

Modelado y Pronóstico de Concentración de Hielo Marino en la Antártida

Sandra Barreira¹, Alvaro Scardilli¹

¹Departamento Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval, Comodoro Py 2055, piso 15, CABA

Abstract. Este estudio presenta el desarrollo y evolución de dos modelos de pronóstico de concentración de hielo marino en Argentina, llevados a cabo por el Servicio de Hidrografía Naval. El primer modelo operativo, conocido como Modelo Operativo de Pronóstico (MOP), en uso desde 2016, se basa en anomalías de concentración de hielo antártico respecto al promedio 1981-2010, utilizando redes neuronales de análisis de componentes principales (PCAN) con aprendizaje reforzado supervisado en dos capas. Desde entonces, ha evolucionado hacia una nueva versión, el Modelo Nuevo de Pronóstico (MNP), que incorpora anomalías basadas en el promedio 1991-2020 y múltiples capas de aprendizaje para mejorar la precisión del pronóstico a tres meses. Ambos modelos se actualizan mensualmente con datos satelitales y han sido evaluados por la Red de Pronóstico de Hielo Marítimo Sur (SIPN South), demostrando mejoras significativas en la capacidad de previsión. Este avance no solo beneficia la navegación segura en el Océano Austral, sino que también respalda la planificación logística y las operaciones científicas en la región.

Keywords: Hielo Marino, Pronóstico, Aprendizaje automático, Modelado

1. Introducción

Durante los últimos 10 años, el Servicio de Hidrografía Naval de Argentina ha estado experimentando con modelos de pronóstico del campo de hielo marino antártico basados en diversas técnicas de Aprendizaje Automático, desde redes neuronales para identificación de imágenes hasta modelos inteligentes que aprenden de forma autónoma. Nuestro primer modelo operativo, basado en anomalías de concentración de hielo marino antártico respecto al promedio 1981-2010, ha estado en funcionamiento desde 2016. Este modelo se fundamenta en 204 posibles estructuras de campo de hielo marino y ha aprendido a mejorar su pronóstico de manera automática. Este sistema inteligente inicial se basó en una Red de Análisis de Componentes Principales (RACP) con aprendizaje reforzado supervisado y propagación hacia adelante y hacia atrás de 17 nodos para los doce meses del año, resultando en un total de 204 nodos en dos capas de aprendizaje. En los últimos tres años, hemos estado desarrollando una nueva versión del modelo operativo. Esta nueva

versión del modelo calcula anomalías y patrones de hielo marino con respecto al promedio 1991-2020, y se han añadido nuevas capas de aprendizaje para mejorar los resultados. Se ha añadido una tercera capa con combinaciones de dos patrones, generando 1440 nuevos nodos para el pronóstico, y una cuarta capa con combinaciones de tres patrones que añade 6720 nodos más al pronóstico. Hasta ahora, el modelo ha aprendido a pronosticar la concentración y extensión del campo de hielo marino para los próximos tres meses en caso de que aparezca uno de los 8364 nodos posibles en cada mes dado. A medida que el sistema continúa aprendiendo por sí mismo, se espera que la nueva versión del modelo mejore su rendimiento. El objetivo principal de este modelo es proporcionar a los navegantes una herramienta que permita la planificación de rutas y operaciones en el Océano Austral en función de la presencia y concentración del hielo marino. Los resultados del modelo están disponibles a través del enlace <http://www.hidro.gov.ar/smara/SB/sb.asp> en dos escalas de tiempo diferentes: mensual y diaria. Los resultados diarios han sido probados y evaluados durante los últimos cinco años por el Proyecto Red de Pronóstico de Hielo Marítimo Sur (SIPN South).

2. Métodos de Aprendizaje Automático - Sistema de Pronóstico

El Servicio de Hidrografía Naval de Argentina cuenta con dos modelos de concentración de hielo marino en funcionamiento: el modelo operativo de pronóstico (MOP) y el nuevo modelo en desarrollo (NMP). Los datos utilizados para desarrollar los modelos fueron campos de concentración de hielo marino obtenidos por satélite proporcionados por el Centro Nacional de Datos de Nieve y Hielo (NSIDC) de EE.UU. A finales de cada mes, el NSIDC nos proporciona los datos actualizados para poder ejecutar los modelos.

Para desarrollar el modelo de pronóstico de hielo marino basado en aprendizaje profundo (deep learning-based) MOP, seguimos tres pasos. El primer paso consistió en construir la Red de Análisis de Componentes Principales (RACP) de anomalías de concentración de hielo marino (SICA) respecto al promedio 1981-2010. Durante este paso, se obtuvieron las características principales de los campos de SICA (mapas) utilizando el Modo-T Rotado Varimax [1] y [2], dando como resultado 8 patrones en fases positivas y negativas (16 patrones en total) y un nodo que consideraba aquellos meses que no se clasifican bajo ninguno de los 16 patrones o combinaciones/variedades de 2 o 3 patrones. Para definir cada patrón, utilizamos un umbral de ± 0.3 para las cargas (loadings). Los meses en los que las cargas no superan el valor de ± 0.3 se consideran no clasificados bajo ningún patrón. El segundo paso consistió en enseñar al sistema mediante aprendizaje supervisado reforzado con propagación hacia adelante y hacia atrás a distinguir cada patrón en esta primera capa de aprendizaje formada por 17 patrones/nodos. Luego se le enseña a distinguir cada mes del año formando la segunda capa de aprendizaje de 204 nodos (tercer paso). El tercer paso fue el desarrollo del sistema de pronóstico que utiliza lo que el sistema aprendió tanto en el segundo paso para pronosticar las anomalías de concentración de hielo marino para los próximos tres meses, proporcionando una probabilidad de ocurrencia de cada patrón, pero también tiene incorporado el sistema de aprendizaje

con lo cual todo el sistema continúa aprendiendo con cada ejecución mensual del pronóstico.

El NMP se basa en las anomalías respecto al promedio 1991-2020. De nuevo, se obtuvieron 16 patrones junto con una categoría no clasificada utilizando el análisis de Componente Principales (ACP) en Modo-T. Algunos de los patrones obtenidos con las nuevas anomalías son similares a los del MOP, pero otros son un poco diferentes. Estas diferencias entre los patrones se deben al valor medio diferente utilizado para ambos modelos, aunque utilizamos el conjunto completo de datos para ambos modelos y la adición de más años para definir los patrones de ACP del Modo T.

Para desarrollar el NMP, añadimos más capas de aprendizaje al segundo paso del proceso. La primera capa de aprendizaje es igual que en el MOP, la segunda capa consiste en una combinación de dos patrones para cada mes, dando 1440 nuevos nodos para aprender, y la tercera capa incluye las combinaciones de tres patrones para cada mes añadiendo 6720 nodos más al sistema de aprendizaje-pronóstico. Hasta ahora, la nueva versión del modelo ha aprendido a pronosticar el campo de concentración de hielo marino para los próximos tres meses en caso de que aparezca uno de los 8364 nodos posibles en un mes dado. Aunque el orden de los patrones y el peso de cada patrón son importantes, esta información no se consideró debido a la extensión de la base de datos. Por ejemplo, si en un mes determinado los patrones que dominan el campo de hielo marino son primero positivo (1+), segundo negativo (2-) y octavo negativo (8-) en ese orden debido al peso de cada patrón, y en otros meses los patrones aparecen como (8-), (1+) y (2-) o cualquier otra variación en el orden de estos, los resultados del pronóstico para los próximos tres meses pueden ser diferentes, pero con la extensión de la base de datos actual es imposible considerar esa diferencia. Lo mismo ocurre con los patrones de los meses que podrían haber ocurrido antes de la aparición de una combinación de patrones de un mes. A pesar de que el orden de los patrones es importante, hasta ahora no hemos podido enseñar al sistema para tener en cuenta esta diferencia en la ocurrencia de patrones. En este último caso, el número de nodos habría sido variaciones y no combinaciones de elementos, dando 2880 nodos para la segunda capa y 40320 nodos para la tercera capa. Si consideráramos esta última opción tendríamos muchísimos nodos sin información. Además, como el número de casos reales es limitado, no nos es posible enseñar al sistema con combinaciones de cuatro patrones, aunque hayan estado presentes en algunos meses del conjunto de datos.

El sistema de pronóstico de ambos modelos (MOP y NMP) ha sido programado para incluir cada mes los nuevos datos en el proceso de aprendizaje. De esta manera, el sistema continúa aprendiendo por sí mismo sin necesidad de un nuevo proceso de aprendizaje completo de todos los datos. El NMP incluye no sólo la probabilidad de ocurrencia de cada patrón único, sino también la probabilidad de ocurrencia de la combinación de dos y tres patrones para los siguientes tres meses. Sólo los patrones o combinaciones de patrones con mayor probabilidad de ocurrencia son los que se utilizan para construir los mapas de pronóstico de concentración de hielo marino y anomalías de hielo marino para los siguientes tres meses. A medida que el sistema continúa aprendiendo por sí mismo, se espera que la nueva versión del modelo mejore su rendimiento.

3. Resultados y discusión

Los campos de anomalías de SICA y de la concentración de hielo marino para ambos modelos se reconstruyen utilizando composiciones de los meses en el conjunto de datos que han tenido el mismo patrón o patrones que los modelos pronostican para los próximos tres meses. El uso de esta metodología ha demostrado no ser muy preciso para los resultados. Uno de los problemas es que el proceso de composición tiene el efecto de suavizar las anomalías, ya que se calculan con muchos meses pasados, por lo que las anomalías resultantes podrían ser de menor magnitud o tener una forma de campo diferente a las que ocurrirán en el mes que se está pronosticando. Por lo tanto, muchas características detalladas del campo real de hielo marino no pueden ser pronosticadas.

Otro problema con las composiciones es que consideran todos los meses con el mismo patrón o patrones, pero no diferencian según los valores de las cargas/loadings que los patrones tenían cuando aparecieron antes. Se utilizan todos los meses con pesos (cargas/loadings) por encima del umbral de ± 0.3 para calcular la anomalía del hielo marino para el mes pronosticado sin considerar que podrían existir diferencias en el pronóstico si un mes tiene patrones con un valor alto o bajo de cargas. Intentaremos resolver este problema en una etapa futura en la fase de aprendizaje del proceso.

Desde el inicio del MOP en 2016, el error cuadrático medio porcentual (ECMP) en el pronóstico del campo de concentración de hielo marino con respecto a los valores reales para cada mes no superó el 10 % para el pronóstico a 1 mes y el 12 % para 3 meses. Sin embargo, para el pronóstico a 3 meses para junio de 2023 con los datos de marzo de 2023, el ECMP obtenido fue del 17,12 % y en el caso del pronóstico a 1 mes fue el 14,04 %. Luego de esos valores de junio 2023 los ECMPs comenzaron a bajar normalizándose por debajo del valor máximo antes mencionado. Por ejemplo, el ECMP del MOP para el último mes verificado hasta el momento que fue julio de 2024 a 1 mes que fue de 8,02 % y a 3 meses de 9,24 %. Para el NMP, teniendo en cuenta que está funcionando en modo aprendizaje desde 2022, el ECMP máximo obtenido fue del 8 % para el pronóstico a 1 mes y del 10,3 % para 3 meses con excepción nuevamente del pronóstico para el mes de junio de 2023 que superó el valor máximo del ECMP en el pronóstico hasta ese momento llegando al 12%. Para el caso del NMP el ECMP a 1 mes para julio 2024 fue de 6,11 % y de 8,29 % a 3 meses. En 2023, el campo de concentración de hielo marino fue completamente diferente a lo que había ocurrido anteriormente en el registro observacional. Esto presentó un desafío sustancial para el método de Aprendizaje Automático, ya que no había años similares para que el modelo aprendiera, y como resultado, la precisión del pronóstico fue menor en 2023 que en años anteriores. Los resultados para el año 2023 fueron aceptados para su publicación este año en un Exchange del CLIVAR (Climate and Ocean-Variability, Predictability, and Change, a core project of the WRCP-World Climate Research Programme) [3].

Como ejemplo del rendimiento de ambos modelos, la Figura 1a muestra el campo de SICA real con respecto al promedio 1981-2010 de julio 2024 y la Figura 1b, el campo de concentración de hielo marino para el mismo mes. La Figura 2a muestra los campos de SICA pronosticados por el MOP y la Figura 2b el campo de concentración de hielo marino pronosticado. La Figura 3a muestra los campos de SICA pronosticados por el NMP y la Figura 3b el campo de concentración de hielo marino.

Las anomalías derivadas del NMP se presentan con respecto al promedio 1981-2010 para hacer comparativos con los resultados de ambos modelos y el campo real en la Figura 1a.

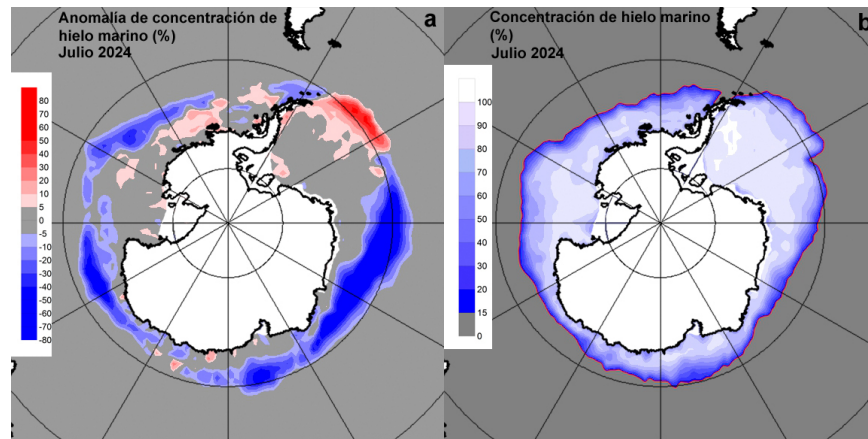


Fig. 1. (a) Anomalía real de la concentración de hielo marino en la Antártida con respecto a la media del período 1981-2010) para el mes de julio de 2024. (b) Campo de concentración de hielo marino antártico para julio de 2024.

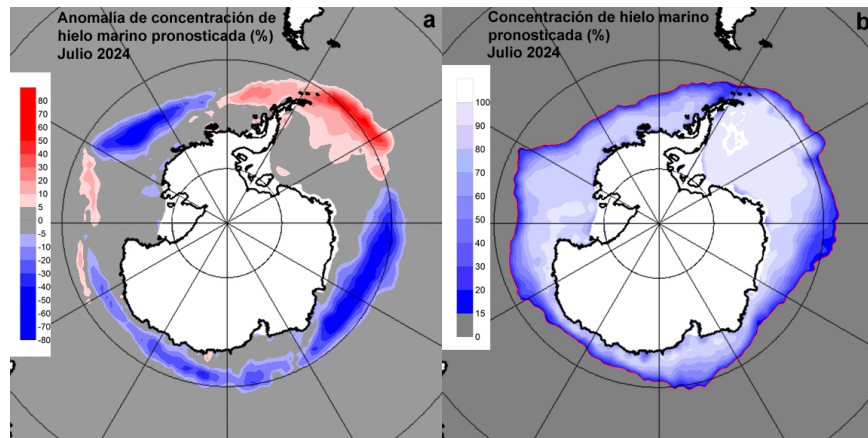


Fig. 2. (a) Anomalía real de la concentración de hielo marino en la Antártida con respecto a la media del período 1981-2010) para el mes de julio de 2024 pronosticada por el modelo operativo (MOP). (b) Campo de concentración de hielo marino antártico para julio de 2024 pronosticado por el MOP.

Como se puede apreciar de las figuras 1a, 1b y 1c, el pronóstico de las anomalías de la concentración de hielo marino tanto del MOP y del NMD estuvieron bien localizadas espacialmente, aunque las intensidades de estas difieren con los valores reales (fig.1a). En la región del mar de Amundsen ambos modelos pronosticaron anomalías negativas más intensas que las que posteriormente se presentaron en julio 2024. Esto llevó a que los campos de concentración de hielo marino no se extendieran latitudinalmente cerca del paralelo de 210 °. Ninguno de los modelos pudo pronosticar la pequeña anomalía negativa al norte de la península antártica por consiguiente ambos modelos pronosticaron un crecimiento del campo de hielo en esa región. En el caso del NMD ese crecimiento fue menor dado que no presentaba anomalías en la región y el campo resultante estuvo representado por el campo medio de julio.

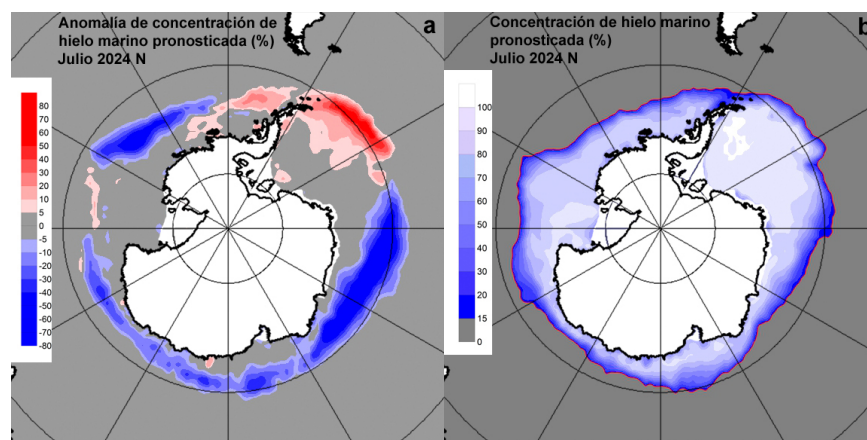


Fig. 3. (a) Anomalia real de la concentración de hielo marino en la Antártida con respecto a la media del periodo 1981-2010) para el mes de julio de 2024, pronosticada por el nuevo modelo en desarrollo (NMD). (b) Campo de concentración de hielo marino antártico para julio de 2024 pronosticado por el NMD.

La anomalía negativa real en la figura 1a se extiende hacia el este desde los 330° de longitud hasta los 90°. La anomalía producida por los modelos es inferior a la real en intensidad y comienza en los 345° de longitud, dando una concentración pronosticada mayor en el caso del MOP en esa región y mejor representada en el caso del NMD. Entre 150° y 180° de longitud, la anomalía negativa de ambos modelos es inferior a la real en intensidad, aunque se encuentra espacialmente bien ubicada dando como resultado un campo más extenso latitudinalmente en los resultados de ambos modelos (figura 2b y 3b). Como ya hemos dicho los ECMPs del MOP y del NMD para julio de este año a 1 mes fueron de 8.02 % y 6,11 %, lo cual nos lleva a pensar que, aunque visualmente los resultados de los modelos (mapas) pueden ser similares, el NMD, aunque todavía en etapa de prueba-aprendizaje está mejorando los resultados del modelo de uso operativo actual.

Pronóstico de Concentración de Hielo Marino (en décimos)

15 de Julio 2024 - SHN - Argentina

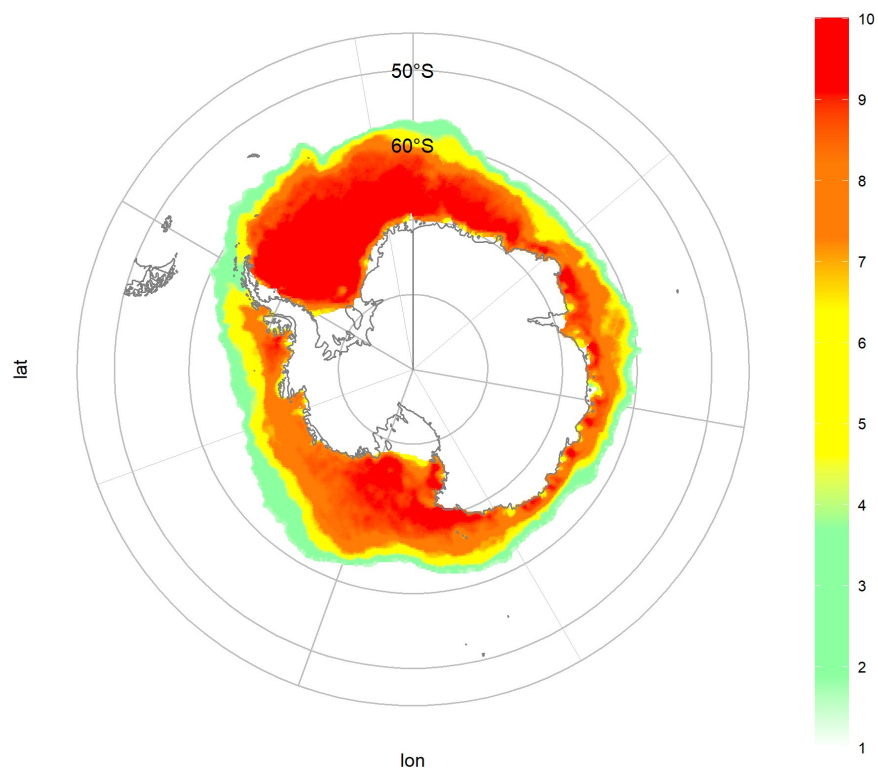


Fig. 4. Campo de concentración de hielo marino pronosticado para el 15 de julio de 2024 por el MOP.

Los campos diarios de concentración de hielo marino se obtienen mediante composiciones de todos los días de la base de datos de ese mes bajo pronóstico con el mismo patrón/patrones para cada día de ese mes. Por lo tanto, el pronóstico diario tiene un problema similar al pronóstico mensual de tener demasiados días para componer cada día. La Figura 4 muestra el pronóstico de concentración de hielo marino MOP del 15 de julio de 2024 y la figura 5 el campo real de hielo marino para la misma fecha obtenida a través del Centro de Hielo y Nieve de EE.UU. (NSIDC). Como se puede apreciar de la comparación de ambas figuras, el modelo diario presentó una concentración de hielo marino de mayor extensión latitudinal entre 345^a

de latitud y 15° de longitud, similarmente a lo ocurrido con los pronósticos mensuales, aunque el sistema para calcular los pronósticos diarios difiere ya que en vez de utilizar las SICAs se utilizan directamente los campos de concentración de hielo marino. Actualmente este producto que se publicaba mensualmente en la página de internet del Servicio de Hidrografía Naval se encuentra fuera de servicio porque estamos trabajando en la mejora de los programas computacionales necesarios para su obtención.

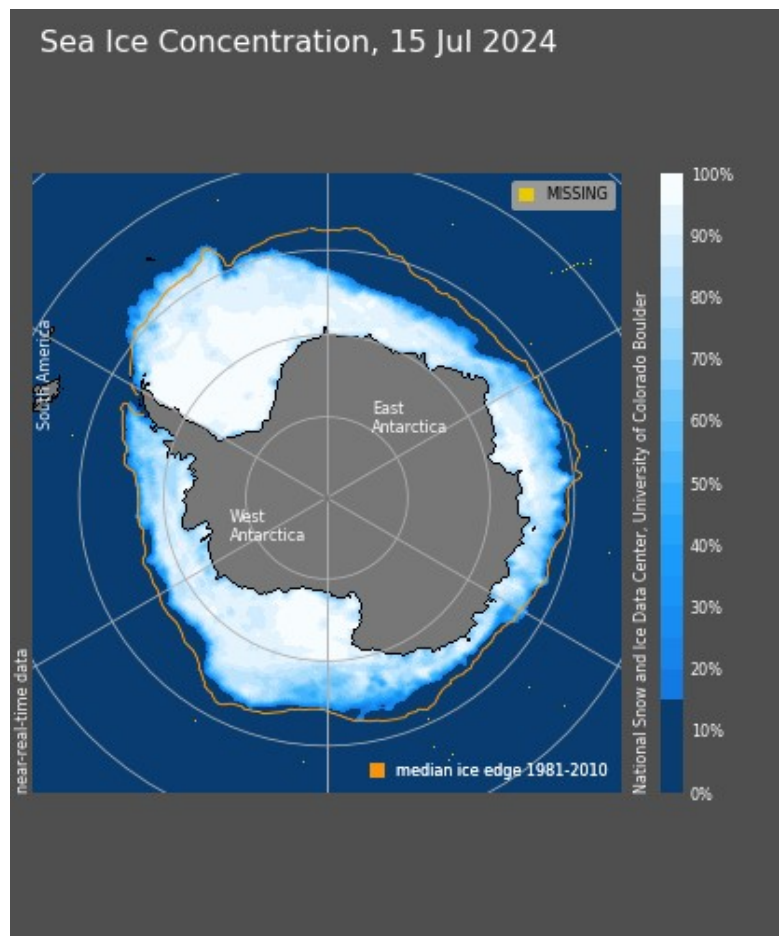


Fig. 5. Campo de concentración de hielo marino real del 15 de julio de 2024 obtenida a través del Centro de Hielo y Nieve de EE.UU. (NSIDC).

En cuanto a la validación del desarrollo de los modelos, los pronósticos diarios del MOP han sido evaluados por el Proyecto de Pronóstico Estacional Coordinado SIPN-South desde el segundo año de su edición. Los resultados de los seis años de este experimento coordinado de pronóstico estacional fueron publicados en 2023 [4]. En las dos últimas ediciones del SIPN-South también se sometieron a evaluación los resultados del NMD, aunque estos solo se han calculado para el período de verano y no se realizan en forma mensual como con el MOP hasta ahora.

4. Conclusiones

El pronóstico de tres meses del MOP se publica cada mes en la página de internet oficial del Servicio de Hidrografía Naval: <http://www.hidro.gov.ar/smara/SB/sb.asp>. También es destacable que no sólo se publican los campos de concentración y anomalías de hielo marino, sino también las anomalías pronosticadas de temperatura del aire, presión atmosférica superficial y precipitación asociadas con los patrones SICA para América del Sur y los océanos circundantes.

Como se puede ver, la adición de una combinación de diferentes patrones al proceso de aprendizaje-pronóstico ha mejorado los resultados del pronóstico. El NMD reemplazará al MOP probablemente en 2025 y estará disponible en la página web de la SHN. Se tiene la intención de seguir añadiendo capas al modelo y tratar de resolver los diferentes problemas encontrados durante el proceso de aprendizaje, como las variaciones en lugar de combinaciones y el peso de cada patrón.

La importancia de un pronóstico operacional de concentración de hielo marino radica en las aplicaciones no sólo para la investigación y la ciencia, sino también para la seguridad de la navegación, la planificación de rutas y para los deberes logísticos en estaciones en la costa o cerca de ella. Contar con un pronóstico con alta fiabilidad permitiría a los tomadores de decisiones planificar, con beneficios económicos y prevenir riesgos ambientales, por ejemplo, evitando entrar en aguas cubiertas de hielo marino si no es necesario. Por estas razones, la mejora de los modelos y sus capacidades de pronóstico es de alta prioridad e importancia, especialmente en el Océano Austral donde las actividades turísticas, comerciales, científicas y pesqueras aumentan cada año.

Referencias

1. Barreira, S. and Compagnucci, R.: Spatial fields of Antarctic sea-ice concentration anomalies for summer-autumn and their relationship to Southern Hemisphere atmospheric circulation during the period 1979-2009, *Annals of Glaciology* (52) 57, 140-150 (2011).
2. Barreira, S.: Variabilidad espacial y temporal del hielo marino. Relación con la circulación atmosférica. Editorial Académica Española - LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121, Saarbrücken, Germany, 493 pp, ISBN 978-3-659-02325-5 (2012).
3. Barreira, S. and Scardilli, A.: Argentina's Sea-Ice Concentration Model, towards the understanding of daily and monthly sea ice variability and its forecast, accepted to be published at a CLIVAR Exchange (2024).

4. Massonnet, F., Barreira, S., Barthélémy, A. et al.: SIPN South: six years of coordinated seasonal Antarctic Sea ice predictions. *Front. Mar. Sci.*, 1-17, 10:1148899, doi:10.3389/fmars.2023.1148899 (2023)