y sirven de base para investigaciones futuras que permitan combinarla con información sobre la orientación de los valles donde se emplazan los glaciares de escombros y las características del relieve que crean las condiciones para la preservación del permafrost. Un dato esencial es la información sobre la temperatura, la cual podrá ser obtenida de sensores remotos específicos.

6. Conclusiones

- La metodología empleada en este estudio ha posibilitado la cartografía de las áreas cubiertas por nieve desde enero 2014 a abril 2021, mediante el

uso de sensores remotos en bandas ópticas e infrarrojas. Sin embargo, se presentaron limitaciones debido a la presencia de nubes en las cumbres, lo que obstaculizó la correcta visualización de la cobertura nival en las imágenes de los satélites Landsat 8 y Sentinel 2A. Esto resultó en la imposibilidad de observar algunas escenas que habrían sido relevantes en el análisis temporal.

- Mediante el procesamiento de los datos del producto de nieve MOD10A2 del sensor MODIS, se pudo determinar la extensión máxima de las cubiertas de nieve en períodos de 8 días. Estos períodos se seleccionaron en función de las fechas de las imágenes capturadas por los satélites Landsat 8 y Sentinel 2A.
- La comparación de los resultados obtenidos al calcular las áreas entre las Imágenes Landsat y Sentinel con el producto MOD10A2, revela que MOD10A2 ha superado estos valores en un rango de 21,71% al 91,81% en relación a los eventos de nieve registrados en las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A. En contraste, en solo tres casos, los eventos de nieve de Landsat 8 y Sentinel 2A superaron la cobertura de nieve de 8 días de MODIS, con un rango de valores entre 4,51a 31,7%.
- El área con mayor frecuencia de nevadas se presentó en el sector centro-sur de la cumbre y cuenca alta de ambas laderas.
- Durante los meses de enero a abril, se registraron extensiones de nieve significativas en las cumbres. Destacan especialmente las siguientes fechas y áreas nevadas: el 06 de abril de 2019 (46569,7 ha), el 15 de febrero de 2021 (45216 ha) y el 30 de abril de 2021 (31628,9 ha). Otros eventos importantes de precipitaciones níveas incluyen el 10 de agosto de 2015 (25934,2 ha) y el 12 de junio de 2017 (22663,5 ha).
- Las alturas máximas de nieve no han tenido grandes variaciones, oscilando entre 5100 msnm y 5534 msnm. Sin embargo, se han observado notables variaciones en las alturas mínimas, que han fluctuado entre 2740 msnm y 4347 msnm.
- Las precipitaciones níveas beneficiaron principalmente a los glaciares de escombros en la ladera oriental, seguidos en importancia por los glaciares de escombros en la ladera occidental y en la ladera sur.
- -La máxima precipitación de nieve registrada en imagen Sentinel 2A del 6 de abril de 2019, cubrió un área de 1535,69 ha de las 2019,25 ha de glaciares de escombros. Por otro lado, durante período 30 de marzo al 6 de abril de 2019, la máxima extensión de nieve captada por MODIS, abarco 1852,07 ha de glaciares de escombros.
- Puede concluirse que durante el lapso analizado en las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A los glaciares de escombros tuvieron una cobertura nívea de 652,53 ha, lo que representa el 32,31% de la superficie total de los glaciares de escombros Mientras que el producto MODIS indica una cobertura nívea media de 1093 ha., lo que representa el 54,13%.
- Los resultados obtenidos indican que los glaciares de escombros han sido parcialmente cubiertos por las precipitaciones níveas, lo que sugiere que han experimentado aportes hídricos debido a la fusión de la nieve.

Sin embargo, no es posible cuantificar el aporte, ya que en la zona no se encuentran estaciones meteorológicas que permitan estimar los espesores y la evaporación potencial.

Agradecimientos

A la Fundación Miguel Lillo por haber brindado los fondos para la realización de este trabajo, encuadrado en el proyecto G-0032-1: "Los glaciares de escombros en el Holoceno del NW Argentino. Implicancias paleoclimáticas y connotaciones en las actividades humanas actuales".

Bibliografía

- Aceñolaza, F. G., & Alonso, R. N. (2001). Icnio-asociaciones de la transición Precámbrico/Cámbrico en el noroeste de Argentina. *Journal of Iberian Geology*, 27, 11-22. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=273865>
- Ahumada, A. L., Páez, S. V., & Ibáñez Palacios, G. P. (2013). Los glaciares de escombros en la sierra de Aconquija, Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 25 (1-2), 49-68. DOI: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/26724>
- Alderete, M. C. (1998). Unidades fisiográficas. En M. Gianfrancisco, M.E. Puchulu, J. Durango de Cabrera y G.F. Aceñolaza (eds.), *Geología de Tucumán* (pp. 29-40). Publicación Especial Colegio Graduados en Ciencias Geológicas, Tucumán.
- Ariza, A. (2006). Análisis del retroceso de glaciares tropicales en los Andes centrales de Colombia mediante imágenes Landsat. *Revista Politechne*, 13 (1), 7-23. https://www.researchgate.net/publication/313345265_Analisis_del_Retroceso_de_Glaciares_Tropicales_en_los_Andes_Centrales_de_Colombia_Mediante_Imagenes_Landsat
- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Di Bella, C. M., Oricchio, P., & Gaspari, F. J. (2019). Cobertura de nieve en las cuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 5 (3). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8198726>
- Aumassanne C., Beget M.E., Oricchio P., Di Bella C.M., Gaspari F.J., & Babinec, F. (2022). Dinámica anual e interanual de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado (Argentina) y su relación con el caudal. *Meteorológica*, 47 (2). DOI: <https://doi.org/10.24215/1850468Xe015>
- Bianchi, A. R., Yañez, C. E., & Acuña, L. R. (2005). *Base de datos mensuales de precipitaciones del noroeste argentino*. Proyecto Riesgo Agropecuario: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Centro Regional Salta-Jujuy. http://www.ora.gov.ar/informes/atlas_noa_precipitaciones.pdf
- Brenning, A. (2003). La importancia de los glaciares de escombros en los sistemas geomorfológico e hidrológico de la cordillera de Santiago: Fundamentos y primeros resultados. *Revista Norte Grande*, (30), 7-22. <https://revistanortegrande.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/42865>
- Cara, L., Masiokas, M., Viale, M., & Villalba, R. (2016). Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS. *Meteorológica*, 41, 21-36. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2016000100002&lng=es&tlng=es

- Cea López, C., Cristóbal Rosello, J. & Pons Fernández, X. (2006). Mejoras en la determinación de la cubierta nival mediante imágenes Landsat y Modis. En M. T. Camacho Olmedo, J. A. Cañete Pérez y J. J. Lara Valle (eds.), *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas* (65-78). Universidad de Granada. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8133122>
- Cea, C., Cristóbal, J., & Pons, X. (2007). Determinación de la superficie nival del pirineo catalán mediante imágenes Landsat y MODIS [Conferencia]. 7ª Semana de Geomática, Barcelona, España. https://www.researchgate.net/publication/239926802_Determinacion_de_la_superficie_nival_del_pirineo_catalan_mediante_imagnes_Landsat_y_MODIS
- Cogliati, M. G., Groch, D., & Finessi, F. G. (2013). Estimación de la cubierta de nieve en el norte de la provincia del Neuquén. *Boletín Geográfico*, 35, 47-58. Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue. ISSN 0326-1735; e-ISSN 2313-903X. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4839823>
- Cogliati, M. G., Groch, D., & Finessi, F. G. (2015). Utilización de productos Terra-Modis para el cálculo de la superficie nival en la Cordillera del Viento (Neuquén, Argentina). En Cynthia Hucailuk, C., y M., Lara (comps.), *Actas de trabajos completos E-ICES 10-1a ed.*, Comisión Nacional de Energía Atómica-CNEA. ISBN 978-987-1323-39-5
- Corte, A. E. (1983). Los conceptos: geocriogénicos-parageocriogénicos y glacial-paraglacial en los Andes Centrales de Argentina, latitud 30°. *Anales Instituto Argentino de Nivología y Glaciología*, 83, 43-63.
- Dahri, Z. H., Ahmad, B., Leach, J.H., & Ahmad, S. (2011). Satellite-Based Snowcover Distribution and Associated Snowmelt Runoff Modeling in Swat River Basin of Pakistan. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences*, 48 (1), 19-32. https://www.researchgate.net/publication/286328119_Satellite-based_snowcover_distribution_and_associated_snowmelt_runoff_modeling_in_Swat_River_Basin_of_Pakistan
- Dozier, J. (1989). Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Finessi F. G. & Cogliati M. G. (septiembre de 2018). Cálculo del área cubierta de nieve en el norte neuquino, con información satelital [conferencia]. XI Jornadas Patagónicas de Geografía y I Congreso Internacional de Geografía de la Patagonia argentino-chilena. Neuquén, Argentina. Eje 5. Ambientes patagónicos: procesos, complejidad y riesgos. https://www.researchgate.net/publication/328367663_CALCULO_DEL_AREA_CUBIERTA_DE_NIEVE_EN_EL_NORTE_NEUQUINO_CON_INFORMACION_SATELITAL
- González Bonorino, F. (1950). *Descripción Geológica de la Hoja 13e, Villa Alberdi, Provincia de Tucumán*. Dirección Nacional de Minería, Boletín 74, 106.
- Haeberli, W. (1983). Permafrost-glacier relationships in the Swiss Alps, today and in the past. IV International Conference on permafrost, National Academy Press Proceedings, 415-420.
- Hall, D.K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2001). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms*. NASA/Goddard Space Flight Center.
- Hall, D.K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., & Bayr, K. J. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83, 181-194. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0)

- Hall, D. K., Riggs G. A. & Salomonson, V. V. (2006). *MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. Version5*. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
https://nsidc.org/sites/default/files/mod10_l2-v005-userguide.pdf
- Hall D. K. & Riggs G. A. (2007). Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes*, 21, 1534-1547. <https://doi.org/10.1002/hyp.6715>
- Huang, X., Liang, T., Zhang, X. & Guo, Z. (2011). Validation of MODIS snow cover products using Landsat and ground measurements during the 2001–2005 snow seasons over Northern Xinjiang, China. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (1), 133-152. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160903439924>
- Ibáñez Palacios, G. P. (2007). Zonación altitudinal de los procesos criogénicos en la cuenca alta del Río Centavillo, Tucumán, Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 20 (1), 73-82. <https://lillo.org.ar/revis/geo/2008/v20n1/v20n1a06.pdf>
- Klein, A.G. & Stroeve J., (2002). Development and validation of a snow albedo algorithm for the MODIS instrument. *Annals of Glaciology*, 34, 45-52.
DOI: <https://doi.org/10.3189/172756402781817662>
- Köppen, W. (1923). *Die Klimate der Erde. Grundriss der Klimakunde*. Berlin und Leipzig, 369.
- Köppen, W. (1931). *Grundriss der Klimakunde. Walter de Grueter Co. XII*. Berlin und Leipzig, 388.
- Leal Parra, G.J. (2020). *Una aproximación al mapeo de la línea de nieve mediante la plataforma google earthengine en la zona glaciológica sur de los andes de Chile* [Tesis Grado Geógrafo, Universidad de Concepción Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía]. http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/548/1/Tesis_Una_Aproximacion_al_Mapeo.Image.Marked.pdf
- Minetti, J. L., Acuña, L. R. & Nieva, J. I. (2005). El régimen pluviométrico del Noroeste Argentino. En Minetti, J. L. (ed.), *El clima del Noroeste Argentino* (169-186), Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C: ZonCaldenius.
- Ostertag, G., Frassetto, F., Solorza, R. & Salcedo, A. P. (2008). Determinación del estado nival de las cuencas del Limay y Neuquén a través de la aplicación de teledetección y SIG. *Boletín Geográfico*, 31, 27-41.
<https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/130>
- Paudel, K. P. & Andersen, P. (2011). Monitoring snow cover variability in an agropastoral area in the Trans Himalayan region of Nepal using MODIS data with improved cloud removal methodology. *Remote Sensing of Environment*, 115 (5), 1234-1246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.006>
- Puchulu, M. E. (2000). Clasificaciones de suelos, recopilación, actualización y compilación. En: Muruaga, C.M. y Grosse, P. (eds.), *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino*, San Miguel de Tucumán: 874-912. ISBN 978-987-42-6666-8
- Rittger, K., Painter, T. H. & Dozier, J. (2013). Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS. *Advances in Water Resources*, 51, 367-380.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.002>
- Santillan de Andres, S. E. & Ricci, T. R. (1980). *Geografía de Tucumán*. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Tucumán, 1299, 1-175.
- Sayago, J.M., Neder L. & Puchulu, M. E. (1998). Suelos. En M. Gianfrancisco, M. E. Puchulu, J. Durango de Cabrera y G. F. Aceñolaza (eds.), *Geología de Tucumán* (275-284). Publicación Especial Colegio Graduados en Ciencias Geológicas, Tucumán.
- Tahir, A. A., Chevallier, P., Arnaud, Y., Ashraf, M. & Bhatti, M. T. (2015). Snow cover trend and hidrological characteristics of the Astore River basin (Western Himalayas)

and its comparison to the Hunza basin (Karakoram region). *Science of the Total Environment*, 505, 748-761.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.065>

- Thapa, A. & Muhammad, S. (2020). Contemporary snow changes in the Karakoram region attributed to improved MODIS data between 2003 and 2018. *Water*, 12 (10), 2681. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12102681>
- Tapia, A. 1925. Apuntes sobre el glaciario pleistocénico del Nevado del Aconquija. *Anales de la Sociedad Argentina de Geografía*, 1, 313-365.
- Telesca, L., Shaban, A., Gascoïn, S., Darwich, T., Drapeau, L., Hage, M. E. & Faour, G. (2014). Characterization of the time dynamics of monthly satellite snow cover data on Mountain Chains in Lebanon. *Journal of Hydrology*, 519, 3214-3222.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.037>
- Trombotto Liaudat, D. & Ahumada, A. L. (2005). Los fenómenos periglaciares. Identificación, determinación y aplicación. *Opera Lilloana*, 45, 9-131. <https://www.lillo.org.ar/editorial/index.php/publicaciones/catalog/download/400/437/15?inline=1>
- Trombotto Liaudat, D., Wainstein, P., Arenson, L. U. (2014). *Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana=Terminological Guide of the South American Geocryology*. 1a ed.-Luján de Cuyo, 128 p. ISBN 978-987-33-5235-5. https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Guia%20terminologica%20geocriologia%20Sudamericana.pdf