

Análisis intercomparativo Multi-SAR.

Caso de estudio: desprendimiento del témpano A81

Soledad Tiranti¹, Álvaro S. Scardilli¹

¹ Departamento Meteorología, División Glaciología, Servicio de Hidrografía Naval,
Buenos Aires, Argentina.

tirantisoledad@gmail.com, asscardilli@hidro.gov.ar

Resumen. La tecnología SAR constituye una fuente de datos óptima para el monitoreo de las regiones polares y el estudio de las características y dinámica de los hielos. En el presente trabajo se exponen los principales resultados cualitativos del análisis intercomparativo Multi-SAR en cuanto a capacidad de detección de hielo marino y témpanos en la zona de desprendimiento del témpano A81, al sur del mar de Weddell, a principios de febrero de 2023. El experimento se complementó con la interpretación visual de imágenes satelitales ópticas (Sentinel-2) y fotografías digitales aéreas capturadas in situ y de alta resolución espacial. Los principales objetivos de este trabajo fueron validar y comparar la información detectada en las imágenes SAOCOM y Sentinel-1 con la visualizada en las fotografías aéreas y analizar y comparar visualmente las imágenes Sentinel-1 y SAOCOM en cuanto a capacidad de detección de hielo marino (formas y estados de desarrollo) y témpanos.

Palabras claves: Radar de Apertura Sintética (SAR), SAOCOM, Banda L, Sentinel-1, Banda C, intercomparación Multi-SAR, hielo marino, hielo de origen terrestre, témpano A81, vuelo glaciológico, imágenes aéreas.

1 Introducción

Los análisis previos de intercomparación de imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética, por sus siglas en inglés) desarrollados durante el periodo 2020-2022 por el Servicio de Hidrografía Naval de Argentina (SHN) fueron publicados en 2023 en el artículo *Multi-band SAR intercomparison study in the Antarctic Peninsula for sea ice and iceberg detection* [1]. El estudio consistió en un experimento de intercomparación cuantitativa de la información detectada en las bandas X, C y L de imágenes de los satélites COSMO-SkyMed, Sentinel-1 y SAOCOM, respectivamente. Las áreas de interés fueron la Península Antártica Norte (Golfo de Erebus y Terror y Estrecho Antarctic). El experimento demostró que la polarización HV de la banda L es útil para la detección de témpanos rodeados de hielo del primer año, incluso bajo diferentes parámetros SAR, mientras que en la polarización HH esa discriminación se dificulta. A su vez, la banda L presentó mayor sensibilidad a las características superficiales de los hielos del primer año permitiendo el reconocimiento rápido de los mismos y la detección de cintas de hielo del primer año aun en condiciones de mar ventoso y acumulación de nieve. La polarización HV es óptima en la identificación de cintas en

relación a HH debido a una menor sensibilidad a la rugosidad superficial del agua. Finalmente, la detección de nieve resultó mejor en la polarización HH para todas las frecuencias SAR, permitiendo diferenciar entre hielo marino desnudo y cubierto de nieve.

En el presente trabajo se desarrolló un análisis intercomparativo visual de las bandas C y L de imágenes SAR provenientes de los satélites Sentinel-1 y SAOCOM respectivamente. El área de interés fue la zona de desprendimiento del témpano A81, al sur del mar de Weddell. El experimento de intercomparación se complementó con la interpretación visual de imágenes satelitales ópticas (Sentinel-2) y fotografías digitales aéreas capturadas in situ durante un vuelo glaciológico desarrollado durante la Campaña Antártica de Verano 2022-2023.

Los principales objetivos de este trabajo fueron:

- Validar y comparar la información detectada en las imágenes SAOCOM y Sentinel-1 con la visualizada en las fotografías aéreas, capturadas in situ y de mejor resolución espacial.
- Analizar y comparar visualmente las imágenes Sentinel-1 y SAOCOM en cuanto a capacidad de detección de hielo marino (en diversas formas y estados de desarrollo) y témpanos.

2 Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de análisis comprendió la zona de desprendimiento del témpano A81 (Figura 1). El 23 de enero de 2023 el *British Antarctic Service (BAS)* informó acerca de la ruptura de la Barrera de hielo Brunt, al sur del Mar de Weddell, luego del monitoreo continuo de las principales grietas de la barrera mediante GPS. Este proceso de ruptura dio origen al témpano A81, con un área de aproximadamente 1500 km². A partir de ese momento se inició su seguimiento diario y de otros témpanos de menor tamaño que se originaron del desprendimiento. El 24 de enero se produjo la ruptura del hielo fijo que tenía adosado al sudoeste el témpano quedando libre de obstáculos para su deriva al oeste. Hacia el 29 de enero el témpano se había desplazado 11 km con dirección oeste. Los témpanos de menor tamaño ubicados al sudeste del A81 también derivaron hacia el oeste junto con escombros y formación de hielo marino a su alrededor. Días posteriores continuó el monitoreo permanente del témpano a fin de evaluar si la deriva del mismo podía afectar la navegación del Rompehielos ARA Almirante Irizar hacia la Base Antártica Conjunta Belgrano II.

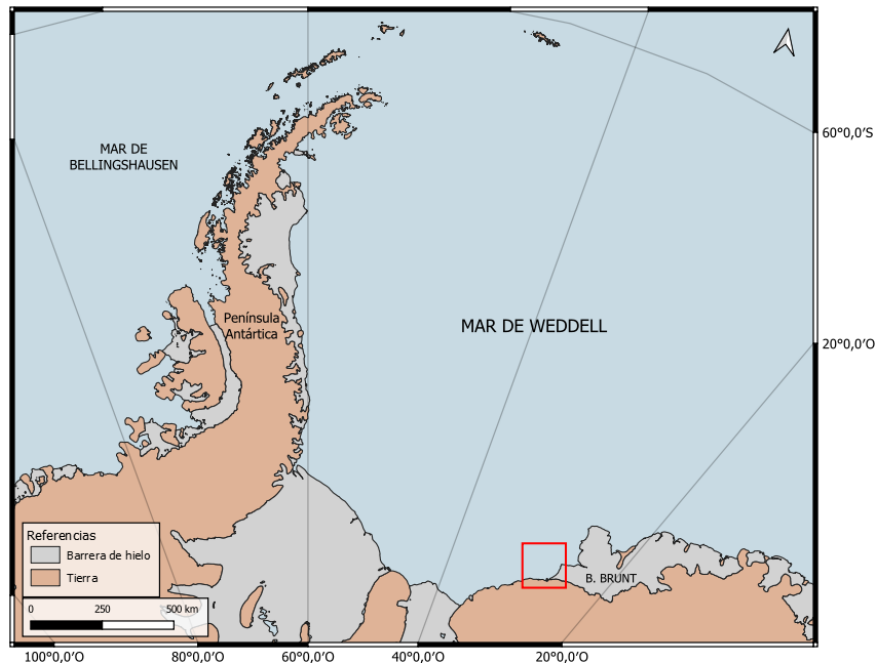


Fig. 1. Área de estudio

2.2 Productos

Los productos satelitales y aéreos que se analizaron en el presente trabajo provienen de distintas fuentes (Tabla 1). En cuanto a tecnología SAR se emplearon imágenes proporcionadas por los satélites SAOCOM (CONAE - Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Argentina) y Sentinel-1 (ESA - Agencia Espacial Europea). Para obtener un conjunto de datos comparable en resolución espacial y que permita la intercomparación Multi-SAR, la imagen Sentinel-1 fue remuestreada a un píxel cuadrado de tamaño final 50.3 metros (resolución espacial de imagen SAOCOM). La imagen SAOCOM se analizó, por un lado, como composición RGB/HH-HV-HH así como también por bandas individuales de polarización HH y HV. Asimismo, se analizaron productos satelitales ópticos, como es el caso de las imágenes Sentinel-2 (ESA), cuya alta resolución espacial permitió su empleo como imágenes de apoyo para el reconocimiento del hielo marino en las imágenes de radar, mediante comparación visual. Finalmente se encuentran las fotografías aéreas capturadas in situ mediante cámara réflex digital NIKON D750 durante un vuelo glaciológico en helicóptero *Sea King*, efectuado el día 5 de febrero de 2023 entre las 05:00 y las 08:00 HOA aproximadamente, durante la Campaña Antártica de Verano 2022-2023. El objetivo del vuelo fue la observación del témpano A81 y sus alrededores, involucrando mediciones de altura en distintos puntos del témpano y capturas de una

serie de imágenes aéreas de la condición glaciológica circundante. Estas fotografías permitieron fácilmente la identificación de hielo marino (en diversas formas y estados de desarrollo) y témpanos debido a la alta resolución espacial de las mismas.

Tabla 1. Productos de análisis

Producto	Instrumento	Fecha/hora	Modo adq. / Nivel Proc.	Bandas	Polarización	Res. Espacial
Imágenes aéreas	NIKON D750	05/02/2023 8:10-11:38 UTC	/	RGB	/	24,3 MP
Imagen Sentinel-2	MSI	05/02/2023 10:11 UTC	S2 MSI L1C	234 RGB	/	5,8 m
Imagen SAOCOM	Radar de apertura sintética	05/02/2023 11:20 UTC	Topsar Wide L1C	L (1,275 GHz)	Dual Pool HHHV	50,3 m
Imagen Sentinel-1	Radar de apertura sintética	07/02/2023 23:31 UTC	Interferometric Wide swath L-1 GRD	C (5.4 GHz)	Simple (SP)HH	20 m (Remuestreo a 50.3 m)

3 Análisis y resultados

Para establecer la validación y posterior comparación de productos SAR SAOCOM y SENTINEL-1 fue necesario realizar una serie de pasos previos. En primer lugar, se llevó a cabo la localización aproximada de cada fotografía aérea dentro de la trayectoria del vuelo glaciológico, empleando como información complementaria de apoyo visual las imágenes ópticas Sentinel-2, que permiten detectar más detalles por su mayor resolución espacial. Una vez ubicadas las fotos aéreas en la trayectoria de vuelo fue posible la comparación entre lo que se observa en las fotografías y lo que se interpreta en las imágenes satelitales SAR. Luego se procedió con la identificación en las fotografías aéreas de tipos de hielo (marino y terrestre) y la discriminación, dentro del hielo marino, de distintas formas y estados de desarrollo. En términos de hielo marino, las formas se clasifican según la longitud de la componente horizontal mientras que el estado de desarrollo refiere al espesor (longitud del componente vertical) o edad que alcanza el hielo marino. En los alrededores del témpano A81 se observó formación de hielo marino encontrándose distintos estados de desarrollo, como hielo nuevo (pasta/grumo/shuga de menos de 10cm de espesor), nilas (hasta 10cm) y hielo joven gris (10-15cm). Este proceso tuvo lugar debido al enfriamiento que aportaron los témpanos y escombros surgidos de la ruptura de la barrera y las condiciones de baja intensidad de viento, favorables para que se genere el congelamiento del agua de mar. También se identificó hielo del primer año de diferentes espesores (30cm-2m) en forma de escombros, tortas y bandejones, provenientes de la ruptura del hielo fijo que se encontraba adosado al oeste del témpano A81.

Una vez finalizados los pasos mencionados se procedió a la comparación de la capacidad de detección visual en las imágenes de radar SAOCOM (banda L) y SENTINEL-1 (banda C) de los diferentes objetos que se describen a continuación.

Hielo terrestre aislado (Figura 2)

SAOCOM RGB-HH/HV/HH: óptima detección del límite témpano-agua. El hielo terrestre se observa en un patrón heterogéneo de niveles de verdes y magenta brillantes que se distingue fácilmente del agua en tonos de magenta homogéneos y oscuros. SAOCOM (HV): óptima detección de límite témpano-agua. El hielo terrestre se observa en niveles de grises heterogéneos que se discriminan del agua oscura en tonos relativamente homogéneos. SAOCOM (HH): empeora la detección del témpano y del límite hielo terrestre- agua respecto de la polarización HV ya que los bordes del hielo terrestre se difuminan. SENTINEL-1 (HH): óptima detección del límite témpano-agua. El hielo terrestre se observa en niveles de grises heterogéneos que se distinguen del agua oscura en tonos más homogéneos. Se destaca un mejoramiento en la detección respecto de banda L, a igual polarización HH.

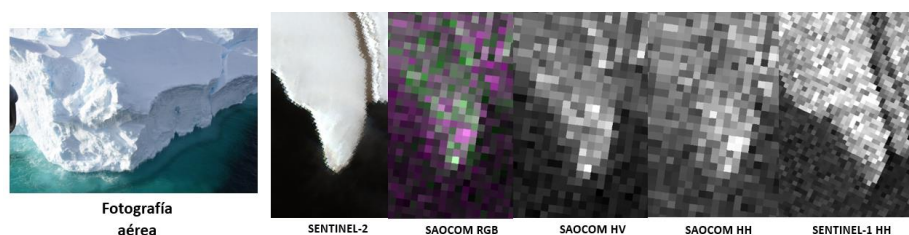


Fig. 2. Témpanos aislados. Capacidad de detección de hielo de origen terrestre y del límite témpano/agua.

Hielo terrestre en matriz de hielo marino (Figura 3)

SAOCOM RGB-HH/HV/HH: los témpanos se diferencian por tonos heterogéneos y brillantes de verdes y magentas que contrastan con la matriz de hielo marino en tonos homogéneos de magenta oscuro. SAOCOM (HV): los témpanos se observan en tonos grises claros y brillantes que contrastan con la matriz de hielo marino más oscura y homogénea. Se difuminan algunos límites de témpanos como en el caso RGB. SAOCOM (HH): los témpanos se identifican en tonos de grises claros y brillantes pero el contraste con el hielo marino es menor que en la polarización HV ya que la matriz se presenta en tonos más claros, lo que dificulta la detección de los bordes de los témpanos. SENTINEL-1 (HH): los témpanos se diferencian por tonos de grises claros y brillantes que contrastan con matriz de hielo marino en tonos de grises bastante oscuros. Los límites de témpanos se encuentran bien definidos. Existen mejoras en la visualización respecto de banda L, a igual polarización HH.

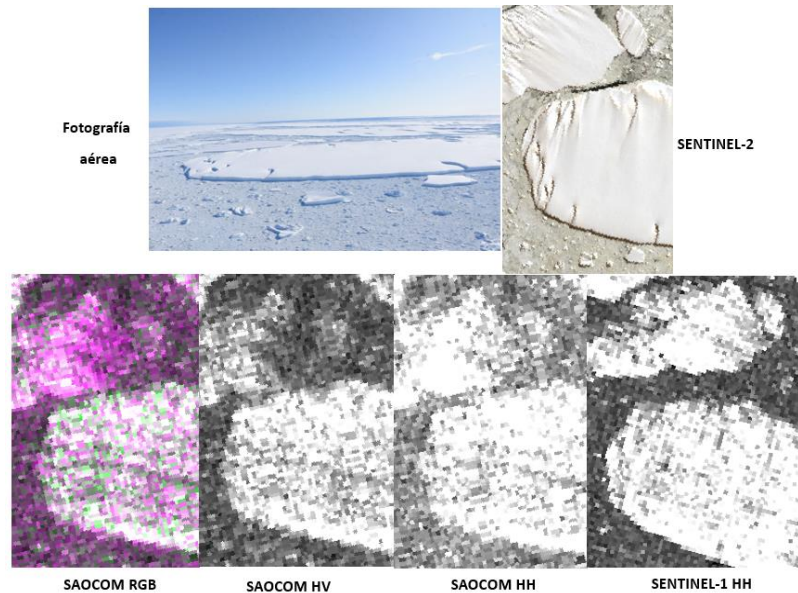


Fig. 3. Detección de hielo de origen terrestre dentro de matriz de hielo marino.

Formas de hielo marino. Debido a la resolución espacial de las imágenes satelitales analizadas, las formas de hielo marino que pudieron detectarse son aquellas que cuentan con 100 m o más de longitud en alguno de sus ejes, es decir, desde bandejones medianos a tamaños superiores. Los bandejones analizados fueron de hielo del primer año, posiblemente de distintos espesores (Figura 4).

SAOCOM RGB-HH/HV/HH: la composición RGB permite diferenciar los límites de los bandejones debido al alto contraste entre el hielo marino del primer año (en tonos bastante oscuros, tendientes a negro) y la matriz circundante en tonos magenta, relativamente más claros. SAOCOM (HV): la polarización HV no resulta óptima para la identificación de bandejones ya que los mismos se observan en tonos similares a la matriz circundante. SAOCOM (HH): la polarización HH mejora la identificación de bandejones respecto de HV ya que los límites de las formas se discriminan debido a que la matriz presenta tonos más claros que el hielo marino que conforma a los bandejones. SENTINEL-1 (HH): si bien se detectan los límites de los bandejones, no se presenta un nivel contraste tan definido como en banda L, a igual polarización HH.

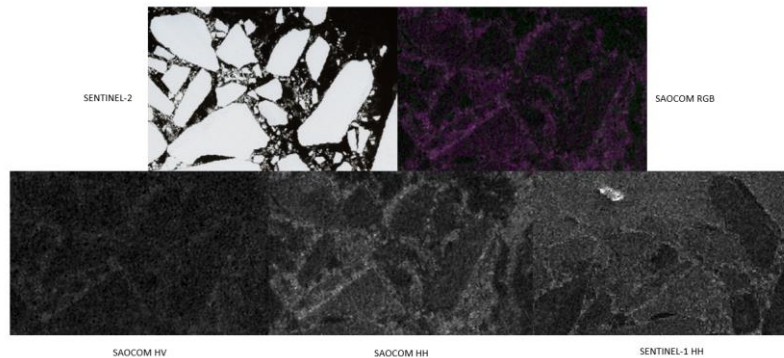


Fig. 4. Identificación de formas de hielo marino (bandejones).

Hielo fijo (Figura 5)

SAOCOM RGB-HH/HV/HH: óptima discriminación del límite hielo fijo/agua. El hielo fijo se distingue por su tonalidad oscura/negra y homogénea. El agua se observa en tonos magenta. SAOCOM (HV): el límite hielo fijo/agua se encuentra difuminado imposibilitando la demarcación del borde del hielo fijo. SAOCOM (HH): óptima detección del límite hielo fijo/agua. El hielo fijo se distingue por su tonalidad oscura/negra y homogénea. El agua se observa en un patrón de tonos grises claros. SENTINEL-1 (HH): óptima detección del límite hielo fijo/agua. El hielo fijo presenta tonalidad oscura/negra y homogénea y el agua en tonos grises claros. Respuesta similar a SAOCOM HH.

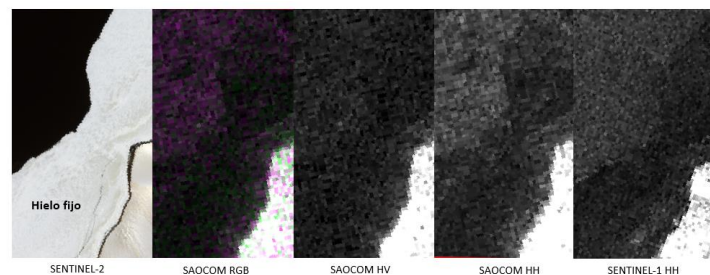


Fig. 5. Detección de hielo fijo.

Estados de desarrollo del hielo marino y espacios de agua entre hielos

Hielo nuevo (pasta/shuga). En SAOCOM RGB se observa como matriz relativamente homogénea en tonos magenta mientras que en SAOCOM HV es un

patrón en tonos de grises, el cual se torna más clara en el caso de SAOCOM HH lo cual mejora su detección. En cuanto a Sentinel-1, la respuesta es similar que en el caso de SAOCOM HH. En los 4 productos, la pasta/shuga puede ser confundida con agua en movimiento (Figuras 7 y 8).

Nilas: en los 4 tipos de productos se observan en tonos oscuros tendientes a negro, lo cual puede confundirse con presencia de aguas calmas sin hielo marino (Figura 9).

Hielo joven gris: en SAOCOM RGB, SAOCOM HH y SENTINEL-1 se visualiza en tonos oscuros y sin distinción precisa de las formas. Puede confundirse con aguas calmas. En SAOCOM HV no se logra la discriminación del hielo joven gris (Figura 6).

Hielo del primer año. En los 4 productos se identifica en tonos oscuros tendientes a negro, lo cual puede generar confusión en espacios de agua calma. Los límites de las formas son detectados, aunque en SAOCOM HH y RGB con mayor facilidad que en SAOCOM HV ya que la matriz aparece en tonos de grises más claros en el primer caso, y en magenta en el segundo, optimizando el contraste visual. En Sentinel-1 se observan mejoras en la identificación de límites de forma respecto de la banda C, a igual polarización HH (Figura 8).

Espacios de agua entre hielos. En todos los productos analizados, las aguas libres de hielo marino y sin movimiento se identifican en tonos oscuros tendientes a negro, lo cual no permite la discriminación de casos de presencia de nilas, hielo joven gris y hielo del primer año (Figura 8).

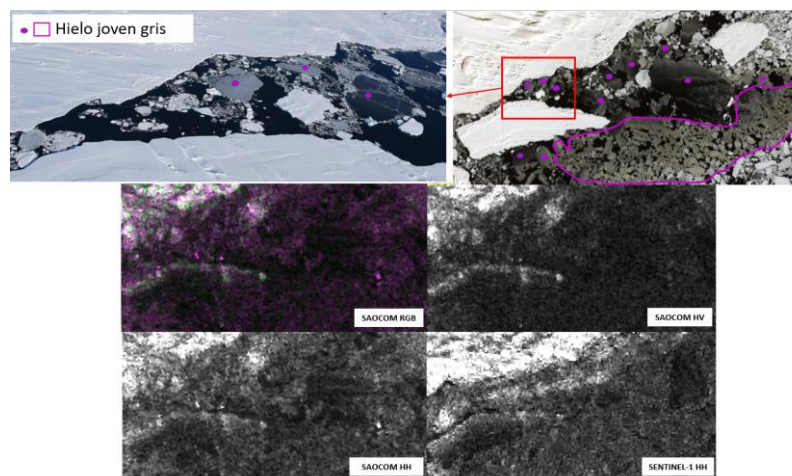


Fig. 6. Detección de hielo joven gris

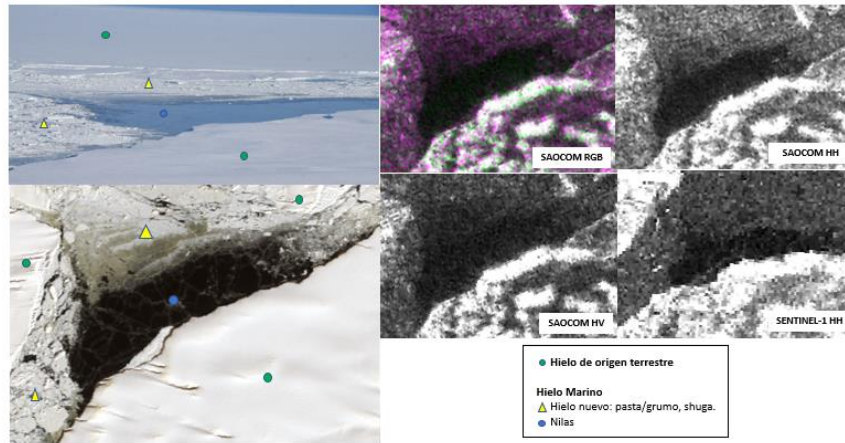


Fig. 7. Detección de nilas y hielo nuevo.

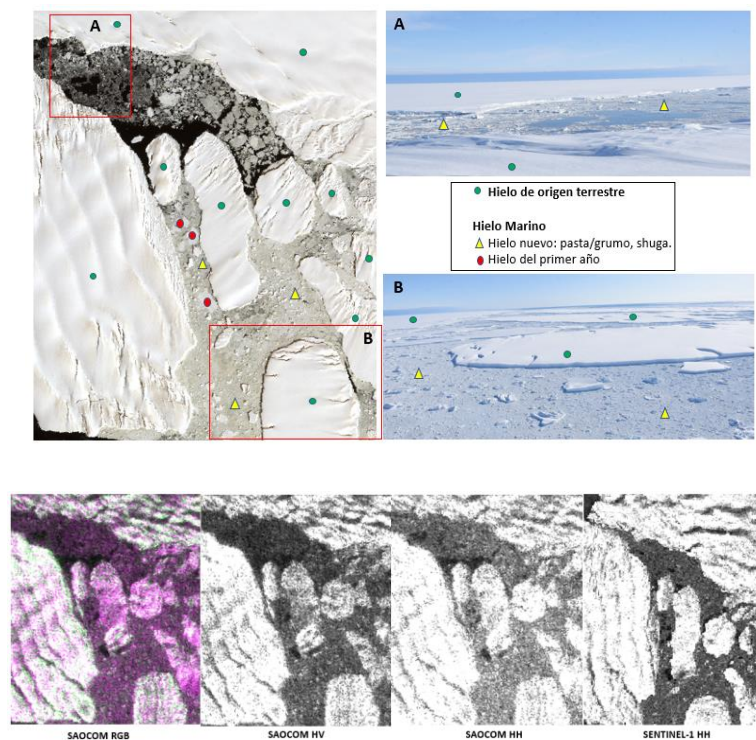


Fig. 8. Detección de hielo nuevo, hielo del primer año y espacios de agua.

4 Discusión y conclusiones

El análisis intercomparativo Multi-SAR en cuanto a capacidad de detección de hielos exhibió una serie de resultados cualitativos que son relevantes para la continuación de proyectos futuros de detección automática de hielo marino y terrestre con el objetivo de generar clasificaciones supervisadas y acelerar los tiempos de análisis de las imágenes satelitales.

En cuanto a la detección de témpanos, la composición RGB de SAOCOM y su banda HV mostraron resultados óptimos en contraposición al bajo contraste y límites difuminados identificados en la polarización HH. Por el contrario, la banda HH de SENTINEL-1 presentó mejoras en la detección respecto de SAOCOM HH, lo cual sugiere una mayor capacidad de identificación en la banda C respecto de la banda L. La discriminación de bandejones resultó alta en el caso de SAOCOM RGB y SAOCOM HH mientras que SAOCOM HV no fue óptima por el bajo contraste entre bandejones y matriz circundante. En cuanto a la banda C de SENTINEL-1 (HH), si bien se detectan los límites de las formas, presenta un nivel de contraste más bajo que la polarización HH en banda L. Respecto del hielo fijo, los productos permitieron en general una detección óptima del mismo, exceptuando el caso de SAOCOM HV donde el límite agua/hielo fijo se encontró difuminado imposibilitando la detección del hielo fijo sin dificultades. Finalmente, en relación a estados de desarrollo, la pasta/shuga se identificó en todos los casos como una matriz relativamente homogénea y clara pero que puede ser confundida con casos de agua en movimiento. Las nilas, el hielo joven gris y el hielo del primer año aparecen en tonos oscuros tendientes a negro, respuesta similar al de las aguas calmas mientras que los espacios de agua libres de hielo se identifican también en tonos oscuros, lo cual puede ser confundido con nilas, hielo joven gris y hielo del primer año.

La tecnología SAR constituye una fuente de datos óptima para el monitoreo de las regiones polares y el estudio de los hielos. Aun así, existen ciertas limitaciones en los productos actuales que no permiten, por ejemplo, la identificación precisa de hielo marino en estados de desarrollo incipientes y formas menores a bandejones medianos. Asimismo, diferencias en el periodo de revisita de los satélites impiden en ocasiones la obtención de productos comparables en fechas. Este fue el caso del producto Sentinel-1 que al corresponderse con una captura de dos días de diferencia respecto de las imágenes SAOCOM y las aéreas, dificultó la identificación de hielos similares entre las imágenes debido al movimiento de los hielos en fechas posteriores.

Por otra parte, es importante destacar el rol fundamental del empleo de imágenes aéreas capturadas en situ para la validación de los productos SAR y como complemento de apoyo visual en la identificación de témpanos y de las formas y estados de desarrollo del hielo marino.

Referencias

1. Salvó, C.S., Gómez Saez, L., Arce, J.C.: Multi-band SAR intercomparison study in the Antarctic Peninsula for sea ice and iceberg detection. *Front. Mar. Sci.* 10:1255425 (2023).