

Verificación de pronósticos por ensamble en alta resolución generados a partir del Sistema de Asimilación de Datos y Pronóstico Numérico del Servicio Meteorológico Nacional en dos casos de estudio

Dan Yañez¹, Maria Eugenia Dillon^{2,3}, Paula Maldonado², Yanina García Skabar²

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA, Argentina)

² Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina)

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina)

Autor correspondiente: Dan Yañez, dan.denis.ivan@gmail.com

Manuscrito recibido el 30 de noviembre de 2023, en su versión final el 01 de abril de 2024

RESUMEN

En este trabajo se busca evaluar el desempeño de los pronósticos probabilísticos en alta resolución (4 km) generados a partir del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SAP.SMN) y estudiar el impacto de las condiciones iniciales en los mismos, considerando pronósticos inicializados a partir de un ensamble de análisis regionales (AReg) y de análisis globales (SAP.SMN-ENS). Se seleccionaron 2 casos de estudio para analizar el desempeño de ambos pronósticos, caracterizados por el desarrollo de convección húmeda profunda y precipitación intensa sobre el centro-este de Argentina y Uruguay, ocurridos el 26-27 de febrero y el 6-7 de marzo de 2022. Para verificar los pronósticos probabilísticos se utilizaron datos de estimación cuantitativa de precipitación por satélite SQPE-OBS, reflectividad máxima de radares de banda C, datos de estaciones convencionales y radiosondeos. En líneas generales, se puede considerar que AReg mostró un mejor desempeño para el caso 1 y SAP.SMN-ENS lo hizo en el caso 2, indicando un impacto significativo de las condiciones iniciales en el desempeño del pronóstico. En ambos casos de estudio, ambos experimentos logran representar adecuadamente los sistemas convectivos respecto de los datos de radar, con ciertas diferencias



Artículo en edición

en la posición e intensidad de los mismos, dando como resultado una subestimación de la precipitación acumulada en 24 horas en las zonas de máxima precipitación estimada por SQPE-OBS. Estos resultados son alentadores respecto de la inclusión de observaciones locales en la condición inicial de los pronósticos numéricos en alta resolución del SAP.SMN-ENS y motivan a seguir avanzando en el desarrollo de un sistema regional de asimilación de datos que permita mejorar la precisión de los pronósticos, investigando aspectos como la configuración y la estrategia de asimilación.

Palabras clave: Pronóstico por ensambles, Análisis regionales, SAP.SMN.

Verification of ensemble forecasts generated from the Data Assimilation and Numerical Forecasting System of the National Meteorological Service of Argentina for two case studies

ABSTRACT

This work seeks to evaluate the performance of high-resolution (4 km) probabilistic forecasts generated from the data assimilation and numerical forecasting system of the Argentinian National Meteorological Service (known by its Spanish acronym SAP.SMN), and to study the impact of the initial conditions considering forecasts initialized from regional (AReg) and global ensemble analyses (SAP.SMN-ENS). Two case studies were selected to analyze the performance of both forecasts, characterized by the development of deep convection and intense precipitation in central-eastern Argentina and Uruguay, which occurred on February 26-27 and March 6-7, 2022. To verify the probabilistic forecasts, data from the Satellite Quantitative Precipitation Estimation SQPE-OBS, maximum reflectivity from C-band radars, conventional stations, and radiosondes were used. In general terms, it can be considered that AReg showed better performance for case 1, while for the other case study it was SAP.SMN-ENS that had a better performance, indicating a significant impact of initial conditions on forecast performance. In both case studies, both experiments adequately represent convective systems compared to radar data, with certain differences in their position and intensity, resulting in an underestimation of accumulated precipitation in 24 hours in areas

Artículo en edición

of maximum precipitation estimated by SQPE-OBS. These results are encouraging regarding the inclusion of local observations in the initial condition of the high-resolution numerical forecasts of the SAP.SMN-ENS and motivate to continue advancing in the development of a regional data assimilation system that allows improving the accuracy of forecasts, investigating aspects such as the configuration and assimilation strategy.

Key words: Ensemble forecasting, Regional analyses, SAP.SMN.

1) INTRODUCCIÓN

El sudeste de Sudamérica, y en particular la región central de Argentina, se caracterizan por tener una elevada frecuencia de ocurrencia de fenómenos meteorológicos de alto impacto asociados a convección húmeda profunda, la cual se organiza frecuentemente en forma de sistemas convectivos de mesoescala (Zipser y otros, 2006). Estos sistemas convectivos representan en la región el 80% de la precipitación durante la estación cálida y producen distintos tipos de eventos de alto impacto como inundaciones, ráfagas de viento intensas, granizo y tornados (ej. Matsudo y Salio, 2011; Mezher y otros, 2012; Trapp, 2020; Bechis, 2022). Estos fenómenos pueden afectar considerablemente la integridad de la población y sus bienes, siendo necesario contar con pronósticos del tiempo precisos para anticipar y mitigar estos impactos.

Los pronósticos numéricos probabilísticos son una herramienta muy útil para obtener pronósticos de buena calidad, al cuantificar la incertidumbre asociada al carácter caótico de la atmósfera, ya que a partir de un conjunto (o ensamble) de condiciones iniciales ligeramente diferentes se pueden determinar algunas propiedades de la *función de distribución de probabilidad* (PDF, por sus siglas en inglés) de los posibles estados futuros del sistema atmosférico (Epstein, 1969). Para generar un pronóstico numérico probabilístico de buena calidad, es necesario contar con condiciones iniciales óptimas que pudieran representar lo más adecuadamente posible la evolución temporal de las propiedades de la PDF a medida que se incrementa el plazo de pronóstico. Para la obtención de condiciones iniciales óptimas uno de los métodos más utilizados en la actualidad consiste en emplear técnicas de asimilación de datos basadas en ensambles (Kalnay, 2003), como el filtro de Kalman por ensambles

Artículo en edición

(Evensen, 1994), ya que permiten generar un conjunto de perturbaciones dinámicamente consistentes que aportan información valiosa acerca de la incertidumbre del estado atmosférico. Además de considerar los errores presentes en las condiciones iniciales, es necesario considerar los errores de modelo. Una de las maneras es utilizando un ensamble multifísica, aprovechando las diferentes parametrizaciones disponibles en los modelos, con el fin de representar la incertidumbre de los mismos (ej. Bowler y otros, 2008; Berner y otros, 2011). En el sur de Sudamérica dicha técnica fue utilizada satisfactoriamente asimilando tanto observaciones simuladas (Saucedo (2016)) como observaciones reales (Dillon y otros (2021)). Otras maneras de representar los errores del modelo en un sistema de asimilación de datos por ensambles es mediante técnicas de inflación y localización, también abordadas previamente en nuestra región (ej. Saucedo (2016), Maldonado y otros, 2020).

En lo que respecta a la mesoescala y la escala convectiva, emplear modelos con resolución horizontal del orden del km resulta indispensable para mejorar el desempeño de los pronósticos numéricos (ej. Dillon y otros, 2013; Schumacher y otros, 2020), permitiendo que los procesos convectivos puedan ser resueltos en forma explícita y simulando de forma más adecuada los procesos involucrados en la iniciación y evolución de la convección. Asimismo, la utilización de pronósticos por ensambles en escala convectiva permite cuantificar la incertidumbre asociada a la evolución y desarrollo de las tormentas (Alvarez Imaz, 2022), lo que supone una ventaja respecto de los pronósticos determinísticos. Cabe destacar que un desafío actual del pronóstico por ensambles en escala convectiva está asociado a la elección del conjunto de condiciones iniciales, para lo cual los sistemas de asimilación de datos basados en ensambles y con alta resolución horizontal pueden aportar un enfoque interesante (Harnisch y Keil, 2015).

Hoy en día, en los centros meteorológicos mundiales, se procesan pronósticos numéricos globales tanto determinísticos como probabilísticos, con resoluciones horizontales de entre 5 y 25 km (Geer y otros, 2018; Magnusson y otros, 2022), y a su vez se ejecutan pronósticos numéricos regionales con resoluciones de entre 1.3 y 15 km (Gustafsson y otros, 2018). Un modelo regional puede complementar la información provista por un modelo global, principalmente en el caso de que la resolución horizontal empleada sea mayor, que tenga más

Artículo en edición

cantidad de miembros de ensamble (en caso de pronósticos probabilísticos), que haya ingerido más cantidad de observaciones o que se asimilen observaciones locales que el sistema global no incluye; siendo un desafío la representación de las condiciones de borde laterales, las cuales son imprescindibles e inevitables (Warner y otros, 1997). En la literatura se ha mostrado que, en general, los sistemas de reanálisis regionales resuelven mejor los procesos regionales de mesoescala en comparación a los reanálisis globales, extendiendo este resultado a los pronósticos inicializados con los mismos (He y otros, 2019 y trabajos citados allí; Su y otros, 2019). Por otro lado, Gustafsson y otros (2018) documentaron beneficios y mejoras en los sistemas de pronóstico regionales utilizados en varios centros operativos, cuando los mismos empleaban como condiciones iniciales datos provenientes de un sistema de asimilación regional en comparación con los provistos a partir de modelos globales.

Actualmente, en el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN), se encuentra implementado el Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico denominado SAP.SMN. El mismo utiliza el modelo *Weather Research and Forecasting* v4.0 (WRF; Skamarock y otros, 2019), y posee una componente operativa (Matsudo y otros, 2022) y una experimental (Maldonado y otros, 2022). Por un lado, de manera operativa se generan pronósticos probabilísticos en alta resolución (4 km) cuatro veces al día (SAP.SMN-ENS), utilizando como condiciones iniciales y de borde una combinación de los análisis y pronósticos del *Global Ensemble Forecasting System* (GEFS; Zhou y otros, 2017) y el *Global Forecasting System* (GFS) determinístico (Dillon y otros, 2020, NT 79). Por otro lado, la componente experimental consta de un sistema regional de asimilación de datos basado en ensambles, utilizando el método *Local Ensemble Transform Kalman Filter* (LETKF; Hunt y otros, 2007) acoplado con el modelo WRF (Miyoshi y Kunii, 2011), mediante el cual se generan 40 análisis horarios con 4 km de resolución horizontal. Estos análisis regionales se denominan SAP.SMN-ANA y constituyen un conjunto de condiciones iniciales que pueden ser utilizadas para generar pronósticos por ensambles en alta resolución.

El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño de los pronósticos probabilísticos en alta resolución en Argentina generados a partir de los análisis regionales SAP.SMN-ANA para dos casos de estudio. Para ello se analizará el impacto de la condición inicial en los pronósticos

Artículo en edición

probabilísticos considerando pronósticos inicializados a partir del SAP.SMN-ANA y los pronósticos del SAP.SMN-ENS, con el fin de indagar si el desempeño de los mismos mejora al utilizar condiciones iniciales provistas por análisis regionales en lugar de análisis globales. Esta evaluación contribuirá al continuo desarrollo del sistema regional de pronóstico numérico por ensambles basado en modelos numéricos de alta resolución y sistemas regionales de asimilación de datos del SMN.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

2.1) DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Para analizar el desempeño de los pronósticos probabilísticos de alta resolución se seleccionaron dos casos de estudio caracterizados por el desarrollo de convección húmeda profunda en el centro-este de Argentina y Uruguay, ocurridos el 26-27 de febrero (caso 1) y el 6-7 de marzo (caso 2) de 2022. La caracterización de las condiciones sinópticas de la región en ambos casos de estudio se realizó con los análisis del GFS, pertenecientes al National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

En el caso 1, el desarrollo de convección se produjo por el avance conjunto de un frente frío y un frente cálido, que se combinaron con la presencia de aire cálido, húmedo e inestable en el centro del país, proveniente de latitudes subtropicales a partir de la corriente en chorro de capas bajas de Sudamérica (Salio y otros, 2007). En la Figura 1a y 1b se pueden observar las condiciones sinópticas para las 18 UTC del 26/2. En 850 hPa, se encuentra la presencia de un frente cálido en el centro del país acompañado por la zona de convergencia de humedad, favoreciendo las condiciones de inestabilidad en esta región. Asimismo, en 500 hPa hay ubicada al sureste del país una vaguada, avanzando un frente frío ubicado en el norte de la Patagonia hacia el centro del país, potenciando las condiciones de inestabilidad. En las horas siguientes, el avance de una vaguada más intensa ubicada sobre el océano Pacífico en niveles medios propició el desplazamiento del frente frío hacia el noreste del país (no mostrado). Mediante observaciones de temperatura de brillo del canal 13 ($10.3 \mu\text{m}$) del satélite GOES-16 (Figura 2a y 2b), se puede observar a las 22 UTC del 26/2 la presencia de varias celdas convectivas en toda la región central (abarcando las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y sur de Córdoba), las cuales se van intensificando en su desplazamiento hacia el este (no

Artículo en edición

mostrado), organizándose finalmente a las 09 UTC del 27/2 en un intenso sistema convectivo de mesoescala (MCS, por sus siglas en inglés) que afectó principalmente el centro y norte de la provincia de Buenos Aires, el sur de Santa Fe y Entre Ríos, y Uruguay. Entre los fenómenos y daños ocasionados, se reportaron cortes de luz debido a la gran actividad eléctrica, caída de granizo chico y ráfagas de viento intensas con caída de árboles en la provincia de Buenos Aires, mientras que al sur de Entre Ríos y Santa Fe, se registraron anegamientos de calles e inundaciones.

El caso 2 se caracterizó por el desarrollo de sistemas convectivos asociados al avance de un frente frío desde el norte de la Patagonia hacia el sur del Litoral, y a la formación de una ciclogénesis al este de la provincia de Buenos Aires. Las condiciones sinópticas para las 18 UTC del 6/3 muestran una vaguada en 500 hPa sobre la cordillera de los Andes (Figura 1c), la cual va a impulsar el avance de un intenso frente frío en superficie desde el norte de la Patagonia hacia las provincias centrales. Mientras que se observa la presencia de viento norte hacia el centro del país en 850 hPa (Figura 1d), teniendo una convergencia de humedad sobre la región central y norte, con una intensificación de la corriente en chorro en 200 hPa (no mostrado). A partir de las imágenes satelitales puede observarse la nubosidad asociada al frente frío, al este de La Pampa y al centro-sur de Buenos Aires a las 04 UTC del 7/3 (Figura 2c). A las 11 UTC del 7/3 (Figura 2d), se puede ver la evolución y el avance de los sistemas en dirección noreste, con tormentas más generalizadas e intensas sobre el norte de Entre Ríos y centro de Santa Fe, mientras que hay nubosidad al este de la provincia de Buenos Aires asociada a la formación de una ciclogénesis. Entre los fenómenos y daños ocasionados por el avance del frente frío por la provincia de Buenos Aires y sur de Santa Fe, se reportaron ráfagas de viento intensas que provocaron voladuras de techos, caída de árboles y postes de luz. Asimismo, en el Partido de la Costa de Buenos Aires se registraron abundantes precipitaciones en poco tiempo (ej. 65 mm en 3 hs) que provocaron algunas inundaciones locales.

2.2) SISTEMA DE ASIMILACIÓN DE DATOS Y PRONÓSTICO NUMÉRICO

2.2.1) COMPONENTE EXPERIMENTAL: ANÁLISIS REGIONALES

Artículo en edición

Actualmente, el esquema experimental del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional (SAP.SMN) utiliza el sistema de asimilación de datos LETKF-WRF (SAP.SMN-ANA; Maldonado y otros, 2022). Este sistema permite generar en forma horaria un ensamble de 40 análisis regionales en un dominio que abarca el sur de Sudamérica (Figura 3). La retícula implementada utiliza una resolución horizontal de 4 km y la proyección Conforme de Lambert, con 1249 puntos de retícula en dirección latitudinal, 999 puntos en dirección longitudinal y 45 niveles sigma-p en el plano vertical con tope en 10 hPa.

El ensamble de análisis es generado a partir de la combinación de diferentes esquemas físicos para la representación de los procesos de microfísica y capa límite planetaria, y distintas condiciones de borde (Dillon y otros, 2020, NT 82). La variedad de parametrizaciones empleadas en el ensamble permite resolver los fenómenos de mesoescala de diferentes maneras, y así cuantificar la incertidumbre del análisis a partir de la dispersión de los miembros del ensamble. En la Tabla I se detallan las distintas combinaciones implementadas para cada miembro del ensamble. Las parametrizaciones de capa límite usadas son Mellor-Yamada-Janjic (MYJ; Janjic, 1994), Yonsei University (YSU; Hong, 2006) y Shin Hong (SH; Shin, 2015), mientras que las parametrizaciones de la microfísica utilizadas son WRF Single Moment Microphysics (WSM6; Hong y Lim, 2006) y el esquema de Purdue Lin (LIN; Chen, 2002), ambas de un momento y 6 especies de hidrometeoros. Para la capa superficial se usa el esquema MM5 (Jiménez y otros, 2012) para YSU y SH, y el esquema de similaridad Eta (Janjic, 2002) para MYJ. Respecto al modelo de suelo, se utiliza NOAH-MP de 4 capas (Niu y otros, 2011). La radiación se parametriza con RRTMG (Iacono y otros, 2008), tanto para onda corta como para onda larga. Cabe destacar que dada la resolución horizontal empleada por el modelo (i.e., 4 km), la convección es resuelta de forma explícita y no se utiliza una parametrización de cumulus. Para las condiciones de borde se utilizan campos perturbados de GFS de resolución 0.25° , los cuales se construyen añadiendo la anomalía de un miembro de GEFS de resolución 0.5° respecto a la media del ensamble. Los primeros 20 miembros del SAP.SMN-ANA usan los miembros 01 al 20 del GEFS ordenados, mientras que del miembro 21 al 40 se utilizan los miembros 20 al 01 del GEFS, es decir en orden inverso. Así, ninguna realización posee la misma combinación de esquemas físicos y la

Artículo en edición

misma condición de borde. La utilización de un ensamble multifísica y perturbaciones en las condiciones de borde son características que colaboran en la representación de la incertidumbre del modelo (Saucedo, 2016).

En este trabajo, el periodo de generación de análisis regionales empieza a las 18 UTC del día anterior al día de inicio del pronóstico probabilístico, de manera de tener 12 ciclos continuos previos al horario de inicio del pronóstico de interés, obteniéndose el primer análisis para el caso 1 (caso 2) a las 19 UTC del 25 de febrero (5 marzo) y el último a las 06 UTC del 26 de febrero (6 marzo) (Figura 4). Las fuentes de observaciones utilizadas son diez e incluyen datos de estaciones de superficie convencionales (ADPSFC) y automáticas (ADPAUT), barcos y boyas (SFCSHP-SFCBUY), radiosondeos (ADPUPA), aviones (AIRCFT), vientos derivados del satélite geoestacionario GOES-16 (G16DMW), perfiles de temperatura y humedad derivados del satélite de órbita polar Aqua (AIRSRT) y viento superficial sobre el océano a partir del satélite polar Metop-A (ASCATW), y reflectividad de radares de banda C (RADARC). Estas observaciones se asimilan durante una ventana temporal de una hora previa al tiempo del análisis, subdividida en 7 intervalos temporales (slots) centrados de 10 minutos, es decir utilizando un esquema 4D-LETKF (Dillon y otros, 2020, NT82). Se asimilan datos de las variables temperatura, humedad específica, humedad relativa, viento zonal, viento meridional, presión en superficie y reflectividad. Una descripción detallada de las fuentes de observación asimiladas en el sistema SAP.SMN-ANA puede encontrarse en Dillon y otros (2020, NT 82) y Dillon y otros (2021).

En la Figura 5 se muestran las observaciones asimiladas en el último ciclo de análisis (i.e, 06 UTC) para ambos casos de estudio, siendo este el análisis empleado para inicializar los pronósticos probabilísticos. Las observaciones asimiladas con menor densidad son las SFCSHP-SFCBUY, seguidas por las observaciones de AIRCFT que no presentan una gran cantidad. Considerando este horario, no hay observaciones de ADPUPA en nuestra región, ya que solamente están disponibles a las 00 UTC en el periodo utilizado. La mayor cantidad de observaciones asimiladas provienen de G16DMW seguidas por RADARC, superando las 32.000 y 16.000 observaciones, respectivamente, para este ciclo en particular para ambos casos de estudio. Los satélites AIRSRT y ASCATW al ser de órbita polar no presentan datos para todas las horas en la región, en particular para este horario sólo hay AIRSRT para el caso

Artículo en edición

1. Respecto a ADPAUT, presenta una mayor cantidad de observaciones respecto a ADPSFC, al tener una frecuencia de observación horaria, mientras que ADPSFC dispone de una frecuencia variable porque no todas las estaciones reportan durante las horas de la madrugada y/o reportan cada 3 o 6 horas, disminuyendo así la cantidad de datos disponibles. La ventaja de ADPSFC es que están distribuidas en todo el país, mientras que ADPAUT concentra la gran mayoría en la región centro. Para ambos casos de estudio, la cantidad de observaciones asimiladas de ADPAUT y ADPSFC son similares. La distribución espacial y temporal no homogénea de algunas de las observaciones podría impactar negativamente en la generación de los análisis desde el punto de vista teórico (Evensen, 2022). Sin embargo, cabe destacar que durante los 12 ciclos de asimilación, no se observaron incrementos sostenidos de los errores a lo largo del periodo de asimilación, calculados respecto del reanálisis ERA5 (Hersbach y otros, 2023) para las variables temperatura, humedad específica y viento (no se muestra). Esto indicaría que el sistema SAP.SMN-ANA tuvo un desempeño estable en ambos casos de estudio y por lo tanto, los análisis de las 06 UTC presentan la confianza suficiente para ser utilizados como condición inicial de los pronósticos a evaluar (Yañez, 2023).

2.2.2) COMPONENTE OPERATIVA: PRONÓSTICOS PROBABILÍSTICOS

El esquema operativo del SAP.SMN tiene una componente de pronóstico probabilístico que consiste en un ensamble de 20 miembros denominado SAP.SMN-ENS (Matsudo y otros, 2022). La configuración multifísica del ensamble es la misma que los miembros 01 al 20 de SAP.SMN-ANA (ver Tabla I). Cabe destacar que en la actualidad, las perturbaciones generadas a partir de la combinación de campos de pronóstico de GFS y GEFS no sólo se utiliza como condición de borde sino también como condición inicial. Es decir que, al momento de escribir este artículo, el SAP.SMN-ENS es un pronóstico regional ejecutado a partir de un modelo global que se nutre indirectamente de la asimilación de datos global, pero no posee asimilación de observaciones regionales como las que aportan los datos de radar (RADARC) o las estaciones de superficie automáticas (ADPAUT).

En este trabajo se realizaron 2 experimentos para cada caso de estudio con el fin de cumplir con los objetivos planteados. Por un lado, el experimento SAP.SMN-ENS que es el pronóstico por ensambles operativo generado actualmente por el SMN, y consiste en un pronóstico

Artículo en edición

probabilístico inicializado a partir de un ensamble de 20 análisis globales generado a partir de los datos de GFS y GEFS. Por otro lado, el experimento AReg que consiste en un pronóstico probabilístico inicializado a partir de un ensamble de 20 análisis regionales generados por el sistema de asimilación SAP.SMN-ANA. De esta forma, únicamente el experimento AReg cuenta con asimilación de datos regionales.

En ambos experimentos se generaron pronósticos horarios a 30 horas, inicializados a las 06 UTC del 26 de febrero de 2022 para el caso 1 y del 6 de marzo de 2022 para el caso 2. La configuración física de los 20 miembros del modelo coincide entre SAP.SMN-ENS y AReg. Sin embargo, para las condiciones de borde se utilizó la combinación de pronósticos globales GEFS y GFS inicializados a las 00 UTC para AReg (c.f., Figura 4) y a las 06 UTC en el experimento SAP.SMN-ENS. Esta diferencia se debe a la disponibilidad de los datos del modelo global en tiempo real, ya que se considera a AReg como una ejecución operativa (Dillon y otros, 2020, NT 82). Si bien el uso del modelo global inicializado a las 00 UTC podría degradar las condiciones de borde de AReg en comparación a usar el modelo global de las 06 UTC, simplemente por no estar actualizado, esta característica permite que AReg esté disponible hasta 2 horas antes que el SAP.SMN-ENS, lo cual sería muy beneficioso. Cabe destacar que un diseño similar se utilizó satisfactoriamente en Dillon y otros (2021) para un sistema regional ejecutado en tiempo real.

2.3) MÉTODOS DE VERIFICACIÓN

La verificación de los pronósticos probabilísticos de los experimentos SAP.SMN-ENS y AReg y su comparación se realizó utilizando diferentes fuentes de datos en el centro-este del país, región en donde se desarrollaron los sistemas precipitantes más intensos en ambos casos de estudio. En la Figura 3 se muestra la ubicación de dichas fuentes y el área elegida para evaluar los pronósticos.

Se evaluó la precipitación acumulada en 24 horas (PP24H) considerando el día pluviométrico definido entre las 12 UTC de un día y las 12 UTC del día siguiente. Para esto se utilizó la estimación cuantitativa de precipitación por satélite SQPE-OBS provista por el SMN (Hobouchian y otros, 2021). Esta estimación es una buena representación de la precipitación

Artículo en edición

en la región, al tener una cobertura homogénea en una retícula con una resolución espacial de 0.1° y temporal de 24 horas. Consiste en un ajuste pluviométrico de la estimación *IMERG early run* (IMERG-ER; Huffman y otros, 2020) a partir de las estaciones convencionales del SMN y de los países limítrofes, sumando estaciones meteorológicas automáticas del SMN y de terceros, siendo así un producto con valor regional agregado. Además del SQPE-OBS, se utilizaron los datos de precipitación acumulada de las estaciones convencionales del SMN y de los países limítrofes (Uruguay y sur de Brasil). Como los pronósticos realizados son a 30 horas, empezando a las 06 UTC, se excluyeron las primeras 6 horas del pronóstico de precipitación acumulada del modelo para que sean comparables con ambos conjuntos de datos. Además, los datos del modelo fueron interpolados a la retícula regular del SQPE-OBS, utilizando una interpolación lineal mediante la función `griddata` de la librería `scipy.interpolate` de Python.

Asimismo, se realizó un análisis estadístico de la PP24H utilizando el estadístico *Fractional Skill Score* (FSS; Roberts y Lean, 2008), considerando umbrales de 1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 y 70 mm. Este estadístico indica el desempeño del pronóstico en distintas escalas espaciales al considerar un área alrededor de los puntos de retícula, permitiendo reducir los errores asociados a escalas menores producto del desfasaje espacial entre el campo pronosticado y observado. Se utilizaron áreas cuadradas considerando entre 1 y 10 puntos de retícula de lado con resolución 0.1° (es decir, entre 10 - 100 km de lado, aproximadamente). Este estadístico se calculó para cada miembro del ensamble y luego se obtuvo el valor medio de FSS. Los valores del mismo varían entre 0 y 1, siendo 1 para el caso de un pronóstico perfecto.

Para analizar el desplazamiento y ubicación de los sistemas precipitantes se utilizó la reflectividad máxima en la columna (COLMAX). Se utilizaron los datos de reflectividad provenientes del sistema de radares meteorológicos de banda C de Argentina, luego de ser sometidos a un control de calidad que permite eliminar ecos no meteorológicos e interferencias (Arruti, 2021). Para obtener los datos de COLMAX se utilizó el paquete PyART (Hellmus y Collis, 2016). Se consideraron solamente los radares que incluyen en su rango máximo de 240 km la zona centro-este del país donde se evalúan los pronósticos (ver Fig. 3).

Artículo en edición

A partir del análisis de la precipitación acumulada y de la evolución de los sistemas precipitantes en cada caso de estudio, se seleccionaron estaciones convencionales del SMN en puntos de interés (ver Fig. 3) en donde se encontraron diferencias en los pronósticos. Las estaciones son Benito Juárez Aero (37.70°S y 59.78°O) y Nueve de Julio Aero (35.43°S y 60.88°O), para las cuales se realizaron meteogramas para evaluar el entorno de superficie pronosticado por el modelo, considerando las siguientes variables: temperatura a 2 metros (T2m), temperatura de rocío a 2 metros (Td2m) y presión de superficie (PSFC).

Con el fin de estudiar el desempeño de los pronósticos en la representación de la estructura vertical termodinámica, se emplearon datos de radiosondeos de la estación de Ezeiza (34.82°S y 58.55°O , ver Fig. 3) perteneciente a la provincia de Buenos Aires, correspondientes a las 12 UTC del 26 de febrero para el caso 1 y del 6 de marzo para el caso 2. Se consideraron las variables temperatura (T) y temperatura de rocío (Td) en 19 niveles de presión. Para compararlos, se utilizaron los datos del modelo promediados en una caja de 3 x 3 puntos de retícula centrada en el punto de retícula más cercano a la ubicación de la estación de forma tal de considerar el desplazamiento horizontal del instrumento durante su ascenso producto del viento.

Cabe destacar que a lo largo de la verificación de los pronósticos probabilísticos se muestra la media y dispersión del ensamble, la probabilidad de ocurrencia y el rango de las distintas variables a partir de los miembros del ensamble, con el fin de realizar el mejor uso posible del gran volumen de información generado.

3) RESULTADOS

Los resultados de ambos casos se presentan en conjunto, empezando primero con el caso de estudio del 26-27 de febrero de 2022 y en segundo lugar con el caso del 6-7 de marzo de 2022. Se hace hincapié en la comparación entre los pronósticos AReg, inicializados a partir de análisis regionales, y los pronósticos SAP.SMN-ENS, inicializados a partir de un modelo global que no incluye análisis regionales.

Artículo en edición

3.1) EVALUACIÓN DE LA PP24H

La PP24H, entre las 12 UTC del 26/2 y las 12 UTC 27/2, en las estaciones convencionales, la estimada por el SQPE-OBS y la obtenida por la media del ensamble de los pronósticos, junto a la dispersión de los miembros del ensamble (spread) para SAP.SMN-ENS y AReg se muestra en la Figura 6. La media del ensamble de los pronósticos AReg y SAP.SMN-ENS (Figura 6c y 6d) presenta valores menores a 70 mm en el área de máxima precipitación ubicada en el noreste de Buenos Aires, sur de Santa Fe, sur de Entre Ríos y sudeste de Uruguay, mientras que la estimación SQPE-OBS y las observaciones de superficie (Figura 6a y 6b) alcanzan valores mayores a 70 mm. Por ejemplo, Gualeguaychú Aero (Entre Ríos) registró 110 mm en 24 horas. Esta área de máxima precipitación se encuentra mejor representada en la media de SAP.SMN-ENS. También se encuentra presente en el SQPE-OBS un área de máxima precipitación que supera los 100 mm ubicada al noroeste de Buenos Aires, para la cual la media del ensamble de ambos pronósticos presenta valores mucho menores, del orden de entre 10 y 20 mm. En cambio, en la zona de precipitación observada que se encuentra al sureste de Buenos Aires y al este sobre el océano, si bien la media de ambos ensambles subestimaron lo observado por el SQPE-OBS, el pronóstico AReg presenta mayores valores que SAP.SMN-ENS, aproximándose así mejor a lo observado. Cabe destacar que las regiones de máxima precipitación de los pronósticos están asociadas a los mayores valores de spread dado que son zonas más difíciles de pronosticar y por lo tanto, la incertidumbre en el pronóstico es mayor. En particular, el spread (Figura 6e y 6f) en la región de máxima precipitación toma valores cercanos a 50 mm, presentando en ambos pronósticos valores similares en el sur de Entre Ríos y sur de Santa Fe, indicando que algún miembro pudo pronosticar 100 mm de precipitación acumulada. En la provincia de Buenos Aires, los mayores valores de spread se ubican al noroeste en SAP.SMN-ENS y hacia el este en AReg.

La PP24H, entre las 12 UTC del 6/3 y las 12 UTC 7/3 se muestra en la Figura 7. El máximo de precipitación acumulada observada en estaciones convencionales y estimada a partir de datos satelitales SQPE-OBS (Figura 7a y 7b) se encuentra en la parte suroeste de Buenos Aires alcanzando los 90 mm, región en la que ambas simulaciones (Figura 7c y 7d) presentan una media de ensamble menor a 40 mm. Asimismo, se observan máximos relativos en la región centro-este de la provincia de Buenos Aires (aproximadamente en 36°S y 59.5°O, y en

Artículo en edición

36.5°S y 58.2°O), con acumulados entre 60 y 80 mm, en donde la media del ensamble del pronóstico AReg presenta mayor coincidencia, mientras que SAP.SMN-ENS presenta valores por debajo de los 40 mm. En el centro de Santa Fe aparece otro máximo relativo en la observación y estimación SQPE-OBS, cercano a 60 mm, pero en ambos pronósticos hay una sobreestimación de la precipitación acumulada con un máximo de entre 50 y 80 mm en un área mayor y desplazada al este de Santa Fe, abarcando el centro de Entre Ríos y Uruguay. Analizando el spread (Figura 7e y 7f) de la precipitación acumulada, se puede ver que ambos pronósticos presentan valores altos cercanos a 50 mm para el sistema precipitante al norte del dominio, mientras que para el sistema precipitante al sur del dominio, el pronóstico AReg presenta un spread cercano a 40 mm a diferencia de SAP.SMN-ENS que presenta valores menores a 30 mm.

A su vez, se analizó en la Figura 8 la media de los miembros que usan la misma parametrización de microfísica WSM6 y LIN, obteniendo para los pronósticos SAP.SMN-ENS y AReg en el caso 1 (Figura 8a, 8b, 8c y 8d) que LIN genera precipitación acumulada más intensa que WSM6 en el norte de Buenos Aires. Respecto al caso 2 (Figura 8e, 8f, 8g y 8h), en ambos pronósticos LIN genera precipitación acumulada más intensa en el norte del dominio, sobreestimando lo observado en mayor medida que WSM6. Respecto al posicionamiento e intensidad de los sistemas precipitantes de la provincia de Buenos Aires, se observa que en este caso las diferencias dependen más de los experimentos AReg y SAP.SMN-ENS, que de las parametrizaciones de microfísica utilizadas, sugiriendo que las condiciones iniciales tuvieron más impacto en el desarrollo de los sistemas que las parametrizaciones físicas. Considerando los miembros que usan la misma parametrización de capa límite planetaria MYJ, SH y YSU (no mostrado), en ambos casos se obtiene que MYJ es la cual genera precipitación acumulada más intensa y más espaciada horizontalmente (sobreestimando en mayor medida en el caso 2), en ambos experimentos.

En la Figura 9 se muestra la probabilidad de PP24H mayor a 20 mm para el pronóstico SAP.SMN-ENS (columna 1), AReg (columna 2) y la diferencia entre ellos (columna 3), válido para las 12 UTC del 27 de febrero y para las 12 UTC del 7 de marzo. También se superpone la PP24H equivalente a 20 mm estimada por SQPE-OBS en todos los paneles, con

Artículo en edición

finés comparativos. En el primer caso (Figura 9a, 9b y 9c), al comparar con la precipitación estimada por SQPE-OBS, se observa que los valores de probabilidad de AReg muestran una mejor coincidencia que los de SAP.SMN-ENS al sur y sudeste de Buenos Aires, y en el mar Argentino, indicando así que la precipitación acumulada en esta área está mejor pronosticada por los miembros del ensamble de AReg. A su vez, la zona de mayor probabilidad de AReg, con valores superiores al 50%, se extiende al centro de Uruguay y hacia el sur de Córdoba, en consonancia con la estimación de precipitación (ver sombreado verde en el panel de diferencias). Sin embargo, SAP.SMN-ENS alcanza los valores de probabilidad más altos entre el norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe, sur de Entre Ríos y sureste de Uruguay (ver sombreado violeta en el panel de diferencias). En el segundo caso (Figura 9d, 9e y 9f), se puede observar que ambos pronósticos en Santa Fe, Entre Ríos y Uruguay presentan valores de probabilidad altos cercanos al 100%, siendo en general mayor para AReg, como puede verse en los valores positivos sombreados en verde en el panel de diferencia entre los pronósticos. Sin embargo, ambos pronósticos sobreestiman la precipitación respecto de la estimación SQPE-OBS, la cual abarca áreas más acotadas espacialmente. En el centro-este de Buenos Aires, los valores más altos de probabilidad coinciden mejor en el pronóstico AReg, mientras que en el área sur del sistema se posiciona mejor la probabilidad de SAP.SMN-ENS. En particular, en la región suroeste de Buenos Aires y en La Pampa, la extensión del área más probable es mayor en el pronóstico SAP.SMN-ENS, como se ve en los valores negativos sombreados en violeta.

Mediante un análisis estadístico de la PP24H considerando el FSS para evaluar la misma en distintas escalas espaciales y umbrales, en la Figura 10 se muestra el valor medio del estadístico para los pronósticos SAP.SMN-ENS (columna 1) y AReg (columna 2), y la diferencia entre ambos (columna 3). El comportamiento esperable para este estadístico es que sea cercano a 1 cuanto mayor sea la escala espacial y cuanto menor sea el umbral, siendo un pronóstico útil a partir del valor de 0.5 (Roberts y Lean, 2008). En el caso 1 (Figura 10a, 10b y 10c), el pronóstico AReg presenta mejor desempeño que SAP.SMN-ENS hasta umbrales de 30 mm y escalas superiores a 60 km, y para umbrales de 40 mm y escalas superiores a 90 km (con diferencias del orden de 10^{-2} y 10^{-1}). Para umbrales más grandes de 50 y 70 mm, es mejor el desempeño del pronóstico SAP.SMN-ENS, aunque ambos pronósticos presentan

Artículo en edición

valores bajos del estadístico. En el caso 2 (Figura 10d, 10e y 10f), el FSS indica que ambos pronósticos tienen un comportamiento más similar (las diferencias siempre son del orden de 10-2), mostrando siempre mejores resultados el pronóstico SAP.SMN-ENS a excepción del umbral de 50 mm. Igualmente, para umbrales superiores a 40 mm, ambos pronósticos presentan valores de FSS bajos para todas las escalas espaciales, lo cual indica un mal desempeño de los pronósticos para representar núcleos precipitantes más intensos.

En resumen, se encontró que en ambos casos hay una subestimación en la zona de máxima precipitación estimada por el SQPE-OBS (norte de Buenos Aires en el caso 1 y suroeste de esa provincia en el caso 2), estando la media del ensamble de SAP.SMN-ENS más cercana a lo estimado que AReg para el caso 1 y al revés para el caso 2. Esta subestimación ocurre porque estas regiones de máxima precipitación están asociadas a los mayores valores de spread dado que son zonas más difíciles de pronosticar y por lo tanto, la incertidumbre en el pronóstico es mayor. Analizando las parametrizaciones de microfísica y capa límite, ambos casos muestran que las precipitaciones más intensas se obtienen al usar los esquemas de LIN y MYJ, respectivamente. Asimismo, los pronósticos probabilísticos de precipitación mostraron que para el caso 1 el pronóstico AReg presentó un mejor desempeño, destacándose en el sudeste de Buenos Aires y al este sobre el océano. En el caso 2, el pronóstico SAP.SMN-ENS tiene un mejor desempeño sobre la precipitación acumulada al sur de Buenos Aires, mientras que AReg lo hace en el centro-este de dicha provincia. A partir del análisis estadístico de la PP24H utilizando el FSS, para el caso 1 se encontró que para los umbrales más bajos el desempeño del pronóstico AReg es mejor, mientras que para umbrales más grandes empieza a ser mejor el de SAP.SMN-ENS, aunque la diferencia es pequeña entre ambos. Para el caso 2, SAP.SMN-ENS presenta un mejor desempeño para los umbrales bajos, mientras que para umbrales más altos ambos pronósticos son menos eficientes, al tener una fuerte sobreestimación de la precipitación.

A modo exploratorio, se compararon los campos de PP24H pronosticados por el GFS inicializado a las 00 y 06 UTC con los de los experimentos y los estimados por SQPE-OBS, para ambos casos (no mostrado). Para el caso 1 se vio que el área de precipitación más intensa estuvo mejor ubicada en la inicialización de GFS de las 06 UTC, mientras que los máximos

Artículo en edición

en el sudeste de Buenos Aires fueron mejor representados por la inicialización de GFS de las 00 UTC. Esto muestra una concordancia con la comparación del desempeño entre el SAP.SMN-ENS y el AReg, cuyas condiciones iniciales y de borde se basan en los pronósticos globales inicializados a las 06 y 00 UTC, respectivamente (ver sección 2.2.2). Para el caso 2 se observó que los máximos en el centro este de Buenos Aires fueron mejor representados (aunque con menor intensidad) por el GFS inicializado a las 00 UTC, coincidiendo con el desempeño de AReg. A su vez, se identificó que ninguno de los GFS representó adecuadamente el sistema intenso desarrollado en el sudoeste de Buenos Aires, lo cual puede haber influido negativamente en el desempeño de ambos experimentos. Si bien hay que tener en cuenta que las condiciones iniciales y de borde de los modelos regionales no son exactamente el GFS, sino perturbaciones del GFS (ver sección 2.2.2), este análisis sugiere que la influencia de los campos globales puede ser considerable, dependiendo del caso.

3.2) EVALUACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD

En la Figura 11 se muestra la probabilidad de COLMAX mayor a 15 dBZ para el ensamble del SAP.SMN-ENS (columna 1) y AReg (columna 2) en ambos casos de estudio. A las 22 UTC del 26/2 (Figura 11a y 11b), los sistemas convectivos que se observan al noreste de Buenos Aires (en la intersección de los radares de Pergamino y Ezeiza) coinciden mejor con los valores más probables del pronóstico AReg que los de SAP.SMN-ENS. De la misma manera, el sistema formado al noroeste y sureste de Buenos Aires coincide con los mayores valores de probabilidad de AReg. Para las 09 UTC del 27/2 (no se muestra), ambos pronósticos presentan valores altos de probabilidad, mayores al 70%, para el sistema formado al norte de Buenos Aires, aunque la extensión de la zona de mayor probabilidad es más grande que el área contenida por la observación y se encuentra más desplazada hacia el este en SAP.SMN-ENS y hacia el norte en AReg.

En el caso 2 para las 04 UTC del 7/3 (Figura 11c y 11d), el pronóstico SAP.SMN-ENS presenta los valores más probables para las celdas ubicadas al oeste de Buenos Aires, mientras AReg lo hace para las ubicadas al este de dicha provincia. En el norte del dominio analizado, ambos pronósticos presentan valores de probabilidad entre 30 y 70%, mientras que no se observan grandes sistemas convectivos dentro del rango de los radares disponibles. A las 11 UTC del 7/3 (no mostrado) se observan valores de probabilidad altos en una región extensa al

Artículo en edición

norte del dominio que presentan coincidencia con los sistemas convectivos observados por el radar de Paraná, siendo SAP.SMN-ENS el que presenta más coincidencia, mientras que AReg está un poco más desplazado hacia el norte. Al este de Buenos Aires sobre el mar Argentino, el pronóstico SAP.SMN-ENS presenta mejor coincidencia con los sistemas convectivos observados por el radar de Mar del Plata que AReg, el cual presenta los valores más probables más desplazados al este.

Concluyendo, se destaca que en ambos pronósticos se logra representar los sistemas convectivos observados, aunque hay ciertas diferencias en la posición e intensidad de los mismos. Para el caso 1, en general los sistemas están mejor representados por el pronóstico AReg. En cambio, para el caso 2 el pronóstico AReg mostró un mayor desplazamiento hacia el noreste del sistema asociado al avance del frente frío, posiblemente asociado a una circulación en niveles bajos caracterizada por vientos del sudoeste más intensos en AReg que en SAP.SMN-ENS, al considerar las condiciones sinópticas pronosticadas por el modelo (no mostrado). El desfase entre los sistemas observados y pronosticados se podría atribuir por un lado a un desfase inicial en la representación de los sistemas (debido a una distribución no-homogénea de las observaciones asimiladas) y por otro lado a una disminución del impacto de las observaciones asimiladas a medida que transcurren los plazos del pronóstico.

3.3) EVALUACIÓN DEL ENTORNO DE SUPERFICIE

Los meteorogramas para evaluar el desempeño de los pronósticos SAP.SMN-ENS y AReg en la representación del entorno de superficie de las variables T2m, Td2m y PSFC, se muestran en la Figura 12. Dadas las diferencias encontradas en el caso 1 entre ambos pronósticos en la región sudeste de la provincia de Buenos Aires, a partir de los campos de PP24H y de reflectividad máxima, se analizó el desempeño de los pronósticos utilizando los datos de la estación convencional de superficie Benito Juárez Aero (37.70°S y 59.78°O, ver Fig. 3), la cual tiene una frecuencia de observación de 6 horas. Tanto T2m como Td2m (Figura 12a y 12c) están, en general, mejor representadas por la media del ensamble del pronóstico AReg. En particular, el pronóstico AReg logra representar la saturación observada a las 00 UTC del 27 de febrero (plazo de pronóstico de 18 horas), lo que podría ser consistente con un mejor desempeño de la precipitación acumulada en dicha región. En cambio, para el pronóstico

Artículo en edición

SAP.SMN-ENS, la saturación ocurre más adelante en el tiempo (alrededor del plazo de pronóstico de 25 horas, para la media del ensamble) y los valores de temperatura pronosticados se encuentran cercanos al borde del rango de variabilidad de los miembros del ensamble, determinado por el valor máximo y mínimo entre los miembros del ensamble (sombreado en la Fig. 12). Para la PSFC (Figura 12b y 12d), la media del ensamble de AReg coincide mejor en los plazos de pronóstico 6 y 12 con lo observado respecto de SAP.SMN-ENS, mientras que para los plazos de 18 y 30 horas, la media del ensamble de ambos pronósticos sobreestima lo observado.

El meteograma de la estación Nueve de Julio Aero ubicada en 35.43°S y 60.88°O en el centro de Buenos Aires (ver Fig. 3), resulta un punto de interés a partir de lo analizado en los campos de PP24H y reflectividad máxima previamente mostrados para el caso 2. Esta estación presenta una frecuencia de medición trihoraria con un faltante de datos entre los plazos de pronóstico 0-6 y 18-30 horas. Para la T2m (Figura 12e y 12g), en general los valores observados están dentro del rango de variabilidad de ambos ensambles, siendo la media del ensamble del pronóstico SAP.SMN-ENS la que mejor se aproxima. En la Td2m (Figura 12e y 12g), el pronóstico AReg representa mejor su evolución que SAP.SMN-ENS, con la media del ensamble mucho más cercana a los valores observados y con un rango de variabilidad mucho menor. En particular, AReg tiene un buen desempeño en los plazos de pronóstico de 6, 15 y 18 horas, mientras que SAP.SMN-ENS lo tiene en el plazo de 30 horas. Para los plazos restantes, ambos pronósticos subestimaron la Td2m observada y no se encuentra incluida dentro del rango de variabilidad del ensamble. En general, el pronóstico SAP.SMN-ENS representa mejor la caída de la PSFC (Figura 12f y 12h) entre los plazos de 6-15 horas, dado que AReg tiende a subestimar lo observado. Sin embargo, ambos pronósticos fueron eficientes en representar el aumento de la presión observada hacia el final del pronóstico.

Resumiendo, los meteogramas realizados para evaluar el entorno de superficie para el caso 1 mostraron que en general las variables analizadas están mejor representadas por el pronóstico AReg. En particular, la T2m y la Td2m en AReg logran representar mejor la saturación observada en la estación Benito Juárez, lo cual puede relacionarse con el mejor desempeño visto sobre la precipitación acumulada en el sudeste de Buenos Aires. Para el caso 2, hay una

Artículo en edición

mejor representación de SAP.SMN-ENS para la T2m y PSFC, mientras que AReg muestra un mejor desempeño para la Td2m.

3.4) EVALUACIÓN DEL PERFIL VERTICAL TERMODINÁMICO

En busca de evaluar el desempeño de los pronósticos en la representación del perfil vertical termodinámico de la atmósfera, se utilizaron los datos de radiosondeos de las variables T y Td de Ezeiza Aero (Figura 13). A las 12 UTC del 26 de febrero (Figura 13a y 13b), se puede observar que en general la T para ambos pronósticos es similar a la temperatura observada en el radiosondeo, presentando mínimas diferencias cerca de superficie, en donde es mejor el desempeño de SAP.SMN-ENS, y en el nivel de 200 hPa, en donde lo es el de AReg. Para la Td en niveles bajos, el pronóstico AReg coincide mejor con lo observado por el radiosondeo. En niveles medios, si bien las simulaciones no logran representar el perfil húmedo observado, el rango que abarca el ensamble de AReg se aproxima más a la observación que el de SAP.SMN-ENS. El rango de variabilidad del ensamble para la T es pequeño en comparación con el de la Td, no habiendo así mucha dispersión entre los miembros del ensamble en ambos pronósticos para la T. Cabe destacar que para esta hora se observan algunas nubes bajas sin mucho desarrollo vertical ya que los sistemas convectivos más intensos se desarrollaron en horas de la tarde, siendo un entorno inestable propicio para el desarrollo de convección húmeda profunda.

A las 12 UTC del 6 de marzo (Figura 13c y 13d) se puede observar que para la T en niveles medios y bajos, la media del ensamble de ambos pronósticos presenta coincidencia con lo observado, pero cerca de superficie no logran representar la inversión térmica presente. En niveles altos, entre 300 y 200 hPa, ambos pronósticos subestimaron la T observada, siendo SAP.SMN-ENS el que mejor se aproxima. Para la Td, en líneas generales, el perfil de SAP.SMN-ENS es mejor que el de AReg considerando tanto la media del ensamble como su rango de variabilidad. En particular, en niveles bajos y medios, la media de ambos ensambles sobreestima la Td observada. Cabe destacar que en este tiempo existe presencia de nubosidad baja cerca de la estación, mientras que el sistema convectivo se forma en la madrugada del día siguiente por el avance del frente frío. En particular, el perfil vertical observado resulta menos inestable que el representado por ambos pronósticos.

Artículo en edición

En general para ambos casos, el perfil de T presenta pocas diferencias con el perfil observado por los radiosondeos, aunque éstas pueden ser relevantes en niveles bajos cercanos a superficie, en especial en el caso 2 en donde no se simula una inversión térmica. En cuanto a la representación de la humedad, se encontraron marcadas diferencias en los perfiles de Td, teniendo mejor desempeño para el caso 1 el pronóstico AReg y para el caso 2 el de SAP.SMN-ENS. Si bien la dispersión más pequeña en el perfil de T, en comparación con el de Td, fue observada previamente con el modelo WRF en la región (Alvarez Imaz, 2022), se considera necesario indagar en un futuro la causa de la misma utilizando por ejemplo otras parametrizaciones físicas y/o condiciones de borde.

4) CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el desempeño de los pronósticos probabilísticos en alta resolución (4 km) generados a partir del SAP.SMN y se analizó el impacto de la condición inicial en los mismos, considerando pronósticos inicializados a partir de un ensamble de análisis regionales (pronósticos AReg) y uno de análisis globales (pronósticos SAP.SMN-ENS). Se analizó el desempeño de ambos tipos de pronósticos en 2 casos de estudio caracterizados por el desarrollo de convección húmeda profunda y precipitación intensa sobre el centro-este de Argentina y Uruguay, ocurridos el 26-27 de febrero (caso 1) y el 6-7 de marzo (caso 2) de 2022.

En líneas generales, se puede considerar que AReg mostró un mejor desempeño para el caso 1 y SAP.SMN-ENS lo hizo en el caso 2, indicando un impacto significativo de las condiciones iniciales en el desempeño del pronóstico. La calidad de los análisis AReg depende de la cantidad y tipo de observaciones asimiladas. En el caso 2, AReg asimila una menor cantidad de datos AIRSRT y RADARC que en el caso 1, principalmente en el sur de la provincia de Buenos Aires y en el norte de La Pampa, los cuales son fundamentales en nuestra región para mejorar las condiciones termodinámicas del entorno y capturar la estructura tridimensional de los sistemas convectivos (Dillon 2019, Maldonado 2023). Cabe destacar que en el caso 2 ambos pronósticos fallan en la simulación del sistema ubicado al norte del dominio, indicando

Artículo en edición

un rol importante de la física y dinámica del modelo WRF en el desarrollo de los sistemas precipitantes.

Algunos aspectos en común que se pueden resaltar en ambos casos de estudio son:

- Subestimación de PP24H en la zona de máxima precipitación estimada por el SQPE-OBS, considerando la media del ensamble de pronósticos.
- Las precipitaciones más intensas se obtienen al usar los esquemas de microfísica de LIN y de capa límite MYJ.
- A partir de los datos de radar, se destaca que en ambos experimentos se logran representar los sistemas convectivos observados, aunque hay ciertas diferencias en la posición e intensidad de los mismos.
- En la evaluación del perfil termodinámico, las mayores diferencias se encontraron en la representación de la humedad en toda la vertical y de la temperatura cerca de la superficie.

Si bien no es posible concluir en forma unívoca que el pronóstico SAP.SMN-ENS o el pronóstico AReg presenta un mejor desempeño respecto al otro considerando las variables y casos de estudio analizados, los resultados obtenidos resultan alentadores respecto de la inclusión de observaciones locales en la condición inicial de los pronósticos numéricos en alta resolución del SAP.SMN y motivan a seguir avanzando en el desarrollo de un sistema regional de asimilación de datos que permita mejorar la precisión de los pronósticos. En este sentido, resulta de interés analizar el impacto individual de cada fuente de observación asimilada, como así también incluir nuevos tipos de observaciones [por ejemplo datos de *Global Navigation Satellite System* (GNSS) o de viento *Doppler* de radar]. También es de interés estudiar otros diseños del sistema de asimilación de datos respecto al uso de ciclos parciales (como en este trabajo) o continuos, para asegurar que los pronósticos en alta resolución se beneficien tanto del sistema regional como del modelo global (Schwartz y otros, 2022). Por último, resulta fundamental avanzar en una evaluación del sistema durante un periodo más largo que permita obtener estadísticos más robustos y que abarque un mayor número de casos de estudio. En esta dirección, se destaca la necesidad de evaluar la calidad del ensamble mediante histogramas de rangos para estudiar su confiabilidad, diagramas de

Artículo en edición

desempeño con el fin de mostrar la relación entre las medidas de verificación categóricas (Roebber, 2009), y el índice Brier y sus componentes de confiabilidad, resolución e incertidumbre (Wilks, 1995), entre otros, para un mejor entendimiento del sistema SAP.SMN.

Agradecimientos: Al Servicio Meteorológico Nacional y al proyecto CyT Alerta por la adquisición del HPC en donde se ejecutaron los pronósticos. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto PICT 2018-03202.

REFERENCIAS

Alvarez Imaz, M., 2022: Estudio del impacto de la configuración del modelo WRF en pronósticos determinísticos y probabilísticos para un caso de iniciación de la convección en las Sierras de Córdoba, Argentina. Tesis doctoral, FCEyN, UBA.

https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n7211_AlvarezImaz.pdf

Arruti, A., P. Maldonado, M. Rugna, M. Sacco, J. Ruiz, L. Vidal, 2021: Sistema de control de calidad de datos de radar en el Servicio Meteorológico Nacional - Parte I: Descripción del algoritmo. Nota Técnica SMN 2021-86. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1537>.

Bechis, H., V. Galligani, M.A. Imaz, M. Cancelada, I. Simone, F. Piscitelli, P. Maldonado, P. Salio, S. Nesbitt, 2022: A case study of a severe hailstorm in Mendoza, Argentina, during the relampago-cacti field campaign. Atmospheric Research 271, 106127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106127>.

Berner, J., S.Y. Ha, J.P. Hacker, A. Fournier, C. Snyder, 2011: Model uncertainty in a mesoscale ensemble prediction system: Stochastic versus multiphysics representations. Mon. Wea. Rev. 139, 1972–1995. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010MWR3595.1>.

Bowler, N.E., A. Arribas, K.R. Mylne, K.B. Robertson, S.E. Beare, 2008: The MOGREPS short-range ensemble prediction system. Q. J. R. Meteorol. Soc. 134, 703–722. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.234>.

Artículo en edición

Chen, S.H. and W.Y. Sun, 2002: A one-dimensional time dependent cloud model. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 80(1), 99–118. DOI: <https://doi.org/10.2151/jmsj.80.99>.

Dillon, M.E., y coautores, 2021: A rapid refresh ensemble based data assimilation and forecast system for the RELAMPAGO field campaign. *Atmos. Res.* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105858>.

Dillon, M.E., C. Matsudo, Y. García Skabar, M. Sacco y M. Alvarez Imaz, 2020: Implementación del sistema de pronóstico numérico en el HPC: Configuración del ensamble. Nota Técnica SMN 2020-79. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1403>.

Dillon, M.E., García Skabar, Y., Kalnay, E., Ruiz, J. y Collini, E., 2019: Sensibilidad de un sistema de asimilación de datos por ensambles a diferentes configuraciones, implementado en el sur de Sudamérica. *Revista Meteorológica*, V. 44 No.2, P. 15-34, 2019.

Dillon, M.E., Y. Garcia Skabar, M. Nicolini, 2013: Desempeño del pronóstico de modelos de alta resolución, en un área limitada: análisis de la estación de verano 2010-2011. *Meteorológica*, 38(2), 69-89.

Epstein, E.S., 1969: Stochastic-dynamic prediction. *Tellus*, 21, 739-759. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1969.tb00483.x>.

Evensen, G. F.C. Vossepoel, P.J. van Leeuwen, 2022: *Data Assimilation Fundamentals*, Springer. DOI: [10.1007/978-3-030-96709-3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96709-3).

Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, *J. Geophys. Res.*, 99, 143-162. DOI: <https://doi.org/10.1029/94JC00572>.

Geer, A.J., y coautores, 2018: All-sky satellite data assimilation at operational weather forecasting centres. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 144, 1191–1217.

Artículo en edición

DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3202>.

Gustafsson, N., y coautores, 2018: Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 144, 1218–1256.

DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3179>.

Harnisch, F. and C. Keil, 2015: Initial conditions for convective-scale ensemble forecasting provided by ensemble data assimilation, *Mon. Wea. Rev.*, 143, 1583-1600. DOI:

<https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00209.1>.

He, J., y coautores, 2019: Development and Evaluation of an Ensemble-Based Data Assimilation System for Regional Reanalysis Over the Tibetan Plateau and Surrounding Regions. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(8), 2503–2522. DOI:

<https://doi.org/10.1029/2019MS001665>.

Helmus, J. and Collis, S., 2016: The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a library for working with weather radar data in the Python programming language. *Journal of Open Research Software*, 4 (1). DOI: <http://doi.org/10.5334/jors.119>.

Hersbach, H., y coautores, 2023: ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: [10.24381/cds.bd0915c6](https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6).

Hong, S.Y., and J.O.J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.

Hong, S.Y., Y. Noh, J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>.

Artículo en edición

Hobouchian, M.P., y coautores, 2021: Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1694>.

Huffman, G.J., y coautores, 2020: Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). Satellite Precipitation Measurement. Advances in Global Change Research, 67, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_19.

Hunt, B.R., E.J. Kostelich, I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. Phys. D: Nonlinear Phenom. 230, 112–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physd.2006.11.008>.

Iacono, y coautores, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. J. Geophys. Res., 113, D13103. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>.

Janjic, Z. I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev., 122, 927–945. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2).

Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note No. 437, 61 pp.

Jimenez, P.A., y coautores, 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. Mon. Wea. Rev., 140, 898–918. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00056.1>.

Kalnay, E., 2003: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, 341 págs. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511802270>.

Artículo en edición

Magnusson, L., y coautores, 2022: Skill of Medium-Range Forecast Models Using the Same Initial Conditions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 103, E2050–E2068. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0234.1>

Maldonado, P., 2023: Implementación y evaluación de un sistema de asimilación de datos de radar meteorológico en escala convectiva para el desarrollo de un sistema de pronóstico por ensambles a muy corto plazo. Tesis de doctorado, DCAO, FCEyN, UBA. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n7321_Maldonado.pdf.

Maldonado, P., y coautores, 2022: Sistema de asimilación de datos y pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: componente experimental. Características y ajustes. XIV Congreso Argentino de Meteorología. 7 al 11 de noviembre, 2022.

Maldonado, P., J. Ruiz, C. Saulo, 2020: Parameter sensitivity of the WRF–LETKF system for assimilation of radar observations: Imperfect-model observing system simulation experiments; American Meteorological Society; *Wea. Forecasting*, 35, 4, 5-2020, 1345-13620882-8156. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0161.1>

Matsudo, C., y coautores, 2022: Sistema de asimilación de datos y pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: componente operativa. XIV Congreso Argentino de Meteorología. 7 al 11 de noviembre, 2022.

Matsudo, C., y Salio, P., 2011: Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina. *Atmospheric research*, 100 (4), 523–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.004>.

Mezher, R., M. Doyle, and V. Barros, 2012: Climatology of hail in Argentina. *Atmospheric research*, 114, 70–82. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.020>.

Artículo en edición

Miyoshi, T., M. Kunii, 2011: The local ensemble transform Kalman filter with the Weather Research and Forecasting Model: Experiments with real observations. *Pure Appl. Geophys.*, 169, 321–333. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1269-0>.

Niu, G.Y., y coautores, 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah–MP): 1. Model description and evaluation with local–scale measurements. *J. Geophys. Res.*, 116, D12109. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010JD015140>.

Roberts, N.M. and H. Lean, 2008: Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 78–97. DOI: <https://doi.org/10.1175/2007MWR2123.1>.

Roebber, P.J., 2009: Visualizing multiple measures of forecast quality. *Wea. Forecasting*, 24, 601–608. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222159.1>.

Salio, P., M. Nicolini, E.J. Zipser, 2007: Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. *Mon. Wea. Rev.* DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3305.1>.

Saucedo, M., 2016: Estudio de los efectos de diferentes fuentes de error sobre la calidad de los análisis generados por un sistema de asimilación por filtros de Kalman. Tesis de doctorado, DCAO, FCEyN, UBA.

https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5939_Saucedo.pdf.

Schumacher, V., A. Fernández, F. Justino, A. Comin, 2020: WRF high resolution dynamical downscaling of precipitation for the Central Andes of Chile and Argentina. *Frontiers in Earth Science*, 328. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00328>.

Schwartz, C., J. Poterjoy, J. Carley, D. Dowell, G. Romine, K. Ide, 2022: Comparing Partial and Continuously Cycling Ensemble Kalman Filter Data Assimilation Systems for

Artículo en edición

Convection-Allowing Ensemble Forecast Initialization. *Wea. Forecasting*, 37, 85–112. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0069.1>.

Shin, H.H., and S.Y. Hong, 2015: Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 250-271. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00116.1>.

Skamarock, W., J. Klemp, J. Dudhi, D. Gill, Z. Liu, J. Berner, X.Y. Huang, 2019: A description of the advanced research WRF model version 4. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 145(145), 550.

Su, C.H., y coautores, 2019: BARRA v1.0: the Bureau of Meteorology Atmospheric high-resolution Regional Reanalysis for Australia, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2049–2068.

Trapp, R.J., y coautores, 2020: Multiple-Platform and Multiple-Doppler Radar observations of a Supercell Thunderstorm in South America during RELAMPAGO. *Monthly Weather Review* 148, 3225–3241. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0125.1>.

Warner, T.T., R.A. Peterson, R.E. Treadon, 1997: A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potentially serious limitation to regional numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2599–2617.

DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2599:ATOLBC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2599:ATOLBC>2.0.CO;2).

Wilks, D.S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, San Diego, 467 p.

Yañez, D., 2023: Validación de pronósticos probabilísticos en alta resolución generados a partir del Sistema de Asimilación de Datos y Pronóstico Numérico del Servicio Meteorológico Nacional. Tesis de licenciatura, DCAO, FCEyN, UBA.

Artículo en edición

Zhou, X., Y. Zhu, D. Hou, Y. Luo, J. Peng, R. Wobus, 2017: Performance of the New NCEP Global Ensemble Forecast System in a parallel Experiment. *Weather Forecast.* 32, 1989–2004. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0023.1>.

Zipser, E.J., D.J. Cecil, C. Liu, S. Nesbitt, D. Yorty, 2006: Where are the most intense thunderstorms on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87 (8), 1057–1072. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-8-1057>.

Artículo en edición

FIGURAS Y TABLAS

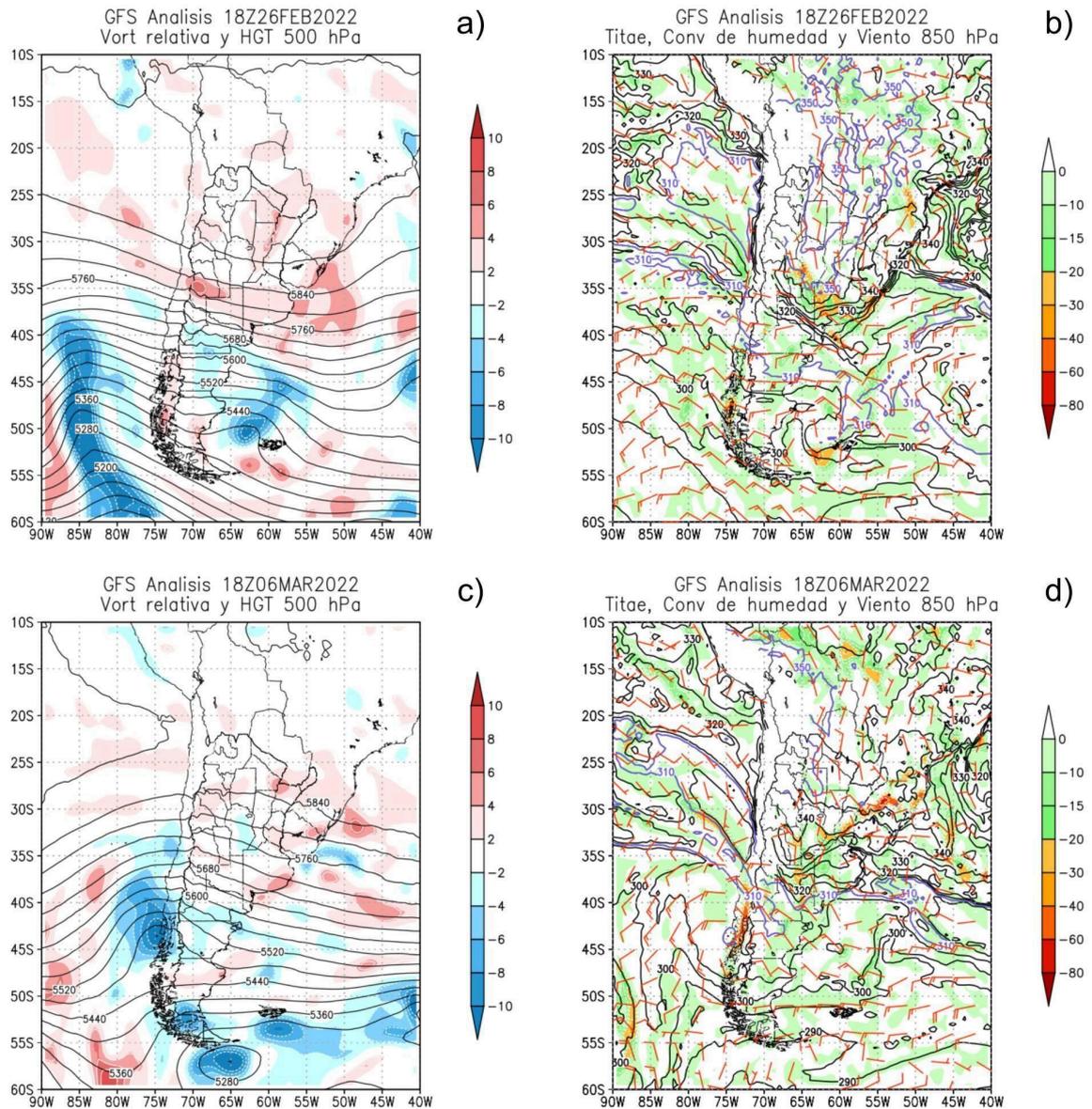


Figura 1: Condiciones sinópticas representadas por el análisis de GFS a las 18 UTC para el 26 de Febrero (a, b) y el 6 de marzo (c, d) del 2022. Se muestran los campos de vorticidad relativa (10-5 s⁻¹; sombreado) y altura geopotencial HGT (m, contornos) en 500 hPa (a y c) y los de temperatura potencial equivalente Titae (K; contornos), convergencia de humedad (g kg⁻¹ día⁻¹; sombreado) y viento (ms⁻¹; barbas) en 850 hPa (b y d).

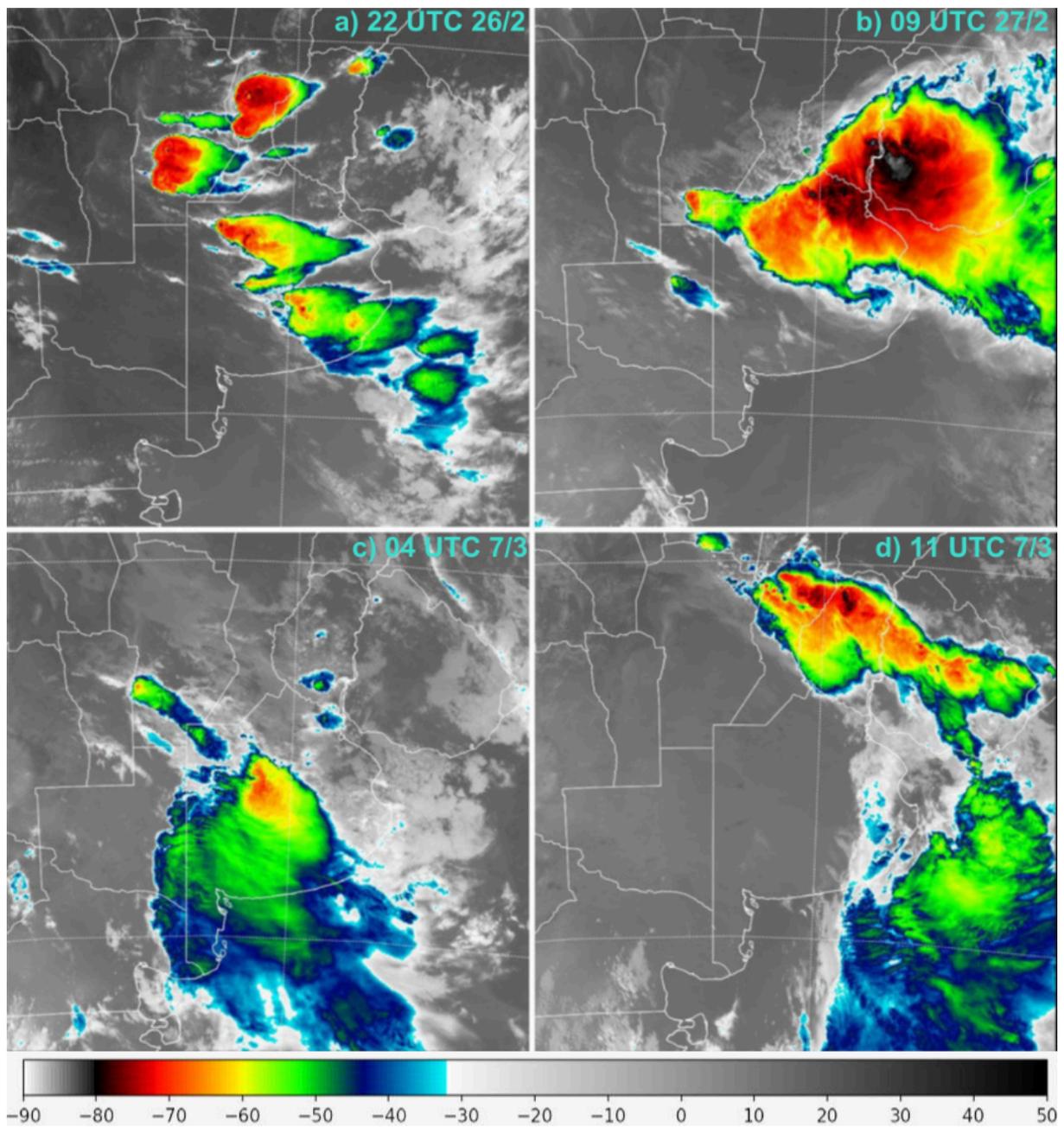


Figura 2: Observaciones de temperatura de brillo (°C) del canal 13 (10.3 μm) del satélite GOES-16 en la región centro de Argentina para las (a) 22 UTC del 26/2, (b) 09 UTC del 27/2, (c) 04 UTC del 7/3 y (d) 11 UTC del 7/3 (fuente: SMN).

Artículo en edición

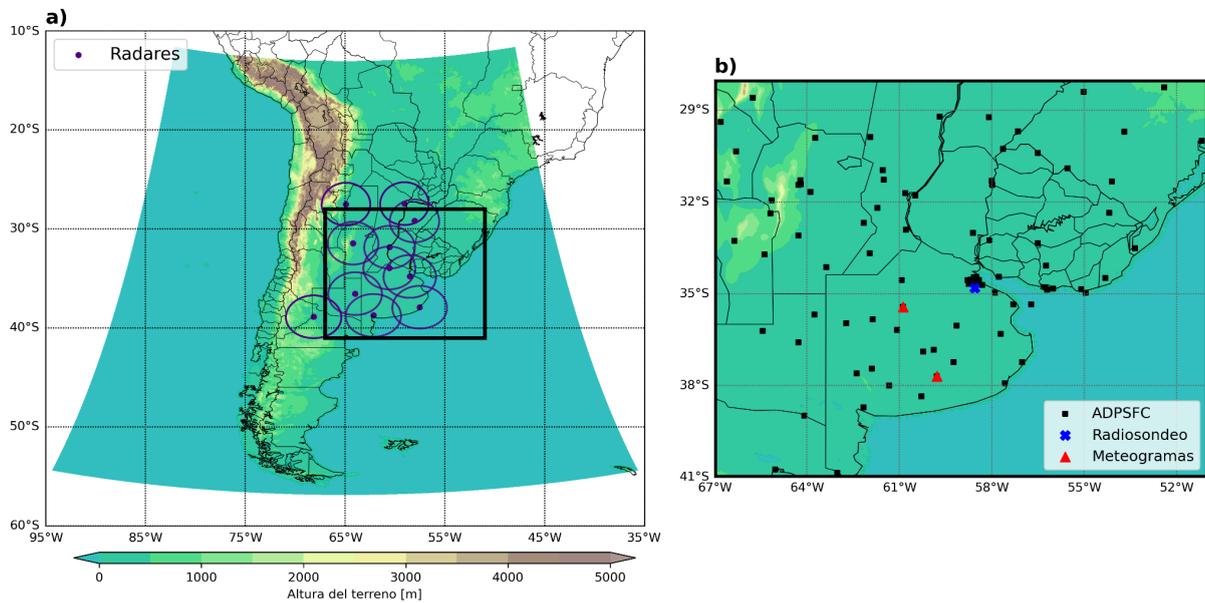


Figura 3: (a) Dominio computacional utilizado y topografía del modelo (m, sombreado). El recuadro negro indica el dominio utilizado para la validación de los pronósticos probabilísticos, incluyendo la ubicación de los radares meteorológicos (puntos violetas) y su rango máximo (círculos violetas). (b) Ubicación de las estaciones convencionales de superficie (ADPSFC; negro) y radiosondeos (azul), distinguiendo las estaciones en las que se realizan los meteogramas (rojo) dentro del dominio de validación.

Artículo en edición

Microfísica	Número de miembro del ensamble - Capa Límite Planetaria				
WSM6	01, 21 - MYJ	02, 22 - MYJ	03, 23 - MYJ	04, 24 - SH	05, 25 - SH
	06, 26 - SH	07, 27 - YSU	08, 28 - YSU	09, 29 - YSU	10, 30 - MYJ
LIN	11, 31 - MYJ	12, 32 - MYJ	13, 33 - MYJ	14, 34 - SH	15, 35 - SH
	16, 36 - SH	17, 37 - YSU	18, 38 - YSU	19, 39 - YSU	20, 40 - YSU

Tabla I: Combinaciones de esquemas físicos de microfísica y capa límite planetaria de los miembros del ensamble de análisis regionales del sistema SAP.SMN-ANA. Los miembros indicados en rojo (azul) corresponden a los que utilizan los miembros 01 al 20 del GEFS en orden directo (inverso). El sombreado indica los miembros que poseen el mismo esquema físico de microfísica y capa límite planetaria.

Artículo en edición

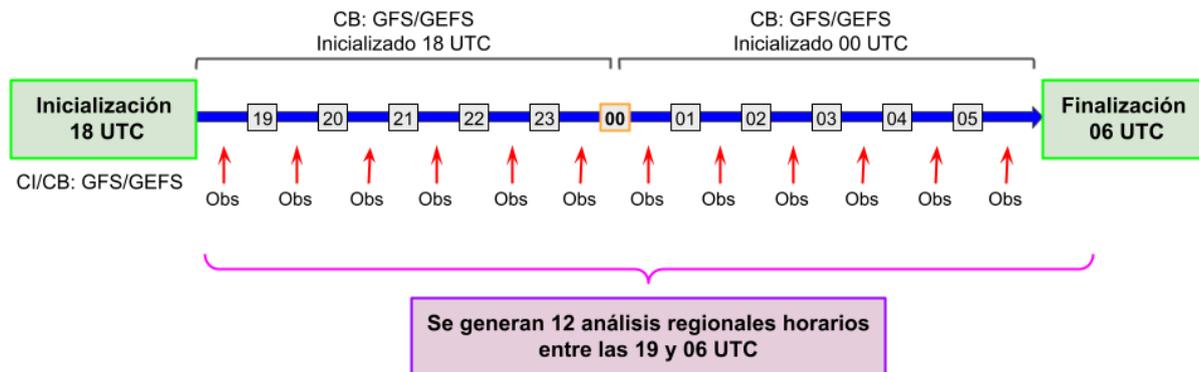


Figura 4: Esquema de ejecución del sistema de asimilación SAP.SMN-ANA para generar los análisis regionales para ambos casos de estudio.

Artículo en edición

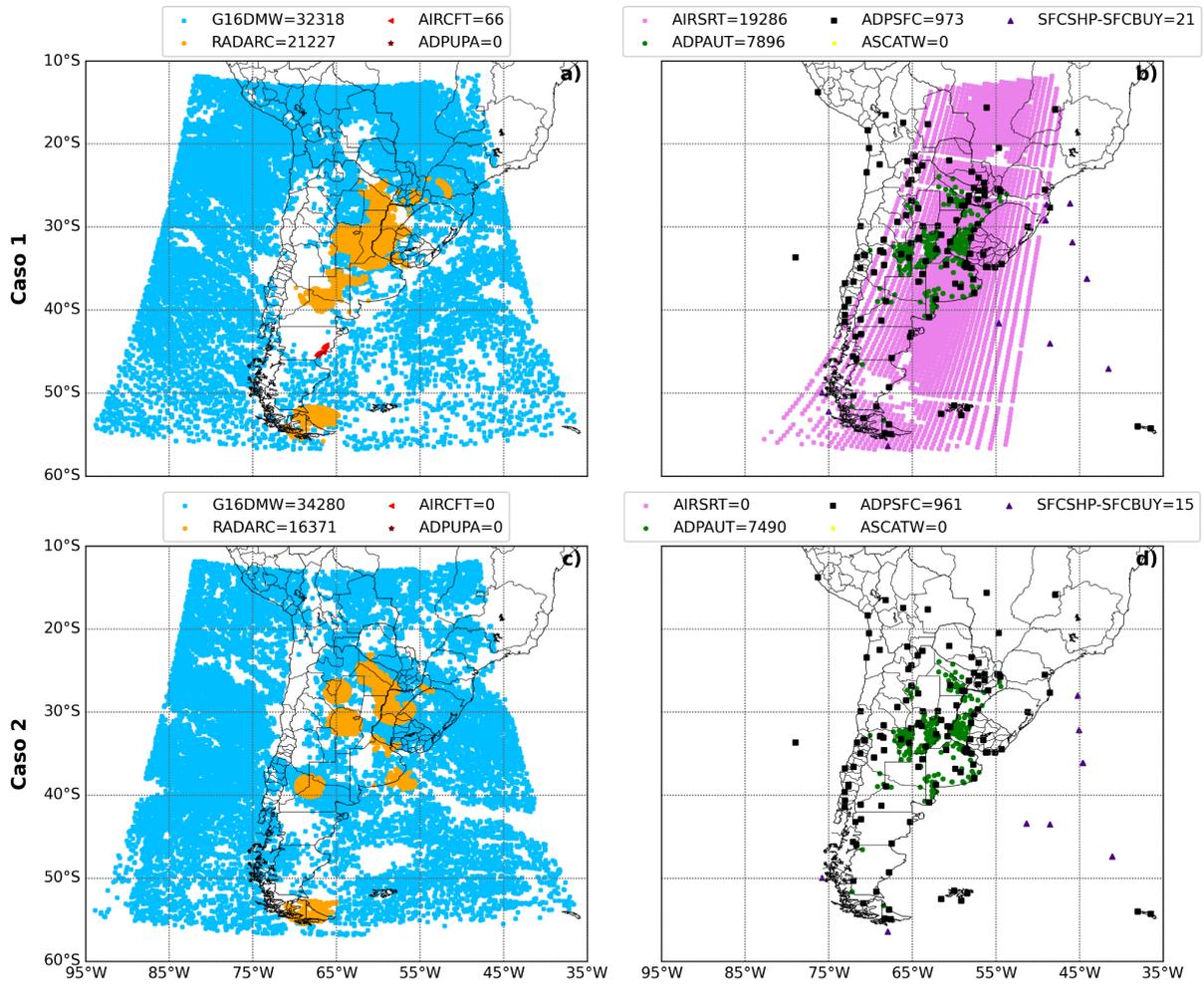


Figura 5: Distribución espacial de las observaciones asimiladas por el sistema SAP.SMN-ANA a las 06 UTC del 26/2 (paneles superiores) y del 6/3 (paneles inferiores) de 2022. En la leyenda se indica la cantidad de observaciones asimiladas por cada fuente con un total para el 26/2 de 81.787 y para el 6/3 de 59.117 (ver la definición de los acrónimos en el texto).

Artículo en edición

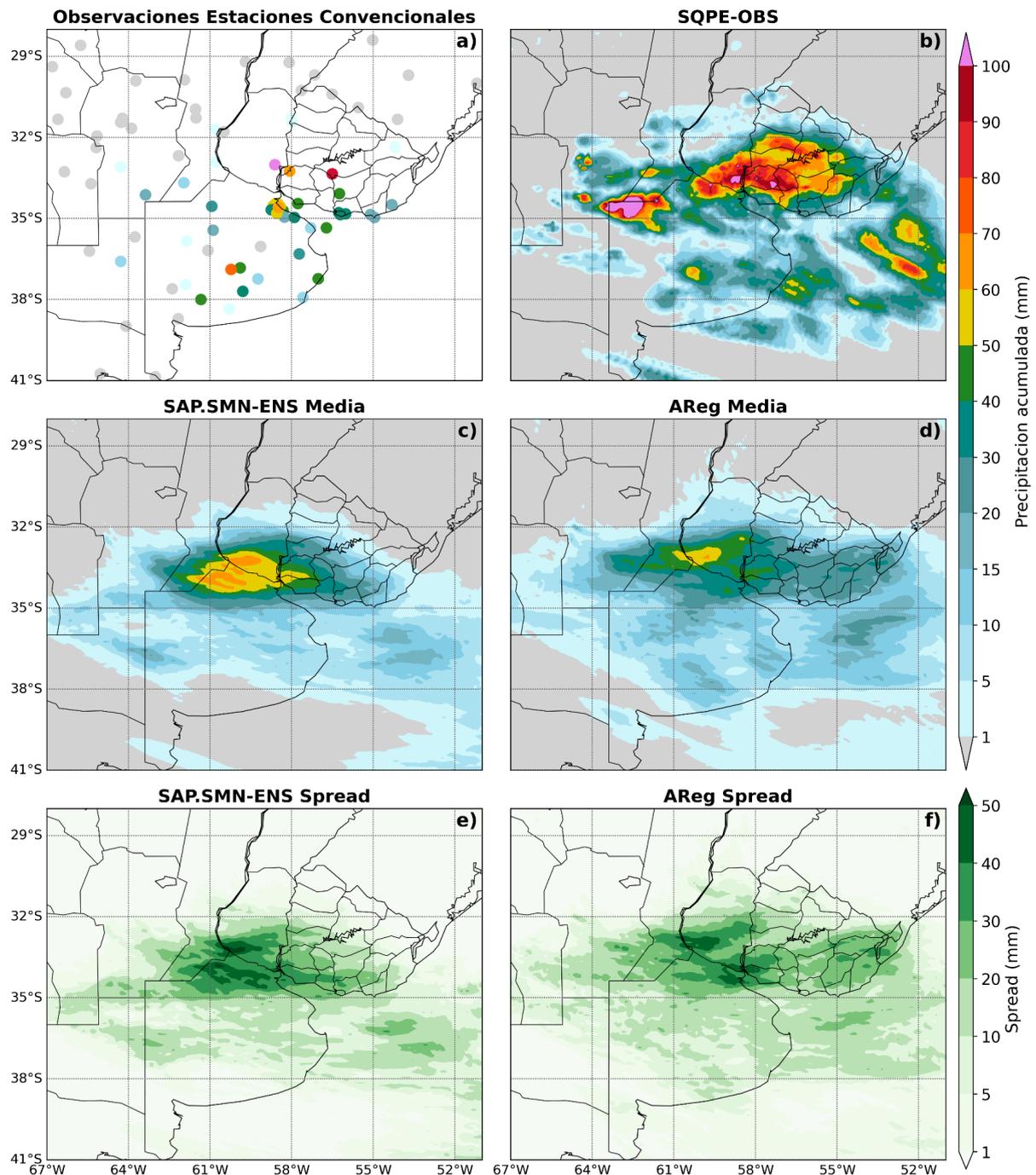


Figura 6: Precipitación acumulada entre las 12 UTC del 26/2 y las 12 UTC del 27/2, (a) registrada por las estaciones convencionales del SMN y países limítrofes, (b) estimada por SQPE-OBS, (c) media del ensemble de SAP.SMN-ENS, (d) media del ensemble de AReg, (e) dispersión del ensemble de SAP.SMN-ENS y (f) dispersión del ensemble de AReg.

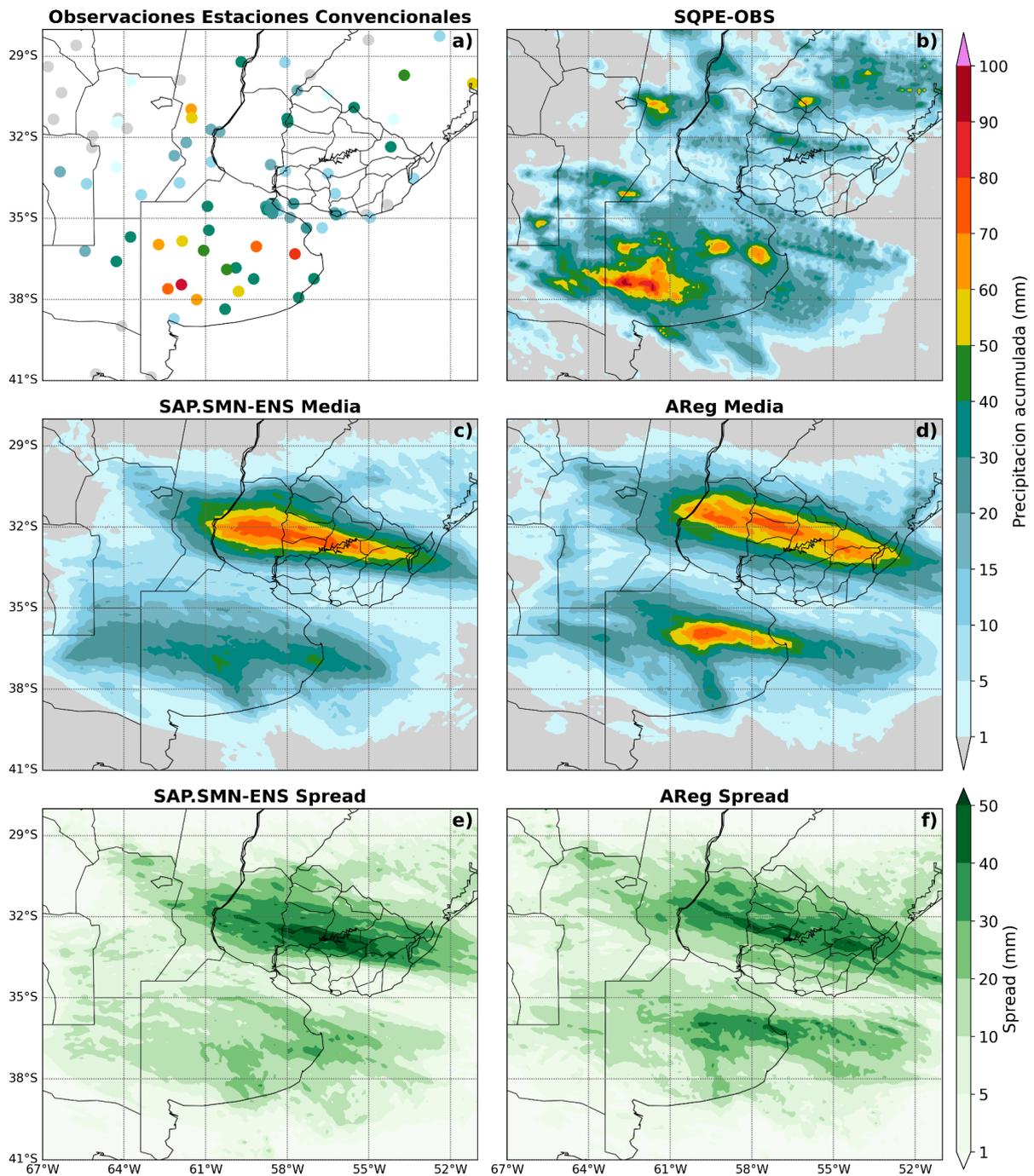


Figura 7: Como en la Figura 6, pero para la precipitación acumulada entre las 12 UTC del 6/3 y las 12 UTC del 7/3.

Artículo en edición

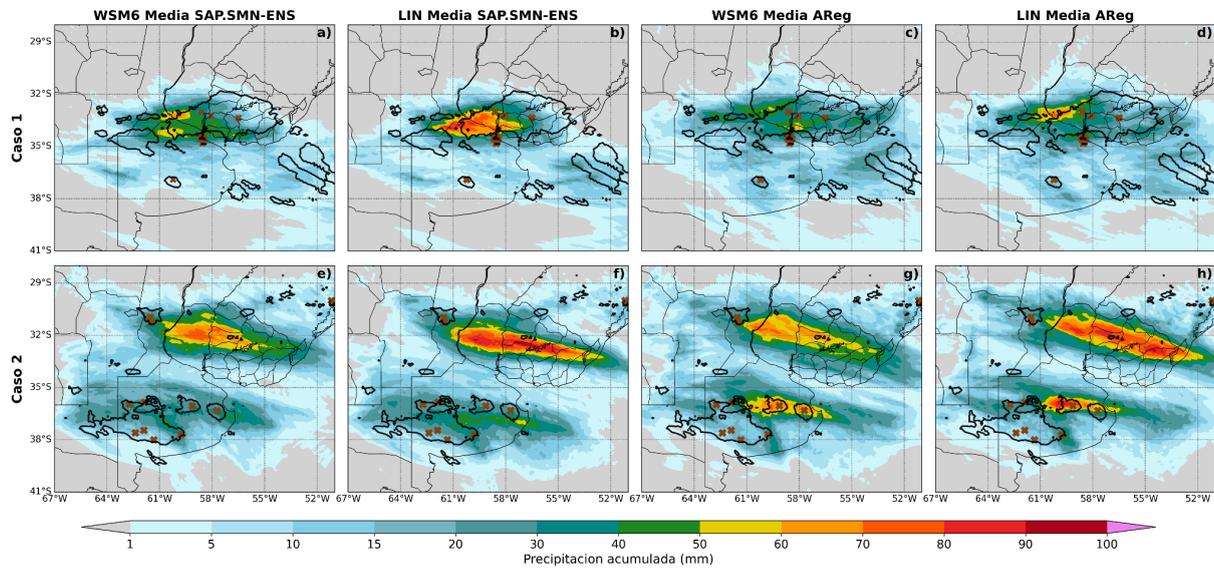


Figura 8: Precipitación acumulada para la parametrizaciones de microfísica WSM6 y LIN para SAP.SMN-ENS (columna 1 y 2) y AReg (columna 3 y 4), entre las 12 UTC del 26/2 y las 12 UTC del 27/2 (paneles superiores) y entre las 12 UTC del 6/3 y las 12 UTC del 7/3 (paneles inferiores). El contorno negro indica la precipitación acumulada en 24 horas equivalente a 40 mm estimada por SQPE-OBS y las cruces marrones indican las estaciones convencionales de superficie que superaron los 40 mm de precipitación acumulada en 24 horas.

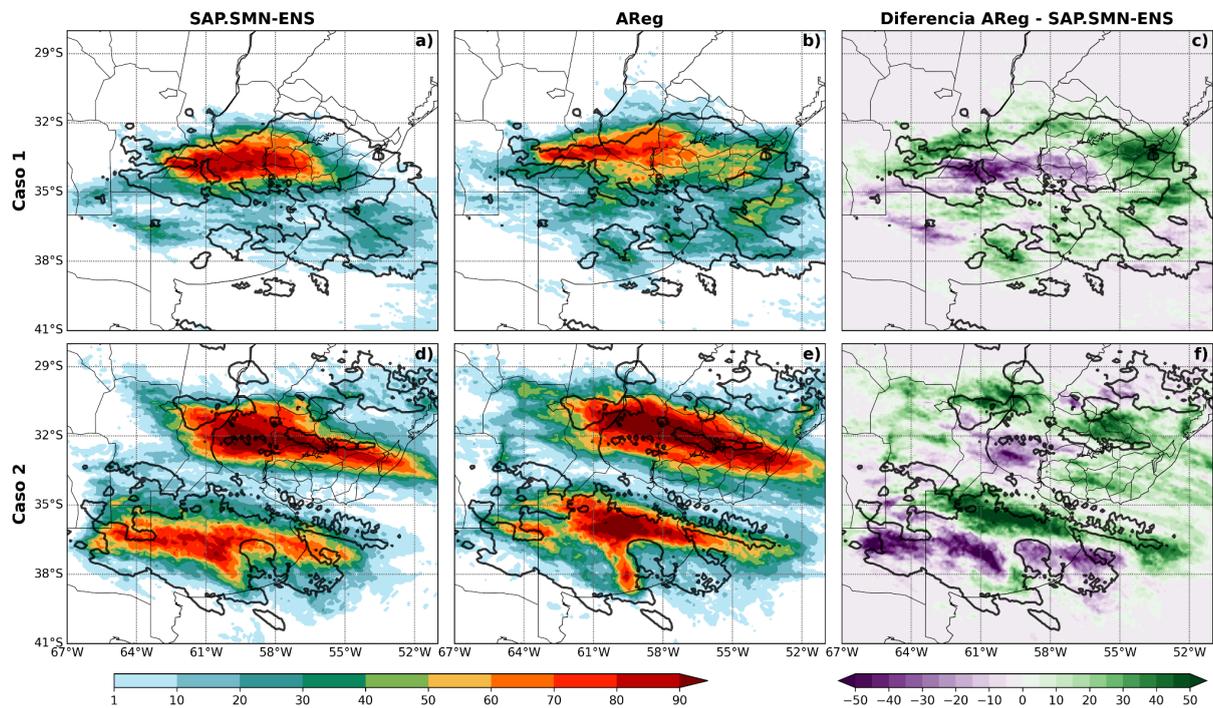


Figura 9: Probabilidad de precipitación acumulada en 24 horas mayor a 20 mm [%], entre las 12 UTC del 26/2 y las 12 UTC del 27/2 (paneles superiores) y entre las 12 UTC del 6/3 y las 12 UTC del 7/3 (paneles inferiores), para el SAP.SMN-ENS (columna 1), AReg (columna 2) y la diferencia AReg-SAP.SMN-ENS (columna 3). En contorno negro se indica precipitación acumulada en 24 horas equivalente a 20 mm estimada por SQPE-OBS.

Artículo en edición

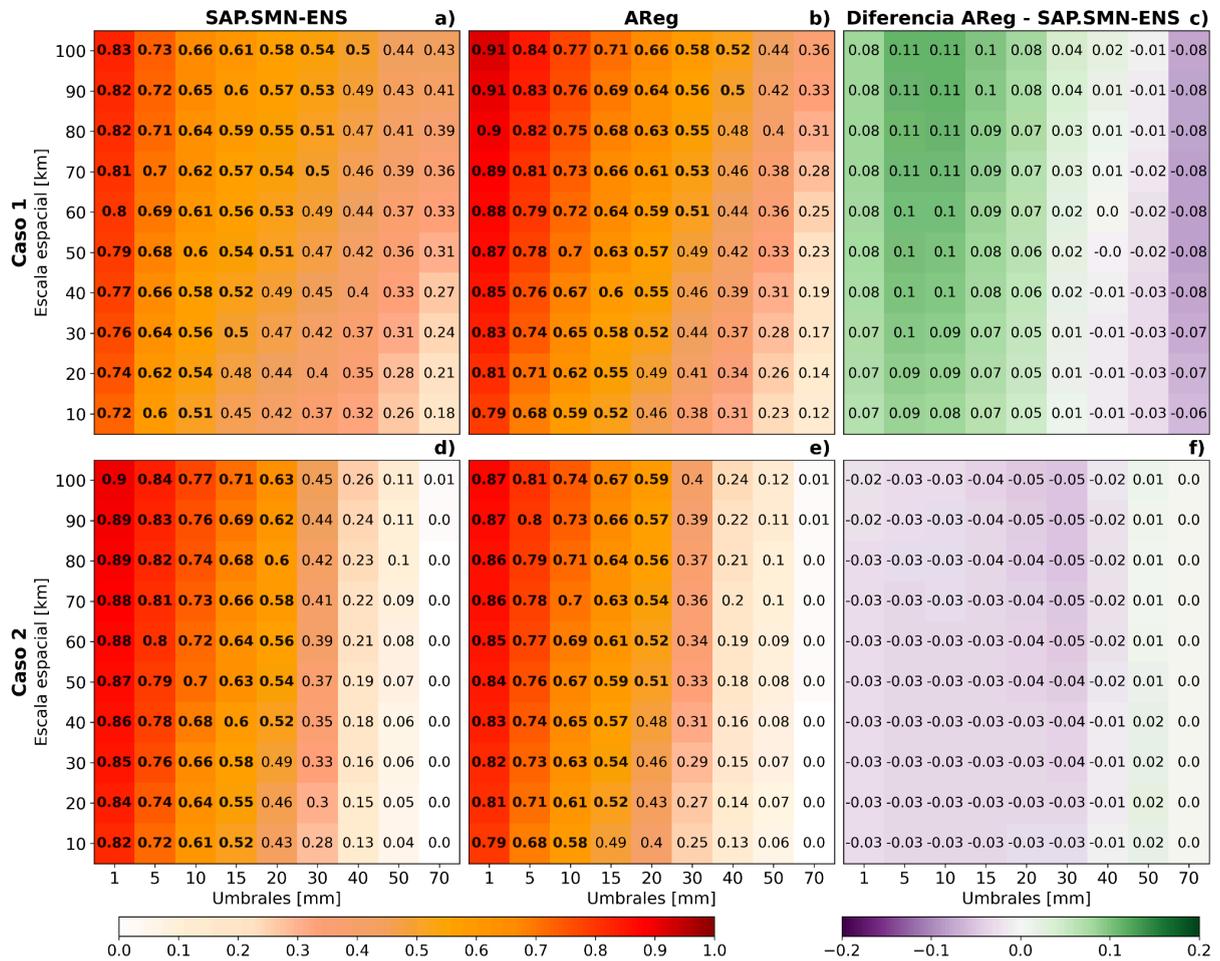


Figura 10: Valor medio de FSS a partir del calculado para cada miembro del ensamble del pronóstico SAP.SMN-ENS (columna 1), AReg (columna 2) y diferencia entre AReg respecto de SAP.SMN-ENS (columna 3), usando de referencia el SQPE-OBS, para la precipitación acumulada entre las 12 UTC del 26/2 y las 12 UTC del 27/2 (paneles superiores) y entre las 12 UTC del 6/3 y las 12 UTC del 7/3 (paneles inferiores), en el área de verificación de los pronósticos, para distintas escalas espaciales y umbrales. Los valores en negro indican cuando el FSS supera el umbral de 0.5.

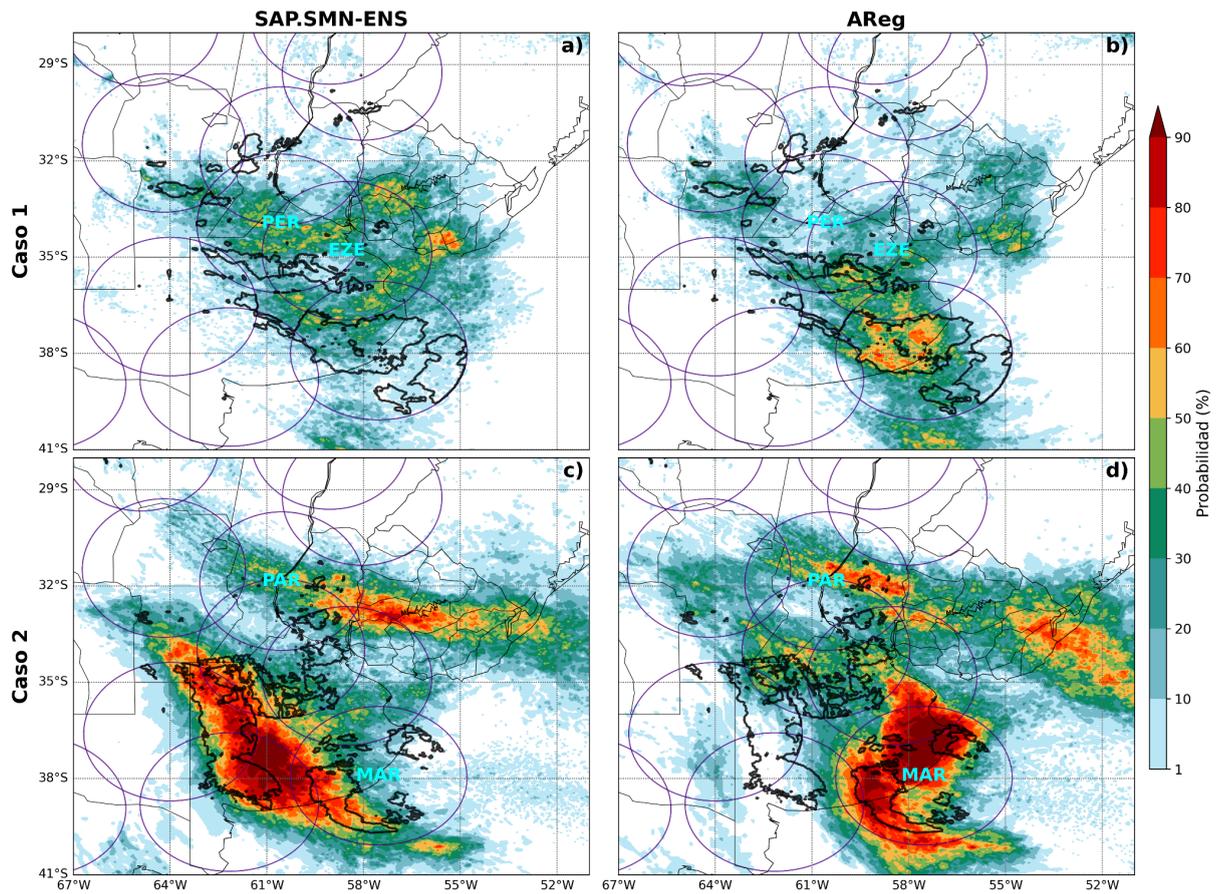


Figura 11: Probabilidad de COLMAX mayor a 15 dBZ para el ensamble del SAP.SMN-ENS (columna 1) y AReg (columna 2), para las 22 UTC del 26/2 (paneles superiores) y para las 04 UTC del 7/3 (paneles inferiores). El contorno negro indica el valor de COLMAX equivalente a 15 dBZ observado por los radares meteorológicos cuyos rangos están representados por los círculos violetas. Se indica la posición de los radares de Pergamino (PER), Ezeiza (EZE), Paraná (PAR) y Mar del Plata (MAR).

Artículo en edición

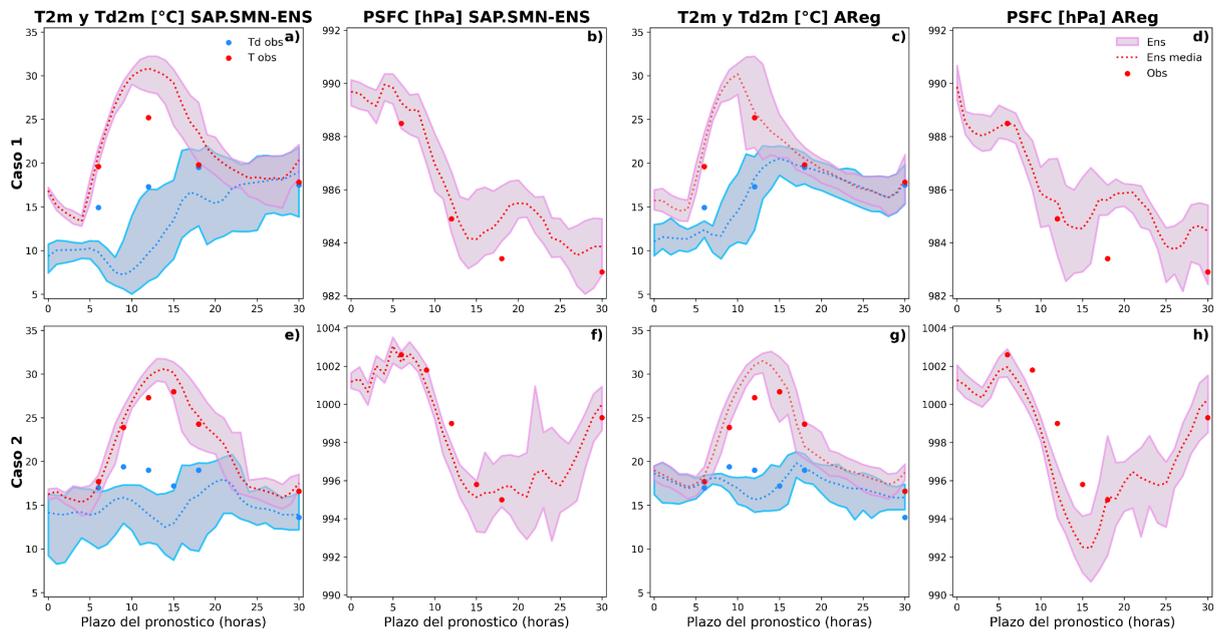


Figura 12: Meteograma para la estación Benito Juárez Aero ubicada en 37.70°S y 59.78°O (paneles superiores) y la de Nueve de Julio Aero ubicada en 35.43°S y 60.88°O (paneles inferiores) de la provincia de Buenos Aires, para la media del ensamble (línea punteada) del pronóstico SAP.SMN-ENS (columna 1 y 2) y AReg (columna 3 y 4), entre las 06 UTC del 26/2 (6/3) y las 12 UTC del 27/2 (7/3); para las variables temperatura y temperatura de rocío a 2 metros (T2m y Td2m, respectivamente, columna 1 y 3) y presión de superficie (PSFC, columna 2 y 4). El área sombreada indica el rango de variabilidad de cada variable en los miembros del ensamble. Los puntos corresponden a los datos observados disponibles cada 3 o 6 horas.

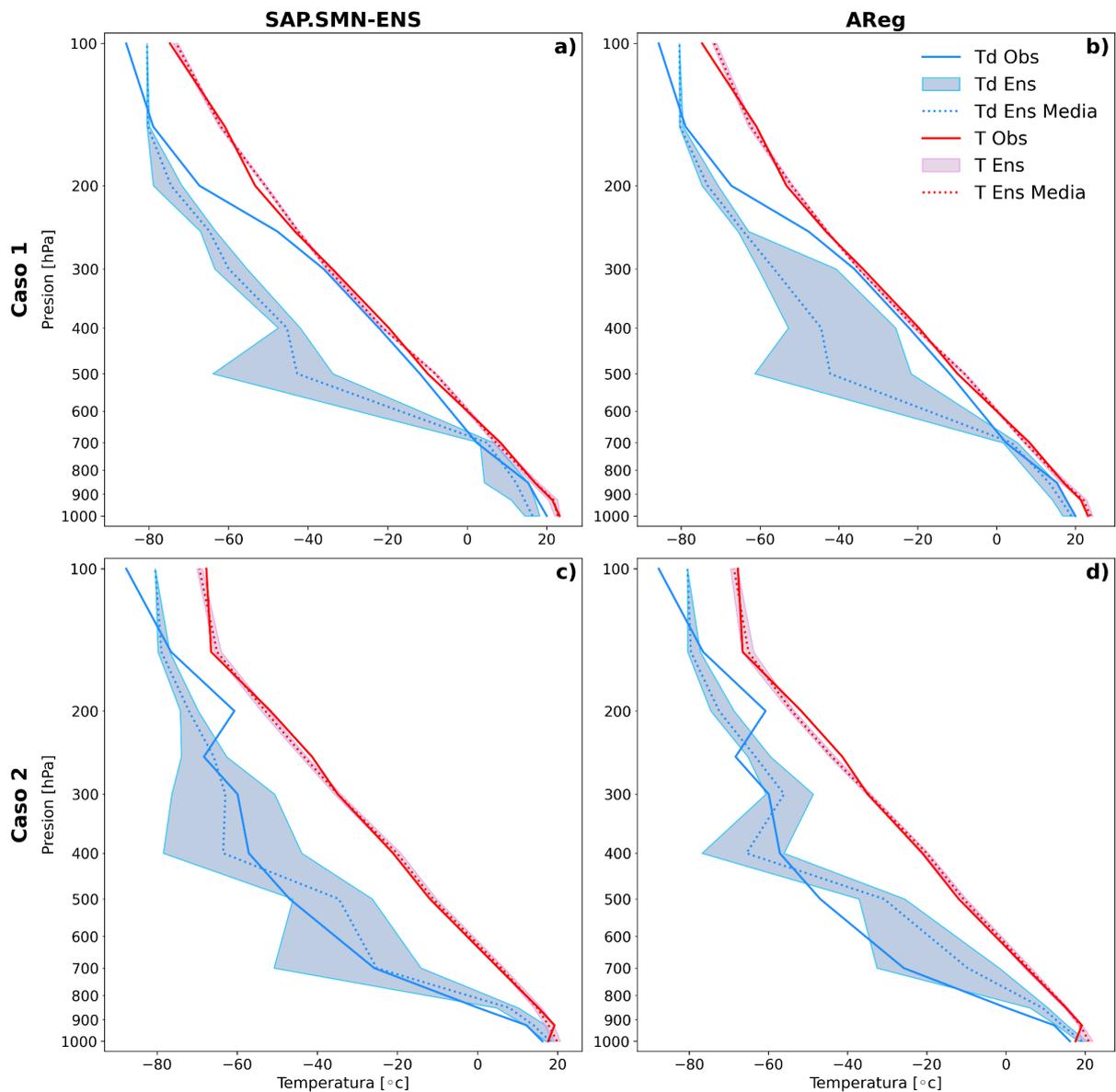


Figura 13: Perfil vertical de temperatura (T; línea roja) y temperatura de rocío (Td; línea azul) de la estación Ezeiza Aero de la provincia de Buenos Aires, ubicada en 34.82°S y 58.55°O, a las 12 UTC del 26 de febrero (paneles superiores) y del 6 de marzo (paneles inferiores) para la media del ensamble (línea punteada) del pronóstico SAP.SMN-ENS (izq.) y AReg (der.). Las líneas llenas corresponden al radiosondeo observado mientras que las líneas punteadas corresponden a la media del ensamble y el área sombreada indica el rango de variabilidad de cada variable en los miembros del ensamble.