

USO INTEGRADO DE DATOS SATELITALES PARA LA RECONSTRUCCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA COBERTURA DE NIEVE EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GRANDE, ARGENTINA

ROMINA SOLORZA ¹, CAROLINA AUMASSANNE ², ANA PAULA SALCEDO ³, SOFÍA TEVEROVSKY ¹

¹Gerencia de Observación de la Tierra, Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Centro Espacial Teófilo Tabanera, Ruta C45, km 8, Falda de Cañete (X5187XAC), Córdoba, Argentina. rsolorza@conae.gov.ar

²Agencia de Extensión Rural de INTA 25 de Mayo, La Pampa, Argentina.

³Subgerencia Centro Regional Andino, Instituto Nacional del Agua, Mendoza, Argentina.

RESUMEN

En la actualidad, la disponibilidad de sensores remotos ópticos, infrarrojos y de radar que trabajan a distintas frecuencias del espectro electromagnético, con distintas resoluciones espaciales y temporales, son una herramienta operativa para el monitoreo de las características de la nieve en cuencas de grandes extensiones. También, las plataformas de procesamiento de grandes volúmenes de datos, facilitan la extracción de información para estudiar las variaciones de estos parámetros. El objetivo de este trabajo es analizar espacial y temporalmente la cobertura de nieve de la cuenca alta del río Grande a partir de datos multifrecuencia de sensores ópticos y radar, reconstruyendo la cobertura de nieve para el período 2000 a 2021 y testeando nuevas metodologías con datos actuales. Se construyeron mapas de cobertura total de nieve en base a datos de los sensores MODIS, Landsat y Sentinel 2. También se definieron parámetros y metodologías para la creación de mapas de equivalente de agua en nieve con datos SAOCOM. Los resultados fueron comparados y validados con mediciones de estaciones nivométricas e hidrológicas y brindan información novedosa para entender de forma más completa la distribución y variabilidad de la cobertura nival en este sector de la cordillera. Los mismos pueden servir de base para múltiples aplicaciones incluyendo el modelado hidrológico de la cuenca del río Grande contribuyendo al manejo sostenible e integrado de los recursos hídricos.

1. INTRODUCCIÓN

La nieve acumulada durante el invierno en la alta cuenca del río Colorado constituye el principal suministro de agua para el consumo humano, la agricultura y la industria [1]. 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 [2]. En el marco de un convenio interinstitucional entre la CONAE, el INA y el INTA se están desarrollando metodologías para el monitoreo de las

condiciones de la nieve en la zona de aporte y su relación con la oferta de agua en la cuenca, para contribuir a un manejo integrado del agua. Tanto en el área bajo estudio, como en la mayoría de las cuencas de régimen nivo-glaciar de los Andes de Argentina, existen vacíos de información para el monitoreo de la nieve y para la predicción de la disponibilidad del agua, la cual está siendo cada vez más demandada por productores y administradores del agua. Tanto las condiciones extremas de la zona de la cordillera (clima, topografía, etc.), el tamaño de las cuencas y los elevados costos de las campañas, dificultan la

disponibilidad de datos de campo, principalmente de estaciones nivométricas. En la actualidad, la disponibilidad en aumento de datos de sensores remotos que operan en las distintas regiones del espectro electromagnético (ópticos y radar) permite generar una completa caracterización de la cubierta de nieve, aportando información para la gestión hídrica de las cuencas de montaña [3], [4], [5], [6], [7]. Entre ellos se destaca el potencial de la constelación de satélites argentinos SAOCOM 1 (Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina, CONAE), que operan con antenas SAR en la banda L de las microondas.

Esta investigación se enmarca en un convenio interinstitucional de cooperación técnica para responder a las demandas de los usuarios y gestores del agua en la cuenca del río Colorado. Desde la CONAE se ponen a disposición los datos satelitales, software y se asiste en metodologías avanzadas en la estimación de parámetros de la criósfera, desde el INTA se establecen los lineamientos principales de trabajo y se realiza el importante aporte de datos de estaciones in situ y el trabajo de campo, mientras que desde el INA se avanza en la modelación hidrológica para la predicción de caudal.

En este trabajo se presentan los avances del primer año del convenio, mientras se avanza en objetivos particulares como la reconstrucción de escenarios climáticos, el estudio de la demanda de agua para riego y el análisis de la relación oferta-demanda en toda la cuenca.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está ubicada en el sector más septentrional de la subcuenca del río Grande (Figura 1), que incluye las nacientes del A° Tordillo, y ha sido denominada *Valle Hermoso*, por su cercanía a la estación nivológica homónima. A su vez, a escasos 20 kilómetros aguas abajo del cierre 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 A° Cobre. La existencia de una estación nivológica con registro temporal extenso del parámetro Equivalente en Agua de Nieve (EAN) y 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. La subcuenca 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 cuenca, la altura está sobre los 4000 m.s.n.m. mientras que en la parte inferior, a la altura de la desembocadura del cauce principal, la altura promedio es de alrededor de 2200 m.s.n.m.

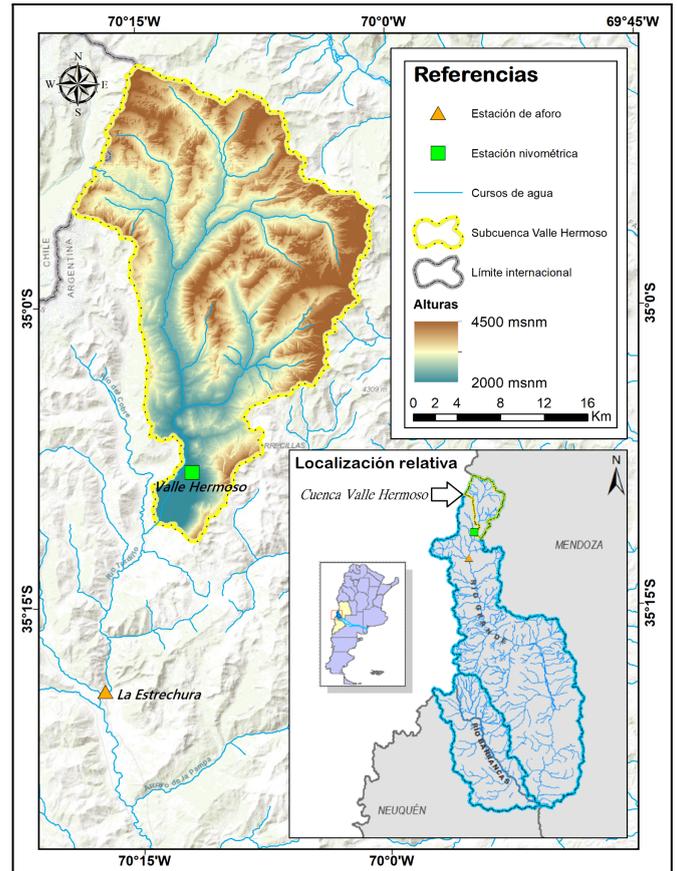


Figura 1: Localización de la subcuenca Valle Hermoso, cuenca alta del río Grande.

3. DATOS SATELITALES INTEGRADOS

La “constelación virtual” de datos multifrecuencia utilizados para este trabajo, cuyas características se resumen en la Figura 2, permitió estudiar los parámetros de la nieve a distintas escalas espaciales y teniendo en cuenta distintos períodos de análisis. También, con el objetivo de evidenciar cambios significativos interanuales en la caída de nieve y posterior disponibilidad de agua, se conformó un archivo histórico de datos satelitales. Específicamente, se utilizaron: **1)** el producto satelital MOD10A2 de 500 metros de

resolución espacial, con periodicidad cada 8 días, durante los 22 años de análisis (<https://nsidc.org/data/mod10a2>), **2)** imágenes Landsat 5 TM, 8 OLI, 9 OLI-2 (30 m) y Sentinel 2A y 2B (20 m), construyendo algoritmos de estimación en Google Earth Engine (GEE) para obtener la serie histórica. En todos los casos, y adecuando el uso radiométrico de las bandas de cada sensor, la variable principal obtenida fue el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI), obteniendo la superficie cubierta de nieve en Km². **3)** También se utilizaron datos SAR Sentinel 1A y 1B (banda C, frecuencia de 5.4 GHz, 5.54 cm de longitud de onda) para la obtención de la nieve de fusión. Se utilizó el modo de adquisición TopSAR Interferometric Wide Swath (IW) que realiza adquisiciones sobre Argentina cada 12 días, y se adquieren desde el año 2014 a la actualidad. Se utilizó el nivel de procesamiento Ground Range Detected (L-1 GRD). **4)** Además 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), para reconstruir el EAN. Se utilizó el modo de adquisición StripMap y el nivel de procesamiento L1A. Se cuenta con datos desde Octubre de 2018 a la actualidad.

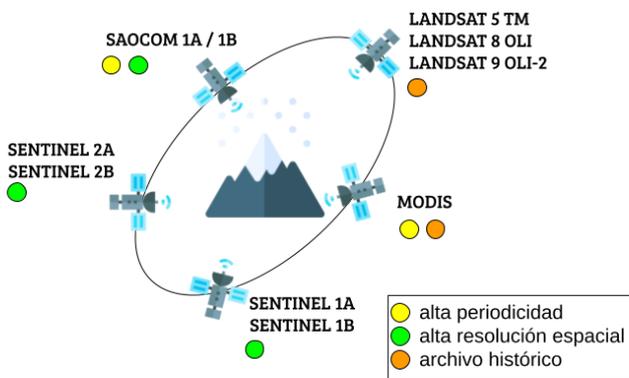


Figura 2: Datos utilizados a modo de constelación virtual para el estudio de parámetros de la criósfera en la subcuenca Valle Hermoso, río Colorado, Argentina.

Las características de resolución espacial, temporal y radiométrica de todos los datos satelitales utilizados en este trabajo, el período bajo análisis y las escenas totales disponibles de cada sensor se resumen en la Tabla 1.

TABLA 1: Características de las fuentes de datos satelitales utilizadas, período de análisis y escenas disponibles de cada sistema sensor.

Fuente de datos	Período analizado	Escenas disponibles	Resolución		
			Espacial	Temporal	Radiométrica
MODIS	2000/2021	1015	500 m	8 días	36 bandas en el visible e infrarrojos
LANDSAT 5 TM	2000/2011	148	30 m	16 días	7 bandas en el visible e infrarrojos
LANDSAT 8 OLI	2013/2021	200	30 m	16 días	11 bandas en el visible e infrarrojos
LANDSAT 9 OLI-2	2022/2023	14	30 m	16 días	11 bandas en el visible e infrarrojos
SENTINEL 1	2014/2021	124	10 m	12 días	Dual-Pol microondas Banda C
SENTINEL 2A y 2B	2016/2022	367	10 m	10 cada satélite, 5 la constelación	13 bandas en el visible e infrarrojo
SAOCOM	2022	37	10 m	16 cada satélite, 8 la constelación	Full-Pol microondas Banda L

En cuanto a datos de campo, se utilizaron los registros de EAN de la estación Valle Hermoso y de caudal de la estación de aforo La Estrechura (Figura 1). Los datos fueron cedidos por el Sistema de Información Hidronivometeorológico del Departamento General de Irrigación de Mendoza y por el Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Nación (<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/>).

4. METODOLOGÍA

Se calculó la superficie total cubierta de nieve a través del NDSI (Normalized Difference Snow Index) para todas las fechas, considerando la presencia de nieve a partir del umbral 0.4 [8]. Luego, se binarizaron los datos a partir de este umbral, y se calculó 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 .csv para realizar el análisis en detalle de toda la serie. Mediante el método de detección de cambios en base a imágenes SAR [9][10] se calculó la superficie con nieve húmeda. Este método se basa en el cambio que presenta el coeficiente de retrodispersión (magnitud biofísica principal de la amplitud en las imágenes de radar) a lo largo de las estaciones [11][12][13]. En particular, se toma

en cuenta la marcada disminución del coeficiente de retrodispersión cuando la nieve contiene agua líquida en su interior (temporada de fusión) y mediante un umbral se detecta la superficie de nieve próxima a fusionarse.

También, mediante el uso de imágenes SAR, utilizando la información de fase, se exploró la potencialidad de las técnicas interferométricas para estimar y estudiar la variación estacional del EAN, que se refiere a la cantidad de agua líquida que se obtendría si se fusiona el paquete de nieve. Esta es una técnica actualmente en desarrollo [14] y en este trabajo se muestra un primer resultado de aplicación en la cuenca piloto.

5. RESULTADOS

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 bajo análisis (Figura 3), entre 181 y 276 escenas respecto a 53 escenas en promedio desde 2000 a 2017. Cabe destacar la continuidad temporal de MODIS y alta disponibilidad de escenas de Sentinel, particularmente Sentinel 1, con 130 escenas por año en promedio.

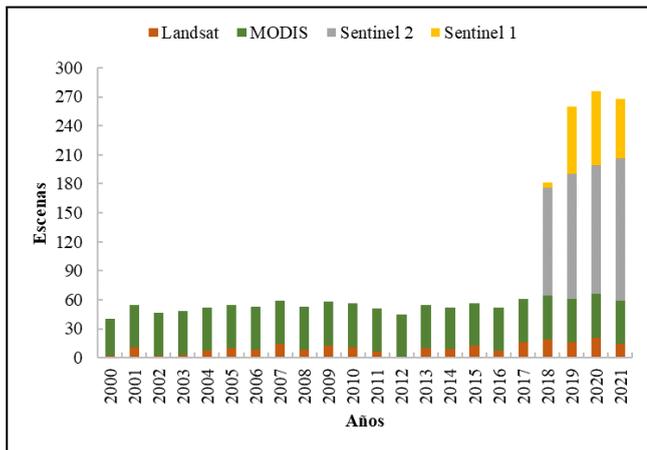


Figura 3. Disponibilidad total de escenas de Landsat 5 y 8, MODIS, Sentinel 1 y 2 por año para el período 2000-2021.

En Figura 4 puede observarse la reconstrucción histórica de la cobertura de nieve total estimada a partir de las escenas de Landsat y MODIS 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, observándose una buena relación entre la cobertura de nieve total (CNT) Y EAN en los meses de septiembre y octubre.

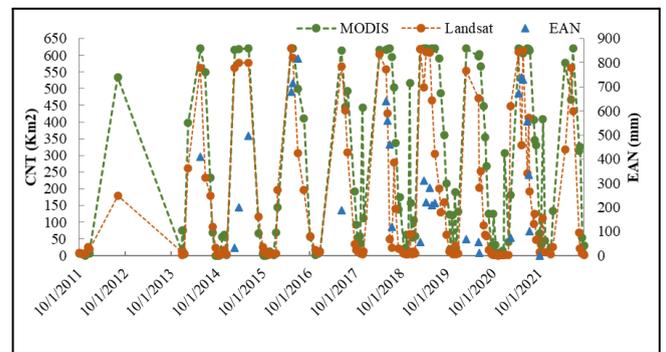
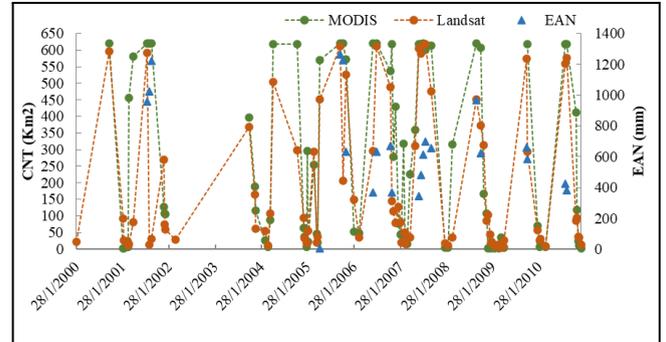


Figura 4: Relación de la cobertura de nieve total estimada (CNT) con EAN estación Valle Hermoso. Arriba, período 2000-2010; Abajo, período 2011-2021. Las fechas corresponden a las escenas disponibles de Landsat para el área de estudio.

En la figura 5 se muestra, a la izquierda, un mapa donde se indican los menores valores de retrodispersión en cada píxel para cada fecha, y a la derecha, las alturas estimadas con el DEM. Los valores mínimos de retrodispersión indican el inicio de la fusión de la nieve para las fechas seleccionadas (temporada de fusión/primavera). En estos mapas se observa que la fusión comienza en las zonas más bajas de la cuenca (color celeste en el mapa de la izquierda y color verde en el mapa de la derecha) y a medida que avanza la primavera la fusión se da en las zonas más altas de la cuenca.

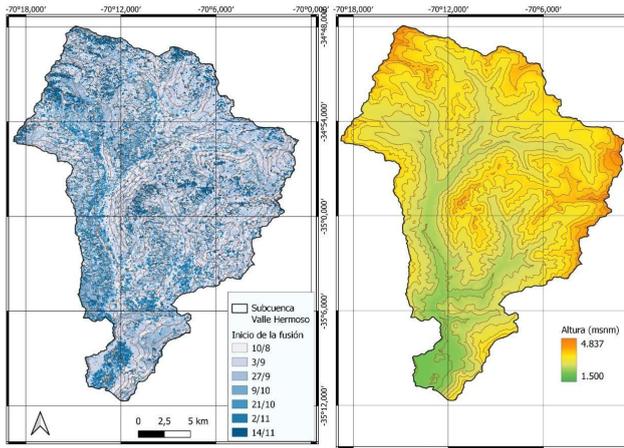


Figura 5: Izq: valores mínimos de retrodispersión por fecha. Der: Franjas altitudinales obtenidas con un DEM.

Respecto a la estimación de la variación del EAN con técnicas de Interferometría Diferencial (DInSAR), se muestra en la Figura 6, un ejemplo de aplicación de este método con datos SAOCOM sobre la cuenca piloto Valle Hermoso. Este mapa muestra, pixel a pixel, la variación del EAN entre las dos fechas del par interferométrico construido, considerando el 25 junio y el 3 de julio de 2022. La variación del EAN registrada para esas fechas en la estación Valle Hermoso fue de 41 mm y el valor de la variación del EAN en el pixel de la estación, estimado con la técnica DInSAR fue de 35 mm. Cabe destacar que aún es necesaria la integración de nuevos puntos de validación para toda el área. Asimismo, la construcción de nuevos pares con alta coherencia interferométrica, se ve limitada por la caída de nevadas. Cuando hay cambios entre dos fechas en el blanco observado, como la caída de nieve, se produce lo que se conoce como factor de decorrelación temporal, que redundo en una pérdida de la calidad de la fase, y por lo tanto de la fiabilidad del producto final. Este factor también conlleva a una pérdida de información en algunos píxeles, como se observa en algunos sectores del área. En la actualidad, se continúa avanzando en la mejora de la estimación del EAN obtenido a partir de datos SAOCOM, debido al potencial que tiene la banda L para minimizar los factores de decorrelación, y para poder contar finalmente con un producto de mayor representatividad espacial de este parámetro de la criósfera.

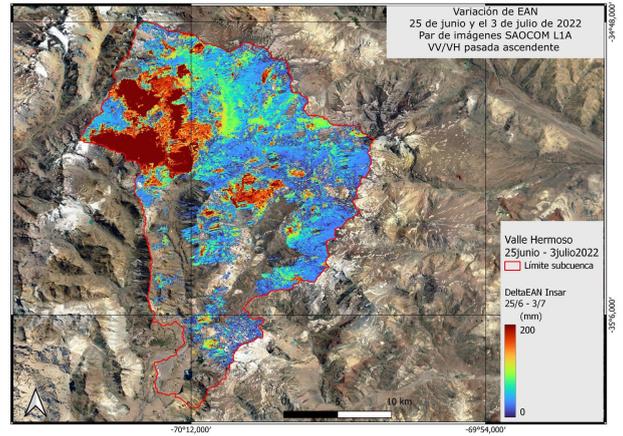


Figura 6: Variación de EAN obtenida mediante técnicas DinSAR y datos SAOCOM.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta los primeros resultados obtenidos luego de la implementación de un sistema integrado de información satelital para conocer la dinámica de la nieve en la alta cuenca del río Colorado. Contar con datos multifrecuencia representa una oportunidad única para el monitoreo de parámetros de la criósfera, sumado a las implicancias y aportes que este monitoreo conlleva para la gestión de cuencas hídricas de alta montaña. Por otra parte, la información satelital con mayor resolución espacial permite comprender con mayor detalle la variabilidad anual e interanual de la cobertura de nieve, además de ser una importante fuente de datos de entrada para modelos hidrológicos distribuidos, en áreas de grandes extensiones con escasa información de campo.

A su vez, la disponibilidad, en aumento, de datos de sensores remotos, en especial los datos SAOCOM, incentiva la búsqueda de nuevas metodologías para estudio de la cubierta de nieve y su relación con la hidrología de montaña. En el marco de la continuidad del convenio INA-INTA-CONAE se continúa trabajando en los siguientes objetivos: avanzar con esta misma metodología en toda la cuenca alta del río Colorado, conocer las relaciones entre cobertura de nieve y morfometría, y la relación entre la cobertura de nieve y la temperatura de superficie. Este análisis integral permitirá comprender con mayor detalle la dinámica hidrológica de la cuenca, y generar datos de entrada para los modelos hidrológicos.

REFERENCIAS

- [1] AUMASSANNE, C. M., BEGET, M. E., ORICCHIO, P., DI BELLA, C. M., GASPARI, F. J., BABINEC, F. J. 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).
- [2] 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
- [3] 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.
- [4] COGLIATI, MARISA & FINESSI, FLORENCIA. 2016. **Utilización de productos Terra-Modis para el cálculo de la superficie nival en la Cordillera del Viento (Neuquén, Argentina).** Conference: E-ICES 10, Buenos Aires, Argentina.
- [5] MUHAMMAD, SHER & THAPA, AMRIT. 2020. **An improved Terra-Aqua MODIS snow cover and Glacier Inventory 6.0 combined product (MOYDGL06*) for high-mountain Asia between 2002 and 2018.** *Earth System Science Data*. 12. 345-356.
- [6] NOTARNICOLA C., DUGUAY M., MOELG N., SCHELLENBERGER T., TETZLAFF A., MONSORNO R., COSTA A., STEURER C. & ZEBISCH M. 2013. **Snow cover maps from MODIS images at 250 m resolution, Part 2: Validation.** *Remote Sensing* 5: 1568 – 1587.
- [7] NADIR ARSLAN, A., KOSKINEN, J., PRAKS, J., ALASALMI, H., KRUIOPIS, N., & 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.
- [8] SALOMON, V., APPEL, I. (2004). **Estimating fractional snow cover from MODIS using the Normalized Difference Snow Index.** *Remote Sensing of Environment* 89: 351–360.
- [9] NAGLER, T., ROTT, H. (2000). **Retrieval of wet snow by means of multitemporal sar data.** *IEEE Transactions on Geoscience and RemoteSensing*, Vol.38, 754-765.
- [10] NAGLER, T., ROTT, H. (2004). **Snow classification algorithm for envisat asar.** Proc. of the 2004 Envisat & ERS Symposium, Salzburg, Austria 6-10 September 2004 (ESA SP-572).
- [11] SALCEDO, A.P., AUMASSANNE, C., 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.
- [12] TEVEROVSKY, S., PASCUAL, I., NOTARNICOLA, C., SALMUNI, G. (2018). **Estimation of wet snow cover area with SAR imagery in the basin of Tupungato River,** *IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 1– 6.
- [13] 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.
- [14] TEVEROVSKY, S., SOLORZA, R., SOLDANO, A., NOTARNICOLA, C. (2022). **Estimación del Equivalente en Agua de Nieve en base a técnicas de Interferometría Diferencial y datos de la constelación SAOCOM.** In 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON) (pp. 1-7). IEEE.