

AEMET- γ SREPS en operaciones

<https://doi.org/10.31978/639-19-010-0.351>

Alfons Callado Pallarés¹ (acalladop@aemet.es)
Pau Escribà Ayerbe¹ (pescribaa@aemet.es)
David Gil Oliva¹ (dgilo@aemet.es)
Marc Compte Rovirola¹ (mcompter@aemet.es)
Mauri Martínez Sánchez¹ (mmartinezs@aemet.es)
Sergi González Herrero¹ (sgonzalezh@aemet.es)
David Quintero Plaza² (dquinterop@aemet.es)
José Antonio García-Moya Zapata³ (jgarciamoyaz@aemet.es)

¹AEMET / Delegación Territorial en Cataluña

²AEMET / Delegación Territorial en Canarias

³AEMET / Departamento de Desarrollo y Aplicaciones / Área de Innovación (jubilado)

RESUMEN

En el presente trabajo se resumen las tres charlas que se han presentado en el Sexto Simposio de Predicción sobre el sistema de predicción por conjuntos de alta resolución AEMET- γ SREPS. En la primera de ellas, titulada «AEMET- γ SREPS: *Convection-permitting* LAM-EPS», se presenta el diseño básico del sistema. En la segunda charla, «El AEMET- γ SREPS en un caso de convección por convergencias en el Mediterráneo», se presenta un caso de predicción real operativa de fuertes lluvias provocadas por un sistema convectivo de mesoescala donde el AEMET- γ SREPS dio un apoyo significativo a la predicción. Finalmente, en la última charla, «La aplicación web AEMET- γ SREPS», se muestra el trabajo de creación de la página web con la que los predictores de AEMET van a poder visualizar los productos de predicción probabilística generados por el sistema.

PALABRAS CLAVE: predicción probabilística; alta resolución; fenómenos severos; convección organizada; predecibilidad; multimodelo; multicondiciones de contorno; aplicación web.

1. INTRODUCCIÓN

La predicción probabilística del tiempo se ha convertido en una herramienta básica de la predicción en los últimos años. No es posible hacer una predicción del tiempo realista con una única integración del modelo, es decir, con una predicción determinista. Para ciertos fenómenos la predecibilidad (la capacidad de predicción) se pierde en pocas horas, debido a la no linealidad de las ecuaciones que resuelven la evolución de la atmósfera y a los errores inherentes en la predicción. A este fenómeno lo llamamos caos (LORENZ, 1963). Es debido al caos que el predictor se ve obligado a cambiar su paradigma a la hora de hacer la predicción: para ciertos fenómenos como, por ejemplo, la convección organizada, existirán varios estados futuros posibles del modelo. Estos distintos estados posibles solo los podemos estimar con una predicción por conjuntos.

A la hora de escoger de qué manera construimos el conjunto de predicciones posibles nos encontramos con multitud de técnicas. De lo que se trata es de ver cómo cuantificamos los errores en la predicción de la atmósfera. Sabemos que en los modelos de predicción existen los errores en el estado inicial, los errores del propio

modelo y en el caso de los modelos de área limitada, entre los que el HARMONIE operativo de AEMET se encuentra, los errores de las condiciones de contorno. En el caso que nos ocupa, el del AEMET- γ SREPS, la técnica utilizada para construir las distintas predicciones posibles es la técnica del multimodelo conjuntamente con la de las multicondiciones de contorno.

En el caso de la predicción del tiempo en España nos encontramos que los fenómenos meteorológicos que tienen mayor impacto en la sociedad son precisamente los fenómenos severos o extremos y en particular la convección organizada. Un buen ejemplo es el caso de Sant Llorenç d'Escardassar del mes de octubre de 2018, que dejó más de 10 víctimas mortales. Otros fenómenos de impacto son los vientos fuertes en aeropuertos, las nevadas copiosas o las nieblas, que son de difícil predicción por los modelos. Todos estos fenómenos son susceptibles de ser mejor predichos usando una predicción probabilística de alta resolución.

Después de 2 años de intenso trabajo, el grupo de predecibilidad de AEMET, asentado principalmente en la Delegación Territorial de AEMET en Cataluña, ha conseguido poner operativo un sistema de predicción por conjuntos (SPC) a alta resolución (2,5 km) a 48 horas que es ejecutado dos veces al día, a la 00 y a las 12 UTC. A este sistema lo llamamos AEMET- γ SREPS. El sistema cubre toda la península ibérica (un sistema idéntico es ejecutado sobre el área de Canarias una vez al día) por lo que los beneficiarios son no solo la totalidad del Sistema Nacional de Predicción de AEMET sino cualquier otro servicio meteorológico ibérico. En este sentido en el último año hemos estado colaborando con el servicio portugués, el IPMA, para que dispongan del AEMET- γ SREPS para su predicción operativa.

Este trabajo resume las tres charlas que hizo el grupo de predecibilidad para toda la AEMET, a modo de presentación, sobre el AEMET- γ SREPS en el Simposio Nacional de Predicción celebrado en Madrid el pasado mes de septiembre de 2018. En un primer apartado se describe el diseño del sistema. Después se presenta un caso de predicción operativa de convección organizada en el Mediterráneo para mostrar cómo el AEMET- γ SREPS ayudó al predictor a tomar confianza en una predicción concreta. Finalmente se describe someramente la aplicación web en la que los predictores pueden disponer de los distintos productos para la predicción.

2. AEMET- γ SREPS: CONVECTION-PERMITTING LAM-EPS

El AEMET- γ SREPS es un SPC de 20 miembros de alta resolución a 2,5 km, no hidrostático, *convection-permitting*, multicondiciones de contorno y multimodelo. Se corre dos veces al día, a las 00 y 12 UTC, hasta dos días (48 horas), desde abril de 2016. Es el SPC heredero del clásico AEMET-SREPS (GARCÍA-MOYA *et al.*, 2011) con un diseño muy parejo y la misma finalidad: el ser la herramienta para tener en cuenta las incertidumbres en la predicción operativa de corto plazo en AEMET, cuantificando la predecibilidad.

2.1. Objetivos del AEMET- γ SREPS

El primer objetivo es predecir fenómenos meteorológicos severos e incluso extremos, tales como por ejemplo las precipitaciones copiosas en el ámbito mediterráneo que comúnmente producen inundaciones: ¡una alerta a tiempo en los «avisos meteorológicos» de AEMET puede salvar vidas y bienes!

Como fenómenos meteorológicos severos nos referimos a fenómenos que ocurren sobre todo en el ámbito mediterráneo, en los que son determinantes las evoluciones mesoescalares en su génesis y en su evolución regional, modulando los más generales forzamientos sinópticos. Así, para simular las evoluciones mesoescalares, sobre todo con inestabilidad convectiva, son imprescindibles los modelos de predicción del tiempo de alta resolución. Y dada su baja predecibilidad, no se puede acometer su predicción si no es a través de un SPC de alta resolución.

El segundo objetivo es predecir variables cotidianas de alto interés socioeconómico con alta fiabilidad y detalle. Ejemplos de esto podrían ser: temperaturas máximas y mínimas de nuestro pueblo o ciudad, viento en los aeropuertos, que condiciona la operatividad de despegues y aterrizajes; en el caso de energías renovables, viento en parques eólicos, radiación solar para parques de energía solar fotovoltaica y de concentración (térmica), en ambos casos para anticipar su producción de electricidad, etc.

2.2. Las fuentes de incertidumbre del AEMET- γ SREPS

En el diseño del AEMET- γ SREPS se tienen en cuenta las tres diferentes fuentes de incertidumbre de la siguiente manera (véanse las negritas en la figura 1):

- **Incertidumbre en las condiciones iniciales:** se utiliza la misma estrategia que en las condiciones de contorno, a esto lo llamamos multicondiciones iniciales. La incertidumbre se tiene en cuenta a través de las diferencias de los análisis que de manera independiente se han realizado en 5 centros punteros a nivel mundial. Se pretende en 2019 sustituirlo con una asimilación propia de observaciones con el método LETKF (HUNT *et al.*, 2007).
- **Incertidumbre en las condiciones de contorno:** la incertidumbre sinóptica entra a través de los cuatro bordes de los 4 modelos del γ SREPS a través de las predicciones de los 5 modelos globales deterministas: a estos lo llamamos multicondiciones de contorno:
 - a) IFS (o ECHRES) del ECMWF o Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (<https://www.ecmwf.int>).
 - b) ARPÈGE de MétéoFrance (<http://www.meteofrance.fr>).
 - c) GFS del NCEP de USA (<http://www.ncep.noaa.gov>).
 - d) GSM del JMA o del Servicio Meteorológico Japonés (<http://www.jma.go.jp>).
 - e) GEM del CMC o del Centro Meteorológico Canadiense (<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/science-technology/centres/quebec.html#cmc>).
- **Errores e incertidumbres en los modelos de predicción del tiempo:** se evalúan con la técnica multimodelo, es decir, con 4 modelos de alta resolución desarrollados independientemente. Se espera que las diferencias entre ellos contengan gran parte de las incertidumbres inherentes en ellos mismos. Los 4 modelos utilizados son:
 - a) HARMONIE-AROME del sistema compartido ALADIN-HIRLAM (BENGTSSON *et al.*, 2017).
 - b) HARMONIE-ALARO de ALADIN o *ALadin-ARome de Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International* (TERMONIA *et al.*, 2018).
 - c) WRF-ARW del NCAR o *Weather Research and Forecasting, Advanced Research WRF (NCAR) dynamical core* del National Center for Atmospheric Research (<https://ncar.ucar.edu> y <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>; SKAMAROCK *et al.*, 2008).
 - d) NMMB del NCEP o *Non-hydrostatic Multi-scale Model on a B grid* del National Centers for Environmental Prediction (<https://dtcenter.org/nems-nmmb/users/index.php>; JANJIC y GALL., 2012).

En la figura 2 podemos observar los 20 *miembros* o 20 simulaciones ligeramente diferentes, pero todas igualmente plausibles, que componen el γ SREPS. Los 20 miembros se generan al cruzar las 5 condiciones de contorno de 5 modelos globales (multicondiciones de contorno) con los 4 modelos (multimodelo): vaya, que con cada modelo se simulan 5 predicciones con cada una de las 5 condiciones de contorno.

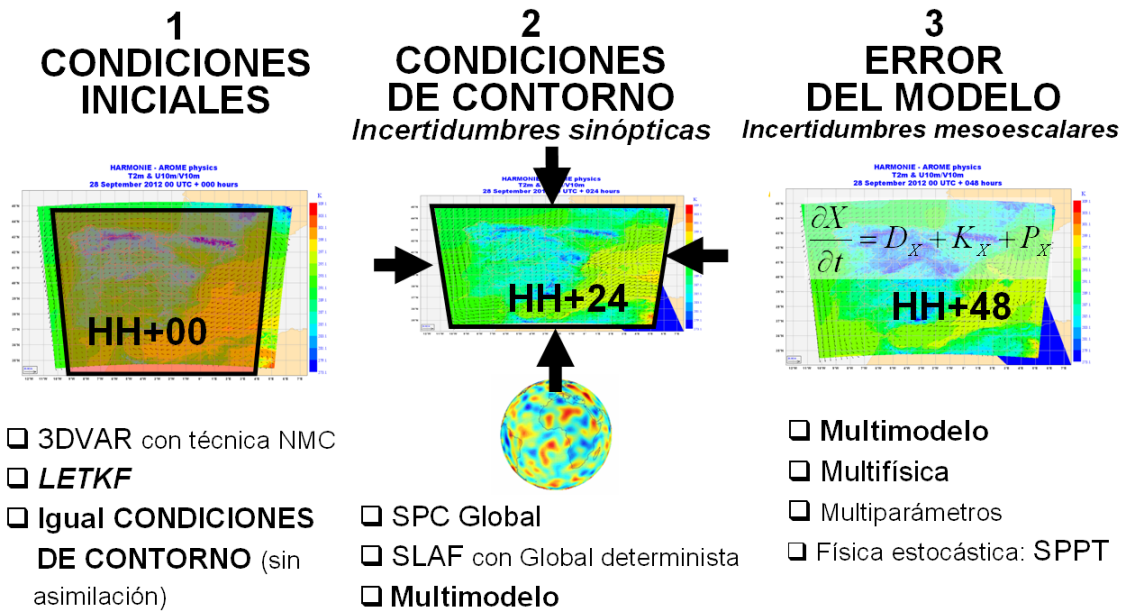


Figura 1. Esquema de las distintas fuentes de error de la predicción a alta resolución, así como varios ejemplos de técnicas propuestas para tener en cuenta este error en la predicción probabilística. En negrita las técnicas seleccionadas para construir el AEMET-γSREPS.







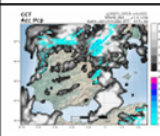
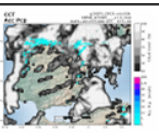
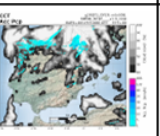
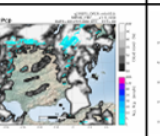
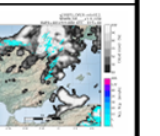

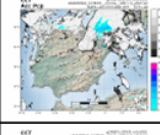
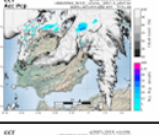
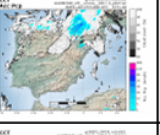
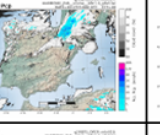
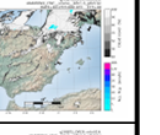

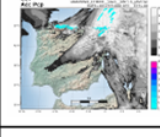
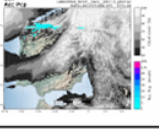
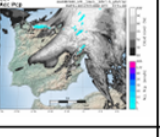
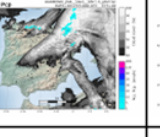
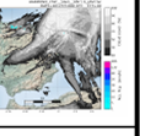

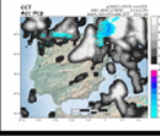
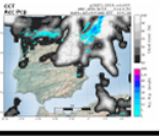
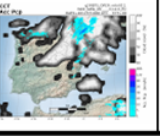
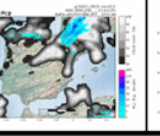
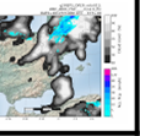
Multi-BCs	ECMWF / IFS	NCEP / GFS	MF / ARPÈGE	JMA / GSM	CMC / GEM
Multi-NWP					
HARMONIE-AROME 					
HARMONIE-ALARO 					
WRF ARW 					
NMMB 					

Figura 2. Los 20 miembros del γSREPS. Un miembro es generado con una condición de contorno de una de las 5 columnas de los 5 modelos globales más un modelo de una de las 4 filas de los 4 modelos de predicción del tiempo de alta resolución. Por ejemplo, la última celda (abajo a la derecha) es el miembro simulado por el modelo NMMB con las condiciones de contorno del CMC/GEM.

2.3. Diseño del AEMET-γSREPS

En el diseño del AEMET-γSREPS, y debido a que es multimodelo, ha imperado la premisa de correr los 4 modelos bajo las condiciones más parecidas posibles para beneficiar lo menos posible uno frente a otro y descompensar el SPC. Bajo esta filosofía, se han configurado todos los modelos de manera equiparable, por ejemplo, con rejillas horizontales (*grids* en inglés) y niveles verticales casi equivalentes.

Rejillas horizontales. Tres de los modelos, a saber, HARMONIE-AROME, ALARO y WRF-ARW tienen configurada exactamente la misma *rejilla* con la misma proyección horizontal: la conforme cónica de Lambert. El modelo NMMB tiene una rejilla de longitud-latitud regular rotada, consiguiendo tener un *grid* muy regular en latitudes medias. Ambas rejillas, como puede observarse en la figura 3, tienen una distribución muy pareja con casi exactamente el mismo número de puntos, 565×469 , con la misma separación entre ellos de 2,5 km.

Para aquellos puntillosos, se habrán dado cuenta de que en la figura 3, ¡el NMMB tiene dos puntos más de *grid*! En realidad, se pone un punto de *grid* o rejilla más alrededor del área del NMMB, y la razón de ello reside en el hecho de que toda salida del γSREPS, para todos los miembros, está codificada exactamente igual en formato GRIB1: esto incluye que todas las salidas de todos los miembros están en la misma proyección, la conforme cónica de Lambert. Pero el NMMB estaba en longitud-latitud regular rotada, entonces: ¡se debe interpolar a la Lambert! Y para interpolar bien se necesita tener siempre puntos alrededor y eso no se cumpliría en los bordes del área del NMMB sin incluir ese punto de más.

Niveles verticales. Para que la simulación en los 4 modelos de la parte más baja de la atmósfera, la capa límite atmosférica, no tenga ventajas de unos respecto a otros, se han distribuido los niveles verticales de manera equiparable con unos espesores entre ellos muy parejos: mismo número de niveles verticales hasta 850 hPa con un espesor casi equivalente. Todo ello se pone de relieve en la figura 4, donde se puede apreciar que casi no hay diferencias en las zonas sin relieve, pero sí las hay en las zonas montañosas. Estas discrepancias son insalvables debido a las distintas orografías y distintas definiciones subyacentes de los niveles verticales en los modelos.

Nótese que tanto WRF-ARW como NMMB tienen 72 niveles verticales, 7 más que los 65 de los modelos HARMONIE: AROME y ALARO. Ello es debido a que los dos primeros tienen un tope en la atmósfera que simulan a 40 hPa. ¡Los segundos no! En ese tope o tapa que se pone al modelo, o cerca de él, se pueden

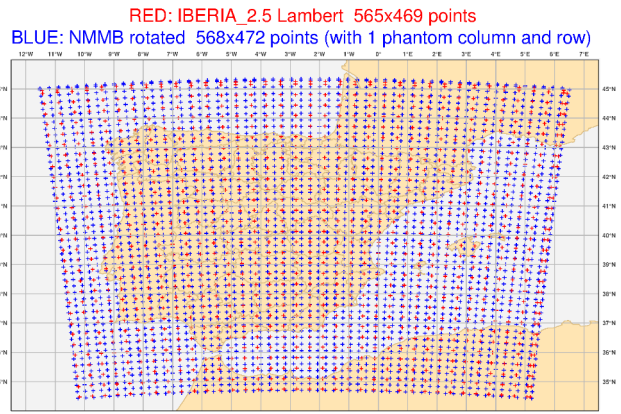


Figura 3. Rejilla o *grid* horizontal del γSREPS denominada IBERIA_2.5. En cruces rojas, la proyección conforme cónica de Lambert de los modelos HARMONIE-AROME, ALARO y WRF-ARW; y en las azules el *grid* de la proyección longitud-latitud regular rotada del NMMB. Nota: se representan 1 de cada 15 puntos.

Para aquellos puntillosos, se habrán dado cuenta de que en la figura 3, ¡el NMMB tiene dos puntos más de *grid*! En realidad, se pone un punto de *grid* o rejilla más alrededor del área del NMMB, y la razón de ello reside en el hecho de que toda salida del γSREPS, para todos los miembros, está codificada exactamente igual en formato GRIB1: esto incluye que todas las salidas de todos los miembros están en la misma proyección, la conforme cónica de Lambert. Pero el NMMB estaba en longitud-latitud regular rotada, entonces: ¡se debe interpolar a la Lambert! Y para interpolar bien se necesita tener siempre puntos alrededor y eso no se cumpliría en los bordes del área del NMMB sin incluir ese punto de más.

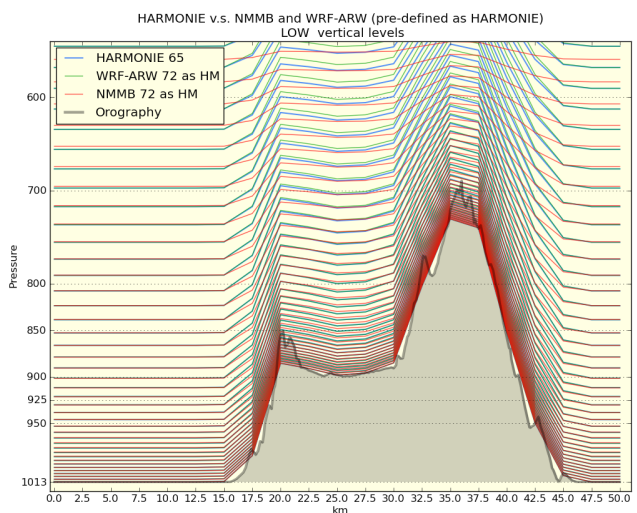


Figura 4. Las tres distribuciones de niveles verticales utilizados en los 4 modelos del γSREPS: 65 niveles verticales híbridos de sigma-presión para AROME y ALARO (HARMONIE en azul), 72 niveles sigma para WRF-ARW, y 72 híbridos sigma-presión para el NMMB.

generar en las simulaciones evoluciones atmosféricas espurias (no reales), como ondas de gravedad, que podrían entorpecer la simulación de toda la atmósfera del modelo. Pero ahí va: ¡otro truquillo de los modelizadores! Acumulando, ¡aumentando y apretujando! más niveles verticales al acercarse a ese tope, como si estuviéramos en los niveles bajos al acercarnos a la superficie, se reducen ostensiblemente esos indeseables problemillas: ¡en el γ SREPS se consigue poniendo esos 7 niveles verticales de más en el WRF y el NMMB!

Configuraciones de los modelos. En la tabla 1 se muestran las características y configuraciones de los 4 modelos utilizados. Nótese que cada modelo es de su padre y de su madre, es decir, tienen diseños de base variopintos. Pero, como se señalaba en el apartado anterior, en esas diferencias es donde reside la ventaja del multimodelo.

Modelo / Características	HARMONIE		WRF-ARW	NMMB
	AROME	ALARO		
Dinámica y física	Física AROME. Dinámica MESO-NH	Física ALARO con convección 3MT en la dinámica. Dinámica MESO-NH	Núcleo dinámico ARW. Física 3 km	Dinámica NNM. Física NMMB
Paso de tiempo	60 segundos (espectral y semilagrangiano)		12 segundos (euleriano)	5,625 segundos (euleriano)
Niveles verticales	65 híbridos sigma-presión		72 sigma Tope atmósfera 40 hPa	72 híbridos sigma-presión hasta 40 hPa
Proyección / Rejilla o <i>grid</i> horizontal	Conforme cónica de Lambert. Con centro en 2,5°O / 40°N (IBERIA_2.5) <i>Grid</i> Arakawa A 565 × 469 puntos de <i>grid</i>			Regular latitud-longitud rotada. Centro 2,5°O / 40°N <i>Grid</i> Arakawa B 567 × 471 puntos
8 puntos de relajación en las condiciones de contorno				

Tabla 1. Resumen de las características y configuraciones más generales de los 4 modelos de alta resolución del AEMET- γ SREPS.

Resolución condiciones de contorno. Otro aspecto de capital importancia en el diseño del γ SREPS, es tener la mejor resolución horizontal y vertical posible en las condiciones de contorno que provienen de los 5 modelos globales. ¡Cuanto menor sea el *salto* de resolución entre un modelo global a uno de alta resolución, mejor simulación! En la tabla 2 se muestran las resoluciones de los modelos globales disponibles para el γ SREPS frente a la resolución real a la que se integran. Y el objetivo es ese, disponer de la resolución más próxima posible a la real de los modelos globales como condiciones de contorno.

Para suavizar el cambio de resolución de los 5 modelos globales a los 4 de alta resolución del γ SREPS, de unos 10-25 km a 2,5 km, se ha configurado un espacio grande de transición: 8 puntos de relajación ¡denominación en la jerga de los modelizadores! (véase la tabla 2). De no hacerlo así, podrían aparecer en los bordes de las simulaciones defectos artificiosos y espurios, debidos, por ejemplo, a ondas de gravedad no reales generadas por el salto de resolución de las condiciones de contorno al modelo de alta resolución.

Condición de contorno	Modelo global original		Del modelo global a γ SREPS	
	Resolución horizontal (km)	Número niveles verticales y tipo	Resolución horizontal (km)	Número niveles verticales y tipo
ECMWF / IFS	11	137 Híbrido	11	137 Híbrido
NCEP / GFS	13	64 Sigma	26	32 Isobárico
MétéoFrance / ARPÈGE	7	105 Híbrido	10	60 Híbrido
CMC / GEM	25	80 Híbrido	25	28 Isobárico
JMA / GSM	20	100 Híbrido	20	86 Híbrido

Tabla 2. Resoluciones horizontales y número de niveles verticales de las 5 condiciones de contorno del γ SREPS respecto a la resolución original de los modelos globales.

Parametrizaciones. Para los procesos de *subgrid* o subrejilla, es decir, las parametrizaciones de la física de los modelos, como la radiación, la microfísica de nubes (evolución de las nubes), la turbulencia en la capa límite atmosférica, el suelo, etc., se han utilizado en cada modelo aquellas combinaciones diseñadas específicamente para simulaciones de alta resolución *convection-permitting* desde 1 a 4 km. También ha imperado la búsqueda de la coherencia entre los distintos modelos: por ejemplo, se actualiza la entrada de energía de los modelos, es decir, la radiación solar (radiación de onda corta), con la misma cadencia, concretamente cada 15 minutos, en todos ellos.

2.4. Evolución y futuro del AEMET- γ SREPS

En un mundo en plena evolución tecnológica y continuos avances, el γ SREPS no podía ser menos. Los SPC de alta resolución van incorporando continuamente los *últimos* avances en las técnicas para generarlos y así como la mejora propia de sus modelos. A continuación, se listan las evoluciones previstas en el γ SREPS en el momento de escribir estas líneas:

- a) *Asimilación.* Incorporación de un sistema de asimilación propio, basado en LETKF o en su defecto en 3DVAR, asimilando observaciones de alta resolución convencionales, de satélites y sobre todo de radares.
- b) *Ciclos cada 3 horas.* Un objetivo futuro del γ SREPS es la predicción a muy corto plazo, es decir, las primeras 12 horas. Así se integrarán los ciclos intermedios, a saber, 03, 05, 09, 15, 18 y 21 UTC, a unas 12 horas para las predicciones a muy corto plazo y salidas muy frecuentes (15 minutos de dos puntos más abajo).
- c) *Incremento del alcance.* Se integrarán los ciclos principales de las 00 UTC y las 12 UTC a 3 días (72 horas), cubriendo todo el corto plazo operativo en AEMET.
- d) *Salidas cada 1 hora y cada 15 minutos para campos relevantes.* La salida del γ SREPS es cada 3 horas y se va a incrementar a 1 hora, suficiente para la mayoría de tareas de verificación y de productos generales de predicción. Pero hay campos que por su relevancia y/o utilidad van a tener una salida cada 15 minutos. Ejemplos son: el viento a 10/80/100/120 metros en parques eólicos, la radiación solar con la GHI para parques de energía fotovoltaica y la DNI para los de concentración, etc.
- e) *Área más grande: IBERIAxl_2.5.* El área de integración del γ SREPS, llamada IBERIA_2.5, cubre poco más que la península ibérica, lo que limita desarrollos meteorológicos sinópticos e incluso mesoescales, dando una preponderancia muy grande a partir de unas 12-18 horas de integración a las condiciones de contorno. El γ SREPS se convierte, un poco, en un zoom dinámico de los modelos globales. La idea es

incrementar el área de IBERIA_2.5 a IBERIAx1_2.5, pasando de 565×469 puntos de rejilla a 1152×864 o de 1400×1200 km a 2900×2200 km. De esta manera se retrasa el efecto de zoom dinámico hasta unas 24-36 horas y de paso se da más peso a la asimilación en las condiciones iniciales.

- f) *Incrementar a 25 miembros: el GEM-LAM.* Para describir mejor las probabilidades y tener más posibilidades de captar fenómenos adversos, se debe incrementar el número de miembros: ¡para describir mejor la PDF! Por consistencia, coherencia y simetría con las condiciones de contorno, se pretende incluir un nuevo modelo en el γ SREPS, el modelo de alta resolución canadiense GEM-LAM, que se correspondería a las condiciones de contorno del CMC/GEM.
- g) *Incluir la parametrización estocástica SPPT.* En algunos casos de eventos de precipitaciones intensas, la parametrización estocástica SPPT para tener en cuenta los errores del modelo ha dado excelentes resultados. Se planea estudiar la combinación de la SPPT con el multimodelo.
- h) *Más campos postprocesados.* Inclusión de una serie de campos postprocesados por los modelos de especial interés, sobre todo, para su uso en predicción operativa: CAPE, CIN, pseudoimágenes de reflectividad radar, pseudoimágenes de satélite, visibilidad y/o niebla, rayos, temperaturas máximas y mínimas a 2 metros, rachas máximas de viento, etcétera.
- i) *Calibración.* Calibrar la salida de tres campos meteorológicos de especial relevancia socioeconómica: la temperatura a 2 metros, el viento a 10 metros y la precipitación acumulada. Se utilizarán métodos convencionales de calibración y métodos de *Machine Learning*.
- j) *Actualización de modelos.* Cada nueva versión de modelos de predicción del tiempo incluye mejoras de las que se benefician los SPC en su conjunto. La actualización del γ SREPS está unívocamente ligada a actualizar los modelos que lo componen cada vez que hay una nueva versión estable. Por ejemplo, al escribir estas líneas se está actualizando el WRF-ARW de la versión 3.6.0 a la 3.9.1.1, que como mejora más significativa incluye una mejor descripción de los niveles verticales: Se abandonan los niveles sigma para dar paso a los mejores niveles híbridos de sigma-presión.
- k) *Presentación de los productos en una página web interactiva.* Desarrollo y evolución del actual portal web incluyendo más productos del γ SREPS en mapas interactivos como herramienta esencial para predicción operativa en AEMET en el corto plazo e incluso para nowcasting (predicción a muy corto plazo). La interactibilidad básica comprende, por ejemplo, seleccionar un tipo de producto, hacer un zoom dinámico a una zona deseada, etc. Y la interactibilidad avanzada permite combinar varios campos como capas, plotear miembros individuales como isolíneas sobre mapas de probabilidad, pinchar en un punto o clicar en un polígono y plotear el epsgrama temporal o el perfil vertical correspondiente, etcétera.

3. EL AEMET- γ SREPS EN UN CASO DE CONVECCIÓN POR CONVERGENCIAS EN EL MEDITERRÁNEO

Hemos creído interesante presentar un caso real de predicción del tiempo, por parte del GPV de Barcelona, donde el AEMET- γ SREPS fue una herramienta útil en la predicción. Este ejemplo de uso operativo se enmarca en la larga tarea del Grupo de Predecibilidad de AEMET de tomar contacto con el predictor para intercambiar experiencias en el uso y mejora del γ SREPS como sistema operativo de predicción del tiempo.

3.1. Descripción del evento

Se trata de un evento típico al que se suelen enfrentar los predictores del GPV de Barcelona. Estamos delante de un desarrollo de convección organizada asociada a convergencias de vientos en una situación de tramontana/cierzo con gran inestabilidad en el Mediterráneo occidental. El problema de este tipo de situaciones muchas

veces está en predecir dónde y cuándo va a ocurrir la convergencia de vientos, porque esto marcará los desarrollos tormentosos posteriores. Una pequeña diferencia en la localización de la convergencia puede llevar a tener evoluciones predichas de la tormenta, muy distintas. Tal como se puede apreciar en la figura 5, el radiosondeo de Barcelona de las 12 UTC del 9 de agosto de 2018 indica que hay gran inestabilidad en capas medias y altas, llegándose a observar un CAPE de 3457 J/kg.

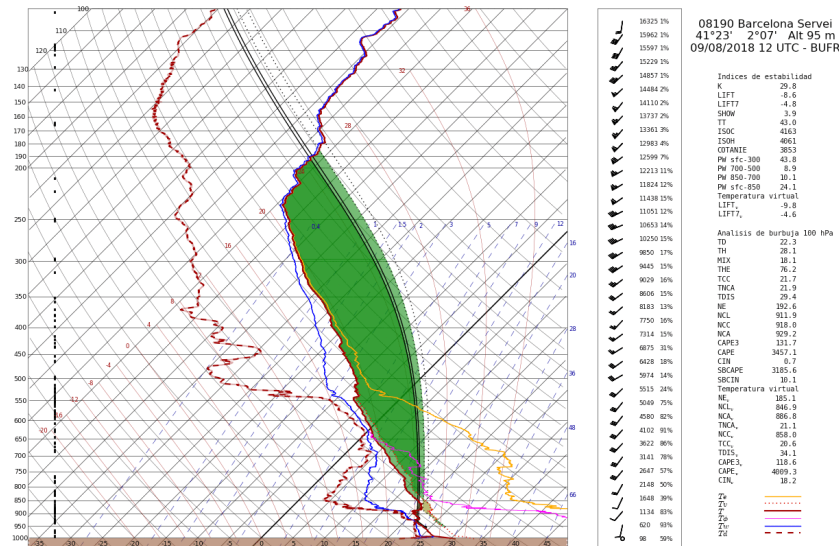


Figura 5. Radiosondeo de Barcelona para las 12 UTC del día 09/08/2018.

3.2. La predicción del HARMONIE-AROME ciclo 40 determinista

La predicción operativa del HARMONIE-AROME de las 00 UTC del 9 de agosto de 2018 da un desarrollo convectivo de más de 128 mm en 3 h que se forma en la costa central catalana y se desplaza hacia las islas Baleares, impactando en Mallorca y Menorca en las siguientes 24 horas. Unas horas más tarde, con la nueva pasada del HARMONIE, la de las 12, el predictor se encuentra que el modelo no prevé este desarrollo, sino que da otro desarrollo convectivo hacia Ibiza, algo más tarde que el que mostraba la pasada de las 00. En la figura 6 se comparan las dos pasadas del HARMONIE para los mismos alcances de predicción.

Este caso de predicción es un ejemplo paradigmático de cómo dos pasadas consecutivas de HARMONIE pueden dar valores muy distintos en la predicción, en este caso, en la escala convectiva. Estos son los famosos «saltos» del modelo entre pasadas. De la exploración de los mapas de convergencias de viento (no se muestran aquí), se ve claramente cómo la línea de convergencias en ambas pasadas del modelo tiene una localización espaciotemporal distinta, con lo que el desarrollo tormentoso posterior queda condicionado a este hecho.

Si echamos un vistazo a cómo ha ido la asimilación de datos en el modelo HARMONIE para la pasada de las 12 UTC (esta comprobación no la hacen los predictores sino los modelizadores, entre los que nos encontramos la mayoría de los miembros del grupo de predecibilidad), se puede apreciar que no ha habido ningún problema aparente. De hecho, a esa hora es cuando más observaciones se han asimilado en el modelo, entre convencionales, de satélite y de aviones, un total de 11 146.

Ante todos estos indicios, el predictor no debería quedarse únicamente con la predicción más reciente. Lo más probable es que nos encontremos ante una situación de alta incertidumbre espaciotemporal en la predicción, donde pequeñas diferencias en la definición del estado inicial pueden llevarnos a evoluciones modelizadas de la atmósfera muy distintas. Por esta razón, en este caso una herramienta de predicción por conjuntos nos puede ser de mucha utilidad.

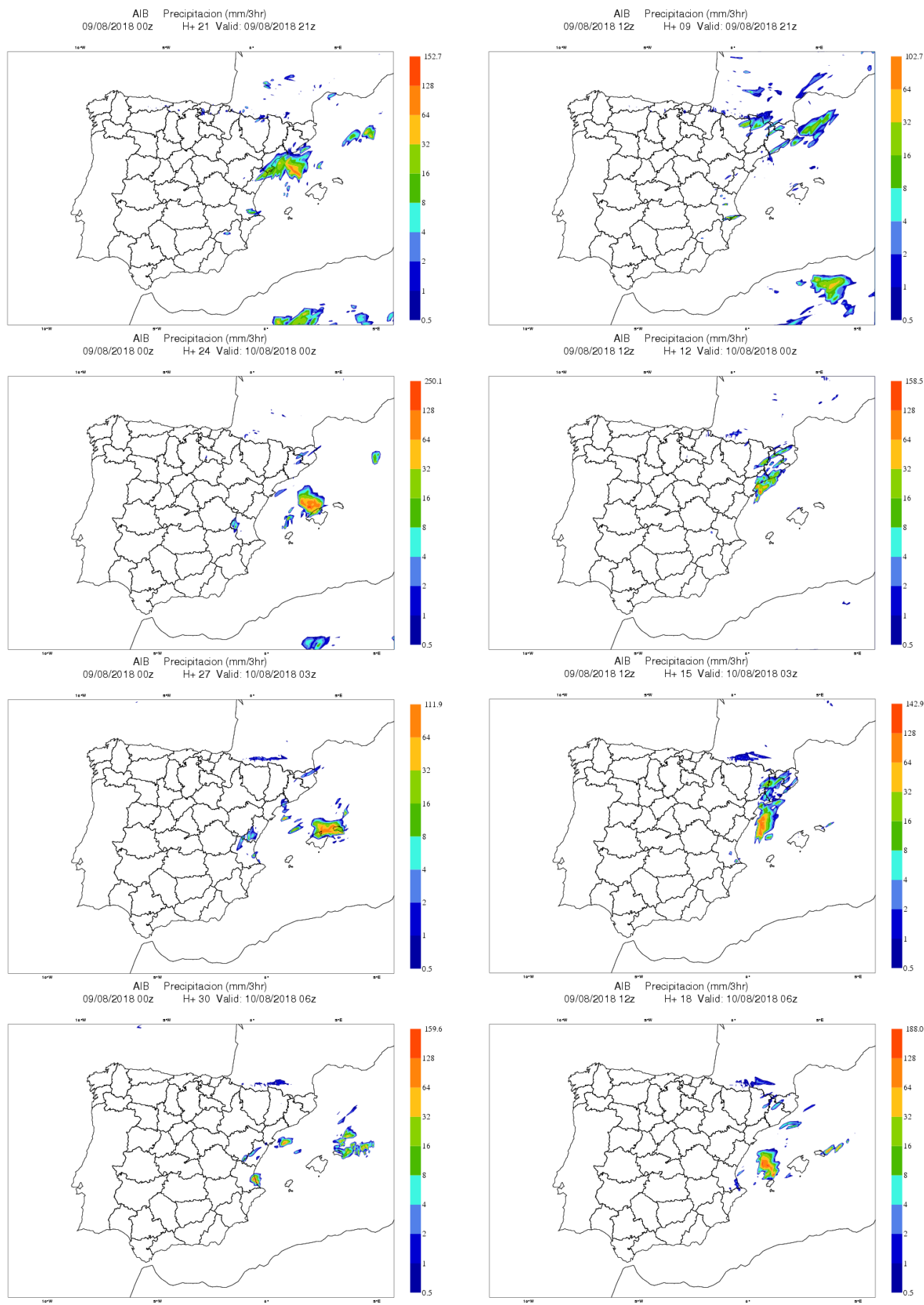


Figura 6. Predicciones de precipitación acumulada en 3 horas del modelo HARMONIE-AROME en las pasadas 00 UTC (izquierda) y 12 UTC (derecha) del día 9 de agosto de 2018. Predicciones válidas desde el 9 de agosto a las 21 UTC (fila superior) hasta las 6 UTC del 10 (fila inferior).

3.3. Las predicciones del EPS del ECMWF y del AEMET- γ SREPS

En la figura 7 se presentan las predicciones de precipitación acumulada en 3 horas, para el alcance de predicción H+12 y distintos umbrales (2, 5, 10, 20 y 40 mm), de los sistemas de predicción por conjuntos EPS del ECMWF y AEMET- γ SREPS. En este caso nos centramos en ambos sistemas solo en la pasada del día 9 a las 12 UTC. Lo que se pretende mostrar con estas figuras es básicamente dos ideas claras. La primera es que ambos sistemas están prediciendo las dos posibles trayectorias que los HARMONIE determinista de las 00 y de las 12 UTC habían predicho. Como se ve, existe una probabilidad no nula de que los sistemas tormentosos se desplacen tanto a Mallorca/Menorca como a Ibiza. Este primer resultado afianza la idea de que nos encontramos ante una predicción con alta incertidumbre, o sea, caótica.

La segunda idea a resaltar de la figura 7 es la capacidad del AEMET- γ SREPS de predecir valores altos de precipitación. Como se ve, mientras que el EPS del ECMWF no da señal más allá del umbral 20 mm, el γ SREPS es capaz de dar precipitaciones mayores de 40 mm en 3 horas. Este aspecto es resultado de la alta resolución a la que se ejecuta el γ SREPS, en lo que llamamos la escala *convection-permitting*. Es decir, la convección está resuelta directamente por la dinámica del modelo, no por una parametrización específica de la misma. Este aspecto no es baladí, porque, si imagináramos que solo tuviéramos disponible el EPS del ECMWF, no sería fácil deducir claramente que nos encontraríamos ante un fenómeno de precipitación convectiva de gran magnitud. Para finalizar, y como se verá más adelante, cabe decir que las observaciones registradas dieron unos valores más cercanos a lo que el AEMET- γ SREPS predijo.

Otra manera de ver con más claridad lo explicado en el párrafo anterior es fijarse en el campo de precipitación acumulada en 3 horas máxima para los miembros del *ensemble*. En cada punto de *grid* de este producto estamos pintando el miembro que ha dado más precipitación. Esto es lo que se presenta en la figura 8. Como se ve, los rasgos estructurales de la precipitación en ambos casos son muy distintos, destacando la granularidad característica de la escala convectiva en el caso del AEMET- γ SREPS. Además de la forma, los valores de precipitación son mucho mayores en este último caso, quedando el EPS del ECMWF con unos valores que infrapredicen la precipitación. El campo precipitación máxima puede ser útil para un predictor en el sentido que si nuestro sistema de predicción es realista, es difícil esperar valores más altos de precipitación, es decir, es una cota máxima al fenómeno.

Un aspecto interesante de las predicciones probabilísticas con modelos de alta resolución es que, al tener las estructuras convectivas una forma granular con escalas típicas de pocos kilómetros (figura 8), al pintar las probabilidades de precipitación (figura 9), estas suelen tener valores bajos incluso para umbrales bajos (difícilmente superiores al 40 %). Estos valores bajos de la probabilidad pueden llevar a la confusión de pensar que, como la probabilidad es baja, el fenómeno convectivo con altos valores de precipitación es difícil (poco probable) que suceda. ¡En ningún caso! La explicación correcta es que, debido a la estructura de mesoescala y a la alta variabilidad espacial de la convección (separación entre miembros), las probabilidades del fenómeno suelen ser bajas para un punto de *grid* específico, pero la probabilidad de que ocurra el fenómeno en una amplia área puede ser muy alta. Con lo que ¡OJO! Con valores bajos de probabilidad no tenemos que deducir que no sea fácil tener un fenómeno convectivo intenso.

Para salvar esta confusión, existen varias maneras de generar productos derivados que hasta cierto punto resuelven el problema. Un ejemplo es el producto que se presenta en la figura 10. En este caso estamos representando los contornos de las áreas que superan un cierto umbral de precipitación, para cada miembro. Además, estamos diferenciando los miembros por colores, con lo que podemos identificar a los mismos en función de cómo se han construido (véase la sección 2 del presente documento). En particular, en el caso que nos ocupa, podemos ver cómo los miembros de color violeta, los que usan el modelo japonés como condición de contorno, el JMA, son los que ven principalmente la trayectoria Mallorca/Menorca. En cambio, los miembros construidos con el modelo del ECMWF, los rojos, se centran en la trayectoria Ibiza, y no ven la Mallorca/Menorca. En este caso, este resultado confirma la potencialidad de usar un multimodelo, es decir, si hubiéramos usado únicamente el modelo del ECMWF, difícilmente hubiéramos visto las dos trayectorias.

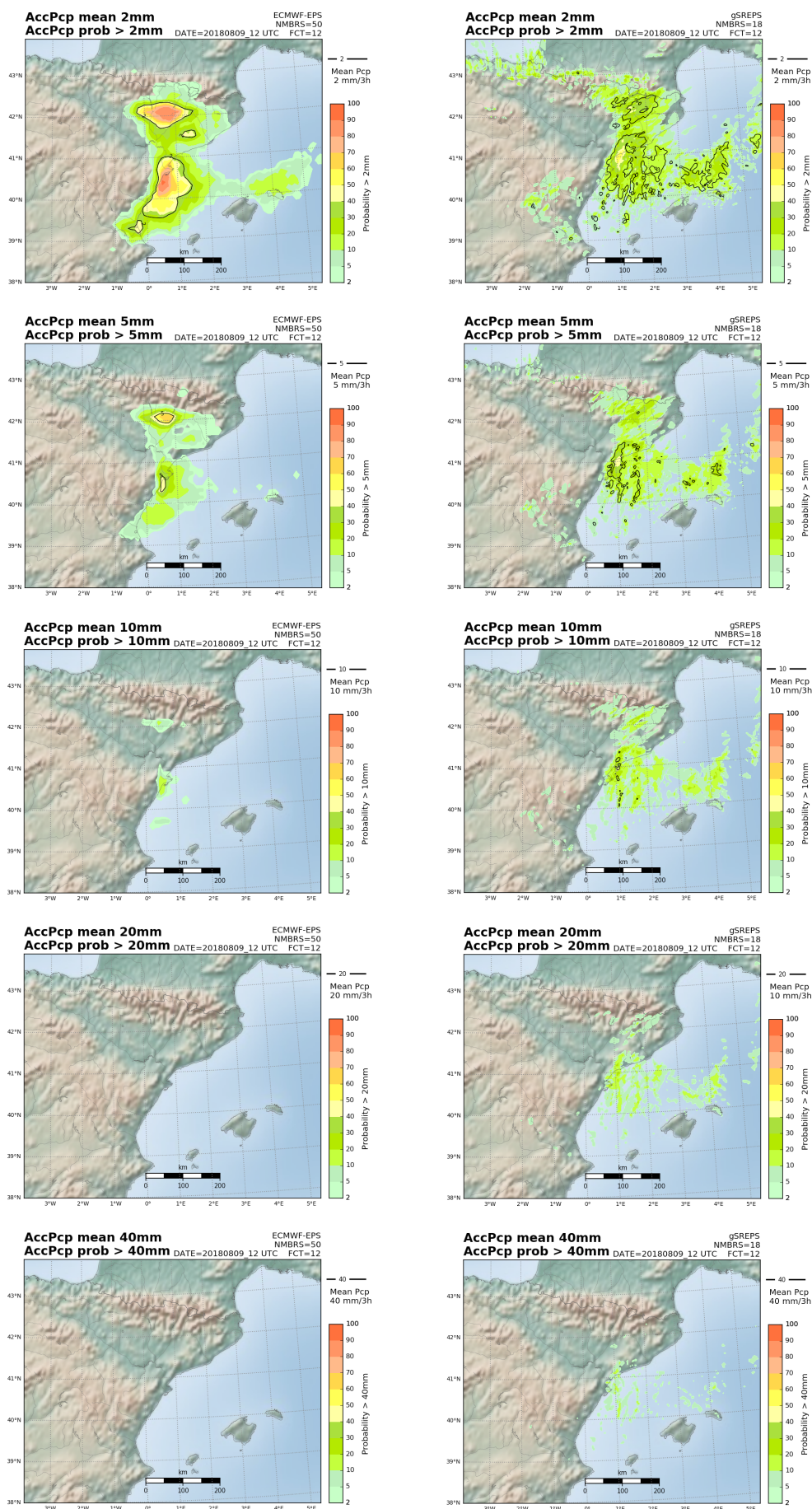


Figura 7. Probabilidades de precipitación acumulada en 3 horas para distintos umbrales en H+12, impacto en Mallorca y Menorca. ECMWF-EPS (izquierda) y AEMET-γSREPS (derecha). Predicción inicializada el 9 de agosto a las 12 UTC en ambos sistemas.

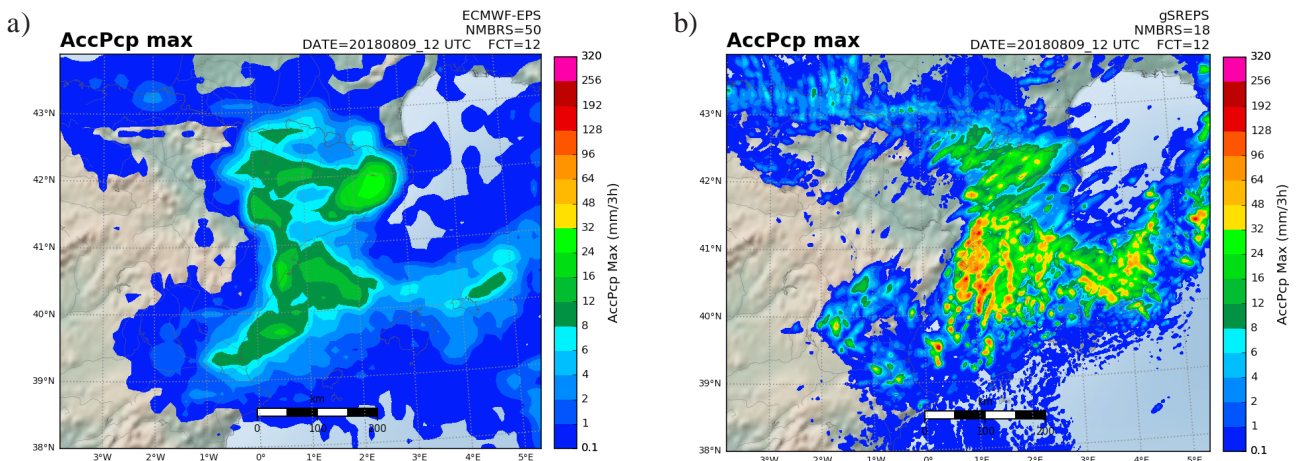


Figura 8. Máxima precipitación acumulada en 3 horas de los distintos miembros del conjunto, para la predicción H+12 inicializada el 9 de agosto a las 12 UTC. a) ECMWF-EPS y b) AEMET-γSREPS.

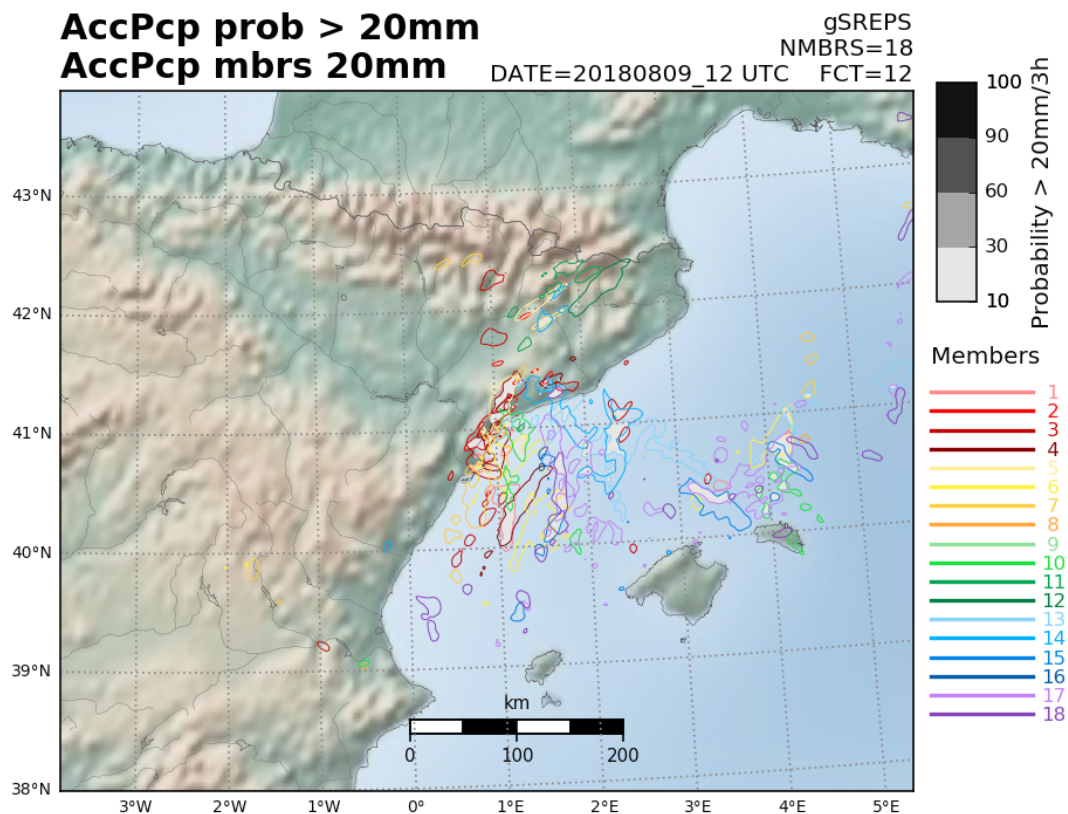


Figura 9. Contornos de las áreas que superan un cierto umbral de precipitación, en el que cada color identifica a un miembro distinto del AEMET-γSREPS. En este caso el umbral es 20 mm las últimas 3 horas y la predicción es H+12 inicializada el 9 de agosto a las 12 UTC.

3.4. Resumen de la predicción

Después de haber consultado los distintos sistemas de predicción disponibles por el predictor, podemos decir que tanto el ECMWF-EPS como el AEMET-γSREPS predicen las 2 trayectorias. Esto confirma que las discrepancias en los HARMONIE deterministas de pasadas distintas vienen dadas por la incertidumbre debida al error inherente de la predicción (caos). La clara ventaja del AEMET-γSREPS en este caso es que da probabilidades para precipitaciones mayores de 40 mm en 3 horas. Estos valores, como se verá más

adelante, se corresponden mejor con los valores observados. Este resultado se debe a la naturaleza *convection-permitting* del AEMET- γ SREPS, a 2,5 km de resolución, respecto al ECMWF-EPS, que corre a 16 km con la convección parametrizada.

Tenemos tanto incertidumbre espacial como temporal. En el caso de Ibiza no se han mostrado las predicciones de entre H+15 y H+24 del γ SREPS, por no saturar de figuras el documento. La conclusión de estas predicciones es que la tormenta puede llegar entre H+15 y H+24. Es decir, tenemos una clara incertidumbre temporal: no sabemos cuándo llegará a Ibiza, pero es altamente probable que llegue. Esto solo lo da el AEMET- γ SREPS. El EPS del ECMWF vislumbra la trayectoria de Ibiza pero ningún miembro llega jamás a impactar contra la isla.

Aunque las probabilidades en el AEMET- γ SREPS parezcan bajas, hay que tener en cuenta que debido a la estructura granular o en islitas de la convección resuelta a 2,5 km, las probabilidades se suavizan debido al desplazamiento por localización (incertidumbre espacial). Esto en ningún caso no quiere decir que las intensidades de precipitación no vayan a ser altas, sino que tendremos incertidumbre en su localización. ¡Cuidado!

Por otro lado, el efecto multimodelo de las condiciones de contorno en el diseño del AEMET- γ SREPS nos permite en este caso que la trayectoria Mallorca/Menorca sea contemplada por nuestro sistema. Los modelos globales JMA, GFS, MF y CMC la contemplan, mientras que el ECMWF determinista no.

Finalmente, el AEMET- γ SREPS permite en este caso afianzar la seguridad de que las células convectivas pueden desplazarse en dos trayectorias, una hacia Mallorca/Menorca otra hacia Ibiza, con intensidades de precipitación severas en ambos casos. El predictor de turno en este caso en el GPV de Barcelona, ante la incertidumbre y tras examinar el AEMET- γ SREPS, decide poner aviso naranja de fuerte precipitación tanto en el norte Mallorca como en Menorca y en Ibiza, haciendo hincapié en la incertidumbre espacial: «sé que lloverá fuerte en alguna de las islas, pero no sé en cuál de ellas». ¡Esta era la predicción correcta!

3.5. Observación del fenómeno

Finalmente llovió en las 3 islas. El impacto del sistema tormentoso en Mallorca y Menorca fue hacia las 00 UTC del 10 de agosto. En el caso de Ibiza, el sistema tormentoso sufre varios desarrollos llegando a impactar a las 07 UTC del mismo día. El fenómeno sucede en una forma, tiempo e intensidad de precipitación parecidas a la combinación de lo que el HARMONIE 40 de las 00 y de las 12 habían predicho... Y que el AEMET- γ SREPS apoyaba. O sea, que en este caso el AEMET- γ SREPS fue una herramienta clave para dar confianza al predictor en su predicción.

Para corroborar tal observación en la figura 10 se muestra la reflectividad (Z) en 10 minutos del radar de Palma de Mallorca en salidas bihorarias, desde las 19 UTC del día 9 a las 05 UTC del día 10. Siguiendo la relación de Marshall-Palmer ($Z=200 \times R^{1.6}$) tenemos unos valores máximos de PCP acumulados en 3 horas alrededor de 150 mm (zonas naranja y roja, de 50 a 60 dBz). Se puede apreciar en la columna de la izquierda como un primer sistema convectivo se forma frente a la costa entre Barcelona y Tarragona y se desplaza hacia Mallorca y Menorca impactando a las 23 UTC. En ese mismo momento se forma un segundo sistema convectivo enfrente del delta del Ebro que más tarde (columna de la derecha), irá evolucionando en desarrollos sucesivos hacia la isla de Ibiza. En la figura 11 se puede apreciar la continuación de la estructura convectiva ahora con el radar de Valencia, observándose el impacto en la isla de Ibiza hacia las 07 UTC.

Finalmente, y a modo también de curiosidad, el registro de rayos totales observados por la red de detección de rayos de AEMET generó para los días 9 y 10 de agosto de 2018 el número de rayos observados mayor en la historia desde que se tienen registros... Estos rayos son los que se muestran en la figura 12. Efectivamente estábamos delante de un fenómeno convectivo de extrema virulencia.

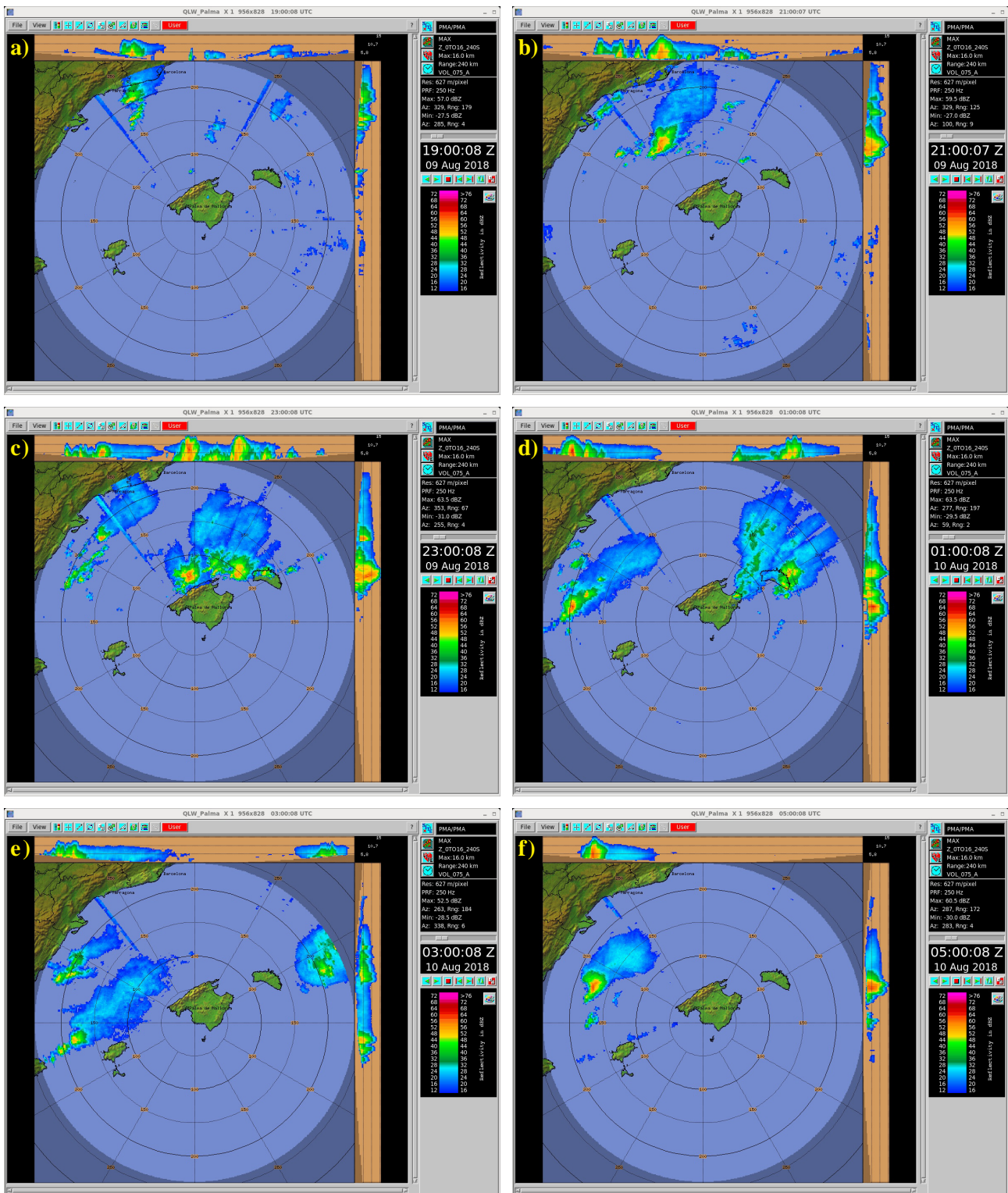


Figura 10. Reflectividad 10-minutal del radar de Palma de Mallorca en frecuencia bihoraria desde las 19 UTC del 9 de agosto (a) hasta las 5 UTC del 10 de agosto de 2018 (f).

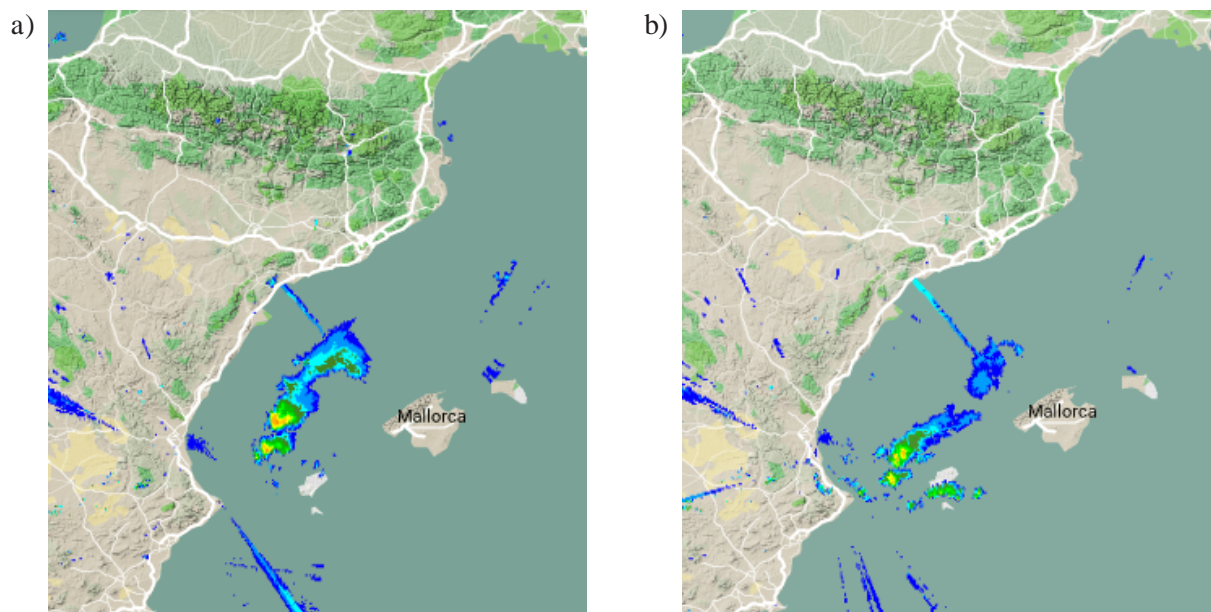


Figura 11. Reflectividad 30-minutal del radar de Valencia: a) a las 06 UTC y b) a las 07 UTC. A las 07 UTC queda registrado el impacto del sistema convectivo en Ibiza.

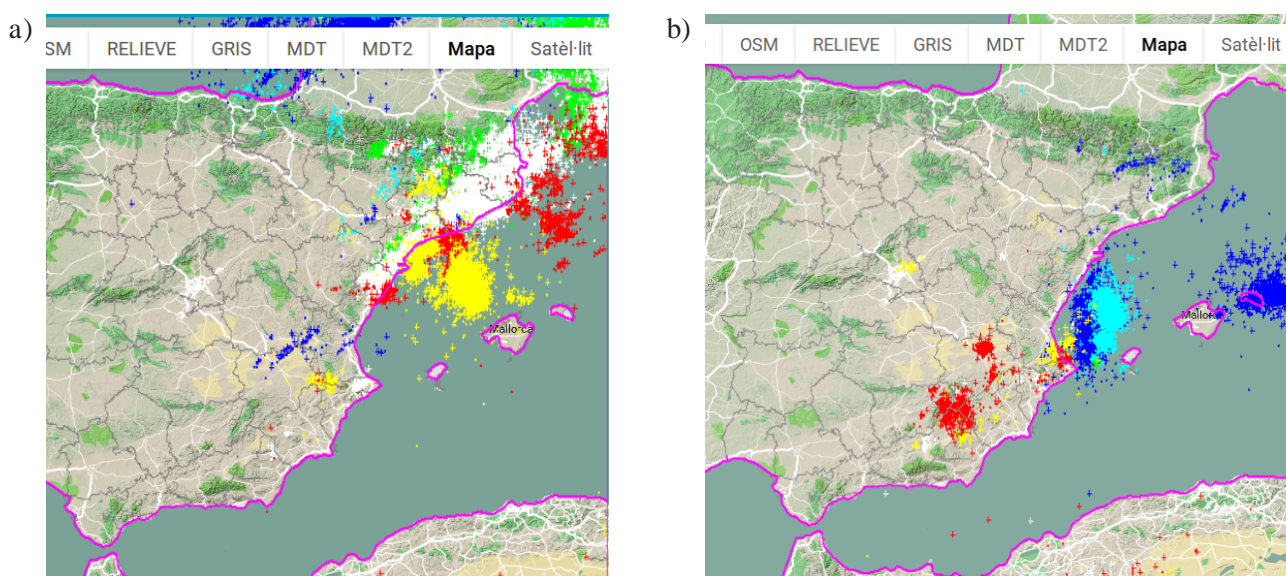


Figura 12. Rayos totales observados los días a) 9 y b) 10 de agosto de 2018 por la red de observación de rayos de AEMET.

4. LA APLICACIÓN WEB AEMET- γ SREPS

Después de alrededor de dos años de trabajo conjunto, la aplicación web para hacer llegar los productos de AEMET- γ SREPS a los predictores ha llegado a un estado preoperativo y está en fase de pruebas en el GPV de Barcelona y en todo el Sistema Nacional de Predicción de AEMET hasta el 31 de marzo de 2019, cuando podría pasar a ser totalmente operativo.

Esta aplicación permite consultar los productos y navegar fácilmente por ellos. El objetivo principal es que sea una aplicación extremadamente estable y práctica, dirigida sobre todo a los predictores operativos, que necesitan obtener la información de manera muy rápida y fiable. Esta estabilidad y fiabilidad se debe en gran

parte a las tecnologías escogidas. Por un lado, la parte de servidor utiliza el *framework Phoenix*, que corre sobre una infraestructura de software diseñada para ser resistente a fallos y reiniciar aquellas partes de la aplicación que por alguna razón dejen de funcionar. Por otro lado, la interfaz de usuario está escrita en *Elm*, lenguaje que, por su diseño, evita errores de ejecución.

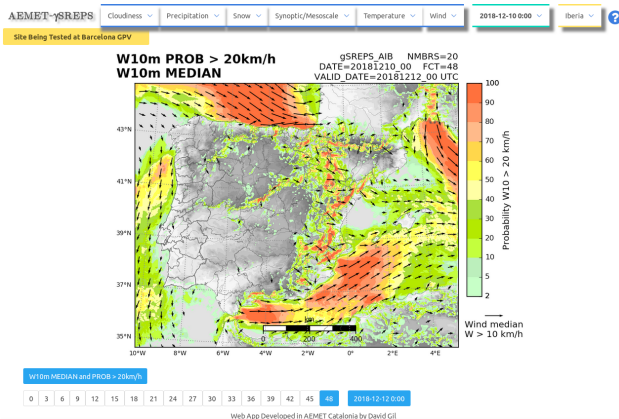


Figura 13. Página principal de la aplicación con un plot de la península ibérica.

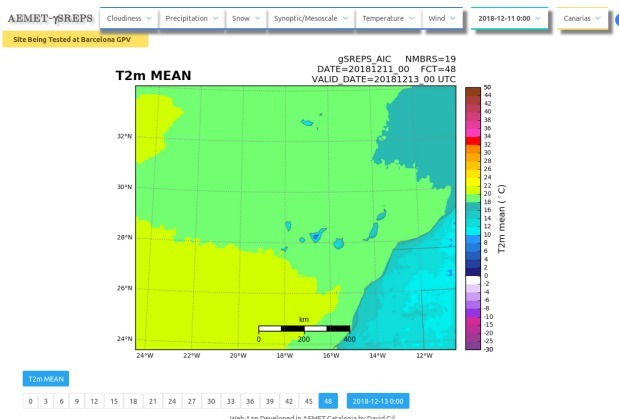


Figura 14. Producto de temperatura media a dos metros para las islas Canarias.

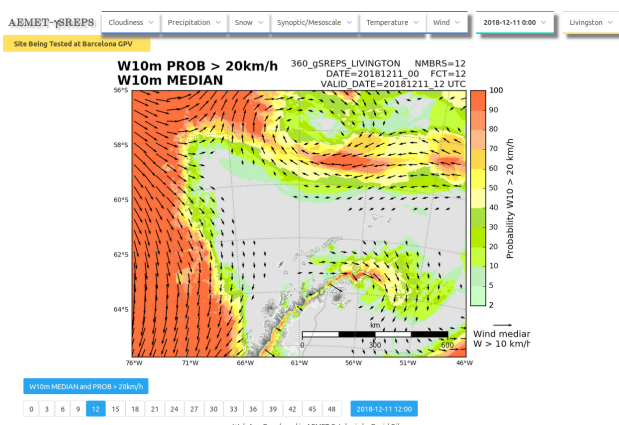


Figura 15. Producto de viento para la isla de Livingston, en la Antártida.

En la parte de arriba de la aplicación podemos ver diversos desplegables. Un primer grupo lo forman las diferentes categorías, que contienen los productos. El segundo desplegable permite escoger entre las últimas cuatro pasadas. Por último, el desplegable de la derecha contiene el área principal (toda la Península) y las diversas subáreas, que están relacionadas con las áreas de avisos.

En la parte inferior podemos ver el nombre del producto escogido, el tiempo de validez y los diferentes alcances. Estos alcances se pueden seleccionar pasando por encima el puntero del ratón o, para ser más prácticos, con las flechas del teclado del ordenador.

Una característica importante es la capacidad que tiene la aplicación de informar en tiempo real a todos los usuarios en el momento que una nueva pasada ha llegado al servidor, refrescando automáticamente la información en el navegador.

En un futuro próximo esta aplicación proporcionará los productos al Panel-VIM del ATAP para que los predictores puedan consultarlos a través del Panel. Las escalas de colores son las mismas que las utilizadas por el ATAP, lo cual facilita enormemente la comparación de productos.

En breve, la aplicación también incluirá las islas Canarias y, durante las campañas antárticas de AEMET, las simulaciones del AEMET-γSREPS con 12 miembros alrededor de la isla de Livingston, donde se sitúa la base española Juan Carlos I.

A más largo plazo tenemos pensado implementar cierta interactividad, gracias a la cual se podrían generar epsgramas, perfiles verticales y *cross-sections* probabilísticos a partir de lo que el usuario solicitara en cada momento, y la posibilidad de hacer zoom gracias a mapas interactivos a los que superpondríamos imágenes georreferenciadas creadas directamente a partir de los ficheros GRIB.

5. CONCLUSIONES

Después de un intenso y largo trabajo, por fin el sistema de predicción por conjuntos AEMET- γ SREPS está ejecutándose operativamente dos veces al día (00 y 12 UTC) sobre la península ibérica y una vez al día (00 UTC) para Canarias y la isla de Livingston (Antártida) durante la campaña de verano antártico de AEMET. En los tres casos las predicciones son hasta 48 horas.

Este sistema está construido tomando distintos modelos, tanto globales como de área limitada, en lo que se llama la aproximación multimodelo y multicondiciones de contorno. Dicha aproximación es muy costosa desde el punto de vista técnico, puesto que supone mantener varios modelos al mismo tiempo. Por otro lado sus resultados, la capacidad de acierto de la predicción, parece que superan en general a cualquier otra técnica conocida hasta el momento.

En este trabajo se muestra un caso particular de cómo el AEMET- γ SREPS puede ayudar al predictor a mejorar la predicción de un fenómeno de convección organizada en el Mediterráneo. Estamos convencidos de que no solo el sistema será útil para la predicción de la precipitación severa sino también para otros fenómenos severos de viento, niebla, nieve o cualquier otro parámetro meteorológico de interés en nuestro ámbito. Por otro lado, el AEMET- γ SREPS está en una primera fase de operaciones, esto quiere decir que tiene largo recorrido en su mejora, especialmente con lo que respecta a la introducción de la asimilación de datos y el aumento de su dominio de integración.

Para acabar, el AEMET- γ SREPS no sería nada si sus *clientes* directos no le sacaran provecho. Estos *clientes* son principalmente los predictores. Por esta razón, el grupo de predicibilidad de AEMET siempre ha intentado tener un contacto directo con la predicción operativa, tanto para insistir en las virtudes de los sistemas de predicción probabilística como para recabar información de primera mano de dichos sistemas en operaciones (cuando aciertan, cuando fallan...), con el objetivo final de poder mejorarlos.

REFERENCIAS

- BENGTSSON, L., ANDRAE, U., ASPELIEN, T., BATRAK, Y., CALVO, J., DE ROOY, W. C., GLEESON, E., HANSEN-SASS, B., HOMLEID, M., HORTAL, M., IVARSSON, K., LENDERINK, G., NIEMELÄ, S., NIELSEN, K. P., ONVLEED, J., RONTU, L., SAMUELSSON, P., SANTOS MUÑOZ, D., SUBÍAS, A., TIJM, S., TOLL, V., YANG, X. y ØDEGAARD KØLTZOWB, M., 2017. The HARMONIE-AROME Model Configuration in ALADIN-HIRLAM NWP System. *Monthly Weather Review*, 145, 1919-1935. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1>.
- GARCÍA-MOYA, J. A., CALLADO, A., ESCRIBÀ, P., SANTOS, C., SANTOS MUÑOZ, D. y SIMARRO, J., 2011. Predictability of short-range forecasting: A multi-model approach. En: *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63, 550-563. ISSN: 02806495. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00506.x.
- HUNT, B., KOSTELICH, E. y SZUNYOGH, I., 2007. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. En: *Physica D*, 230, 112-126.
- JANJIC, Z. y GALL, R. L., 2012. Scientific documentation of the NCEP nonhydrostatic multiscale model on the B grid (NMMB). Part 1 Dynamics. En: NCAR Technical Note NCAR/TN-489+STR, doi:10.5065/D6WH2MZX.
- LORENZ, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic Flow. En: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141. *Progress in Physical Geography*, 32, 475-480. doi: 10.1177/0309133308091948.

SKAMAROCK, W., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., GILL, D. O., BARKER, D. M., DUDA, M. G., HUANG, X.-Y., WANG, W. y POWERS, J. G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. En: NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR.

TERMONIA, P., FISCHER, C., BAZILE, E., BOUYSSSEL, F., BROŽKOVÁ, R., BÉNARD, P., BOCHENEK, B., DEGRAUWE, D., DERKOVÁ, M., EL KHATIB, R., HAMDI, R., MAŠEK, J., POTTIER, P., PRISTOV, N., SEITY, Y., SMOLÍKOVÁ, P., ŠPANIEL, O., TUDOR, M., WANG, Y., WITTMANN, C. y JOLY, A., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. En: *Geosci. Model Dev.*, 11, 257-281. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>.

