

Análisis de las fuentes de humedad en los episodios de lluvias torrenciales del otoño de 1982 empleando el método de los trazadores

Autor: Damián Insua Costa

Supervisores: M. Carmen Llasat Botija (mcarmenllasatb@ub.edu) y Gonzalo Miguez Macho (gonzalo.miguez@usc.es)
Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona, Spain.*

Resumen: Durante los días del 19 al 21 de octubre y del 6 al 8 de noviembre de 1982, se produjeron en la Península Ibérica dos eventos de precipitaciones extremas de una magnitud excepcional, que causaron grandes pérdidas materiales y numerosas víctimas mortales. El primero afectó especialmente al Levante y el segundo a Cataluña, Andorra y sur de Francia. Las situaciones meteorológicas que provocaron tales eventos fueron las dos más típicas asociadas con inundaciones en Cataluña y el Levante, por lo que los resultados pueden ser extrapolables a otros casos. En este trabajo nos centraremos en estudiar de forma detallada las posibles fuentes de humedad que, a priori, pudieron jugar un papel relevante para producir las intensísimas precipitaciones. Para ello, hemos empleado el método de los trazadores de humedad instalados en el modelo meteorológico regional WRF. Los resultados obtenidos muestran que en el evento de octubre, la evaporación en el Mediterráneo los días previos a la catástrofe y la inyección de humedad desde África fueron importantes para dar lugar a las precipitaciones, aunque solo explican en torno a la mitad de estas. En el evento de noviembre, la humedad procedente del Atlántico actuó como fuente predominante, si bien es cierto que su predominio en las lluvias del sur de Francia no fue tan claro y en esta región la influencia del Mediterráneo fue considerable.

I. INTRODUCCIÓN

En el otoño de 1982 dos eventos de precipitaciones extremas afectaron de forma muy importante a la Península Ibérica, especialmente en su mitad este, causando cuantiosos daños materiales y víctimas mortales.

El primero de estos eventos se produjo en el mes de octubre, y las mayores cantidades de precipitación se registraron los días 19, 20 y 21 de este mes, sobre todo el día 20. Especialmente dramática fue la situación que se vivió en la Comunidad Valenciana (la más afectada por las lluvias). Y es que durante el día 20 cayeron precipitaciones de una intensidad excepcional sobre la cuenca del Júcar lo que provocó la ruptura del pantano de Tous, causando grandes inundaciones en las regiones vecinas al pantano. Por este motivo, este evento es conocido comúnmente como el evento de la “pantanada” de Tous (Fig. 1).



Figura 1: Daños provocados por la “pantanada” de Tous. Fuente: Falla Malva.

Las consecuencias fueron catastróficas: se estima que perdieron la vida 40 personas y que los daños materiales alcanzaron el equivalente a unos 300 millones de euros (no actualizados). Como ya dijimos, la causa última de esta catástrofe estuvo en las intensísimas precipitaciones caídas en

la zona, sobre todo el día 20, pero ya con importantes acumulaciones el día 19. Se llegaron a recoger hasta 1120 mm en el observatorio situado en Casa del Barón (Valencia) durante esos dos días. Algunos investigadores han llegado a afirmar que podrían haber caído 1000 mm en tan solo 15 horas sobre el observatorio de la Muela de Cortes (Valencia), lo que supondría haber superado el período de retorno de 500 años (Rivera 2012).

El segundo evento se produjo tan solo unos días más tarde, entre los días 6 y 8 de noviembre, con especial intensidad el día 7. En este caso las precipitaciones fueron generalizadas en toda la Península y afectaron especialmente a Cataluña, Andorra y sur de Francia. También en Andalucía la situación fue complicada durante el día 6. Además, en este caso, a las precipitaciones se le sumó un fuerte viento que agravó la situación.

Las mayores acumulaciones de precipitación se dieron en el centro y este de los Pirineos; se recogieron hasta 408 mm en 24 horas en Valcebollère (Pirineo francés) y 556 mm en La Molina (Pirineo catalán) entre los días 6 y 8. También destacan los 150 mm recogidos en Málaga durante el día 6.

Las consecuencias del evento fueron de nuevo catastróficas; se estima que perdieron la vida 42 personas, sumando las víctimas de Cataluña, Andorra y Francia. En concreto en Cataluña perdieron la vida 14 personas y los daños materiales alcanzaron unos 970 millones de euros (actualizados a 2013).

La selección de estos dos casos de estudio no ha sido casual; representan los dos tipos de situaciones más típicas de inundaciones en Cataluña y el Levante (Llasat y Puigcerver 1989). La del evento de octubre sería un caso ejemplar de episodio asociado a la presencia de una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA), mientras que la del segundo se referiría a una situación de bloqueo en omega con una profunda depresión sobre el Atlántico. Además, estos dos eventos han sido considerados como dos de los más importantes dentro de la meteorología española tanto por sus magnitudes y daños causados como por la importancia que estos tuvieron en el avance de la meteorología en España. Por este motivo han sido ampliamente estudiados por varios

* Correo electrónico: dinsuaco7@alumnes.ub.edu

investigadores que, entre otros factores, han tenido en cuenta el análisis de las fuentes de humedad. Para ello han empleado diferentes métodos: desde los métodos más antiguos, que se basan en el análisis de líneas de corriente, como el empleado por Llasat (1987), pasando por los métodos que emplean imágenes de satélite, como el usado por Riosalido et al (1988) en el evento de octubre, hasta los más recientes, basados en el uso de modelos numéricos de mesoescala, como el empleado por Trapero et al (2013) para el evento de noviembre.

Actualmente existen diversos métodos para el análisis cuantitativo de fuentes y sumideros de humedad, entre los que destacan (Dominguez et al 2016): simples modelos analíticos, modelos tridimensionales de retrotrayectorias sin conexión y trazadores de humedad implementados en un modelo meteorológico regional o global. Se puede consultar el trabajo llevado a cabo por Gimeno et al (2012) para encontrar una descripción más detallada de los diferentes métodos.

Con todo ello, el objetivo de este trabajo es ir un paso más allá en el estudio de las fuentes de humedad. Para esto se empleará el último método numérico para el análisis de fuentes y sumideros de humedad que hemos comentado: el método de los trazadores de humedad implementado en un modelo meteorológico, que en nuestro caso será el modelo regional WRF (Weather Research and Forecasting) en su versión 3.4.1. Este método, que será explicado con más detalle posteriormente, nos permitirá analizar el recorrido seguido por todas las partículas de agua que salen de una determinada región que potencialmente puede ser la fuente de humedad. El agua es seguida hasta que precipita, de tal forma que permite calcular la cantidad de precipitación caída en nuestro dominio procedente de esta fuente. Así, por ejemplo, este método nos permitirá calcular qué porcentaje de precipitación caída en los eventos procedía de la humedad evaporada en el Mediterráneo en los días previos. En este trabajo no se entrará en una explicación detallada sobre la causa y las consecuencias de los eventos, sino que nos centraremos en analizar con detalle las fuentes de humedad. En particular, nos centraremos en comprender las grandes cantidades de precipitación acumulada mediante el cálculo de la cantidad y el porcentaje de precipitación y agua precipitable que procedían de distintas fuentes, como pueden ser el Atlántico o el Mediterráneo.

Por tanto, en las siguientes secciones presentaremos un análisis reducido de la situación sinóptica que dio lugar a los dos eventos. Posteriormente explicaremos el método empleado y comentaremos las fuentes de datos utilizadas. Finalmente expondremos un apartado con los resultados de las simulaciones y las conclusiones que se deducen de estas.

II. BREVE ANÁLISIS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

A. El evento de octubre de 1982

Diversos autores han estudiado los factores meteorológicos que jugaron un papel más relevante para dar lugar a precipitaciones tan extremas durante los días 19, 20 y 21 de octubre de 1982, basándose principalmente en las observaciones hechas en aquellos días (entre otros: Dana et al 1982, Rivera y Martínez 1983, Llasat 1991, Romero et al

2000). Es de resaltar que por aquél entonces la cantidad y calidad de las observaciones era mucho más reducida que hoy en día. Aún así, distintos observatorios recogieron datos importantes sobre las condiciones meteorológicas durante aquellos días y las observaciones por satélite, aunque de peor calidad que las de hoy en día, jugaron un papel fundamental para hacer un diagnóstico de este caso de estudio.

SLP(hPa) and Z 500 hPa (m) 12Z20OCT1982

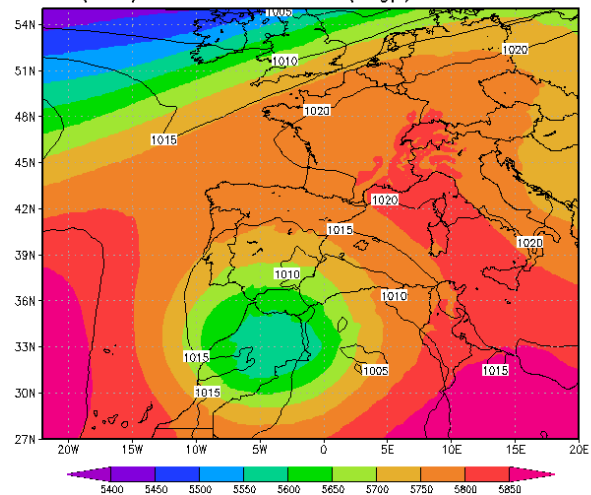


Figura 2: Presión reducida a nivel del mar y altura geopotencial a 500 hPa a las 12Z del 20 de octubre de 1982 (imagen de las simulaciones realizadas con el modelo WRF).

Las conclusiones de los estudios llevados a cabo sobre este evento concluyen que la causa del mismo estuvo en el “estrangulamiento” de una fuerte vaguada en altura que llegaba por el Atlántico, lo que dio lugar a la formación de una DANA, cuyo centro se situó en el norte de Marruecos durante el día 20, acompañada por la formación de una extensa baja poco profunda centrada sobre el norte de Argelia, tal y como se puede apreciar en la Fig. (2). Esta configuración hizo aumentar notablemente la inestabilidad en el norte de Argelia, mar de Alborán y sureste de la Península Ibérica durante los días 19, 20 y 21 de octubre. Se concluye que el papel fundamental que jugó la baja en superficie fue el de organizar un persistente flujo cálido y húmedo de levante sobre la zona del sureste peninsular, la más afectada por las lluvias. La depresión arrastraba aire húmedo desde el Atlántico hacia África para después volverlo a subir hacia el Mediterráneo (Llasat 1991), con un giro final hacia el oeste-noroeste, de tal forma que el flujo incidía casi perpendicularmente en el Levante. En cuanto a la DANA, por una parte hizo aumentar la divergencia en niveles altos, favoreciendo los ascensos de aire y, por otra parte, favoreció el aporte de humedad en niveles medios y altos al captar humedad del chorro subtropical como demostraron Riosalido et al (1988) empleando imágenes de satélite, haciendo las precipitaciones más eficientes (Rivera 2012). Además, se considera que la orografía jugó un papel muy importante para que se alcanzaran picos tan elevados de precipitación en algunos sitios (Dana et al 1982).

Con esta situación se formó un Complejo Convectivo de Mesoescala (Maddox 1980), que fue el primero en ser identificado en Europa, gracias al trabajo llevado a cabo por Rivera y Riosalido (1986) y Riosalido et al (1988) basado en

el análisis de imágenes de satélite. Es de resaltar que dado que el complejo no cumplía las condiciones de extensión propuestas por Maddox (1980), se decidió finalmente introducir la denominación de Sistema Convectivo de Mesoescala, como una mejor descripción del fenómeno. Este sistema se mantuvo cuasi-estacionario en el sureste peninsular durante el día 20 (Romero et al 2000), dando lugar a las intensísimas precipitaciones.

B. El evento de noviembre de 1982

Tan solo unos días después del evento de octubre, otra situación bastante excepcional produjo intensísimas precipitaciones, que afectaron, en este caso, a toda la Península, con especial intensidad en los Pirineos, como ya habíamos comentado. Al igual que el evento de octubre, que es considerado como uno de los más catastróficos en el Levante durante todo el siglo XX, el episodio del 6 al 8 de noviembre de 1982 es considerado como una de los temporales más graves que afectaron al noreste peninsular durante este período. Así pues, diversos autores han hecho distintos análisis de aquel evento (entre otros: Albentosa 1983, Llasat 1991, Trapero et al 2013).

Las conclusiones que se sacan es que el evento estuvo propiciado por una potente situación de bloqueo en omega, con una profunda borrasca situada en el Atlántico (frente a las costas de Galicia sobre las 12Z del día 7) y un anticiclón sobre Europa Central, como podemos apreciar en la Fig. (3). A 500 hPa podemos apreciar claramente la situación en omega, con una intensa vaguada que se descuelga desde latitudes altas y cubre gran parte del Atlántico, acompañada de una dorsal que emerge desde el Mediterráneo y cubre gran parte del interior de Europa.

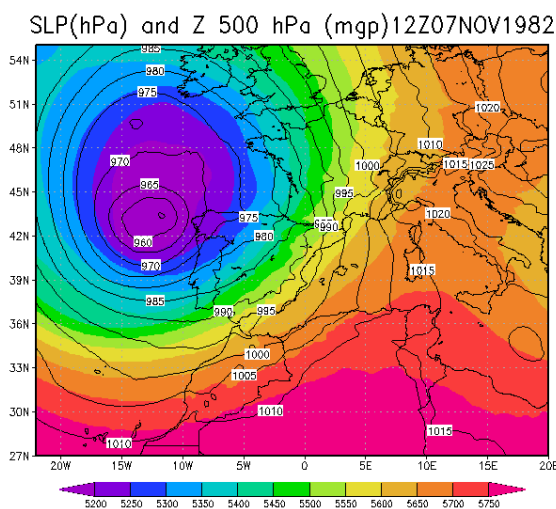


Figura 3: Presión reducida a nivel del mar y altura geopotencial a 500 hPa a las 12Z del 7 de noviembre de 1982 (imagen de las simulaciones realizadas con el modelo WRF).

Esta situación propició el aumento de la inestabilidad en toda la Península, especialmente en el nordeste peninsular, donde se produjo una entrada de aire cálido desde el Mediterráneo en niveles bajos y una intrusión fría en altura, acompañada por un aumento de la divergencia en niveles altos. En niveles bajos los vientos se mantuvieron de componente sur-sureste sobre la zona del nordeste peninsular

durante la mayor parte del día 7 (cuando se recogió la mayor parte de las precipitaciones), girando hasta adquirir componente suroeste en altura. De esta forma hubo un flujo muy importante de humedad desde el Atlántico, que afectó a toda la Península, y que se pudo ver reforzado a su paso por el Mediterráneo, lo que produjo que la masa de agua precipitable (entre 1000 y 300 hPa) tomase valores extraordinarios en esa zona, que llegó a ser del 202% del valor medio en Palma de Mallorca (Llasat 1990). Aún así, los estudios posteriores realizados por Trapero et al (2013) concluyen que el papel jugado por el Mediterráneo como fuente local de humedad fue muy limitado. La situación de un flujo muy húmedo y cuasi-estacionario durante el día 7 sobre el noreste peninsular dio el escenario propicio para que se recogieran grandes cantidades de precipitación. Sin embargo, la inestabilidad permanecía latente en esa zona. Los radiosondeos de Palma de Mallorca mostraron que los ascensos mínimos necesarios para la inestabilización de gran parte de la troposfera eran de 1000 m o superiores (Llasat 1990). Así, la orografía jugó un papel fundamental para liberar esta inestabilidad, lo que condujo a que la mayor acumulación de agua se diese en zonas altas y que la costa se viese mucho menos afectada. Por este motivo la región más afectada fueron los Pirineos.

A partir de las pocas imágenes de satélite disponibles y del campo de precipitación acumulada, se observó que, en este episodio, a diferencia del de octubre, la situación no dio lugar a un Sistema Convectivo de Mesoescala, sino a diversas tormentas multicelulares que se mantuvieron sobre zonas altas (trenes convectivos) provocando que las precipitaciones fuesen tan extremas.

III. METODOLOGÍA Y DATOS

A. Configuración del modelo y fuentes de datos

Las simulaciones para este estudio fueron llevadas a cabo en el modelo meteorológico regional WRF (Weather Research and Forecasting) en su versión 3.4.1 (Skamarock et al 2008) usando un único dominio (Fig. 4) de 4340 km x 3360 km, centrado sobre el noreste de la Península Ibérica con una resolución horizontal de 20 km y 27 niveles verticales. Los trazadores de humedad han sido incluidos en la versión 3.4.1 del modelo WRF por Miguez-Macho et al (2013).

Las condiciones iniciales y de contorno con las que se corre el modelo fueron obtenidas de los reanálisis ERA-Interim del ECMWF con resolución espacial de 0.7° y actualizadas cada 6 h.

Se emplearán datos de observación de las precipitaciones que han sido obtenidos de la base de datos IBERIA02, creada por la Universidad de Cantabria (UC), la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el Instituto Portugués de Meteorología (IPMA), mediante la interpolación de datos observados por más de 2400 estaciones distribuidas por toda la Península Ibérica (Belo-Pereira et al 2011). Se dispone así de una base de datos de precipitaciones diarias acumuladas en el período 1950-2008 (marzo) y que cubre toda la Península Ibérica con una resolución espacial de 0.2°.

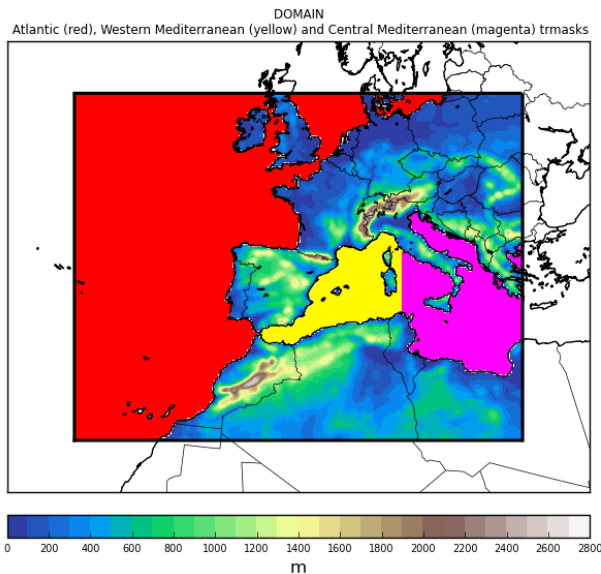


Figura 4: Dominio de simulación con topografía del terreno y vista horizontal de tres de las cuatro máscaras empleadas.

B. El método de los trazadores de humedad

El modelo meteorológico regional WRF con la implementación de los trazadores de humedad (WRF-WVT) nos ha permitido hacer un estudio detallado de algunas fuentes de humedad en los casos de estudio descritos con anterioridad. Este método se basa en hacer un seguimiento de las partículas de agua procedentes de una región de interés situada dentro de nuestro dominio de simulación y que denominaremos máscara. Esta máscara puede ser de dos o tres dimensiones y la idea es que toda partícula que entre en contacto con la máscara quede “etiquetada” de forma que podremos seguir su recorrido hasta que esta precipita (o sale del dominio de simulación). De esta forma es posible diseñar de forma sencilla un sistema de máscaras que detecten el origen de toda la humedad que acaba por precipitar dentro de una determinada región. Esto es así porque la precipitación registrada en el interior de una región a lo largo de un cierto período de tiempo puede proceder únicamente de tres fuentes distintas (Trenberth 1999):

- Humedad que ya se encontraba en la atmósfera en el inicio del período analizado.
- Humedad advectada hacia el interior de la región por la acción de los vientos.
- Humedad evapotranspirada en la superficie de la propia región.

La humedad que se encontraba en la atmósfera al inicio del período de simulación se puede etiquetar empleando una máscara 3D que cubra toda la región y que se desactive después del primer instante de tiempo; la advectada se puede etiquetar empleando una máscara 2D que cubra los bordes de la región y la evapotranspirada se puede etiquetar cubriendo con una máscara 2D la superficie de dicha región. Así pues, el método permite cuantificar por separado las distintas fuentes de humedad de una determinada región.

Por lo que acabamos de decir, los trazadores de humedad han sido de gran utilidad para el análisis del ciclo hidrológico en determinadas regiones del planeta y han sido

especialmente empleados para el cálculo del impacto que tiene la evapotranspiración de una determinada región en las precipitaciones caídas en la misma, lo que se conoce como tasa de reciclaje (Eltahir y Bras 1996). Entre estos estudios se encuentran los de Bosilovich y Schubert (2002) sobre el ciclo hidrológico regional de Norte América e India durante el verano, los de Rios-Entenza et al (2014) sobre la tasa de reciclaje en la Península Ibérica o los de Joel et al (2016) sobre la importancia de la tasa de reciclaje en las precipitaciones de una región del oeste de África durante la estación húmeda del 2003.

C. Descripción de las variables empleadas y los días analizados en el estudio

El modelo WRF en su versión 3.4.1 dispone de seis variables distintas para la razón de mezcla de las diferentes especies de humedad en la atmósfera: para el vapor de agua, agua de las nubes, agua de la lluvia, hielo, nieve y granizo. Denominaremos a estas como: q_v , q_c , q_r , q_i , q_s y q_g , respectivamente. La implementación de los trazadores de humedad añade seis nuevas variables que se corresponden con las razones de mezcla de las seis especies de humedad que proceden de los trazadores, o lo que es lo mismo, que preceden de la posible fuente, la denominada máscara. Denominaremos a estas como: tr_{q_v} , tr_{q_c} , tr_{q_r} , tr_{q_i} , tr_{q_s} y tr_{q_g} . Sumando las variables anteriores obtendremos, por una parte, la razón de mezcla para la suma de todas las especies de humedad (en cualquier punto del dominio 3D), que denominaremos q (g/kg) y, por otra parte, la razón de mezcla para la suma de todas las especies de humedad que proceden de los trazadores, que denominaremos tr_q (g/kg).

Con las variables anteriores y las variables de presión que aporta el modelo, es posible calcular la cantidad de agua precipitable Q (mm) contenida en una columna atmosférica de sección unidad:

$$Q = \frac{1}{\rho g} \int_{p_t}^{p_s} q dp \quad (1)$$

y el trazador de cantidad de agua precipitable TR_Q (mm):

$$TR_Q = \frac{1}{\rho g} \int_{p_t}^{p_s} tr_q dp \quad (2)$$

donde p_s hace referencia a la presión en superficie y p_t hace referencia a la presión en último nivel vertical de nuestra simulación. Además, ρ hace referencia a la densidad del agua y g a la aceleración de la gravedad. Estos dos niveles de presión definen el grosor de la columna atmosférica analizada.

Al mismo tiempo, el modelo dispone de variables para la lluvia convectiva y no convectiva. La suma de estas dos variables nos dará la lluvia total, que denominaremos R (mm). Consecuentemente la implementación de los trazadores añade otras dos nuevas variables más, que se corresponden a la lluvia convectiva y no convectiva procedente de la humedad de los trazadores. La suma de estas nos dará la lluvia total procedente de los trazadores TR_R (mm). Con estas dos variables se puede obtener el porcentaje de lluvia total procedente de la humedad de los

trazadores, o lo que es lo mismo, el porcentaje de lluvia asociada a la precipitación de la humedad que procede de la máscara P (%):

$$P = 100 \frac{TR-R}{R} \quad (3)$$

Estas variables serán las empleadas en el estudio cuantitativo de las fuentes de humedad. Analizaremos únicamente estas variables en los principales días de los eventos tratados, el día 20 en el caso de octubre y el día 7 en el caso de noviembre. Las simulaciones serán lanzadas cuatro días antes de los principales días de los eventos.

D. Las distintas simulaciones según las posibles fuentes de humedad

Cuando analizamos la situación sinóptica de cada episodio, habíamos visto que las características de uno y otro eran muy distintas. Mientras que en el de octubre la situación estaba gobernada por una DANA y una depresión en superficie sobre el norte de África, que provocaban sobre el Levante un flujo del este-sureste en niveles bajos y del sureste en niveles altos, en el de noviembre teníamos una potente situación de bloqueo en omega a 500 hPa, con una profunda baja en superficie frente a las costas de Galicia, bloqueada por un anticiclón en Europa Central, que hacían incidir sobre el noreste peninsular un flujo del sureste en niveles bajos y del suroeste en niveles altos. Debido a estas grandes diferencias, las principales fuentes de humedad en los dos episodios resultan ser substancialmente distintas. Es por esto que, para los dos casos, hemos aplicado el método de los trazadores con distintas máscaras. Además, cabe resaltar que, como ya hemos comentado, los dos eventos representan los dos tipos de situaciones más comunes que dan lugar a inundaciones en Cataluña y el Levante. Por este motivo, es posible que los resultados y conclusiones que resulten de nuestro estudio sean extrapolables a otras muchas situaciones de inundaciones en estas zonas.

El caso de octubre

Los estudios llevados a cabo sobre este evento sugerían que, por una parte, hubo un aporte importante de humedad del Mediterráneo asociada a la circulación marcada por la baja en superficie y por la DANA del norte de África. Además, estas arrastraban aire húmedo desde el Atlántico hasta regiones al interior del continente africano, para después subirlas hasta el Mediterráneo. También habíamos comentado la posibilidad de que hubiese una inyección de humedad en niveles medios y altos provocada por un chorro subtropical que llegaba desde África. Luego esto sugiere que también hubo un aporte de humedad del Atlántico y del chorro subtropical que llegaba al Levante desde zonas del interior del continente africano.

Con lo comentado anteriormente, nos hemos marcado el objetivo de cuantificar la cantidad y el porcentaje de precipitación (y agua precipitable) procedente de la evaporación producida en el Mediterráneo desde el inicio de nuestras simulaciones (día 16) hasta el principal día del evento (día 20) y evaluar cuánta de esta precipitación llegaba desde el continente africano, ya sea procedente del Atlántico o del chorro subtropical. Además, hemos dividido el

Mediterráneo en dos regiones (occidental y central) para evaluar si la precipitación que procedía de la evaporación en el Mediterráneo, era humedad evaporada cerca de la costa o llegaba desde más lejos. Para esto hemos hecho tres simulaciones, cada una de ellas con una máscara distinta (Fig. 4):

- 1- Máscara 2D horizontal sobre el Mediterráneo Occidental: juega el papel de etiquetar toda la humedad evaporada durante el período de simulación en la zona considerada como Mediterráneo Occidental.
- 2- Máscara 2D horizontal sobre el Mediterráneo Central: juega el papel de etiquetar toda la humedad evaporada durante el período de simulación en la zona considerada como Mediterráneo Central.
- 3- Máscara 3D cubriendo el borde sur del dominio no cubierto por el Atlántico: juega el papel de etiquetar toda la humedad (a todos los niveles) que remonta desde el norte de África y es advectada en nuestra región de simulación.

Es de resaltar que la máscara 3D empleada para evaluar la humedad que es advectada desde el norte de África debería ser una máscara 2D vertical superpuesta con el borde sur del dominio de simulación, es decir, con dimensiones en x y en z pero no en y (atendiendo al eje habitual de coordenadas terrestres). Sin embargo esto no ha sido posible porque no se puede crear una máscara vertical de grosor nulo. Por esto mismo hemos cubierto el borde sur del dominio con una máscara 3D de poco grosor en la dirección meridional (2 pasos de malla, es decir, $y=40$ km). De esta forma estamos haciendo la suposición de que la mayor parte de la humedad procedente de esa máscara 3D procede de la humedad advectada desde zonas al interior de África.

El caso de noviembre

En este caso los estudios coinciden en que hubo una aportación muy importante de humedad procedente del Atlántico, provocada por una profunda depresión situada frente a las costas de Galicia. Así, el viento que afectaba a la Península era predominantemente del suroeste pero adquiriría componente sur-sureste sobre el noreste peninsular en niveles bajos. Esta configuración dio lugar a que, a estos niveles, la masa de aire que llegaba al noreste peninsular tuviese un recorrido bastante importante sobre el Mediterráneo. De esta forma, algunos estudios postulan que es posible que el intenso flujo de humedad procedente del Atlántico se viese reforzado aún más a su paso por el Mediterráneo. Sin embargo, Trapero et al (2013) empleando un método basado en las retro trayectorias de distintas parcelas de aire que llegaban a la zona de los Pirineos (la más afectada), han medido el papel jugado por el Mediterráneo como fuente local de humedad, concluyendo que la ganancia de humedad de las parcelas a su paso por el mismo, en términos de su razón de mezcla, era muy limitada debido al alto contenido inicial en vapor de agua y su rápido paso sobre este.

Con todo ello, en este caso nos hemos marcado el objetivo de cuantificar la cantidad y el porcentaje de precipitación (y agua precipitable) procedente del Atlántico y evaluar cuánta de esta precipitación procedía de la humedad evaporada en el Mediterráneo en los cuatro días antes del

principal día del evento (día 7). De esta forma, podemos evaluar si el Atlántico actuó como fuente esencial de humedad, o si la ganancia en humedad debida a la evaporación sobre el Mediterráneo los días previos, tuvo un efecto importante sobre las precipitaciones. Para esto hemos hecho tres simulaciones, cada una de ellas con una máscara distinta (Fig. 4). De nuevo se escogen dos máscaras 2D horizontales, situadas sobre el Mediterráneo Occidental y Mediterráneo Central. Sin embargo, en este caso se substituye la tercera máscara del apartado anterior por una máscara 3D atlántica:

- 4- Máscara 3D sobre el Atlántico: juega el papel de etiquetar toda la humedad que entra sobre la región atlántica (a todos los niveles) de nuestro dominio de simulación (se etiqueta la humedad evaporada del Atlántico, la que había inicialmente sobre este y la advectada desde fuera).

Es de resaltar que con esta configuración de máscaras, algo de humedad se podría etiquetar dos veces, lo que daría lugar a errores en nuestro cálculo. Esto es así porque si la humedad evaporada en el Mediterráneo, que ya estaría etiquetada, entrase en Atlántico, sería de nuevo etiquetada. De esta forma, cuando esa humedad precipite, sería considerada dos veces cuando evaluemos el porcentaje de precipitación procedente de cada fuente de humedad, algo totalmente indeseable dado que nosotros queremos analizar cada fuente por separado. Sin embargo, teniendo en cuenta que en nuestras latitudes los vientos predominantes son del oeste y que la situación que había durante este evento era de vientos intensos que procedían del Atlántico, consideramos que este error puede ser despreciado, si tenemos en cuenta además que el período analizado es de tan solo cuatro días.

IV. RESULTADOS

Pasamos finalmente a mostrar los resultados de las distintas simulaciones llevadas a cabo y a hacer una discusión de los mismos.

A. Precipitación simulada y observada: una validación visual

Para cada evento, se ha obtenido de las simulaciones la precipitación acumulada en 24 horas. Analizaremos el día 20 para el caso de octubre y el día 7 para el de noviembre. Además se mostrará la precipitación observada para estos días.

Los resultados se muestran en la Fig. (5) y nos servirán para hacernos una idea de las precipitaciones acumuladas en los principales días de los eventos y para validar visualmente los resultados del modelo. En cuanto a esto último, la validación visual es especialmente acertada ya que las resoluciones de las simulaciones y de los datos de precipitación observada son muy similares. Se ha representado únicamente la parte del dominio que resulta de nuestro interés.

Como podemos comprobar, la cantidad de precipitación acumulada en 24 h que nos aporta el modelo es consistente con las precipitaciones observadas en aquellos días.

Para el caso del 20 de octubre, aunque es verdad que las precipitaciones cubrieron un área un poco más extensa que la que arroja la simulación, el máximo de precipitación sí se

ajusta muy bien a las observaciones, tanto en cuanto al valor que toma (200.3 mm) como a su localización. Por tanto, tomaremos como válidos los resultados que aporta el modelo para este evento.

En el caso del 7 noviembre las simulaciones parecen ser mejores que en el caso de octubre. La distribución espacial de la precipitación y los máximos de esta coinciden en general con las observaciones. No disponemos de datos de precipitación observada en el sur de Francia, pero es de destacar que el modelo calcula que el máximo de precipitación del evento se registró en esta zona, sobre el macizo del Aigoual (272.8 mm). Llasat (1991) habla de que las precipitaciones se adentraron en el sur de Francia afectando de forma especial a este sistema montañoso. Por todo ello, daremos también por válidos los resultados para este evento.

B. Las fuentes de humedad en el evento de octubre

En este apartado mostramos la cantidad de precipitación y agua precipitable caídas el día 20 de octubre que procedían de las distintas posibles fuentes de humedad consideradas: evaporación en el Mediterráneo Occidental, evaporación en el Mediterráneo Central y humedad advectada por el borde sur del dominio desde el interior de África. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. (6).

En las imágenes podemos ver representada la cantidad de agua precipitable a las 12Z del día 20 de octubre procedente de la evaporación producida en el Mediterráneo Occidental (Fig. 6b), de la evaporación producida en el Mediterráneo Central (Fig. 6d) y de la humedad advectada por el borde sur del dominio (Fig. 6f). Lo primero a destacar, es que la cantidad de agua precipitable sobre el Levante procedente de la evaporación en el Mediterráneo Occidental es comparable con la procedente del Mediterráneo Central. Por tanto, el “efecto de proximidad” no ha jugado un papel relevante en cuanto a que la parte del Mediterráneo más próxima a la costa no aportó más humedad que zonas más al interior de este. Esto era bastante esperable dada la circulación marcada por la baja en niveles bajos. Por otra parte, vemos que por el borde sur es advectado un chorro de humedad muy bien marcado, que proporciona una cantidad importante de agua precipitable al sureste peninsular. Esto confirma los estudios que defendían que hubo una aportación importante de humedad desde África. Estos estudios hablaban de que esta podía preceder directamente del Atlántico (arrastrada primero hacia el sur por la circulación en la rama oeste de la baja) o del chorro subtropical. Es difícil distinguir con los resultados obtenidos cuál fue el papel de uno y otro. Lo que sí parece claro es que la mayor parte de la humedad procedente de África llegó en niveles medios o altos, porque observando la cantidad de agua precipitable advectada desde esa región, es fácil ver que no sigue claramente la circulación de la baja en superficie. Si recordamos la posición que ocupaba la DANA (Fig. 2) uno puede darse de cuenta que el chorro que viene del sur se adapta de mejor forma a la circulación dada por esta. Concluimos por tanto que la mayor parte de la humedad procedente de África llegaba en niveles medios y altos, por lo que, parece probable, que la inyección de humedad del chorro subtropical contribuyó de forma importante a las intensas precipitaciones caídas en el Levante.

En las imágenes Fig. (6a), Fig. (6c), Fig. (6e) podemos ver la precipitación caída durante el día 20 procedente de las tres fuentes de las que hemos venido hablando. En cuanto a la precipitación procedente de la evaporación en el

Mediterráneo, de nuevo podemos comprobar como la humedad que procedía del Mediterráneo Central, jugó un papel tan importante o más que el Mediterráneo Occidental.

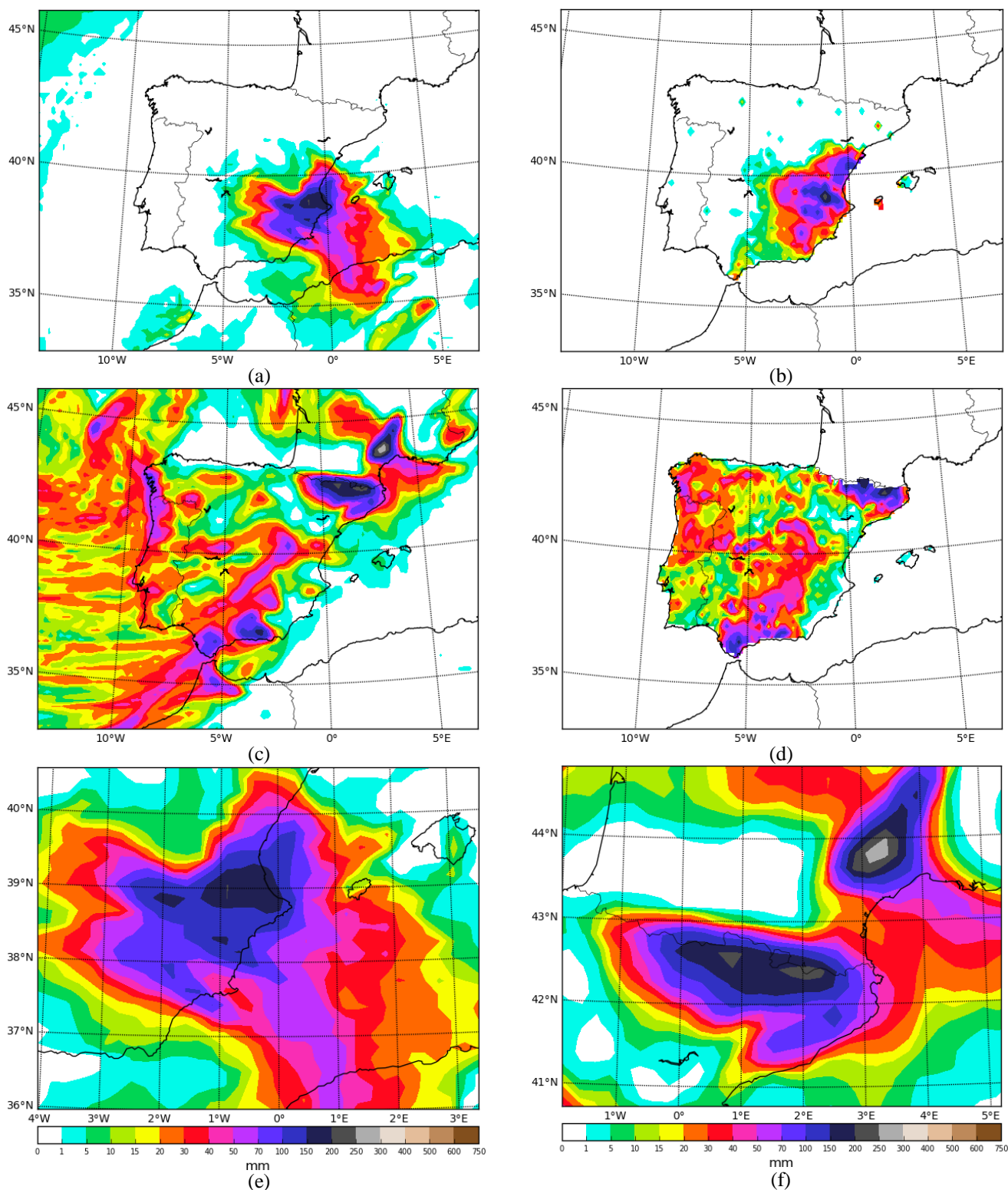


Figura 5: Las imágenes de la primera fila (a,b) muestran la precipitación simulada y observada durante el día 20 de octubre de 1982. Las de la segunda fila (c,d) muestran estas mismas variables para el día 7 de noviembre de 1982. La tercera fila (e,f) muestra los máximos de precipitación simulados para estos días.

Las dos fuentes fueron relevantes ya que cada una explica más de 30 mm del total de la precipitación caída en la zona más afectada por el episodio. Si la evaporación del Mediterráneo no estuviese presente en los cuatro días anteriores, la cantidad de precipitación registrada disminuiría en torno a unos 70 mm con lo que, dado el máximo obtenido (200.3 mm), es de esperar que el evento hubiese sido mucho

menos catastrófico. En cuanto a la precipitación procedente de la humedad advectada desde África por el borde sur del dominio, podemos comprobar que es superior a las otras dos por lo que podemos concluir que esta fue una fuente de humedad más efectiva que el Mediterráneo. En algunos puntos se acumularon más de 40 mm procedentes de esta fuente. Sin embargo, cabe destacar que estas precipitaciones

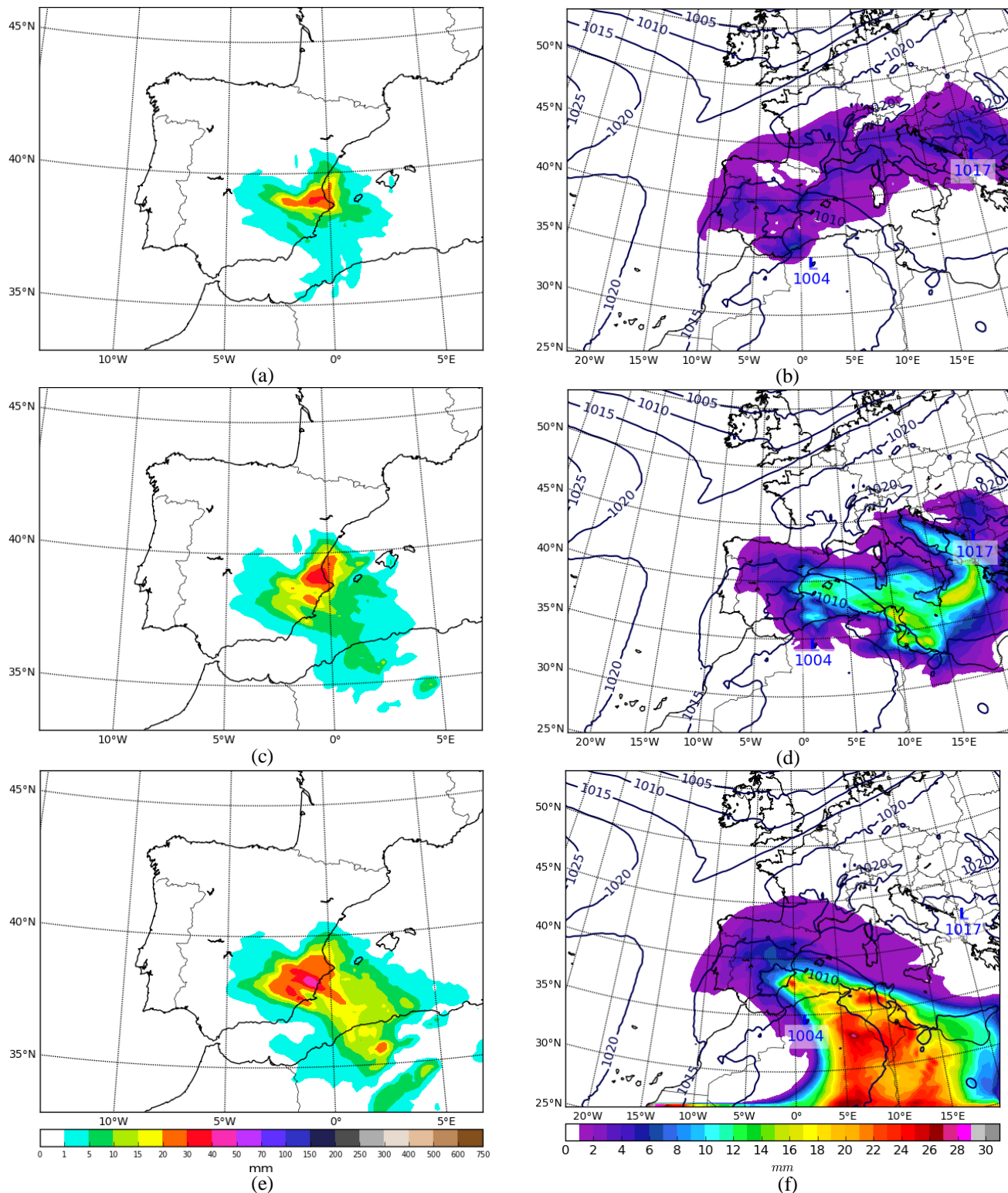


Figura 6: Las imágenes de la primera columna (a,c,e) muestran la precipitación acumulada durante el día 20 de octubre procedente de las distintas fuentes de humedad y las imágenes de la segunda columna (b,d,f) muestran la cantidad de agua precipitable (a las 12Z de este día) procedente de estas fuentes: evaporación en el Mediterráneo Occidental (a,b), evaporación en el Mediterráneo Central (c,d) y humedad advectada por el borde sur de dominio (e,f).

afectaron sobre todo al sur del Levante, y no tanto a otras regiones. Dada la posición del máximo de precipitación visto en la Fig. (5), es probable que en esa zona las otras fuentes de humedad fuesen más importantes.

Para un análisis numérico más detallado, vamos a calcular el valor del porcentaje de precipitación que procedía de cada fuente. Estos serán calculados en dos lugares determinados dentro de la zona más afectada, uno más al norte y otro más al sur. Los resultados se muestran en la Tabla I, donde R_T hace referencia a la precipitación total acumulada, R_1 a la precipitación procedente de la evaporación en el Mediterráneo Occidental, R_2 a la precipitación procedente de la evaporación en el Mediterráneo central y R_3 a la precipitación procedente de la advección de humedad desde el norte de África. Los porcentajes de precipitación (P) que proceden de estas fuentes de humedad aparecen detallados con los mismos subíndices. La variable P_T hace referencia al porcentaje obtenido al sumar las contribuciones de todas las fuentes de humedad empleadas.

Tabla I: Contribución de cada fuente de humedad a la precipitación del evento de octubre en los lugares seleccionados.

	Punto 1	Punto 2
Latitud	38.9	38.3
Longitud	-0.7	-0.7
R_T (mm)	190,3	117,7
R_1 (mm)	30.1	9.35
R_2 (mm)	30.5	17.3
R_3 (mm)	27.1	35.3
P_1 (%)	15.8	7.9
P_2 (%)	16.0	14.7
P_3 (%)	14.3	30.0
P_T (%)	46.1	52.6

Como podemos comprobar, efectivamente la advección de humedad desde África afectó más al lugar situado más al sur (Punto 2), en donde explica hasta el 30% de la precipitación total acumulada, mientras que la evaporación en el Mediterráneo contribuyó más al lugar situado más al norte (Punto 1), con porcentajes de en torno al 16% para cada región del Mediterráneo analizada. Esto se puede generalizar a toda la región, vistas las imágenes de la Fig. (6). Llama la atención que las tres fuentes de humedad juntas solo explican en torno al 50% de la precipitación total acumulada. Por lo tanto, otras fuentes, como la humedad presente sobre el Mediterráneo al inicio de las simulaciones, pudieron jugar un papel muy destacado. Un estudio más detallado, analizando más fuentes de humedad, podría explicar si esto es así.

C. Las fuentes de humedad en el evento de noviembre

Pasamos a hacer un análisis similar para el día 7 de noviembre. Analizaremos de nuevo la contribución que tuvo en la precipitación la evaporación en el Mediterráneo pero, en este caso, en vez de analizar la humedad adveccionada por el borde sur, analizaremos la humedad que llega desde el Atlántico (a todos los niveles). Los resultados obtenidos se muestran en las imágenes de la Fig. (7) (ordenadas de igual forma que en el apartado anterior).

En cuanto a la cantidad de agua precipitable a las 12Z del día 7, se deduce claramente que la aportación del Atlántico fue predominante en toda la Península debido a la circulación tan marcada del suroeste. Sin embargo, justo en el noreste peninsular y sur de Francia, en donde se recogieron las mayores acumulaciones, este predominio no es tan marcado ya que hay una contribución de cantidad de agua precipitable procedente de la humedad evaporada en el Mediterráneo. En este caso sí hay un claro efecto de proximidad ya que la cantidad de agua precipitable que llega desde el Mediterráneo Central es mucho menor que la que llega desde el Mediterráneo Occidental. Esto es así porque, en este caso, el recorrido seguido por la masa de aire que incidía sobre el noroeste peninsular era casi paralelo a la costa y próxima a esta, con un giro final hacia el oeste que la llevaba a incidir en esa zona.

En cuanto a la precipitación, un simple análisis visual de las imágenes de la Fig. (7) y Fig. (5) nos muestra que la precipitación acumulada total y la procedente del Atlántico es casi la misma en la Península. Esto nos confirma que en la mayor parte de esta, la precipitación caída procedía exclusivamente del Atlántico. Sin embargo, si observamos la precipitación procedente de la evaporación en el Mediterráneo, vemos que sí hubo una contribución en la precipitación caída en el noreste y sur de Francia (de acorde con lo comentado para la cantidad de agua precipitable). Esta contribución afectó de forma distinta a esta región, en tanto que podemos observar que fue más importante al este de los Pirineos, interior de Cataluña, y sur de Francia mientras que fue mucho más reducida en el Pirineo Central y Occidental. Parece que esta contribución fue especialmente destacable en el macizo del Aigoual, en el sur de Francia. Además, de nuevo vemos que la contribución del Mediterráneo Central fue mucho menos destacada que la del Mediterráneo Occidental.

Un análisis numérico similar al empleado en el evento de octubre nos confirmará los porcentajes de precipitación que aportaron cada fuente. De nuevo escogeremos dos lugares para el estudio, en este caso, uno situado sobre el Pirineo Central y otro sobre el macizo del Aigoual. Las variables R_3 y P_3 harán referencia, en este caso, a la precipitación y el porcentaje de precipitación procedente del Atlántico, respectivamente. El Punto 1 hace referencia al lugar situado en el Pirineo Central y el Punto 2 al lugar situado en el macizo del Aigoual.

Tabla II: Contribución de cada fuente de humedad a la precipitación del evento de noviembre en los lugares seleccionados.

	Punto 1	Punto 2
Latitud	42.4	43.8
Longitud	0.8	3.1
R_T (mm)	199.8	272.8
R_1 (mm)	17.3	55.3
R_2 (mm)	0.0	13.1
R_3 (mm)	163.2	116.3
P_1 (%)	8.7	20.3
P_2 (%)	0.0	4.8
P_3 (%)	81.7	42.6
P_T (%)	90.4	67.7

Podemos comprobar que la humedad del Atlántico fue determinante en los dos lugares, sin embargo, mientras que en el Pirineo Central fue la fuente principal de precipitación, superando valores del 80% de la precipitación total, en el macizo del Aigoual esta fuente, aún siendo muy importante, no lo fue tanto, pues a ella le corresponden menos del 50% de

las precipitaciones. Justo en esto punto donde el predominio del Atlántico no es tan marcado, vemos que entra en juego la humedad procedente de la evaporación en el Mediterráneo. De los 272.8 mm que se obtienen en el lugar situado en el macizo de Aigoual, 55.3 mm (un 20.3%) procedían de la evaporación en el Mediterráneo Occidental. Incluso alguna

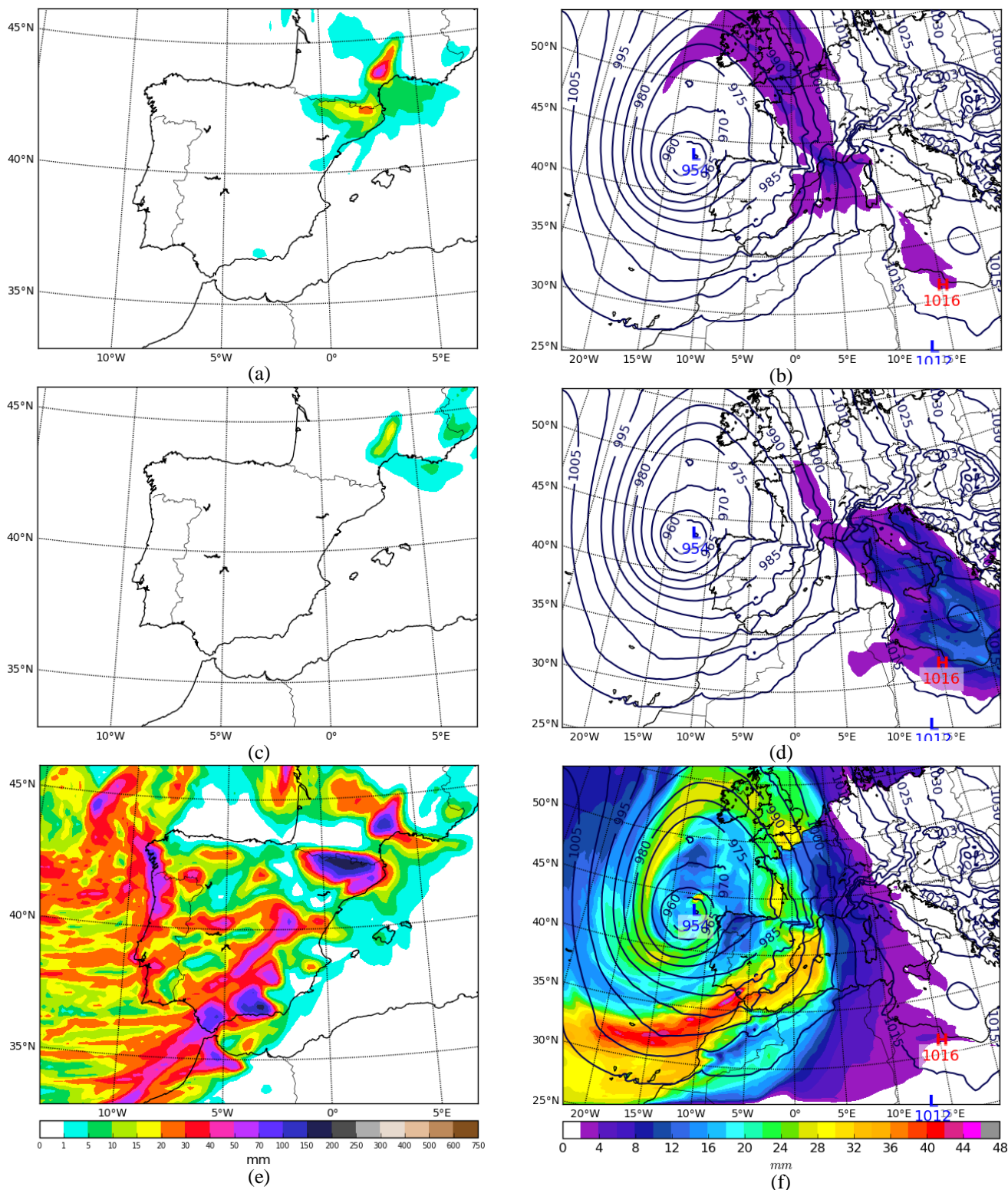


Figura 7: Las imágenes de la primera columna (a,c,e) muestran la precipitación acumulada durante el día 7 de noviembre procedentes de las distintas fuentes de humedad y las imágenes de la segunda columna (b,d,f) muestran la cantidad de agua precipitable (a las 12Z de este día) procedente de estas fuentes: evaporación en el Mediterráneo Occidental (a,b), evaporación en el Mediterráneo Central (c,d) y humedad procedente del Atlántico a todos los niveles (e,f).

pequeña cantidad de precipitación recogida en esta zona venía de la evaporación en el Mediterráneo Central. Por tanto, el papel del Mediterráneo como fuente de humedad procedente de la evaporación, fue muy limitado en muchas regiones, como el Pirineo Central (contribuyendo menos del 10%), sin embargo, en otras regiones como el macizo del Aigoual, la evaporación en el Mediterráneo jugó un papel bastante importante (más del 25%) al tiempo que la influencia del Atlántico era menor.

Por último, destacar que mientras en el Pirineo Central estas tres fuentes de humedad explican la mayoría de la precipitación caída (más de un 90%), en el caso del macizo del Aigoual, un 30% de las precipitaciones no procedían de ninguna de estas tres fuentes. Podría ser de nuevo interesante, haciendo un estudio más detallado, saber el papel jugado por otras fuentes de humedad, como la que estaba presente sobre el Mediterráneo al inicio de las simulaciones. Esto podría aclarar si el papel jugado por este como fuente de humedad fue superior a lo que nuestros cálculos reflejan, ya que hay que tener en cuenta que en nuestro trabajo únicamente analizamos la humedad evaporada en el Mediterráneo los cuatro días previos a la catástrofe.

V. CONCLUSIONES

- En el evento de octubre, que afectó principalmente al Levante, hubo una clara inyección de humedad desde África, especialmente importante en niveles medios y altos, que explica hasta el 30% de la precipitación acumulada en algunos de los lugares más afectados. Es posible que esta humedad fuera llevada directamente hasta África desde el Atlántico o que fuese inyectada por el chorro subtropical.
- En este evento la humedad evaporada tanto en el Mediterráneo Occidental como en el Mediterráneo Central tuvieron una importancia similar en las precipitaciones recogidas, sin influir que el Mediterráneo Occidental estuviese más próximo a la zona afectada.
- Esta fuente de humedad fue también importante ya que a la suma de la evaporación en el Mediterráneo Occidental y Central en los cuatro días anteriores al día de la catástrofe (día 20) le corresponde en torno a otro 30% de las precipitaciones en muchos puntos.
- Las tres fuentes de humedad explican en torno al 50% de la precipitación caída, lo que nos hace indicar que otras fuentes, como la humedad presente al inicio de las simulaciones sobre el Mediterráneo, tuvieron que tomar un papel importante.
- En el evento de noviembre, la principal fuente de humedad fue el Atlántico, al que le corresponden el total de las precipitaciones caídas en la mayor parte de la Península.
- Sin embargo, en Cataluña, Andorra y sur de Francia (las zonas más afectadas), esta influencia del Atlántico no es tan marcada. Si bien es cierto que en el Pirineo Central hemos calculado que más del 80% de las precipitaciones venían del Atlántico, en el macizo del Aigoual, al sur de

Francia, la influencia del Atlántico se vio limitada al 40% de las precipitaciones.

- En estas zonas donde la influencia del Atlántico no fue tan clara, la evaporación en el Mediterráneo en los cuatro días anteriores a la catástrofe (día 7) jugó un papel importante a la hora de dar lugar a las precipitaciones.
- En este caso la influencia del Mediterráneo Occidental, más próximo a la zona afectada, jugó un papel mucho más importante que el Mediterráneo Central.
- El análisis numérico llevado a cabo nos muestra que en el máximo de precipitación simulado (272.8 mm), sobre el macizo del Aigoual, la contribución de la humedad evaporada en el Mediterráneo Occidental al total de la precipitación fue de 55.3 mm mientras la contribución del Mediterráneo Central fue de 13.1 mm. En total el 25.1% de la precipitación registrada en ese lugar procedía de la evaporación en el Mediterráneo, por lo que concluimos que fue una fuente importante.
- Finalmente, en la zona del Pirineo Central más del 90% de la precipitación procedía de estas tres fuentes de humedad, sin embargo, este porcentaje queda reducido a en torno un 70% en el macizo del Aigoual. Esto nos indica que en esta zona otras fuentes de humedad tuvieron que tomar un papel relevante.

Agradecimientos

A mis dos tutores, M. Carmen Llasat Botija y Gonzalo Míguez Macho. Al Grupo de Física No Lineal de la Universidad de Santiago de Compostela y, en especial, a Sabela Regueiro Sanfiz y Jorge Eiras Barca. A todos ellos, gracias por la ayuda y el buen trato que he recibido.

VI. REFERENCIAS

- Albentosa, L. M. (1983). Precipitaciones excepcionales e inundaciones durante los días 6 al 8 de noviembre de 1982 en Cataluña. *Estudios Geográficos*, 11, 170-171.
- Belo-Pereira, M., Dutra, E., & Viterbo, P. (2011). Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20).
- Bosilovich, M. G., & Schubert, S. D. (2002). Water vapor tracers as diagnostics of the regional hydrologic cycle. *Journal of Hydrometeorology*, 3(2), 149-165.
- Dana, D. F. G., Blasco, D. R. F., & Perez, D. A. R. (1982). Situación atmosférica causante de lluvias torrenciales durante los días 19 al 21 de octubre de 1982 en el Levante español. Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones.
- Dominguez, F., Míguez-Macho, G., & Hu, H. (2016). WRF with Water Vapor Tracers: a Study of Moisture Sources for the North American Monsoon. *Journal of Hydrometeorology*, (2016).

- Eltahir, E. A., & Bras, R. L. (1996). Precipitation recycling. *Reviews of Geophysics*, 34(3), 367-378.
- Gimeno, L., Stohl, A., Trigo, R. M., Dominguez, F., Yoshimura, K., Yu, L., ... & Nieto, R. (2012). Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation. *Reviews of Geophysics*, 50(4).
- Joel, A., Richard, K., Jianhui, W., & Harald, K. (2016). Evaporation tagging and atmospheric water budget analysis with WRF: A regional precipitation recycling study for West Africa. *Water Resources Research*.
- Maddox, R. A. (1980). Mesoscale convective complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61(11), 1374-1387.
- Míguez-Macho, G., Rios-Entenza, A., & Dominguez, F. (2013, December). The Impact of Soil Moisture and Evapotranspiration Fluxes on the Spring Water Cycle in the Iberian Peninsula: a Study with Moisture Tracers in WRF. In *AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 1, p. 05)*.
- Llasat, M. C. (1987). Episodios de lluvias copiosas en Catalunya: génesis, evolución y factores coadyuvantes. *Universitat de Barcelona*.
- Llasat, M. C., & Puigcerver, M. (1989). Características meteorológicas de las inundaciones en Cataluña. *Rev. de Obras Públicas*, April, 301-306.
- Llasat, M. C. (1990). Influencia de la orografía y de la inestabilidad convectiva en la distribución espacial de lluvias extremas en Cataluña. *Acta geológica hispánica*, 25(3), 197-208.
- Llasat, M. C. (1991). Gota fría. *Boixareu Universitaria*, (6), 165.
- Rios-Entenza, A., Soares, P. M., Trigo, R. M., Cardoso, R. M., & Míguez-Macho, G. (2014). Moisture recycling in the Iberian Peninsula from a regional climate simulation: spatiotemporal analysis and impact on the precipitation regime. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(10), 5895-5912.
- Riosalido, R., Rivera, A., & Martin, F. (1988). Development of a mesoscale convective system in the Spanish Mediterranean Area. In *Proc. 7th Meteosat Scientific Users' Meeting*, Madrid (pp. 27-30).
- Rivera Pérez, Á., & Martínez López, C. (1983). Tratamiento digital de imágenes Meteosat de alta resolución: aplicación al caso de las inundaciones de Levante en octubre de 1982.
- Rivera, A., & Riosalido, R. (1986). Mediterranean convective systems as viewed by Meteosat. A case study. In *Proc. 6th Meteosat Scientific Users Meeting*, Amsterdam (pp. 25-27).
- Rivera, A., (2012). Las lluvias torrenciales del 20 de octubre de 1982 y el inicio de la meteorología de mesoescala en España. XVIII Jornadas de Meteorología 'Eduard Fontserè', Barcelona.
- Romero, R., Doswell III, C. A., & Ramis, C. (2000). Mesoscale numerical study of two cases of long-lived quasi-stationary convective systems over eastern Spain. *Monthly Weather Review*, 128(11), 3731-3751
- Skamarock, W. C., et al. (2008), A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Trapero, L., Bech, J., Duffourg, F., Esteban, P., & Lorente, J. (2013). Mesoscale numerical analysis of the historical November 1982 heavy precipitation event over Andorra (Eastern Pyrenees). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2969-2990.
- Trenberth, K. E. (1999). Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation. *Journal of Climate*, 12(5), 1368-1381.