

3.2

Incorporación del Sar Saocom para el monitoreo operativo del hielo marino y témpanos

Por Constanza Sofía Salvó, Ludmila Gómez Saez, Alvaro Scardilli, Héctor Salgado. Departamento de Meteorología del Servicio de Hidrografía Naval.

Resumen

El monitoreo del hielo marino y los témpanos en la Antártida es de relevancia para temáticas climáticas y de logística en las campañas antárticas de verano. La eficiente y segura navegación de los buques que abastecen las bases antárticas y trasladan el personal requieren de información actualizada de las condiciones glaciológicas. Los radares de apertura sintética son, por excelencia, los instrumentos utilizados para el seguimiento del hielo marino y los témpanos. Entre ellos, el SAOCOM es un satélite argentino recientemente puesto en órbita en el año 2018. En este trabajo se presenta el avance en la incorporación del SAOCOM en las tareas operativas y de investigación llevadas a cabo en el Servicio de Hidrografía Naval.

PALABRAS CLAVE: Sensores remotos, radar de apertura sintética, SAOCOM, Antártida.

FECHA: 01/09/2021

TIPO DE TRABAJO: Artículos referidos a innovaciones tecnológicas

EJE TEMÁTICO: Sensores remotos y detectores

Introducción al trabajo

El Servicio de Hidrografía Naval (SHN) ha asesorado en temas de glaciología marina y de apoyo a las operaciones logísticas y de búsqueda y rescate en aguas polares y subpolares como parte de sus tareas definidas en la Ley Hidrográfica (Ley N° 19.922). Dichas tareas se hicieron aún más

necesarias con la llegada y puesta en operación del ROMPEHIELOS A.R.A. "ALMIRANTE IRIZAR" en el año 1978. Para la ejecución de los asesamientos glaciológicos fue necesario el uso de la información satelital en la observación de los hielos flotantes, hielo marino y témpanos, determinantes en la toma de decisiones para las tareas logísticas antárticas. Desde ese entonces, el Departamento de Meteorología ha desarrollado e investigado el uso de los sensores remotos para tal fin, siendo de relevancia los radares de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) dada su operatividad aún bajo condiciones de nubosidad y ausencia de luz solar típicas del Continente Antártico. Para el cumplimiento de las tareas operativas ha sido necesaria la generación de líneas de investigación novedosas y aplicadas a las necesidades que con tiempo fueron surgiendo (Mehl & Salgado, 1995; Salgado et al., 1995; Salgado 1998, 2001; Carballo et al., 2015; Salgado et al., 2017; Salvó et al., 2018; Scardilli et al., 2018). En la actualidad, con el lanzamiento del satélite argentino SAOCOM por parte de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), se cuenta por primera vez con imágenes de un organismo nacional para llevar a cabo las tareas de monitoreo glaciológico. Este trabajo expone la incorporación y alcances obtenidos con las imágenes del SAR SAOCOM en las tareas operativas y de investigación y desarrollo del SHN.

Desarrollo del trabajo

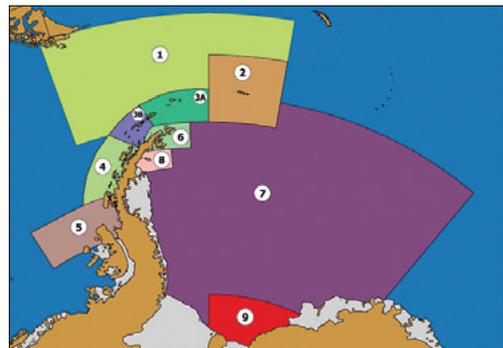
El Servicio de Hidrografía Naval (SHN) realiza tareas operativas y de investigación para brindar servicio de seguridad náutica en aguas polares de la Antártida, una de las áreas de responsabilidad nacional dentro de la NAVAREA VI. Las tareas operativas constan del monitoreo diario del hielo marino y témpanos para la generación de productos de las Cartas de Hielo, la Carta de Borde de Hielo Marino y la Carta de Témpanos, las cuales se hallan a disposición en la web <http://www.hidro.gov.ar/> (Scardilli et al., 2018). A su vez, también se provee información de las observaciones glaciológicas de las bases antárticas junto con la publicación semanal de un parte glaciológico.

Para llevar a cabo estas tareas los sensores remotos son las herramientas principales empleadas, desde satélites ópticos, como el sensor MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) en los satélites Aqua y Terra, hasta sensores activos, como los radares de apertura sintética (SAR). Los sensores que por excelencia se destinan al monitoreo del hielo flotante son los SAR y en el SHN los que frecuentemente se utilizan son el Sentinel-1 (banda C, 5.405 GHz), el SAOCOM (banda L, 1.275 GHz) y en menor medida el COSMO-SkyMed (banda X, 9.6 GHz). El SAR SAOCOM, lanzado el 7 de octubre 2018 (SAOCOM 1A) y el 30 de agosto 2020 (SAOCOM 1B) por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), se utiliza en el SHN desde el año 2019.

Las tareas diarias de los analistas de hielo del SHN consisten en la descarga y procesamiento de las imágenes satelitales y su posterior digitalización en ambientes SIG para la generación de los productos glaciológicos mencionados. Entre ellos, las Cartas de Hielo sintetizan las condiciones generales de concentración y tipo de hielo marino y presencia de témpanos de 10 zonas de análisis dentro de la NAVAREA VI (Figura 1).

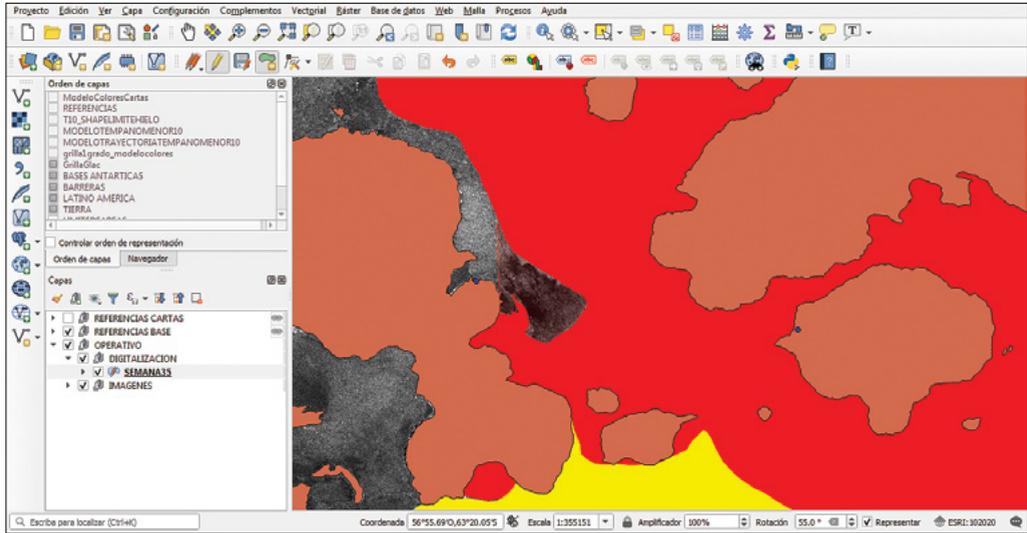
La digitalización de la información se basa en la interpretación de las imágenes actualizadas de diversas resoluciones espaciales y observaciones in situ recibidas en tiempo real

FIGURA 1: ZONAS DE LAS CARTAS DE HIELO DEL SERVICIO DE HIDROGRAFÍA NAVAL



desde las bases y buques antárticos. A partir de la interpretación visual los analistas de hielo del SHN, utilizando el software libre QGIS, crean los polígonos de concentración de hielo marino generando semanalmente la respectiva Carta de Hielo (Figura 2 y 3).

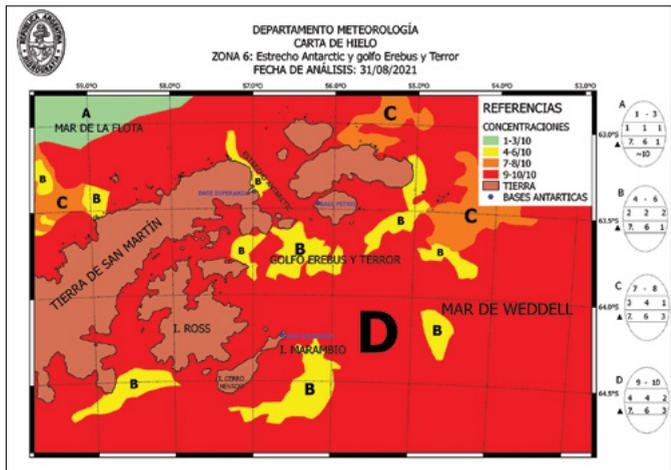
FIGURA 2: EMPLEO DEL SOFTWARE QGIS PARA GENERACIÓN DE CARTAS DE HIELO. DIGITALIZACIÓN DE CONCENTRACIONES EN EL ESTRECHO ANTÁRTICO SOBRE IMAGEN SENTINEL-1 DEL DÍA 31 DE AGOSTO DE 2021.



Según el código de colores, se diferencian las concentraciones y a cada polígono se le asigna una letra para referenciar el “Código Oval” (Egg Code, su denominación en inglés), esta descripción refiere a la simbología del hielo marino por estándares internacionales (WMO, 2004). A modo de ejemplo en la Figura 3 se presenta la carta del día 31 de agosto del 2021 para la zona 6 correspondiente al estrecho Antártico y Golfo de Erebus y Terror. En el “Código Oval”, el polígono A muestra en la parte superior la concentración total de hielo marino (1-3/10), en el siguiente la partición de las concentraciones parciales (1 1 1), según los estados de desarrollo o espesores (7. 6 1), y en la última división se informa la forma del hielo (sólo en caso de que sean visualizadas), como, por ejemplo, cintas o fajas de hielo (<10). A su vez, el triángulo negro a la izquierda del “Código Oval” indica la presencia de témpanos en el área del polígono correspondiente.

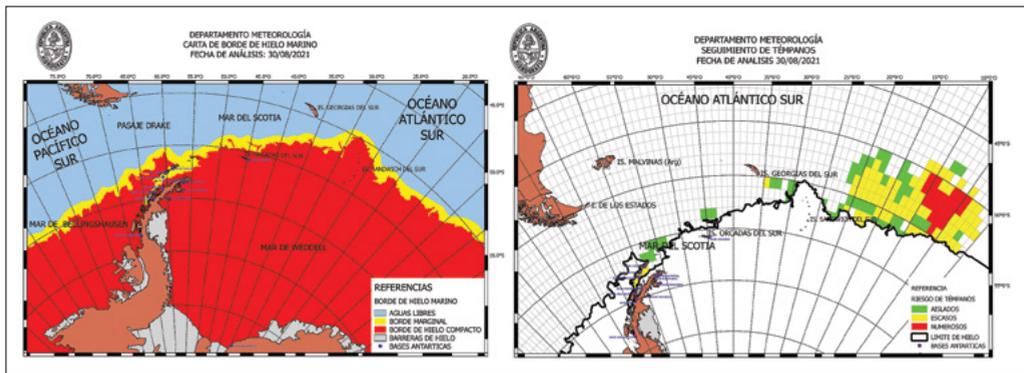
Bisemanalmente se generan la Carta de Borde de Hielo Marino y la Carta de Témpanos (Figura

FIGURA 3: CARTA DE HIELO DE LA ZONA 6 DEL 31 DE AGOSTO DE 2021.



ra 4). La Carta de Borde de Hielo Marino establece los límites generales del campo de hielo compacto y del borde marginal, lo que permite a los navegantes conocer cuáles son las zonas navegables libres de hielo marino y seguras de las que no. La Carta de Témpanos visualiza la posición de témpanos con una extensión mayor a 10 millas náuticas, los cuales son clasificados por una letra y número establecido por el U. S. National Ice Center (US NIC); los témpanos menores a las 10 millas náuticas y que pueden ser observados a través de las imágenes satelitales para su seguimiento; y por último las áreas con riesgo de témpanos según la densidad de estos elementos que se observan en cada sector de 1° de longitud por 1° de latitud. El riesgo en estas áreas se clasifica según la cantidad de témpanos con el nombre de "Aislados" si presenta 1 témpano, "Escasos" si se encuentran de 2 a 6 témpanos, o "Numerosos" si el número es igual o superior a 7 témpanos. Los témpanos dentro del campo de hielo compacto no son mostrados en este tipo de cartas.

FIGURA 4: CARTA DE BORDE DE HIELO MARINO (IZQUIERDA) Y CARTA DE TÉMPANOS (DERECHA) DEL 30 DE AGOSTO DE 2021.



En la actualidad, el SAOCOM ya se encuentra operativamente en uso por el SHN siendo las imágenes al sur de 60°S descargadas y procesadas para el reconocimiento del hielo flotante por parte de los analistas de hielo y generación de todos los productos de cartografía glaciológica mencionados. El SAOCOM también ya ha sido utilizado operativamente en el asesoramiento de los buques de la Armada Argentina en la Campaña Antártica de Verano 2020-2021.

Sin embargo, el uso de los SAR requiere de constante investigación, desarrollo y capacitación de personal para su operativa aplicación. Es por ello que en el SHN se llevan a cabo líneas de investigación para el aprovechamiento de estos recursos. Recientemente, se ha realizado un estudio comparativo entre distintas frecuencias de los SAR. El objetivo de este proyecto fue comparar las ventajas y desventajas del uso de cada uno de los satélites de manera de generar conocimiento para la eficiencia en el monitoreo de los hielos flotantes (témpanos y hielo marino).

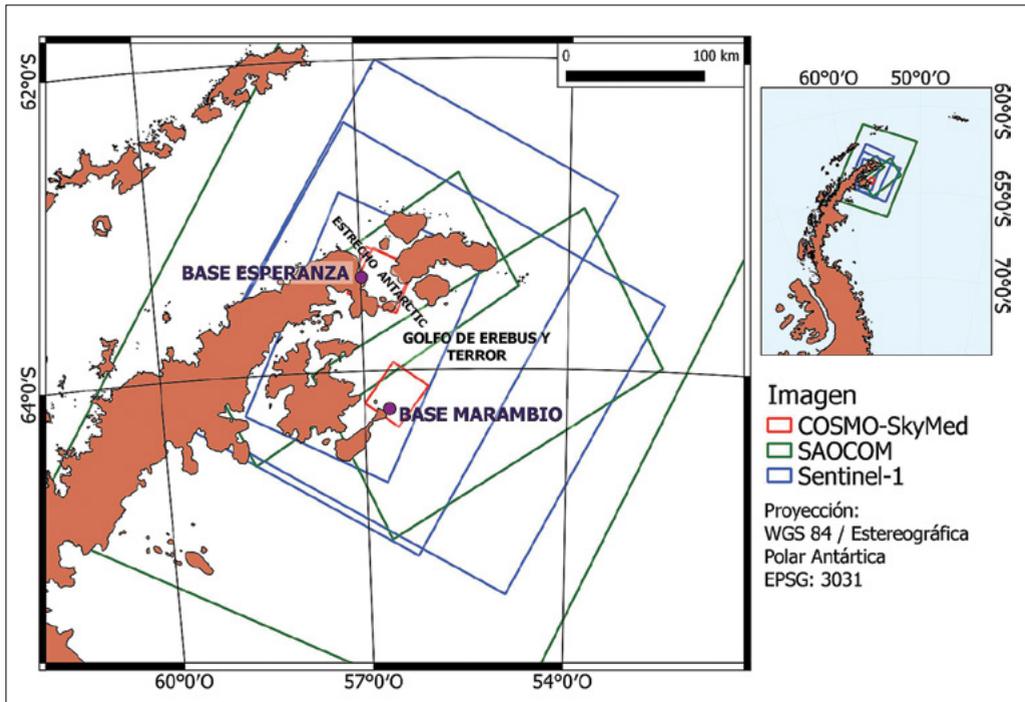
Se trabajó con tres grupos de imágenes SAR provenientes de COSMO-SkyMed, Sentinel-1 y SAOCOM donde estas presentaron una diferencia temporal de adquisición menor a 32 horas (Tabla 1). Estas imágenes fueron procesadas (calibración, multilooking, corrección geométrica y transformación de coeficiente de backscatter a decibels según lo descrito en Filippini 2019) y posteriormente analizadas en conjunto de manera de reconocer el hielo marino y los témpanos en el mismo grupo de imágenes. La polarización utilizada fue HH y HV frente a la cantidad de imágenes adquiridas en Dual Pol, y la combinación RGB empleada para su representación fue de HH-HV-HH. El área de estudio del proyecto fue en los alrededores del golfo de Erebus y Terror y el estrecho Antártico, zonas aledañas a las bases antárticas Marambio y Esperanza

respectivamente (Figura 5). Esta región fue seleccionada por la diversidad de tipos de hielo presentes. Todas las condiciones ambientales se contrastaron con datos meteorológicos de las bases antárticas Marambio y Esperanza.

TABLA 1: IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA UTILIZADAS EN EL PROYECTO DE INTERCOMPARACIÓN SAR.

| Satélite | Fecha | Hora UTC | Modo | Órbita | Resolución [m] | Polarización | Ángulo de incidencia [°] |
|--------------|------------|----------|-----------|-------------|----------------|--------------|--------------------------|
| Sentinel-1 | 2020/05/10 | 07:51 | EW | Descendente | 50.0 | Dual Pol | 45-30 |
| SAOCOM | 2020/05/10 | 11:09 | TOPSAR W | Ascendente | 100.0 | Quad Pol | 17-35 |
| COSMO-SkyMed | 2020/05/11 | 19:10 | Ping-Pong | Descendente | 33.3 | Dual Pol | 56-58 |
| Sentinel-1 | 2020/05/13 | 08:16 | EW | Descendente | 50.0 | Dual Pol | 17-27 |
| SAOCOM | 2020/05/13 | 19:55 | TOPSAR W | Descendente | 50.0 | Dual Pol | 24-48 |
| COSMO-SkyMed | 2020/05/13 | 20:09 | Ping-Pong | Descendente | 33.3 | Dual Pol | 18-22 |
| SAOCOM | 2020/05/21 | 11:16 | TOPSAR W | Ascendente | 50.0 | Quad Pol | 17-35 |
| COSMO-SkyMed | 2020/05/21 | 19:45 | Ping-Pong | Descendente | 25.5 | Dual Pol | 39-41 |
| Sentinel-1 | 2020/05/22 | 07:51 | EW | Descendente | 100.0 | Dual Pol | 33-45 |

FIGURA 5: ÁREA DE ESTUDIO Y ÁREA DE COBERTURA DE LAS IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA UTILIZADAS EN EL PROYECTO DE INTERCOMPARACIÓN SAR.



Los resultados de la intercomparación cualitativa mostraron que la banda L proveniente del SAOCOM presentó un mejor reconocimiento de los témpanos de dimensiones menores a 100 metros, principalmente en campos de hielo fijo del primer año y joven, formación de hielo que se corresponde a estadios iniciales e intermedios de desarrollo con espesores que pueden ir

de los 10 centímetros hasta los 2 metros (Figura 6). Puede observarse cómo los témpanos en la imagen SAOCOM se distinguen con coloraciones verdes lo que representa una mayor respuesta en la polarización HV. Este resultado incluso se observó con resoluciones espaciales menores de SAOCOM respecto de otros sensores, revelando una ventaja operativa para el uso de imágenes de mayor extensión como las TOPSAR Wide (Figura 7).

FIGURA 6: TÉMPANOS MENORES A 100 M AL NORTE DE ISLA MARAMBIO. COMBINACIÓN RGB: HH-HV-HH.

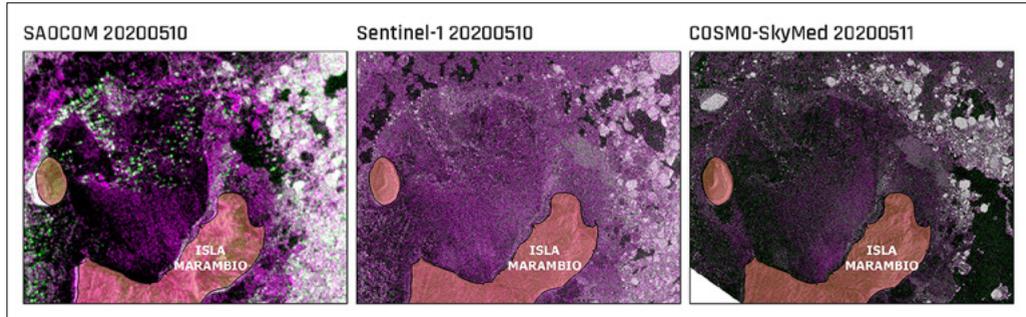
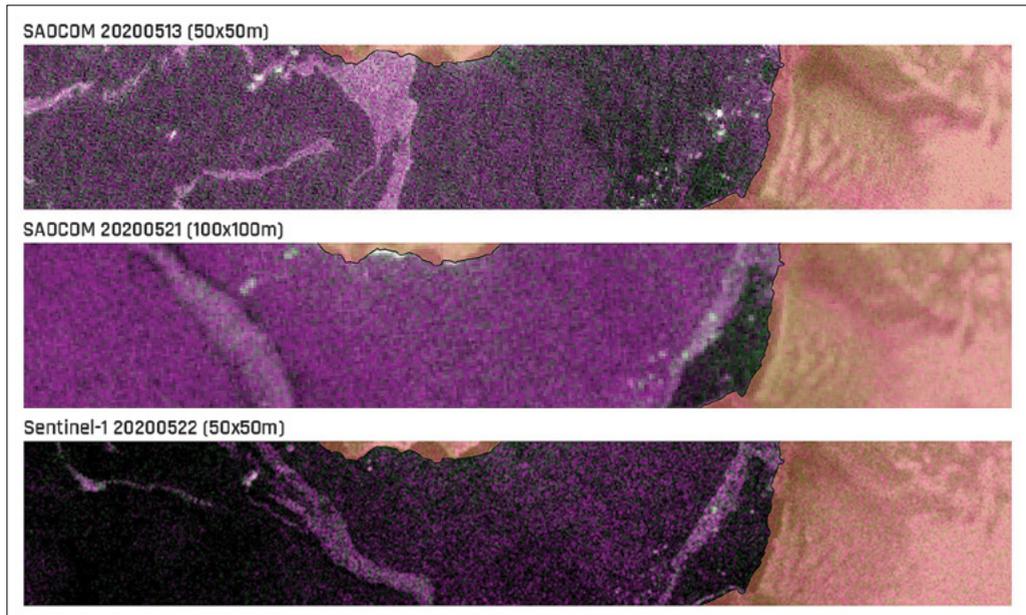
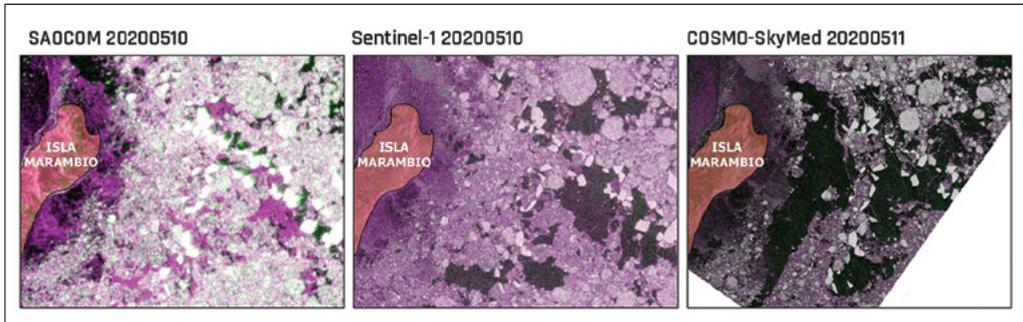


FIGURA 7: TÉMPANOS EN IMÁGENES SAOCOM DE DIFERENTE E IGUAL RESOLUCIÓN A SENTINEL-1. COMBINACIÓN RGB: HH-HV-HH.



Los témpanos de grandes dimensiones, como los tabulares de extensión superior a 300 metros, presentaron valores de retrodispersión mayores que Sentinel-1 y COSMO-SkyMed (Figura 8). La elevada respuesta en la polarización HV de SAOCOM, representada con coloraciones verdes, en conjunto con la polarización HH, que saturan la respuesta de los témpanos con coloraciones blancas intensas, permitieron su distinción dentro del campo de hielo con mejor reconocimiento visual respecto de los demás sensores.

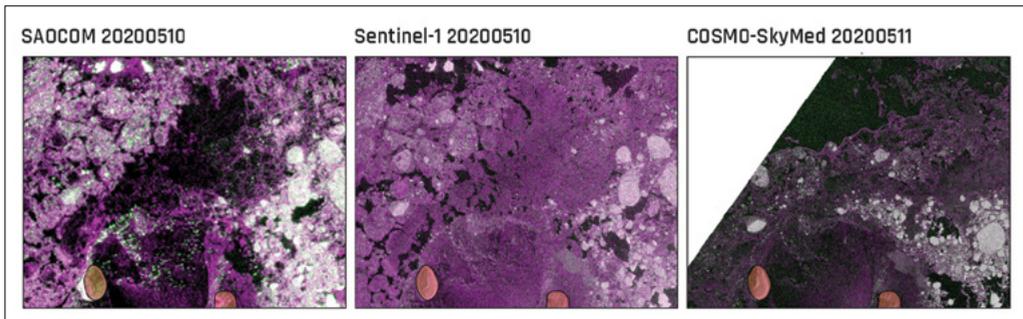
FIGURA 8: TÉMPANOS TABULARES AL ESTE DE ISLA MARAMBIO EN IMÁGENES SAOCOM, SENTINEL-1 Y COSMO-SKYMED. COMBINACIÓN RGB: HH-HV-HH.



Se esperaba que la combinación de la banda L con la banda X o C podría mejorar la detección de témpanos debido a la mayor penetración de las ondas de radar en banda L (Falkingham, 2014). No se han realizado demasiadas investigaciones en el uso operativo de banda L para la detección de témpanos. Sin embargo, los resultados cualitativos aquí obtenidos fueron concluyentes con estudios previos donde la banda L presentó mayor facilidad en la detección de témpanos de diferentes escalas espaciales en comparación a la banda C o X para diferentes resoluciones espaciales y áreas de estudio (IICWG, 2019).

En cuanto al hielo marino, la retrodispersión de las imágenes de la banda C y la X fueron similares mientras que la banda L aportó las diferencias visuales detectables. El SAOCOM mostró gran sensibilidad al hielo joven y del primer año (Figura 9). La mayor sensibilidad del SAOCOM se corresponde con la mayor penetración de la banda L sobre la nieve. Estas diferencias resaltan características intrínsecas al objeto cuyo análisis debe ser estudiado según su aplicación. Para estudios de propiedades fisicoquímicas de cada tipo de hielo, este detalle puede ser de utilidad al ser acompañados con datos in-situ.

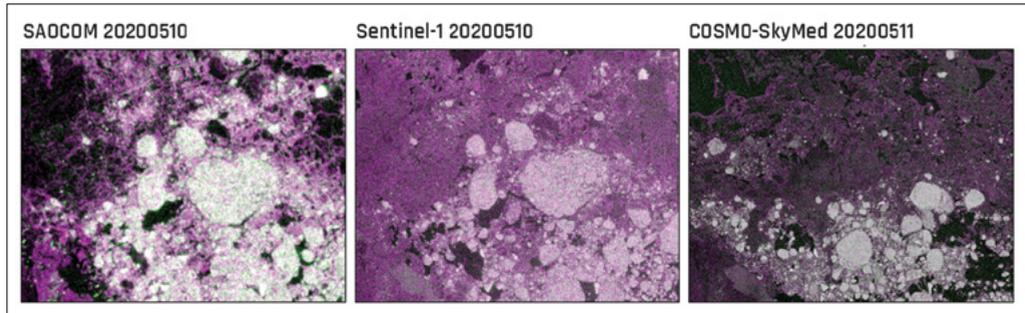
FIGURA 9: HIELO JOVEN Y DEL PRIMER AÑO CON ALGO DE HIELO VIEJO EN LAS IMÁGENES SAOCOM, SENTINEL-1 Y COSMO-SKYMED. COMBINACIÓN RGB: HH-HV-HH.



Para fines operativos, el exceso de detalle ofrecido por la banda L puede, por un lado, favorecer el reconocimiento de distintos tipos de hielo para su posterior digitalización y, por otro lado, puede desfavorecer a una rápida inspección de las imágenes por parte del analista de hielo para su uso en situaciones de urgencia. Esto último se debe ya que la mayor sensibilidad en la

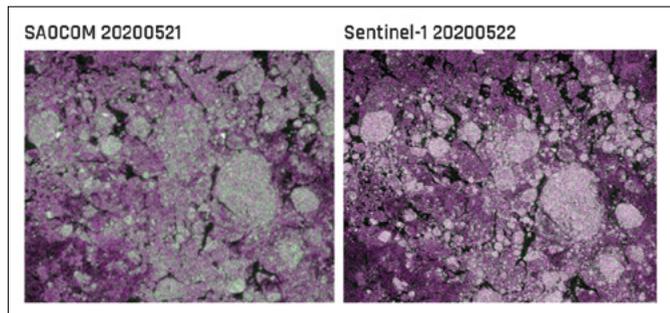
detección por la banda L mostrará una condición compleja para el ojo humano y en ese caso la banda C y X, al homogeneizar la respuesta del hielo, serían de mayor utilidad. Como puede observarse en la Figura 10, Sentinel-1 y COSMO-SkyMed permiten distinguir homogéneamente un campo de hielo viejo, mayor a 2 metros, y otro de menor espesor correspondiente al primer año y joven, mientras que SAOCOM detecta diferentes características de la superficie brindando más información.

FIGURA 10: HIELO JOVEN, DEL PRIMER AÑO Y VIEJO EN LAS IMÁGENES SAOCOM, SENTINEL-1 Y COSMO-SKYMED. COMBINACIÓN RGB: HH-HV-HH.



En el campo de hielo marino con mayores espesores (mayor a 2 metros), se observó que las bandas X y C permiten una mejor distinción de los límites y bordes de las bandejas de hielo en comparación con la respuesta de la banda L (Figura 10 y 11). Este resultado podría deberse a las diferencias en las resoluciones espaciales y no tratarse de una característica intrínseca de la respuesta de cada banda.

FIGURA 11: BANDEJAS DE HIELO VIEJO EN IMÁGENES SAOCOM Y SENTINEL-1 COMBINACIÓN RGB: HH-HV-HH.

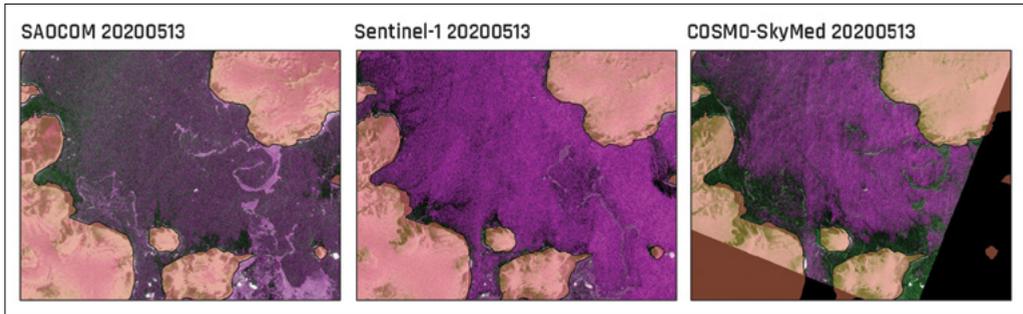


Estos últimos resultados demuestran que la información brindada por la banda C y X resulta complementaria a la información obtenida de la banda L. El uso de imágenes SAR en distintas bandas beneficia las tareas operativas de cartografía de hielo (Dierking, 2010).

En algunas situaciones la respuesta obtenida en las diferentes bandas presentó complejidad para su análisis e inferencia de resultados. En la Figura 12 se muestra un caso particular con cintas de hielo marino de escombros y tortas rodeadas de agua. La distinción entre hielo y agua se observa con mayor claridad en banda L, sin embargo, esto puede deberse a la alta respuesta del agua debido a su rugosidad superficial en banda C y X, que puede ser la misma explicada a condiciones ambientales diferentes. Esto muestra la necesidad de un mayor análisis e investigación comparando las distintas imágenes en diversidad de escenarios para obtener resultados certeros.

Finalmente se concluye que el SAOCOM ha mostrado una mejora en los productos del SHN y los estudios llevados a cabo muestran resultados positivos para su uso y aplicación en el monitoreo del hielo marino y los témpanos. Los resultados en el uso del SAOCOM para los ase-

FIGURA 12: CINTAS DE HIELO EN LAS IMÁGENES SAOCOM, SENTINEL-1 Y COSMO-SKYMED. COMBINACIÓN RGB: HH-HV-HH.



soramientos glaciológicos en la Campaña Antártica de verano 2020-2021 fueron ampliamente exitosos, esto contribuyó a un mayor recurso y disponibilidad de información satelital, la cual es relevante frente a las condiciones ambientales cambiantes del continente Antártico. Para el SHN este hito es un logro de amplio reconocimiento, ya que es la primera vez que los productos glaciológicos cuentan con datos de imágenes satelitales nacionales para la generación de información. Serán necesarias posteriores investigaciones y continuidad en su aplicación para el desarrollo de nuevas mejoras tecnológicas.

Referencias

- > Carballo, F., Masuelli, S., Salgado, H., Labanda M. & Barreira, S. (2015). *Sea Ice Extension and Concentration from SAC-D MWR Data*. 10th Aquarius/SAC-D Science Meeting 2015, 17-19 November 2015, Buenos Aires.
- > Dierking, W. (2010). *Mapping of different sea ice regimes using images from Sentinel-1 and ALOS synthetic aperture radar*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48(3):1,045–1,058
- > Falkingham (2014). *Global satellite observation requirements for floating ice*. PSTG-4 Final Report.
- > Filippini, F. (2019). *Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow*. In Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings Vol. 18, No. 1, p. 11.
- > International Ice Charting Working Group (IICWG, 2019). *Rose-L*. Report 1, versión 2, Diciembre 2019.
- > Mehl, H. & Salgado, H. (1995). *Aspectos de interés para la navegación antártica interpretados a partir de imágenes SAR ERS*. Revista SELPER, Vol 11, N° 1-2, Editorial M. Araya, Chile, Mar-Jun. 1995, pp. 29-33.
- > Salgado H., Picasso, M., Frulla L. & Gagliardini, A. (1995). *Uso de imágenes ERS-1/SAR para la caracterización de hielos flotantes*. Revista SELPER, Vol 11, N° 1-2, Edit.M. Araya, Chile, pp. 93-98.
- > Salgado H. (1998). *Actualización de cartografía náutica antártica (etapa primera)*. Globesar 2 Mid-Term Symposium Radarsat Applications in Latin America, Cartagena, Colombia, pp.368-371.
- > Salgado, H. 2001. *Antarctic nautical cartography updated with Radarsat images*. Canadian Journal of Remote Sensing (CJRS), Vol.27, N°6, pp.691-697
- > Salgado H., Carballo, F., Salvó, C., Lorenzo, B. & Monique, B. *Sea ice SAR backscattering analysis in Antarctic navigation zone*. 20 al 22 de junio de 2017. Earth Observation (EO) Summit 2017, Montreal, Canada.

- > Salvó, C., Salgado, H., Lorenzo, B., Scardilli, A. & Claus, F. *Concentración de hielo flotante en el Mar de Weddell* por medio de imágenes SAR. XIII CONGREGMET. 16 al 19 de octubre de 2018. Rosario, Argentina.
- > Scardilli, A., Claus, F., Miño R. A., Salvó, C. & Salgado H. *Cartas de hielo y témpanos en la Antártida a partir del análisis de sensores remotos y observaciones del Servicio de Hidrografía Naval*. NOVENO CONGRESO DE LA CIENCIA CARTOGRÁFICA "La Cartografía como Herramienta de Decisión". IGN. 24 al 26 de octubre de 2018.
- > WMO. (2004). No. 1215. *Ice chart colour code standard*. JCOMM Technical Report No. 24.