

# Calibración de los pronósticos horarios de magnitud del viento

Nota Técnica SMN 2024-162

**Silvina Righetti<sup>1,2</sup>, Federico Cutraro<sup>1</sup>, Yanina García Skabar<sup>1</sup> y Maximiliano Sacco<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios.*

<sup>2</sup> *Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.*

Enero 2024

### *Información sobre Copyright*

*Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.*

*La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.*

## Resumen

Con el objetivo de calibrar los pronósticos horarios de intensidad del viento a 10 m de los modelos WRF y GFS, en sus versiones determinísticas y por ensamble, se plantea aplicar un método híbrido. El mismo busca corregir tanto la parte sistemática como la aleatoria del error utilizando una combinación de filtros de Kalman con inferencias bayesianas. Al analizar el desempeño de su aplicación durante 2022 y 2023 se pudo ver una mejora en todos los estadísticos, tanto en la calibración en puntos con observaciones como en la de todo el dominio. La mayor corrección, con ambos modelos, se observa en la zona cordillerana.

## Abstract

A hybrid method that seeks to correct both the systematic and the random part of the error using a combination of Kalman filters with bayesian inferences is proposed to calibrate the hourly forecasts of wind intensity at 10 m of the WRF and GFS models, in their deterministic and ensemble versions. The performance of its application during 2022 and 2023 showed an improvement in all statistics, both in the calibration at points with observations and in the calibration of the entire domain. The highest correction, with both models, is observed in the mountainous area.

**Palabras clave:** Calibración, viento, filtro de Kalman, inferencia bayesiana.

## Citar como:

Righetti, S., F. Cutraro, Y. García Skabar y M. Sacco, 2024: Calibración de los pronósticos horarios de magnitud del viento. Nota Técnica SMN 2024-162.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los pronósticos numéricos presentan errores que deben ser corregidos para mejorar la calidad de las predicciones meteorológicas. En Cutraro y otros (2020) se muestran los resultados de la calibración de la temperatura de los modelos WRF y GFS (determinístico y ensamble), realizada mediante la aplicación de la metodología de Regresión Adaptada basada en el Filtro de Kalman (RAFK) en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En la misma se observa un buen desempeño del método aplicado y una mejora en la calidad de los pronósticos.

Con la idea de continuar en el camino de la corrección de los pronósticos numéricos de otras variables meteorológicas, se planteó trabajar con la magnitud del viento. En su trabajo de 2008, Louka y otros, mostraron que las teorías basadas en la aplicación de filtros de Kalman eran buenas corrigiendo el bias del viento, pero no así la variabilidad de su error. Luego, Galanis y otros (2017) plantearon una metodología híbrida combinando filtros de Kalman con inferencias bayesianas demostrando una buena corrección tanto de la parte sistemática como de la aleatoria.

En esta nota se presentan los resultados de la calibración de los pronósticos horarios de velocidad del viento a 10 m de altura realizada utilizando la propuesta de Galanis y otros (2017) durante el año 2022 y 2023, tanto en puntos con estaciones como en todo el dominio del modelo numérico, para los modelos WRF y GFS (determinístico y ensamble).

## 2. METODOLOGÍA Y DATOS

Para la corrección de los pronósticos horarios de la magnitud del viento a 10 m se aplicó una metodología híbrida que combina filtros de Kalman con un modelo Bayesiano. Para la primera parte, se utilizó la técnica RAFK, empleada previamente para la temperatura. Ésta se aplicó en puntos donde se encuentran estaciones sinópticas de superficie con observaciones de viento y luego se expandió a todo el dominio del modelo mediante la aplicación de una metodología de interpolación. Para mayor detalle, tanto de la metodología de calibración como de la interpolación espacial, ver la nota técnica de Cutraro y otros (2020).

Con respecto al modelo Bayesiano, el mismo se aplicó luego de la metodología RAFK. Para ello se considera la ecuación (1):

$$K_t = O_t + V_t \quad (1)$$

donde  $K_t$  representa la salida del modelo numérico con la calibración por el filtro de Kalman ya realizada,  $O_t$  es la observación y  $V_t$  es el error no sistemático remanente. Luego, asumiendo que tanto las observaciones como el error no sistemático siguen distribuciones normales y utilizando la teoría Bayesiana, se puede obtener una segunda corrección a la intensidad del viento. Para mayor información sobre la metodología, referirse a Galanis y otros (2017).

Debido a que la velocidad del viento es una magnitud que no puede tomar valores negativos se incluyó la metodología descrita en Gupta y Hauser (2007) para que en los casos en que el valor calibrado resultara negativo, los coeficientes se ajusten de manera óptima tal que el valor calibrado sea igual a cero.

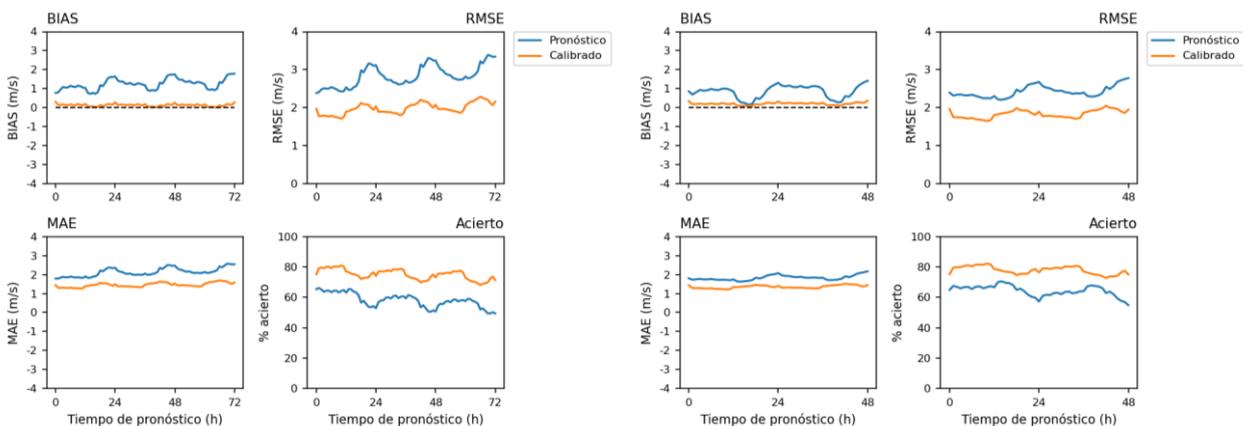
Los pronósticos calibrados que se analizarán a continuación corresponden a aquellos inicializados a las 00 UTC en el período comprendido entre el 1 de enero de 2022 al 30 de noviembre de 2023. Para verificar los

resultados se consideraron las observaciones de las estaciones sinópticas de superficie del SMN y los campos de reanálisis del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés). En este último caso, su resolución espacial ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) y su proyección (regular en latitud y longitud) difieren de la de los modelos analizados, por lo cual se realizó una interpolación para llevar los campos calibrados y sin calibrar al del reanálisis.

### 3. RESULTADOS

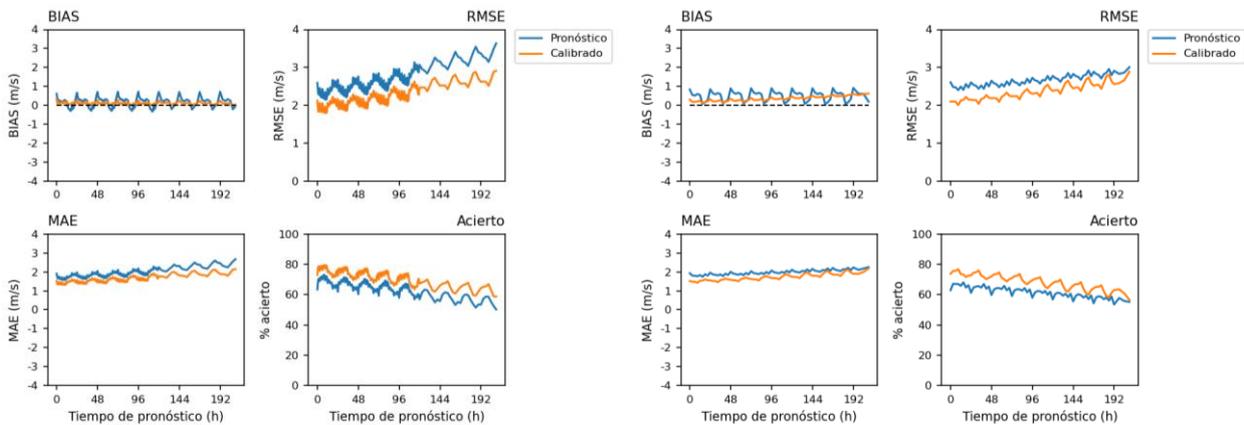
#### 3.1 Verificación de la calibración en puntos con observaciones

En la Figura 1 se presenta el BIAS, el RMSE, el MAE y el porcentaje de acierto, calculado para todo el período de estudio y considerando todas las estaciones, para el modelo WRF en sus versiones determinística (izquierda) y ensamble (derecha). En todos los casos, una situación fue considerada como “acierto” siempre y cuando el valor de la magnitud del viento se encontrara dentro de un entorno de  $\pm 2$  m/s del valor medido. Al observar la figura se puede ver que, tanto para el pronóstico determinístico como para el ensamble, el BIAS es prácticamente eliminado para todos los plazos. También se puede apreciar mejores valores de los estadísticos RMSE, MAE y porcentaje de acierto para los pronósticos calibrados en relación a los sin calibrar. Además, es importante mencionar la presencia de un aparente ciclo diario en todos los estadísticos calculados (también se apreciaba en la temperatura) el cual disminuye su amplitud y sufre un desfase luego de realizar la calibración. Queda pendiente el análisis de la causa de este comportamiento.



**Figura 1:** BIAS, RMSE, MAE y porcentaje de acierto para el modelo calibrado (línea naranja) y sin calibrar (línea celeste) para WRF determinístico (izquierda) y ensamble (derecha) en función del plazo de pronóstico. Los estadísticos fueron calculados para todo el período de estudio (solo ciclo 00 UTC) y considerando todas las estaciones de superficie.

En la Figura 2 se observan los mismos estadísticos que en la Figura 1, pero para GFS (izquierda) y GEFS (derecha). En este caso, también se aprecia una disminución importante del BIAS de los pronósticos al calibrar, aunque para GEFS tiende a aumentar con el plazo de predicción. En cuanto al resto de los estadísticos, también se observa una mejora en el desempeño de los pronósticos calibrados en relación a los sin calibrar: disminuye el RMSE y el MAE, y aumenta el porcentaje de acierto.

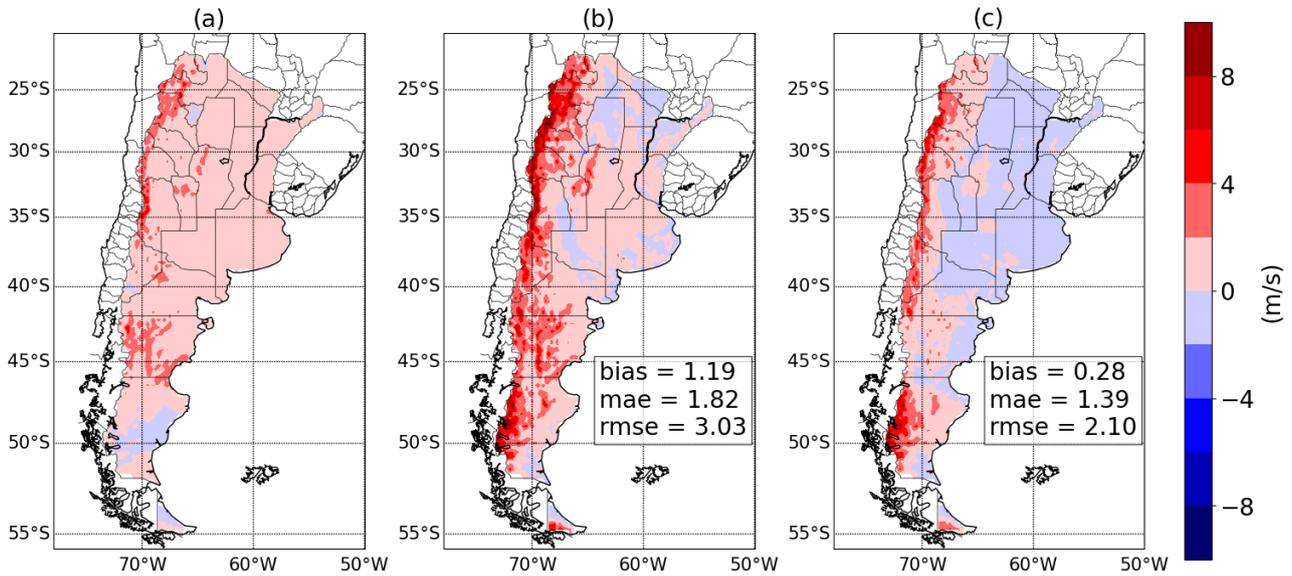


**Figura 2:** Ídem Figura 1, pero para los modelos GFS (izquierda) y GEFS (derecha).

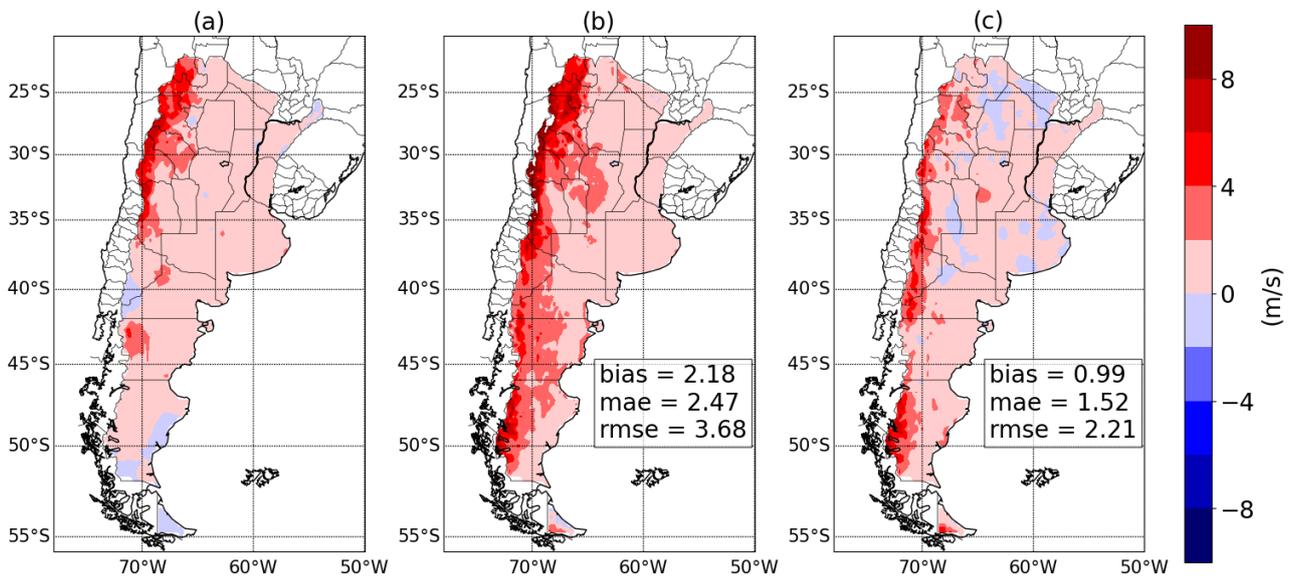
### 3.2 Verificación de los mapas calibrados con reanálisis del ECMWF

Para realizar la verificación de los campos calibrados de intensidad de viento se consideraron los reanálisis de ERA5 del ECMWF. En las Figuras 3 y 4 se muestran los resultados para el modelo WRF determinístico en los plazos horarios +6 y +18, respectivamente, del ciclo 00 UTC. En ambos plazos se puede ver que los errores más grandes son positivos (sobrestimación del pronóstico) y se presentan en la zona cordillerana y en la región de la meseta patagónica. Dichos errores son mayormente corregidos por la metodología de calibración, principalmente en la región oeste de Cuyo y del NOA en el plazo +18. Al analizar los estadísticos para todo el dominio, se puede ver una mejora en todos los casos al aplicar la calibración, observándose una disminución del BIAS, del MAE y del RMSE. En el resto de los plazos de pronóstico los resultados son similares a los presentados para +6 y +18 (no se muestran).

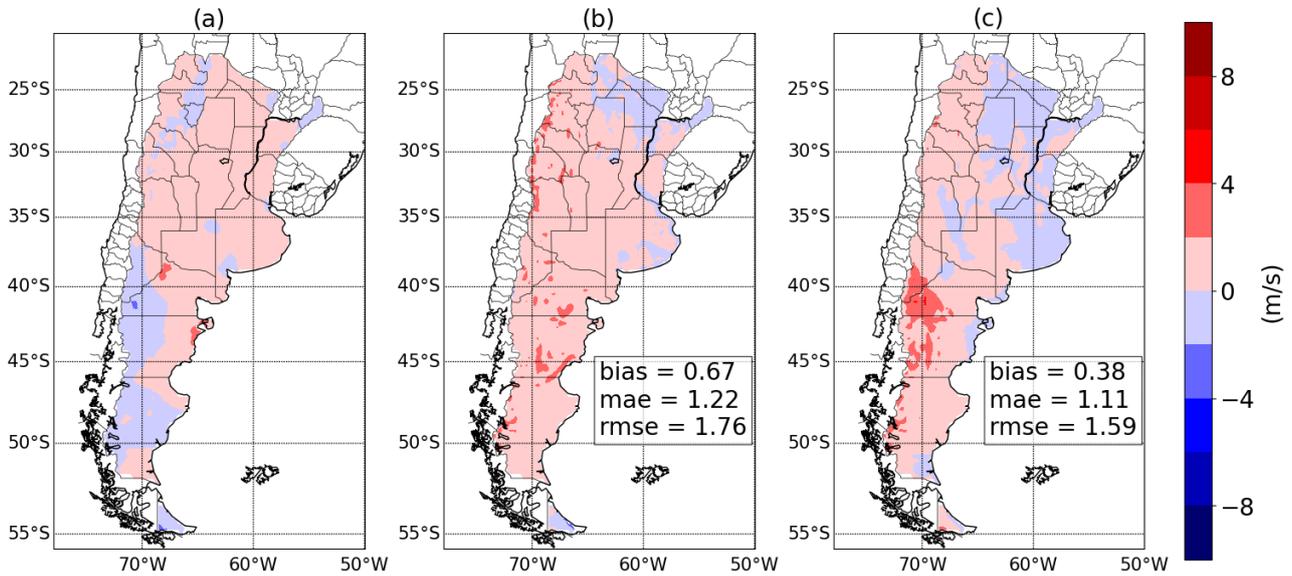
En las Figuras 5 y 6 se presentan los campos de errores para el modelo GFS para los mismos plazos horarios, +6 y +18, respectivamente, del ciclo 00 UTC. En este caso se aprecian menores errores del campo sin calibrar en comparación a los vistos con el WRF, pero los mismos son prácticamente positivos en todo el país, indicando una sobreestimación de la magnitud del viento. Al calibrar, el error disminuye en la mayor parte del dominio, pero se nota un incremento del mismo en la región cercana a la ciudad de Bariloche (41,15°S y 71,16°O), principalmente en el plazo +18. Para analizar este caso particular, donde la aplicación de la calibración pareciera aumentar los errores, se analizaron los pronósticos de GFS calibrados y sin calibrar, junto con las series temporales de datos observados en la estación Bariloche (usados para realizar la calibración) y de los reanálisis de ERA5 (utilizados para la verificación del producto). En la Figura 7 se presenta un ejemplo para el día 18 de junio de 2022, donde se puede apreciar claramente la gran diferencia existente entre el dato de reanálisis (línea roja) y el dato observado en la estación sinóptica de superficie (línea verde). En este caso, y en muchos de los estudiados (no se muestran), el pronóstico subestima ampliamente a la observación, con lo cual al aplicar la metodología de corrección, el pronóstico tiende a acercarse al valor observado y alejarse del valor del reanálisis. Este comportamiento podría ser la causa del gran BIAS que se observa en la zona de Bariloche en el campo calibrado.



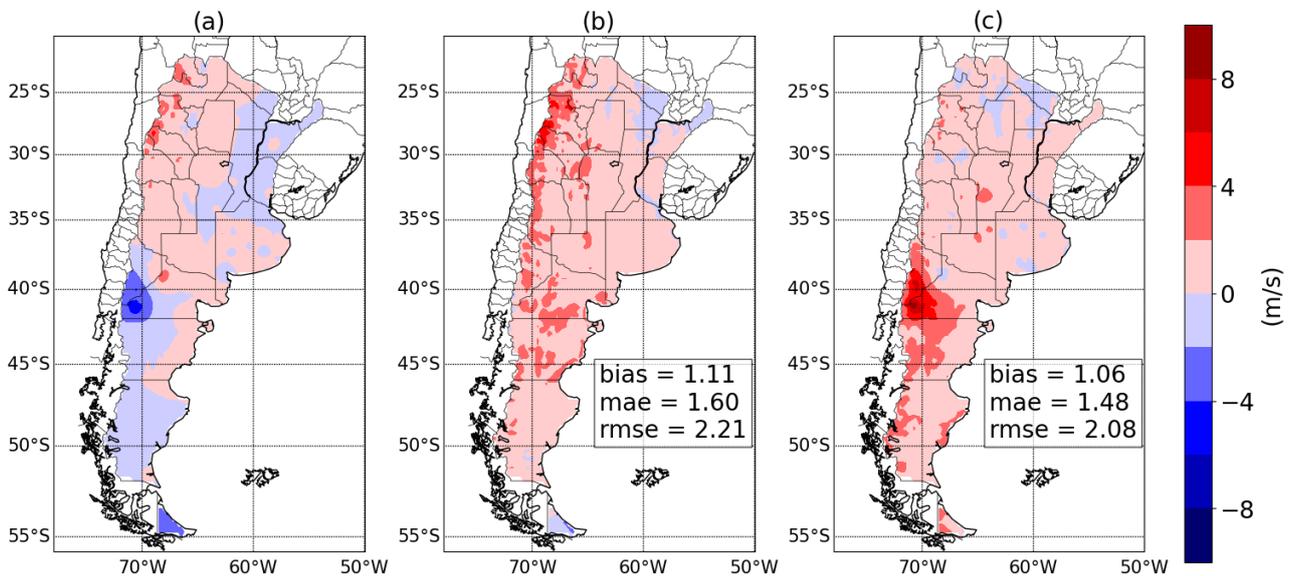
**Figura 3:** Campos para el modelo WRF determinístico de diferencia media entre a) el pronóstico sin calibrar y calibrado, b) el pronóstico sin calibrar y el reanálisis y c) el pronóstico calibrado y el reanálisis para el plazo horario +6 del ciclo 00 UTC durante el período 2022-2023. En el recuadro se muestran los estadísticos BIAS, MAE y RMSE correspondientes a todo el dominio.



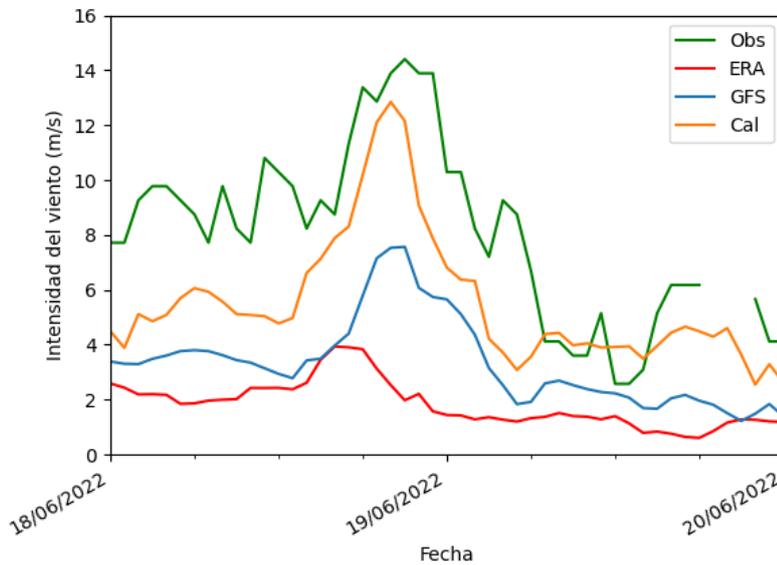
**Figura 4:** Ídem Figura 3 para plazo de pronóstico +18.



**Figura 5:** Campos para el modelo GFS de diferencia media entre a) el pronóstico sin calibrar y calibrado, b) el pronóstico sin calibrar y el reanálisis y c) el pronóstico calibrado y el reanálisis para el plazo horario +6 del ciclo 00 UTC durante el período 2022-2023. En el recuadro se muestran los estadísticos BIAS, MAE y RMSE correspondientes a todo el dominio.

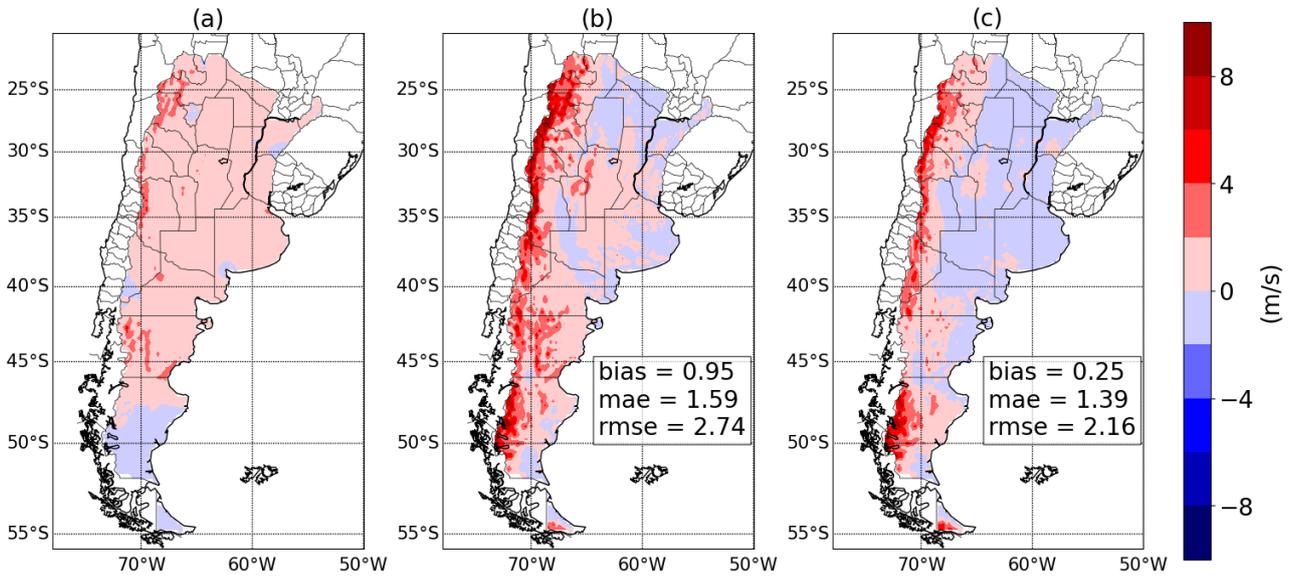


**Figura 6:** Ídem Figura 5 para plazo de pronóstico +18.

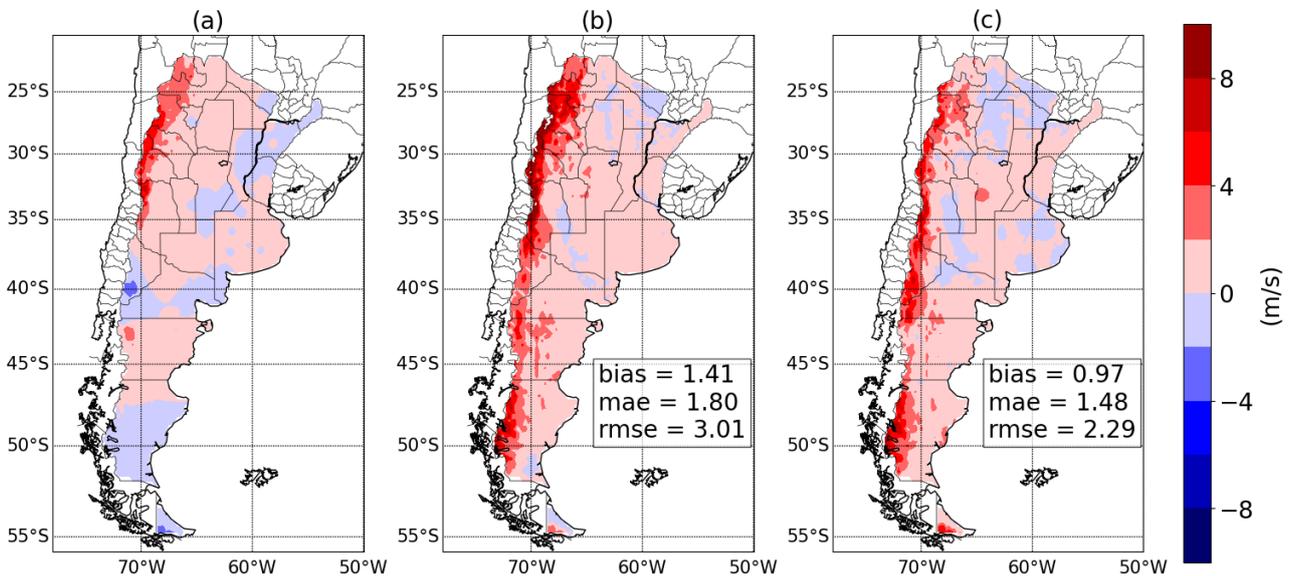


**Figura 7:** Evolución temporal de la intensidad del viento pronosticada en Bariloche por el modelo GFS sin calibrar (línea azul) y calibrado (línea naranja) para el día 18 de junio de 2022 a las 00 UTC. En línea roja se muestra el dato del reanálisis ERA5 y en verde la observación de la estación convencional.

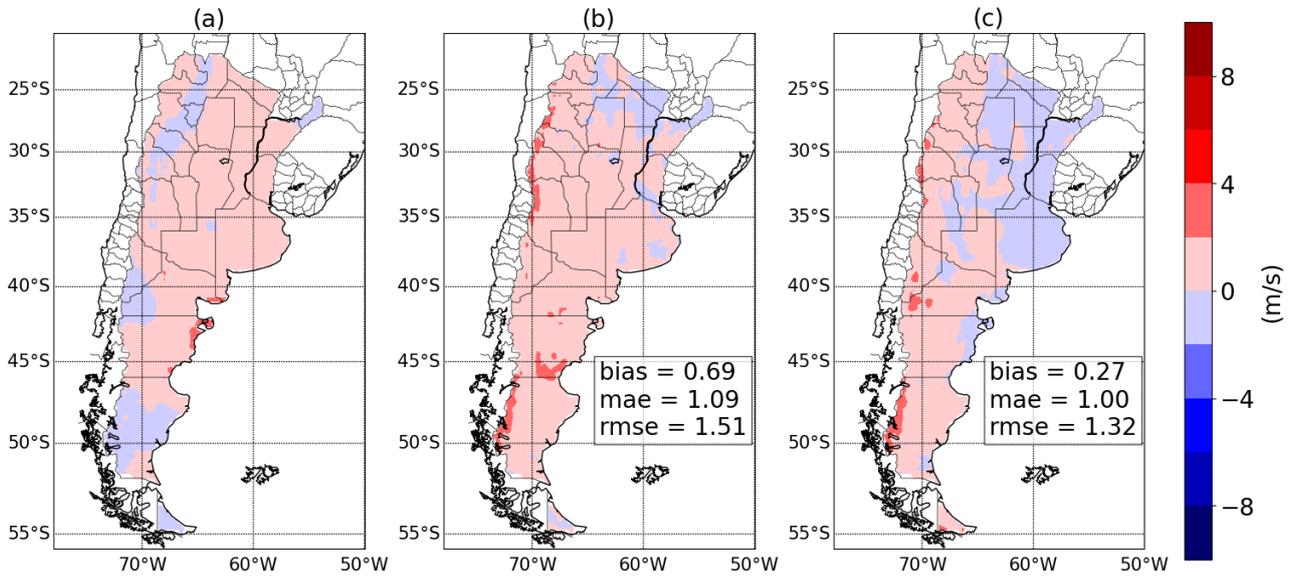
Para las versiones por ensamble de WRF (Figura 8 y 9) y GFS (Figura 10 y 11), los resultados obtenidos considerando la media del conjunto fueron similares a los presentados para los modelos determinísticos, pero se pueden mencionar algunas pequeñas diferencias. En el caso del WRF los patrones de errores son muy parecidos antes y después de calibrar, pero se ven algunas diferencias en los estadísticos calculados para todo el dominio. En particular, se pueden apreciar menores valores en los pronósticos sin calibrar del ensamble, pero un resultado similar al determinístico luego de calibrar. En el caso del GFS y GEFS, los patrones espaciales de los errores también son muy parecidos, pero se observan mejores estadísticos para GEFS, tanto calibrados como sin calibrar. También es importante mencionar que en el GEFS, si bien se sigue observando un aumento del error luego de calibrar en la zona de Bariloche, el mismo disminuye su intensidad a la mitad de lo que se observaba con GFS.



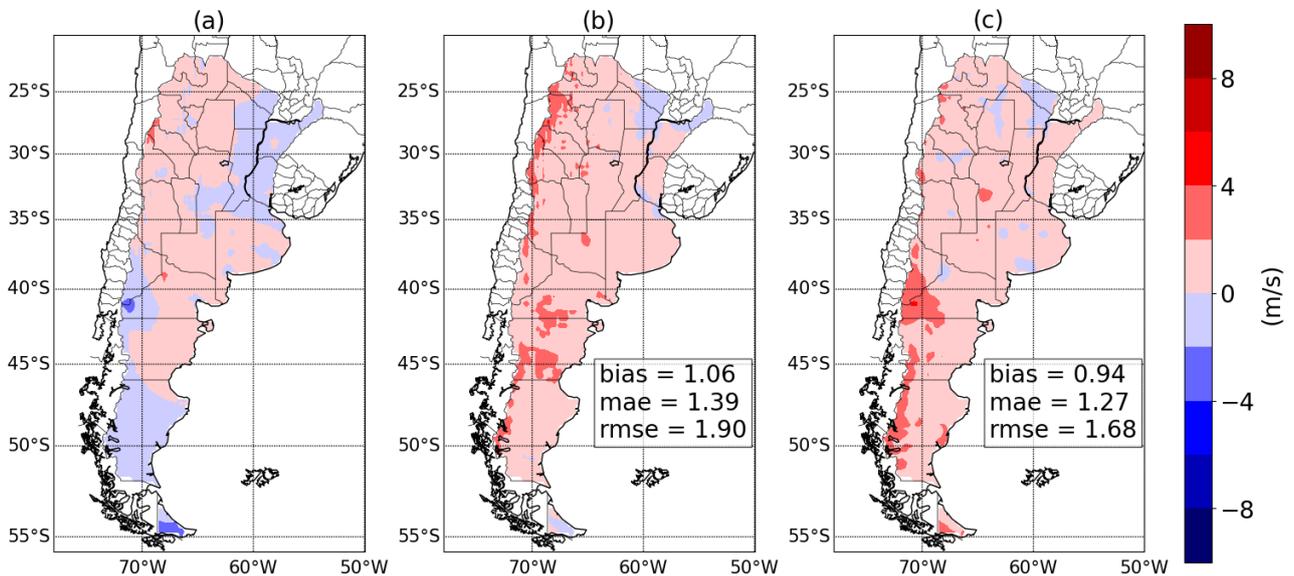
**Figura 8:** Campos para el modelo WRF por ensamble de diferencia media entre a) el pronóstico sin calibrar y calibrado, b) el pronóstico sin calibrar y el reanálisis y c) el pronóstico calibrado y el reanálisis para el plazo horario +6 del ciclo 00 UTC durante el período 2022-2023. En el recuadro se muestran los estadísticos BIAS, MAE y RMSE correspondientes a todo el dominio.



**Figura 9:** Ídem Figura 8 para plazo de pronóstico +18.



**Figura 10:** Campos para el modelo GEFS de diferencia media entre a) el pronóstico sin calibrar y calibrado, b) el pronóstico sin calibrar y el reanálisis y c) el pronóstico calibrado y el reanálisis para el plazo horario +6 del ciclo 00 UTC durante el período 2022-2023. En el recuadro se muestran los estadísticos BIAS, MAE y RMSE correspondientes a todo el dominio.



**Figura 11:** Ídem Figura 10 para plazo de pronóstico +18.

## 4. CONCLUSIONES

Con el objetivo de calibrar los pronósticos horarios de la magnitud del viento a 10 m de altura se planteó utilizar la metodología híbrida propuesta por Galanis y otros (2017) a las salidas de los modelos WRF y GFS, en sus versiones determinísticas y por ensambles. Dicho método combina filtros de Kalman con inferencias bayesianas para remover tanto la parte sistemática como la parte aleatoria del error de los pronósticos. Al analizar los resultados de la aplicación de la calibración entre el 1 de enero de 2022 y el 30 de noviembre de 2023 se observó una mejora en los pronósticos puntuales, tanto para WRF como GFS (determinístico y ensamble), obteniéndose mejores estadísticos en todos los plazos de pronóstico luego de aplicar la metodología. Al estudiar el desempeño en todo el dominio espacial, nuevamente se vió una disminución de los errores en la mayor parte de Argentina, siendo mayor la corrección en la zona cordillerana. Se observaron también que las versiones por ensamble de ambos modelos presentan menores bias, sin embargo al calibrar el resultado final es muy parecido al que se obtiene con la versión determinística corregida.

## 5. REFERENCIAS

Cutraro, F., S. Righetti, Y. García Skabar y M. Sacco, 2020: Implementación del sistema de pronóstico numérico en el HPC: Calibración de temperaturas pronosticadas. Nota Técnica SMN 2020-81.

Galanis, G., E. Papageorgiou, A. Liakatas, 2017: A hybrid Bayesian Kalman filter and applications to numerical wind speed modeling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 167, 1 - 22.

Gupta, N., R. Hauser, 2007: Kalman Filtering with Equality and Inequality State Constraints. Oxford University Numerical Analysis Group. <http://arxiv.org/abs/0709.2791>

Louka, P., G. Galanis, N. Siebert, G. Kariniotakis, P. Katsafados, G. Kallos, L. Pytharoulis, 2008: Improvements in wind speed forecasts for wind power prediction purposes using Kalman filtering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 96. 10.1016/j.jweia.2008.03.013.

## Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía ([rdelia@smn.gov.ar](mailto:rdelia@smn.gov.ar)), Luciano Vidal ([lvidal@smn.gov.ar](mailto:lvidal@smn.gov.ar)) o Martin Rugna ([mrugna@smn.gov.ar](mailto:mrugna@smn.gov.ar)) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo ([macevedo@smn.gov.ar](mailto:macevedo@smn.gov.ar)).