

# El Sistema de Predicción por conjuntos para el Corto Plazo de AEMET (AEMET-SREPS): migración a la mesoescala

C. Santos<sup>(1)</sup>, A. Amo<sup>(1)</sup>, E. Abellán<sup>(2)</sup>, A. Callado<sup>(2)</sup>, P. Escribà<sup>(3)</sup>, J.A. García-Moya<sup>(1)</sup>, I. Martínez<sup>(1)</sup>, J. Simarro<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), C/ Leonardo Prieto Castro, 8, 28040 Madrid, csantosb@aemet.es, mamob@aemet.es

<sup>(2)</sup> D.T. AEMET en Cataluña, Arquitecte Sert, 1, 08005 Barcelona, eabellanv@aemet.es, acalladop@aemet.es

<sup>(3)</sup> European Center for Medium Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading RG2 9AX, UK, pescribaa@aemet.es

<sup>(4)</sup> D.T. AEMET en la Comunidad Valenciana, C/Botánico Cavanilles, 3, 46010 Valencia, jsimarro@aemet.es

## Resumen

El Sistema de Predicción por Conjuntos para el Corto Plazo desarrollado en la AEMET (AEMET-SREPS), pionero en Europa como multi-modelo en la predicción probabilística con modelos de área limitada (Limited Area Models, LAM), pasa a una fase de transición a la mesoescala gamma. Se revisa en este artículo tanto su historia, aplicaciones y logros como su configuración actual, perspectiva y líneas de investigación.

## 1. Introducción

La predicción probabilística es una herramienta fundamental para la predicción operativa en los servicios meteorológicos. En el corto plazo (D+1, D+2), AEMET es pionera en el desarrollo y ejecución diaria experimental de un Sistema de Predicción por Conjuntos (Ensemble Prediction System o EPS), para el Corto Plazo (Short Range EPS o SREPS), complementando así en el abanico temporal al EPS del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (European Center for Medium-range Weather Forecasts o ECMWF, de D+3 a D+9) como herramienta probabilística en la predicción operativa. La modelización numérica del tiempo se adentra ya en la Mesoescala (modelos con grid kilométrico), tanto modelos como ensembles. Con reconocido prestigio en la escala sinóptica, se aproxima el momento en el AEMET-SREPS de dar el salto a la escala Meso-Gamma, siendo necesario por ello explorar las técnicas de diseño en el estado del arte de la predicción probabilística. Para una introducción didáctica a los sistemas de predicción por conjuntos, referimos al lector a García-Moya et al. (2007) o Callado et al. (2012).

## 2. El AEMET-SREPS

### 2.1 Historia

Desde su concepción en 2002 el AEMET-SREPS (también referido como SREPS en este artículo) ha sufrido, como todo sistema de gran envergadura, multitud de vicisitudes, no todas ellas técnicas. Con idea original de Bartolomé Orfila, el motor del grupo ha sido José Antonio García-Moya hasta 2011, y a partir de entonces Carlos Santos. Han participado activamente Carlos Santos, Alfons Callado, Daniel Santos, Pau Escribà, Juan Simarro, y más recientemente Jesús Montero, Isabel Martínez, Arancha Amo, Esteban Abellán y Juan Manuel

Sancho. Se muestran aquí en forma de cronograma esquemático los hitos técnicos principales.

2002: Se decide en AEMET (INM entonces) formar un Grupo de Predecibilidad para la investigación y desarrollo en predicción probabilística y EPS para el corto plazo (SREPS).

2002-2004: Se evalúan diferentes técnicas (sin referencias por brevedad, pueden encontrarse más detalles en las diferentes secciones): *singular vectors*, *bred vectors*, *SLAF*, *multi-física*, *multi-análisis*, *multi-modelo*. Se introduce el modelo HIRLAM, se instalan e introducen los modelos externos HRM, MM5 y UM. Se modifican los anteriores modelos locales para poder usar, además del habitual ECMWF, los modelos globales GME, UKMO y GFS como condiciones iniciales (inicial conditions ICs) y de contorno (lateral boundary conditions LBCs).

Jun 2004: Decisión final en diseño e inicio de la construcción del sistema multi-modelo multi-análisis.

Jun 2005: Inicio de la pasada diaria 00UTC en fase test, 16 miembros.

Sep 2005: Inicio del archivo masivo permanente.

Nov 2005: Presentación "europea" del sistema en el ECMWF, Workshop on Operating Systems.

Mar 2006: Pasada diaria experimental 00UTC estable, 16 miembros.

Abr 2006: Inclusión del modelo LM (COSMO), 20 miembros.

May 2006: Inclusión de pasada 12UTC.

Jul 2006: Inclusión de verificación objetiva contra observaciones.

Jun 2006: Dos pasadas diarias (00 y 12UTC) experimental estable, 20 miembros.

Sep 2006: Inicio de tests Time-Lagged Super-ensemble (40 miembros).

Sep 2006: Presentación del sistema en Universidad de Maryland, Eugenia Kalnay.

Oct 2006: Inicio de test calibración BMA.  
 Ene 2007: Presentación de resultados en el ECMWF, Workshop on Verification Methods.  
 Ene 2007: Inicio experimental de distribución externa de productos.  
 Nov 2009: Inclusión de CMC (MSC Canadá) como condición inicial y de contorno, 25 miembros.  
 Nov 2010: Inclusión de GSM (JMA Japón) como condición inicial y de contorno, reemplazando a UM (UKMO), 25 miembros.  
 Ene 2011: Dos pasadas diarias (00 y 12UTC) experimental estable, 25 miembros.  
 Ene 2011: Publicación del sistema en Tellus A, prestigio internacional reconocido.  
 Oct 2011: Se deja de correr MM5 como LAM, por re-estructuración de recursos en la máquina CRAY X1e; 20 miembros.

## 2.2 Configuración actual

El actual AEMET-SREPS es un sistema multi-modelo, multi-análisis y multi-contorno, basado en la integración de 4 modelos de área limitada diferentes forzados cada uno con las predicciones de 5 modelos globales distintos (Tabla 1). La Figura 1 muestra los diferentes dominios de integración y el dominio común para post-proceso y verificación del sistema.

Fig. 1.- Dominios de integración y verificación

La Figura 2 muestra el grid de post-proceso y verificación. Las salidas de los distintos modelos se interpolan a este grid común de resolución horizontal 0.25°, unos 25 km en nuestras latitudes.

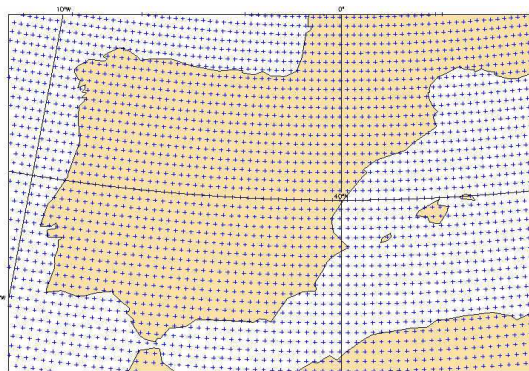


Fig. 2.- Grid: 0.25°, aproximadamente 25 km

La Figura 3 muestra en forma de tabla gráfica los modelos LAM que se corren diariamente en el superordenador de AEMET CRAY X1e (el modelo MM5 se dejó de correr en Octubre de 2011, coincidiendo con necesidades extra de recursos para un experimento de nowcasting). En la Figura 3 los modelos LAM integrados se muestran en filas y los modelos globales (General Circulation Models o

GCM) usados como condiciones iniciales y de contorno se muestran en columnas.

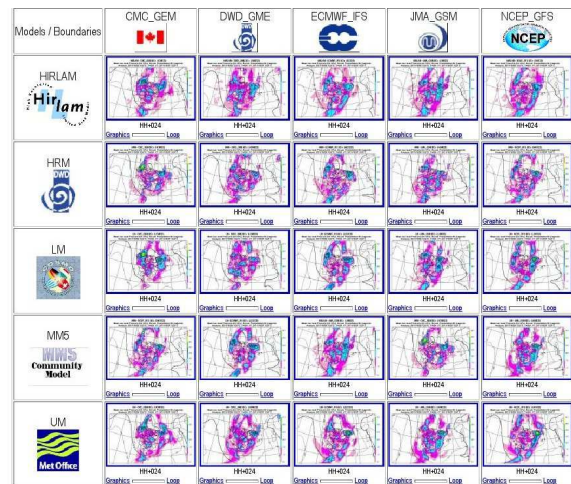


Fig. 3.- Modelos LAM integrados (filas) y modelos GCM como condiciones iniciales y de contorno (columnas)

La Tabla 1 muestra de forma compacta la configuración actual del sistema, incluyendo algún ingrediente modificado recientemente.

Análisis y c. contorno	CMC (MSC), GFS (NCEP), GME (DWD), GSM (JMA), IFS (ECMWF)
Modelos	HIRLAM (HIRLAM), HRM (DWD), LM (COSMO), [MM5], UM (UKMO)
Miembros	5-5=25 (hasta Oct 2011), 5-4=20
Dominio	Atlántico N, Europa, África N
Resolución	0.25° (Grid común de post-proceso y verificación)
Pasadas	00 y 12 UTC, T+72
Máquinas	CRAY X1e + Blade Frame Linux
Post-proceso y verificación	Verificación objetiva contra análisis y observaciones (SYNOP, TEMP, redes climatológicas de alta densidad)

Tabla 1.- Configuración actual del AEMET-SREPS

Como ya se dicho, el actual AEMET-SREPS es un sistema multi-modelo, multi-análisis y multi-contorno. Con ello se pretende muestrear las incertidumbres procedentes de los errores de los modelos, las condiciones iniciales y las condiciones de contorno, respectivamente. Para la puesta en marcha del sistema, se requirió un trabajo previo de ajuste fino de los diferentes miembros. En la Figura 4 se muestra como ejemplo la evolución con respecto al alcance de la predicción del error medio (BIAS) y el error cuadrático medio (su raíz cuadrada, RMSE) de la predicción de los distintos miembros en un periodo de 3 meses una vez el sistema ha llegado a su puesta a punto.

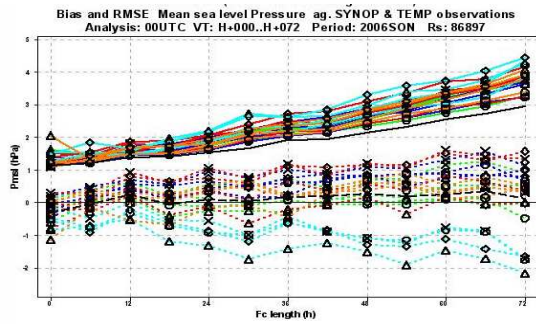


Fig. 4.- Ajuste fino de los miembros: BIAS y RMSE

### 2.3 Verificación objetiva

La calidad del sistema ha sido contrastada cuantitativamente en diversos ejercicios de verificación, demostrando su calidad y su valor. La Figura 5 muestra el “valor añadido” probabilístico de SREPS con respecto al HIRLAM sinóptico operativo en AEMET (llamado ONR). Se muestra una serie temporal del Brier Skill Score (BSS, Wilks, 2011) para Probabilidad de viento superior a 10 m/s. SREPS (azul) muestra un BSS significativamente más alto que ONR (verde). Las líneas más finas son componentes del BSS orientadas negativamente (mejor cuanto más pequeñas).

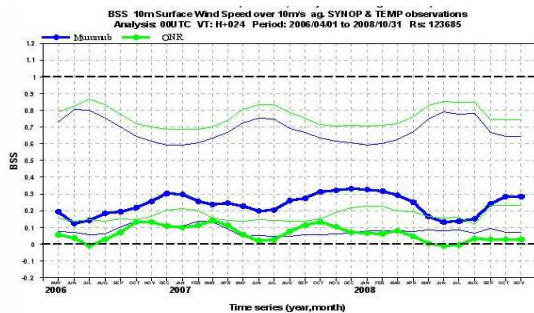


Figura 5.- Verificación comparativa con HIRLAM. Serie temporal BSS de AEMET-SREPS (azul) comparado con HIRLAM ONR (verde) para probabilidades de viento superiores a 10 m/s (ver texto)

SREPS ha demostrado también superar en calidad al EPS del ECMWF en el intervalo temporal donde debe aportar su valor: el corto plazo. En la Figura 6 pueden verse series temporales de BSS para SREPS (rojo) y el EPS del ECMWF (azul 51 miembros, verde 21 miembros) para probabilidades de precipitación por encima de 1 mm. SREPS muestra diferencias significativas, especialmente en las estaciones donde la representación de la convección mediterránea puede ser importante. En estos casos el papel de la mayor resolución de SREPS es crítico.

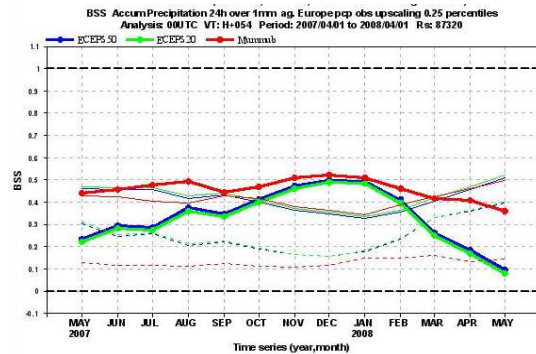


Figura 6.- Verificación comparativa con el EPS del ECMWF en el corto plazo. Serie temporal BSS de SREPS (rojo) comparado con EPS de ECMWF (azul, verde) para probabilidades de precipitación superiores a 1 mm (ver texto)

### 2.4 Casos de estudio

En numerosos casos de estudio SREPS ha revelado dar una buena señal a la hora de hacer un pronóstico de fenómenos extremos o adversos. En la Figura 7 puede verse un mosaico gráfico con ocho conocidos casos de estudio en los últimos años, en los que SREPS demostró ser una herramienta muy útil. Según aparecen en la figura, de izquierda a derecha y de arriba abajo: ciclogénesis explosiva (21 Abr 2008), lluvias intensas en Cataluña (8-10 May 2008); lluvias intensas en Sueca (23 Sep 2008), tormentas de nieve generalizadas (8-10 Ene 2009); temporales en costas Atlántica y mediterránea (24 Ene 2009), tormentas de nieve en Cataluña (8 Mar 2009); temporal en Islas Canarias (17 Feb 2010), lluvias fuertes en País Vasco y Cataluña (6 May 2012).



Figura 7.- Casos de estudio destacados (ver texto para detalles)

## 3. Aplicaciones

### 3.1 Predicción numérica y operativa en Europa

En Predicción Numérica en Europa, el Consortium for Small-scale Modeling (COSMO), liderado por el Deutscher Wetterdienst (DWD) es uno de los principales grupos europeos, y ha venido utilizando

AEMET-SREPS con diversos fines. En el sistema COSMO-SREPS (ARPA-SIM Bolonia, Figura 8), formado por 16 miembros a 10 km de resolución, con perturbaciones en algunos parámetros de la física, AEMET-SREPS se ha utilizado como condiciones iniciales y de contorno. En el sistema anidado al anterior DWD-DE-SREPS, con 16 miembros a 2.8 km y alcance de 24 horas, usando COSMO-SREPS como condiciones de contorno.

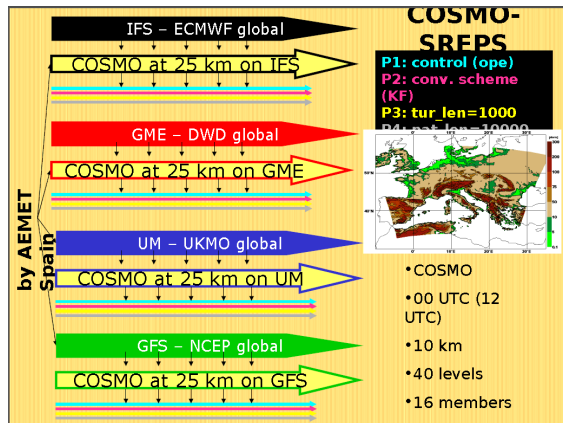


Figura 8.- COSMO-SREPS, con AEMET-SREPS como condiciones iniciales y de contorno.

En predicción operativa se utiliza AEMET-SREPS diariamente en el Centro de Predicción de la ARPA Lombardia (Servicio Meteorológico de Lombardía, REF, Figura 9), demostrando ser de importancia crítica en los fenómenos mediterráneos de convección profunda, precipitaciones intensas, etc...

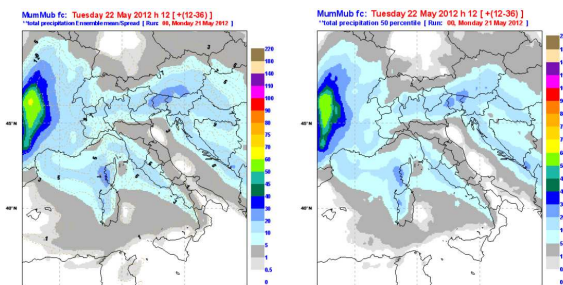


Figura 9.- AEMET-SREPS se utiliza en la predicción operativa diariamente en la ARPA de Lombardía

### 3.2 Proyectos internacionales

La integración del personal de AEMET-SREPS en proyectos internacionales de gran escala es notoria. Destacando ostensiblemente, estamos integrados en el proyecto Grand Limited Area Model Ensemble Prediction System (GLAMEPS, Iversen et al., 2011, Figura 10) desde su comienzo en 2006. Es un proyecto del consorcio HIRLAM para desarrollar un ensemble de alta resolución y ahora intentarlo en la mesoescala. Se trata de una combinación multi-modelo con perturbaciones, usando HIRLAM, ALADIN, y un subconjunto del EPS del ECMWF. Actualmente en los 10 km de resolución horizontal, se ha probado su calidad superior respecto al EPS

del ECMWF. En la actualidad se está diseñando la migración a la mesoescala gamma.

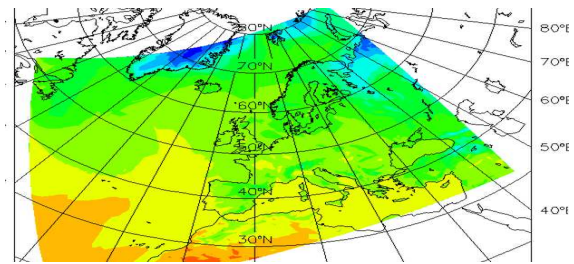


Figura 10.- Dominio de integración GLAMEPS

También hay una participación activa en el proyecto THORPEX Interactive Grand Global Ensemble - Limited Area Models (TIGGE-LAM, Bougeault et al., 2010) desde su comienzo en 2008. El proyecto TIGGE mantiene el almacenamiento en la base de datos del ECMWF Meteorological Archival and Retrieval System (MARS) de los principales GCMs del mundo para su uso potencial en predicción probabilística (principalmente usando estos GCMs como ICs y LBCs). TIGGE-LAM es una versión LAM de TIGGE.

Se ha participado en proyectos de menor envergadura y duración pero no de menor ámbito, en particular en proyectos relacionados con el viento y la industria eólica (Wind power). En 2009-2010 se participó en el proyecto "Multi-Scale data assimilation, Advanced wind modelling & Forecasting with Emphasis to extreme Weather situations for a safe large-scale wind power Integration" (SAFEWIND, Collaborative project funded by the European Commission under the 7th Framework Program, Theme 2007-2.3.2: Energy, REF). Este proyecto investigó la plausibilidad de usar ensembles de área limitada para predicción de energía eólica (Wind Power Forecasting, WPF) en una perspectiva general.

En el periodo 2003-2005 se participó en el proyecto "A High resolution Numerical wind Energy Model for On- and Offshore using ensemble predictions" (HONEYMOON), con propósitos similares a SAFEWIND.

### 3.3. Proyectos nacionales

Con la Universidad de Islas Baleares, Facultad de CC Físicas, se colabora sistemáticamente en proyectos relacionados con los sistemas de predicción por conjuntos para la previsión de fenómenos adversos en el Mediterráneo:

2011-2014 PREDIMED: Mejora de las predicciones de tiempo severo Mediterráneo por medio de observaciones adaptativas y métodos avanzados de predicción por conjuntos en el marco de los proyectos MEDEX Fase II y HyMeX (CGL2011-24458), CICYT.

2008-2011 MEDICANES: Ambientes Meteorológicos, Predecibilidad Numérica y Evaluación del Riesgo en el Clima Presente y Futuro (CGL2008-01271), CICYT.

2005-2008 ENSEMBLE: Aplicación de Técnicas de Predicción por Conjuntos a episodios meteorológicos de gran impacto en el Mediterráneo Occidental (CGL2005-05681/CLI), CICYT.

## 4. Predicción operativa y Estudios y Desarrollo en AEMET

### 4.1 Delegación Territorial (DT) en Cataluña

Según informe elaborado conjuntamente por personal de EyD y del GPV el 23-05-2012 (interno de AEMET), los productos probabilísticos derivados de AEMET-SREPS se utilizan rutinariamente en el GPV (Grupo de Predicción y Vigilancia) de la DTCAT (Delegación Territorial de AEMET en Cataluña) en las predicciones de corto plazo por la mayoría de los Predictores Operativos y por los Equipos Técnicos (tan sólo un predictor ha manifestado no utilizarlo rutinariamente).

Es de resaltar que son especialmente útiles en los avisos meteorológicos, pudiendo ser determinantes en la toma de decisión de su idoneidad, y del nivel y probabilidad de riesgo a alertar.

Se utiliza el AEMET-SREPS como herramienta complementaria a las predicciones deterministas del IFS de ECMWF y de los dos HIRLAM de 0,16° y 0.05°. Para las diferentes variables y de manera rutinaria, se dibujan tres escenarios de uso:

a) Diferencias significativas entre los productos deterministas, normalmente del ECMWF y del HIRLAM, que incluso son a veces localmente contradictorios (Ej. Campos de precipitación). En tal caso el AEMET-SREPS se utiliza directamente para determinar qué tipo de tiempo es el más probable y qué probabilidad tiene. A veces se utiliza para determinar cuál de los dos modelos deterministas se va a utilizar, si la salida de uno de ellos es bastante más probable que la del otro.

b) Diferencias poco significativas entre los productos deterministas del ECMWF y AEMET. Si AEMET-SREPS muestra poca dispersión (poca incertidumbre), asegura poder utilizar sin reparos cualesquiera de los productos deterministas.

c) Avisos meteorológicos (“meteoalerta”): los productos probabilistas de AEMET-SREPS son muy útiles y utilizados casi siempre para su elaboración. Se utilizan en la toma de decisión en tres ejes: Adecuidad e idoneidad del aviso; Nivel del aviso; y especialmente, Probabilidad del aviso.

Por otro lado, se utilizan los productos probabilistas de AEMET-SREPS para aquellos fenómenos meteorológicos más extremos y a veces adversos, que difícilmente podrían recoger los productos deterministas. Normalmente se corresponden con probabilidades bajas, que pocas veces se incluyen en

los boletines, pero que alertan a los Predictores Operativos de un fenómeno meteorológico a tener en cuenta en tareas de Vigilancia Operativa.

Se dispone de sitio web propio interno de productos meteorológicos específicos para la predicción de montaña y nivológica. En particular, SREPS-gramas (ver Figuras 11, 12) y precipitación acumulada en 24 horas (Figura 13).

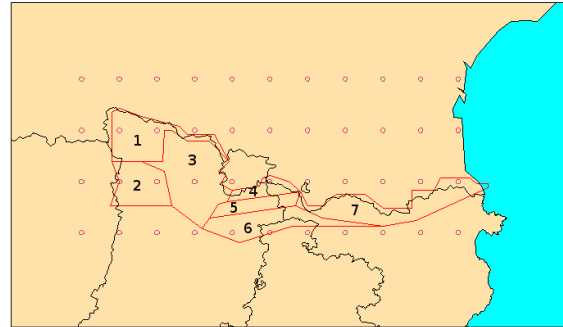


Figura 11.- Disponibilidad de SREPS-gramas para los puntos de grid del AEMET-SREPS

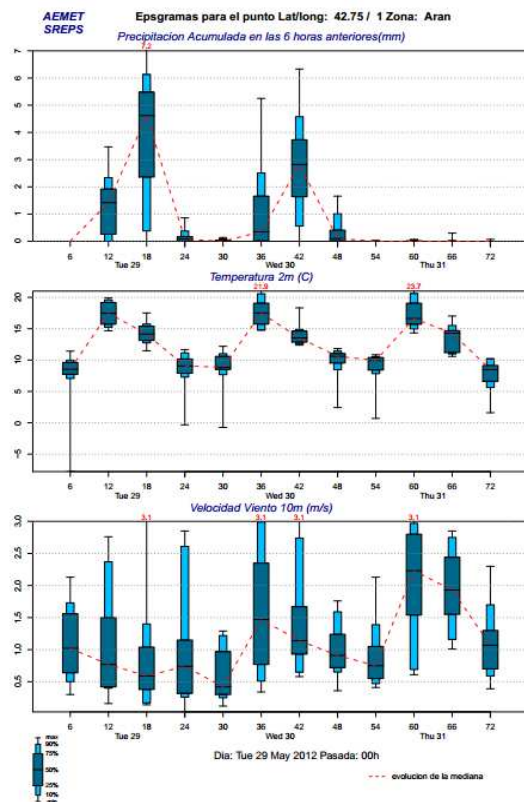


Figura 12.- SREPS-grama específico para la zona del Valle de Arán

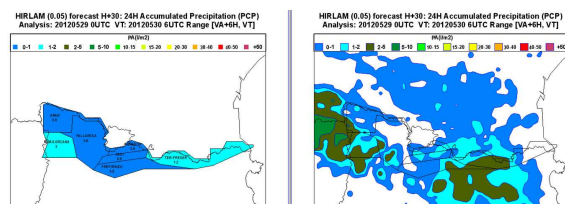


Figura 13. Precipitación Acumulada en 24 horas

Actualmente se está elaborando un sistema (basado en *python*) para el cómputo de EPSgramas en aeropuertos españoles, usando las salidas del EPS del ECMWF y del SREPS. En la Figura 13 se muestra un ejemplo de EPSgrama para la predicción de Precipitación que se complementa con una alerta y una propuesta ya codificada de aquéllos fenómenos y cambios meteorológicos que deberían consignarse en la elaboración del TAF (Terminal Aerodrome Forecast) para el aeropuerto de Barcelona.

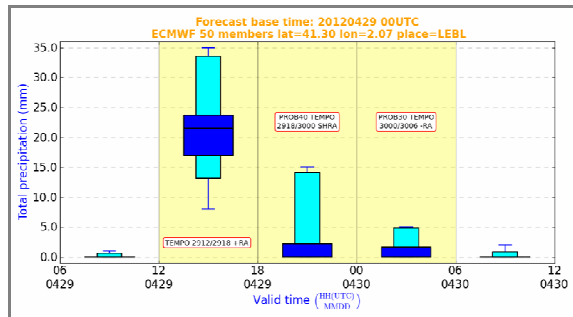


Figura 13.- EPSgrama de la predicción H+36 de precipitación para la pasada 29042012 a las 00 UTC en el aeropuerto de Barcelona. Se computa usando el EPS del ECMWF y se añade información de soporte para la elaboración del TAF.

#### 4.2 DT en Málaga

AEMET-SREPS es utilizado de forma esporádica por la mayoría de los predictores mientras que algunos de ellos lo usan rutinariamente y de forma intensiva. En el Equipo Técnico del GPV se reconoce como una herramienta muy útil por parte de los meteorólogos y se utiliza para el estudio de situaciones de tiempo severo. Pueden destacarse 3 ejemplos recientes:

(i) El estudio de la situación de lluvias torrenciales en Aguilar de la Frontera del 16 de agosto de 2010. Este trabajo está publicado como Nota Técnica y hace uso de SREPS (¿???pag. 87, Figura 15 aquí).

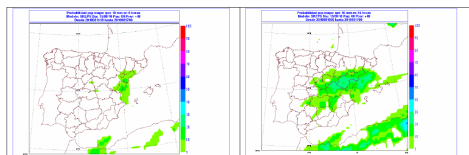


Figura V.1.2. Probabilidad de precipitación superior a 1, 5 y 10 mm prevista por el modelo SREPS del día 15 de agosto a las 00 UTC para los periodos 18 a 24 UTC (columna de la izquierda) y 00 a 24 UTC (columna de la derecha) del día 16 de agosto.

Figura 15.- Estudio de la situación de lluvias torrenciales en Aguilar de la Frontera del 16 de agosto de 2010

(ii) Situación de vientos intensos descendentes en la costa malagueña durante el 4 de febrero de 2012. En el Apartado 2.1.2 se indica la utilidad de SREPS (Figura 16).

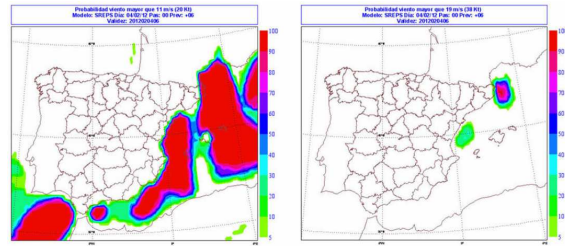


Figura 16.- Uso de SREPS en la DT Málaga en la situación de vientos intensos descendentes en la costa malagueña durante el 4 de febrero de 2012.

(iii) Informe del Área de Técnicas de Análisis y Predicción de AEMET (ATAP) sobre NoSWEx (ver sección 4.4) 17 Octubre – 11 Noviembre 2011 de Ana Genovés et al. (interno de AEMET). En este informe participaron miembros del Equipo Técnico del GPV de Málaga. Durante el experimento se utilizó SREPS de forma intensiva en Málaga.

#### 4.3 DT en Valencia

AEMET-SREPS no se utiliza de forma sistemática aunque ha permitido la detección de algunos fenómenos adversos, como es de esperar, especialmente aquellos fenómenos relacionados con convección mediterránea y precipitaciones extremas. Es de destacar el estudio de convección estacionaria (Simarro and Nuñez, 2008, Figura 17). Se seleccionó una serie de casos poco comunes de convección estacionaria en los que tenían lugar inundaciones en áreas relativamente pequeñas en la Comunidad Valenciana. Estas situaciones son potencialmente peligrosas aunque no sean extremas, dado que el núcleo convectivo se desplaza poco o nada y puede descargar mucha cantidad de agua. La utilidad de AEMET-SREPS en estos casos es notoria.

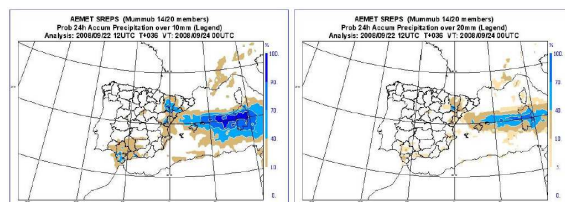


Figura 17.- Estudio de convección estacionaria (Simarro and Nuñez, 2008) donde se utiliza AEMET-SREPS.

#### 4.4 DT en Islas Baleares: Sistema automático de detección de ciclones mediterráneos

En la Unidad de Estudios Meteorológicos del Mediterráneo se hizo una adaptación del ya existente método de detección y seguimiento de ciclones mediterráneos para usar las salidas del AEMET-SREPS y dar información probabilística relativa a los ciclones (Genovés et al., 2007, 2008 y 2010, Picornell et al. 2007). En sitio web interno de AEMET se dispone diariamente de algunos resultados (e.g. mapas probabilísticos de trayectorias de ciclones) de forma operativa. Como muestra, en la Figura 18 podemos ver un mapa de “Forward

strike probability” (relacionado con la probabilidad de tránsito de ciclón). Resumidamente, con los miembros del ensemble se calculan las trayectorias posibles de los ciclones, y la densidad de probabilidad de presencia o paso de ciclón, que se refleja en una escala de colores.

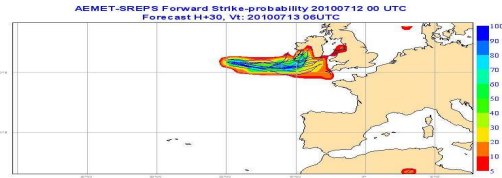


Figura 18.- Detección y seguimiento probabilístico de ciclones con AEMET-SREPS (ver texto).

#### 4.5 Área de Técnicas de Análisis y Predicción (ATAP)

Según el informe del experimento de nowcasting de AEMET, Nowcasting of Severe Weather Experiment (NoSWEx) 17 Octubre – 11 Noviembre 2011 de Ana Genovés et al. (informe interno de AEMET) los ensembles se utilizaron en la gran escala: “Por una parte, la utilización de Sistemas de Predicción por Conjuntos ha permitido la detección y el seguimiento sistemático de las incertidumbres del flujo de gran escala hasta tres días (H+72)” Por falta de personal se ha dedicado poca atención al sistema, aunque el ATAP mantiene una página intranet en AEMET dedicada al AEMET-SREPS (Figura 19).

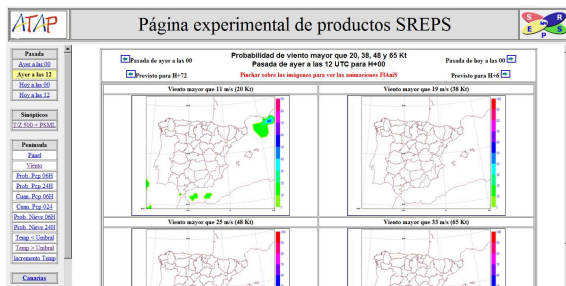


Figura 19.- Página intranet de ATAP dedicada a AEMET-SREPS

En informe del ATAP del 7 de Mayo de 2012 sobre AEMET-SREPS (informe interno de AEMET) se comenta que “cuando la situación estaba bien conducida sinópticamente las salidas eran utilizadas para cuantificar la incertidumbre de los fenómenos adversos que siempre iban acompañadas con probabilidades bajas. En otras condiciones donde los fenómenos eran conducidos por la mesoescala y orografía, y la resolución de los modelos era básica, los resultados fueron menos esperanzadores”.

Se han desarrollado casos de estudio:

(i) Nevadas en la zona Centro; (ii) Vientos fuertes y lluvias intensas en Canarias en febrero de 2010 (Figura 20); (iii) Caso de estudio de lluvias torrenciales en Aguilar de la Frontera en Córdoba, en agosto de 2011 (coordinado desde la DTAND-

Málaga); (iv) Caso de estudio en 2012 relativo a vientos fuertes en Málaga.

En el Laboratorio de Predicción (LP) del ATAP también tuvo cabida SREPS; según se comenta en su informe (sic): “En algunos LPs que realizan en el ATAP, dentro de las labores de actualización y normalización de los conocimientos, metodologías, herramientas, y técnicas de predicción que se han realizado con los predictores a turnos del CNP, se han dado y se dará se ha enfatizado el uso del SREPS en cuantificar las incertidumbres a corto plazo, sobre todo en fenómenos adversos relacionados con fenómenos adversos [...] En este sentido las temperaturas, viento, precipitación y nevadas son de especial interés para su predicción y se iba a considerar el uso del SREPS como uno de las herramientas a analizar dentro de la cadena de predicción experimental que se iba a simular en el LP”.

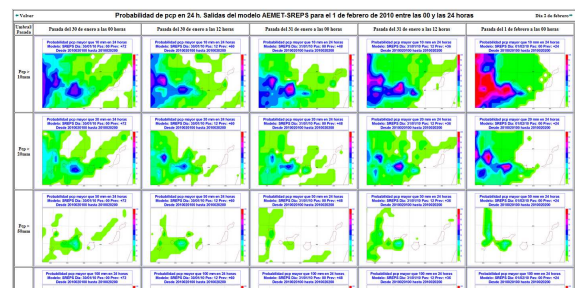


Figura 20.- Caso de estudio de fuertes precipitaciones en Canarias en el que se usó AEMET-SREPS en el ATAP

También se incluye en el mismo informe que “En el plan de modernización de la Predicción y Producción de AEMET se contempla la implantación del sistema NinJo en las estaciones de trabajo operativas. Estas estaciones admitirán como datos de entrada gribs de modelo probabilísticos tipo EPS y SREPS. En este sentido, se han dado los primeros pasos para las pruebas de ingestión, visualización y tratamiento de la información de las salidas del SREPS”.

En el mismo informe del ATAP, finalmente se afirma: “No existe un proyecto oficial ni persona dedicada a mantener o mejorar la página y productos del SREPS en el ATAP desde que el meteorólogo A... se marcha en febrero de 2011, aunque dicha página sigue activa y de forma experimental. Desconocemos si dicha página se utiliza o no en los entornos operativos dentro del SNP” (o dicho con otras palabras, ¿hay vida en otros planetas?).

### 5. Transición a la mesoescala: AEMET-γ-SREPS:

#### 5.1 Estrategia para la transición a la mesoescala gamma

Los modelos de mesoescala son ya una realidad. Ahora bien, la predecibilidad en escalas kilométricas puede plantear una serie de problemas cualitativa y cuantitativamente distintos a la experiencia en modelos de otras escalas superiores (Callado et al., 2012). En AEMET-SREPS se intentará dar un salto desde los 25 km hasta los 4 km directamente o quizá a los 2.5 km, sin pasar por un posible intermedio de unos 10 km que retrasaría el proyecto. Dado que hablamos de mesoescala gamma el proyecto se ha venido a llamar AEMET- $\gamma$ -SREPS.

Dentro de un marco europeo y por la convergencia de intereses y esfuerzos, la fase de investigación actual está en buena parte integrada en el proyecto Grand Limited Area Model EPS (GLAMEPS, Iversen et al., 2011) del consorcio HIRLAM/ALADIN. Se desarrolla mediante experimentos en las plataformas del ECMWF utilizando HARMONIE, donde se están evaluando diferentes técnicas para su posible adecuación a los ensembles en escala kilométrica (~2 km de resolución). Aunque AEMET tendrá su propia *suite*, las líneas de investigación son convergentes:

- Perturbación de las parametrizaciones del modelo con un esquema de Parametrización Estocástica (ver sección 5.2).
- Perturbación de las condiciones iniciales con un esquema de asimilación de datos de la familia “Kalman Filters” o “Filtros de Kalman” (ver sección 5.3).
- Perturbación de las condiciones de contorno laterales (LBCs, ver sección 5.4).
- Multi-modelo.
- Calibración: Regresión Logística Extendida (sección 5.5).
- Verificación: Métodos espaciales orientados a características, incorporación de observaciones de alta resolución (sección 5.6)..
- Aplicaciones específicas: diseño de software para EPS-gramas aeronáuticos (sección 5.7).
- Envoltura *python* para toda la suite.
- Monitorización de la *suite* mediante *ecflow*.

Así mismo, la asimilación de observaciones características de la mesoescala es fundamental para integraciones “Cloud-Resolving” o “Cloud-Permitting” (Ducrocq et al., 2002). En sistemas experimentales de este tipo se asimilan radio-sondeos, perfiladores de viento, GPS, boyas, barcos, aviones, diferentes datos de satélite de distintos tipos y por último, reflectividad y viento Doppler del radar.

La puesta en operación de un sistema de este estilo a escala kilométrica está sujeta a la disponibilidad en AEMET de los recursos de supercomputación imprescindibles para operar en tiempo real. Puede optarse también por correr el sistema en las plataformas de supercomputación disponibles en el ECMWF.

## 5.2 Parametrizaciones estocásticas

Los procesos que, por su escala, un modelo numérico resuelve se llaman dinámicos o de rejilla, mientras que los no resueltos se llaman procesos sub-rejilla o simplemente *física* del modelo (e.g. Turbulencia, condensación, etc.) y suelen parametrizarse: se computan “dentro” de cada celda y aportan una tendencia al modelo. Una técnica puntera para tener en cuenta las incertidumbres y errores de los modelos numéricos de predicción del tiempo en el entorno de los ensembles es conocida como “Stochastic Perturbed Parameterization Tendencies” (SPPT, Buizza et al. 1999; Palmer et al.): se aplica ruido multiplicativo a la tendencia de cada variable en los procesos de sub-rejilla o parametrizados de manera diferente en cada uno de los miembros del EPS según la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_x \square K_x \square P_x \square \square P_x \quad (1)$$

$$P_x \square \square P_x = \square \square r \square P_x = P_x \square r P_x$$

Donde  $\delta P_x$  es el término adicional de la SPPT en las ecuaciones de pronóstico dinámicas, representando  $P$  las tendencias de las Parametrizaciones Físicas, y  $r$  el término aleatorio o estocástico.

En este proceso deben tenerse en cuenta las correlaciones espaciales y temporales a través de  $r$ . Es decir, su valor no es independiente ni entre puntos de rejilla contiguos ni en pasos de tiempo consecutivos.

También se debe perturbar estocásticamente en la *intensidad* adecuada de la incertidumbre *real* de las Parametrizaciones Físicas. En la Fig. 21 se muestran las incertidumbres correspondientes a las Parametrizaciones Físicas del modelo del ECMWF a baja resolución respecto al mismo modelo a alta resolución. Así por ejemplo, la línea negra muestra la incertidumbre de las Parametrizaciones Físicas en su conjunto y la línea discontinua azul la intensidad con la que se intenta tener en cuenta esa incertidumbre con la SPPT en el EPS operativo del ECMWF.



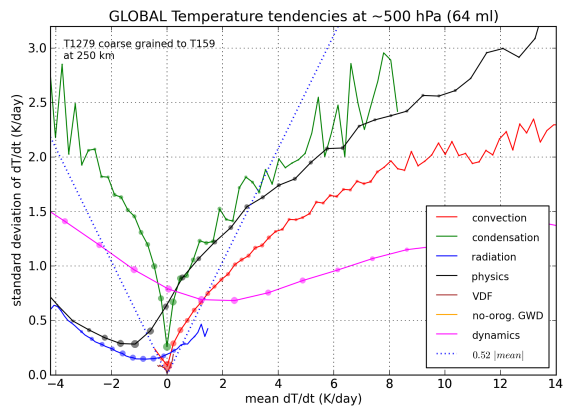


Fig. 21.- Incertidumbre de las Parametrizaciones Físicas o procesos de sub-rejilla en el modelo del ECMWF (ver texto). Resultados obtenidos con la técnica de “coarse training” e.g. Shutts y Callado (2011).

### 5.3 Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF)

El LETKF (Hunt et al., 2007) es un método para la computación del análisis (estado óptimo atmosférico dada una predicción previa a corto plazo y las observaciones disponibles en un cierto instante) y de su error. Este método pertenece a la familia de los Ensemble Kalman Filters (EnKF). A diferencia de los métodos variacionales (4DVAR), los EnKF estiman la covarianza de los errores del background (B) a partir de una predicción por conjuntos a corto plazo, con lo que consiguen una estimación de B dependiente del flujo y al mismo tiempo se evitan la necesidad de codificar el Modelo tangente lineal (métodos variacionales). La principal desventaja es que el rango de la matriz B es significativamente menor que los grados de libertad del sistema dinámico atmosférico.

En el caso del LETKF, se añade el concepto de “localización”, que permite realizar un análisis independiente en cada punto de rejilla, con lo que se consigue que el método aumente considerablemente su eficiencia computacional en plataformas multiprocesador y que el rango de B incremente. Para más detalles del método se refiere al lector a Hunt et al. (2007).

Además del análisis, el LETKF estima el error del mismo y genera de una manera directa un conjunto de análisis igualmente probables que muestrean el error inicial. Este conjunto de análisis puede usarse como condiciones iniciales para una predicción por conjuntos. Este es el método que el AEMET- $\gamma$ -SREPS va a usar como primera prioridad para el muestreo del error del estado inicial.

En la Figura 22 se muestra la comparación de dos series temporales del error (RMSE) del análisis y del background de presión al nivel del mar de un experimento LETKF con el modelo IFS del ECMWF. Como es de esperar, el análisis tiene sistemáticamente menos error que el background, lo que significa que el LETKF es un método útil para

la generación del análisis y para la estimación de su error.

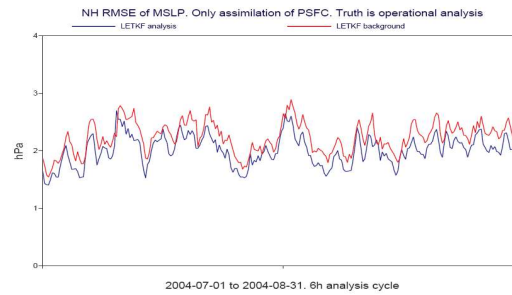


Fig. 22.- Series temporales de RMSE de Presión a nivel del mar del análisis (azul) y el background (rojo) de un experimento LETKF en el que solamente se han asimilado observaciones de Presión en superficie. Se toma el análisis operativo (con todas las observaciones asimiladas) como “realidad”. El índice de verificación está promediado sobre todo el hemisferio norte.

### 5.4 Perturbación de las condiciones de contorno laterales

Los modelos regionales o de área limitada (LAM) requieren condiciones de contorno laterales (LBCs) que provienen usualmente de modelos globales (GCMs). Estudios previos sobre modelización en área local han demostrado que las LBCs afectan a las soluciones en todo el dominio.

Es necesario el muestreo de todas las posibles LBCs plausibles en este contexto con el fin de mejorar la predicción. La predecibilidad en dominios de área limitada es diferente a la predecibilidad en los dominios globales puesto que errores que pueden crecer con el tiempo, pueden ser *advectados* fuera del dominio; así mismo, condiciones de contorno fiables pueden ser *advectadas* hacia el interior del dominio mejorando la predecibilidad. Por otro lado, condiciones de contorno no adecuadas pueden dar lugar a grandes errores en la predicción. En general, el tamaño del dominio y la longitud de la integración determinarán cuánto afectarán a las soluciones las condiciones de contorno. Es importante por tanto conocer el impacto de la elección de las LBCs y varios estudios abordan este asunto (e.g. Clark et al., 2008).

Este impacto se está evaluando comparando la evolución de la dispersión (*spread*) con el paso de tiempo y evaluando la relación dispersión-error (*spread-error* aunque suele denominarse *spread-skill* por abuso del lenguaje, García-Moya et al., 2011) en diferentes ensembles de modelos de predicción numérica del tiempo (NWP) que podrían ser utilizados como proveedores de LBCs. En particular, se está estudiando este balance *spread-skill* de diversos ensembles globales diseñados ad hoc para este propósito, entre los cuales podemos citar: el EPS del ECMWF y derivados suyos (e.g. clusters del algoritmo “tubing”), modelos globales seleccionados del proyecto TIGGE (Bougeault et al., 2010), modelos globales seleccionados de AEMET-

SREPS. La Figura 23 muestra ejemplos de este estudio, que incluyen la evolución del spread con el alcance, el balance spread-skill y la evolución del Continuous Ranked Probability Score (CRPS, medida de calidad probabilística, Wilks, 2011) con el alcance de la predicción.

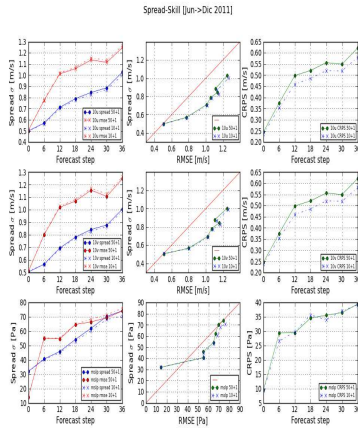


Fig. 23.- Perturbaciones en las LBCs (ver texto). En filas se muestran las componentes U y V del viento y la presión reducida al nivel del mar (MSLP), en columnas la evolución del spread con el alcance, el balance spread-skill y la evolución del CRPS con el alcance de la predicción

### 5.5 Métodos de calibración

Las técnicas avanzadas de post-proceso estadístico pueden conseguir mejorar las salidas de un modelo o un ensemble. En particular, cuando lo que queremos es optimizar la distribución de probabilidad (probability distribution function, PDF) de la predicción que nos da un ensemble, lo que hacemos es calibrar el mismo usando observaciones y predicciones pasadas, dando una mejor PDF. Con anterioridad se ha estudiado y experimentado con la calibración de ensembles basada en Promediado Bayesiano de Modelos (BMA; Raftery et al., 2005, Escriba et al., 2011). Ahora para la mesoescala se está experimentando con la técnica llamada Regresión Logística Extendida (ELR; Wilks, 2009), que parece da resultados prometedores.

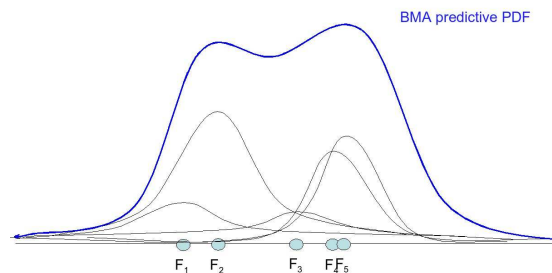


Fig. 24.- Ilustración de la PDF mejorada obtenida con el método BMA de calibración a partir de 5 predicciones (ver texto).

### 5.6 Métodos de verificación

Para la Verificación de modelos y ensembles la migración a la mesoescala es un desafío no menos difícil que para la modelización, alcanzando también un punto crítico (Casati et al., 2008), con dificultades debido a las escalas espaciales de modelos y observaciones (e.g. problema de la doble penalización, Davis et al., 2006). Métodos desarrollados recientemente ofrecen nuevas perspectivas y acercan la verificación objetiva a la subjetiva, al trabajar con patrones y estructuras espaciales (Ahijevych et al 2009, Gilleland et al 2009). Como caso particular de la familia llamada "verificación orientada a características" (Davis et al., 2006), el método Structure-Amplitude-Location SAL (Wernli et al., 2008) proporciona información detallada y cuantitativa de diferentes aspectos de la llamada Predicción Cuantitativa de Precipitación (Quantitative Precipitation Forecast, QPF), siendo por tanto un método complementario para contrastar la calidad de modelos de alta resolución, penalizados usualmente por los métodos clásicos. De este modo SAL puede ayudar en la evaluación de modelos en desarrollo y predicción de un modo "diagnóstico", parecido a la verificación subjetiva. Otro método de la misma familia llamado MODE (Davis et al., 2009) es directamente aplicable de forma natural para ensembles, por lo que es el siguiente paso a seguir en esta línea de investigación. En ese contexto se están investigando métodos de verificación que aborden los patrones espaciales explícitamente, en particular SAL, probado con éxito para comparar HIRLAM y HARMONIE con ECMWF (ver Amo et al., 2012 para más detalles) o MODE, más adecuado para ensembles.

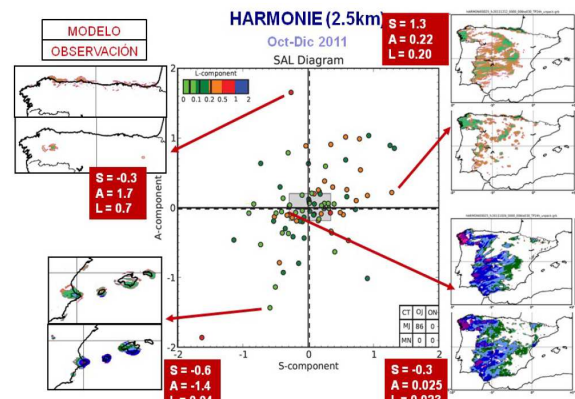


Fig. 25.- Método SAL de verificación (ver texto). Cada puntito del diagrama corresponde a una comparación modelo-observación.

Las observaciones de alta resolución pasan a ser cruciales, no sólo para la asimilación de datos, sino también para la verificación (Ducrocq et al., 2002). El uso de observaciones de muy alta resolución, como productos de radar o de satélite está así mismo en investigación; en este contexto el control de calidad presenta dificultades adicionales y también

es crucial. Se utilizan métodos de up-scaling (Cherubini et al., 2002) con software propio.

No pueden olvidarse los casos de estudio que forman parte siempre de un buen contraste de calidad de modelos o ensembles (siempre y cuando vayan acompañados de un contraste objetivo, que aunque no suele hacerse es aconsejable). Para la mesoescala se tornan especialmente importantes los casos de estudio relacionados con fenómenos convectivos intensos.

### **5.7 Aplicaciones específicas: fenómenos adversos y aeronáutica**

La dificultad inherente en la predicción de episodios convectivos asociados a la mesoescala y el impacto social de estos fenómenos adversos hace de un ensemble de mesoescala una herramienta con un tremendo potencial.

Por otro lado, se está avanzando en la aplicación de los EPS a la Meteorología Aeronáutica: Basado en una interacción dinámica con los GPV para evaluar sus necesidades, van a generarse EPS-gramas, predefinidos y dinámicos, en aeropuertos (ver sección 4.1).

## **6. Publicaciones**

Se destacan aquí las publicaciones más recientes y relevantes del así llamado Grupo de Predecibilidad:

En Callado et al. (2012) se aborda de forma exhaustiva la teoría y práctica de los EPS desde un punto de vista general. En García-Moya et al. (2011) se hace una revisión completa del sistema AEMET-SREPS y sus resultados a través de los años en la comunidad internacional de Predicción Numérica, incluyendo su comparación y valor añadido con el EPS del ECMWF. En Iversen et al. (2011) se describe el sistema GLAMEPS, proyecto convergente e incidente con AEMET-SREPS y en el que se colabora desde 2006 (ver secciones 3.2 y 5.1). El potencial impacto del error de las observaciones en la verificación probabilística se estudia en Santos y Ghelli (2011). En Simarro y Nuñez (2010) se usa el sistema para un caso de convección estacionaria en la Comunidad Valenciana. En Callado et al. (2011) se evalúa la calidad de las predicciones de precipitación del sistema en el Mediterráneo y en Escriba et al. (2011) se compara el sistema con y sin calibración bayesiana para un fenómeno adverso de viento en Cataluña.

## **7. Conclusiones**

AEMET ha sido pionera en Europa en el desarrollo de un Sistema de Predicción por Conjuntos para el Corto Plazo basado en técnicas multi-modelo, multi-análisis y multi-contorno (AEMET-SREPS). El sistema ha tenido un rotundo éxito, demostrado en los ejercicios de verificación objetiva, en los casos

de estudio y en su uso en la predicción operativa. Su éxito en Europa, especialmente en el ámbito mediterráneo, es patente, destacando el uso que hacen del mismo el consorcio COSMO y la ARPA de Lombardía. La participación en proyectos europeos de gran escala es notable, incluyendo SAFEWIND, HONEYMOON y sobre todo GLAMEPS de HIRLAM. Debido a la escasez de recursos en el ATAP, su implantación en la predicción operativa en AEMET se ha visto seriamente limitada circunstancialmente. Los GPVs mediterráneos (Barcelona, Valencia, Málaga, Baleares) utilizan el sistema rutinariamente en mayor o menor medida. Con el desarrollo de los modelos deterministas a escala convectiva, el AEMET-SREPS entra en fase de migración a la mesoescala gamma, con lo que el sistema será renombrado AEMET- $\gamma$ -SREPS. Dados los problemas específicos de predecibilidad en la mesoescala, así como la limitación computacional en el caso del aumento de la resolución, se necesitan técnicas específicas de muestreo de las incertidumbres de la predicción como SPPT, LETKF, perturbaciones en las LBCs, así como verificación "feature-based", calibración con ELR, y productos específicos como los SREPS-gramas para su posterior interpretación por parte del predictor.

## **Referencias**

- Ahijevych, D., E. Gilleland, B. G. Brown, and E. E. Ebert, 2009: Application of Spatial Verification Methods to Idealized and NWP-Gridded Precipitation Forecasts. *Weather and Forecasting*, 24, 1485, doi:10.1175/2009WAF-2222298.1.
- Bougeault P, and Coauthors. 2010. The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble. *Bulletin of the American Meteor. Soc.*, 91, 1059-1072
- Buizza, R., Miller, M, and Palmer, T.N., 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Q.J.R. Met. Soc.*, 125, 2887-2908.
- Callado, A., P. Escribà, J. A. García-Moya, J. Montero, C. Santos, D. Santos-Muñoz, and J. Simarro, 2012: Ensemble weather forecasting. *Meteorology*, InTech (in press).
- Callado, A., Santos, C., Escribà, P., Santos-Muñoz, D., Simarro, J., and García-Moya, J. A., 2011: Performance of multi-model AEMET-SREPS precipitation probabilistic forecasts over Mediterranean area, *Adv. Geosci.*, 26, 133-138, doi:10.5194/adgeo-26-133-2011,
- Casati, B., L. J. Wilson, D. B. Stephenson, P. Nurmi, A. Ghelli, M. Pocerich, U. Damrath, E. E. Ebert, B. G. Brown, and S. Mason, 2008: Forecast verification: current status and future

- directions. *Meteorological Applications*, 15, 3-18, doi:10.1002/met.52.
- Cherubini, T., A. Ghelli, and F. Lalauette, 2002: Verification of Precipitation Forecasts over the Alpine Region Using a High-Density Observing Network. *Weather and Forecasting*, 17, 238-249, doi:10.1175/1520\_0434(2002)017<0238:VOPFOT>2.0.CO;2.
- Clark, A. J., Gallus W. A. Jr. and Chen, T. 2008. Contributions of mixed physics versus perturbed initial/lateral boundary conditions to ensemble-based precipitation forecast skill. *Mon. Wea. Rev.* 136(6), 2140–2156.
- Davis, C. A., B. G. Brown, R. Bullock, and J. Halley-Gotway, 2009: The Method for Object-Based Diagnostic Evaluation (MODE) Applied to Numerical Forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. *Weather and Forecasting*, 24, 1252, doi:10.1175/2009WAF-2222241.1.
- Davis, C., B. Brown, and R. Bullock, 2006: Object-Based Verification of Precipitation Forecasts. Part I: Methodology and Application to Mesoscale Rain Areas. *Monthly Weather Review*, 134, 1772, doi:10.1175/MWR3145.1.
- Ducrocq, V., D. Ricard, J.-P. Lafore, F. Orain, 2002: Storm-Scale Numerical Rainfall Prediction for Five Precipitating Events over France: On the Importance of the Initial Humidity Field. *Wea. Forecasting*, 17, 1236–1256.
- Escribà, P., Callado, A., Santos, D., Santos, C., García-Moya, J. A., and Simarro, J., 2011: Probabilistic prediction of raw and BMA calibrated AEMET-SREPS: the 24 of January 2009 extreme wind event in Catalunya, *Adv. Geosci.*, 26, 119-124, doi:10.5194/adgeo-26-119-2010.
- García-Moya, J.A., Callado, A., Escriba, P., Santos, C., Santos-Muñoz, D. and Simarro, J. (2011): Predictability of short-range forecasting: a multimodel approach. *Tellus A*, 63: 550–563. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00506.x
- García-moya, J.-A., Callado, A., Santos, C., Santos-Muñoz, D. and Simarro, J. (2007) “El Sistema de Predicción por Conjuntos para el Corto Plazo del INM”. *Boletín de la Asociación Meteorológica Española*, 16, 22-27, Madrid, Abril 2007.
- Genovés, A., M.A. Picornell and J. Campins., 2010, Explosive cyclogenesis of 23-24 January 2009. Forecast from AEMET SREPS. EGU General Assembly 2010, Vienna (Austria) 2-7 May, 2010.
- Genovés, A., M.A. Picornell, C. Santos, J.A. García-Moya, J. Campins and A. Jansá., 2007, Extratropical cyclones tracker. First approach from the INM-SREPS. 7th Annual Meeting of the European Meteorological Society/8th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM), 1-5 October 2007, San Lorenzo del Escorial, Spain.
- Genovés, A., M.Á. Picornell, C. Santos, J. Campins y J.A. García-Moya., 2008, Predicción de ciclones extratropicales a partir del INM-SREPS. XXX Jornadas de la Asociación Española de Meteorología. Zaragoza, 5 al 7 de mayo de 2008.
- Gilleland, E., D. Ahijevych, B. G. Brown, B. Casati, and E. E. Ebert, 2009: Intercomparison of Spatial Forecast Verification Methods. *Weather and Forecasting*, 24, 1416, doi:10.1175/2009WAF2222269.1.
- Iversen, T., Deckmyn, A., Santos, C., Sattler, K., Bremnes, J. B., Feddersen, H. and Frogner, I.-L. (2011), Evaluation of ‘GLAMEPS’—a proposed multimodel EPS for short range forecasting. *Tellus A*, 63: 513–530. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00507.x
- Jolliffe, I. T. and Stephenson, D. B. 2011. *Forecast Verification: A Practitioner’s Guide in Atmospheric Science*. Wiley, New York.
- Palmer, T. N., Buizza, R., Doblas-Reyes, F., Jung, T., Leutbecher, M., Shutts, G. J., Steinheimer M., & Weisheimer, A., 2009: Stochastic parametrization and model uncertainty. ECMWF Research Department Technical Memorandum n. 598, ECMWF, Shinfield Park, Reading RG2-9AX, UK, pp. 42.
- Picornell, M.A., A. Genovés, C. Santos, J.A. García-Moya, J. Campins and A. Jansá. , 2007, Extratropical cyclone tracks forecast from the INM-SREPS. 9th EGU Plinius Conference on Mediterranean Storms, 10-13 September 2007, Varenna, Italy.
- Raftery, A. E., Balabdaoui, F., Gneiting, T. & Polakowski, M., 2005: Using Bayesian Model Averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, 133, pp. 1155-1174.
- Santos, C. and Ghelli, A., 2012, Observational probability method to assess ensemble precipitation forecasts. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 138: 209–221. doi: 10.1002/qj.895
- Shutts, G., and Callado, A., 2011: Tracking down the origin of NWP model uncertainty: coarse-graining studies. *Proceedings ECMWF Workshop on Model Uncertainty*, 20-24 June 2011.
- Simarro, J. and Nuñez, J.A., 2008 “Study of some stationary convection cases in the Valencian Community”, 6th European Conference on Severe Storms Scientific Programme.

- Wernli, H., M. Paulat, M. Hagen, and C. Frei, 2008: SAL: A Novel Quality Measure for the Verification of Quantitative Precipitation Forecasts. *Monthly Weather Review*, 136, 4470, doi:10.1175/2008MWR2415.1.
- Wilks, D. S., 2009: Extending logistic regression to provide full-probability-distribution MOS forecasts. *Meteorological Applications*, 16, pp. 361-368.
- Wilks, D .S., 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Volume 100, Third Edition (International Geophysics). Academic Press.