

APORTES DE DATOS SATELITALES PARA EL ESTUDIO HIDRO-MORFOLÓGICO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO, ARGENTINA

^{1*}Aumassanne, Carolina;²Salcedo, Ana Paula; ³Solorza, Romina; ³Teverovsky, Sofia; ³Machado, Federico; ³Soldano, Alvaro; ²Bonilla, Jorge; ^{4,5}Beget, Maria Eugenia; ⁴Oricchio, Patricio.

¹Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 25 de Mayo, La Pampa, ARGENTINA

²Subgerencia Centro Regional Andino, Instituto Nacional del Agua, Mendoza, ARGENTINA

³Gerencia de Observación de la Tierra. Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Córdoba, ARGENTINA

⁴Instituto de Clima y Agua, CIRN. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, ARGENTINA

⁵Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA

E-mail: * aumassanne.carolina@inta.gob.ar

Introducción

Los sensores satelitales ópticos y de radar brindan información de variables de la criósfera en distintas regiones del espectro electromagnético, en continuidad espacial y periodicidad temporal dependiendo de cada programa espacial. En las zonas montañosas de Argentina, se cuenta con antecedentes de estudios sobre la dinámica nival asistida por sensores remotos. Cogliati *et al.* (2016) y Cara *et al.* (2016) han realizado importantes aportes en el estudio de la dinámica nival con datos de sensores ópticos, en las cuencas altas del río Neuquén y del río Mendoza, respectivamente. Por otro lado, la nieve en proceso de fusión ha sido estudiada en base a datos de radar (Salcedo y Cogliati 2014; Solorza *et al.* 2016; Teverovsky *et al.* 2018; Salcedo *et al.* 2022). Aumassanne *et al.* (2019 y 2022) plantearon los primeros antecedentes de estudios multitemporales para la cuenca alta del río Colorado.

Con el firme objetivo de asistir a mejorar el manejo del agua en toda la cuenca del Río Colorado, se estableció un convenio interinstitucional INA-INTA-CONAE, utilizando el potencial de cada institución para desarrollar un sistema integrado de monitoreo de variables hidrometeorológicas. Este trabajo expone una parte de los alcances de este convenio.

El objetivo particular de este estudio es estudiar el proceso de acumulación y fusión nival y su relación con la morfometría de la cuenca. Se generaron series multianuales de datos satelitales del área cubierta de nieve, discriminando en el manto nival aquella que es húmeda o se encuentra próxima a fusión. También se analizó la relación entre la disminución areal de la cobertura nival durante la temporada de deshielo y el aumento del caudal medio mensual. Asimismo, se investigaron técnicas de estimación del Equivalente en Agua de Nieve, como variable predictora principal del caudal en cuencas de alta montaña.

Área de estudio

La cuenca alta del Río Colorado es drenada por los ríos Barrancas y Grande, siendo este último el que aporta los mayores caudales por fusión nival. El área de estudio es la cuenca del río Grande con cierre en la estación de aforo La Gotera (35°52' 13,00"S; 69°53' 0,44"O). El área de estudio fue delimitada en función de la presencia de estaciones nivológicas y de caudales, abarcando un área de 5003,8 km², lo que representa el 48 % de la superficie de la cuenca del Río Grande. En La Gotera, el caudal medio anual es de 96,5 m³.s⁻¹. Tiene un caudal medio mensual en los meses de estiaje de 53,9 m³.s⁻¹ y un caudal medio mensual máximo de 302,91 m³.s⁻¹.

Datos utilizados y metodología

Para la obtención de **parámetros morfométricos**, se construyó un mosaico digital sobre la base de MDE-Ar del Instituto Geográfico Nacional de Argentina (<https://www.ign.gob.ar>), que

tiene 30 m de resolución espacial y una precisión vertical de aproximadamente 2 m. Utilizando el Modelo Digital de Elevaciones se calcularon parámetros de forma, relieve y drenaje.

Para la obtención de **parámetros hidrométricos**, se estimaron 3 variables: cobertura de nieve total (CNT) según Salomonson y Appel (2004), cobertura de nieve húmeda (CNH) de acuerdo a Nagler y Rott (2000), y equivalente en agua de nieve (EAN) según Guneriusen *et al.* (2001) y Teverovsky *et al.* (2022). Se utilizaron datos satelitales de diversas fuentes y frecuencias (Tabla 1). Toda la información satelital fue sistematizada y procesada en Google Earth Engine (GEE), excepto los datos SAOCOM que fueron procesados con el programa SNAP de la Agencia Espacial Europea.

Tabla 1.- Datos y sus características.

Variable estimada	Sensor	Resolución espacial [m]	Período [años]	Fuente
Cobertura Nieve Total (CNT)	MODIS Producto MOD10A2	500	2000-2022	https://code.earthengine.google.com
	Sentinel 2A y 2B	20	2016-2022	https://code.earthengine.google.com
Cobertura Nieve Húmeda (CNH)	Sentinel 1A y 1B	20	2014-2022	https://code.earthengine.google.com
Equivalente en Agua de Nieve (EAN)	SAOCOM	10	2022	https://catalog.sao.com.com.ar

Respecto a la estimación del EAN, se aplicaron técnicas de Interferometría Diferencial (DinSAR) sobre imágenes radar SAOCOM en modo de adquisición StripMap, nivel de procesamiento L1A, polarización HH/VH, *beam* S4, a fin de obtener la diferencia de EAN entre dos fechas específicas. La metodología se testeó en la cuenca en estudio y sus resultados fueron publicados en Solorza *et al.*, (2023).

En cuanto a **datos de campo**, se utilizaron los registros de EAN de la estación Valle Hermoso y Paso Pehuenche, y de caudal de la estación de aforo La Gotera. Los datos fueron descargados del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Nación (disponibles en <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/>). Se utilizaron datos diarios de ambas variables de la serie 2000-2021. Los datos de las estaciones sirvieron como validación de los resultados obtenidos mediante los procesamientos realizados con sensores remotos.

Resultados

Los parámetros de forma, relieve y drenaje estimados para la cuenca de estudio son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2.- Parámetros morfométricos estimados.

Parámetros	Variables	Valor
De forma	Área de drenaje (km ²)	5003,8
	Perímetro (km)	561
	Ancho promedio (km)	38
	Longitud axial (km)	164
	Coef. de compacidad de Gravelius	2,24
	Factor de forma	0,23
De relieve	Pendiente media (grados)	14,45
	Cota máxima y mínima (m s.n.m)	4687-2592
De drenaje	Razón de elongación	0,49
	Longitud del curso pp (km)	145
	Tiempo de concentración (horas)	4

De todo el período analizado, la superficie máxima cubierta por nieve fue de 4868,7 km² en agosto de 2002 y la mínima de 4,75 km² en enero de 2014. En promedio, la CNT fue de 3725 km² en los meses de invierno y de 281 km² en los de verano, un 75% y 7% respectivamente. Como ejemplo de todo el periodo analizado, se observa en la Figura 1 el año 2022, el cual muestra el inicio de las nevadas hacia principios de Abril (marcado por la curva de CNT), llegando a su valor máximo en Julio-Agosto, y un descenso de la misma hacia finales de Agosto (inicio del periodo de fusión de primavera) en concordancia con un aumento en el caudal (Q) y una disminución de la CNH. Analizando las dos fuentes de información óptica, para la estimación de CNT, las mayores diferencias se obtuvieron en el período de fusión, a partir de agosto. Esta diferencia se debe a las resoluciones espaciales y temporales de ambas fuentes, ya que el producto MODIS resulta de un compuesto de 500 m de píxel cada 8 días mientras que S2 arroja un valor absoluto diario de 20 m de píxel.

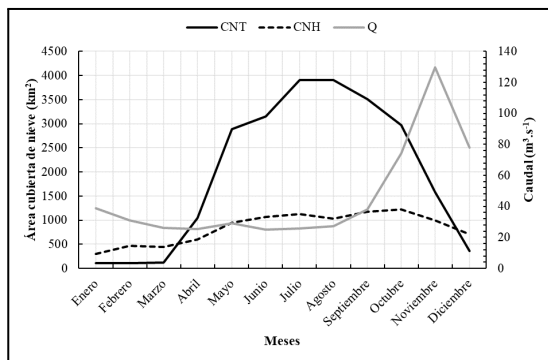


Figura 1.- CNT en base a MODIS y CNH a partir de Sentinel 1, en comparación con caudal de la estación La Gotera para el año 2022.

Consideraciones finales

Se construyó cartografía de la CNT, CNH y se analizó espacial y temporalmente su relación con las características topográficas. Se determinó CNT a partir de sensores ópticos y CNH con datos de sensores SAR, y se presentó una metodología para el monitoreo de cobertura de nieve, avanzando en la estimación del EAN con datos SAOCOM. Se han probado metodologías tendientes a generar información que explique el proceso de acumulación y fusión nival, que da apoyo a los datos puntuales de estaciones de medición en alta montaña y aportan a la toma de decisiones y a la gestión del recurso agua abajo, de particular importancia en un contexto crítico de escasez hídrica como el vigente. La estimación de EAN mediante técnicas de DinSAR ofrece resultados prometedores. Se avanza en otras líneas de investigación para estimar EAN mediante modelos de nieve de base física. Se destaca el uso de grandes volúmenes de datos en

la plataforma Google Earth Engine, para el periodo 2000-2022. Se plantean como líneas de investigación para el año 2023: 1) relacionar los resultados obtenidos con datos de temperatura de superficie, provenientes tanto de estaciones meteorológicas como de sensores satelitales, de precipitación y de otras variables hidrometeorológicas que permitan determinar la influencia estacional y explicar las variaciones interanuales de la cobertura de nieve; 2) Analizar la variación de la dinámica nival en función del aumento de las temperaturas y disminución de precipitaciones en escenarios de cambio climático, y 3) aplicar modelación hidrológica para la predicción de caudal en la cuenca alta del río Colorado, y el análisis de la relación oferta-demanda del agua considerando la disponibilidad del recurso en la alta cuenca. A partir de los resultados alcanzados y las líneas de investigación-extensión futuras, se destaca también la continuidad de los convenios de cooperación interinstitucional para fortalecer vínculos y aportar capacidades a demandas territoriales concretas.

Referencias

- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Di Bella, C. M., Oricchio, P. y 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)*.
- Aumassanne, C. M.; 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". *Revista Meteorológica*, 47(2).
- 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. *Revista 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.
- Guneriussen, T. Hogda, K. A. Johnsen, H. and Lauknes, I. (2001) "InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 10, pp. 2101-2108, Oct. 2001, doi: 10.1109/36.957273.
- Nagler, T & Rott, H. (2000). Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 38, 754-765.
- Salcedo, A.P. and Cogliati, M.G. (2014). Snow Cover Area Estimation Using Radar and Optical Satellite Information. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4, 514-523.
- Salcedo, A. P.; Aumassanne, C. M.; Solorza, R.; Teverovsky, S.; Haye, S.; Oricchio, P. (2022). "Uso integrado de datos satelitales para el monitoreo de parámetros hidrometeorológicos de la cuenca alta del río Colorado, Argentina". ICES-17. Mendoza, Argentina.
- Salomonson, V. y Appel, I. (2004). Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of the Environment*. Vol. 89, Issue 3. 351-360.
- 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. La Asoc. Geol. Argentina*, vol. 73, pp. 421-429.
- Solorza, R.; Aumassanne, C.; Salcedo, A. P.; Teverovsky, S. (2023). Uso de datos satelitales de múltiples fuentes para la reconstrucción espacio-temporal de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Grande, Argentina. XXII Congreso Argentino de Tecnología Espacial. Mendoza, Argentina.
- Teverovsky, S., Notarnicola, C. (2018). Estimation of wet snow cover area with SAR imagery in the basin of Tupungato River, Mendoza, Argentina. Congreso Bional Argencon IEEE 2022.
- Teverovsky, S.; Solorza, R.; Notarnicola, C.; Soldano, A. (2022). "Estimación del Equivalente en Agua de Nieve en base a técnicas de Interferometría Diferencial y datos de la constelación SAOCOM". Congreso Bional Argencon IEEE 2022.