

Aportes para el manejo integrado del agua: estudio hidro-morfológico con datos satelitales multifrecuencia en la cuenca alta del río Colorado, Argentina

Romina SOLORZA¹, Carolina AUMASSANNE², Ana Paula SALCEDO³, Sofia TEVEROVSKY¹, Federico MACHADO¹ y Álvaro SOLDANO¹

¹ Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Gerencia de Observación de la Tierra. Centro Espacial Teófilo Tabanera, Córdoba. E-mail: rsolorza@conae.gov.ar, skorsic@conae.gov.ar, femachado@conae.gov.ar.

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo, La Pampa, Argentina. E-mail: aumassanne.carolina@inta.gob.ar

³ Instituto Nacional del Agua (INA). Subgerencia Centro Regional Andino, Mendoza, Argentina. E-mail: apsalcedo@ina.gob.ar

RESUMEN: La cuenca del río Colorado tiene su origen en la Cordillera de los Andes y recorre el país a lo largo de más de 1200 km para desaguar en el Océano Atlántico. Debido a que numerosos usos del agua a lo largo de toda la cuenca dependen de su caudal, resulta indispensable conocer la dinámica de las variables hidrometeorológicas que tienen lugar en la naciente. Este trabajo tiene como objetivo el estudio de parámetros hidro-morfológicos a través de datos satelitales multifrecuencia, haciendo foco en la cuenca alta, donde se ubica una de las microcuencas de aporte: Valle Hermoso. Se propone el uso de datos satelitales de distintas fuentes: ópticos (MODIS, Landsat 5, 8 y 9, Sentinel 2), radar (Sentinel 1 y SAOCOM), modelos digitales del terreno y datos de estaciones in situ que miden parámetros nivométricos e hidrológicos. Se construyó cartografía de superficie total cubierta de nieve, se estimó la nieve en proceso de fusión y se analizó espacial y temporalmente su relación con las características topográficas. Destaca en este estudio el uso de distintas fuentes de datos y software, como la plataforma de procesamiento de grandes volúmenes de datos Google Earth Engine (GEE) para la comprensión de la dinámica temporal de las variables estudiadas.

Palabras clave: Nieve, sensores remotos, cuencas andinas, manejo sustentable del agua.

Contributions for an integrated water management system: an hydro-morphological study using multifrequency satellite data in the upper Colorado catchment, Argentina

ABSTRACT: The Colorado River catchment has its origin in the Andes Mountains, flows through the country for more than 1.200 km and drains into the Atlantic Ocean. Several uses of water depend on its path throughout the entire basin. For these reasons, it is essential to know the dynamics of the hydrometeorological variables during the melting season. This paper exposes a comprehensive methodology to monitor these variables, focusing on the upper basin, where one of the contribution sub-basins is located: Valle Hermoso. The use of satellite data from different sources is proposed: optical (MODIS, Landsat 5, 8 and 9, Sentinel 2), radar (Sentinel 1 and SAOCOM), digital terrain models and in situ measurements, are used to retrieve main snow variables and hydrological parameters. Main objectives are: to map snow-covered areas, estimate snow melting and

analyze, spatially and temporally, the relationship between snow accumulation and melting process. In this study, the use of the big data processing platform Google Earth Engine (GEE) is used to calculate spatial and temporal dynamics of the studied variables.

Keywords: Snow monitoring, remote sensing, Andes, watershed management.

MANUSCRITO ACEPTADO

INTRODUCCIÓN

El régimen hídrico de las cuencas del centro oeste de Argentina es esencialmente pluvio-nival y, en consecuencia, es fuertemente dependiente de la cantidad de nieve que precipita y se acumula en las altas cuencas durante el invierno. Para cuantificar la acumulación y fusión de nieve, los datos provistos por estaciones meteorológicas no suelen ser suficientes en cuencas de grandes extensiones debido a la baja representatividad espacial de estas mediciones y a que no permiten caracterizar la enorme variabilidad de ambientes y condiciones existentes en áreas de montaña. Además, en esas áreas, el acceso a la instalación y el mantenimiento de instrumentos terrestres se dificulta por las condiciones meteorológicas adversas y los costos de las campañas para la instalación.

La información derivada de sensores remotos, en una variedad de resoluciones (espacial, temporal, espectral y radiométrica), permite el seguimiento de grandes extensiones de territorio de forma permanente y objetiva, permitiendo la construcción de series temporales que facilitan la caracterización intra anual e interanual de la cobertura de los parámetros nivológicos de interés en este tipo de cuencas (e.g. Aumassanne et al. 2019). Dado que la nieve presenta una respuesta espectral muy elevada en las longitudes de onda del espectro visible (entre 0.4 y 0.7 μm), que disminuye conforme aumenta la longitud de onda y siendo muy baja en torno a 1.5 μm , el uso de los sensores ópticos, son óptimos para la identificación de cobertura nival, por disponer de bandas que se encuentran en estos rangos espectrales. Particularmente, la disponibilidad de información que estos sensores brindan en el rango del infrarrojo evita la confusión que puede generarse entre la nieve y la cubierta nubosa, muy reflectante en todas las longitudes de onda del dominio óptico. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), en órbita desde el año 1999, ha favorecido la conformación de grandes series de datos para establecer propuestas de monitoreo de la nieve. Particularmente, el producto MOD10A2 fue ampliamente utilizado debido a su alta frecuencia temporal (Hall et al. 2001, Hall et al.

2006). Por ejemplo, en algunos estudios (Paudel y Andersen 2011, Notarnicola et al. 2013, Telesca et al. 2014, Tahir et al. 2015 y Muhammad y Thapa 2020), han evaluado la variabilidad temporal del área cubierta por nieve y la precisión de las estimaciones realizadas por MODIS. En Argentina, trabajos similares se llevaron a cabo (Cogliatti et al. 2016) para la cuenca alta del río Neuquén, (Cara et al. 2016) para la cuenca superior del río Mendoza, (Aumassanne et al. 2015, 2019 y 2022) para la cuenca alta del río Colorado.

Mientras que el mapeo de nieve desde sensores ópticos aprovecha el alto albedo que tiene la cobertura nival, su estimación con satélites de Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés Synthetic Aperture Radar) se basa en la atenuación que muestra la señal de respuesta debido a la presencia de agua en el paquete de nieve. El método se basa en la comparación de imágenes multitemporales de un área determinada adquiridas bajo distintas condiciones de nieve: sin nieve, con nieve fresca o recién caída y con nieve de fusión (Hallikainen et al. 2001, Koskinen et al. 1997 y Nagler y Rott 2000) establecieron esta técnica para estimar nieve de fusión con datos ERS-1 en banda C mediante el uso de dos imágenes: una de verano, donde permanece la nieve eterna, utilizada como referencia y otra con nieve en proceso de fusión. Otros estudios (Shi y Dozier, 1995 y 2000, Nadir Arslan et al. 1998, Martini et al. 2004, Pettinato et al. 2004 y 2011, Rott et al. 2009) aplicaron estas metodologías y algoritmos obteniendo resultados prometedores. El conocimiento del contenido de agua líquida aporta una noción más acabada de la dinámica de las cuencas cordilleranas durante el periodo de deshielo y puede aportar a la mejora de las predicciones de caudales y la optimización de los modelos hidrológicos. En Argentina, también se han aplicado estos algoritmos para el estudio de la fusión de la nieve con datos de radar (Salcedo 2011, Salcedo y Cogliatti 2014, Solorza et al. 2016 y Teverovsky et al. 2018). De esta manera, los satélites SAR son una fuente complementaria a los datos ópticos para el seguimiento de la cobertura nival en cuencas de grandes extensiones.

El río Colorado se origina de la confluencia de dos de sus principales afluentes, los ríos Grande y Barrancas, y recorre alrededor de 1200 km atravesando parte de las provincias de Mendoza, Neuquén, Río Negro, La Pampa y Buenos Aires hasta su desembocadura en el océano Atlántico. Tiene un derrame anual promedio de 4380 hm³ y una superficie total de drenaje de 47459 km². Su caudal medio anual es de 138.8 m³/s (COIRCO, 2015), caracterizado por una marcada estacionalidad primavero-estival, atribuida a su régimen principalmente nival. La cuenca del Colorado, inmersa en un sistema árido, experimenta una situación hidrometeorológica crítica en los últimos 12 años producto de la variabilidad natural propia del sistema y del cambio climático global, atravesando el período seco más extenso que se ha registrado en las bases de datos hidrométricas disponibles. De hecho, para esta nueva situación que se presenta en los Andes centrales de Argentina, en la reciente bibliografía científica se considera el término de “mega sequía” (Garreaud et al. 2017), que se caracteriza por un aumento en la temperatura media anual del aire de ~0.8 °C y una reducción de las precipitaciones anuales del 40 %. La importancia del río Colorado en la región, radica en que es la principal, y en muchos casos única fuente de abastecimiento de agua de las poblaciones para diversos usos en toda la diagonal árida de las cinco provincias que recorre y de otras poblaciones extra-cuenca. Por lo tanto, estudiar la principal entrada del ciclo hidrológico, la nieve, es de interés regional y nacional para el manejo sustentable de este importante recurso hídrico de los Andes semiáridos de la República Argentina.

En este contexto, a partir de la disponibilidad de herramientas y datos, resulta factible un abordaje a distintas escalas temporales (anual e interanual) para el estudio de la cantidad de nieve acumulada durante cada invierno y su variación espacio temporal. Este trabajo se enmarca en una estrategia de monitoreo del río Colorado establecida bajo un convenio estratégico entre la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y el Instituto Nacional del Agua (INA), entendiéndose que la información generada resulta clave para la gestión y aprovechamiento

sostenible del recurso, y para minimizar los impactos y riesgos en la gestión integrada del agua. Este estudio es un primer paso en la definición de un sistema integrado de información para el manejo del agua en toda la cuenca del río Colorado.

En base a lo expuesto, el objetivo general de este trabajo es presentar una propuesta para el estudio y seguimiento de variables hidrometeorológicas a partir de información satelital y de campo en la cuenca alta del río Colorado, considerando los siguientes objetivos particulares:

1. Construir información topográfica de alta resolución para la cuenca piloto y analizar su morfometría, entendiendo que el funcionamiento de una cuenca depende de sus características físicas.
2. Generar series multianuales de la cobertura de nieve explotando el uso de diversos sensores ópticos y radar, a fin de analizar espacial y temporalmente la distribución del manto nival.
3. Identificar alcances y limitaciones de técnicas interferométricas con datos SAR para la estimación del equivalente de agua en nieve.
4. Establecer lineamientos de uso de estas variables para el manejo integrado del recurso agua.

Se consideró como periodo de análisis los años desde 2000 a 2021, en función de la disponibilidad de imágenes ópticas y radar sobre la zona de estudio. Para la estimación del Equivalente en Agua de Nieve, se utilizaron datos SAOCOM correspondientes al año 2022, en base a la existencia de pares interferométricos que cumplan con las condiciones requeridas para la metodología utilizada.

LA MICROCUENCA PILOTO VALLE HERMOSO

El área de estudio está ubicada en el sector más septentrional de la cuenca del río Grande. La subcuenca del río Grande está situada enteramente en la provincia de Mendoza, con sus nacientes en el macizo central de Los Andes, que limita con Chile,

siendo sus principales tributarios los ríos Cobre y Tordillo.

Se toma como área de estudio la microcuenca que incluye las nacientes del arroyo Tordillo, denominada para este trabajo Valle Hermoso, por su cercanía a la estación nivológica homónima. A su vez, a escasos 20 km aguas abajo del cierre de la cuenca Valle Hermoso, se ubica la estación de aforo La Estrechura, cuyas mediciones incluyen los caudales erogados tanto por la cuenca de estudio, como de la vertiente del arroyo Cobre (Fig. 1). La microcuenca de Valle Hermoso tiene un área total de 624.5 km². Entre su nacimiento y desembocadura tiene una distancia de 42 km, y predomina la orientación norte-sur. En la cabecera de la microcuenca, la altura está sobre los 4000 msnm mientras que, en la parte inferior, en la altura de la desembocadura del cauce principal, la altura promedio es de alrededor de 2200 msnm.

La existencia de una estación nivológica con registro temporal extenso de equivalente en agua de nieve, más la posibilidad de contar con mediciones de caudales cercanos al cierre de la cuenca piloto, fueron criterios claves a la hora de delimitar la zona de trabajo.

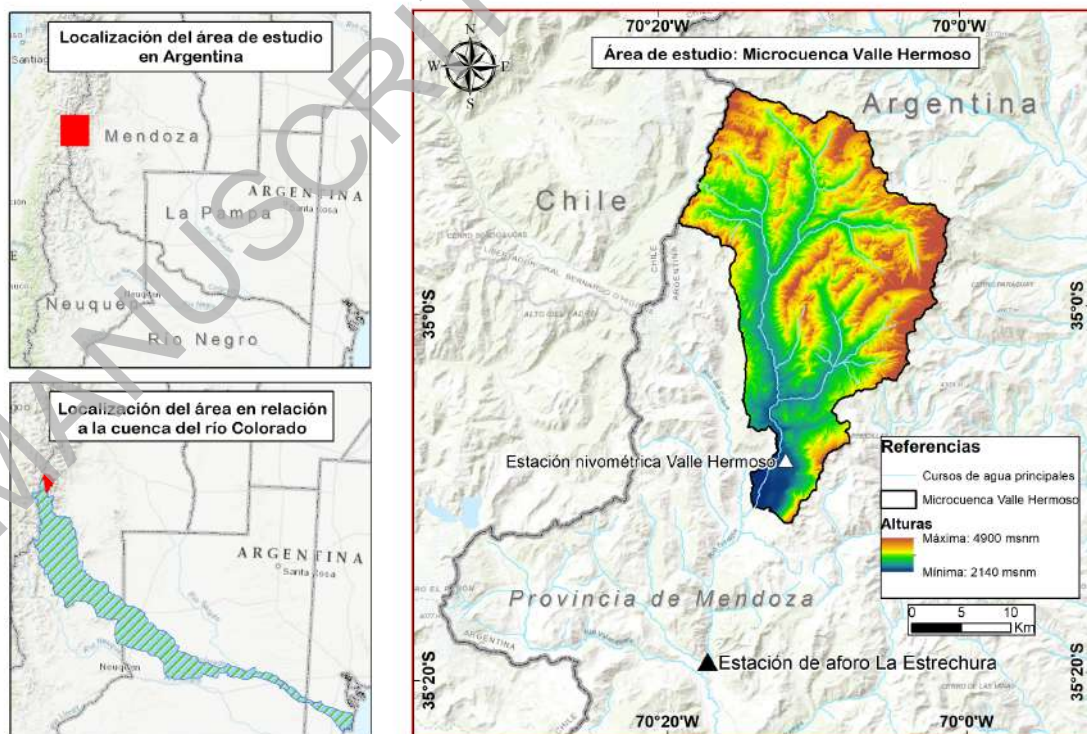


Figura 1: Ubicación del área de estudio: Valle Hermoso, subcuenca del río Grande, Argentina y de las estaciones de medición in situ.

Posee un régimen hidrológico casi exclusivamente nival y su caudal medio anual en la estación de aforo de la Estrechura es de 32.17 m³/s (COIRCO 2013), variando entre un caudal promedio mínimo mensual de 14 m³/s en períodos de estiaje y llegando próximo a los 62.8 m³/s en épocas de intenso deshielo (Fig. 2 a). La subcuenca del río Grande, al igual que el resto de las cuencas de origen nival con nacimiento en el centro oeste de Argentina está atravesando un período seco, registrando a la fecha doce ciclos hidrológicos, con derrames por debajo del promedio histórico a partir del año 2010 (Fig. 2 b)

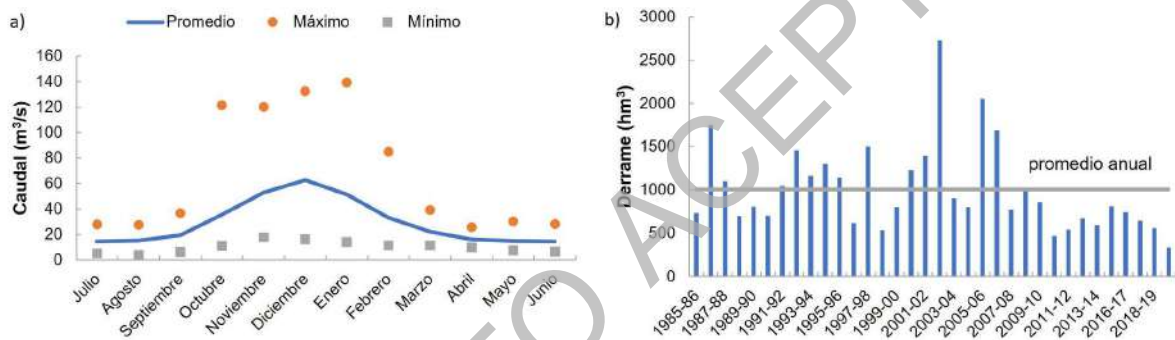


Figura 2. a) caudal (m³/s) promedio mensual, máximos y mínimos históricos mensuales. b) Derrame (hm³) del río Grande en la estación de aforo La Estrechura periodo 1985-2020.

En la zona el clima es frío con una temperatura media anual que no supera los 10 °C y precipitaciones en forma de nieve que fluctúan entre los 600 y 1000 mm (promedio anual) concentradas en la época invernal, con máximos en junio, con un marcado efecto de precipitación orográfica en toda la cuenca (Halcrow 2013).

Desde el punto de vista geomorfológico, el área de estudio está emplazada en un paisaje montañoso de fuerte relieve, con cordones intermontanos definidos por lineamientos estructurales que presentan una dirección predominante norte-sur al noreste-sudoeste. Los sectores más altos y abruptos se corresponden con el relieve volcánico antiguo y mantos basálticos derramados sobre planicies elevadas. En zonas de menor altura predominan sedimentitas mesozoicas con estructuras de anticlinales y sinclinales de arrumbamiento noreste-sudoeste y mantos de piroclastitas que rellenan valles profundos

y sectores altos. El paisaje se completa con depósitos aluviales modernos de gravas, arenas y limos en el fondo de los valles intermontanos (Nullo et al. 2005).

CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DE ENTRADA

Información topográfica

Para el análisis morfométrico del área de estudio, se construyó un mosaico digital de la zona de estudio en base al Modelo Digital de Elevaciones de Argentina (MDE-Ar versión 2.1) a disposición del usuario por el Instituto Geográfico Nacional (IGN 2023). Este modelo, que cubre la totalidad del territorio continental nacional, fue construido a partir de una combinación de datos capturados por las misiones satelitales SRTM y ALOS-1. Tiene 30 m de resolución espacial y una precisión vertical de aproximadamente 2 m. También se utilizó el NASA SRTM Digital Elevation 30 m disponible en el repositorio GEE para el cálculo de la superficie con nieve de fusión.

Datos ópticos a múltiple escala

MODIS

Se utilizó el producto satelital MOD10A2 (National Snow and Ice Data Center 2023), de 500 metros de resolución espacial, para obtener la extensión máxima de la cubierta de nieve cada 8 días, para el periodo de enero de 2000 a diciembre de 2018. La presencia de nieve se detecta a partir del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI). La escena abarca un área de 1200 x 1200 km, de la cual se extrajo únicamente el área perteneciente a la microcuenca de Valle Hermoso. Se identificaron los píxeles con nieve descartando el resto (nube, dudoso, sin dato) en cada imagen para el período bajo análisis. Luego, se calculó y analizó la superficie cubierta por nieve para cada una de las fechas durante los 18 años de análisis.

Landsat 5 TM, 8 OLI y 9 OLI-2

Se utilizaron imágenes Landsat 5 TM, 8 OLI y 9 OLI-2 (Landsat 5 TM, Earth Engine Data Catalog 2023) para la construcción de series temporales de cobertura total de nieve caída

en base a grandes volúmenes de datos. La serie de satélites Landsat está provista de cámaras multiespectrales que adquieren datos en el rango del visible, infrarrojo cercano, térmico y lejano. Sus resoluciones se mantienen a 30 metros en el visible, el NIR y el SWIR, y permitiendo a la banda pancromática una mejora de la imagen hasta 15 metros de resolución. Landsat 5 estuvo activo desde enero de 1984 a enero de 2013. Landsat 8 fue puesto en órbita en abril de 2013 y adquiere datos hasta la actualidad, aunque es preferible la utilización de Landsat 9 para considerar datos más recientes, ya que fue puesto en órbita en 2021 y por lo tanto posee una mejor calidad radiométrica. El período de revisita combinando Landsat 8 y Landsat 9 es de 8 días.

Sentinel 2A y 2B

Considerando la disponibilidad de una resolución espacial más precisa, 10 m, se construyeron también mapas de cobertura de nieve con imágenes Sentinel 2, misión satelital multiespectral del Programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Cuenta con un instrumento óptico con 13 bandas espectrales, cuatro de 10m en el espectro visible e infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), 3 de 20 m en el rojo de borde (red-edge), 3 en el SWIR, y tres atmosféricas de 60 m de resolución espacial. Tiene 290 km de FOV (*Field of View*).

Datos SAR multifrecuencia

Se utilizaron datos Sentinel 1A y 1B (banda C, frecuencia de 5.4 GHz, 5.54 cm de longitud de onda) de la ESA. Se utilizó el modo de adquisición TopSAR Interferometric Wide Swath (IW) que realiza adquisiciones sobre Argentina cada 12 días, y que se adquieren desde el año 2014 a la actualidad. Se utilizó el nivel de procesamiento Ground Range Detected (L-1 GRD). Las imágenes Sentinel 1 (Sentinel 1A/1B, Alaska Satellite Facility 2023), se utilizaron para la construcción de la máscara de distorsiones geométricas mientras que para la estimación de la nieve de fusión, se procesó toda colección en GEE. Se seleccionaron imágenes con las siguientes características: 1)

imágenes con nieves eternas (verano), de períodos con caída de nieve (invierno) y con presencia de nieve de fusión (primavera); 2) frecuencia de adquisición de al menos una imagen cada 2 meses; y 3) imágenes con la misma geometría de adquisición (ángulo de incidencia 40°, polarización VV y órbita descendente).

También se utilizaron datos SAOCOM 1A y 1B (banda L, frecuencia 1.2 GHz, 23.5 cm de longitud de onda), misión SAR de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina (CONAE). Se utilizó el modo de adquisición StripMap y el nivel de procesamiento L1A. Se cuenta con datos desde octubre de 2018 a la actualidad. Las imágenes SAOCOM (Catálogo SAOCOM, CONAE 2023), se utilizaron para la construcción de la metodología para estimar el Equivalente en Agua de Nieve (EAN) en base a imágenes SAR. Se descargaron también considerando misma geometría de adquisición (modo StripMap, Beam S4, pasadas Ascendentes y polarización HH/VH). Las características de resolución espacial, temporal y radiométrica de todos los datos satelitales utilizados en este trabajo se resumen en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Características de las fuentes de datos satelitales y software de procesamiento utilizado en el presente trabajo.

Fuente de datos	Período analizado	Resolución espacial	Resolución temporal	Resolución radiométrica	Software utilizado	Escenas disponibles
MODIS	2000/2021	500 m	8 días	36 bandas en el visible e infrarrojos	ERDAS	1015
LANDSAT 5 TM	2000/2011	30 m	16 días	7 bandas en el visible e infrarrojos	GEE	148
LANDSAT 8 OLI	2013/2021	30 m	16 días	11 bandas en el visible e infrarrojos	GEE	200
LANDSAT 9 OLI-2	2021	30 m	16 días	11 bandas en el visible e infrarrojos	GEE	2
SENTINEL 1	2016/2021	10 m	12 días sobre Argentina	Dual-Pol microondas Banda C	GEE SNAP 9.0	521
SENTINEL 2A y 2B	2019/2021	10 m	10 cada satélite, 5 días la constelación	13 bandas en el visible e infrarrojo	GEE	104

SAOCOM	2022	10 m	16 cada satélite, 8 la constelación	Full-Pol microondas Banda L	SNAP 9.0	3
MDE-Ar	2019	30 m	-	-	SAGA GIS Global Mapper QGIS	

Referencias en campo

Se utilizaron los registros de EAN de la estación Valle Hermoso, que pertenece al Sistema de Información Hidronivometeorológico del Departamento General de Irrigación (Mendoza), y de caudal de la estación de aforo La Estrechura (Fig. 2). Los datos utilizados en este trabajo fueron descargados del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Nación (2023) y fueron procesados localmente. Se utilizaron datos diarios de ambas variables de la serie 2000-2021.

METODOLOGÍA

El estudio hidro-morfométrico de la cuenca abarca una serie de metodologías orientadas en primer lugar a la obtención de variables nivológicas, tales como superficie de nieve total, de nieve húmeda y equivalente de agua en nieve bajo técnicas digitales de procesamiento de imágenes satelitales. En segundo término, el estudio de la topografía y las formas del relieve bajo el procesamiento del modelo digital de elevaciones. A continuación se presenta un diagrama general de todos los datos y metodologías utilizadas (Fig. 3), así como de los programas utilizados para la ejecución de cada etapa.

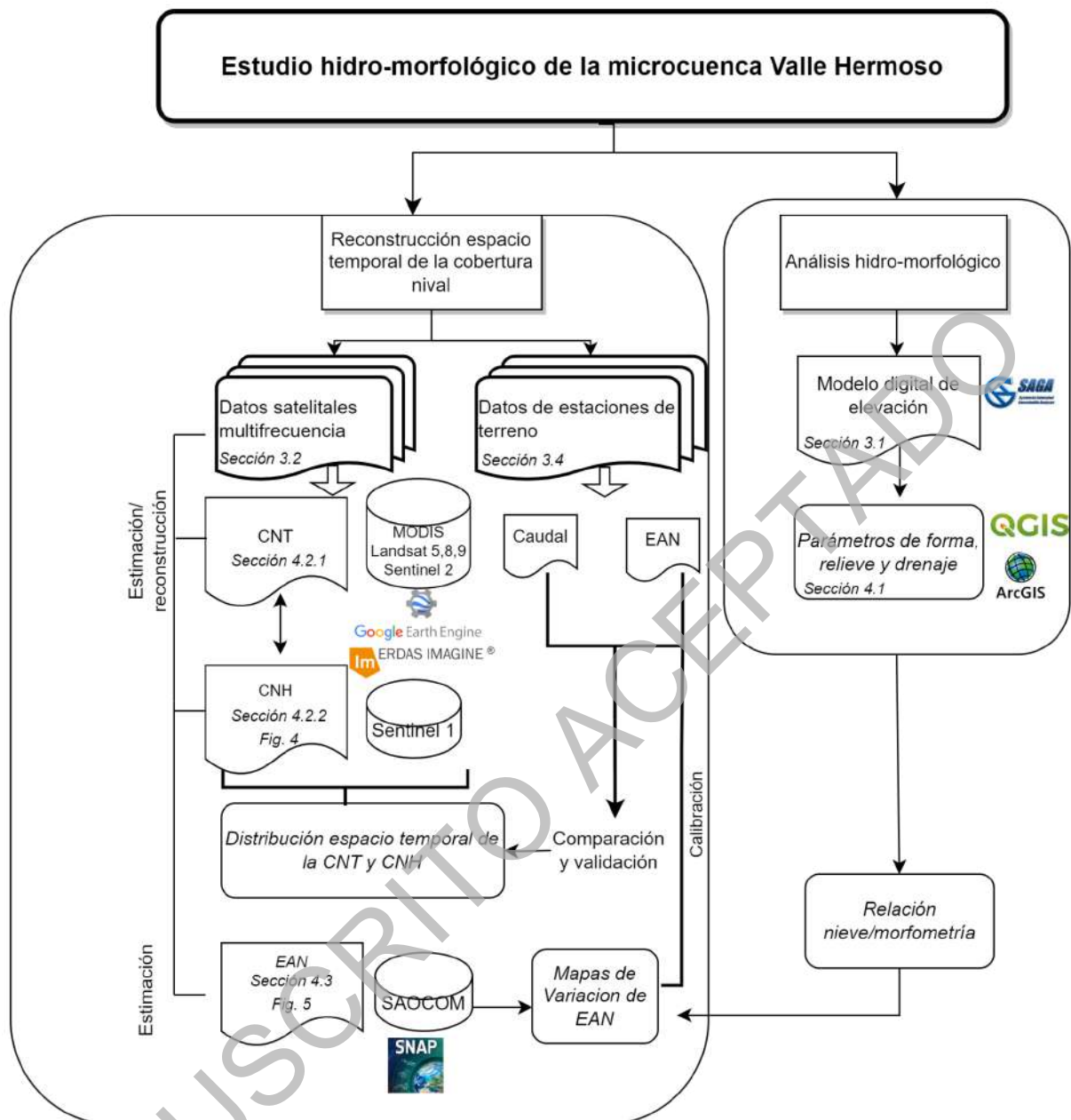


Figura 3: Diagrama general de la metodología y fuentes de información utilizadas.

Definición de parámetros geomorfométricos

La topografía es uno de los principales factores que controla la variación espacial de las condiciones hidrológicas, afectando la distribución espacial de la humedad del suelo, del flujo del agua subterránea y de los procesos erosivos. Conocer las características físicas y funcionales de una cuenca ayuda a predecir su respuesta hidrológica. A través de la construcción de un mosaico en base al MDE-Ar, se calcularon parámetros específicos de

forma y relieve y se construyeron índices para analizar la morfología local, el grado de alteración hídrica del área y el poder erosivo de la cuenca.

Se construyó un perfil longitudinal y dos perfiles transversales. Se calculó el perímetro (P), el área de drenaje (A), el ancho promedio (A_p), la longitud axial (L_a), y el coeficiente de compacidad de Gravelius (K_c). A partir de A_p y L_a , se calculó el factor de forma (IF) y también, se calculó la razón de elongación (R_e).

Para cuantificar el efecto del relieve sobre la dinámica hídrica se determinaron las cotas máximas y mínimas y también las alturas en la naciente y la desembocadura. También se calculó la pendiente media de la cuenca (P_m) que da un indicio del poder erosivo, y considera el área total, la equidistancia entre curvas medidas en Km (E_q) y la longitud de las curvas de nivel en Km (L_c). También se calcularon distintos índices a partir de parámetros primarios (como la pendiente, la orientación y las curvaturas) y secundarios (como la rugosidad del terreno y el índice topográfico de humedad), para obtener un detalle más preciso de las geometrías de las formas superficiales. Los parámetros primarios calculados, que se derivan directamente del procesamiento del mosaico MDE-Ar construido, sin necesidad de cálculos adicionales son la altura general del área, la pendiente, que es la inclinación respecto de la horizontal, y la orientación de laderas, que es el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector gradiente. Este parámetro resulta es de interés para tener una aproximación a las laderas de solana y umbría, aspecto que es determinante para la permanencia de la nieve, ya que las laderas con orientación al sur, en el hemisferio sur, están expuestas a menor radiación solar. Se calculó además la red con los drenajes de distinto orden y las curvas de nivel, que dan una primera aproximación al diseño de drenaje en relación con el relieve.

También, se calcularon parámetros secundarios, que derivan del procesamiento de parámetros primarios, como las curvaturas, medidas geométricas basada en la derivada de segundo orden. Particularmente la curvatura del plano o contorno, permite caracterizar

la convergencia y divergencia topográfica, lo que a su vez tiene relación con la acumulación, las tasas de velocidad de los flujos y el transporte de sedimentos. A partir de estas se calcula el índice de convergencia. Por último, se computaron el Índice de Rugosidad del Terreno que expresa la diferencia de elevación entre celdas adyacentes dentro de un MDE (Riley et al. 1999), el Índice Topográfico de Humedad (TWI) que permite identificar zonas donde es posible encontrar acumulación de agua de acuerdo a las condiciones de la pendiente, y el mapa de profundidad de valles, que indica la distancia vertical a la red de canales.

Cobertura de nieve

Estimación de la cobertura total de nieve caída

Las imágenes Landsat 5, 8 y 9, Sentinel 2 y MODIS fueron utilizadas para calcular la Cobertura de Nieve Total (CNT). Se trabajó sobre las colecciones disponibles utilizando la plataforma de procesamiento Google Earth Engine (GEE). GEE es un gran motor de búsqueda y base de datos de imágenes satelitales sobre el cual es posible el procesamiento y obtención de resultados, ejecutando todas las tareas necesarias desde los servidores de Google, sin necesidad de descargar o ejecutar tareas en forma local. GEE posee una gran disponibilidad de colecciones de datos históricos y una alta capacidad de procesamiento de grandes volúmenes de datos. La serie Landsat ha ido cambiando la configuración de bandas de acuerdo a mejoras e introducción de nuevos sensores de medición. Esta situación tuvo que ser considerada en el algoritmo desarrollado en GEE para obtener la serie histórica. Para el caso de Sentinel 2 se construyeron mosaicos acotados al área de estudio, para cada fecha. Se consideró el cálculo de CNT solo cuando el mosaico, cumplía con la condición de tener un 70 % del territorio libre de nubes. Respecto a MODIS, se utilizó el producto de nieve MOD10A2.

Las imágenes, calibradas a valores de reflectancia a tope de atmósfera, fueron utilizadas considerando una cobertura de nubes del 5 % y adecuadas en la radiometría

considerando el cambio en la denominación de bandas en cada misión. En primer lugar, se calculó el mapa de nieve mediante el uso del índice espectral de nieve de diferencia normalizado (NDSI, por sus siglas en inglés respectivamente Normalized Difference Snow Index) para todas las fechas. El NDSI (Ecuación 1) realiza una diferencia normalizada entre las bandas de los sensores correspondientes al canal del Verde del visible y el Infrarrojo de onda corta (SWIR).

$$NDSI = \frac{Verde - SWIR}{Verde + SWIR} \quad (1)$$

Se considera la presencia de nieve a partir del umbral 0.4 (Salomonson y Appel 2004). Los valores por encima del umbral corresponden a nieve, mientras que los que se encuentran por debajo del umbral se asocian a otras coberturas diferentes. De esta forma se obtiene una máscara binaria sobre la cual se calcula la superficie total cubierta de nieve (en km²) agregando esta información como nuevo parámetro a los metadatos de cada imagen. De manera complementaria, se exportaron los datos en formato de valores separados por comas (.csv) para realizar el análisis en profundidad de toda la serie.

Estimación de la nieve en estado de fusión

Mediante imágenes SAR de distintos períodos es posible estimar la nieve en estado de fusión. Este método de detección de cambios (Nagler 1996, Nagler y Rott 2000) se basa en el cambio estacional significativo que presenta el coeficiente de retrodispersión (σ_0), a lo largo de las estaciones del año, presentando valores muy opuestos entre periodos de nieve seca (invierno) o sin nieve (verano), respecto al periodo de fusión y humedecimiento de la nieve (primavera) Los pasos del procesamiento (Fig. 4) pueden describirse en las siguientes etapas: 1) Selección adecuada de imágenes de verano/invierno para cada año, (en adelante, denominada "imagen de referencia"); 2) selección adecuada de imágenes de primavera, donde es esperable el período de fusión; 3) preprocesamiento de las imágenes: corrección de registro, calibración radiométrica, filtrado speckle y geocodificación; 4) aplicación del método de detección de cambios: cociente entre

imagen de referencia y las distintas imágenes de primavera; 5) aplicación de reglas de decisión y umbralización para generar el mapa resultado de superficie ocupada con nieve en estado de fusión. El umbral se define analizando la distribución del coeficiente de retrodispersión del suelo cubierto por nieve húmeda respecto del suelo libre de nieve. Para este caso se definió un umbral -3 dB, indicando que la clase “nieve húmeda” es aquella por debajo de ese umbral. La nieve seca, o aquella sin contenido de agua líquida no es detectable bajo este método. Dependiendo del caso, es importante enmascarar otras coberturas, tales como bosque, cuerpos de agua, entre otras. La microcuencia de estudio no presenta ninguna de estas otras coberturas, por tanto solo se utilizó el umbral de -3 dB. Para todas las escenas procesadas se enmascararon las zonas alcanzadas por las distorsiones geométricas típicas de la adquisición lateral SAR (sombras, inversión o acortamiento del relieve).

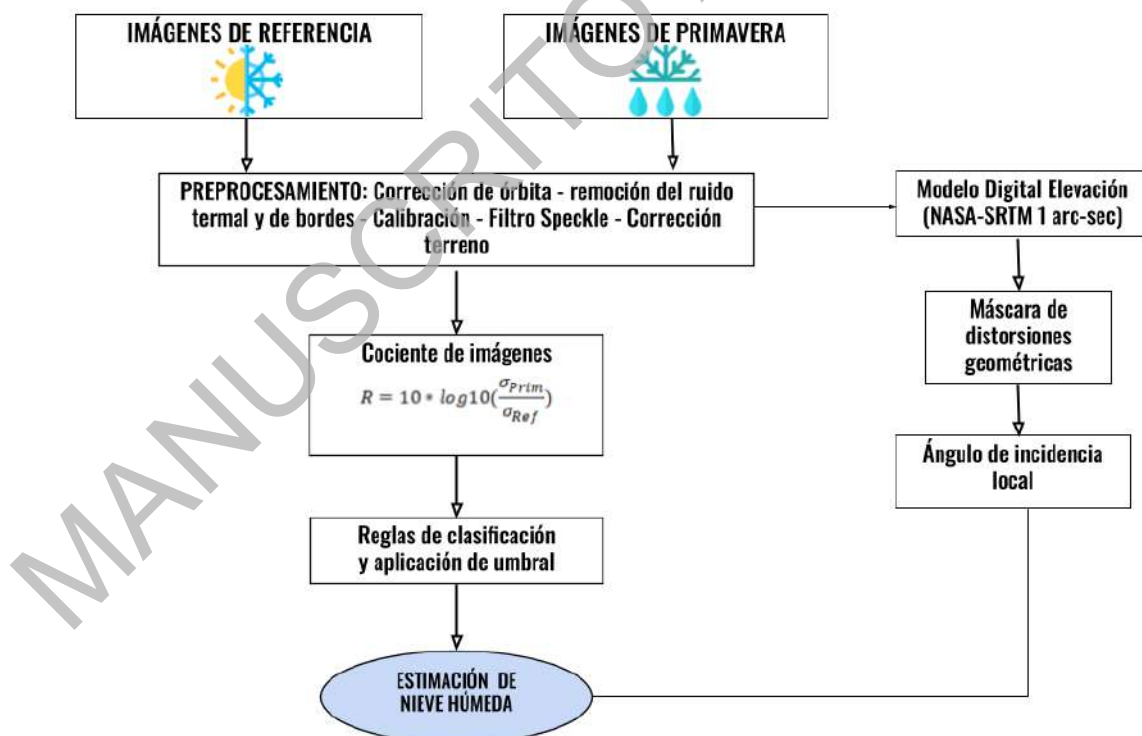


Figura 4: Etapas metodológicas para la estimación de la nieve de fusión con imágenes.

Estimación del equivalente agua de nieve regional

Se exploró la potencialidad de las técnicas interferométricas para estudiar la variación del Equivalente Agua de Nieve (EAN), aprovechando la disponibilidad de datos SAOCOM en banda L. La respuesta de la onda de radar frente a la cobertura de nieve está dada por las características propias del sensor (longitud de onda, polarización, entre otras) y por las características de la capa de nieve, siendo la más importante, el contenido de humedad, expresado mediante la constante dieléctrica. Los datos en amplitud que brindan los sensores SAR, permiten la detección de nieve húmeda, es decir, la que está próxima a la fusión (sección 4.2.2), mientras que, los datos de fase, se utilizan en las técnicas de interferometría SAR (InSAR). A partir del cálculo de la diferencia de fase entre dos imágenes de dos fechas distintas, es posible analizar los cambios en la distancia entre la superficie observada y el sensor. En relación con la cubierta de nieve, esta técnica constituye un método directo para estimación de la variación del EAN, basada en la Ecuación 2, que relaciona el cambio de fase, con el cambio en el EAN (ΔEAN):

$$\Delta\text{EAN} = \frac{\phi}{4\pi\xi\rho} \quad (2)$$

donde λ corresponde a la longitud de onda del sensor, ρ a la densidad media de la nieve (0.2-0.3 g/cm³, correspondiente a la densidad media de la nieve seca) y ξ relaciona la constante dieléctrica y el ángulo de incidencia. Esta técnica de interferometría diferencial (Gunterriussen et al. 2001), se encuentra aún en etapa de desarrollo en la microcuenca piloto de estudio, identificando los alcances y limitaciones del método, para poder luego contar con datos de EAN a escala cuenca. Para alcanzar este objetivo se programaron adquisiciones SAOCOM en modo de adquisición StripMap, nivel de procesamiento L1A, polarización HH/VH, beam S4, que cubre la microcuenca de estudio.

Como primera aproximación, se procesó un par interferométrico de imágenes SAOCOM. La figura 5 muestra la cadena de procesamiento realizada para la obtención de los interferogramas diferenciales y los mapas de variación de EAN.

El procesamiento consistió, en primer lugar, en el corregistro de las imágenes, el cálculo

de los interferogramas (información sobre diferencia de fase) y de la coherencia interferométrica (indicador de la calidad de la fase). Luego, se transformaron los valores de diferencia de fase a diferencia de EAN. Por último, los resultados obtenidos se calibraron y validaron con datos de la estación de medición de EAN Valle Hermoso.

Con el objetivo de generar una serie temporal de EAN durante la temporada de invierno, se programaron y se están realizando adquisiciones SAOCOM para reconstruir el EAN regional que aporte información para enriquecer los pronósticos hidrológicos de la cuenca y, de esa forma, obtener datos complementarios sobre la disponibilidad de agua.

MANUSCRITO ACEPTADO

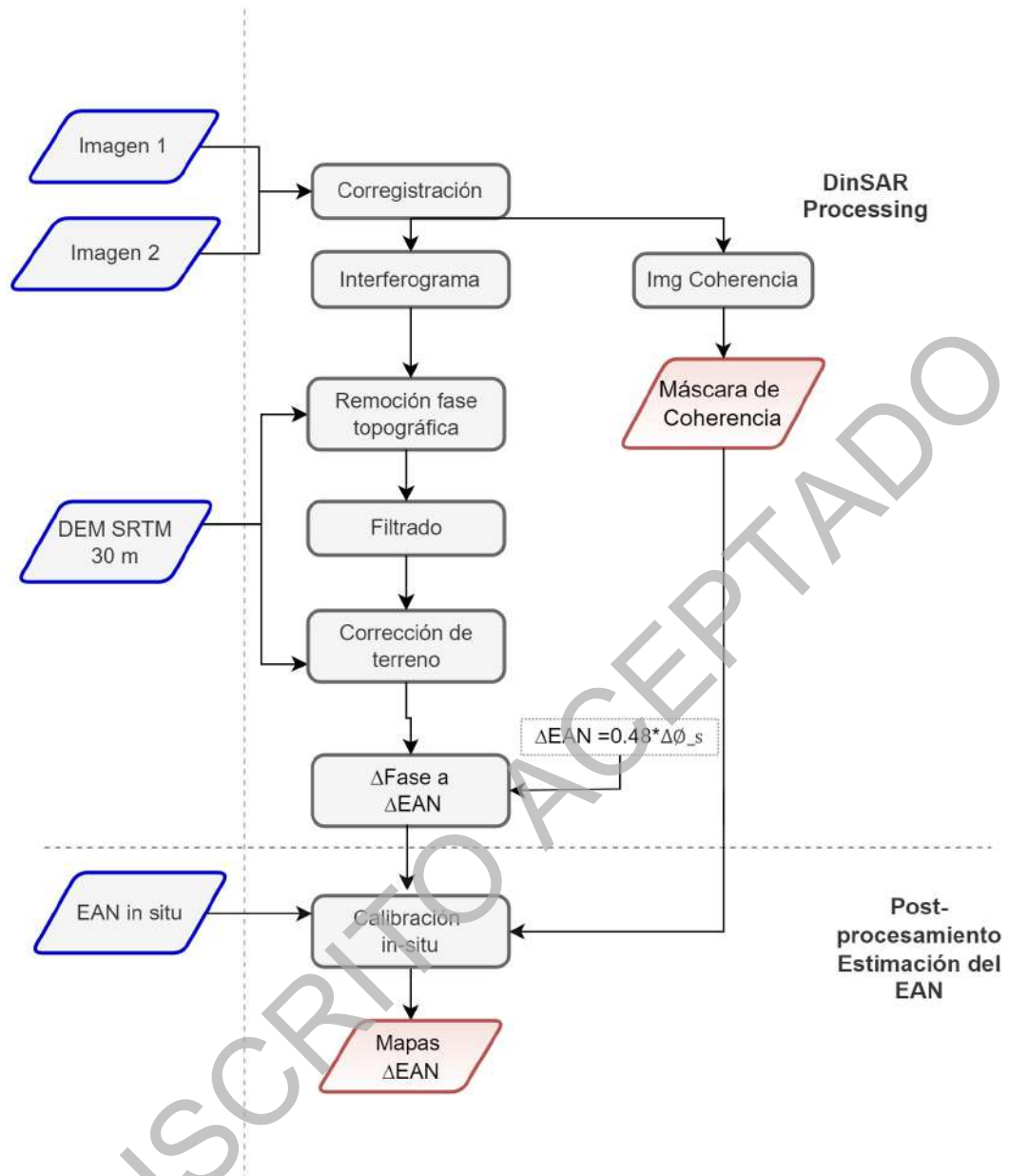


Figura 5: Metodología de procesamiento DinSAR para obtención de mapas de variación de EAN

RESULTADOS

Geomorfometría de la microcuenca Valle Hermoso

Los resultados morfométricos alcanzados en el análisis permitieron conocer en detalle las características físicas del área de estudio. Inicialmente se definieron el perfil longitudinal y los perfiles transversales en la microcuenca (Fig. 6).

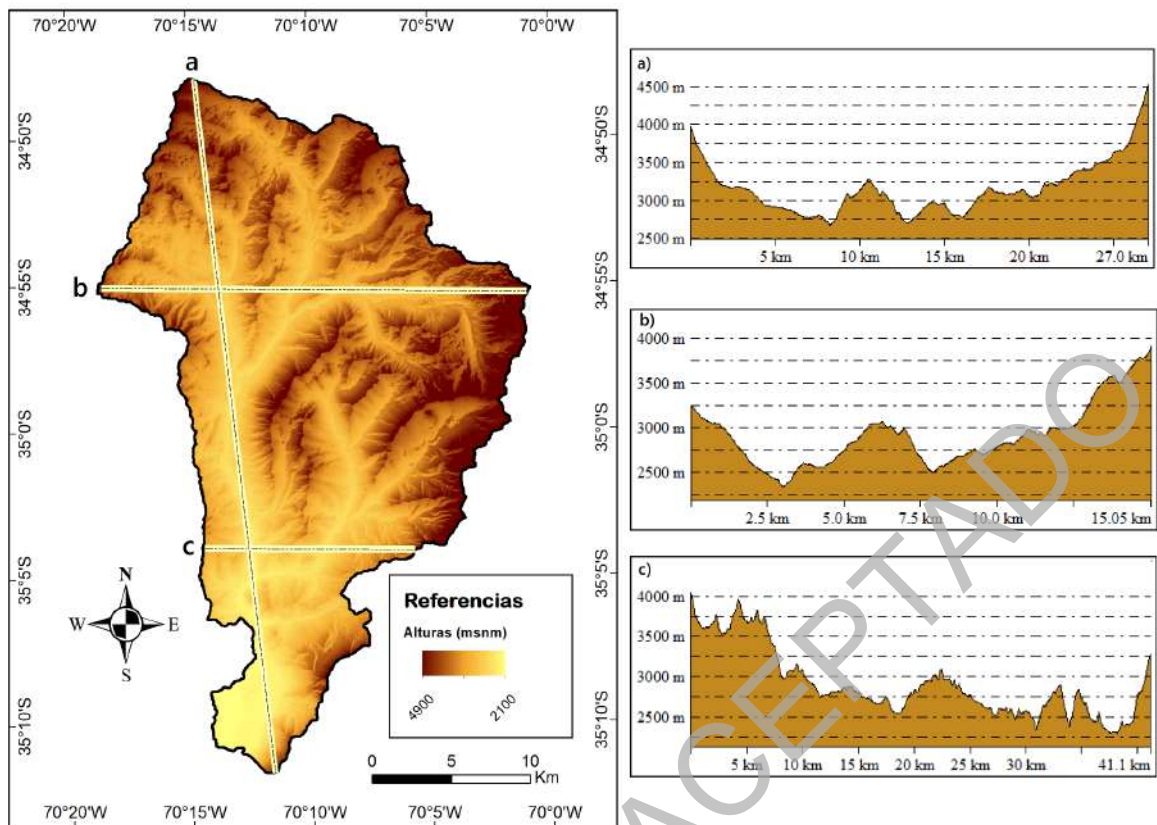


Figura 6: Perfiles topográficos y curva hipsométrica de la microcuenca Valle Hermoso.

Por otra parte, se construyó la curva hipsométrica (Fig. 7), que indica el total o porcentaje de área de la microcuenca por encima de los pisos altitudinales. Este parámetro da información sobre la fase de madurez y el poder erosivo de la. De acuerdo a la curva obtenida, se observa que es una cuenca en equilibrio, con cauces en estado de “madurez” hidrológica.

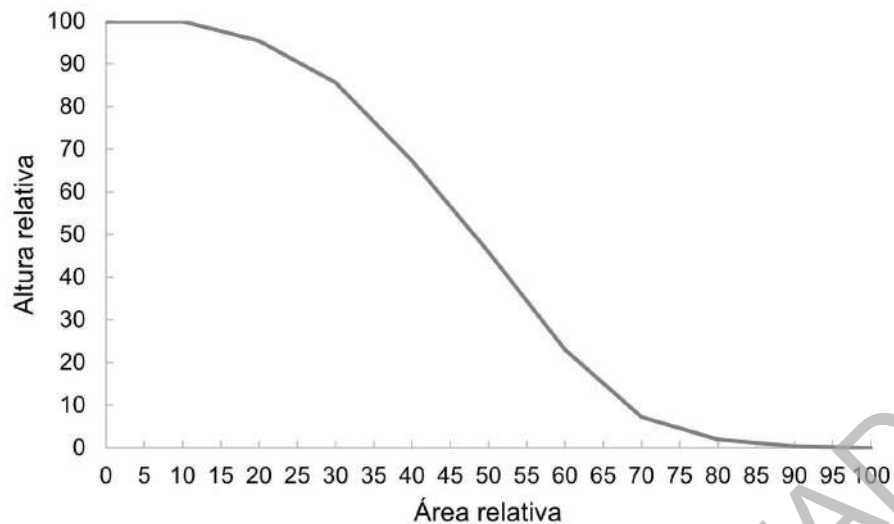


Figura 7: Curva hipsométrica de la microcuenca Valle Hermoso.

Los resultados morfométricos calculados para la microcuenca de Valle Hermoso se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Parámetros morfométricos obtenidos del área piloto, microcuenca Valle Hermoso.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultado	Fórmula	Descripción
Área	A	Km ²	624.5	Medición directa	Superficie total de la cuenca
Perímetro	P	Km	147.3	Medición directa	Relación entre la línea envolvente de la cuenca y la divisoria de aguas
Longitud axial	L_a	Km	42	Medición directa	Distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca
Ancho promedio	A_p	Km	163	Medición directa	Relación entre la superficie de la cuenca con su longitud axial
Cota máxima	C_{max}	msnm	4910	Medición directa	Altura máxima de la cuenca
Cota mínima	C_{min}	msnm	2138	Medición directa	Altura mínima de la cuenca
Altitud media	H	msnm	2059	$H = H_n - H_d$	Diferencia de alturas entre la naciente y la desembocadura
Altitud en la naciente	H_n	msnm	4296	Medición directa	Altura en el punto de inicio del curso
Altitud en la desembocadura	H_d	msnm	2237	Medición directa	Altura en el punto de salida del curso
Pendiente media de la cuenca	P_m	grados	23.7	$P_m = \frac{100(Eq*Lc)}{A}$	Relación del relieve con el proceso de degradación al que está sometido una cuenca.
Longitud del	L	Km	50.67	Medición directa	Longitud del cauce principal, el

curso principal					de mayor extensión de la cuenca
Longitud total del sistema de drenaje	L_t	Km	1165	Medición directa	Incluye la longitud de los cauces hasta el orden 3
Coefficiente de compacidad Gravelius	K_c	adimensional	1.6	$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$	Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente a la cuenca
Razón de elongación	Re	adimensional	8400	$Re = \frac{1.129 \cdot A^{0.5}}{L_a}$	Relación entre el diámetro de un círculo con igual área (A) que la de la cuenca y la longitud axial (La)
Factor de forma	IF	adimensional	0.4	$IF = \frac{A_p}{L_a}$	Indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial y manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas
Tiempo de concentración	T_c	Horas	90	$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$	Tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca

Del análisis de los resultados presentados del cuadro 2 se establece que la microcuenca presenta una forma oblonga a rectangular oblonga, que presupone que es poco susceptible a las crecidas, cuyas aguas escurren en general por un solo curso principal. El resto de los indicadores apuntan a características similares. Por ejemplo, el Índice de Compacidad que es superior a 1 (valor de 1.6) indica que la forma de la microcuenca es más alargada y por tanto el tiempo de concentración será mayor por lo que es de esperar que la magnitud de la esorrentía generada por una precipitación en ella sea menor que en aquella que presente un menor coeficiente de compacidad.

Además, se generó cartografía temática descriptiva para el área de estudio (Fig. 8). La altura general del área (Fig. 8 a) registra la mayoría de valores entre 2088 y 4000 msnm. Las pendientes dominantes en el área están entre 20° y 55° (Fig. 8 b) y en la orientación de laderas dominan el cuadrante sur, sureste y este (Fig. 8 c). Se pudo obtener además la red con los drenajes de distinto orden y las curvas de nivel, que dan una primera aproximación al diseño de drenaje en relación con el relieve (Fig. 8 d).

También, se calcularon las curvaturas del plano (Fig. 8 e) y el índice de convergencia

(Fig. 8 f), de los cuales se deriva que predominan las laderas cóncavas, de tipo convergente, con tendencia a acumular flujos de los espacios vecinos.

En la zona, valores altos de rugosidad (TRI) coinciden con las cumbres de los cordones montañosos. Los valores altos del TWI coinciden con zonas de baja pendiente, y por lo tanto son zonas propensas a acumular gran cantidad de agua. Por el contrario, las celdas con valores bajos, coinciden con zonas de elevada pendiente y por lo tanto baja acumulación (o alta capacidad de escorrentía). Los valores dominantes de profundidad de los valles intermontanos oscilan entre 200 y 600 metros. Cabe destacar que la profundidad del valle aumenta por erosión vertical, a medida que actúan factores como el aumento del caudal y la disminución de carga sedimentaria.

MANUSCRITO ACEPTADO

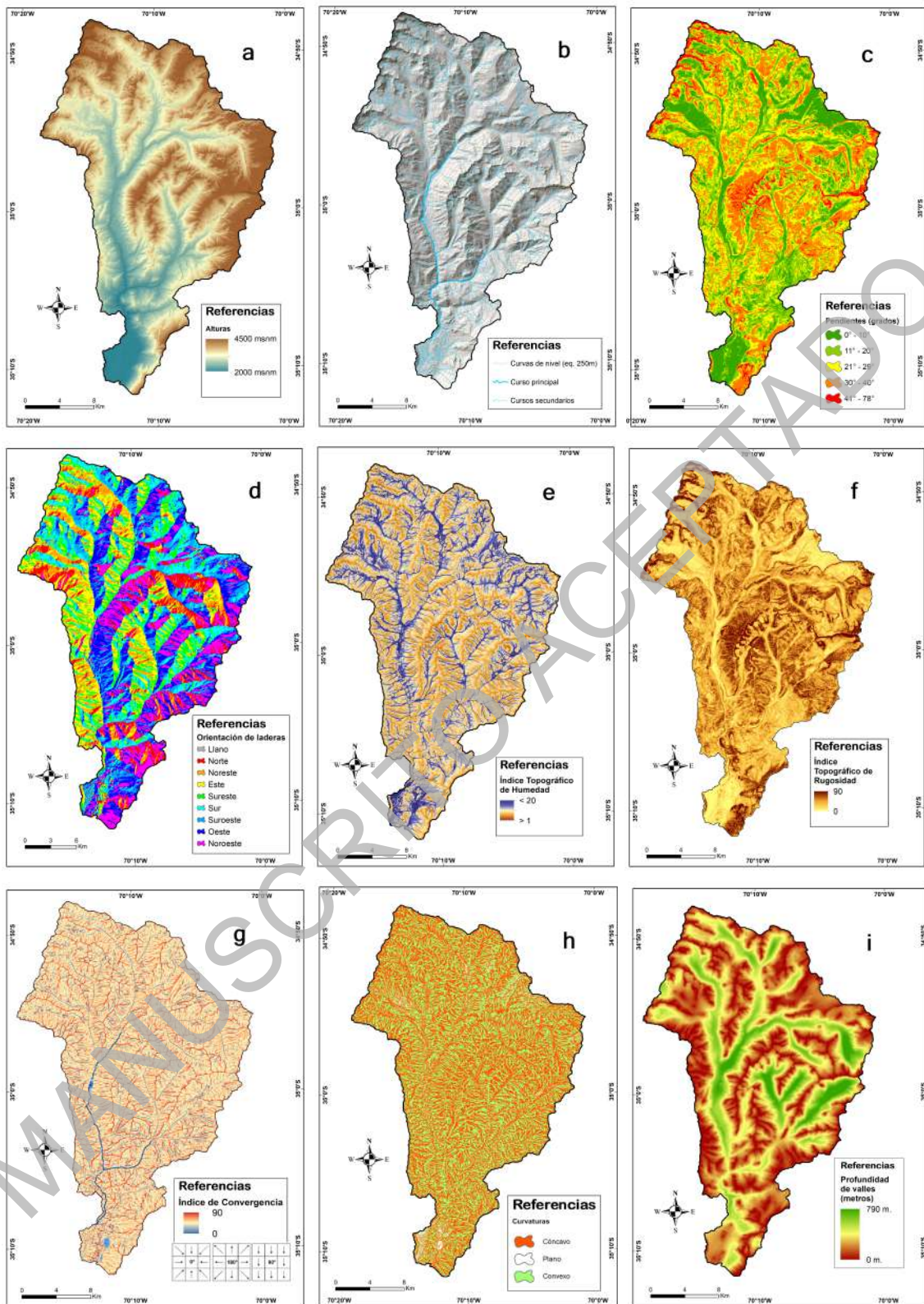


Figura 8: Parámetros geomorfométricos de la microcuenca Valle Hermoso: a) Alturas, b) Red de drenaje, c) Pendientes, d) Orientación de laderas, e) Índice Topográfico de Humedad, f) Índice Topográfico de Rugosidad, g) Índice de Convergencia, h) Curvaturas, i) Profundidad de valles.

Cobertura de nieve

Cobertura total de nieve caída

A partir del análisis de las distintas fuentes de información que permiten estimar la cobertura total de nieve puede observarse que para el área bajo estudio existe una mayor disponibilidad de información los últimos 4 años (Fig. 9). Se destaca la continuidad temporal de MODIS y alta disponibilidad de escenas de Sentinel, particularmente Sentinel 1. Por otro lado, se observa una menor disponibilidad intra anual de escenas, en los meses de otoño e invierno, principalmente de imágenes de Landsat.

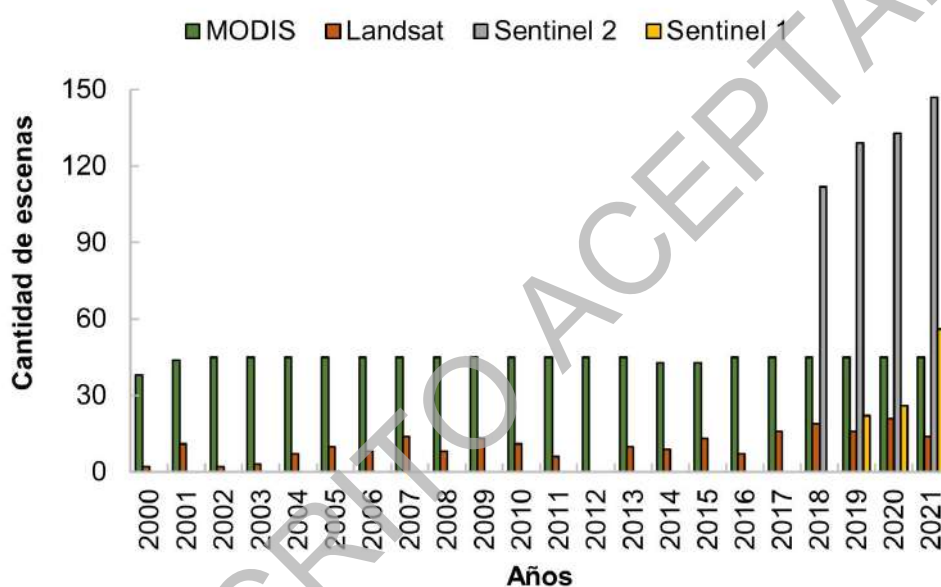


Figura 9: Disponibilidad de escenas de MODIS, Landsat 5 y 8, Sentinel 1 y 2 para el período 2000-2021.

La variabilidad intra-anual e interanual en la cobertura de nieve total en el área de estudio puede analizarse a partir de los datos provistos por el sensor MODIS, dada la gran disponibilidad de datos (Fig. 10). El área promedio cubierta por nieve durante los 22 años de análisis fue de 353 km², que equivale al 56.5 % de la superficie de la microcuenca Valle Hermoso. En invierno el porcentaje promedio de cobertura de nieve fue de 599 km² y de 62.9 km² en verano, debido a que la precipitación en la Cordillera es sumamente escasa en esta estación del año. La superficie máxima cubierta por nieve fue de 619.7 km² (99.2 % de la superficie), y la mínima de 0.5 km². Los resultados encontrados en este trabajo reafirman la presencia de una marcada variabilidad interanual, que ya ha sido

indicada previamente por otros autores para el área (Aumassanne et al. 2022).

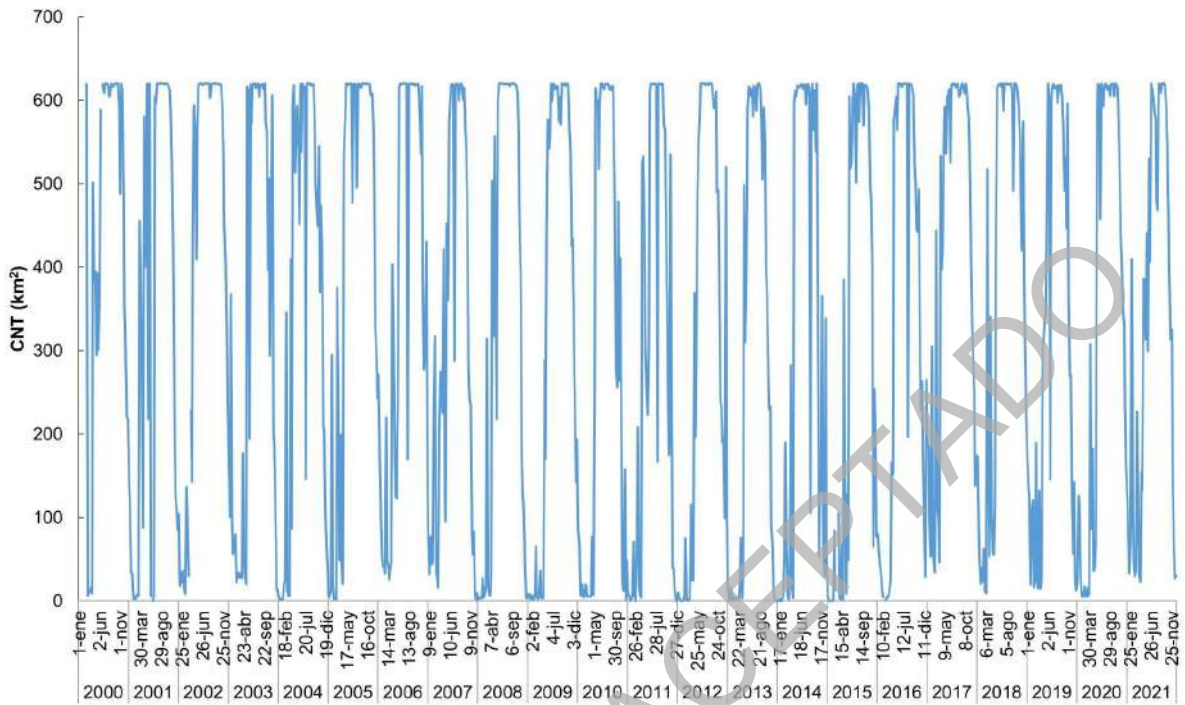


Figura 10: Cobertura de nieve total (CNT) estimada a partir del producto de MODIS (MOD10A2) para la microcuenca Valle Hermoso para el período 2000-2021

Por otra parte, se calculó el NDSI para 348 imágenes de las colecciones Landsat 5 y Landsat 8 que cubren el período 2000-2021 y 5 imágenes Landsat 9 para el año 2022, teniendo en cuenta que el cálculo de la superficie debía considerar que el path/row Landsat cubra toda la superficie de la microcuenca Valle Hermoso. Como es de esperar, los meses de mayor acumulación de nieve son los de invierno, destacando mayo, junio y julio con mayor superficie de toda la microcuenca ocupada por nieve. La figura 11 muestra la nieve total caída el 9/6/2022, que cubre una superficie de 452 km². De acuerdo a la estadística obtenida del procesamiento Landsat 9, la superficie total cubierta de nieve pasó de 450 km² en mayo a 245 km² a finales de octubre.

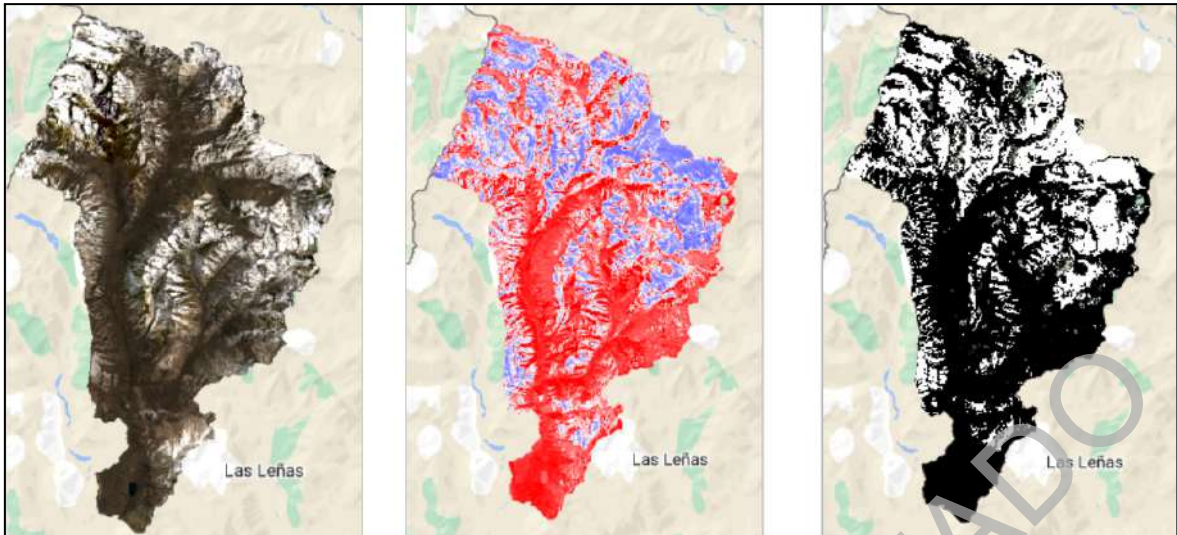


Figura 11: Izquierda: Imagen Landsat 9 del 9/6/2022 color natural. Centro: NDSI centrado en 0.4 (azul y blanco: nieve; rojo: otras superficies). Derecha: máscara binaria con NDSI mayor a 0.4 (blanco: nieve; negro: otras superficies).

A partir de las estimaciones obtenidas de CNT con MODIS y Landsat se obtuvo la correlación entre ambas fuentes de información, para cada año analizado, obteniendo coeficientes de correlación mayores a 0.5 en los últimos 5 años del período bajo análisis (Fig. 12). Cabe recordar que estos años son los que mayor cantidad de escenas están disponibles de Landsat como pudo observarse en la figura 8.

MANUSCRITO ACEPTADO

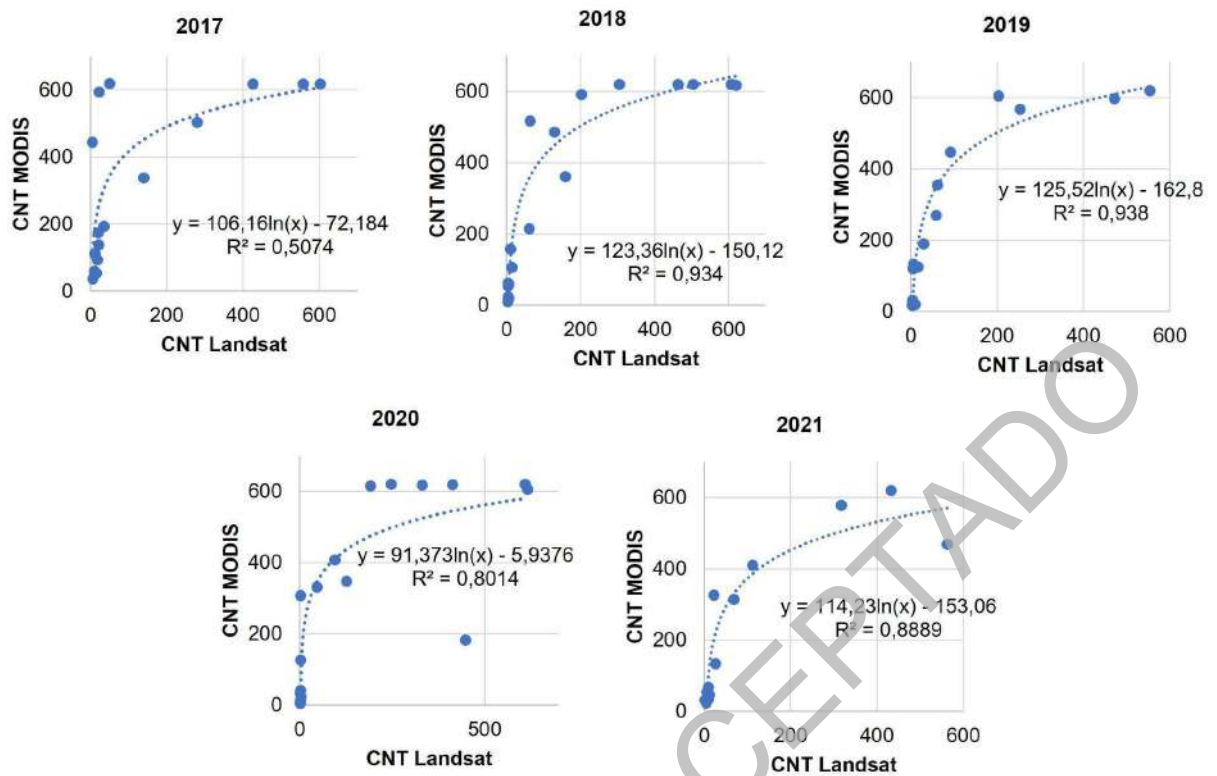


Figura 12: Correlación entre datos Landsat y MODIS en la estimación de cobertura total de nieve.

En la figura 12 se observa la relación entre las estimaciones de cobertura de nieve total (CNT) y el EAN registrado en la estación de Valle Hermoso. Las fechas utilizadas corresponden con las escenas disponibles de Landsat para el área de estudio. Cabe aclarar que en la época de otoño-invierno las escenas disponibles son menores, debido a que la cobertura nubosa característica de esa época impide obtener datos sobre el área, observándose una buena relación entre CNT y EAN en los meses de septiembre y octubre.

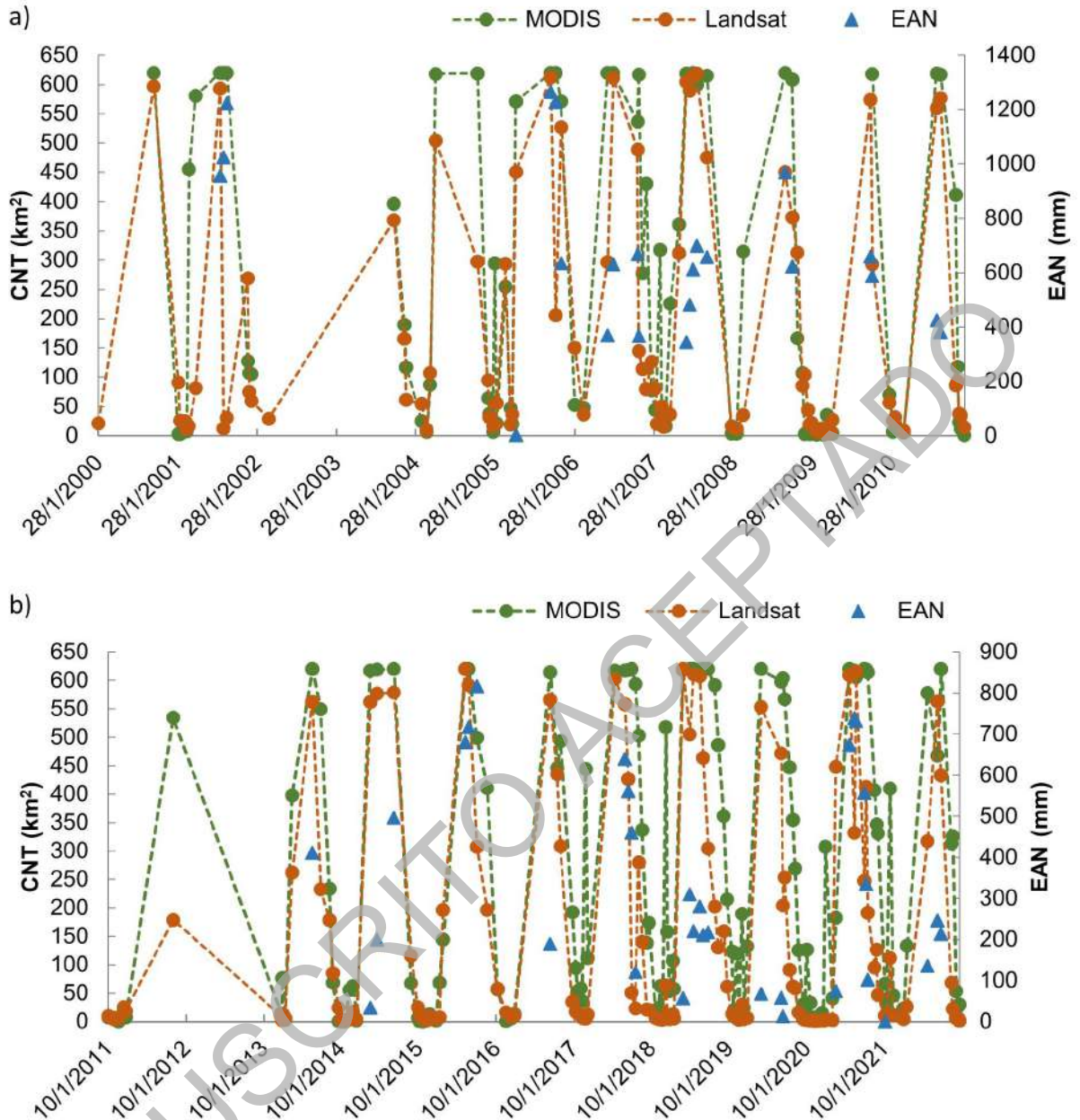


Figura 13: Relación de la cobertura de nieve total estimada (CNT) con EAN estación Valle Hermoso. Las fechas corresponden a las escenas disponibles de Landsat para el área de estudio.

También, se relaciona la cobertura de nieve total estimada (CNT) con el caudal del río Grande registrado en la estación de aforo de La Estrechura (Fig. 13 a y b). Las fechas utilizadas corresponden con las escenas disponibles de Landsat para el área de estudio. Existe una relación directa entre la CNT y el caudal diario, específicamente, durante los años 2016, 2017, 2018 y 2019 puede observarse el tiempo de retardo entre la máxima CNT y el máximo caudal diario registrado, con un mínimo de 48 días y máximo de 112

días. Por otro lado, se obtuvo diferencias en los valores de caudal y CNT entre los dos períodos analizados. Para el período 2000-2010 (Fig. 14 a), se obtuvo una CNT de 172 km² y de caudal promedio diario de 35.7 m³/s. Estos valores disminuyeron en el período 2011-2021 (Fig. 14 b), registrando valores de 148 km² y 19.15 m³/s respectivamente.

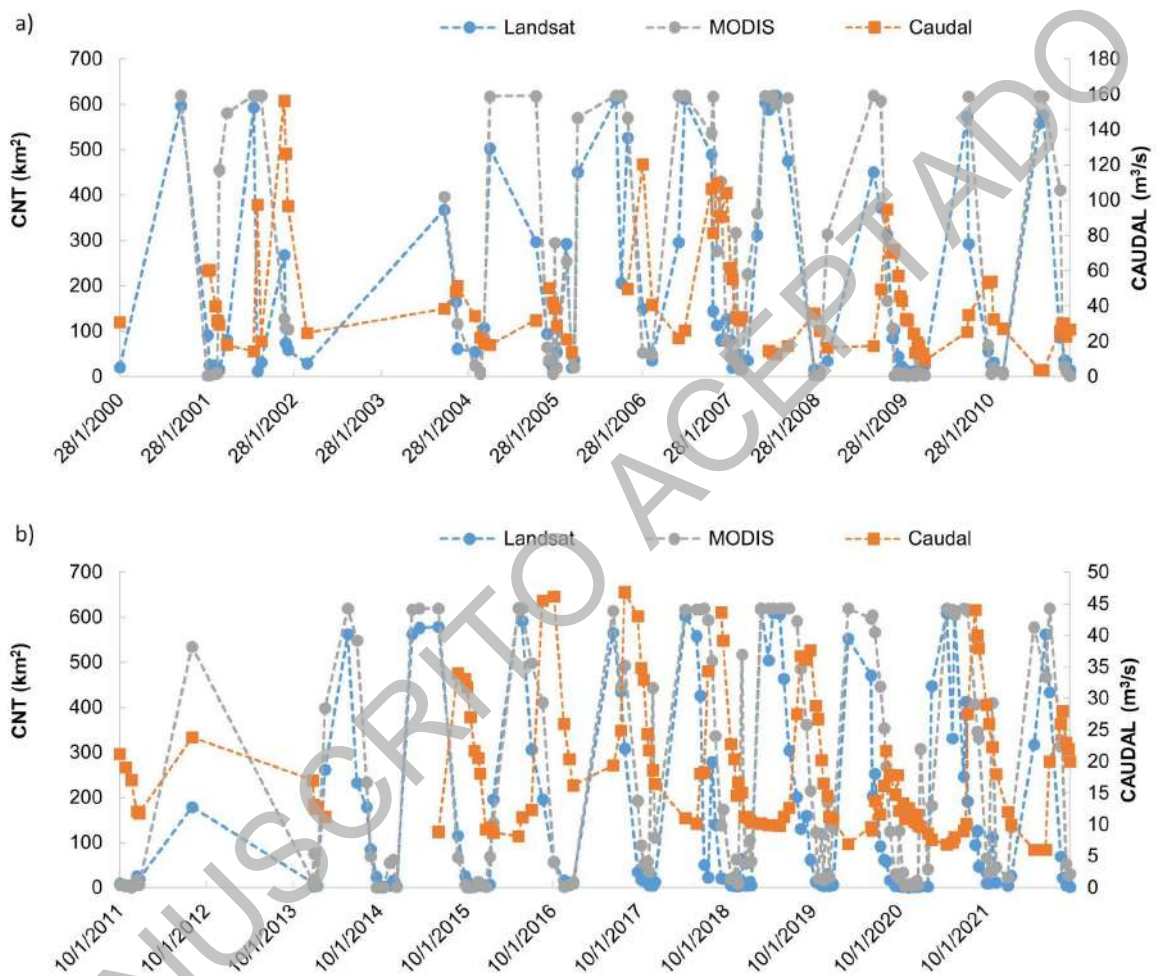


Figura 14: Cobertura de Nieve Total (CNT) estimada. Las fechas corresponden a las escenas disponibles de Landsat para el área de estudio. a) período 2000-2010, b) período 2011-2021.

Nieve de fusión

En base al método de detección de cambios del coeficiente de retrodispersión, se obtuvieron, con el set de datos de Sentinel 1, mapas de nieve en estado de fusión y se pudo medir su extensión areal (km²) para cada fecha. La figura 15, muestra los mapas del área de nieve en fusión del año 2015, donde se observa el aumento paulatino de la superficie de nieve húmeda a medida que avanza la temporada de primavera, llegando a

valores máximos para el mes de noviembre. En la secuencia de imágenes puede observarse cómo la fusión comienza en las cotas inferiores, particularmente en zonas de los valles, y se va desplazando hacia cotas superiores y zonas de laderas al inicio del periodo de deshielo (octubre-noviembre).

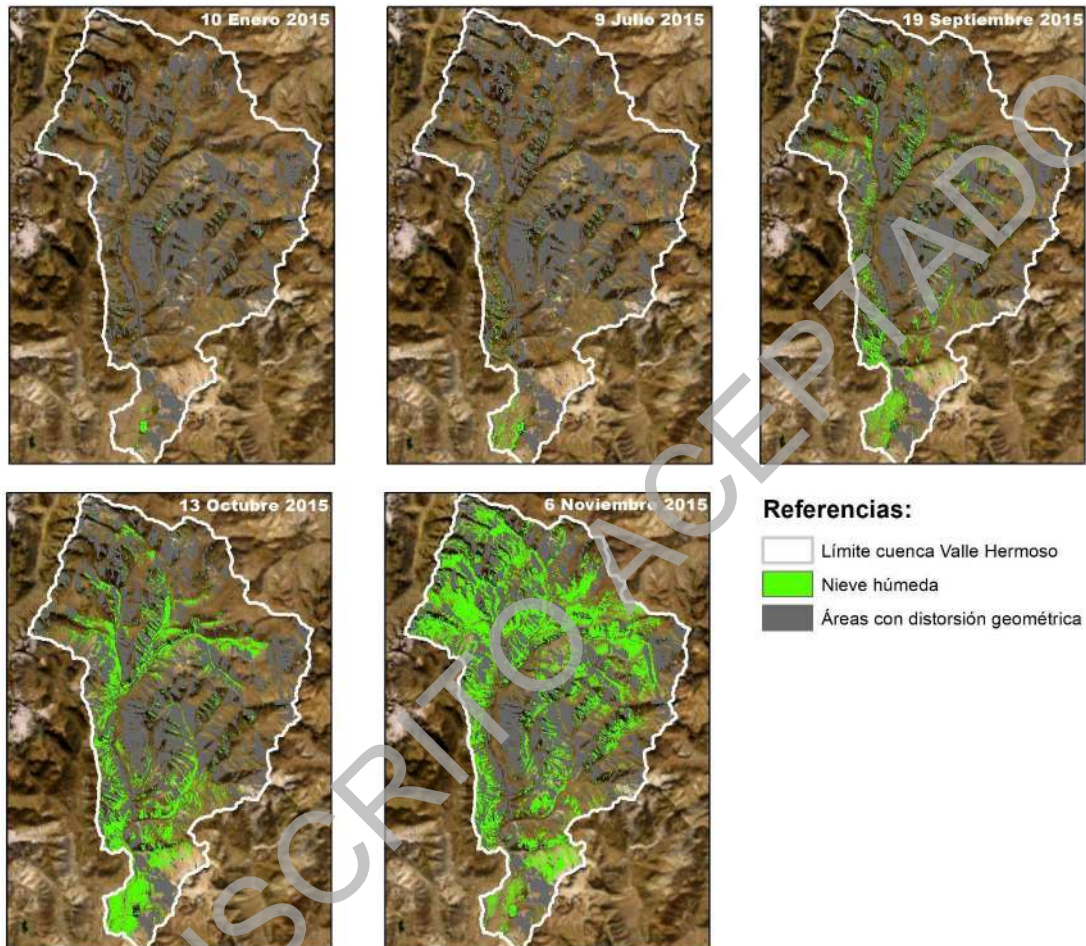


Figura 15: Mapas de nieve húmeda en base a imágenes Sentinel 1 pasada descendente año 2015. En las zonas con distorsiones geométricas no es posible registrar datos de nieve húmeda.

Cobertura de nieve total húmeda y caudal

La figura 16 muestra la variación anual del porcentaje de CNT Y CNH y el caudal para los años 2019, 2020 y 2021 para la pasada descendente. Aquí se observa el marcado aumento de la superficie de nieve en fusión entre el mes de agosto y septiembre. Esto indica el inicio de la temporada de fusión de la nieve. Además, en el año 2020 se observan dos picos de fusión a continuación de dos eventos de nevadas (la segunda de menor magnitud). Los periodos de fusión pueden estar relacionados, al aumento de

temperaturas y luego recongelamiento, o bien a eventos de precipitación que hayan fusionado las capas superficiales del manto nival. Concretamente, el seguimiento de la cobertura nival total y húmeda a lo largo del año hidrológico, y de los caudales al cierre de la microcuenca en estudio, permitió identificar con claridad la relación existente entre la caída abrupta del porcentaje de cobertura de nieve respecto al aumento repentino de los caudales. Se observa que, para los años 2016 y 2019, la disminución de nieve húmeda corresponde al inicio del aumento de volumen aguas abajo. Esto nos permite reconocer a la variación de superficie de nieve húmeda como un buen indicador para la predicción del inicio de la escorrentía en cuencas no aforadas.

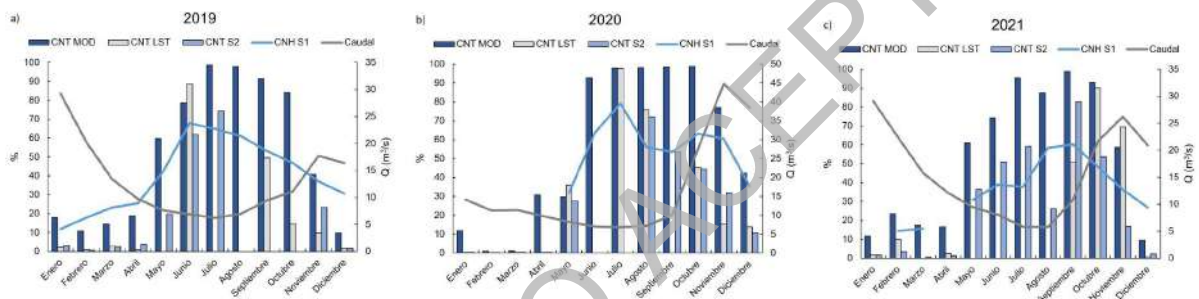


Figura 16: Cobertura de nieve total (%) estimada en base a imágenes de MODIS, Landsat y Sentinel 2 y cobertura de nieve húmeda (%) estimados en base a imágenes Sentinel 1 y caudal para los años 2019 (a), 2020 (b) y 2021 (c).

Avances en la construcción de la metodología para estimar EAN con imágenes radar

En este punto, se procesaron pares de imágenes SAOCOM para avanzar en la construcción de la metodología para la estimación del EAN, como variable regional, para poder tener información de toda la cuenca, y que no sea dependiente sólo de una estación de medición.

En la figura 17 se muestra el mapa resultante de aplicar la metodología DinSAR, que indica la variación del EAN entre el 25 de junio y el 3 de julio de 2022 en cada pixel de la cuenca. La variación del EAN estimada con este método resultó positiva para toda el área de estudio. Esto concuerda con la información obtenida de la estación Valle Hermoso, donde también se registra aumento del EAN, probablemente debido a nevadas en ese período. Las zonas donde no hay información del EAN corresponden a zonas

enmascaradas debido a la baja coherencia interferométrica.

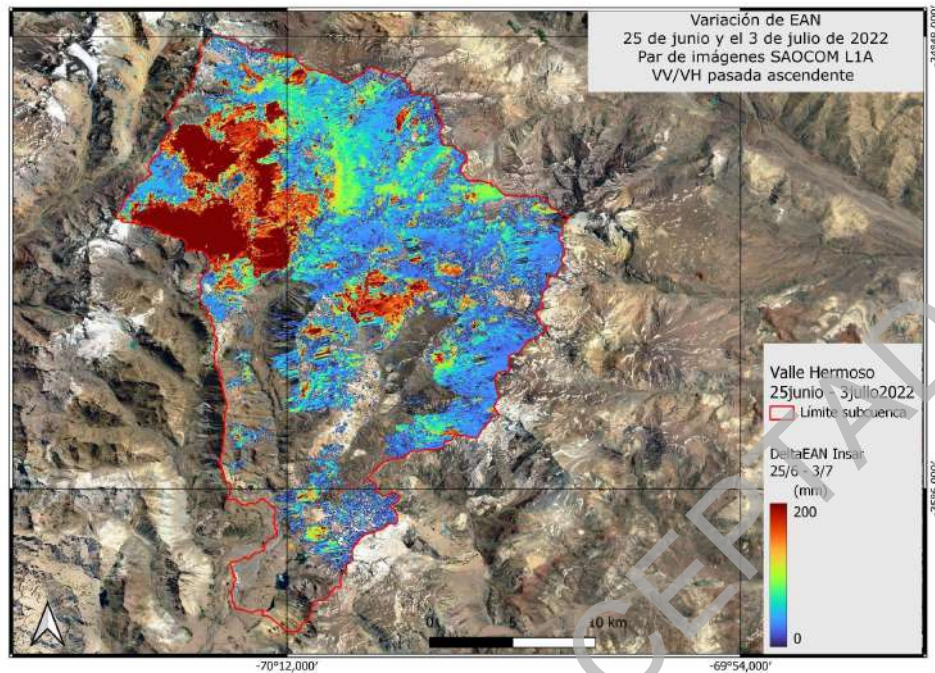


Figura 17: Mapa variación de EAN entre el 25 de junio y 3 de julio de 2022 en base imágenes SAOCOM L1A, ascendentes.

Distribución espacio-temporal de la nieve y su relación con la topografía

La CNT presenta la mayor variabilidad en las zonas más bajas del área de estudio, por debajo de los 2500 msnm. La mayor CNT ocurre entre los 2500 y 3500 msnm, y principalmente en laderas con pendiente entre 16 a 30 grados, en orientación suroeste y sureste. Por otra parte, se observa que existe una relación entre la ubicación de la nieve húmeda en función de la topografía realizada para una serie Sentinel 1 del año 2019, permite identificar una clara disposición de la nieve húmeda en pisos de altura cada vez más altos a medida que avanza la temporada de primavera. A cotas bajas y en zona de valles se ubica la nieve que comienza su fusión en agosto. En cotas intermedias se ubican las fechas de fines de septiembre y octubre, y en las zonas más altas los píxeles de final de temporada de deshielo de noviembre. Del histograma de frecuencias de cantidad de píxeles por fecha según elevación, se interpreta que en agosto la altura promedio de los píxeles próximos a fusión, es en torno a los 3000 metros, en septiembre

3100 msnm., en octubre 3200 msnm y en noviembre en 3500 msnm., que puede coincidir en algunos casos con zonas englazadas (Cuadro 3).

DISCUSIÓN

El objetivo principal de este trabajo fue presentar una propuesta de estudio y seguimiento de distintas variables vinculadas a la cobertura nival y a la morfometría, a partir de información satelital y de campo en la cuenca alta del río Colorado. Se destaca por un lado el uso de datos satelitales de distintas fuentes, con distinta resolución espacial y temporal, y en algunos casos, con un banco de datos históricos importante. Y por el otro, el uso de Google Earth Engine para el procesamiento de todo el volumen de datos en la nube. El cálculo total de la superficie nevada, la superficie con nieve húmeda y el equivalente en agua de nieve, en complemento con datos de estaciones in situ (EAN y caudal) e información cuantitativa obtenida del MDE, han arrojado información relevante para comprender la dinámica hidro-nivológica de la microcuenca piloto Valle Hermoso.

Relación morfometría/nieve

Las propiedades morfométricas obtenidas a partir del MDE resultan en un aporte novedoso para el área y el estudio de hidrología de montaña por la resolución espacial del MDE utilizado. La topografía rige y determina en gran parte el comportamiento hidrológico de las cuencas, así como también influye en la distribución espacial de la nieve. La ubicación altimétrica de la nieve húmeda según fechas permite conocer la superficie disponible para el resto de la temporada de deshielo y el remanente para el periodo de estiaje. A su vez, la información sobre el inicio de la fusión es un indicador, en este tipo de cuencas nivales, del aumento en el caudal de los ríos.

La cuenca hidrográfica como unidad de investigación y las propiedades morfométricas de los sistemas fluviales, como marco de referencia, sientan las bases y el marco físico para el manejo y la gestión del agua. La integración de los parámetros morfométricos en la

microcuenca hidrográfica piloto al estudio de la dinámica espacio temporal del caudal constituye un aporte relevante al conocimiento del funcionamiento de toda la cuenca.

Ventajas y desventajas de los datos utilizados

El presente trabajo permitió integrar todas las fuentes de información satelital disponibles con distintos softwares, y mediante la plataforma Google Earth Engine, con registros de estaciones de alta montaña, a fin de conocer las condiciones de la nieve y la fusión en la microcuenca de estudio. Esta metodología puede ser replicada a otras cuencas andinas a fin de conformar sistemas de monitoreo satelital para predecir variables hidrológicas de relevancia en cuencas no instrumentadas.

En cuanto a la estimación de la CNT, los datos Landsat brindan la posibilidad de generar un producto con alta resolución espacial y radiométrica, permitiendo lograr una buena precisión en la identificación de nieve en imágenes libres de nubes. Sin embargo, su resolución temporal (16 días) no permite realizar un seguimiento frecuente de la cobertura nival, más aún en regiones con alta nubosidad estacional en los momentos de mayor interés, desde mediados de otoño a mediados de primavera. Una solución a este problema, es el uso de productos generados por el sensor MODIS que, si bien se caracteriza por una resolución espacial menor que Landsat, su frecuencia temporales mucho mayor, pudiendo tomar hasta dos imágenes diarias de un punto en particular, si se toman en consideración las dos plataformas a bordo de las cuales estuvo presente dicho sensor (Terra y Aqua). Cabe destacar la importancia del uso complementario de datos Landsat y Sentinel 2, que permite aumentar la revisita y generar producto de área nevada con mayor frecuencia. Sin embargo, persiste la dificultad de obtener la cobertura nival cuando hay nubosidad. Es en este punto que entran en juego los sensores SAR que, si bien brindan información sobre la nieve con contenido de humedad, próxima a fusionarse, no se descartan escenas debido a la presencia de nubes.

Implicancias de la estimación de EAN

La estimación del EAN con técnicas de Interferometría SAR es una técnica novedosa que se encuentra aún en desarrollo para el área de estudio. Si bien es una técnica muy prometedora ya que permite obtener información remota, pixel a pixel, sobre el contenido de agua líquida en el paquete de nieve, posee ciertas limitaciones. Una limitación propia de la técnica InSAR es la pérdida de coherencia interferométrica dada, por ejemplo, por la caída de nieve, que se traduce en decorrelación de la señal. Esto implica pérdida de píxeles con información valiosa. Por este motivo, es importante contar con varios pares interferométricos de la temporada de invierno (ya que la nieve debe ser fresca, seca) para poder realizar una estimación del EAN, sin perder calidad en la fase interferométrica. Es en este punto que se destaca el potencial de los datos SAOCOM en banda L, ya que esta banda, al tener mayor penetración en la capa de nieve, reduce la pérdida de coherencia, aumentando los píxeles con información válida. Por otro lado, en este punto se destaca la posibilidad a futuro de generar serie temporal de EAN con esta metodología, que luego podrá ser utilizada para información del caudal que se generará en la época de fusión, lo que constituye una herramienta importante para la gestión del agua en estas cuencas de montaña.

Propuesta para el seguimiento de las variables hidrometeorológicas de interés

A continuación, se resumen las variables indicadoras hidro-morfológicas analizadas en este trabajo (ítem 1 a 3) y las que se espera integrar para avanzar (ítem 4 a 8) en la creación de un sistema integrado de información de la cuenca del río Colorado, en el marco del proyecto inter-institucional CONAE-INTA-INA, a partir de datos de múltiples fuentes (Cuadro 3).

Cuadro 3. Variables indicadoras para el estudio y manejo del agua a partir de información satelital.

Item	Variable	Fuente de información	Observaciones
1	<i>Cobertura de nieve total</i>	MODIS LANDSAT SENTINEL 2	Datos con alta periodicidad y a múltiples escalas. Grandes volúmenes de datos históricos que permiten analizar variaciones que responden a ciclos climáticos. Como desventaja, es sensible a la cobertura de nubes.
2	<i>Superficie con nieve húmeda</i>	SENTINEL 1	Datos con periodicidad media. Como ventaja, el SAR es independiente de las condiciones climáticas y de nubosidad. Esta variable muestra la extensión areal de la nieve húmeda. Permite predecir el inicio de la escorrentía por fusión.
3	<i>EAN</i>	SAOCOM S1	Permite complementar mediciones a campo y contar con información distribuida en el espacio. Es un parámetro necesario para los modelos de simulación.
4	<i>Permanencia de la nieve</i>	MODIS MDE-Ar	Permite identificar regiones con nieve/hielo permanente, que funcionan como fuente de almacenamiento de agua. Es importante contar con esta información a fin del verano, ya que es la cobertura de nieve que se transfiere de un ciclo hidrológico a otro.
5	<i>Duración de la nieve</i>	MODIS LANDSAT SENTINEL 2 MDE-Ar SENTINEL 1	Relación de la nieve con parámetros morfométricos. Permite identificar en qué sector de la cuenca la nieve empieza a fusionarse primero. Posición altimétrica del inicio de la fusión según fechas
6	<i>Contenido de agua líquida</i>	SENTINEL 1 SAOCOM	Parámetro que tiene relación con el albedo y la morfología de la cuenca (altura, orientación de laderas). Permite calcular el porcentaje de humedad volumétrica y reconocer ciclos de fusión (humedecimiento, maduración, escorrentía) dentro del paquete de nieve.
7	<i>Temperatura de superficie</i>	MODIS	Complementa el estudio de los cambios estacionales de la nieve. Se utiliza como método de validación de la nieve húmeda.

8	<i>Precipitación</i>	Estaciones In Situ y a partir de información satelital	A partir de información satelital se puede conocer la distribución regional de las precipitaciones y sus variaciones espacio-temporales. En complemento con la cobertura de nieve, ayuda a determinar la oferta hídrica de la cuenca.
---	----------------------	--	---

En el proyecto se destaca el uso de múltiples fuentes de información satelital y de campo, que permiten indagar en el estudio de numerosos parámetros indicadores de la dinámica nival, que dominan la oferta de agua en la cuenca alta del Colorado, siendo la fuente de agua principal de las provincias aguas abajo. El abordaje planteado en esta investigación a distintas escalas espaciales y temporales con distintas fuentes de información utilizadas y con la integración de información satelital y de terreno le otorga al proyecto un potencial a destacar con aportes de conocimientos significativos y novedosos para la gestión integrada de los recursos hídricos a escala de cuenca.

CONCLUSIONES

Se realizó un análisis integrado para el periodo 2000-2021, a partir de datos provistos por sensores ópticos y de radar, destacándose el uso de grandes volúmenes de datos en la plataforma de Google Earth Engine. Se determinó cobertura de nieve total a partir de sensores ópticos y nieve húmeda con datos SAR, y se presentó una metodología para el monitoreo de cobertura de nieve, avanzando en la estimación del EAN desde sensores remotos.

Los resultados aquí alcanzados permiten comprender la dinámica de la hidrología de la microcuenca de Valle Hermoso y poner a punto metodologías para el estudio de variables hidrometeorológicas, que podrán ser utilizadas en toda la cuenca alta del río Colorado como en otras cuencas de régimen nival. Además, la información aquí generada sirve como datos de entrada para modelos de simulación hidrológica. Cabe resaltar que en este trabajo se utilizó información de Landsat 9 para la estimación de cobertura de nieve total, siendo este uno de los primeros trabajos en utilizar ésta fuente, resultando novedosa su aplicación en cuencas andinas. Se planifica utilizar esta información en

futuras líneas de investigación dentro del mismo proyecto para toda la cuenca alta del río Colorado.

Se espera que estos resultados sean de utilidad para el manejo integrado de los recursos hídricos a nivel de cuenca, los cuales podrían ser usados como base para la planificación principalmente de las áreas bajo riego, siendo este el principal usuario de agua en la cuenca, como así también para uso de agua para la población, minería, hidrocarburos y generación de energía.

Queda abierta como línea futura de investigación poder relacionar los resultados obtenidos en este trabajo con datos de temperatura de superficie, de estaciones meteorológicas e información satelital, precipitación y otras variables hidrometeorológicas que permitan determinar la influencia estacional y las variaciones interanuales de la cobertura de nieve y la variabilidad de la oferta hídrica en la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Irrigación Mendoza por los datos de estaciones meteorológicas utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS

- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Oricchio, P. y Di Bella, C. M. 2015. Seguimiento satelital de la cobertura de nieve en la cuenca del río Colorado. XXV Congreso Nacional del Agua, Argentina.
- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Oricchio, P., Di Bella, C. M. y Gaspari F. J. 2019. Cobertura de nieve en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría. RIA, 45 (3): 394 - 403.
- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Oricchio, P., Di Bella, C. M., Gaspari F. J. y 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).
- Cara, L., Masiokas, M., Viale, M. y Villalba, R. 2016. Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS. Meteorológica, 41, 21-36.

- Cogliati, M. y Finessi, F. 2016. Utilización de productos Terra-Modis para el cálculo de la superficie nival en la Cordillera del Viento (Neuquén, Argentina). Conferencia: EICES 10, Buenos Aires, Argentina.
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). 2013. Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. Disponible en: www.coirco.com.ar
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). 2015. Perl, J. E., Andrés, F. O. Presentación: Manejo Integral de la cuenca del río Colorado. Oferta y demanda hídrica en períodos de sequía. En: Jornada de Actualización "Cuenca del río Colorado: Situación Actual, Proyectos en Ejecución, Planificación". Villa Casa de Piedra, La Pampa. Disponible en: www.coirco.com.ar.
- Catálogo SAOCOM, CONAE, 2023. <https://catalog.saocom.conae.gov.ar/catalog/#/>
- Garreaud, R.D., Álvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J. y Zambrano-Bigiarini, M. 2017. The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21 (12), 6307–6327.
- Halcrow. 2013. Cuenca del río Colorado determinación de áreas de riesgo hídrico. Programa Multisectorial de preinversión III. Préstamo BID 1896/OC-AR. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado. Hidroestructuras S.A.
- Hall, D. K., Riggs, G. A. y Salomonson, V. V. 2001. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod10.pdf).
- Hall, D. K., Riggs, G. A. y Salomonson, V. V. 2006. MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. Version 5. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
- Hallikainen, M.T., Pulliainen, J.T., Praks, J. y Arslan, A. 2001. Progress and challenges in radar remote sensing of snow. *Proceedings 3rd Int. Symp. Retrieval of Bio and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*. Sheffield.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN), 2023. <https://www.ign.gob.ar/#>
- Koskinen, J. T., Pulliainen, J.T. y Hallikainen, M. T. 1997. The use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 35, 3: 601-610.
- Landsat 5 TM, Earth Engine Data Catalog, 2023. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat-5>
- Landsat 8 OLI/TIRS, Earth Engine Data Catalog, 2023. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat-8>
- Landsat 9 OLI-2/TIRS-2, Earth Engine Data Catalog, 2023. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat-9>

- Martini, A., Ferro-Famil, L., Pottier, E. y Dedieu, J.P. 2004. Snow extent discrimination in alpine areas from polarimetric and multi-frequency SAR data. En Proceedings EUSAR.
- Muhammad, S. y Thapa, A. 2020. An improved Terra-Aqua MODIS snow cover and Randolph Glacier Inventory 6.0 combined product (MOYDGL06*) for high-mountain Asia between 2002 and 2018. Earth System Science Data. 12: 345-356.
- Nadir Arslan, A., Koskinen, J., Praks, J., Alasalmi, H., Kruopis, N., y Hallikainen, M. 1998. Retrieving Snow Water Equivalent on C and L band. SAR data for dry snow. Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. IGARSS 98. IEEE International.
- Nagler, T. y Rott, H. 2000. Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 38, 2: 754-765.
- National Snow and Ice Data Center, 2023. <https://nsidc.org/data/mod10a2>
- Notarnicola C., Duguay, M., Moelg, N., Schellenberger, T., Tetzlaff, A., Monsorno, R., Costa, A., Steurer, C. y Zebisch M. 2013. Snow cover maps from MODIS images at 250 m resolution, Part 2: Validation. Remote Sensing 5: 1568 – 1587.
- Nullo, F. E., Stephens, G., Combina, A., Dimieri, L., Baldauf, P., Bouza, P. y Zanettini, J.C.M. y Leanza, H.A., 2005. Hoja Geológica 3569-III / 3572 IV, Malargüe, provincia de Mendoza. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín 346, 85 p. Buenos Aires, Argentina.
- Paudel, K. P. y 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.
- Pettinato, S., Poggi, P., Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P. and Crepez, A. 2004. Mapping snow cover in alpine areas with envisat/sar images. Envisat and ERS. Symposium, September 6-10. Proceeding ESA ISBN 92-9092-883-2 Salzburg, Austria.
- Pettinato, S., Santi, E., Brogioni, M., Paloscia, S., Pampaloni, P., Palchetti, E., Shi, J. and Xiong, C. 2011. The potential of Cosmo-SkyMed SAR images in mapping snow cover and snow water equivalent. IGARSS 2011. IEEE.
- Rivera, J. A., Marianetti, G. y Scaglione, M. 2022. Análisis de los eventos de precipitación que afectan la distribución de agua potable en el Gran Mendoza, Argentina. Cuadernos Geográficos; Lugar: Granada; vol. 61: 204 - 222
- Rott, H., Heidinger, M., Nagler, T., Cline, D. and Yueh, S. 2009. Retrieval of snow parameters from ku-band and x-band radar backscatter measurements. IGARSS 2009. IEEE
- Salcedo, A. P. 2011. Estimate of Area of Snow Cover in Watersheds with High Rate of Data Fusion Using ERS-2. Tesis maestría AEARTE . Universidad Nacional de Córdoba. 103p.

- Salcedo, A.P. y Cogliati, M.G. 2014. Snow Cover Area Estimation Using Radar and Optical Satellite Information. *Atmospheric and Climate Sciences* 4: 514-523.
- Salomonson, V. and Appel, I. 2004. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment* 89: 351-360.
- Sentinel 1A/1B, Alaska Satellite Facility, 2023. <https://search.asf.alaska.edu/>
- Sentinel 1A/1B y 2A/2B, Earth Engine Data Catalog, 2023. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentine>
- Shi, J. y Dozier, J. 1995. Inferring snow wetness using C-band data from SIR-C's polarimetric synthetic aperture radar. *IEEE Trans. Geosci. RemoteSens.*
- Shi, J. y Dozier, J. 2000. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-sar. *Geoscience and RemoteSensing, IEEE TransactionsonVolume: 38* , Issue: 6.
- Sistema de Información Hidronivometeorológico del Departamento General de Irrigación (Mendoza), 2023.
- Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Nación, 2023. <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/>
- Solorza, R., Cogliati, M., Salcedo, A.P., Notarnicola, C. 2016. Estimación del Área Cubierta de Nieve con datos SAR en banda L en un sector cordillerano de la Patagonia Argentina. *Rev. De La Asoc. Geol. Argentina*, vol. 73: 421–429.
- Tahir, A.A., Chevallier, P., Arnaud, Y., Ashraf, M. y Bhatti, M. T. 2015: Snow cover trend and hydrological 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
- Telesca, L., Shaban, A., Gascoin, S., Darwich, T., Drapeau, L., Hage, M.E. y 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.
- Teverovsky, S., Pascual, I., Notarnicola, C., Salmuni, G. 2018. Estimation of wet snow cover area with SAR imagery in the basin of Tupungato River, Mendoza, Argentina. In 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON) (pp. 1-6). IEEE.