

SENSIBILIDAD DE UN SISTEMA DE ASIMILACIÓN DE DATOS POR ENSAMBLES A DIFERENTES CONFIGURACIONES, IMPLEMENTADO EN EL SUR DE SUDAMÉRICA.

María Eugenia Dillon^{1,2}, Yanina García Skabar^{1,2,3}, Eugenia Kalnay⁴, Juan José Ruiz^{1,3,5,6} y Estela Ángela Collini^{1,7}

¹CONICET

²Servicio Meteorológico Nacional

³UMI-IFAECL, (CNRS-CONICET-UBA)

⁴Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland

⁵Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. CONICET. UBA

⁶Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

⁷Servicio de Hidrografía Naval

(Manuscrito recibido el 22 de noviembre de 2017, en su versión final el 11 de mayo de 2018)

RESUMEN

Uno de los mayores desafíos en la predicción numérica del tiempo es el de reducir la incertidumbre de las condiciones iniciales. Con el fin de abordar esta problemática, variados esfuerzos se están llevando a cabo en el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN). En este artículo se presenta la evaluación del sistema regional de asimilación por ensambles WRF-LETKF (Weather Research and Forecasting model - Local Ensemble Transform Kalman Filter). El dominio cubre el Sur de Sudamérica con una resolución horizontal de 40 km, y el período de prueba utilizado es de dos meses (noviembre y diciembre de 2012). El sistema de asimilación consta de un ensamble de 40 miembros e incorpora observaciones tanto convencionales como provenientes de satélites.

En este trabajo, se evaluó el impacto de utilizar un ensamble multi física incluyendo en sus miembros distintas opciones de parametrizaciones de cumulus y capa límite planetaria. Se halló que dicha estrategia generalmente produce resultados mejores comparada con un sistema de ensamble en el cual todos los miembros poseen las mismas parametrizaciones. También se exploró la inclusión de bordes perturbados, pero no se encontró un impacto significativo con la metodología propuesta. Otro experimento consistió en la inclusión de los perfiles verticales de temperatura y humedad de los AIRS (Atmospheric Infrared Sounders) en la asimilación, cuya evaluación demostró un impacto positivo en los resultados. Finalmente, se comparó la media de los pronósticos por ensamble inicializados con los análisis de las diferentes variantes del sistema WRF-LETKF con un pronóstico determinístico del WRF inicializado con los análisis provistos por el GFS (Global Forecast System). Si bien generalmente dicha comparación mostró un impacto positivo de la asimilación de datos a escala regional, también mostró la necesidad de que el sistema regional

mantenga la información de mayor escala provista por el modelo global.

Palabras clave: Asimilación de datos, ensamble multi esquema, AIRS, LETKF.

SENSITIVITY OF DIFFERENT CONFIGURATIONS OF AN ENSEMBLE BASED DATA ASSIMILATION SYSTEM IMPLEMENTED OVER SOUTHERN SOUTH AMERICA.

ABSTRACT

One of the big challenges in numerical weather prediction is to reduce the uncertainty in the initial conditions. At the National Meteorological Service (SMN) of Argentina, many efforts have been carried out to address this issue. In this work, the regional Local Ensemble Transform Kalman Filter coupled with the Weather Research and Forecasting model (WRF-LETKF) system is evaluated. The domain covers most of Southern South America with an horizontal resolution of 40 km and a 2 month period is tested (November and December 2012). A 40 member ensemble is used to assimilate conventional and satellite observations.

In this work a multi physics ensemble that includes different choices for the cumulus and planetary boundary layer parameterizations is evaluated. This experiment shows that, overall, the multi physics approach produce better results than a single physics configuration. The inclusion of boundary perturbations has also been explored although, it does not produce a significant impact in the current experimental settings. In addition, we explore the sensitivity to the assimilation of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) temperature and moisture retrievals. The results indicate that the inclusion of these retrievals is a valuable alternative to deal with the scarcity of radiosondes observations in Southern South America. Finally, a comparison among the different WRF-LETKF ensemble mean forecasts and deterministic WRF forecasts initialized from the GFS (Global Forecast System) without assimilation, was carried on. Generally a positive impact of the data assimilation technique was achieved, although it was found that the regional system needs to keep large scale information from the global model.

Keywords: data assimilation, multi-scheme ensemble, AIRS, LETKF.

1. INTRODUCCIÓN

En Argentina, existe la necesidad de implementar un sistema de asimilación de datos regional operativo en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ya que por un lado permitiría contar con análisis regionales de mayor resolución temporal, respecto de los actualmente disponibles; y por otro lado, permitiría incluir observaciones locales que no llegan a asimilarse en los modelos globales, generando de esa manera condiciones iniciales más precisas. En particular, si se aplicara un método de asimilación por ensambles, se contaría con la ventaja de

obtener información sobre la incertidumbre de la condición inicial lo cual permitiría producir pronósticos probabilísticos más confiables, lo cual es imprescindible para cualquier centro de predicción operativa. Asimismo, un sistema de análisis y pronósticos por ensambles posibilitaría calcular una estimación del error del modelo.

En Sudamérica, existen algunos estudios realizados con el fin de generar y/o implementar sistemas de asimilación de datos y evaluar su impacto tanto en los análisis como en los pronósticos a escala regional, mediante los cuales

se obtuvieron resultados alentadores (ej.: García Skabar y Nicolini, 2009; García Skabar y Nicolini, 2014). Actualmente en el Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) se está avanzando con un sistema de asimilación regional de actualización rápida para Sudamérica, utilizando el esquema GSI-3DVar (Gridpoint Statistical Interpolation – three Dimensional Variational data assimilation system) con el modelo de pronóstico Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock y otros, 2008) (Goncalves y otros, 2016, 2017) y también se implementó un sistema de asimilación global con el mismo esquema (Bastarz y Herdies, 2017).

Recientemente, Saucedo (2016) realizó experimentos idealizados para evaluar el impacto de diferentes técnicas para representar los errores de modelo y aquellos asociados a la condición de borde, utilizando el Filtro de Kalman por Ensamblados Transformado y Localizado (LETKF; Hunt y otros, 2007) acoplado con el modelo WRF. En dicho trabajo se documentó un impacto positivo de la técnica de ensambles multimodelo (Stensrud y otros, 2000), es decir de la utilización de diferentes parametrizaciones de los procesos de escala no resueltas para representar el error de modelo en el contexto de los sistemas de asimilación, y también de la perturbación de las condiciones de borde para representar la incertidumbre asociada a las mismas (Meng y Zhang, 2011; Houtekamer y Zhang, 2016). Dillon y otros (2016) aplicaron técnicas similares utilizando observaciones reales sobre la región de Sudamérica, confirmando el impacto positivo del uso de ensambles multimodelo.

Respecto a las observaciones a asimilar, es de esperar que el sistema mejore en la medida en que aumente la cantidad disponible de las mismas. En este sentido, la inclusión de datos provenientes de satélites representa un potencial beneficio debido a su amplia cobertura espacial y temporal. La asimilación tanto de variables derivadas (ej. viento, temperatura y humedad) como de radianzas, ha demostrado tener un impacto positivo en análisis y pronósticos (ej.

Kopken y otros, 2004; Miyoshi y Sato, 2007; Mc Carty y otros, 2009; Jones y Stensrud, 2012; Ota y otros, 2013; Wu y otros, 2014).

El objetivo del presente artículo es evaluar la sensibilidad del sistema WRF-LETKF a los siguientes aspectos:

- 1) Representación de los errores de modelo a través de la implementación de un ensamble multi-esquema.
- 2) Representación de la incertidumbre en las condiciones de borde a través de la utilización de perturbaciones aleatorias en las condiciones de borde (Saucedo, 2016).
- 3) Impacto de incluir las estimaciones de temperatura y humedad provistas por el sensor hiperspectral Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) (Susskind, 2011; Miyoshi y Kunii 2012; Jones y Stensrud, 2012).

Cabe destacar que este trabajo avanza respecto a Dillon y otros (2016) por un lado en la incorporación del estudio de la sensibilidad a la inclusión de los datos AIRS y a la utilización de bordes perturbados, y por otro lado en una evaluación más detallada del desempeño de los análisis y pronósticos generados.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 describe las características del sistema de asimilación y de los experimentos, en la sección 3 se realiza un análisis de los resultados obtenidos, y la sección 4 presenta las conclusiones.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1 Sistema de asimilación WRF-LETKF

El modelo de pronóstico numérico WRF ha sido utilizado en diversos estudios, tanto teóricos como aplicados, y en particular ha sido acoplado a sistemas de asimilación variacionales y por ensambles. En particular, Miyoshi y Kunii (2011) desarrollaron un código del sistema WRF-LETKF de libre acceso, el cual fue usado para este trabajo. Cabe destacar que el método de asimilación de datos LETKF fue desarrollado en la Universidad de Maryland por Hunt y otros

(2007), con el fin de ser un método práctico para aplicarlo a sistemas temporalmente caóticos de alta dimensión, como lo es la atmósfera.

El LETKF es computacionalmente adecuado para su aplicación en sistemas de asimilación de datos atmosféricos (Szunyogh y otros, 2008), ya que al ser altamente paralelizable se puede resolver un sistema complejo con una gran cantidad de observaciones con recursos no tan elevados (Houtekamer y Zhang, 2016). El costo computacional es función principalmente del número de miembros utilizados, de la cantidad de observaciones asimiladas y de la resolución del modelo (Miyoshi y otros, 2014).

Resulta oportuno mencionar que el filtro de Kalman por ensambles consiste en un paso de pronóstico, tanto del pronóstico de las variables como de la matriz de covarianza de los errores de éste (P^f), y luego un paso de análisis, en el que está involucrada la matriz de ganancia K dada por:

$$K_i = P_i^f H_i^T [R_i + H_i P_i^f H_i^T]^{-1} \quad (1)$$

en el tiempo t_i ; donde H_i es el operador de las observaciones, que traduce las variables del modelo al espacio de las observaciones, y R_i es la matriz de covarianza de los errores de las observaciones. Para estimar la matriz P^f se computa simultáneamente un ensamble de pronósticos, con $k \in [1, m]$ identificando los miembros del ensamble:

$$P^f \approx \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (x_k^f - \bar{x}^f)(x_k^f - \bar{x}^f)^T \quad (2)$$

donde x_k^f denota el pronóstico de cada miembro del ensamble y \bar{x}^f es su media. El paso de análisis (x^a) y su matriz de covarianza (P^a) se calculan de la siguiente manera:

$$x_i^a = x_i^f + K_i \left\{ y_i^0 - H \left[\bar{x}_i^f \right] \right\} \quad (3)$$

$$P_i^a = (I - K_i H_i) P_i^f \quad (4)$$

utilizando las observaciones y^0 en el tiempo t_i . A partir de estas ecuaciones se desprende que cuanto mayor sea el número de miembros de

ensamble y de observaciones disponibles para assimilar, más costoso será el cómputo de las mismas.

En las implementaciones en la atmósfera generalmente el tamaño del ensamble es mucho menor que las dimensiones del sistema, lo cual puede producir que algunos de los elementos de P^f estén dominados por errores de muestreo. Esto sucede sobre todo en aquellos elementos que representan la covarianza entre variables correspondientes a puntos de retícula que son muy distantes entre sí. Para reducir el efecto de los errores de muestreo se utilizan técnicas de localización de la covarianza. En este trabajo se usa la localización propuesta por Hunt y otros (2007), quienes multiplican el error de cada observación por un factor que aumenta exponencialmente con la distancia entre ésta y el punto de retícula donde se está calculando el análisis. Este tratamiento se combina con la aplicación de una distancia de corte a partir de la cual un determinado punto de retícula no es influenciado por la observación.

Los parámetros correspondientes a la escala de localización horizontal y vertical se fijaron en 400 km y 0.4 ln (hPa) respectivamente, lo que implica que el radio de influencia de las observaciones se extiende en la horizontal 1.460 km y en la vertical 12,5 km aproximadamente (Miyoshi y Kunii, 2011). Para reducir el impacto de los errores de muestreo y representar parte de los errores de modelo, se utilizó la inflación multiplicativa adaptativa propuesta por Miyoshi (2011) e implementada exitosamente en el sistema WRF-LETKF por Miyoshi y Kunii (2012).

El dominio seleccionado incluye el Sur de Sudamérica (Figura 1). Se implementó una retícula de 40 km en el plano horizontal con proyección Lambert (139 x 134 puntos), y 30 niveles sigma-p en el plano vertical con tope en 50 hPa utilizando una mayor concentración de niveles cerca de superficie. Estas características permiten resolver adecuadamente los sistemas de escala sinóptica que afectan a la región y por

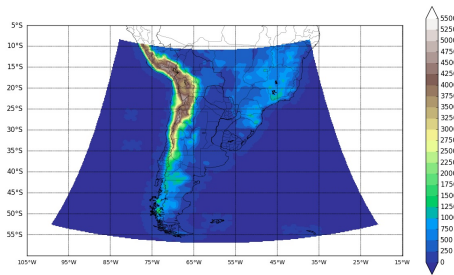


Figura 1: Dominio utilizado y topografía del modelo [m] (sombreado).

tanto son adecuadas para una primera evaluación del sistema de asimilación de datos regional. La cantidad de miembros de ensamble empleados en este trabajo es 40, en concordancia con Miyoshi y Kumii (2012) y Saucedo (2016).

La frecuencia de asimilación usada en este trabajo es de 3 horas, con el fin de diseñar un esquema que permita obtener una mayor frecuencia de análisis que la disponible en la actualidad, considerando los análisis globales producidos cada 6 horas por NCEP (National Centre for Environmental Prediction). Respecto a la ventana de asimilación, la misma comienza 2 horas antes del análisis y finaliza media hora luego de la hora del análisis. Las observaciones disponibles dentro de la ventana de asimilación se agrupan en sub-períodos de 1 hora de duración de forma tal de ser comparados con las salidas horarias del modelo, tal como se esquematiza en la Figura 2. Esta implementación es denominada 4D-LETKF (Hunt y otros, 2007), ya que compara la trayectoria pronosticada por el modelo dentro de la ventana de asimilación, con las observaciones en el tiempo que les corresponde.

El período seleccionado para realizar los experimentos es el de noviembre y diciembre de 2012. El sistema de asimilación se inicializa el 1 de noviembre de 2012 a las 00 UTC. El ensamble se inicializa a partir de la condición inicial del modelo Global Forecast System (GFS) a la cual se le suman perturbaciones generadas a partir de la resta entre dos estados de la atmósfera

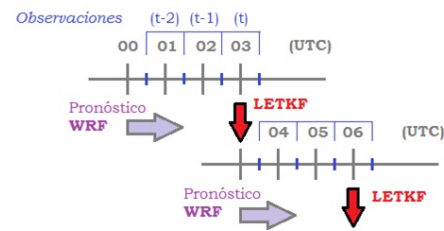


Figura 2: Esquema del ciclo de asimilación utilizado (adaptado de Dillon y otros, 2016). Por ejemplo, a las 00 UTC se inicializa un conjunto de pronósticos horarios del WRF, los cuales se van a usar como campos preliminares para los análisis de las 03 UTC (tiempo t). Las observaciones asimiladas para generar dichos análisis son las comprendidas entre las 00:30 y las 03:30 UTC, divididas en porciones horarias (tiempos $t-2$, $t-1$, t) para poder contrastarlas con los campos preliminares correspondientes. Luego, como resultado del proceso de asimilación LETKF, se obtienen los análisis a las 03 UTC, a partir de los cuales se inicializa un nuevo conjunto de pronósticos horarios del WRF para poder repetir el ciclo y calcular los análisis de las 06 UTC.

separados entre sí por 24 horas, escalada por un factor de 0.2, de manera de obtener 40 condiciones iniciales diferentes. Dichos estados, usados para la generación de perturbaciones, se obtuvieron de los reanálisis del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) con resolución $0,5^\circ$ (Saha y otros, 2010) de octubre y noviembre de 2010.

En la Tabla 1 se resumen las características del sistema WRF-LETKF descritas en los párrafos anteriores, las cuales son comunes a todos los experimentos de asimilación que se llevan a cabo.

2.2 Configuración de los experimentos

El primer experimento llevado a cabo se denomina E-CONTROL y será tomado como

Resolución horizontal	40 km (139 x 134 puntos)
Resolución vertical	30 niveles sigma-p (tope en 50 hPa)
Frecuencia de análisis	3 horas
Ventana de asimilación	3 horas (no contrada)
Miembros de ensamble	40
Parámetros de localización espacial	400 km (horizontal), 0.4 ln (hPa) (vertical)
Período de prueba	Noviembre y Diciembre de 2012

Tabla I: Características del sistema WRF-LETKF implementado.

experimento de referencia para evaluar la sensibilidad del sistema a diferentes variantes. En el experimento E-CONTROL, todos los miembros del ensamble utilizan un mismo conjunto de parametrizaciones que fueron escogidos siguiendo a Saulo y otros (2008), Ruiz y otros (2010): Kain-Fritsch para cumulus (Kain, 2004); WSM6 para microfísica (WRF Single Moment 6-class scheme; Hong y Lim, 2006); YSU para la capa límite planetaria (Yonsei University scheme; Hong, Noh y Dudhia, 2006); RRTM para la radiación de onda larga (Rapid Radiative Transfer Model; Mlawer y otros, 1997) y Dudhia para la radiación de onda corta (Dudhia, 1989). El modelo de suelo acoplado que se utilizó es el Noah Land Surface Model (Chen y Dudhia, 2001). Todos los miembros del ensamble utilizaron los pronósticos determinísticos del GFS de 0,5° de resolución como condición de borde.

Las observaciones asimiladas son las contenidas en los archivos PREPBUFR (PREP-Binary Universal Form for Representation of Meteorological Data) generados por el NCEP (Keyser, 2013). Los errores asociados a cada observación también se obtienen de dichos archivos y son generados a partir de un control de calidad riguroso llevado a cabo como parte del Global Data Assimilation System (GDAS) operado por NCEP. Los PREPBUFR son generados operativamente 4 veces al día a las 00, 06, 12 y 18 UTC, cada uno conteniendo todas las observaciones correspondientes a las 3 horas precedentes y a las 3 horas posteriores. Estos archivos incluyen la hora de adquisición de las observaciones, lo que permite agruparlas según

la frecuencia requerida, para este trabajo de una hora como se mencionó en la sección 2.1.

Las variables utilizadas son las componentes zonal y meridional del viento, la temperatura, la humedad específica, la temperatura virtual y la presión de superficie. En tanto que las fuentes de observaciones son los radiosondeos (ADPUPA), las estaciones de superficie (ADPSFC), los buques y boyas (SFCSHIP), los aviones (AIRCFT), los vectores de movimiento atmosféricos obtenidos a partir de las imágenes del satélite GOES (SATWND) y el viento superficial sobre el océano estimado a partir del Advanced Scatterometer (ASCATW) (Verspeek y otros, 2009). Un ejemplo de la distribución espacial de dichos tipos de observación se encuentra plasmado en el panel superior de la Figura 3.

Combinaciones de parametrizaciones realizadas para el experimento E-MULTI		Esquema de Cumulus		
		Kain-Fritsch (Kain, 2004)	BMJ (Janjic, 1994)	Grell (Grell y Devenyi, 2002)
Esquema de Capa Límite Planetaria (CLP)	YSU (Hong, Noh y Dudhia 2006)	A (5 miembros)	B (5 miembros)	C (5 miembros)
	MYJ (Janjic, 2002)	D (5 miembros)	E (4 miembros)	F (4 miembros)
	Quasinormal (Sukoriansky y otros, 2005)	G (4 miembros)	H (4 miembros)	I (4 miembros)

Tabla II: Combinaciones de parametrizaciones realizadas para el experimento E-MULTI, indicando la cantidad de miembros correspondiente en cada caso.

Para abordar los objetivos propuestos se proponen 3 experimentos de sensibilidad. A continuación se describen las características específicas que distinguen a cada uno de E-CONTROL:

1) Experimento E-MULTI: Este experimento consiste en la utilización de un ensamble multi-esquema, en donde cada miembro del ensamble utiliza una combinación diferente de esquemas para la representación de los procesos de escala no resuelta según las combinaciones

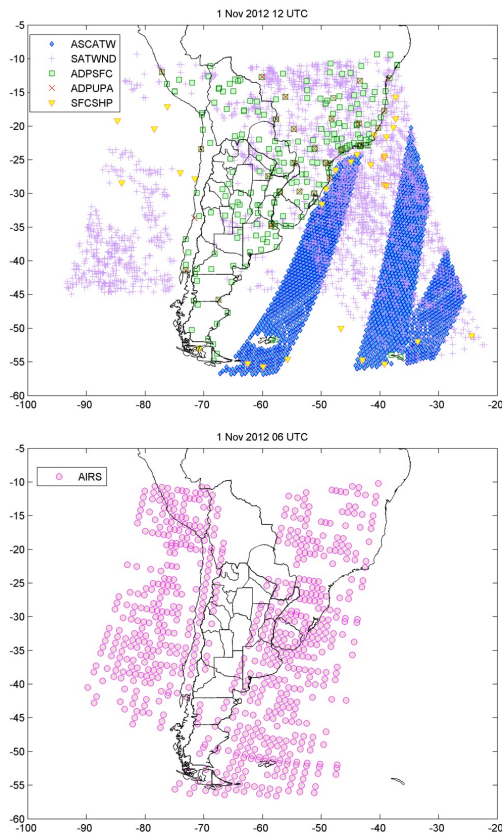


Figura 3: Panel superior: Observaciones provenientes del PREPBUFR asimiladas en el ciclo de las 12 UTC del 1 de Noviembre en todos los experimentos. Los símbolos se refieren a: estaciones de superficie (ADPSFC), radiosondeos (ADPUPA), viento superficial sobre el océano (ASCATW), los vectores de movimiento atmosféricos obtenidos a partir de las imágenes del satélite GOES (SATWND), buques y boyas (SFCSHIP). Panel inferior: Observaciones provenientes de los AIRS asimiladas en el ciclo de las 06 UTC del 1 de Noviembre en el experimento E-AIRS.

detalladas en la Tabla 2. En este caso, las diferentes configuraciones se basan en distintos esquemas de convección profunda y capa límite ya que, dada la resolución horizontal con la que se realizan estos experimentos, son los esquemas que presentan un mayor impacto. Esta estrategia es una manera de representar la incertidumbre

asociada al error del modelo (ej. Meng y Zhang, 2007, 2008; Saucedo, 2016).

2) Experimento E-BPERT: Este experimento consiste en introducir perturbaciones en los bordes, de manera de que cada uno de los 40 miembros del ensamble tenga una condición de borde diferente. Esto es una manera de representar la incertidumbre presente en las condiciones de borde y ayudar a mantener la dispersión del ensamble en el interior del dominio. El método utilizado es análogo al implementado para generar las condiciones iniciales del sistema de asimilación, considerando una evolución temporal coherente para cada miembro.

3) Experimento E-AIRS: En este experimento se incorporan los perfiles verticales de temperatura y humedad estimados por el AIRS (Susskind, 2011). Estos datos incrementan significativamente la cantidad de observaciones de temperatura y humedad en la vertical entre uno y dos órdenes de magnitud. Siguiendo a Miyoshi y Kunii (2012), se redujo la resolución horizontal original de los datos llevándola a 135 km de resolución aproximadamente mediante una técnica de thinning, es decir que se tomó una observación de cada 9. Además, cabe destacar que se utilizaron sólo los datos catalogados como de mejor calidad y por debajo de 200 hPa (Tobin y otros, 2006). Un ejemplo de la distribución espacial de los perfiles de AIRS se puede observar en el panel inferior de la Figura 3.

En la Tabla 3 se resumen las características propias de cada experimento de asimilación llevado a cabo, las cuales fueron descritas detalladamente en los párrafos anteriores.

2.3 Métodos de evaluación

Con el objeto de evaluar el comportamiento de cada sistema de ensamble, se calculó la dispersión del análisis para una variable x mediante la

Experimento	Características principales		
	Obs. asimiladas	Parametrizaciones	Condiciones de borde
E-CONTROL	PREPBUFR	Fijas	Fijas
E-MULTI	PREPBUFR	Múltiples	Fijas
E-BPERT	PREPBUFR	Fijas	Perturbadas
E-AIRS	PREPBUFR + AIRS	Fijas	Fijas

Tabla III: Resumen de las características principales de cada experimento de asimilación, las cuales se encuentran detalladas en el texto.

ecuación:

$$DISPERSION = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (x_m - \bar{x})^2} \quad (5)$$

donde M es la cantidad de miembros del ensamble (en este caso 40), x_m representa el estado del miembro m y \bar{x} representa la media del ensamble. Esta medida se utilizó para confeccionar gráficos de dispersión en conjunto con la raíz cuadrada de la diferencia cuadrática media (RMSD), cuya expresión está dada en la Ec. 6, donde O_i corresponde a la observación, X_i es el análisis medio y N es la cantidad total de registros considerados.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - X_i)^2} \quad (6)$$

Con el objeto de evaluar el comportamiento de los pronósticos de la media de cada sistema de ensamble, se computó el RMSD, el bias (Ec. 7) y el error de energía total húmeda, conocida en la bibliografía como TE (Ota y otros, 2013; Singh y otros, 2014) y cuyo cálculo se detalla en la Ec. 8.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - X_i) \quad (7)$$

$$TE_{i,j,k,t} = 0,5 \left(u_{i,j,k,t}^{\prime 2} + v_{i,j,k,t}^{\prime 2} + \frac{C_{pd}}{T_r} T_{i,j,k,t}^{\prime 2} + \frac{L^2}{C_{pd} T_r} q_{i,j,k,t}^{\prime 2} + \frac{R_d T_r}{P_r^2} P s_{i,j,k,t}^{\prime 2} \right) \quad (8)$$

La TE se calculó para cada punto de retícula (i, j, k) y para cada tiempo t, con $T_r = 280$

K (temperatura de referencia), $L = 2,510,400 \text{ J Kg}^{-1}$, $R_d = 287,04 \text{ J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ (constante del aire seco), $P_r = 105 \text{ Pa}$ (presión de referencia), y las variables primadas indicando la diferencia entre dos estimaciones del estado de la atmósfera en un instante determinado. La unidad de TE resulta $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$. Para sintetizar la información, se realizaron cálculos del promedio de TE tanto vertical como horizontal y temporalmente.

Los estadísticos de verificación fueron calculados comparando los análisis y/o pronósticos contra los radiosondeos de las 12 UTC disponibles sobre la región (23 en total) y contra los reanálisis cuatri diurnos y globales ERA-INTERIM provistos por el ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (Dee y otros, 2011; Bao y Zhang, 2013). Dicho conjunto de reanálisis constituye un conjunto de datos independiente de los experimentos realizados para este trabajo.

3. RESULTADOS

En primer lugar se comparó la magnitud de la dispersión del ensamble de análisis con la magnitud del RMSD de la media del ensamble de análisis, calculado en base al ERA-INTERIM sobre el área comprendida entre 80°O y 40°O , 50°S y 15°S . Esta comparación busca determinar en qué medida el ensamble captura adecuadamente la incertidumbre de los análisis. Idealmente, la dispersión del ensamble y el error del análisis medio deberían ser similares (Hou y otros, 2001; Fortin y otros, 2014).

En la Figura 4 se presentan los diagramas de dispersión correspondientes a la componente zonal para los niveles de 975, 850, 500 y 250 hPa. Un aspecto evidente en todos los paneles es que el RMSD es mayor a la dispersión, y es por eso que muchos puntos se encuentran por debajo de la diagonal. Esto indica que la dispersión del ensamble no es lo suficientemente efectiva en representar el error del análisis. A su vez se puede observar que tanto E-MULTI como E-BPERT tienen la mayor dispersión entre sus miembros para todos los niveles. Sin

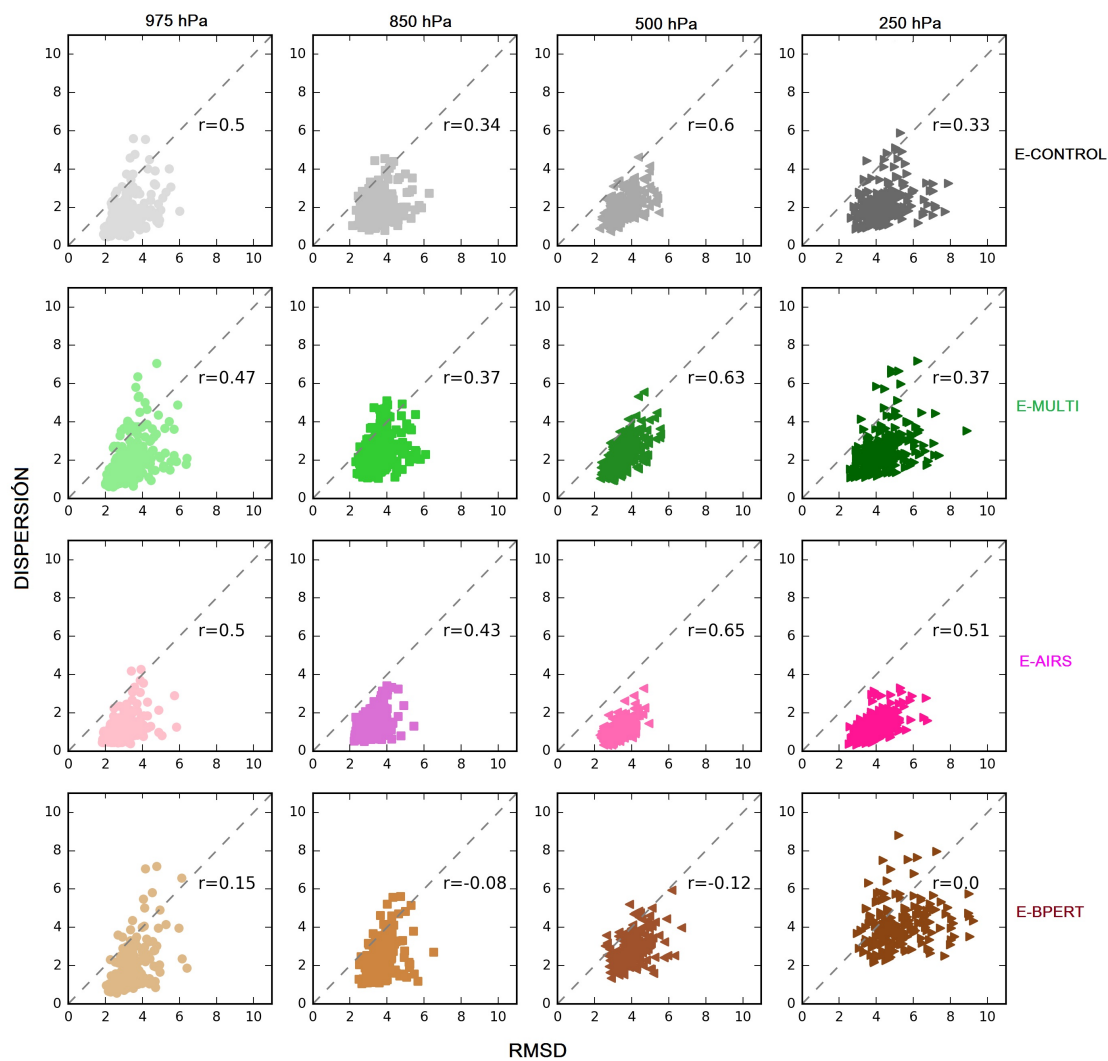


Figura 4: Dispersión del análisis como función del RMSD de la media del ensemble de análisis, calculado a partir del ERA-INTERIM, para la componente zonal del viento; para los niveles verticales de 975, 850, 500 y 250 hPa (columnas) para los experimentos E-CONTROL, E-MULTI, E-AIRS y E-BPERT (filas). Se incluye en cada panel el coeficiente de correlación lineal correspondiente.

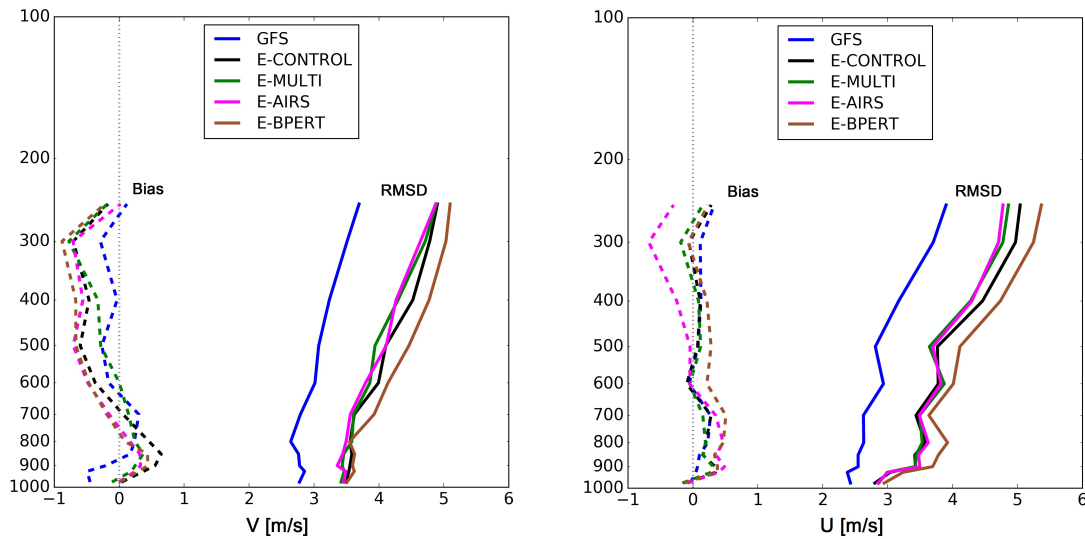


Figura 5: Perfiles verticales de bias (contornos punteados) y RMSD (contornos llenos) de los pronósticos a 6 hs (válidos a las 12 UTC) de las componentes meridional (V) y zonal (U) del viento [ms^{-1}], utilizando radiosondeos como referencia; para la media del ensamble de E-CONTROL (negro), E-MULTI (verde), E-AIRS (magenta) y E-BPERT (marrón). Se incluye el GFS (azul).

embargo los coeficientes de correlación más elevados corresponden a E-AIRS, indicando que en dicho experimento la dispersión del ensamble acompaña mejor a los cambios que se producen en la incertidumbre de la condición inicial, lo cual es una característica deseable. Resultados similares fueron obtenidos para la temperatura y la componente meridional del viento (Dillon, 2017).

Para evaluar el error de la media del ensamble, se computaron el bias y RMSD de los pronósticos a 6 horas de la misma considerando como referencia los 23 radiosondeos disponibles a las 12 UTC en la región de estudio. En la Figura 5 se presentan los perfiles verticales de dichos estadísticos para las componentes meridional y zonal del viento. Se puede observar que tanto E-MULTI como E-AIRS muestran valores de RMSD menores o similares que E-CONTROL en todo el espesor de la atmósfera para ambas variables, evidenciando un impacto positivo tanto del uso de un multi-esquema como de la inclusión de perfiles termodinámicos de satélite en el sistema de asimilación de datos. Mientras que E-BPERT muestra un deterioro en el error

del pronóstico respecto de E-CONTROL. En el caso de la componente meridional todos los experimentos muestran una disminución del módulo del bias respecto a E-CONTROL en niveles bajos, y tanto E-MULTI como E-AIRS también lo hacen en algunos niveles superiores. Mientras que para la componente zonal el módulo del bias más cercano a cero en general está dado por E-CONTROL.

En la Figura 5, también se incluyen el bias y RMSD calculados para el pronóstico a 6 horas del GFS, de manera de contrastar el desempeño del sistema WRF-LETKF regional propuesto con el de un modelo global robusto. A pesar de que los valores de RMSD del GFS son menores en toda la vertical para ambas variables (aproximadamente 1 ms^{-1} más pequeños), el módulo del bias de algunos experimentos resulta menor en ciertos niveles por debajo de los 500 hPa para la componente meridional y en niveles altos para la componente zonal. Se considera que este comportamiento es razonable teniendo en cuenta que el modelo global incluye radianzas en su sistema de asimilación y que su resolución es mayor que la utilizada en el WRF. Cabe

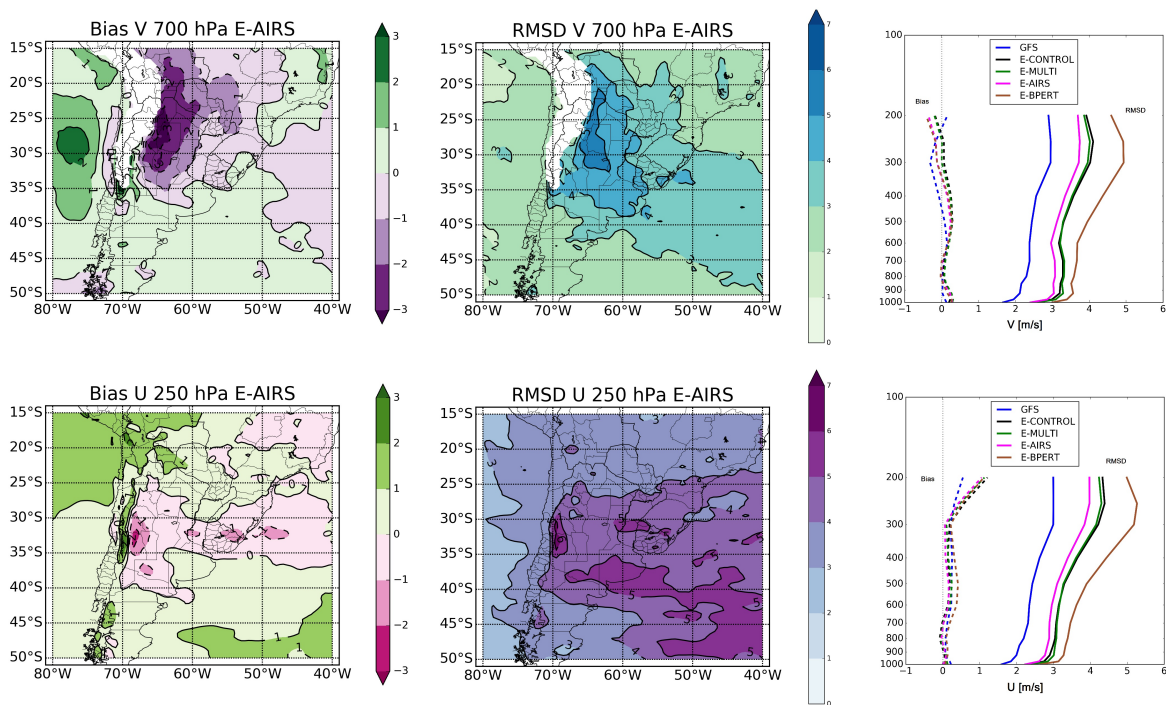


Figura 6: Distribución espacial de bias y RMSD de los pronósticos a 6 hs de la componente meridional del viento [ms^{-1}] de 700 hPa (paneles superiores) y de la componente zonal del viento [ms^{-1}] de 250 hPa (paneles inferiores); para la media del ensamble de E-AIRS. Perfiles verticales de bias (contornos punteados) y RMSD (contornos llenos) de los pronósticos a 6 hs de las componentes meridional (V) y zonal (U) del viento [ms^{-1}]; para la media del ensamble de E-CONTROL (negro), E-MULTI (verde), E-AIRS (magenta) y E-BPERT (marrón). Se incluye el GFS (azul). En todos los casos se utilizan los reanálisis ERA-INTERIM como referencia.

destacar que se hallaron resultados similares para la temperatura virtual y la humedad específica (Dillon, 2017).

A su vez, se computaron el bias y RMSD de los pronósticos a 6 horas de las medias de los ensambles utilizando los reanálisis ERA-INTERIM como estado de referencia, con el objetivo de realizar una evaluación más integradora. Considerando el pronóstico a 6 horas como un conjunto, teniendo en cuenta la verificación a las 00, 06, 12 y 18 UTC para todos los días, se calcularon dichos estadísticos para ambas componentes del viento, la temperatura y la humedad específica, en 12 niveles verticales, sobre el área comprendida entre 80°O y 40°O, 50°S y 15°S. Todas las configuraciones mostraron diferencias respecto del E-CONTROL en menor o mayor medida en toda el área de estudio, en

todo el espesor de la atmósfera. Generalmente se destaca una disminución del módulo del bias y RMSD gracias a la inclusión de perfiles termodinámicos de satélite en el sistema de asimilación, es decir para E-AIRS.

A modo de ejemplo en la Figura 6 se presenta la distribución espacial de ambas métricas de las componentes meridional y zonal del viento en niveles bajos y altos, respectivamente, para E-AIRS (quien muestra el mejor desempeño), y los perfiles verticales de ambas variables para todos los experimentos. A partir de los campos de bias se puede observar que los mayores problemas están dados en la determinación de la posición e intensidad de la corriente en chorro tanto de niveles bajos (del norte) como de niveles altos (del oeste). Los mayores valores de RMSD se concentran al este de los Andes

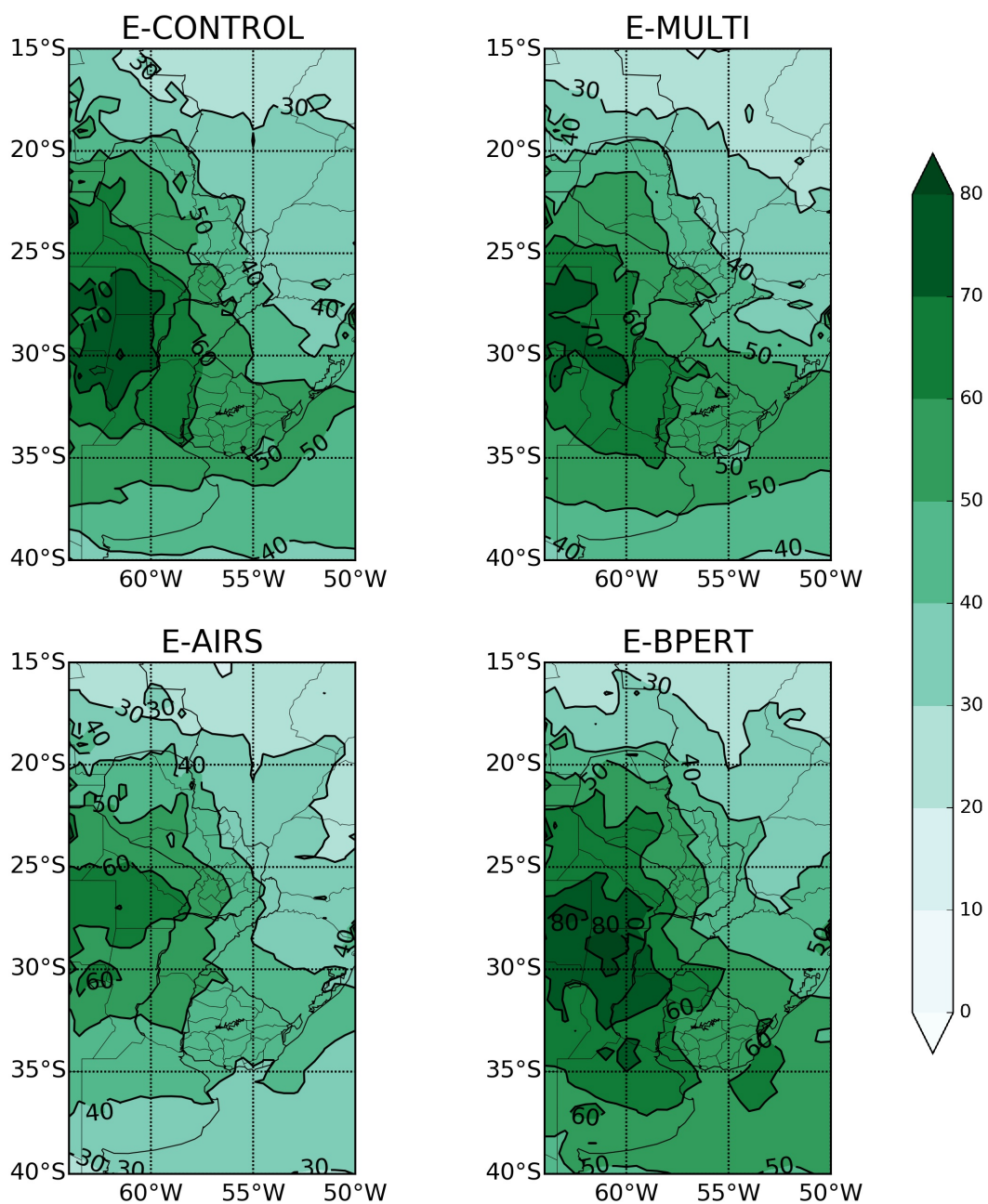


Figura 7: Error de Energía Total Húmeda (TE) [m^2s^{-2}] de los pronósticos a 6 horas, utilizando los reanálisis ERA-INTERIM como referencia; para la media del ensamble de E-CONTROL, E-MULTI, E-AIRS y E-BPERT.

y se extienden hacia el océano, indicando una posible propagación dada por el flujo medio característico de la región. La estructura de los perfiles verticales de RMSD es similar a la hallada considerando los radiosondeos como referencia.

Con el objeto de tener una visión más integradora del error, en la Figura 7 se observan los campos horizontales del error de energía total húmeda (TE) de los pronósticos a 6 horas de la media del ensamble, teniendo en cuenta la verificación a las 00, 06, 12 y 18 UTC de manera conjunta. Cabe destacar que el dominio presentado para esta variable es reducido a la región de mayor interés en relación al desarrollo de sistemas convectivos, en donde es deseable que todas las variables, en particular la humedad, estén representadas correctamente. En todos los casos se distingue un máximo de TE entre 25°S y 30°S, al oeste de 60°O. Una vez más, se observa que el experimento que más reduce los errores respecto a E-CONTROL es E-AIRS.

Con el fin de evaluar cuál es el término que más contribuye a la energía total húmeda, en la Figura 8 se muestran los perfiles verticales de éste y de los términos relativos a la energía cinética, a la temperatura y a la humedad, los cuales fueron calculados mediante un promedio considerando la región mostrada en la Figura 6 (entre 64°O y 50°O, 40°S y 15°S). Cabe aclarar que el término relativo a la presión de superficie no se presenta ya que su contribución es de entre uno y dos órdenes de magnitud menor. Se observa que en niveles bajos el término que más aporta al TE es el de humedad, mientras que en niveles altos lo hace el de energía cinética. Una característica común entre los tres términos es el mejor desempeño de E-AIRS en relación a los otros experimentos. En particular se destaca la reducción del error en el término cinético en el experimento E-AIRS, lo cual está relacionado probablemente con un apropiado tratamiento de las covarianzas entre la temperatura, la humedad y el viento, que son estimadas a partir del ensamble.

En la Figura 9 se presentan los perfiles verticales

de TE considerando los horarios de pronóstico por separado para analizar el comportamiento del ciclo diurno. A pesar de que en todos los horarios la forma del perfil vertical de TE es similar, a las 00 UTC todos los experimentos presentan los valores más elevados y a las 18 UTC los valores más pequeños. Es decir que el pronóstico inicializado a las 18 UTC es de menor calidad que el inicializado a las 12 UTC, lo cual puede ser atribuible a la diferencia en la cantidad de observaciones asimiladas en cada ciclo (del orden de 9.000 y 14.000 respectivamente, para E-CONTROL) y al calentamiento radiativo presente en las horas de la tarde, que puede desencadenar procesos convectivos más complejos de pronosticar. En coincidencia con lo mostrado anteriormente, el experimento E-AIRS es el que logra el impacto más positivo en el sistema regional. En particular los pronósticos que verifican a las 00 UTC se ven muy beneficiados por la asimilación de los perfiles de AIRS, lo cual se debe a que éstos incrementan la cantidad de observaciones de 9.000 a 14.000 en este horario (el aumento de observaciones no posee la misma magnitud en todos los ciclos ya que depende de las características de la órbita del satélite, como ser el período de revisita).

Por último, para complementar la evaluación del sistema de asimilación y para evaluar el impacto de la asimilación de datos regional sobre los pronósticos a corto plazo, se realizaron pronósticos determinísticos hasta un plazo de 48 horas, inicializados a partir de la media de los ensambles de cada uno de los experimentos. Se inicializó un pronóstico por día a las 12 UTC durante el período completo. Dichos pronósticos fueron comparados no sólo con el pronóstico del GFS sino también con un pronóstico determinístico realizado con el modelo WRF usando como condición inicial y de borde al GFS (al cual se denomina WRF-GFS). En todos los casos el modelo WRF utiliza la misma configuración y conjunto de parametrizaciones utilizado en el experimento E-CONTROL.

En la Figura 10 se presentan los perfiles verticales de bias y RMSD de la temperatura

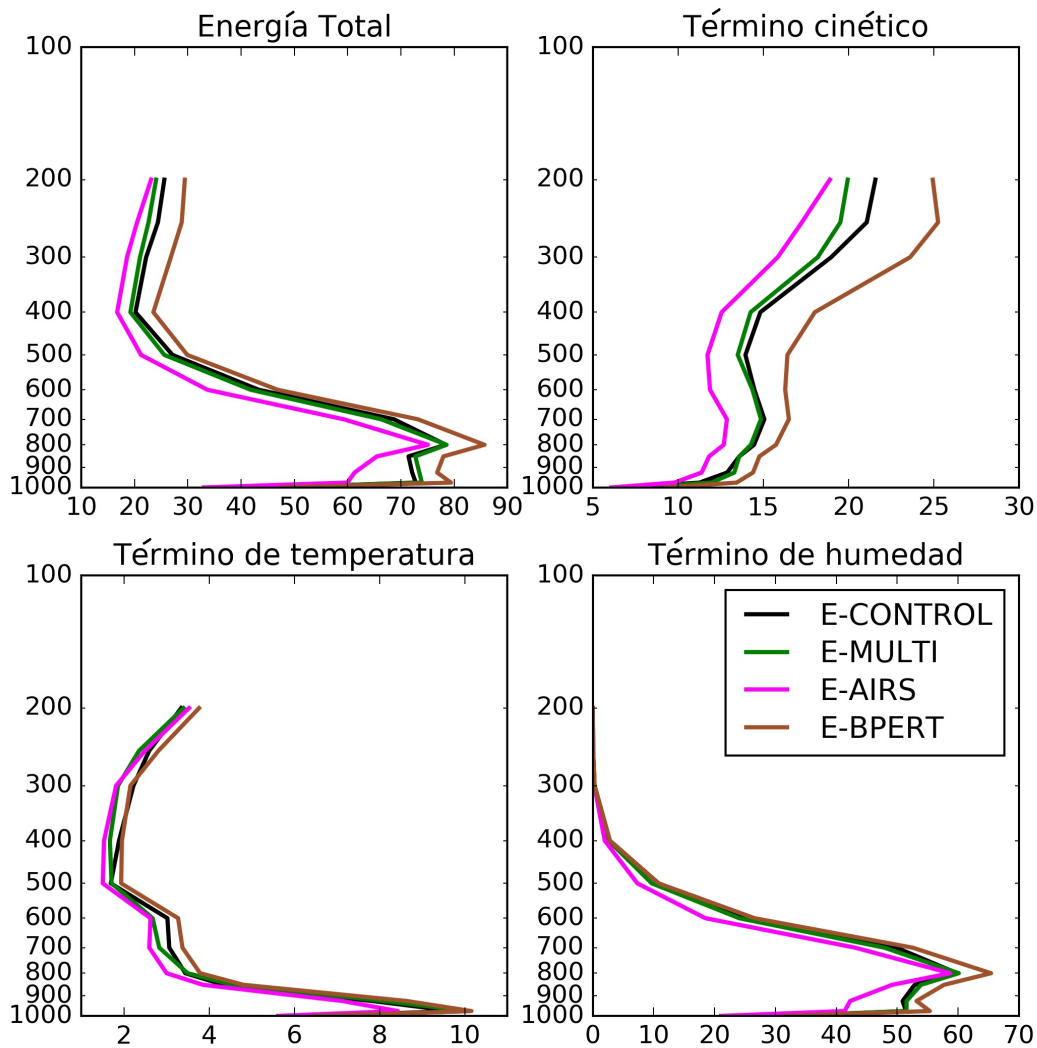


Figura 8: Perfil vertical del Error de Energía Total Húmeda (TE) y los distintos términos que contribuyen al TE (Ec. 4) [m^2s^{-2}], de los pronósticos a 6 horas, utilizando los reanálisis ERA-INTERIM como referencia; para la media del ensamble de E-CONTROL (negro), E-MULTI (verde), E-AIRS (magenta) y E-BPERT (marrón). Energía Total (TE) y Término cinético (paneles superiores); Término de temperatura y Término de humedad (paneles inferiores). Notar la diferencia de escala entre paneles con el objeto de obtener una representación clara en cada uno.

de los pronósticos a 12, 24, 36 y 48 horas. La estructura vertical del bias es similar para todos los experimentos predominando en general valores negativos, lo cual implica una sobrestimación de la temperatura en los

diferentes pronósticos. Igualmente, la misma es menor a 1 K. Dependiendo del nivel y del plazo de pronóstico, la simulación con el bias más cercano a cero difiere. En algunos casos es E-AIRS (sobre todo por encima de 500 hPa), en otros E-MULTI,

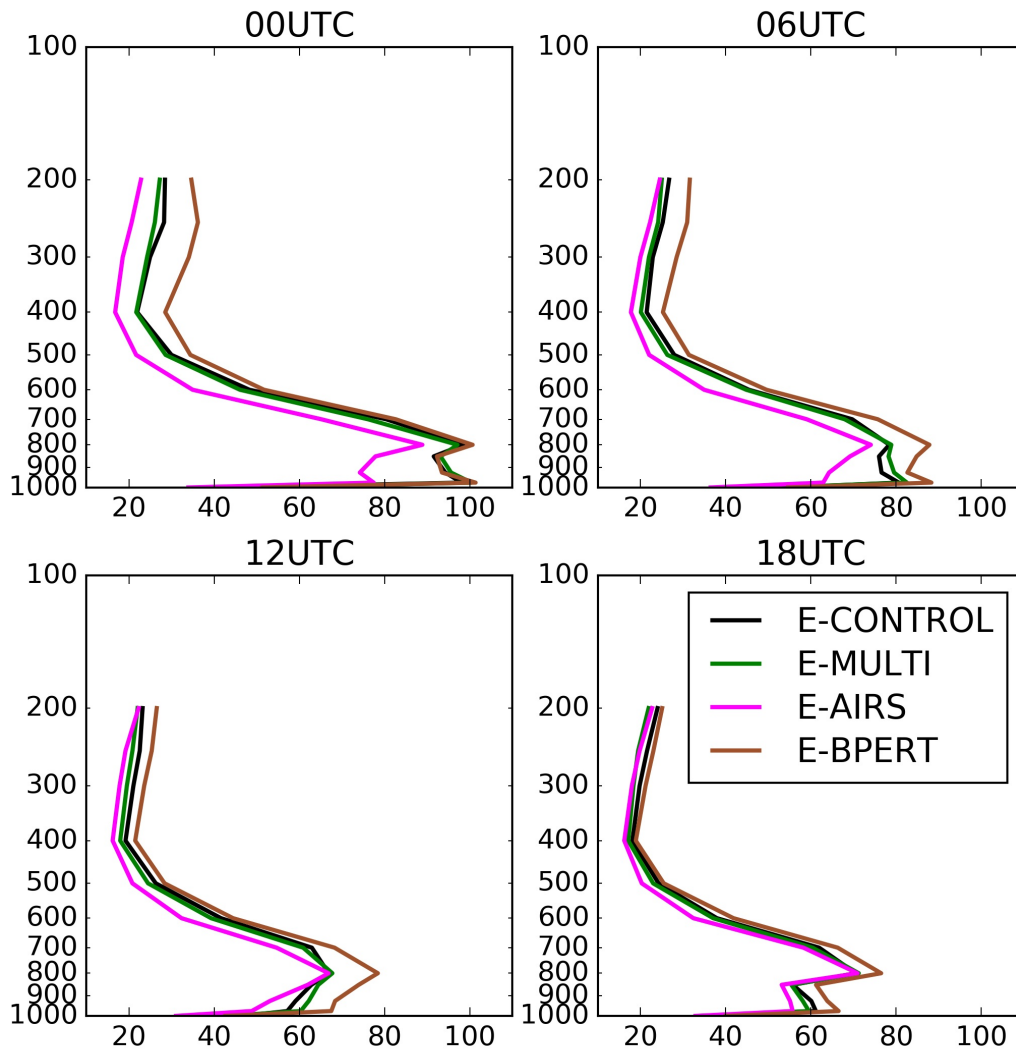


Figura 9: Perfil vertical del Error de Energía Total Húmeda (TE) [m^2s^{-2}], utilizando los reanálisis ERA-INTERIM como referencia, para los pronósticos a 6 horas de la media del ensamble de E-CONTROL (negro), E-MULTI (verde), E-AIRS (magenta) y E-BPERT (marrón); para las 00, 06, 12 y 18 UTC (según lo indicado en cada panel). Se incluye el GFS (azul).

WRF-GFS o GFS (en menor medida). Una vez más se distingue el impacto positivo de asimilar perfiles termodinámicos provenientes de satélite y el uso de un ensamble multi-esquema. Sin embargo también se observa que a veces el bias es más pequeño para la simulación regional que no asimila datos (WRF-GFS).

Respecto al RMSD se observa una escasa diferencia entre los experimentos WRF-LETKF para todos los plazos de pronóstico. Un aspecto a destacar es que la estructura del RMSD del WRF-GFS es similar a la de los experimentos con asimilación, y si bien para los pronósticos a 12 y 24 horas sus valores son más cercanos al GFS, para los plazos mayores sus valores se

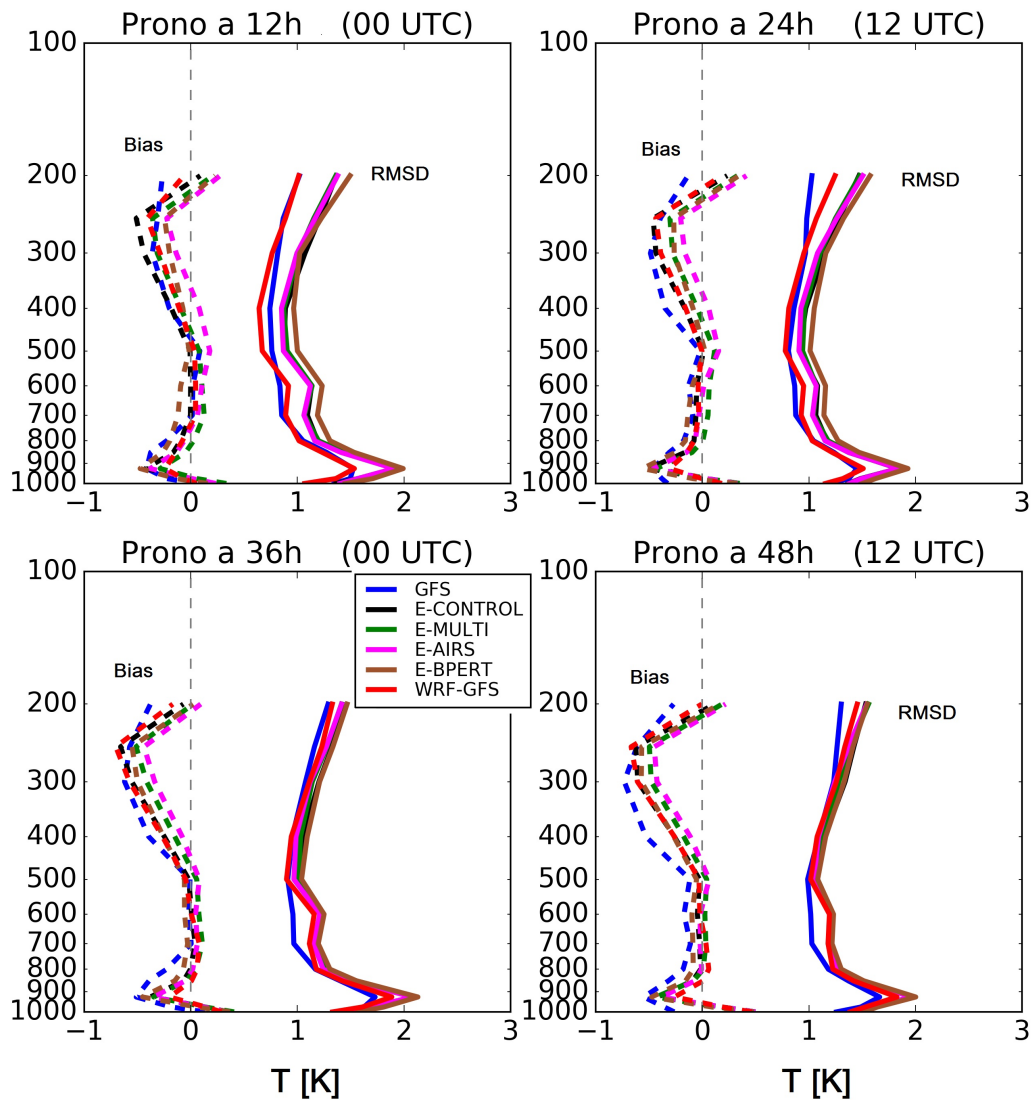


Figura 10: Perfiles verticales de bias y RMSD de los pronósticos a 12, 24, 36 y 48 hs de la temperatura [K] inicializados a las 12 UTC, utilizando los reanálisis ERA-INTERIM como referencia; para la media del ensamble de E-CONTROL (negro), E-MULTI (verde), E-AIRS (magenta) y E-BPERT (marrón); considerando el dominio $80^{\circ}\text{O} - 40^{\circ}\text{O}$, $50^{\circ}\text{S} - 15^{\circ}\text{S}$. Se incluye el GFS (azul) y un experimento WRF-GFS (rojo) (ver detalles en el texto).

asemejan más a los de WRF-LETKF. Es decir que a medida que avanza el pronóstico tiene mayor peso el error intrínseco del modelo WRF que las distintas condiciones iniciales.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se evaluó la sensibilidad del WRF-LETKF a distintas configuraciones para un período de prueba, con el fin de avanzar en el diseño de un sistema de asimilación regional que pueda ser implementado en forma operativa en el Servicio Meteorológico Nacional

de Argentina. Los primeros pasos fueron documentados en Dillon y otros (2016), en donde se plasmaron los resultados preliminares del uso de un ensamble multi-esquema en el sistema de asimilación. En este trabajo se incorporaron nuevos experimentos y se presentó una evaluación más exhaustiva del desempeño de los análisis y pronósticos generados, mediante el estudio de la estructura del sistema de ensamble y la inclusión de estadísticos calculados teniendo como referencia los reanálisis globales ERA-INTERIM.

Se estudiaron 4 configuraciones y se encontró que las mismas son capaces de representar satisfactoriamente el estado de la atmósfera, aunque en general todas presentaron una subestimación de la incertidumbre asociada a los pronósticos a corto plazo, lo cual puede tener un impacto negativo sobre la calidad de los análisis generados. Mejorar este aspecto del sistema de ensamble será el foco de futuros desarrollos.

Si bien la evaluación de diversos estadísticos para distintos plazos de pronóstico dentro del período de prueba arrojó resultados dependientes de las variables y el nivel considerado, se encontraron características propias del desempeño de cada experimento en particular:

- La utilización de un sistema multi-esquema compuesto por combinaciones entre parametrizaciones de cumulus y capa límite planetaria, permite mejorar el desempeño de los análisis y pronósticos en la mayoría de los casos, y a la vez brinda un aumento en la dispersión de los miembros del ensamble.
- La inclusión de perfiles verticales de temperatura y humedad estimados a partir de datos satelitales AIRS en el sistema de asimilación impacta positivamente en los análisis y pronósticos producidos por el sistema WRF-LETKF, lo cual se debe a la falta de este tipo de datos en la región. Es importante destacar, que si bien los AIRS proveen información de variables termodinámicas, el impacto positivo se pudo ver claramente también

en la circulación, lo cual sugiere que el ensamble está capturando adecuadamente las covarianzas entre los errores entre las diferentes variables que componen el vector de estado. Por otra parte, incluir los datos AIRS mejora la sincronización entre la incertidumbre del pronóstico y la dispersión del ensamble, indicando que el sistema captura de forma más precisa los cambios que ocurren en dicha incertidumbre.

- En este trabajo la inclusión de perturbaciones en los bordes produjo una degradación de la calidad del análisis, a pesar del aumento observado en la dispersión del ensamble. También se observó una degradación de la relación entre la sincronización entre la dispersión y el error. Esto puede deberse a la falta de información de los errores del día en la estructura de las perturbaciones utilizadas en los bordes. Luego, se deberán evaluar otras estrategias para perturbar las condiciones de borde, ya que en un sistema de ensambles regional es necesario considerar la incertidumbre en los bordes del modelo de área limitada para representar adecuadamente las incertezas en las distintas escalas espaciales. En este sentido, se plantea la utilización de un ensamble global ya que se ha mostrado que es una estrategia adecuada (Houtekamer y Zhang, 2016).

Respecto al experimento WRF-GFS, se observó que en algunos casos su desempeño fue superior al de los experimentos WRF-LETKF. Asimismo, se mostró que a medida que avanza el pronóstico tiene mayor peso el error intrínseco del modelo WRF que las distintas condiciones iniciales. Luego, se plantea la necesidad de avanzar en el estudio de metodologías que permitan ajustar el sistema de asimilación periódicamente a un pronóstico global. Esto es necesario con el fin de no perder la consistencia con la circulación global a medida que avanzan los ciclos y mejorar el desempeño del sistema regional.

Para finalizar, se destaca que los resultados mostrados en el presente trabajo constituyen las bases para el diseño de un sistema de asimilación de datos reales moderno y eficiente para el sur

de Sudamérica. Si bien existen varios aspectos en los cuales es necesario progresar, se pudo ver que el rendimiento del WRF-LETKF es satisfactorio para la implementación de un sistema regional.

Agradecimientos: Agradecemos al Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, a la Universidad de Buenos Aires y al Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, quienes apoyan este proyecto. También al NCEP por proveer generosamente tanto los análisis y pronósticos del GFS como las observaciones PREPBUFR. Agradecemos especialmente a Takemasa Miyoshi y Marcos Saucedo por sus valiosas sugerencias, así como a los revisores del artículo. Los siguientes proyectos financiaron parcialmente este trabajo: PICT 2014-1000, PICT 2013-1299, PIDDEF 16/2014 y UBACYT 200201300100820BA.

REFERENCIAS

- Bao, X., F. Zhang, 2013: Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 Reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *J. of Clim.*, 26, 206-214, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00056.1
- Bastarz, C. F., Herdies, D. L., 2017: GSI based hybrid 3Densvar data assimilation for the CPTEC-INPE BAM global model. Seventh International WMO Symposium on Data Assimilation, 11 al 15 de Septiembre de 2017; Florianópolis, Brasil. Resumen disponible <http://www.cptec.inpe.br/das2017/>
- Chen, F., J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569-585, doi:10.1175/1520-0493(2001)129,0569:CAALSH.2.0.CO;2.
- Dee, D. P., y coautores, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 137, 553-597.
- Dillon, M. E., Y. García Skabar, J. Ruiz, E. Kalnay, E. A. Collini, P. Echevarría, M. Saucedo, T. Miyoshi, M. Kunii, 2016: Application of the WRF-LETKF data assimilation system over southern South America: Sensitivity to model physics. *Wea. and For.*, 31, 217-236, doi:10.1175/WAF-D-14-00157.1
- Dillon, M. E., 2017: Asimilación de datos reales a escala regional en Argentina. Tesis de doctorado, DCAO, FCEyN, UBA.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077-3107, doi:10.1175/1520-0469(1989)046,3077:NSOCOD.2.0.CO;2.
- Fortin, V., M. Abaza, F. Anctil, R. Turcotte, 2014: Why should ensemble spread match the RMSE of the ensemble mean? *J. of Hydromet.*, vol 15, 1708-1713 DOI: 10.1175/JHM-D-14-0008.1
- García Skabar, Y., M. Nicolini, 2009: Enriched analyses with assimilation of SALLJEX data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 2425-2440, doi:10.1175/2009JAMC2091.1.
- García Skabar, Y., M. Nicolini, 2014: Impact of enriched analyses on regional numerical forecasts over southeastern south america during Salljex. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol. 29, No3, 315 - 330.
- Goncalves L., B. Silveira, C. Cossetin, L. Sapucci, E. Vendrasco, E. Khamis, 2016: Assessment of the CPTEC/INPE operational Rapid Refresh data assimilation cycle over South America. *Geophysical Research Abstracts*; Vol. 18, EGU2016-17968; <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-17968.pdf>
- Goncalves L., L. F. Sapucci, E. Vendrasco, V. B. Machado, C. F. Bastarz, E. Khamis, J. G. Z. De Mattos, 2017: Results from the CPTEC/INPE Rapid Refresh Data Assimilation over South America. Seventh International WMO Symposium on Data Assimilation, 11 al 15 de Septiembre de 2017; Florianópolis, Brasil. Resumen disponible <http://www.cptec.inpe.br/das2017/>

- Grell, G. A., D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1693, doi:10.1029/2002GL015311.
- Hong, S.-Y., 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:10.1175/MWR3199.1
- Hou, D., E. Kalnay, K. K. Droegemeier, 2001: Objective verification of the SAMEX '98 ensemble forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, vol 129, 73-91
- Houtekamer, P. L., F. Zhang, 2016: Review of the Ensemble Kalman Filter for atmospheric data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, vol 144, 4489-4532, DOI: 10.1175/MWR-D-15-0440.1
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, 230, 112–126, doi:10.1016/j.physd.2006.11.008
- 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: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 437, 61 pp.
- Jones, T. A., D. J. Stensrud, 2012: Assimilating AIRS temperature and mixing ratio profiles using an ensemble Kalman filter approach for convective-scale forecasts. *Wea. and For.*, 27, 541–564, doi:10.1175/WAF-D-11-00090.1.
- Kain, J. S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU.2.0.CO;2.
- Keyser, D., 2013: PREPBUFR processing at NCEP. NOAA/NWS/NCEP/EMC. [Available online at http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data_processing/prepbuf_r.doc/document.htm.]
- Kopken, C., G. Kelly, J.-N. Thépaut, 2004: Assimilation of Meteosat radiance data within the 4D-Var system at ECMWF: assimilation experiments and forecast impact. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 130, 2277–2292. doi: 10.1256/qj.02.230
- Mc Carty W., G. Jedlovec, T. L. Miller, 2009: Impact of the assimilation of Atmospheric Infrared Sounder radiance measurements on short-term weather forecasts. *J. Geophys. Res.*, vol 144, D18122, DOI 10.1029/2008JD011626
- Meng, Z., F. Zhang, 2007: Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part II: Imperfect model experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1403–1423, doi:10.1175/MWR3352.1.
- Meng, Z., F. Zhang, 2008: Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part III: Comparison with 3DVAR in a real-data case study. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 522–540, DOI: 10.1175/2007MWR2106.1
- Meng, Z., F. Zhang, 2011: Limited-area ensemble-based data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 2025–2045, doi:10.1175/2011MWR3418.1.
- Miyoshi, T., Sato, Y., 2007: Assimilating Satellite Radiances with a Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) Applied to the JMA Global Model (GSM). *SOLA*, 3, 37–40
- Miyoshi, T., 2011: The Gaussian approach to adaptive covariance inflation and its implementation with the local ensemble transform Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 1519–1535, doi:10.1175/2010MWR3570.1.
- 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:10.1007/s00024-011-0373-4.
- Miyoshi, T., M. Kunii, 2012: Using AIRS retrievals in the WRF-LETKF system to improve regional numerical

- weather prediction. *Tellus*, 64A, 18408, doi:10.3402/tellusa.v64i0.18408.
- Miyoshi, T., K. Kondo, and T. Imamura, 2014: The 10,240-member ensemble Kalman filtering with an intermediate AGCM. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5264–5271, doi:10.1002/2014GL060863
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16 663–16 682, doi:10.1029/97JD00237.
- Ota, Y., J. C. Derber, E. Kalnay, T. Miyoshi, 2013: Ensemble-based observation impact estimates using the NCEP GFS. *Tellus A*, vol 65, 20038, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.20038>
- Ruiz, J. J., C. Saulo, J. Nogués-Paegle, 2010: WRF Model sensitivity to choice of parameterization over South America: Validation against surface variables. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 3342–3355, doi:10.1175/2010MWR3358.1.
- Saha, S., y coautores, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull Amer Met. Soc.*, 91, 1015 -1057.
- 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.
- Saulo, C., S. Cardazzo, J. Ruiz, C. Campetella, A. Rolla, 2008: El sistema de pronóstico experimental del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. *Meteorológica*, Vol. 33, 83 - 97.
- Singh, R., S. P. Ojha, C. M. Kishtawal, P. K. Pal, 2014: Impact of various observing systems on weather analysis and forecast over the Indian region. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 10232–10246, doi:10.1002/2014JD021890.
- Skamarock, W., y coautores, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note TN – 4681STR, 113 pp., doi:10.5065/D68S4MVH
- Sukoriansky, S., B. Galperin, V. Perov, 2005: Application of a new spectral model of stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice. *Bound.-Layer Meteor.*, 117, 231–257, doi:10.1007/s10546-004-6848-4.
- Susskind J., 2011: Improved temperature sounding and quality control methodology using AIRS/AMSU data: The AIRS Science Team Version 5 retrieval algorithm. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49, 883-907, doi:10.1109/TGRS.2010.2070508
- Szunyogh, I., E. J. Kostelich, G. Gyarmati, E. Kalnay, B. R. Hunt, E. Ott, E. Satterfield, J. A. Yorke, 2008: A local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the NCEP global model. *Tellus*, 60A, 113–130, doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00274.x.
- Tobin, D. C., H. E. Revercomb, R. O. Knuteson, B. M. Lesht, L. L. Strow, S. E. Hannon, W. F. Feltz, L. A. Moy, E. J. Fetzer, T. S. Cress, 2006: Atmospheric radiation measurement site atmospheric state best estimates for Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrieval validation. *J. Geophys. Res.*, 111, D09S14, doi:10.1029/2005JD006103
- Verspeek, J. A., A. Stoffelen, M. Portabella, H. Bonekamp, C. Anderson, J. Figa, 2009: Validation and calibration of ASCAT using CMOD5.n. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 48, 386–395, doi:10.1109/TGRS.2009.2027896.
- Wu T.-C., H. Liu, S. J. Majumdar, C. S. Velden, J. L. Anderson, 2014: Influence of assimilating satellite-derived atmospheric motion vector observations on numerical analyses and forecasts of tropical cyclone track and intensity. *Mon. Wea. Rev.*, 142, 49-71, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00023.1>

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.