

Caracterización supercelular en España: resultados preliminares

Autor: Carlos Calvo Sancho

Directora: María del Carmen Llasat Botija, carmell@meteo.ub.edu (1)

Co-director: Yago Martín González, ym@ucf.edu (2)

(1) *Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Diagonal 645, 08028 Barcelona, España. and*

(2) *School of Public Administration, University of Central Florida. Florida, EE. UU.**

Abstract: En el presente trabajo se analiza la influencia de los tipos de tiempo (campo de altura de geopotencial de 500 hPa) en la formación de supercélulas en España y los casos de estudios de posibles supercélulas en Campillos (Málaga) y Campo de Belchite (Zaragoza). El estudio se ha realizado empleando la base de datos de Supercélulas en España, el reanálisis del National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el modelo IP-WRF. Los resultados principales indican que destacan tres tipos de tiempo: TT3, TT7 y TT10, que tienen en común que hay difluencia en altura aportando el forzamiento dinámico necesario para la formación de supercélulas a través del tránsito de ondas cortas o la parte delantera de una vaguada sobre la vertical de la península ibérica. A título de ejemplo se estudian dos casos que muestran que los valores convectivos de la supercélula del 26 de agosto de 2019 y de la posible supercélula del 20 de julio de 2018 conformaron un entorno proclive para la convección organizada. Finalmente, es necesario realizar una interpretación cuidadosa de la distribución espacial de las supercélulas por tipo de tiempo debido al escaso número de episodios en la base de datos.

I. INTRODUCCIÓN

Algunas tormentas se asocian con fenómenos extremos (precipitaciones intensas, granizo, actividad eléctrica, vientos fuertes o muy fuertes, *flash-floods*, tornados, etc.) que con frecuencia causan daños a personas y bienes. Por ello su predicción y diagnóstico es de vital importancia para reducir el riesgo.

Aunque la mayor parte de estos episodios se asocian a tormentas multicelulares y sistemas convectivos de mesoescala, una parte, sobre todo la vinculada con tiempo severo, se debe a tormentas supercelulares.

El estudio de las tormentas supercelulares en España no está ampliamente desarrollado y su literatura científica, actualmente, es escasa. Uno de los autores que más las ha estudiado ha sido José Antonio Quirantes de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) con su estudio de Caracterización básica de Supercélulas (Quirantes et al., 2008; Quirantes et al., 2014). También la AEMET ha realizado distintos casos de estudios de supercélulas con gran impacto para la población, ya sea por la formación de tornados o por altas intensidades de precipitación. Dichos estudios se focalizaban más en el funcionamiento y desarrollo de una supercélula en vez de qué factores son los que influyen en su desarrollo, su climatología y distribución en España. En los últimos años se han dado importantes pasos para conocer mejor su desarrollo y distribución en España a través de la iniciativa de ciencia ciudadana del Foro de Tiempo.com, que se encarga de recoger y catalogar las presuntas supercélulas que se desarrollan en la geografía española (Martin et al., 2020).

Una supercélula es el tipo de tormenta menos común alrededor del mundo, pero sin embargo es la responsable,

con gran diferencia, del mayor número de incidencias por tiempo severo: granizo superior a los cinco centímetros de diámetros, tornados y/o alta actividad eléctrica superando los 200 rayos por minuto (Markowski y Richardson, 2010). En el Anexo I se explica en profundidad las características de las tormentas supercelulares.

Precisamente el objetivo de este trabajo es analizar la influencia de los tipos de tiempo en la formación de supercélulas en España y dos episodios de tiempo de severo en los que se posiblemente se produjeran supercélulas, si bien esto no se puede asegurar si no se disponen de imágenes Doppler o imágenes del evento.

II. DATOS

Los datos que se han utilizado para la clasificación de los tipos de tiempo y el estudio de los casos seleccionados son la base de datos de Supercélulas de España (Martín et al., 2020) que abarca desde el año 2014 hasta el presente, el reanálisis del *National Center For Environmental Prediction* (NCEP/NCAR), la red de radares de la AEMET y los análisis del modelo de predicción numérica hidrostático global *Global Forecast System* (GFS). En el reanálisis del NCEP se ha cubierto el período 1987-2019 y los datos cubren una amplia área (25° - 55° N y 20° W- 25° E), que incluye Europa Central y el Norte de África (Figura 1).

III. METODOLOGÍA

1. Identificación de los Tipos de Tiempo asociados a las potenciales supercélulas

Para obtener la clasificación de los tipos de tiempo de la altura de geopotencial a 500 hPa (Z500) en

* Correo electrónico: ccalvosancho@gmail.com

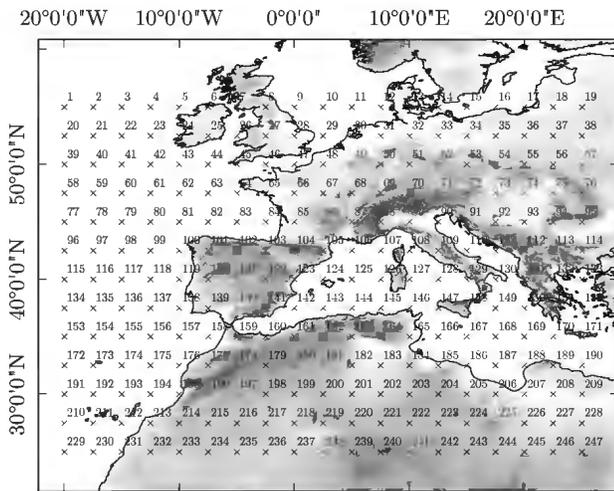


Figura 1. Rejilla de los valores de geopotencial a 500 hPa

el área geográfica seleccionada, se realizó un ACP en modo espacial (S-mode) (Richman, 1986; López-Bustins et al., 2015) para reducir las dimensiones de las variables, seguido de un análisis cluster (AC) de los días basado en retener los valores de la varianza. El S-mode usado muestra el grado de representatividad de cada día en cada componente.

Así, para escoger el número de componentes para usar en el ACP se utiliza el Scree test. Se seleccionan los primero seis componentes principales porque explican el 93.11% de la variabilidad del Z500 de los diferentes tipos de tiempo del período 1987-2019. Estas componentes principales fueron después rotadas por las medias con una rotación Varimax (Esteban et al., 2006). Los valores muestran un grado de representatividad asociada a los modos de variación de cada componente principal, es decir, la clasificación de cada día con su centroide más representativo (Lemus-Canovas et al., 2019).

Se han obtenido doce tipos de tiempo que se muestran en la Figura 2. Los tres tipos de tiempo más frecuentes son anticiclónicos, pero en estos tipos se encierran vaguadas de ondas cortas que desarrollan convección organizada en España. Una descripción más a fondo de esta metodología se encuentra en Lemus-Canovas et al., (2019) y en SynoptReg, el paquete de R que se ha utilizado para desarrollar esta investigación.

Una vez se tiene el tipo de tiempo de cada día para el período 2014-2019 (período de la base de datos de supercélulas en España) se seleccionan e identifican aquellos días en que hubo potencialmente una supercélula. Para ello se ha utilizado una unión espacial (*Join*) a través del software ArcGIS para hacer la relación espacial y temporal de las supercélulas en función de los tipos de tiempo. De esta forma, se puede obtener la distribución de las supercélulas

en la geografía peninsular y balear.

2. Casos de estudio

Para determinar los factores que propiciaron el desarrollo de las potenciales supercélulas en los dos casos de estudio se ha utilizado los tipos de tiempo obtenidos, la modelización mesoescalar del modelo IP-WRF y los parámetros termodinámicos en cada caso de estudio.

- a) Tipos de tiempo. Tras identificar las potenciales supercélulas con su tipo de tiempo, se seleccionan dos de distinto tipo de tiempo. Tras ello, se ha analizado la situación sinóptica de cada posible supercélula.
- b) Modelización mesoescalar con IP-WRF. Con el modelo IP-WRF se han simulado los días de las posibles supercélulas con inicialización en frío a través de los análisis del *Global Forecast System (GFS)* del NCEP/NCAR. Hay un análisis cada 6-horas (00, 06, 12, 18 UTC). El modelo necesita unas horas de *spin-up* (en general, unas 5-6 horas). En la Tabla I se recoge los esquemas utilizados en el IP-WRF. Se va a obtener una serie de variables para hacer el diagnóstico de los casos de estudio, que son las siguientes: MUCAPE, Lifted Index (LI), cizalladura a distintos niveles (0-6 kilómetros, 0-3 kilómetros y 0-1 kilómetros) y la helicidad relativa a la tormenta a distintos niveles (0-6 kilómetros, 0-3 kilómetros y 0-1 kilómetros).
- c) Herramientas de vigilancia. Se van a utilizar distintas herramientas de vigilancia meteorológica procedente de la AEMET. Las principales herramientas van a ser radar (reflectividad y velocidad radial), satélite (HRVIS, IR y WV) e imágenes del evento, si existieran.

Tabla I. Esquemas de parametrizaciones utilizados en el IP-WRF

Parametrización	Dominios 45-15 km	Dominios 3-1 km
Microfísica	Thompson (28)	Thompson (28)
Onda larga	New Goddard (5)	New Goddard (5)
Onda corta	New Goddard (5)	New Goddard (5)
Llamada radiación	5 min	5 min
Convección	New Tiedke (16)	Deshabilitado
Capa superficial	MM5 Revisado (1)	MM5 Revisado (1)
Superficie terrestre	5-Layer (1)	5-Layer (1)
Capa límite	BouLac (8)	BouLac (8)

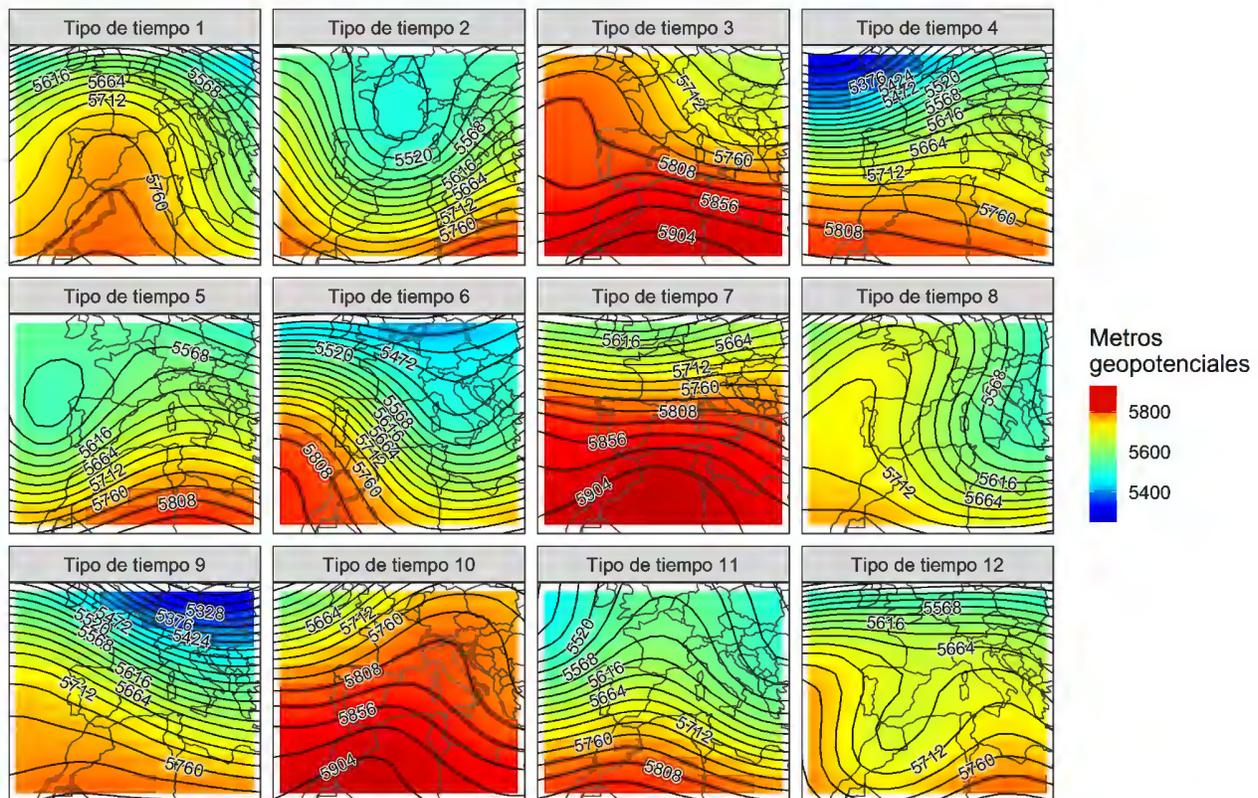


Figura 2. Composición de los tipos de tiempo para el geopotencial a 500 hPa para el período 1987-2019

IV. RESULTADOS

A. Tipos de tiempo y distribución de posibles supercélulas

La composición anual de Tipos de Tiempo (TT) para el período 1987-2019 para los 12 TT se muestran en la Figura 2 y su correspondiente descripción de las distintas características sinópticas de cada TT para el campo de 500 hPa se presenta a continuación en la Tabla II.

Una característica para determinar el rol que tienen los tipos de tiempo en la formación y distribución de las potenciales supercélulas en España es calcular cuál es su frecuencia. Se puede observar en la Figura 3 que la variabilidad de los TT en la PI es alta durante todo el año, pero destaca principalmente tres: el TT3, el TT7 y el TT10.

Dichos TT tienen en común que son un patrón sinóptico que predomina en verano con circulación zonal de poniente o dorsal cercana a la PI. Debido a este patrón común de circulación zonal de poniente en los TT3 y TT7, es factible que la formación de las potenciales supercélulas sea por la transición de ondas cortas por la PI. Dichas ondas cortas aportan el forzamiento dinámico necesario para la formación de la convección profunda sobre la PI. Respecto al TT10, es un patrón de una dorsal al sureste de la PI sobre el mediterráneo occidental y una

ligera vaguada al noroeste de la PI. Dado que la PI se encuentra sobre la vertical en el ramal divergente en altura de la vaguada, provoca que existan movimientos verticales generalizados espacialmente destacando convección somera y organizada en todo el territorio español.

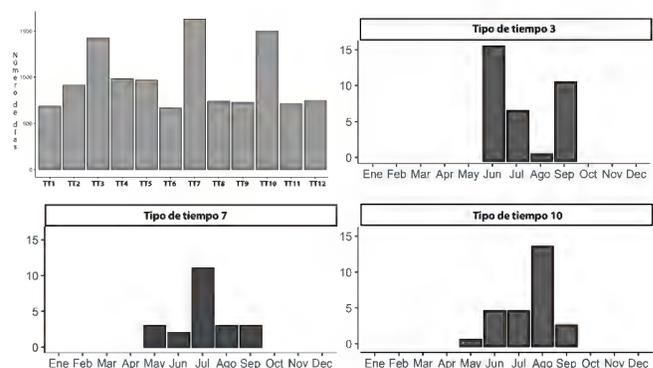


Figura 3. (a) Número de días que cada TT se produce en el período 1987-2019; (b) Número de potenciales supercélulas que se produjeron con el TT3 en los distintos meses; (c) Número de potenciales supercélulas que se produjeron con el TT7 en los distintos meses; (d) Número de potenciales supercélulas que se produjeron con el TT10 en los distintos meses.

Se puede observar que cada TT tiene una mayor afeción temporal para el desarrollo de las potenciales su-

Tabla II. Descripción de los distintos tipos de tiempo en el período 1987-2019 para la Península Ibérica.

Descripción	TT
D1. Dorsal y circulación anticiclónica en altura sobre la PI.	TT1
D2. Eje meridiano de la dorsal al este del archipiélago de las Azores.	TT6
D3. Dorsal al noroeste de la PI.	TT8
D4. Dorsal sobre la PI extendiéndose hacia el norte de Europa (Pluma ibérica) con circulación anticiclónica sobre la PI.	TT11
D5. Dorsal al suroeste de la PI.	TT9
V1. Vaguada al norte-noreste de la PI. Circulación de noroeste en altura.	TT2
V2. Vaguada profunda al noroeste de la PI. Circulación de suroeste en altura.	TT5
V3. Vaguada al noroeste de la PI. Circulación de suroeste en altura.	TT4
V4. Vaguada al sureste de la Península. DANA.	TT12
S1. Circulación zonal de poniente con bloqueo anticiclónico en diamante al oeste de la PI.	TT3
S2. Circulación zonal de poniente sobre la PI.	TT7
S3. Dorsal al sureste de la PI. Circulación de suroeste y anticiclónica en altura.	TT10
Tres patrones generales sobre la PI: D dorsal, V vaguada y S verano.	

percélulas en España: los valores más altos son en junio, julio y agosto para TT3, TT7 y TT10, respectivamente.

En la Figura 4 se muestra la distribución espacial de las posibles supercélulas en España para el período 2014-2019 (período de datos de supercélulas en España (Martín et al., 2020) en función de los tipos de tiempo.

El TT1 destaca en posibles supercélulas localizadas en la costa occidental de Andalucía. Las posibles supercélulas suelen ser supercélulas invernales que vienen asociadas a difluencia en altura sobre dicha zona y dorsal sobre el centro peninsular. Suelen ir asociadas a tiempo severo, con alta frecuencia de formación de tornados. Dichos sistemas suelen desarrollarse en entornos convectivos de alta cizalladura y baja CAPE (Soriano y Gutiérrez, 2019).

El TT3 es una situación de bloqueo en diamante que puede dar lugar a transición de ondas cortas sobre la PI pudiendo formar convección somera y/u organizada. La distribución espacial se concentra en el sector ENE de la PI, pero también tiene presencia en otros sectores, como en el País Vasco o SE peninsular. El punto con mayor densidad de potenciales supercélulas del TT3 es en el Bajo Aragón histórico en la provincia de Teruel.

El TT5 es un tipo de tiempo primaveral donde el calentamiento diurno comienza a ser un factor más en la formación de tormentas. Su distribución espacial se concentra en el eje del valle del Ebro. Su causa, aunque no la

única, es la difluencia en altura que está en diagonal sobre la vertical en el cuadrante NE de la PI. Resaltar la zona de la costa de Huelva, debido a que aparecen posibles supercélulas con gran número de fenómenos tornádicos. El 4 de marzo de 2018 se produjo un tornado outbreak en la provincia de Huelva con cuatro tornados asociados a potenciales supercélulas de topes bajos, altos valores de cizalladura y bajos valores de CAPE. Es decir, es una potencial supercélula denominada *mini-(low topped) supercell* (Marwitz et al., 1972; Davies, 1990, Soriano y Gutiérrez, 2019).

El TT7 es el tipo de tiempo más frecuente en el período 1987-2019. Es una situación de circulación zonal de poniente donde predomina la transición de ondas cortas sobre la PI que aportan el forzamiento dinámico para la formación de convección somera y organizada. La distribución espacial del TT7 se localiza en el E peninsular, en el SE de la provincia de Teruel y en el NW de la provincia de Castellón. En este emplazamiento se localiza la mayor densidad de actividad eléctrica de toda España, en la Sierra del Rayo (Nuñez-Mora et al., 2019). También existen otros focos de densidad elevada de posibles supercélulas como en la Comunidad de Madrid y en el interior de las provincias de Albacete, Alicante y Valencia.

El TT10 es un patrón sinóptico propicio para la formación de convección somera y organizada. El eje de la dorsal está sobre el SE peninsular hacia la península itálica, mientras que el ramal divergente de la pseudovaguada está sobre la PI y la difluencia sobre el cuadrante NE esencialmente. La distribución espacial del TT10 se localiza en el cuadrante NE peninsular. Destaca la provincia de Teruel tanto el Bajo Aragón histórico (se compone por las comarcas del Andorra-Sierra de Arcos, Bajo Martín, Bajo Aragón, Bajo Aragón-Caspe y Matarranya) como el Maestrazgo turolense. También destacan zonas como La Rioja, Cinco Villas (Zaragoza) o el N de la provincia de Barcelona.

En el conjunto de los TTs (TT3, TT7 y TT10) propensos a la formación de posibles supercélulas, destaca el Sistema Ibérico y, por ende, la provincia de Teruel. Con una gran variedad de patrones sinópticos permite la formación de convección somera y organizada que puede dar lugar a posibles supercélulas. Esto es debido a una serie de condiciones que la hacen muy favorable: es una área proclive para las convergencias en capas bajas entre el flujo húmedo de levante (brisas marinas) y el procedente del interior peninsular, el calentamiento diurno de un área extensa a una elevada altitud haciendo que las parcelas de aire partan de superficie sin energía de inhibición convectiva (CIN) y los valores de cizalladura vertical suelen ser elevados. Es por ello, también, que la mayor densidad de rayos se encuentre en el Maestrazgo turolense.

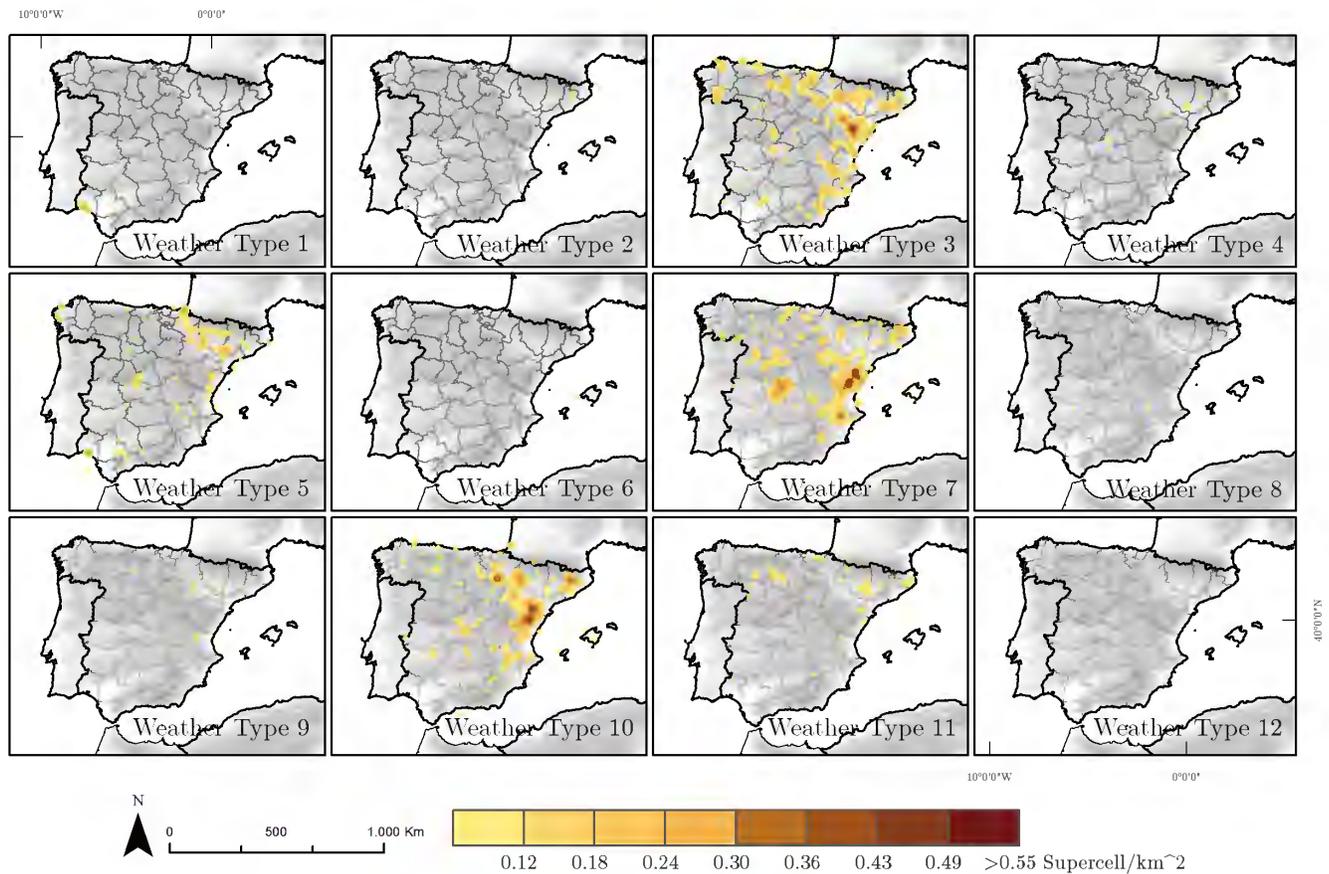


Figura 4. Distribución espacial de las potenciales supercélulas en función del tipo de tiempo.

B. Caso de estudio I: supercélula tornádica de Campillos, Málaga

La tarde del 26 de agosto de 2019 numerosas tormentas severas afectaron a distintas zonas de la geografía española, destacando el sur peninsular, la meseta norte y el sistema ibérico. Esa tarde la península ibérica se encontraba bajo la influencia de una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) ubicada en el extremo oeste peninsular (Figura 6). Esto dió lugar a que la parte delantera de la vaguada estuviera sobre gran parte del sur-centro peninsular. Resalta también el importante gradiente térmico vertical existente entre superficie (25/30 °C), 850 hPa (14/20 °C) y 500 hPa (-18/-12 °C). Todos estos factores contribuyeron en el desarrollo de inestabilidad en amplias zonas de la península ibérica. El tipo de tiempo del 26 de agosto de 2019 fue TT10.

El comienzo de la convección fue observado a través del radar de Málaga de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) alrededor de los 15:10 UTC en el sureste de la provincia de Sevilla (Comarca Sierra Sur de Sevilla) (Figura 5). La estación de aficionados en Estepa (cercana a la zona del comienzo de la convección) a las

12 UTC registraba una temperatura del aire de 25 °C y una temperatura de punto de rocío de 17 °C. Las células convectivas se desarrollaron en una región que tuvo una potente insolación en torno a las 3-4 horas.

Después, la tormenta estudiada que había comenzado a desarrollarse en el sureste de la Sierra Sur de Sevilla evolucionó rápidamente a un sistema potencialmente supercelular (1650 UTC) (Figura 5). El sistema registró reflectividades superiores a 50 dBz evidenciando la convección profunda, un movimiento anómalo debido a que tenía una dirección de NNE y el viento rector era de SW. Es decir, un movimiento claramente diferenciado que hacía destacar dicho sistema respecto al resto.

Alrededor de las 1730 UTC, el sistema se había desplazado claramente hacia el SSE y comenzaba a tener una serie de características que intuía una división supercelular (*splitting supercell*). Poco después de 1800 UTC, se observan los dos miembros procedentes de la división supercelular a través de radar. Ambos miembros tuvieron un ciclo de vida superior a los 60 minutos y, sobre todo en el miembro con movimiento hacia la derecha, tuvo unos ecos de radar muy característicos que permite la clasificación como supercélula con la Lemon Technique (Dupage,

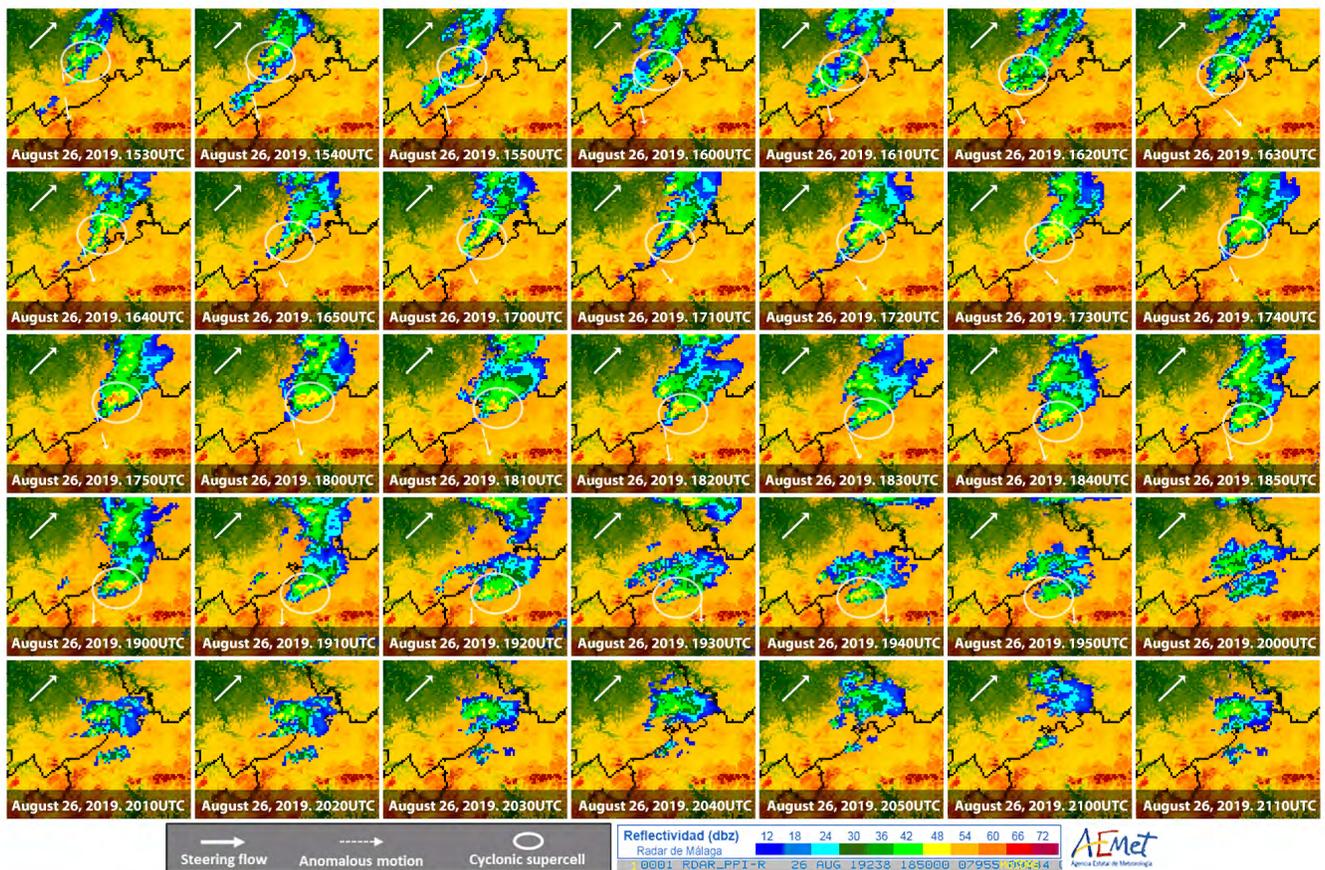


Figura 5. Secuencia radar del producto PPI del radar de Málaga el día 26 de agosto de 2019.

1977) que sirve para identificar fenómenos supercelulares a través de radar meteorológico.

El miembro de la derecha de la división supercelular se desplazó hacia el municipio de Campillos siendo una supercélula tornádica donde generó tres tornados (EF1-EF2-EF0) entre las 1730 y 1930 UTC de mínimo 30 minutos de duración cada uno que provocó daños materiales en fincas agrícolas y eras. En este lapso de tiempo se observan sobresalientes características de radar de convección organizada y, especialmente, supercelular. A las 1740 UTC un hook-echo se ha desarrollado (eco de radar en forma de coma) y que posteriormente también se puede observar (1820, 1840, 1850, 1900, 1910, 1920 UTC). En el hook-echo se observa una región de eco débil o WER (Weak-Echo Region), un ‘agujero’ en la reflectividad que evidencia las intensas corrientes ascendentes siendo una configuración potencial de fenómenos tornádicos, mostrando la potencial amenaza de tiempo severo. En el momento de la formación de los tornados (- 1800/1835 UTC; - 1845/1915 UTC; - 1900/indeterminado UTC) cerca del municipio de Campillos, las características de radar del producto PPI no sugerían la posibilidad de formación de tornado.

El análisis de la velocidad radial (producto Doppler del radar de Málaga), a pesar de ser un poco ruidosa, mues-

tra un sistema precipitante que se aleja del radar hacia el NW, mientras que en el extremo SSE se acerca hacia el radar (figura no mostrada por restricción espacial del trabajo). Esto sugiere la presencia de un mesociclón debido a la diferencia de signo de velocidades que nos indica que en dicha región hay una rotación. Esto permite confirmar y clasificar la posible supercélula como una supercélula ciclónica.

Tabla III. Índices convectivos obtenidos de radiosondeos atmosféricos simulados por el modelo IP-WRF en el municipio de Campillos (Málaga) el día 26 de agosto de 2019 en diferentes instantes temporales. MLCAPE: Mixed-layer CAPE; SRH3: helicidad relativa a la tormenta de 0 a 3 Km; Cizalladura vertical del viento de 0 a 6 Km.

Hora (UTC)	MLCAPE	SRH3	CIZ6
1200	2482 J/Kg	23 m ² /s ²	20 m/s
1500	2354 J/Kg	45 m ² /s ²	22 m/s
1800	1755 J/Kg	90 m ² /s ²	15 m/s
2100	937 J/Kg	17 m ² /s ²	15 m/s

El entorno ambiental preconvectivo y convectivo del día 26 de agosto de 2019 en las comarcas de Antequera (Málaga) y Sierra de Sur de Sevilla (Sevilla) concurrían

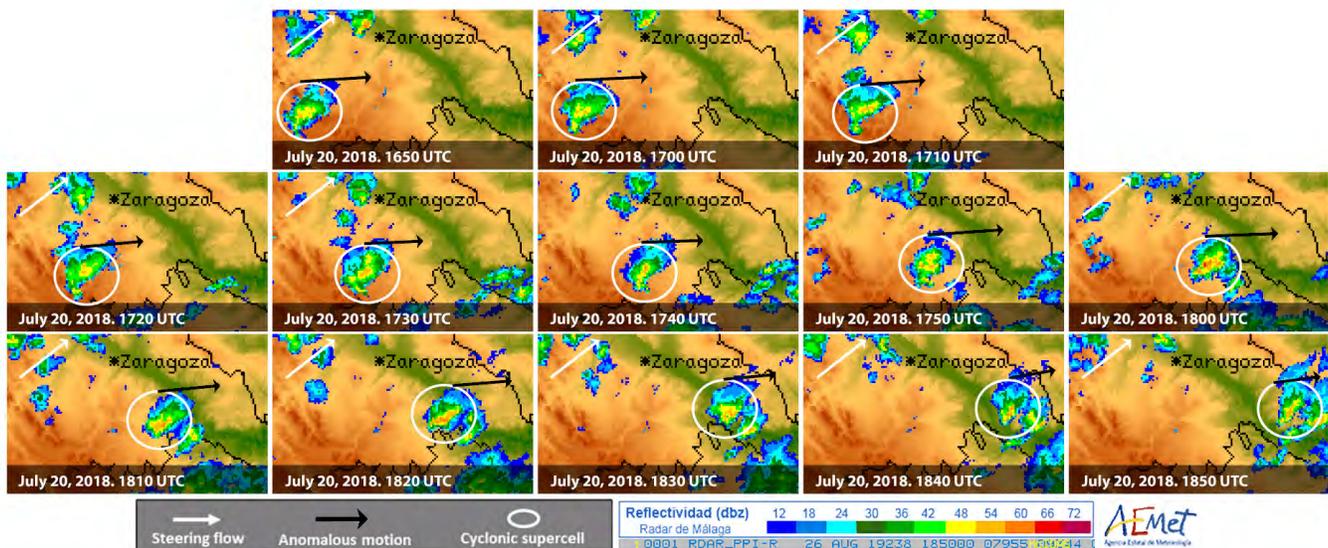


Figura 9. Secuencia radar del producto PPI del radar de Zaragoza el día 20 de julio de 2018 (izquierda); cizalladura (m/s) y helicidad relativa de la tormenta (m²/s²) a 0-3 Km y 0-6 Km (arriba derecha) a las 1820 UTC; CAPE (J/Kg) a las 1820 UTC.

ra, siendo superior a las tres horas.

La cizalladura vertical a 0-1 Km 0-3 Km y 0-6 Km (Figura 8) revelaban valores muy altos en el entorno preconvectivo y convectivo. Antes del comienzo del desarrollo de las células convectivas se observaban valores significativos típicos de entornos convectivos favorables para el desarrollo de supercélulas (superior a 12 m/s). El instante temporal en el que se observaron los valores máximos de cizalladura en todos los niveles fue a las 1925 UTC: 35.7 m/s de cizalladura en los primeros seis kilómetros.

La helicidad relativa a la tormenta (SRH) a 0-1 Km, 0-3 Km y 0-6 Km revelaba valores medios-altos en el entorno preconvectivo (Figura 8), pero durante el entorno convectivo aumentaron observándose valores extremadamente altos (SRH > 600 m²/s²) (Figura 8). Por lo tanto, se superó, con creces, el umbral de SRH para el potencial desarrollo de supercélulas en España (SRH > 200 m²/s²) (Quirantes et al., 2014). El instante temporal en el que se observaron los valores máximos de helicidad relativa a la tormenta (SRH) fue a las 1925 UTC: 771.49 m²/s² de SRH en los primeros tres kilómetros.

C. Caso de estudio II: supercélula de alta intensidad de precipitación en Belchite, Zaragoza

En julio de 2018 numerosas tormentas severas afectaron a la comunidad autónoma de Aragón, especialmente la provincia de Zaragoza con dos importantes eventos que destacaron: el 1 de julio con un reventón húmedo (*wet downburst*) causado por una división supercelular que registró 157 km/h en el Aeropuerto de Zaragoza, y el 11 de julio por otro reventón (*esclafit*) que afectó la ciudad de Zaragoza con numerosos daños materiales. La tarde del 20 de julio de 2018 la península ibérica se encontra-

ba bajo la influencia de una profunda vaguada ubicada su eje sobre la mitad oeste peninsular (Figura 10). Ese día se registró un importante gradiente térmico vertical entre superficie (25/32 °C), 850 hPa (14/20 °C) y 500 hPa (-14/-12 °C). Resaltar también el gradiente térmico horizontal en la zona de estudio, siendo de +10 °C en pocos kilómetros. Todos estos factores contribuyeron para la formación de inestabilidad en numerosos puntos de la geografía zaragozana. El tipo de tiempo del 20 de julio de 2018 fue TT7.

Durante la tarde del 20 de julio, en la provincia de Zaragoza se desarrollaron importantes tormentas potencialmente supercélulas que afectaron especialmente a dos comarcas: Comarca de Tarazona y El Moncayo, y Comarca del Campo de Belchite. En la comarca de Tarazona afectaron en distintos instantes temporales tres posibles supercélulas: una formada sobre la provincia de Soria y dos con formación sobre la misma comarca. En el Campo de Belchite se intensificó una posible supercélula procedente del Campo de Daroca dejando un mesociclón visualmente magnífico.

El comienzo de la convección fue observada a través del radar de Zaragoza de la AEMET alrededor de las 1620 UTC en el Campo de Daroca. La estación de aficionados en Calamocha (cercana a la zona del comienzo de la convección) a las 12 UTC registraba una temperatura del aire de 26 °C y una temperatura del punto de rocío de 17 °C. Las células convectivas se desarrollaron en una región que tuvo un calentamiento continuado de unas 5-6 horas.

Después, la tormenta estudiada que había comenzado a desarrollarse en el Campo de Daroca evolucionó rápidamente a un sistema supercelular (1650 UTC) (Figura 9). El sistema registro un movimiento anómalo debido a que tenía una dirección W y el viento rector era de SW.

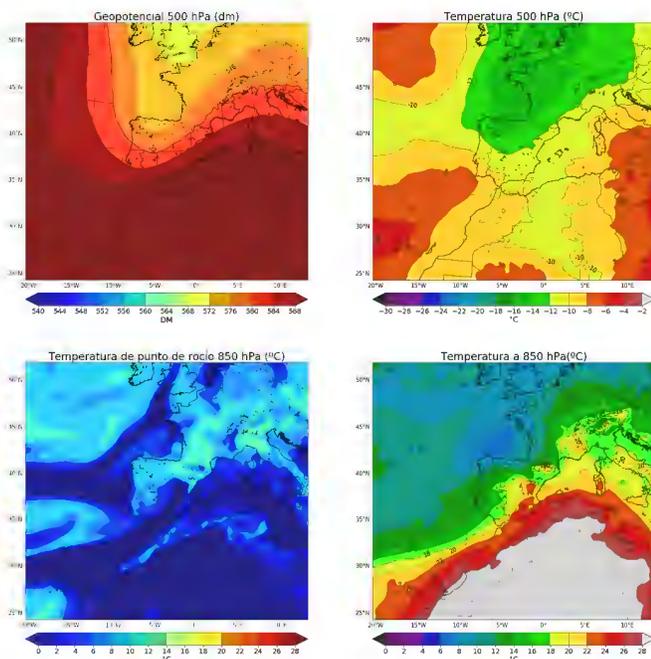


Figura 10. Situación sinóptica del día 20 de julio de 2018. Arriba izquierda: altura geopotencial a 500 hPa (DM); arriba derecha: temperatura a 500 hPa (°C); abajo izquierda: temperatura de punto de rocío (°C); abajo derecha: temperatura a 850 hPa (°C).

Es decir, como en el caso anterior, existía un movimiento claramente diferenciado.

El sistema supercelular tuvo una duración superior a los 60 minutos, ecos de reflectividad superior a 60 dB y diferentes características de la morfología de radar significativas de una posible supercélula (Dupage, 1977). A las 1650 UTC se asemeja la clásica característica de *hook-echo* asociado a las tormentas supercelulares (Dowell y Burguess, 1993) que en las imágenes posteriores se puede observar (1700, 1710, 1720, 1730, 1740 UTC). En ciertos momentos se puede observar una característica muy común en tormentas supercelulares: una región con reflectividad más débil, es decir, un *WER* (Weak Echo Region).

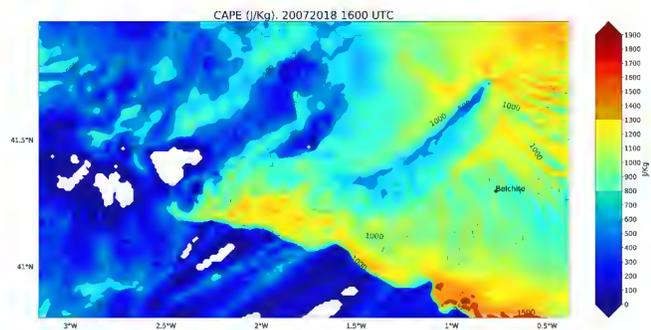


Figura 11. CAPE (J/Kg) a las 1820UTC. 20 de julio de 2018.

Las imágenes de la velocidad radial (producto Doppler del radar de Zaragoza), a pesar de ser un poco ruidosa, muestra un sistema precipitante que se aleja del radar hacia el suroeste que en su extremo S se acerca hacia el radar (figura no mostrada por restricción espacial del trabajo). Esto sugiere la presencia de un mesociclón, permitiendo confirmar y clasificar la posible supercélula como una supercélula ciclónica.

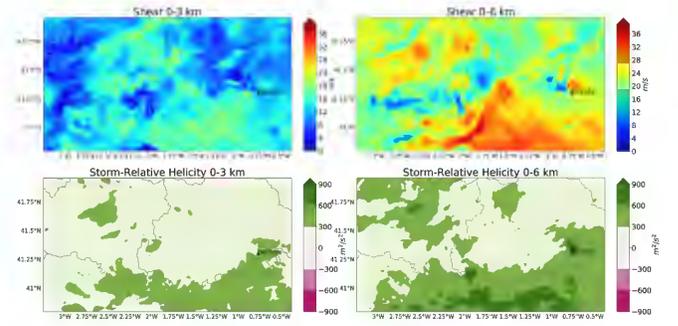


Figura 12. Cizalladura 0-1 Km, 0-3 Km y 0-6 km (arriba); y helicidad relativa a la tormenta (SRH) 0-1 Km, 0-3 Km y 0-6 Km (abajo). 20 de julio 1820 UTC.

El entorno ambiental preconvectivo y convectivo del día 20 de julio en el Campo de Daroca y Campo de Belchite concurrían valores de CAPE y cizalladura superando los umbrales de referencia en España (Quirantes et al., 2008; Quirantes et al., 2014) (Tabla IV).

Tabla IV. Índices convectivos obtenidos de radiosondeos atmosféricos simulados por el modelo IP-WRF en el municipio de Belchite (Zaragoza) el día 26 de agosto de 2019 en diferentes instantes temporales. MLCAPE: Mixed-layer CAPE; SRH3: helicidad relativa a la tormenta de 0 a 3 Km; Cizalladura vertical del viento de 0 a 6 Km.

Hora (UTC)	MLCAPE	SRH3	CIZ6
1200	1351 J/Kg	15 m ² /s ²	26 m/s
1500	774 J/Kg	14 m ² /s ²	22 m/s
1800	1174 J/Kg	11 m ² /s ²	23 m/s
2100	36 J/Kg	16 m ² /s ²	18 m/s

La CAPE registró valores altos durante la tarde del 20 de julio en toda la provincia de Zaragoza (Figura 11) en valores en torno a 600 y 900 J/Kg. Tuvo una alta variabilidad tanto espacial como temporal, dado que en distintos instantes temporales se superaba ampliamente los 1000 J/Kg.

La cizalladura vertical a 0-3 km y 0-6 km revelaban valores muy altos en el entorno preconvectivo y convectivo (Figura 12). Antes del comienzo del desarrollo de las células convectivas se observaban valores significativos típicos de entornos convectivos favorables para la formación de tormentas supercelulares (superior a 12 m/s). El momento temporal que se registraron los valores máximos de cizalladura 0-6 Km en el Campo de Belchite fue a las 1820 UTC: 29 m/s.

La helicidad relativa a la tormenta (SRH) a 0-3 Km y 0-6 Km mostraba valores muy altos en el entorno convectivo del Campo de Belchite (SRH > 700 m²/s²) (Figura 12). El instante temporal que revelaba los valores máximos de SRH fue a las 1820 UTC: 751 m²/s² en los primeros tres kilómetros.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado una clasificación de tipos de tiempo asociados con las supercélulas registradas en el período 2014-2019 así como el estudio de dos eventos notorios de dos posibles supercélulas.

Destacan especialmente tres tipos de tiempo: TT3, TT7 y TT10. Dichos TTs son claramente anticiclónico y no aportan el tipo de tiempo sinóptico aparentemente favorable, si bien es propio del verano que es cuando más dominan. Sin embargo, su relación con sistemas convectivos hace pensar en la posible existencia de vaguadas secundarias. En la distribución espacial de las supercélulas en España destaca el cuadrante noreste de la Península y, especialmente, la comunidad autónoma de Aragón. Debido al escaso número de datos (período 2014-2019), requiere una interpretación cuidadosa de los resultados debido a la gran influencia de pocos días, pero con gran número de supercélulas.

El caso de estudio de la potencial supercélula de Campillos con la formación de tres tornados revela que los valores registrados el 26 de agosto de los distintos parámetros e índices convectivos superan, ampliamente, los umbrales típicamente observados y establecidos para la formación de supercélulas en la península ibérica (Quirantes et al., 2014) y, además, son indicativos de la potencial rotación de la corriente ascendente, produciendo un mesociclón en la base y, por tanto, el potencial desarrollo de una supercélula. Además, debido a los valores observados de cizalladura en el primer kilómetro, había una alta probabilidad de tornadogénesis (superior a 10 m/s) (Markowski y Richardson, 2010). Todas estas condiciones conforman de forma significativa lo que se considera un entorno supercelular.

El caso de estudio de la potencial supercélula del Campo de Belchite revela que los valores registrados el 20 de julio de 2018 de los distintos parámetros e índices convectivos están en torno a los valores medios observados y establecidos para la formación de potenciales supercélulas en la península ibérica, excepto la SRH. Además, son indicativos de la potencial rotación de la corriente ascendente.

Por último, he de destacar que esta investigación continuará a través del estudio de los entornos preconvectivos y convectivos en España a través del estudio diario de cada supercélula confirmada en la base de datos de Martín et al. (2020), y la posible realización de un doctorado sobre la materia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mis tutores, María del Carmen Llasat y Yago Martín, por su apoyo y ayuda en todo momento en la realización de este TFM. Agradecer a Marc Lemus la ayuda que recibí en verano de 2019 para la realización de la clasificación de los tipos de tiempo a través de su paquete para R SynoptReg. Dar las gracias a mis compañeros del Proyecto Supercélulas que están creando y manteniendo desde 2014 la base de datos de Supercélulas en España a través de ciencia ciudadana. Agradecer a la AEMET, y en especial a la Delegación de Cataluña, por el apoyo e interés de la investigación que ha desembocado en este TFM. Por último, agradecer a mi familia, amigos y compañeros del máster por el apoyo e interés para hacer lo que he querido desde pequeño y en la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Doswell, C., y Burgess, D. (1993). Tornadoes and Tornadoic Storms: A Review of Conceptual Models.
- Dupage, C. (1977). The Lemon Technique. 1–6.
- Esteban, P., Jones, P. D., Martín-Vide, J., y Mases, M. (2005). Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 25(3), 319–329.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S. K., Hnilo, J. J., Fiorino, M., y Potter, G. L. (2002). NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11), 1631–1643+1559.
- Lemus-Canovas, M., Lopez-Bustins, J. A., Martín-Vide, J., y Royé, D. (2019). synoptReg: An R package for computing a synoptic climate classification and a spatial regionalization of environmental data. *Environmental Modelling and Software*, 118(April), 114–119.
- Markowski, P., y Richardson, Y. (2010). Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. In *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*.
- Martin, Y., Civica, M., y Pham, E. O. (2020). Constructing a database of supercells in Spain using publicly available PPI radar and citizen science. 1–25.
- Marwitz, J. D., Auer, A. H., y Veal, D. L. (1972). Locating the Organized Updraft on Severe Thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 11, pp. 236–238.
- Núñez, J. A., Riesco, J., y Mora, M. A. (2019). Climatología de descargas eléctricas y de días de tormenta en España. *Climatología de Descargas Eléctricas y de Días de Tormenta En España*.
- Quirantes, J. A., Martín, J., y Mora, J. A. (2014). Características básicas de las supercélulas en España. 1–57.
- Quirantes, J. A. (2008). Nociones básicas sobre Supercélulas.
- Soriano, J. D. D., y Gutiérrez, D. (2019). Case study of multiple low topped supercell tornadoes in SW Iberia . March 4 , 2018. (November), 2019.

ANEXO I. CARACTERÍSTICAS DE LAS SUPERCÉLULAS

Una supercélula es una tormenta con una corriente ascendente rotacional que contiene un profundo y persistente sistema de bajas presiones con una circulación cerrada en el campo de vientos a nivel mesoescalar, denominado mesociclón (Fujita, 1963; Doswell y Burgess, 1993; Davies-Jones, 2015). ‘Profundo’ se refiere al criterio objetivo de la definición de mesociclón sin interrupción sobre la vertical en al menos un tercio de la corriente ascendente (Doswell y Burgess, 1993). ‘Persistente’ se refiere a tener, al menos, dos actualizaciones consecutivas de imagen radar, lo que equivaldría a una duración de entre 10 y 15 minutos como mínimo (Doswell y Burgess, 1993). Usualmente, una supercélula es unicelular, cuasiestática y con movimiento anómalo, pero no siempre es así ya que puede estar embebida en un sistema convectivo, puede pertenecer a un sistema multicelular o no puede tener movimiento anómalo en un principio. Una supercélula con rotación ciclónica tiene una componente de propagación hacia la derecha de la cizalladura del viento medio. Aunque en general las supercélulas tienen rotación ciclónica, es posible encontrar un pequeño porcentaje de supercélulas con rotación anticiclónica con una componente de propagación hacia la izquierda del viento rector o dominante. En Estados Unidos, un mesociclón asociado a una supercélula se caracteriza por una región de vorticidad vertical con una anchura de 3 a 8 kilómetros localizándose en el entorno de 700 hPa. Asimismo, es el viento a esta altura el que usualmente rige el desplazamiento de la tormenta (Davies-Jones, 2015).

El mesociclón en altura es consecuencia de una corriente inclinada ascendente (*tilting-updraft*) de vorticidad horizontal presente en el flujo de la tormenta que está asociada con altos valores de cizalladura del viento medio. Esto provoca que la vorticidad vertical sea amplificada por la expansión vertical en niveles bajos de la corriente ascendente y transportada en el ascenso de la parcela de aire. La velocidad vertical en las supercélulas suele ser notoria, es decir, que puede exceder los 50 m/s.

Las supercélulas contienen dos corrientes descendentes: Rear-Flank Downdraft (RFD) y Forward-Flank Downdraft (FFD). El RFD se corresponde a la región en forma de coma o gancho (*hook-echo region*) en el flanco trasero de la tormenta. Se forma cuando los vientos secos de niveles medios y altos invaden el flanco trasero de la corriente ascendente. El FFD se corresponde con una zona de precipitación más estratificada en el flanco delantero de la tormenta. El FFD y el RFD producen conjuntamente una estructura de frente de racha en superficie que se asemeja a una estructura frontal asociada a un ciclón extratropical de latitudes medias.

El flujo de entrada de la corriente ascendente de una supercélula es frecuentemente fuerte y suele estar asociado a una baja mesoescalar relativa con una presión inferior 1-3 hPa respecto al entorno denominada *inflow low*. Una de las condiciones esenciales, pero no deter-

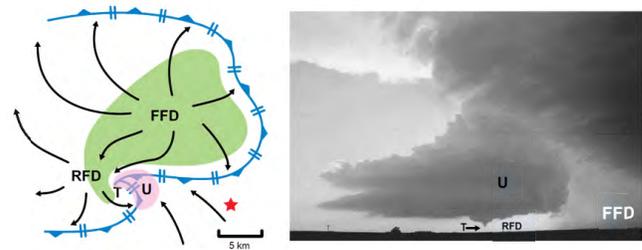


Figura 13. Representación esquemática de una tormenta supercelular (Lemon y Doswell, 1979). El sombreado verde se refiere a una aproximación de la precipitación vista desde radar (> 35 dBz). Se localiza el FFD y el RFD. T muestra la localización típica de la formación de un tornado. El sombreado rosa, y que se representa como una U, es la región principal de la corriente ascendente. La estructura de frontal (frente de racha) se dibuja como contorno. La estrella es el punto aproximado donde se ha realizado la fotografía de la derecha (Erik Rasmussen). (Markowski y Richardson, 2010).

minante, para el desarrollo de una supercélula es la de altos valores de CAPE (Convective Available Potential Energy) en el entorno de la parcela de aire. Con la helicidad se puede obtener una medida cuantificable de la rotación de la parcela de aire en la corriente ascendente. Para predecir la formación e intensidad de los mesociclones se evalúa la helicidad ambiental relativa a la tormenta (Storm-relative Environmental Helicity) (SREH) desarrollado por Davies-Jones et al., (1990) y Droegemeier et al., (1993). Si la SREH es positiva (negativa) es que el entorno de la tormenta está asociado con una advección de vorticidad ciclónica (anticiclónica). Las supercélulas suelen ocurrir en entornos que contienen altos valores de cizalladura vertical del viento. Valores de SREH en los estratos comprendidos entre 0-3 km superiores a $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ indican entornos potenciales para el desarrollo de supercélulas. En supercélulas y tornados *outbreaks* los valores SREH en niveles 0-3 km pueden exceder los $400 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

En entornos con fuerte cizalladura puramente unidireccional, las supercélulas sufrirán el proceso denominado *Storm-Splitting*. Este fenómeno se caracteriza principalmente en la división de una célula no-supercelular en dos células supercelulares: una con movimiento hacia la derecha (ciclónica) y otra hacia la izquierda (anticiclónica). La división de la tormenta es el resultado de dos fenómenos:

1. La precipitación que se acumula a lo largo del eje oeste-este ejerce una fuerza de arrastre hacia abajo de la parcela de aire, virando la corriente ascendente en descendente allí, causando el máximo original hasta desaparecer (Klemp et al., 1978). Este efecto acelera el proceso de división.
2. Los vórtices son centros de bajas presiones y la fuerza de presión de la corriente ascendente bajo los vórtices genera nuevas corrientes ascendentes de

crecimiento.

Las supercélulas se pueden dividir en tres distintos tipos, principalmente: Supercélula Clásica (Classic Supercell – CL), Supercélula de Alta Precipitación (High Precipitation Supercell – HP) y Supercélula de Baja Precipitación (Low Precipitation Supercell – LP) (Doswell y Burgess, 1993). Las CL tienen la gran mayoría de su precipitación en el flanco delantero (FFD) con poca precipitación en el flanco trasero donde se localiza la corriente ascendente. Las LP tienen casi toda su precipitación desplazada de su corriente ascendente en el flanco delantero de la tormenta, donde mucha de ella es evaporada antes que toque la superficie. Las LP pueden parecer visualmente espectaculares, pero en radar solo exhiben un débil eco (< 45 dBz) sin la forma en coma característica de las supercélulas. Sus corrientes descendentes tienden a ser débiles y el RFD puede estar ausente. En las LP los tornados se dan raramente. Las HP tienen unos valores muy altos de precipitación en la zona del *hook-echo* y en el flanco trasero de la tormenta. Visualmente, la corriente descendente es difícil de observar debido a la fuerte intensidad de la precipitación, es decir, está engullida por la cortina de precipitación. En radar puede tener una forma de coma y con gran frecuencia esta relacionada con la producción de granizo severo. Las corrientes descendentes pueden ser muy intensas provocando reventones (downbursts), pero la producción de tornados es menos común que en las supercélulas HP y en las CL debido a

que las corrientes descendentes son tan fuertes que cortan continuamente la corriente ascendente con el flujo de salida del aire frío.

REFERENCIAS ANEXO I

- Dahl, J. M. L. (2006). Supercells - Their Dynamics and Prediction. 122.
- Davies, J. (1990). Midget Supercell Spawns Tornadoes. *Weatherwise*, 43(5), 260–260.
- Davies-Jones, R. (2002). Linear and nonlinear propagation of supercell storms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(22), 3178–3205.
- Davies-Jones, R. (2015). A review of supercell and tornado dynamics. *Atmospheric Research*, 158–159, 274–291.
- Davies-Jones, R. (1984). Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms.
- Droegemeier, K. K., Lazarus, S. M., y Davies-Jones, R. (1993). The influence of helicity on numerically simulated convective storms. *Monthly Weather Review*, Vol. 121, pp. 2005–2029.
- Fujita, T. T., 1963: Analytical mesometeorology: A review, *Meteor. Monogr.*, 5, No. 27, Amer. Meteor. Soc., 77-125
- Klemp, J. B., y Wilhelmson, R. B. (1978). Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 35, pp. 1097–1110.