



RUIZ, J.^{2,3,5}, ALDECO L.¹, DIEHL A.⁶, GARCÍA SKABAR Y.^{1,5}, MATSUDO C.¹, OSMAN M.^{2,3,5}, PELOROSSO L.⁴, SAULO. C.^{1,2,3,5}, VERA C.^{2,3,5}

1. *Servicio Meteorológico Nacional, Ministerio de Defensa (SMN), Argentina*
2. *Centro de Investigaciones del Mar y la Atmosfera, UBA-CONICET (CIMA), Argentina*
3. *Departamento de Ciencias de la Atmosfera y los Océanos, FCEyN (DCAO-FCEyN), Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina*
4. *Departamento de Computación, FCEyN (DC-FCEyN), UBA, Argentina*
5. *Instituto Franco-Argentino para el estudio del clima y sus impactos, CNRS-CONICET-UBA, Argentina (UMI-IFAECI), Argentina*
6. *Computer Science Department - Data Analysis and Visualization Group (CSD-DAVG), Universidad de Constanz, Alemania*

Since the early days of Lorenz's momentous discovery, which gave impetus to the new science of chaos, additional progress has been made, but his findings have not been changed in any fundamental way. In NWP, substantial progress has been made through the realization that the chaotic behavior of the atmosphere requires the replacement of single "deterministic" forecasts by "ensembles" of forecasts with differences in the initial conditions and in the model characteristics that realistically reflect the uncertainties in our knowledge of the atmosphere. This realization led to the introduction of operational ensemble forecasting at both NCEP and ECMWF in December 1992. It also led to work on extending the usefulness of NWP forecasts through a systematic exploitation of the chaotic nature of the atmosphere.

Atmospheric modeling, data assimilation and predictability – EUGENIA KALNAY

Presentamos en este capítulo un amplio abanico de campos de investigación y desarrollo en Argentina en lo referente a sistemas de predicción por conjuntos (SPC) y predicción probabilista. Desde pronósticos por ensambles basados en varias técnicas con el modelo WRF como base, pasando por la aplicación de métodos de análogos, hasta predicción estacional y, además, técnicas avanzadas de visualización específicas para predicción probabilista. Al igual que en el capítulo dedicado a México, por el enorme interés cultural de la diversidad lingüística, se ha respetado la terminología original del trabajo, de uso al otro lado del Atlántico, aclarando algún término por facilitar la consistencia con otros capítulos de este volumen. Por ejemplo, en este capítulo se usa el término *ensambles*, mientras que en esta obra en general usamos el acrónimo SPC o el anglicismo *ensembles*.

Palabras clave: sistemas de predicción por conjuntos en Argentina, pronósticos por ensambles en alta resolución, pronósticos probabilistas de precipitación utilizando análogos y su calibración, pronósticos por ensambles en escala estacional.

Imagen parte superior: *En los Esteros del Iberá*, Argentina, diciembre 2014, fotografía de HADA IRASTORZA, The Conservation Land Trust - <http://www.theconservationlandtrust.org>, https://storage.googleapis.com/gustfront_images/rep/1509/hada_irastorza.png

37.1 Introducción

El sur de Sudamérica abarca unos 7 millones de km² de extensión siendo una de las regiones más productivas del continente comprendiendo el sur de Brasil, Uruguay, Paraguay y Argentina. En ella se localiza la Cuenca del Plata, la segunda en importancia en el continente y la quinta en el mundo, y tres subcuencas: Paraná, Paraguay y Uruguay. La población que habita la región es superior a los 100 millones de personas y más del 70 % del Producto Bruto Interno (PBI) de los cuatro países se genera ahí. Entre las actividades económicas más relevantes se encuentra la producción de cereales, siendo una de las más importantes del mundo; la producción de energía hidroeléctrica, de unos 106 000 MW y el transporte fluvial, de unos 17 400 000 Tn sólo en el trayecto Paraná-Paraguay.

Esta región es particularmente afectada por fenómenos meteorológicos de alto impacto social y económico que abarcan diferentes escalas de tiempo y espacio. Dada la importancia de la producción agrícola, las sequías y los excesos de lluvias producen fuertes impactos económicos en la producción local. Por otra parte, los excesos de lluvias producen el desborde de los ríos en las cuencas antes mencionadas generando inundaciones de zonas urbanas ribereñas que producen un alto impacto social. Se estima que entre 1980 y 2010, las inundaciones fueron el evento natural más significativo en Argentina afectando a 13 millones de personas y generando pérdidas económicas por al menos 9 billones de dólares (<http://www.preventionweb.net>). Más aún, de acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) la frecuencia de desastres naturales, y en particular aquellos vinculados con precipitaciones extremas se ha incrementado en la región probablemente debido al cambio climático global [2, 7, 20].

Los fenómenos de alto impacto social y económico ocurren también en escalas de tiempo más cortas y asociadas a fenómenos de escala sinóptica y de mesoescala. BROOKS et al. [5, 6], muestran que el sur de Sudamérica es una región donde el entorno de escala sinóptica es frecuentemente favorable para la ocurrencia de eventos de convección húmeda profunda y organizada que puede llevar al desarrollo de fenómenos meteorológicos tales como granizo de gran tamaño, precipitaciones intensas en cortos períodos de tiempo, vientos fuertes e incluso tornados. Estas estimaciones son confirmadas por estudios observacionales que muestran la recurrencia de este tipo de

fenómenos en la región, sobre todo durante la estación cálida, aunque con eventos que también se registran durante el invierno ([8, 27, 37, 46] entre otros). Estos fenómenos en ocasiones ocurren asociados a sistemas convectivos de mesoescala de gran tamaño que alcanzan extensiones de algunos miles de km² [35].

Los países en vías de desarrollo, son particularmente vulnerables a los desastres naturales, debido a que su infraestructura y economía es más frágil lo que implica que la población está más expuesta a las consecuencias de dichos desastres. En particular las ciudades Argentinas han crecido rápidamente en las últimas décadas, lo que en muchos casos trae aparejado problemas de infraestructura como la insuficiencia de drenajes lo que incrementa el nivel de vulnerabilidad de la población [19]. Por otra parte, según el censo de 2010, un porcentaje importante de la población urbana habita en viviendas precarias que son particularmente vulnerables a los eventos meteorológicos de alto impacto. Un ejemplo de esta vulnerabilidad es la inundación ocurrida en la ciudad de La Plata que se produjo por un evento de lluvia extrema entre el 2 y 3 de septiembre de 2013 y que dejó un saldo de 84 muertos y más de 600.000 personas afectadas.

Por tal motivo, el desarrollo de un sistema de pronóstico que pueda detectar con anticipación la ocurrencia de fenómenos de alto impacto en diferentes escalas temporales y espaciales es de suma importancia para la región. Este sistema debe buscar no solo poder anticipar la evolución de la atmósfera con la mayor precisión posible, sino también brindar una adecuada información acerca de la incertidumbre asociada a la previsión, que para los fenómenos más extremos suele ser elevada, y permitir detectar posibles escenarios futuros que involucren la ocurrencia de fenómenos de alto impacto social y económico. El desarrollo e implementación de sistemas de pronóstico por ensambles en diferentes escalas de tiempo y espacio, da respuesta a estos requerimientos permitiendo evaluar diversos escenarios futuros y derivar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos potencialmente peligrosos para la población.

Este capítulo describe brevemente las actividades que se están desarrollando en este sentido como parte de la colaboración entre el Servicio Meteorológico Nacional, el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, Universidad de Buenos Aires) y el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-Universidad de Buenos Aires) y que están orientadas a dar respuesta a los requerimientos

antes mencionados a través de diversos sistemas de pronósticos por ensambles y sus respectivos posprocesamientos.

37.2 Pronósticos por ensambles en alta resolución

El modelado de la atmósfera en resoluciones que permitan resolver parte de los procesos que ocurren en las nubes convectivas, junto con la implementación de estrategias de pronósticos por ensambles en dichas resoluciones constituye una herramienta fundamental para poder avanzar en el pronóstico de eventos de alto impacto social y económico vinculados a la convección húmeda profunda, aún a pesar de su elevado costo computacional [11]. No obstante, la aplicación de los pronósticos por ensambles en modelos con convección resuelta en forma explícita genera nuevos desafíos, como por ejemplo el desarrollo de técnicas apropiadas para representar la incertidumbre en las condiciones iniciales y en la formulación del modelo que tengan en cuenta la naturaleza y características de las inestabilidades presentes en la mesoescala.

En particular, en Argentina existe experiencia previa en la utilización de modelos regionales y en particular recientemente en la implementación del modelo de mesoescala Weather Research Forecast (WRF, [39]) [14, 28, 34, 36]. La implementación del modelo WRF ha permitido realizar importantes avances en relación al pronóstico en escala convectiva de fenómenos de alto impacto como precipitaciones intensas, granizo o vientos fuertes utilizando resoluciones cercanas a los 4 km que permitan resolver la convección en forma explícita. No obstante en la actualidad el desarrollo

de sistemas de pronóstico que permitan cuantificar la incertidumbre en estas escalas es todavía una asignatura pendiente. Por tal motivo recientemente han comenzado a realizarse investigaciones tendientes al desarrollo de técnicas de pronóstico por ensambles en modelos con convección explícita (en particular utilizando el modelo WRF) y en donde se evalúan diferentes estrategias para representar la incertidumbre de los pronósticos. Si bien el objetivo general es poder generar pronósticos para múltiples aplicaciones el foco actual está principalmente orientado al pronóstico de fenómenos de alto impacto social y económico como los mencionados previamente. A continuación se muestra una evaluación de los sistemas por ensambles en alta resolución para el caso de un sistema convectivo de mesoescala ocurrido entre el 22 y el 24 de diciembre de 2015 que ocasionó inundaciones en varias de las principales ciudades de la región noreste de Argentina provocando miles de evacuados y grandes pérdidas económicas.

37.2.1 Estrategias de pronóstico por ensamble en alta resolución

Para evaluar los pronósticos por ensambles para el caso seleccionado se utilizaron 2 estrategias de pronósticos por ensamble diferentes:

Perturbaciones en la condición inicial (control): esta estrategia consiste en un conjunto de 20 miembros con una única configuración física donde cada miembro difiere en la especificación de las condiciones iniciales y de borde las cuales son tomadas del Global Ensemble Forecast System (GEFS [17]). Las parametrizaciones físicas utilizadas corresponden a la configuración indicada como «A» en la Tabla 37.1.

		Esquema de microfísica			
		WDM6[25]	Thompson [41]	NSSL2D [26]	Morrison [30]
Esquema de CLP	YSU [21]	A (1,2,3)	B (4,5,6)	D (10,11,12)	C (7,8,9)
	MYJ [23]	E (13,14)	F (15,16)	H (19,20)	G (17,18)

Tabla 37.1: Parametrizaciones físicas correspondientes a la representación de capa límite planetaria y microfísica utilizadas en el ensamble multifísica. Los números dentro de los paréntesis indican los miembros de GEFS utilizados como condición inicial y de borde.

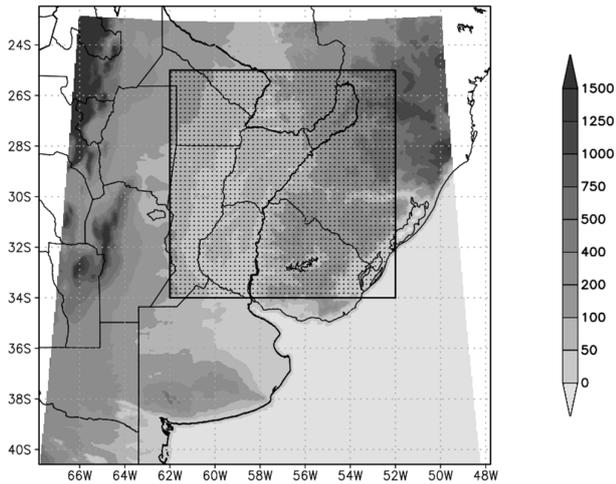


Figura 37.1: Dominio computacional y topografía (en metros, sombreado). El rectángulo punteado indica el subdominio de verificación.

Perturbaciones en las condiciones iniciales y en la física del modelo (multifísica): Al igual que la estrategia anterior este ensamble consiste en 20 miembros en donde se perturban las condiciones iniciales y de borde utilizando el ensamble global del NCEP, pero además se incorporan miembros que utilizan diferentes combinaciones de esquemas de microfísica y capa límite (CLP). Las parametrizaciones utilizadas por los diferentes miembros del ensamble se detallan en la Tabla 37.1 en la página anterior.

En todos los casos se utiliza la versión 3.7 del modelo no-hidrostático WRF para la región centro-noreste de Argentina (Figura 37.1) con una resolución espacial 4 km (419 x 499 puntos de retícula) y 38 niveles verticales sigma-p con un tope en 50 hPa. Todos los experimentos se extienden hasta un plazo de 48 horas y comparten las siguientes parametrizaciones físicas: esquema de suelo *Noah* [10], radiación de onda larga Rapid Radiative Transfer Model (RRTM [29]) y el esquema de radiación de onda corta *Dudhia* [15]. No se utiliza parametrización de la convección húmeda profunda. Para el caso de estudio, las simulaciones utilizaron como condición inicial y de borde los análisis y pronósticos GEFS inicializados a las 12 UTC del 22 de diciembre de 2015.

37.2.2 Análisis del caso de estudio

En la Figura 37.2, parte izquierda, se puede ver una imagen de temperatura de los topes nubosos correspondiente a las 11:45 UTC del 22 de diciembre de 2015. Para esa hora la región noreste de Argentina y sur de Brasil se encontraba afectada por el sistema convectivo de mesoescala. La precipitación acumulada a las 12 UTC del 24 de diciembre estimada a partir del producto IMERG [22] fue superior a 200 mm para algunas regiones dentro del área de verificación (Figura 37.2, parte derecha).

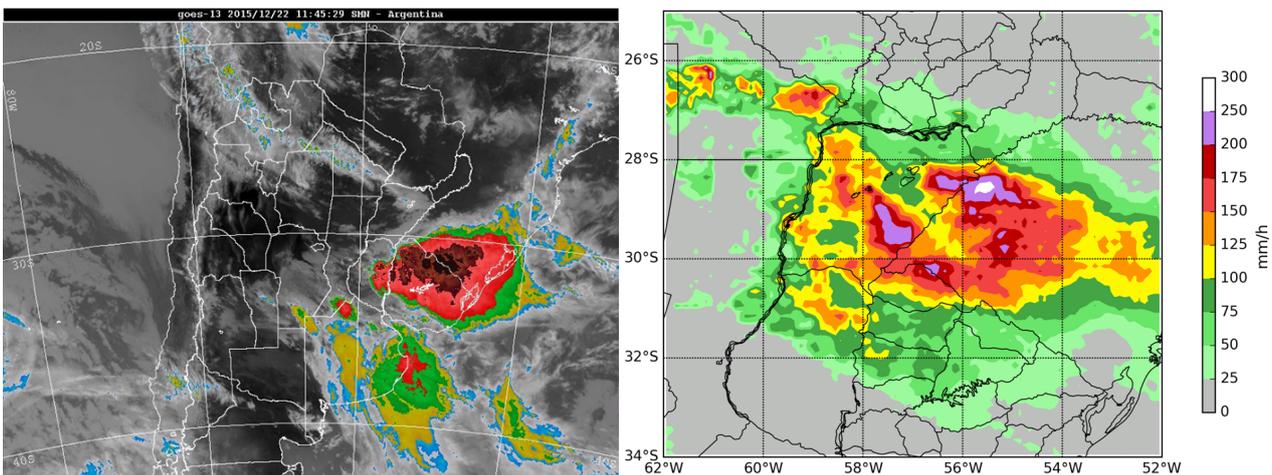


Figura 37.2: Izquierda: Imagen de temperatura de topes nubosos correspondiente al canal infrarrojo del satélite GOES 13 de las 11:45 UTC del 22 de Diciembre de 2015. Derecha: Precipitación estimada a partir del producto IMERG (Final Run, [22]) entre las 18 UTC del 22 y las 12 UTC del 24 de diciembre de 2015 dentro del área de verificación.

La Figura 37.3, muestra la media del ensamble para la precipitación correspondiente al período mostrado en la Figura 37.2 en la página anterior, parte derecha. Se puede ver que todos los experimentos subestimaron la intensidad de la precipitación para este caso, sobre todo en la porción norte del sistema convectivo. La comparación de las diferentes estrategias en términos de la media del ensamble muestra pequeñas diferencias en los valores de precipitación. Este comportamiento resulta esperable dado que la media del ensamble suaviza los detalles más impredecibles del campo de precipitación acumulada. Por el contrario, la desviación estándar de los valores pronosticados por el ensamble (paneles inferiores de la Figura 37.3) muestran que existen una gran incertidumbre asociada al pronóstico de este tipo de eventos. En algunas regiones la dispersión puede superar los 70 mm siendo de una magnitud comparable a los montos de preci-

pitación observados. También se aprecian diferencias importantes entre los conjuntos en cuanto a la cuantificación de la incertidumbre. Por ejemplo, el ensamble control que sólo cuenta con perturbaciones de las condiciones iniciales y de borde es el que tiene los valores más pequeños de dispersión. En cambio la estrategia multifísica que incluyen también diferentes tratamientos de los procesos de capa límite y de los procesos micro físicos, muestran una mayor dispersión permitiendo que en un mayor número de puntos de retícula la observación quede contenida dentro del rango de valores pronosticados por los diferentes miembros del ensamble. No obstante, aún la implementación de diferentes parametrizaciones para los procesos de escala no resuelta, no pudieron capturar las precipitaciones ocurridas más al norte, indicando que aún en este caso la incertidumbre está subestimada.

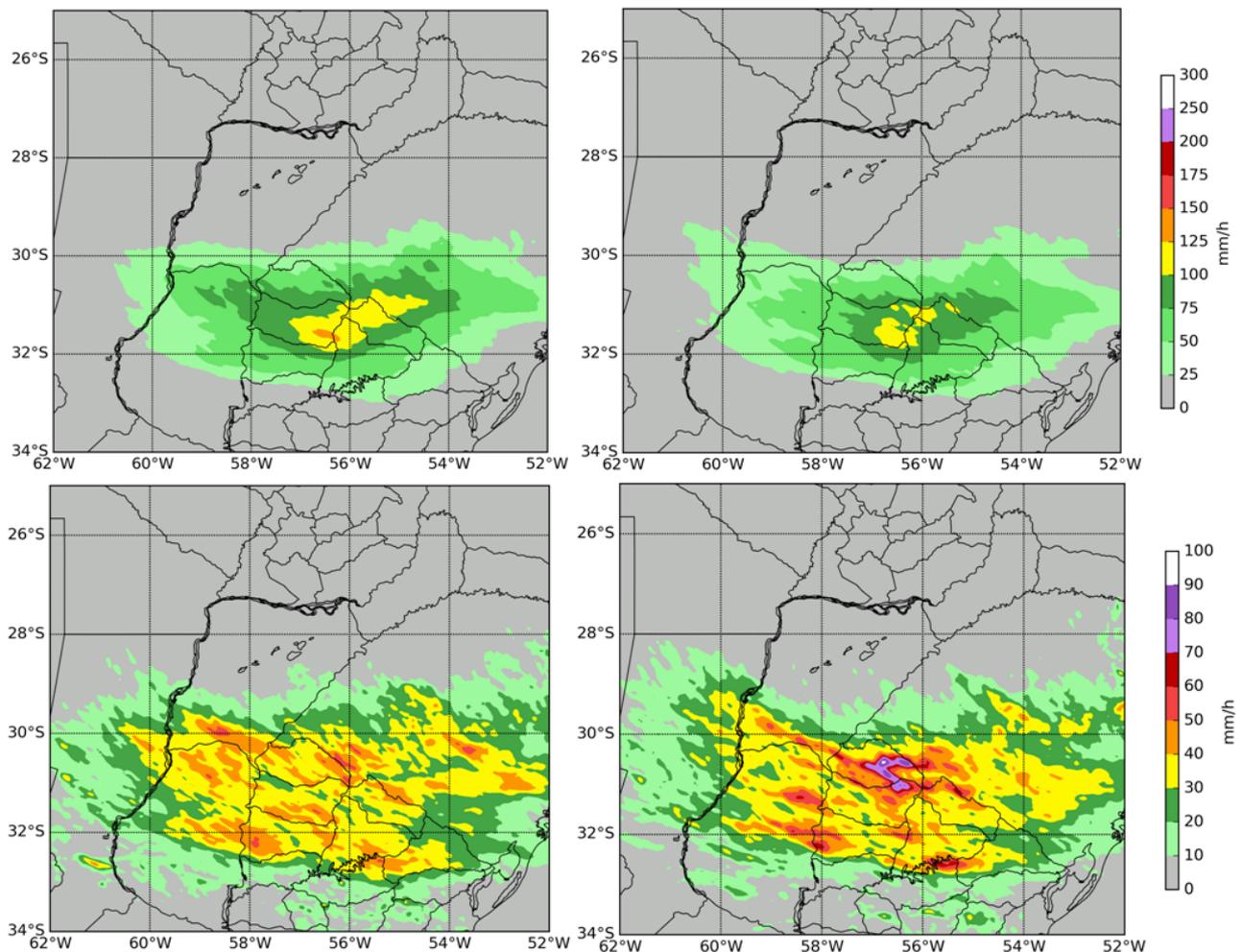


Figura 37.3: Campos pronosticados de precipitación media (paneles superiores) y dispersión (paneles inferiores) de las dos estrategias de pronósticos por ensambles analizadas. Los valores corresponden a la precipitación acumulada en el período de verificación (mm). Ensamble control (paneles izquierdos) y ensamble multifísica (paneles derechos).

Este caso de estudio pone de manifiesto la magnitud de la incertidumbre asociada al pronóstico de eventos de alto impacto en la región. Por otra parte este grado de incertidumbre incrementa la potencialidad de los ensambles de alta resolución para poder aportar información útil respecto del pronóstico de fenómenos de alto impacto. Este tipo de información, si es bien utilizada por los pronosticadores y correctamente transmitida e interpretada por los organismos asociados a la gestión de riesgo, puede contribuir a disminuir los daños económicos y sociales ocasionados por fenómenos meteorológicos de alto impacto. Por otra parte este caso de estudio muestra que existen todavía limitaciones para poder cuantificar adecuadamente dicha incertidumbre y que es necesario continuar profundizando la investigación aplicada al desarrollo de técnicas de generación de ensambles más apropiadas para la mesoescala y que tengan también en cuenta la interacción con otras escalas.

37.3 Calibración de pronósticos probabilistas de precipitación utilizando análogos

De acuerdo con lo mencionado en la sección anterior, los pronósticos por ensambles utilizando modelos que permiten representar los procesos convectivos, son una herramienta importante para el pronóstico de eventos meteorológicos de alto impacto. No obstante, su alto costo computacional, dificulta la extensión de los plazos de estos pronósticos más allá de las 36-48 horas. Para plazos mayores, se pueden utilizar los sistemas de pronósticos por ensamble globales como por ejemplo los generados por el European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF, sec. 19.3 en la página 293) o el National Center for Environmental Prediction (NCEP).

No obstante, como es sabido, los pronósticos por ensambles suelen producir una estimación sesgada de la incertidumbre asociada a los pronósticos. Por tanto resulta importante estimar la magnitud y signo de los sesgos en la incertidumbre y en el valor de las variables pronosticadas, como así también avanzar en el desarrollo de técnicas de posprocesamiento estadístico que permitan corregir parcialmente dichos sesgos.

En particular en el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, se implementó operativamente la corrección o calibración de los pronósticos probabilísticos de precipitación a corto y mediano plazo

utilizando la técnica de pronóstico por análogos [1]. Dicha técnica fue introducida por HAMILL et al. [18] y se basa en la utilización de un conjunto de pronósticos globales por ensambles y retrospectivos que se extiende desde el primero de enero de 1984 hasta la actualidad (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/reforecast2/>). Una de las ventajas de este conjunto de datos, es que permite contar con una historia mucho mayor que la que brindan la mayoría de las versiones operativas de los pronósticos globales. Esto posibilita obtener estadísticas más robustas acerca de los errores del modelo, a la par que habilita la utilización de métodos de calibración más complejos como la regresión por análogos.

37.3.1 Regresión por análogos

La regresión por análogos también conocido como el método de los k-vecinos más cercanos [3], es un método de aprendizaje automático utilizado en problemas de clasificación y regresión, que permite encontrar relaciones no lineales entre diferentes variables de un mismo conjunto de datos. La aplicación de la regresión por análogos a la calibración de pronósticos probabilistas de precipitación y temperatura utilizando pronósticos retrospectivos fue introducida por HAMILL et al. [18]. La Figura 37.4 en la página siguiente, ejemplifica la aplicación de la técnica con pronósticos de precipitación. En dicha técnica, primero se compara el pronóstico actual (panel superior en la Figura 37.4 en la página siguiente) sobre una región dada que en este caso consta de 3 x 3 puntos de retícula y para un plazo dado de pronóstico, con todos los pronósticos retrospectivos correspondientes a la misma región y plazo de pronóstico. Aquellos pronósticos retrospectivos que resulten más similares al pronóstico actual serán considerados los análogos de nuestra situación actual (segunda fila de paneles en la Figura 37.4 en la página siguiente). La similitud puede medirse de diferentes maneras, pero en este caso se utiliza la diferencia medida en el campo de precipitación pronosticado a través del error cuadrático medio. Para mejorar la representatividad de los pronósticos por análogos, en la presente implementación, los análogos son buscados en un período de +/- 30 días alrededor del día del año correspondiente al pronóstico actual. De esta manera se busca encontrar análogos que correspondan a la misma época del año.

Una vez seleccionados los análogos, se toman las observaciones de precipitación correspondientes a di-

chos análogos (tercera línea de paneles en la Figura 37.4). Dicho conjunto de observaciones son una muestra a partir de la cual podemos estimar la distribución de probabilidad de la precipitación en aquellos días en los que el pronóstico era similar al pronóstico actual (última fila de paneles en la Figura 37.4). A partir de dicha muestra se pueden evaluar las probabilidades de que la precipitación supere un determinado umbral. Este procedimiento se repite para cada región y para cada plazo de pronóstico hasta obtener

un mapa completo de la probabilidad de precipitación para diferentes umbrales y para diferentes plazos de pronóstico.

La efectividad de la regresión por análogos puede depender en gran medida de aspectos tales como el tamaño del dominio utilizado para realizar la búsqueda de los análogos, las variables involucradas en el cálculo de la similitud de los pronósticos, las medidas de similitud utilizadas y la cantidad de análogos considerados.

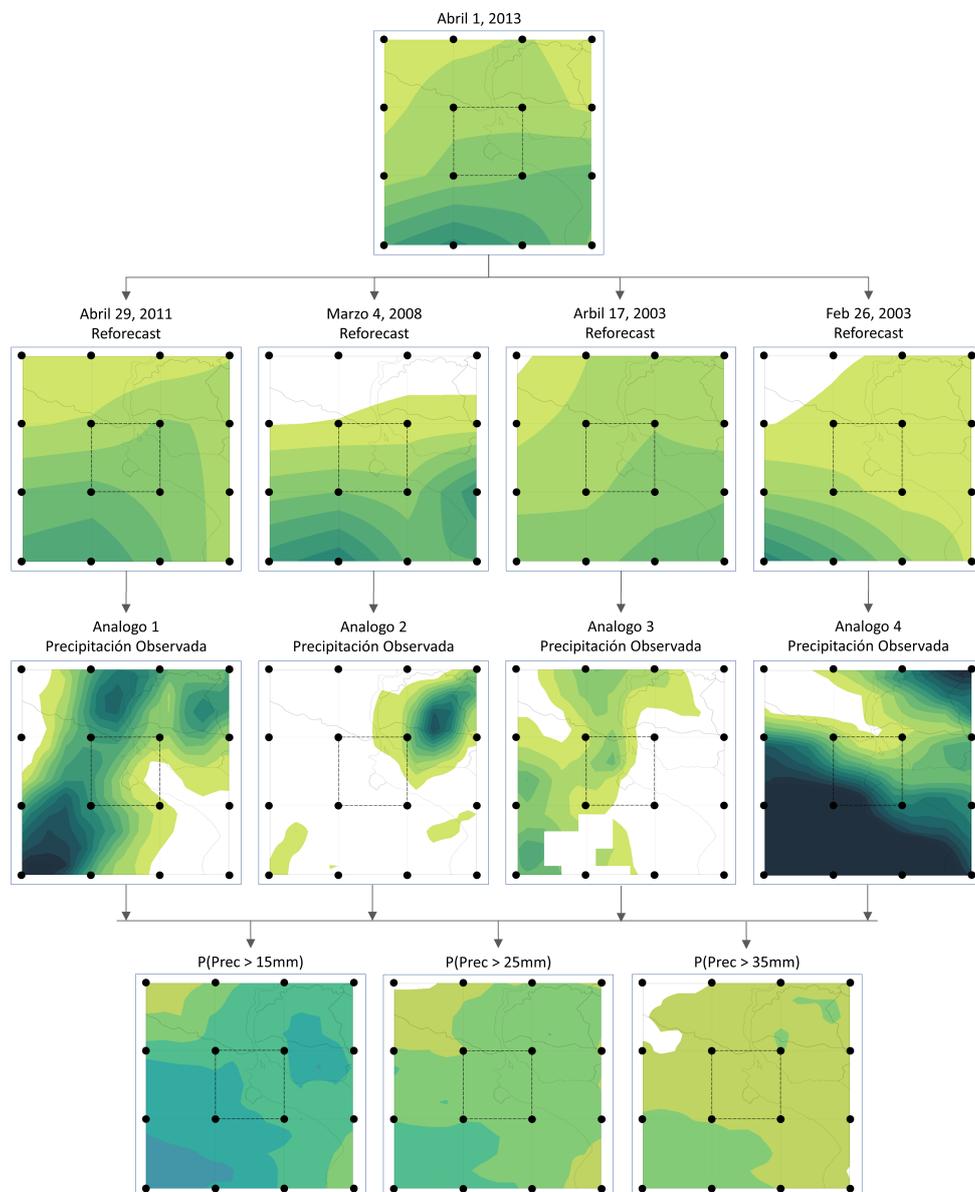


Figura 37.4: Esquema que representa el proceso de calibración de los pronósticos probabilistas de precipitación utilizando el método de regresión por análogos (tomada de [33]).

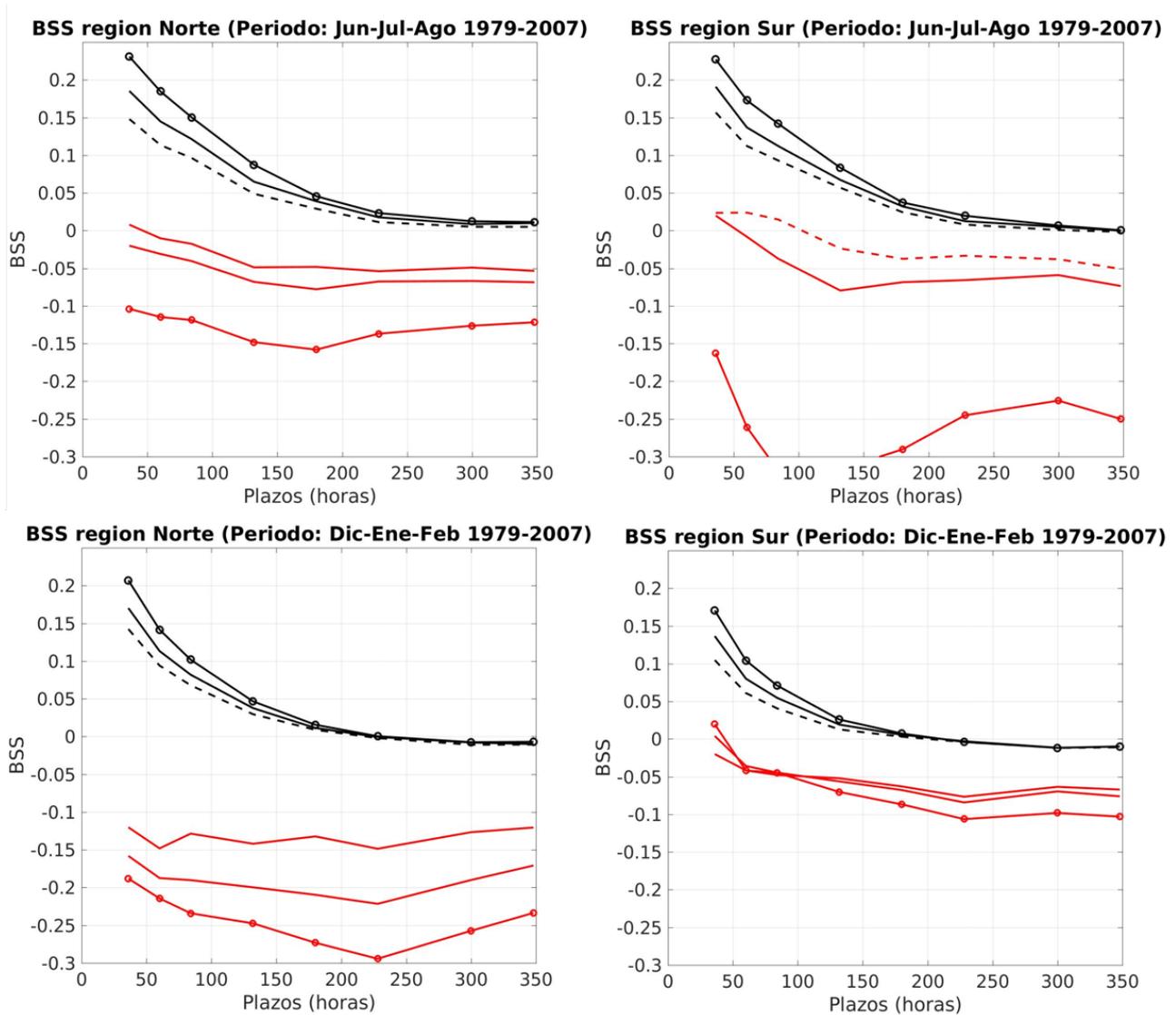


Figura 37.5: Coeficiente de acierto de Brier (BSS, sec. 15.9.8 en la página 232) como función del plazo de pronóstico (horas) para los pronósticos probabilistas de precipitación calibrados a través de la regresión por análogos (negro) y pronósticos probabilistas de precipitación no calibrados (rojo). En todos los casos se muestran los pronósticos probabilistas para los umbrales de 1 mm (línea sólida y círculos), 5 mm (línea sólida) y 10 mm (línea punteada). Los paneles superiores corresponden a los meses de junio, julio y agosto (invierno), los paneles inferiores a los meses de diciembre, enero y febrero (verano), los paneles de la izquierda corresponden a la región norte y los de la derecha a la región sur.

37.3.2 Verificación de los pronósticos por análogos en Argentina

La aplicación de la regresión por análogos, produjo mejoras importantes en la calidad de los pronósticos probabilistas de precipitación sobre el sur de Sudamérica. A continuación se muestran algunos resultados de la verificación de los pronósticos retrospectivos de precipitación en plazos de 24 h sobre estaciones de Argentina, y como dichos pronósticos podrían mejorarse mediante la introducción de una calibración basada en la regresión por análogos.

La Figura 37.5 muestra los valores del coeficiente de acierto de Brier (BSS por sus siglas en inglés, sec. 15.9.8 en la página 232) calculado para los pronósticos retrospectivos calibrados utilizando el método de regresión por análogos [1] y para los pronósticos probabilistas no calibrados (es decir aquellos que se obtienen computando la frecuencia de miembros del ensamble que indican precipitación por encima del umbral seleccionado). La verificación de los pronósticos se realizó sobre dos regiones diferentes: la región norte de Argentina caracterizada por un clima más húmedo y subtropical y la región sur en donde predominan características de un clima templado. La

verificación también se realizó en forma separada para los meses de invierno y de verano. Para ambas regiones, tanto en invierno como en verano, la aplicación de la regresión por análogos tiene como resultado una notoria mejora del rendimiento del pronóstico para los diferentes umbrales analizados. En prácticamente todos los casos, el pronóstico no calibrado muestra valores negativos de BSS, es decir que su utilidad es muy limitada a la hora de su uso en la toma de decisiones. No obstante, la calibración utilizando la regresión por análogos muestra valores claramente positivos de

BSS hasta plazos que van aproximadamente hasta las 300 horas de pronóstico.

En 2012, el NCEP generó un segundo conjunto de pronósticos retrospectivos utilizando la versión del modelo GFS utilizada en dicho año. Esta versión actualizada está disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/reforecast2/>. En esta nueva versión la resolución del modelo global se incrementó de T62 a T254 para los primeros 8 días de pronóstico pasando luego a T190 hasta los 16 días de pronóstico.

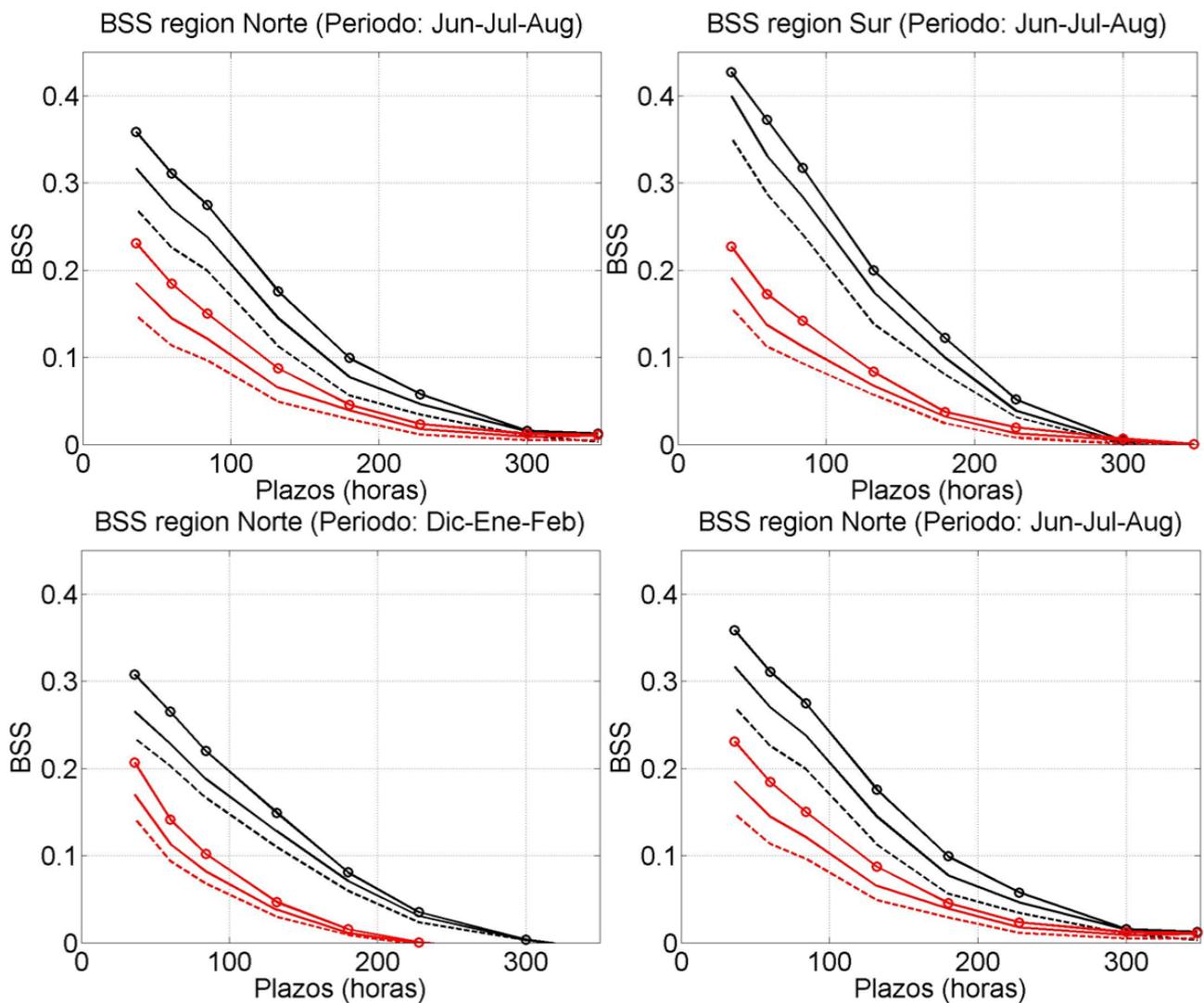


Figura 37.6: Coeficiente de acierto de Brier como función del plazo de pronóstico (horas) para los pronósticos probabilistas de precipitación calibrados a través de la regresión por análogos utilizando la versión 2 de los pronósticos retrospectivos (negro) y la versión 1 de los pronósticos retrospectivos (rojo). En todos los casos se muestran los pronósticos probabilistas para los umbrales de 1 mm (línea sólida y círculos), 5 mm (línea sólida) y 10 mm (línea punteada). Los paneles superiores corresponden a los meses de junio, julio y agosto (invierno), los paneles inferiores a los meses de diciembre, enero y febrero (verano), los paneles de la izquierda corresponden a la región norte y los de la derecha a la región sur.

La Figura 37.6 en la página anterior muestra el impacto del aumento de la resolución en el conjunto de pronósticos retrospectivos. Los valores de BSS obtenidos con los pronósticos retrospectivos de alta resolución son sensiblemente mejores que los obtenidos con la versión de baja resolución. En esta figura se puede apreciar además un mejor rendimiento de los sistemas de pronósticos probabilistas durante los meses de invierno en ambas regiones. Esto se evidencia a través de la convergencia del BSS al valor de 0, que durante el invierno se produce para plazos de pronóstico mayores. Una de las principales motivos de este comportamiento es que durante los meses cálidos gran parte de la precipitación está explicada por la ocurrencia de sistemas convectivos como el analizado en la sección anterior en donde la incertidumbre asociada a los pronósticos suele ser muy grande aún en plazos de tiempo cortos. Más aún, el sistema analizado en la sección anterior muestra que la incertidumbre asociada a estos sistemas no está únicamente confinada a las escalas pequeñas, sino que también se da en escalas

espaciales más grandes que determinan la posición o intensidad del sistema convectivo en su conjunto.

Los pronósticos probabilistas de precipitación generados a partir de la regresión por análogos se encuentran implementados operativamente en el Servicio Meteorológico Nacional y utilizan los datos observados de precipitación acumulada en 24 horas de la red de estaciones de superficie del Servicio Meteorológico Nacional y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Los pronósticos probabilistas de precipitación acumulada en 24 horas se generan en plazos de pronóstico de 1 a 7 días. Por otra parte se generan pronósticos probabilistas de precipitación total acumulada en 7 días para los plazos de entre 1 y 7 días y entre 8 y 14 días. Estos últimos se generan para umbrales de precipitación fijos y para umbrales definidos a partir de determinados percentiles de la distribución climatológica de lluvias en diversas estaciones. Un ejemplo de pronóstico probabilista de lluvia entre los plazos de 8 y 14 días se puede ver en la Figura 37.7.

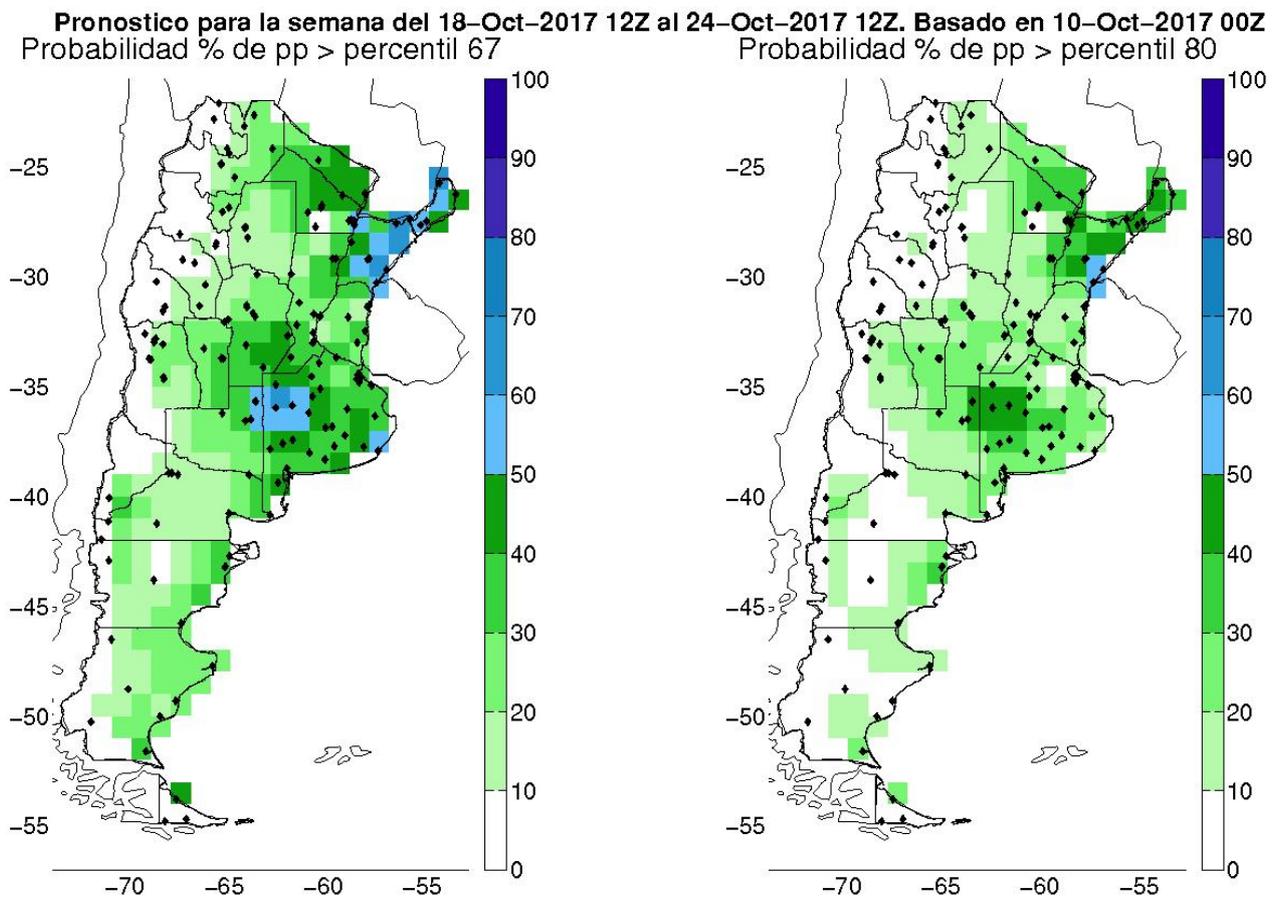


Figura 37.7: Probabilidad de precipitación por encima del percentil 67% (izda.) 80% (dcha.) de la distribución climatológica para la semana comprendida entre el 18 de octubre y el 24 de octubre de 2017 estimada utilizando la regresión por análogos a partir de los pronósticos retrospectivos del NCEP.

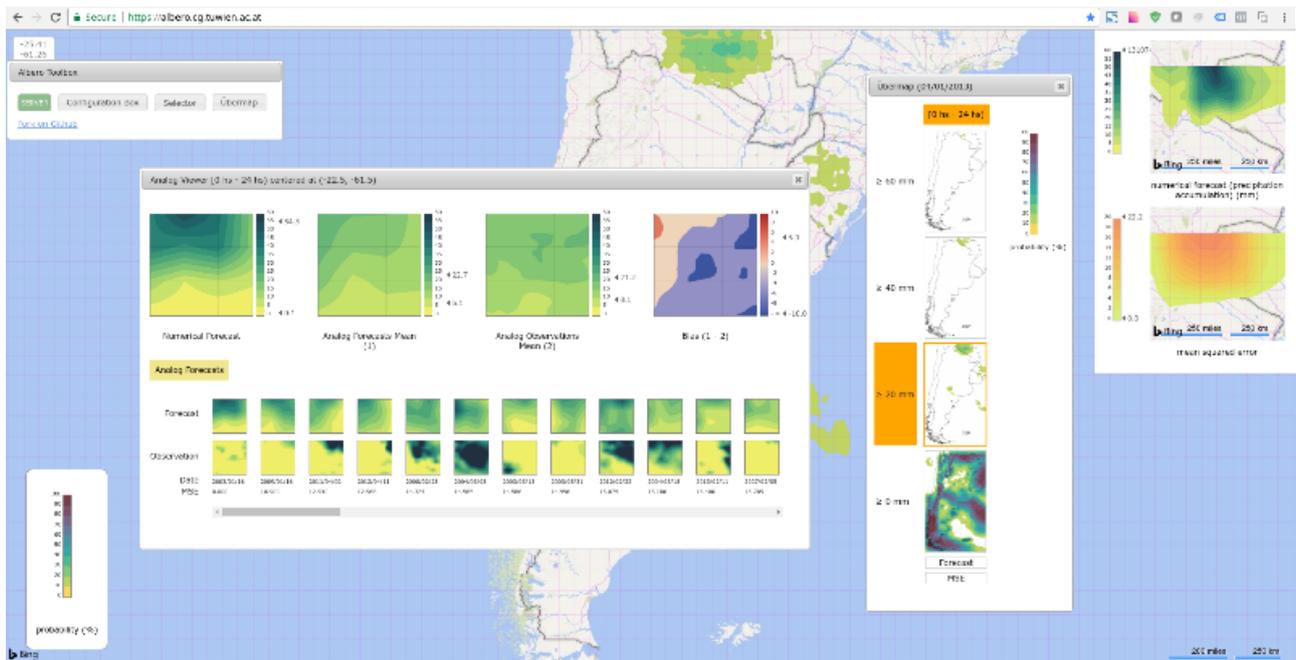


Figura 37.8: Albero es una solución de análisis visual que combina diferentes técnicas de visualización e interacción para facilitar un análisis eficiente del pronóstico probabilista.

37.3.3 Visualización de los pronósticos por análogos

Con la llegada de los pronósticos por ensambles, la cantidad de información a disposición del pronosticador o de los usuarios de los pronósticos meteorológicos se incrementó de forma significativa. Esta situación se acentúa aún más con el incremento de la resolución y con el aumento del tamaño de los ensambles. El incremento en el volumen de información trae aparejados desafíos respecto a la interpretación y análisis de los resultados en forma eficiente.

Una de las maneras de alcanzar este objetivo, es a través del diseño de herramientas que permitan visualizar los aspectos significativos de la información en forma rápida y sencilla. El volumen de información creciente asociado a los pronósticos por ensambles puede ser utilizado de manera más eficiente por parte de los pronosticadores y tomadores de decisión, mediante el uso de técnicas de análisis visual (Visual Analytics, [40]). Un ejemplo de tales desarrollos que se lleva adelante en Argentina es el sistema *Albero*. *Albero* es una solución de análisis visual, especialmente diseñada para el análisis de los pronósticos probabilistas de precipitación basados en los pronósticos retrospectivos [13].

La Figura 37.8 muestra los diferentes ciclos de interacción con el usuario integrados en *Albero*. El primero de estos ciclos es el ciclo de configuración o

parametrización, luego vienen el ciclo de pronóstico probabilistas y el ciclo de análogos. En el ciclo de configuración, el usuario puede definir de manera sencilla, parámetros tales como el plazo de pronóstico, la extensión del pronóstico y los umbrales de precipitación para los cuales desea estimar la probabilidad. Esto se hace a través de un menú interactivo (Figura 37.8). Una vez configurada la herramienta, se realiza el cálculo del pronóstico por análogos sobre toda la región de interés, utilizando dominios locales superpuestos [13]. Esto permite visualizar a través de múltiples mapas miniatura, los pronósticos probabilistas para los umbrales y plazos indicados. Finalmente, el ciclo de pronóstico por análogos permite inspeccionar con más detalle lo que sucede en una región en particular. En este ciclo la herramienta permite visualizar los análogos individuales obtenidos, ordenados de acuerdo a su nivel de similitud, así como algunas propiedades estadísticas adicionales del conjunto de análogos como su media, el error medio del modelo, etc. Este último ciclo permite entre otras utilidades inspeccionar la existencia de eventos extremos dentro del conjunto de análogos identificado, así como monitorear la calidad de los análogos encontrados para cada caso particular.

Albero representa además un avance en la implementación de la regresión por análogos y los pronósticos retrospectivos, ya que utiliza estimaciones satelitales de precipitación CMORPH [24] que se encuentran disponibles entre -40 y 40° de latitud, permitiendo

la generalización de su uso en varias regiones del planeta. En la actualidad Albero se encuentra funcionando en forma experimental para el sur de Sudamérica (la versión experimental puede ser consultada en <https://albero.cg.tuwien.ac.at/>).

37.4 Pronósticos por ensambles en escala estacional

En el sudeste de Sudamérica, los eventos climáticos extremos y en particular aquellos ligados con la precipitación (ej. Las sequías prolongadas o los períodos extremadamente lluviosos) ponen la productividad e infraestructura de la región en riesgo. Un concepto innovador para enfrentar estas condiciones climáticas adversas, conocido como manejo del riesgo climático, se sostiene en la planificación y la implementación satisfactoria de acciones previas a la ocurrencia de estos eventos. Dentro de este contexto los pronósticos climáticos de calidad constituyen un pilar fundamental para que estas estrategias de trabajo resulten exitosas contribuyendo de esa manera al desarrollo productivo de diversos sectores socioeconómicos que se verían beneficiados al disponer de pronósticos en escalas mayores que la típicamente asociada al pronóstico del tiempo.

El estudio de las fuentes de variabilidad interanual de la precipitación en Sudamérica ha recibido considerable atención (e. g. [45]). En particular se ha mostrado que en el sudeste de Sudamérica la variabilidad de la precipitación en escalas interanuales exhibe gran amplitud a lo largo de todo el año (e. g. [44]) y que el fenómeno que posee mayor influencia sobre dicha variabilidad es el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (e. g. [16]) aunque modulado por las condiciones del Atlántico Ecuatorial [4]. Las anomalías en la temperatura de superficie del mar (TSM) en el Índico tropical, y en particular aquellas asociadas con el dipolo del océano Índico (IOD por sus siglas en inglés), influyen también sobre la precipitación estacional [9] al igual que el Modo Anular del Sur (SAM por sus siglas en inglés) [38].

Los estudios de predictibilidad del clima en escalas estacionales sobre Sudamérica demuestran que existen oportunidades para el desarrollo de herramientas de pronóstico que aporten información útil tanto en regiones tropicales como extratropicales. Recientemente, OSMAN et al. [32] analizaron la predictibilidad y el rendimiento del conjunto de modelos del proyecto

Climate Historical Forecast Project (CHFP, [42]) en pronosticar la circulación de verano e invierno del Hemisferio Sur y encontraron que la predictibilidad y el desempeño en las inmediaciones de Sudamérica es alta, especialmente durante el verano. Asimismo, OSMAN Y VERA [31] evaluaron la predictibilidad y el desempeño de los modelos del proyecto CHFP en pronosticar la temperatura y precipitación sobre Sudamérica confirmando que la predictibilidad de la temperatura superficial y la precipitación es significativa sobre todo en regiones tropicales siendo la predictibilidad de la temperatura mayor a la de la precipitación. Sin embargo, algunas regiones específicas del sur de Sudamérica muestran valores relativamente altos de predictibilidad. En particular, los valores más altos de predictibilidad de la precipitación extratropical se encuentran en el sudeste de Sudamérica y durante el verano DEF desplazándose más al norte durante el invierno.

Hasta ahora se han hecho muy pocos desarrollos de herramientas de pronóstico estacional para Sudamérica a partir de las predicciones globales provistas operativamente por diferentes modelos globales de pronóstico. Uno de esos pocos ejemplos es el sistema de pronóstico de precipitación estacional, EUROBRISA, de COELHO y otros ([12]). Por ese motivo en Argentina se lleva adelante el desarrollo de un sistema de pronóstico operativo en escala estacional que funciona sobre la base de la combinación y calibración de pronósticos numéricos globales provistos por el proyecto CHFP (<http://chfps.cima.fcen.uba.ar/>). Este conjunto cuenta con la ventaja de estar disponible para toda la comunidad en tiempo real, lo que permite la implementación de un pronóstico probabilista estacional calibrado para la región.

37.4.1 Calibración de pronósticos estacionales

El sistema implementado que combina y calibra pronósticos estacionales para Sudamérica generado por diferentes modelos numéricos globales se basa en la metodología de regresión por ensamble o EREG [43] desarrollada e implementada por el Climate Prediction Center (CPC) para sus pronósticos estadísticos y dinámicos y en el marco de la iniciativa North American Multi Model Ensemble (NMME). Esta herramienta cuenta con la ventaja de ser muy fácil de implementar y muestra un rendimiento por encima de otros métodos sencillos de calibración de pronósticos aprovechando al mismo tiempo toda la información que

provee el ensamble y no sólo aquella asociada al promedio del conjunto.

EREG consiste en describir la función de distribución de probabilidad de las variables que se desea pronosticar utilizando una combinación de distribuciones gaussianas. En los métodos de calibración tradicionales, muchas veces se considera a dicha distribución como una gaussiana centrada en la media del ensamble y cuya desviación estándar está dada por la dispersión del ensamble. En el caso del EREG, la distribución se describe como una suma de gaussianas centradas alrededor del valor pronosticado por cada uno de los miembros del ensamble. El método provee además una forma de estimar el ancho de cada una de estas distribuciones de forma tal que la función de distribución total describa en forma lo más precisa posible la incertidumbre del pronóstico. Este método se basa en la suposición de que los diferentes miembros que componen el ensamble tienen la misma probabilidad de producir el pronóstico más preciso para un evento cualquiera (es decir que su desempeño es estadísticamente igual). Por otra parte también se asume que los errores de cada uno de los pronósticos se distribuyen en forma gaussiana. La Figura 37.9 muestra un ejemplo de cómo se estima la función de distribución de probabilidad para una variable pronosticada a partir de las funciones de distribución calculadas a partir de cada uno de los miembros del ensamble.

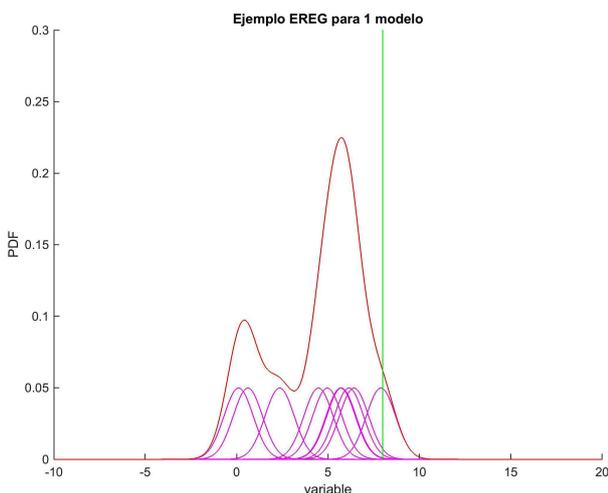


Figura 37.9: Figura ilustrativa de la Función de Densidad de Probabilidad derivada de la aplicación de EREG a un ensamble con 10 miembros. La función de densidad de probabilidad (PDF, línea roja) es la suma normalizada de las campanas gaussianas centradas en las estimaciones de la regresión de cada uno de los miembros del ensamble (líneas magenta). La línea vertical verde representa la observación.

En este caso al asumir que todos los miembros son igualmente probables, la distribución total se obtiene como el promedio algebraico de las distribuciones obtenidas a partir de cada miembro en particular. En este ejemplo en particular, se puede apreciar que la distribución resultante puede adoptar formas complejas como por ejemplo la estructura bimodal que aparece en la figura. A partir de la distribución de probabilidad total se pueden obtener fácilmente probabilidades para diferentes rangos de las variables pronosticadas.

En el caso de contar con múltiples modelos disponibles, además de calibrar cada pronóstico, deben combinarse si se quiere obtener un único pronóstico integrado. Para alcanzar este último propósito, es necesario consolidar los pronósticos evaluando objetivamente su credibilidad. En el sistema implementado se están evaluando dos enfoques basados en EREG: Por un lado se consideró la PDF calibrada obtenida con cada modelo luego de aplicar EREG y se aplicó un promedio pesado, según el desempeño individual de cada modelo, para obtener una PDF final. Por otro lado, se aplicó EREG al ensamble compuesto por todos los miembros de todos los modelos siendo cada miembro del ensamble asociado a cada modelo pesado en función del desempeño individual de dicho modelo.

37.4.2 Verificación de los pronósticos estacionales calibrados sobre Sudamérica

Las metodologías de calibración y combinación presentadas fueron aplicadas a los pronósticos estacionales de precipitación y temperatura para los trimestres Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Junio-Julio-Agosto (JJA) a partir de condiciones iniciales generadas en noviembre y mayo respectivamente, provistos por los modelos de CHFP. El dominio elegido abarca la totalidad de Sudamérica, (275° E - 330° E; 15° N - 60° S). Cada modelo del conjunto fue calibrado utilizando EREG y luego combinado utilizando las dos metodologías mencionadas para obtener dos pronósticos consolidados. La verificación de los pronósticos calibrados se realizó para los pronósticos comprendidos entre los años 1982 y 2005 utilizando la técnica de validación cruzada. En general el rendimiento de la calibración utilizando EREG y la aplicación de las metodologías de combinación mejoran los resultados utilizando las salidas directas de los modelos, tanto en forma determinista como probabilista, así como para todas las variables y trimestres considerados.

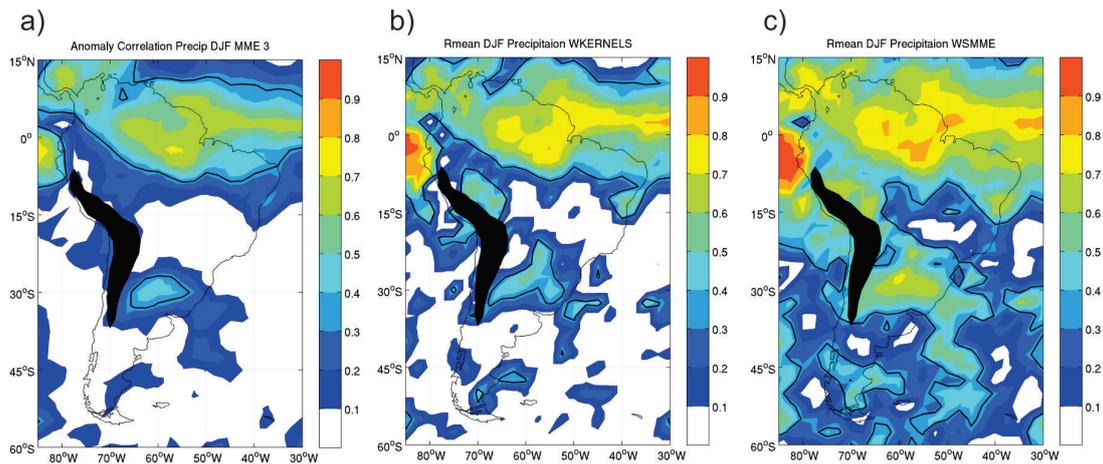


Figura 37.10: Coeficiente de correlación de anomalías (ACC) entre la precipitación DEF observada y el pronóstico de precipitación DEF obtenido a partir de a) el MME sin calibrar, b) la media de la FDP obtenida luego de promediar la PDF de cada modelo obtenida con EREG, c) la media de la FDP obtenida luego de aplicar EREG al ensemble compuesto por todos los miembros de todos los modelos. La línea negra marca los valores a partir de los cuales el ACC es significativo al 95 % de confianza.

La Figura 37.10 muestra, a modo de ejemplo, el coeficiente de correlación de anomalías (ACC por sus siglas en inglés) para el pronóstico de precipitación en DEF. El ACC calculado es en general superior con el pronóstico final consolidado, sobre todo en las regiones donde el uso directo del ensemble multimodelo (MME; generado a partir de la media del ensemble de cada modelo) se asocia con ACC significativos. En cambio, en las regiones donde el MME no presenta ningún tipo de calidad, el desempeño del ensemble calibrado es dispar.

Los resultados se evaluaron también con un pronóstico probabilista para tres categorías: por debajo de

lo normal, normal y por encima de lo normal. Estas tres categorías son definidas de forma tal de que sean equiprobables de acuerdo con la climatología de cada punto de retícula. Cuando se evalúa el desempeño del pronóstico probabilista utilizando el Ranked Probability Skill Score (RPSS, sec. 15.9 en la página 224), se observa que los ensambles consolidados producen mejores resultados que el pronóstico sin calibrar. Las mejoras ocurren en todo el dominio pero sólo en los trópicos se supera el desempeño del pronóstico de referencia que consiste en asignar a cada categoría la misma probabilidad de ocurrencia. La Figura 37.11 ilustra esta situación para el pronóstico de precipitación en DEF.

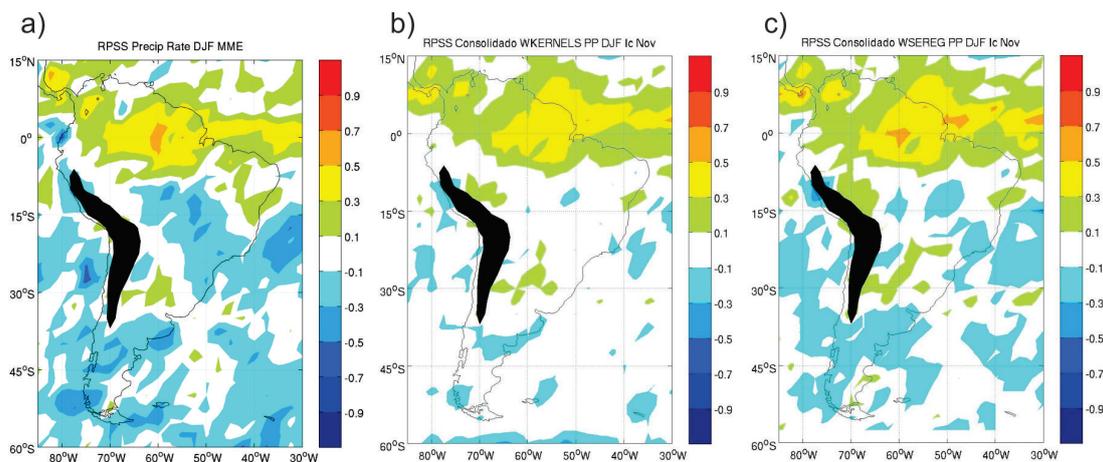


Figura 37.11: RPSS entre la precipitación categórica de DEF observada y el pronóstico probabilista de precipitación de DEF obtenido a partir de a) el MME sin calibrar, b) la FDP obtenida luego de promediar la PDF de cada modelo obtenida con EREG, c) la FDP obtenida luego de aplicar EREG al ensemble compuesto por todos los miembros de todos los modelos. El área sombreada en negro enmascara la región donde la topografía alcanza alturas por encima de los 3000 metros.

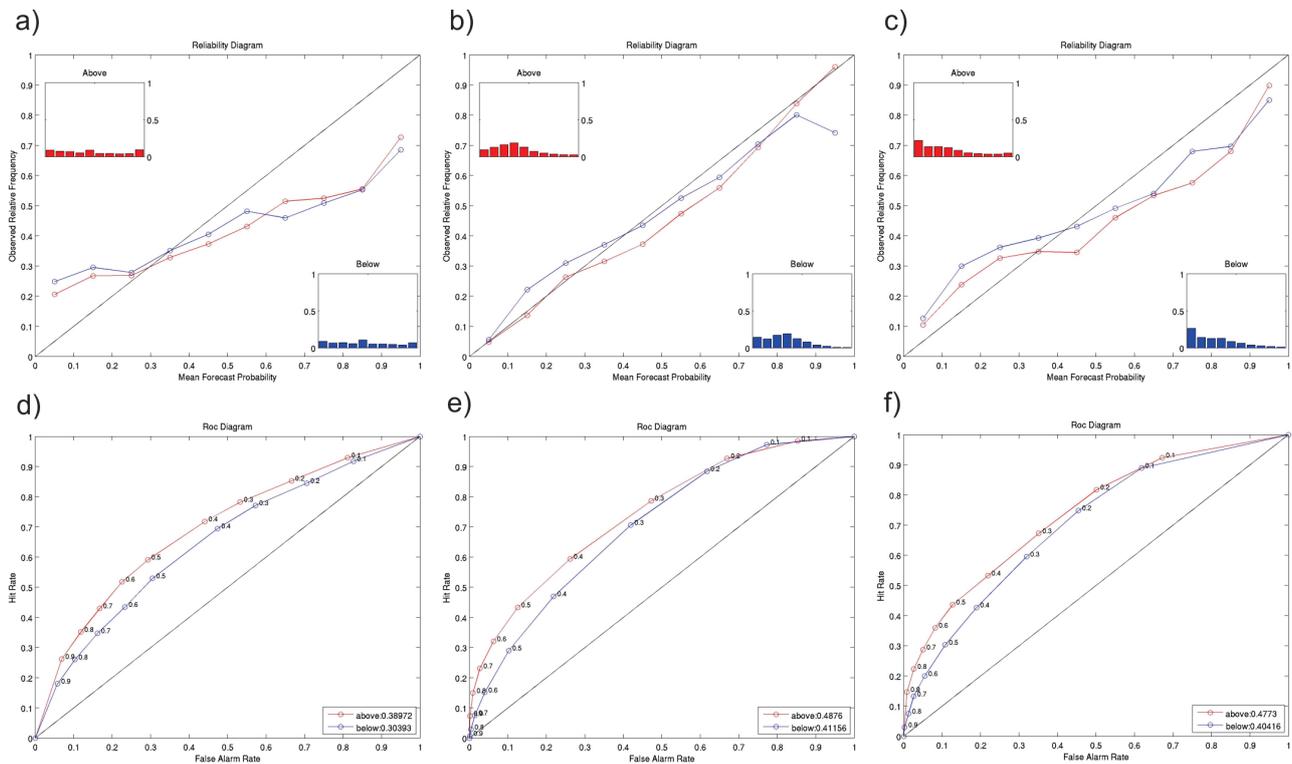


Figura 37.12: Para el pronóstico probabilista de temperatura superficial de DEF sobre Sudamérica a), b) y c) Diagramas de atributos y frecuencia de distribución relativa; y d), e) y f) diagramas ROC. El color rojo (azul) es utilizado para el evento temperatura superior (inferior) a lo normal. Los pronósticos son obtenidos con tres metodologías: a) y d) el pronóstico sin calibrar; b) y e) la FDP obtenida luego de promediar la PDF de cada modelo obtenida con EREG; c) y f) la FDP obtenida luego de aplicar EREG al ensamble compuesto por todos los miembros de todos los modelos.

El análisis del desempeño del pronóstico probabilista en términos de la confiabilidad y la resolución muestra que en general el pronóstico hecho con el ensamble sin calibrar presenta poca confiabilidad, mientras que la calibración la mejora, para ambas variables y períodos. Por otro lado, en términos de resolución, la calibración y combinación mejoran en general el desempeño respecto al pronóstico sin calibrar sobre latitudes tropicales, especialmente en los pronósticos de temperatura. En los extratropicales todas las metodologías presentan poca resolución, con excepción del pronóstico de temperatura en JJA. En general, los resultados en los pronósticos de precipitación no difieren mucho si se pronostica la categoría superior a lo normal o inferior a lo normal. En cambio, se encontró que en los pronósticos de temperatura la categoría superior a lo normal suele presentar mejor desempeño que la inferior a lo normal con todas las metodologías. La Figura 37.12 muestra como ejemplo el desempeño del pronóstico en términos de confiabilidad y resolución (paneles superiores, diagrama de atributos) y discriminación (paneles inferiores, diagrama ROC) para el pronóstico de temperatura de DEF.

37.5 Conclusiones generales del capítulo

Entre los desafíos más importantes relacionados con el pronóstico por ensamble en la región, se debe mencionar la necesidad de una mejora en la comunicación de la información acerca de la incertidumbre de los pronósticos en las diferentes escalas espaciales y temporales. Es importante notar que en la actualidad, en Argentina, esta información no se está comunicando al público o a los tomadores de decisiones, sino que está disponible solo para los pronosticadores.

Para poder avanzar en la comunicación de los pronósticos, es necesario incrementar el vínculo con los usuarios de la información, es decir con aquellos que utilizan los pronósticos meteorológicos en el proceso de tomas de decisiones. Es fundamental entender más en profundidad cómo la información meteorológica participa de dichos procesos de toma de decisión para mejorar la especificidad de los productos generados. Por otra parte también es importante que los tomadores de decisión puedan utilizar la información de la incertidumbre asociada a los pronósticos y de esa

manera aprovechar al máximo la información meteorológica disponible. La incertidumbre es una pieza fundamental del proceso de toma de decisiones, por lo cual la información meteorológica no puede ser eficientemente utilizada si no se conoce la incertidumbre asociada a la misma. Una de las principales dificultades asociadas a la incertidumbre en la información meteorológica es que la misma varía constantemente en el tiempo y en el espacio. Esto implica que los pronósticos meteorológicos en diferentes escalas pueden ser efectivos en determinados casos o prácticamente inútiles en otros y es importante que los usuarios comprendan bajo qué condiciones el nivel de incertidumbre presente en la información meteorológica nos permite utilizarla para la toma de una decisión concreta.

Los pronósticos por ensambles pueden ser utilizados más allá de la cuantificación de la incertidumbre para la mejora de los modelos y de las condiciones iniciales. Existen en la actualidad métodos como el filtro de Kalman por ensambles que utiliza la cuantificación de la incertidumbre basada en un ensamble de pronósticos, para asimilar observaciones y de esa forma obtener condiciones iniciales más precisas junto con una estimación de la incertidumbre asociada a las mismas. Estas técnicas han producido impactos positivos en la calidad de los pronósticos desde la escala estacional hasta la mesoescala. Por tal motivo en la actualidad se están desarrollando e implementando sistemas de asimilación de datos basados en ensambles en diferentes escalas espaciales que van desde la escala sinóptica a la escala convectiva.

Respecto de los pronósticos por ensambles en sí mis-

mos, si bien se ha avanzado mucho en la cuantificación de la incertidumbre de los pronósticos meteorológicos utilizando esta técnica sobre la región, todavía existen muchos casos en los que los fenómenos de interés ocurren aún sin haber sido anticipados por ninguno de los escenarios futuros que componen el ensamble indicando que existe lugar para la mejora de los métodos que se utilizan para representar adecuadamente las fuentes de incertidumbre presentes tanto en la determinación de las condiciones iniciales y de borde, como en la formulación de los modelos numéricos que se utilizan para realizar los pronósticos. Es importante mencionar además que cada escala tiene a este respecto sus particularidades y que las diferentes fuentes de incertidumbre pasan a tener un peso relativo diferente en cada caso, lo cual hace que los métodos necesarios para representar dicha incertidumbre deban ser convenientemente diseñados y ajustados de acuerdo a los requerimientos de cada problema en particular.

Otro tópico que está íntimamente asociado con los pronósticos por ensambles son las técnicas de posprocesamiento estadístico, en particular aquellas diseñadas para calibrar los pronósticos probabilistas que se derivan de un ensamble. En este campo las diferentes aplicaciones que se muestran en este capítulo ponen de manifiesto la importancia de contar con dichas técnicas para obtener pronósticos probabilistas más confiables. Es importante avanzar en el desarrollo de técnicas que hagan un uso cada vez más eficiente de la información provista por todo el ensamble y por las observaciones utilizadas en el proceso de calibración y que puedan ser aplicadas para ensambles compuestos por varios modelos.

37.6 Referencias

- [1] ALDECO, L S. *Aplicación de la técnica de análogos a la generación de pronósticos probabilísticos de precipitación sobre algunas estaciones de la Argentina. Tesis de Licenciatura*. Buenos Aires, 2011 (citado en páginas 588, 590).
- [2] ALEXANDER, L V y col. “Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation”. En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111.D5 (2006). DOI: [10.1029/2005JD006290](https://doi.org/10.1029/2005JD006290) (citado en página 584).
- [3] ALTMAN, Naomi S. “An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression”. En: *The American Statistician* 46.3 (1992), páginas 175-185 (citado en página 588).
- [4] BARREIRO, Marcelo y TIPPMANN, Andrés. “Atlantic modulation of El Niño influence on summertime rainfall over southeastern South America”. En: *Geophysical Research Letters* 35.16 (2008). DOI: [10.1029/2008GL035019](https://doi.org/10.1029/2008GL035019) (citado en página 594).
- [5] BROOKS, Harold E, LEE, James W y CRAVEN, Jeffrey P. “The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data”. En: *Atmospheric Research* 67 (2003), páginas 73-94 (citado en página 584).
- [6] BROOKS, Nick. “Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework”. En: *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper* 38 (2003), páginas 1-16 (citado en página 584).
- [7] CAMILLONI, I. y BARROS, V. *La Argentina y el Cambio Climático*. Eudeba, 2016 (citado en página 584).
- [8] CECIL, Daniel J y BLANKENSHIP, Clay B. “Toward a global climatology of severe hailstorms as estimated by satellite passive microwave imagers”. En: *Journal of Climate* 25.2 (2012), páginas 687-703 (citado en página 584).
- [9] CHAN, Steven C, BEHERA, Swadhin K y YAMAGATA, Toshio. “Indian Ocean dipole influence on South American rainfall”. En: *Geophysical Research Letters* 35.14 (2008). DOI: [10.1029/2008GL034204](https://doi.org/10.1029/2008GL034204) (citado en página 594).
- [10] CHEN, Fei y DUDHIA, Jimy. “Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity”. En: *Monthly Weather Review* 129.4 (2001), páginas 569-585 (citado en página 586).
- [11] CLARK, Adam J. y col. “A Comparison of Precipitation Forecast Skill between Small Convection-Allowing and Large Convection-Parameterizing Ensembles”. En: *Weather and Forecasting* 24.4 (2009), páginas 1121-1140. ISSN: 0882-8156. DOI: [10.1175/2009WAF2222222.1](https://doi.org/10.1175/2009WAF2222222.1) (citado en página 585).
- [12] COELHO, Caio A S y col. “Integrated seasonal climate forecasts for South America”. En: *CLIVAR Exchanges* 12 (2007), páginas 13-19 (citado en página 594).
- [13] DIEHL, Alexandra y col. “Albero: A Visual Analytics Approach for Probabilistic Weather Forecasting”. En: *Computer Graphics Forum*. Volumen 36. 7. Wiley Online Library. 2017, páginas 135-144. DOI: [10.1111/cgf.13279](https://doi.org/10.1111/cgf.13279) (citado en página 593).
- [14] DILLON, María Eugenia, GARCÍA SKABAR, Yanina y NICOLINI, Matilde. “Desempeño del pronóstico de modelos de alta resolución, en un área limitada: análisis de la estación de verano 2010-2011”. En: *Meteorologica* 38.2 (2013), páginas 69-89 (citado en página 585).
- [15] DUDHIA, Jimy. “Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model”. En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 46.20 (1989), páginas 3077-3107 (citado en página 586).

- [16] GRIMM, Alice M, BARROS, Vicente R y DOYLE, Moira E. "Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events". En: *Journal of climate* 13.1 (2000), páginas 35-58 (citado en página 594).
- [17] GUAN, Hong, CUI, Bo y ZHU, Yuejian. "Improvement of statistical postprocessing using GEFS reforecast information". En: *Weather and Forecasting* 30.4 (2015), páginas 841-854 (citado en página 585).
- [18] HAMILL, Thomas M y WHITAKER, Jeffrey S. "Probabilistic quantitative precipitation forecasts based on reforecast analogs: Theory and application". En: *Monthly Weather Review* 134.11 (2006), páginas 3209-3229 (citado en página 588).
- [19] HARDOY, Jorgelina y PANDIELLA, Gustavo. "Urban poverty and vulnerability to climate change in Latin America". En: *Environment and Urbanization* 21.1 (2009), páginas 203-224 (citado en página 584).
- [20] HAYLOCK, Malcolm R y col. "Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature". En: *Journal of climate* 19.8 (2006), páginas 1490-1512 (citado en página 584).
- [21] HONG, Song-You, NOH, Yign y DUDHIA, Jimmy. "A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes". En: *Monthly weather review* 134.9 (2006), páginas 2318-2341 (citado en página 585).
- [22] HUFFMAN, George J y col. "NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG version 5.2)". En: *Algorithm theoretical basis document, version 4* (2018), página 30 (citado en página 586).
- [23] JANJIĆ, Zaviša I. "The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes". En: *Monthly Weather Review* 122.5 (1994), páginas 927-945 (citado en página 585).
- [24] JOYCE, Robert J y col. "CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution". En: *Journal of Hydrometeorology* 5.3 (2004), páginas 487-503 (citado en página 593).
- [25] LIM, Kyo-Sun Sunny y HONG, Song-You. "Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models". En: *Monthly weather review* 138.5 (2010), páginas 1587-1612 (citado en página 585).
- [26] MANSELL, Edward R, ZIEGLER, Conrad L y BRUNING, Eric C. "Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics". En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 67.1 (2010), páginas 171-194 (citado en página 585).
- [27] MATSUDO, C M y SALIO, Paola V. "Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina". En: *Atmospheric research* 100.4 (2011), páginas 523-537 (citado en página 584).
- [28] MATSUDO, C y col. "Verification of WRF-ARW convective-resolving forecasts over Southeastern South America". En: *MAU-SAM* 66.3 (2015), páginas 445-456 (citado en página 585).
- [29] MLAWER, Eli J y col. "Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave". En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102.D14 (1997), páginas 16663-16682 (citado en página 586).
- [30] MORRISON, Hugh, THOMPSON, Gregory y TATARSKII, V. "Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes". En: *Monthly Weather Review* 137.3 (2009), páginas 991-1007 (citado en página 585).
- [31] OSMAN, Marisol y VERA, C S. "Climate predictability and prediction skill on seasonal time scales over South America from

- CHFP models”. En: *Climate Dynamics* 49.7-8 (2017), páginas 2365-2383. DOI: [10.1007/s00382-016-3444-5](https://doi.org/10.1007/s00382-016-3444-5) (citado en página 594).
- [32] OSMAN, Marisol, VERA, C S y DOBLAS-REYES, F J. “Predictability of the tropospheric circulation in the Southern Hemisphere from CHFP models”. En: *Climate dynamics* 46.7-8 (2016), páginas 2423-2434. DOI: [10.1007/s00382-015-2710-2](https://doi.org/10.1007/s00382-015-2710-2) (citado en página 594).
- [33] PELOROSSO, L. *Albero: Visualización de Pronósticos Probabilísticos utilizando Técnicas de Análisis de Análogos. Tesis de Licenciatura*. Buenos Aires, 2018 (citado en página 589).
- [34] RUIZ, Juan J y SAULO, Celeste. “How sensitive are probabilistic precipitation forecasts to the choice of calibration algorithms and the ensemble generation method? Part I: Sensitivity to calibration methods”. En: *Meteorological Applications* 19.3 (2012), páginas 302-313. DOI: [10.1002/met.286](https://doi.org/10.1002/met.286) (citado en página 585).
- [35] SALIO, Paola, NICOLINI, Matilde y ZIPSER, Edward J. “Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet”. En: *Monthly Weather Review* 135.4 (2007), páginas 1290-1309 (citado en página 584).
- [36] SAULO, Celeste y col. “El sistema de pronóstico experimental del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera”. En: *Meteorologica* 33.1-2 (2008), páginas 83-97 (citado en página 585).
- [37] SCHWARZKOPF, M L de y ROSSO, L C. “Severe storms and tornadoes in Argentina”. En: *Preprints, 12th Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc.* 1982, páginas 59-62 (citado en página 584).
- [38] SILVESTRI, Gabriel y VERA, Carolina. “Nonstationary impacts of the southern annular mode on Southern Hemisphere climate”. En: *Journal of Climate* 22.22 (2009), páginas 6142-6148 (citado en página 594).
- [39] SKAMAROCK, William C y col. *A description of the advanced research WRF version 2*. Informe técnico. National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale y Microscale Meteorology Div, 2005 (citado en página 585).
- [40] THOMAS, J y COOK, K. *Illuminating the path: the R&D agenda for visual analytics*. National Visualization and Analytics Center, Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2005 (citado en página 593).
- [41] THOMPSON, Gregory, RASMUSSEN, Roy M y MANNING, Kevin. “Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis”. En: *Monthly Weather Review* 132.2 (2004), páginas 519-542 (citado en página 585).
- [42] TOMPKINS, Adrian M y col. “The Climate-System Historical Forecast Project: Providing Open Access to Seasonal Forecast Ensembles from Centers around the Globe”. En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 98.11 (2017), páginas 2293-2301 (citado en página 594).
- [43] UNGER, David A y col. “Ensemble regression”. En: *Monthly Weather Review* 137.7 (2009), páginas 2365-2379 (citado en página 594).
- [44] VERA, Carolina y SILVESTRI, Gabriel. “Precipitation interannual variability in South America from the WCRP-CMIP3 multi-model dataset”. En: *Climate dynamics* 32.7-8 (2009), páginas 1003-1014. DOI: [10.1007/s00382-009-0534-7](https://doi.org/10.1007/s00382-009-0534-7) (citado en página 594).
- [45] VERA, Carolina y col. “Toward a unified view of the American monsoon systems”. En: *Journal of climate* 19.20 (2006), páginas 4977-5000 (citado en página 594).
- [46] ZIPSER, Edward J y col. “Where are the most intense thunderstorms on Earth?” En:

Bulletin of the American Meteorological So-

ciety 87.8 (2006), páginas 1057-1071 (citado en página 584).