

LLUVIAS TORRENCIALES

La influencia determinante de los factores que intervienen en el desarrollo de lluvias torrenciales puede investigarse a través de técnicas de simulación numérica

Clemente Ramis, Romualdo Romero, Víctor Homar y Sergio Alonso

Grupo de Meteorología. Departamento de Física. Universitat de les Illes Balears. Palma de Mallorca

Hace ya varias décadas que la simulación numérica (reproducción aproximada mediante un ordenador de un fenómeno físico, químico, económico, sociológico, etc.), se introdujo tímidamente como una tercera vía de investigación y, poco a poco, se ha situado junto a las otras dos vías clásicas: la experimentación y el desarrollo teórico. Hoy en día, como consecuencia de muchos factores, pocas son las disciplinas científicas que no utilizan la simulación numérica como una herramienta fundamental de investigación o como complemento de los métodos clásicos. Gracias a la simulación numérica, algunas disciplinas han recibido un impulso extraordinario ya que, por su propio carácter, les está vedado alguno de los métodos tradicionales. Las ciencias de la Naturaleza han resultado especialmente favorecidas y en particular la Meteorología. En la atmósfera se hacen observaciones a partir de las cuales se pueden hacer deducciones de su comportamiento así como estimaciones sobre su evolución, pero es imposible que la atmósfera repita un mismo estado para poder realizar más y/o mejores medidas de las variables. Además, el número de observaciones es siempre limitado y, por lo tanto, no es posible tener información de todos los procesos que están ocurriendo en la atmósfera en un momento determinado. No resulta difícil entender, entonces, que para conocer la evolución futura de la atmósfera a partir de un instante dado no se puede hacer uso de la experimentación. La vía teórica tampoco aporta soluciones al problema por sí sola; las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento atmosférico son no lineales y no admiten solución analítica. La simulación numérica resulta pues fundamental. De hecho la primera simulación numérica con fines pacíficos, realizada tras la segunda guerra mundial con el ordenador ENIAC en Aberdeen, Maryland (EE.UU.), fue de la circulación atmosférica mediante un modelo meteorológico sencillo.

Los modelos meteorológicos numéricos usados actualmente en la Meteorología operativa son muy complejos, simulan el comportamiento atmosférico con un alto grado de fiabilidad, al menos para intervalos de tiempo no excesivamente largos (3-4 días) y constituyen el punto de apoyo de las predicciones meteorológicas que llegan al público. A pesar de su complejidad, no son capaces de resolver algunos problemas que conlleva la predicción meteorológica, varios de ellos

asociados a razones conocidas (por ejemplo que la atmósfera es un sistema caótico). El desarrollo de lluvias muy intensas, generalmente producidas por nubes de desarrollo vertical o convectivas, constituye uno de los problemas no resueltos. La mayoría de las veces el tamaño de tales nubes es demasiado pequeño para que el modelo las simule explícitamente y, en consecuencia, sus efectos deben imponerse de una forma indirecta. Lo mismo sucede con otros procesos atmosféricos que se escapan a la resolución del modelo, como por ejemplo los fenómenos turbulentos. Otro tipo de modelos, generalmente usados en investigación, es capaz de simular explícitamente las nubes convectivas. Para ello deben tener una gran resolución espacial (lo cual limita el área de aplicación) e incorporar procesos físicos generalmente no considerados en los de aplicación operativa. Por estas razones precisan de una potencia de cálculo muy superior, lo cual limita su aplicabilidad operativa.

Las lluvias torrenciales (más de 200 mm en 24 horas) son, como se sabe, una característica climática de la zona mediterránea española. En efecto, el meteorólogo Font Tullot en su libro *Climatología de España y Portugal* indica que la mayoría de los observatorios pluviométricos de Cataluña, Valencia, Murcia y sur de Andalucía han observado alguna vez esta cantidad (Figura 1). En las Islas Baleares también se han registrado cantidades semejantes. La mayor parte de dichas precipitaciones se producen a finales de verano o en otoño pero también pueden darse en invierno. Es relativamente frecuente que las lluvias torrenciales den lugar a inundaciones con elevadas pérdidas económicas tanto en la producción primaria como en industrias, vías de comunicación y viviendas, además del impacto que producen sobre el terreno al arrastrar por escorrentía grandes cantidades de tierra. En algunas ocasiones hay que lamentar también pérdidas de vidas humanas.

Las situaciones meteorológicas de gran escala que suelen dar lugar a este tipo de lluvias en la zona mediterránea española son conocidas por los meteorólogos desde hace años e incluso existe un modelo conceptual que permite explicar las razones de tales precipitaciones. Los estudios realizados demuestran que, en la mayoría de los casos, hay en superficie un anticiclón hacia Europa central y una depresión hacia el sur de la península Ibérica; ambos sistemas béricos producen un flujo de componente Este sobre el Mediterráneo, que transporta aire cálido y húmedo hacia la costa española. En niveles medios troposféricos (500 hPa, unos 5500 metros) una depresión está situada al sudoeste de la península Ibérica que envía aire húmedo sobre la costa mediterránea española. La existencia de aire muy húmedo en toda la columna atmosférica es un ingrediente necesario para que la convección sea eficaz, es decir, capaz de producir lluvias intensas. En un ambiente muy húmedo los productos de condensación que precipitan desde grandes alturas no llegan a evaporarse en su caída. El Mediterráneo, que está muy caliente a finales de verano y en otoño, aporta vapor de agua al aire en contacto con él. El aire cálido y húmedo al llegar a la costa mediterránea es obligado a ascender por la orografía costera y da lugar a la formación de las nubes convectivas. Este modelo

conceptual (véase Figura 2) contiene una gran cantidad de procesos físicos coherentes entre sí y unidos representan un mecanismo de desarrollo de convección y de lluvias intensas.

Vistas así las cosas, podría parecer sencillo predecir, con cierta antelación (24-48 horas), las lluvias torrenciales en el área mediterránea española mediante los campos meteorológicos previstos y la aplicación del anterior modelo conceptual. Sin embargo quedan varias preguntas que contestar para que la predicción sea útil: ¿dónde se darán las lluvias?, ¿qué cantidades de precipitación van a producirse?, ¿a qué hora se darán las mayores lluvias?. El modelo conceptual no responde a estas preguntas y el subjetivismo y la experiencia del predictor deben jugar un papel decisivo. Muchas otras cuestiones podrían añadirse a la lista si deseamos considerar procesos que siguen a la lluvia intensa: ¿cuál es la orografía de la región?, ¿determina ésta la cuenca de un río?, ¿cuál será la respuesta de la cuenca a la precipitación caída?, etc. Sin entrar en los procesos hidrológicos y restringiéndonos únicamente a los meteorológicos, se puede afirmar que los modelos meteorológicos numéricos pueden ayudar a contestar parcialmente, con sólidos fundamentos, a las anteriores preguntas. Todavía más, el modelo numérico nos permite validar o modificar, si es preciso, el modelo conceptual y estudiar si la orografía es, en efecto, la causante de la convección y si realmente el Mediterráneo es la fuente que alimenta con vapor de agua el aire que incide contra la orografía costera. Por medio de tres ejemplos concretos, se mostrará posteriormente la capacidad de los modelos numéricos de resolver algunas de las cuestiones planteadas.

Las predicciones para plazos más cortos, del orden de horas, permiten afinar mucho más y determinar con bastante precisión las áreas que se verán afectadas por los sistemas meteorológicos productores de lluvias intensas. Sin embargo la cantidad de lluvia no es predecible con exactitud pues debe hacerse indirectamente intentando identificar la capacidad potencial de los sistemas convectivos para producir precipitación. Para ello el meteorólogo dispone, además de las observaciones meteorológicas desde tierra (viento, presión, temperatura, humedad, etc.), de observaciones de las nubes desde el espacio mediante los satélites meteorológicos (el Meteosat produce una imagen cada 30 minutos) y desde tierra mediante el Radar (generalmente una observación cada 10 minutos). La evolución temporal de las señales de estos sensores remotos permite estimar la potencia de las nubes convectivas, el estado en su ciclo de vida e incluso la intensidad de la precipitación que producen en un momento determinado. Pero hay que tener en cuenta que el satélite y el radar realizan observaciones, no predicciones. Las predicciones se realizan sobre la base de estas observaciones y por lo tanto están sujetas a indeterminaciones. Estas predicciones a plazo muy corto, siendo más fiables, presentan la desventaja de que, precisamente por ser de pocas horas, no permiten una respuesta amplia para controlar y mitigar las pérdidas que puedan derivarse de las posibles inundaciones posteriores. Este motivo justifica los esfuerzos que actualmente se están realizando para intentar mejorar la predicción de las lluvias torrenciales a plazos más largos que permitan, por lo tanto, respuestas más adecuadas.

Se conocen muchos casos de lluvias intensas en la zona mediterránea española y todos ellos presentan un gran interés desde el punto de vista meteorológico. A continuación se describen brevemente tres de ellos en los cuales la precipitación diaria superó los 200 mm en algún punto. Aunque tres casos no son suficientes para cubrir este tipo de eventos, éstos son los que serán comentados en el apartado posterior referente a las simulaciones numéricas. De cualquier modo, representan ejemplos típicos.

a) 12 de Noviembre de 1988.

Durante la tarde y primeras horas de la noche del 12 de Noviembre de 1988 se produjeron lluvias muy intensas en Cataluña. Hubo inundaciones como consecuencia del desbordamiento de algunos ríos. Las pérdidas fueron muy elevadas e incluso murieron once personas. Las cantidades de lluvia registradas desde el día 12 a las 8 de la mañana hasta el día 13 a las 8 de la mañana superaron los 100 mm en una zona próxima a la costa norte con valores puntuales de 200 mm (Figura 3). La imagen del satélite Meteosat a las 12 horas (Figura 4) muestra un sistema nuboso sobre Cataluña, que alcanza grandes alturas, con nubes más bajas sobre el mar Mediterráneo. La situación meteorológica a las 12 horas se ajusta en muchos aspectos a la indicada en el modelo conceptual. En efecto, en los niveles próximos al suelo (por ejemplo 1000 hPa, Figura 5a) hay aire cálido y húmedo sobre el Mediterráneo que se dirige hacia Cataluña mientras que a niveles más altos (500 hPa, Figura 5b) hay una depresión sobre el sur de la península Ibérica que favorece la entrada de aire húmedo a estos niveles.

b) 28 de Septiembre de 1994

La imagen del Meteosat de las 12 horas (Figura 6) muestra dos sistemas convectivos sobre el Mediterráneo. Uno de ellos se movió a lo largo de la costa mediterránea mientras el otro avanzó hacia el nordeste sobrepasando las Islas Baleares. Ambos sistemas dieron lugar a precipitaciones importantes sobre tierra (más de 140 mm en algunos puntos), como puede verse en la Figura 7, pero gran parte de la precipitación tuvo lugar sobre el mar, como se deduce de la Figura 8 que muestra la lluvia calculada a partir de los datos del Radar instalado en Valencia. La situación meteorológica correspondiente al día 28 a las 12 horas muestra que en niveles bajos hay un flujo del Este de aire cálido y húmedo sobre el Mediterráneo y en niveles medios una depresión muy profunda sobre el sudoeste peninsular produciendo flujo del Sur sobre el Mediterráneo occidental y la mitad oriental de la península Ibérica.

c) 9 y 10 de Octubre de 1994

El pueblo de Alforja, en Tarragona, fue el que sufrió las lluvias más intensas del temporal que se desencadenó sobre Cataluña el 9 de octubre y que continuó el día 10. En dicho lugar, durante estos dos días, se recogieron 450 mm, 250 de los cuales en un intervalo de tan sólo dos horas y media. La Figura 9 muestra las cantidades de lluvia recogidas desde las 8 de la mañana del día 10 hasta las 8

de la mañana del día siguiente. Nuevamente las inundaciones fueron importantes y murieron ocho personas. La imagen del satélite Meteosat de las 06 horas del día 10 (Figura 10) muestra que una estructura convectiva con temperaturas muy bajas en su cima, y por lo tanto alcanzando grandes alturas, está localizada sobre el sur de Cataluña. La situación meteorológica nos indica la existencia de una masa de aire cálido y húmedo sobre el Mediterráneo que es transportada hacia la costa mediterránea por los vientos del Este y del Sudeste presentes sobre el mar. En niveles medios hay una depresión al sudoeste de la península Ibérica provocando vientos del Sur sobre la costa mediterránea española y aportando aire húmedo desde latitudes más bajas.

Se observa, pues, que los tres casos presentan, a grandes rasgos, características comunes que son similares a las del modelo conceptual antes descrito. Los mapas de isoyetas nos indican, sin embargo, que las precipitaciones más intensas se produjeron en lugares diferentes.

Un modelo meteorológico numérico es un esquema físico-matemático del comportamiento de la atmósfera que se expresa mediante ciertas ecuaciones escritas de forma inteligible para un ordenador. Si se parte de un estado inicial de la atmósfera, el ordenador puede determinar el estado de ésta al cabo de cierto tiempo, resolviendo dichas ecuaciones. El estado de la atmósfera en un instante determinado viene representado por la distribución tridimensional de las variables físicas que la caracterizan, como por ejemplo presión, temperatura, humedad, movimiento (viento). Las ecuaciones a resolver indican como varían estas magnitudes al transcurrir el tiempo (ecuaciones de pronóstico), conociendo las fuerzas que obligan a que cambien. En realidad dichas ecuaciones deberían aplicarse a cada punto de la atmósfera pero esto es absolutamente imposible por lo que, en el modelo, se aplican a un número limitado de puntos. Además, existen ciertas restricciones de índole matemática que impiden obtener en unos pocos pasos de tiempo el estado final si el plazo de predicción es superior a algunas horas, por lo que las ecuaciones de pronóstico deben aplicarse muchas veces, partiendo cada vez de los resultados obtenidos en el paso anterior.

Para determinar los puntos a los cuales aplicar las ecuaciones, en los modelos de área limitada, que como su nombre indica se aplican a una pequeña porción de la Tierra -en oposición a los modelos globales, que se aplican a toda la Tierra- se construye una malla tridimensional y sólo se consideran los puntos en los nudos de la malla. Horizontalmente los nudos están separados entre sí una cierta distancia que se conoce como resolución del modelo. Verticalmente se consideran varios niveles para dar cuenta de la estructura tridimensional de la atmósfera (Figura 11).

La orografía es un factor que, como se ha visto, influye decisivamente en los movimientos atmosféricos, por lo que se incluye una versión simplificada de ella a la misma resolución del modelo. La introducción de la orografía permite distinguir entre tierra y mar. La interacción entre

el suelo y la atmósfera generalmente se introduce mediante un submodelo de suelo que tiene en cuenta la textura del suelo, la temperatura, el contenido de agua, el tipo, cantidad y estado de vegetación que lo cubre, etc.. También debe conocerse la energía solar que alcanza el suelo por lo que debe incorporarse un submodelo de radiación. La energía que llega al suelo depende de la composición de la atmósfera y de la cantidad y clase de nubes que cubren el cielo en un momento determinado. La evaporación desde el mar se calcula por medio de la temperatura de su superficie y la humedad del aire que está sobre él. La capacidad de difusión vertical de la atmósfera también se tiene en cuenta por medio de expresiones que permiten estimarla en términos de la estabilidad de estratificación del aire y la cizalladura del viento.

Los procesos de condensación del vapor de agua para producir nubes y lluvias reciben un tratamiento especial, no sólo por su propia importancia como elemento de predicción, sino porque la liberación de calor latente influye en la posterior evolución del resto de variables. Se considera la posibilidad de que existan nubes convectivas y nubes estratificadas. Como las nubes se producen donde hay movimientos ascendentes, la velocidad vertical es una variable crítica en los modelos numéricos. Atendiendo a su determinación se distinguen dos tipos de modelos: hidrostáticos y no-hidrostáticos. Los primeros son aquellos en los cuales la velocidad vertical se deduce a partir de otras variables del modelo (en un proceso conocido como diagnóstico), mientras que en los no-hidrostáticos la velocidad vertical tiene su propia ecuación de pronóstico en el modelo.

Los modelos utilizados para las simulaciones que se van a presentar son el SALSA (Simulation sur Aire Limitée de Systèmes Atmosphériques), desarrollado en Estados Unidos y Francia, y el HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*) desarrollado por varios países europeos (Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Holanda, Irlanda, Islandia, Noruega y Suecia), actualmente utilizado por el Instituto Nacional de Meteorología de España como modelo operativo para las predicciones de hasta 48 horas. Ambos modelos son hidrostáticos e incluyen los procesos físicos comentados.

Hemos realizado varias simulaciones de los tres casos de lluvia torrencial descritos anteriormente. En el primer y tercer caso se ha utilizado el modelo SALSA y en el segundo el HIRLAM. El SALSA se ha aplicado a un área de $1800 \times 1800 \text{ km}^2$ con centro en $1^\circ \text{ E } 41^\circ \text{ N}$, con una resolución de 20 km y se han considerado 31 niveles en la dirección vertical que se extienden desde la superficie de la Tierra hasta unos 40 km de altura. El área incluye los sistemas montañosos de la península Ibérica, parte de los Alpes y del Atlas y prácticamente todo el Mediterráneo occidental. El área considerada en el modelo HIRLAM es mayor, cubriendo aproximadamente $6000 \times 3000 \text{ km}^2$ con una resolución de 30 km y 31 niveles en la vertical. En ambos modelos se han incorporado los

diferentes tipos de suelo y de vegetación presentes en la región. La situación meteorológica inicial y la temperatura superficial del mar se han obtenido de los análisis del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio, sito en Reading (Reino Unido). Aunque los resultados de las simulaciones incluyen una gran cantidad de productos (campos meteorológicos, evaporación desde el mar, temperatura del suelo, etc.) vamos a presentar y comentar solamente los campos de precipitación obtenidos.

Para el caso del 12 de Noviembre de 1988 se ha realizado una simulación de 12 horas, desde las 12 hasta las 24 horas. El campo de precipitación obtenido se puede ver en la Figura 12. El modelo da lluvias sobre Cataluña y sobre el mar, aunque las mayores cantidades están localizadas en el norte de Cataluña. Sobre la costa se obtienen cantidades considerables pero inferiores a las observadas en la realidad. Si comparamos el campo de precipitación del modelo con el observado (Figura 3), se aprecia una aceptable correlación espacial, lo que nos indica que este resultado es una buena guía para el predictor. Análogamente el modelo indica que la mayor parte de la precipitación es de origen convectivo, en concordancia con lo que puede deducirse de las imágenes del satélite Meteosat (Figura 4).

Para el segundo caso, 28 de Septiembre de 1994, se ha realizado una simulación de 30 horas, desde las 00 horas del 28 a las 06 horas del 29. El campo de precipitación simulado entre las 06 del 28 y las 06 del 29 se puede ver en la Figura 13. Se observa que la mayor precipitación se encuentra sobre el mar, cerca de la costa de Valencia, con una zona de precipitación importante sobre tierra. Puede también observarse que las lluvias sobre Mallorca no son simuladas por el modelo. Sin embargo éste es capaz de reproducir, excepto en los detalles, la distribución de lluvia que se dedujo del radar de Valencia (Figura 8). A pesar de que el modelo es incapaz de simular el segundo núcleo convectivo que pasó por encima de las Baleares, puede decirse que sitúa correctamente los centros de mayor precipitación. Se puede también observar que las cantidades que da el modelo se aproximan, en este caso, a las estimadas con información radar. Hay que concluir, también, que los resultados del modelo son una buena guía para la predicción.

El tercer caso considerado, 9 y 10 de Octubre de 1994, se simuló con dos experimentos. El primero desde las 00 horas del 9 hasta las 06 del 10 y el segundo desde las 00 del 10 hasta las 06 del 11. Únicamente se presenta el campo de precipitación simulado entre las 06 horas del día 10 y las 06 del 11 (Figura 14). Para el día 9, el modelo dio las mayores precipitaciones en la costa de Valencia. Para el día 10, las mayores precipitaciones se trasladan hacia la zona costera catalana. También en este caso las cantidades que da el modelo son inferiores a las observadas, pero la localización espacial correlaciona bien con la precipitación observada. La mayor parte de la precipitación simulada por el modelo es convectiva, de acuerdo con la información que se puede obtener del Meteosat (Figura 10).

Como se ha indicado anteriormente, la simulación numérica permite estudiar la influencia de los diversos factores en el desarrollo de la lluvia intensa. Es posible realizar simulaciones (experimentos numéricos) en diferentes condiciones y, comparando los resultados obtener información sobre la influencia de los factores que interesan. En particular, se pueden realizar simulaciones sin considerar la orografía con lo cual se elimina la influencia de las montañas en el movimiento atmosférico y en el desarrollo de tormentas; o se puede prescindir de la evaporación desde el mar eliminando así una fuente de vapor de agua hacia la atmósfera. En los experimentos descritos a continuación se han considerado precisamente estos dos factores porque son los que tiene en cuenta el modelo conceptual explicado anteriormente y porque la acción física que conllevan sugiere que deben ser fundamentales.

Si se desea estudiar el efecto de los dos factores mencionados, no basta, como a primera vista parece, con realizar tres simulaciones (una considerando el modelo completo (que llamaremos f_{12}), otra en la cual se ha eliminado la orografía y una tercera en la que se prescinda de la evaporación). En efecto, por ser no lineales las ecuaciones que rigen el comportamiento atmosférico, si se procediera así se estaría dejando de considerar el efecto sinérgico que puede representar la interacción entre la orografía y la evaporación. Si se compara el experimento completo con el que no considera la orografía no es posible extraer el efecto único de ésta última, pues en el experimento completo está incluido el efecto de interacción. Para resolver este problema es preciso realizar cuatro simulaciones en nuestro caso. Además del experimento completo f_{12} debemos considerar otro, f_0 , en el cual no se considera ni orografía ni evaporación desde el mar; un tercero, f_1 , con orografía y sin evaporación y finalmente, un cuarto experimento f_2 , sin orografía pero sí con evaporación. Podemos entonces separar la influencia de cada uno de los factores e incluso el efecto de interacción entre ambos, de la forma siguiente:

Efecto de la orografía: $f_1 - f_0$

Efecto de la evaporación: $f_2 - f_0$

Efecto de la interacción: $f_{12} - (f_1 + f_2) + f_0$

Dicha técnica de separación de factores se ha aplicado a nuestros casos de estudio. Se presentan a continuación algunos resultados.

Para el caso de las precipitaciones de Cataluña del 12 de Noviembre de 1988, el campo de precipitación obtenido con el experimento f_0 se muestra en la Figura 15 y el efecto de la orografía sobre la precipitación en la Figura 16. Puede observarse, comparando ambas con el resultado obtenido en el experimento completo (Figura 12), que la orografía produce un efecto importante, en particular la orografía costera, que focaliza la precipitación en una franja próxima a la costa. El efecto de la evaporación por sí solo es prácticamente despreciable. Un resultado importante es que el efecto sinérgico, que también localiza su acción positiva sobre la costa catalana, es notable pero

no decisivo en este caso. Los experimentos demuestran que la dinámica meteorológica a gran escala es débil, pues no implica movimientos ascendentes importantes y por lo tanto condensación abundante ni formación de lluvia intensa (Figura 15), que la orografía representa un factor fundamental al producir las ascensiones suficientes para que el vapor de agua condense abundantemente sobre las zonas costeras (Figura 16) y que el efecto sinérgico de ambos factores resulta notable pero no decisivo. La importancia moderada del efecto sinérgico puede explicarse observando los campos iniciales. Se comprueba que inicialmente la atmósfera a niveles bajos ya tenía una humedad alta, es decir, contenía suficiente vapor de agua para dar lugar a precipitaciones importantes en presencia de orografía. Este resultado no se ajusta totalmente al modelo conceptual explicado anteriormente, que atribuye mucha importancia al efecto de interacción, pues hemos visto que la evaporación desde el mar durante las horas previas al evento no ha sido decisiva.

Las precipitaciones intensas de la costa de Valencia de los días 28 y 29 de Septiembre de 1994 representan otro ejemplo interesante. Como se ha visto anteriormente, en este caso las nubes convectivas se desarrollaron principalmente sobre el mar. Parece entonces que el efecto orográfico tiene que jugar aquí un papel secundario. El campo de precipitación obtenido en la simulación sin orografía puede verse en la Figura 17. Las cantidades son importantes y la localización de los centros más intensos es parecida a la del experimento completo (Figura 13). El efecto de la orografía está representado en la Figura 18. Vemos pues que la acción de la orografía, más que provocar la precipitación y focalizarla en una región determinada, se limita a producir pequeñas modificaciones en la distribución espacial. Hay que concluir, pues, que en este caso existen mecanismos dinámicos de gran escala que producen velocidades verticales importantes en la atmósfera los cuales disparan la convección, haciendo que este evento se aleje del esquema conceptual. El análisis de la situación meteorológica permite atribuir la existencia de corrientes verticales a una corriente en chorro sobre el Mediterráneo.

Para el caso de las precipitaciones de Cataluña de los días 9 y 10 de Octubre de 1994 solamente se muestran los resultados del día 10. El efecto de la orografía sobre el campo de precipitación se presenta en la Figura 19a y el de la interacción en la Figura 19b. Puede observarse que la orografía es importante para producir precipitación en la zona costera mediterránea y hacia los Pirineos. En algunos puntos el efecto es significativamente negativo, es decir, existe una distribución diferente de la precipitación si se considera la orografía o si no se hace. El efecto de la evaporación desde el mar por sí solo es despreciable; en ausencia de orografía la precipitación es similar tanto si hay evaporación como si no la hay. Por último, se observa que el efecto más importante es el sinérgico de interacción entre la orografía y la evaporación, pues localiza máximos muy importantes sobre la costa catalana, eliminando también precipitación en tierras interiores. Es decir, las simulaciones nos muestran que, en efecto, las montañas costeras pueden desarrollar precipitación en algunas zonas con la humedad presente inicialmente en la atmósfera, que la

dinámica a gran escala de la situación meteorológica es débil y no posibilita ascensos suficientemente fuertes que por sí mismos puedan desarrollar lluvia intensa y, por último, que la interacción orografía- evaporación es el factor decisivo en la distribución de la precipitación torrencial sobre Cataluña. Este caso se ajusta, pues, al modelo conceptual.

Lo anterior pone de manifiesto que la simulación numérica ha permitido aislar el papel de diferentes procesos físicos y ver que algunas veces no tienen tanta importancia como el esquema conceptual les atribuye. La simulación también permite llamar la atención sobre diferentes mecanismos de disparo de la convección en la zona mediterránea española. Asimismo los resultados expuestos indican que el estudio y la predicción de este tipo de situaciones meteorológicas presenta mayor complicación de la que el esquema de la Figura 2 haría esperar.

Los resultados de la simulación numérica de los tres casos de lluvia muy intensa en la costa mediterránea española permiten extraer varias conclusiones: los modelos numéricos actuales que pueden utilizarse para la predicción de lluvias intensas a plazo corto (36-48 horas) son capaces de dar una información muy importante al localizar con bastante precisión las áreas de precipitación. La resolución espacial de los mismos no es suficiente para poder tratar las células convectivas individualmente y por lo tanto, junto a otras razones más complejas, las cantidades de lluvia dadas por los modelos suelen ser inferiores a las realmente observadas. Por este motivo, mejorar la predicción cuantitativa de la precipitación en los modelos numéricos es uno de los objetivos actuales de la investigación en este campo.

Se ha visto que la orografía costera es un factor fundamental en el desarrollo de estas lluvias para la zona mediterránea española; en la mayoría de las ocasiones dicha orografía representa el mecanismo de elevación que necesitan las partículas de aire superficiales para formar las nubes convectivas que dan lugar a las lluvias intensas. Sin embargo, también se ha visto que existen situaciones en que la orografía sólo juega un papel secundario, dando lugar únicamente a una cierta redistribución de las precipitaciones.

Las simulaciones numéricas también han mostrado la importancia del efecto de la interacción entre la evaporación y la orografía. Naturalmente, será tanto más importante cuanto mayor la evaporación. Si el aire inicialmente está muy húmedo, admitirá poco vapor adicional y entonces este efecto será más débil; sin embargo, si está menos húmedo y la temperatura de la superficie del mar es alta (como generalmente ocurre en el Mediterráneo occidental a finales de verano y en otoño) la evaporación será muy grande y el aire de las capas bajas, al interaccionar con las montañas cercanas a la costa, podrá desarrollar fácilmente nubes convectivas que darán precipitaciones intensas.

El esquema conceptual comentado al principio, aunque probablemente represente la mayor parte de las situaciones meteorológicas que desencadenan lluvias fuertes en la costa mediterránea española, no es el único que explica los mecanismos que intervienen en estas situaciones. Correspondería a los casos en que la dinámica meteorológica a gran escala es débil. En estas circunstancias, el papel de la orografía es fundamental. Pero hay otras situaciones en las cuales es la propia atmósfera la que suministra los mecanismos de elevación suficientes para que las partículas de bajos niveles puedan inestabilizarse y desarrollar nubes convectivas. El desarrollo de convección sobre el mar, que posteriormente podría alcanzar tierra firme, estaría ligado a situaciones en las cuales domina este segundo tipo de mecanismos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

- Burgueño, A., A. Redaño y M. C. Llasat (1989): *Aspectos estadísticos y sinópticos de las precipitaciones intensas en Cataluña*. Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona. Numero 875.
- Cotton, W. R. (1990): *Storms*. Geophysical Science Series Vol. 1. ASTeR Press.
- Font Tullot, I. (1993): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología.
- Gedzelman, S. D. (1980): *The Science and Wonders of the atmosphere*. John Wiley & Sons.
- Holton, J. R. (1992): *An Introduction to Dynamic Meteorology (Third Edition)*. Academic Press.
- Llasat, M. C. (1991): *Gota fría*. Editorial Boixareu Universitaria.

FIGURAS

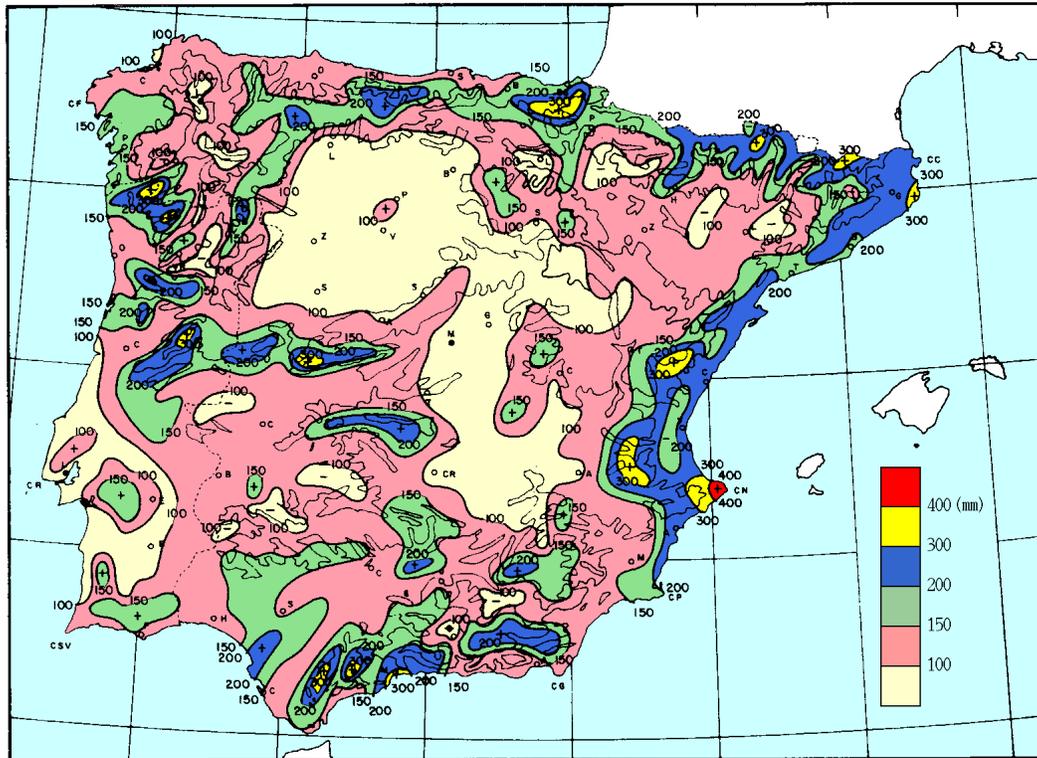


Figura 1. Distribución sobre la península Ibérica de la precipitación máxima registrada en 24 horas (Font, 1983).

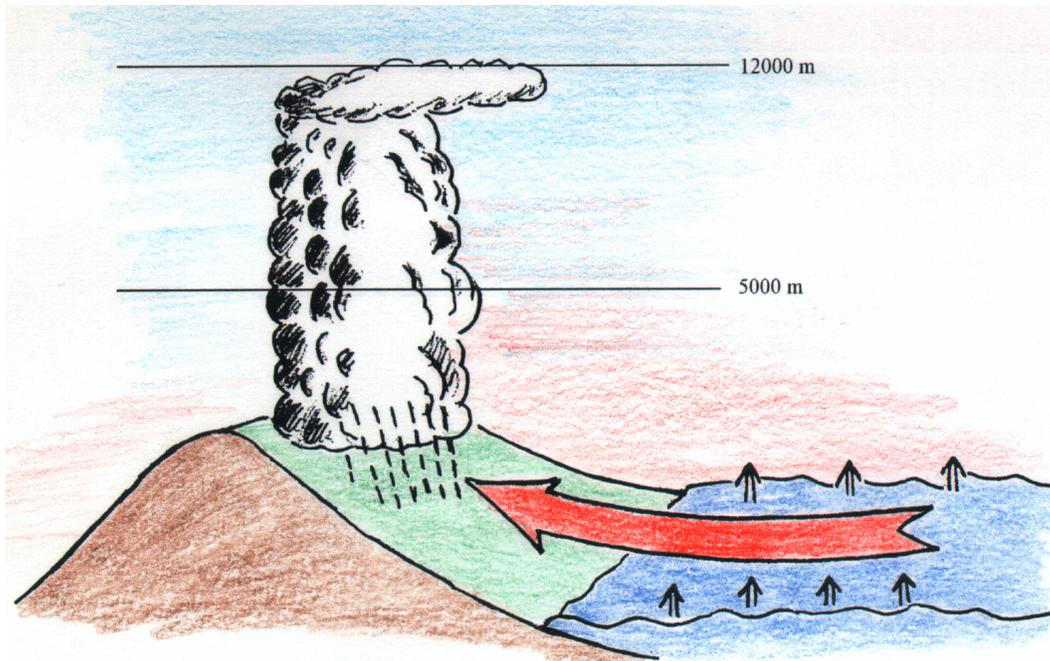


Figura 2. Esquema del modelo conceptual de desarrollo de lluvias torrenciales en la zona costera mediterránea. La flecha de niveles bajos representa aire cálido y húmedo procedente del Este. La flecha de niveles altos representa aire húmedo procedente del Sudoeste.

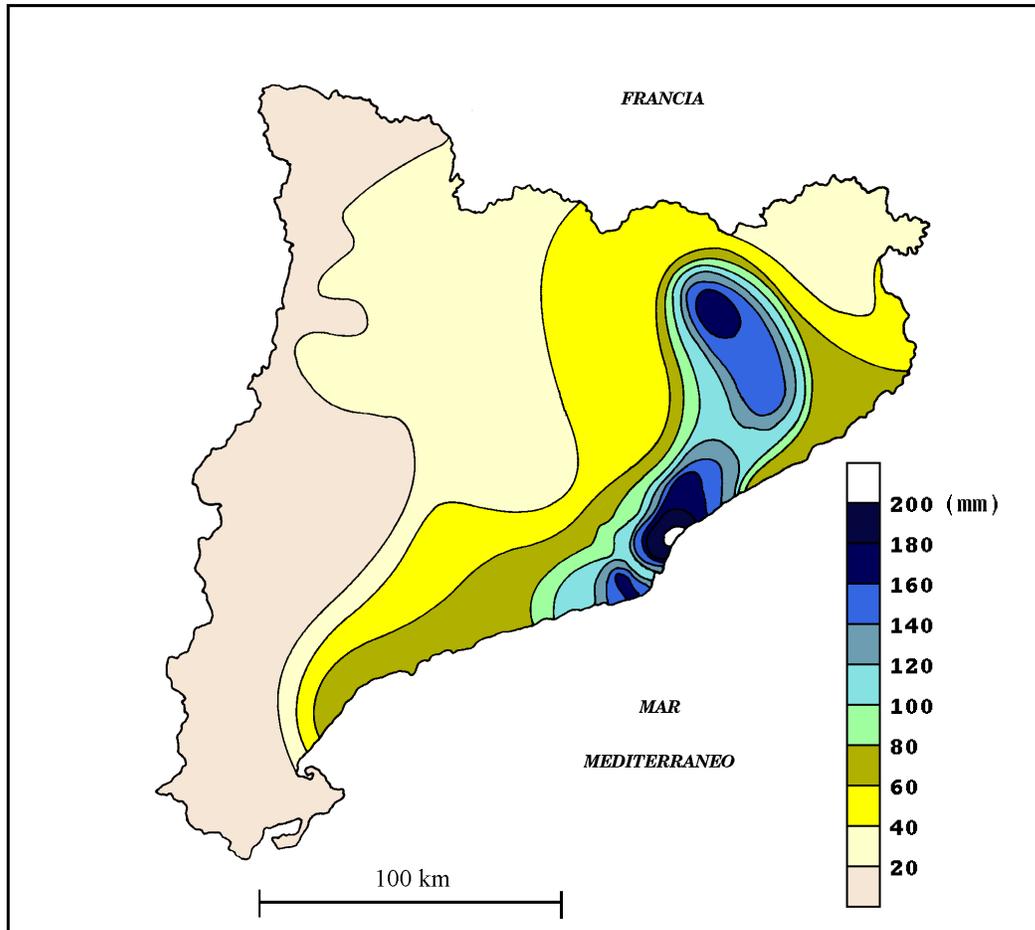


Figura 3. Precipitación registrada (en mm) en Cataluña el 12 de Noviembre de 1988.

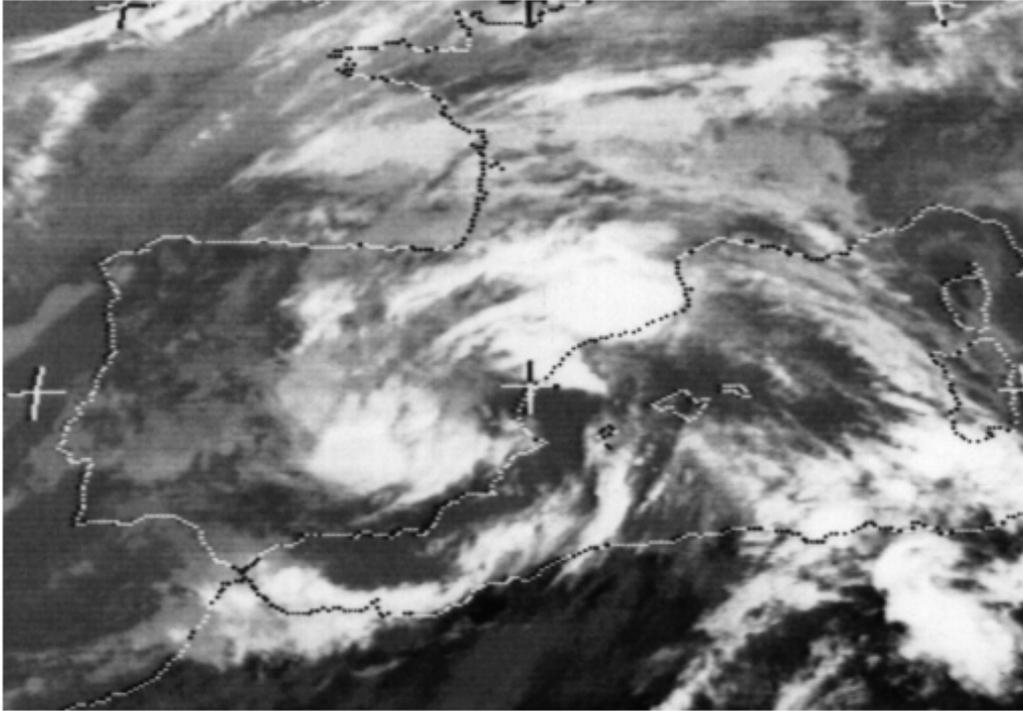
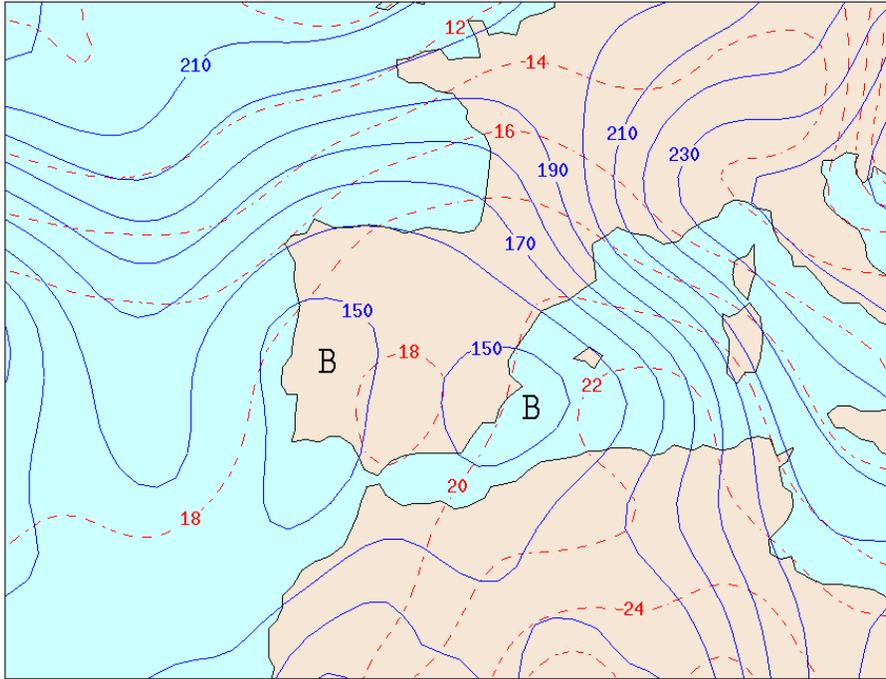
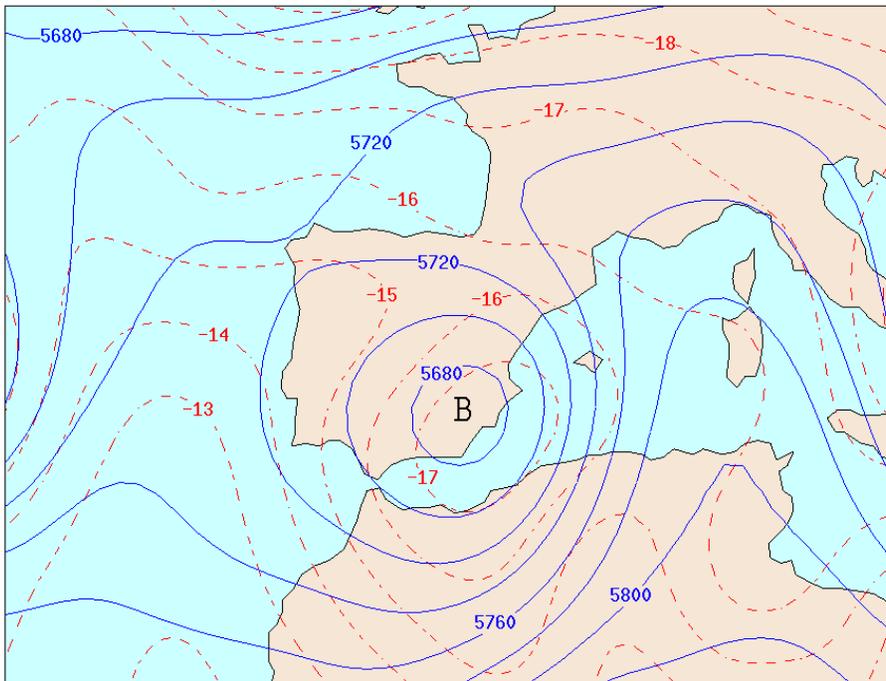


Figura 4. Imagen del canal infrarrojo del Meteosat correspondiente al 12 de Noviembre de 1988 a las 12 horas. Las cimas más frías de las nubes aparecen en blanco.



(a)



(b)

Figura 5. Situación meteorológica del 12 de Noviembre de 1988 a las 12 horas: a) 1000 hPa, b) 500 hPa. Las líneas continuas representan la altura, aproximadamente en metros, de la superficie isobárica y las discontinuas la temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

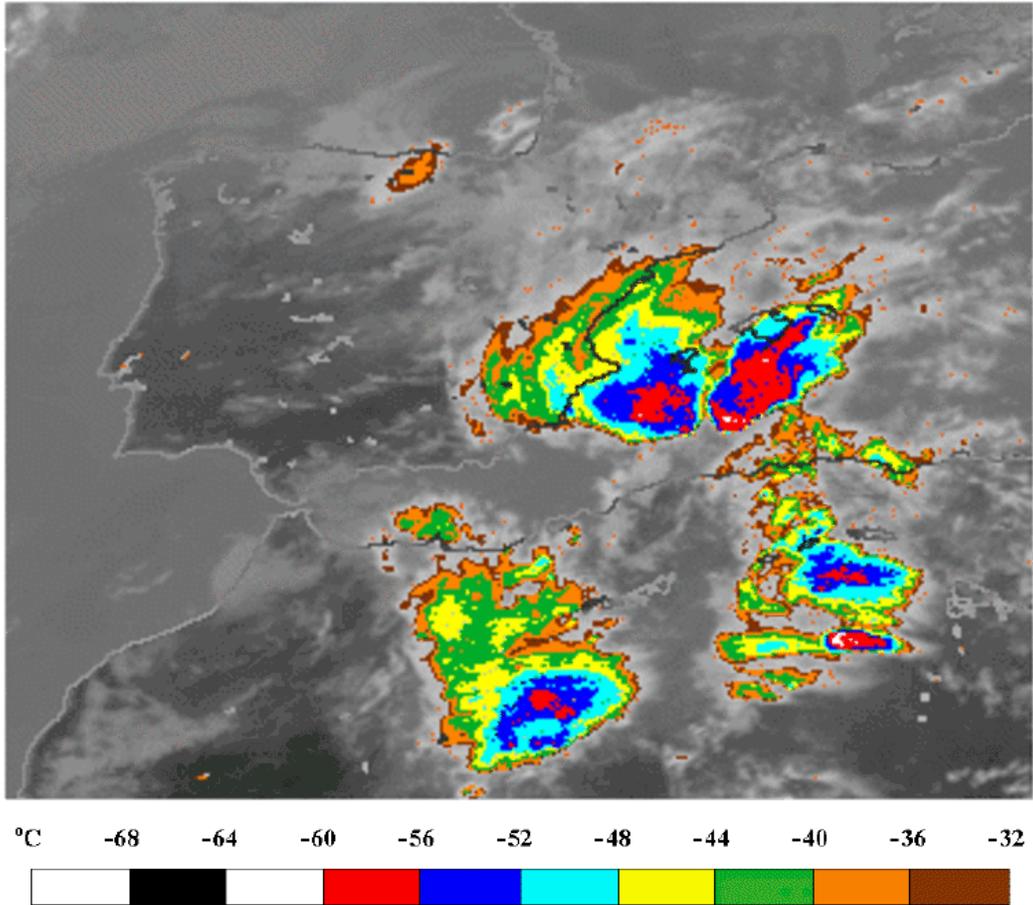


Figura 6. Imagen del canal infrarrojo del Meteosat correspondiente al 28 de Septiembre de 1994 a las 12 horas. Los colores representan la temperatura de la cima de las nubes.

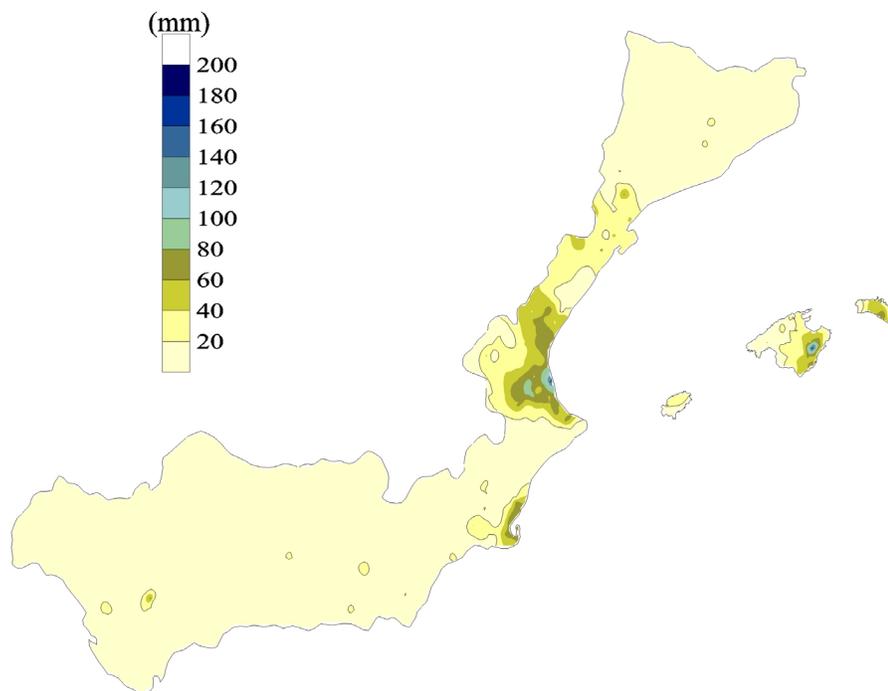


Figura 7. Precipitación registrada (en mm) en el área mediterránea española el 28 de Septiembre de 1994.

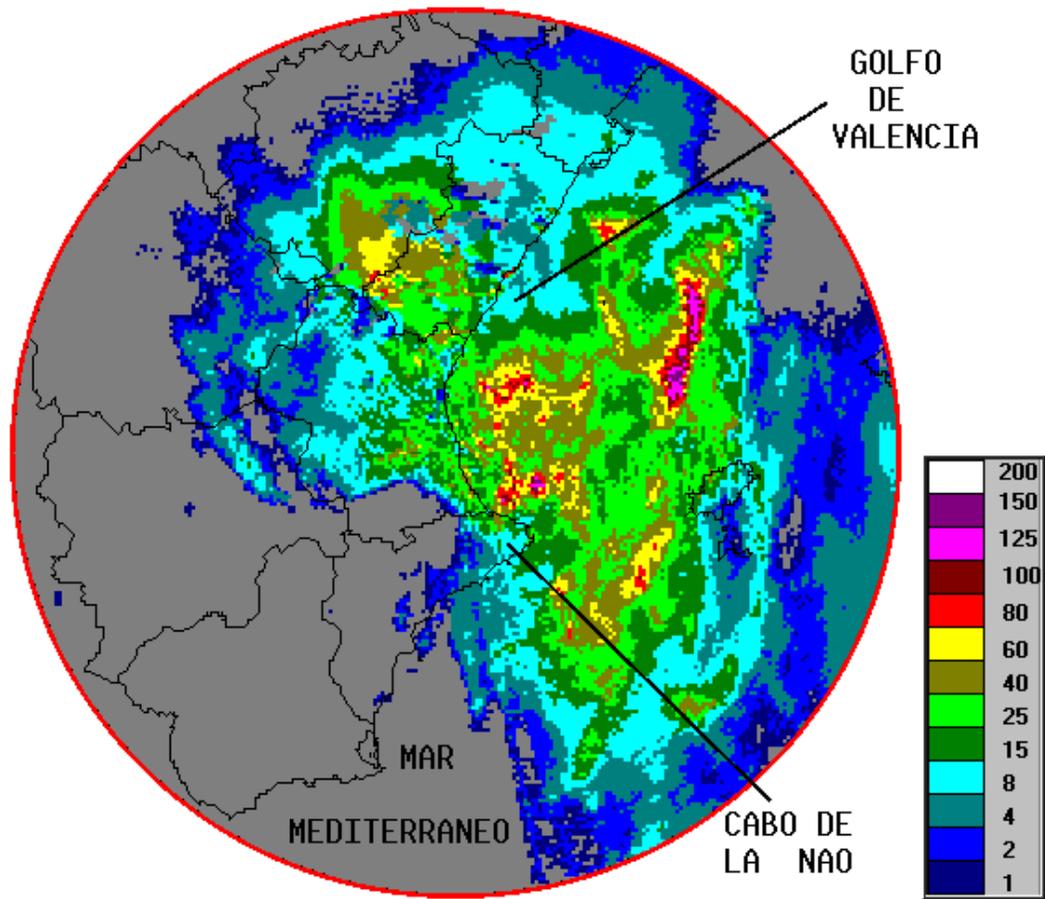


Figura 8. Precipitación estimada (en mm) por el Radar de Valencia el 28 de Septiembre de 1994.

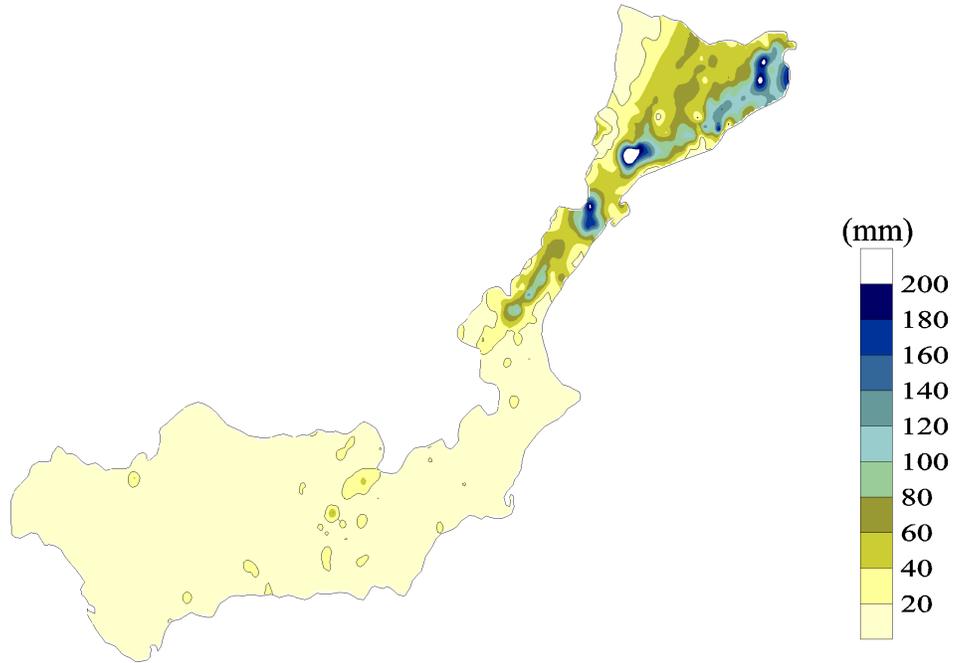


Figura 9. Precipitación registrada (en mm) en la zona mediterránea peninsular española el 10 de Octubre de 1994.

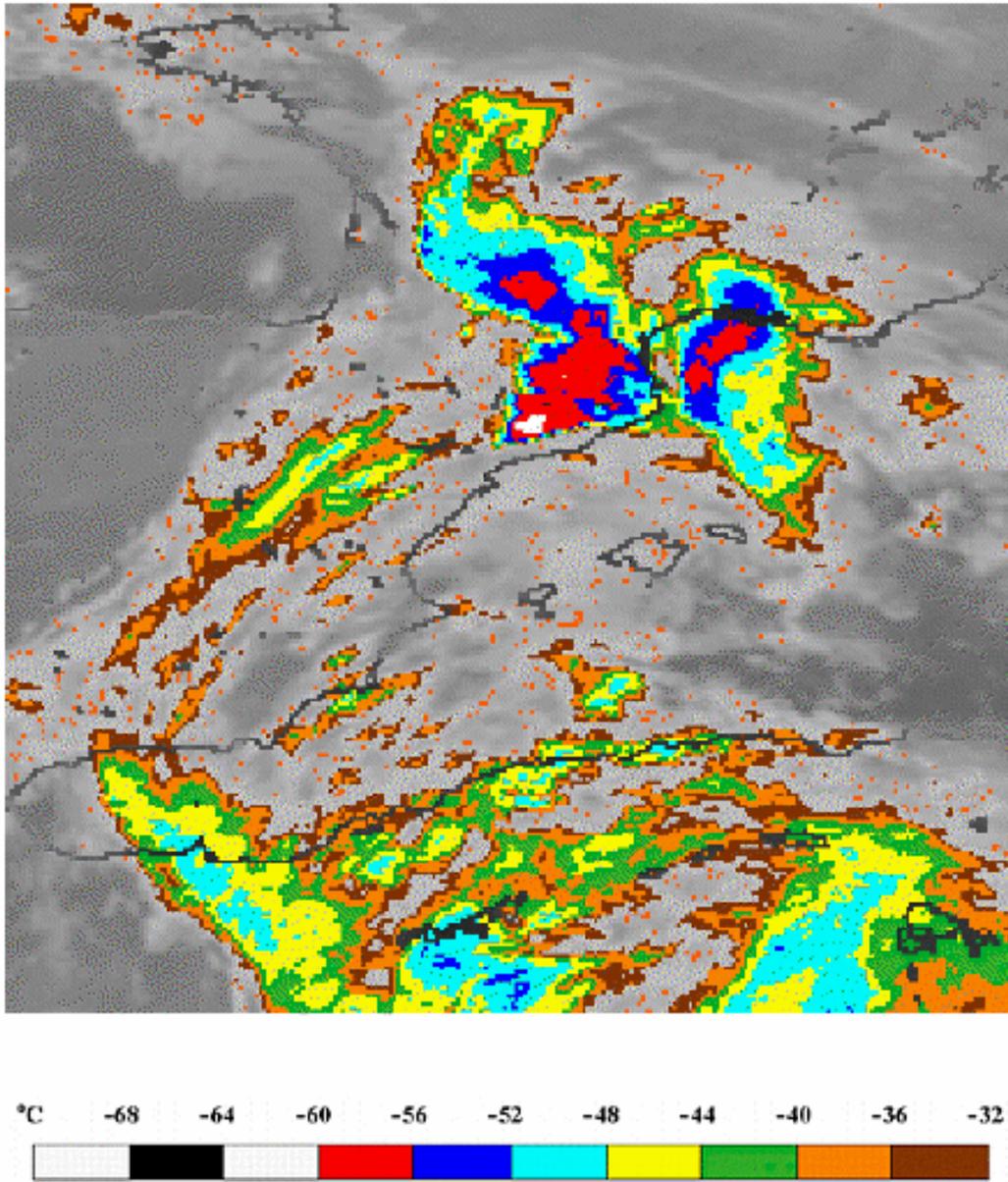


Figura 10. Imagen del canal infrarrojo del Meteosat correspondiente al 10 de Octubre de 1994 a las 06 horas. Los colores representan la temperatura de la cima de las nubes.

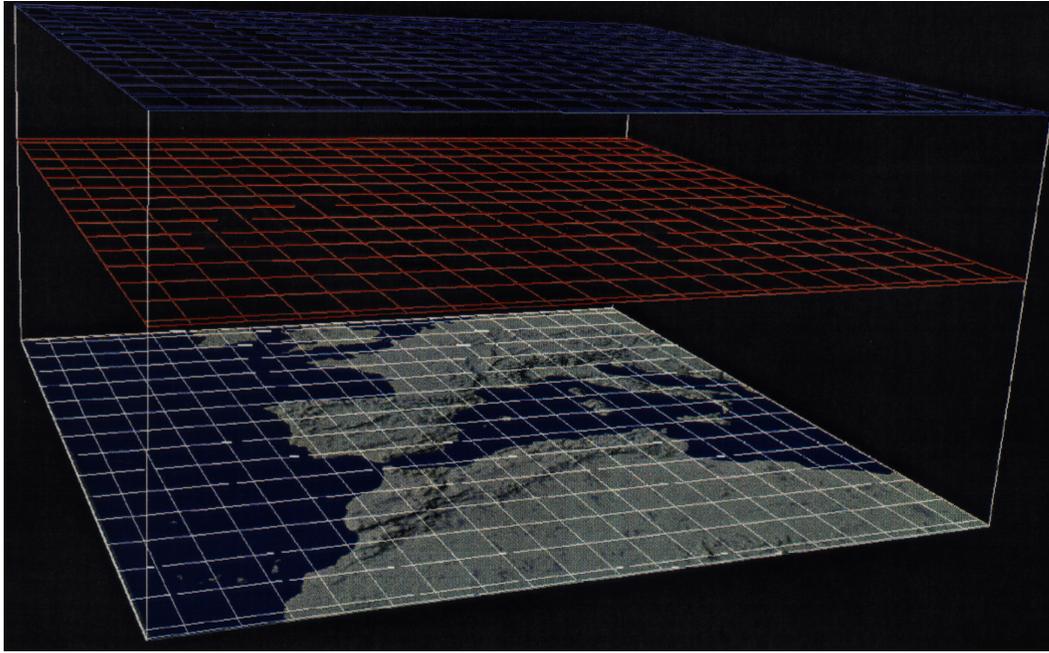


Figura 11. Esquema de la malla que se define para fijar los puntos a los cuales se aplican las ecuaciones del modelo numérico.

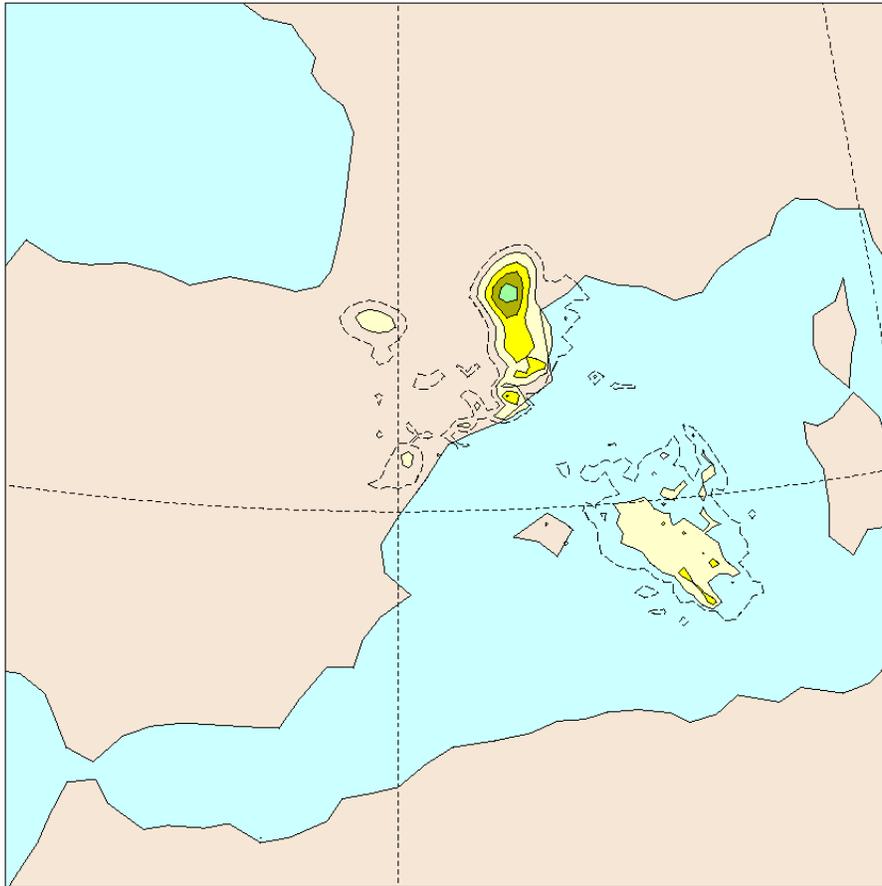


Figura 12. Precipitaciones simuladas por el modelo SALSA entre las 12 y las 24 horas del 12 de Noviembre de 1988. Los colores indican cantidades de precipitación según la escala de la Figura 3. La línea discontinua es la isoyeta de 10 mm.

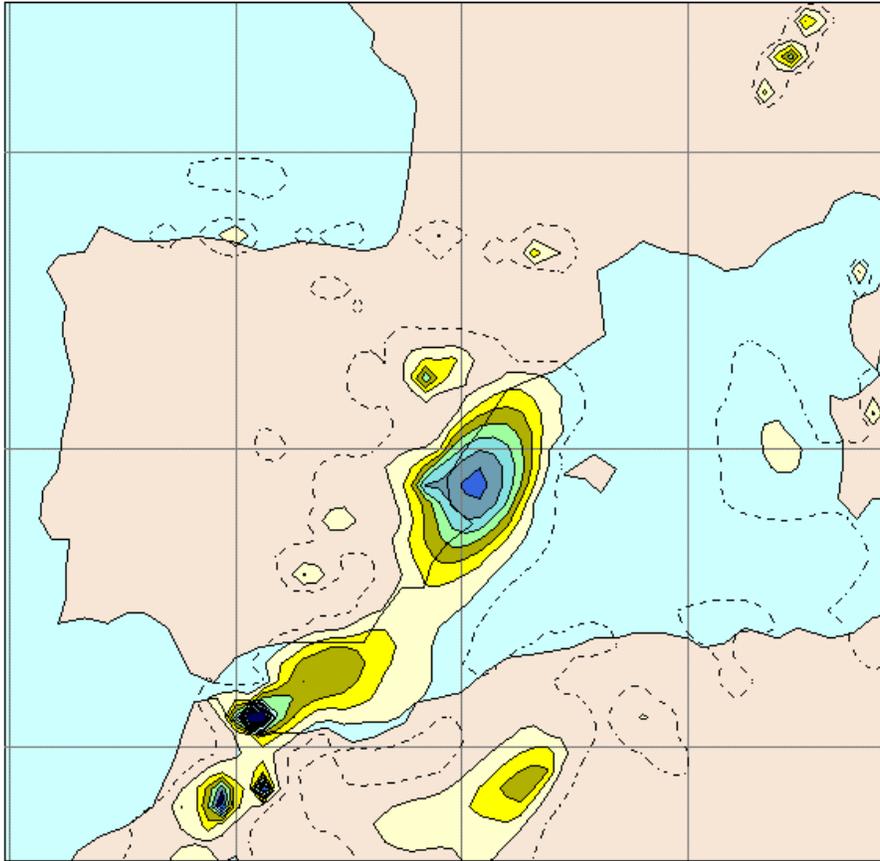


Figura 13. Precipitación simulada por el modelo HIRLAM para el 28 de Septiembre de 1994. Los colores indican cantidades de lluvia según la escala de la Figura 7. La línea discontinua es la isoyeta de 5 mm.

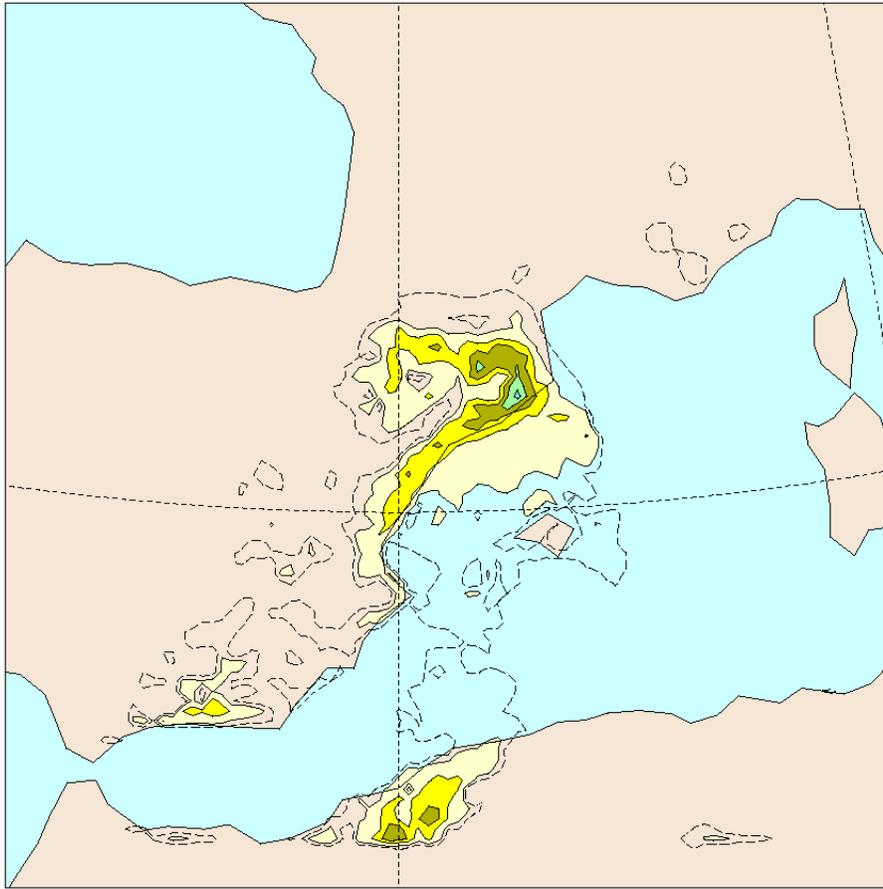


Figura 14. Precipitación simulada por el modelo SALSA para el 10 de Octubre de 1994. Los colores indican cantidades de lluvia según la escala de la Figura 9. La línea discontinua es la isoyeta de 10 mm.

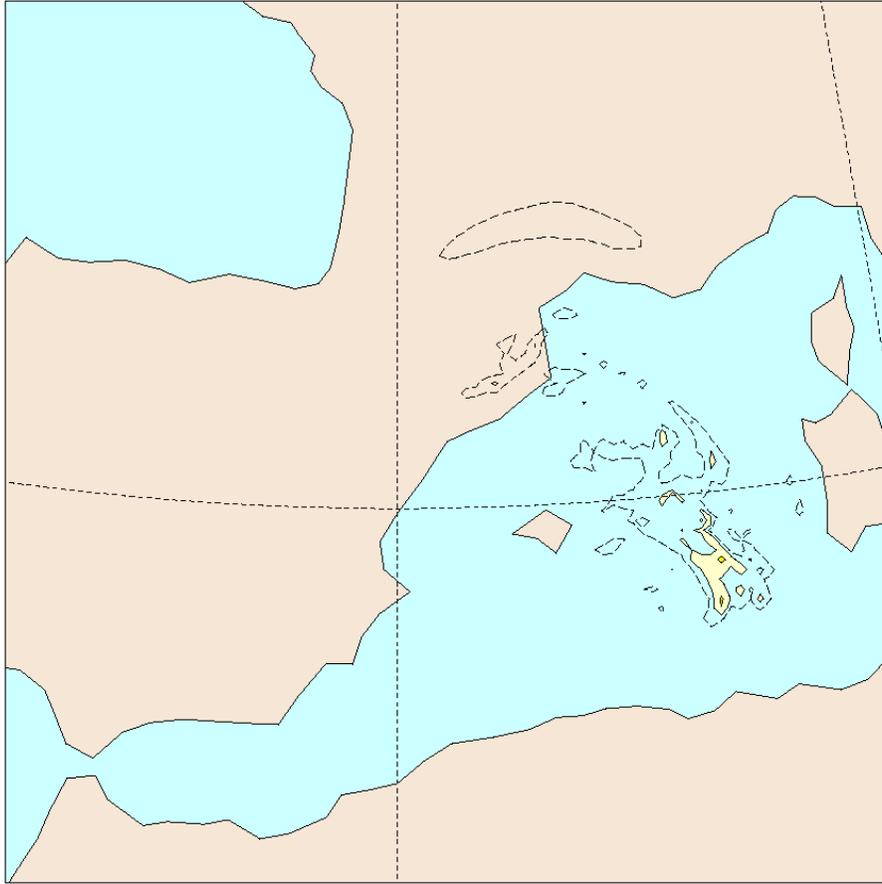


Figura 15. Precipitación simulada por el modelo SALSA entre las 12 y las 24 horas del 12 de Noviembre de 1988 en el experimento sin orografía. Los colores indican cantidades de precipitación según la escala de la Figura 3. La línea discontinua es la isoyeta de 10 mm.

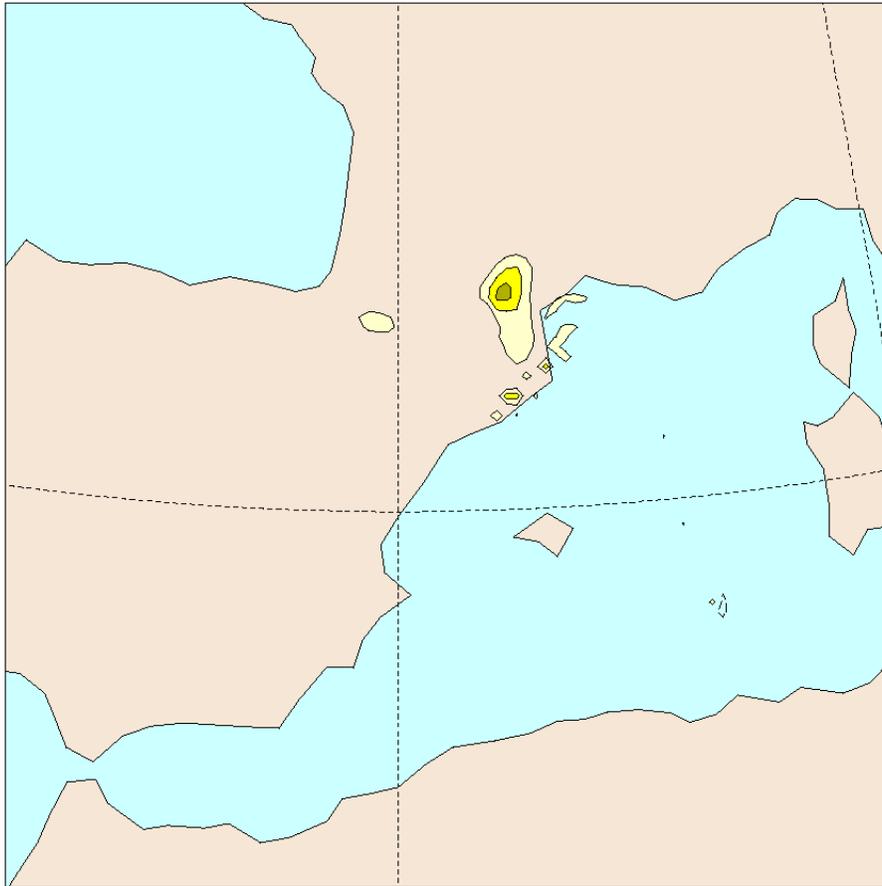


Figura 16. Efecto de la orografía sobre el campo de precipitación en la simulación del caso del 12 de Noviembre de 1988. Los colores indican una contribución positiva según la escala de la Figura 3. Las líneas discontinuas indican efectos supresivos (a partir de 20 mm con un intervalo de 20 mm).

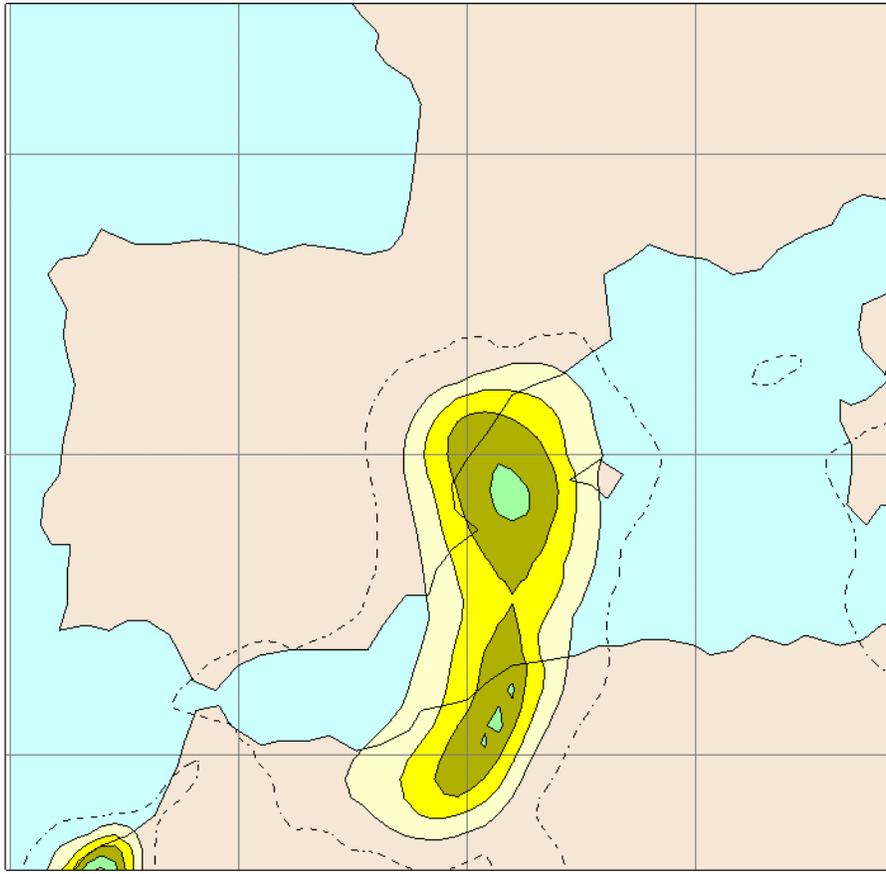


Figura 17. Precipitación simulada por el modelo HIRLAM para el 28 de Septiembre de 1994 en el experimento sin orografía. Los colores indican cantidades de lluvia según la escala de la Figura 7. La línea discontinua es la isoyeta de 5 mm.

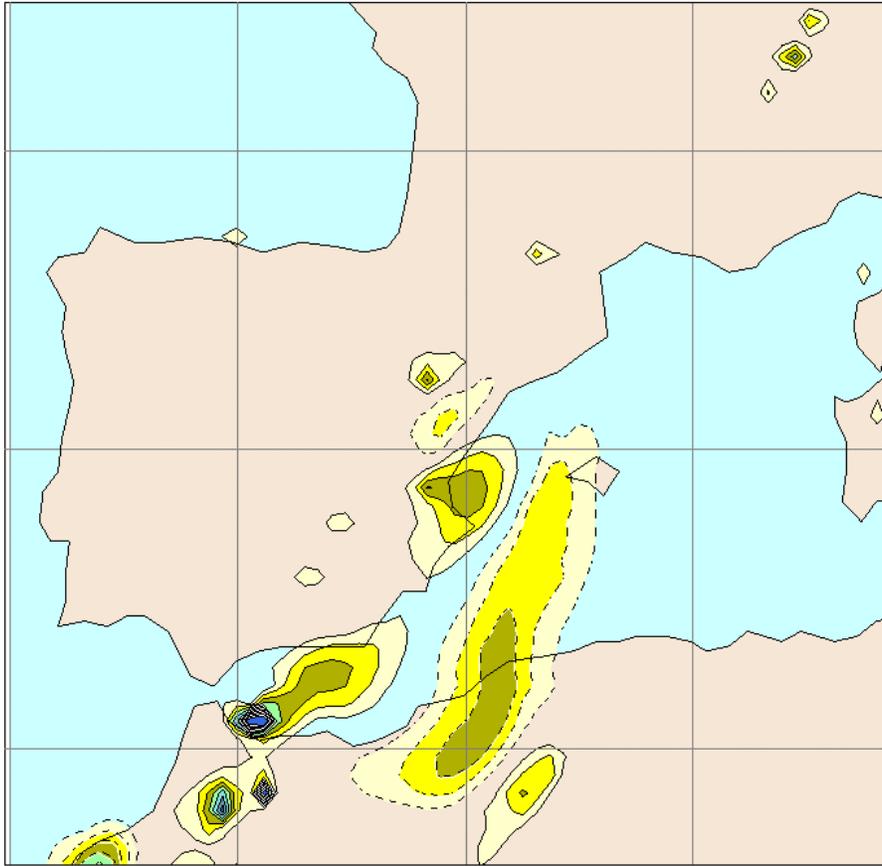
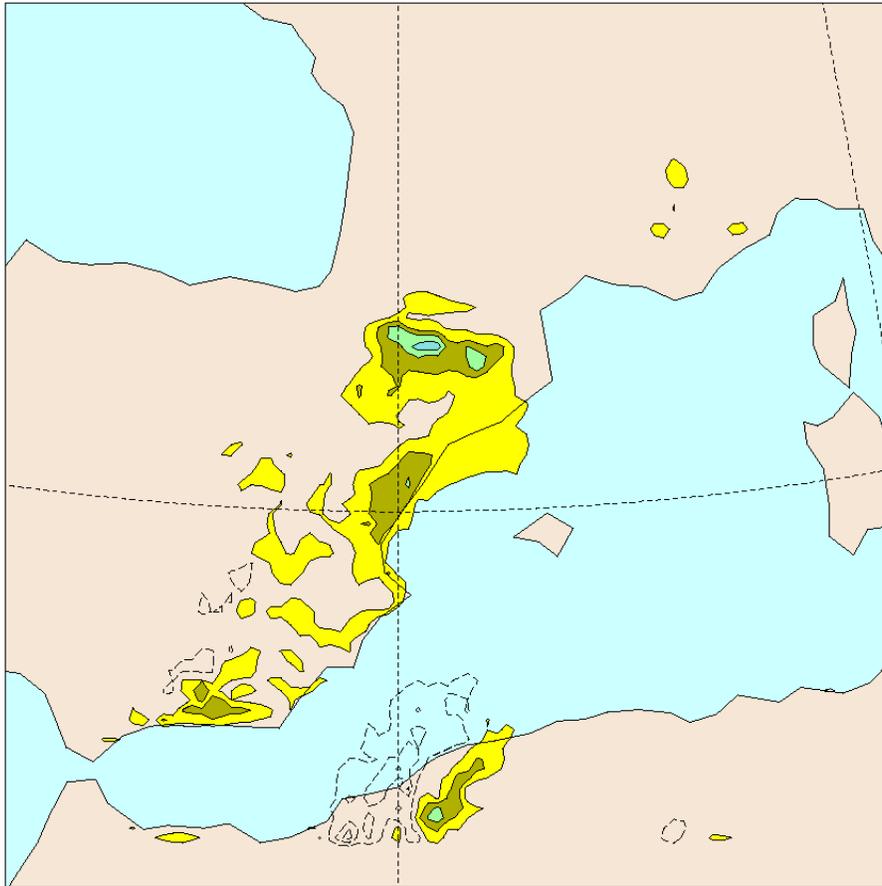
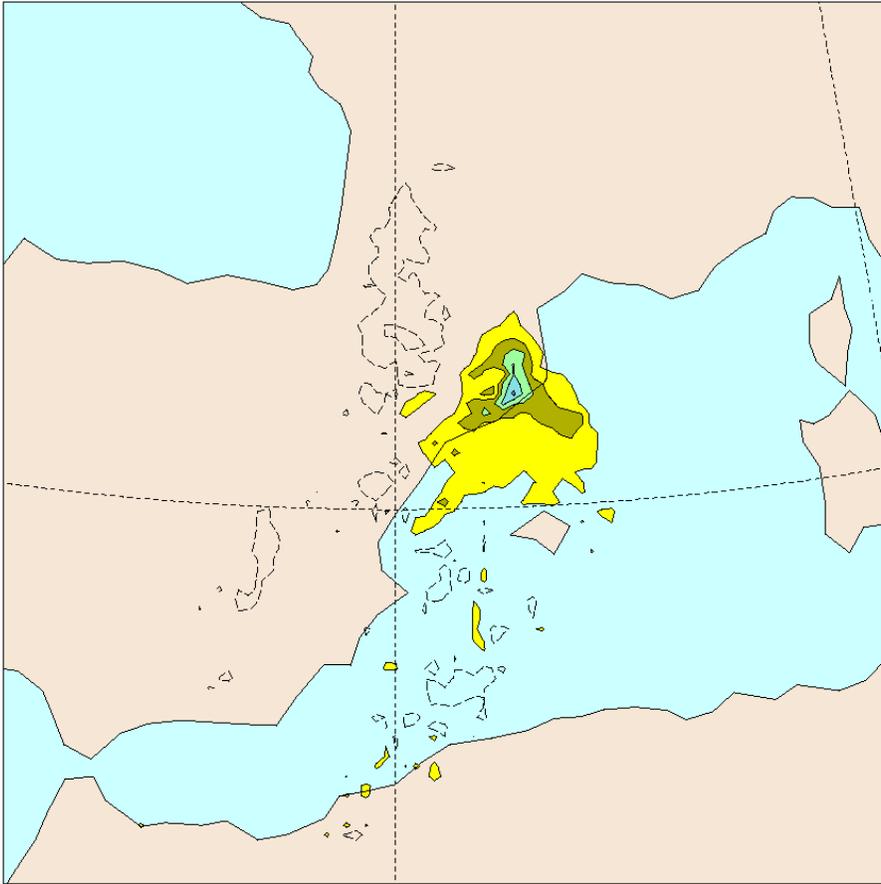


Figura 18. Efecto de la orografía sobre el campo de precipitación para el 28 de Septiembre de 1994. Los colores indican cantidades de lluvia según la escala de la Figura 7. Las líneas continuas indican contribuciones positivas y las discontinuas efectos supresivos.



(a)

Figura 19. Efecto sobre el campo de precipitación para el experimento del 10 de Octubre de 1994: a) de la orografía, b) de la interacción evaporación-orografía. Las isoyetas continuas representan efectos positivos (a partir de 10 mm con un intervalo de 20 mm). Las líneas discontinuas representan efectos supresivos (a partir de 10 mm con un intervalo de 20 mm).



(b)

Figura 19 (cont.).