

INFORME SOBRE LAS RACHAS DE VIENTO HURACANADAS ASOCIADAS A LA CONVECCIÓN PROFUNDA Y MUY ORGANIZADA DEL DÍA 4 DE OCTUBRE DE 2013 EN BIOTA (ZARAGOZA)



Ismael San Ambrosio Beirán

Jefe de la Unidad de Estudios y Desarrollos

Brígido Pablo López López

Técnico Superior de Estudios y Desarrollos del Grupo de Predicción y Vigilancia
Delegación Territorial de AEMET en Aragón

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este informe quieren agradecer la amable colaboración del alcalde y del alguacil de la localidad de Biota que nos ayudaron en el estudio de campo, mostrándonos las zonas del término municipal más afectadas.

También agradecemos la participación y ayuda de M^a Carmen Díez Cornago (D. T. de AEMET en Aragón) durante la visita de campo.

En especial hay que mencionar a D. Pedro Machín, de la empresa IASOL S.L. ya que nos facilitó los datos de viento registrados por las estaciones meteorológicas instaladas en la planta fotovoltaica que sufrió importantes daños durante este evento.

Finalmente, nuestro agradecimiento a Francisco Martín León (Área de Técnicas y Aplicaciones de Predicción, AEMET) y a Francisco Javier Rodríguez Marcos (D. T. de AEMET en Aragón) por las correcciones, comentarios y aportaciones hechas a este documento.

ÍNDICE

1. Introducción.....	4
2. Situación sinóptica.....	7
3. Situación mesoescalar y entorno preconvectivo.....	10
4. Imágenes de satélite.....	36
5. Imágenes radar y descargas eléctricas.....	41
6. Datos observados de la red de EMAS.....	65
7. Visita de campo.....	80
8. Conclusiones.....	88
9. Bibliografía.....	89

1. INTRODUCCIÓN

Durante la primera mitad del viernes 4 de octubre de 2013 una serie de tormentas que se desplazaban del SW al NE afectaron al centro y sur de Navarra y especialmente a la comarca zaragozana de Las Cinco Villas. A partir de las 11 UTC el sistema convectivo se desplazó al E cesando la actividad en la zona.

La tormenta que afectó a la zona de Las Cinco Villas sobre las 5 UTC (7 horas locales) produjo grandes daños en naves agrícolas e industriales, tendido eléctrico, una central fotovoltaica en las inmediaciones de Sádaba (Zaragoza), casas particulares y árboles. Todos estos daños quedaron reflejados en diversos medios de comunicación. Las localidades cuyos términos municipales fueron más afectados fueron los de Biota, Pinsoro (perteneciente a Ejea de los Caballeros) y Sádaba (figuras 1 a 4).

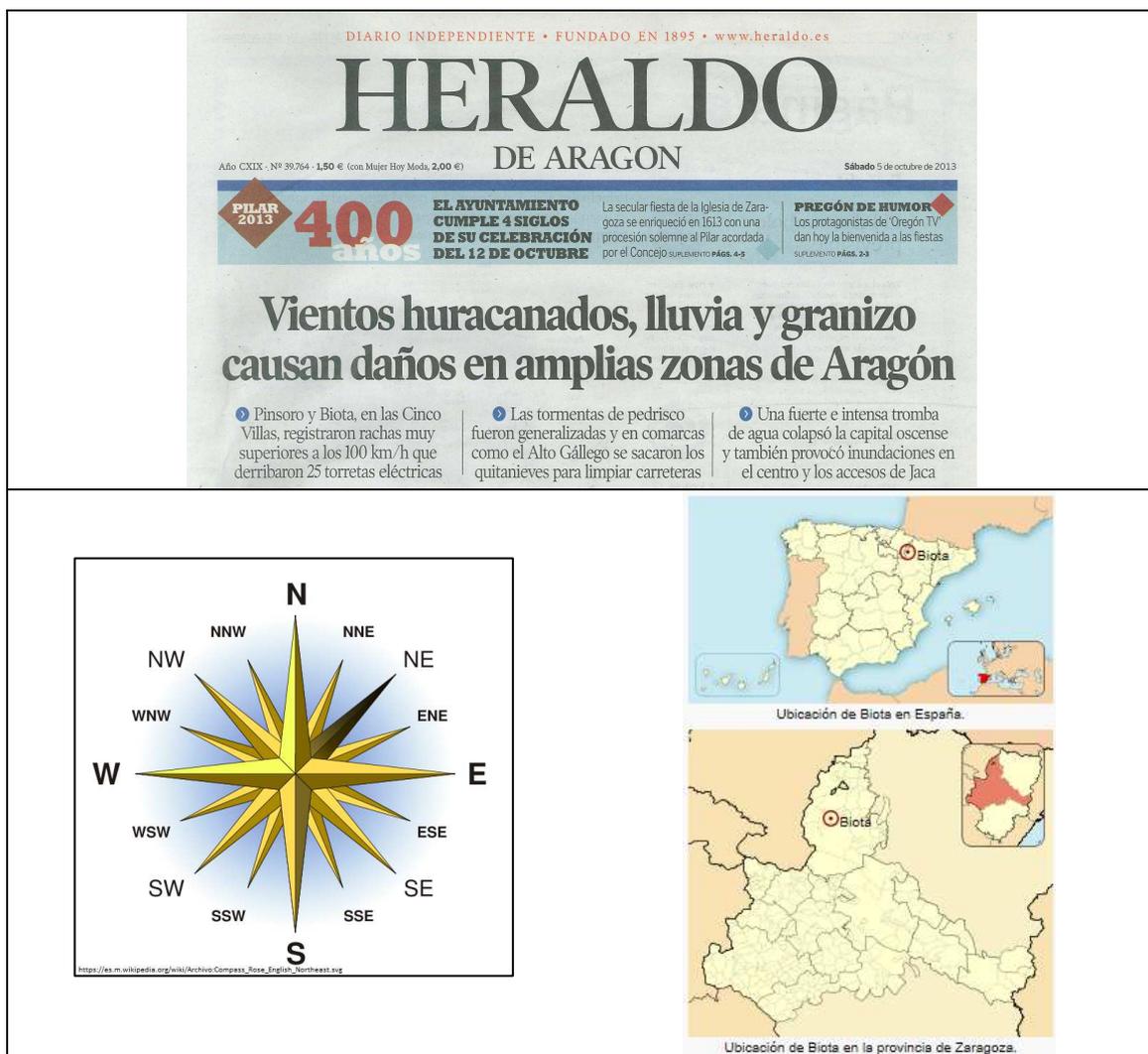


Figura 1. Noticia en periódicos, arriba. Situación del municipio de Biota en la Península, abajo (fuente: Internet y wikipedia)

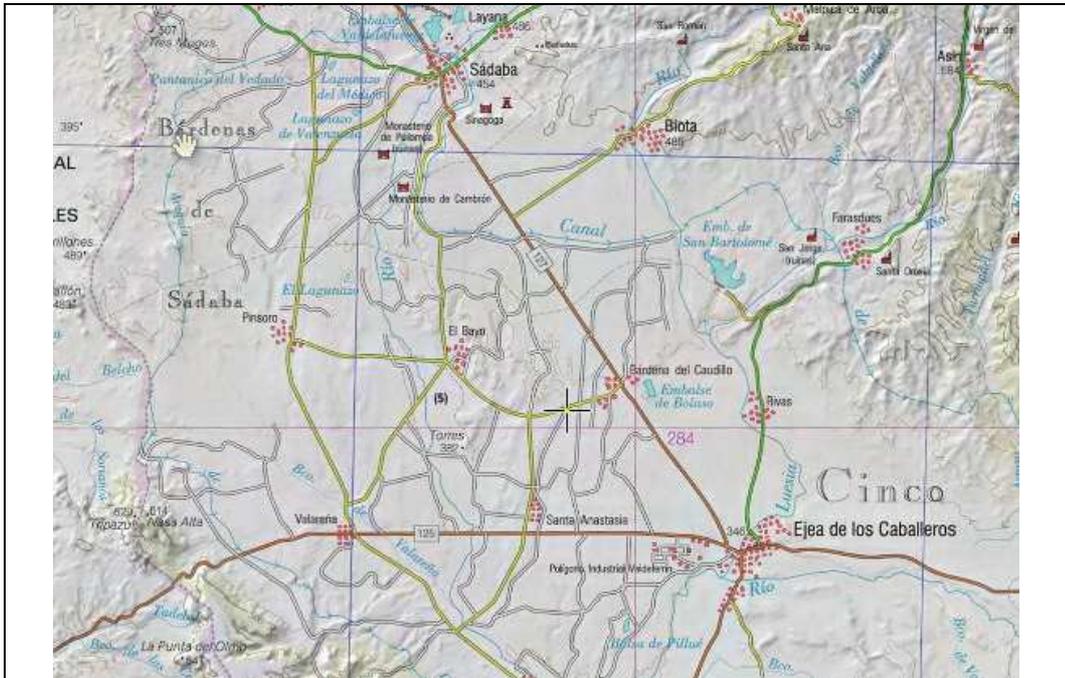


Figura 2. Situación de la zona más afectada entre los municipios de Sádaba, Biota, Pinsoro y Ejea de los Caballeros (fuente: SIGPAC)



Figura 3. Área ampliada entre Sádaba y Biota (fuente: SIGPAC)

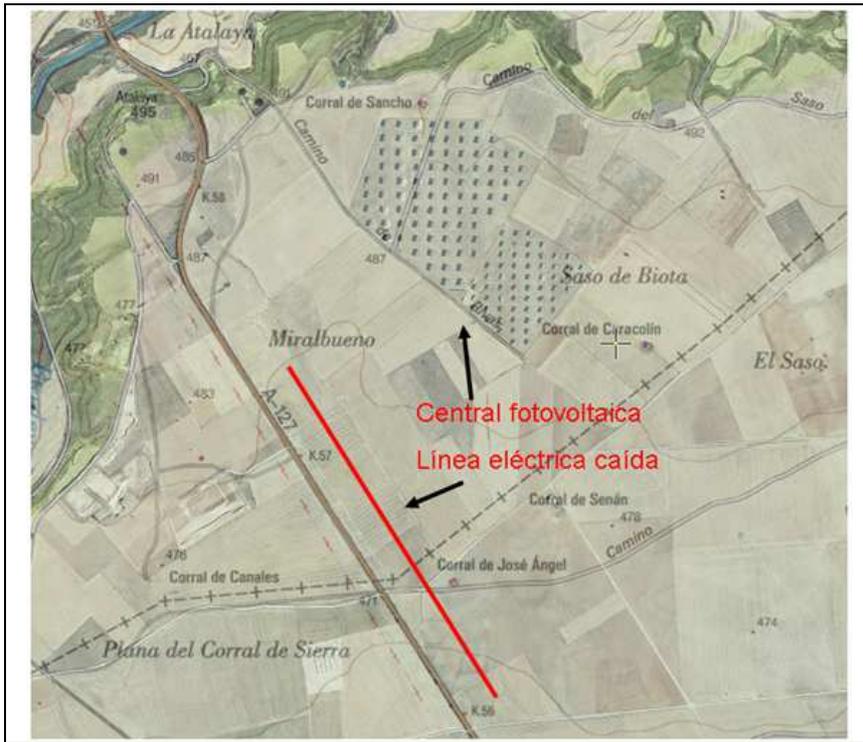


Figura 4. Imagen mostrando la situación del tendido eléctrico caído y de la central fotovoltaica (fuente: SIGPAC)

Se redacta el siguiente informe con el objetivo de analizar la situación meteorológica en la que se desarrolló el fenómeno y de describir la variabilidad espacial en cuanto a localización e intensidad de los efectos adversos en superficie asociados a los fenómenos convectivos. Durante todo el informe, y si no se dice lo contrario, se utilizará la hora UTC. La hora local u oficial se obtiene sumando dos horas a ésta. También se utilizarán las abreviaturas de la rosa de los vientos que se muestran en la figura 1.

2. SITUACIÓN SINÓPTICA

Se va a estudiar la situación sinóptica del día 4 de octubre, especialmente durante la primera mitad del día. En 500 hPa (figura 5) aparecía una marcada vaguada con eje meridiano al W de la Península y con una masa de aire frío asociado (-19° C aproximadamente). Dicha vaguada se desplazó hacia el E penetrando en el interior peninsular. En el análisis de las 06 UTC se aprecia la formación de una vaguada secundaria dentro del flujo general del SW. El flujo por delante de la vaguada era difluente. El frío en altura, y el estar situados en la parte delantera y difluente de la vaguada, favoreció los ascensos y la aparición de convección.

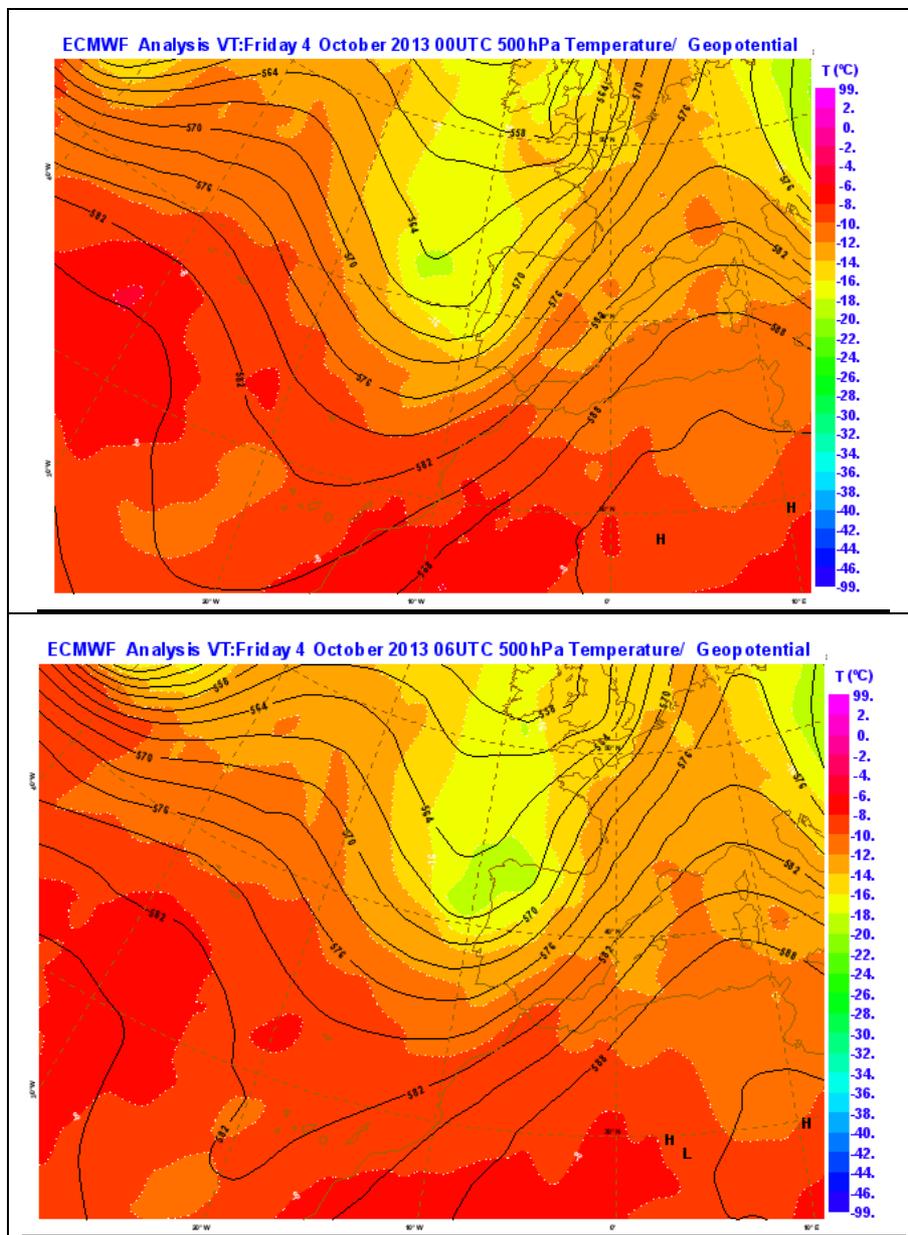


Figura 5. Análisis de ECMWF de geopotencial y temperatura en 500 hPa el día 4 de octubre a las 00 UTC, arriba, y a las 06 UTC, abajo.

En la figura 6, viento en 300hPa, se observa un chorro del SSW de unos 45 m/s en la parte delantera de la vaguada. Este chorro del SSW se aprecia también en la imagen de vapor de agua del MSG (figura 7), con más de 80 kt, que está profundizando la vaguada secundaria. También se observan en esta imagen los desarrollos convectivos sobre Navarra, E de La Rioja, N de Zaragoza y NW de Huesca.

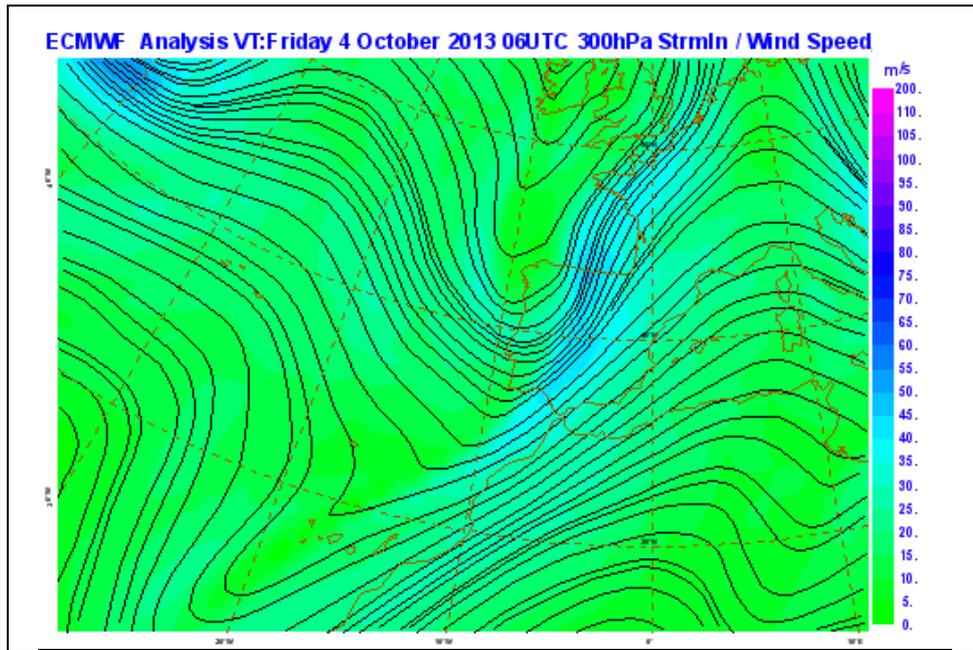


Figura 6. Análisis de ECMWF de líneas de corriente y velocidad del viento en 300 hPa el día 4 de octubre a las 06 UTC.

En la figura 8 vemos la situación en niveles bajos. En superficie destaca un amplio anticiclón sobre el Atlántico, otra zona de altas presiones relativas que afecta al SE de Francia y al área pirenaica y dos zonas de bajas presiones, una sobre el Mediterráneo occidental de origen térmico y otra sobre las Islas Británicas asociada a la vaguada en altura. Sobre la Península no hay un gradiente bórico marcado.

La temperatura en 850 hPa muestra una dorsal térmica en el área mediterránea que se prolonga a lo largo del valle del Ebro aunque de forma poco marcada.

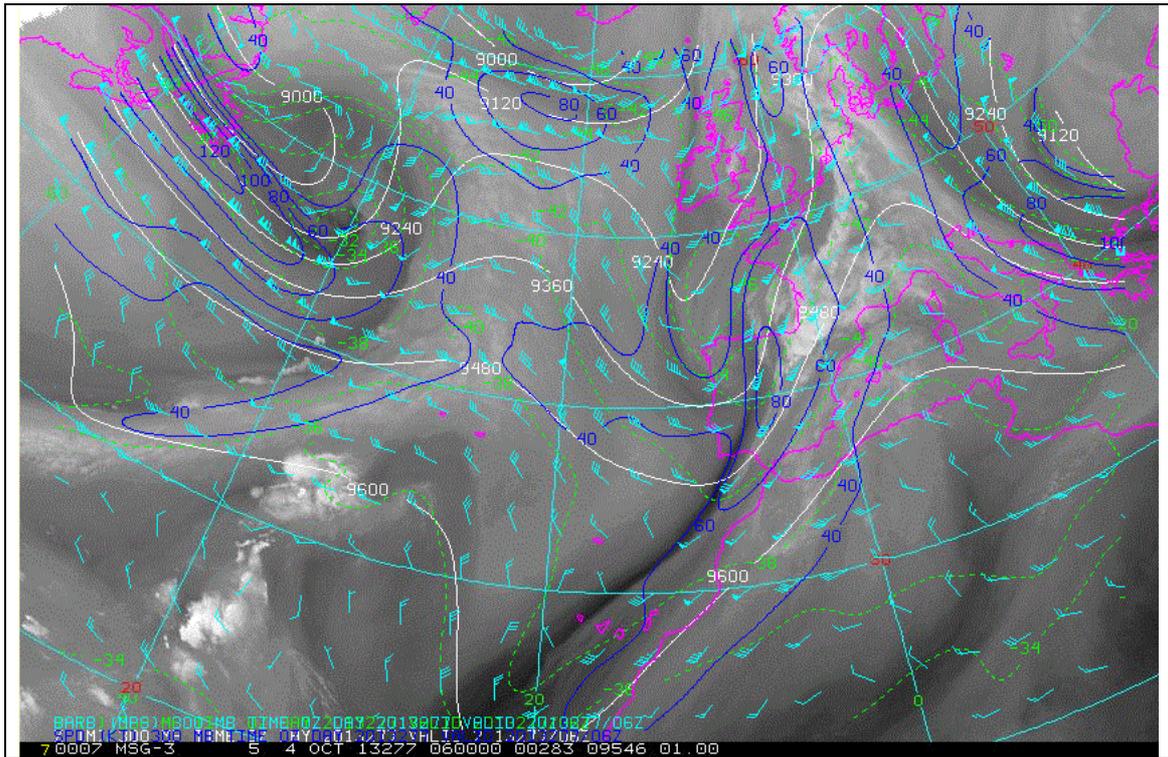


Figura 7. Imagen de vapor de agua del MSG con campos superpuestos de viento (barbas, azul claro, e isotacas en nudos, azul oscuro), temperatura (líneas verdes discontinuas, °C) y geopotencial (líneas blancas), en 300 hPa del HIRLAM 0.48°, el día 4 de octubre a las 06 UTC.

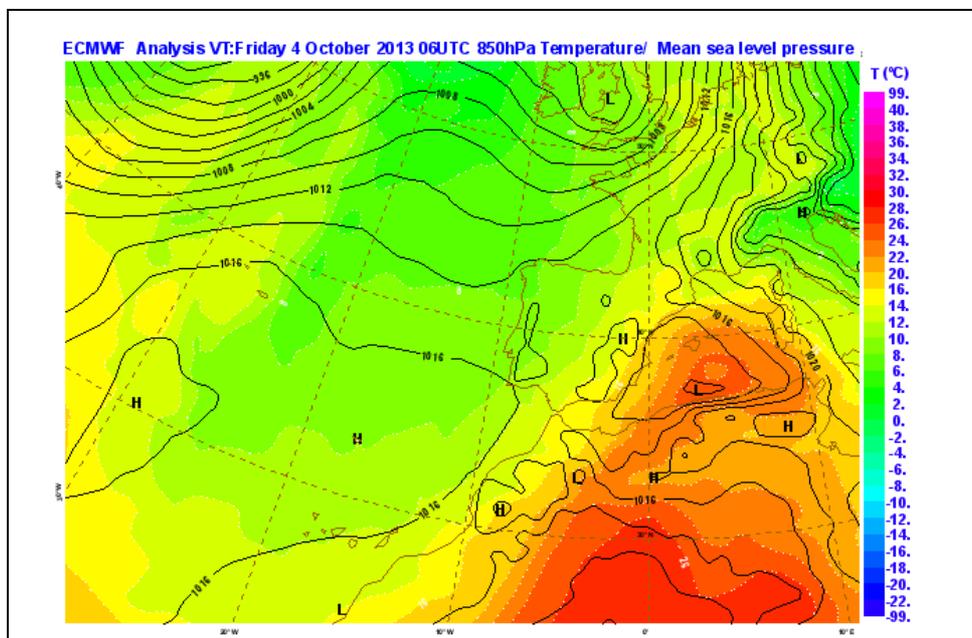


Figura 8. Análisis de ECMWF de temperatura en 850 hPa, escala adjunta de colores, y presión a nivel del mar, línea continua negra en hPa, del día 4 de octubre a las 06 UTC.

3. SITUACIÓN MESOESCALAR Y ENTORNO PRECONVECTIVO

SITUACIÓN MESOESCALAR

Se observa cómo la zona de interés, además de estar situada en la parte delantera de la vaguada, se encontraba en una zona baroclina entre las 00 y 09 UTC con una onda térmica de -13/-14 °C sobre el NE peninsular (ver figuras 9 y 10).

En la imagen de las 00 UTC se observa claramente la actividad convectiva en el área baroclina por delante de la vaguada. En la imagen de las 06 UTC se observa que se ha formado una vaguada secundaria con eje WNW-ESE que profundiza la actividad convectiva en el valle medio-alto del Ebro.

En niveles medios, 700 hPa, el flujo es fuerte (20-30 kt) del SW, como en niveles altos, y también se aprecia la pequeña onda secundaria (figura 11), mientras que en 850 hPa (figura 12) el flujo tiende a ser del S y SE moderado (10-20 kt) en el área de interés, mostrando que el aporte de aire húmedo y cálido procedente del Mediterráneo se extendía al menos hasta este nivel.

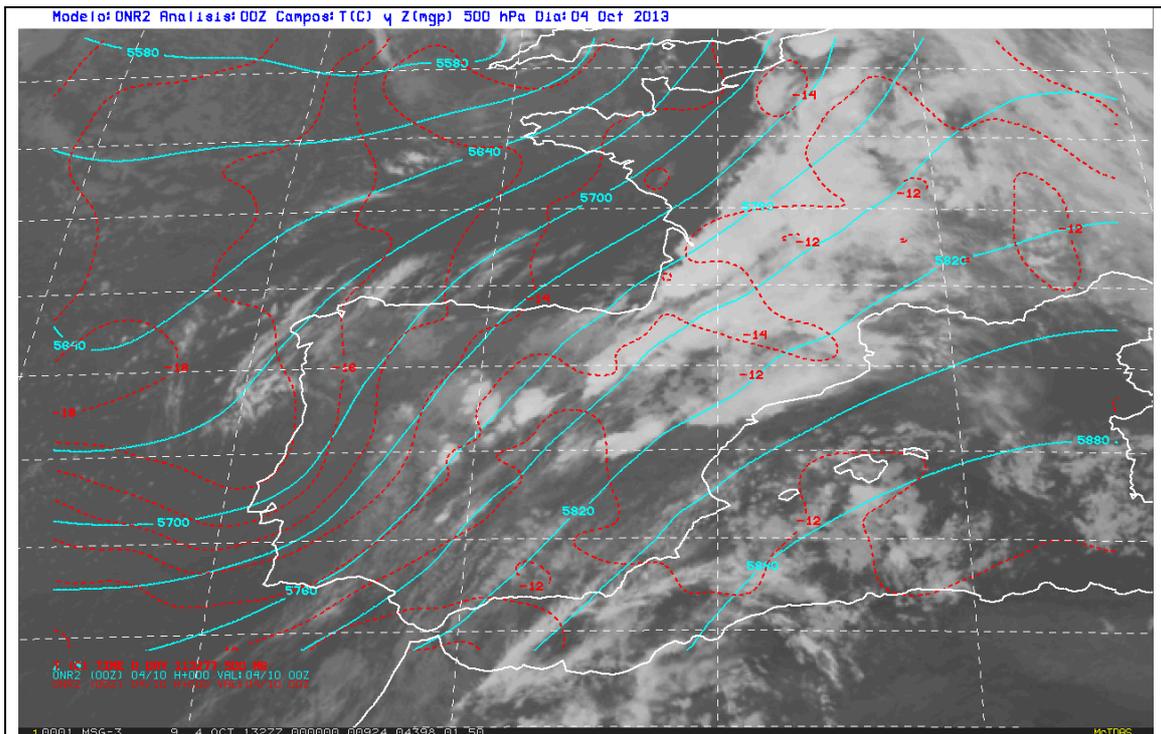


Figura 9. Imagen infrarroja del MSG con campos superpuestos del análisis de temperatura, línea roja discontinua en °C, y geopotencial en 500 hPa, línea azul continua, del HIRLAM 0.48° del día 4 de octubre a las 00 UTC.

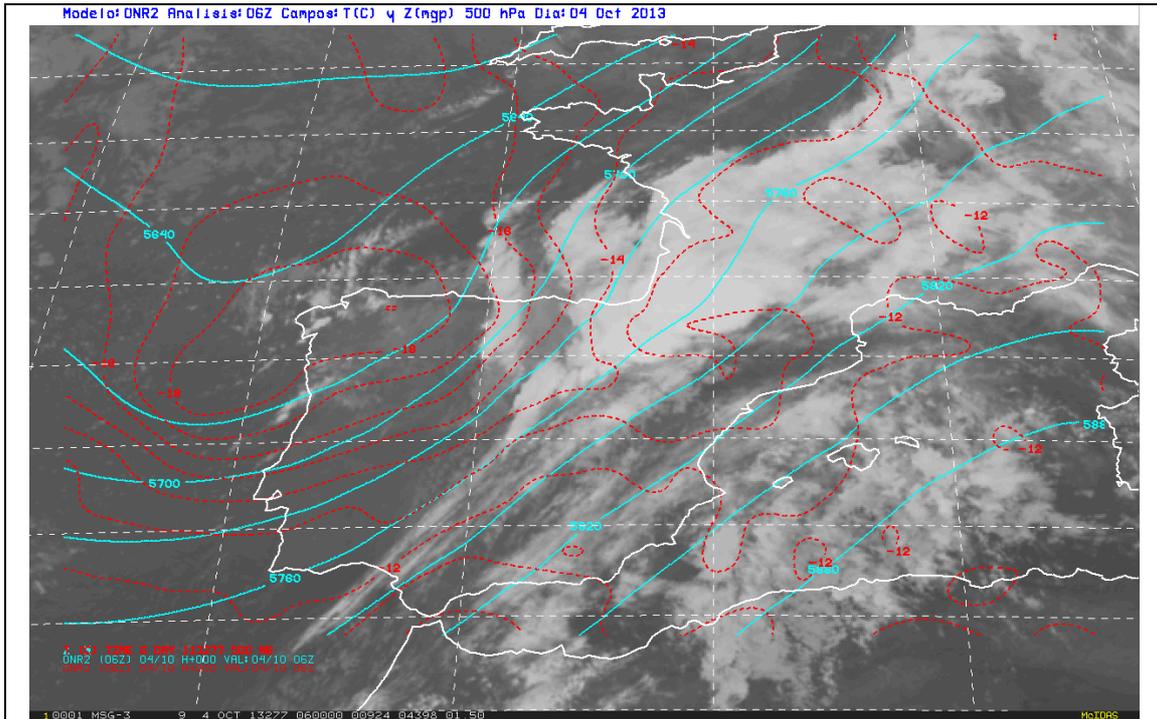


Figura 10. Imagen infrarroja del MSG con campos superpuestos del análisis de temperatura, línea roja discontinua en °C, y geopotencial en 500 hPa, línea azul continua, del HIRLAM 0.48° del día 4 de octubre a las 06 UTC.

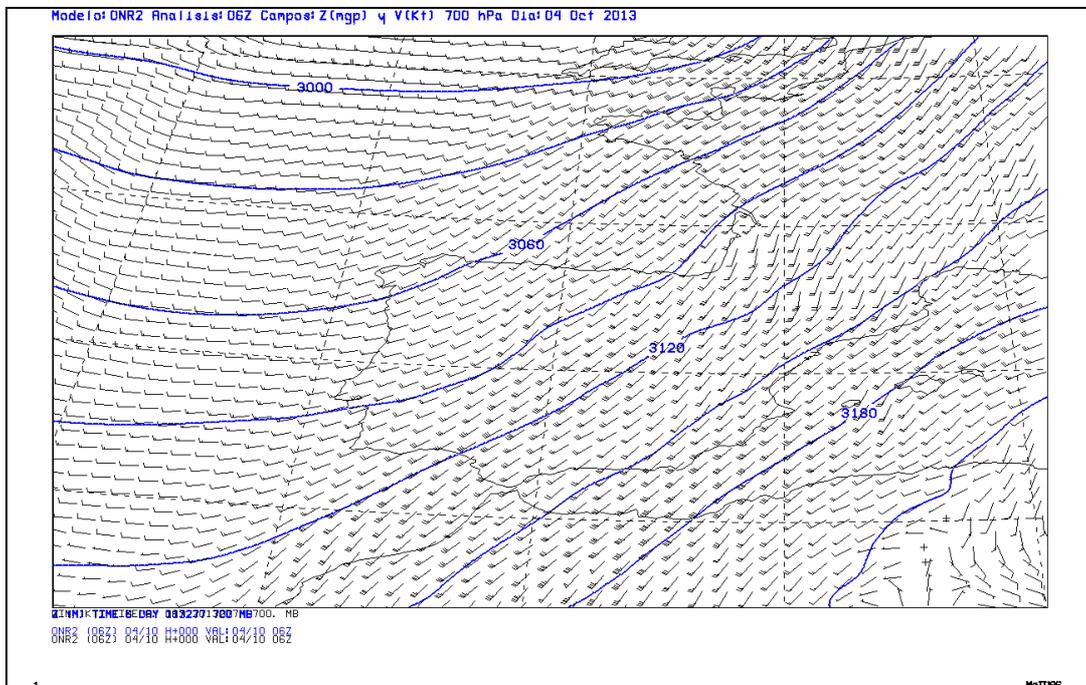


Figura 11. Análisis de viento y geopotencial en 700 hPa, líneas azules, del HIRLAM 0.48°, el día 4 de octubre a las 06 UTC.

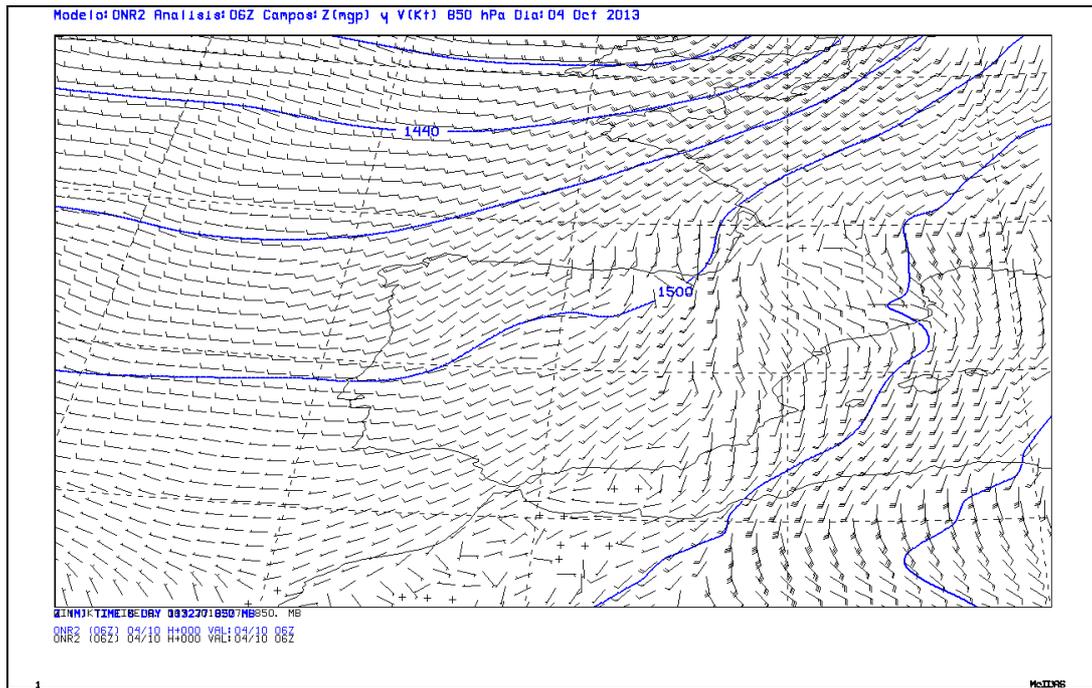


Figura 12. Análisis de viento y geopotencial en 850 hPa, líneas azules, del HIRLAM 0.48°, el día 4 de octubre a las 06 UTC.

En superficie tanto el HIRLAM como el ECMWF muestran a las 06 UTC una mesoalta en el área pirenaica y bajas presiones relativas en los litorales atlántico y mediterráneo lo que, de alguna manera, refuerza el flujo sinóptico de componente E que sube por el Valle del Ebro hasta Las Cinco Villas y Navarra (figuras 13 y 14).

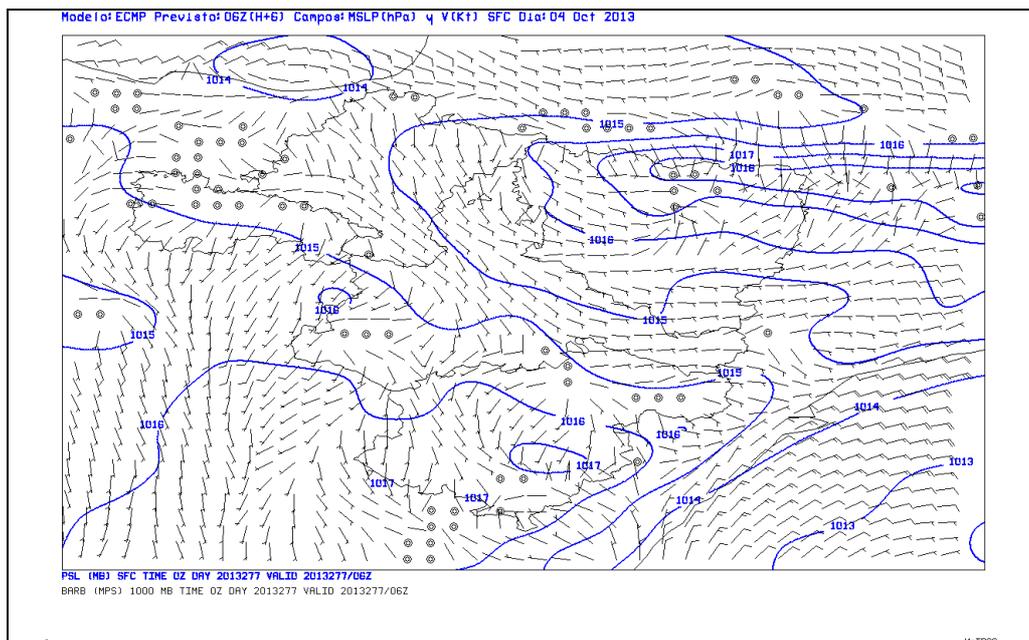


Figura 13. Análisis de viento y presión a nivel del mar, líneas azules, del ECMWF 0.125°, el día 4 de octubre a las 06 UTC.

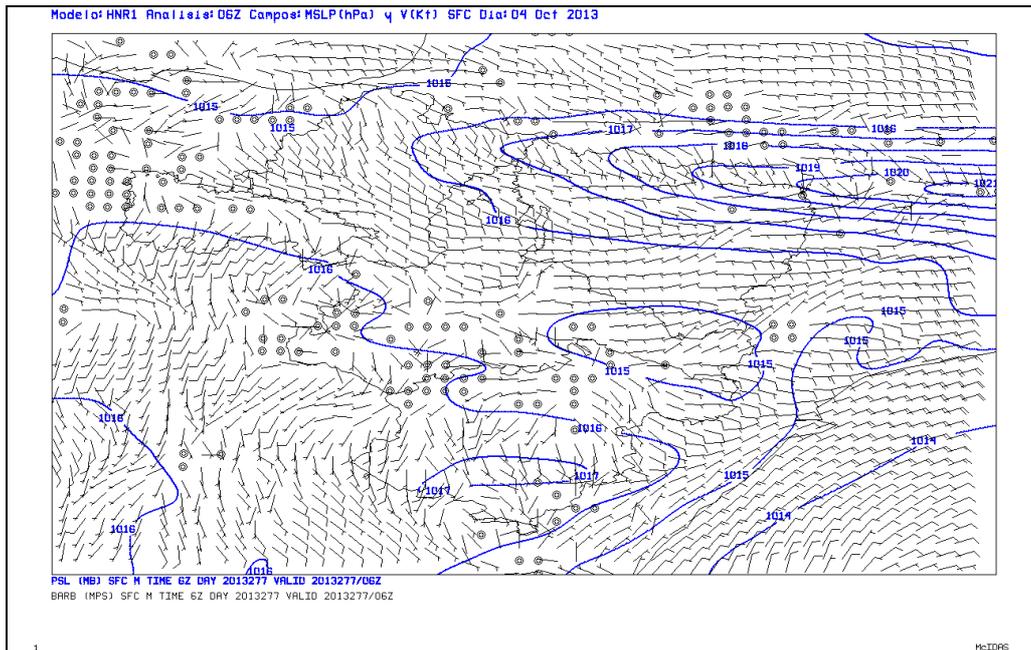


Figura 14. Análisis de viento y presión a nivel del mar, líneas azules, del HIRLAM 0.05°, el día 4 de octubre a las 06 UTC.

El viento es muy parecido entre 500 y 700 hPa pero por debajo de este último nivel y hasta superficie los modelos predecían una cizalladura moderada de 30 kt (15 m/s) de dirección SSW, y el giro del viento con la altura evidenciaba una advección cálida. Los modelos mostraban además una marcada convergencia de vientos y de humedad en el valle del Ebro especialmente en el área de las Cinco Villas (ver figuras 15 a 19). El ECMWF daba más señal que el HIRLAM tanto en 925 como en 850 hPa. Además el ECMWF situaba este máximo sobre esta zona entorno a las 06 UTC mientras que el HIRLAM lo retrasaba hasta las 09 UTC. El modelo del ECMWF en 850 a las 06 UTC daba valores de convergencia de humedad de hasta 24g/Kg/6h, mientras el HIRLAM en 850 a las 09 UTC daba valores de 14 g/Kg/6h.

Con todo esto, se puede decir que para la zona de interés los modelos diagnosticaban un entorno favorable a desarrollos convectivos con posibilidad de bastante organización y con valores de cizalladura moderados.

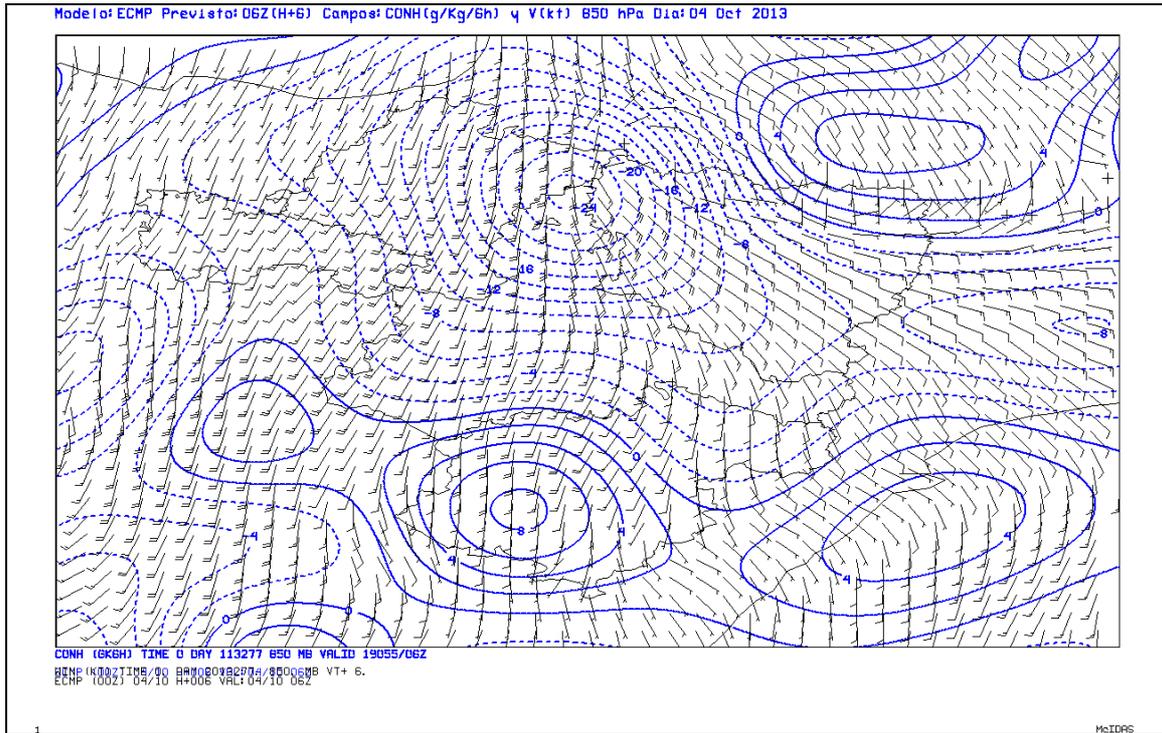


Figura 15. Convergencia de humedad, líneas azules, y viento en 850 hPa, ECMWF 0.125°, el día 4 de octubre a las 06 UTC.

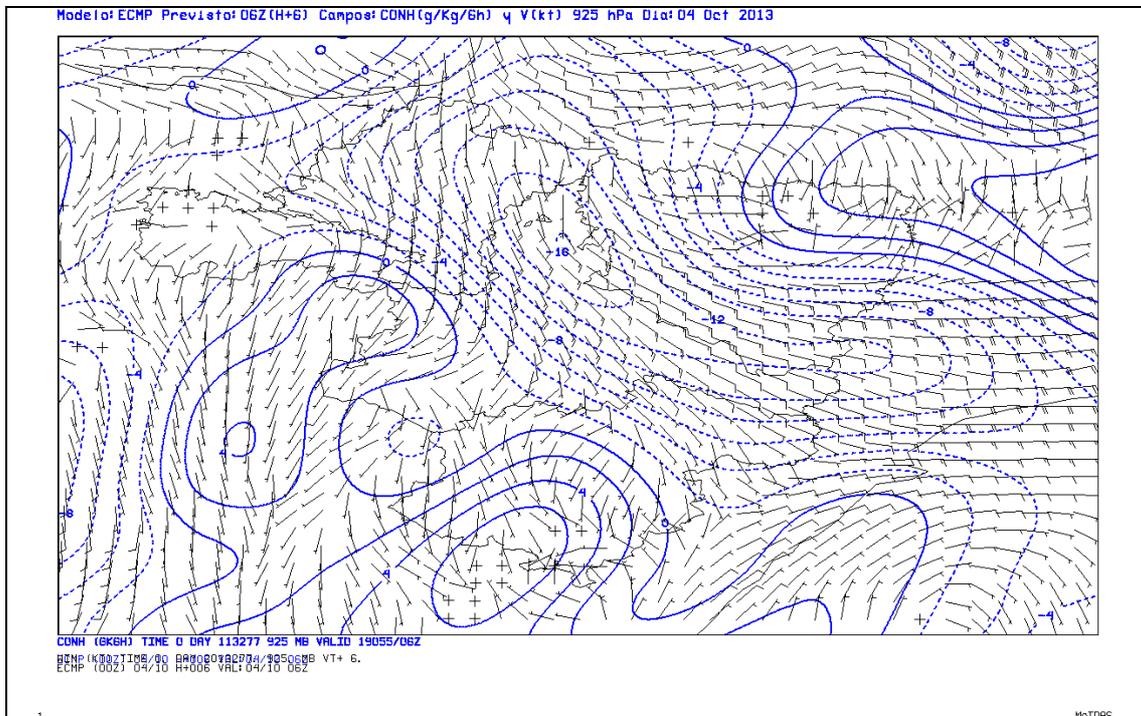


Figura 16. Convergencia de humedad, líneas azules, y viento en 925 hPa, ECMWF 0.125°, el día 4 de octubre a las 06 UTC.

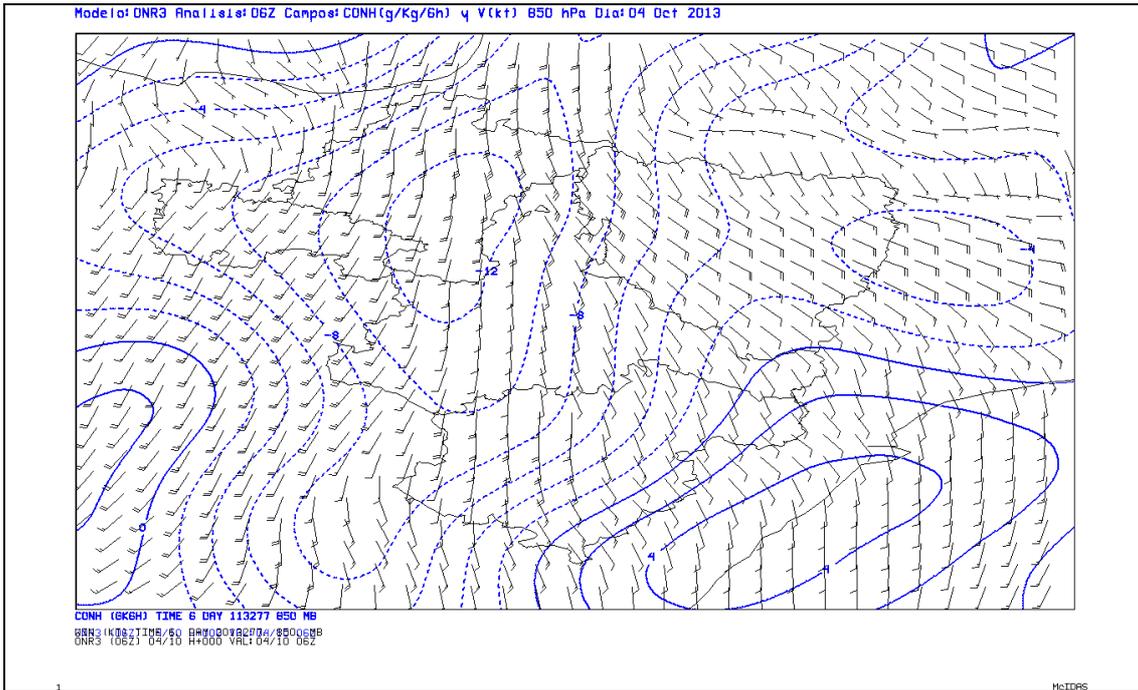


Figura 17. Convergencia de humedad, líneas azules, y viento en 850 hPa, HIRLAM 0.16°, el día 4 de octubre a las 06 UTC.

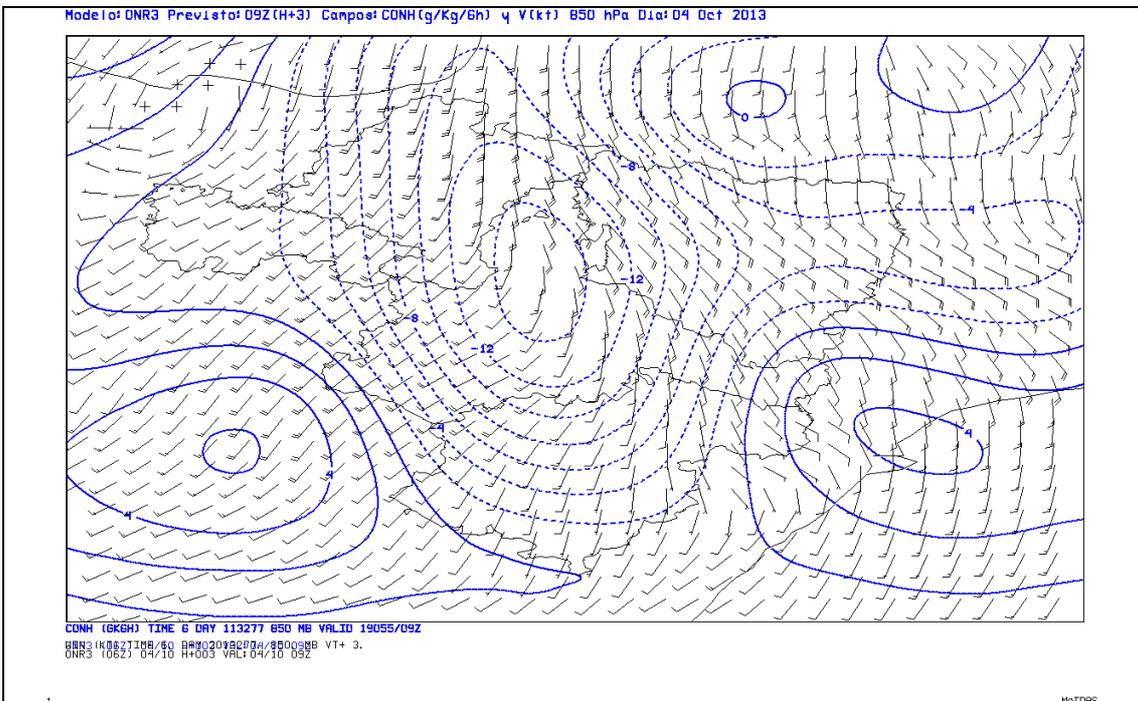


Figura 18. Convergencia de humedad, líneas azules, y viento en 850 hPa, HIRLAM 0.16°, el día 4 de octubre a las 09 UTC.

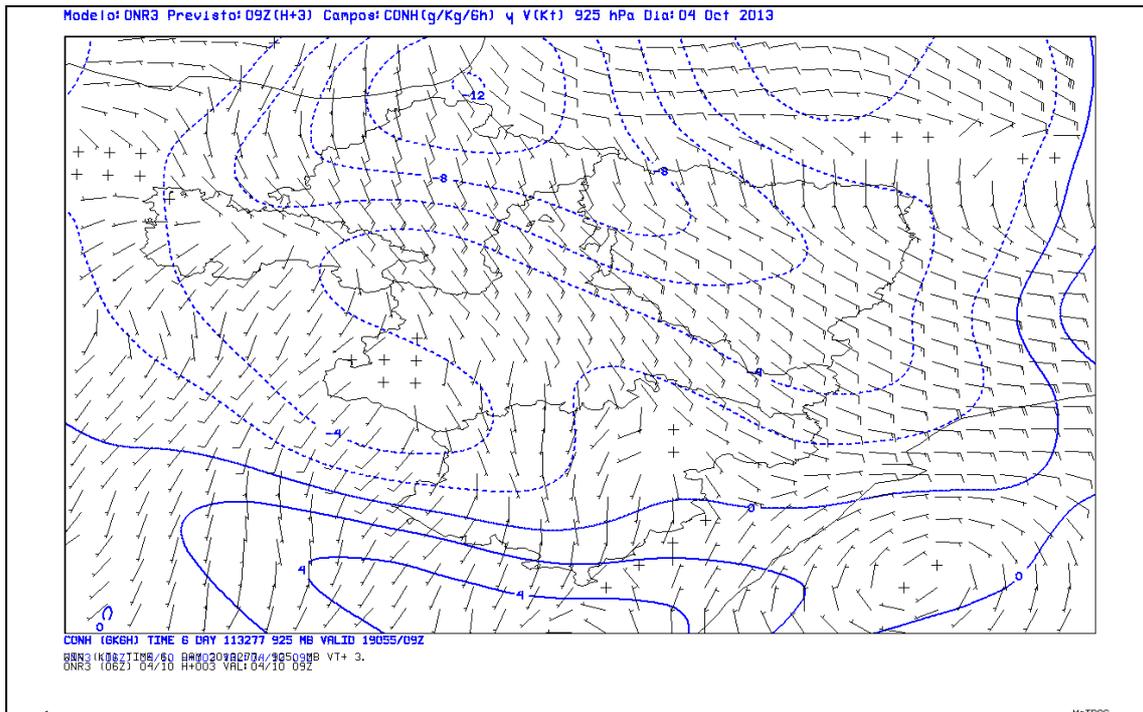


Figura 19. Convergencia de humedad, líneas azules, y viento en 925 hPa, HIRLAM 0.16°, el día 4 de octubre a las 09 UTC.

ENTORNO PRECONVECTIVO

Tal y como se puede ver en los apartados anteriores, la zona de interés se encontraba en un entorno favorable a desarrollos convectivos, que podrían ser organizados, dada la presencia de inestabilidad, asociada a una vaguada, y cizalladura en la estructura vertical de viento. Considerando en detalle los campos de viento en niveles bajos, encontramos la presencia de los demás ingredientes para el desarrollo de convección profunda, hay un importante aporte de humedad, dado el flujo del SE que asciende por el valle del Ebro aportando aire cálido y húmedo del mediterráneo, y se pueden apreciar también zonas de convergencia de vientos y convergencia de humedad (ver figuras 13 a 19) en el área del W y N de la provincia de Zaragoza, N de Soria, E de La Rioja así como en el SE y E de Navarra, que podrían haber actuado como mecanismos de disparo.

Si entramos a analizar de manera más específica los campos de diagnóstico de la convección, se pueden apreciar las siguientes diferencias y similitudes entre el HIRLAM 0.16 y el ECMWF operativo en el intervalo de 00 UTC a 06 UTC del día 4 (ver figuras 20 a 31):

- Ambos modelos dan valores de *Lifted Index* (LI) no muy elevados, entre 1 y -2 °C, que se corresponde con zonas de cierta inestabilidad, aunque tampoco excesiva.
- Valores de CAPE (Energía Potencial Convectiva Disponible) entre 100 y 400 J/Kg previstos por HIRLAM y también por ECMWF, si bien ambos modelos ya han resuelto precipitación convectiva, que parametrizan a través del CAPE. En la Península se pueden considerar significativos valores de más de 400 J/Kg.
- Se aprecia un marcado máximo de inestabilidad potencial en el estrato 850-500 hPa que abarca prácticamente todo el E de la Península Ibérica, y que en el área

que nos interesa presenta valores próximos a -2 del parámetro ESTW en 700 hPa, previstos de manera similar por los dos modelos.

- Ambos modelos pronostican valores de CIN (Inhibición Convectiva) menores de 150 J/Kg en el área de interés. Esto es importante ya que supone menos dificultad para el desarrollo de la convección.
- Se aprecian las zonas de convergencia de vientos en superficie, mencionadas en el apartado anterior, así como convergencias de humedad en 850 hPa muy significativas: valores entre -5 y -10 g/Kg/6horas según el modelo HIRLAM y entre -8 y -15 g/Kg/6horas según ECMWF, que pueden actuar como mecanismo de disparo, al igual que las convergencias de viento antes señaladas. Además, son una evidencia del aporte de humedad en capas bajas necesario para el desarrollo de fenómenos convectivos, y por otro lado suelen llevar aparejado un importante aumento de la inestabilidad potencial.
- Contenido de agua precipitable hasta 300 hPa muy elevado para esta época del año: entre 32 y 37 mm, que en algún momento parece estar entre 37 y 50 mm.
- Valores muy significativos de la cizalladura vertical hasta 6 km. Según los dos modelos en la zona de estudio se ven valores entre 10 y 16 m/s, e incluso en algún momento se llega a valores entre 16 y 20 m/s. También tenemos valores que se pueden considerar significativos de helicidad relativa a la tormenta, próximos a 100 m^2/s^2 , incluso entre 100 y 150 m^2/s^2 y en algún momento, según las salidas del modelo del ECMWF, se observan pequeñas áreas con valores entre 150 y 200 m^2/s^2 . Este parámetro supone un entorno favorable a la organización de la convección, como ya indica la cizalladura vertical, pero además es una medida de la componente horizontal de vorticidad paralela al flujo que alimenta la tormenta, y es útil como una estimación de la capacidad para generar rotación en la corriente ascendente. Se puede considerar que valores superiores a 150 m^2/s^2 son significativos de cara al posible desarrollo de supercélulas.
- Ambos modelos prevén en las áreas de interés de este informe cantidades significativas de precipitación y de precipitación de origen convectivo, que superan valores de 5 e incluso de 10 mm en 6 horas.

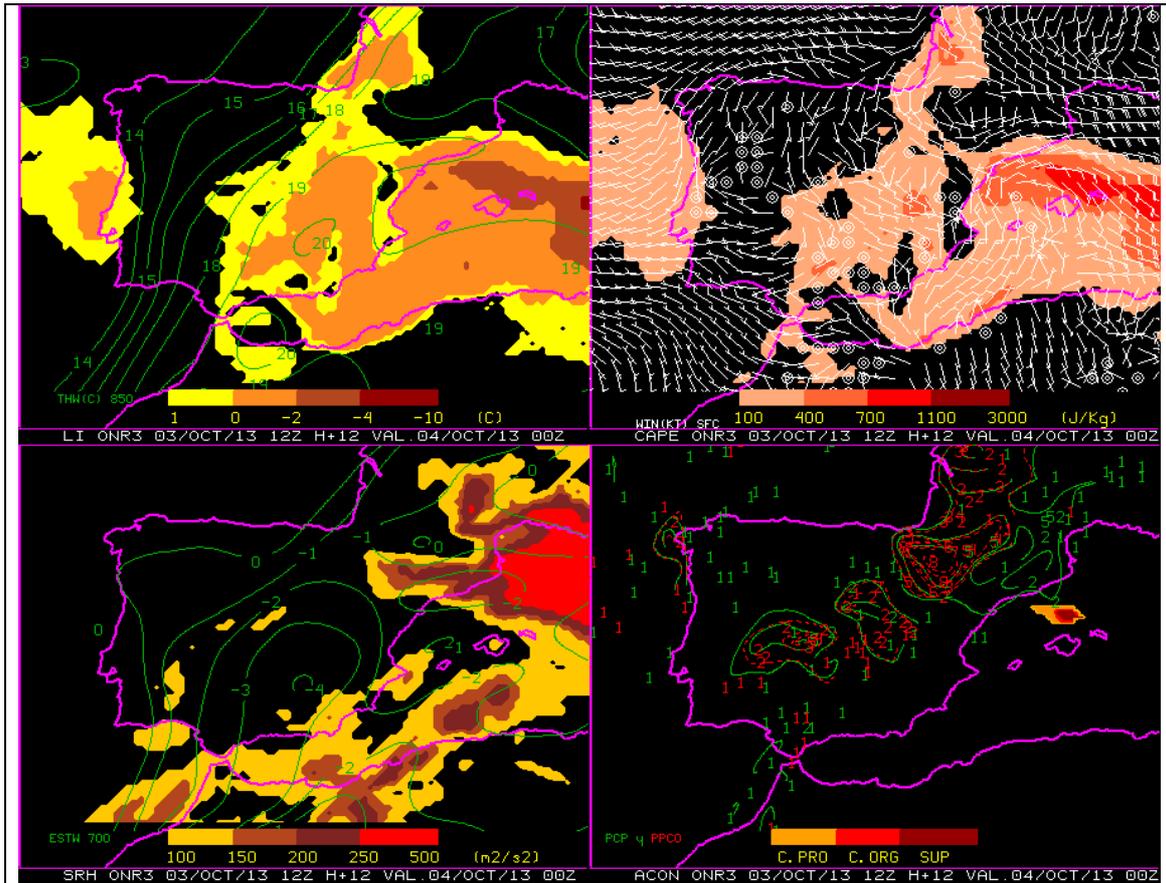


Figura 20. Índices de diagnóstico convectivo previstos por HIRLAM 0.16 para las 00 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+12). Arriba a la izquierda: LI (coloreado) y temperatura potencial del termómetro húmedo en 850 hPa. Arriba a la derecha: CAPE coloreado y barbas de viento en superficie. Abajo a la izquierda: Helicidad relativa a la tormenta (coloreada) e inestabilidad potencial en 700 hPa. Abajo a la derecha: diagnóstico de convección profunda, organizada o supercelular (coloreado) y precipitación total y convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico.

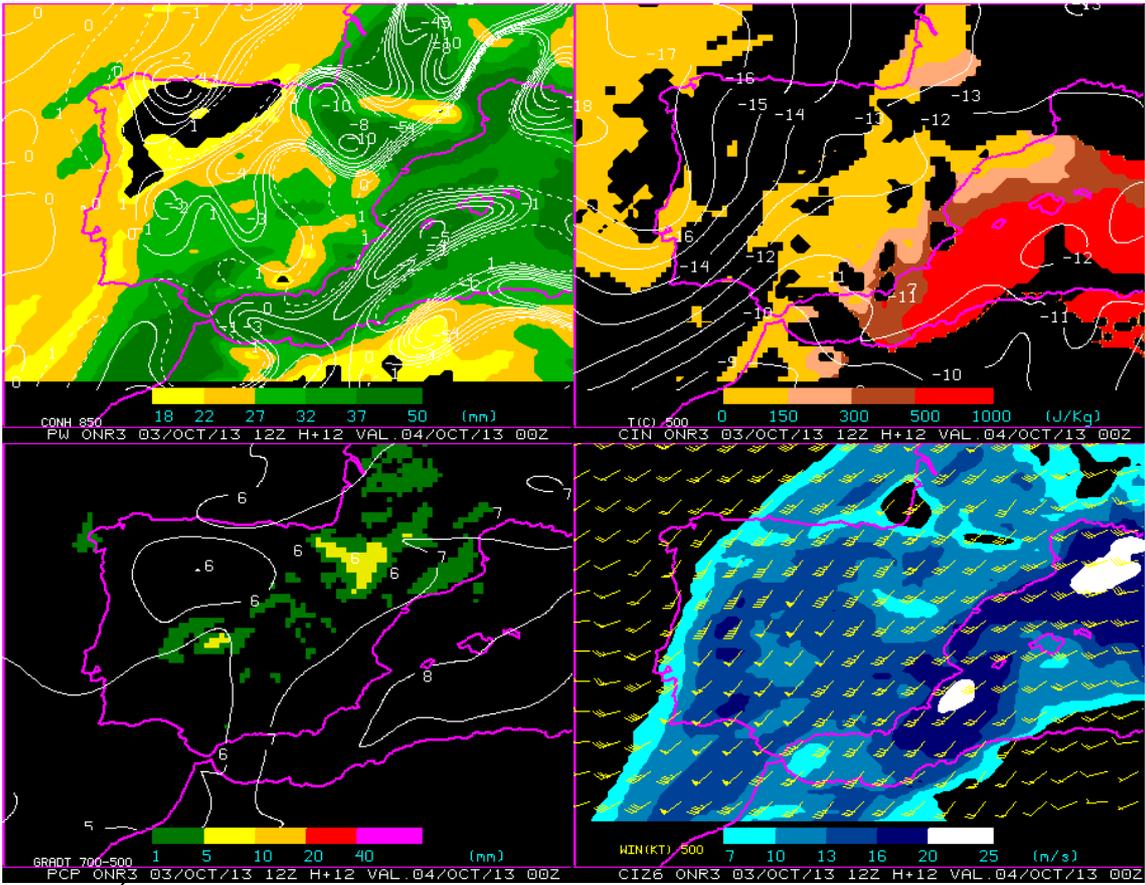


Figura 21. Índices de diagnóstico convectivo previstos por HIRLAM 0.16 para las 00 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+12). Arriba a la izquierda: agua precipitable hasta 300 hPa coloreada y convergencia de humedad en 850 hPa. Arriba a la derecha: CIN coloreado y temperatura en 500 hPa. Abajo a la izquierda: Precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico (coloreado) y gradiente de temperatura 700-500 hPa. Abajo a la derecha: Cizalladura entre el viento medio en los primeros 500 m y el viento medio en los primeros 6 Km (coloreado) y barbas de viento en 500 hPa.

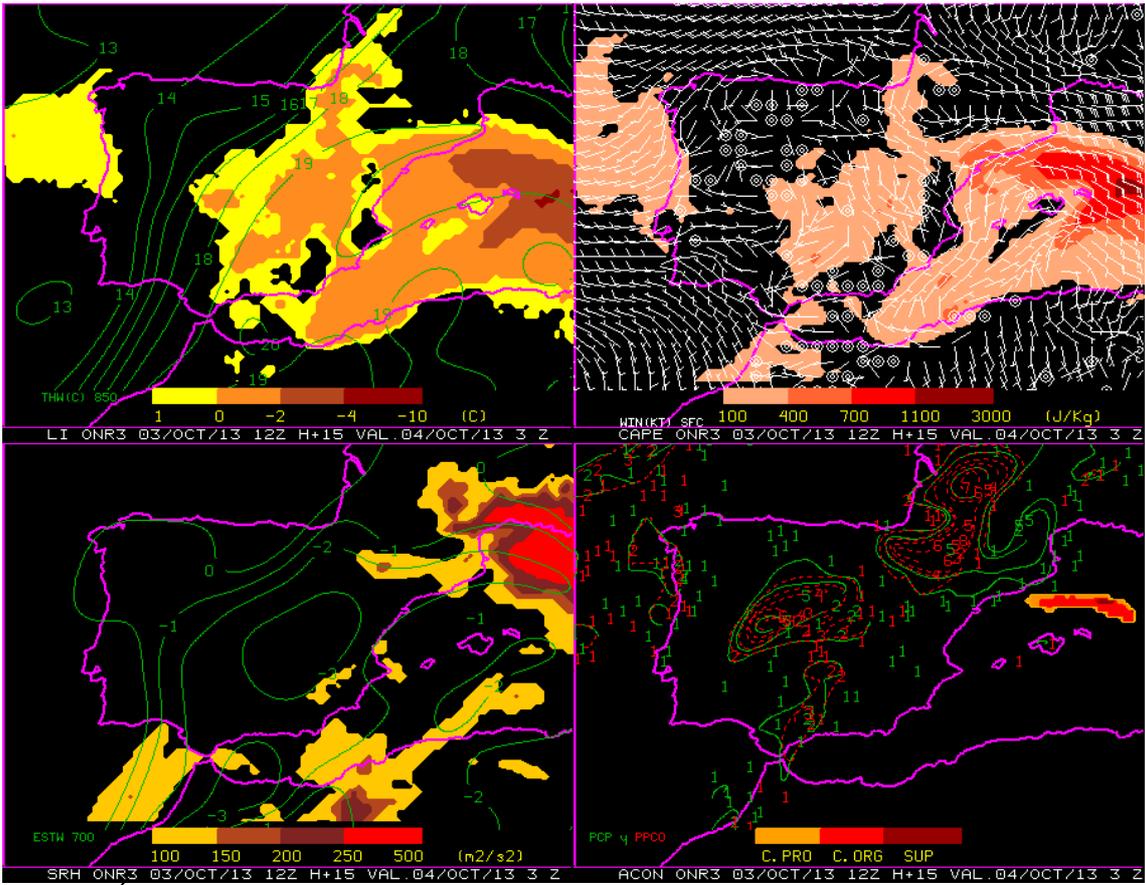


Figura 22. Índices de diagnóstico convectivo previstos por HIRLAM 0.16 para las 03 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+15). Arriba a la izquierda: LI (coloreado) y temperatura potencial del termómetro húmedo en 850 hPa. Arriba a la derecha: CAPE coloreado y barbas de viento en superficie. Abajo a la izquierda: Helicidad relativa a la tormenta (coloreada) e inestabilidad potencial en 700 hPa. Abajo a la derecha: diagnóstico de convección profunda, organizada o supercelular (coloreado) y precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico.

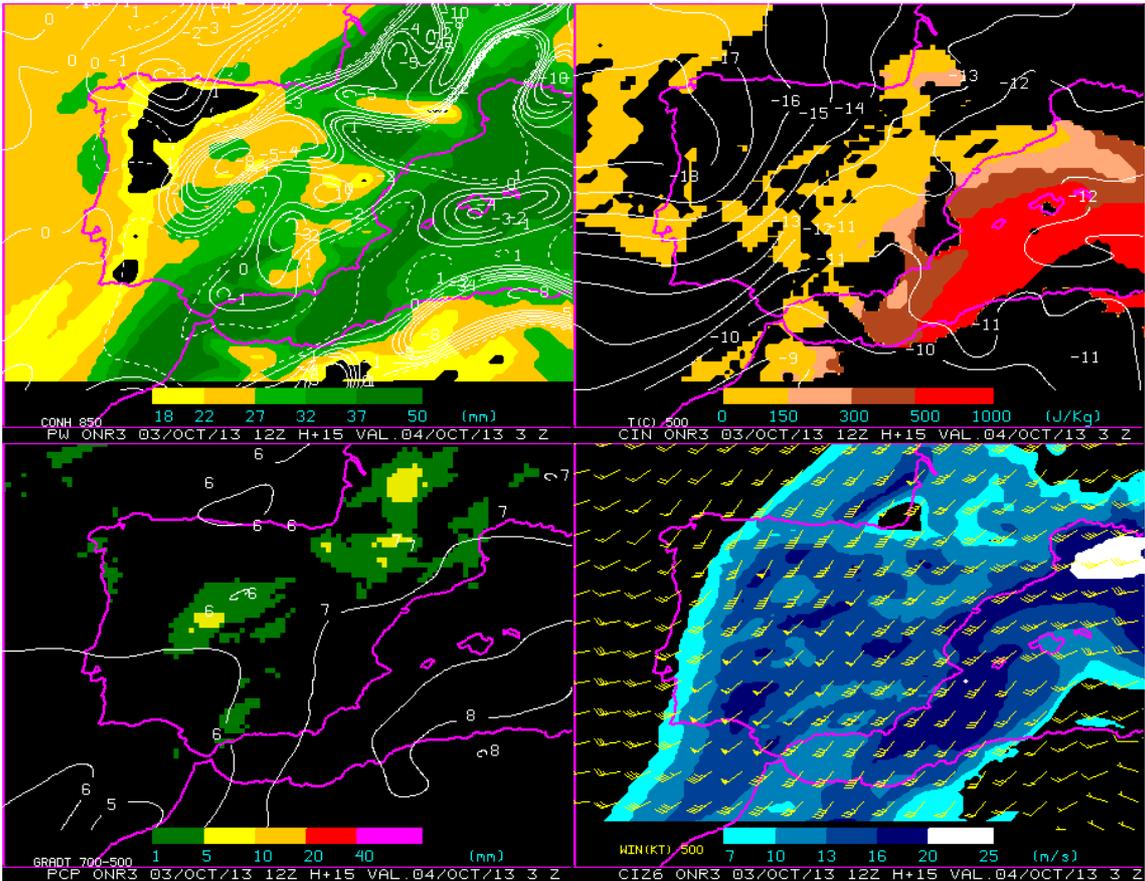


Figura 23. Índices de diagnóstico convectivo previstos por HIRLAM 0.16 para las 03 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+15). Arriba a la izquierda: agua precipitable hasta 300 hPa coloreada y convergencia de humedad en 850 hPa. Arriba a la derecha: CIN coloreado y temperatura en 500 hPa. Abajo a la izquierda: Precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico (coloreado) y gradiente de temperatura 700-500 hPa. Abajo a la derecha: Cizalladura entre el viento medio en los primeros 500 m y el viento medio en los primeros 6 Km (coloreado) y barbas de viento en 500 hPa.

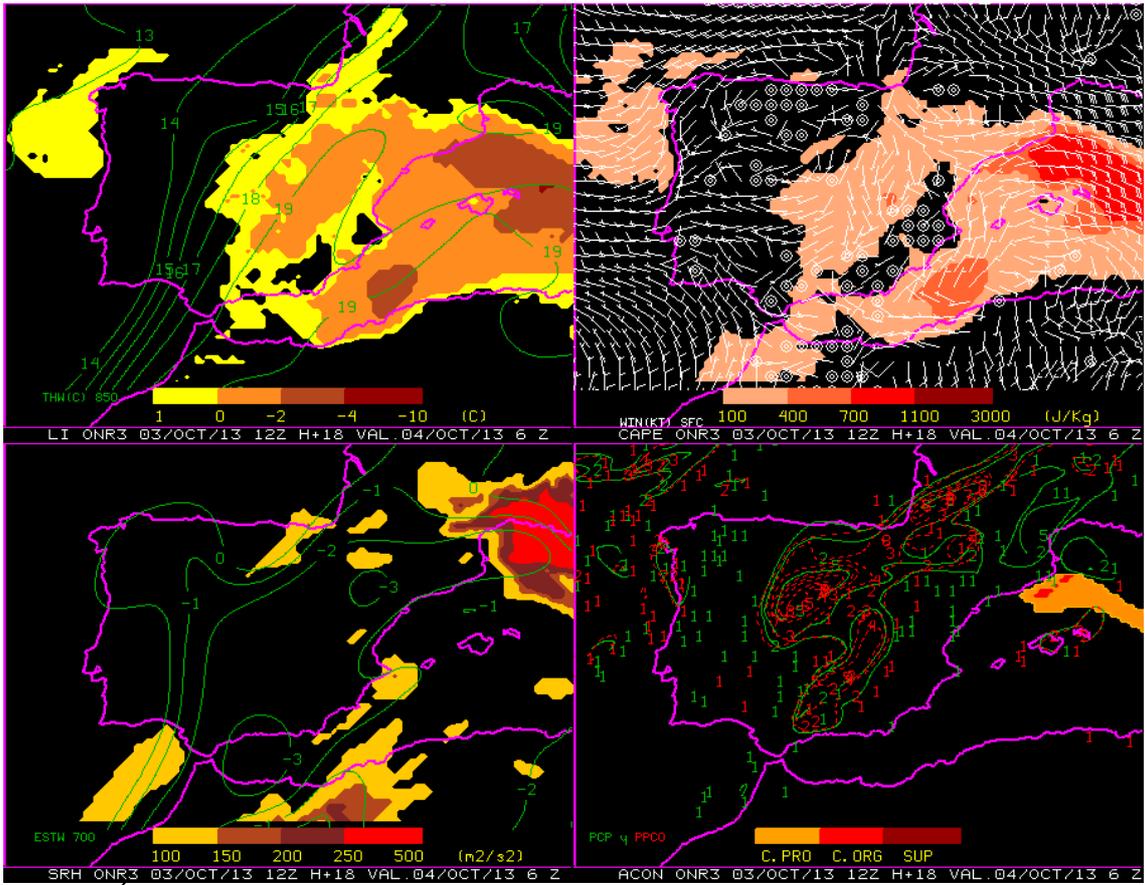


Figura 24. Índices de diagnóstico convectivo previstos por HIRLAM 0.16 para las 06 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+18). Arriba a la izquierda: LI (coloreado) y temperatura potencial del termómetro húmedo en 850 hPa. Arriba a la derecha: CAPE coloreado y barbas de viento en superficie. Abajo a la izquierda: Helicidad relativa a la tormenta (coloreada) e inestabilidad potencial en 700 hPa. Abajo a la derecha: diagnóstico de convección profunda, organizada o supercelular (coloreado) y precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico.

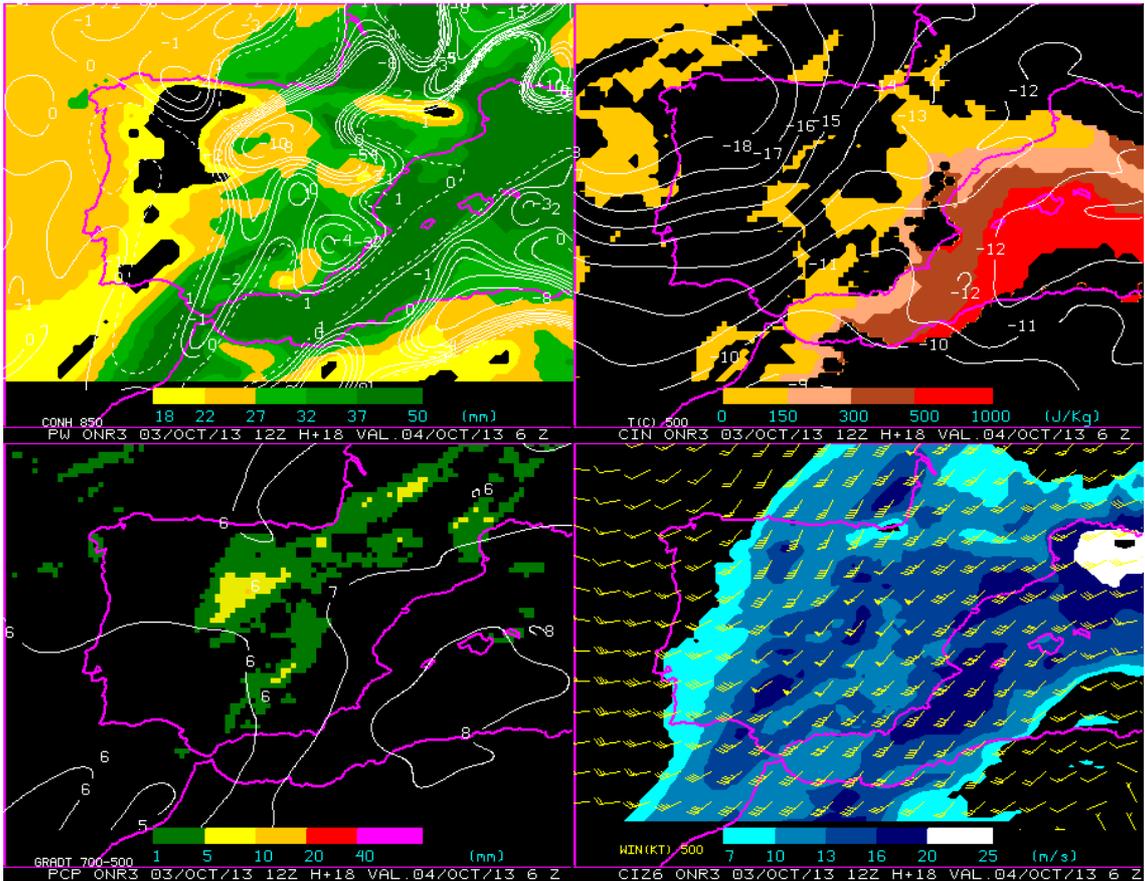


Figura 25. Índices de diagnóstico convectivo previstos por HIRLAM 0.16 para las 06 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+18). Arriba a la izquierda: agua precipitable hasta 300 hPa coloreada y convergencia de humedad en 850 hPa. Arriba a la derecha: CIN coloreado y temperatura en 500 hPa. Abajo a la izquierda: Precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico (coloreado) y gradiente de temperatura 700-500 hPa. Abajo a la derecha: Cizalladura entre el viento medio en los primeros 500 m y el viento medio en los primeros 6 Km (coloreado) y barbas de viento en 500 hPa.

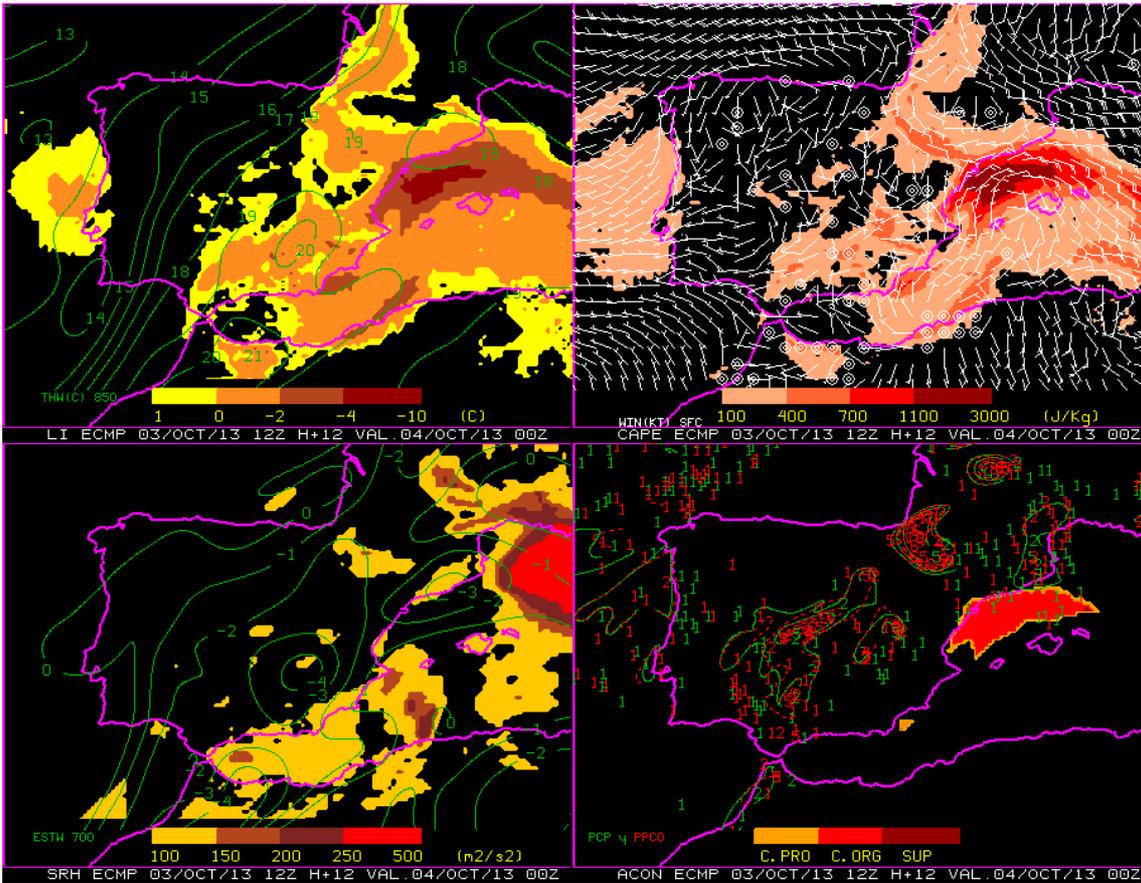


Figura 26. Índices de diagnóstico convectivo previstos por el modelo del ECMWF para las 00 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+12). Arriba a la izquierda: LI (coloreado) y temperatura potencial del termómetro húmedo en 850 hPa. Arriba a la derecha: CAPE coloreado y barbas de viento en superficie. Abajo a la izquierda: Helicidad relativa a la tormenta (coloreada) e inestabilidad potencial en 700 hPa. Abajo a la derecha: diagnóstico de convección profunda, organizada o supercelular (coloreado) y precipitación total y convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico.

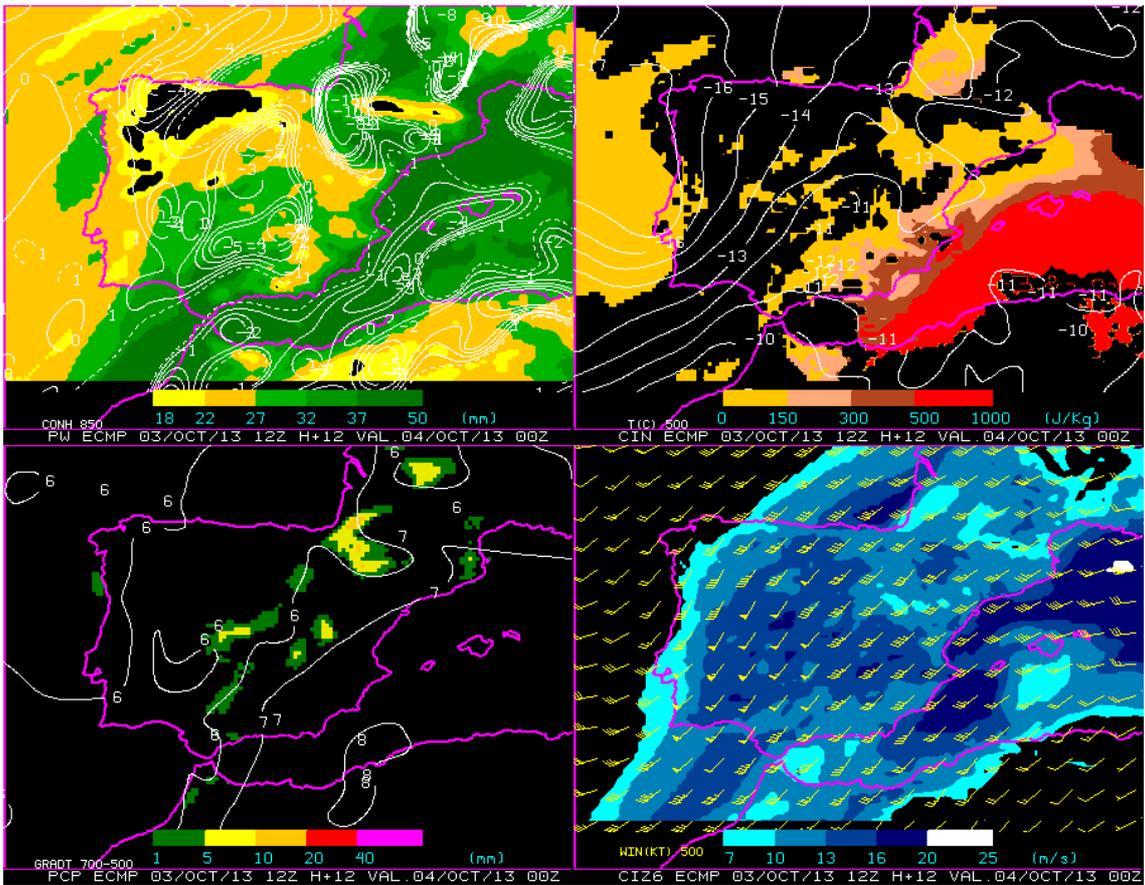


Figura 27. Índices de diagnóstico convectivo previstos por el modelo del ECMWF para las 00 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+12). Arriba a la izquierda: agua precipitable hasta 300 hPa coloreada y convergencia de humedad en 850 hPa. Arriba a la derecha: CIN coloreado y temperatura en 500 hPa. Abajo a la izquierda: Precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico (coloreado) y gradiente de temperatura 700-500 hPa. Abajo a la derecha: Cizalladura entre el viento medio en los primeros 500 m y el viento medio en los primeros 6 Km (coloreada) y barbas de viento en 500 hPa.

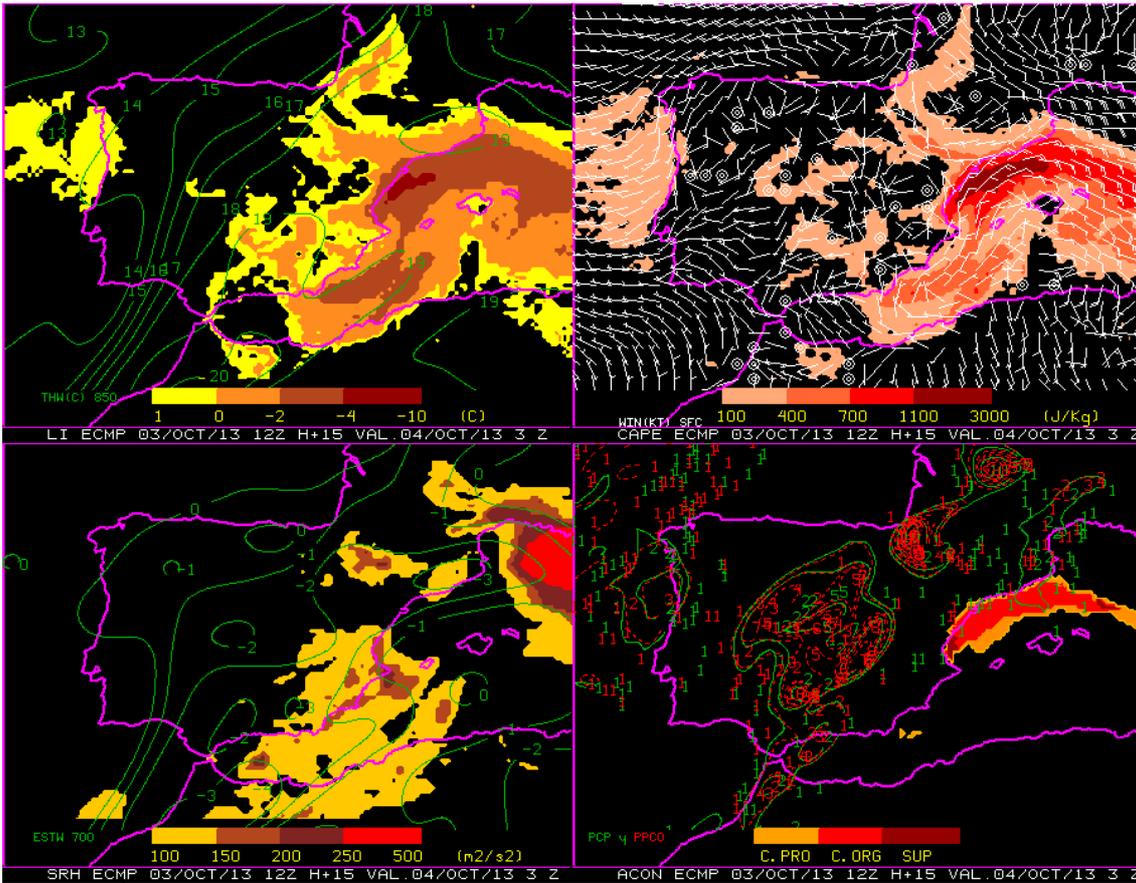


Figura 28. Índices de diagnóstico convectivo previstos por el modelo del ECMWF para las 03 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+15). Arriba a la izquierda: LI (coloreado) y temperatura potencial del termómetro húmedo en 850 hPa. Arriba a la derecha: CAPE coloreado y barbas de viento en superficie. Abajo a la izquierda: Helicidad relativa a la tormenta (coloreada) e inestabilidad potencial en 700 hPa. Abajo a la derecha: diagnóstico de convección profunda, organizada o supercelular (coloreado) y precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico.

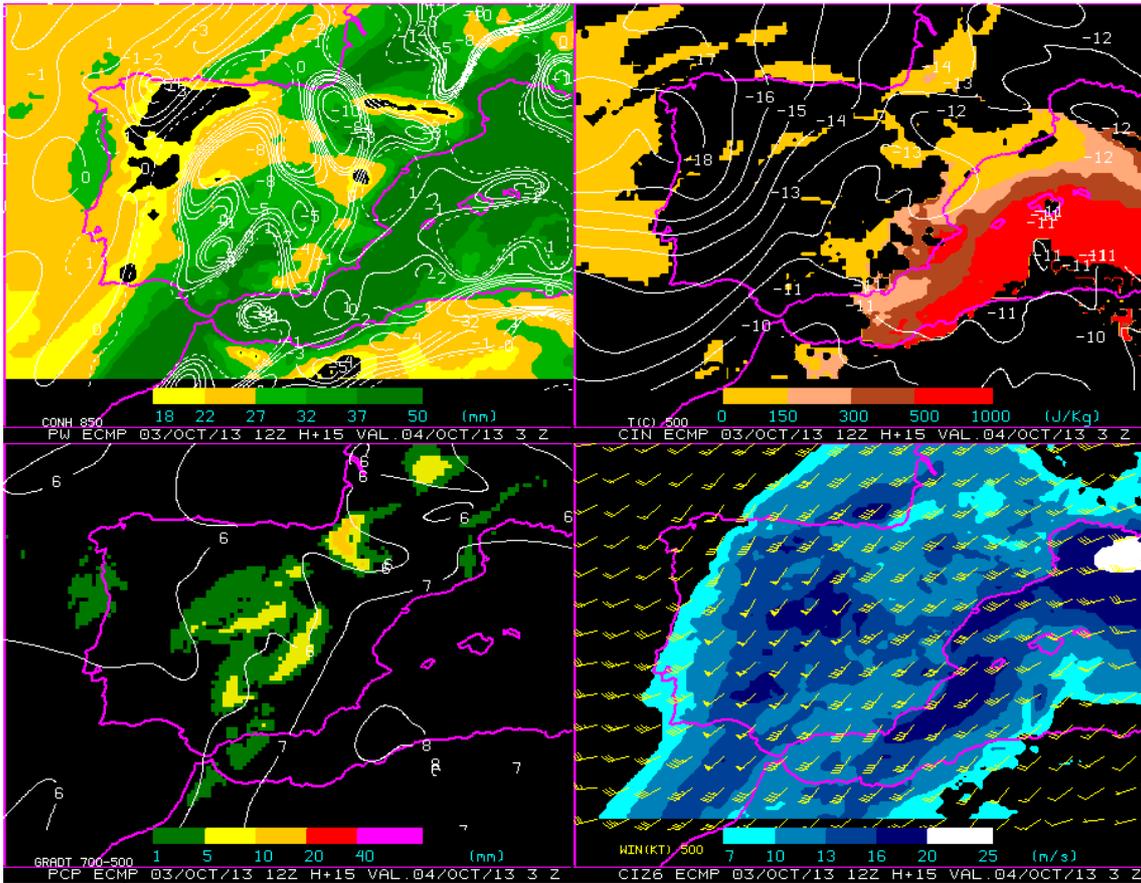


Figura 29. Índices de diagnóstico convectivo previstos por el modelo del ECMWF para las 03 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+15). Arriba a la izquierda: agua precipitable hasta 300 hPa coloreada y convergencia de humedad en 850 hPa. Arriba a la derecha: CIN coloreado y temperatura en 500 hPa. Abajo a la izquierda: Precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico (coloreado) y gradiente de temperatura 700-500 hPa. Abajo a la derecha: Cizalladura entre el viento medio en los primeros 500 m y el viento medio en los primeros 6 Km (coloreada) y barbas de viento en 500 hPa.

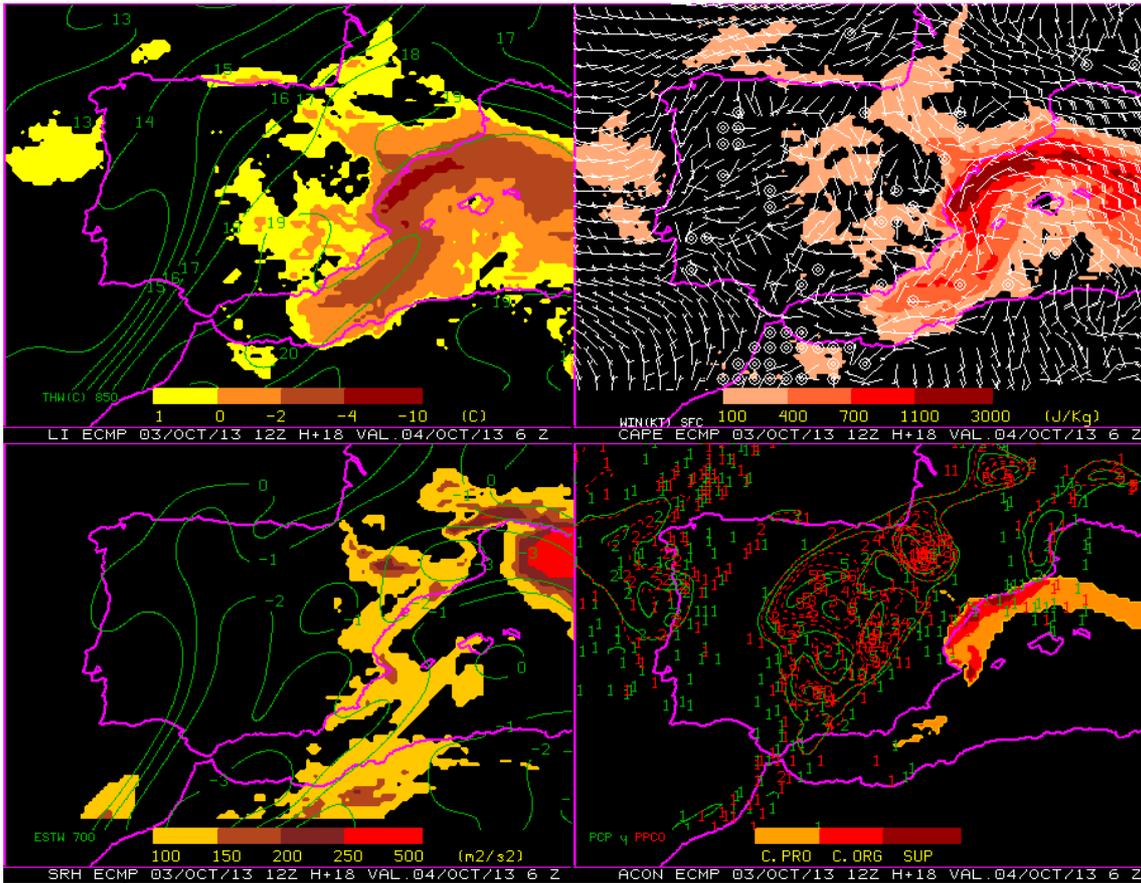


Figura 30. Índices de diagnóstico convectivo previstos por el modelo del ECMWF para las 06 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+18). Arriba a la izquierda: LI (coloreado) y temperatura potencial del termómetro húmedo en 850 hPa. Arriba a la derecha: CAPE coloreado y barbas de viento en superficie. Abajo a la izquierda: Helicidad relativa a la tormenta (coloreada) e inestabilidad potencial en 700 hPa. Abajo a la derecha: diagnóstico de convección profunda, organizada o supercelular (coloreado) y precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico.

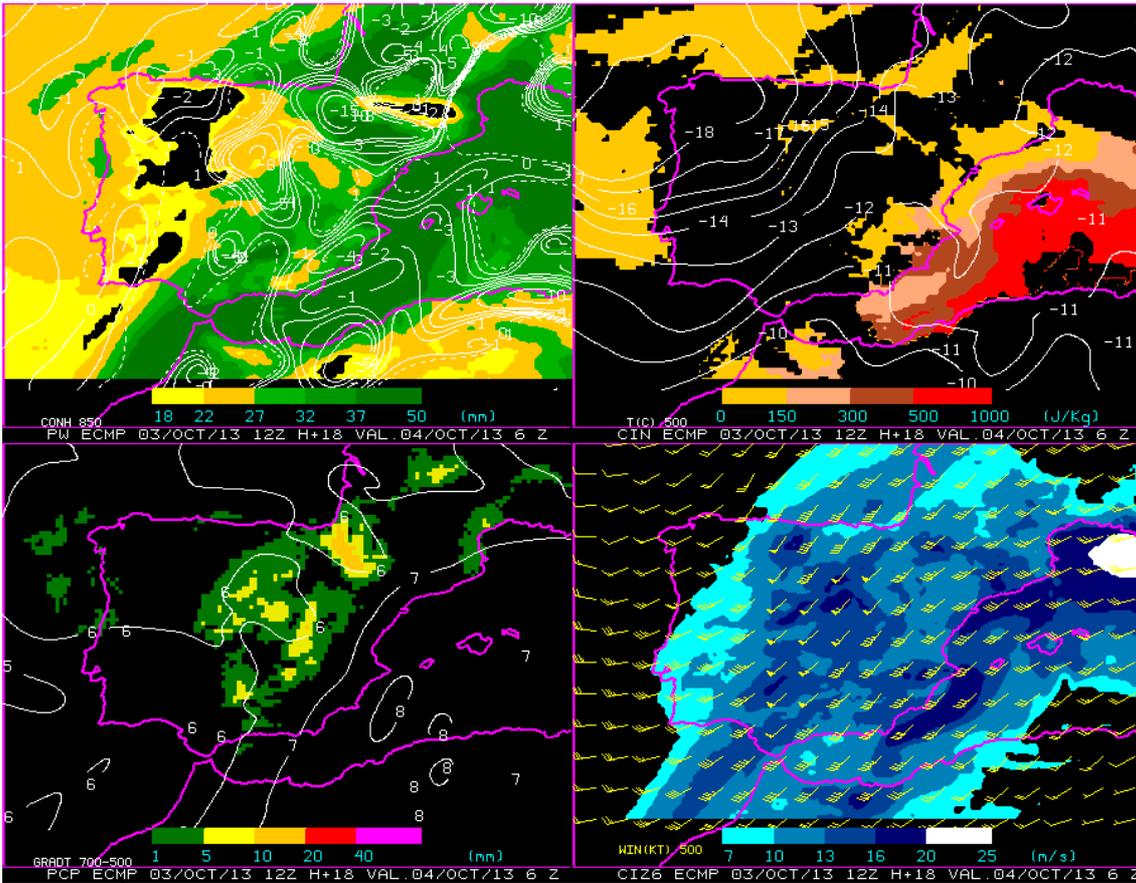


Figura 31. Índices de diagnóstico convectivo previstos por el modelo del ECMWF para las 06 UTC del viernes 4 de octubre de 2013 (pasada de 12 UTC, alcance H+18). Arriba a la izquierda: agua precipitable hasta 300 hPa coloreada y convergencia de humedad en 850 hPa. Arriba a la derecha: CIN coloreado y temperatura en 500 hPa. Abajo a la izquierda: Precipitación convectiva prevista en las 6 horas centradas en la hora de diagnóstico (coloreado) y gradiente de temperatura 700-500 hPa. Abajo a la derecha: Cizalladura entre el viento medio en los primeros 500 m y el viento medio en los primeros 6 Km (coloreado) y barbas de viento en 500 hPa.

En las imágenes siguientes, figuras 32 a 35, se pueden ver las salidas de estos modelos relativas a dos campos de diagnóstico convectivo útiles para valorar posibles entornos favorables para el desarrollo de convección muy organizada y en concreto para el desarrollo de estructuras supercelulares. Estos campos son el CAPE hasta 3 km (CAP3), y la Helicidad Relativa a la Tormenta hasta 2 km (SRH2). En el área de estudio, teniendo en cuenta las salidas del ECMWF se aprecia, al menos, en el intervalo desde las 21 UTC del día 3 de octubre hasta las 06 UTC del día 4 valores de CAP3 entre 50 y 100 J/Kg. Según las salidas del HIRLAM 0.16, en este intervalo de tiempo no se prevén valores significativos de este parámetro. Por otro lado las salidas de ambos modelos dan valores de la SRH2 para este intervalo de tiempo entre 50 y 150 m²/s², que en algún momento parecen llegar hasta valores próximos a 200 m²/s². Según autores como Rasmussen (2003) valores de CAP3 superiores a 55-60 J/Kg realzan entornos en los que se puede favorecer el desarrollo de convección muy organizada e incluso el desarrollo de tornados, ya que estos valores refuerzan una interacción más efectiva entre la corriente ascendente y la cizalladura. Del mismo modo, y según el mismo autor, valores de SRH2 superiores a 90 m²/s² indican condiciones similares, y suponen también un entorno especialmente favorable para el desarrollo de supercélulas y de tornados.

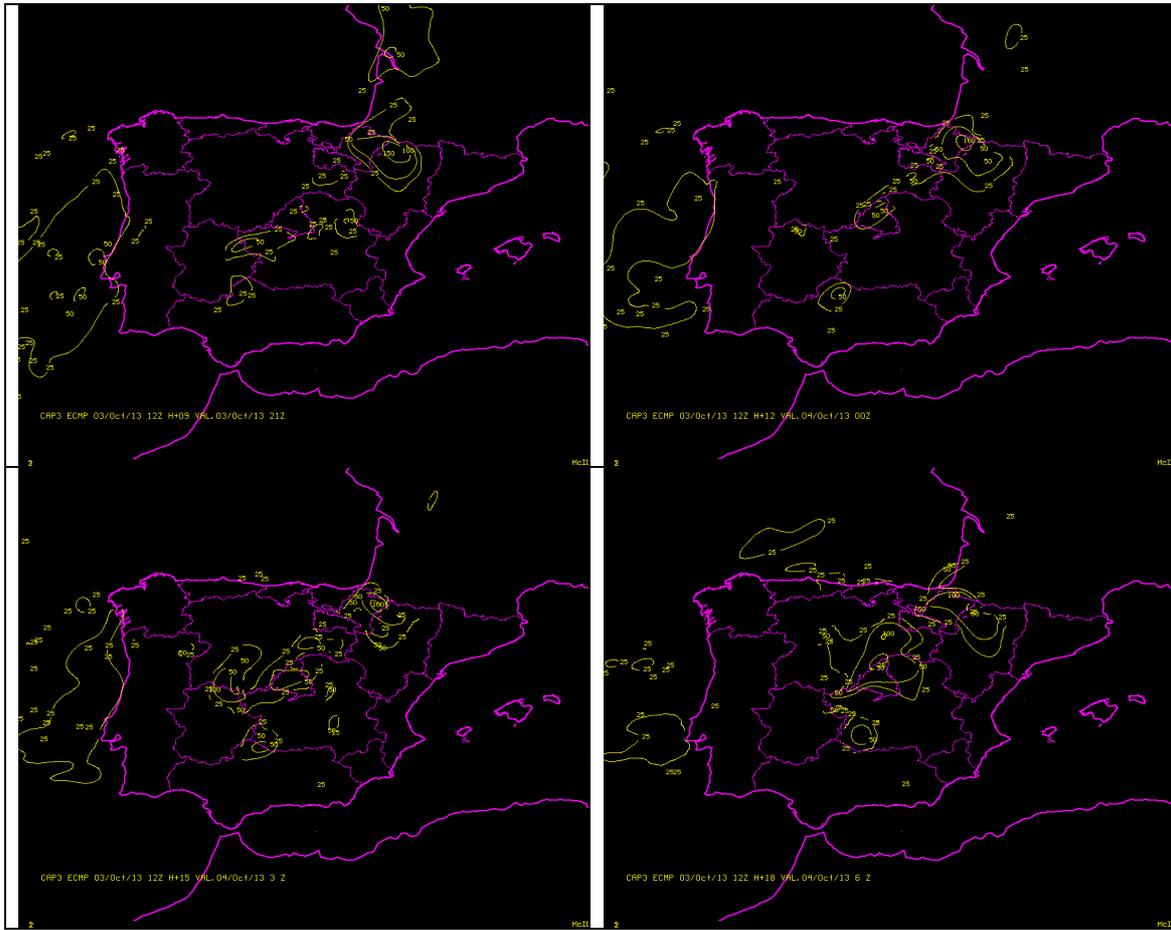


Figura 32. CAPE hasta 3 km (CAP3) previsto por la pasada del modelo del ECMWF de las 12 UTC del día 3 de octubre de 2013: Arriba a la izquierda: para las 21 UTC del jueves 3 de octubre (alcance H+09). Arriba a la derecha: para las 00 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+12). Abajo a la izquierda: para las 03 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+15). Abajo a la derecha: para las 06 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+18).

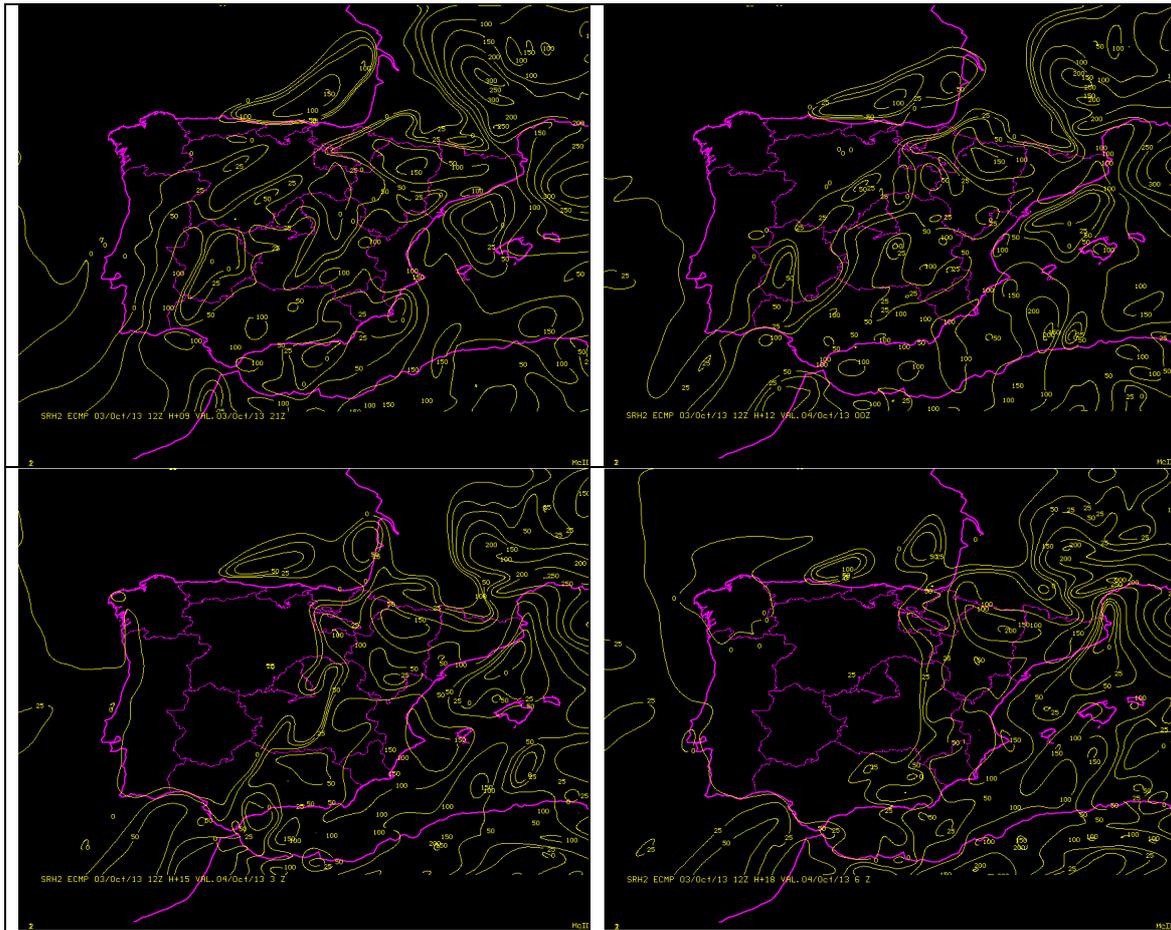


Figura 33. Helicidad Relativa a la Tormenta hasta 2 km (SRH2) previsto por la pasada del modelo del ECMWF de las 12 UTC del día 3 de octubre de 2013: Arriba a la izquierda: para las 21 UTC del jueves 3 de octubre (alcance H+09). Arriba a la derecha: para las 00 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+12). Abajo a la izquierda: para las 03 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+15). Abajo a la derecha: para las 06 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+18).

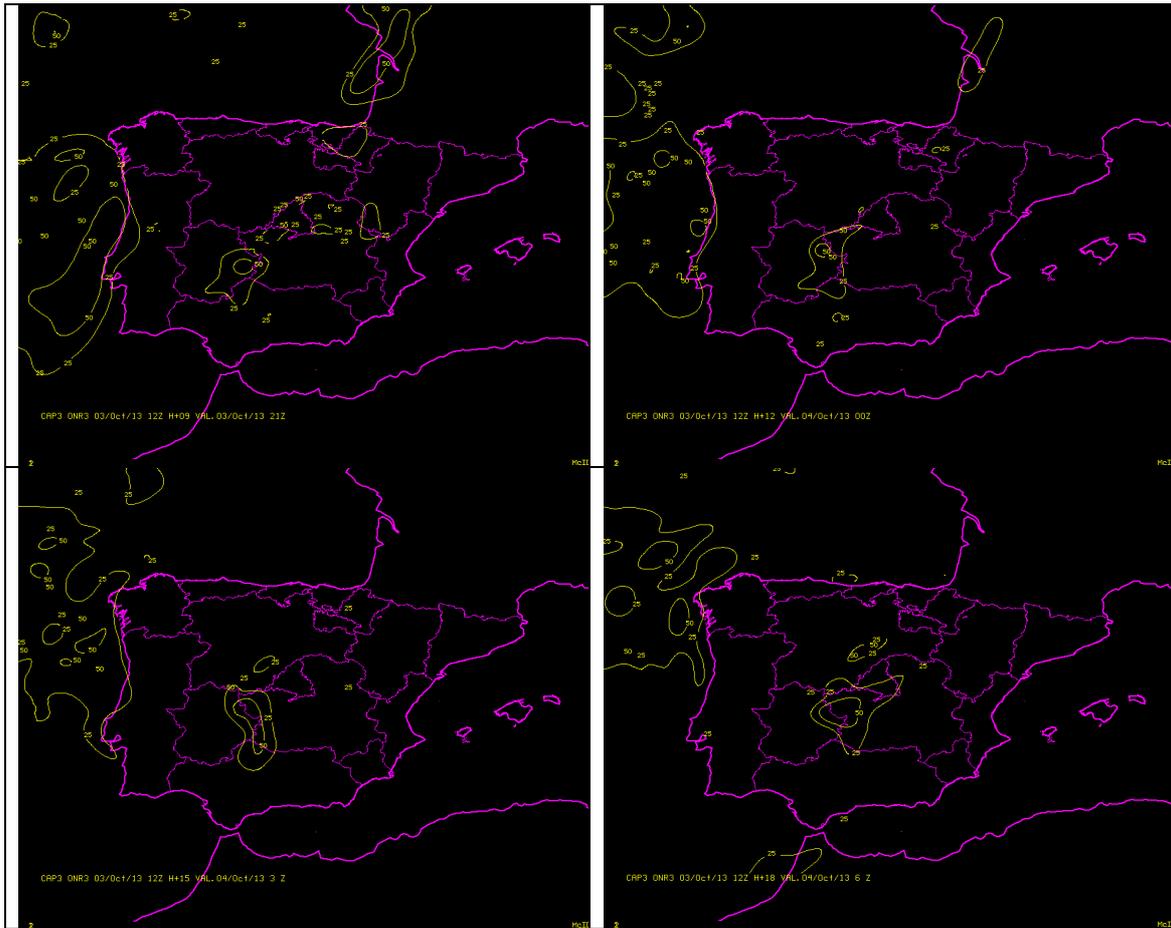


Figura 34. CAPE hasta 3 km (CAP3) previsto por la pasada del modelo HIRLAM 0.16 de las 12 UTC del día 3 de octubre de 2013: Arriba a la izquierda: para las 21 UTC del jueves 3 de octubre (alcance H+09). Arriba a la derecha: para las 00 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+12). Abajo a la izquierda: para las 03 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+15). Abajo a la derecha: para las 06 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+18).

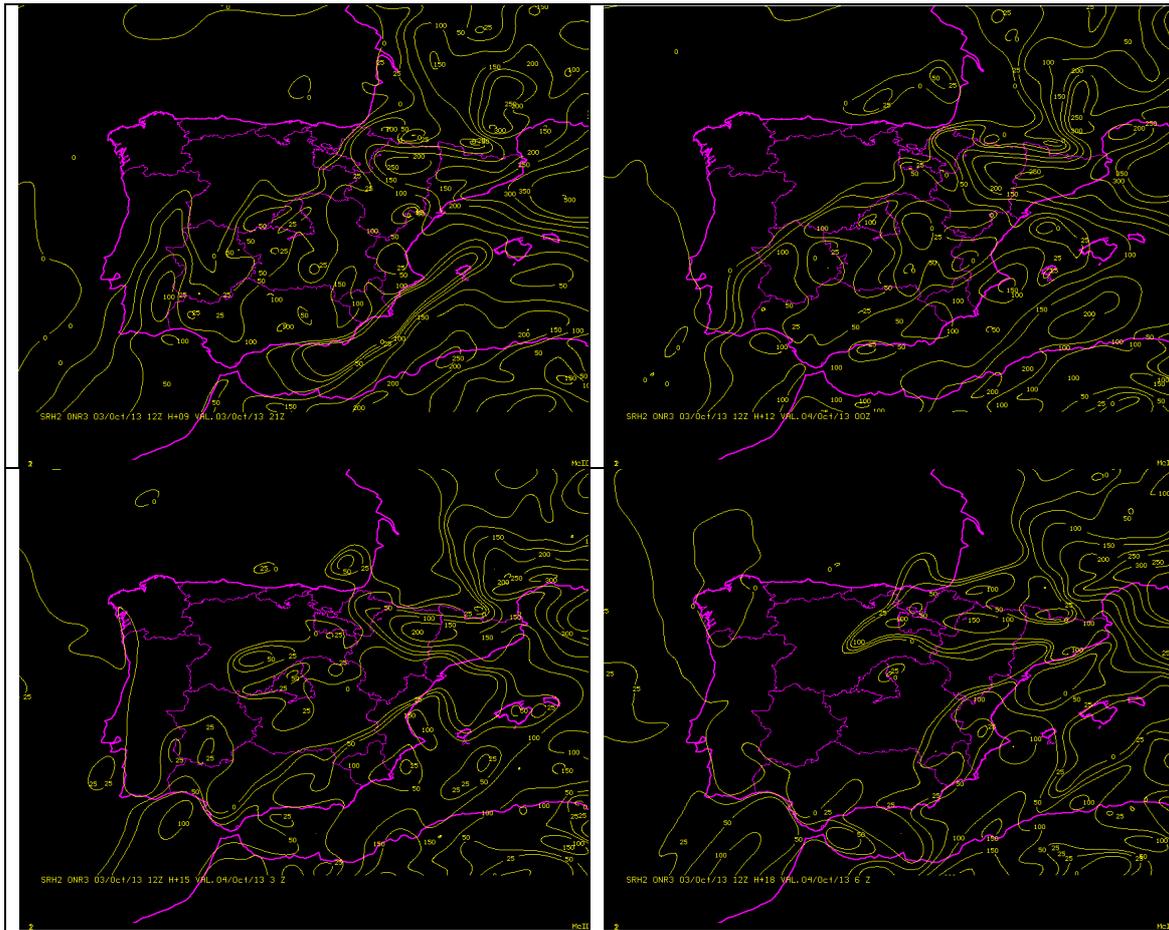


Figura 35. Helicidad Relativa a la Tormenta hasta 2 km (SRH2) previsto por la pasada del modelo HIRLAM 0.16 de las 12 UTC del día 3 de octubre de 2013: Arriba a la izquierda: para las 21 UTC del jueves 3 de octubre (alcance H+09). Arriba a la derecha: para las 00 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+12). Abajo a la izquierda: para las 03 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+15). Abajo a la derecha: para las 06 UTC del viernes 4 de octubre (alcance H+18).

Por otro lado, si analizamos tanto los sondeos observados del Aeropuerto de Zaragoza de las 12 UTC del día 3 de octubre y de las 00 UTC del día 4 (figura 36), como los sondeos previstos por los dos modelos anteriormente mencionados (figuras 37 y 38), se corrobora la existencia de un entorno bastante inestable. Se ve mayor inestabilidad en los sondeos observados (valores de CAPE superiores a 1500 J/Kg a las 12 UTC del día 3, y superiores a 1100 J/Kg a las 00 UTC del día 4), e inestabilidad no tan acusada, pero significativa en cualquier caso, en los sondeos previstos por los modelos numéricos. Esto se puede deber en parte a que los modelos numéricos parametrizan precipitación convectiva disminuyendo el valor de CAPE. Tanto en los sondeos previstos como en los observados se puede apreciar la presencia de una marcada cizalladura vertical del viento, que además está muy concentrada en niveles bajos de la troposfera, de hecho se aprecia el mayor cambio del viento entre superficie y 700-800 hPa, es decir hasta unos 2000-3000 m de altura. El viento pasa de tener valores de 5-10 kt y de ser de componente SE en superficie, a tener valores de 20-30 kt de componente SW en niveles próximos a 700 hPa.

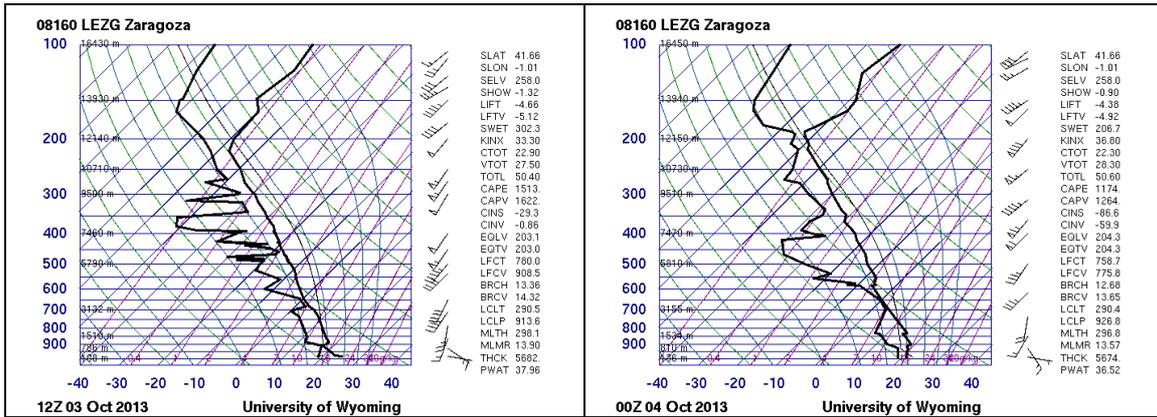


Figura 36. Sondeos observado en el aeropuerto de Zaragoza a las 12 UTC del día 3 de octubre (a la izquierda.) y a las 00 UTC del 4 de octubre (a la derecha).

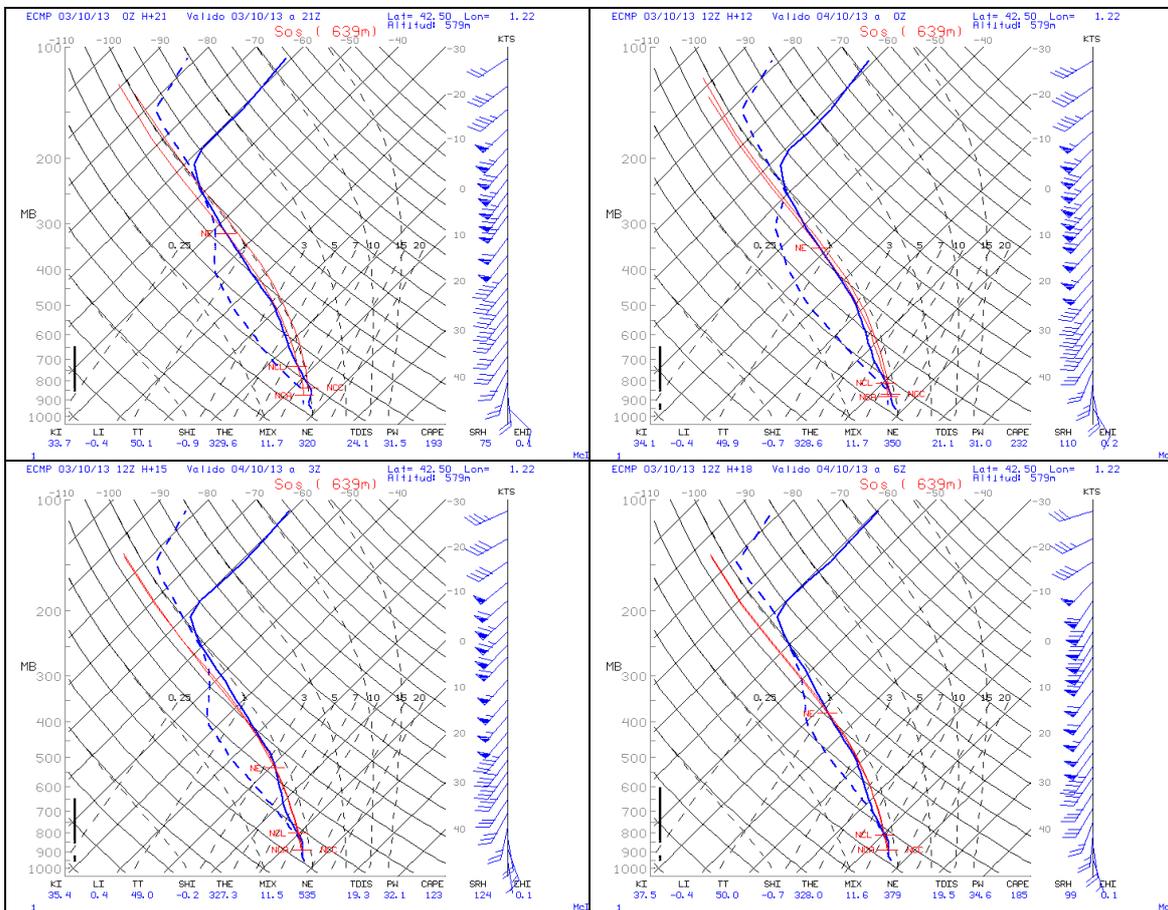


Figura 37. Sondeos previstos por el modelo ECMWF para la población de Sos del Rey Católico (punto próximo a la zona de estudio) para las 21 UTC del día 3 de octubre (arriba a la izquierda, pasada de las 00 H+21), para las 00 UTC del 4 de octubre (arriba a la derecha, pasada de las 12 H+12), para las 03 UTC del día 4 de octubre (abajo a la izquierda, pasada de las 12 H+15), para las 06 UTC del día 4 de octubre (abajo a la derecha, pasada de las 12 H+18).

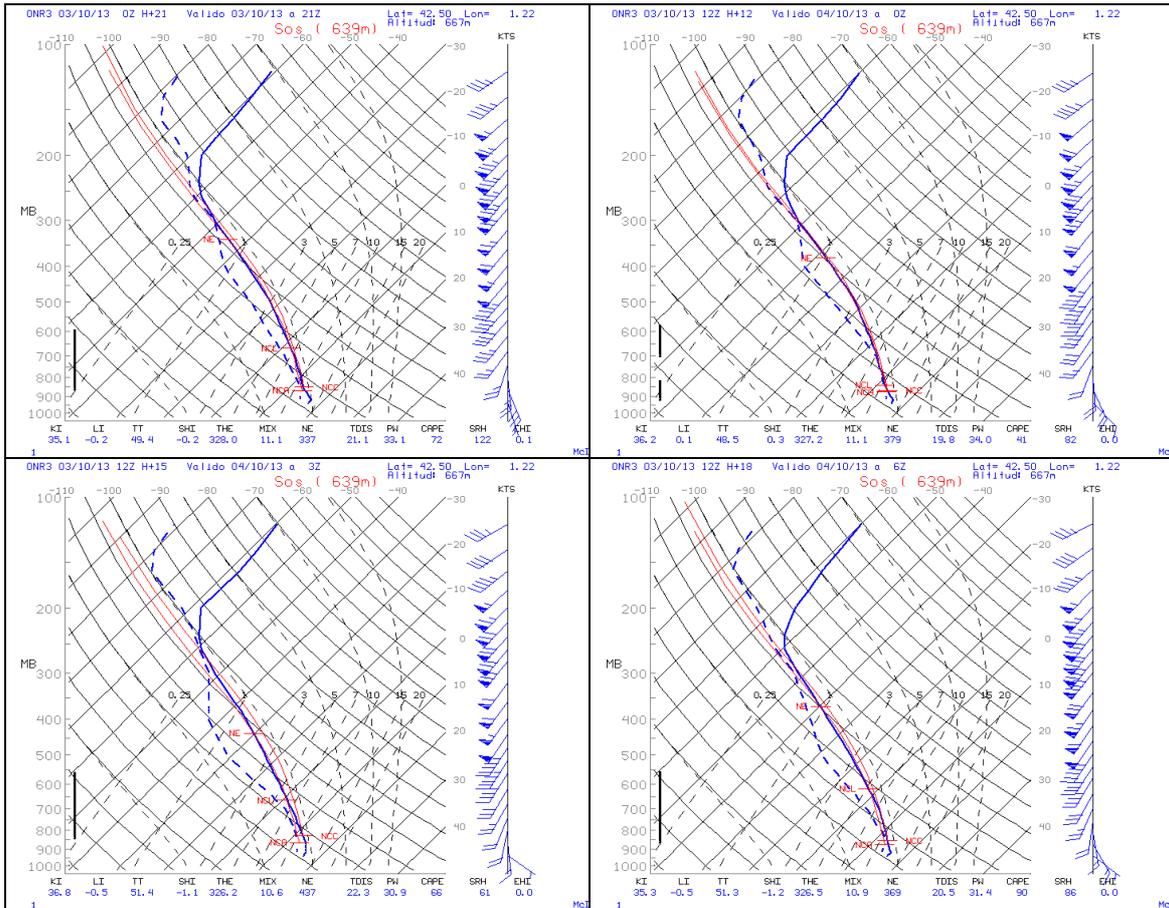


Figura 38. Sondeos previstos por el modelo HIRLAM ONR3 para la población de Sos del Rey Católico (punto próximo a la zona de estudio) para las 21 UTC del día 3 de octubre (arriba a la izquierda, pasada de las 00 H+21), para las 00 UTC del 4 de octubre (arriba a la derecha, pasada de las 12 H+12), para las 03 UTC del día 4 de octubre (abajo a la izquierda, pasada de las 12 H+15), para las 06 UTC del día 4 de octubre (abajo a la derecha, pasada de las 12 H+18).

4. IMÁGENES DE SATÉLITE

En las imágenes del canal infrarrojo 10.8 del satélite Meteosat Segunda Generación (MSG), que nos da información del carácter térmico de las cimas de las nubes, observamos como a las 03:30 UTC en el área que abarca las provincias de Soria, Rioja, Navarra y NW de Aragón han crecido unos importantes núcleos de origen convectivo. Entre esta hora y las 05:00 UTC en toda esta zona se mantiene este tipo de nubosidad, que incluso se va desarrollando y adoptando una característica forma en "V", que posteriormente va a persistir durante toda la mañana, extendiéndose a casi toda la provincia de Huesca. Estas configuraciones son típicas de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) intensos y generados en entornos con fuerte cizalladura vertical del viento (ver figura 39).

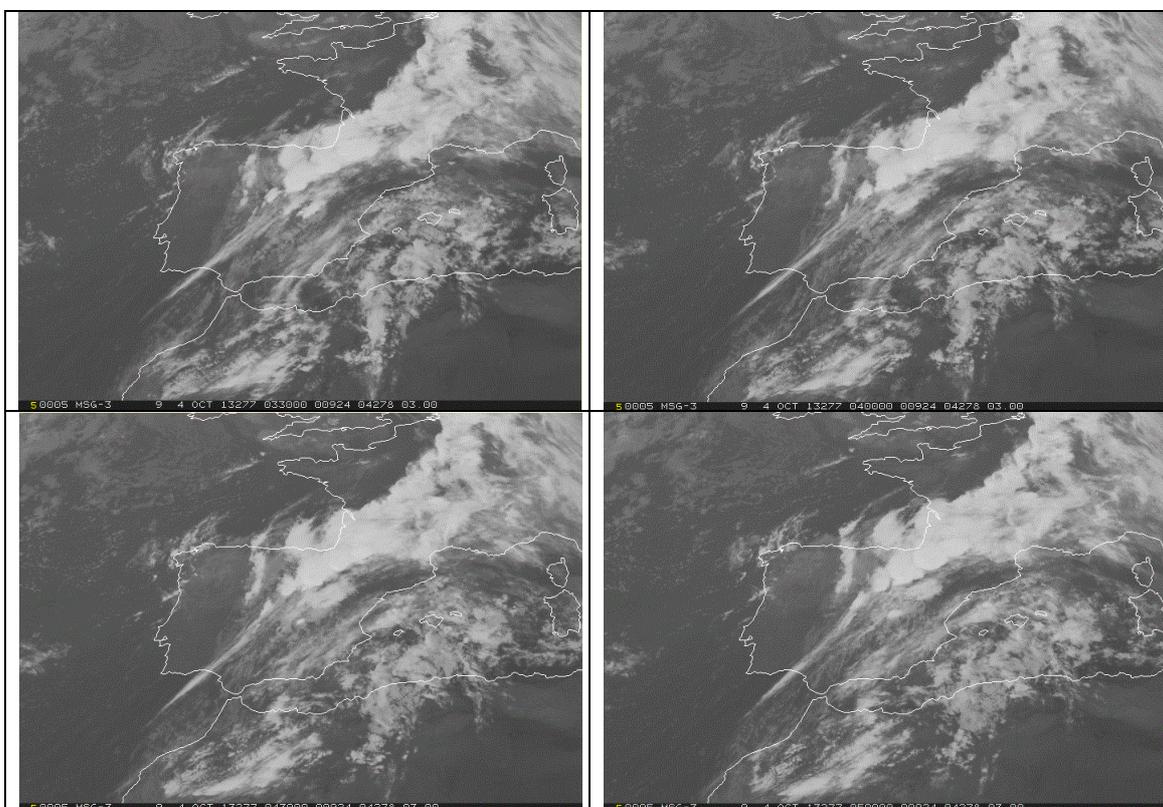


Figura 39. Imágenes del canal IR108 del satélite MSG, de las 03:30 UTC (arriba a la izquierda), de las 04:00 UTC (arriba a la derecha), de las 04:30 UTC (abajo a la izquierda) y de las 05:00 UTC (abajo a la derecha).

Por medio de otras imágenes y productos del SAF de Nowcasting, generados a partir de los datos del satélite Meteosat Segunda Generación (MSG), se puede ver como los desarrollos convectivos que estaban afectando a esta zona eran de bastante intensidad, llevaban asociada una marcada actividad eléctrica y tenían un fuerte desarrollo vertical. En la figura 40 vemos el producto PC, probabilidad de precipitación, que marca todas las zonas del N de la cordillera Ibérica, y cabecera del Ebro con probabilidades de precipitación entre un 25 y un 45 %, así como una importante actividad eléctrica asociada a las partes de mayor desarrollo de los sistemas convectivos.

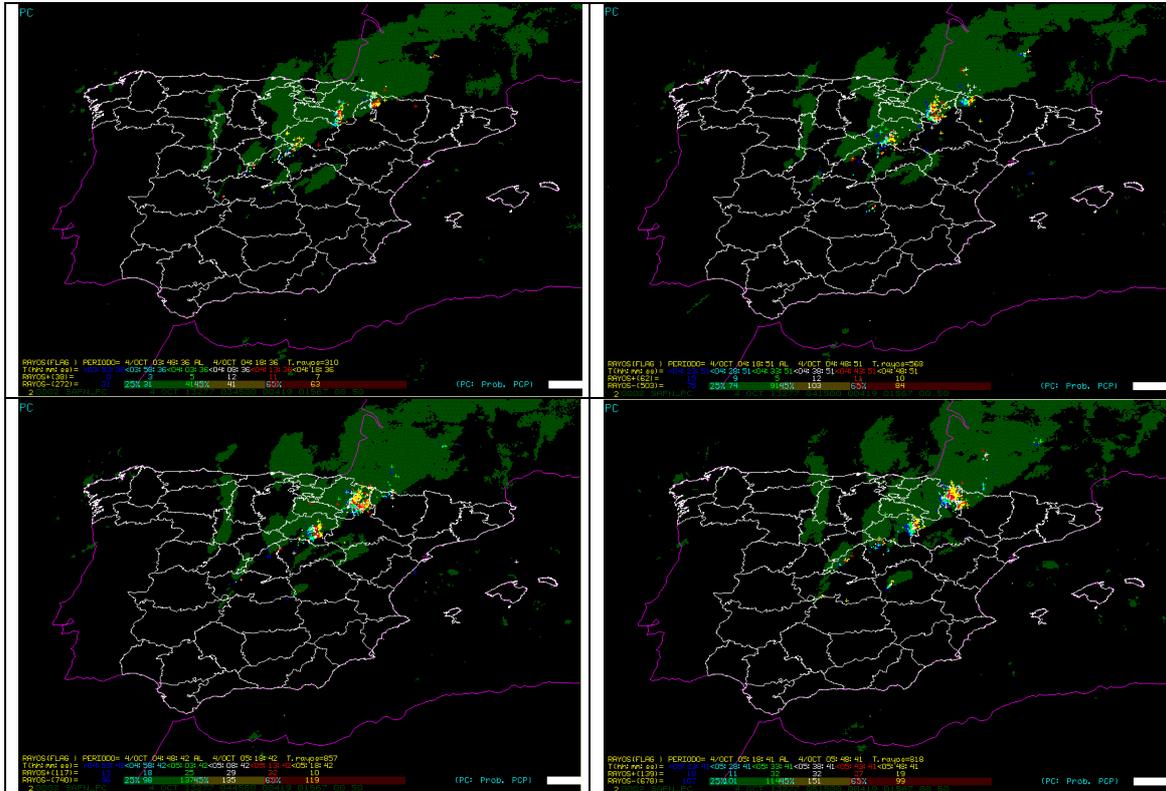


Figura 40. Imágenes de producto PC (probabilidad de precipitación) del SAF de Nowcasting con los rayos detectados en los 30 minutos siguientes. A las 03:45 UTC (arriba a la izquierda), a las 04:15 UTC (arriba a la derecha), a las 04:45 UTC (abajo a la izquierda) y a las 05:15 UTC (abajo a la derecha).

El CRR (Convective Rainfall Rate, intensidad de precipitación convectiva) en la figura 41, nos marca, en este mismo intervalo de horas y en las mismas áreas de interés, y en especial en la comarca de las Cinco Villas (N de la provincia de Zaragoza) tasas de precipitación en general de entre 5 y 15 mm/h, que en algunos puntos aislados del NE de Navarra, N de Zaragoza y NW de Huesca llegan a superar los 15 mm/h.

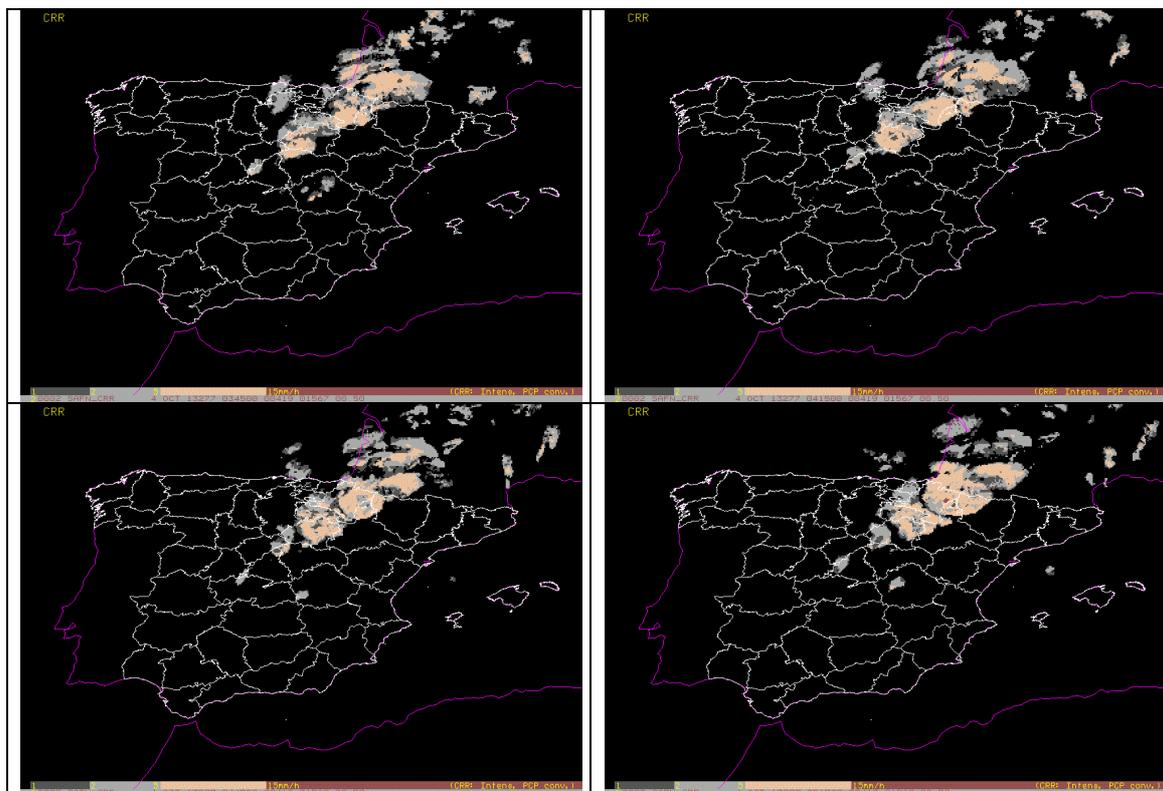


Figura 41. Imágenes de producto CRR (intensidad de precipitación convectiva), del SAF de Nowcasting, de las 03:45 UTC (arriba a la izquierda), de las 04:15 UTC (arriba a la derecha), de las 04:45 UTC (abajo a la izquierda) y de las 05:15 UTC (abajo a la derecha).

El realce Previmet, ver figura 42, sobre la imagen IR108, y el producto RDT (Rapid Development Thunderstorm) del SAF de Nowcasting nos indican en este intervalo de tiempo la presencia de grandes desarrollos nubosos con topes muy fríos, observándose temperaturas por debajo de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e incluso por debajo de $-68\text{ }^{\circ}\text{C}$, en estructuras identificadas a su vez como estructuras convectivas en desarrollo. Se aprecia como estas estructuras constituyen una sucesión de tres SCMs en línea que van desarrollándose y desplazándose hacia el NE desde la provincia de Soria y cubriendo la Rioja, E de Navarra, para terminar afectando al W y NW de Zaragoza, así como al NW de Huesca.

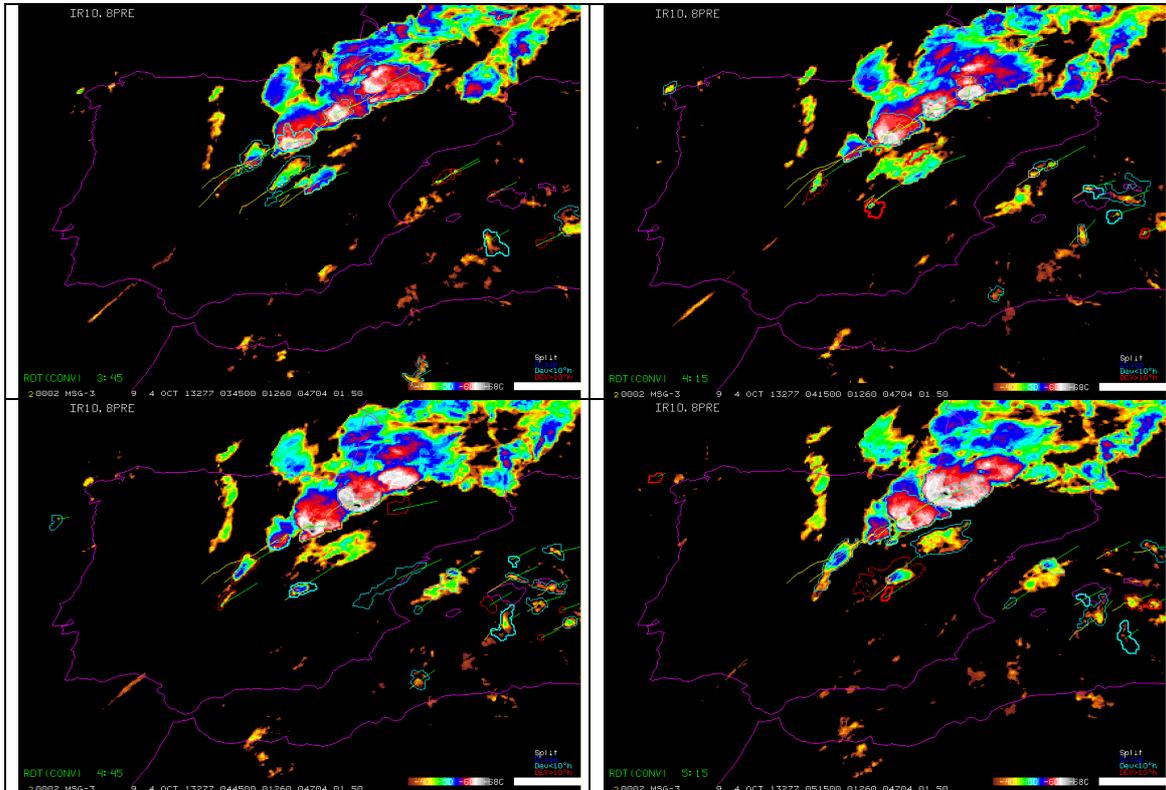


Figura 42. Imágenes del IR108 con el realce PREVIMET con el producto RDT (Rapid Development Thunderstorms) del SAF de Nowcasting, de las 03:45 UTC (arriba a la izquierda), de las 04:15 UTC (arriba a la derecha), de las 04:45 UTC (abajo a la izquierda) y de las 05:15 UTC (abajo a la derecha).

Finalmente en la figura 43, se pueden ver las imágenes de la diferencia de canales WV6.2-IR10.8, los llamados “pixeles cálidos” que permiten realzar la convección profunda y la presencia de “overshootings” por medio de los colores naranjas y rojos en las áreas afectadas por estos SCMs. A su vez se aprecia como estas estructuras se van intensificando y aumentando de tamaño a la vez que se desplazan y afectan a todas las zonas antes indicadas.

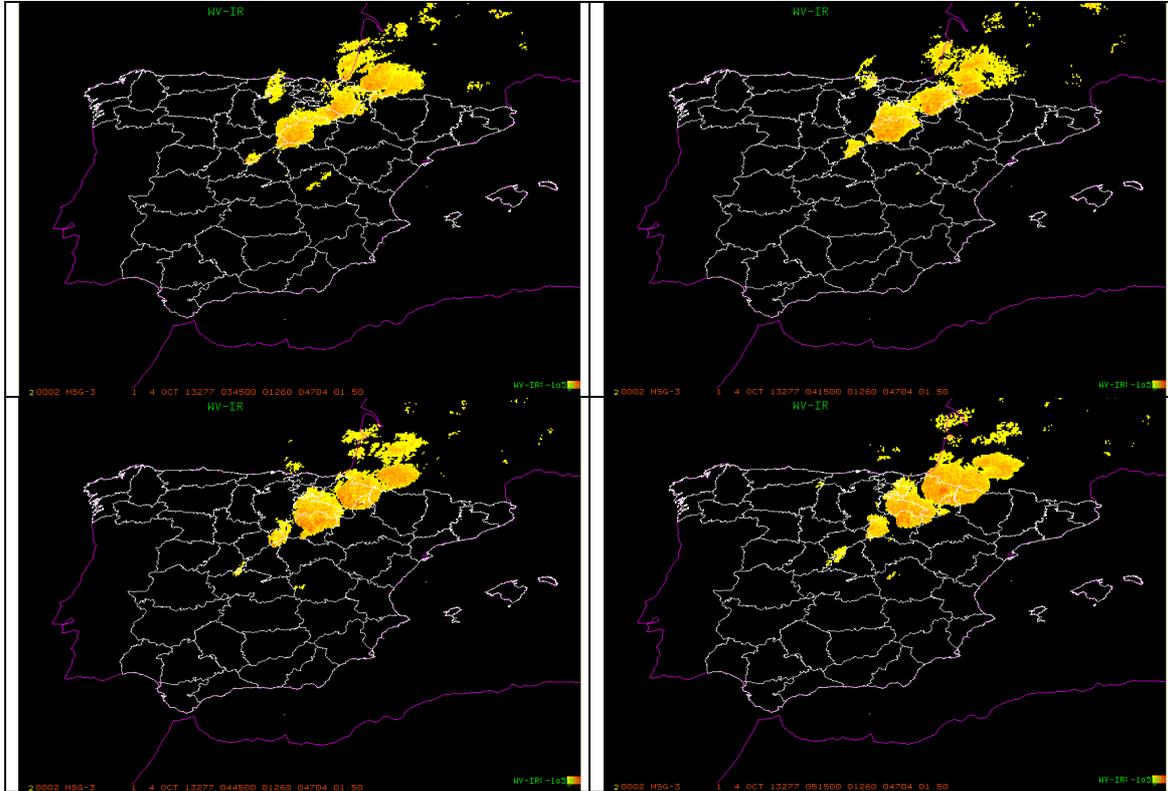


Figura 43. Imágenes de la diferencia WV6.2 – IR10.8 (píxeles cálidos) del SAF de Nowcasting de las 03:45 UTC (arriba a la izquierda), de las 04:15 UTC (arriba a la derecha), de las 04:45 UTC (abajo a la izquierda) y de las 05:15 UTC (abajo a la derecha).

5. IMÁGENES RADAR Y DESCARGAS ELÉCTRICAS

El desarrollo, formación y evolución de esta situación ha sido bien recogida por el radar de Zaragoza, tanto en modo normal como en modo Doppler. Esto permite analizar y describir con bastante detalle el tipo de fenómenos convectivos que se generaron durante este evento. Lo primero que se puede destacar se observa en las imágenes del primer PPI de reflectividad. En la figura 44 se puede ver cómo a las 03:00 UTC se ha constituido en el centro de la provincia de Soria una línea de turbonada, tipo de estructura convectiva organizada en línea y que en este caso se extiende en dirección N hacia La Rioja, donde se observa fundamentalmente su área de precipitación estratiforme. Esta estructura persiste, de manera que en la imagen de las 04:00, figura 45, se aprecia que se ha desplazado en dirección NE y se encuentra afectando el extremo NE de Soria, en su confluencia con La Rioja, Zaragoza y Navarra, mostrando claramente su estructura lineal, perfectamente constituida y con la zona de precipitación estratiforme extendida de manera paralela según la orientación de la propia línea. En estas dos imágenes se aprecia también cómo a estas horas el área de interés, N de la provincia de Zaragoza en la comarca de Las Cinco Villas, está siendo afectada por otra estructura convectiva muy intensa y también con una marcada organización.

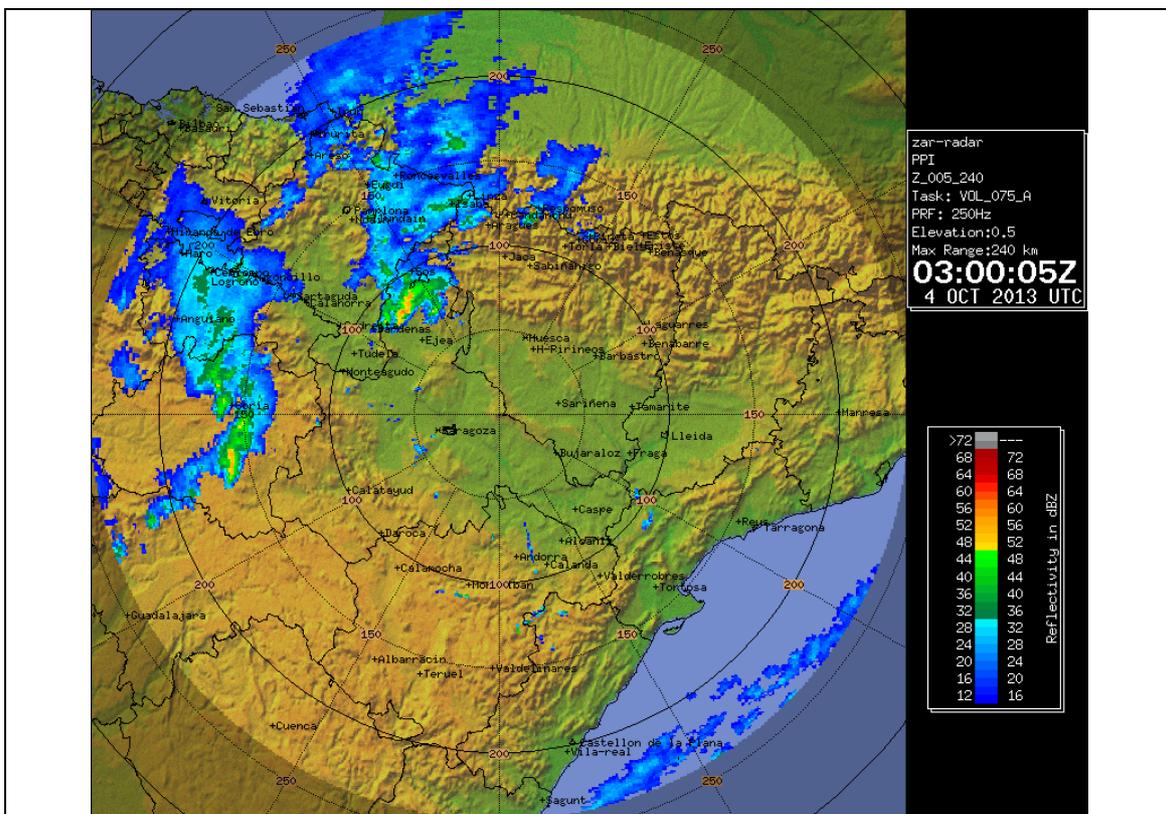


Figura 44. Imagen de reflectividad del radar de Zaragoza correspondiente al primer PPI (primera elevación radar), del día 4 de octubre de 2013 a las 03:00 UTC.

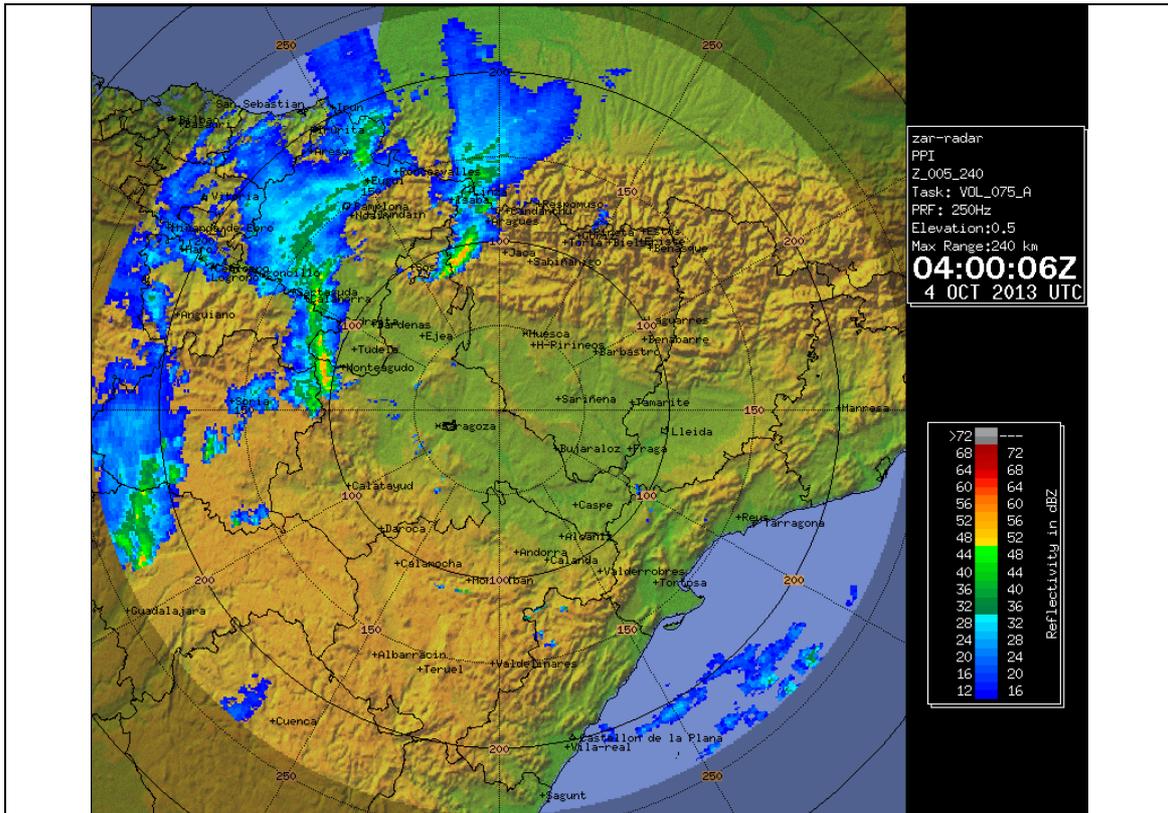


Figura 45. Imagen de reflectividad del radar de Zaragoza correspondiente al primer PPI (primera elevación radar), del día 4 de octubre de 2013 a las 04:00 UTC.

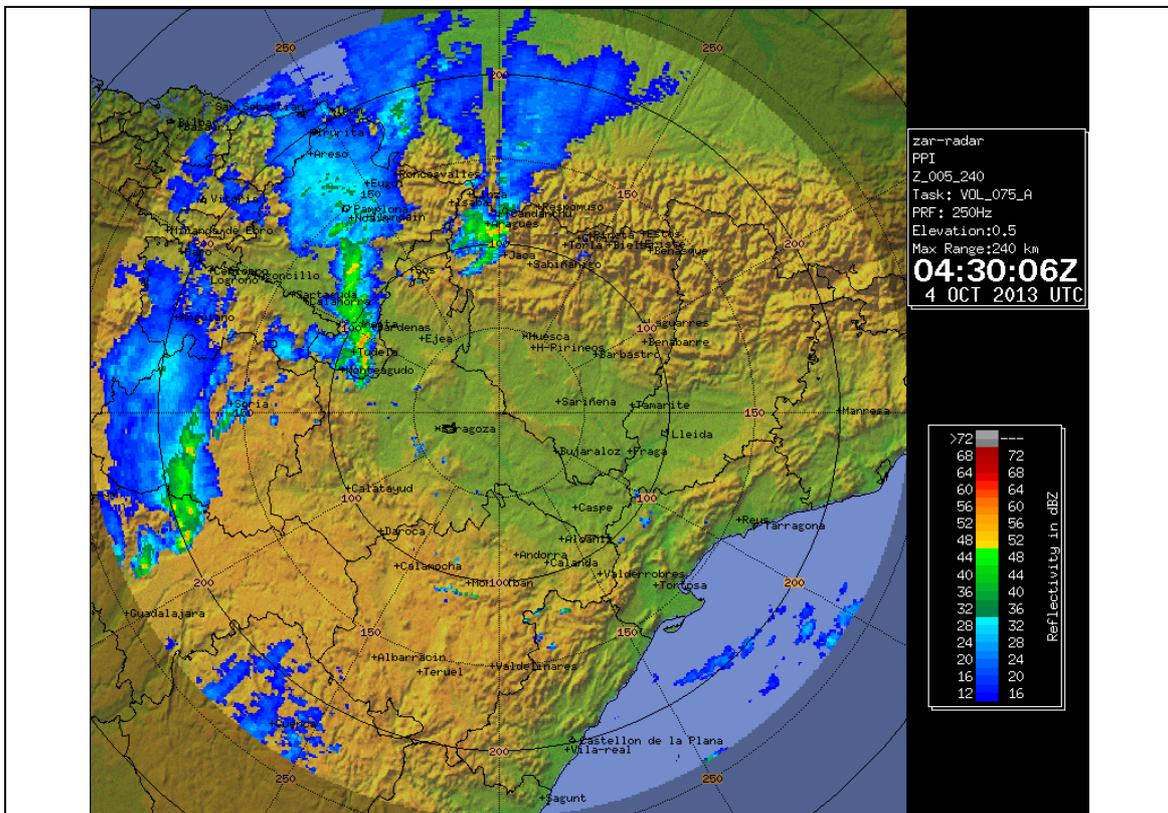


Figura 46. Imagen de reflectividad del radar de Zaragoza correspondiente al primer PPI (primera elevación radar), del día 4 de octubre de 2013 a las 04:30 UTC.

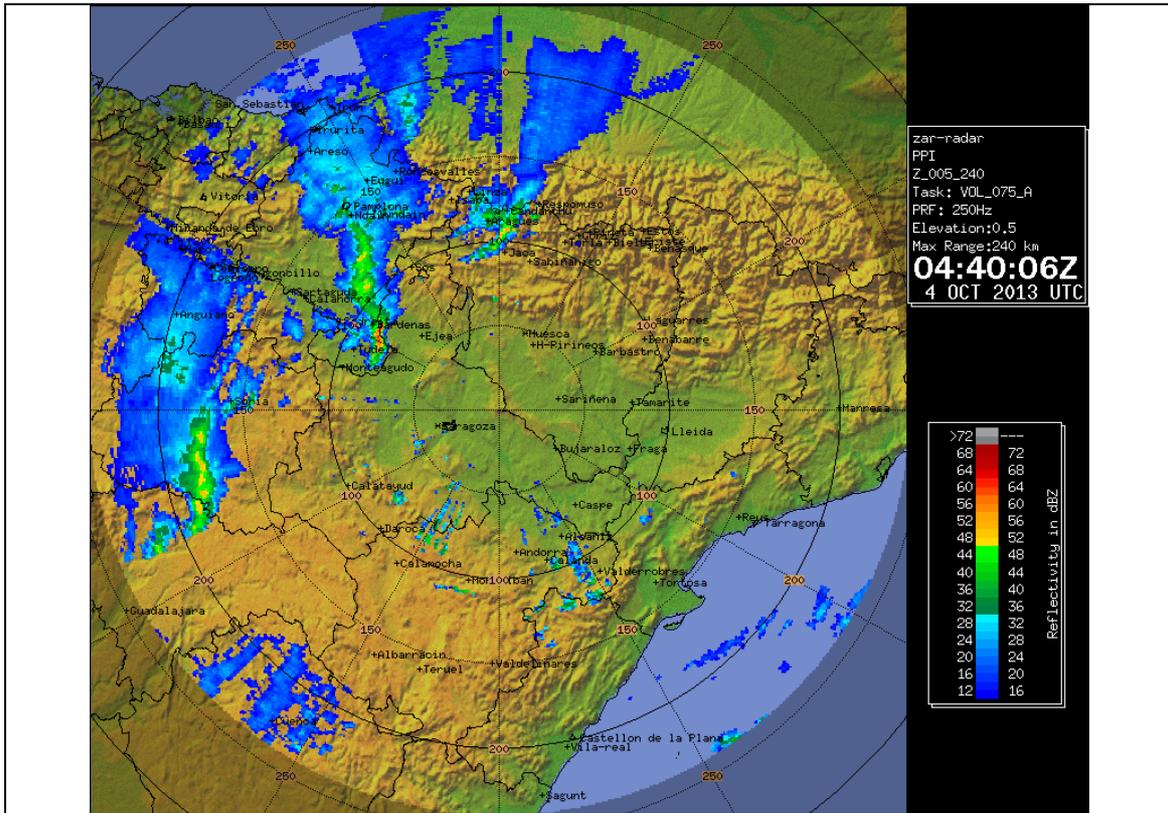


Figura 47. Imagen de reflectividad del radar de Zaragoza correspondiente al primer PPI (primera elevación radar), del día 4 de octubre de 2013 a las 04:40 UTC.

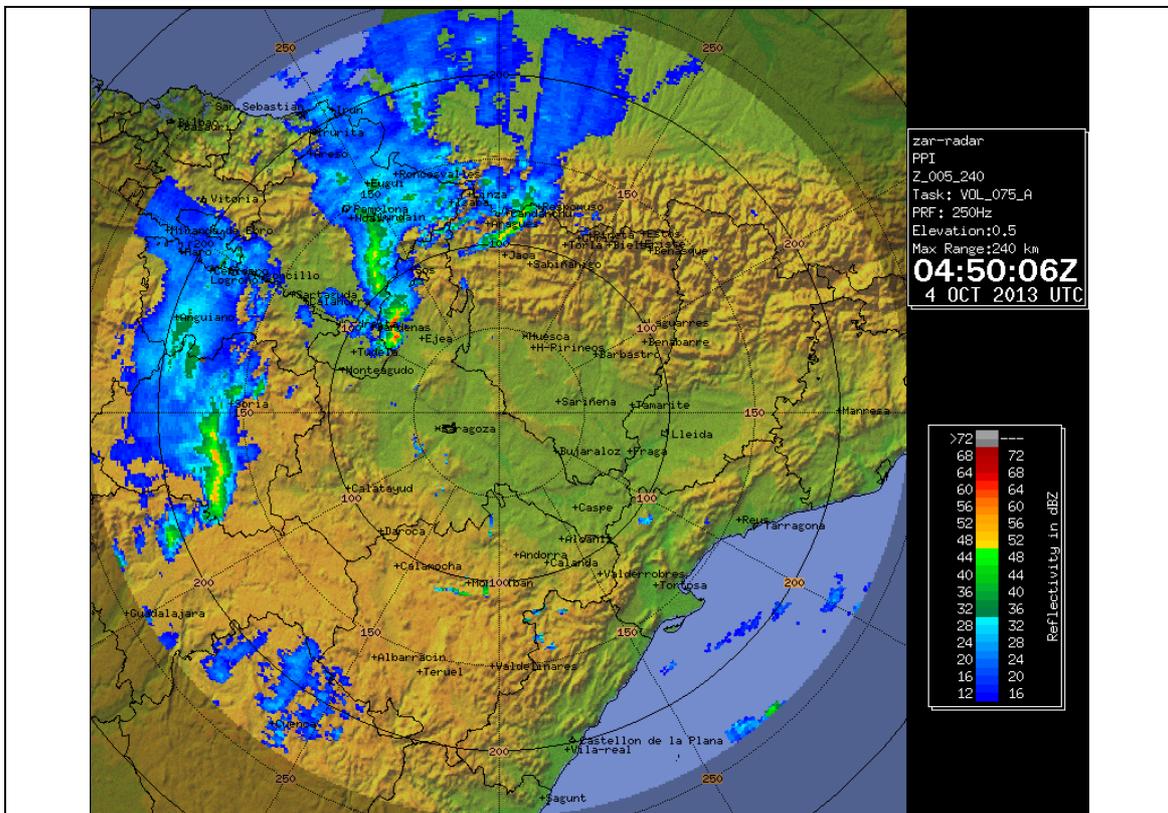


Figura 48. Imagen de reflectividad del radar de Zaragoza correspondiente al primer PPI (primera elevación radar), del día 4 de octubre de 2013 a las 04:50 UTC.

En las figuras 46 a 48 podemos observar como la línea de turbonada se sigue desplazando hacia el área de Las Cinco Villas. En la imagen de las 04:30, figura 46, se observa la estructura situada sobre el SE de Navarra. En las siguientes imágenes, y en especial en la figura 48, imagen de las 04:50, parece que esta estructura tan lineal se empieza a romper en pequeñas estructuras con cierta curvatura cuando se aproxima al área entre Biota y Sádaba. En las imágenes siguientes, figura 49 a 51, se observa como la estructura evoluciona desde las 05:00 hasta las 05:30 a una forma más redondeada con una amplia zona de precipitación estratiforme extendiéndose hacia el N. Esta estructura va a seguir evolucionando y persistiendo, pero manteniendo reflectividades muy intensas. De hecho, se observa que da lugar a un importante haz de atenuación, y de esta manera continúa su ciclo de vida desplazándose hacia la provincia de Huesca.

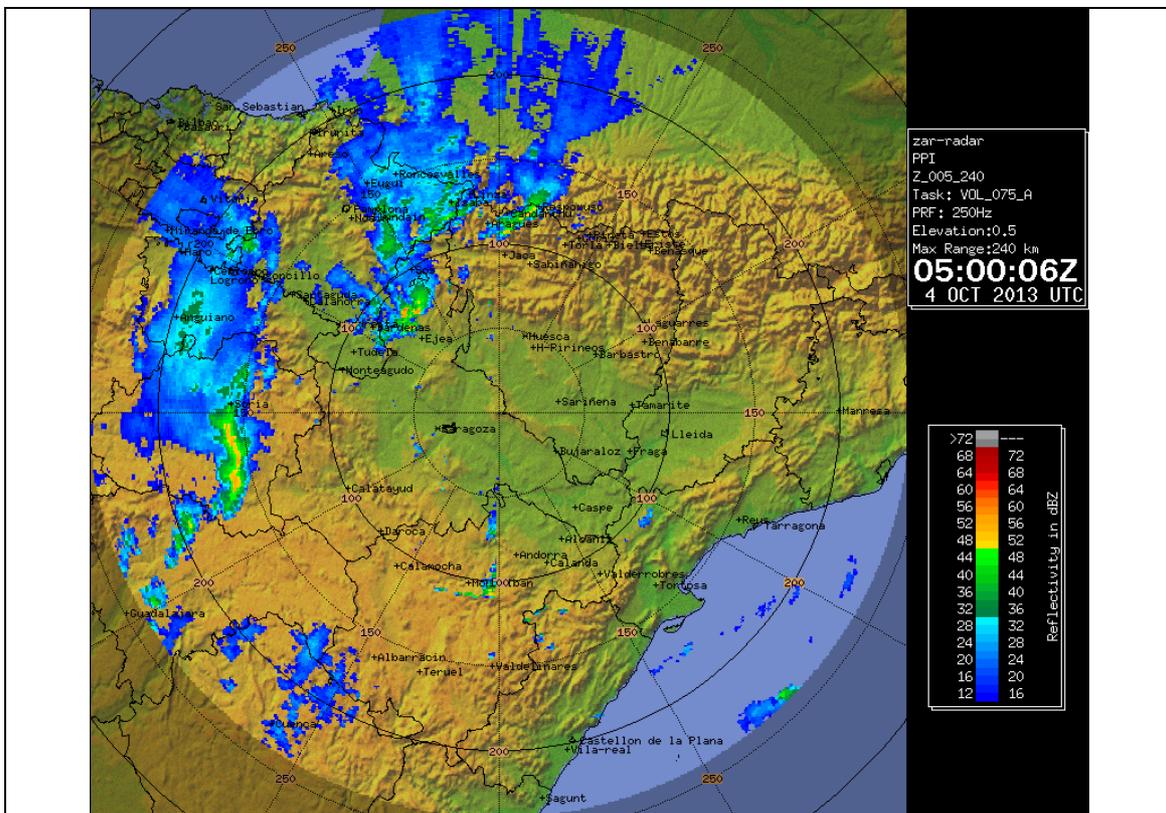


Figura 49. Imagen de reflectividad del radar de Zaragoza correspondiente al primer PPI (primera elevación radar), del día 4 de octubre de 2013 a las 05:00 UTC.

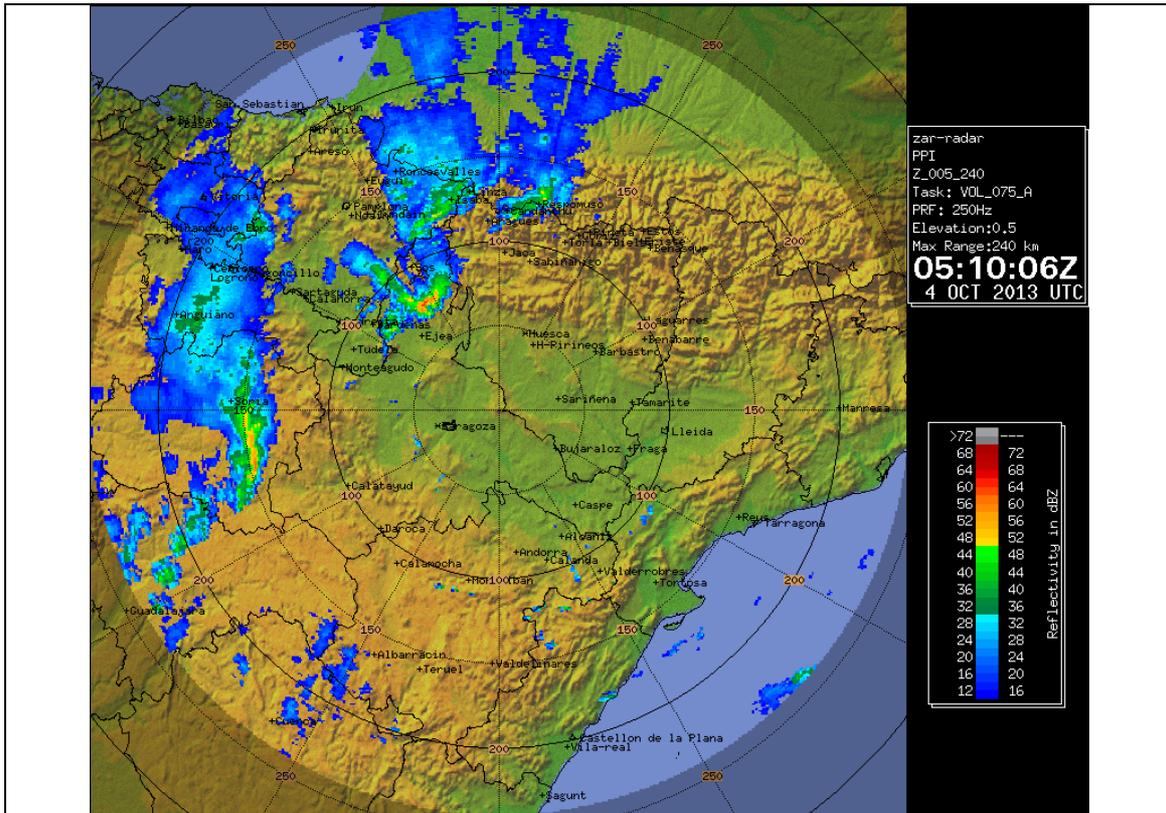


Figura 50. Imagen de reflectividad del radar de Zaragoza correspondiente al primer PPI (primera elevación radar), del día 4 de octubre de 2013 a las 05:10 UTC.

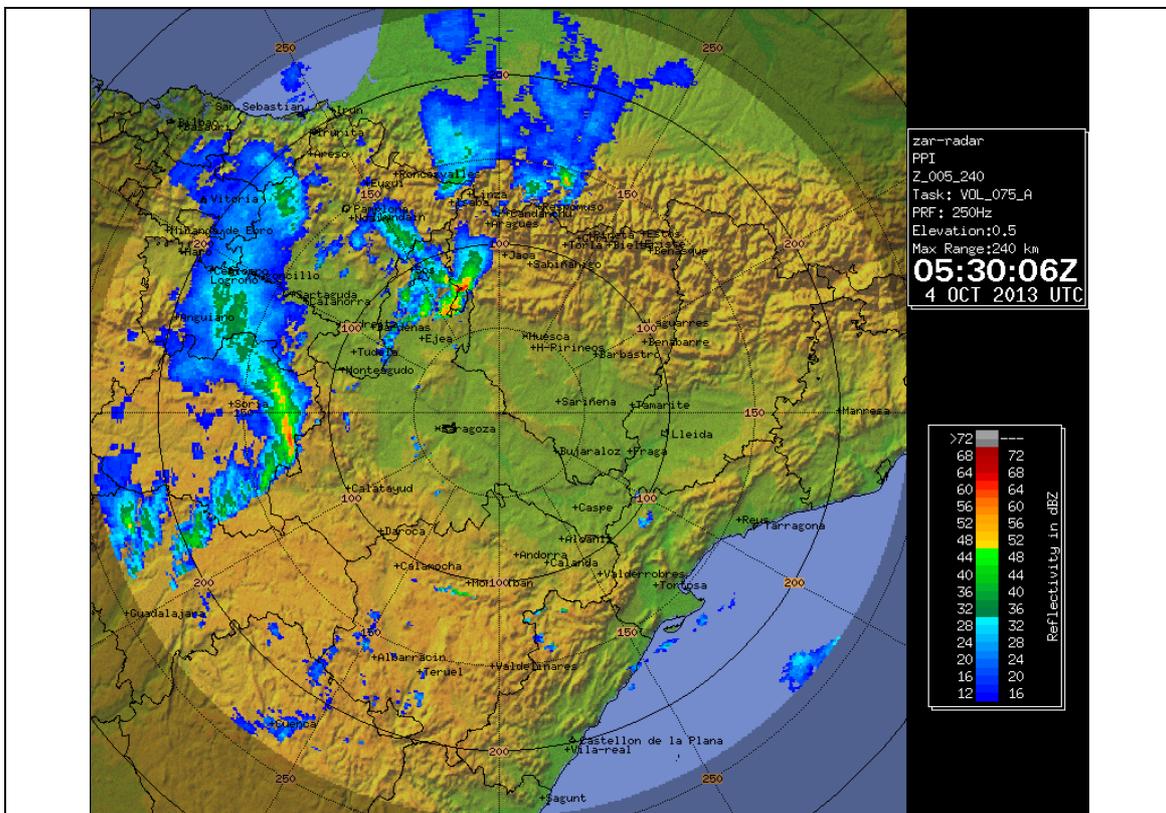


Figura 51. Imagen de reflectividad del radar de Zaragoza correspondiente al primer PPI (primera elevación radar), del día 4 de octubre de 2013 a las 05:30 UTC.

En las figuras 52 y 53 se pueden ver las imágenes de Ecotop y en las figuras 54 y 55 las de VIL (Vertically Integrated Liquid) de las 04:40 y 04:50 UTC, horas más próximas al momento en que se produjeron los mayores daños en la zona. Las imágenes de Ecotop, que indican la mayor altura a que llegan los ecos de 12 dBZ, ponen de manifiesto el gran desarrollo vertical de las estructuras convectivas que se formaron en esta zona, con valores en torno a los 14 o 15 km de altura. Por otro lado, a esas horas las imágenes de VIL reflejan un contenido líquido muy elevado. Se ven valores en torno a los 25 Kg/m², reflejo del gran desarrollo de las estructuras convectivas, y de la presencia de valores intensos de reflectividad en toda su extensión vertical, como consecuencia de las intensas corrientes ascendentes que actúan para generar esta convección. Estos valores intensos de VIL según diversos autores americanos como Greene y Clark (1972), Stewart (1991) o Kitzmiller et al. (1995), son un buen indicativo de la posible severidad y adversidad de las estructuras convectivas (granizo, vientos fuertes en superficie, precipitaciones intensas y tornados, entre otros fenómenos).

Si observamos en detalle las imágenes de Máximos de Reflectividad por paneles, se puede apreciar en primer lugar, en las figuras 56 a 58, cómo la estructura convectiva entre las 04:30 y las 04:50 UTC adopta una forma curvada, de manera que da la impresión de que la línea de turbonada en estos momentos se está transformando en un "bow echo" (eco en arco), tipo de estructura convectiva altamente organizada y que puede llevar asociados fenómenos especialmente severos y adversos en superficie. En las figuras 59 y 60, imágenes que corresponden a las 05:00 y 05:10 UTC, se observa que la estructura convectiva presenta una forma claramente redondeada, que podría corresponder a un proceso de transformación en supercélula. En especial a las 05:10 parece una forma más bien lobulada y no tanto con forma de gancho, lo cual podría corresponder a una supercélula HP (de alta precipitación), más que a una supercélula clásica.

En estas imágenes, así mismo, se pueden apreciar otros patrones que son reflejo del alto grado de organización de esta estructura convectiva. Así, en las proyecciones verticales se puede ver el gran desarrollo vertical de la convección, lo cual quedó ya señalado al analizar las imágenes de ecotop, pero en éstas, además, se puede apreciar que aparecen valores intensos de reflectividad a alturas considerables. Así se aprecian valores de 45 y 50 dBZ a alturas de 6 u 8 km. Por otro lado se constata en especial en la proyección según los ejes XZ (longitud/altura, panel superior de las imágenes) que la línea vertical de máximos de reflectividad está muy inclinada, lo cual da lugar además a la aparición de una ZB (zona abalconada) encima de una RED (Región de Eco Débil), es decir valores altos de reflectividad suspendidos en altura sobre una región con valores pequeños de reflectividad. Se observa también un fuerte gradiente de reflectividad entre la propia estructura convectiva y las zonas que la rodean. Estos patrones son consecuencia de la intensidad de las corrientes ascendentes en un entorno favorable para que aparezca este tipo de convección con un muy alto grado de organización.

En la proyección según el eje YZ (latitud/altura), situado en el panel derecho de las imágenes, se aprecia un patrón que tiene apariencia de "gancho vertical" con su correspondiente REDA (Región de Eco Débil Acotado). Este patrón podría corresponder al modelo conceptual de supercélula. En estos momentos, como hemos visto antes, la estructura tiene más bien forma de "bow echo", y esta apariencia en la vertical se puede deber simplemente a que se trata de una proyección sobre un plano fijo de una estructura arqueada y no un corte vertical de la estructura convectiva. De

cualquier manera, no está de más recordar que, como se ha comentado en un párrafo anterior, a partir de la 05:00 es posible que la estructura convectiva esté evolucionando a una supercélula y que efectivamente podrían aparecer ya patrones de este tipo en los datos de reflectividad.

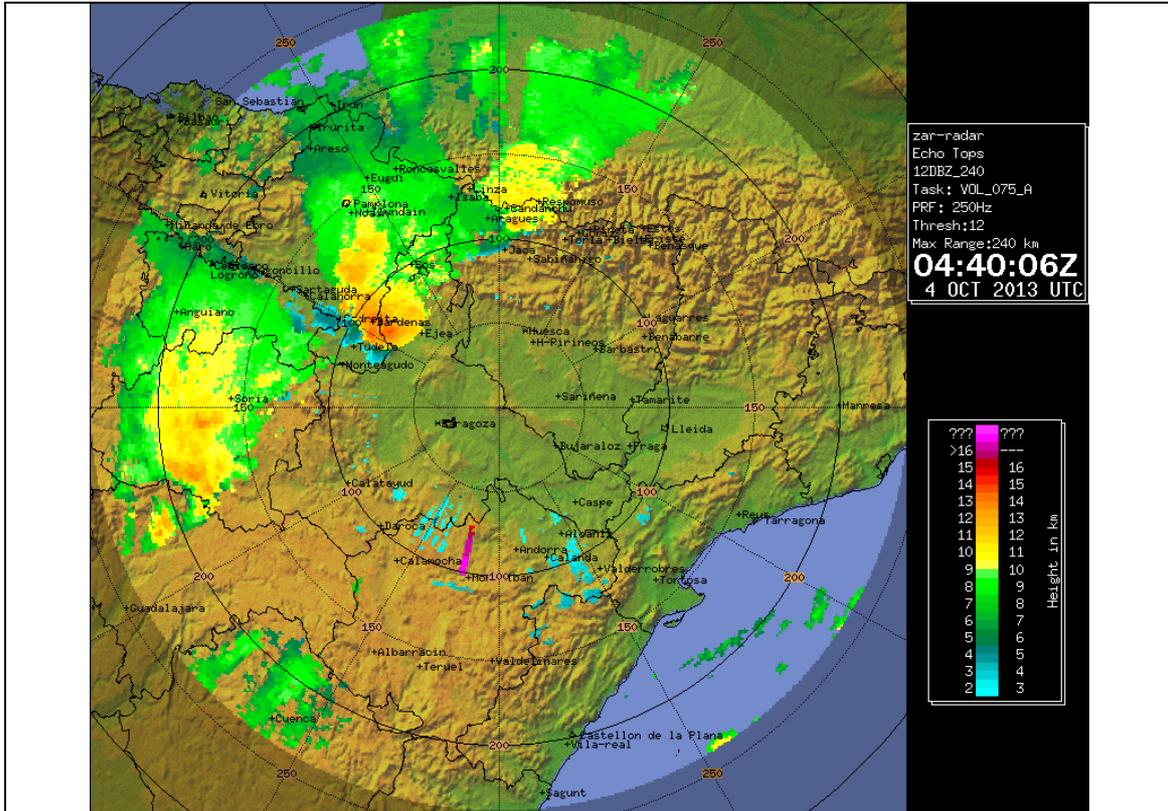


Figura 52. Imagen de Ecotop del radar de Zaragoza correspondiente a las 04:40 UTC del día 4 de octubre de 2013.

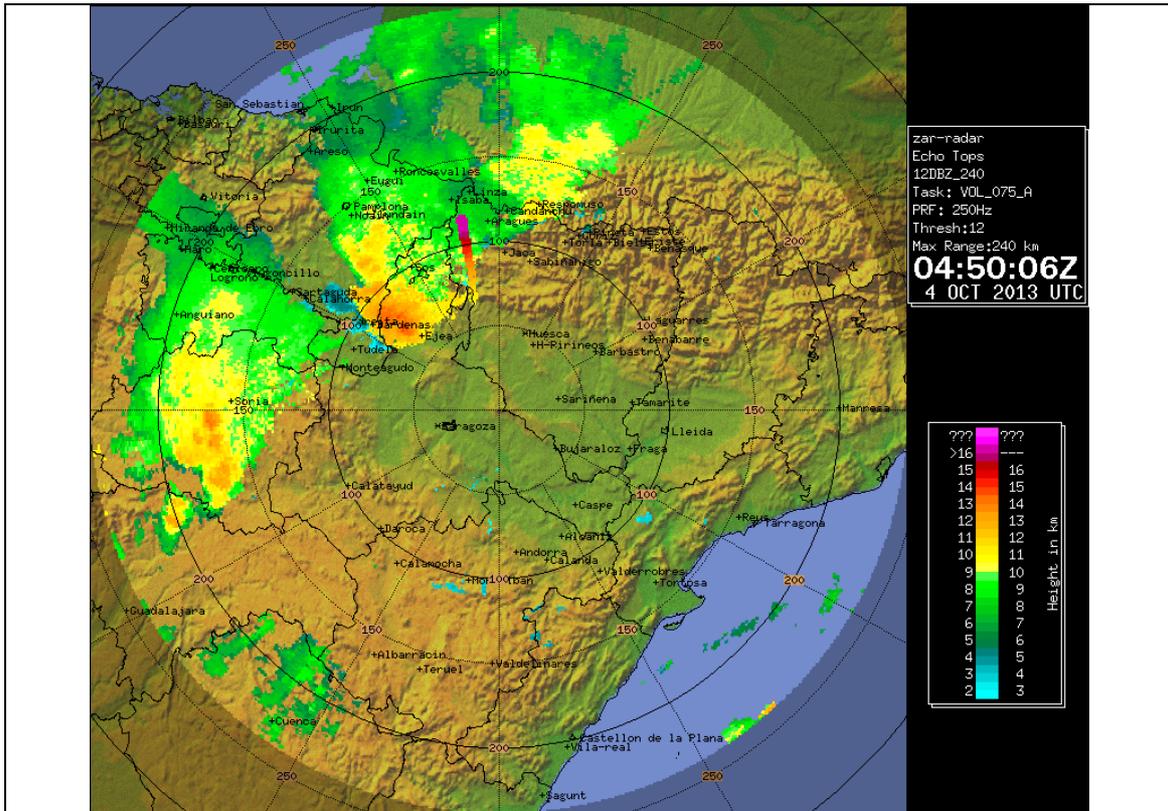


Figura 53. Imagen de Ecotop del radar de Zaragoza correspondiente a las 04:50 UTC del día 4 de octubre de 2013.

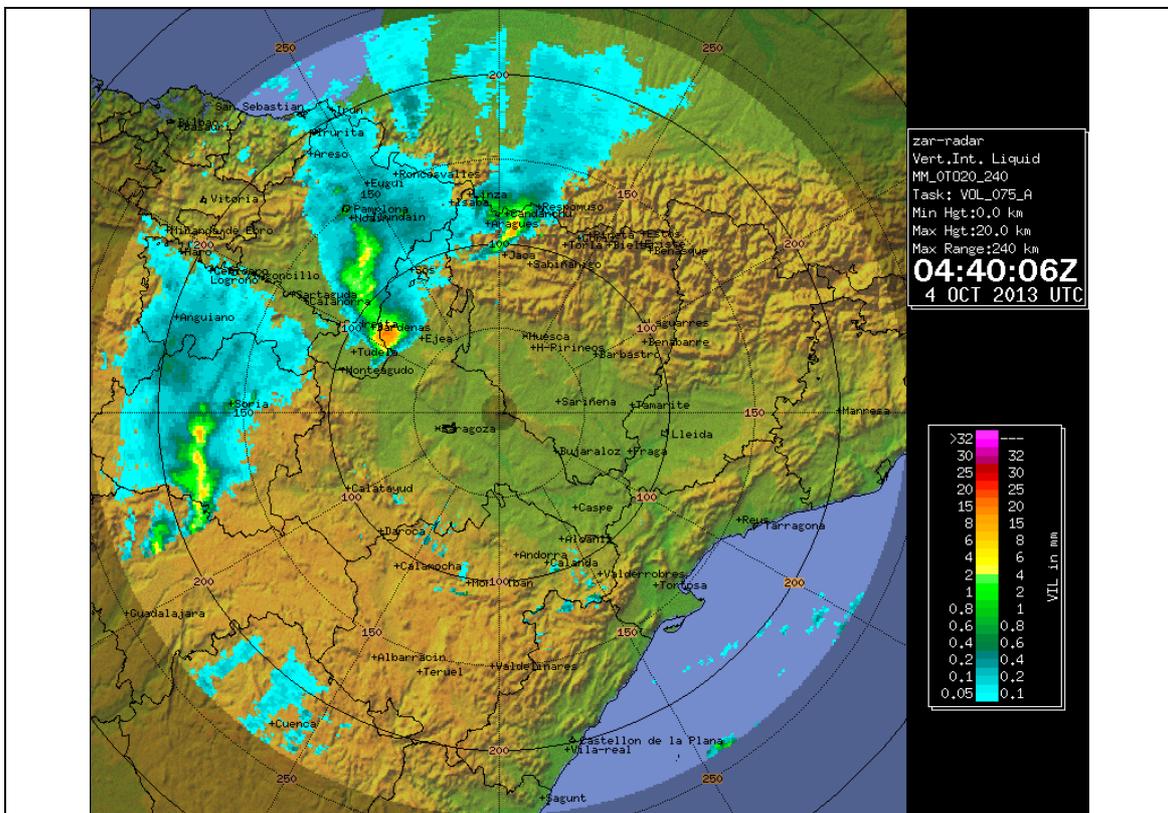


Figura 54. Imagen de VIL (Vertically Integrated Liquid) del radar de Zaragoza correspondiente al día 4 de octubre de 2013 a las 04:40 UTC.

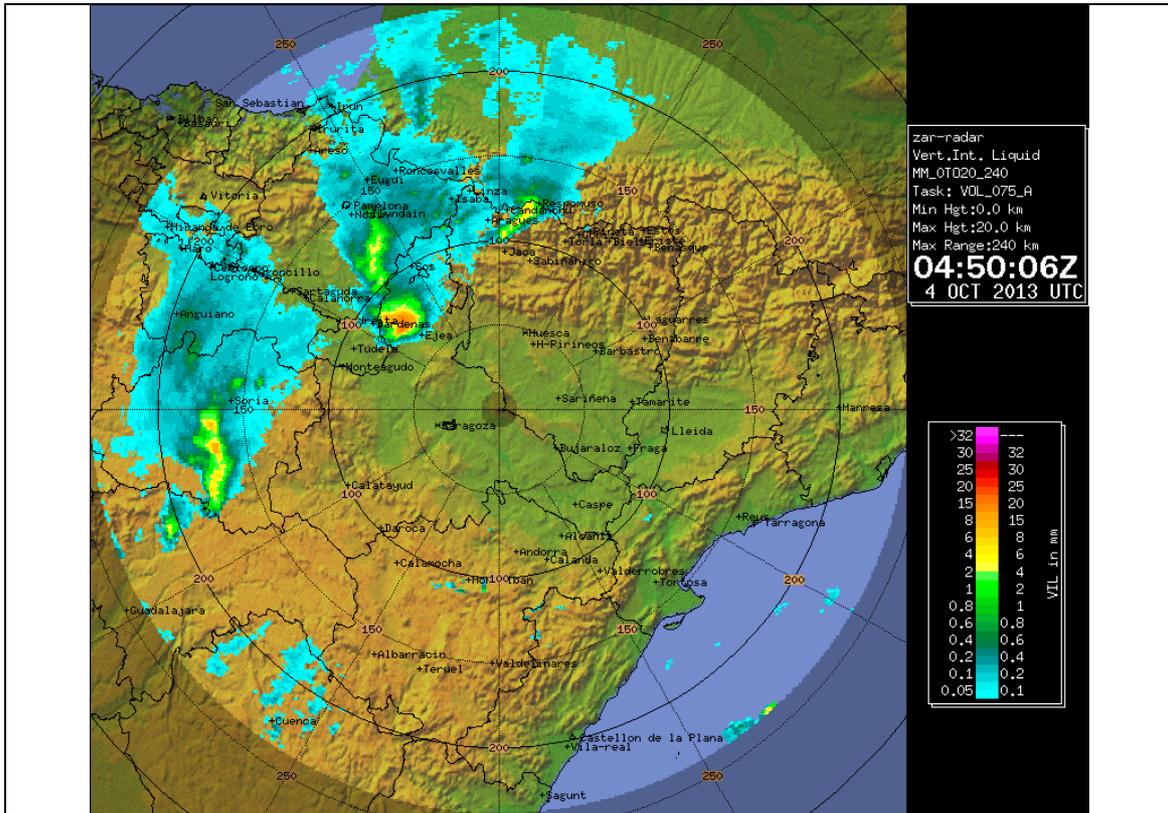


Figura 55. Imagen de VIL (Vertically Integrated Liquid) del radar de Zaragoza correspondiente al día 4 de octubre de 2013 a las 04:50 UTC.

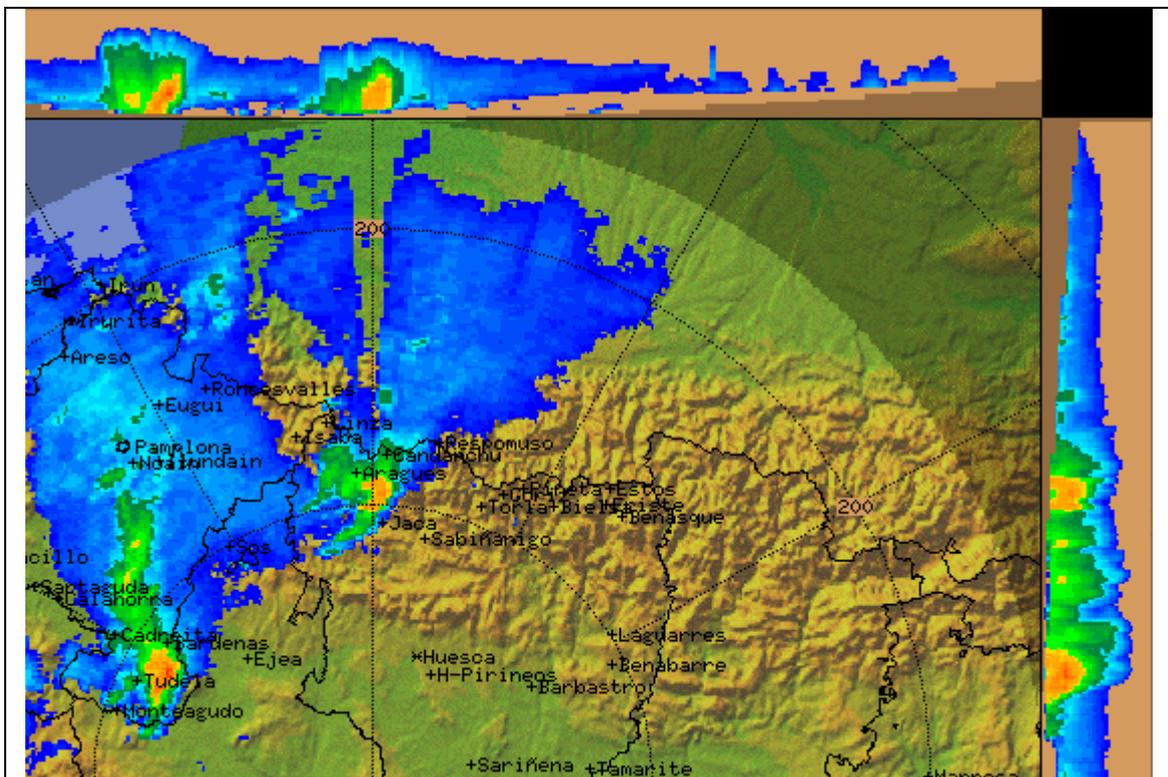


Figura 56. Ampliación del sector de interés de la imagen de Máximos de Reflectividad en paneles del día 4 de octubre de 2013 a las 04:30 UTC.

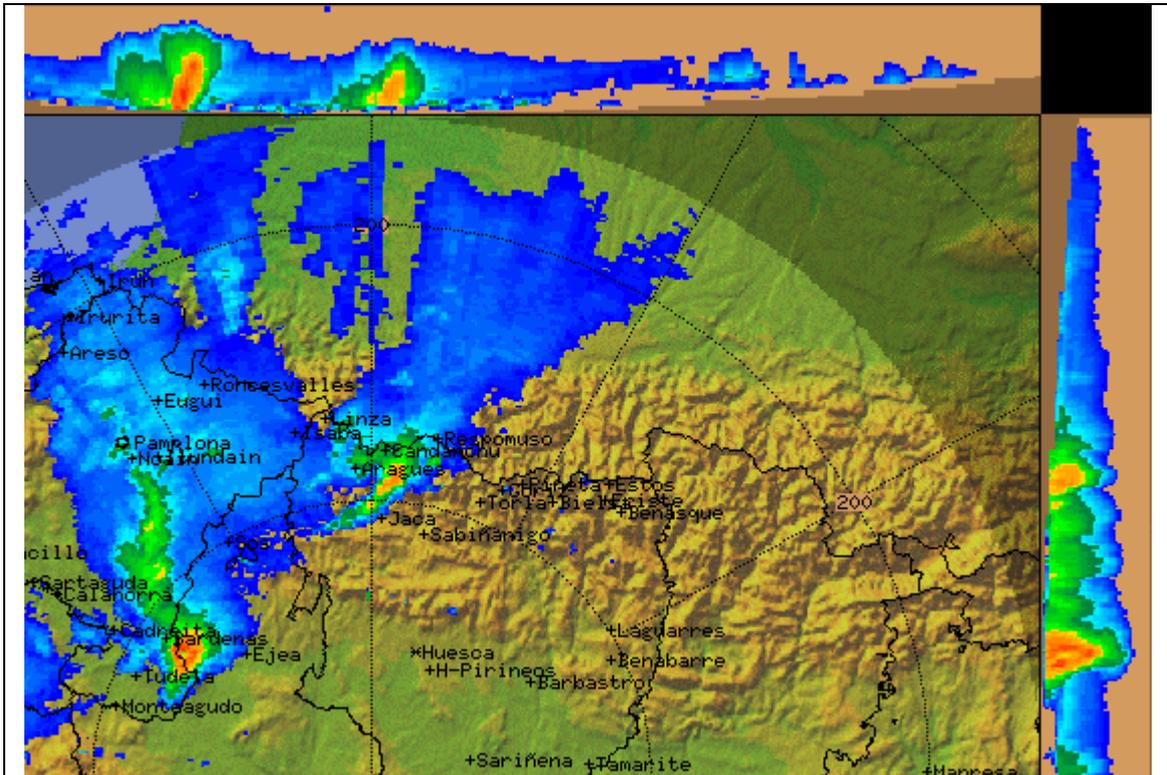


Figura 57. Ampliación del sector de interés de la imagen de Máximos de Reflectividad en paneles del día 4 de octubre de 2013 a las 04:40 UTC.

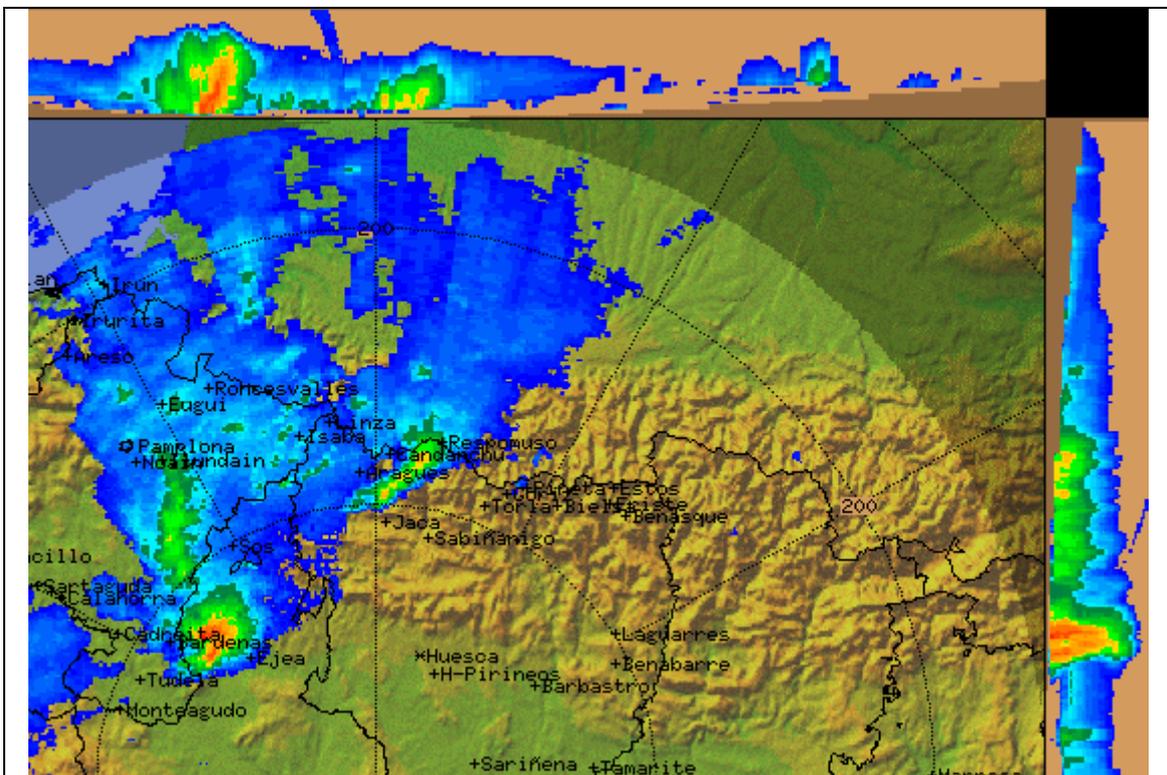


Figura 58. Ampliación del sector de interés de la imagen de Máximos de Reflectividad en paneles del día 4 de octubre de 2013 a las 04:50 UTC.

En las figuras 61 a 64 se presentan las salidas de los módulos 2D y 3D de la aplicación YRADAR para la identificación, caracterización, seguimiento y extrapolación de la convección (Martín et al., 2001). En el intervalo de tiempo que abarca desde las 04:30 hasta las 05:00, se observa que en las salidas 2D aparece identificada una estructura convectiva de considerable tamaño, con reflectividades máximas intensas, en general entre 50 y 60 dBZ y moviéndose en una dirección en general NE, aunque estos desplazamientos aparecen como poco consistentes y algo erráticos. En cuanto a las imágenes del módulo 3D, se aprecia la forma lineal de la estructura convectiva, dentro de la cuál aparecen identificadas 2 ó 3 células con importante desarrollo vertical. La más intensa, situada en el extremo más meridional, presenta en general parámetros que delatan su posible adversidad o severidad, reflectividades muy intensas (más de 60 dBZ), espesor importante (más de 8 ó 10 km), ecotop muy elevado (más de 12 km), y densidad de VIL muy alta (en general más de 4 ó 5 g/cm³). Además, estas características se mantienen de manera persistente a lo largo, al menos, de un intervalo de más de 2 horas antes de afectar a la zona de interés. La densidad de VIL fue introducida como parámetro de diagnóstico para la convección por Amburn y Wolf (1997). Trata de normalizar el valor del VIL con respecto a la extensión vertical de la tormenta, y ha sido utilizada con bastante éxito para discriminar entre nubes convectivas generadoras de granizo severo y no severo. Este parámetro no necesita información del entorno y sólo se basa en datos del propio radar. Estos autores señalan valores de 3,5 g/cm³ en EE.UU. como umbral para separar células potencialmente generadoras de granizo. En nuestro entorno (San Ambrosio, 2004) parece que con valores inferiores el riesgo de encontrar granizo severo es ya importante. Por otro lado hay que destacar que las salidas del módulo 3D de la aplicación YRADAR asignan a estas células unos desplazamientos muy consistentes y robustos, que se van ajustando de manera bastante precisa al movimiento real que presentan estas células, y en especial las que afectaron a Biota y áreas próximas.

Si además analizamos las salidas de datos VAD del radar, figura 65, se puede comprobar que el perfil de vientos que traza es bastante similar a los perfiles que hemos visto antes en el apartado de sondeos (figuras 36, 37 y 38). En esta figura presentamos los perfiles VAD de la 01 UTC y la evolución cada 10 minutos durante la hora previa. No presentamos los de las horas más próximas a los acontecimientos ya que por la falta de ecos en las proximidades del radar los perfiles en esos momentos tienen muy pocos datos, y es a partir de las 06 UTC cuando vuelve a haber perfiles más completos. De cualquier manera los perfiles que vemos aquí y los que se obtienen a partir de las 06 UTC son muy similares. En ellos destaca también la fuerte cizalladura vertical del viento, concentrada sobre todo en capas bajas, por debajo de unos 2 km de altura, y además podemos ver en la hodógrafa de la 01 UTC una curvatura, sobre todo en estos niveles más bajos, en el sentido de las agujas del reloj. La mayor cizalladura en niveles bajos supone un entorno favorable a la organización de la convección en líneas de turbonada y en especial en "bow echos", y por otro lado la curvatura de la hodógrafa pone de manifiesto un entorno que posibilita el desarrollo de supercélulas con giro ciclónico.

Es también importante señalar que esta estructura vertical de vientos es consistente con el desplazamiento que vemos a partir de las salidas del módulo 3D y también con los modelos conceptuales de movimiento de sistemas convectivos y en especial de líneas de turbonada. En la figura 66 hemos representado la hodógrafa generada a la 01 UTC, sobre ella se han superpuesto los vectores que de manera aproximada

intervienen en el desplazamiento de las células convectivas. Así, se puede ver en color rojo (vector v) la componente de traslación, que teóricamente se puede asimilar al viento medio entre superficie y 500 hPa (en este caso hemos tomado hasta unos 5 km de altura), en color naranja (vector p) se representa la componente de propagación, que en muchas ocasiones se puede asimilar a un vector opuesto al flujo en superficie, y el desplazamiento final de las estructuras que sería la resultante de la suma vectorial de estos vectores, que se representa en la figura con color azul (vector c). Es fácil constatar que el movimiento de estas líneas de turbonada y de las células convectivas observadas y que se representan en las figuras 61 a 64, es muy similar al vector c .

En las salidas del módulo 2D, figuras 61 a 64, se pueden ver también los datos de la red de detección de descargas eléctricas. Se puede comprobar que en el área de cobertura del radar de Zaragoza hay una considerable actividad eléctrica asociada a las diferentes estructuras convectivas identificadas. Como se ve en las imágenes presentadas se detectan del orden de unos 200 rayos cada 10 minutos en todo el cuadrante, y aunque no hay un predominio de rayos positivos, se puede considerar una actividad más que significativa. Por otro lado dentro de la aplicación YRADAR se hace una asignación de rayos a las diferentes estructuras convectivas identificadas. Así, se puede comprobar que a la célula que nos interesa se le asignan desde las 04:30 a las 05:00 un total de 140 rayos negativos y 27 positivos. Hay que señalar que en esta aplicación sólo se consideran las descargas nube-tierra, y no las nube-nube, con lo cual podría haber habido actividad eléctrica de este último tipo no detectada y que no queda reflejada en estas imágenes.

Las supercélulas son estructuras convectivas con un muy alto grado de organización interna y se caracterizan principalmente por poseer una zona persistente de fuertes corrientes ascendentes en rotación (mesovórtice), que generalmente son de tipo ciclónico (mesociclón). Datos registrados en EEUU revelan que el 90 % de las supercélulas llevan asociados fenómenos severos en superficie: tornados, granizo de gran tamaño o vientos muy intensos (Burgess & Lemon, 1991). La mitad de las mismas generan tornados violentos en superficie (Burgess & Lemon, 1990; Moller et al, 1994). Y por otro lado, las supercélulas con mesovórtices en niveles bajos (1-3 Km) son las más proclives a generar tornados (Burgess et al, 1995).

Para caracterizar estas estructuras supercelulares es importante poder detectar esas rotaciones mesoescales, lo cual en ocasiones se puede hacer con datos volumétricos del radar, especialmente en modo Doppler. Aún así, y como se señala en el párrafo anterior, la presencia de un mesovórtice en altura no implica la presencia de un tornado en superficie, ya que en muchas ocasiones dicho mesovórtice no se desploma hacia superficie y no se produce el tornado. Además, existen también tornados, no muy violentos, que se pueden generar por otros mecanismos no asociados a las supercélulas. Por lo tanto, el hecho de disponer de los datos del radar de Zaragoza en modo normal (reflectividad) y en modo doppler (reflectividad y velocidad radial de los ecos) que nos permitan identificar las características tridimensionales de la estructura de reflectividad y la presencia de rotaciones típicas de una supercélula, no supondría tampoco una condición necesaria ni suficiente para certificar la existencia de un tornado. Sí que sería, sin duda alguna, un elemento clave muy importante de cara a garantizar la existencia de unas condiciones idóneas para el desarrollo del mismo, pero seguiríamos necesitando evidencias directas del tornado tomadas sobre el terreno.

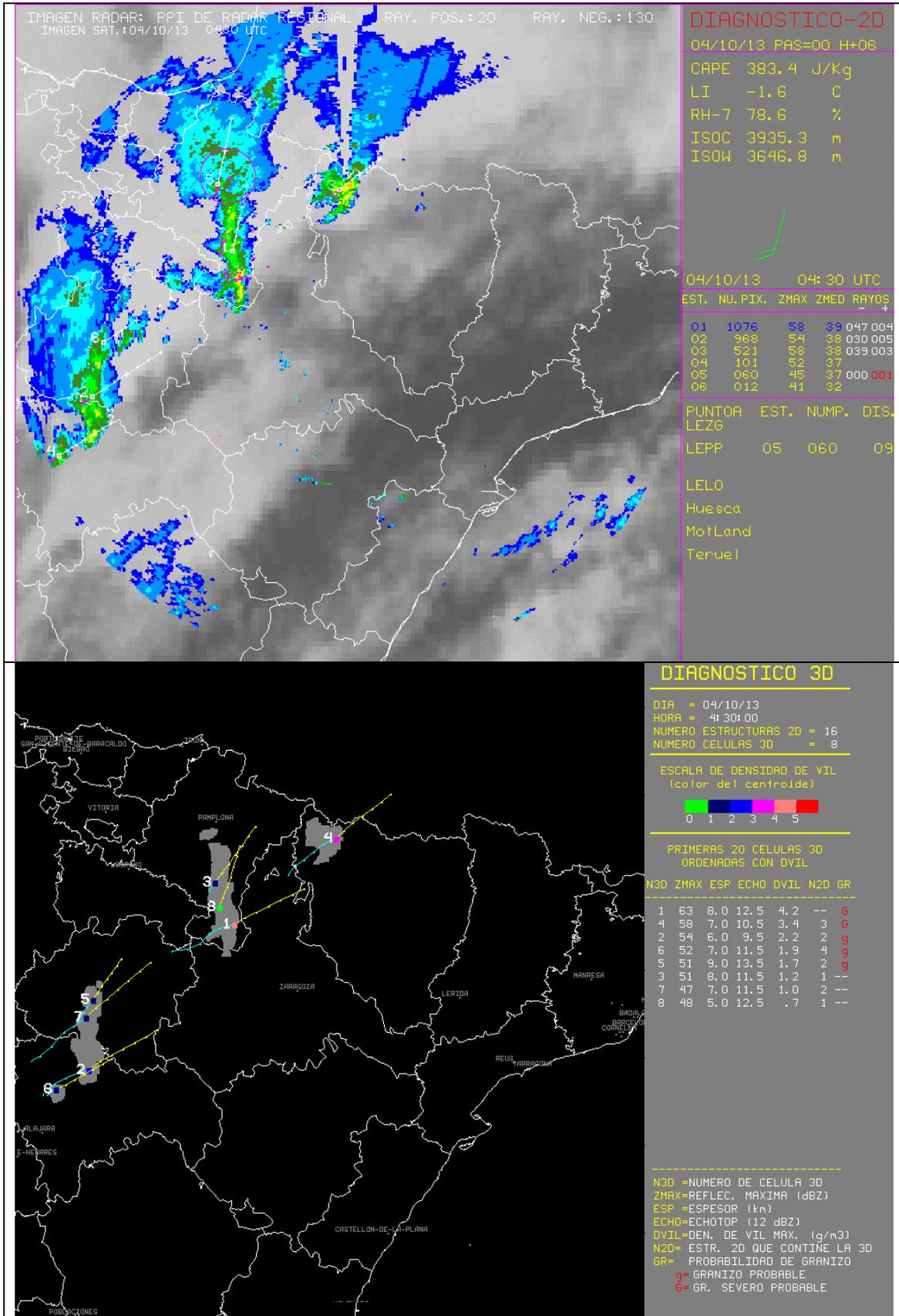


Figura 61. Imágenes de la aplicación YRADAR del día 4 de octubre de 2013 a las 04:30 UTC, salida del módulo de diagnóstico 2D (arriba) y del módulo de diagnóstico 3D (abajo).

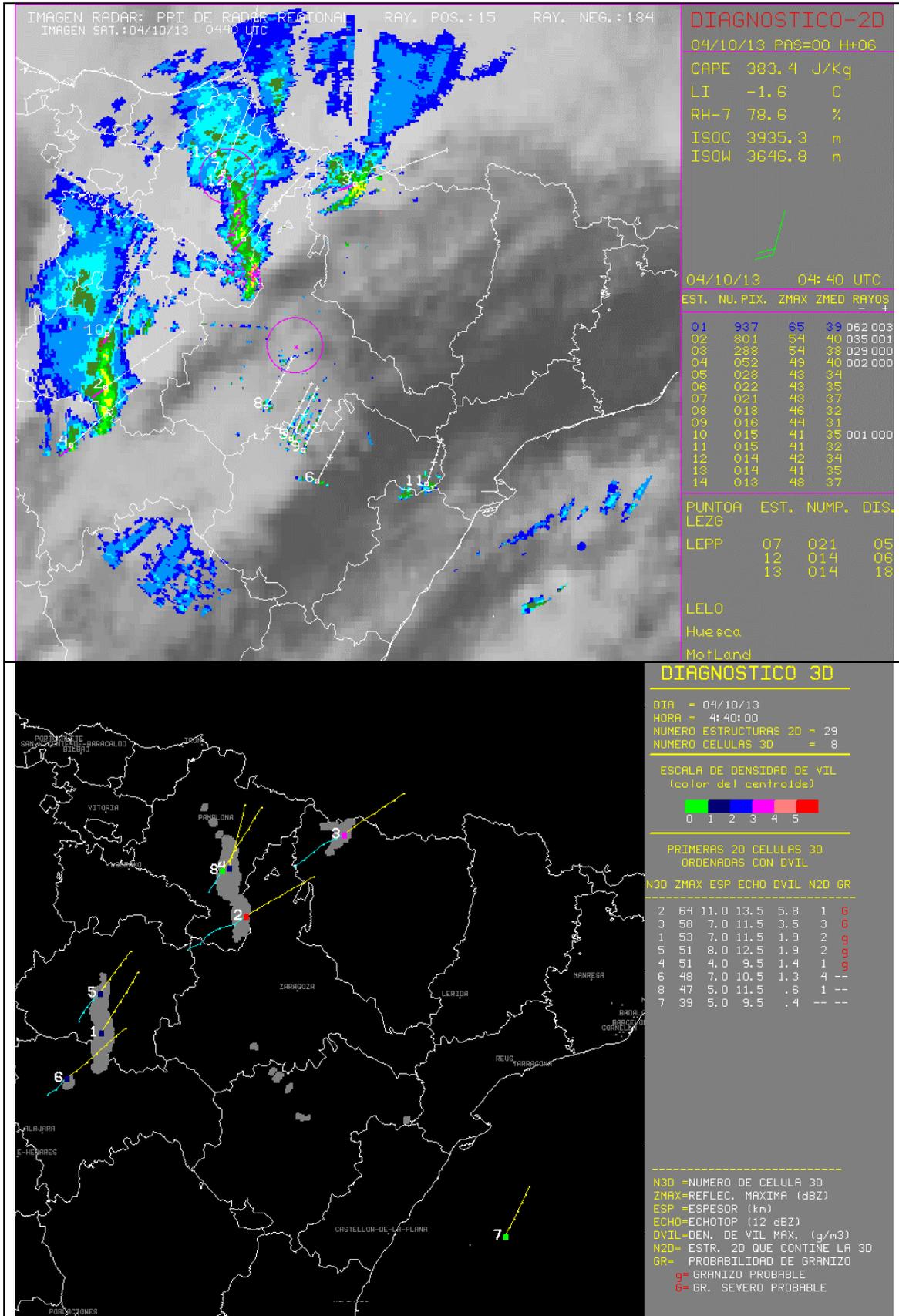


Figura 62. Imágenes de la aplicación YRADAR del día 4 de octubre de 2013 a las 04:40 UTC, salida del módulo de diagnóstico 2D (arriba) y del módulo de diagnóstico 3D (abajo).

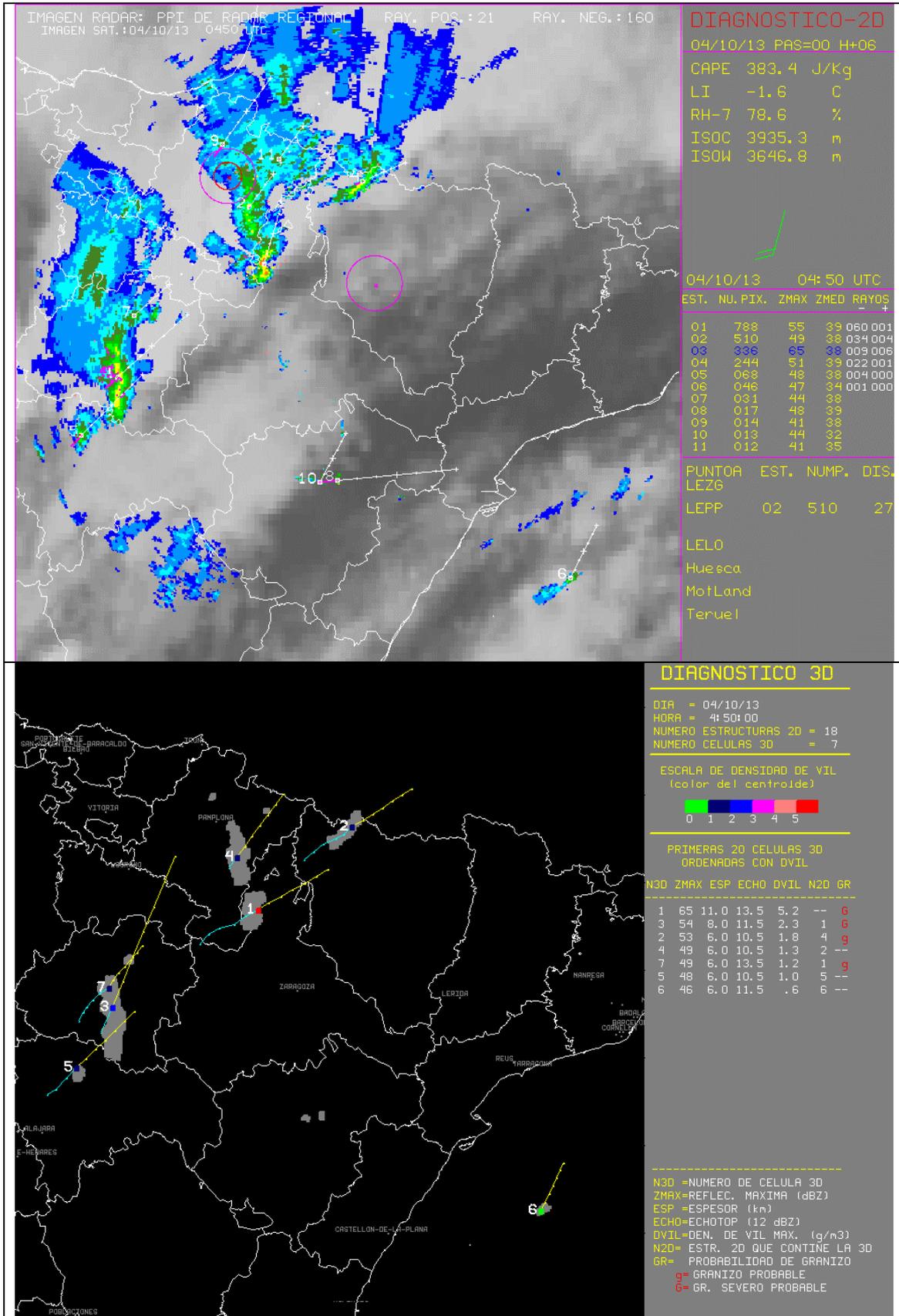


Figura 63. Imágenes de la aplicación YRADAR del día 4 de octubre de 2013 a las 04:50 UTC, salida del módulo de diagnóstico 2D (arriba) y del módulo de diagnóstico 3D (abajo).

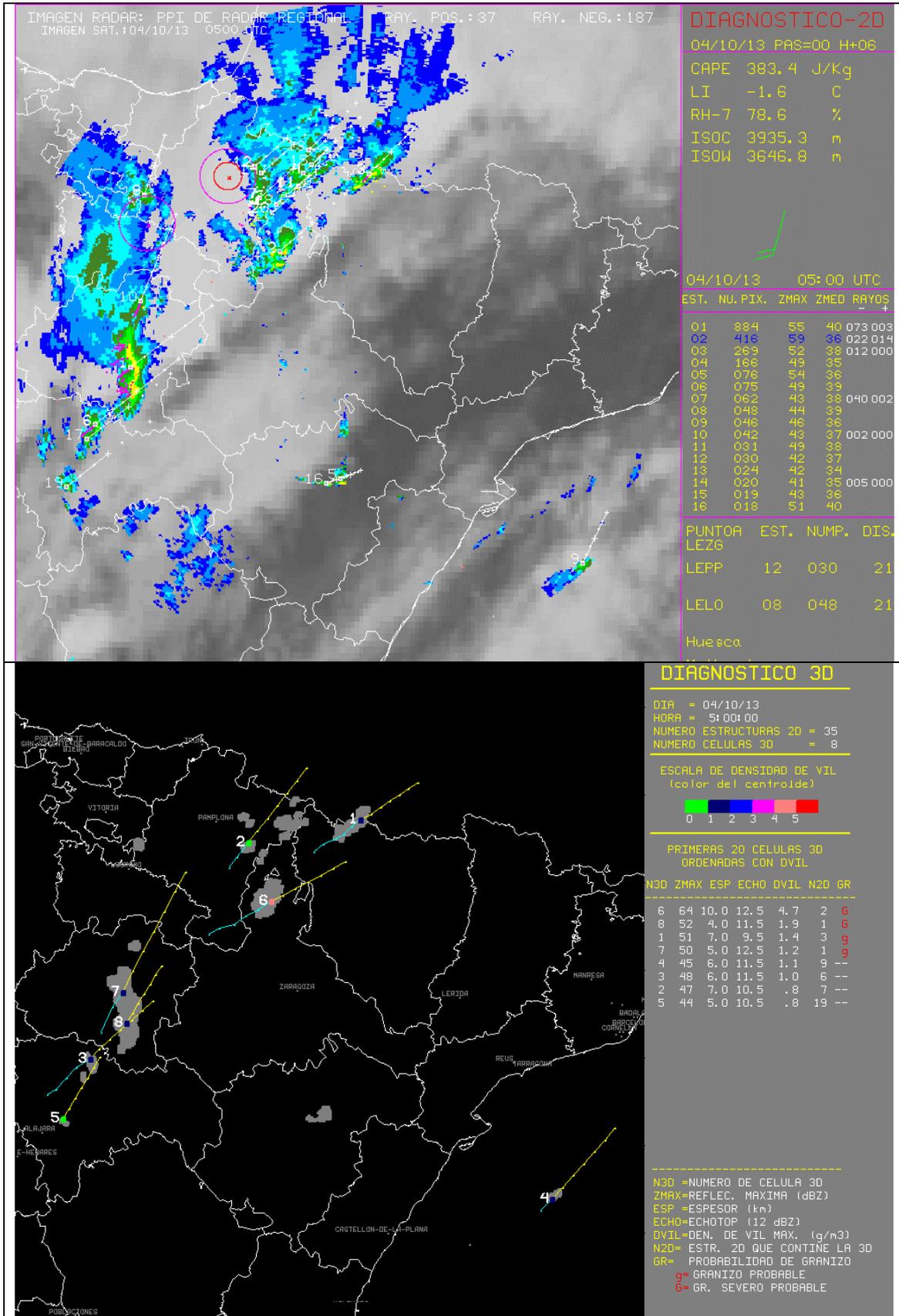


Figura 64. Imágenes de la aplicación YRADAR del día 4 de octubre de 2013 a las 05:00 UTC, salida del módulo de diagnóstico 2D (arriba) y del módulo de diagnóstico 3D (abajo).

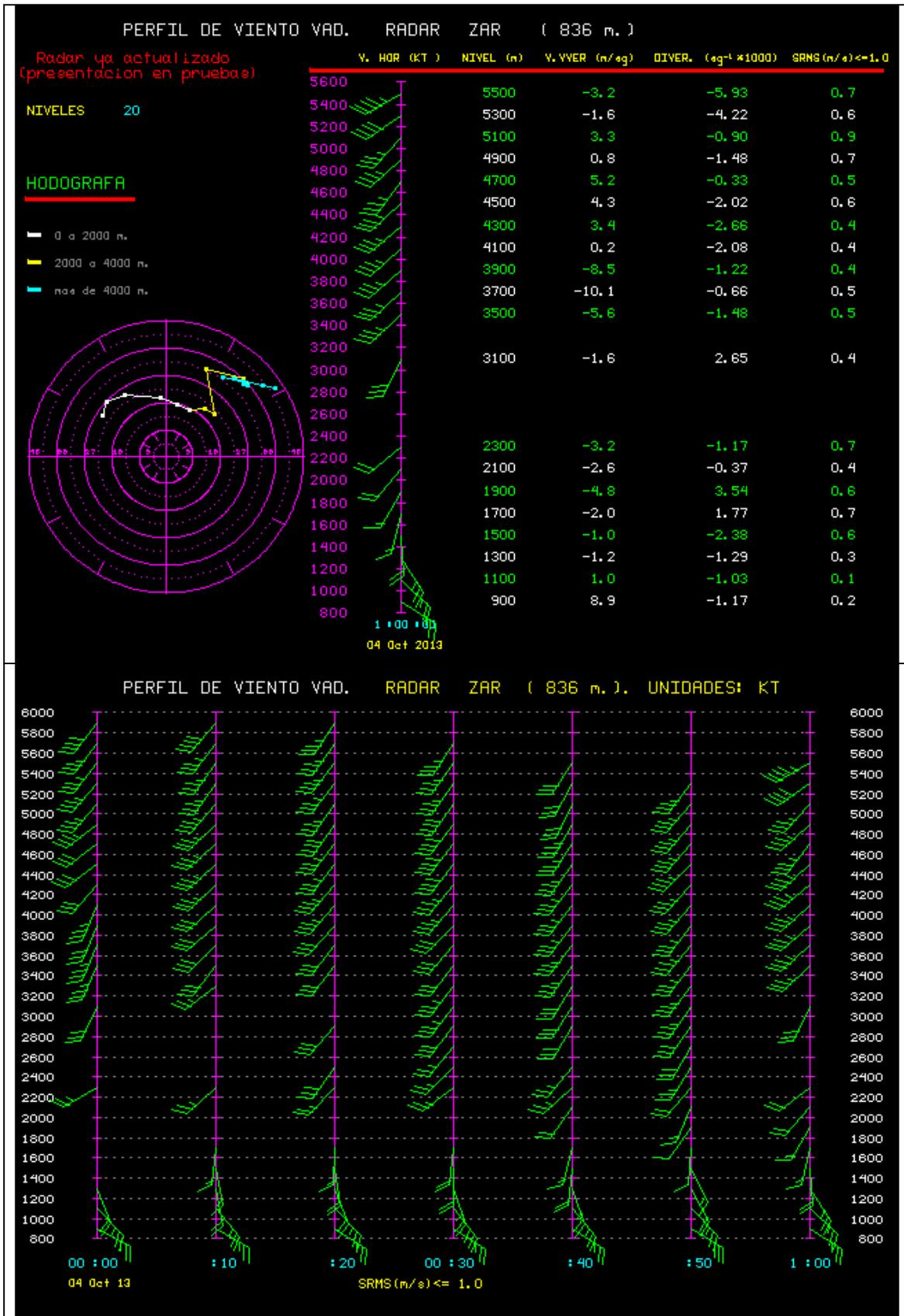


Figura 65. Perfiles de viento VAD del radar de Zaragoza el día 4 de octubre de 2013 Perfil de la 01:00 UTC con hodógrafa (arriba) y perfiles diezminutales entre las 00:00 y la 01:00 UTC (abajo).

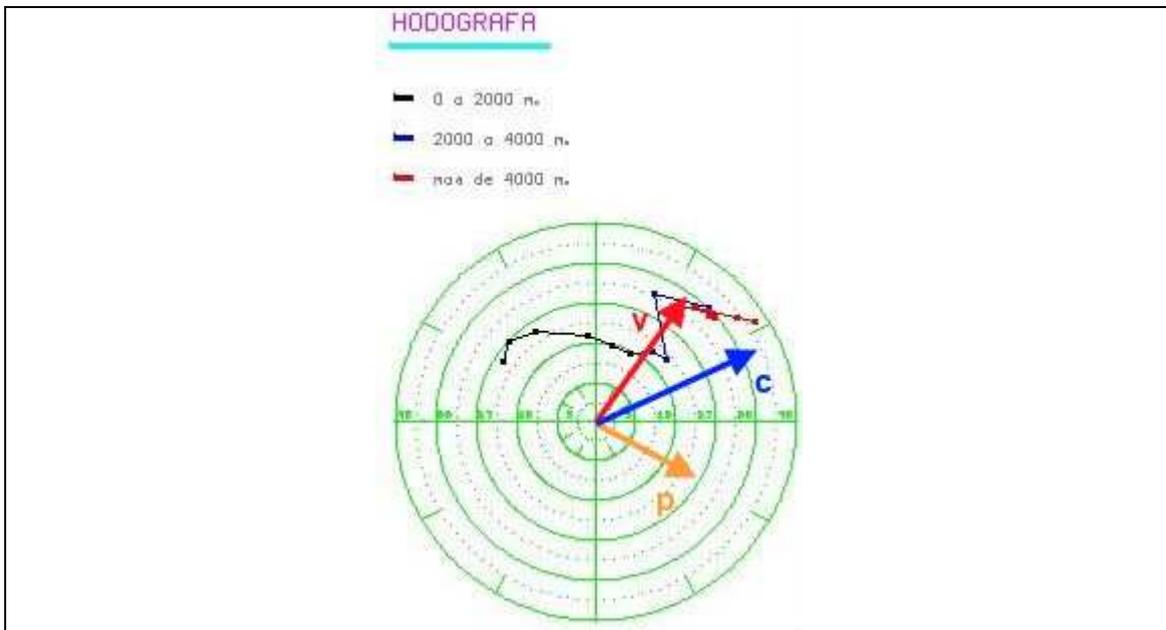


Figura 66. Hodógrafa obtenida con los datos VAD del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a la 01:00 UTC. Aparecen representada sobre la misma una aproximación de la componente de traslación de las estructuras convectivas (vector v , de color rojo), de la componente de propagación (vector p , de color naranja) y el desplazamiento resultante (vector c , de color azul).

Teniendo en cuenta todo lo señalado en los párrafos anteriores se van a analizar las imágenes de viento radial entre las 04:16 y las 05:36 UTC, figuras 67 a 75. Lo primero que se puede destacar es un importante cambio de aspecto de las imágenes a partir de las 05:06 UTC. Así en las imágenes anteriores a esta hora, y en especial en las imágenes de las 04:16 a las 04:46 UTC, se tienen ecos sólo en una parte de la imagen, sobre el SE de Navarra, desplazándose hacia el límite con Zaragoza y la comarca de las Cinco Villas, ecos por otro lado asociados a la línea de turbonada que identificábamos en las imágenes de reflectividad. Se aprecia la forma lineal de esta estructura, que poco a poco se va curvando, y sobre todo se aprecia que por detrás de esta línea, en su flanco occidental, se tiene un máximo muy claro de vientos en dirección al radar (colores verdes), y por delante una zona de vientos que se alejan, de menor intensidad (colores amarillos). Los vientos intensos de color verde en la parte trasera de la línea corresponderían al “Rear Inflow Jet”, corriente descendente trasera que conforma la línea de turbonada, y que al irse intensificando de manera localizada termina por transformarla en un “bow echo”. Esta estructura en el viento radial se ajusta perfectamente a lo que sería un ejemplo de modelo conceptual de “bow echo”, tal y como está descrito en Markowski & Richardson (2010). Este máximo de vientos acercándose al radar es una clara evidencia de la presencia de este “Rear Inflow Jet”.

En las imágenes de las 04:56 y 05:06 UTC (figuras 71 y 72) los ecos cálidos y fríos no son muy intensos, pero se empieza a intuir un posible mesociclón. En la imagen de las 05:16 UTC (figura 73) aparece muy claro el dipolo característico de un mesociclón visto en imágenes de viento radial. Esto sería una clara evidencia de la presencia de esta corriente ascendente en rotación que permitiría caracterizar una supercélula. En las imágenes de las 05:26 y 05:36 UTC (figuras 74 y 75) se intensifica notablemente el máximo en colores cálidos, y no se ve con tanta claridad el posible mesociclón.

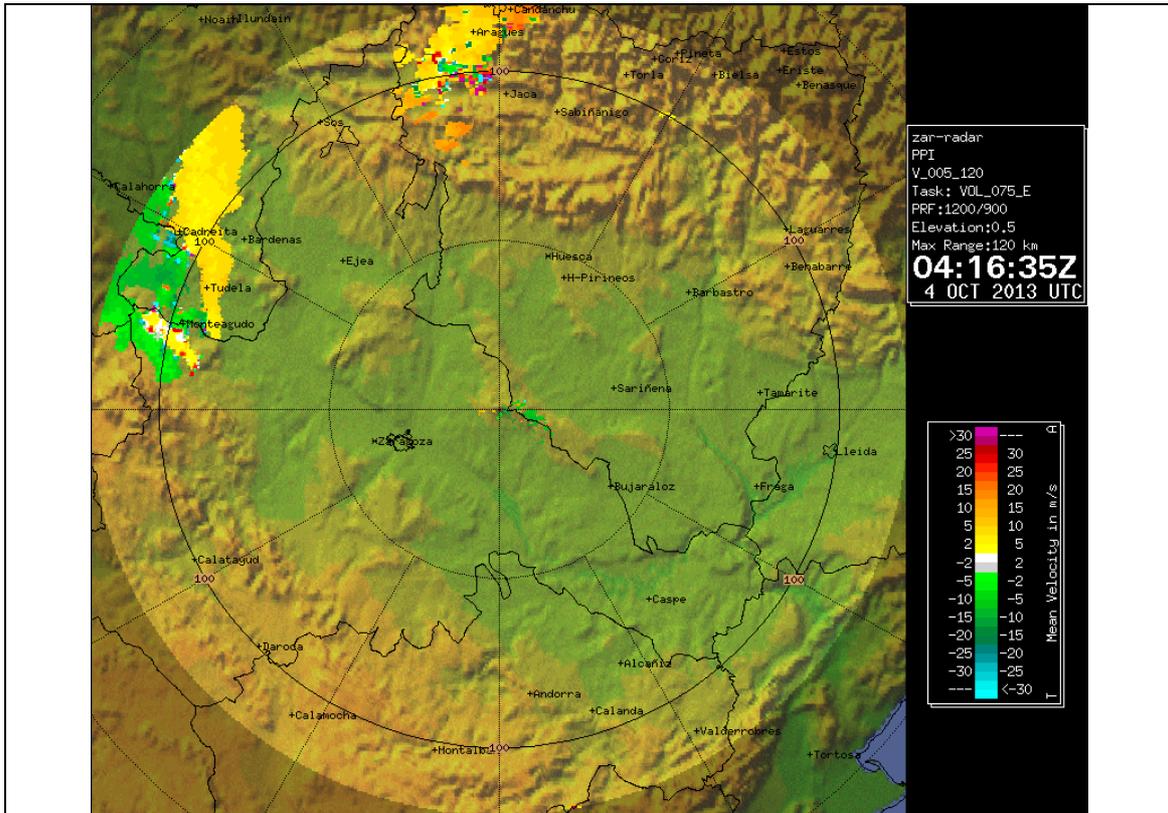


Figura 67. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 04:16 UTC.

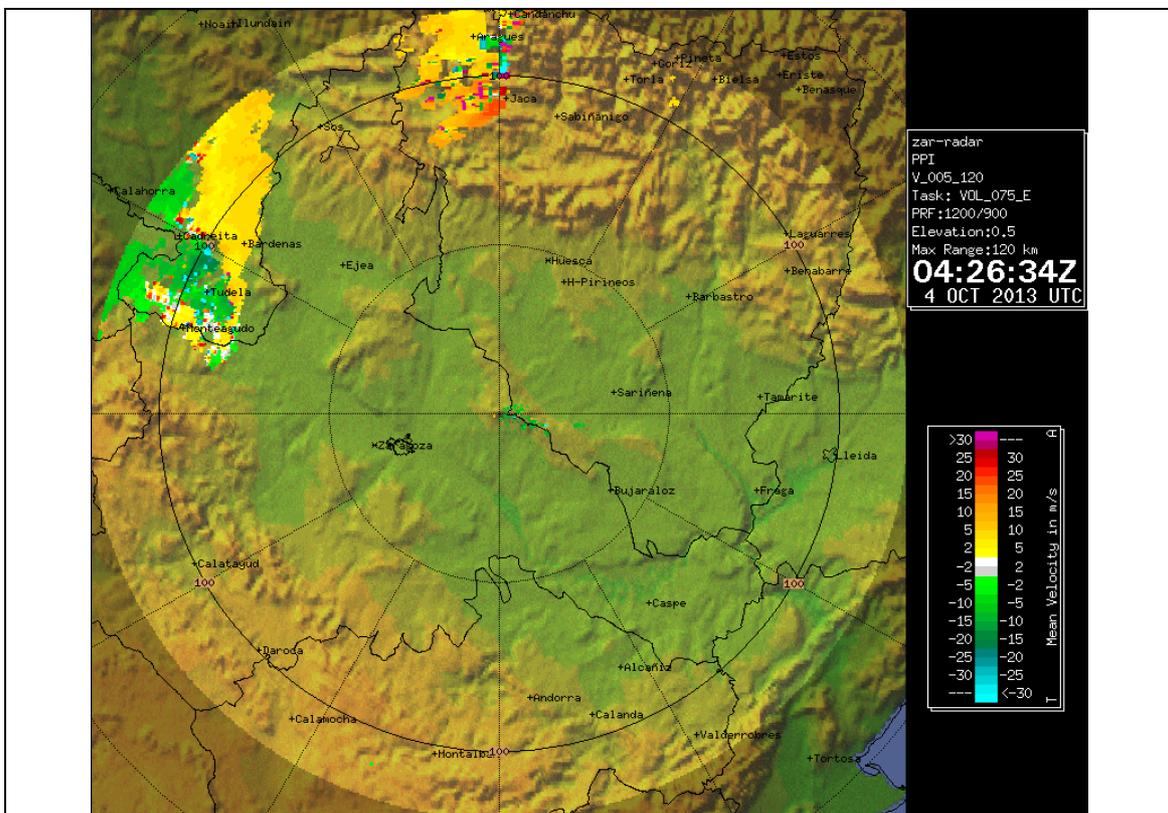


Figura 68. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 04:26 UTC.

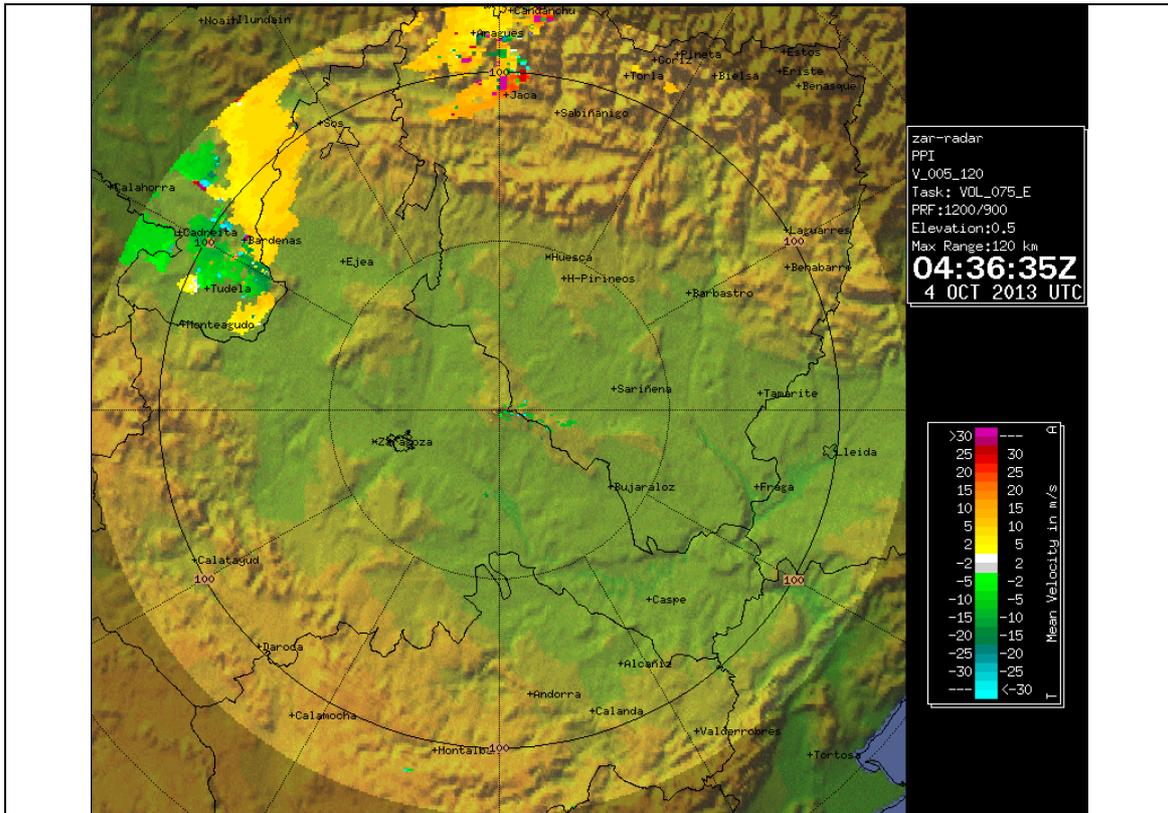


Figura 69. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 04:36 UTC.

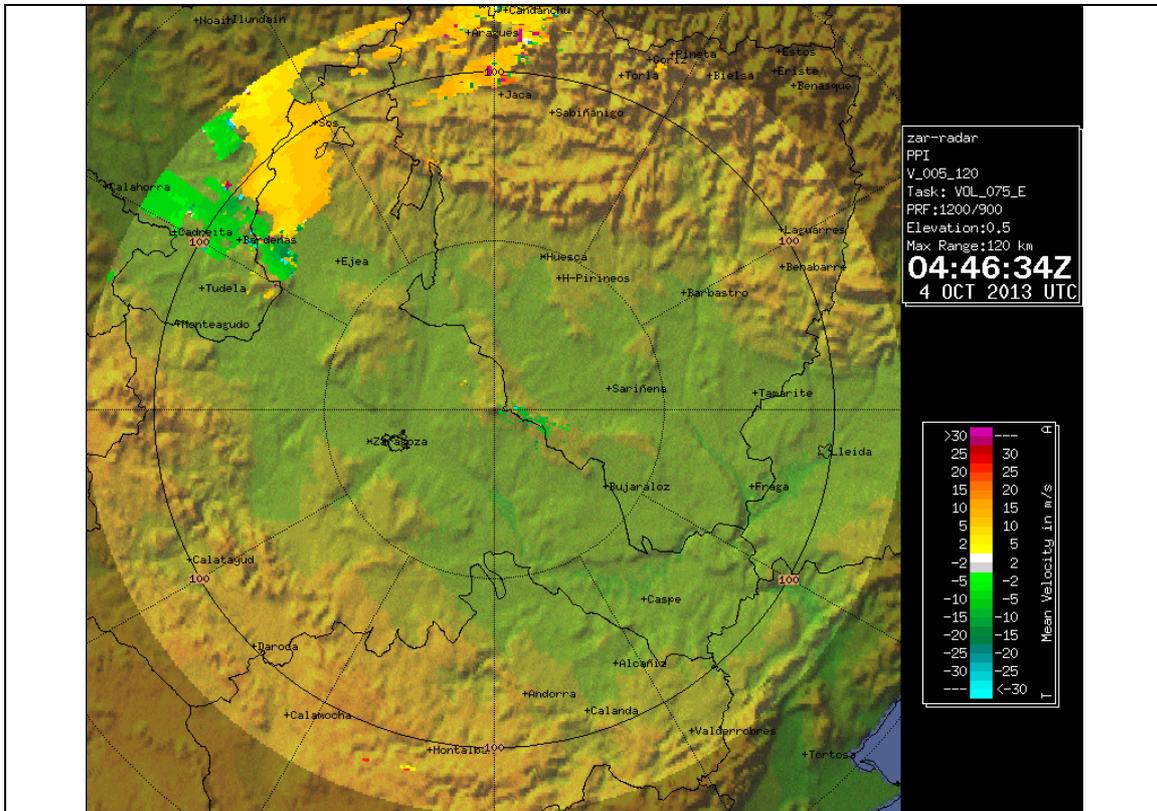


Figura 70. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 04:46 UTC.

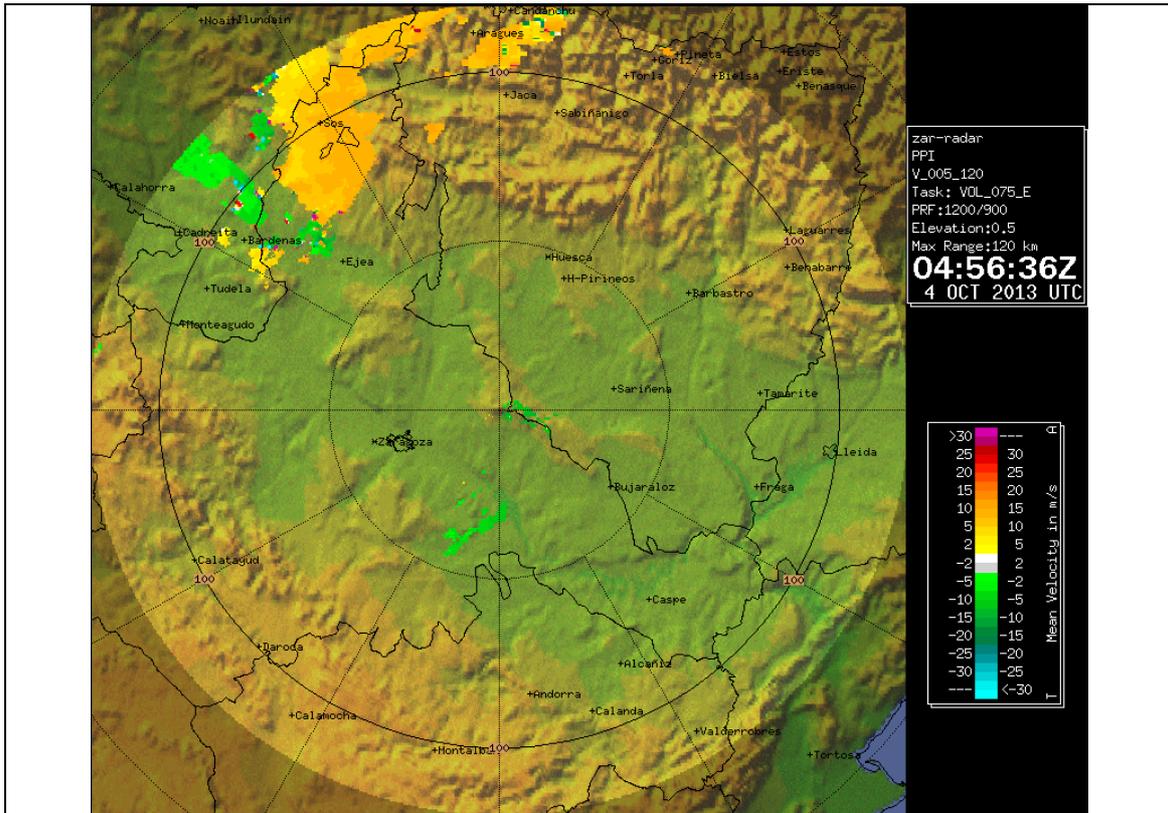


Figura 71. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 04:56 UTC.

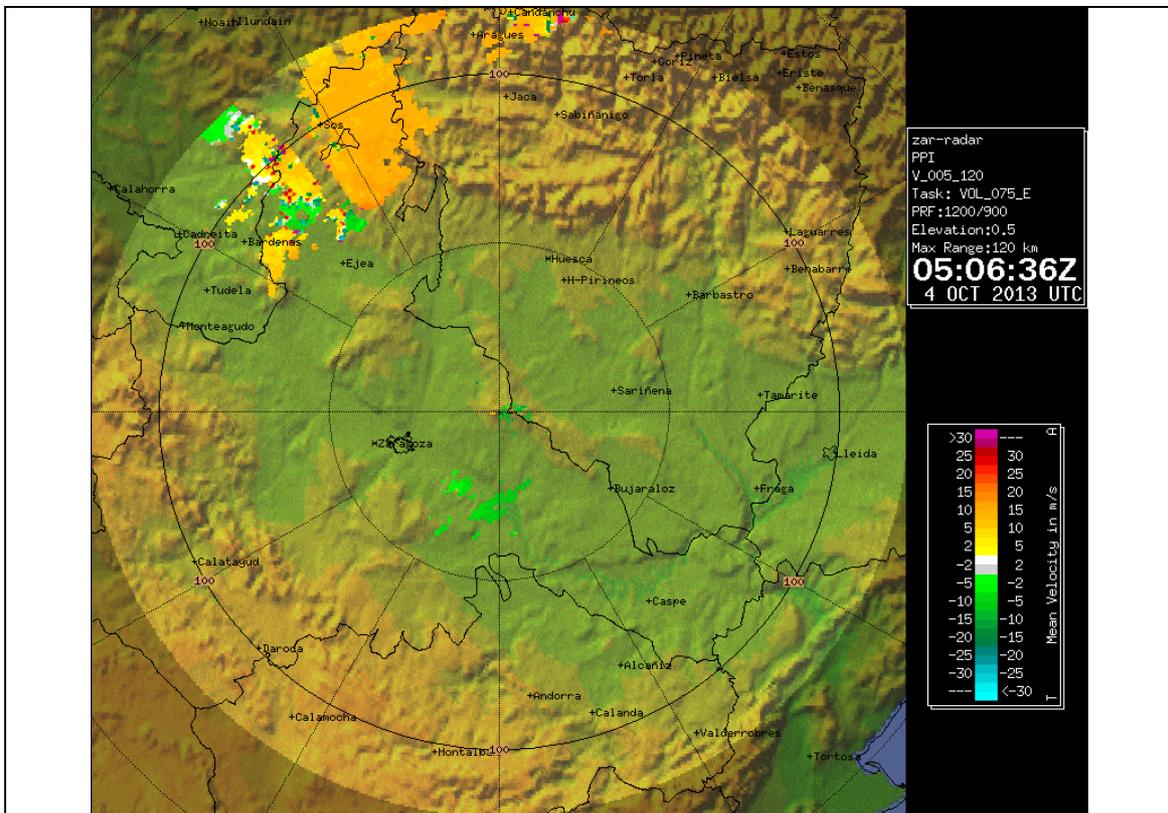


Figura 72. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 05:06 UTC.

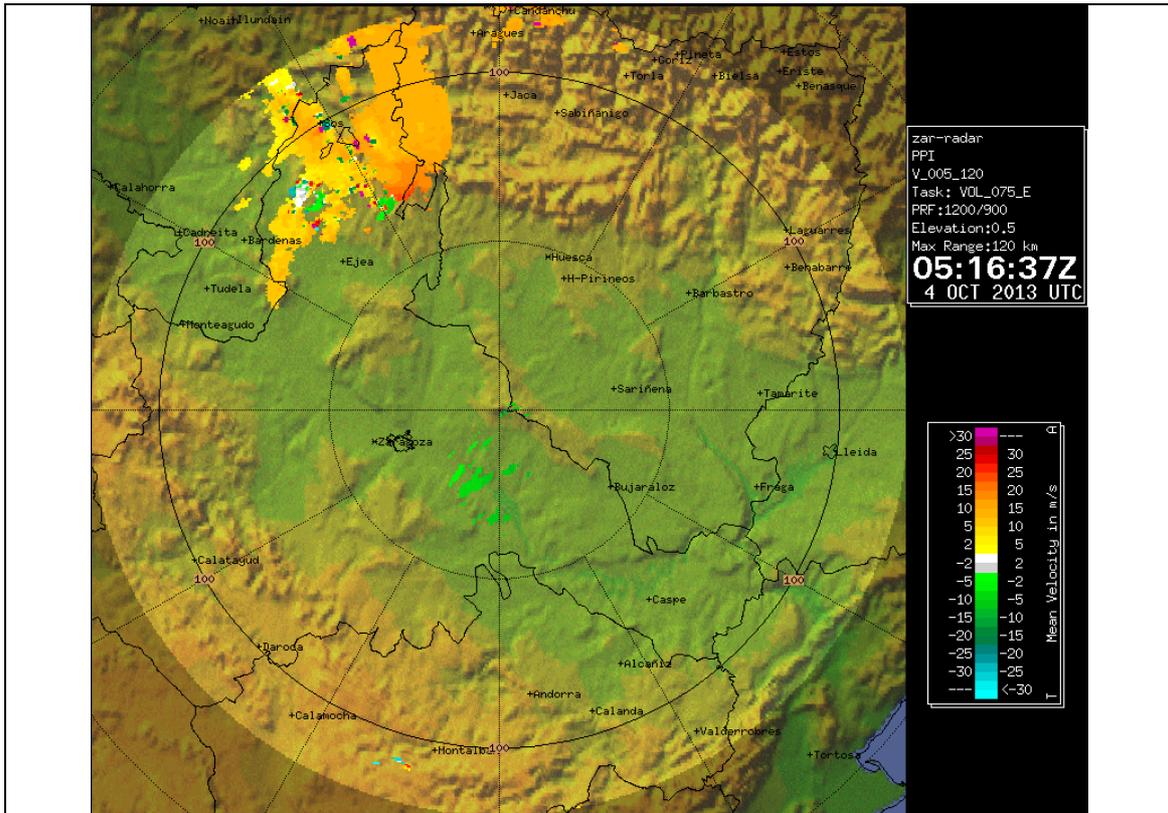


Figura 73. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 05:16 UTC.

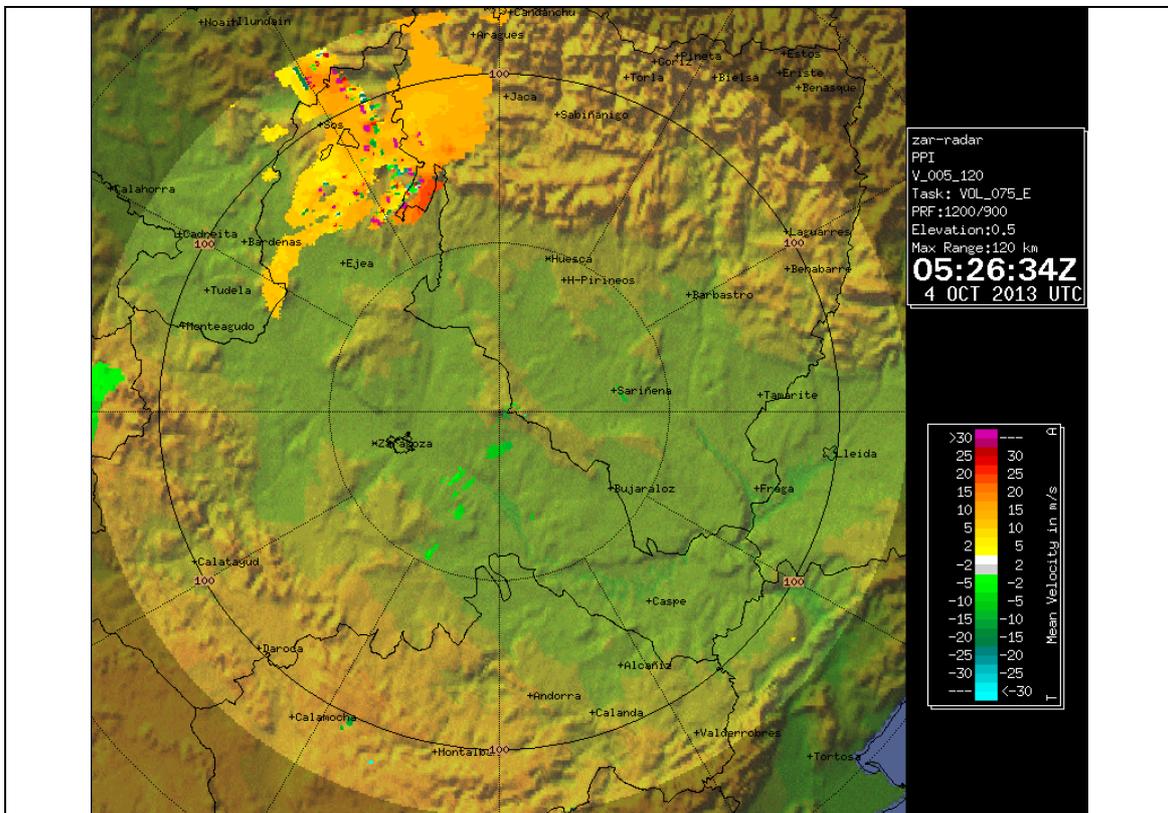


Figura 74. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 05:26 UTC.

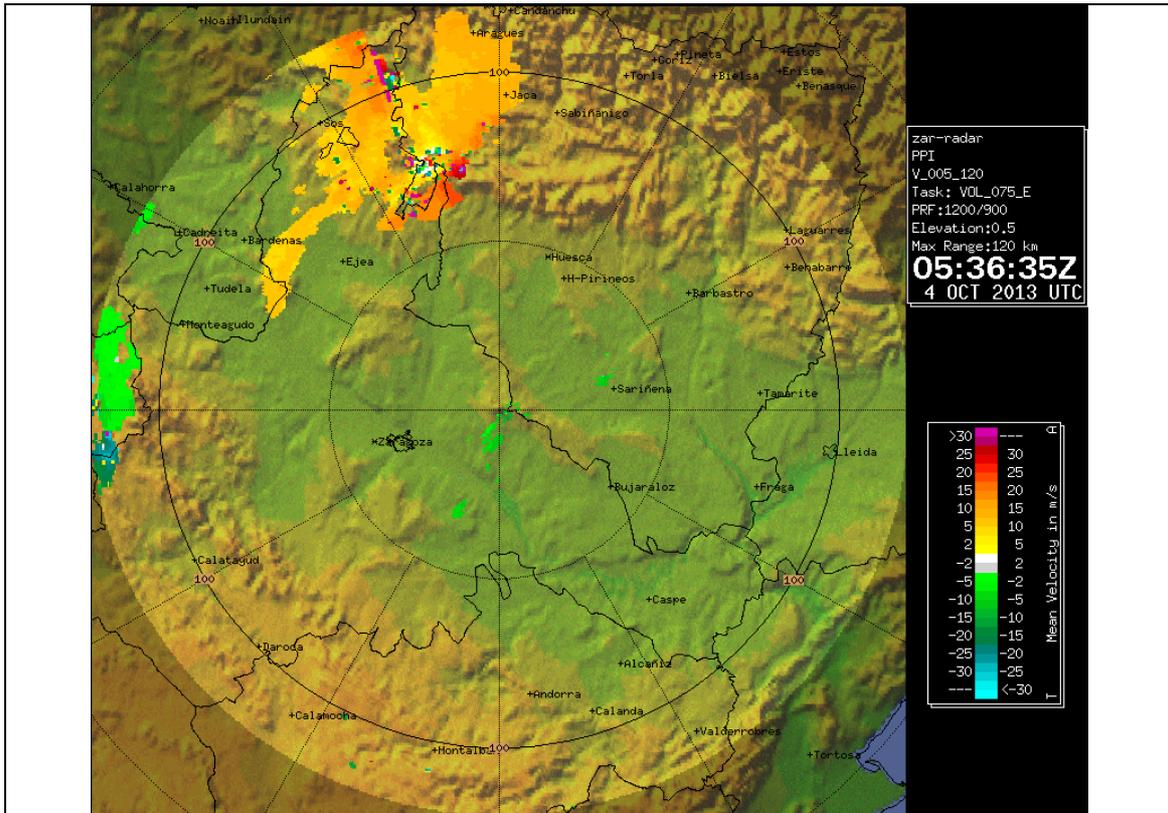


Figura 75. Imagen de viento radial del radar de Zaragoza del día 4 de octubre de 2013 a las 05:36 UTC.

6. DATOS OBSERVADOS MEDIANTE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

En este apartado, se estudian los datos meteorológicos más interesantes de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de interés. Los reanálisis de los días 3 y 4 de octubre con validez de 07 a 07 UTC (figura 76) muestran que se produjeron precipitaciones generalizadas en el NW peninsular con una banda de precipitación máxima con dirección SW – NE afectando al área del Moncayo en Zaragoza, Ribera Baja del Ebro y Bardenas en Navarra, Cinco Villas en Zaragoza y NW de la provincia de Huesca. Este máximo de precipitación se corresponde con la trayectoria seguida por varias líneas de turbonada que se desplazaron en esa dirección durante la primera mitad del día 4.

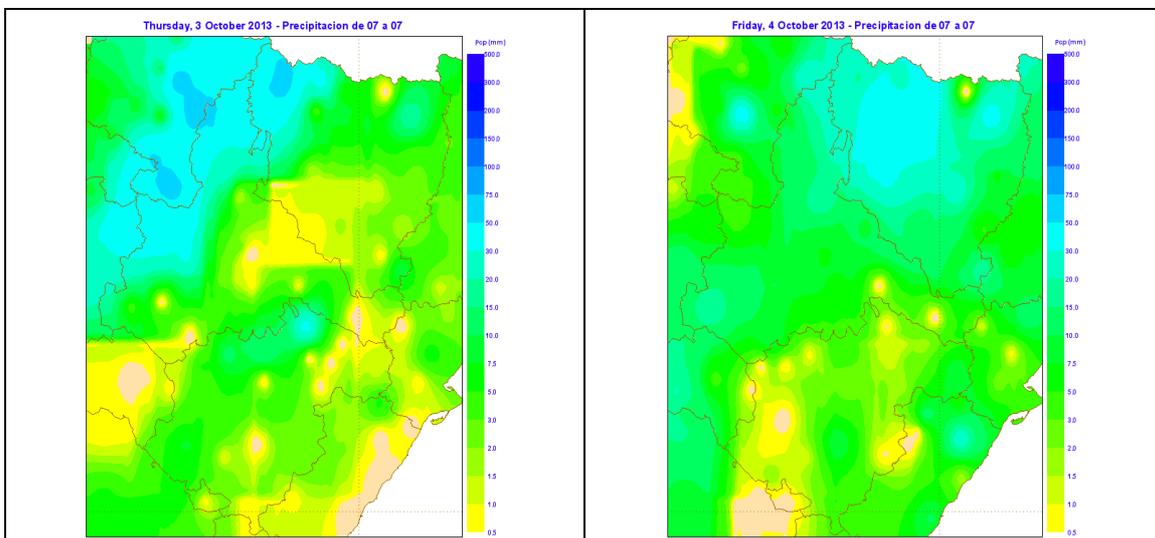


Figura 76. Análisis de precipitación de 07 UTC del día en curso a 07 del día siguiente de los días 3 (izquierda) y 4 (derecha) de octubre de 2013.

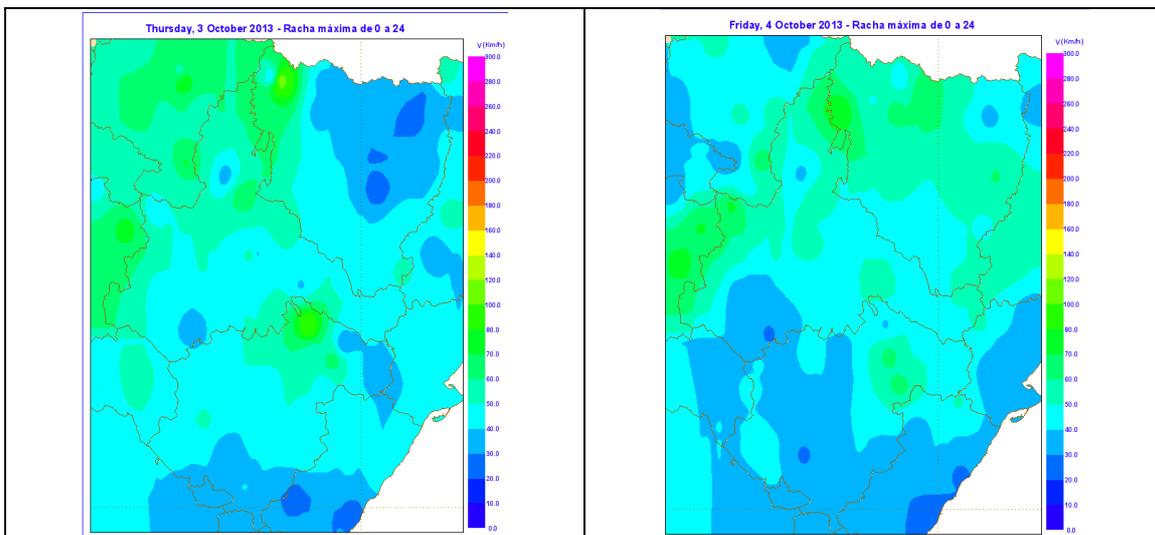


Figura 77. Análisis de rachas máximas de los días 3 (izquierda) y 4 (derecha) de octubre de 2013.

En los análisis de viento (figura 77) también se observa una banda de rachas máximas en la misma zona aunque curiosamente con un mínimo en la zona de interés de las Cinco Villas, debido probablemente a la falta de datos de observación disponibles a la hora de realizar estos mapas (ver más adelante el dato observado en Ejea).

6.1 Estaciones automáticas de Aemet.

En primer lugar se estudian los datos procedentes de la red de estaciones automáticas de Aemet (EMAS), que toman datos de forma continua de diferentes variables meteorológicas, centrándonos en el viento y la precipitación.

En la figura 78 se muestran las estaciones automáticas que se han analizado teniendo en cuenta que rodean a la zona de interés de Sádaba-Biota y que a su vez están en la trayectoria de las líneas de turbonada mencionadas anteriormente.

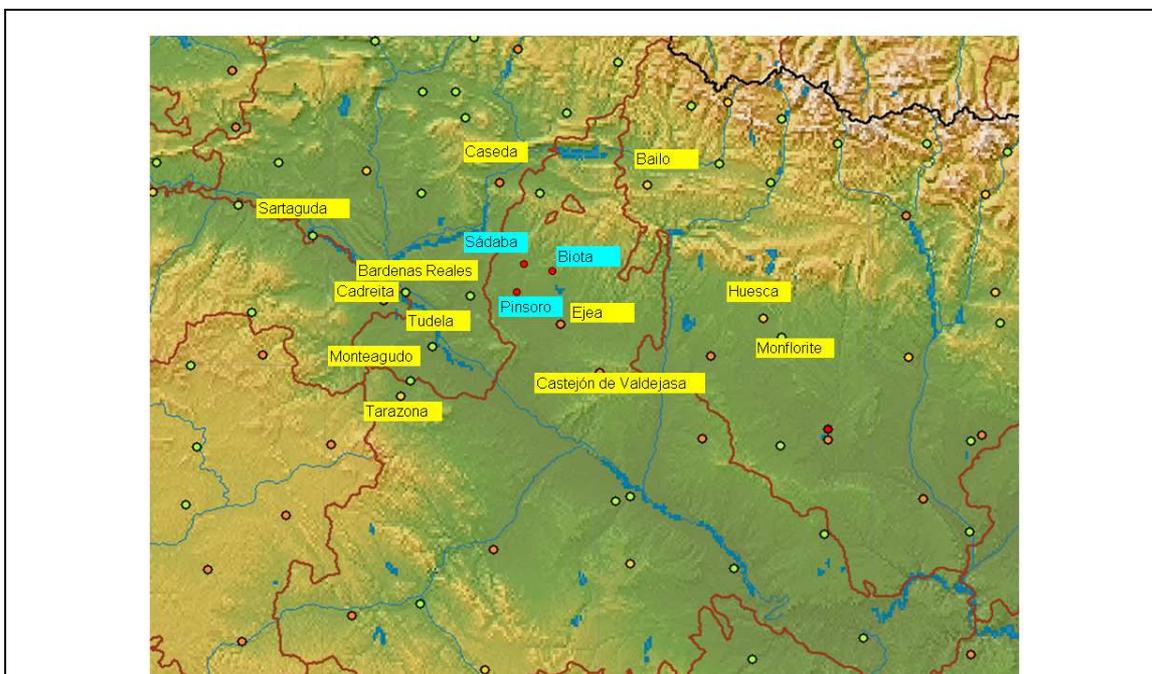


Figura 78. Situación de las estaciones automáticas de Aemet utilizadas en el estudio. En amarillo estaciones automáticas y en azul municipios afectados.

En la tabla 1 se muestran las precipitaciones máximas en 12 horas, en 1 hora y en 10 minutos. Se observa que las precipitaciones más intensas se produjeron entre las 02:00 y las 07:30 UTC en la línea de dirección SW-NE desde Tarazona a Bailo mientras que las estaciones de Huesca y Castejón de Valdejasa dan el máximo más tarde cuando el sistema se estaba desplazando en su conjunto hacia el E. Las intensidades fueron en general de carácter muy fuerte y torrencial (más de 5 y 10 mm en 10 min respectivamente).

Posteriormente se verá en las gráficas que hubo 3 líneas de turbonada consecutivas que pasaron por Tarazona, Monteagudo, Tudela, Cadreita, Bardenas Reales, Casada y Bailo. Las 3 dejaron precipitaciones intensas pero los valores más altos corresponden a la segunda línea a su paso por Tudela, Bardenas y tal vez por Sádaba y Biota. Esta línea dejó las siguientes precipitaciones en 10 minutos:

- 19,2 mm en Tudela a las 04:30 (el registro máximo de estas estaciones).
- 13,8 mm en Bardenas a las 04:50.
- Siguiendo este patrón de movimiento estaría sobre el área de Biota a las 05:10 UTC (07:10 local) que es la hora a la que se produjeron los mayores daños en esta zona.

Estación	PCP en 12 horas		PCP en 1 hora		PCP en 10 minutos	
	PCP	Hora final	PCP	Hora final	PCP	Hora final
A. MONFLORITE (HUESCA)	23,7	15:40	14,1	11:40	4,4	10:50
BAILO.PUYLATO (HUESCA)	56,2	10:40	20,0	07:50	15,0	07:30
CASTEJON DE VALDEJASA (ZARAGOZA)	19,8	11:40	10,2	11:10	7,6	10:20
EJEA DE LOS CABALLEROS (ZARAGOZA)	27,4	11:00	12,6	07:20	8,0	07:00
HUESCA (HUESCA)	43,2	14:20	32,8	11:20	12,2	11:20
TARAZONA (ZARAGOZA)	38,0	10:00	13,6	06:30	9,8	06:10
BARDENAS REALES (NAVARRA)	49,4	11:10	20,8	05:00	13,8	04:50
CADREITA (NAVARRA)	56,9	11:10	18,3	02:30	9,2	02:20
CASEDA. DEPÓSITO (NAVARRA)	68,6	10:50			10,0	05:10
MONTEAGUDO (NAVARRA)	41,8	10:00	14,2	06:50	10,2	06:10
SARTAGUDA (NAVARRA)	9,6	09:20	4,4	04:20	2,0	03:50
TUDELA (NAVARRA)	71,2	10:10	28,4	04:50	19,2	04:30

Tabla 1. Valores de precipitación de estaciones automáticas Aemet del día 4 de octubre de 2013 (horas en UTC).

En las figuras 79 a 87 se observa perfectamente en los registros de precipitación el paso de las 3 líneas de turbonada por las diferentes EMAS, destacando que la banda de precipitación máxima era relativamente estrecha. Así por ejemplo, las precipitaciones en Tudela y Cadreita (figuras 81 y 82) se dan al mismo tiempo pero son mucho mas intensas en Tudela. En la zona E la diferencia es aun más marcada y de hecho a Ejea de Los Caballeros y a Castejón de Valdejasa (figuras 86 y 87) no les afectan las 2 primeras líneas de turbonada, y sus gráficas muestran un patrón distinto al de las anteriores EMAS.

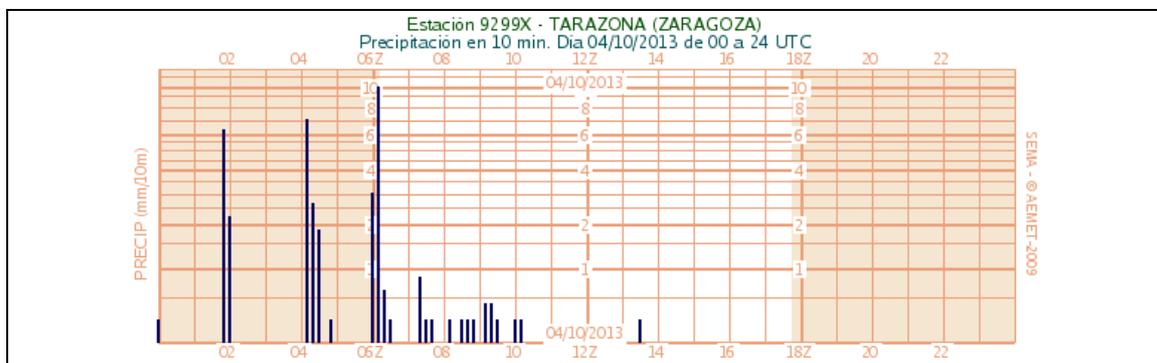


Figura 79. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Tarazona.

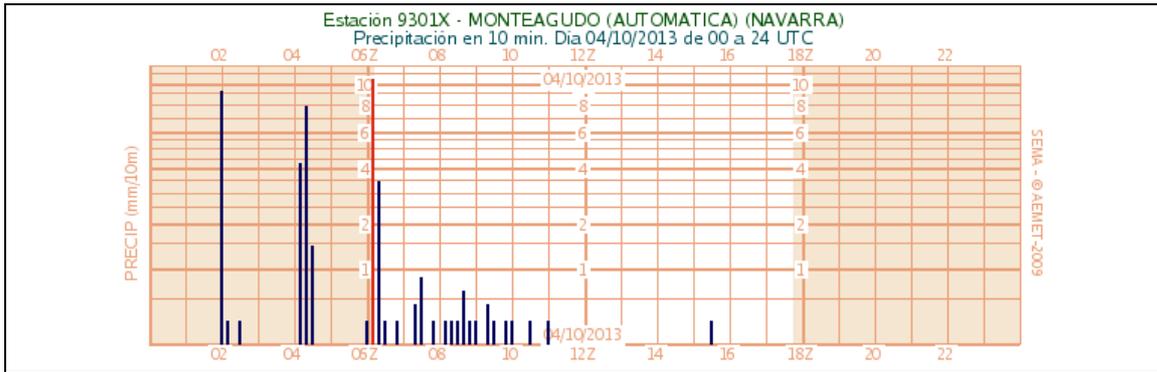


Figura 80. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Monteagudo.

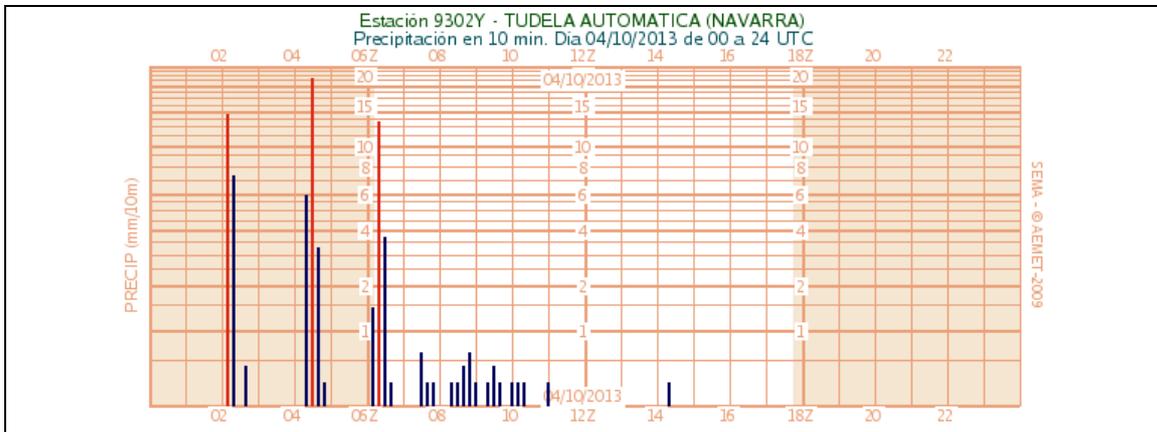


Figura 81. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Tudela.

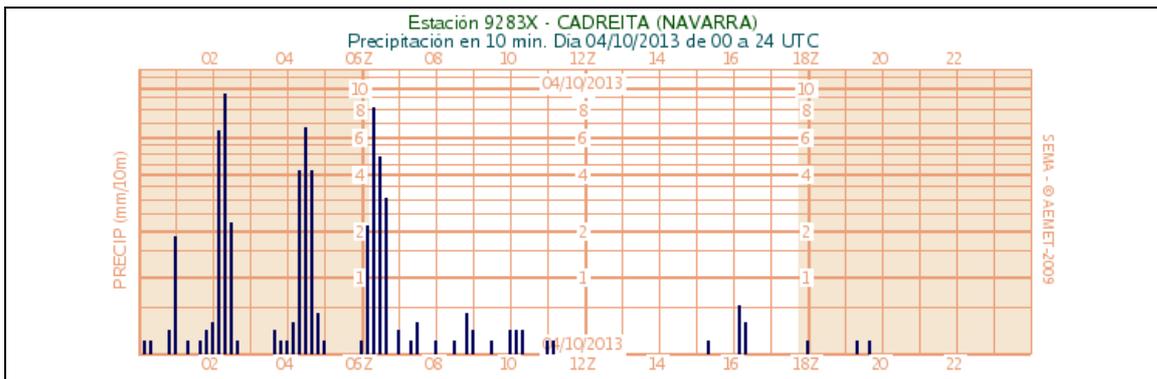


Figura 82. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Cadreita.

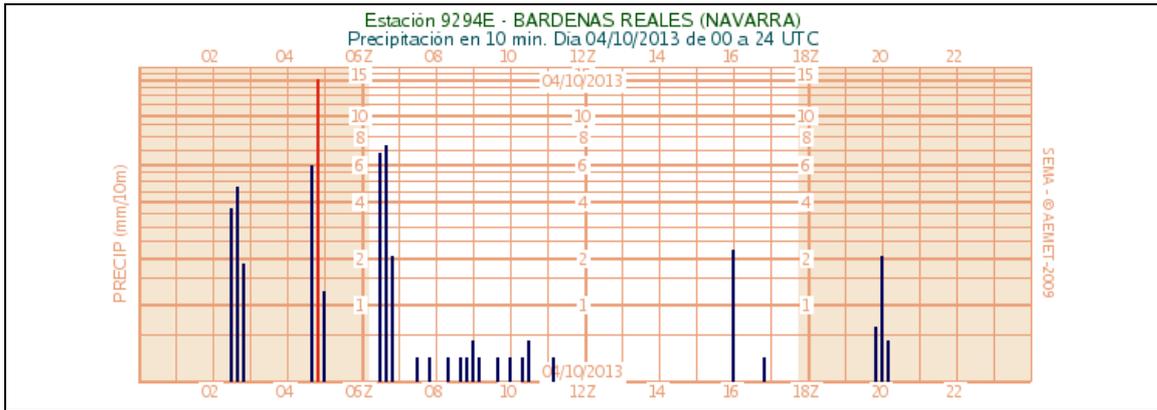


Figura 83. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Bardenas Reales.

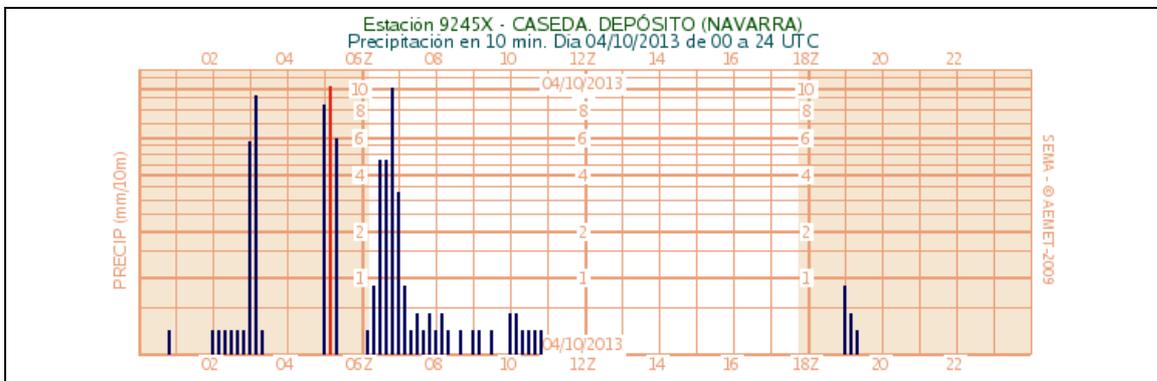


Figura 84. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Caseda.

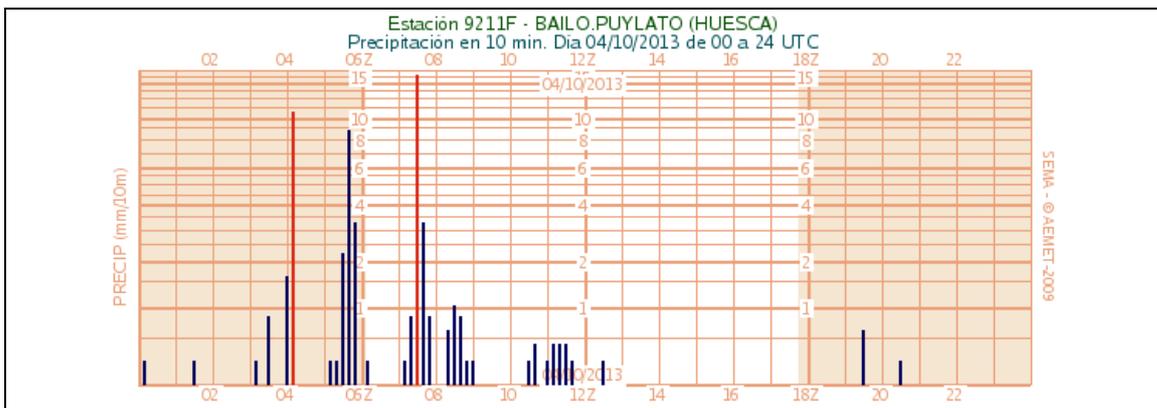


Figura 85. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Bailo.

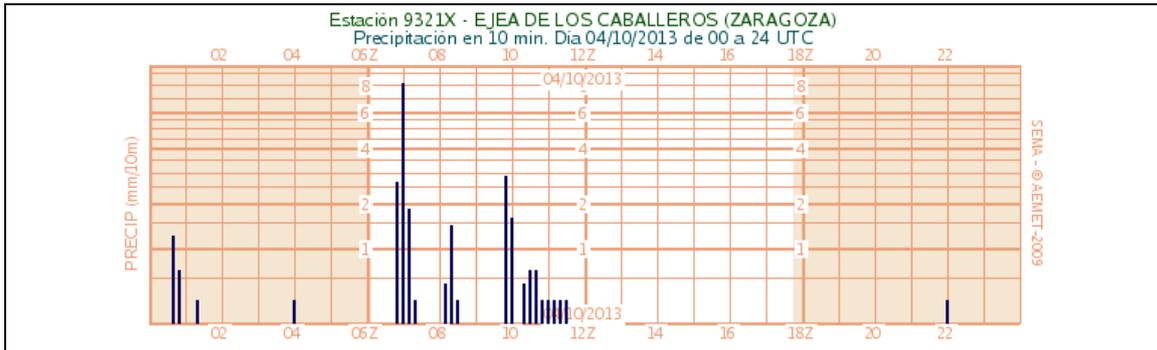


Figura 86. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Ejea de los Caballeros.

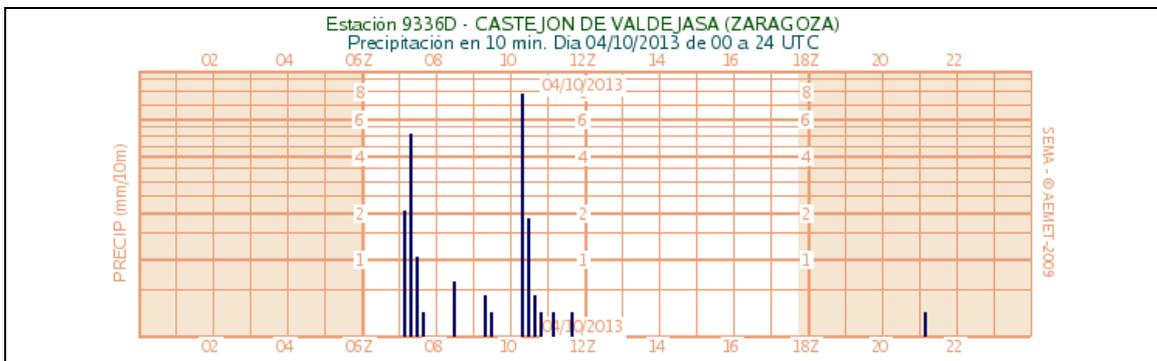


Figura 87. Gráfico de precipitación de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Castejón de Valdejasa.

En la tabla 2 se muestran datos de viento máximo y se observa que no se superaron los 80 km/h en ninguna estación. La dirección predominante en esta tabla es WSW, lo que está de acuerdo con el movimiento general de las estructuras. La hora de los valores máximos en Tudela (04:20 UTC) y Bardenas (04:40 UTC) coinciden con la de los máximos de precipitación en estas EMAS, que a su vez fueron los máximos totales. Aunque antes se ha visto que el paso de la segunda línea de turbonada, sobre las 05:00 UTC, no dejó apenas precipitación en Ejea y Castejón, sí que produjo las rachas máximas de viento en esas EMAS (56,2 km/h en Castejón y 38,5 km/h en Ejea).

Estación	V. max (km/h)	Dirección	Hora UTC
AERO. MONFLORITE (HUESCA)	59,0	303	11:20
BAILO.PUYLATO (HUESCA)	79,6	285	07:30
CASTEJON DE VALDEJASA (ZARAGOZA)	56,2	107	05:00
EJEA DE LOS CABALLEROS (ZARAGOZA)	38,5	245	05:00
TARAZONA (ZARAGOZA)	72,0	245	01:50
BARDENAS REALES (NAVARRA)	68,0	234	04:40
CADREITA (NAVARRA)	29,2	141	00:50
CASEDA. DEPÓSITO (NAVARRA)	52,6	185	03:10
TUDELA AUTOMATICA (NAVARRA)	44,6	252	04:20

Tabla 2. Valores de rachas máximas de viento en EMAS de Aemet del día 4 de octubre de 2013.

En las EMAS de Bardenas, Tudela, Bailo y Tarazona se observan gráficas consistentes con el paso de sistemas convectivos (figuras 88 a 91), con fuertes rachas de viento, en las que además se puede comprobar que los máximos de viento coinciden con los máximos de precipitación. Sin embargo, en los casos de Castejón de Valdejasa y Ejea de los Caballeros (figuras 92 y 93) el máximo de viento no coincide con un máximo de precipitación, se da incluso en ausencia de precipitación y con viento previo bastante uniforme en dirección y poco racheado. Castejón está bastante alejado de Biota, pero Ejea está a sólo 17 km del área donde se produjeron los mayores daños. En el momento de la racha máxima la dirección predominante vuelve a ser WSW. Estos datos son consistentes con el hecho de que a la hora a la cual en el área de Biota se estaban produciendo fuertes tormentas con precipitaciones intensas, granizo y vientos muy fuertes, en la localidad cercana de Ejea se produjeran estas rachas, sin precipitación asociada, relacionadas con la línea de turbonada que estaba afectando más de lleno a Biota.

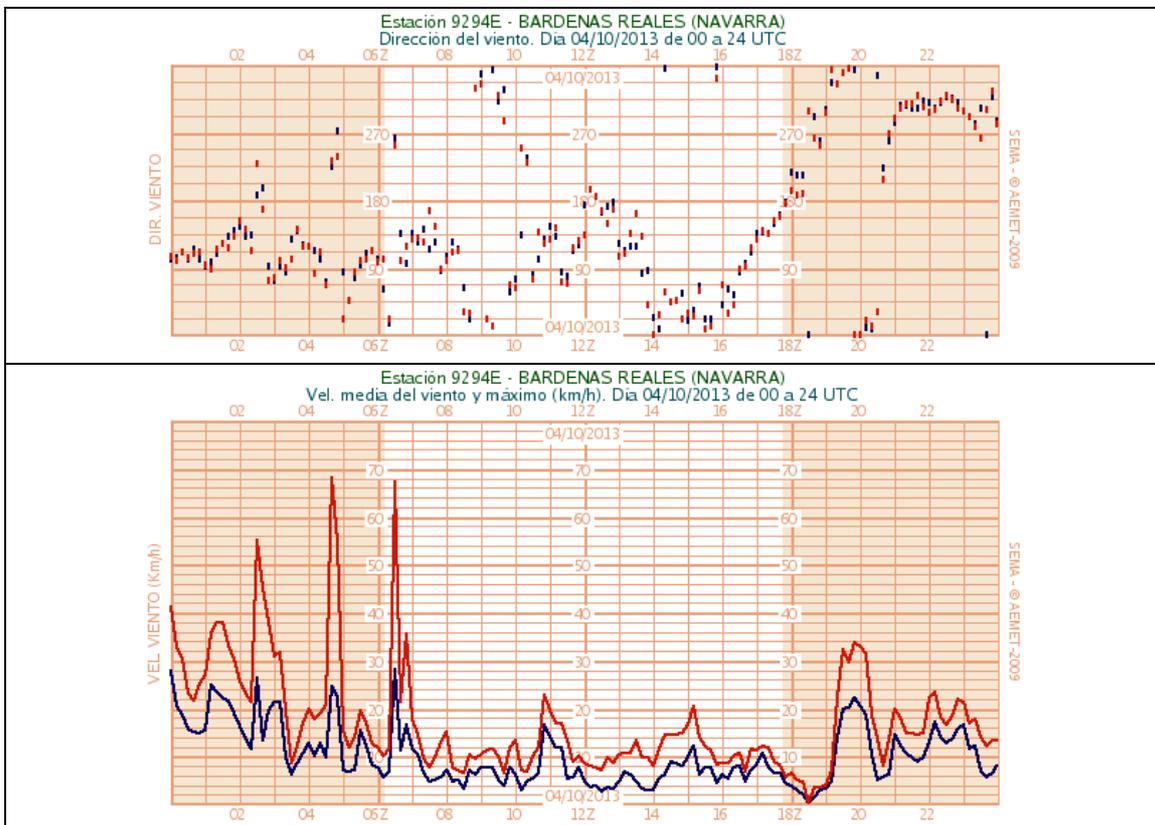


Figura 88. Gráficos de dirección (arriba) y velocidad media y rachas de viento (abajo) de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Bardenas Reales.

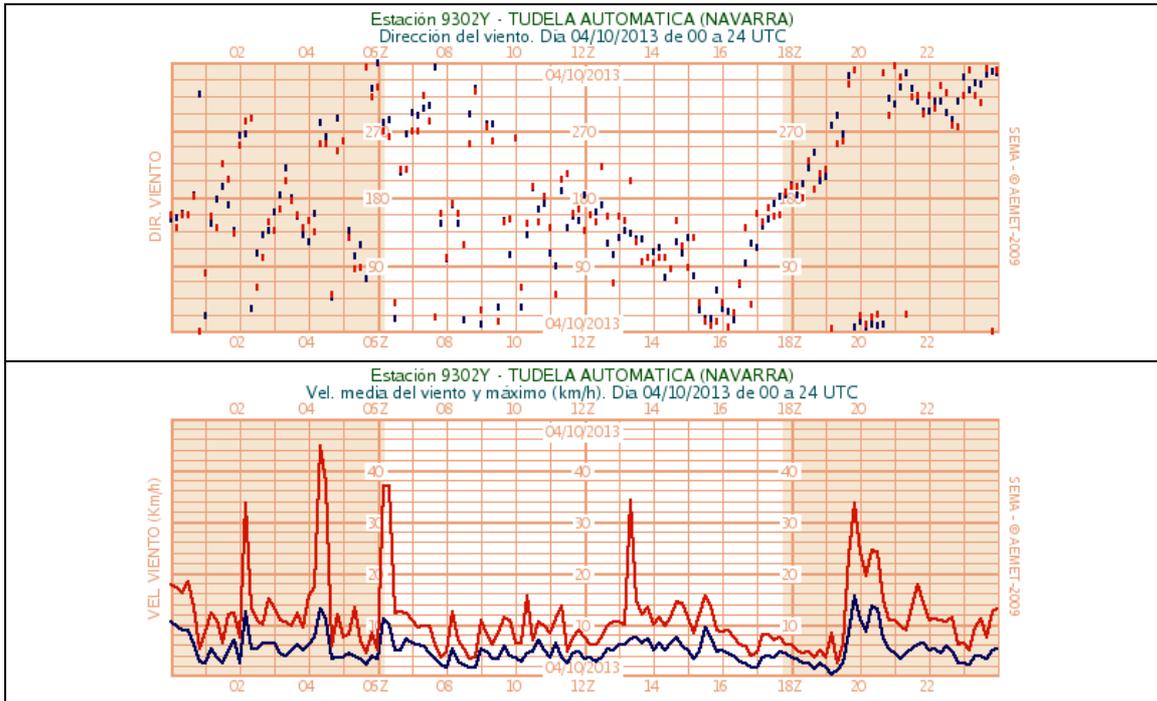


Figura 89. Gráficos de dirección (arriba) y velocidad media y rachas de viento (abajo) de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Tudela.

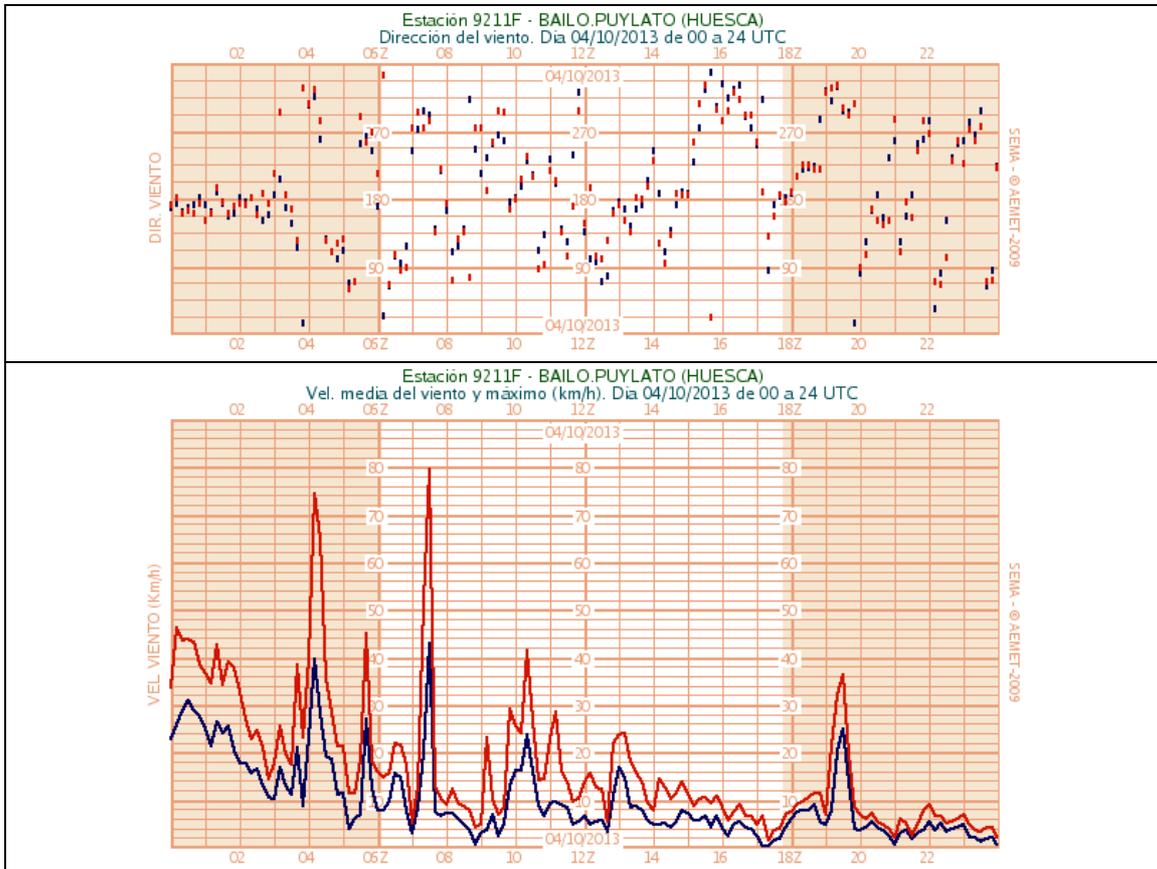


Figura 90. Gráficos de dirección (arriba) y velocidad media y rachas de viento (abajo) de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Bailo.

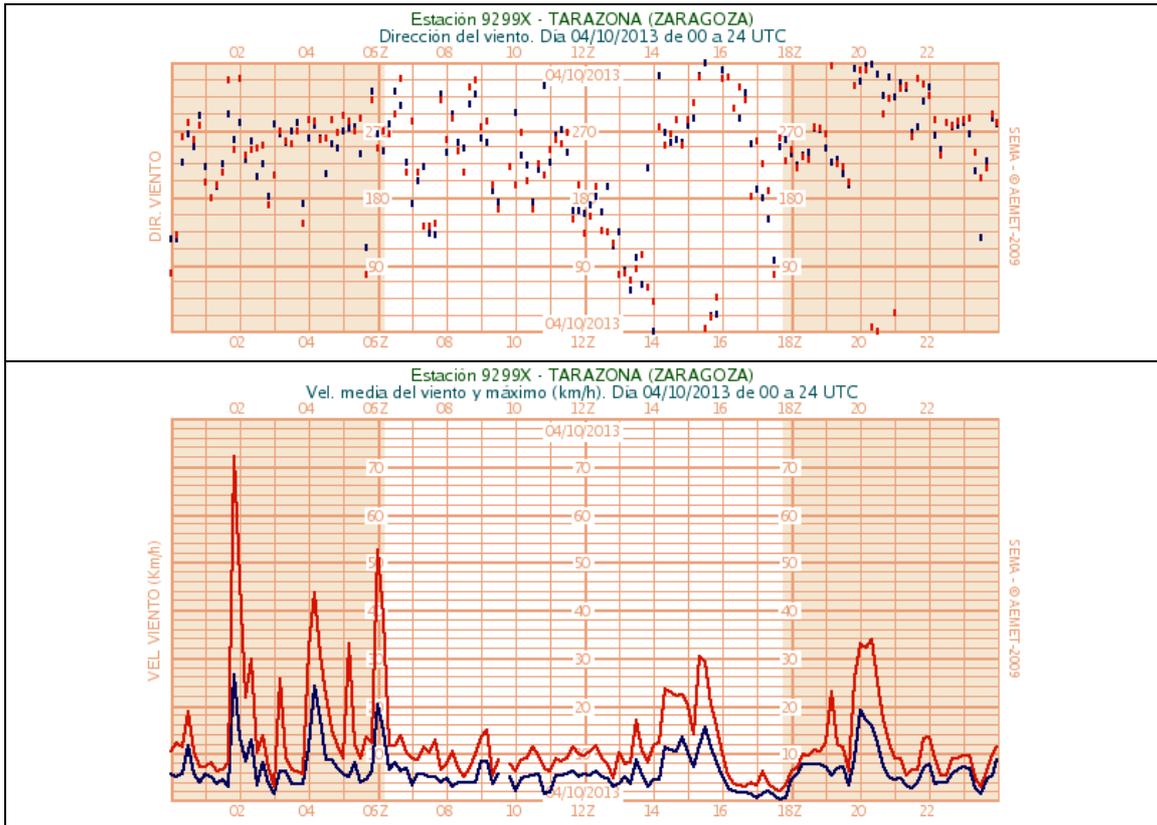


Figura 91. Gráficos de dirección (arriba) y velocidad media y rachas de viento (abajo) de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Tarazona.

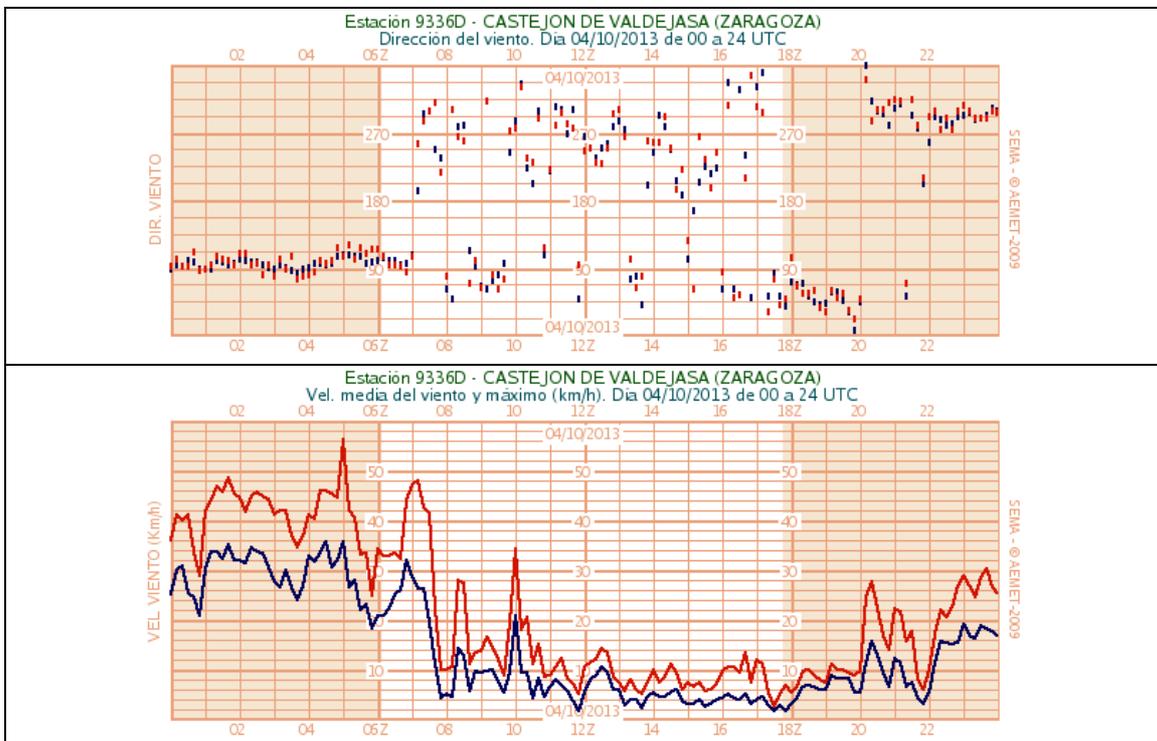


Figura 92. Gráficos de dirección (arriba) y velocidad media y rachas de viento (abajo) de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Castejón de Valdejasa.

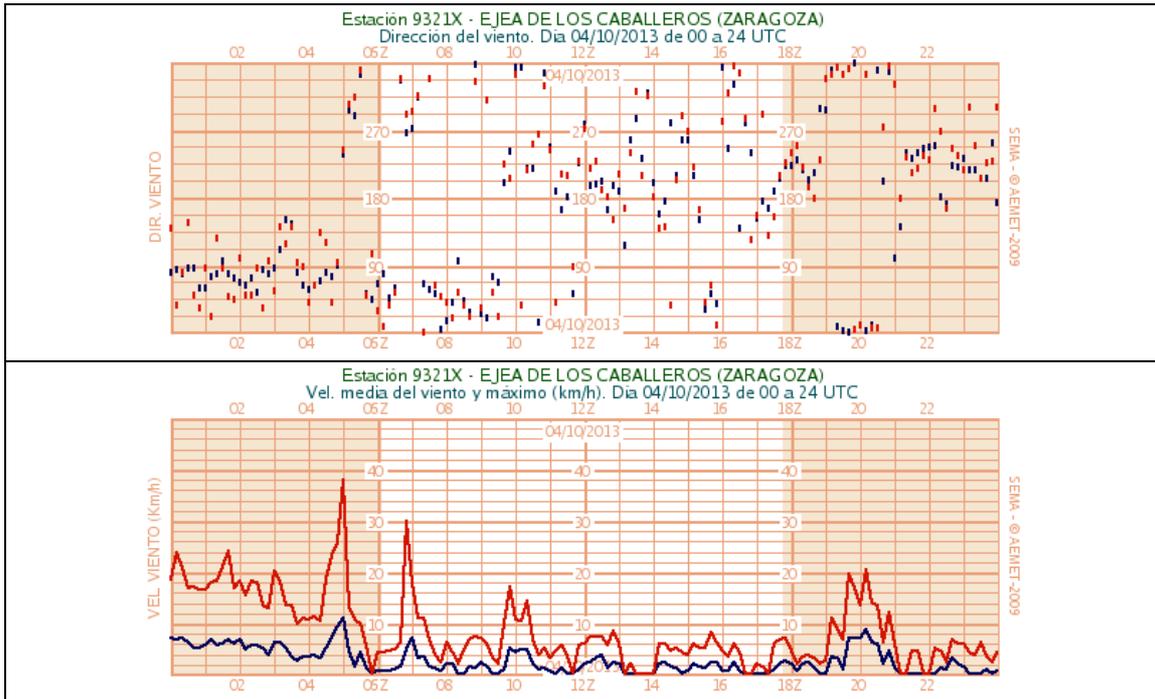


Figura 93. Gráficos de dirección (arriba) y velocidad media y rachas de viento (abajo) de 00 a 24 UTC del día 4 de octubre de 2013 en la EMA de Ejes de Los Caballeros.

6.2 Estaciones automáticas de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Se analizan también los datos de las estaciones automáticas de la Confederación Hidrográfica del Ebro (SAIH Ebro, figura 94 y tabla 3) cercanas a la zona de Sádaba y Biota. Estas estaciones sólo disponen de sensor de precipitación, no de viento. Los datos son consistentes con los aportados por las estaciones de Aemet, mostrando una línea de precipitaciones intensas que va desde Tudela hasta las cabeceras de los ríos Arba (Biel, Riguel, Luesia) pasando por Bardenas, Sádaba, Biota y Pinsoro.

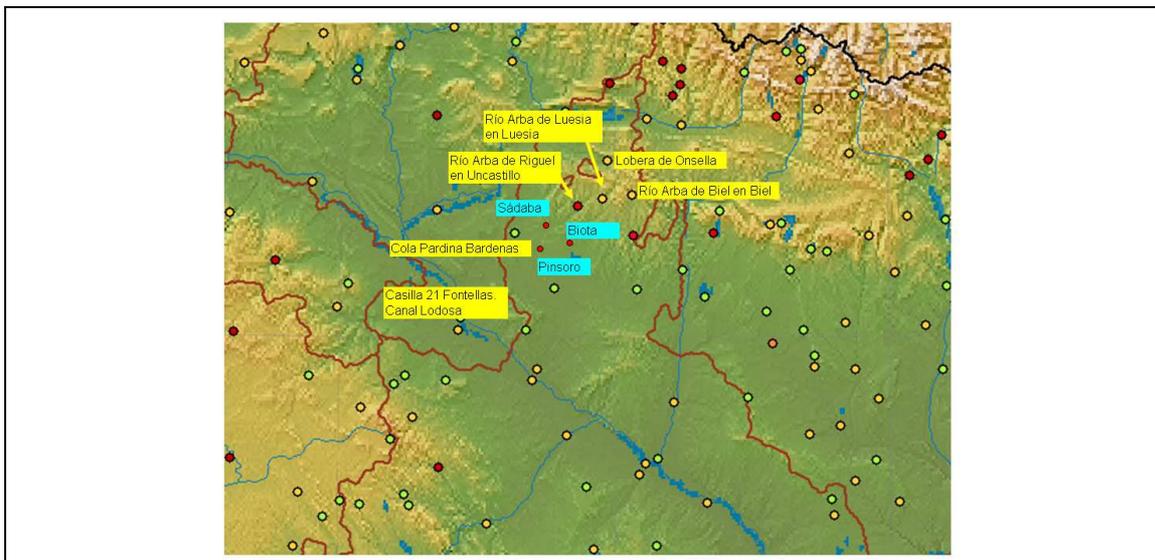


Figura 94. Situación de las estaciones automáticas de SAIH Ebro utilizadas en el estudio.

Estación	PCP en 12 horas		PCP en 1 hora	
	PCP	Hora final	PCP	Hora final
CASILLA 21 FONTELLAS. LODOSA, Canal (Navarra, C. H. ebr)	50,4	12:00	21,6	05:00
COLA PARDINA. BARDENAS, Canal (Zaragoza, C. H. ebr)	68,4	12:00	25,4	03:00
LOBERA DE ONSSELLA, Pluviómetro (Zaragoza, C. H. ebr)	73,6	12:00	30,0	04:00
RÍO ARBA DE RIGUEL EN BIEL, Aforo (Zaragoza, C. H. ebr)	47,4	12:00	19,8	06:00
RÍO ARBA DE LUESIA EN LUESIA, Aforo (Zaragoza, C. H. ebr)	72,2	12:00	43,2	06:00
RÍO ARBA DE RIGUEL EN UNCASTILLO, Aforo (Zaragoza, C. H. ebr)	80,0	12:00	29,2	04:00

Tabla 3. Valores de precipitación de estaciones automáticas SAIH Ebro del día 4 de octubre de 2013 (horas UTC).

En la tabla 4, precipitaciones horarias de la estación de Cola Pardina en Bardenas, muy cercana al área de interés, se aprecian también 3 máximos de precipitación (realzados en color naranja) que coinciden con el paso de las 3 líneas de turbonada ya mencionadas. En concreto, en la hora anterior a las 05 UTC se registraron 22,8 mm justo antes de que el sistema llegara a la zona de estudio.

COLA PARDINA. BARDENAS Precipitación en la hora previa, día 4 de octubre de 2013	
Hora UTC	Pcp (mm)
13:00	0.0
12:00	0.8
11:00	1.0
10:00	0.8
09:00	1.2
08:00	0.6
07:00	12.8
06:00	0.6
05:00	22.8
04:00	2.4
03:00	25.4
02:00	0.0
01:00	0.0

Tabla 4. Valores de precipitación horaria en Cola Pardina. Bardenas estación automática SAIH Ebro del día 4 de octubre de 2013.

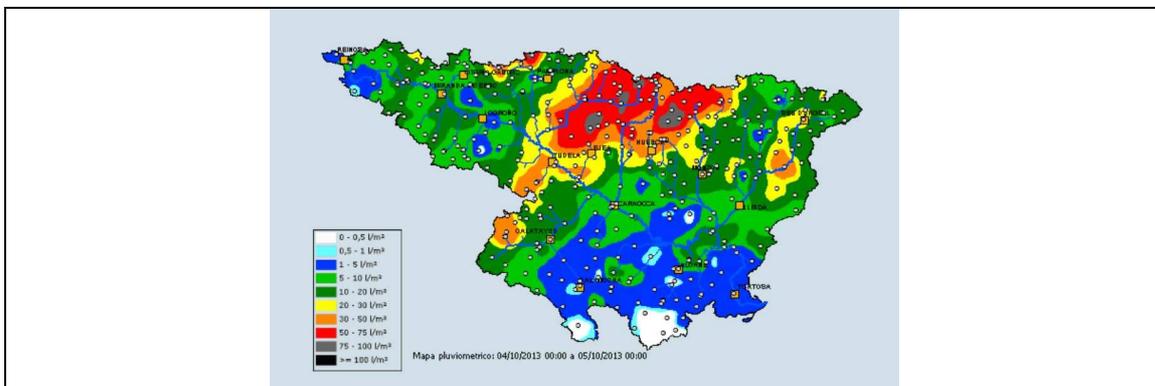


Figura 95. Precipitación acumulada en 24 horas del día 4-octubre-2013 (SAIH Ebro).

En la figura 95 se muestra un mapa con la precipitación acumulada en 24 horas, según datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Se puede ver que en el área de las Cinco Villas hubo un máximo de precipitación de entre 75 y 100 mm. En los mapas de precipitación horarias, figura 96, se aprecian los máximos parciales que coinciden con el paso de las sucesivas líneas de turbonada en dirección SW-NE así como el desplazamiento del sistema convectivo hacia el E a lo largo de la mañana.

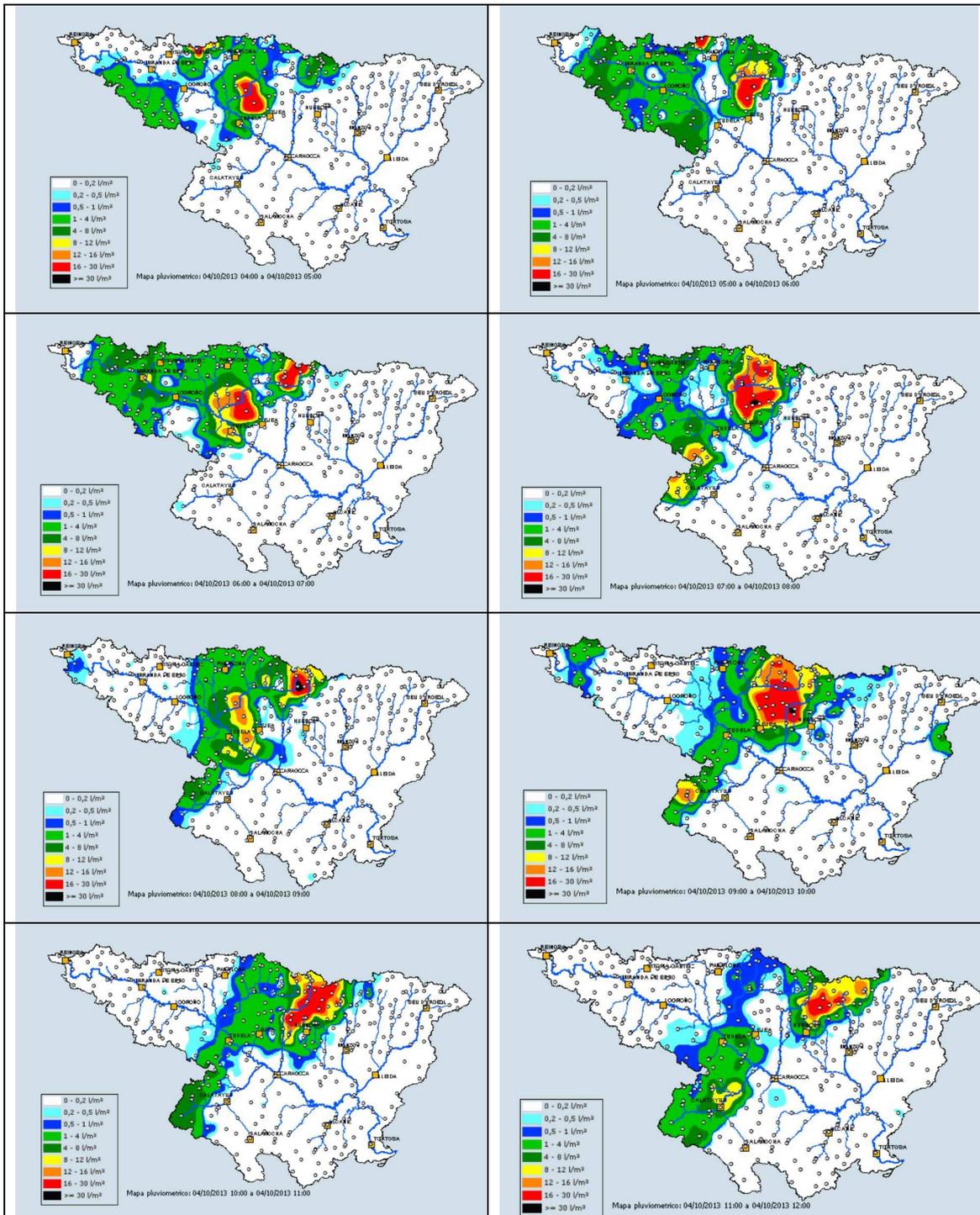


Figura 96. Precipitación acumulada en 1 hora el día 4 de octubre de 2013 a las 5, 6, 7, 8, 9,10, 11 y12 hora local, vistos de arriba abajo y de izquierda a derecha (SAIH Ebro).

6.3 Datos de la torre de viento de la estación fotovoltaica de la empresa IASOL.

Se han podido obtener y estudiar también algunos datos de viento, registrados en la estación fotovoltaica de Sádaba, que se han obtenido a través de la empresa IASOL S.L. La estación tiene varias torres con anemómetros, pero la empresa mencionada nos indicó que sólo disponían de datos de uno de ellos, y sólo se tenían los registros de fuerza y no de dirección del viento. Hubiese sido interesante disponer de todos esos datos para hacer un estudio calculando gradientes que expliquen partes de la planta menos afectadas que otras y posibles cambios de dirección asociados a un posible tornado. La planta fotovoltaica está situada (ver figura 4) en las coordenadas 42°15'56" N, 1°15'14" W y a una altitud de 485 m sobre el nivel del mar.

Estos datos consistían en dos series de rachas máximas de viento, una con 5 datos por minuto y otra con un dato por segundo. En las gráficas de las figuras 97 a 99 se puede ver que desde las 00 hora local del día 4 el viento muestra una intensidad uniforme que oscila entre 20 y 40 km/h mostrando un primer pico de intensidad entre 40 y 60 km/h en torno a las 05 hora local y un máximo de 176 km/h a las 06:55 hora local. Ambos máximos de viento van precedidos por un descenso brusco de la intensidad, casi hasta la calma. También se aprecia un descenso de la intensidad por debajo del viento medio después del máximo, más acusado en el caso del máximo principal. El máximo secundario de las 05:11 hora local puede corresponder al paso de la primera línea de turbonada que daba un máximo en la EMA de Bardenas a las 02:30 UTC. El máximo principal se corresponde claramente con el paso de la segunda línea de turbonada analizada en las gráficas de las EMAS de Aemet.

En las figuras 100 y 101 se muestran las intensidades máximas cada segundo, en 6 y 2 minutos en torno al máximo. Se aprecia el máximo principal de 176 km/h seguido inmediatamente de otro de 125 km/h. También se aprecia el descenso de la intensidad al final de este periodo de 6 minutos. La intensidad fue superior a 60 km/h durante un periodo de unos 2 minutos en torno al máximo principal.

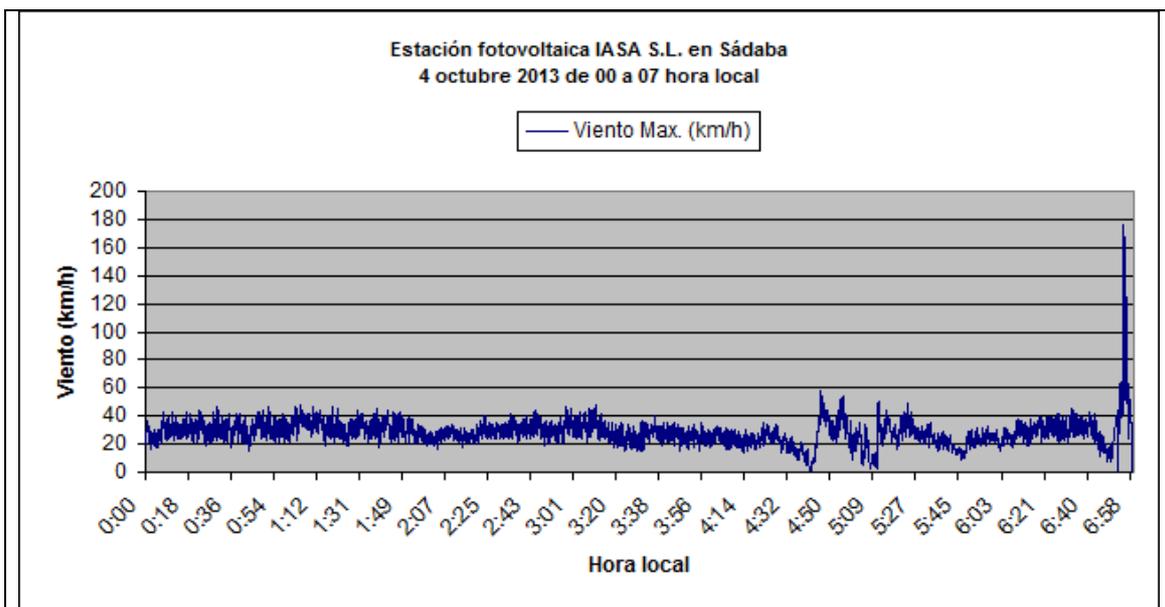


Figura 97. Intensidad de viento cada 12 segundos en la estación fotovoltaica de Sádaba entre las 00 y las 07 hora local del día 4 de octubre de 2013.

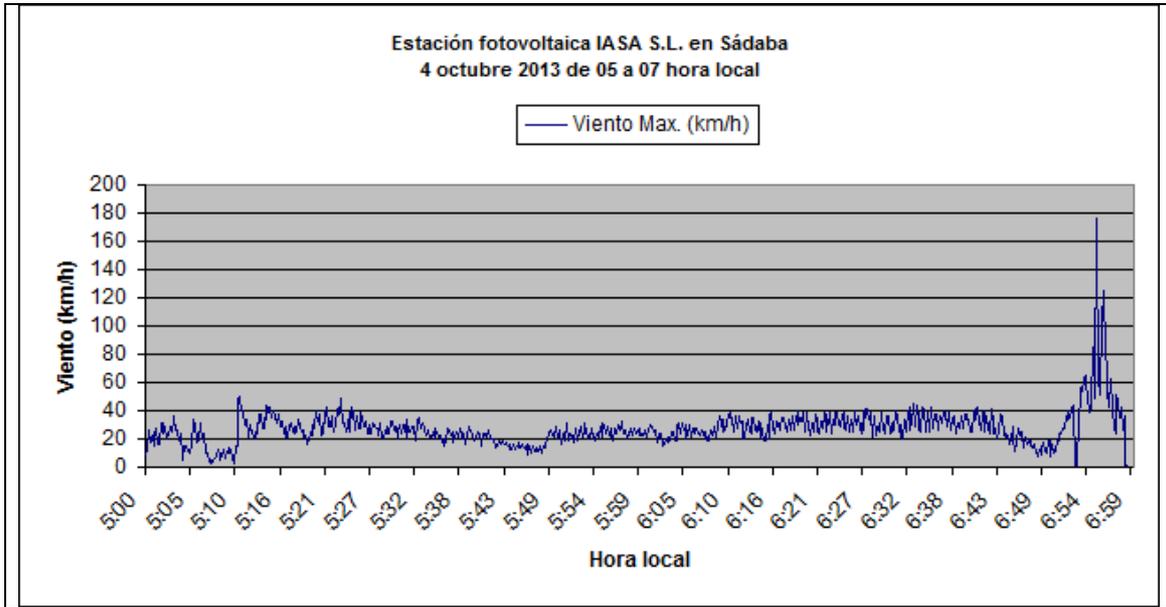


Figura 98. Intensidad de viento cada 12 segundos en la estación fotovoltaica de Sádaba entre las 05 y las 07 hora local del día 4 de octubre de 2013.

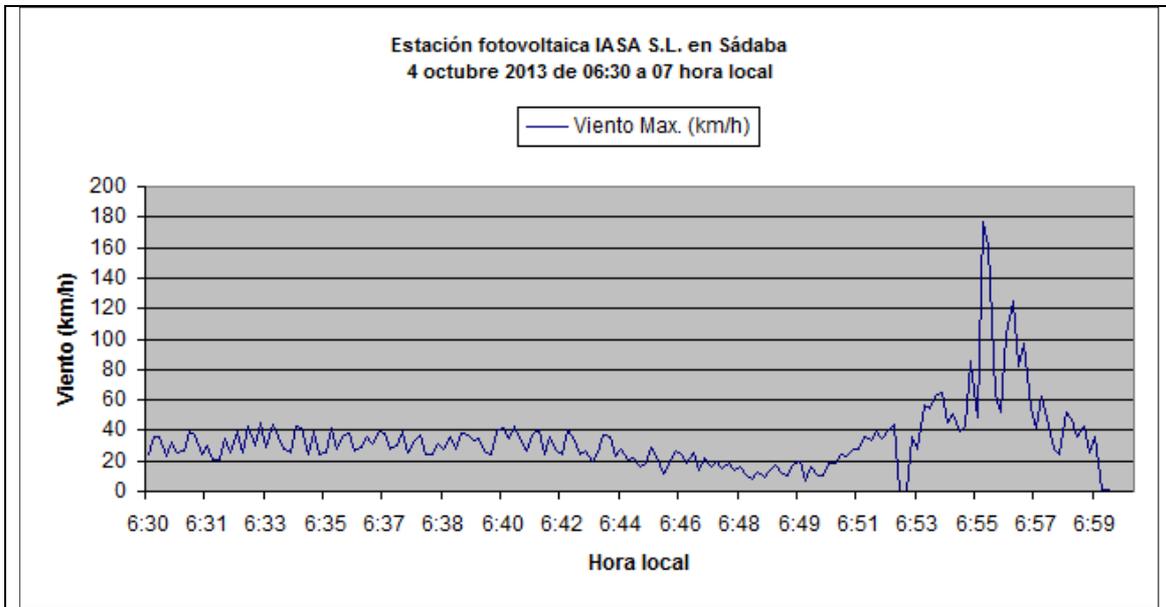


Figura 99. Intensidad de viento cada 12 segundos en la estación fotovoltaica de Sádaba entre las 06:30 y las 07 hora local del día 4 de octubre de 2013.

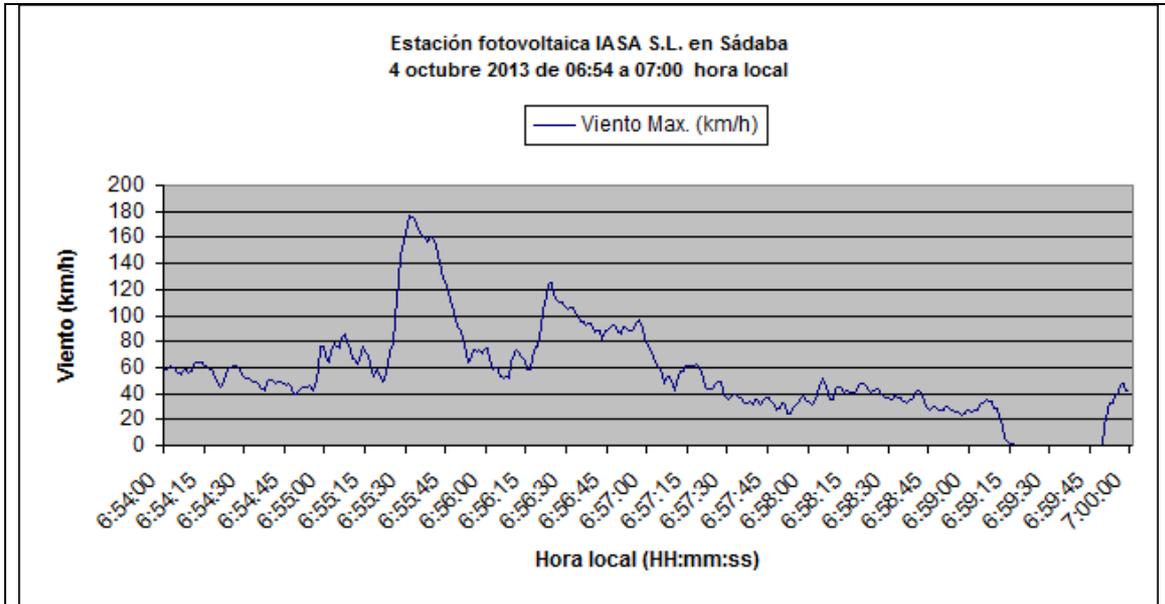


Figura 100. Intensidad de viento cada segundo en la estación fotovoltaica de Sádaba entre las 06:54 y las 07 hora local del día 4 de octubre de 2013.

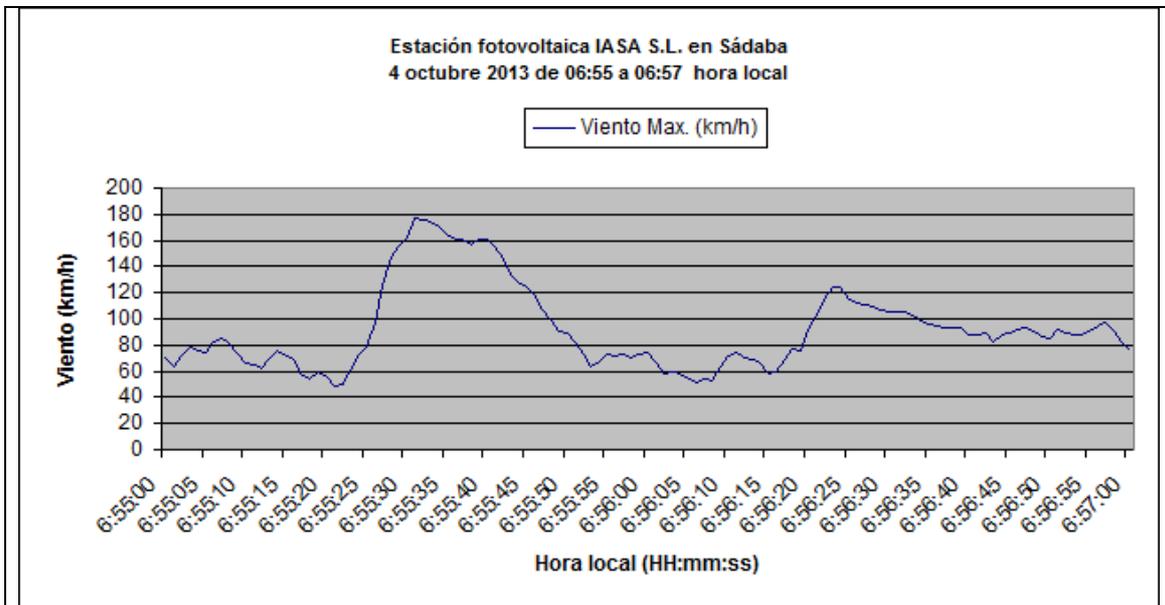


Figura 101. Intensidad de viento cada segundo en la estación fotovoltaica de Sádaba entre las 06:55 y las 06:57 hora local del día 4 de octubre de 2013.

7. VISITA DE CAMPO

El lunes 7 de octubre se realizó una visita a la zona con el objetivo de intentar analizar los daños e intentar encontrar evidencias directas o indirectas del fenómeno que se produjo. En la localidad de Biota el alcalde nos asignó a un alguacil del ayuntamiento que nos acompañó y nos mostró los lugares más afectados. Recorrimos el casco urbano de Biota, varias naves industriales y agrícolas diseminadas por el término municipal, el tramo de carretera paralelo a la línea eléctrica derribada y la planta fotovoltaica de Sádaba. Nos indicó que sobre las 7 de la mañana hora local del día 4 de octubre el cielo se oscureció completamente, que llovía intensamente, con abundante granizo y que había un ruido ensordecedor. En el momento de la visita las carreteras, caminos y calles ya estaban despejadas de restos de árboles y materiales, pero se podían apreciar montones de escombros y ramas todavía en los laterales.

Hay que hacer constar que la zona afectada es una llanura con muy poco arbolado por lo que es difícil identificar posibles direcciones preferentes del viento. En los momentos en que fue posible identificar alguna dirección (árbol caído, ventana afectada, torre eléctrica caída, etc.) ésta era de componente W o bien WSW, en ningún momento se identificó otra.

En las figuras 102 a 113 se ven algunas fotografías de los principales daños registrados en el término municipal de Biota durante esta visita.



Figura 102. Daños en Biota. Carteles caídos y ramas amontonadas.



Figura 103. Daños en Biota. En la visita al casco urbano vimos pájaros muertos por el granizo y nos dijeron que el día del fenómeno había cientos.



Figura 104. Daños en Biota. Árboles que no habían caído y que mostraban claramente la dirección W del viento.



Figura 105. Daños en Biota. Un gran árbol caído dentro de la piscina municipal, también caído hacia el E.



Figura 106. Daños en Biota. Ventanas orientadas al oeste arrasadas por el granizo.



Figura 107. Daños en Biota. Balcón de forja deformado (izquierda) por el impacto de tableros de madera que formaban parte de un escenario para un espectáculo de jotas y que quedó totalmente destruido (derecha).



Figura 108. Daños en Biota. Olivos arrasados por el granizo.



Figura 109. Daños en Biota. Árbol partido y derribado hacia el E.



Figura 110. Daños en Biota. Techo de una nave agrícola, arrancado por el viento.



Figura 111. Daños en Biota. Resto metálico del techo de una nave a gran distancia de la misma.



Figura 112. Daños en Biota. Pacas de paja de gran tamaño desplazadas a gran distancia hacia el E.



Figura 113. Daños en Biota. Campo de maíz arrasado.

Se visitó también la planta fotovoltaica de Sádaba. El alguacil de Biota nos señaló que la localidad de Sádaba no había sufrido daños. De hecho el extremo NW de la planta fotovoltaica, parte más cercana a Sádaba, era la menos afectada, con los paneles algo dañados pero no doblados o arrancados como en el resto de la planta. La mayor parte de los paneles estaban totalmente doblados sobre su poste y en muchos casos arrancados del mismo. En este sentido, D. Pedro Machín, de la empresa IASOL S.L., nos indicó en conversación telefónica que algunas parrillas, estructuras metálicas con varios paneles solares, de unos 9000 kg de peso habían sido arrancadas y lanzadas a más de 30 m de distancia. Las estructuras arrancadas siempre se habían desplazado hacia el E de su posición inicial. Finalmente se pudo ver un tramo de torres metálicas de más de 1 Km de longitud de una línea eléctrica doblados por la mitad y tumbados en dirección E. Todo lo que pudimos ver en esta visita de campo es consistente con la ocurrencia de vientos muy fuertes y huracanados.



Figura 114. Planta fotovoltaica cerca de Sádaba. Paneles solares derribados, deformados y arrancados.



Figura 115. Planta fotovoltaica cerca de Sádaba. Paneles solares derribados, deformados y arrancados.



Figura 116. Planta fotovoltaica cerca de Sádaba. Paneles solares derribados, deformados y arrancados.



Figura 117. Área entre Biota y Sádaba. Tramo de línea eléctrica caído.



Figura 118. Área entre Biota y Sádaba. Torre eléctrica doblada por la mitad y tumbada hacia el E.

8. CONCLUSIONES

- El análisis sinóptico y mesoescalar confirma que había un entorno favorable para la convección.
- El estudio de los índices de diagnóstico convectivo nos indica que en amplias zonas del E peninsular había una marcada inestabilidad y fuerte cizalladura vertical del viento. Este entorno preconvectivo es especialmente favorable para el desarrollo de convección profunda muy organizada.
- A partir del radiosondeo de Zaragoza, de datos de sondeos previstos de modelos numéricos (HIRLAM y ECMWF) para la zona y de los datos VAD del radar de Zaragoza, se observa que la cizalladura vertical del viento era especialmente intensa entre superficie y unos 2 Km de altura, es decir estaba confinada en niveles bajos de la atmósfera, lo cual suponía un entorno favorable al desarrollo de convección y a que ésta se organizase en líneas de turbonada y en bow-echos (ecos en arco).
- A través de las imágenes de satélite y de las imágenes de reflectividad del radar de Zaragoza se puede observar como la convección fue profunda, muy organizada, y como se formaron varias líneas de turbonada. Una de ellas es la que se desplazó desde el NE de Soria, E de La Rioja, E de Navarra hacia la zona de estudio, N de la Provincia de Zaragoza, y en concreto hacia las Cinco Villas.
- Esta zona, en especial el área entre las localidades de Sádaba, Biota y Pinsoro (perteneciente al municipio de Ejea de los Caballeros) fue afectada por esta estructura entre las 04:50 y 05:10 UTC. En esos momentos en las imágenes de reflectividad se aprecia la formación de una estructura tipo bow-echo, estructura convectiva especialmente adversa que suele llevar asociado un frente de racha con una especial intensificación de los vientos en superficie.
- Por otro lado, en las imágenes de viento radial del radar de Zaragoza se aprecian configuraciones significativas de viento que inicialmente, entre las 04:16 y 04:46 UTC parecen evidentes patrones que corresponden a la presencia del “Rear Inflow Jet” que condiciona la formación de un bow-echo, y posteriormente, en especial en la imagen de las 05:16 UTC son compatibles con la presencia de un mesociclón asociado a una posible supercélula.
- **Con todo esto, y a falta de más evidencias sobre el terreno, lo más probable es que los daños producidos en el área abarcada por los municipios antes mencionadas se hayan producido por un frente de racha muy intenso asociado a un tipo de estructura convectiva altamente organizada, un bow-echo (Eco en Arco), y no se descarta que asociado a este bow-echo, en su zona de giro ciclónico, se pudiese haber desarrollado una estructura de tipo supercelular que diese lugar a la formación de un tornado. Se puede informar, así mismo, que los vientos registrados en esta zona por los sensores de la planta fotovoltaica, con rachas de hasta 176 km/h (rachas huracanadas), son perfectamente compatibles y consistentes con fenómenos de este tipo, tanto con bow-echos, como con tornados de origen supercelular.**

9. BIBLIOGRAFÍA

- Amburn, S. A. and P. L. Wolf (1997): "VIL Density as a Hail Indicator". *Wea. and Forecasting*, 12, 473-478.
 - Buisán S.: "Episodio de actividad convectiva tormentosa intensa acaecido el 1 de septiembre de 2009 en la ciudad de Huesca", Agencia Estatal de Meteorología.
 - Burgess, D. W., and L. R. Lemon (1990): "Severe thunderstorm detection by radar". *Radar in Meteorology*, D. Atlas, Ed., American Meteorological Society, Boston, MA, 619-647.
 - Burgess, D. W. and L. R. Lemon (1991): "Characteristics of mesocyclones detected during a NEXRAD test". *Preprints, 25th Int. Conf. on Radar Meteorology*, Paris, France, Amer. Meteor. Soc., 39-42.
 - Burgess, D. W., R. L. Lee, S. S. Parker, S. J. Keighton, and D. L. Floyd (1995): "A Study of mini supercells observed by WSR-88D radars". *Preprints, 27th Conference on Radar Meteorology*, Vail, Colorado, American Meteorological Society.
 - Conesa A.: "Tornado de Valdealgorfa de 23 de julio de 2003", Instituto Nacional de Meteorología.
 - Conesa A.: "Tornado de Corbalán (Teruel) 28 de agosto de 2004" (estudio preliminar), Instituto Nacional de Meteorología.
 - Elizaga F. (1998): "Revisión del uso operativo de campos derivados en McIDAS". *Nota Técnica del STAP nº 30*. Instituto Nacional de Meteorología (octubre 1998):
 - Elizaga, F. y Martín, F.: "Uso de modelos numéricos para la predicción operativa de convección severa", Instituto Nacional de Meteorología.
 - Espejo F., Sanz R.: "El tornado del 28 de agosto de 1999 en la Sierra del Rayo (Teruel)", Instituto Nacional de Meteorología.
 - Greene, D.R. and R.A. Clark (1972): "Vertically integrated liquid: a new analysis tool". *Mon. Wea. Rev.*, 100. 548-552.
 - Kitzmiller, D.H. and J.P. Breidenbach (1995): "Detection of severe local storm phenomena by automated interpretation of radar and storm environment data". *NOAA Technical Memorandum NWS TDL 82*, National Weather Service, NOAA, US Department of Commerce, 33 pp.
 - Kitzmiller, D.H., M.E. Churma and M.T. Filiaggi (1995): "Severe local storm and large-hail probability algorithms in the System for Convection Analysis and Nowcasting (SCAN)". *Techniques Development Laboratory*, Silver Spring, Maryland.
 - Martín, F. et al (2001): "Diagnóstico y predicción de la convección profunda", *Nota Técnica STAP nº 35*, Instituto Nacional de Meteorología.
 - Martín, F. et al (2003): "Supercélula severa en el área mediterránea". *Nota Técnica STAP nº 37*, Instituto Nacional de Meteorología.
 - Markowski & Richardson (2010): "Meso-scale Meteorology in Midlatitudes". *Wiley-Blackwell*.
 - Módulos COMET: <https://www.meted.ucar.edu/loginForm.php> ("Principles of Convection I,II, III").
 - Moller, A. R., M. P. Foster, and G. R. Woodall (1994): "The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures". *Wea. Forecasting*, 9, 327-347.
 - Rasmussen, E. N. (2003): "Refined supercell and tornado forecast parameters". *Wea. Forecasting*, 18, 530-535
 - Requena R., Espejo F.: "Tornado del 30 de abril de 2007 en Arnedo (La Rioja)", Instituto Nacional de Meteorología.
-

- Rodríguez F. J. (2011): "Episodio de actividad convectiva con rachas de viento muy fuertes asociadas el día 6 de junio de 2011 en la zona de Tauste". Informe especial (D.T. de AEMET en Aragón).
 - San Ambrosio I. (2004): "Módulo para la estimación de granizo basado en datos radar". Nota Técnica STAP nº 44, Instituto Nacional de Meteorología.
 - Stewart, S.R. (1991): "The prediction of pulse-type thunderstorms gusts using Vertically Integrated Liquid Water Content (VIL) and the Cloud Top penetrative downdraft mechanism". NOAA Technical Memorandum NWS SR-136.
-