

Estudio meteorológico de la supercélula tornádica del 26 de agosto de 2019 en Campillos (Málaga)

Nota técnica 33 de AEMET

Carlos Jiménez Alonso
Carlos Manuel Jiménez Cavero
Carlos Perea Hitos
Jesús Riesco Martín



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología

Imagen de cubiertas:

Cortesía de Adrián Valencia (@ArchidonaMeteo)

26 de agosto de 2019 a las 21:09 horas.

Foto hecha desde Archidona mirando hacia el oeste. Rayo saliendo desde la parte alta de la nube, yunque o *updraft*, incidiendo en la Peña de los Enamorados de Antequera.

Estudio meteorológico de la supercélula tornádica del 26 de agosto de 2019 en Campillos (Málaga)

Nota técnica 33 de AEMET

Carlos Jiménez Alonso

Carlos Manuel Jiménez Cavero

Carlos Perea Hitos

Jesús Riesco Martín

cjimeneza@aemet.es, cjimenezc@aemet.es, cpereah@aemet.es, jriescom@aemet.es

Agencia Estatal de Meteorología



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología

RESUMEN:

Estudio meteorológico de un episodio tormentoso con características supercelulares y tornados asociados, ocurrido el 26 de agosto de 2019 en las cercanías de Campillos (Málaga).

PALABRAS CLAVE:

Campillos, Málaga, supercélula, tornado, tormenta.



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización


Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2020

Catálogo de Publicaciones de
la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-20-021-7
<https://doi.org/10.31978/666-20-021-7>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>

 @Aemet_Esp

 <https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

ÍNDICE

Página

1. INTRODUCCIÓN	5
2. ANÁLISIS SINÓPTICO Y MESOESCALAR	8
2.1. Análisis sinóptico	8
2.2. Análisis de masas de aire y entorno preconvectivo	10
2.3. Análisis mesoescalar	15
2.4. Análisis del entorno favorable a la formación de supercélulas	21
3. IMÁGENES DE SATÉLITE	28
3.1. Caracterización sinóptica	28
3.2. Caracterización mesoescalar	32
4. RADAR	38
4.1. Seguimiento de la convección en radar según distintos intervalos temporales	38
4.2. Resumen del seguimiento radar de la tormenta que afectó a Sierra de Yeguas y Campillos	51
4.3. Presencia tornádica	52
5. DESCARGAS ELÉCTRICAS	54
5.1. Introducción	54
5.2. Evolución temporal de las descargas eléctricas	57
5.3. Distribución espacial de las descargas eléctricas	59
5.4. Conclusiones	61
6. ESTUDIO DE CAMPO: DAÑOS TORNADOS, PRECIPITACIÓN Y GRANIZO	62
6.1. Tornados	62
6.2. Otros fenómenos registrados	66
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES	68
8. AGRADECIMIENTOS	71
9. REFERENCIAS	72

1. INTRODUCCIÓN

Durante la tarde del lunes 26 de agosto de 2019 se desarrollaron multitud de episodios tormentosos en todo el interior peninsular, algunos de ellos visualmente espectaculares. Gracias a la cantidad de meteoaficionados repartidos por toda la geografía peninsular, se dispone de una ingente cantidad de material gráfico, lo cual facilita un análisis más preciso de los hechos *a posteriori*. Entre los episodios más destacados, hubo varios reportes de presuntas supercélulas en las provincias de Albacete y Cuenca, granizadas en el sistema Central, precipitaciones súbitas de carácter torrencial en la comunidad de Madrid así como varios tornados avistados en el entorno de la localidad de Campillos, en el interior de la provincia de Málaga.

Esta nota técnica se centra en el último episodio citado, acaecido en Campillos, Málaga. Multitud de reportes, tanto en redes sociales como en medios de comunicación convencionales, mostraron varios eventos tornádicos que fueron fotografiados, e incluso filmados, con profusión de detalles, siendo todos ellos de gran espectacularidad. Varias instantáneas de las estructuras nubosas, tomadas desde localidades cercanas, sugieren, con alta probabilidad, que los tornados estaban asociados a un episodio tormentoso de carácter supercelular. El reporte tornádico de Campillos fue también incluido en Sinobas (<https://sinobas.aemet.es/index.php?pag=detal&rep=1301>).



Figura 1.1. Recortes de redes sociales y prensa digital.

En este trabajo se intenta, por un lado, poner de manifiesto las características meteorológicas imperantes y, por otro, caracterizar el episodio en sí mismo, así como mostrar una explicación plausible de lo acontecido. Se trata, sin duda, de un episodio poco habitual. No solo en cuanto al tipo de fenómeno meteorológico protagonista, el tornado, sino a la cantidad de ellos, hasta tres llegaron a visualizarse, siendo dos de ellos simultáneos, según se aprecia en algún vídeo. Otro hecho que le proporciona cierta singularidad al episodio es que los tornados estuvieron probablemente asociados a una supercélula. Las supercélulas no son muy habituales en el sur de la península ibérica, aunque ya en otras ocasiones se han observado tormentas altamente organizadas con características supercelulares; sobre todo en los últimos años, cuando casi toda persona en cualquier lugar dispone de un teléfono móvil con el que inmortalizar fenómenos atmosféricos sorprendentes.

A nivel geográfico, el entorno objeto de estudio constituye una frontera natural entre dos cuencas hidrográficas, como se puede ver en las figuras 1.2 y 1.3. Por un lado, al norte se halla el valle del río

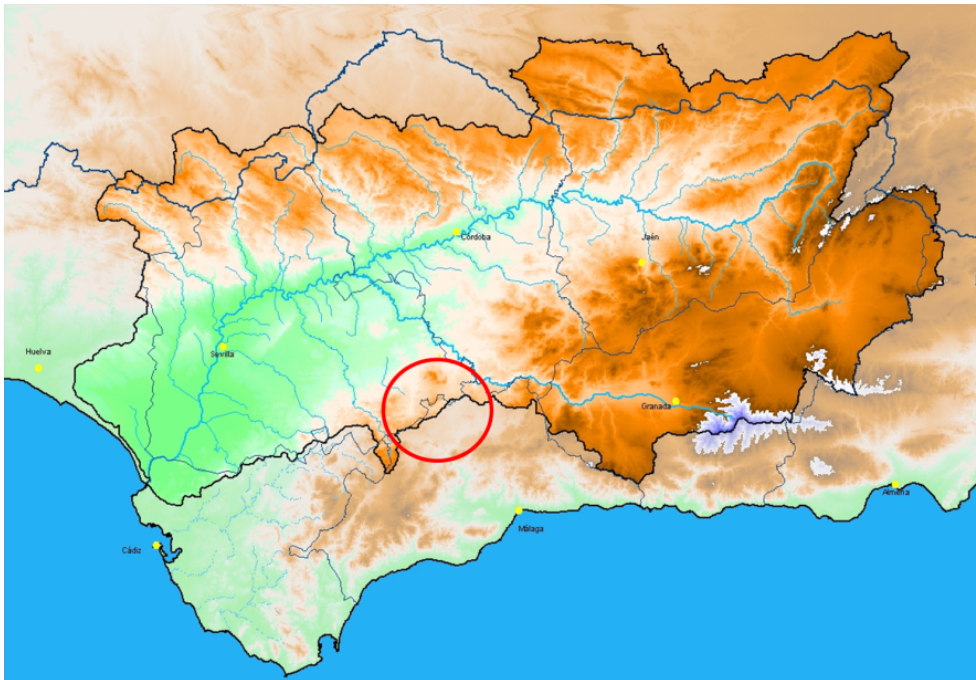


Figura 1.2. Mapa de Andalucía, con límites provinciales en gris, resaltando la cuenca hidrográfica del Guadalquivir en negro. Área de estudio rodeada en rojo.

Guadalquivir, y más concretamente la comarca de la sierra Sur de Sevilla. Por otro lado, hacia el sur tenemos el valle del río Guadalhorce, en su parte alta, atravesando la comarca de Antequera, en la provincia de Málaga.

Los fenómenos meteorológicos más destacados, y recordados, muchas veces tienen lugar en verdaderas fronteras geográficas; allí donde, por ejemplo, se juntan masas de aire de distintas características o se encuentran vientos de distinta intensidad y dirección. Es por ello, que la orografía casi siempre desempeña un papel importante, y en nuestro episodio no iba a ser menos, situado a caballo entre la vertiente atlántica y la vertiente mediterránea.

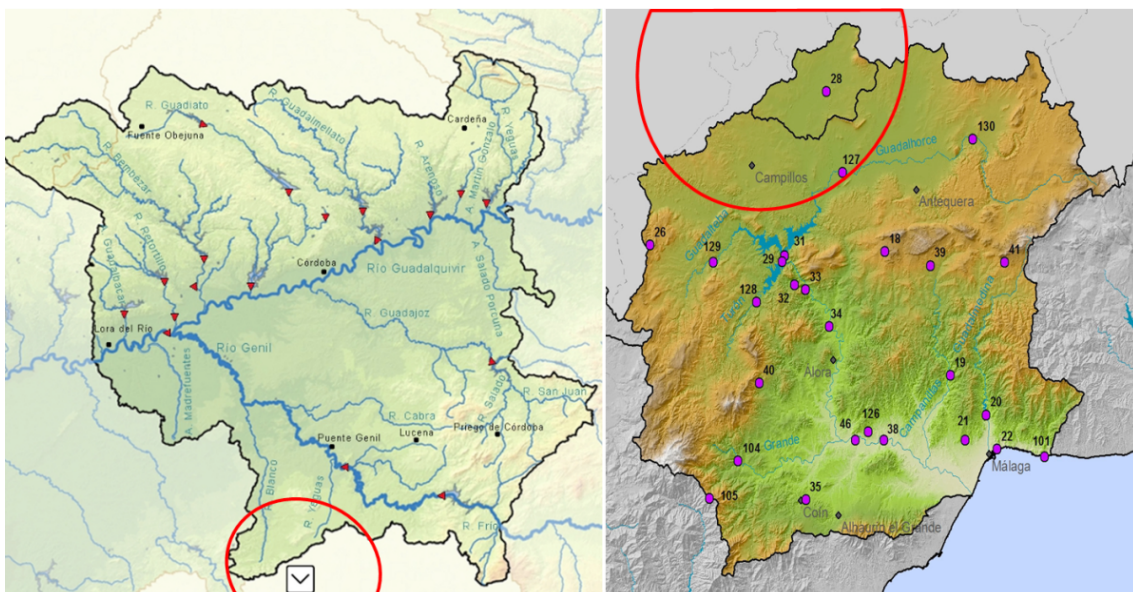


Figura 1.3. Detalles de la cuenca hidrográfica media del río Guadalquivir (izda.) y de la cuenca del río Guadalhorce (dcha.). Los semicírculos en rojo indican el área de estudio. Mapas a distinta escala.

En la zona de estudio, históricamente se han sucedido, de manera periódica, episodios meteorológicos de alto impacto. Tenemos, por ejemplo, las terribles inundaciones de La Roda de Andalucía y Casariche de junio de 1973, por el desbordamiento del río Yeguas a su paso por estas localidades sevillanas, a escasos kilómetros de Campillos, en las que hubo varios fallecidos e innumerables daños materiales. O el episodio de lluvias torrenciales registradas en el entorno de Campillos en 1969, en el que, según algunas fuentes, se registraron 210 mm. Por último, se puede citar también el reciente episodio de los días 20-21 de octubre de 2018, en el que la estación de AEMET ubicada en la cercana localidad de Antequera, registró 250 mm en 12 horas, con un máximo de 56 mm en 1 hora.

El término municipal de Campillos (véase figura 1.4) se halla encuadrado dentro de la gran unidad natural que son las cordilleras Béticas, situándose la mayor parte del término en la depresión de Antequera, una de las depresiones interiores que horadan longitudinalmente a estos sistemas montañosos. Conforme nos desplazamos hacia el oeste, las alturas se acrecientan, con pequeñas sierras, que forman parte de la zona externa de las Béticas, y que marcan el inicio del descenso hacia el valle del Guadalquivir. Desde un punto de vista hidrológico, y siendo muy precisos, el término municipal de Campillos pertenece a dos cuencas distintas, que vienen delimitadas por elevaciones sobre los 600 m. En su mayor parte, el municipio pertenece a la cuenca del río Guadalhorce, siendo una pequeña parte del noroeste del término municipal la que pertenece a la cuenca del río Guadalquivir, vertiendo sus aguas a la cabecera del río Yeguas (afluente del Genil), en la ladera sur de la sierra de los Caballos.

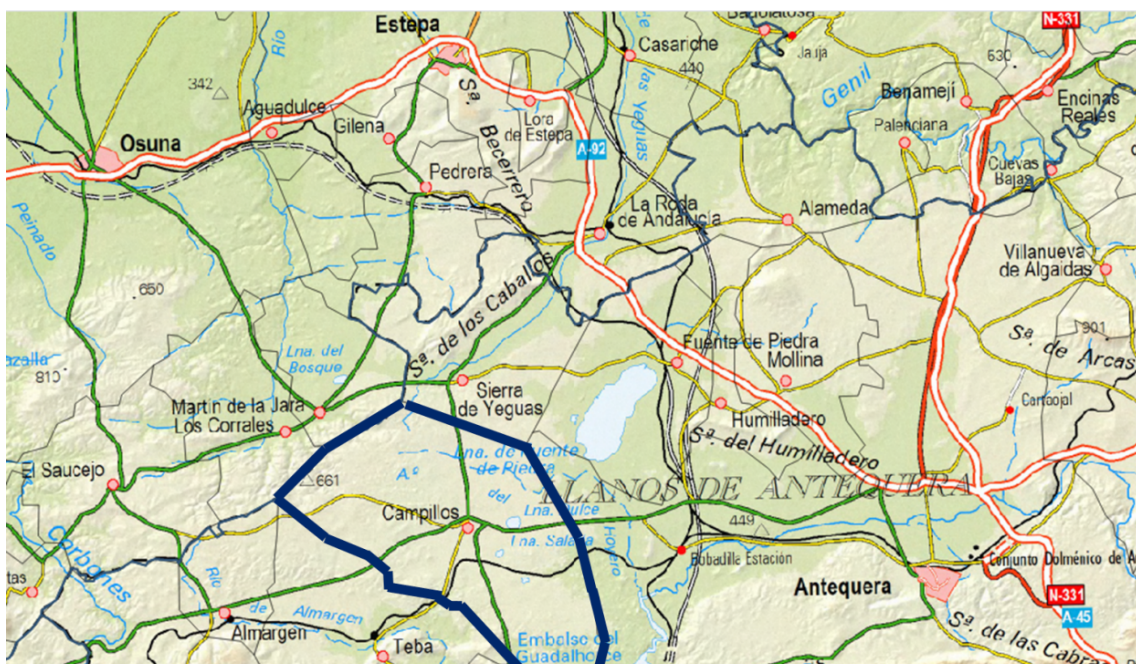


Figura 1.4. Mapa ráster del área de estudio. Límites geográficos de los términos municipales en gris suave, resaltando el término municipal de Campillos.

Con objeto de hacer lo más coherente posible el desarrollo del trabajo, este se ha estructurado en forma de capítulos. Comienza con la presente introducción, donde se expone el episodio de estudio, su situación geográfica y se describe la estructura del trabajo. En el capítulo segundo se realiza un estudio meteorológico del episodio; en primer lugar, mediante un análisis sinóptico y, posteriormente, desde un punto de vista mesoescalar. Los siguientes tres capítulos: imágenes de satélite, radar y rayos, tratan de caracterizar el episodio basándose en las citadas herramientas de teledetección. El capítulo sexto versa sobre un estudio de campo en el que se intentan determinar las trayectorias de los tres tornados, mostrándose los daños producidos sobre el terreno. Por último, el trabajo finaliza con los correspondientes capítulos de conclusiones, agradecimientos y referencias.

2. ANÁLISIS SINÓPTICO Y MESOESCALAR

2.1. ANÁLISIS SINÓPTICO

Durante el sábado 24 de agosto, una vaguada de gran amplitud comienza a descolgarse del régimen zonal predominante en el Atlántico Norte, cuyo extremo sur se aproxima a Galicia. Para el domingo 25, ya se ha elongado lo suficiente y se convierte en una dana (depresión aislada en niveles altos) con varios vórtices, centrada frente a las costas de Portugal. Posee un núcleo frío de -14 °C en 500 hPa y se halla forzada por un chorro trasero de 150 km/h en 300 hPa. Como contrapartida, sobre el este peninsular, y en niveles altos, tenemos flujo de SW, cuyo reflejo en niveles medios es la correspondiente dorsal. Disposición que favorece la entrada de una masa de aire de latitudes más bajas hacia el este peninsular, de carácter tropical, cálida y húmeda, que se desplaza hacia el norte atravesando el Mediterráneo occidental y alcanzando el sur de Francia.

Los mapas de la figura 2.1 muestran el marco sinóptico previsto por el modelo HRES-IFS para el lunes 26 de agosto a las 00 UTC (izquierda) y a las 12 UTC (derecha). En el primer par de imágenes vemos los mapas de análisis de viento y altura geopotencial en 300 hPa. A las 00 UTC se aprecia un máximo de viento rodeando el núcleo de la dana por su flanco sur que, 12 horas más tarde, parece tomar una dirección meridional, avanzando hacia el norte peninsular. Por otro lado, en el segundo y tercer par de mapas vemos el análisis de temperatura y altura geopotencial en 300 hPa y 500 hPa respectivamente. En ellos se observa que la dana se halla plenamente configurada, y comienza su desplazamiento hacia el este, adentrándose por el sur peninsular, con su núcleo sobre el Algarve portugués a las 12 UTC. Con esta configuración, el interior de la Península se sitúa en la zona delantera de la depresión en su flanco este, con un chorro difluente cuasi meridional de algo más de 140 km/h en 300 hPa, que se adentra desde el golfo de Cádiz hasta la zona norte del sistema Ibérico, atravesando Andalucía y la meseta sur. El flujo predominante en niveles medios y altos es, por tanto, de SW.

En la figura 2.2 se muestran las guías técnicas de diagnóstico en niveles medios (izquierda) y superficie (derecha) elaboradas por AEMET. En la guía de superficie vemos que la Península queda encuadrada entre una amplia región de bajas presiones centrada en el norte de África (favorecida por el fuerte calentamiento diurno en esta latitud) y una zona de altas presiones en el entorno de Francia. Esta configuración favorece la circulación de vientos de componente este en niveles bajos (figura 2.3), que aportan humedad del Mediterráneo. A las 12 UTC del lunes 26, tenemos bajas presiones relativas de 1012 hPa sobre el suroeste peninsular, con un fuerte contraste térmico y de humedad en 850 hPa, con valores de 20 °C en el interior este peninsular y de 12 °C sobre amplias zonas de Extremadura y Portugal.

Desde 850 hPa hasta superficie, la circulación es de vientos de levante en la vertiente mediterránea, como se observa en la figura 2.3, con convergencias a sotavento de los sistemas montañosos, en su vertiente atlántica. Por un lado, en el entorno del Guadalquivir, y por otro en el interior este de la meseta sur, actuando como mecanismos de disparo. El flujo de componente este en niveles bajos es moderado, ocasionalmente fuerte en los «portillos orográficos» de entrada al interior peninsular, como son la zona de Almansa (Albacete) para acceder a la meseta sur y el valle del Guadalhorce (Málaga) para acceder a la depresión del Guadalquivir.

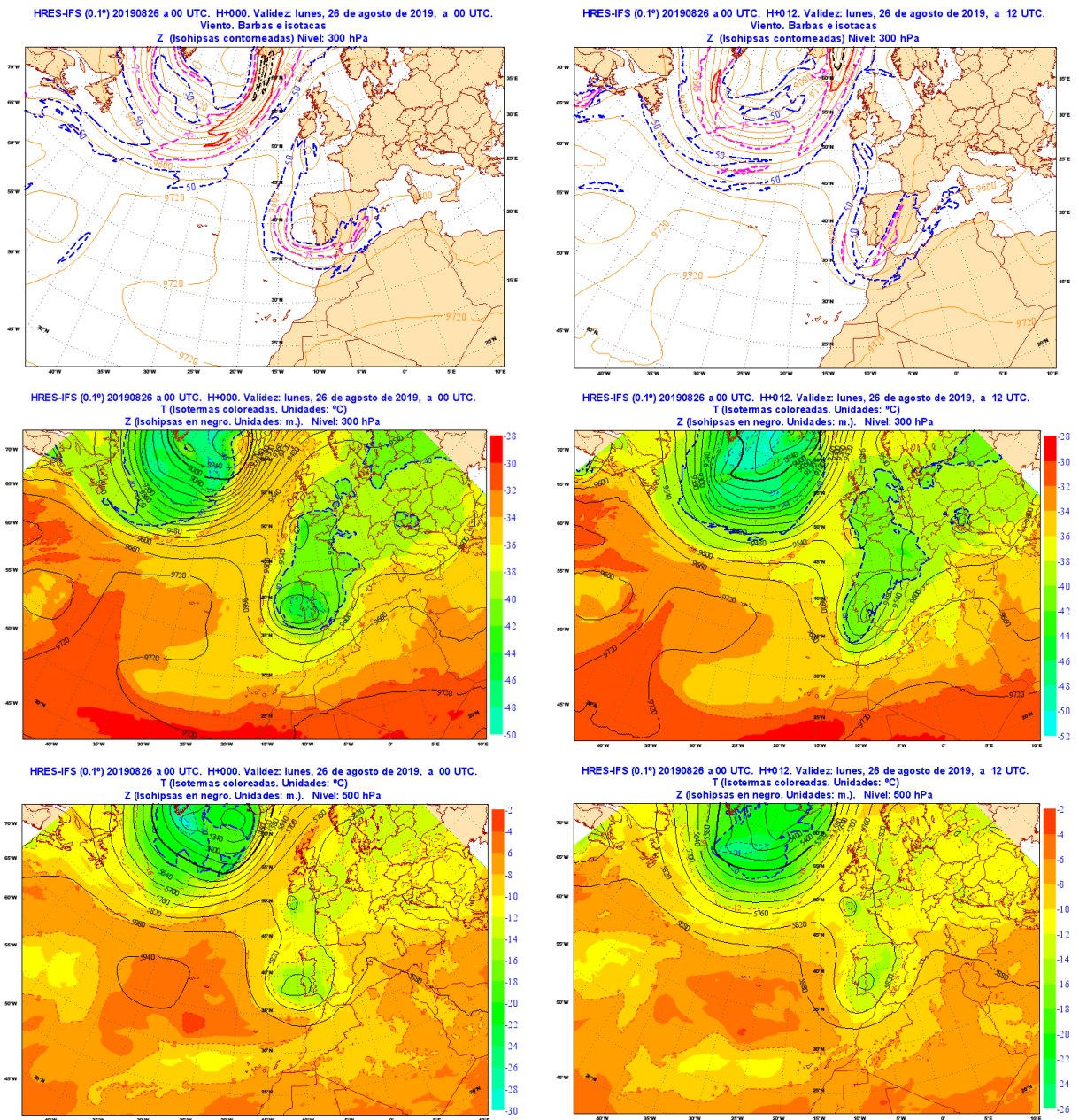


Figura 2.1. Análisis HRES-IFS a las 00 UTC (izquierda) y 12 UTC (derecha) del lunes 26 de agosto. De arriba a abajo: VZ en 300 hPa, TZ en 300 hPa y TZ en 500 hPa.

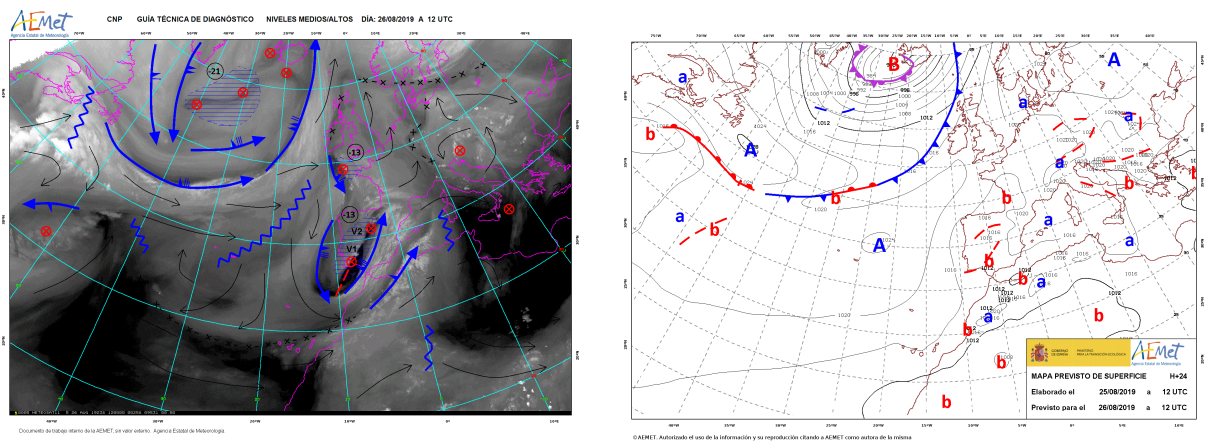


Figura 2.2. Guía técnica de diagnóstico de niveles medios/altos y niveles bajos del 26 de agosto 12 UTC.

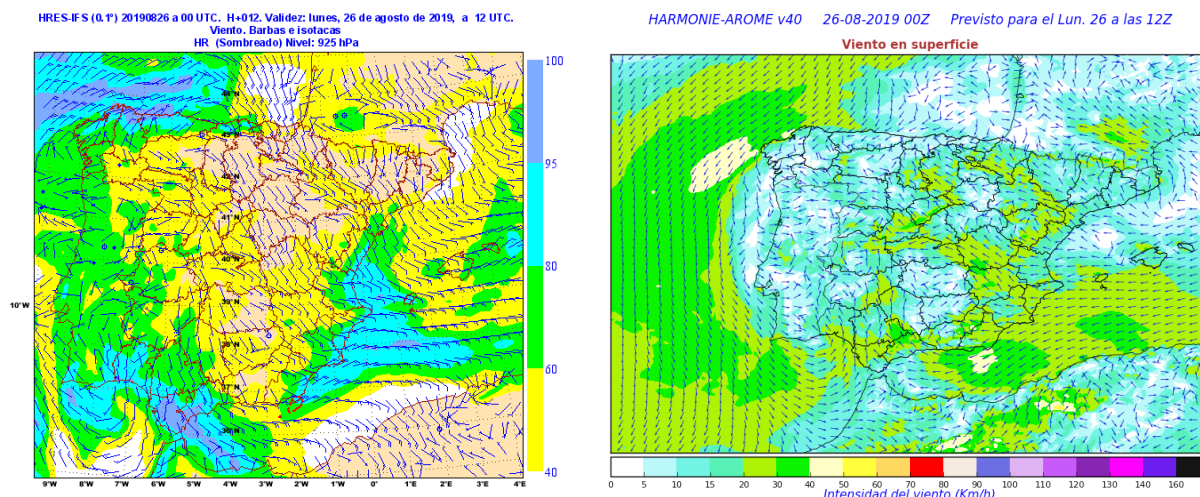


Figura 2.3. Izquierda: viento y HR en 925 hPa previsto por HRES-IFS para el lunes a las 12 UTC (pasada 00 UTC). Derecha: viento en superficie previsto por HARMONIE-AROME para el lunes a las 12 UTC (pasada 00 UTC).

Como podemos ver en el mapa de vorticidad potencial de la figura 2.4, a las 12 UTC existe un intenso forzamiento dinámico en el interior peninsular, asociado al flanco delantero de la vaguada, cuya disposición cuasi meridional lo incrementa, aún más si cabe. Asimismo, en el mapa de temperatura en 850 hPa de la misma figura, se aprecia el fuerte gradiente longitudinal de temperatura a ese nivel, entre la mitad este y la mitad oeste peninsular; por lo que existe una frontera muy bien definida de norte a sur, que divide dos masas de aire de distintas características (como se verá más adelante en este trabajo). Todo ello favorece la existencia de varias líneas de inestabilidad en el interior peninsular, como se indica en las guías técnicas de diagnóstico de la figura 2.2.

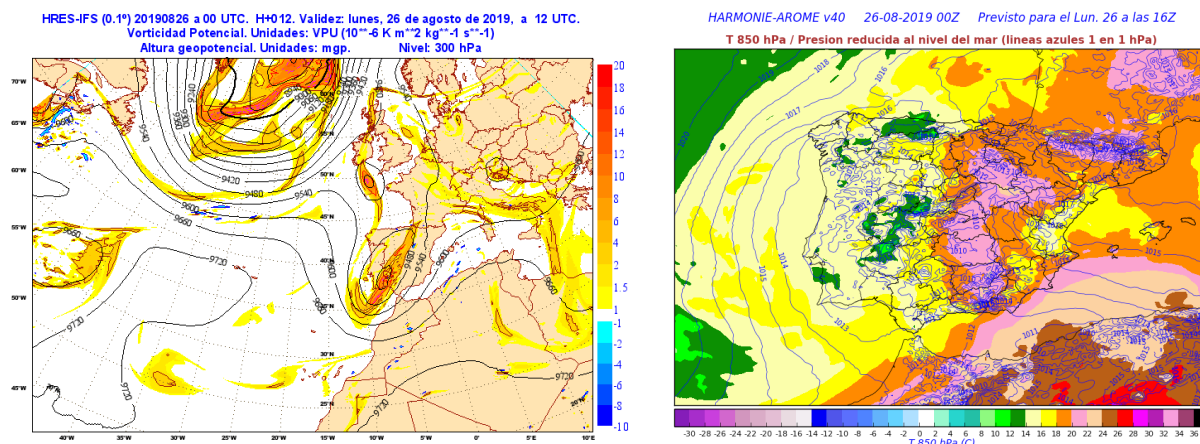


Figura 2.4. Izda.: Vorticidad potencial y altura geopotencial en 300 hPa previsto por HRES-IFS a las 12 UTC. Dcha.: T 850hPa y presión nivel del mar previsto por HARMONIE-AROME a las 16 UTC.

2.2. ANÁLISIS DE MASAS DE AIRE Y ENTORNO PRECONVECTIVO

Caracterizar las masas de aire que entran en juego es fundamental y ayuda a comprender el porqué de los episodios que tienen lugar. De especial importancia es diagnosticar las fronteras entre masas de aire, donde la convección organizada puede prosperar con mayor facilidad. Para ello, se van a mostrar varias herramientas que ayudan a su diagnóstico y pronóstico, como son las imágenes de vapor de agua,

los sondeos, las imágenes RGB y los productos de agua precipitable por niveles del SAF de NWC (véase también el capítulo 3 de este trabajo).

Las imágenes de vapor de agua WV6.2 nos dan información, principalmente, de niveles altos; mientras que el canal WV7.3 aporta información de niveles medios. Las bandas oscuras están asociadas con ambientes secos, zonas de deformación y máximos de viento, conformando verdaderas fronteras de masas de aire. Favorecen entornos con fuerte cizalladura vertical, difluencia en niveles altos y elevada vorticidad potencial. En suma, ingredientes que aportan forzamiento dinámico y favorecen la organización de la convección, en caso de que esta se inicie. Normalmente, también están asociadas a incursiones de aire subsidente estratosférico, extremadamente seco (como se deduce de las imágenes de vapor de agua con realce de nuestro caso).

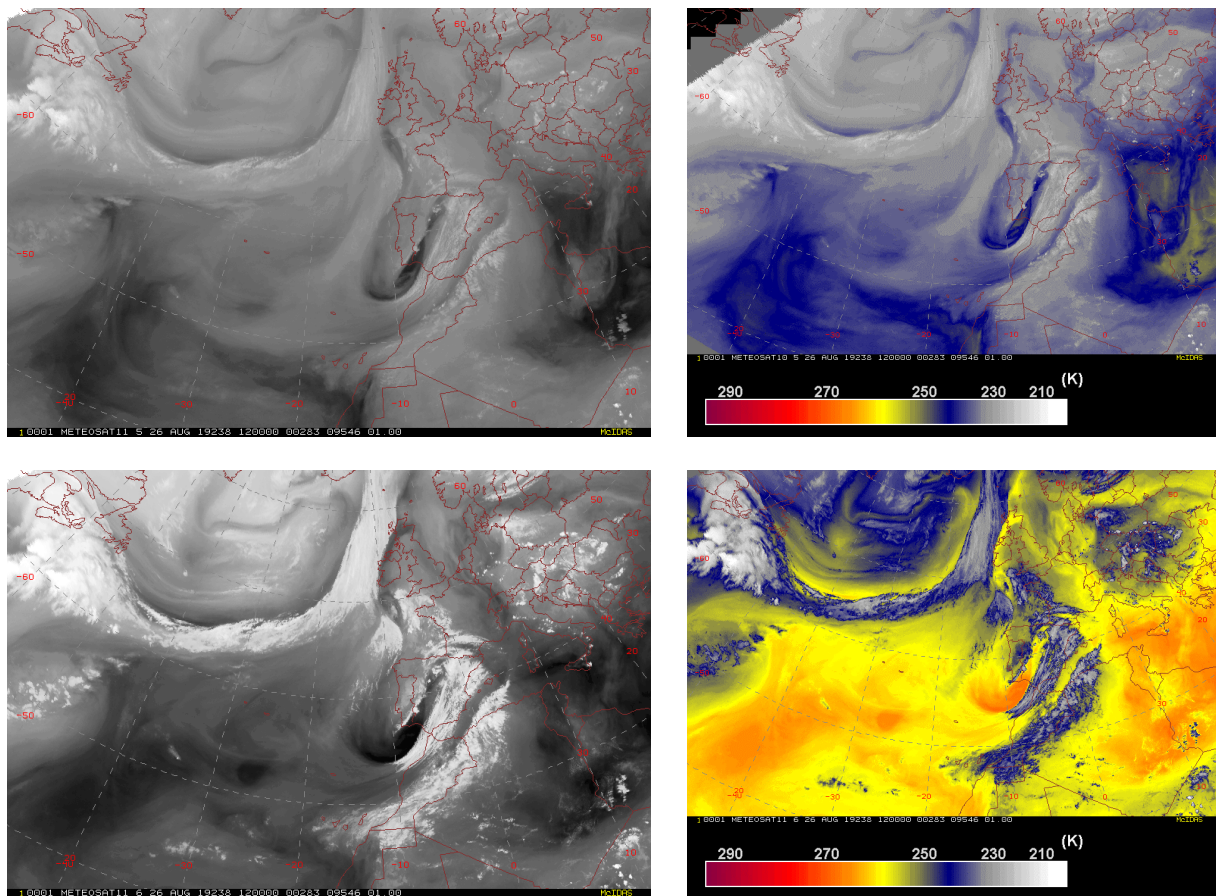


Figura 2.5. Imágenes de vapor de agua del 26 de agosto a las 12 UTC. Canales WV6.2 (arriba) y WV7.3 (abajo). A la derecha se muestran sendos canales con realce.

En la figura 2.5 se muestran las imágenes de WV6.2 y WV7.3 pura (izquierda) y con realce (derecha), del 26 de agosto a las 12 UTC. Se aprecia una banda oscura, penetrando desde el golfo de Cádiz hasta el golfo de Vizcaya, asociada al flanco delantero de la dana. Tenemos, por tanto, un ambiente seco en niveles altos, coincidente con el máximo de viento en altura (80 kt en 300 hPa), en la frontera entre la masa de aire de origen polar de la dana y la masa de aire de origen tropical del este peninsular.

El modelo conceptual de «*pluma de vapor de agua*» puede ser útil para analizar la situación. Las *plumas de vapor de agua* se definen como irrupciones de masas húmedas en capas medias y altas a escala global, que tienen apariencia de pluma en las imágenes de vapor de agua. Una pluma es, por tanto, una banda relativamente brillante separada por dos bandas oscuras (máximos de viento) que

adopta forma de «S», y surge en situaciones de desplazamiento de masas de aire tropicales hacia latitudes más altas, caracterizada por un máximo relativo de agua precipitable (como se verá en el capítulo 3 de este trabajo, en el que se analizan en detalle las imágenes de satélite). Normalmente, están asociadas a episodios de profundización de vaguadas y reforzamiento de dorsales. En nuestro caso, podemos apreciar la *pluma* presente desde las islas Canarias hasta el sur de Francia, en las figuras 2.5 y 2.6. Al oeste de la pluma, tenemos la banda seca anteriormente comentada, donde emergen focos blancos muy brillantes a las 12 UTC, asociados a la convección incipiente. Más al este de la pluma se observa una estructura nubosa también muy brillante, que cruza el norte de África y se adentra en el Mediterráneo, asociada a un flujo a gran escala de origen tropical, con nubosidad estriada perpendicular, que indica la posible presencia de ondas de gravedad viajando en su seno.

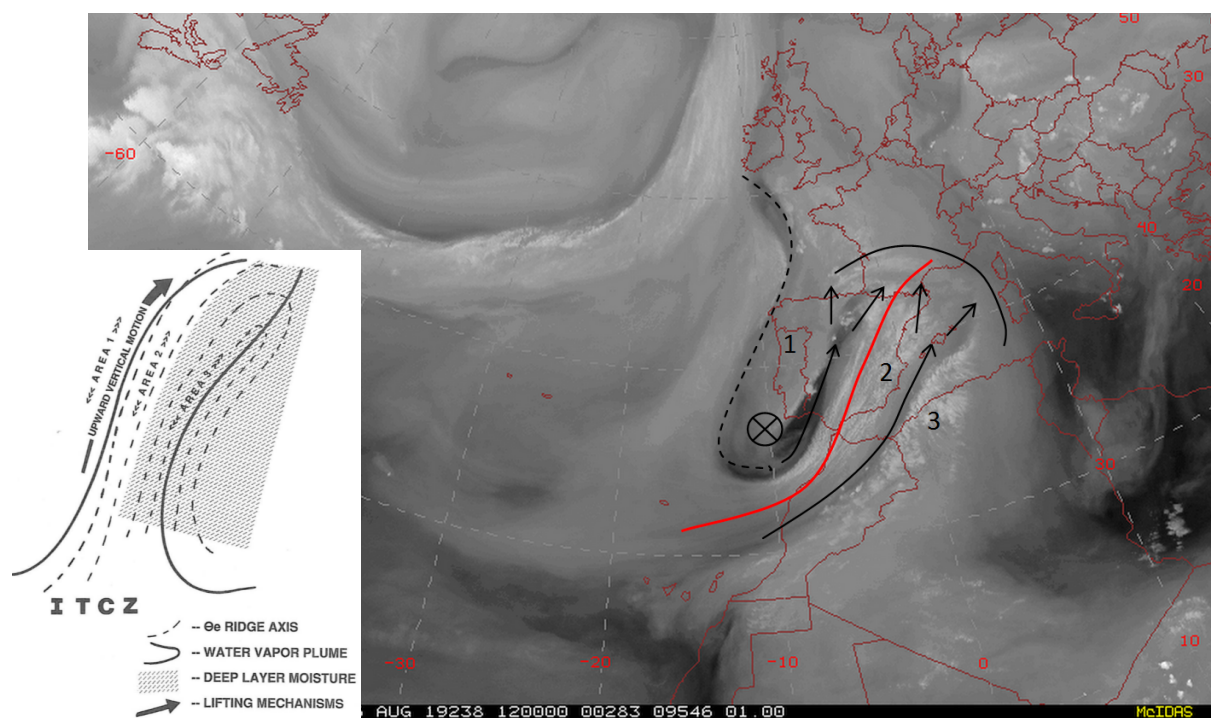


Figura 2.6. Imagen de vapor de agua WV6.2 - 12 UTC. Línea discontinua negra: línea de deformación.

Flechas negras: máximos de viento, con difluencia hacia el noreste peninsular. Aspa negra: vórtice.

Línea roja: pluma de vapor de agua, al oeste masa polar (1), el este masa tropical (2), más al este banda nubosa estriada asociada a flujo tropical (3). Al norte del punto de inflexión de la pluma tenemos difluencia en niveles altos.

Abajo a la izquierda: modelo conceptual de pluma de vapor de agua. (THIAO, W., SCOFIELD, R. A. y ROBINSON, J., 1993).

La identificación de plumas en las imágenes de vapor de agua en la península ibérica está relacionada con un gran número de situaciones meteorológicas adversas, especialmente de convección organizada, con todo tipo de organización: SCM, supercélulas, organización en línea o multicelular, etc. (CANO, D., 2007).

Debido a que las *plumas de vapor de agua* se desplazan hacia el noreste, a menudo se hallan alineadas con ejes de dorsal de temperatura potencial equivalente en niveles bajos, y mecanismos de forzamiento dinámico en niveles altos (máximos de viento, centros de vorticidad, etc.). Está contrastado que las *plumas de vapor de agua* y su interacción con los ejes de dorsal de temperatura potencial equivalente en niveles bajos son precursores de episodios convectivos organizados.

A continuación se intenta desarrollar, y aplicar de forma práctica, el modelo conceptual de *pluma de vapor de agua* a nuestro episodio de estudio (figura 2.6). Para ello, principalmente se hace uso de las

imágenes de vapor de agua WV6.2 sobre las que se superponen isóneas de temperatura potencial equivalente en niveles medios/bajos (*iso theta-e*), por ejemplo en 700 hPa (figura 2.7). Valores altos de temperatura potencial equivalente en niveles bajos son características de masas húmedas y/o cálidas, y por tanto representan regiones favorables para que se inicie la convección. El modelo conceptual empleado nos indica que la *pluma de vapor de agua* se sitúa en el extremo oeste de una dorsal subtropical en altura (o extremo este de la vaguada polar) y también en la zona de llegada de aire húmedo e inestable en niveles bajos, procedente de latitudes subtropicales. Por tanto, la pluma y el aire húmedo e inestable están prácticamente alineados. El modelo conceptual de la figura 2.6 muestra la *pluma* con líneas negras continuas, el eje de dorsal de temperatura potencial equivalente con líneas negras discontinuas y una zona sombreada en gris asociada a una capa húmeda y profunda.

En nuestro episodio, la *pluma* se extendía desde la zona subtropical de las islas Canarias hacia el nordeste, penetrando en Europa y alcanzando el sur de Francia, donde se observa flujo difluente. En el interior de la península ibérica se aprecia un ligero cambio de curvatura de la *pluma* de carácter ciclónico a anticiclónico (figura 2.6). Es, por tanto, en la parte norte de la *pluma*, coincidiendo aproximadamente con el punto de inflexión, donde el forzamiento de niveles bajos (advección cálida y eje de dorsal de *iso theta-e*) se acopla con el forzamiento de niveles altos (máximo de viento), creando las condiciones propicias para convección organizada. En la figura 2.7 se puede apreciar que la dorsal de temperatura potencial equivalente en niveles medios/bajos (700 hPa) penetra en la *pluma* en el interior de la península ibérica. Vemos que la *iso theta-e* de 52 °C se adentra hasta la submeseta sur, mientras que al oeste de la pluma, en el extremo occidental de Andalucía, tenemos valores de 40 °C. Ello nos indica que existe un fuerte gradiente horizontal de temperatura potencial equivalente; en suma, dos masas de aire de distintas características.

Otra herramienta esencial para caracterizar las masas de aire que entran en juego son los **sondeos**. Nos dan información del perfil vertical de temperatura y humedad, junto con la dirección e intensidad del viento. Mediante sondeos observados en distintos puntos de interés, podemos diagnosticar y comparar las masas de aire existentes, y deducir conclusiones muy interesantes. En nuestro episodio, vamos a trabajar con los sondeos observados del 26 de agosto a las 12 UTC, de Huelva y Murcia, mostrados en la figura 2.8.

En el sondeo de Huelva llama la atención la extrema sequedad de la columna troposférica que va desde 700 hPa, hasta la tropopausa (valores en torno al 5 % de humedad relativa). En niveles bajos se aprecia un régimen de levante, húmedo, que va girando en el sentido de las agujas del reloj a la vez que se va desecando en la vertical. En 700 hPa, se establece un régimen de SW hasta alcanzar un máximo de intensidad de 75 kt en 300 hPa. Todo ello corrobora lo anteriormente deducido mediante las imágenes de vapor de agua: la existencia de un máximo de viento en niveles altos, en un ambiente extremadamente seco, hacia el sur de Portugal (Algarve).

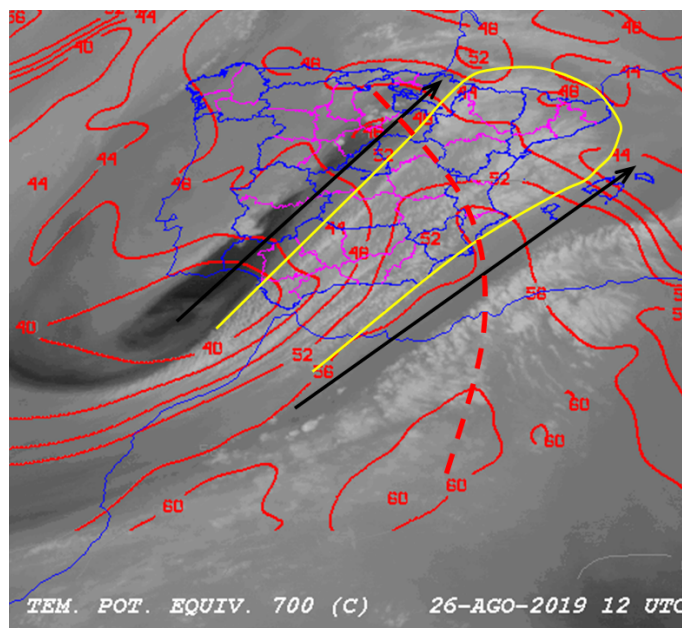


Figura 2.7. Análisis del modelo HRES-IFS. Isóneas de temperatura potencial equivalente en 700 hPa superpuestas sobre imágenes de vapor de agua WV6.2 a las 12 UTC. Área peninsular. Máximos de viento en altura en negro. Detalle de la «pluma» en amarillo. Eje de dorsal de temperatura potencial equivalente en línea discontinua roja.

Por el contrario, fijándonos en el sondeo de Murcia, vemos que las características son totalmente distintas. Llama la atención la fuerte inversión de niveles bajos, en torno a 800 hPa, donde la temperatura aumenta 7 °C aproximadamente. En niveles medios, desde 800 hPa hasta 500 hPa, el perfil vertical de temperatura se ajusta a una adiabática seca, adquiriendo el sondeo forma de «V» invertida, con un régimen de SW, y un ambiente relativamente húmedo, hasta saturarse en torno a 500 hPa (apreciable en la banda brillante de la imagen de WV7.3). Esta «V» sufre un «bocado» en su parte inferior, hasta superficie, debido al flujo de levante, procedente del Mediterráneo, que suaviza la temperatura y carga el ambiente de humedad, separando dos masas de aire de distinta procedencia. En definitiva, en el levante peninsular tenemos una masa de aire cálida y húmeda, procedente de latitudes más bajas (régimen de SW). Se trata de una masa de procedencia tropical, situada al este de la *pluma de vapor* de agua anteriormente expuesta.

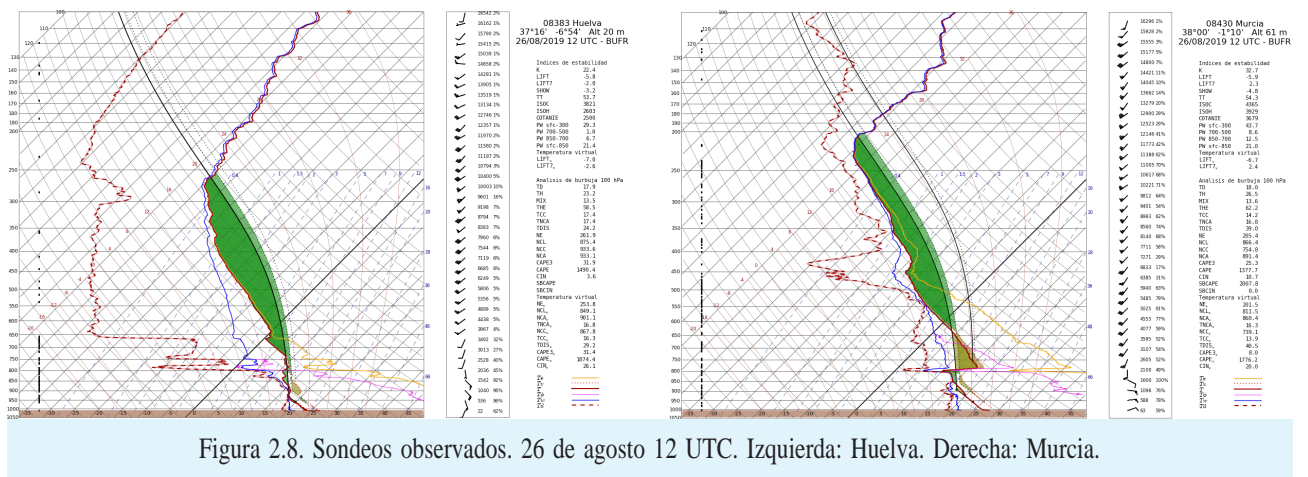


Figura 2.8. Sondeos observados. 26 de agosto 12 UTC. Izquierda: Huelva. Derecha: Murcia.

Comparando distintas variables de ambos sondeos, se aprecia que tenemos entre manos dos masas de aire totalmente distintas en niveles medios y altos. Fijándonos en el agua precipitable en el total de la columna, vemos que en Huelva se indica 29 mm frente a 43 mm en Murcia. Sin embargo, lo realmente destacable es ver en qué capas se halla. En Huelva, por encima de 850 hPa solo tenemos 7,7 mm frente a los 21,1 mm en Murcia. Queda claro que una masa de aire cálida y húmeda, de origen tropical, sobrevuela la localidad mediterránea; mientras que una masa más fría y seca, de origen polar, sobrevuela Huelva. Por último, también podemos ver una diferencia notoria en cuanto a la posición de la tropopausa, fijándonos en la altura del nivel de equilibrio, NE. En el sondeo de la localidad andaluza, el NE se halla a unos 250 hPa (10 km), frente a los 200 hPa correspondientes al NE de Murcia (12 km). A esta altura, pequeñas variaciones de la presión suponen grandes diferencias de espesor.

Variable	Sondeo Huelva	Sondeo Murcia
Temperatura en 700 hPa	4 °C	10 °C
Humedad en 500 hPa	5 %	80 %
Agua precipitable 850-500 hPa	7,7 mm	21,1 mm
Viento en 300 hPa	65 kt (SW)	55 kt (SW)
Altura de la tropopausa	250 hPa (10 km)	200 hPa (12 km)

Tabla 2.1. Comparativa sondeos observados de Huelva y Murcia de 12 UTC del 26 de agosto.

Muchas de estas conclusiones podemos obtenerlas a través de las imágenes de satélite, como se detalla más adelante, en el capítulo 3 de este trabajo.

2.3. ANÁLISIS MESOESCALAR

En este apartado se intenta analizar el episodio objeto de estudio desde un enfoque mesoescalar, centrándonos en el entorno de Campillos, en Málaga. Para ello, se hace uso tanto de modelos de alta resolución y de área limitada (HARMONIE-AROME y WRF), como de datos observados de la red de estaciones meteorológicas automáticas de AEMET. HARMONIE-AROME, con resolución a 2,5 km, es un modelo ampliamente utilizado en predicción operativa en AEMET, mientras que el WRF se corre de manera experimental para analizar algunos casos de estudio. El modelo WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) está diseñado para usarse con fines de investigación y de predicción operativa, teniendo un rango desde la escala sinóptica hasta decenas de metros. Su uso al nivel de mesoescala, o escalas menores, puede ser muy interesante para representar fenómenos y estructuras meteorológicas que se escapan a modelos numéricos de menos resolución, por lo que puede tener mucha utilidad para el estudio de situaciones meteorológicas.

<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

Para tal fin, personal de AEMET del Área de Técnicas y Aplicaciones para la Predicción (ATAP) y de la Unidad de Estudios y Desarrollos del Centro Meteorológico de Málaga (E&D) han instalado y corrido la versión 4.1.2 del modelo WRF (a 1 km de resolución) en el entorno de supercomputación operativo *Nimbus* de AEMET. Una vez generados los ficheros con una resolución temporal de 5 minutos, se han dibujado los ficheros gráficos con distintos campos: precipitación, viento a 10 m, CAPE, agua precipitable, etc. WRF es un modelo de área limitada, por lo que es necesario suministrarle una serie de condiciones iniciales y campos de contorno para el periodo de pronóstico. Para tal fin, se ha utilizado como contorno el modelo *ERA5* del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF) con una resolución espacial de 0,25° y una resolución temporal de 1 hora, con 137 niveles en la vertical.

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

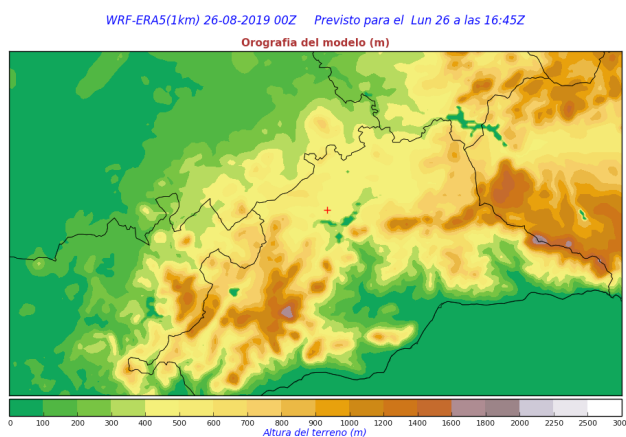


Figura 2.9. Orografía del modelo WRF a 1 km de resolución, centrado en Campillos (Málaga).

Se ha corrido el modelo en dos dominios (áreas) anidados. El primero abarca casi toda Andalucía (5 km de resolución) y el segundo toda la provincia de Málaga (1 km de resolución). A lo largo de este apartado se muestran distintos productos del WRF, a 1 km de resolución, para las dos áreas indicadas, con los que se pueden observar con mayor detalle distintas variables útiles en nuestro caso de estudio. En la figura 2.9 se muestra la orografía del modelo.

Volviendo a nuestro episodio de estudio, en los apartados anteriores se ha mostrado la existencia de un régimen de levante en capas bajas durante el 26 de agosto, advectando aire húme-

do y cálido procedente del Mediterráneo; mientras que por encima el aire seco era protagonista (véanse sondeos más adelante). Como ya se ha comentado, cuanto más intenso sea el chorro en niveles bajos (LLJ: *low level jet*), y más consiga penetrar en el interior de la *pluma de vapor de agua*, más probabilidades habrá de que la convección sea organizada. La coexistencia de máximos de viento en altura (zonas secas, figura 2.11) sobrevolando vientos húmedos y cálidos en niveles bajos (LLJ), acelerados en los portillos de entrada al interior peninsular (valle del Guadalhorce, figuras 2.10, 2.11 y 2.13), propicia que la cizalladura vertical del viento sea muy acusada, favoreciendo la organización de la convección.

Por otro lado, un estrato cuyo perfil vertical muestre aire seco en su tope y, aire húmedo y cálido en su base (cuasi saturado), posee inestabilidad potencial. Esta situación se halla patente en el episodio analizado, en el que tenemos advección de aire frío y seco en niveles medios/altos (flanco delantero de la dana) junto con advección húmeda y cálida en niveles medios/bajos (850-700 hPa). Ante un hipotético ascenso del conjunto del estrato, la base se enfría según la adiabática saturada y el tope se enfría conforme a la adiabática seca, lo que inestabiliza más aún la capa analizada.

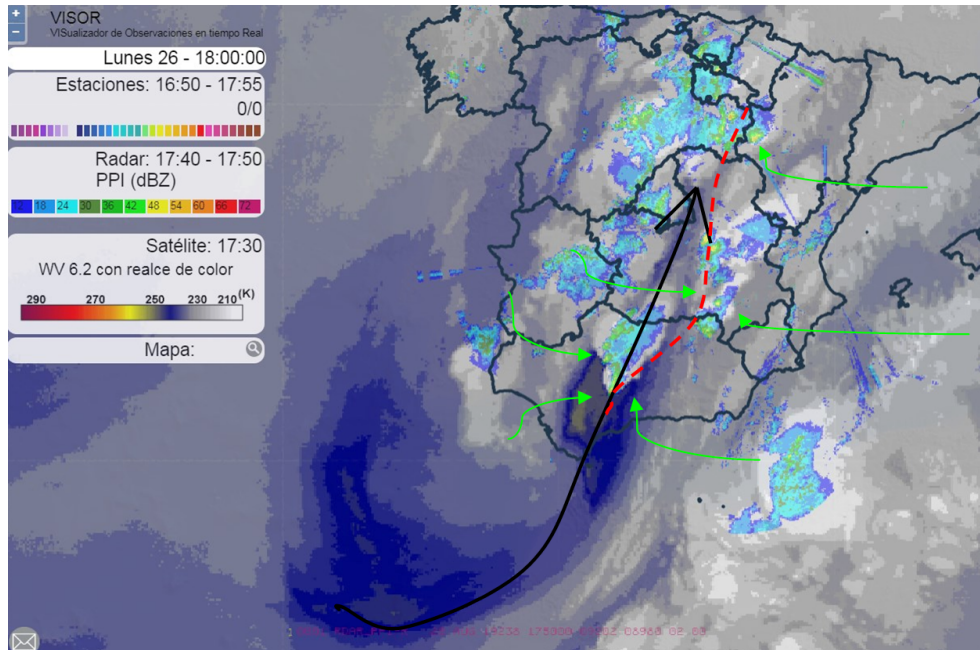


Figura 2.10. Imagen de vapor de agua WV7.3 con realce. 18 UTC. Línea discontinua roja: frontera entre masas de aire. En verde se indica viento en niveles bajos, entrando por los portillos al interior peninsular y convergencias con flujos del oeste. Flecha negra: máximo de viento en niveles altos. Composición PPI radar superpuesta: convección en forma de «V» en Andalucía.

Para liberar dicha energía potencial es necesario un mecanismo de disparo. Es importante señalar aquí que, en nuestro episodio de estudio, los sondeos previstos en la campaña sevillana (figura 2.12) hacia las 15 UTC son inestables desde superficie (CAPE de 1200 J/kg). El calentamiento diurno favorece un incremento de los procesos de mezcla turbulenta en capas muy bajas, propiciando un incremento de la profundidad de la capa superficial, que adquiere un perfil de adiabática seca. Este proceso de mezcla es lo suficientemente intenso para que se produzca una conexión entre la citada capa de mezcla superficial

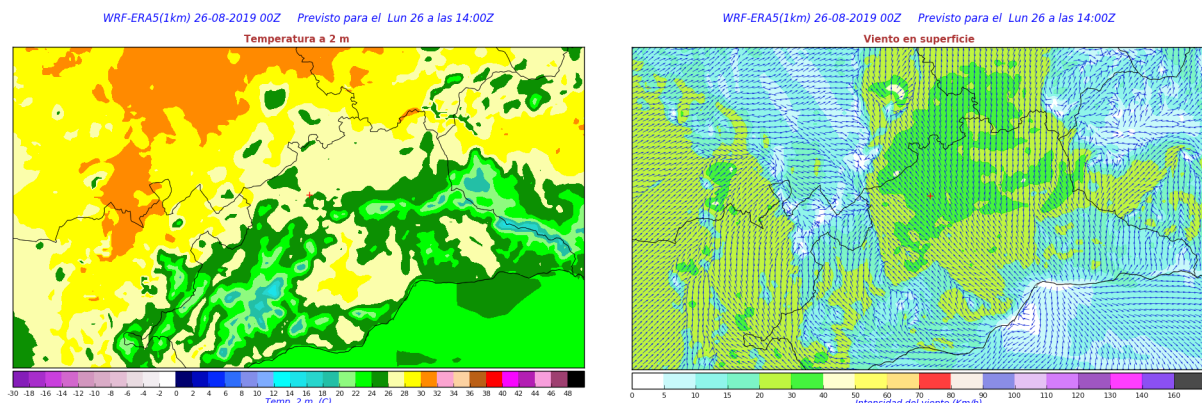


Figura 2.11. Temperatura a 2 metros (izda.) y viento en superficie (dcha.) previstos por WRF a las 14 UTC.

Como hemos visto, la convección se había disparado por calentamiento superficial en la campiña sevillana, en un entorno muy inestable (CAPE de 1200 J/kg), donde surgieron las primeras células tormentosas. Es probable que alguna de las células tormentosas surgidas, y guiadas por el flujo de SW, comenzase a desarrollar un proceso de organización en el momento en el que alcanzase la línea de convergencia mostrada, encontrando un flujo húmedo e intenso del SE remontando el Guadalhorce. Flujo que probablemente sirvió de combustible en forma de humedad y que favoreció el aumento de la cizalladura vertical (SE en niveles bajos y de SW en altura, ambos muy intensos). Por tanto, el hecho de que coincidan a nivel espacial y temporal, un máximo de viento en niveles bajos del SE, con otro máximo de viento en niveles altos del SW, pudo ser determinante para que la convección fuese altamente organizada en el entorno de Campillos.

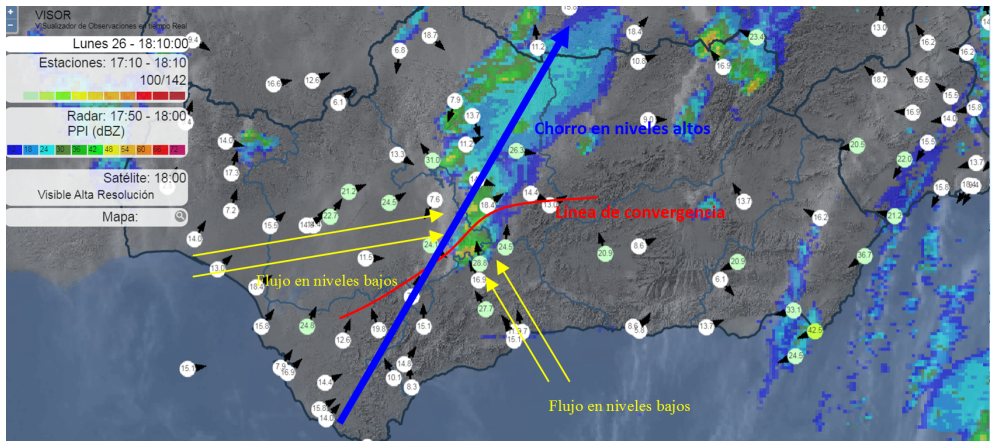


Figura 2.14. Análisis mesoescalar a las 18 UTC. En azul máximo de viento en niveles altos. En rojo línea de convergencia. En amarillo flujos en niveles bajos. Superpuesto sobre imagen PPI radar.

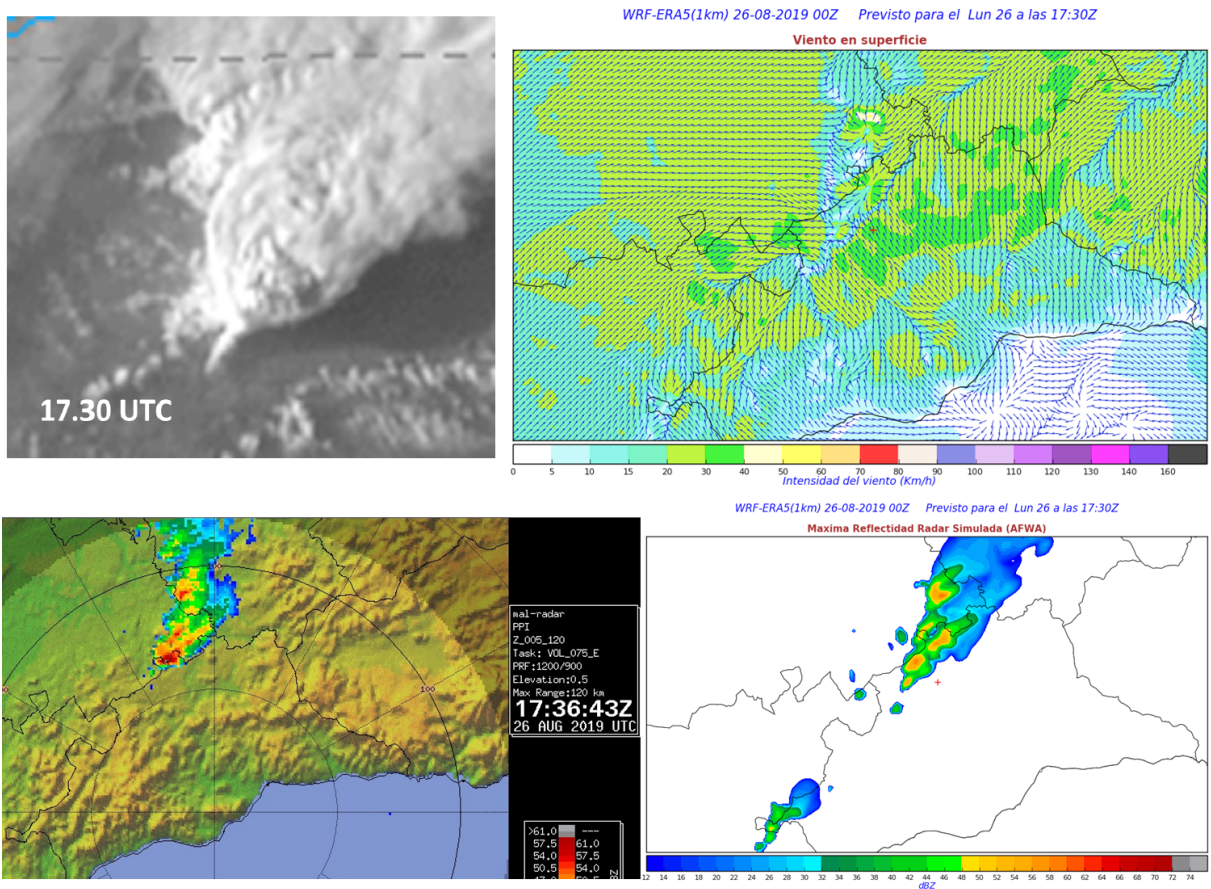


Figura 2.15. De izquierda a derecha y de arriba abajo: imagen HRVIS, viento en superficie previsto por WRF, imagen Zmáx del radar de Málaga y máxima reflectividad radar simulada por WRF. 17.30 UTC.

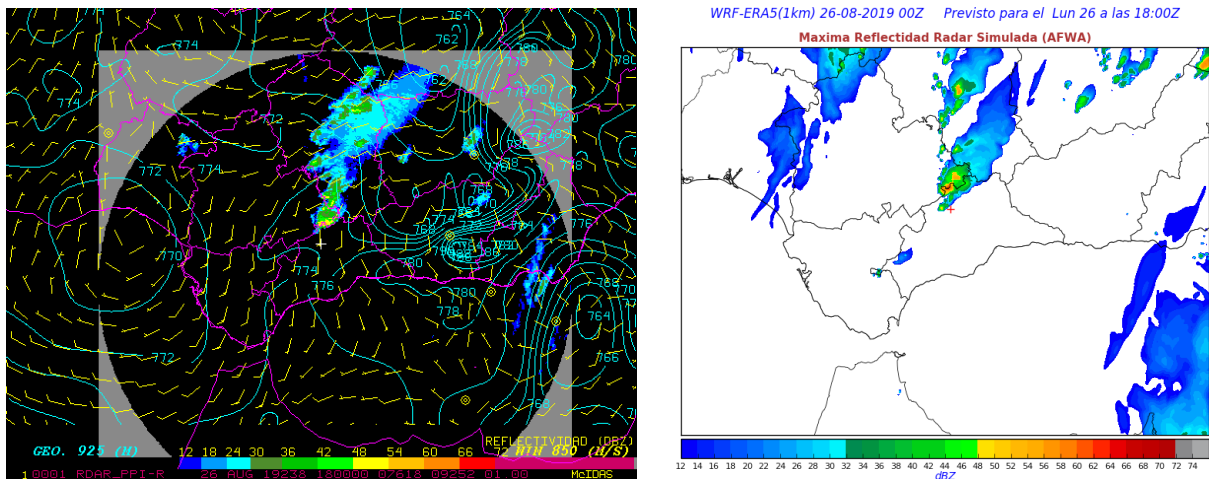


Figura 2.16. PPI radar Málaga superpuesto sobre campos de viento en 850 hPa y altura geopotencial en 925 hPa previstos por HRES-IFS a las 18 UTC (izquierda). Máxima reflectividad radar simulada por WRF a las 18 UTC (derecha).

En las imágenes de la figura 2.15, todas ellas a las 17.30 UTC, se aprecia que el WRF intuye con bastante precisión espacial y temporal las células convectivas surgidas. Como se verá más adelante, fue en torno a las 17.30 UTC cuando hay indicios de una posible supercélula, tal y como se desprende tanto de las herramientas de teledetección (satélite, radar y rayos) como de varias fotografías.

A continuación, (figuras 2.17 y 2.18) vamos a tratar de verificar lo expuesto más arriba, realizando un análisis de las observaciones registradas en las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) de AEMET en el entorno de Campillos. Se trata de las EMA de las localidades de Osuna y La Roda de Andalucía, en la provincia de Sevilla; y de Fuente de Piedra y Álora, en la provincia de Málaga. Las estaciones sevillanas se hallan en la vertiente atlántica, mientras que la estación malagueña de Álora se sitúa en la vertiente mediterránea. Por último, la estación de Fuente de Piedra se halla en una cuenca endorreica homónima, que vierte sus aguas a la laguna de Fuente de Piedra, a unos 402 metros sobre el nivel del mar. Esta última EMA, por tanto, se sitúa sobre la divisoria atlántico-mediterránea, y más

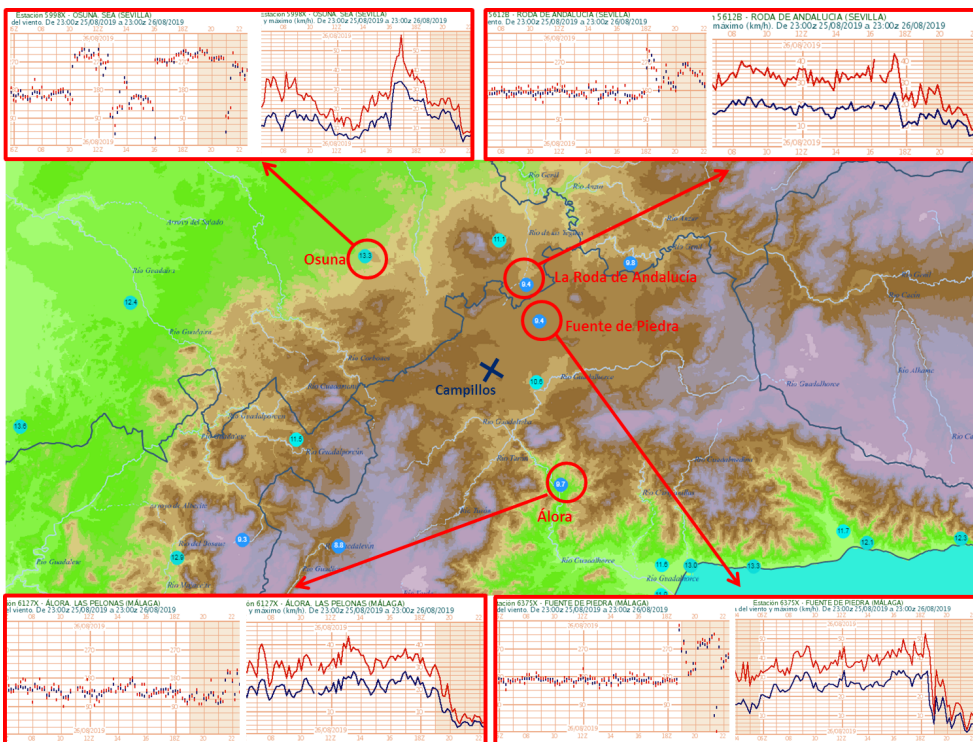


Figura 2.17. Ubicación espacial de las estaciones meteorológicas automatizadas (EMA). Gráficas de dirección, intensidad de viento y racha máxima registradas durante el 26 de agosto.

concretamente entre las cuencas del río Guadalquivir y Guadalhorce. Se puede comprobar, por tanto, que nos hallamos en un área que constituye una verdadera frontera geográfica entre dos vertientes hidrológicas.

Como ya se ha indicado, los flujos en niveles bajos fueron determinantes en el desarrollo del episodio. En la figura anterior se muestran los registros de dirección, intensidad del viento y racha máxima en las cuatro EMA expuestas; se trata, por tanto, de datos en superficie. Destaca la persistencia e intensidad de un flujo de origen mediterráneo, remontando el río Guadalhorce, en Álora y Fuente de Piedra, que incluso alcanza La Roda de Andalucía, ya en el lado atlántico. Un flujo que se acelera a medida que asciende desde el Mediterráneo y se adentra en el interior; y que finalmente se detiene sobre las 18-19 UTC. Con valores de viento medio de 20-30 km/h en Álora y de 30-40 km/h en Fuente de Piedra. Por otro lado, fijándonos en los registros de la EMA de Osuna, vemos que hay un régimen variable durante el día, alternando vientos flojos de componente sur (origen mediterráneo), con vientos de

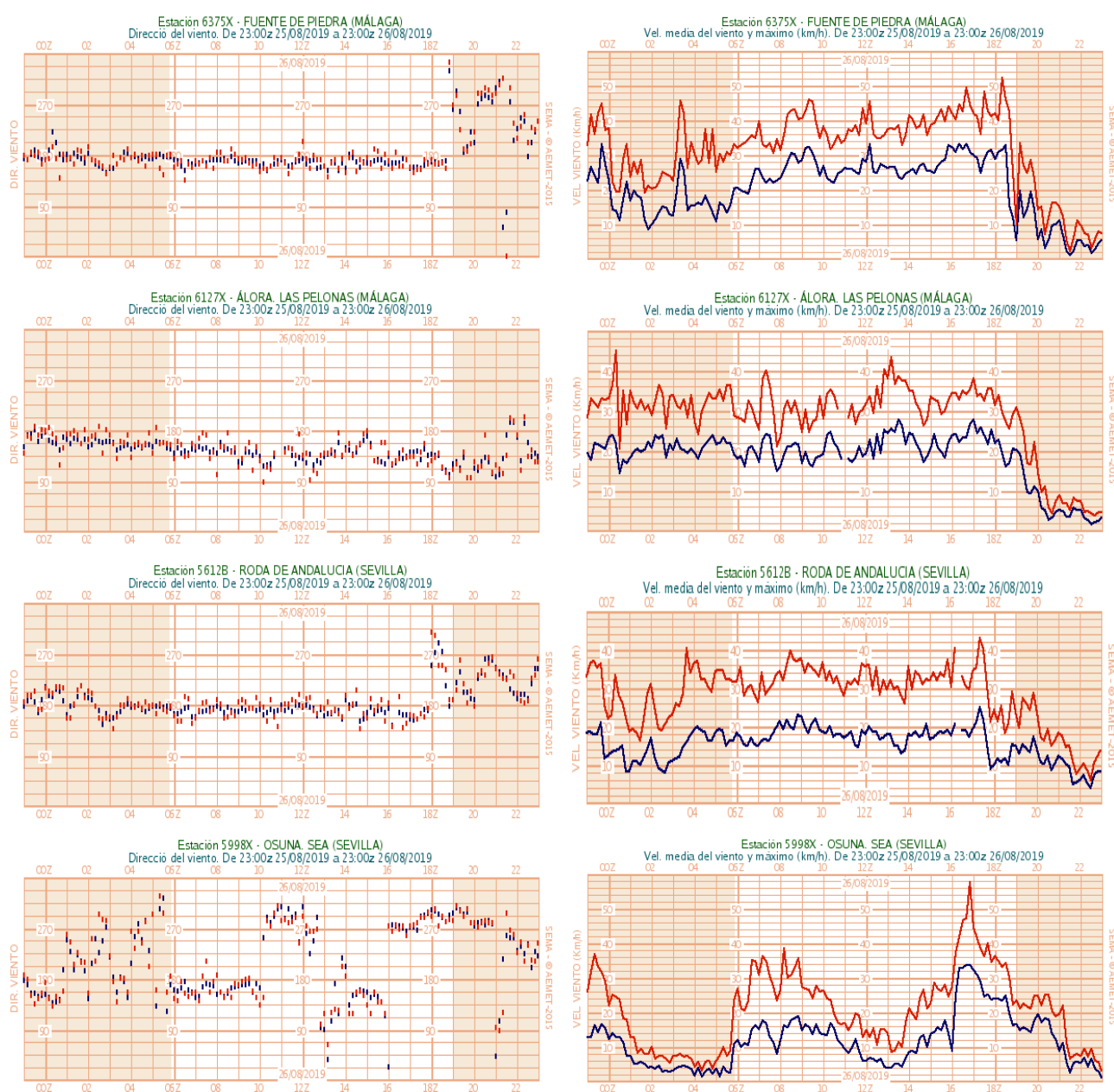


Figura 2.18. Registros de dirección, intensidad de viento y racha máximas en distintas estaciones de AEMET en el entorno de Campillos.

suroeste (origen atlántico). Destaca un giro brusco a las 16 UTC, pasando de un flujo débil de componente sur (viento medio de 10 km/h), a un régimen fuerte muy marcado de suroeste (viento medio de 35 km/h).

A tenor de estos registros, se observa que en la cara norte de las sierras circundantes, mirando hacia la vertiente atlántica, y a partir de las 16 UTC, se produjeron convergencias de viento en superficie entre un régimen de SW atlántico y un régimen de componente sur, con origen en el mar de Alborán. Como ya habíamos intuido con las salidas de los modelos (figura 2.13).

2.4. ANÁLISIS DEL ENTORNO FAVORABLE A LA FORMACIÓN DE SUPERCÉLULAS

Como ya se ha visto, varios mecanismos de disparo, tanto sinópticos como mesoescalares, estaban presentes. Existencia de una dana, con forzamiento dinámico en su flanco delantero, máximos de viento superpuestos en niveles altos y niveles bajos, línea seca como frontera entre dos masas de aire, y convergencias en niveles bajos. Las condiciones sinópticas y mesoescalares sugerían la posibilidad de convección organizada en amplias zonas de la Península, pero afinar y predecir la aparición de supercélulas es una tarea mucho más complicada y arriesgada. Centrándonos en nuestro episodio, quizás lo más viable sea analizar si las condiciones meteorológicas, en el entorno de Campillos, eran favorables para la formación de supercélulas. Para ello, vamos a tratar de aplicar conceptos teóricos sobre formación de supercélulas haciendo uso tanto de datos de observación (satélite, radar y rayos) como de modelos numéricos de alta resolución (sondeos previstos por HRES-IFS).

Las supercélulas se generan en entornos con valores altos de **cizalladura vertical** del viento, valores altos de **helicidad relativa a la tormenta** y valores moderados de **CAPE**. A modo de referencia, podemos tomar los siguientes números:

- Cizalladura vertical del viento en los primeros de CIZ6 = 6 km > 20 m/s
- Helicidad relativa a la tormenta en los primeros 3 km de SRH3 = 100 – 150 m²/s²
- CAPE = 1000 – 1500 J/kg (aunque también con valores < 500 J/kg)

Las supercélulas se caracterizan por poseer tres corrientes bien diferenciadas. Una corriente ascendente en rotación (**mesociclón**, *updraft*), que se halla desacoplada de una corriente descendente delantera (**FFD**, *forward flank downdraft*) y de una corriente descendente trasera (**RFD**, *rear flank downdraft*). El mesociclón es una prueba concluyente de que la tormenta analizada es una supercélula. El origen de la rotación de niveles medios (mesociclón) radica en la existencia previa de un entorno con cizalladura vertical, gracias a la cual se produce vorticidad horizontal. La vorticidad horizontal se transforma en vorticidad vertical al ser inclinada (proceso de *tilting*) y estirada (proceso de *stretching*) por una corriente ascendente (*updraft*).

Como ya se ha comentado, la convección se inició en el entorno de Osuna, en la provincia de Sevilla. Como se muestra en las figuras 2.19 y 2.20, y se verá más detalladamente en el siguiente capítulo, es posible que el miembro a derechas, o *right mover* RM, de una posible división celular, o *storm splitting*, evolucionase a supercélula.

Según la teoría, un entorno con cizalladura unidireccional es el que favorece la formación de *storm splittings*. Para aplicar la teoría a nuestro episodio de estudio, nos fijamos en la figura 2.21. Se trata de un sondeo, y su hodógrafa, previsto por HRES-IFS para un punto situado en Morón de la Frontera a las 12 UTC, en plena campiña sevillana, a escasos kilómetros de Osuna. Se aprecia un perfil inestable, con un CAPE entre 500-1000 J/kg. Hay que tener en cuenta que los primeros desarrollos convectivos se dieron a las 16 UTC, cuando seguramente el calentamiento superficial sería mayor, y por tanto, el valor de CAPE también se vería incrementado. Fijándonos en el viento a distintos niveles, apreciamos

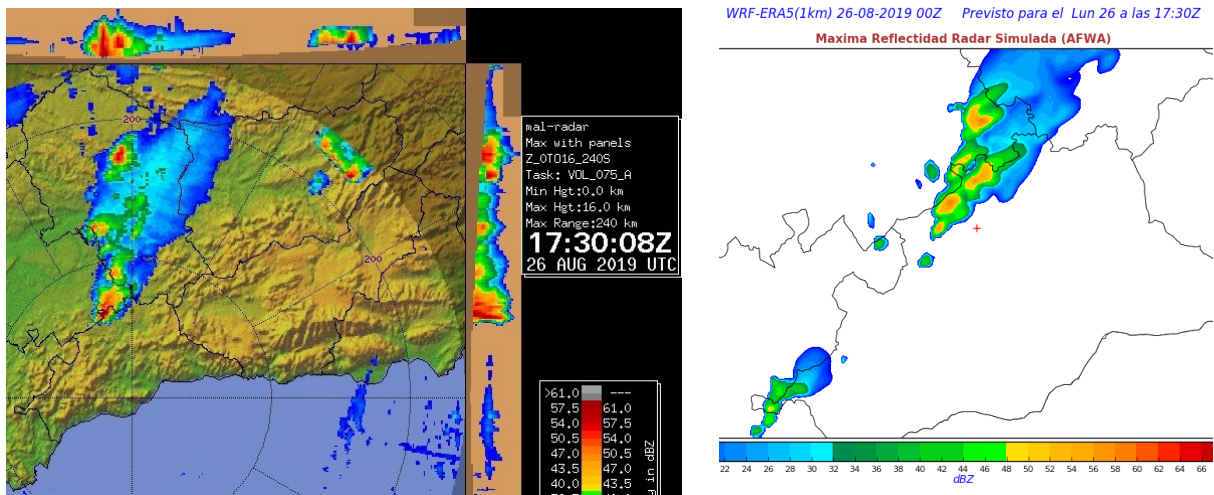


Figura 2.19. Zmáx del radar de Málaga (izda.) y máxima reflectividad radar simulada por WRF (dcha.) 17.30 UTC.

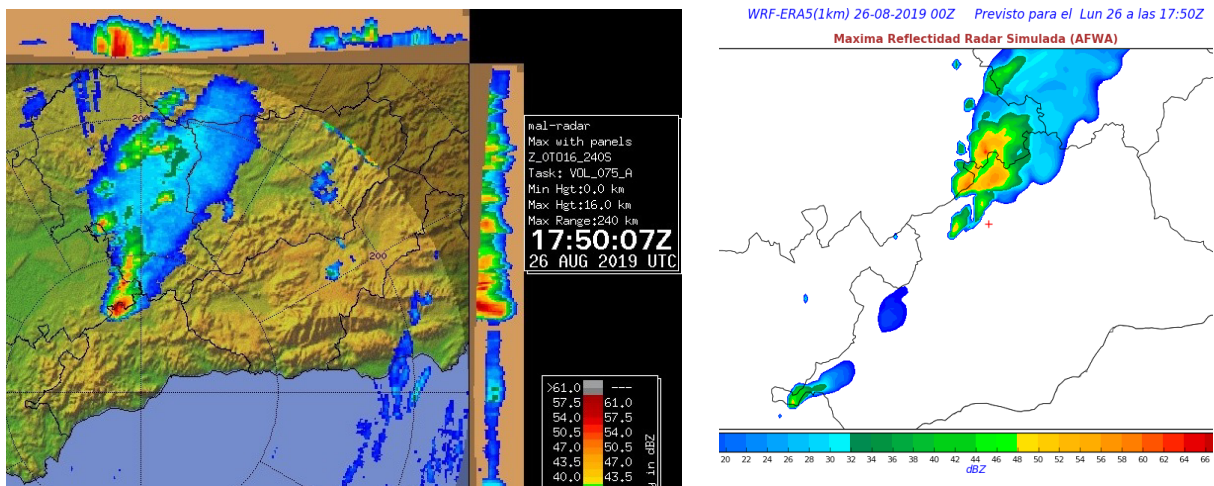


Figura 2.20. Zmáx del radar de Málaga (izda.) y máxima reflectividad radar simulada por WRF (dcha.) 17.50 UTC.

que este es siempre de SW (con una componente sur un poco más marcada en superficie) y se intensifica a medida que ascendemos. La cizalladura prevista en los primeros 6 kilómetros, CIZ6, es de 50 m/s. Se trata, por tanto, de un perfil con cizalladura unidireccional, como ya habíamos intuido, y como se puede ver en la hodógrafa «recta», característica de entornos con cizalladura unidireccional. Por otro lado, la helicidad relativa a la tormenta, desviada a derechas, y evaluada en la capa efectiva, ESRH-R (*storm relative helicity, right mover*), es de 76 m²/s².

A la vista de la cizalladura unidireccional existente, además del resto de condicionantes sinópticos y mesoescalares expuestos anteriormente, se puede afirmar que el entorno del valle del Guadalquivir era propicio para la formación de *storm splittings*. Por otro lado, una división celular no asegura que se desencadene una supercélula. En el 30 % de los casos, progresan a supercélula los dos miembros, otras veces solo progresa uno de ellos, 60 %, y en otras ocasiones ninguno, 10 %. Además de una división celular, basada en cizalladura unidireccional, la otra posibilidad para que se desarrolle una supercélula es la existencia de un entorno con cizalladura con curvatura (*clockwise*), en el que el viento gira y se acelera a medida que ascendemos en la vertical. En un entorno con cizalladura *clockwise*, la hodógrafa no es recta, sino curva.

En ambos casos (cizalladura unidireccional y con curvatura) es necesario que finalmente haya vortici- dad en la dirección del movimiento de la célula (o *streamwise vorticity*). Es decir, que la dirección

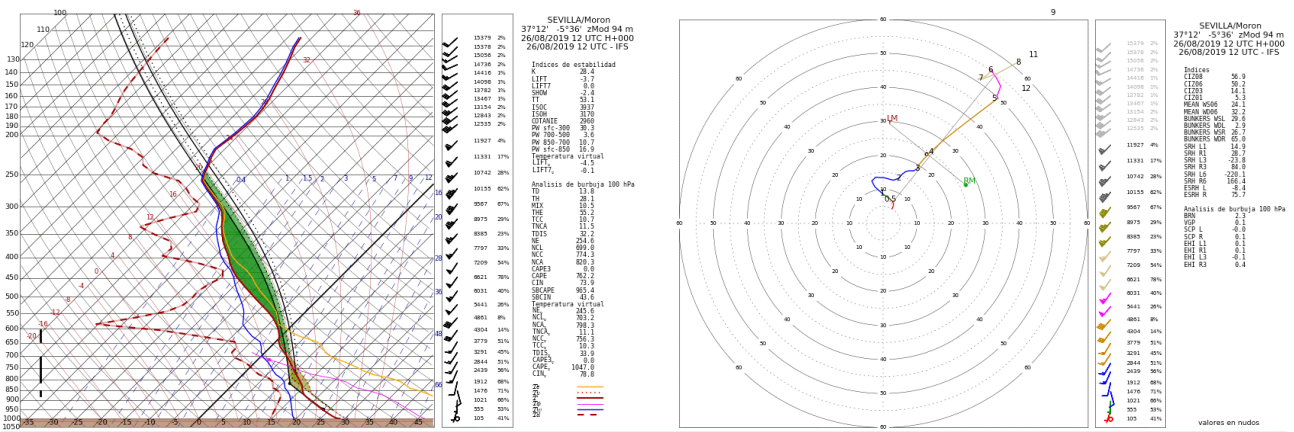


Figura 2.21. Sondeo y hodógrafa prevista por HRES-IFS en Morón de la Frontera. 12 UTC. Cizalladura unidireccional.

que toma el movimiento de la tormenta se alinee con el eje de vorticidad horizontal propio del flujo alimentador en capas bajas (figura 2.22). He aquí la posible explicación a la formación de la supercélula tornádica de Campillos. El miembro del *storm splitting* que de desplazaba hacia la derecha, o *right mover*, R1, en su movimiento de desvío hacia el este-sureste, se encontró con un flujo intenso y húmedo en niveles bajos con esta misma dirección de procedencia, encajado a su vez en un entorno con valores altos de helicidad (SRH). Se trata, como se ha explicado más arriba, del flujo de origen marítimo, que desde el mar de Alborán ascendía por el valle del Guadalhorce, acelerándose orográficamente en el interior de la provincia de Málaga. Es posible que la célula tormentosa R1 encuentre un entorno favorable para consumarse como supercélula con un flujo de componente este-sureste alimentando la tormenta en niveles bajos.

Podemos comprobar en el detalle de la hodógrafa de Morón de la Frontera de la figura 2.23, que el sentido de los distintos vectores considerados es consistente con el modelo conceptual de entorno con cizalladura unidireccional y vorticidad *streamwise* de la figura 2.22, favorable a la formación de supercélulas. Wh es la vorticidad horizontal alineada con el flujo del sureste en niveles bajos. V-C es el vector velocidad relativa a la tormenta del miembro que se desvía a derechas en el *storm splitting*. V es el vector viento medio. S es el vector cizalladura vertical del viento.

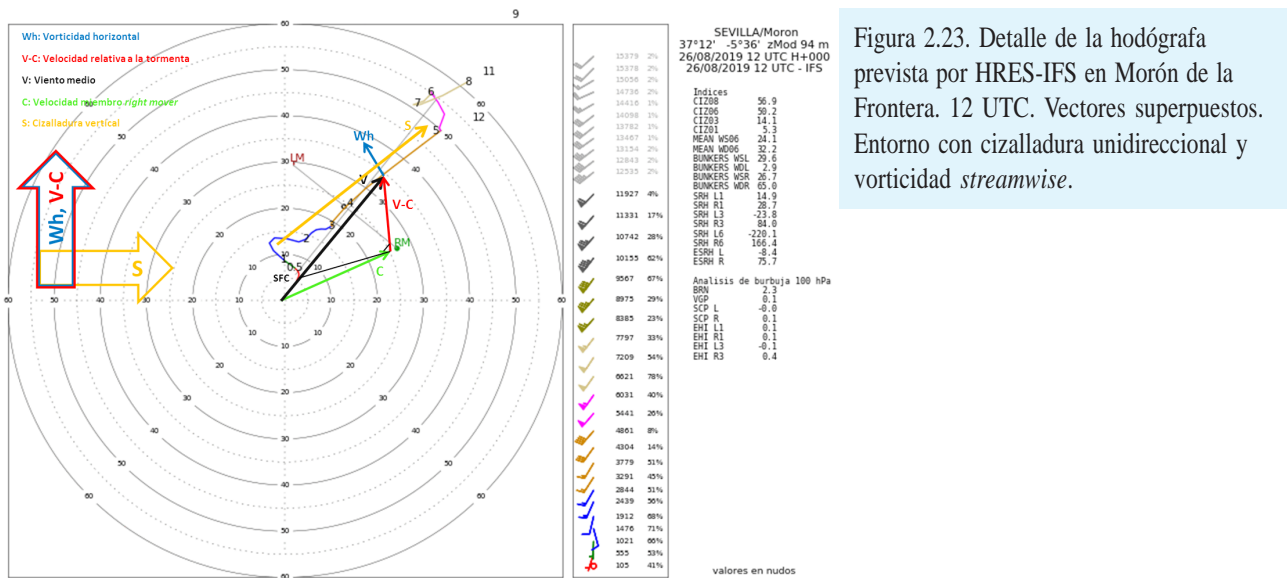
En definitiva, la división celular que se desató en la comarca de Sierra Sur de Sevilla pudo propiciar que el miembro a derechas se desviase lo suficiente para que, en el momento en que atravesó la



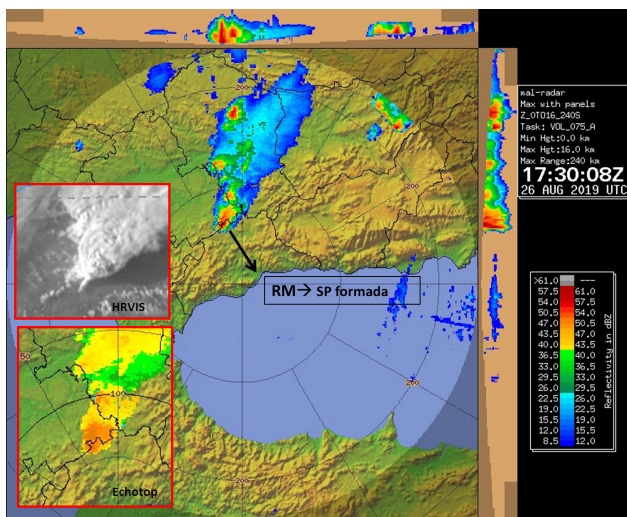
Figura 2.22. Modelo conceptual que representa el origen de la rotación en niveles medios, en el proceso de formación de supercélulas, en un entorno con cizalladura unidireccional.

V-C: vector velocidad relativa a la tormenta, w: vector vorticidad horizontal, S: vector cizalladura vertical (MARKOWSKI, 2010).

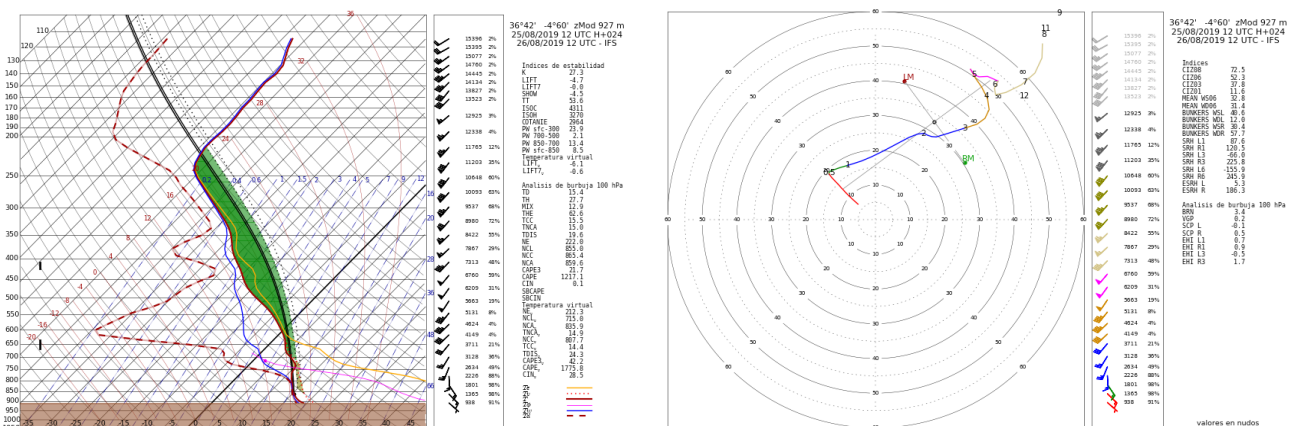
frontera geográfica y penetró en la vertiente mediterránea, en la zona de la laguna de Fuente de Piedra, se encontrase con un entorno favorable para evolucionar a supercélula. En la vertiente atlántica y previamente a la división celular, las tormentas se desplazaban hacia el nordeste, propiciando un encuentro con flujo en niveles bajos con vorticidad *clockwise* (no favorable para desarrollo de supercélulas). En cambio, gracias al *storm splitting*, el *right mover* se desvió de tal manera que encontró un flujo intenso del sureste en capas bajas, con elevada helicidad, propiciando un entorno con vorticidad *streamwise*, y posiblemente favoreciendo que evolucionase a supercélula.



La magnitud que permite evaluar el grado de correlación entre la vorticidad horizontal de un flujo y su dirección de desplazamiento es la helicidad. Por tanto, en el entorno de Campillos, ya en el valle del Guadalhorce, con un flujo del sureste en niveles bajos, la helicidad debía ser muy elevada (figura 2.25). Para el análisis de entornos supercelulares, se utiliza más concretamente la helicidad relativa a la tormenta en la capa efectiva, la cual se computa teniendo en cuenta el movimiento respecto de la tormenta y en la «capa efectiva», es decir la capa que constituye el flujo alimentador de la tormenta.



En el sondeo de la figura 2.25 podemos comprobar que la helicidad relativa a la tormenta en la capa efectiva y a derechas, era efectivamente muy elevada (186 m²/s²). Se observa la cizalladura de curvatura que existía en la vertiente mediterránea, debido al flujo de componente este en niveles bajos.



Según los datos derivados del sondeo anterior, la capa efectiva asciende desde superficie hasta 1720 metros. Es, por tanto, en este espesor de la columna donde es evaluada la helicidad. Fijándonos en el detalle de la hodógrafa del sondeo, vemos que la helicidad en la capa efectiva del miembro que se desvía a derechas se puede calcular gráficamente como el doble del área sombreada en amarillo. Se trata del área limitada entre la punta del vector movimiento de la tormenta hacia la derecha (RM) y la hodógrafa entre los niveles de superficie y tope de la capa efectiva considerada.

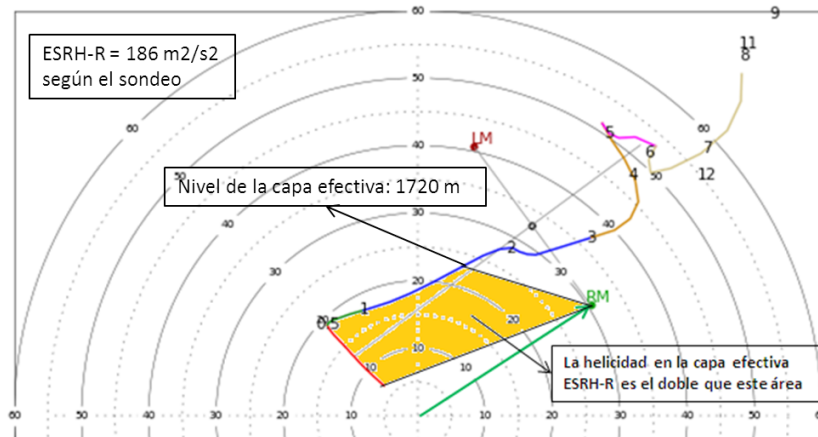


Figura 2.26. Detalle de la hodógrafa prevista por HRES-IFS en un punto cercano a Campillos a las 12 UTC. Método gráfico para evaluar la helicidad en la capa efectiva, conociendo el espesor de la misma.

En nuestro episodio, la posible supercélula formada parece que se viene abajo en el momento en que se debilita el flujo alimentador del SE procedente del mar de Alborán, como se muestra en la figura 2.27, donde se aprecia que el flujo de SE registrado en Álora (valle medio del Guadalhorce) se debilita a partir de las 19 UTC, hasta detenerse a las 20 UTC.

A continuación se muestran varios productos de diagnóstico convectivo. Se trata de campos derivados del modelo HRES-IFS del ECMWF. En la figura 2.28 podemos comprobar, primero, la zona de convergencias en superficie y, segundo, el campo de velocidad vertical asociado en 700 hPa, coincidiendo geográficamente a las 15 UTC. Vemos la línea de convergencias que cruza Andalucía del SW hacia el NE, y posteriormente discurre hacia el norte hasta la comunidad de Madrid. Al este tenemos vientos de levante, y al oeste ponientes flojos. Se trata, como ya se ha comentado, de un forzamiento dinámico en niveles bajos que puede favorecer el inicio de la convección.

En el par de mapas de las 15 UTC de la figura 2.29, se muestra, a la izquierda, el flujo de humedad en 850 hPa; y a la derecha el producto de agua precipitable total, con señal de hasta 35 mm en el entorno de Campillos. El modelo intuía un área muy húmeda y con aporte intenso de humedad, según se deriva del campo $q*v$ (flujo de humedad, en 850 hPa).

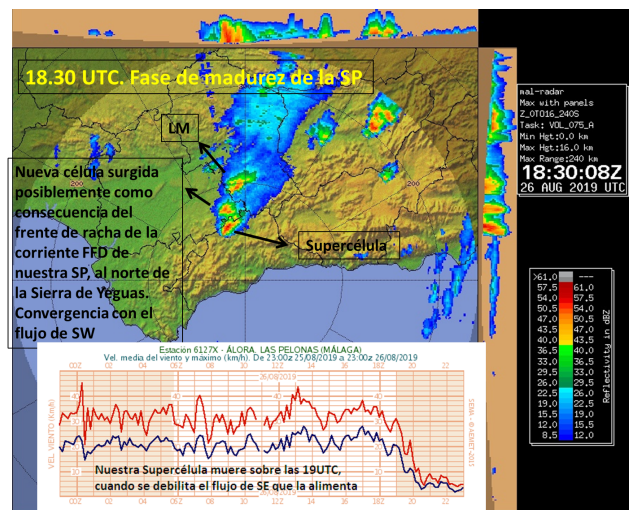


Figura 2.27. Zmáx del radar de Málaga a las 18.30 UTC. Registro de intensidad de viento en la EMA de Álora (valle del Guadalhorce).

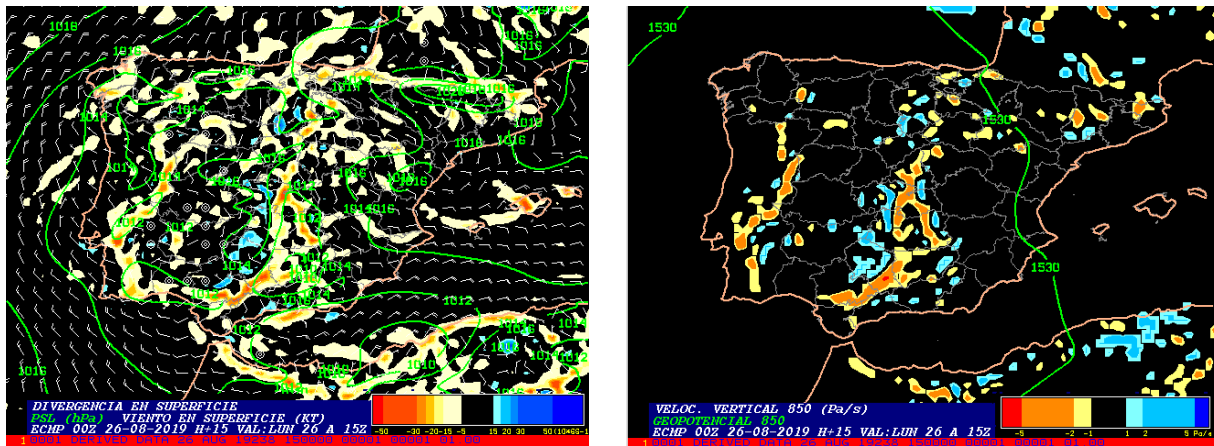


Figura 2.28. Campos derivados de modelo HRES-IFS. Divergencia en superficie y velocidad vertical en 700 hPa. 15 UTC.

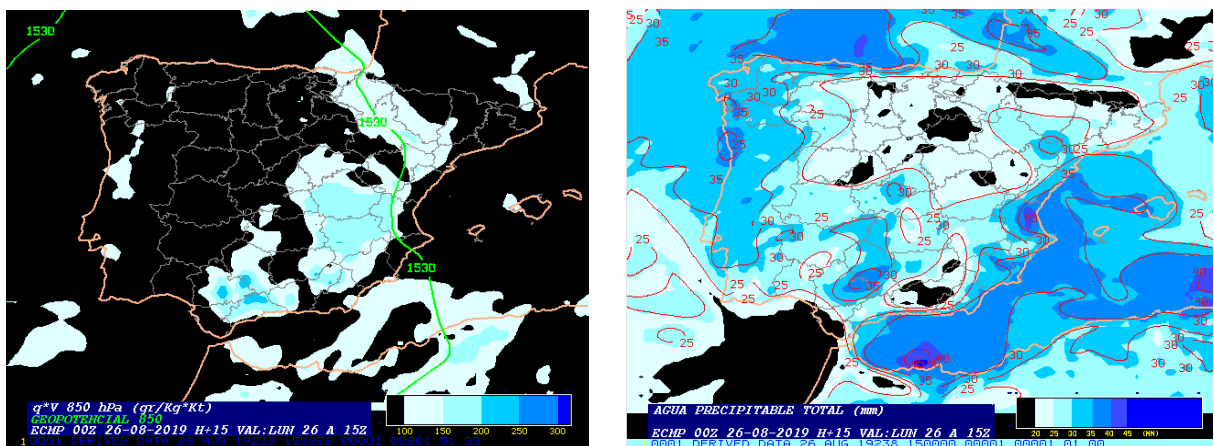


Figura 2.29. Campos derivados de modelo HRES-IFS. Flujo de humedad en 850 hPa y agua precipitable total. 15 UTC.

Fijándonos en la figura 2.30, se puede afirmar que existía un entorno inestable (valores elevados de CAPE) y con posibilidad de que la convección alcanzase estructuras organizadas (señal intensa de cizalladura vertical en 6 km).

Por último, en la figura 2.31 se muestran unos mapas con la distribución espacial de la variable helicidad relativa a la tormenta calculada en la capa efectiva (ESRH). Como ya se ha comentado, la

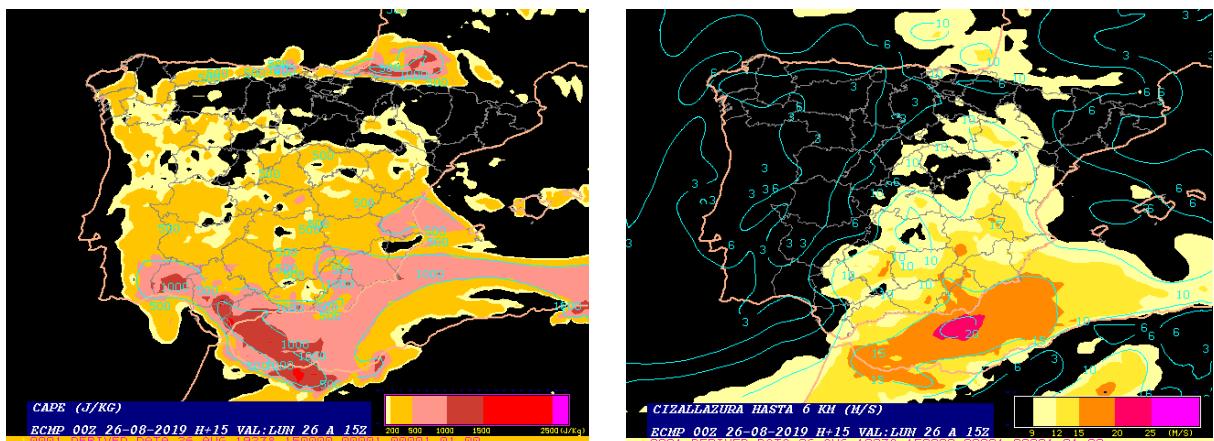


Figura 2.30. Campos derivados de modelo HRES-IFS. CAPE y cizalladura en 6 km.

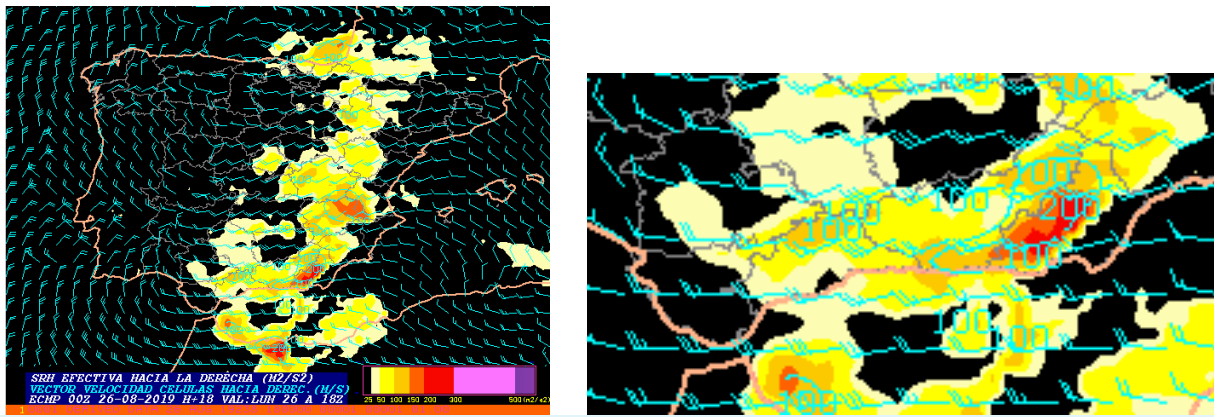


Figura 2.31. Campos derivados de modelo HRES-IFS. Helicidad relativa a la tormenta SRH. Detalle sur peninsular a 18 UTC.

helicidad es una magnitud escalar que nos da idea del grado de alineamiento que existe entre el movimiento de un fluido y su vorticidad horizontal. Se calcula como el producto escalar de la velocidad del fluido y la vorticidad horizontal (ambas magnitudes vectoriales) e integrada en todos los niveles que constituyen la «capa efectiva». En definitiva, es una medida de la vorticidad del fluido en la dirección del movimiento (*streamwise vorticity*), necesaria para la generación de supercélulas. En entornos supercelulares, la helicidad muestra valores elevados. En nuestra área de estudio, tenemos entre $150\text{-}200\text{ m}^2/\text{s}^2$, se trata, por tanto, de valores bastante altos, y se suma a la lista de ingredientes que nos indican la existencia de un entorno favorable a convección organizada.

Un entorno que puede ser favorable a la formación de supercélulas, además de poseer helicidad efectiva, debe ser inestable. Ya que es necesario que, además de existir vorticidad horizontal alineada en la dirección del movimiento de la célula en cuestión, debe haber un mecanismo que sea capaz de inclinar y estirar el flujo, que en sí mismo constituye el proceso de formación de un mesociclón. En la figura 2.31, vemos que el CAPE es aproximadamente de 1000 J/kg , junto con un valor de helicidad en la capa efectiva de $150\text{-}200\text{ m}^2/\text{s}^2$, anteriormente comentada.

Por tanto, echando un vistazo a los productos anteriormente mostrados, derivados del modelo HRES-IFS, el interior de la provincia de Málaga era un entorno favorable a la formación de convección organizada, en concreto, de supercélulas.

3. IMÁGENES DE SATÉLITE

3.1. CARACTERIZACIÓN SINÓPTICA

Las imágenes de satélite son una herramienta esencial tanto para el seguimiento y vigilancia de estructuras convectivas como para realizar estudios *a posteriori*. A continuación se muestra una selección de distintos canales del satélite Meteosat MS-4, imágenes RGB e imágenes del SAF de *nowcasting* de EUMETSAT, liderado por AEMET.

En cuanto a los canales de vapor de agua, en el capítulo de análisis sinóptico se han utilizado algunas imágenes del WV6.2 y WV7.3, tanto para diagnosticar masas de aire y detectar máximos de viento como para aplicar el modelo conceptual de pluma de vapor de agua. A continuación se muestra un panel de imágenes del canal WV6.2 (figura 3.1) con idea de caracterizar la evolución del episodio de manera global. En amarillo se indica el máximo de viento asociado al descuelgue de la vaguada desde el chorro polar y en azul el flujo de origen tropical. La primera imagen, arriba a la izquierda, es de las

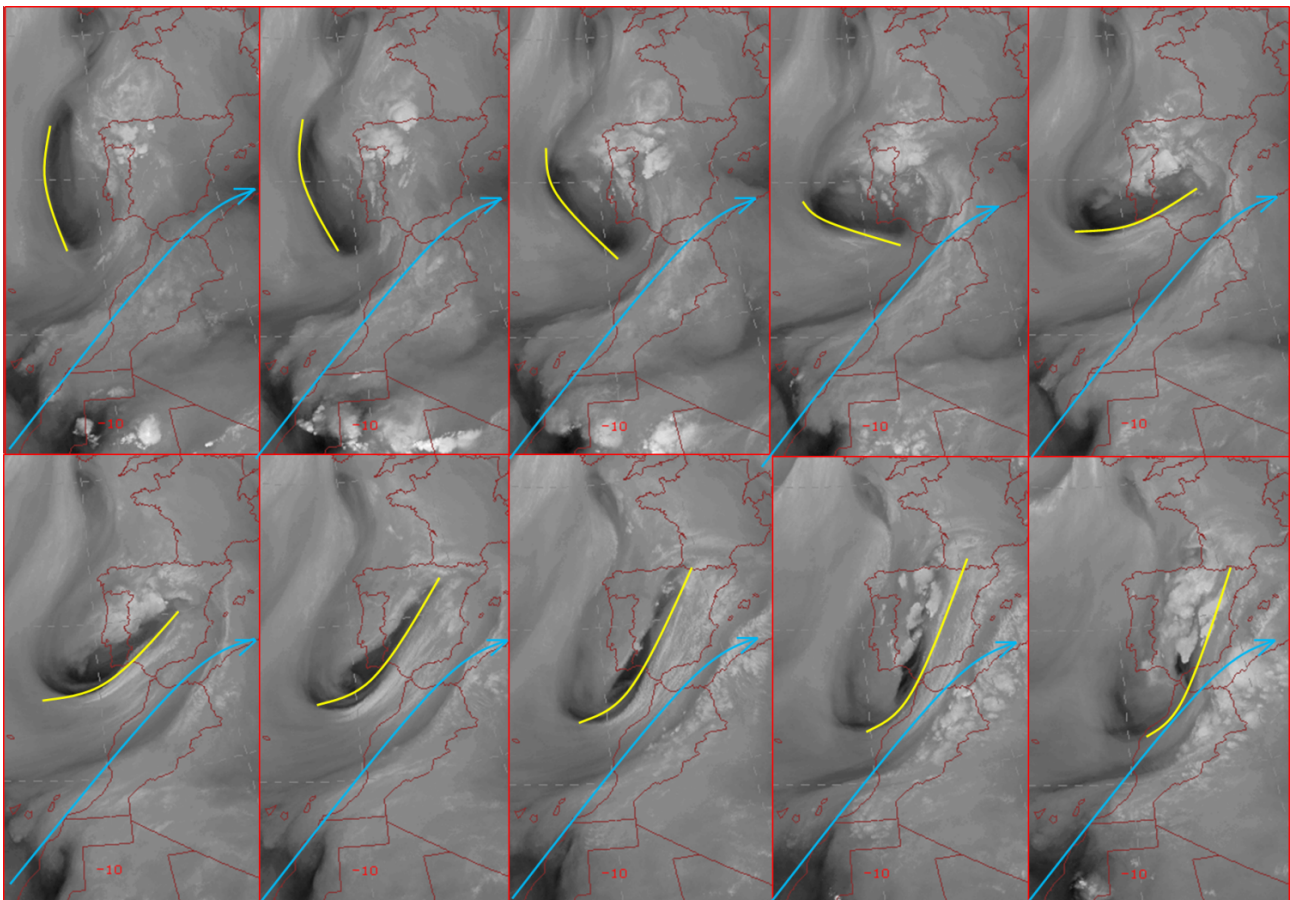


Figura 3.1. Imágenes del canal WV6.2. En amarillo, eje del máximo de viento asociado a la dana. En azul, flujo de origen tropical. Imágenes a intervalos de 3 horas. Desde las 15 UTC del 25 de agosto hasta las 18 UTC del 26 de agosto. De izquierda a derecha y de arriba abajo.

15 UTC del 25 de agosto, y la última, abajo a la derecha, es de las 18 UTC del 26 de agosto, el resto se muestran a intervalos de tres horas. Inicialmente, el máximo de viento conduce la dana desde la parte trasera, con un eje norte-sur, mirando hacia latitudes más bajas. Poco a poco, va tumbándose y orientándose longitudinalmente, dirigiéndose hacia el este, a la vez que rodea al núcleo frío de la dana por su flanco sur, sobre las 00 UTC del lunes 26 de agosto. A partir de aquí, comienza a posicionarse en su flanco delantero, y a dirigirse del SW hacia el NE. Es en este momento cuando el forzamiento dinámico es más activo sobre la zona de estudio, y cuando puede provocar tiempo más adverso en superficie.

En las imágenes del vapor de agua de la figura anterior, se aprecia también la interacción del máximo de viento con una incursión de una masa de aire tropical que se adentra en el mar Mediterráneo, desde el SW cruzando el norte de África. Es posible que este flujo de origen tropical, con otro máximo de viento asociado, frenase el desplazamiento de la dana hacia el este y obligase a su flanco delantero a estirarse hacia el NE.

Con las imágenes RGB de masas de aire de la figura 3.2, podemos comprobar lo indicado en el párrafo anterior. La presencia de una profunda vaguada descolgada del chorro polar, ya en forma de dana centrada sobre Portugal, en tonos morados. Más al este se halla la masa de aire de origen tropical, en tonos verdosos. Entre ambas, y sobre la banda morada que cruza la Península de norte a sur (máximo de viento en altura), se aprecian los principales desarrollos convectivos. Se trata de la frontera que separa ambas masas de aire.

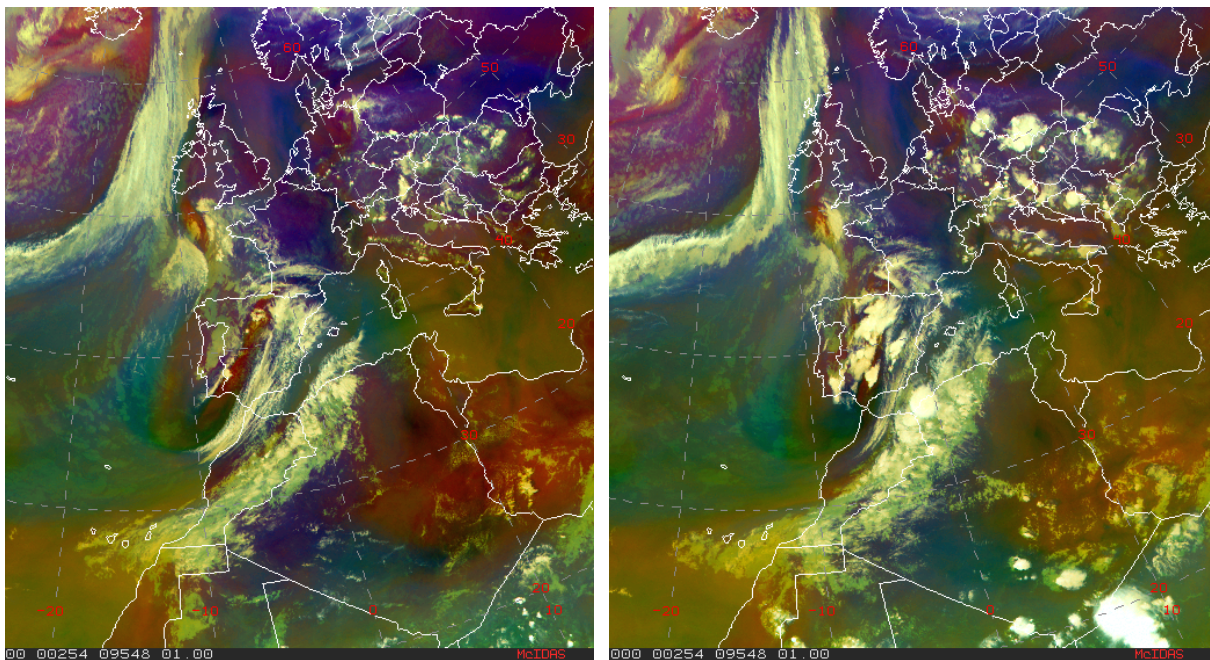


Figura 3.2. RGB de masas de aire. Área sinóptica. 12.00 UTC y 17.00 UTC.

Por otro lado, las imágenes del infrarrojo son muy útiles para analizar la evolución de estructuras nubosas, ya que muestran muy bien la nubosidad alta y se pueden analizar de manera continua en el tiempo. En la figura 3.3 se muestran tres imágenes del canal IR10.8, en las que se puede apreciar el proceso de formación de la denominada «pluma de vapor de agua».

La primera imagen es de las 00 UTC del lunes 26 de agosto. En ella comienza a apreciarse una pequeña banda de cirros, al oeste del golfo de Cádiz, en el flanco sur de la dana. La segunda imagen es de las 03 UTC, cuando la banda se ha hecho más extensa, adentrándose en la península ibérica por el valle del Guadalquivir; y también más intensa, orientándose de oeste a este. Por último, en la tercera imagen

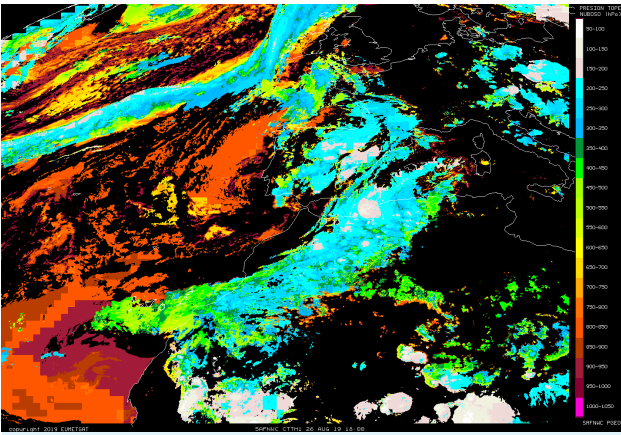


Figura 3.5. Producto Presión del tope nuboso del SAF de *nowcasting* de EUMETSAT a las 18 UTC del día 26.

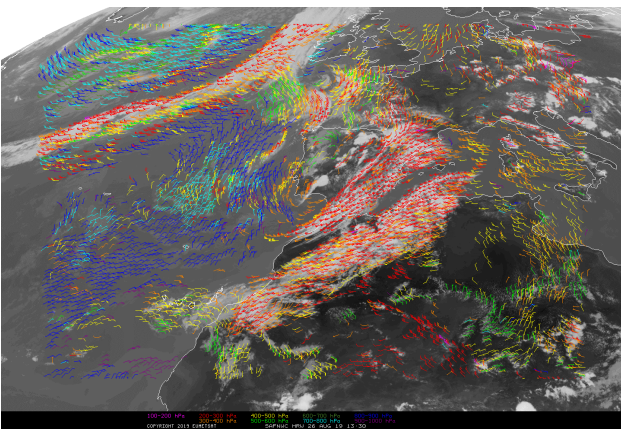


Figura 3.6. Producto HRW (*high resolution winds*) del SAF de *nowcasting* de EUMETSAT a las 13.30 UTC del día 26. Muestra la dirección, intensidad y altura del viento en los topes nubosos.

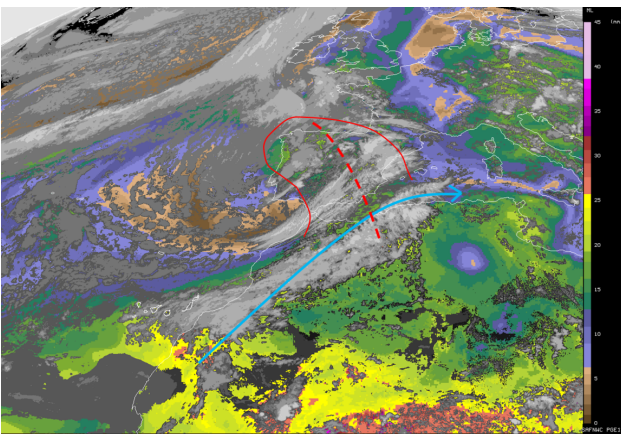


Figura 3.7. Producto Agua precipitable en niveles medios del SAF de *nowcasting* de EUMETSAT a las 12 UTC del día 26.

similar a la que sobrevuela el Sahara. Hay que tener en cuenta que se trata de información en sus niveles medios, por lo que no se ve afectada por las características de la superficie. Se puede apreciar, por tanto, la incursión de una masa de aire tropical en niveles medios sobre la Península, que penetra bajo la *pluma* que sobrevuela en capas altas. Este hecho se ha caracterizado mediante la dorsal de temperatura potencial en 700 hPa mostrada en el capítulo 2 de este trabajo.

el entorno de Campillos, vemos una estructura nubosa azulada, en la que en el vértice inferior parece intuirse un tono blanquecino. Según la escala estamos, por tanto, en un nivel de presión de en torno a 200-250 hPa, es decir, los topes nubosos llegaban a la tropopausa (como se puede ver en los sondeos en el capítulo 2).

En el producto *HRW* del SAF (figura 3.6), se aprecia muy bien la pluma de vapor de agua. Este producto muestra la intensidad y dirección del viento allí donde hay nubosidad, indicando también su altura en hPa, con una escala de colores. También se puede apreciar muy bien la difluencia existente en niveles altos sobre el sur de Francia. Los máximos de viento se hallan en las zonas sin nubosidad y sobre la Península se aprecian los primeros desarrollos convectivos (13.30 UTC).

Por último, el producto de agua precipitable del SAF también es muy útil para corroborar la existencia de dos masas de aire de distintas características. Se trata de un producto que da información en aire claro, y que discrimina por capas, por lo que tenemos imágenes para niveles bajos (sup-850 hPa), niveles medios (850-500 hPa), niveles altos (500 hPa-tope de la atmósfera) y para el total de la columna atmosférica.

En la figura 3.7 se muestra el agua precipitable en niveles medios a las 12 UTC. Es aquí, en las capas medias de la atmósfera, donde este producto del SAF puede ayudar a distinguir masas de aire de distintas características. Sobre la imagen se ha superpuesto una flecha azul que indica el flujo tropical en niveles altos, y una línea roja que abarca casi toda la península ibérica. Esta línea roja abarca un área con tonalidades verdosas, que se deja entrever entre la nubosidad, y que destaca frente a las tonalidades azuladas y ocres existentes a esa misma latitud tanto en las Azores como al este de las islas Baleares. Se trata, de una masa de aire más húmeda, procedente de latitudes más bajas,

3.2. CARACTERIZACIÓN MESOESCALAR

A continuación se van a mostrar una serie de imágenes de satélite con idea de describir más detalladamente el posible episodio supercelular de Campillos, objeto de estudio del presente trabajo.

En primer lugar, se incluye una imagen del canal visible de alta resolución HRVIS, para el área peninsular, a las 17.30 UTC. En ella, figura 3.8, se aprecian diversos focos convectivos en todo el interior, y entre ellos, una estructura nubosa muy bien definida en el corazón de Andalucía, correspondiente a nuestro episodio de estudio. En la figura 3.9 se hace un zoom en el sur peninsular, donde se aprecia de manera más nítida la posible supercélula de Campillos, con una protuberancia nubosa hacia el sur, que podría ser la *flanking line*, y que se corresponde con una zona de convergencias en niveles bajos, desde donde se alimenta la tormenta. Se aprecia un flujo de SW en niveles medios gracias a los penachos nubosos de los focos convectivos, así como por una banda nubosa estriada, en niveles medios/altos, que atraviesa el sureste peninsular. Asimismo, en las costas argelinas, parece intuirse un sistema convectivo de mesoescala.

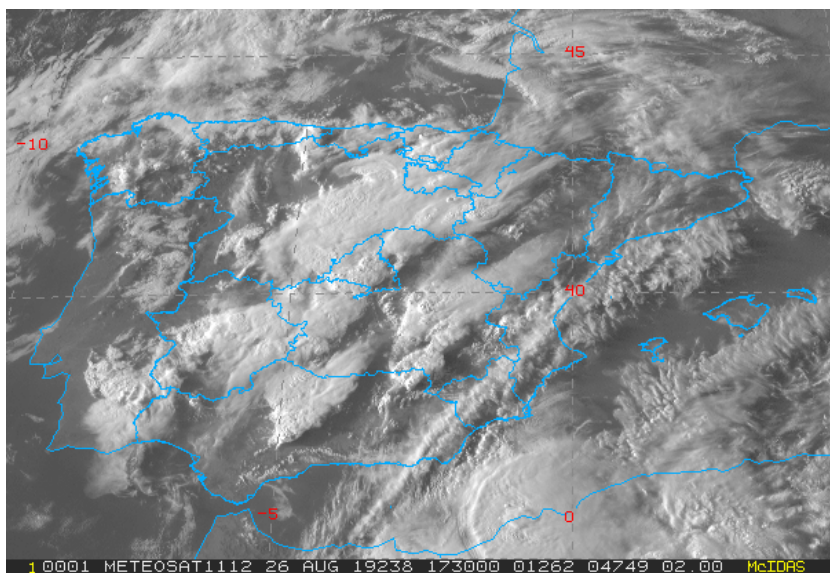


Figura 3.8. Canal HRVIS. Área peninsular. 17.30 UTC.

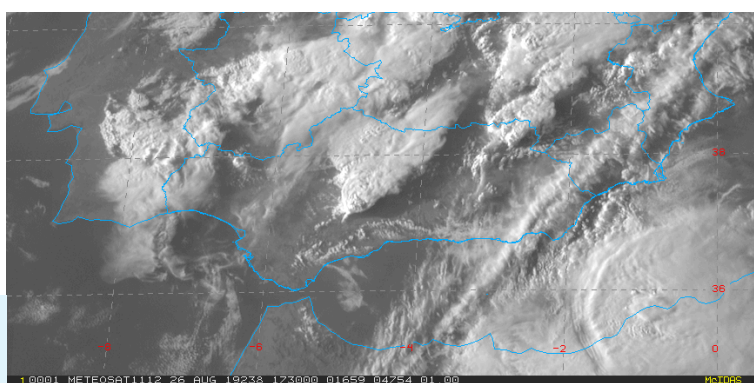


Figura 3.9. Canal HRVIS. Detalle del sur peninsular. 17.30 UTC.

Apoyándonos en los siguientes pares de imágenes de la figura 3.10 se intentan describir en detalle los desarrollos convectivos de nuestro episodio, y posterior evolución a supercélula. Se trata de una secuencia de imágenes a intervalos de 30 minutos, desde las 15.30 UTC hasta las 18.00 UTC. A la izquierda se muestra la imagen del canal visible de alta resolución HRVIS (para apreciar la textura de las estructuras nubosas) y a la derecha la imagen correspondiente del canal infrarrojo IR10.8 con realce Previmet (para apreciar la temperatura de los toques nubosos, y por tanto, intuir la profundidad de los desarrollos). La escala de temperaturas de los toques se muestra a continuación.

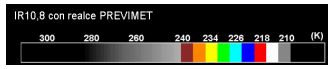
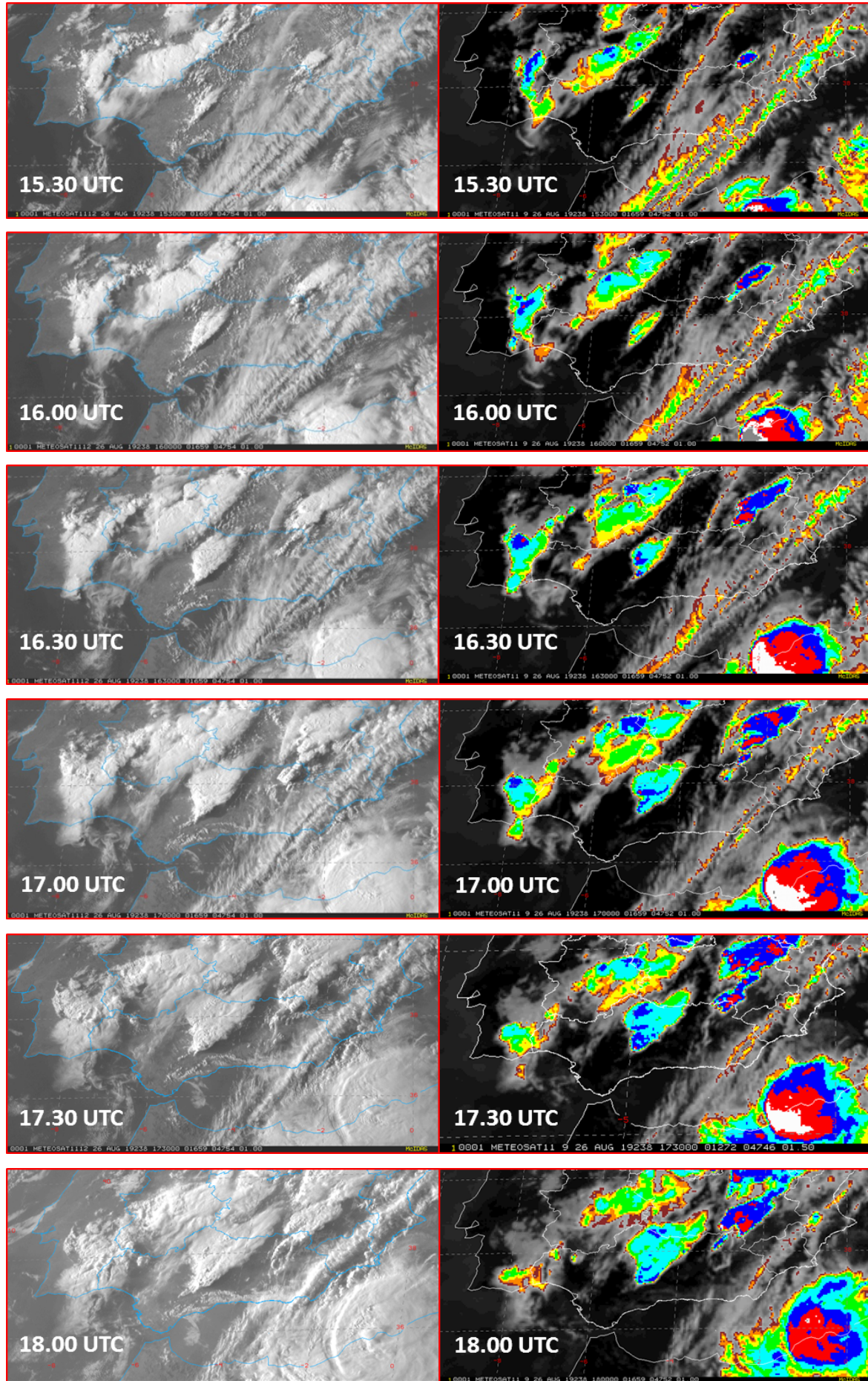


Figura 3.10. Imágenes HRVIS e IR con realce Previmet. Sur peninsular.



En el primer par de imágenes, 15.30 UTC, se aprecia nítidamente una banda nubosa estriada orientada del SW al NE que cruza por el sureste peninsular, atravesando Almería, Murcia y Alicante. Se trata de los restos de la «llamarada» que se describía con las imágenes del vapor de agua y del infrarrojo. Dispone de diminutas bandas nubosas orientadas perpendicularmente al flujo principal, que recuerdan a una «espinas de pescado», característica de entornos con ondas de gravedad atrapadas en su seno, cuyos toques forman finos cirros. Si nos fijamos más al oeste de esta estructura nubosa, apreciamos una zona más despejada, también orientada del SW al NE, que se corresponde con el máximo de viento del flanco delantero de la dana. Es aquí, observando la imagen HRVIS, donde se aprecia una estructura nubosa algo más definida, que destaca en el interior de Andalucía entre una multitud de cúmulos, presentes más al norte en el área de sierra Morena, y más al sur en las sierras malagueñas. Se trata del germen de nuestra posible tormenta supercelular, cuyos toques nubosos más finos se estiran hacia el nordeste, arrastrados por el máximo de viento de SW en niveles altos.

En el siguiente par de imágenes de las 16.00 UTC, los desarrollos convectivos señalados han ganado entidad, tanto en extensión como en profundidad. Fijándonos en las imágenes de IR con realce, vemos que sus toques nubosos han pasado de tonos verdosos a tonos azulados, lo que quiere decir que ha habido movimientos verticales más profundos, alcanzando temperaturas más bajas. En los dos siguientes pares de imágenes, de las 16.30 y 17.00 UTC, la convección continúa en fase de crecimiento, con toques nubosos más fríos en tonos rojizos (hasta $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$) y con un espectacular cumulonimbo cuyo yunque abarca gran parte de la provincia cordobesa.

A continuación, en el par de imágenes, de las 17.30 UTC, el cumulonimbo «cordobés» parece perder entidad, con toques nubosos menos fríos y estructuras nubosas más difusas, muy moldeadas por el máximo de viento. Sin embargo, los desarrollos convectivos situados más al sur parecen tomar el relevo, y se aprecia un gran cumulonimbo con características visuales de tipo supercelular. En la imagen HRVIS podemos ver el «*overshooting top*», destacado por un pixel en tono rojizo en la imagen contigua del infrarrojo realzado. Fijándonos de nuevo en la imagen del visible de alta resolución, se pueden intuir las ondas de gravedad sobre el velo del yunque, formadas como consecuencia de la penetración en la tropopausa de la fuerte corriente ascendente. La inversión propia de la estratosfera frena de manera «elástica» el brusco ascenso de aire, desatando la formación de ondas de gravedad, que se desplazan horizontalmente y son visibles sobre los toques nubosos del yunque. Por último, en la imagen HRVIS se distingue también una protuberancia nubosa hacia el sur de la tormenta, señalando hacia el mar de Alborán, que parece constituir la «*flanking line*» característica de las supercélulas, y que señala la dirección de alimentación de la tormenta.

En el último par de imágenes, correspondiente a las 18.00 UTC, parece intuirse el inicio del decaimiento de todas las estructuras convectivas, incluida nuestra supercélula, con toques nubosos menos fríos. La imagen del visible de alta resolución es la última disponible del día, situándose el sol muy próximo al ocaso, como se puede apreciar en la sombra más oscura que se proyecta hacia el este sobre una superficie muy extensa. Este hecho puede apreciarse desde el inicio del episodio, a las 15.30 UTC, cuando la sombra proyectada al este de los primeros desarrollos convectivos era más nítida pero más reducida, debido a una mayor altura del sol sobre el arco solar.

Con objeto de ayudar a interpretar la descripción anterior, en la figuras 3.11 y 3.12 se muestran dos fotografías de la supercélula de Campillos, tomadas por sendos aficionados a la meteorología.

En las figuras 3.13 y 3.14 se hace un zoom en la zona de interés, con objeto de mostrar en detalle el desarrollo de la tormenta, desde su formación, posterior desarrollo y, por último, posible evolución a supercélula. En la imagen de las 17.30 UTC pueden apreciarse más nítidamente las características supercelulares mencionadas.

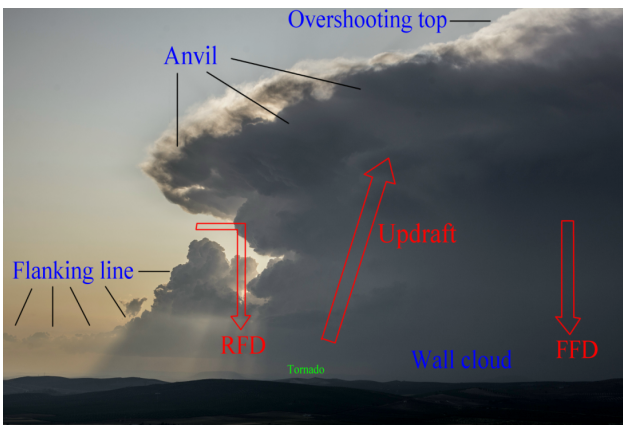


Figura 3.11. Fotografía tomada desde Archidona, mirando hacia el oeste. 17.30 UTC. Adrián Valencia. @ArchidonaMeteo.

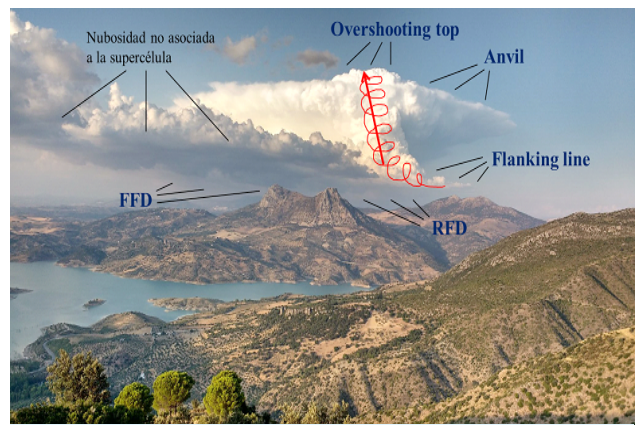


Figura 3.12. Fotografía tomada desde Zahara de la Sierra (Cádiz) mirando hacia el este. 18.00 UTC. @Jkiko_es.

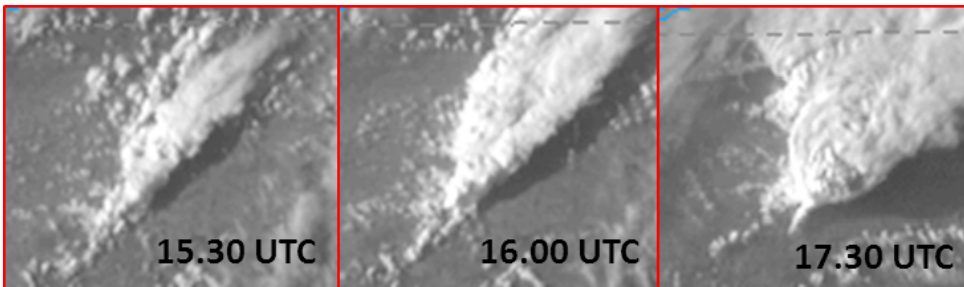


Figura 3.13. Detalles canal HRVIS en el entorno de Campillos. 15.30, 16.00 y 17.30 UTC. En la última imagen se aprecian ondas de gravedad sobre el velo del yunque.

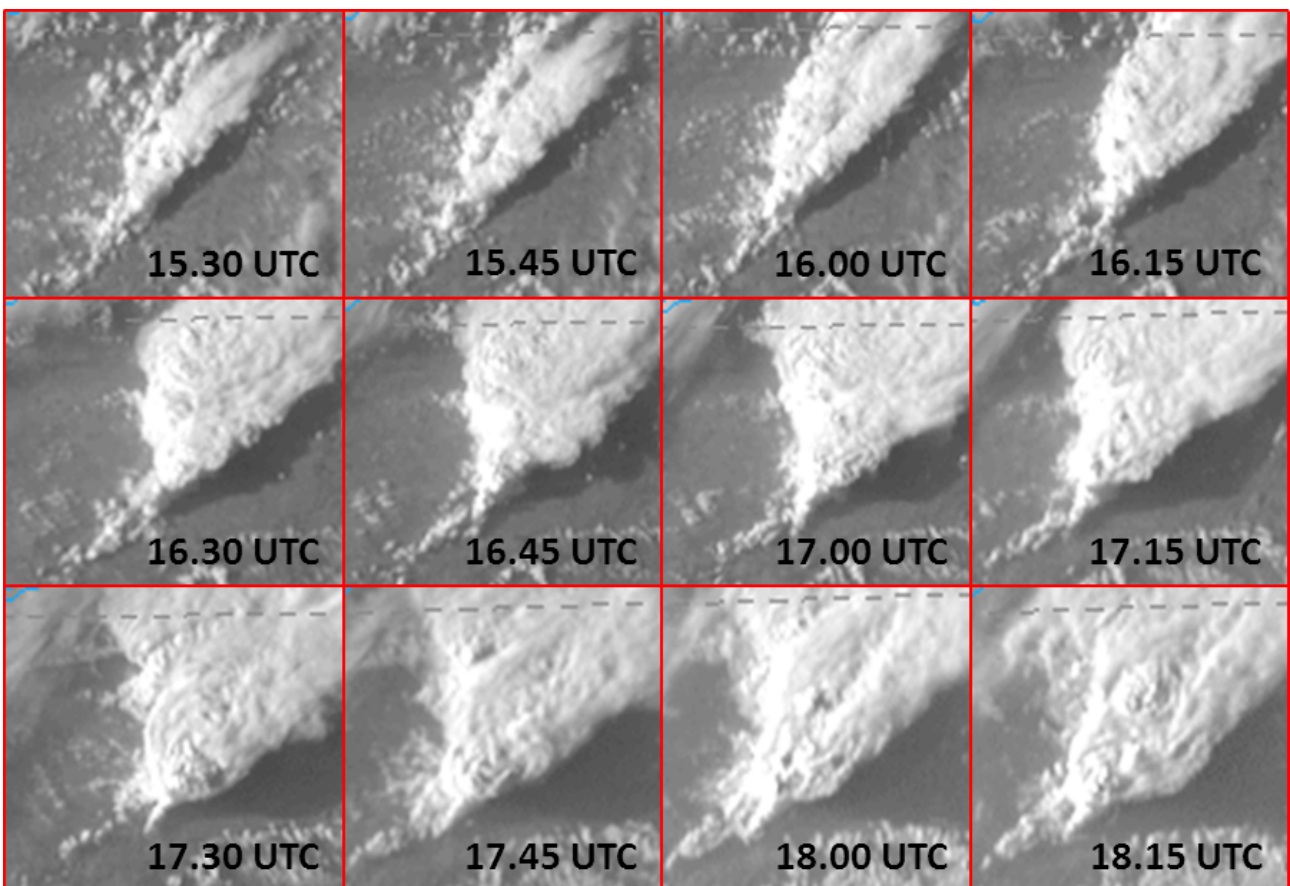


Figura 3.14. Detalles canal HRVIS en el entorno de Campillos a intervalos de 15 minutos.

Por último, en las figuras 3.15 y 3.16 se muestran imágenes *sandwich* con el realce propuesto por el grupo de trabajo de convección de EUMETSAT. Combinan el canal IR10.8 realzado con el HRVIS en una misma imagen. El canal IR10.8 nos proporciona información sobre la temperatura de brillo de los topes nubosos, y por lo tanto da una idea sobre la altura a la que se encuentra el tope. El canal HRVIS da información sobre la textura de los topes nubosos, permitiendo detectar *overshooting tops* y otros indicios de adversidad de la tormenta. Así pues, se trata de un producto muy recomendable para la vigilancia de episodios convectivos desde el punto de vista satelital, ya que proporciona la información sobre temperatura y estructura visible del tope nuboso en una misma imagen.

En la figura 3.15 se observan distintas estructuras convectivas sobre el sur peninsular así como un posible sistema convectivo de mesoescala sobre el norte de África. Se distingue muy bien la convección profunda sobre el sureste de Castilla - La Mancha y el entorno de la sierra de Cazorla, así como en el interior de Andalucía. La imagen es de las 17.30 UTC, cuando se pueden intuir más nítidamente las características supercelulares de nuestra estructura convectiva objeto de estudio, como ya hemos deducido con las imágenes del canal HRVIS.

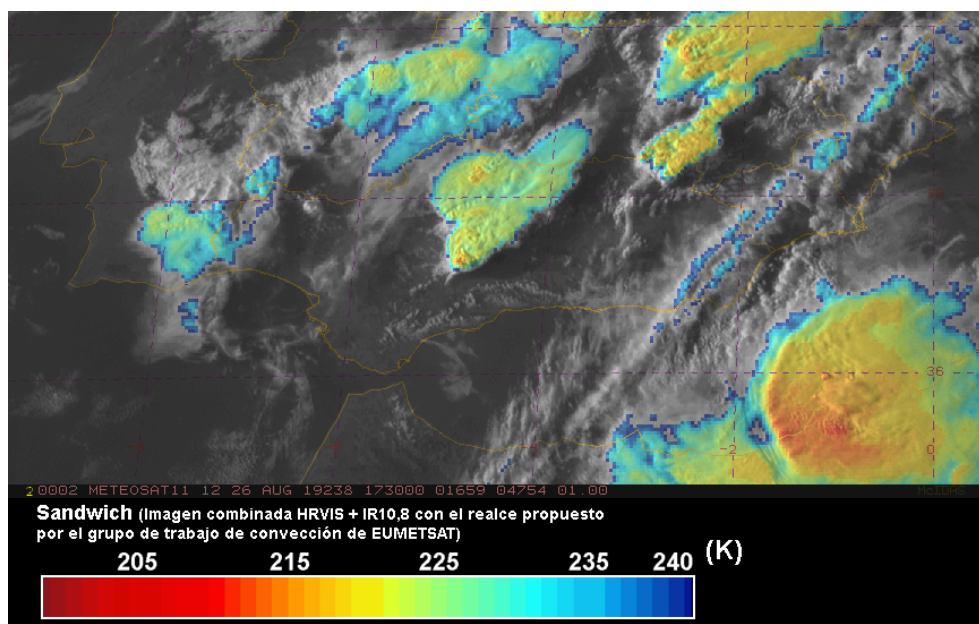


Figura 3.15. Imagen *sandwich* del sur peninsular a las 17.30 UTC.

En los capítulos 4 y 5 de este trabajo se caracteriza en detalle el episodio, mediante un análisis de los datos de observación radar y de descargas eléctricas. Sin embargo, la información que se desprende de un análisis minucioso de las imágenes *sandwich* es coherente, como no podría ser de otra forma, con dicha caracterización *radar* y de *descargas eléctricas*. Para ello, en la figura 3.16 se presenta un panel de imágenes *sandwich* cada 15 minutos, con un zoom en el entorno de Campillos.

El desencadenante del episodio es una posible división celular (*splitting storm*) en torno a las 17.00 UTC, cuyo miembro a derechas RM (*right mover*) evoluciona a supercélula SP, sobre las 17.30 UTC. A continuación, en torno a las 18.15 UTC, y como consecuencia de las convergencias que surgen, se produce la formación de una nueva célula N, al norte de nuestra supercélula. Finalmente, en la fase de decaimiento de la SP, se forman hasta tres tornados (descritos más en detalle en el estudio de campo del capítulo 6 de este trabajo). Gracias a las texturas realzadas en las imágenes *sandwich*, es posible intuir los *overshooting tops* de las células comentadas (en tonos rojizos), así como las ondas de gravedad que se desplazan horizontalmente sobre los yunques.

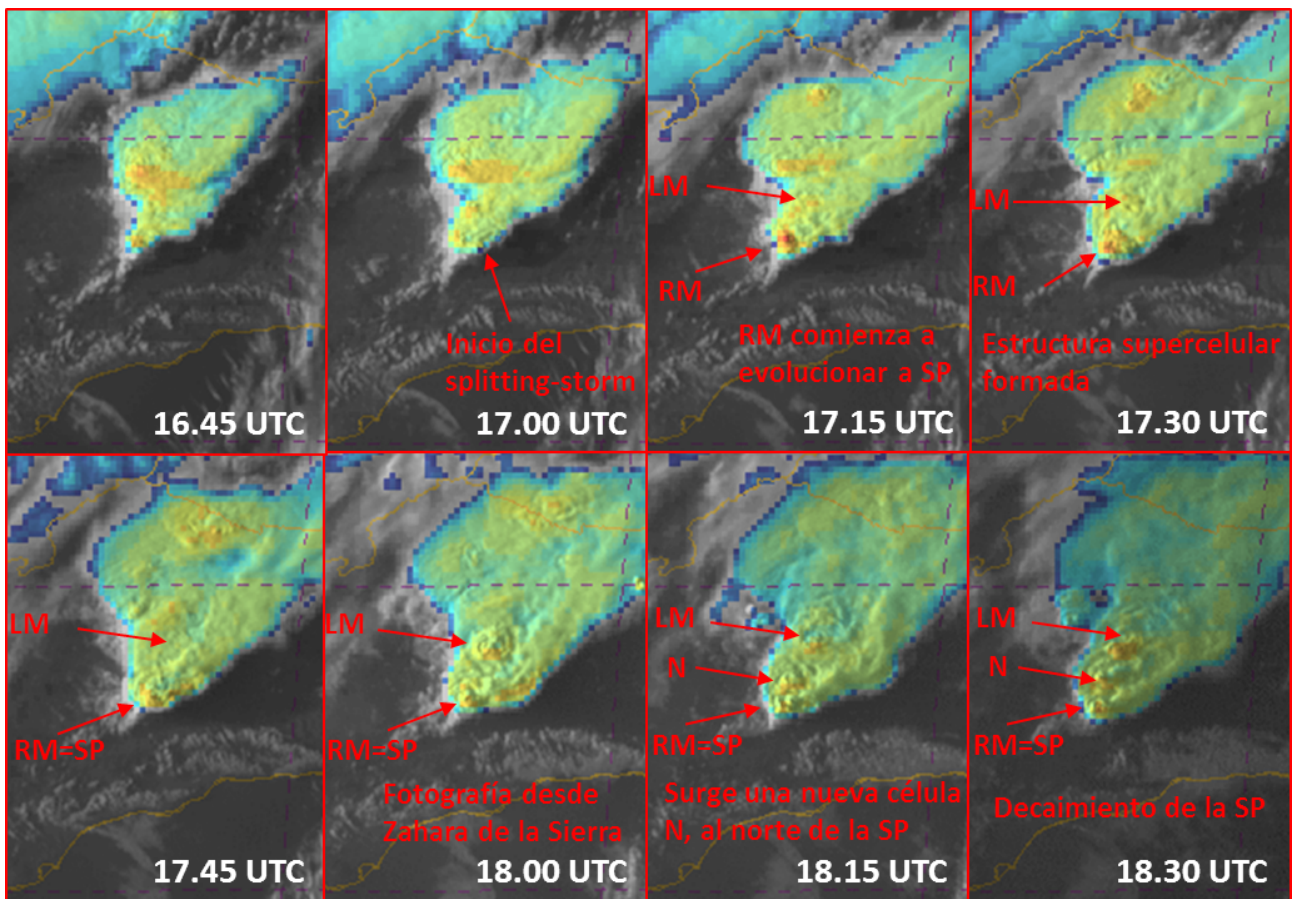


Figura 3.16. Secuencia de imágenes *sandwich* del entorno de Campillos.

4. RADAR

En este capítulo se intenta poner de manifiesto la génesis, evolución y trayectoria de una estructura muy organizada que finalmente acabó generando varios tipos de fenómenos meteorológicos adversos en los términos municipales de Sierra de Yeguas y de Campillos, principalmente precipitación intensa, granizo y tornados, todos ellos asociados a convección profunda organizada.

En realidad, en zonas de orografía compleja como la que nos ocupa, es complicado hacer un seguimiento exhaustivo de algunas características tormentosas a partir del sistema de radares de AEMET, por lo que algunas ideas que se expondrán surgen como hipótesis de lo que probablemente pudo haber sucedido en función ya no solo del radar sino de otros elementos de teledetección y de material gráfico disponibles que en gran abundancia aparecieron fundamentalmente en medios de comunicación y redes sociales. También es importante tener en cuenta algunas limitaciones del sistema actual de radares de AEMET en la detección de las supercélulas típicas de España (QUIRANTES *et al.*, 2014).

4.1. SEGUIMIENTO DE LA CONVECCIÓN EN RADAR SEGÚN DISTINTOS INTERVALOS TEMPORALES

A pesar de las dificultades intrínsecas de esta tarea, se hará una descripción de la evolución de las tormentas en la zona de estudio, tratando de seguir la que finalmente sería responsable de los tornados, a partir de un estadio inicial tormentoso del que derivaría «nuestra tormenta». Y diferenciaremos toda la secuencia de interés en el sistema radar, en cuatro intervalos temporales bien definidos.

II. Primer intervalo horario. 15:30 a 17:10 UTC

Surgimiento de tormentas en la provincia de Sevilla acercándose lentamente a la frontera de la provincia de Málaga e introduciéndose finalmente en esta.

Es poco antes de las 15:30 UTC del día 26 de agosto de 2019 cuando empiezan a identificarse claramente en radar, algunas tormentas en el sureste de la provincia de Sevilla (figura 4.1).

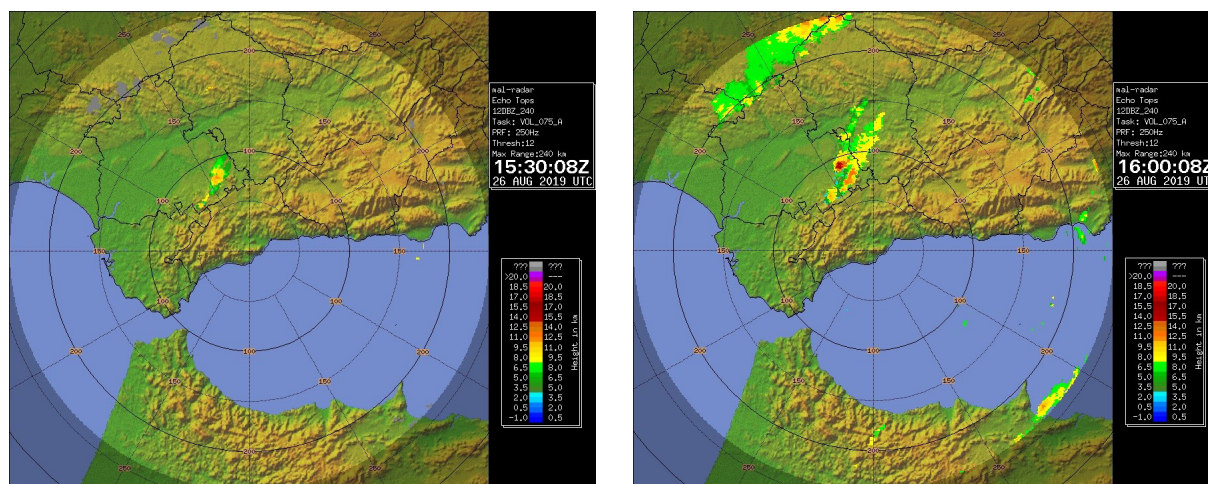


Figura 4.1. Imagen de *echotop* del radar de Málaga a 15:30 y 16:00 UTC en la fase inicial en que salta la convección en forma de líneas y tormentas organizadas en el sur de la provincia de Sevilla.

Seguidamente las tormentas se desplazaron muy lentamente hacia el noreste, en concreto hacia el límite de la frontera entre las provincias de Sevilla y Málaga, zona que es alcanzada hacia las 17:00 UTC por la estructura tormentosa con convección intensa y profunda que es fruto del presente estudio (figura 4.2).

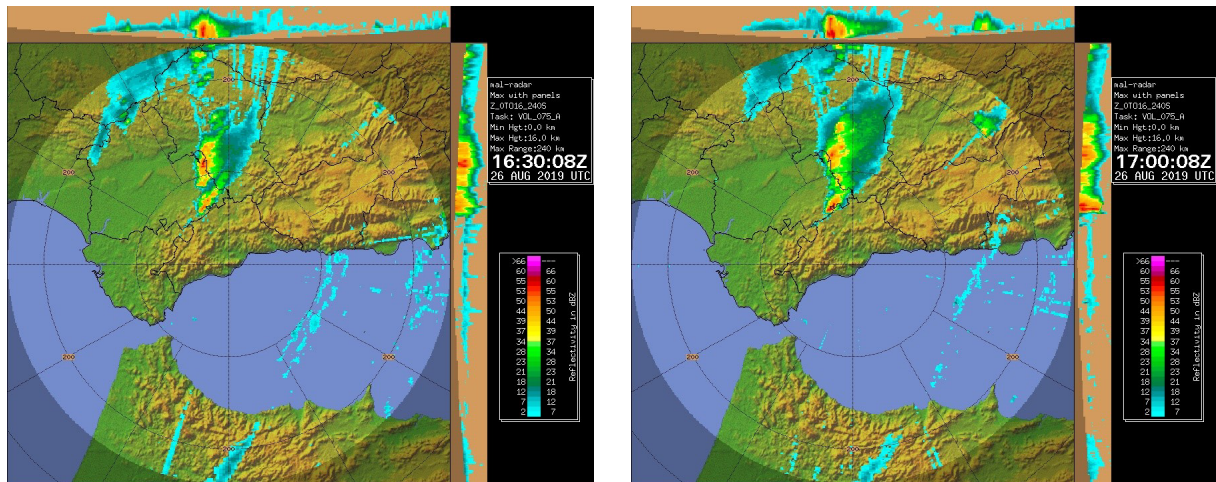


Figura 4.2. Imágenes del máximo de reflectividad del radar de Málaga (Zmax), a 16:30 y 17:00 UTC.

12. Segundo intervalo horario. 17:10 a 18:10 UTC

Formación de un splitting storm (SS1) con célula right mover (R1), con características probablemente supercelulares de baja precipitación y movimiento cuasiestacionario.

Al principio de este segundo tramo horario de estudio se produce una división tormentosa (*splitting storm 1*, que denominamos **SS1**). Ya a las 17:16 UTC se observa la existencia de las dos células **R1** y **L1** fruto de la citada división (figura 4.3.). Ya se mostró previamente en este trabajo cómo el ambiente era favorable a la aparición de supercélulas.

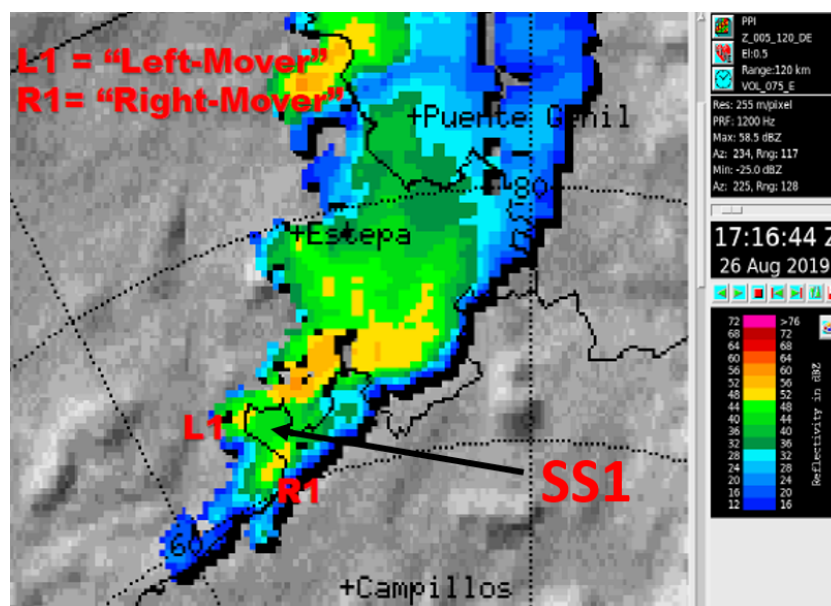


Figura 4.3. Instante en el que se observa que ya se ha producido el *splitting storm* (denotado por SS1), en la imagen del PPI de exploración corta del radar de Málaga (17:16 UTC).

Es la célula de la derecha, **R1** (*right mover*) la que rápidamente se intensifica y se mueve de forma casi estacionaria en el límite norte de la provincia de Málaga (término municipal de Sierra de Yeguas), mientras que la célula de la izquierda, **L1** (*left mover*) presenta menos intensidad y se mueve hacia el norte (figura 4.4).

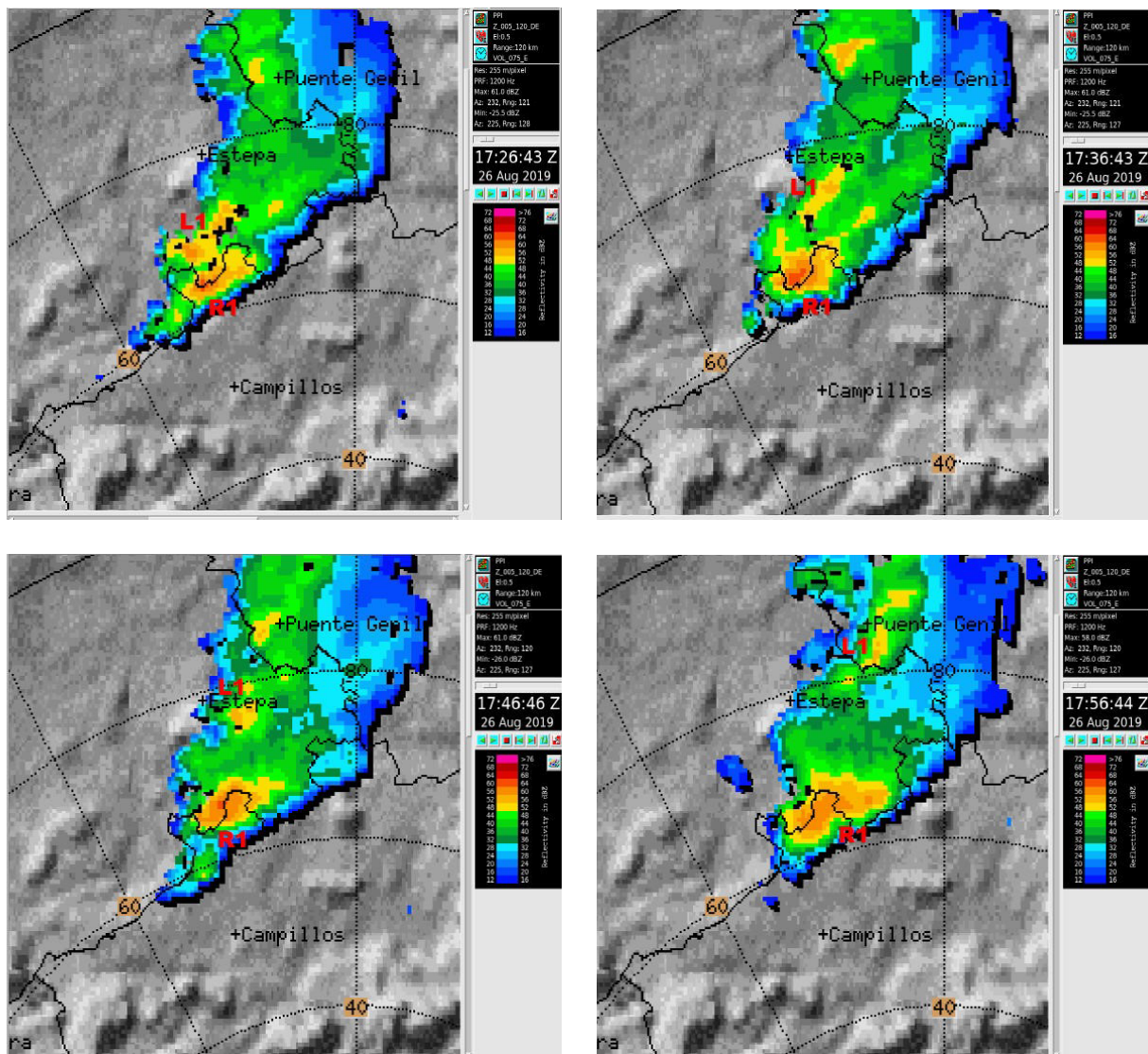


Figura 4.4. Evolución entre 17:26 y 17:56 UTC de la célula *right mover* (R1) y *left mover* (L1) tras la división tormentosa **SS1** (17:16 UTC).

A las 18:06 UTC se puede comparar la imagen radar de reflectividad PPI de $0,5^\circ$ de exploración en el modo de corto alcance de 120 km y una foto de la nube tormentosa realizada desde Zahara de la Sierra (provincia de Cádiz) a unos 50 km al W-SW de Campillos en línea recta (figura 4.5). En la imagen radar parece apreciarse una estructura en gancho, mientras que en la foto se adivina el mesociclón (*updraft* ascendente hasta la tropopausa con el *overshooting top*). En este momento podemos afirmar que la célula **R1** presenta características visuales y de señal radar propias de una supercélula del tipo **LP** (*low precipitation*), como veremos a continuación.

La figura 4.6 muestra las proyecciones verticales en la dirección norte-sur, vistas desde el oeste, del producto ZMAX (reflectividad máxima) del radar de Málaga (sistema IRIS), desde las 17:20 UTC hasta las 18:20 UTC. No es un corte vertical estrictamente hablando pero, al no existir señal de reflectividad al este de la célula R1, la proyección norte-sur nos da información sobre su estructura vertical.

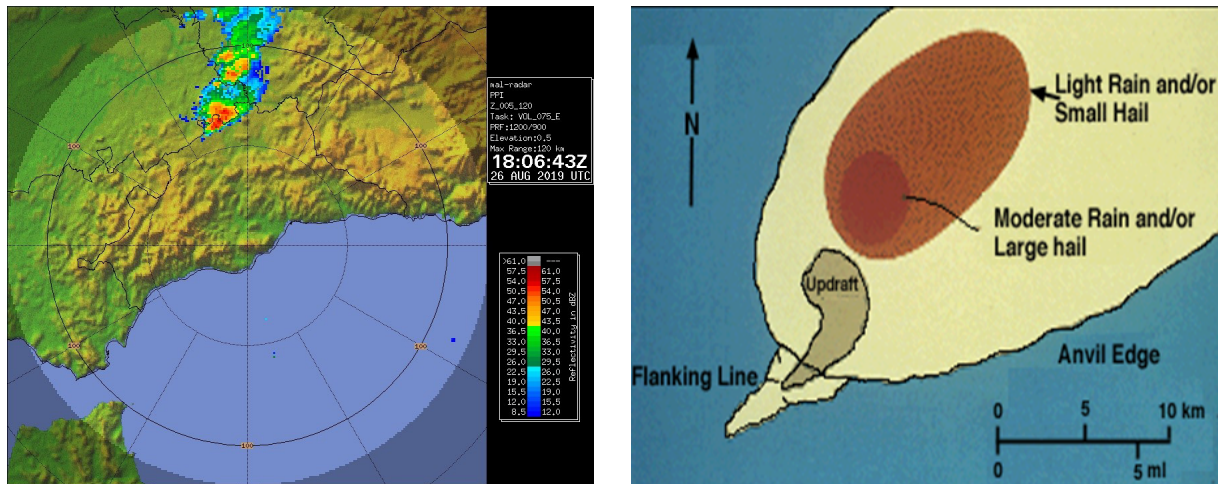


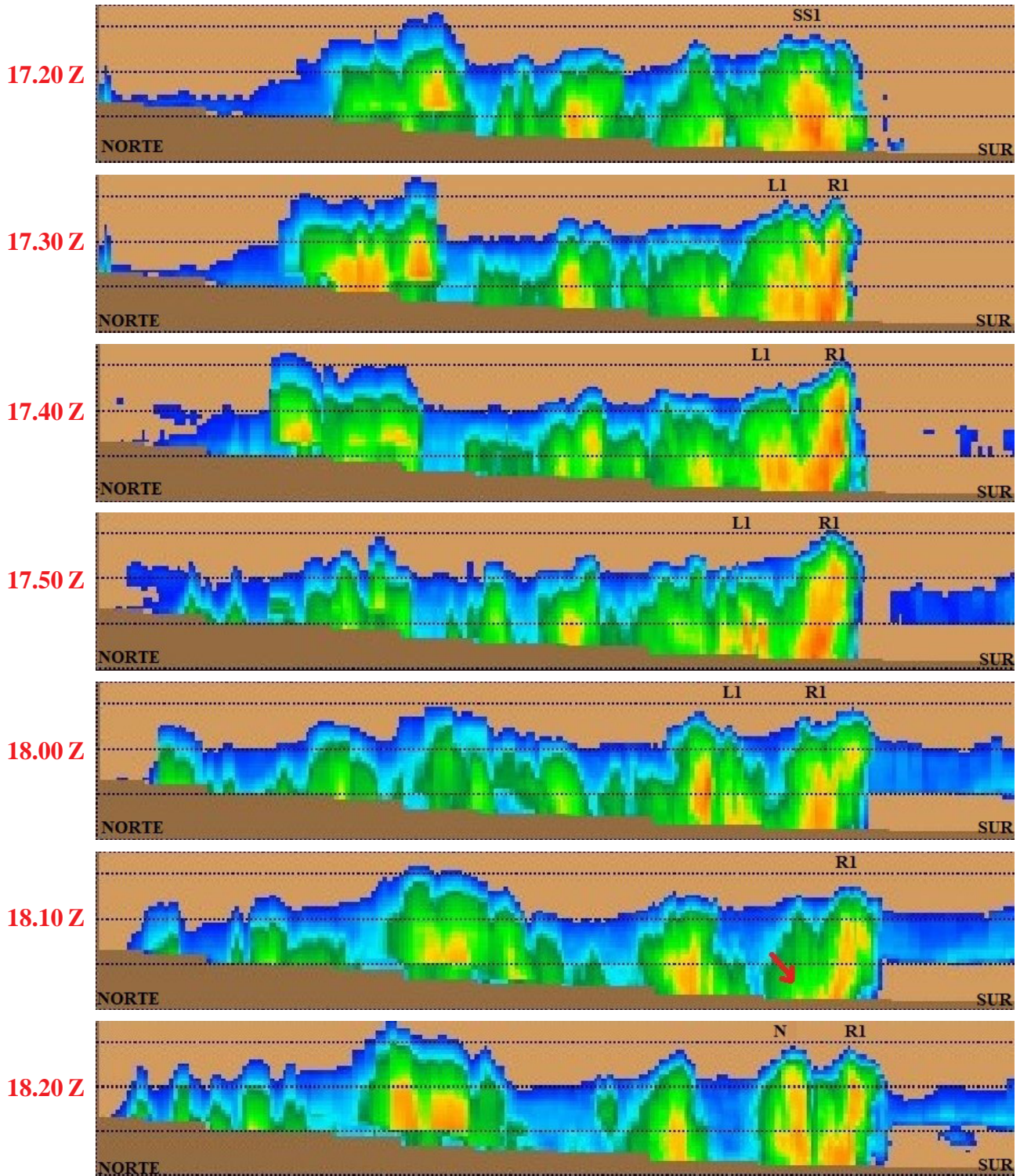
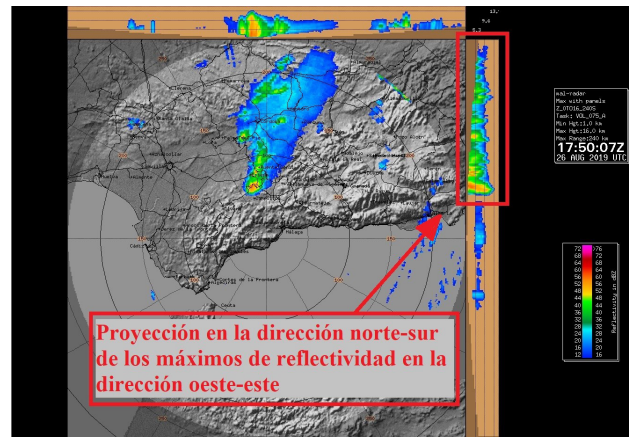
Figura 4.5. Comparativa a la misma hora, de la imagen de reflectividad del PPI más bajo del radar de Málaga (arriba izda.) y de la foto realizada por Jkiko, publicada en su cuenta twitter @kiko_es (abajo). También se presenta (arriba dcha.) el modelo conceptual de supercélula del tipo LP (low Precipitation), extraído de [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/svr/type/spr/lp/chr.xml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/type/spr/lp/chr.xml).

Se puede observar que como resultado del primer *splitting storm*, *SSI*, surgen dos células L1 y R1. Según la teoría de la división celular, la célula que se mueve a la derecha (izquierda) del flujo medio, R1 (L1), desarrolla una corriente ascendente a la derecha (izquierda) de la corriente descendente de precipitación de la célula de la que procede, en el sentido de movimiento de la célula, lo que le confiere cierto grado de organización que puede resultar finalmente en la formación de una supercélula.

En la figura 4.6 se observa esta corriente ascendente después del *splitting storm SSI*, en el flanco sur de la estructura tormentosa R1, llegando a ser evidente a las 17:40 y 17:50 UTC. Es probable que en torno a esa hora la tormenta R1 ya tuviera características supercelulares, algo que en cualquier caso quedaría confirmado a la vista de la foto tomada desde Zahara de la Sierra a las 18:05 UTC.

La evolución temporal de la distribución de reflectividad y de la corriente ascendente puestas de manifiesto en la figura 4.6, aporta indicios de cómo la tormenta R1 pudo generar el mesociclón característico de las supercélulas. A partir de las 17:50 UTC se observa un decaimiento de la célula R1,

Figura 4.6. Proyección vertical del producto ZMAX (reflectividad máxima) en la dirección norte (izquierda) a sur (derecha), vista desde el oeste. En la imagen de la derecha se muestra el plano del proyección en la dirección norte-sur.



después de haberse intensificado mientras se mantenía estacionaria en el límite norte de la provincia de Málaga. Este decaimiento podría haber sido consecuencia del estrangulamiento del flujo alimentador de la corriente ascendente de R1 (flujo del SW), al quedar atrapado entre la corriente descendente de precipitación, al norte, y la propia orografía de la sierra de los Caballos, al sur. Esto pudo haber provocado que la corriente ascendente buscara un flujo alimentador en cotas más altas hasta encontrarlo en la cima de la sierra como un flujo del SE que predominaba en el valle del Guadalhorce, y que se caracterizaba por ser húmedo y tener altos valores de SRH (helicidad relativa a la tormenta en la capa efectiva), lo que justificaría la generación del mesociclón en la célula R1, y su posterior movimiento hacia el sur. En algunos de los cortes se aprecia muy bien la cizalladura existente que inclina la corriente ascendente de R1 y también la presencia de una zona abalconada muy característica (por ejemplo a las 18:00 y a las 18:10 UTC).

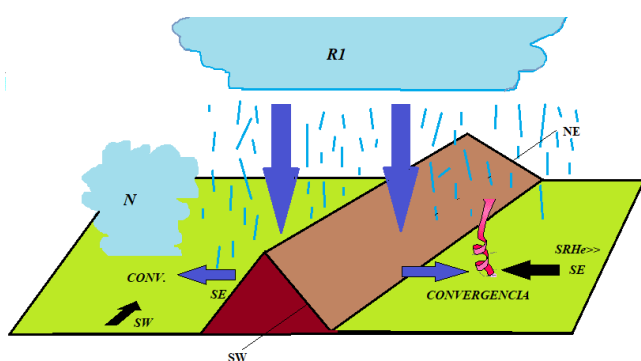


Figura 4.7. Modelo conceptual que muestra el mecanismo que pudo originar la formación del mesociclón en la tormenta R1 así como su movimiento hacia el sur, en el entorno de la sierra de los Caballos en el término municipal de Sierra de Yeguas.

Igual resultado se obtendría si la corriente descendente de precipitación hubiese afectado también a la vertiente sur de la sierra de Los Caballos pues entonces habría convergido con el flujo de SE predominante en la zona (figura 4.7).

Este instante se corresponde con el de la fotografía de la figura 4.5 que fue tomada desde el NW de la provincia de Cádiz en dirección NE, en la que se observa en primer término la corriente ascendente y se adivina el giro del mesociclón así como la *flanking line*, apareciendo detrás la zona de precipitación. Esto es compatible con la señal radar observada a esa hora (18:06 UTC) que muestra una extensa zona de señal de reflectividad sobre Sierra de Yeguas, extendiéndose en la dirección SW-NE, coincidente con la visual desde la que fue tomada la fotografía. Todas estas características son por tanto compatibles con una supercélula del tipo LP (*low precipitation*).

Recordemos brevemente que las supercélulas del tipo LP se caracterizan (figura 4.5) por:

Recordemos brevemente que las supercélulas del tipo LP se caracterizan (figura 4.5) por:

- Presentar una corriente ascendente que es reconocible visualmente, debido a la ausencia de precipitación en su entorno, y a menudo se puede identificar el giro asociado al mesociclón por la forma que adquiere la nubosidad.
- La ausencia de precipitación en el entorno de la corriente ascendente impide que se pueda detectar el giro del mesociclón en la señal radar doppler.
- La región de precipitación significativa se extiende a una cierta distancia de la corriente ascendente.

La figura 4.8 muestra la imagen radar del PPI con elevación $0,5^\circ$ en rango corto a las 18:06 UTC, tanto del viento radial (izda.) como de la reflectividad (centro), así como la imagen de proyección horizontal de reflectividad máxima en rango largo (dcha.) a 18:10 UTC. Se ha señalado con un círculo rojo la zona que probablemente se corresponde con la corriente ascendente: área sin señal de reflectividad en el PPI más bajo, sin señal de velocidad radial (no se puede mostrar el giro) y con un eco sostenido en altura coincidente con la posición de la corriente vertical. Hacia el NE se extiende una amplia zona de señal de reflectividad asociada al área de precipitación.

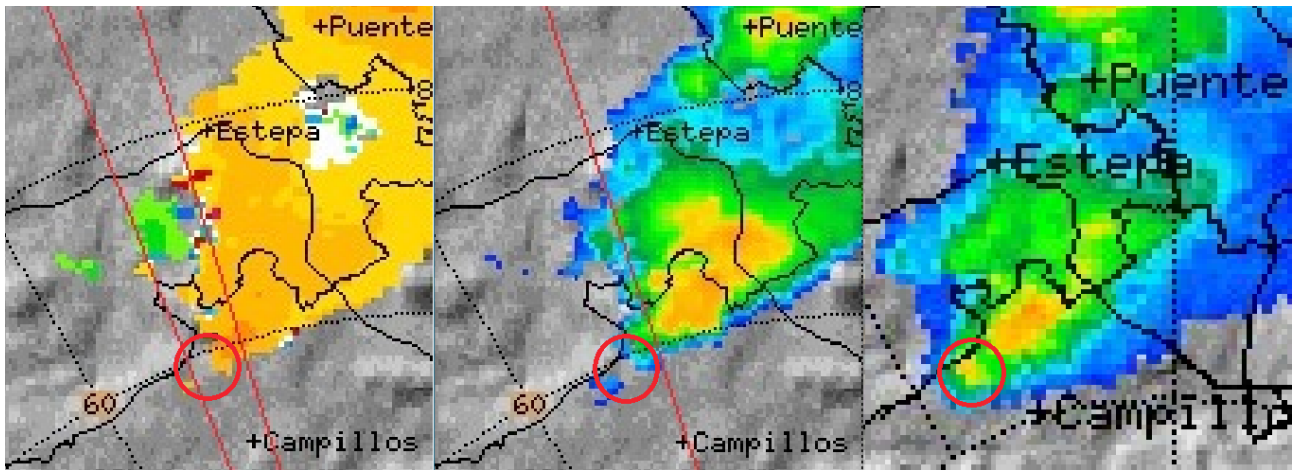


Figura 4.8. PPI 0,5° a 18:06 UTC de viento radial (izda.) y de reflectividad (centro). Zmax a 18:10 UTC (dcha.).

El modelo conceptual expuesto anteriormente explicaría no solo la generación del mesociclón en R1 sino también la posibilidad de generación de nuevas células al norte, por la convergencia de la corriente descendente de precipitación sobre la vertiente norte de Sierra de los Caballos y el flujo general del SW predominante en esa zona (figura 4.7).

Nuestra tormenta R1 de características supercelulares es también fotografiada mirando hacia el oeste desde la localidad malagueña de Archidona (situada en torno a 40 km al este de Campillos). Se observan características visuales en la nube, compatibles con una estructura supercelular (figura 4.9).

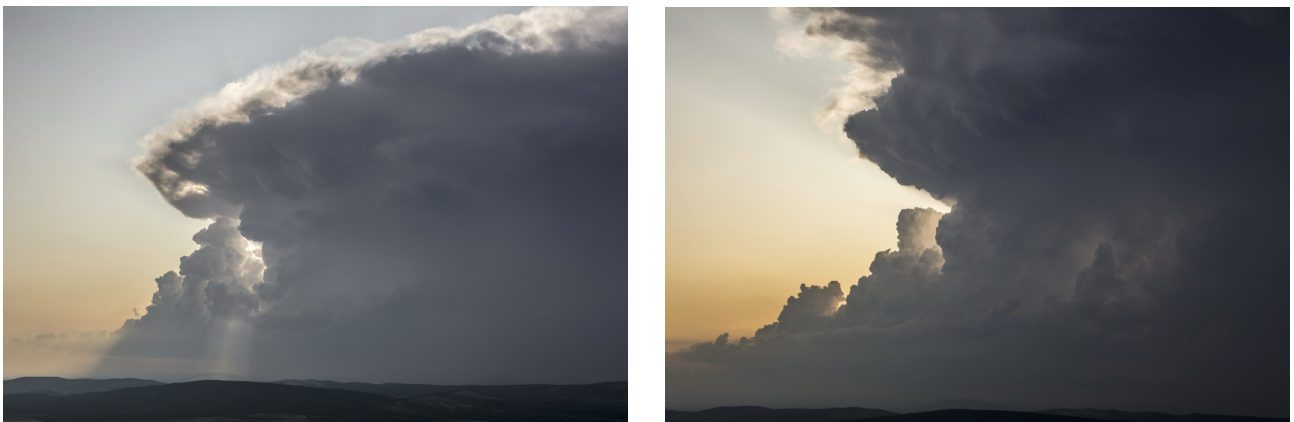


Figura 4.9. Fotos de la tormenta vista desde Archidona (situada en torno a 40 km al este de Campillos) a las 17:36 UTC (izda.) y a las 18:06 UTC (dcha.), realizadas por @MeteoArchidona.

13. Tercer intervalo horario. 18:10 a 19:20 UTC

La estructura sufre un desvío en su trayectoria, para moverse anómalamente hacia el sur con características claramente supercelulares y con presencia tornádica.

Hacia las 18:10 UTC, aproximadamente, se aprecia cómo nuestra supercélula **R1** surgida de una división tormentosa previa, SS1, ya se ha desviado respecto a su trayectoria previa y se mueve ahora claramente hacia el sur. Este desvío lo denotaremos como «**D1**» (figura 4.10). Probablemente este cambio brusco de dirección (casi 90°) responde a la variación del flujo húmedo alimentador en capas bajas que comienza a ser de componente sur en la zona (procedente del mar de Alborán por el valle del Guadalhorce) y por tanto la célula se mueve precisamente hacia el sur buscando el aporte de humedad

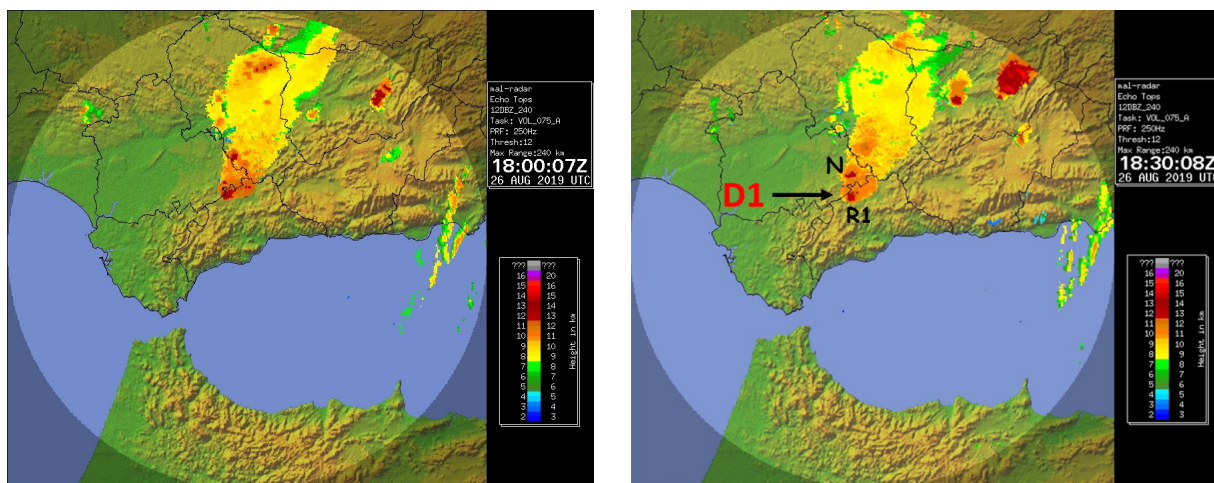


Figura 4.10. Entre las 18 y las 18:30 UTC se produce un claro *desvío* (D1) de la estructura R1, observándose una nueva tormenta N más al norte.

que le llega en esa dirección, pues en niveles medios el flujo rector no es intenso. Por otra parte parece que se genera una nueva célula más al norte, que denotaremos por «N», en la frontera de la precipitación de la célula más al sur, R1, motivo principal de este estudio. Esto se puede apreciar en el producto *echotop* (figura 4.10).

Aunque no se puede descartar de pleno que se haya producido un nuevo *splitting storm*, el desvío tan destacable en la trayectoria de la célula R1 se debió probablemente a la dinámica supercelular y su interacción con el entorno, tal y como se ha expuesto previamente. Tal y como se observa en la secuencia de imágenes del radar de Málaga de la figura 4.11, parece evidente el desvío que sufre «nuestra» célula R1 y su posterior desplazamiento hacia el sur, camino de la localidad de Campillos.

Durante esta franja horaria y según la herramienta para la identificación de la potencial adversidad de las células radar disponible operativamente en AEMET, la supercélula presentaba objetivamente valores muy significativos en algunos parámetros asociados tanto a la estructura 2D (CAPPI más bajo) como a la estructura 3D (tormenta en la vertical). En ambas presentaciones 2D y 3D vistas con el radar de Málaga, la célula convectiva aparecía con tonalidades de color fucsia, que indica potencial adversidad de tipo «2» (muy alta), o sea la máxima de la clasificación actual (figura 4.12).

- En el 2D (19:00 UTC), los valores más significativos de los parámetros son los siguientes:
 - 243 pixeles (cada pixel es de 1 km × 1 km)
 - 61,5 dBZ de reflectividad máxima en la horizontal (CAPPI más bajo)
 - 6 rayos en 10 minutos
 - 6,39 kg/m² de VIL
- En el 3D (18:40), los valores más destacables son los siguientes:
 - 62 dBZ de reflectividad máxima en la vertical
 - 9,5 km de espesor
 - 12 km de *echotop*
 - 3,4 de *dvil*, con alta probabilidad de granizo grande
 - 8,32 km/h de velocidad de desplazamiento

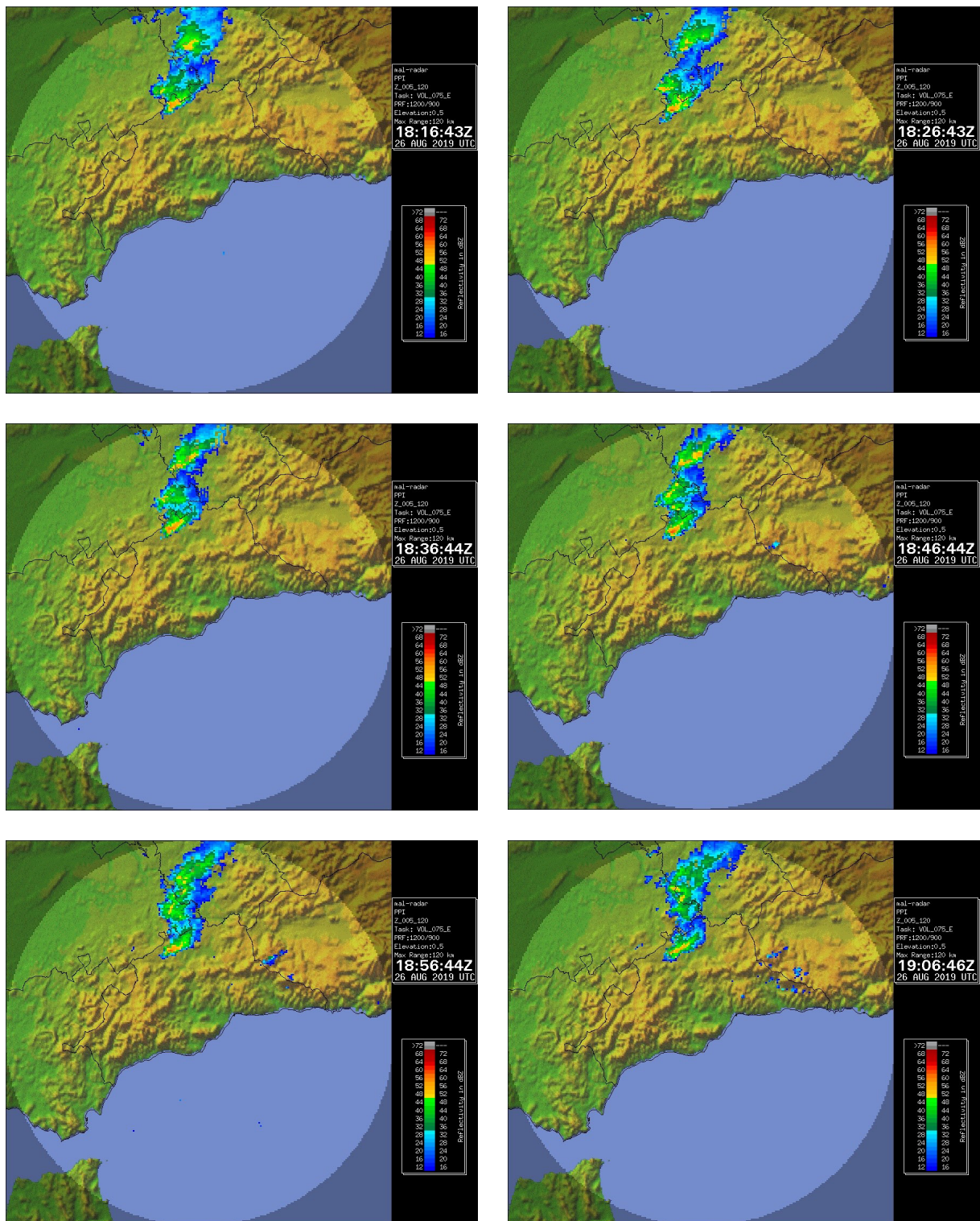


Figura 4.11. Imágenes cada 10 min del PPI de corto alcance del radar de Málaga, de 18:16 a 19:06 UTC.

Se adivina en la figura 4.13 la existencia de un mesociclón en la estructura tormentosa, al detectarse esa configuración dual con señal de alejamiento/acercamiento a ambos lados de un radio desde el radar, algo que además se mantiene en el tiempo durante varias exploraciones consecutivas.

En la figura 4.14 se muestra un zoom del PPI más bajo de reflectividad ($0,5^\circ$ de elevación) junto con la velocidad radial de acercamiento/alejamiento al radar. Aparecen algunos patrones típicos de las supercélulas, como unos ecos aproximadamente en forma de gancho, y un marcado mesociclón (giro mesoescalar de tipo ciclónico en el viento radial).

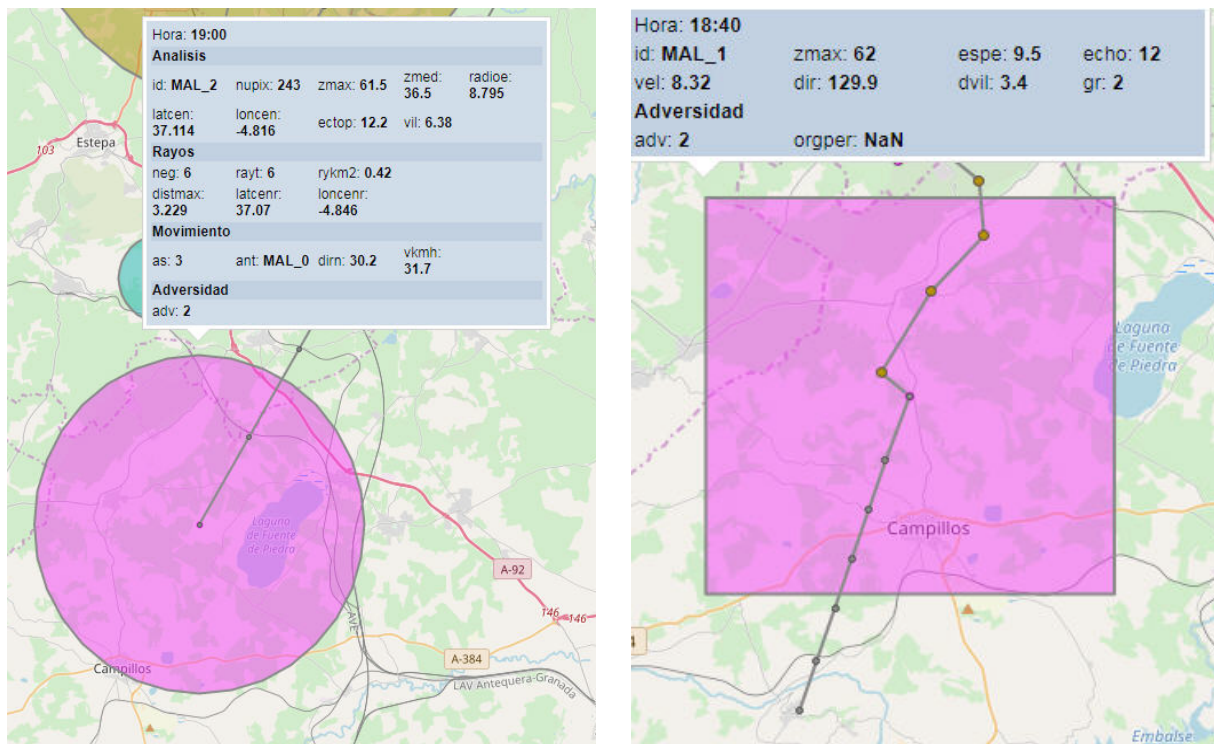


Figura 4.12. Imágenes de la estructura convectiva en el entorno de Campillos y caracterización básica en 2D (izquierda, a las 19:00 UTC) y en 3D (derecha, a 18:40 UTC).

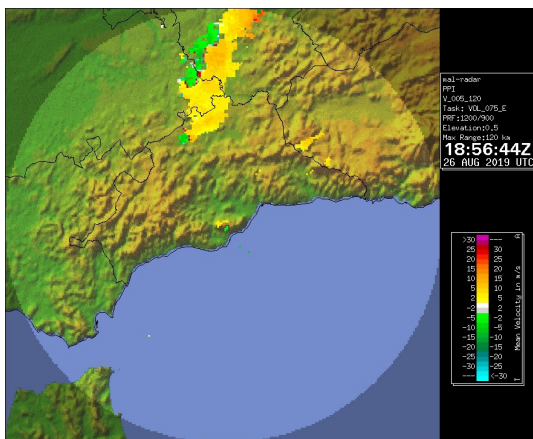


Figura 4.13. Imágenes del PPI de viento radial del radar de Málaga, a las 18:56 UTC.

En su movimiento hacia el sur, la célula R1 fue evolucionando desde una estructura compatible con una supercélula del tipo **LP** (*low precipitation*) a las 18:06 UTC, hasta una que muestra características típicas de una supercélula del tipo **HP** (*high precipitation*) a las 18:56 UTC. Entre ambos instantes es difícil mantener una correlación espacio-temporal de los patrones de velocidad radial y de reflectividad, aunque en algún instante pudo presentar características compatibles con una supercélula de tipo clásica.

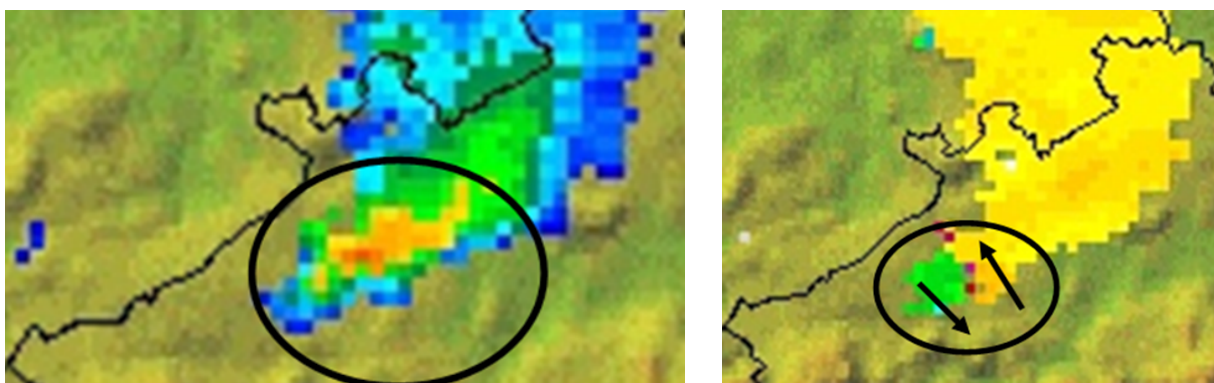


Figura 4.14. Zoom de las imágenes de PPI (reflectividad, izquierda; viento radial, derecha) a las 18:56 UTC.

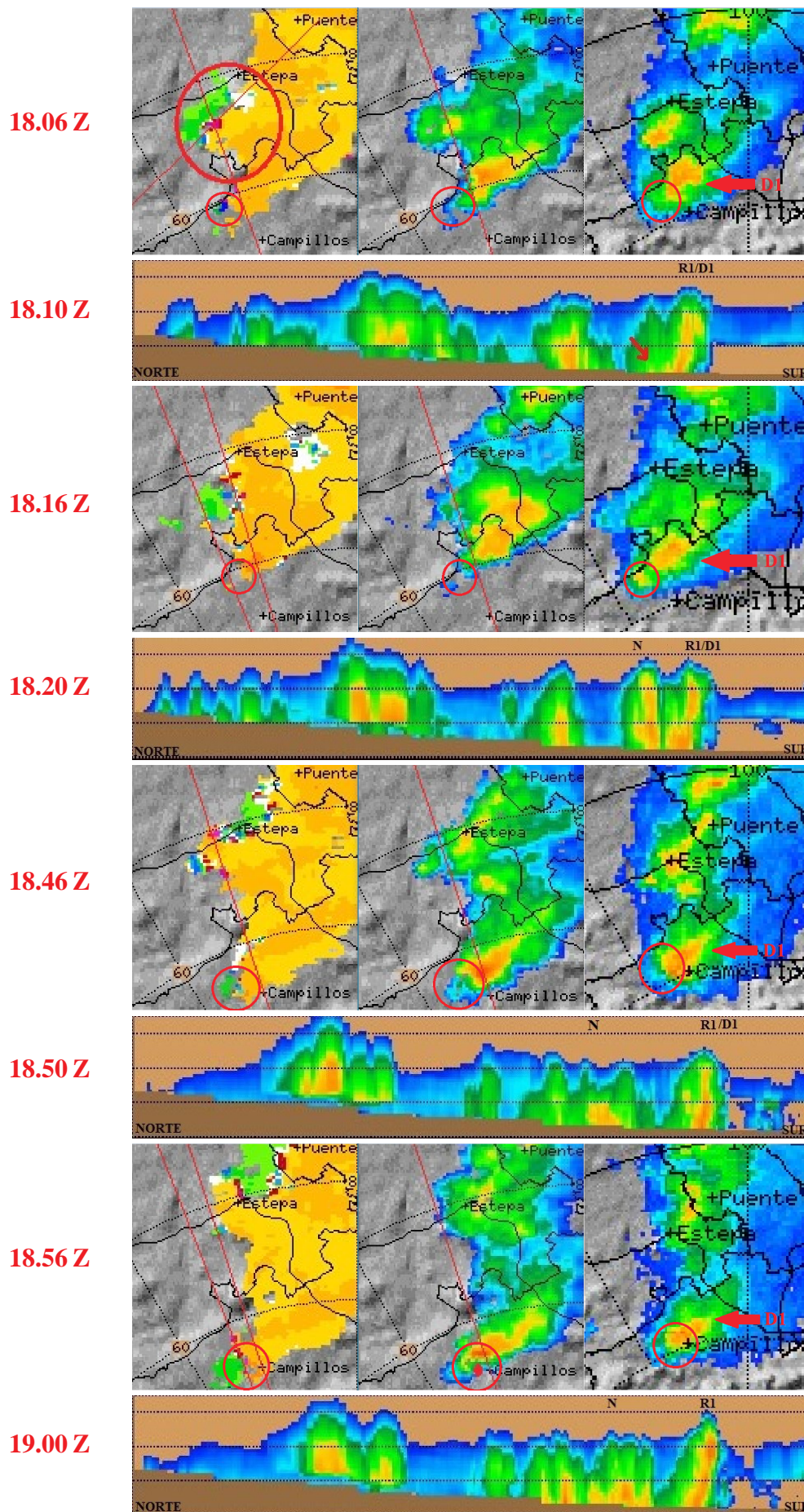


Figura 4.15. Secuencia temporal de imágenes del radar de Málaga. PPI de velocidad radial (izq.), PPI de reflectividad (centro), ZMAX (dcha.). Abajo se muestran las proyecciones norte-sur de ZMAX (reflectividad máxima), vistas desde el oeste.

La figura 4.15 muestra, para varios instantes, una composición de imágenes formadas por el PPI de $0,5^\circ$ de elevación de velocidad radial (izda.), PPI de $0,5^\circ$ de elevación de reflectividad de corto alcance (centro), reflectividad máxima —ZMAX— (dcha.) y proyección norte-sur de ZMAX vista desde el oeste (abajo). Se ha señalado con un círculo rojo pequeño, la posible ubicación del mesociclón.

A las 18:06 UTC, R1 presentaba características propias de una supercélula del tipo LP, como hemos visto más arriba.

A las 18:16 UTC se observa un patrón de giro que queda envuelto parcialmente con señal de reflectividad (precipitación) lo que nos podría indicar que R1 evolucionó rápidamente a una supercélula de tipo clásica. Este patrón también se pone de manifiesto a las 18:46 UTC.

A las 18:56 UTC el patrón de reflectividad PPI de $0,5^\circ$ envuelve la corriente ascendente, identificada como una pequeña área sin señal de velocidad radial en el eje de cambio de dirección del viento radial. Es la denominada BWER (*bounded weak echo region*). Este área y su entorno podrían asociarse al mesociclón característico de las supercélulas del tipo HP.

Esta identificación del mesociclón en radar supone por sí misma una condición suficiente para caracterizar a la tormenta como supercelular. Además existe un movimiento anómalo de esta célula respecto a las de su entorno próximo y se identifican visualmente en la nube elementos propios de una supercélula (figura 4.16).

Merece la pena anticipar en este momento, que se produjeron varios tornados en el entorno de la supercélula, alguno o algunos de ellos asociados a la fase de madurez y comienzo de la fase de decaimiento del mesociclón.

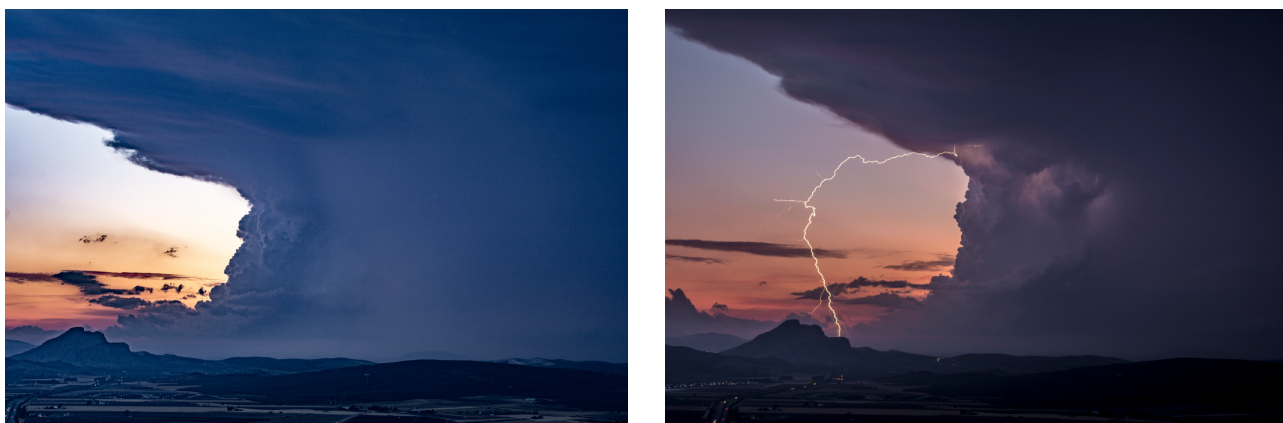


Figura 4.16. Fotos de la tormenta vista desde Archidona a las 19:00 UTC (izquierda) en la que apenas se adivina el tornado pendiente de la base de la nube y a las 19:19 UTC (derecha), realizadas por @MeteoArchidona.

14. Cuarto intervalo horario. 19:20 a 20:00 UTC

Probable estructura ya multicelular con movimiento retrógrado hacia el oeste.

Hacia las 19:16 UTC, parece dejar de observarse el mesociclón, identificándose ya una estructura multicelular que acaba de sufrir un **nuevo desvío «D2»**, comenzando a moverse de forma retrógrada hacia el oeste (figura 4.17).

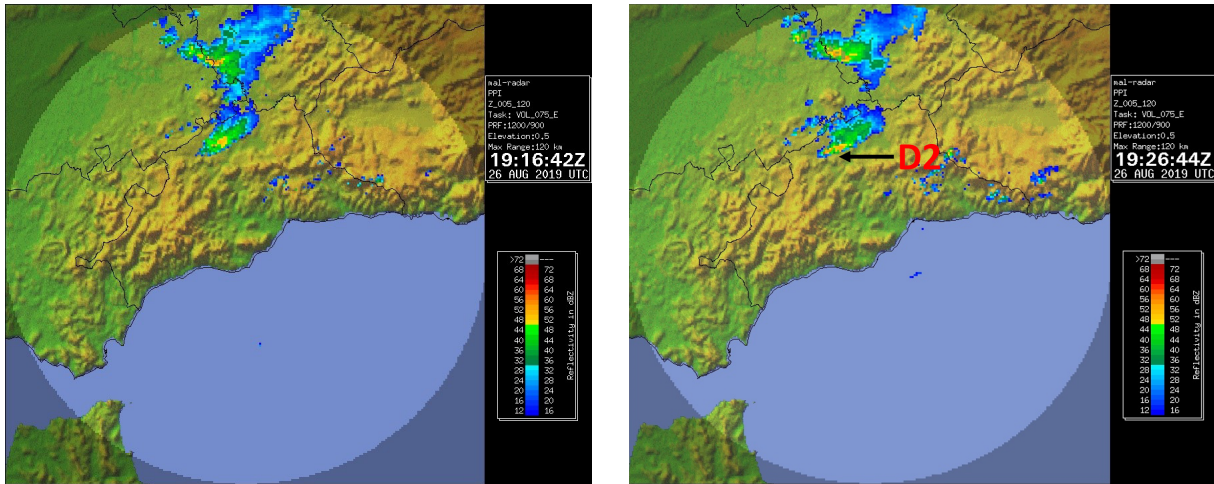


Figura 4.17. Imágenes de la estructura convectiva a partir del PPI del radar de Málaga. A las 19:26 UTC ya se ha producido un nuevo desvío de la célula, en este caso hacia el oeste, denotándose como **D2**.

Finalmente se identifica ya con nitidez una estructura convectiva multicelular desplazándose hacia el oeste por la provincia de Málaga hasta que finalmente parece que de manera definitiva decae hacia las 20 UTC (figura 4.18). En torno a esa hora es precisamente cuando cesa el flujo marítimo que llega por el valle del Guadalhorce.

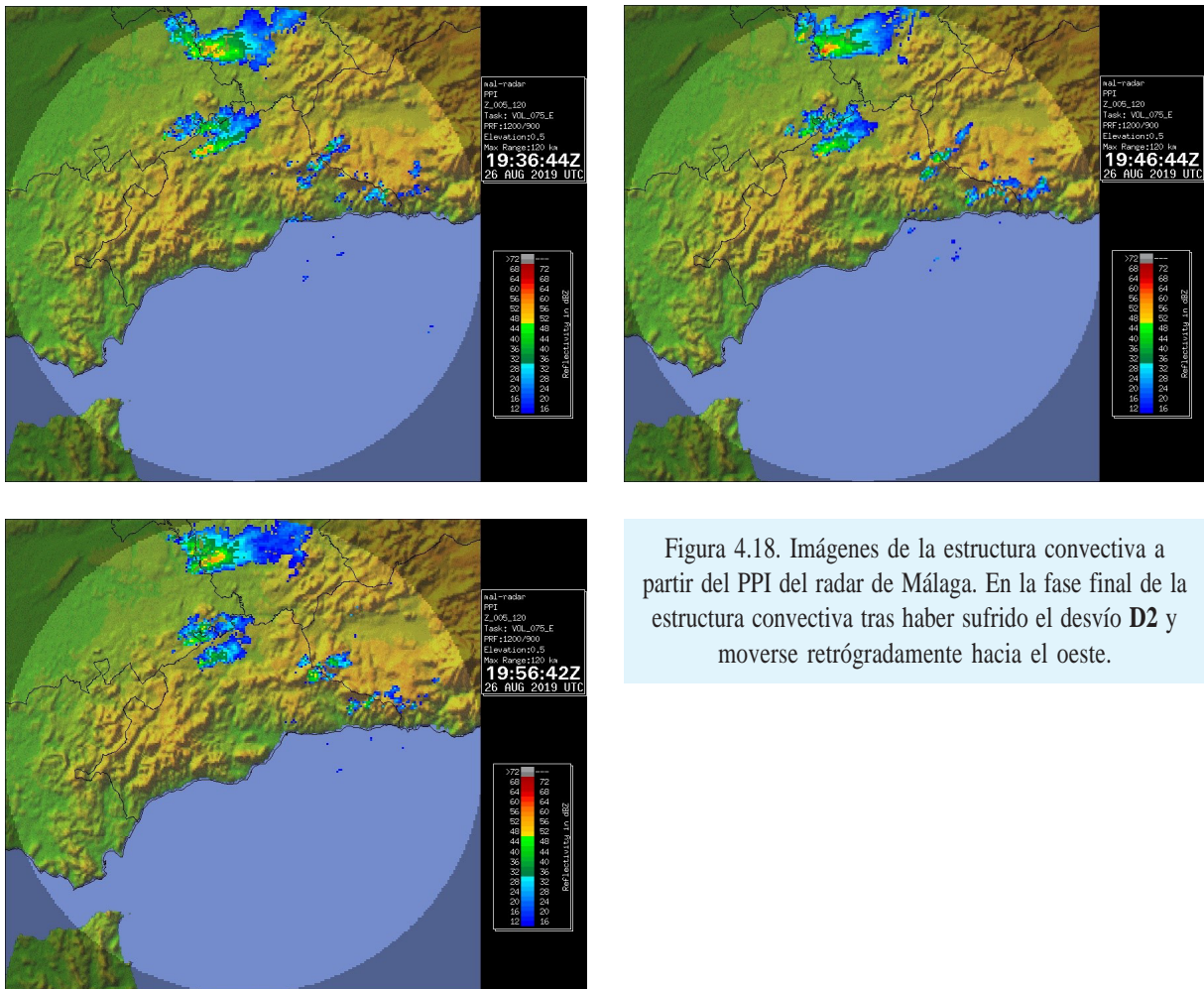


Figura 4.18. Imágenes de la estructura convectiva a partir del PPI del radar de Málaga. En la fase final de la estructura convectiva tras haber sufrido el desvío **D2** y moverse retrógradamente hacia el oeste.

4.2. RESUMEN DEL SEGUIMIENTO RADAR DE LA TORMENTA QUE AFECTÓ A SIERRA DE YEGUAS Y CAMPILLOS

Realizando el seguimiento de la tormenta que finalmente afectó a la localidad de Campillos, generando fenómenos convectivos adversos en su entorno, se pueden identificar 4 intervalos temporales delimitados de forma aproximada.

- **I1. 15:30 a 17:10 UTC.** Comienzo de la convección en el SE de la provincia de Sevilla, con tormentas que avanzan lentamente hasta alcanzar la frontera de la provincia de Málaga.
- **I2. 17:10 a 18:10 UTC.** Prácticamente al principio de este periodo surge la formación de un *splitting storm* (SS1) con célula *right mover* **R1** con características posiblemente supercelulares y movimiento cuasiestacionario en una zona de la frontera entre las provincias de Sevilla y Málaga.
- **I3. 18:10 a 19:20 UTC.** En la fase inicial de este intervalo temporal se produce un desvío (**D1**) de la tormenta *right mover* **R1** surgida del SS1. Este desvío probablemente fue consecuencia de la dinámica propia interna de la supercélula y del flujo de alimentación en capas bajas, sin descartar totalmente un nuevo *splitting storm*. En este periodo la célula se mueve «anómalamente» hacia el sur afectando a los términos de Sierra de Yeguas y Campillos con características claramente supercelulares y con presencia tornádica.
- **I4. 19:20 a 20:00 UTC.** Surge con un nuevo desvío (**D2**) hacia las 19:10 o las 19:20 UTC, cuando la estructura ya empieza a mostrar características multicelulares y un movimiento inequívocamente retrógrado hacia el oeste hasta su desaparición definitiva.

La posición aproximada del centroide de la tormenta supercelular entre las 17:10 y las 19:10 UTC, se representa en la figura 4.19. Entre las 17:10 y las 18:00 UTC la supercélula R1 (*right mover* surgida de una división celular) se movió de forma muy lenta en el límite entre las provincias de Málaga y Sevilla. Es a partir aproximadamente de las 18:10 UTC cuando se produce un claro desvío, D1, de la supercélula hacia el sur, para dirigirse hasta la localidad de Campillos, donde llega poco antes de las 19 UTC.

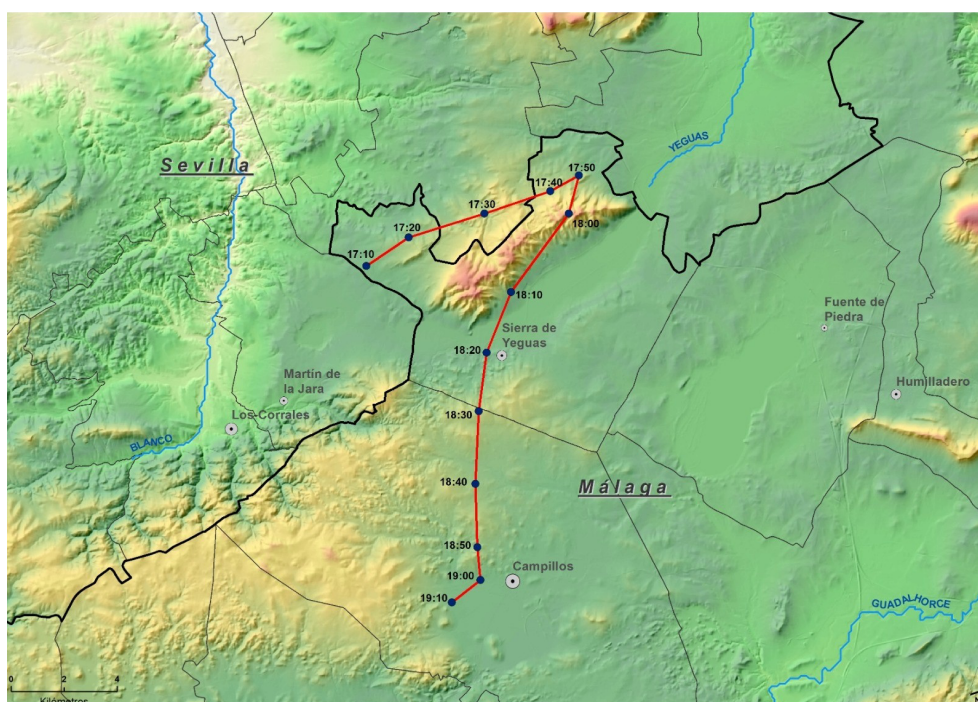


Figura 4.19. Reconstrucción aproximada a partir del sistema radar, de la posible trayectoria del centroide de la tormenta supercelular desde las 17:10 hasta las 19:10 UTC del día 26 de agosto de 2019.

4.3. PRESENCIA TORNÁDICA

Hay que hacer constar que al menos fueron filmados, mediante fotos y videos, tres tornados en la zona. Constituyen de modo irrefutable, evidencias de la presencia tornádica en el entorno de esta localidad situada en el centro norte de la provincia de Málaga.

En cuanto a los radares de AEMET es casi imposible la detección directa de tornados en España a partir de este sistema. Ello se debe por una parte a la resolución espacial de las imágenes radar, ya que cada pixel representa un área de $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ (en el modo de alcance corto) y los tornados apenas tienen varias decenas de metros de diámetro en nuestro país, o a lo sumo 1 o 2 centenares. Además, para poder visualizar alguna señal categórica de tornado en radar, este debería pasar muy cerca de su emplazamiento, ya que al tener una exploración de $0,5^\circ$ de elevación, a distancias significativamente lejanas el haz del radar va creciendo en altura respecto al terreno y exploraría una zona muy elevada. Únicamente en casos especiales en que un tornado tuviera un tamaño lo suficientemente grande, de más de 1 km de diámetro, el radar podría teóricamente identificar un giro mediante la presencia de 2 pixeles contiguos y opuestos en cuanto a acercamiento/alejamiento al radar, lo cual es extraordinariamente complejo por la improbabilidad tan manifiesta de encontrar tornados en España de esas dimensiones. Aparte el tornado tendría que estar muy cerca del radar, a menos de unos 30 o 50 km, para que su haz explorase alturas de menos de 1500 metros sobre la posición del radar. No obstante en España en algunos pocos casos se consigue apreciar en las imágenes radar, un patrón que los norteamericanos descubrieron en los años 70, conocido como *tornado vortex signature* (TVS). Básicamente se trata de dos máximos de viento enfrentados que indiquen rotación, teniendo cada máximo un tamaño de unos 500 m. Es decir, un diámetro de 1 km para el TVS. Y por supuesto, en el caso de los tornados mesociclónicos el TVS tendría que quedar dentro o debajo del área ocupada por el mesociclón (no teniendo que coincidir necesariamente con el centro del mesociclón). En resumidas cuentas los mesociclones suelen tener un diámetro del orden de unos 10-20 km, mientras que los tornados son del orden de unas decenas de metros de ancho. Por tanto sus diferentes magnitudes espaciales son por sí mismas un hecho diferencial muy importante a la hora de sus correspondientes hipotéticas identificaciones en España a través del sistema de radares operativo actualmente en AEMET.

En el caso que nos ocupa, Campillos se halla a unos 50 km de distancia del radar y a 450 metros de altitud. Por otra parte teniendo en cuenta que el radar se ubica a unos 1200 metros de altitud y la elevación del haz con la distancia, dicho haz se encontraría en Campillos a 1350 metros sobre la altura del terreno.

Desgraciadamente en el episodio fruto de este estudio no aparece, tal y como era de esperar, ningún patrón de TVS. No obstante en la práctica, en la exploración radar a partir de las imágenes de viento radial, podemos ver máximos aislados a los que le falta la «pareja», es decir, un pixel «rojo» suelto o un pixel «azul» suelto. ¿Nos están indicando estos máximos «suelos» la hipotética presencia de un TVS? Es algo que no podemos saber de forma concluyente. En la práctica en España existen muchos mesociclones que no producen tornados y por supuesto no todos los máximos aislados dentro de un mesociclón podrían estar relacionados con un TVS. Aparte hay que tener en cuenta que las imágenes radar de viento radial tienen mucho ruido, lo que lleva a utilizar operativamente filtros para eliminar ciertos problemas de la estrategia de exploración, que pueden ser a su vez responsables de eliminar la señal en zonas de gran interés.

Pero para no faltar a la realidad, en algunas situaciones tornádicas en España, la mayor parte no asociadas a supercélulas sino con génesis bastante diferente como las asociadas a los tipos de tornados más comunes (*landspouts* y *waterspouts*), sobre todo en los casos en que discurren en las cercanías del emplazamiento de un radar, es posible seguir la evolución temporal de una señal suelta (pixel anómalo de elevado valor de viento), que luego se suele confirmar a partir de los estudios posteriores de campo, compatible con la trayectoria de un tornado. Es como si en estos casos, a pesar de que no

estamos detectando en el radar el giro asociado al tornado por lo anteriormente explicado, sí representarán indicios de la presencia de una corriente giratoria más elevada, sustentadora del tornado. Tras el estudio de campo mostrado en otro capítulo de este trabajo y de las fotos y vídeos existentes del episodio, queda constatada fehacientemente la presencia de al menos 3 tornados que afectaron a una zona comprendida entre el término municipal de Sierra de Yeguas y de Campillos, asociados a la supercélula. Probablemente algunos de ellos pudieron haber sido de tipo mesociclónico.

A continuación se presentan imágenes radar (figura 4.20) donde aparecen píxeles anómalos sueltos, que aunque no representan obviamente el giro tornádico, sí de algún modo y debido a las características anteriormente citadas, podrían ser indiciarios de su presencia, sobre todo teniendo en cuenta que coinciden cada uno de ellos, en tiempo y lugar, con cada uno de los tres tornados detectados visualmente. Por ello a cada imagen radar se le asocia una foto de cada uno de los tornados.

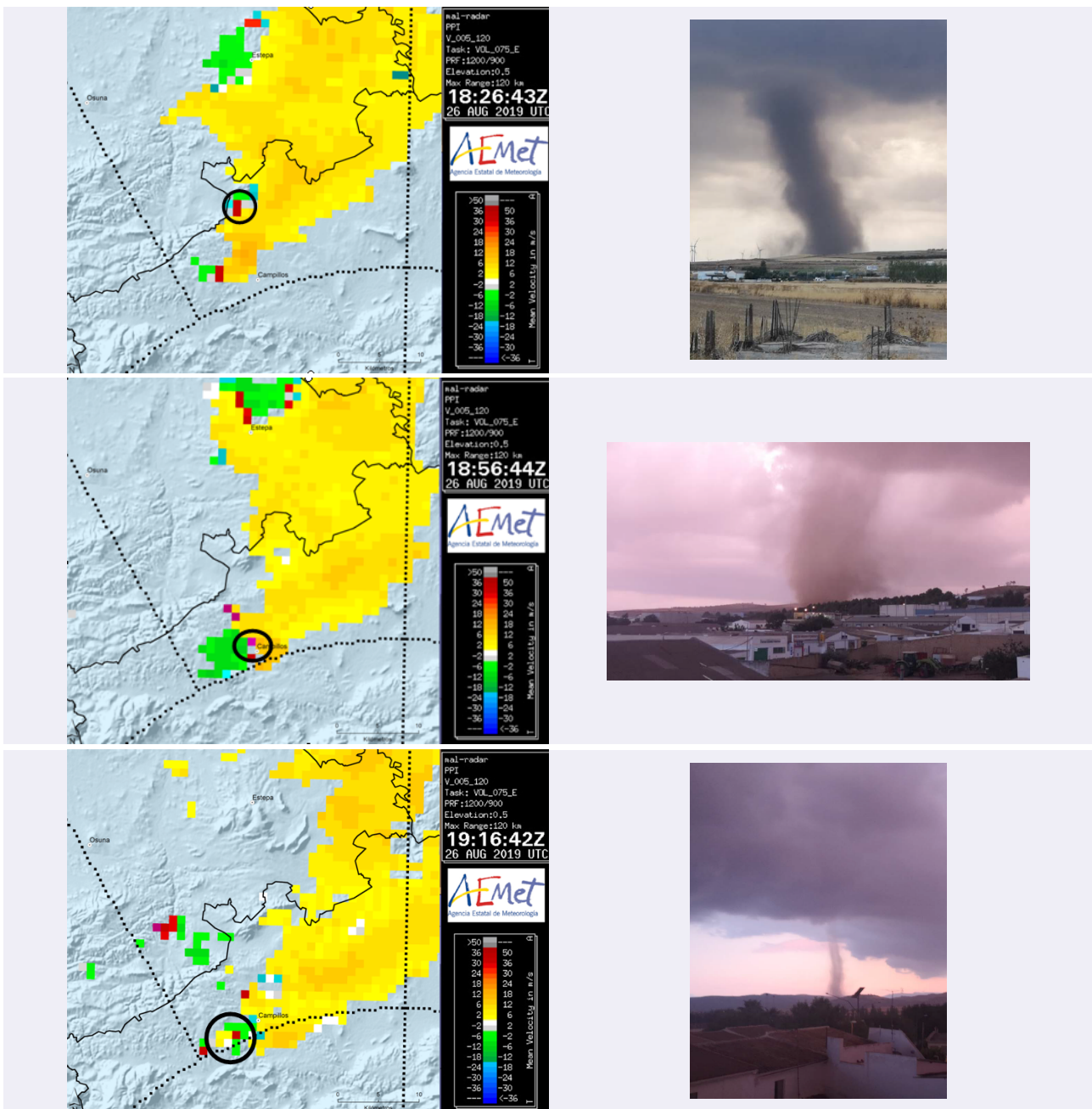


Figura 4.20. Imágenes radar y píxeles anómalos, junto con las fotos de los tornados asociados en zona y hora. Primera foto: Tornado 1 (18:26 UTC). Segunda foto: Tornado 2 (18:56 UTC). Tornado 3 (19:16 UTC).

Fotografías cortesía de Ignacio Aguilera.

5. DESCARGAS ELÉCTRICAS

5.1. INTRODUCCIÓN

Se estima que continuamente se producen en la tierra 100 descargas producidas por alguna de las 2000 tormentas que de media están activas en cualquier momento. Las descargas eléctricas son el resultado final de los procesos de acumulación de carga eléctrica que se producen en la atmósfera. La inmensa mayoría del total está asociada a nubes convectivas, pero hay un pequeño porcentaje debido a otras fuentes como son tormentas de polvo, erupciones volcánicas e incluso la explosión de potentes bombas.

El proceso por el cual una nube convectiva se electrifica, es decir desarrolla zonas diferenciadas en su seno con carga neta opuesta, ha sido objeto de estudio durante mucho tiempo, y aún lo es, pero el modelo conceptual básico que lo explica, el llamado modelo tripolar, es conocido desde hace tiempo (WILLIAMS, 1989). El estado real de electrificación de una nube convectiva puede llegar a ser mucho más complejo que el propuesto por el modelo tripolar (STOLZENBURG *et al.*, 1998), pero para nuestros fines este modelo conceptual es suficiente.

La figura 5.1 muestra la idea básica que propone el modelo tripolar. Existe una acumulación de carga neta en tres regiones diferentes en el seno de una nube convectiva: centro de carga negativa principal, en una región de apenas 1 km de espesor, entre -10 °C y -15 °C , y centros de carga positiva en la zona inferior de la nube, por debajo de la zona de carga negativa, y en zonas altas de la nube, en torno a -40 °C . Cuando la acumulación de carga es suficiente, esta distribución de cargas puede dar lugar a descargas eléctricas entre regiones con distinto signo. Así, se pueden producir descargas eléctricas entre regiones dentro de una nube (descargas intranube), entre regiones de dos nubes adyacentes, entre la nube y el aire circundante y entre la nube y la tierra.

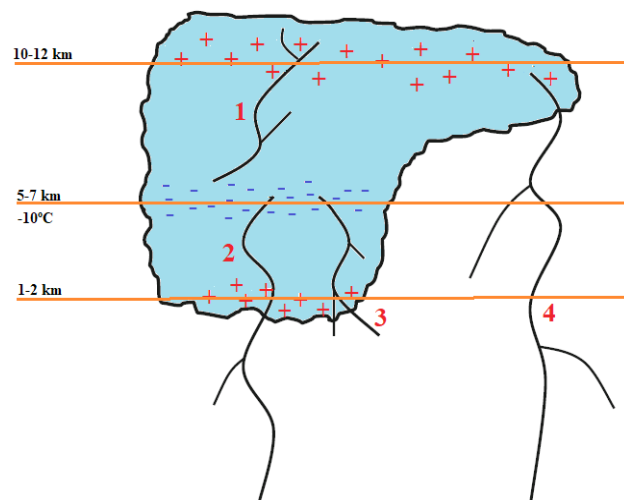


Figura 5.1. Modelo tripolar propuesto por Williams y distintos tipos de descargas eléctricas. (Imagen: Cooray modificada).

El proceso por el cual una nube convectiva adquiere esa distribución de centros de carga está determinado por la existencia de unas partículas, denominadas *graupel*, en su interior. Las partículas *graupel* son pequeñas gotitas de agua que cuando alcanzan el nivel de congelación ($T = 0\text{ °C}$), en su movimiento ascendente, se congelan en pequeños cristales de hielo. Entre esta zona ($T = 0\text{ °C}$) y el tope de la nube (-40 °C) pueden coexistir con gotitas de agua sobreenfriada con las que eventualmente pueden colisionar provocando que estas se congelen directamente sobre los cristallitos de hielo favoreciendo su crecimiento. Este proceso, al que se le denomina de acreción, puede continuar hasta que los cristallitos de hielo dejan de ser reconocibles como tales; a ese nuevo estado del cristallito de hielo se le denomina partículas *graupel*.

Las partículas *graupel* tienen la propiedad de adquirir carga cuando colisionan con otros cristallitos de hielo, pero el signo de la carga que adquieren depende de la temperatura ambiente. Para un contenido acuoso medio de la nube en torno a 1 g/m^3 las partículas *graupel* adquieren carga positiva en una colisión para temperatura ambiente entre $0 \text{ }^\circ\text{C}$ y $-10 \text{ }^\circ\text{C}$, y adquieren carga negativa para temperatura ambiente entre $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ y $-40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Esta propiedad de las partículas *graupel* puede explicar el modelo tripolar de distribución de carga en una nube convectiva. En el seno de la corriente ascendente las partículas *graupel* pueden crecer de forma continua por el proceso de acreción que hemos mencionado hasta grandes alturas, donde en algún punto la corriente ascendente no puede soportarlas y empiezan a caer. Durante el descenso colisionan con cristallitos de hielo adquiriendo en la colisión carga negativa las partículas *graupel* y carga positiva los cristallitos de hielo. Debido a su poco peso estos siguen con su ascenso llegando a acumular carga positiva en alguna región por encima de la zona entre $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ y $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, donde las partículas *graupel* acumularían carga negativa. A medida que las partículas *graupel* continúan descendiendo alcanzarían regiones con temperaturas más altas y se cargarían positivamente en sus colisiones con cristallitos de hielo.

El inicio en la producción de descargas eléctricas es prueba de que la nube convectiva ha desarrollado una corriente ascendente vigorosa que ha provocado un estado de electrificación adecuado. Tras el inicio de las primeras descargas pueden empezar a observarse fenómenos en superficie como precipitación o granizo, que en algunos casos pueden ser severos.

El estudio de los fenómenos convectivos, desde un punto de vista eléctrico, debe tener en cuenta no solo la distribución de la carga eléctrica en el seno de la nube, que como hemos señalado puede llegar a ser mucho más compleja que la propuesta por el modelo tripolar, sino también su movimiento a través de las descargas eléctricas. Por tanto es fundamental el estudio de estas caracterizándolas a través de propiedades fácilmente medibles como: número y evolución de las descargas producidas por unidad de tiempo, intensidad de las descargas y signo.

En la literatura anglosajona se define «*lightning jump*» como un incremento brusco en el ritmo al que se producen descargas eléctricas (descargas nube-nube y descargas nube-tierra) asociadas a una nube convectiva. Nosotros nos referiremos a ellas como LJ. Como hemos señalado más arriba el inicio de las descargas eléctricas es una manifestación de que se ha establecido una corriente ascendente vigorosa que ha provocado la electrificación de la nube. De igual forma podemos relacionar la aparición de un LJ, o incrementos en el ritmo al que se producen descargas eléctricas, con fortalecimientos de la corriente ascendente y posterior producción de fenómenos convectivos en superficie, como precipitación intensa o granizo. Numerosos estudios han puesto de manifiesto que la aparición de un LJ puede anticipar que los fenómenos posteriormente observados en superficie, como precipitación o granizo, puedan ser severos. Algunos estudios cifran hasta en 20 minutos la capacidad de un LJ para predecirlos. Esta relación no es unívoca: no todos los LJ llevan asociados fenómenos severos observados en superficie, ni todos los fenómenos severos observados en superficie debidos a un proceso convectivo tienen asociado un LJ previo, pero se han encontrado numerosos ejemplos en que esto es así (WILLIAMS *et al.*, 1999). Actualmente se están realizando estudios para discernir cuándo un LJ puede tener esa capacidad predictora. Son estudios de tipo estadístico que tratan de identificar los LJ que son significativos respecto del resto producidos en el corto plazo.

Estudios más recientes (STOUGH *et al.*, 2017) han encontrado también una relación entre LJ y el aumento de la organización en una célula convectiva y su evolución a supercélula. Es razonable pensar que esto sea así debido a que ambos fenómenos, LJ y la formación o intensificación del mesociclón, están relacionados con la intensificación de la corriente ascendente. En concreto, el inicio de la formación del mesociclón asociado a una supercélula, o los instantes en que se produce una intensificación del mismo, suelen estar anticipados, de media, entre 5 y 10 minutos por un LJ respecto de la identificación

por la imagen radar más reciente. Esta relación es más estrecha cuanto más intensa es la corriente ascendente. Se ha observado que el 85 % de los LJ observados se pudieron asociar al menos a un incremento en la rotación del mesociclón y que el 77 % de los incrementos observados en la rotación del mesociclón se pudieron asociar al menos a un LJ. Ese mismo estudio avanza que hay indicios de que existe una relación en la aparición de un LJ, la intensificación del mesociclón de niveles bajos y la aparición, o intensificación, de tornados fuertes o violentos.

En este capítulo vamos a describir, desde el punto de vista de las descargas eléctricas, todo el proceso convectivo que tuvo lugar al norte de la provincia de Málaga, limítrofe con Sevilla, que llevó a la formación de una supercélula y tres tornados. Este proceso se extiende desde las 16:00 UTC hasta las 20:00 UTC y ha sido descrito en el capítulo anterior dedicado a la caracterización radar e incluye: una división celular o *storm splitting*, SS1, la formación de los dos miembros; L1 (*left mover*) y R1 (*right mover*), el movimiento de L1 hacia el norte, la transformación de R1 en supercélula, probablemente del tipo LP (*low precipitation*) y su movimiento hacia el sur y posible evolución posterior a supercélula de tipo HD (*high precipitation*), la formación de tres tornados (T1, T2 y T3) y la formación de una nueva célula, N, al norte de la sierra de los Caballos.

Para este estudio se ha dispuesto de datos de descargas eléctricas entre las 16:00 UTC y las 20:00 UTC proporcionados por la red de detectores de AEMET. La zona de interés para el estudio está cubierta por tres detectores (figura 5.2 izq.), que solo proporcionan datos de descargas nube-tierra (figura 5.2 dcha.) por lo que intentar identificar las correlaciones a las que hacían referencia los estudios mencionados más arriba puede ser más dificultosa, ya que no se contabilizan todas las descargas intranube y las descargas entre nubes.

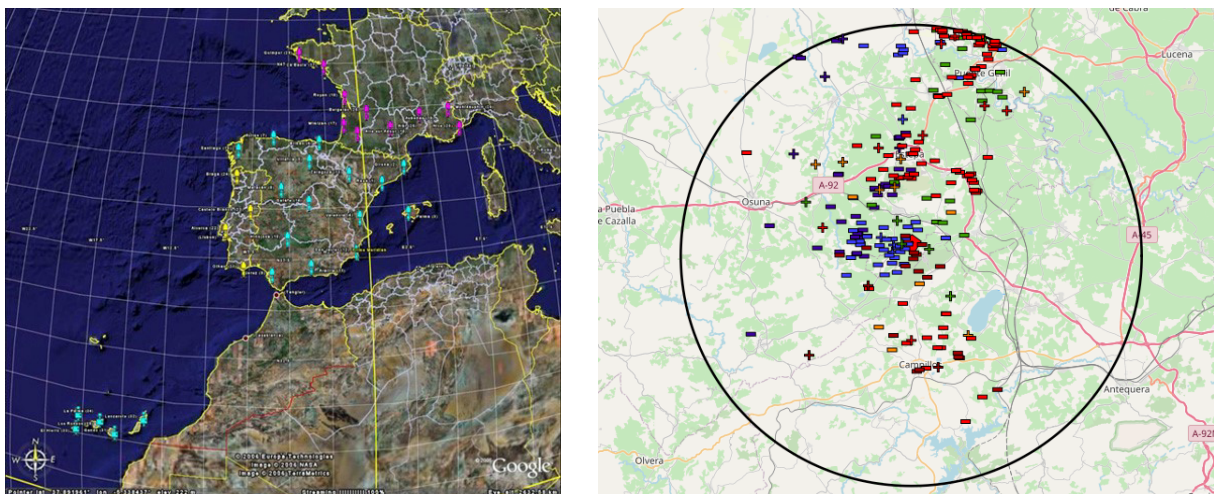


Figura 5.2. Red de descargas (izq.) y descargas eléctricas en el episodio entre las 16:00 UTC y 20:00 UTC (dcha.).

Lo idóneo hubiera sido disponer de la información individualizada para cada célula convectiva, como número de descargas por unidad de tiempo, intensidad y signo de las descargas, y estudiar su evolución temporal pero, al no disponer de estos datos, el estudio se ha realizado sobre un área fija, tanto en el espacio como en el tiempo. Se ha elegido un dominio circular que engloba a todos los fenómenos enumerados anteriormente.

Se mostrarán gráficas de la evolución temporal del número de descargas minutales previamente a la hora nominal, de su media móvil de 5 periodos y de la intensidad de las descargas durante todo el proceso.

5.2. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS

Se ha elegido un dominio principal circular centrado en la ladera norte de la sierra de los Caballos (véase la ubicación exacta en la figura 1.4 del capítulo 1), de 30 km de radio, círculo externo rotulado en azul en la figura 5.3. Obviamente al ser el dominio espacial fijo es posible que, en algún instante, otras células, que nada tienen que ver con el proceso que se está estudiando, atraviesan el dominio objeto de estudio pudiendo contaminar los resultados obtenidos. Para minimizar este hecho, se han definido otros dominios secundarios, también circulares pero de menor tamaño, que nos han permitido interpretar en algunos casos los datos que presentaban alguna inconsistencia. En la figura 5.3 se muestran las áreas elegidas para la realización del estudio. Los dominios circulares secundarios elegidos son dos concéntricos con el dominio principal, pero de 15 y 8 km de radio (rotulados en azul) y un tercero centrado sobre la localidad de Campillos y de 10 km de radio (rotulado en rojo).

Los dominios concéntricos, rotulados en azul, nos van a permitir estudiar los fenómenos que se produjeron al norte de la sierra de los Caballos hasta la formación de la supercélula y el inicio de su movimiento hacia el sur, es decir: SS1, L1, R1 y N.

Utilizaremos los datos de los dominios de 8 y 15 km rotulados en azul y el de 10 km centrado en Campillos para estudiar la evolución de la supercélula, R1, desde el inicio de su movimiento hacia el sur hasta el colapso de la misma.

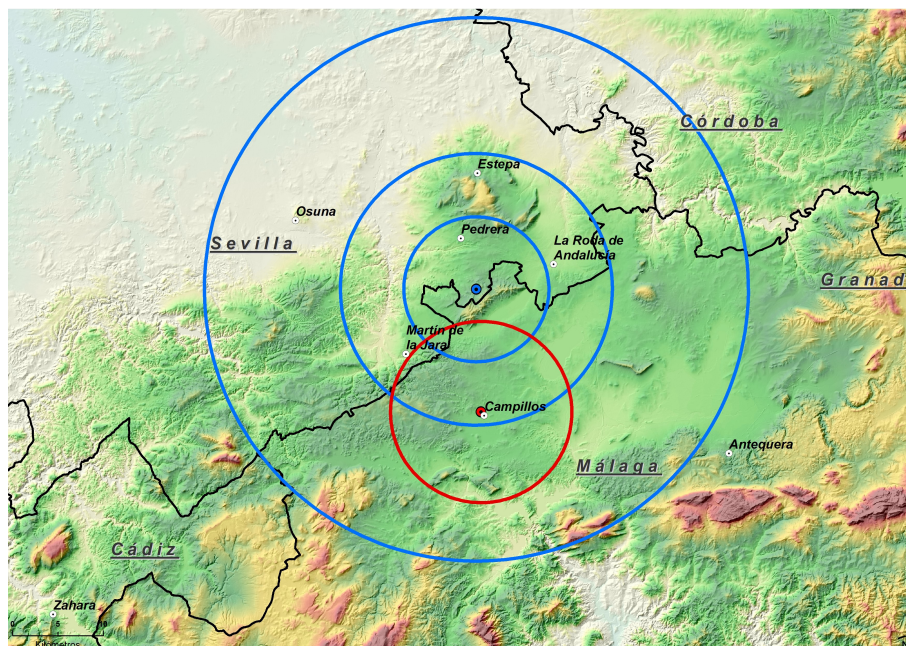


Figura 5.3. Dominios circulares utilizados en el estudio; en color azul centrados sobre la ladera norte de la sierra de los Caballos, de 8, 15 y 30 km de radio, y en color rojo el centrado en la localidad de Campillos y de 10 km de radio.

En el dominio principal de 30 km de radio y en el periodo de 16:00 UTC a 20:00 UTC, el número total de descargas eléctricas fue de 254 de las que 222 fueron negativas (87 %) y 32 positivas (13 %). La densidad de descargas por km^2 en todo el intervalo temporal fue de 0,090 descargas/ km^2 .

La figura 5.4 muestra las gráficas de evolución temporal de las descargas minutales, en el minuto previo a la hora nominal, y de su media móvil de cinco periodos, para el dominio principal y los tres secundarios. Se han etiquetado sobre las mismas los principales fenómenos observados: SS1, R1, T1, T2 y T3. Para el estudio vamos a dividir el periodo en tres intervalos:

1. Intervalo temporal entre las 16:00 UTC y las 17:30 UTC

En este intervalo temporal los tres dominios centrados al norte de la sierra de los Caballos presentan una distribución de descargas minutales y media móvil muy parecidas, aunque los valores absolutos puedan cambiar. Esto sugiere que toda esta actividad eléctrica está asociada a la convección que penetraba por el WSW, procedente de la provincia de Sevilla. Además, sobre las 17:15 UTC los tres dominios muestran un ligero incremento en la actividad eléctrica, que se podría asociar al *storm splitting* SS1.

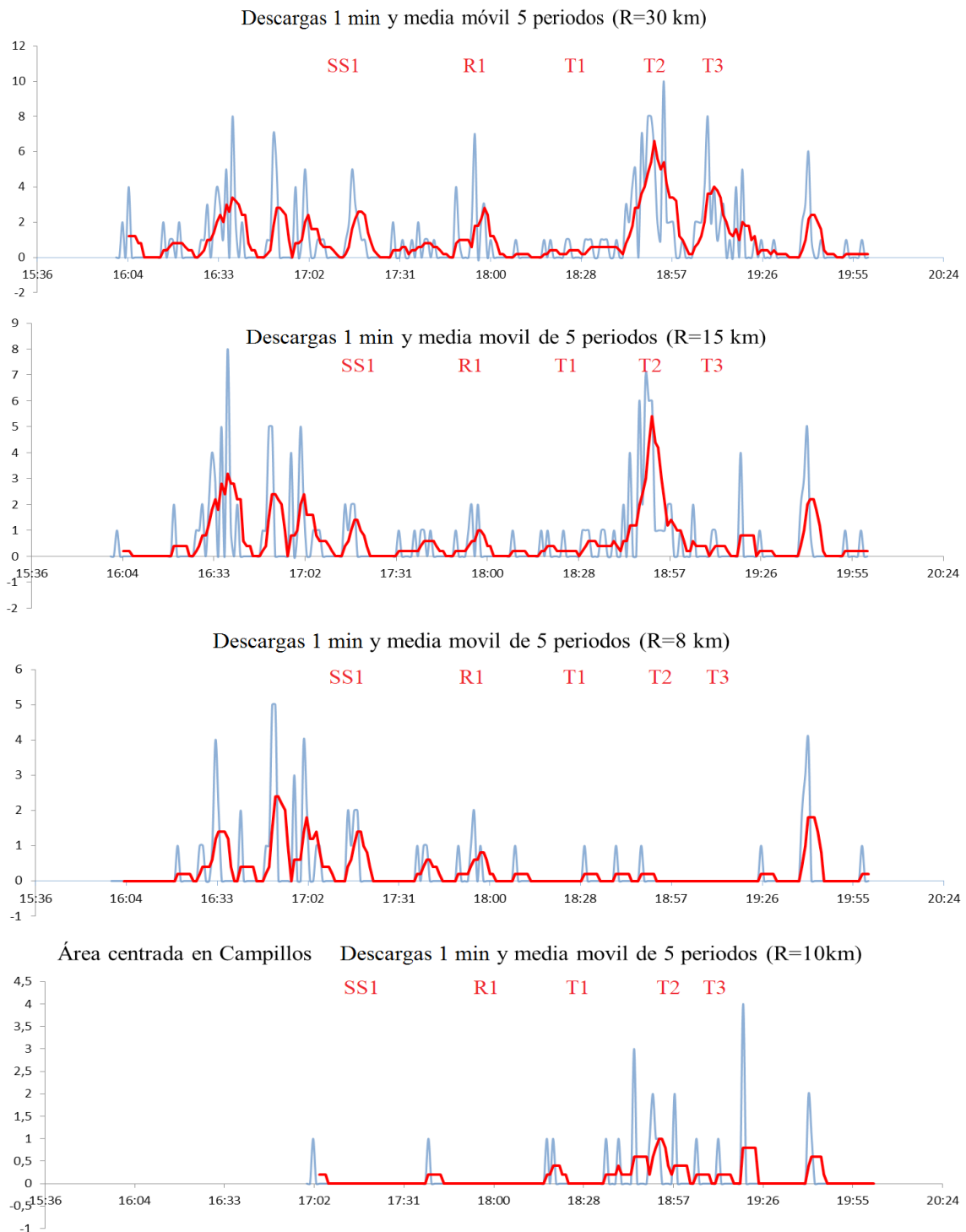


Figura 5.4. Evolución temporal de las descargas eléctricas: número de descargas minutales y media móvil de 5 periodos para los cuatro dominios seleccionados.

2. Intervalo temporal entre las 17:30 UTC y las 18:00 UTC

En este intervalo temporal los tres dominios también presentan una distribución similar, por lo que al igual que en el caso anterior la mayor parte de la actividad eléctrica puede asociarse a la convección que se producía en las inmediaciones de la sierra de los Caballos (norte y oeste), fundamentalmente asociado a los miembros generados por SS1: L1 y R1. Hay dos incrementos ligeros en la actividad eléctrica: uno sobre las 17:40 UTC, que se podría relacionar con la intensificación de la célula R1 sobre la sierra de los Caballos, y otro más intenso sobre las 18:00 UTC que se podría relacionar con la transformación de R1 en supercélula.

3. Intervalo temporal entre las 18:00 UTC y las 20:00 UTC

En este intervalo temporal los tres dominios presentan diferencias que se acentúan a medida que disminuye el radio. Los máximos que aparecen en el dominio principal de 30 km poco antes de las 19:00 UTC y a las 19:10 UTC, aparecen solo parcialmente en el dominio de 15 km y desaparecen en el de 8 km. Esto nos dice que toda esa actividad eléctrica está asociada a células convectivas que se mueven muy al norte de la sierra de los Caballos; una de ellas era la célula N, que se generó al norte de la sierra, que posteriormente se intensificó en el entorno de la población de Estepa. Los tres dominios muestran una escasa actividad eléctrica entre las 18:00 UTC y 18:30 UTC, correspondiente al movimiento de R1 hacia el sur y tornado T1, y un ligero aumento en la actividad eléctrica, poco antes de las 20:00 UTC, asociada a nuevas células que entraron en el dominio por el oeste al final del periodo pero sin mayor trascendencia en nuestro estudio.

La gráfica correspondiente al dominio centrado en Campillos muestra un ligero aumento de actividad en el momento en que se produjeron los tornados T1 y T2 y una señal importante en el momento en que se produjo T3 (4 descargas/minuto). Si nos centramos en T3, vemos que no hay señal en el dominio de 8 km (porque quedaba fuera) y sí en el de 15 km, también en el de 30 km. Los tornados T1 y T2 no muestran señales significativas en esos dos dominios.

5.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS

En este apartado vamos a estudiar la distribución espacial de las descargas eléctricas durante el periodo de 16:00 UTC a 20:00 UTC, en intervalos de 30 minutos.

La figura 5.5 muestra las descargas correspondientes a cada intervalo temporal de 30 minutos. El dominio está centrado al norte de la sierra de los Caballos, marcada con un icono en forma de diamante. El color de las descargas está asociado a la hora en que se produjeron: colores más fríos cuanto más cerca de la hora inicial del intervalo y más cálidos cuanto más cerca de la hora final.

La secuencia de imágenes muestra cómo a partir de las 16:00 UTC se produjo una intensificación de la convección, más acentuada a partir de las 16:30 UTC, en el entorno de la sierra de los Caballos hasta las 18:00 UTC, cuando se producen además algunas descargas de signo positivo en el entorno. Este es el momento en que la célula R1 probablemente se transforma en supercélula. A las 17:15 UTC se produjo el *storm splitting*, SS1.

Entre las 18:00 UTC y 18:30 UTC la célula R1, ya transformada en supercélula, se mueve hacia el sur con muy poca actividad eléctrica, apenas dos descargas, una positiva y otra negativa. Es el momento también en el que se produjo el tornado T1.

Entre las 18:30 UTC y 19:00 UTC se produce un aumento de actividad eléctrica al norte de Campillos, probablemente asociada a la intensificación de la supercélula y posible transformación en una de tipo HP. Poco antes de las 19:00 UTC se produjo el tornado T2.

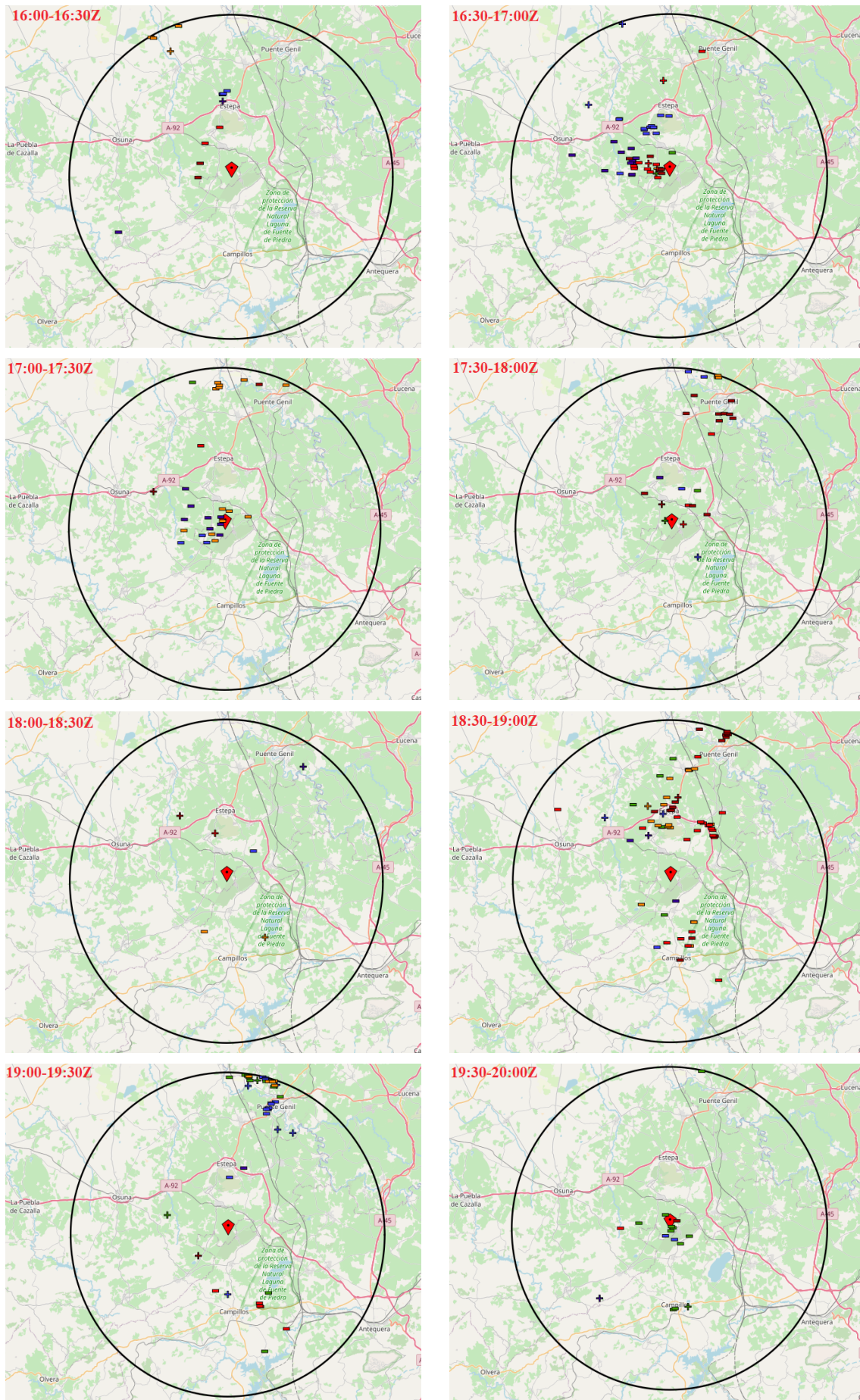
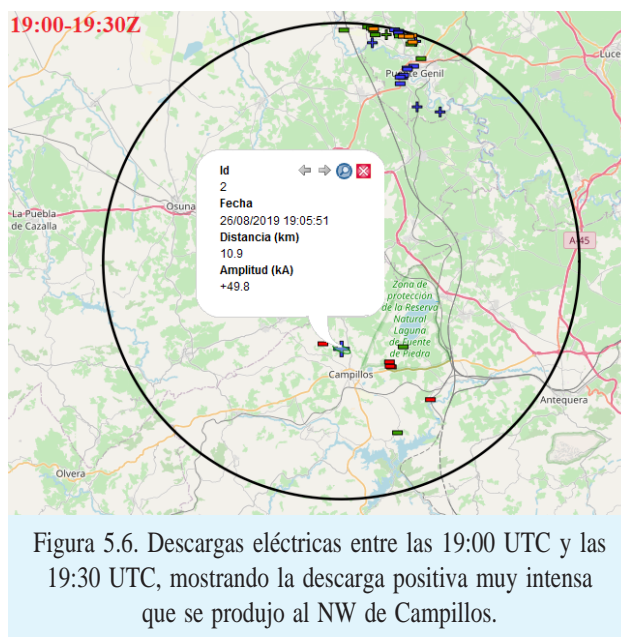


Figura 5.5. Secuencia, en intervalos temporales de 30 minutos, de las descargas nube-tierra entre las 16:00 UTC y 20:00 UTC.

El intervalo entre las 19:00 UTC y 19:30 UTC se caracteriza por disminuir ligeramente la actividad eléctrica en la zona. Es el intervalo que corresponde al tercer tornado, T3, que se produjo a las 19:10 UTC. Es interesante resaltar la descarga positiva (figura 5.6) que se produce en este intervalo y que fue la más intensa del total de las analizadas en todo el proceso (+49,8 kA). Se produjo a las 19:05 UTC a menos de 2 km al norte del tornado T2, que causó numerosos daños en la localidad de Campillos. Este es el momento que marca el colapso de la supercélula.

En el intervalo entre las 19:30 UTC y 20:00 UTC sigue decayendo la actividad eléctrica con apenas tres descargas en la zona de Campillos.



5.4. CONCLUSIONES

Durante el proceso de generación y evolución de la supercélula y formación de tres tornados que afectaron a la zona de Campillos se ha puesto de manifiesto un incremento en el número de descargas por unidad de tiempo (LJ) en momentos importantes del proceso como son la formación del *storm splitting*, SS1, la transformación del miembro derecho, R1, en supercélula y el colapso de la supercélula.

Respecto a la relación entre LJ y los tornados se ha observado un ligero incremento en T1 y algo más significativo en el entorno temporal entre T2 y T3, pero probablemente más relacionado con el colapso de la supercélula.

No se trata aquí de validar los resultados a los que llegaron los estudios mencionados al principio del capítulo, sobre todo por la falta de los datos correspondientes a las descargas intranube, que en fenómenos de esta naturaleza son las más frecuentes. No obstante se ha constatado un incremento en la actividad eléctrica en momentos claves de la evolución de la supercélula.

6. ESTUDIO DE CAMPO:

DAÑOS TORNADOS, PRECIPITACIÓN Y GRANIZO

6.1. TORNADOS

Según testigos, numerosos documentos gráficos reportados en medios de comunicación y redes sociales, aparte de un estudio de campo realizado por AEMET, se constata la existencia de tres tornados asociados a una fuerte tormenta, con características supercelulares, que afectaron a los municipios de Sierra de Yeguas y Campillos, y a los que denominaremos Tornado 1, Tornado 2 y Tornado 3 según su orden cronológico (figura 6.1).

La distribución temporal de los tornados fue aproximadamente la siguiente en horas locales:

- Tornado 1 (dentro de una franja horaria comprendida entre 20:00 a 20:35 h.l.).
- Tornado 2 (en un intervalo temporal comprendido en el periodo de 20:45 h.l. a 21:15 h.l.).
- Tornado 3 (comenzó hacia las 21 h.l. aunque sin poder precisar con exactitud ni comienzo ni duración).

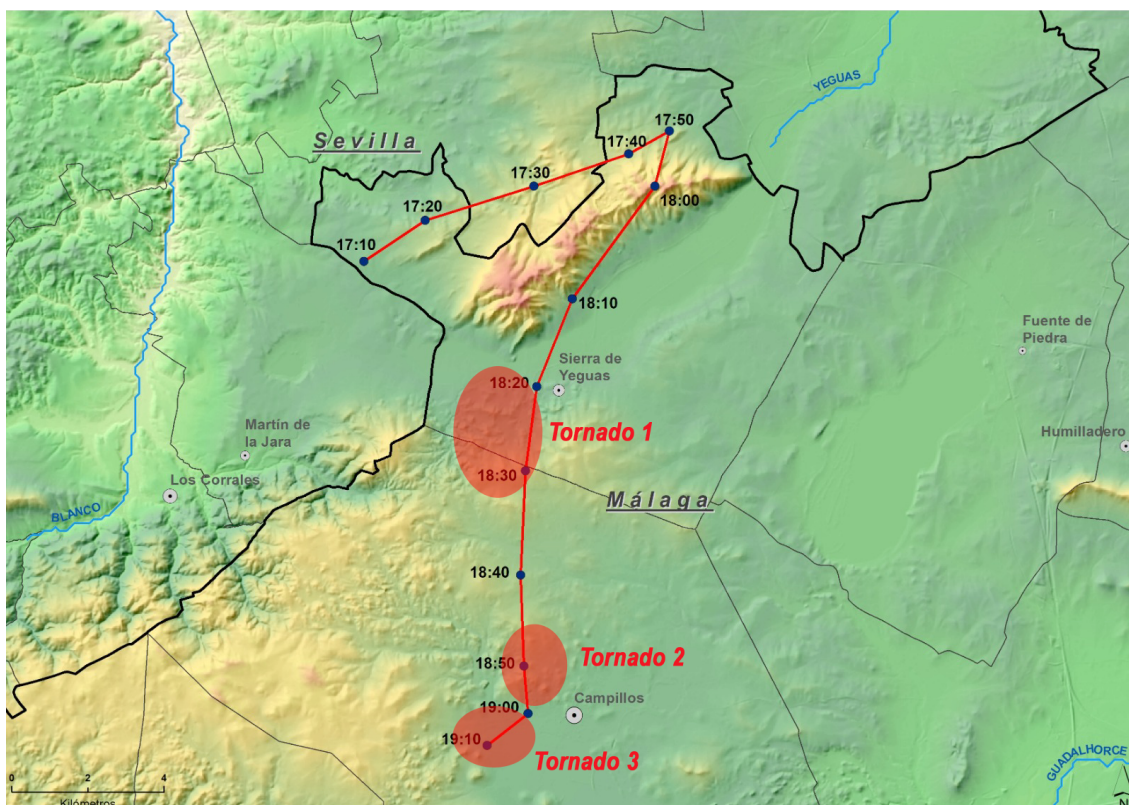


Figura 6.1. Localización aproximada del área afectada por los tornados, en rojo, a partir de documentos gráficos y daños constatados en estudio de campo. En línea roja la trayectoria más probable seguida por la supercélula.

Tornado 1 (entre las 20:00 y las 20:35 h.l.)

Este primer tornado ocurrió, según distintos testimonios, dentro de un intervalo temporal comprendido entre las 20 y las 20:35 h.l., y afectó a un área entre Martín de la Jara y Sierra de Yeguas, aproximadamente a unos 5,5 km al norte de la localidad de Campillos (figura 6.2). En diversas imágenes y vídeos se aprecia que discurrió muy cerca de una doble fila de aerogeneradores.

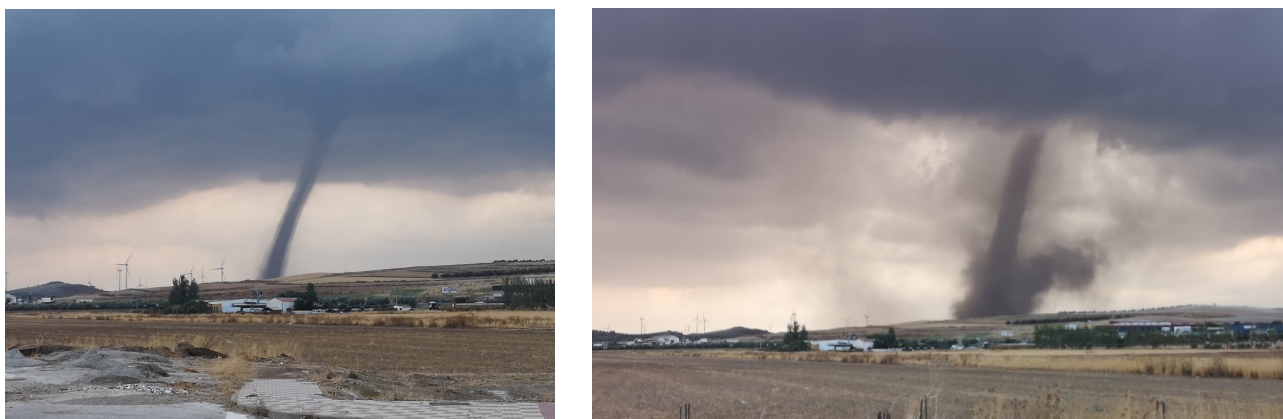


Figura 6.2. Fotos del primer tornado (autor: Ignacio Aguilera del Corral).

En la figura 6.3 se presenta la zona más probable donde pudo transcurrir el tornado 1.

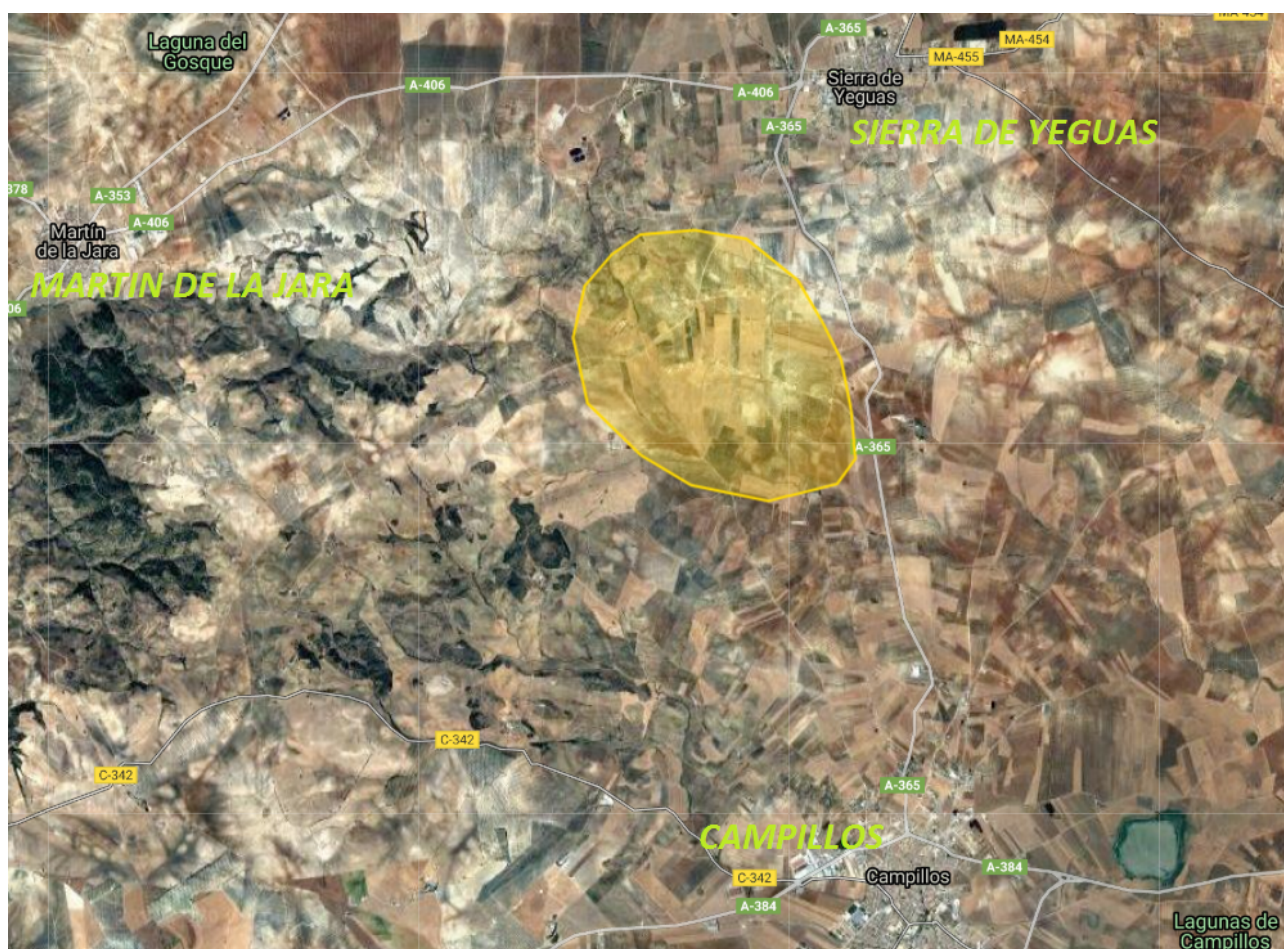


Figura 6.3. Área probable por donde transcurrió el tornado 1 (amarillo).

Tornado 2 (20:45 a 21:15 h.l.)

El segundo tornado (figura 6.4) se observó, según diversos testigos, dentro de una franja horaria comprendida entre las 20:45 y las 21:15 h.l. aproximadamente, en el entorno de la localidad de Campillos.



Figura 6.4. Fotos del segundo tornado, realizadas desde Campillos (autor: Ignacio Aguilera del Corral).

Su trayectoria a partir del material gráfico, testimonio de testigos y estudio de daños, trata de representarse en la figura 6.5, y debió de tener lugar en un área a unos 1,6 km al noroeste de la localidad de Campillos, en una zona de fincas agrícolas y ganaderas. Tuvo una trayectoria de al menos 700 metros de longitud hasta que se le perdió la pista.

Se registraron al menos 6 naves destruidas, más de 60 cabras muertas y daños en tendido eléctrico, campo y carreteras comarcales. Numerosos árboles sufrieron daños de diversa consideración según testigos presenciales e inspección de campo, desde caída de ramas a árboles pequeños arrancados de cuajo, así como numerosos objetos que salieron volando.



Figura 6.5. Segundo tornado. Los marcadores amarillos representan la localización de daños reportados y la línea amarilla su posible trayectoria.

En la figura 6.6 se muestran fotos de los daños y desperfectos causados por este segundo tornado.



Figura 6.6. Daños producidos por el segundo tornado según estudio de campo de AEMET (fotos: Carlos Perea Hitos).

Del análisis de los daños producidos por este tornado estimamos que pudo ser de categoría EF1 (entre 135 y 175 km/h de racha máxima), aunque probablemente en la parte superior de este intervalo y sin descartar que puntualmente pudiera haber alcanzado la categoría EF2.

Tornado 3 (después de las 21 h.l.)

El tercer tornado fue detectado hacia las 21 h.l., ya en la etapa final de la supercélula. A partir de las fotos y vídeos disponibles (figura 6.7), se aprecia que tuvo lugar al oeste de la localidad de Campillos. No se puede determinar su duración con exactitud.



Figura 6.7. Foto del tercer tornado (autor: Ignacio Aguilera del Corral).

De este tornado solo tenemos constancia a partir de las fotos y vídeos de testigos. Ocurrió a última hora, cuando estaba oscureciendo, y no se tienen noticias de daños ocasionados, por lo que es muy difícil reconstruir la zona con exactitud. En la figura 6.8 se trata de representar la zona afectada por el tornado 3, muy cerca de la localidad de Campillos, a partir del material gráfico.



Figura 6.8. Probable área afectada por el tornado 3 (amarillo).

6.2. OTROS FENÓMENOS REGISTRADOS

En la estación de AEMET en Campillos se recogieron 18,7 mm al paso de la tormenta, que además de chubascos intensos produjo granizo de tamaño grande (sin poder precisarse el diámetro) y provocó algunas inundaciones locales.

Cantidades mayores, de entre 40 y 60 mm, fueron registradas en el sur de la provincia de Sevilla, en el entorno de Estepa, Pedrera y Gilena. En la figura 6.9 se muestran las precipitaciones totales del día 26 de agosto en base a la red de estaciones de AEMET. En concreto en Lora de Estepa se recogieron 55 mm en 24 horas, con 41 mm en una hora (entre 17 y 18 UTC).

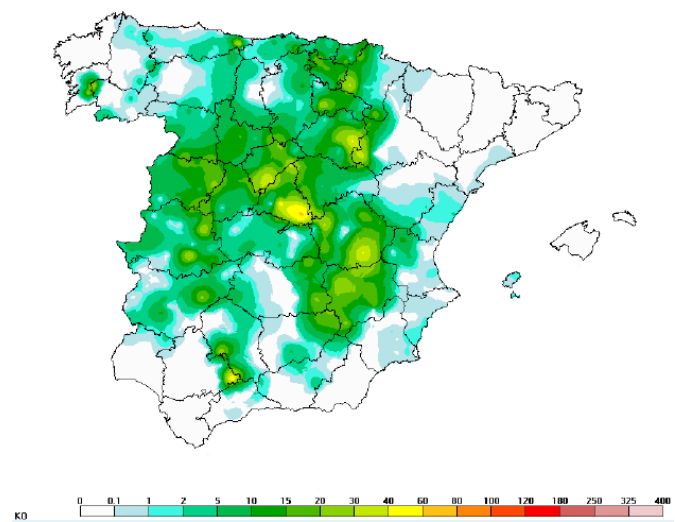


Figura 6.9. Precipitación (mm) recogida el día 26 de agosto de 2019 según las estaciones automáticas de AEMET.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En la tarde del lunes 26 de agosto de 2019 se produjo un episodio convectivo en el que se formó una supercélula en el norte de la provincia de Málaga, con constancia de al menos tres tornados asociados, uno de los cuales causó importantes daños en el término municipal de Campillos.

La configuración sinóptica era de una dana situada sobre el sur de Portugal, con un flujo predominante en niveles medios y altos del SW y un máximo de viento en 300 hPa, mientras que en niveles bajos había una circulación de componente este, aportando un flujo húmedo procedente del Mediterráneo, ocasionalmente fuerte en los portillos orográficos como el del valle del Guadalhorce.

Las fronteras de masas de aire constituyen zonas de gran actividad meteorológica. En nuestro episodio, sobre la península ibérica se situaban dos masas de aire de características completamente diferentes. Hacia el oeste, una de origen polar asociada a la dana; y hacia el este, otra de origen subtropical.

Se ha empleado el modelo conceptual de «*pluma de vapor de agua*» para analizar la situación. Este concepto resulta muy útil para explicar aquellos episodios de convección organizada en la península ibérica que surgen como consecuencia de desplazamientos de masas de aire de origen subtropical bajo capas de aire frío y seco. En definitiva, para episodios que entrañan fuerte inestabilidad potencial.

En el episodio analizado se presenta una situación de advección de aire frío y seco en niveles medios/altos (flanco delantero de la dana) sobre un régimen de advección húmeda y cálida en niveles medios/bajos; propiciando, por tanto, un entorno con inestabilidad potencial. Sin embargo, a nivel mesoescalar, es la cizalladura vertical del viento la que determina en última instancia la organización de la convección. En nuestro episodio, como ya se ha comentado, el máximo de viento en altura sobrevolando un chorro en niveles bajos, acelerado por el portillo del Guadalhorce, favoreció un entorno con fuerte cizalladura vertical.

La convección se inició por calentamiento superficial en la campiña sevillana, bajo condiciones de gran inestabilidad. Algunas de las células, guiadas por el flujo del SW en niveles medios, alcanzaron el máximo de viento en niveles bajos que remontaba el río Guadalhorce. De esta forma, se hallaban presentes los tres ingredientes que propician un entorno favorable a la formación de supercélulas. A saber, valores altos de helicidad relativa a la tormenta (SRH), de inestabilidad (CAPE) y de cizalladura vertical.

Además de las condiciones sinópticas y mesoescalares citadas, en la campiña sevillana la cizalladura era de tipo unidireccional, favoreciendo la formación de *storms splittings*. Es muy probable que una célula tormentosa, que se desarrolló en la sierra Sur de Sevilla, sufriese una división celular. El miembro que se desplazaba a la derecha (*right mover RI*) en su movimiento de desvío hacia el este-sureste, se encontró con un flujo intenso y húmedo en niveles bajos, que desde el mar de Alborán ascendía por el valle del Guadalhorce, encajado a su vez en un entorno con valores altos de helicidad propiciando un entorno con vorticidad *streamwise*, y favoreciendo, posiblemente, que evolucionase a supercélula.

Se ha usado el modelo WRF para intentar captar la situación a escalas de 1 km. Se ha visto que este modelo puede ser muy interesante para estudios de situaciones a nivel de mesoescala o incluso microescala.

Las imágenes básicas de los canales más usados del MSG así como imágenes realizadas según la técnica RGB y del SAF de *nowcasting* son de muchísima utilidad. Principalmente las imágenes HRVIS permiten distinguir ciertas características de la supercélula formada.

Las imágenes de radar son fundamentales para mostrar la evolución de las células tormentosas, el *storm splitting* y la conversión en supercélula de la célula *right mover R1* según fue comentado en el correspondiente capítulo. A las 18:06 UTC del 26 de agosto se aprecia en la imagen radar de reflectividad PPI de 0,5° de exploración en el modo de corto alcance de 120 km una estructura en gancho, mientras que en una foto realizada desde Zahara de la Sierra (Cádiz) se adivinan el mesociclón (*updraft* ascendente hasta la tropopausa con el *overshooting top*) y otras características de supercélula. En este momento podemos afirmar que la célula R1 presenta características visuales y de señal radar, propias de una supercélula del tipo LP (*low precipitation*).

Probablemente se generaron nuevas células al norte, por la convergencia de la corriente descendente de precipitación de la célula R1 sobre la vertiente norte de Sierra de los Caballos y el flujo general del SW predominante en esa zona. A partir de las 18:10 UTC la supercélula se desvía de su trayectoria y se mueve hacia el sur anómalamente. Aunque no se puede descartar de pleno que se produjera un nuevo *storm splitting*, el desvío tan destacable en la trayectoria de la célula R1 se debió probablemente a la dinámica supercelular y su interacción con el entorno.

En su movimiento hacia el sur, la célula R1 fue evolucionando desde una estructura compatible con una supercélula del tipo LP a las 18:06 UTC, hasta una que muestra características típicas de una supercélula del tipo HP (*high precipitation*) a las 18:56 UTC. Entre ambos instantes es difícil mantener una correlación espacio-temporal de los patrones de velocidad radial y de reflectividad, aunque en algún instante pudo presentar características compatibles con una supercélula de tipo clásica.

Comparando los PPI más bajos de reflectividad (0,5° de elevación) junto con la velocidad radial de acercamiento/alejamiento al radar, aparecen algunos patrones típicos de las supercélulas, como unos ecos aproximadamente en forma de gancho, y un marcado mesociclón.

Aunque con los radares de AEMET es casi imposible la detección directa de tornados, sí que se aprecian ciertos patrones compatibles con la traza tornádica, justo precisamente en las zonas e intervalos temporales en que fueron reportados visualmente los 3 tornados.

Durante el proceso de generación y evolución de la supercélula y formación de los tres tornados que afectaron a la zona norte de la provincia de Málaga, se produjo un incremento en el número de descargas por unidad de tiempo (*lightning jump*) en momentos importantes del proceso como son la formación del *storm splitting*, la transformación del miembro derecho, R1, en supercélula y el colapso de la propia supercélula.

Respecto a la relación entre *lightning jump* y los tornados se ha observado un ligero incremento en el primer tornado y algo más significativo en el entorno temporal entre el segundo y el tercero, pero probablemente más relacionado con el colapso de la supercélula.

Es importante dejar constancia que según testigos, numerosos documentos gráficos reportados en medios de comunicación y redes sociales, aparte de un estudio de campo realizado por AEMET, queda probada la existencia de tres tornados asociados a una supercélula que afectó a los municipios de Sierra de Yeguas y Campillos. La distribución temporal de los tornados fue aproximadamente la siguiente en horas locales:

- Tornado 1 (dentro de una franja horaria comprendida entre 20:00 a 20:35 h.l.).
- Tornado 2 (en un intervalo temporal comprendido en el periodo de 20:45 h.l. a 21:15 h.l.).
- Tornado 3 (comenzó hacia las 21 h.l. aunque sin poder precisar con exactitud ni comienzo ni duración).

El primer tornado afectó a un área entre Martín de la Jara y Sierra de Yeguas, aproximadamente a unos 5,5 km al norte de la localidad de Campillos.

El segundo tornado se observó en el entorno de la localidad de Campillos. Su trayectoria a partir del material gráfico, testimonio de testigos y estudio de daños, debió tener lugar en un área a unos 1,6 km al noroeste de la localidad de Campillos, en una zona de fincas agrícolas y ganaderas. Tuvo una trayectoria de al menos 700 metros de longitud hasta que se le perdió la pista. Se registraron al menos 6 naves destruidas, más de 60 cabras muertas y daños en tendido eléctrico, campo y carreteras comarcales. Numerosos árboles sufrieron daños de diversa consideración según testigos presenciales e inspección de campo, desde caída de ramas a árboles pequeños arrancados de cuajo, así como numerosos objetos que salieron volando. Del análisis de los daños producidos por este tornado se estima que pudo ser de categoría EF1 (entre 135 y 175 km/h de racha máxima), aunque probablemente en la parte superior de este intervalo y sin descartar que puntualmente pudiera haber alcanzado la categoría EF2.

El tercer tornado fue detectado hacia las 21 h.l., ya en la etapa final de la supercélula. A partir de las fotos y vídeos disponibles se aprecia que tuvo lugar al oeste de la localidad de Campillos. No se puede determinar su duración con exactitud.

Por último cabe poner de relieve que en este trabajo se ha intentado describir un episodio convectivo singular en la tarde del 26 de agosto de 2019 en el que se generó una supercélula y tuvieron lugar al menos tres tornados. Se ha hecho una revisión analítica tanto a nivel sinóptico como mesoescalar de la situación atmosférica, y se han puesto de relieve las características básicas tanto de la supercélula y los tornados a partir de las herramientas disponibles de teledetección, comparándolas con los vídeos, imágenes y estudio de campo realizados en el entorno del término municipal de Campillos.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se hubiese podido realizar sin el interés, generosidad y entusiasmo de muchas personas, entre las cuales cabe citar expresamente a las siguientes.

Muchas gracias a Alejandro Rodríguez Sánchez (@meteocampillos), que editó unos interesantísimos vídeos y fotos desde Campillos, con su cronología completa de los hechos ocurridos.

Nuestro agradecimiento a Adrián Valencia (@ArchidonaMeteo) por sus magníficas fotos y descripciones, dignas de figurar en una enciclopedia de supercélulas.

Agradecemos la colaboración y ayuda prestada a Ignacio Aguilera, quién captó con su cámara unas imágenes muy interesantes de los fenómenos acaecidos.

Gracias a Jkiko (@Jkiko_es) por facilitarnos una espléndida fotografía obtenida desde Zahara de la Sierra, que complementó nuestra idea sobre la supercélula.

Tenemos que agradecer expresamente a José Ángel Núñez, jefe de la Sección de Climatología de la Delegación Territorial de AEMET en la Comunidad Valenciana, su encomiable apoyo facilitado con la generación y georreferenciación de imágenes radar. Sin su ayuda hubiese sido imposible este trabajo.

Hay que mencionar también a Francisco Javier Bello y Alejandro Roa (ATAP-AEMET) gracias a los cuales hemos podido ejecutar el modelo WRF en el entorno de supercomputación operativo *Nimbus*.

A Miguel Ángel García Couto, jefe del Servicio de Documentación de AEMET por todo el apoyo brindado en la edición de este trabajo.

Y por último estamos muy agradecidos a José Antonio Quirantes (AEMET), gran experto práctico y teórico de la convección *severa* en España, por sus amables sugerencias y respuestas técnicas a las dudas que le fueron consultadas sobre este episodio.

9. REFERENCIAS

- BLUESTEIN, H. B., 1993. Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Oxford University Press.
- BURGESS, D.W. y LEMON, L. R., 1990. Severe thunderstorm detection by radar. Radar in Meteorology, D. Atlas, Ed., American Meteorological Society, Boston, MA, 619-647.
- CANO, D., PALACIO, I. y AYENSA, E., 2008. Estudio de una situación meteorológica el 23 de mayo de 2007 que originó una supercélula en La Mancha central. Jornadas de la AME.
- CANO, D., 2016. La imagen de la primavera — Situación meteorológica con convección organizada el día 28 de mayo de 2016. Revista *Tiempo y Clima* (AME).
- CANO, D., 2019. La imagen del verano — 26 de agosto de 2019. Inundaciones y tornados, Revista *Tiempo y Clima* (AME).
- COORAY, V., 2014. An Introduction to Lightning. Springer.
- MARKOWSKI, P. M., 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. *Advancing Weather and Climate Science*. Wiley-Blackwell.
- MARTÍN, F. *et al.*, 2001. Diagnóstico y predicción de la convección profunda. Nota técnica STAP n.º 35. Instituto Nacional de Meteorología.
- MARTÍN, F. *et al.*, 2003. Supercélula severa en el área mediterránea. Nota técnica STAP n.º 37. Instituto Nacional de Meteorología.
- MÓDULOS COMET. <https://www.meted.ucar.edu/> (Principles of Convection I, II, III).
- PEREA HITOS, C., JIMÉNEZ ALONSO, C. y RIESCO MARTÍN, J., 2014. Guía de campos y parámetros operativos de interés en el diagnóstico convectivo. Nota Técnica de AEMET.
- QUIRANTES CALVO, J. A., RIESCO MARTÍN, J. y NÚÑEZ MORA, J. Á., 2014. Características básicas de las supercélulas en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Agencia Estatal de Meteorología.
- QUIRANTES CALVO, J. A., 2019. Curso de Vigilancia y nowcasting de fenómenos convectivos — Supercélulas. Conceptos y casos. PAF 2019. AEMET.
- RIESCO MARTÍN, J., POLVORINOS PASCUAL, F., NÚÑEZ MORA, J. A., SORIANO ROMERO, J. D. y JIMÉNEZ ALONSO, C., 2015. Climatología de tornados en España peninsular y Baleares. Agencia Estatal de Meteorología.
- SAN AMBROSIO BEIRÁN, I., BUISÁN SANZ, T. B., GUTIÉRREZ COBO, T. J., LÓPEZ PÉREZ, J. M. y PASCUAL BERGHAENEL, R., 2019. Informe sobre la convección muy organizada y de tipo supercelular del día 1 de julio de 2018 en la provincia de Zaragoza. Nota técnica 29 de AEMET.

SÁNCHEZ-LAULHÉ OLLERO, J. M., AGUAYO MALDONADO, P., RIESCO MARTÍN, J., SORIANO ROMERO, J. D., POLVORINOS PASCUAL, F. y ROA ALONSO, A., 2012. Estudio meteorológico del episodio tormentoso y precipitaciones torrenciales del 16 de agosto de 2010 en Aguilar de la Frontera (Córdoba). Nota Técnica 5 de AEMET.

STOLZENBURG, M., RUIST, W. D. y MARSHAALL, T. C., 1998. Electrical structure in thunderstorm convective regions. 3. Synthesis. *J. Geophys. Res.*, 103: 14097-14108.

STOUGH *et al.* 2017. Investigating the Relationship between Lightning and Mesocyclonic Rotation in Supercell Thunderstorms.

THIAO, W., SCOFIELD, R. A. y ROBINSON, J., 1993. The relationship between water vapor plumes and extreme rainfall events during summer season. DMCA.

WILLIAMS, E. *et al.*, 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmos. Res.*, 51, 245-265.

Foto de la cubierta trasera:

Cortesía de Alejandro Rodríguez Sánchez (@MeteoCampillos)

26 de agosto de 2019 a las 19:11 horas.

Foto hecha desde Campillos. Segundo tornado, el que causó más destrozos en la localidad.

