

Evaluación preliminar de un sistema de asimilación de datos de radar basado en el filtro de Kalman por ensambles

Paula Maldonado^{1,2}, Juan Ruiz^{1,2}, Celeste Saulo^{1,2,3}

1 - Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN – UBA), 2 - Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET – UBA), Instituto Franco Argentino sobre Estudios de Clima y sus Impactos (UMI-IFAECI), 3 - Servicio Meteorológico Nacional

E-mail: paula.maldonado@cima.fcen.uba.ar

RESUMEN: El sudeste de Sudamérica es una región con gran potencial para el desarrollo de sistemas convectivos intensos que tienen asociados eventos meteorológicos severos, como ser precipitaciones extremas en cortos periodos de tiempo que pueden dar lugar a inundaciones. Desde el punto de vista del impacto que este tipo de eventos puede producir en la población, resulta sumamente importante mejorar la capacidad para predecir la ocurrencia de los mismos. Para ello, los pronósticos a muy corto plazo (0-12 horas) generados a partir de modelos numéricos con alta resolución espacial (menor a 4 km) son una herramienta sumamente útil, especialmente si los mismos son inicializados con observaciones que proveen información valiosa en la escala convectiva, como la que aportan los radares meteorológicos. El presente trabajo busca avanzar en el desarrollo de un sistema de asimilación de datos en muy alta resolución capaz de asimilar datos de radar para generar pronósticos a muy corto plazo de eventos convectivos severos en Argentina. El sistema de asimilación de datos LETKF-WRF es evaluado utilizando observaciones sintéticas de reflectividad y velocidad Doppler para la situación del día 22 de enero de 2014, caracterizada por la ocurrencia de precipitaciones intensas sobre una amplia región del centro de Argentina. Los resultados son alentadores ya que el sistema de asimilación es capaz de reconstruir la estructura del sistema convectivo, permitiendo la generación de pronósticos detallados de precipitación (y otras variables relevantes) a muy corto plazo. La validación llevada a cabo permitió identificar algunos aspectos del sistema de asimilación que pueden ser optimizados de forma tal de incrementar la precisión, tanto de los diagnósticos como de los pronósticos.

INTRODUCCIÓN

La región ubicada al sudeste de Sudamérica presenta las características necesarias para el desarrollo de sistemas convectivos intensos que producen precipitaciones intensas en cortos períodos de tiempo (i.e. algunas horas) como así también otros fenómenos meteorológicos severos, como ser ráfagas de viento intensas, granizo y tornados, entre otros (Matsudo y Salio, 2011; Mezher et al., 2012; Rasmussen et al., 2014). Dichos

fenómenos pueden tener un gran impacto en la población, generando importantes daños humanos y económicos. Debido a esto, resulta de suma necesidad avanzar en el desarrollo de técnicas que permitan pronosticar la ocurrencia de dichos eventos con la mayor precisión posible.

La predictibilidad del sistema atmosférico (i.e. el grado de precisión con el que es posible predecir el estado futuro de la atmósfera), se ve fuertemente limitada en lo que se refiere a fenómenos que ocurren en una escala espacial y temporal del orden de kilómetros y minutos, respectivamente, denominada escala convectiva. Es por esto que sistemas de presión como los ciclones pueden ser pronosticados con hasta 10 días de anticipación, mientras que la evolución de las tormentas que producen precipitaciones extremas puede ser predicha (en el mejor de los casos) con algunas horas de anticipación. Esto se debe a que en las tormentas dominan inestabilidades cuya tasa de amplificación es mucho mayor, y por ende los errores en el pronóstico crecen a una tasa más grande en esta escala.

Otro desafío que presenta el pronóstico de las tormentas y la precipitación asociada recae en la dificultad en conocer y diagnosticar adecuadamente el estado inicial de la atmósfera en esta escala, debido a que la frecuencia espacial y temporal con la que se obtienen las observaciones generalmente no es la adecuada. Radares meteorológicos, satélites y redes de estaciones de superficie de alta densidad son las únicas observaciones que pueden aportar la información necesaria para describir el estado de la atmósfera en la escala de las tormentas, y por ende, la única fuente de información que puede aportar sustantivamente a la generación de pronósticos de precipitaciones a corto plazo más precisos y detallados. En la actualidad, el SINARAME (Sistema Nacional de Radares Meteorológicos) está construyendo e instalando nuevos radares meteorológicos en distintos puntos del país de forma tal de extender la red operativa. A su vez, se espera contar en breve con el acceso a una mayor cantidad de observaciones satelitales provistas por el satélite GOES-R.

Por otro lado, una forma de representar la evolución del flujo atmosférico es a partir de modelos numéricos de la atmósfera. En particular, el modelado en alta resolución (i.e. modelos que emplean resoluciones horizontales mayores a 4 km) es capaz de simular la evolución de sistemas convectivos que producen precipitaciones extremas (Kain et al., 2006; Weisman et al., 2008; Clark et al., 2009). Por lo tanto, la combinación óptima de ambas fuentes de información (i.e. observaciones y modelos numéricos, ambos con alta resolución espacial y temporal) mediante técnicas de asimilación de datos permite obtener un diagnóstico detallado del estado de la atmósfera, llegando a resolver la circulación dentro de los sistemas precipitantes, lo cual permite realizar un pronóstico más preciso de su evolución en las horas subsiguientes (Snyder y Zhang, 2003; Tong y Xue, 2004; Zhang et al., 2004; Sobash y Stensrud, 2013; Stensrud et al., 2013).

El objetivo de este trabajo es contribuir al desarrollo de un sistema de pronóstico de eventos meteorológicos severos que pueda aprovechar las nuevas redes de observación disponibles, como así también aquellas que se incorporarán en los próximos años. Para ello, se busca avanzar en el desarrollo de un sistema de asimilación de datos en muy alta resolución que sea capaz de asimilar datos de radar para generar pronósticos a muy corto plazo de eventos severos en Argentina. El presente trabajo se organiza de la siguiente forma. En la sección 2, se describe el sistema de asimilación de datos empleado junto con el diseño del experimento con observaciones

sintéticas. En la sección 3, se presentan los resultados obtenidos para el experimento realizado. Finalmente, en la sección 4 se sintetizan las conclusiones del trabajo.

SISTEMA DE ASIMILACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La técnica de asimilación elegida es el *Local Ensemble Transform Kalman Filter* (LETKF; Hunt et al., 2007), la cual resulta adecuada para el tratamiento de sistemas multidimensionales y un gran número de observaciones. Este algoritmo presenta dos etapas: 1) La etapa de análisis, en la que se combinan las observaciones con un pronóstico numérico a muy corto plazo, de forma tal de obtener un diagnóstico del estado de la atmósfera lo más preciso posible, denominado análisis; 2) La etapa de pronóstico, en la que el diagnóstico generado se usa como condición inicial para generar un nuevo pronóstico con el modelo numérico. Este pronóstico servirá para anticipar la evolución futura de la atmósfera y también será utilizado para generar un nuevo diagnóstico en el momento en el que estén disponibles nuevas observaciones. El LETKF utiliza un conjunto de múltiples pronósticos generados con el modelo numérico. Cada pronóstico representa un escenario posible, y la evolución de los diferentes escenarios en el tiempo permite diagnosticar el nivel de incertidumbre que presentan los pronósticos. En este trabajo se utiliza un conjunto de 60 pronósticos para evaluar dicha incertidumbre (Figura 1).

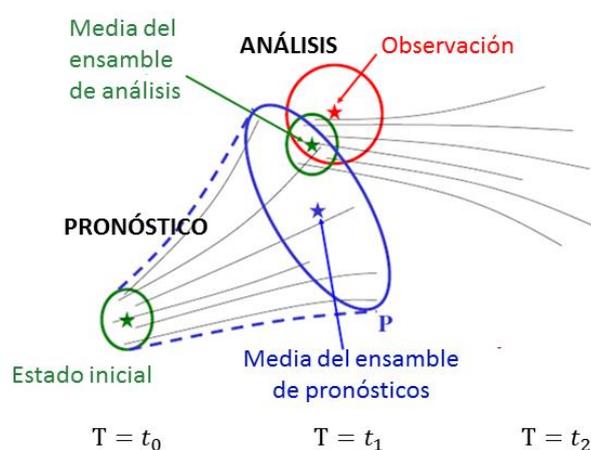


Figura 1.- Esquema del LETKF. El ensemble de análisis (verde) se genera a partir de la combinación entre el ensemble de pronósticos a corto plazo (azul) y las observaciones disponibles (rojo).

Simulación Verdad

El sistema de asimilación de datos utilizado para combinar el modelo numérico con las observaciones es evaluado utilizando observaciones sintéticas de radar para la situación del día 22 de enero de 2014, la cual se caracterizó por el desarrollo de un sistema convectivo, organizado e intenso, que resulta representativo del tipo de sistemas que ocurren frecuentemente en la región centro y norte del país y que explican un gran porcentaje de los eventos severos asociados a convección profunda. Las observaciones sintéticas, se generan a partir de una simulación de la evolución de la atmósfera obtenida a partir de un modelo numérico, que denominaremos

“simulación verdad”. Este tipo de estrategia, permite evaluar el sistema de asimilación de datos y pronóstico en un contexto en donde se conoce la verdadera evolución de la atmósfera.

El modelo numérico empleado es el *Weather Research and Forecasting* (WRF; Skamarock et al., 2008), un modelo dinámico de mesoescala, compresible y no hidrostático. El dominio utilizado es de 500 km x 500 km x 20 km, con una retícula de 500 m de resolución horizontal y centrado en 34.37°S – 63.94°O (Figura 2). El conjunto de parametrizaciones incluye el esquema YSU (Hong et al., 2006) para la capa límite, Noah (Tewari et al., 2004) para el modelo de suelo, RRTM (Mlawer et al., 1997) y Dudhia (1989) para la radiación de onda larga y onda corta, respectivamente. Los procesos microfísicos se parametrizan utilizando el esquema de un momento con 6 especies microfísicas (vapor, gotas pequeñas, gotas de lluvia, hielo pequeño, agregados-nieve, graupel-granizo), WSM6 (Hong y Lim, 2006). Las condiciones iniciales y de borde son provistas por el dominio d02 (Figura 2), que cuenta con una resolución horizontal de 2 km y cuyas condiciones de borde son provistas por los datos del modelo *Global Forecast System* (GFS) con una resolución horizontal de 0,5° x 0,5° cada 6 horas. El período de la simulación verdad comprende desde las 15Z hasta las 22Z del día 22 de enero.

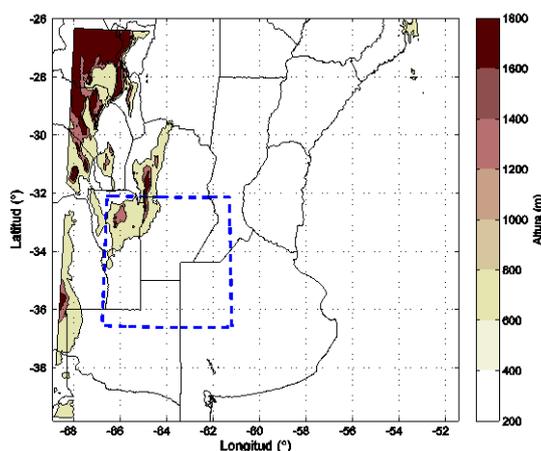


Figura 2.- Dominio empleado en el experimento de asimilación (azul), con la topografía del modelo WRF (sombreado, m). El borde exterior de la figura corresponde a los límites del dominio d02.

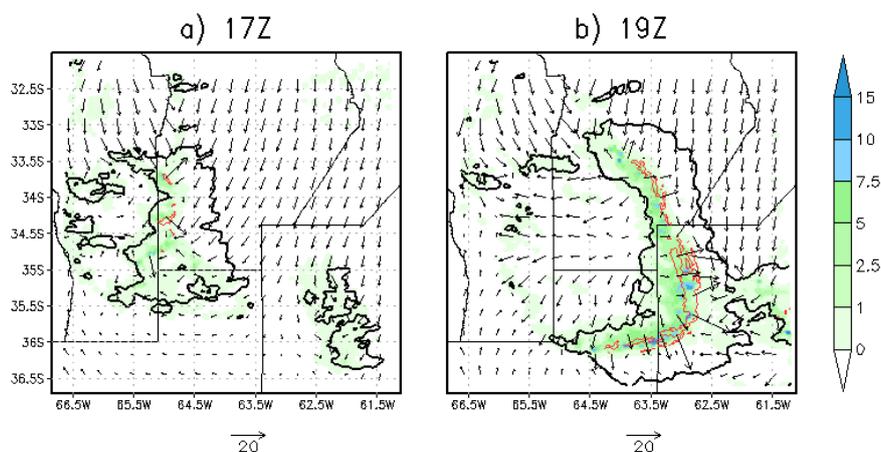


Figura 3.- Precipitación acumulada en 5 minutos (sombreado, mm) e intensidad de viento a 10 m de 15 m s^{-1} (contorno rojo). El contorno negro representa el borde de nube. (a) 17Z. (b) 19Z del día 22 de enero de 2014, para la simulación verdad.

En el instante inicial de la simulación verdad, se observa un entorno favorable para el desarrollo de convección intensa, con valores de CAPE alto ($> 2500 J kg^{-1}$) en la mayor parte del dominio y cortante de viento en la capa 0-6 km moderada ($\sim 15 m s^{-1}$; no mostrado). El inicio de la convección ocurre a las 15Z en forma de celdas aisladas, mientras que dos horas después, el sistema convectivo se presenta como una línea de inestabilidad orientada en sentido N-S ubicada en el sudoeste de Córdoba y desplazándose hacia el sudeste. En las siguientes horas, el sistema muestra un crecimiento marcado en su extensión e intensidad, y finalmente abandona el dominio a las 21Z (Figura 3).

Observaciones sintéticas de radar

La metodología empleada para la generación de las observaciones sintéticas de radar se basa en la técnica OSSE (*Observing System Simulation Experiment*; Arnold y Dey, 1986), es decir, que se hace uso de la simulación verdad para generar los datos sintéticos de radar que incluyen reflectividad y velocidad Doppler. Para esto, se posiciona en forma ficticia un radar Doppler de simple polarización, ubicado en $34.37^{\circ}S - 63.40^{\circ}O$, que opera en banda S ($\lambda = 10,0 cm$), con 14 ángulos de elevación y 240 km de rango. Luego, se utiliza la simulación verdad para simular lo que dicho radar hubiera medido, respetando la geometría de medición empleada por los radares meteorológicos. Las variables simuladas incluyen la velocidad Doppler, que representa la velocidad con la que los hidrometeoros detectados se acercan o alejan del radar; y el factor de reflectividad logarítmico, comúnmente denominado reflectividad, que está relacionado con la cantidad y tipo de hidrometeoros de mayor tamaño dentro de las nubes. Finalmente, para representar los errores presentes en las observaciones reales, se añade un error aleatorio que sigue una distribución gaussiana con media cero y desvío estándar de $0,5 m s^{-1}$ y 2 dBZ para la velocidad Doppler y la reflectividad, respectivamente. De esta manera se obtienen las observaciones sintéticas de reflectividad y velocidad Doppler en la geometría del radar.

El proceso de asimilación con el LETKF

Para el experimento de asimilación se consideran condiciones de modelo imperfecto. Si bien se utiliza el WRF en el proceso de asimilación de las observaciones y para generar los pronósticos a corto plazo, se lo utiliza con una resolución horizontal menor (2 km), diferentes condiciones de borde lateral (pronósticos del GFS) y un tratamiento diferente para los procesos microfísicos (Lin et al., 1983). Asimismo, se realizó otra simulación con la misma versión del modelo WRF en la cual no se asimilan datos de radar y a la que denominaremos simulación control. La asimilación de datos de radar comienza a las 17:05Z, una vez que el sistema convectivo se encuentra más desarrollado. Las observaciones sintéticas son asimiladas por un período de 140 minutos y con una frecuencia temporal de 5 minutos. Es importante destacar que los puntos de retícula en los que las observaciones indican la ausencia de hidrometeoros precipitantes, son asimilados y considerados como zonas de no precipitación. En particular, la asimilación de reflectividad en las zonas con ausencia de nube precipitante permite eliminar del pronóstico la presencia de nubes espurias que pueden generarse en el interior del dominio.

RESULTADOS

Evaluación cualitativa del sistema de asimilación

Una forma de evaluar el desempeño del sistema de asimilación es comparando visualmente el estado estimado por el análisis con el estado real del sistema, dado por la simulación verdad. La Figura 4 muestra dicha comparación en niveles bajos (1 km) para dos tiempos del proceso de asimilación.

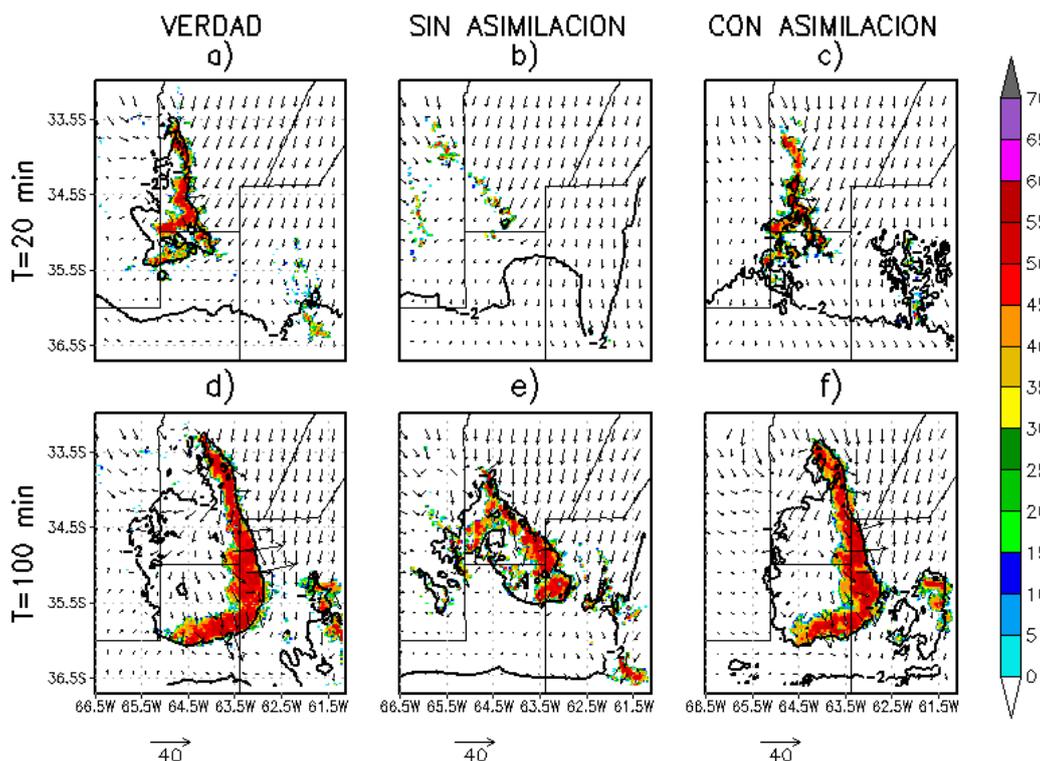


Figura 4.- Campos horizontales de reflectividad (sombreado; dBZ), viento (vectores; $m s^{-1}$) y perturbación de temperatura (contorno negro para -2 K) en 1 km de altura, para la simulación verdad (izquierda), para la simulación control (medio) y para la media del ensamble de análisis (derecha). (a)-(c) 20 minutos, (d)-(f) 100 minutos, de inicializada la asimilación de datos de radar.

A los 20 minutos de inicializada la asimilación (Figura 4, a, b y c), el análisis detecta adecuadamente la región donde se ubica el sistema convectivo, es decir, donde se están produciendo las mayores precipitaciones. La simulación control que no utiliza los datos de radar, muestra algunas áreas donde se desarrollan celdas convectivas aisladas, pero con intensidades todavía muy por debajo de lo que muestra la simulación verdad. No obstante, características del sistema convectivo como son la forma y extensión de la piletta de aire frío, así como también la intensidad de la circulación, no se encuentran representadas con gran precisión tanto por el análisis como por la simulación control. A medida que avanza el proceso de asimilación, puede observarse como los sucesivos análisis corrigen en forma adecuada los errores iniciales. A los 100 minutos de inicializada la asimilación (Figura 4, d, e y f), el sistema de asimilación logra mejorar en forma sustancial la representación de la zona sur de la línea convectiva en términos de reflectividad. Asimismo, el análisis captura en forma adecuada el patrón de circulación tanto dentro como por detrás de la línea convectiva, a la vez que se observa una mejora considerable en la representación de la extensión y forma de la piletta de aire frío. Esto muestra

que, a pesar de que en la región oeste del dominio no se están asimilando datos en forma directa, el sistema de asimilación es capaz de reconstruir la piletta de aire frío producto de la convección que el sistema de asimilación sí estaría corrigiendo a partir de observaciones previas. Puede verse una mejora notable en la representación de la iniciación y estructura del sistema convectivo cuando se utiliza la información de radar disponible. Además, la ubicación y orientación de las tormentas también son mejor representadas respecto de la simulación control, principalmente a medida que avanza el proceso de asimilación.

Evaluación cuantitativa del sistema de asimilación

La Figura 5 muestra los promedios temporales para el período de asimilación y los promedios espaciales de los estadísticos RMSE, dispersión (SPREAD) y BIAS para las componentes zonal y vertical del viento, la temperatura y la relación de mezcla de vapor. Esta figura incluye también el RMSE y el BIAS de la simulación control, en la cual no se asimilan datos de radar. Para los promedios espaciales, sólo se consideraron los puntos de retícula en los que la reflectividad es mayor a -20 dBZ, de manera de focalizar el mismo en las zonas donde está ocurriendo precipitación y por ende donde es más difícil realizar un pronóstico.

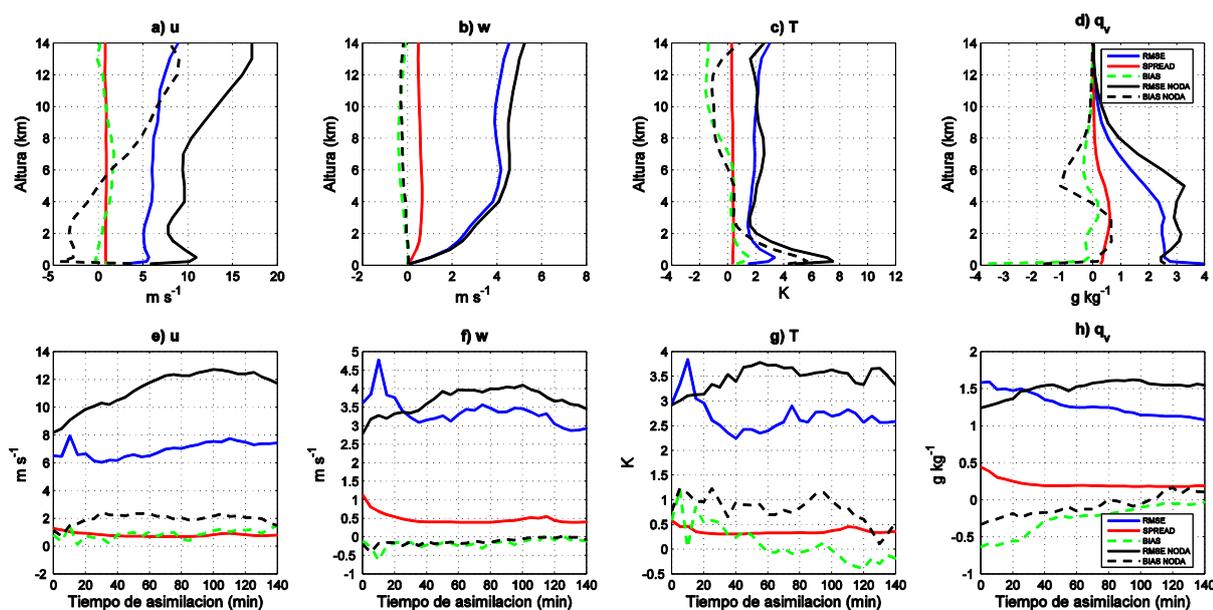


Figura 5.- Promedios temporales (arriba) y espaciales (abajo) del error cuadrático medio (azul), la dispersión del ensamble (rojo) y el bias (verde). Se incluye el RMSE y el BIAS de la simulación control (negro). (a), (e) Velocidad zonal ($m s^{-1}$). (b), (f) Velocidad vertical ($m s^{-1}$). (c), (g) Temperatura (K). (d), (h) Relación de mezcla de vapor ($g kg^{-1}$).

Por un lado, los promedios temporales muestran la variación de los estadísticos con la altura. El comportamiento y la magnitud de la dispersión del ensamble presentan variaciones mínimas con la altura y valores pequeños. Este resultado sugiere que el ensamble es poco dispersivo, lo cual indica que el sistema debe ser mejorado, ya que no se estarían muestreando correctamente las fuentes de error en la condición inicial. Por otro lado, los promedios espaciales muestran la variación de los estadísticos a través del período de asimilación. Durante los primeros 40 minutos de asimilación, se observa un máximo bien marcado en la magnitud del RMSE, mientras que en los ciclos de asimilación restantes, se mantiene aproximadamente constante o presenta

una disminución con el tiempo. Asimismo, la dispersión presenta una disminución durante los primeros 40 minutos de asimilación y un valor aproximadamente constante en los siguientes ciclos.

Comparando el RMSE en el caso en el que se asimilan observaciones de radar con el obtenido en la simulación que no hace uso de dichas observaciones, se encuentra que, al utilizar las observaciones de radar, el valor del error disminuye en forma significativa en todos los niveles para la componente zonal del viento, en niveles medios y altos para la velocidad vertical, en niveles bajos para la temperatura y en niveles medios para la relación de mezcla de vapor. Asimismo, el impacto de la asimilación de observaciones de radar en la magnitud del RMSE es notable luego de 40 minutos de haber inicializado dicha asimilación, mientras que durante los primeros 40 minutos, el error en las variables que no están directamente relacionadas con las observaciones asimiladas es superior al de la simulación control. Esto puede estar asociado a las perturbaciones aleatorias que se utilizan para inicializar el ensamble. Al perturbar la temperatura y las componentes del viento, se generan convergencias/divergencias que dan lugar a movimientos verticales en forma aleatoria en los puntos de retícula, produciendo convección espuria en los primeros análisis. Como la simulación control es un pronóstico determinístico en el que no se introducen este tipo de perturbaciones, sino que se inicializa a partir del análisis del modelo GFS interpolado a la retícula del modelo WRF con resolución de 2 km, no se genera este tipo de convección y entonces el error no se ve afectado en los primeros ciclos de asimilación.

Pronósticos por ensambles

Una ventaja de utilizar el método LETKF para la asimilación de datos, es que el ensamble o conjunto de análisis generados puede ser empleado como condiciones iniciales en un sistema de pronóstico por ensambles, permitiendo así cuantificar la incertidumbre en los pronósticos, en particular la asociada a eventos meteorológicos extremos que resulta grande. Se realizaron dos pronósticos a 3 horas inicializados a las 17:25Z, uno a partir de los campos que tienen incorporada la información de radar y el otro a partir de campos que no cuentan con información de este tipo de observaciones.

La Figura 6 muestra la evolución del RMSE para la media del ensamble de ambos pronósticos. Se puede observar que la precisión del pronóstico aumenta considerablemente para la velocidad zonal y la temperatura, cuando el mismo se inicializa a partir de un análisis que cuenta con información de observaciones de radar. Para la relación de mezcla de vapor, el impacto de la asimilación de datos en el pronóstico se observa una vez transcurridos los primeros 60 minutos, mientras que para la velocidad vertical dicho impacto no es evidente, aunque se aprecia una disminución marcada del error a medida que aumenta el plazo de pronóstico. Esto último, podría asociarse a que el sistema convectivo se encuentra en su etapa de desarrollo, caracterizada por ascendentes intensas, con zonas de máxima velocidad vertical estrechas y desfasadas respecto de la simulación verdad (no mostrado).

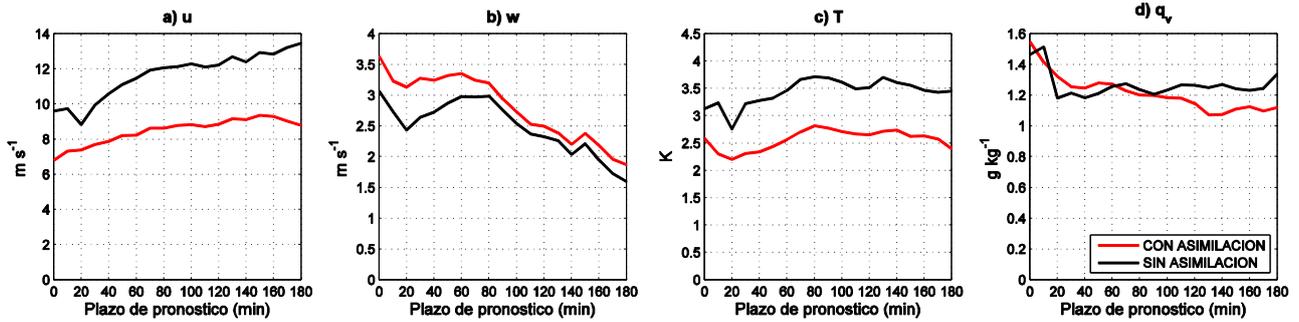


Figura 6.- Promedios espaciales del error cuadrático medio de los pronósticos inicializados a las 17:25Z, con (rojo) y sin (negro) asimilación de datos de radar. (a) Velocidad zonal ($m s^{-1}$). (b) Velocidad vertical ($m s^{-1}$). (c) Temperatura (K). (d) Relación de mezcla de vapor ($g kg^{-1}$).

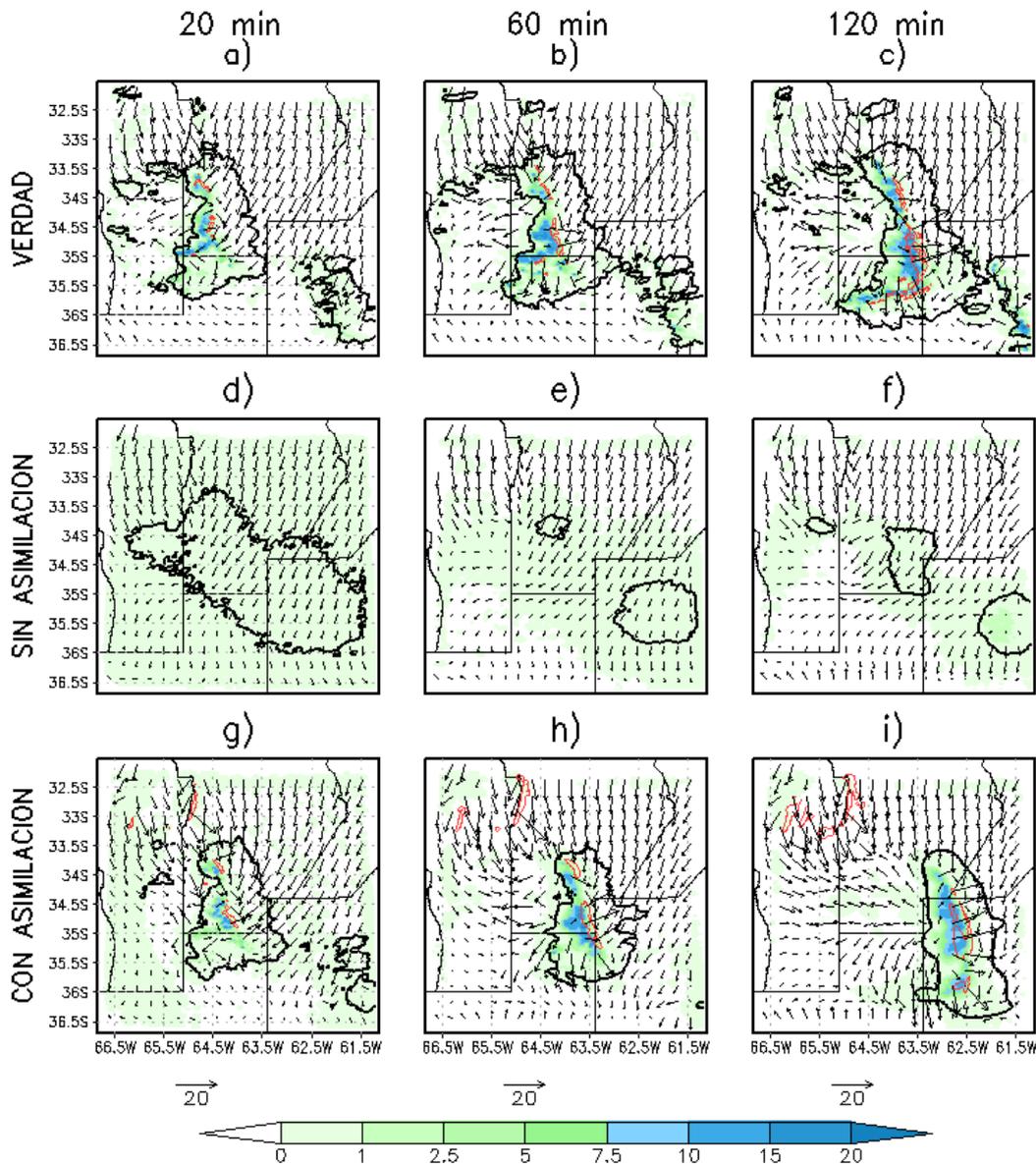


Figura 7.- Campos de precipitación acumulada en 10 minutos (sombreado; mm) e intensidad de viento a 10 m de $15 m s^{-1}$ (contorno rojo), para la simulación verdad (arriba), el pronóstico inicializado sin asimilación de datos de radar (medio) y el pronóstico inicializado con asimilación (abajo). El contorno negro representa el borde de nube. (a), (d), (g) plazo de pronóstico de 20 minutos. (b), (e), (h) plazo de pronóstico de 60 minutos. (c), (f), (i) plazo de pronóstico de 120 minutos.

Respecto al pronóstico a corto plazo de precipitación, la Figura 7 muestra la diferencia entre los pronósticos inicializados con y sin la incorporación de datos de radar, para distintos plazos de pronósticos. En los primeros 20 minutos de pronóstico, la inclusión de observaciones de radar permite obtener un pronóstico detallado del sistema convectivo, tanto en lo que respecta a la ubicación y extensión del mismo, como la representación de las zonas con precipitaciones extremas. Asimismo, se logra capturar el crecimiento del sistema convectivo ya que se observa un aumento en la intensidad de la precipitación en la primera hora de pronóstico. A medida que aumenta el plazo de pronóstico, se hace evidente la pérdida de precisión del mismo en la localización de la línea convectiva (posicionándola algunos kilómetros por delante), como así también en la intensidad de la circulación y de los máximos de precipitación. Sin embargo, podemos decir que incluso después de 2 horas de inicializado el pronóstico, el impacto de la asimilación de datos de radar en dicha inicialización continua siendo notable.

CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo es avanzar en el desarrollo de un sistema de asimilación de datos en muy alta resolución (al menos 4 km de espaciamiento entre puntos de retícula) capaz de asimilar datos de radar para generar pronósticos a muy corto plazo de precipitaciones extremas y eventos severos asociados a convección en Argentina. El mismo se llevó a cabo a partir de la realización de un experimento numérico para un caso de convección húmeda y profunda en el centro de Argentina, utilizando el sistema de asimilación LETKF-WRF junto con observaciones sintéticas de reflectividad y velocidad Doppler.

Desde un punto de vista cualitativo, los resultados muestran que el sistema de asimilación de datos es capaz de identificar en forma precisa la ubicación, extensión y orientación del sistema convectivo y las zonas de precipitación asociadas al mismo, así como también puede reconstruir razonablemente bien otros aspectos asociados a la convección (e.g. pileta de aire frío, frente de ráfagas). Además, variables que no son directamente observadas, como la temperatura, los condensados y la velocidad vertical, también logran ser representadas en forma adecuada. Asimismo, al comparar el experimento de asimilación con la simulación en la que no se asimilan observaciones de radar, se observa que el valor del error cuadrático medio disminuye en forma significativa en las variables analizadas, siendo notable el impacto de la asimilación luego de transcurridos algunos ciclos de asimilación. La evaluación cuantitativa del sistema de asimilación muestra que el error cuadrático medio entre la media del ensamble de análisis y la simulación verdad presenta una tendencia a aumentar durante el período de asimilación. Por otra parte, la dispersión del ensamble presenta una disminución marcada en los primeros ciclos de asimilación y un valor aproximadamente constante y pequeño (en comparación con el RMSE) en los ciclos restantes. Debido a esto, el sistema de asimilación toma como mejor estimación de la verdad aquella dada por el pronóstico generado con el modelo numérico, otorgándole menos peso a las observaciones, por lo que las correcciones introducidas en el análisis son insuficientes, reduciendo la capacidad del sistema de asimilación para reproducir la circulación en la escala de las tormentas. Respecto de los pronósticos por ensambles, los resultados muestran el impacto positivo que tiene la

inicialización de los mismos a partir de campos que incorporaron información proveniente de observaciones de radar. En particular, en los pronósticos de precipitación dicho impacto es sumamente evidente en los primeros 20 minutos, en los que el pronóstico es capaz de reproducir con gran detalle la posición del sistema convectivo, como así también los máximos de precipitación. Una aplicación inmediata de estos pronósticos a corto plazo está asociada a su utilización como input de modelos hidrológicos para el pronóstico de inundaciones repentinas en cuencas pequeñas.

En resumen, puede decirse que los resultados obtenidos en esta evaluación preliminar del desempeño del sistema de asimilación de datos de radar LETKF-WRF son alentadores, ya que el mismo es capaz de reconstruir la estructura del sistema convectivo, permitiendo la generación de pronósticos detallados de precipitación (y otras variables relevantes) a muy corto plazo. Además, la validación llevada a cabo permitió identificar algunos aspectos del sistema de asimilación que pueden ser optimizados de forma tal de incrementar la precisión, tanto de los diagnósticos como de los pronósticos. Finalmente, cabe destacar que la asimilación de datos puede ser implementada en un sistema de alerta hidrológico, ya sea para obtener una mejor estimación del estado inicial de una cuenca, como así también para estimar ciertos parámetros del modelo hidrológico empleado (los cuales pueden resultar difíciles de medir en forma directa).

Agradecimientos. Este trabajo fue financiado mediante los proyectos UBACYT 2014-2017, PICT 2014-1000 y Alert.ar. El experimento de asimilación, incluyendo los pronósticos por ensambles, fue realizado utilizando los recursos computacionales del Riken Advanced Institute for Computational Science.

REFERENCIAS

- Arnold, C. P. y C. H. Dey, 1986: Observing-Systems Simulation Experiments: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67, 687-695, doi:10.1175/1520-0477(1986)067
- Clark, A. J., W. a. Gallus, M. Xue, y F. Kong, 2009: A Comparison of Precipitation Forecast Skill between Small Convection-Allowing and Large Convection-Parameterizing Ensembles. *Weather and Forecasting*, 24, 1121-1140, doi:10.1175/2009WAF2222222.1
- Dudhia, J., 1989: Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 3077-3107, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.
- Hong, S. y J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42, 129-151.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, y J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, y I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230, 112-126, doi:10.1016/j.physd.2006.11.008.
- Kain, J. S., S. J. Weiss, J. J. Levit, M. E. Baldwin, y D. R. Bright, 2006: Examination of Convection-Allowing Configurations of the WRF Model for the Prediction of Severe Convective Weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004. *Weather and Forecasting*, 21, 167-181, doi:10.1175/WAF906.1.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, y H. D. Orville, 1983: Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of*

- Climate and Applied Meteorology, 22, 1065-1092, doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2.
- Matsudo, C. M. y P. V. Salio, 2011: Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina. Atmospheric Research, 100, 523-537, doi:10.1016/j.atmosres.2010.11.004.
- Mezher, R. N., M. Doyle, y V. Barros, 2012: Climatology of hail in Argentina. Atmospheric Research, 114-115, 70-82, doi:10.1016/j.atmosres.2012.05.020.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, y S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. Journal of Geophysical Research, 102, 16663, doi:10.1029/97JD00237.
- Rasmussen, K. L., M. D. Zuluaga, y R. A. Houze, 2014: Severe convection and lightning in subtropical South America. Geophysical Research Letters, 41, 7359-7366, doi:10.1002/2014GL061767.
- Skamarock, W., J. Klemp, J. Dudhi, D. Gill, D. Barker, M. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, y J. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Report, 113, doi:10.5065/D6DZ069T.
- Snyder, C. y F. Zhang, 2003: Assimilation of Simulated Doppler Radar Observations with an Ensemble Kalman Filter. Monthly Weather Review, 131, 1663-1677, doi:10.1175//2555.1.
- Sobash, R. A. y D. J. Stensrud, 2013: The impact of covariance localization for radar data on enKF analyses of a developing MCS: Observing system simulation experiments. Monthly Weather Review, 141, 3691-3709, doi:10.1175/MWR-D-12-00203.1.
- Stensrud, D. J., L. J. Wicker, M. Xue, D. T. Dawson, N. Yussouf, D. M. Wheatley, T. E. Thompson, N. A. Snook, T. M. Smith, A. D. Schenkman, C. K. Potvin, E. R. Mansell, T. Lei, K. M. Kuhlman, Y. Jung, T. A. Jones, J. Gao, M. C. Coniglio, H. E. Brooks, y K. A. Brewster, 2013: Progress and challenges with Warn-on-Forecast. Atmospheric Research, 123, 2-16, doi:10.1016/j.atmosres.2012.04.004.
- Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, y R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified noah land surface model in the WRF model. Bulletin of the American Meteorological Society, 2165-2170.
- Tong, M. y M. Xue, 2004: Ensemble Kalman Filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model. Bulletin of the American Meteorological Society, 133, 85-95, doi:10.1175/MWR2898.1.
- Weisman, M. L., C. Davis, W. Wang, K. W. Manning, y J. B. Klemp, 2008: Experiences with 0{36-h Explicit Convective Forecasts with the WRF-ARW Model. Weather and Forecasting, 23, 407-437, doi:10.1175/2007WAF2007005.1.
- Zhang, F., C. Snyder, y J. Sun, 2004: Impacts of Initial Estimate and Observation Availability on Convective-Scale Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter. Monthly Weather Review, 132, 1238-1253, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1238:IOIEAO>2.0.CO;2.