

Apuntes sobre las olas de calor del verano boreal de 2021

JOSÉ MARÍA SÁNCHEZ-LAULHÉ

El verano boreal (junio-julio-agosto) de 2021 fue el más cálido registrado en el conjunto de las áreas terrestres del mundo¹. En todos los continentes del hemisferio norte (HN) se produjeron olas de calor y episodios de lluvias intensas, acompañados de incendios forestales e inundaciones catastróficas.

Surface air temperature anomaly for June to August 2021

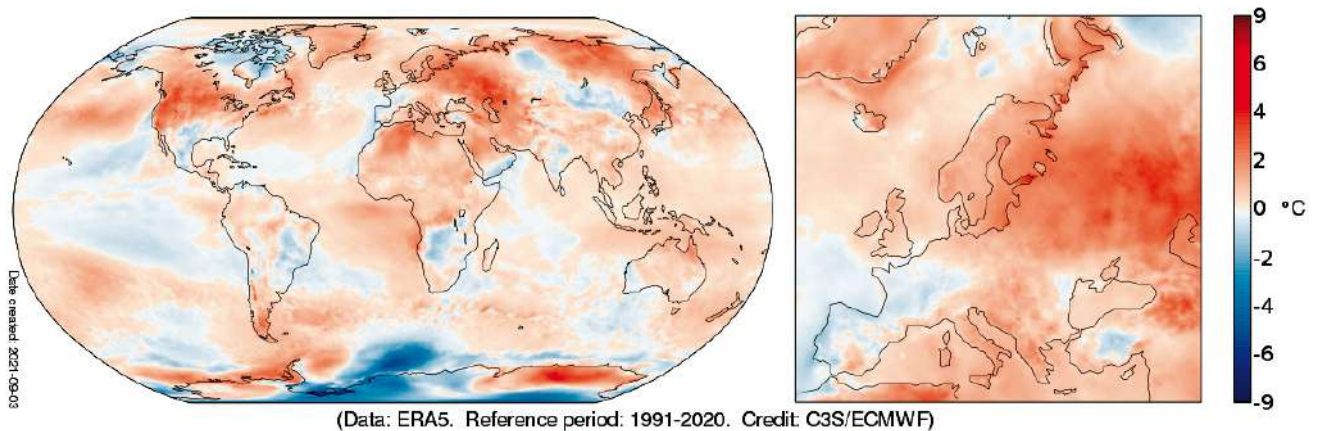


Figura 1. Temperatura del aire en superficie para el verano

Las temperaturas medias estacionales fueron extremadamente altas desde la parte oriental de Siberia central hasta el norte del mar de Japón; en el sur de China; desde la parte occidental de Asia central hasta Europa oriental; en el noroeste del Oriente Próximo; en gran parte del del norte de África; y desde la parte central hasta la occidental de América del Norte. La temperatura media junio-agosto de Europa fue 0.96 °C por encima de la media 1991-2020, lo que hace que sea el verano más cálido registrado. También en los EE.UU. fue el verano más caluroso registrado. El verano se puede calificar de Amplificación Ártica (AA). Las extensiones del mar de hielo ártico en junio, julio y agosto, fueron la sexta, cuarta y décima en los ranking respectivos de menor extensión. En la figura 1 pueden observar las intensas anomalías positivas de temperatura en la mayoría de las regiones terrestres árticas, mientras que la superficie del agua del océano Glacial Ártico se mantuvo relativamente fría respecto a los últimos años.

Olas de calor en el verano de 2021

La ola de calor más prominente de este verano aconteció en el oeste de América del Norte a fines de junio, superándolo

se en muchos lugares los récords anteriores de temperatura máxima en 4 °C a 6 °C, y causando cientos de muertes. Portland (Oregón) batió récords tres días consecutivos, alcanzando 46.6 °C; Lytton, en el centro-sur de la Columbia Británica, registró 49.6 °C el 29 de junio, alcanzando un nuevo el récord canadiense superando en 4.6 °C el récord previo. Más de 465 personas murieron en exceso en esa zona de Canadá y más de 600 en Washington y Oregón. Un estudio de atribución rápido mostró que el evento habría sido casi imposible sin el cambio climático.

En el Valle de la Muerte, California, se alcanzó 54.4 °C el 9 de julio, que iguala la temperatura alcanzada en 2020 como registro más alto en el mundo desde al menos la década de 1930 (pendientes de homologación, ambos). Hubo numerosos incendios forestales importantes. El incendio Dixie en el norte de California, que comenzó el 13 de julio, había quemado unas 390 000 hectáreas hasta el 7 de octubre, el mayor incendio registrado en California.

En Siberia, una ola de calor persistente contribuyó a devastadores incendios forestales durante todo el verano que afectaron a más de 1.5 millones de hectáreas, los más grandes en la historia de Rusia. El humo que produjeron llegó hasta el Polo Norte a 3000 km de distancia.

¹ <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-summer-2021-sets-new-high-for-average-land-temperature>

Pakistán, el norte de India y parte de Medio Oriente también padecieron olas de calor, superando las temperaturas 52 °C en algunos lugares. En Jacobabad, Pakistán, y en Ras al Khaimah, Emiratos Árabes Unidos, se registraron temperaturas de “bulbo húmedo” superiores a 35 °C, que parece ser el límite que el cuerpo humano puede soportar.

En julio y agosto se sucedieron olas de calor en la región mediterránea, que se propagaron de este a oeste desde finales de julio hasta mitad de agosto. El 20 de julio, se estableció un nuevo récord de Turquía con 49.1 °C en Cizre, y en Tbilisi, Georgia, se registró el día más caluroso con 40.6 °C. El 11 de agosto, una estación de Sicilia alcanzó 48.8 °C, récord europeo provisional, mientras que en Kairouan, Túnez, se estableció un récord de 50.3 °C. Se produjeron importan-

(componente u del viento) a unos 70° N, indicativo de chorros subpolares, debido al contraste de temperatura a lo largo de la costa ártica entre la superficie terrestre cálida y sin nieve del norte de los continentes y, un relativamente frío océano Ártico; y (b) la banda de anomalías negativas de la componente u del viento sobre Eurasia, entre 45°- 65° N, debida a la disminución del gradiente de temperatura norte-sur, que conllevaba una reducción muy pronunciada de la componente zonal del viento en el flanco norte del chorro subtropical asiático.

El campo medio de la altura del geopotencial en 200 hPa (Z200) presentó cuatro anomalías positivas principales Z200 (figura 2b) en las latitudes medias y altas, sobre Norteamérica (1), el Atlántico Norte oriental, Rusia occidental (3) y Siberia oriental (4) que bloquearon la circulación atmosférica en los

continentes de latitudes medias causando las olas de calor: los movimientos descendentes intensos asociados a las dorsales de altura de geopotencial calientan adiabáticamente el aire, e inducen zonas poco nubosas que aumentan la radiación de onda corta neta descendente produciendo anomalías calidas en superficie. Estas ondas de Rossby cuasiestacionarias con frecuencia actúan como teleconexiones circunplanetarias asociadas a los chorros de verano, estrechos y zonales, que actúan como guías de ondas (ver por ejemplo, Beverley et al. 2019) y que, a veces, producen una sincronización de extremos climáticos en partes distantes del mundo. Existe una creciente evidencia de que estas ondas planetarias se amplifican y mantienen por forzamientos subtropicales o tropicales con origen en la temperatura del agua del mar del Atlántico en los trópicos o subtrópicos (Liu et al. 2022), forzamientos del suelo continental (Koster et al. 2014), o procesos internos de resonancia atmosférica (Kornhuber et al. 2017). En las figuras 2b y 3 se puede ver la correspondencia entre las anomalías Z200 continentales y las anomalías negativas de humedad en el suelo

(figura 3). La escasez de humedad en el suelo implica menor enfriamiento del suelo por evaporación y temperaturas más altas junto a la superficie. Entre las dorsales (3) y (4) de Rusia aparecía, sobre la Meseta Central de Siberia, una vaguada debida a una menor temperatura debido a la mayor humedad en el suelo producto de la mayor cobertura nivosa en esa región en la primavera, que genera una mayor evaporación y un máximo relativo de precipitación reciclada en verano.

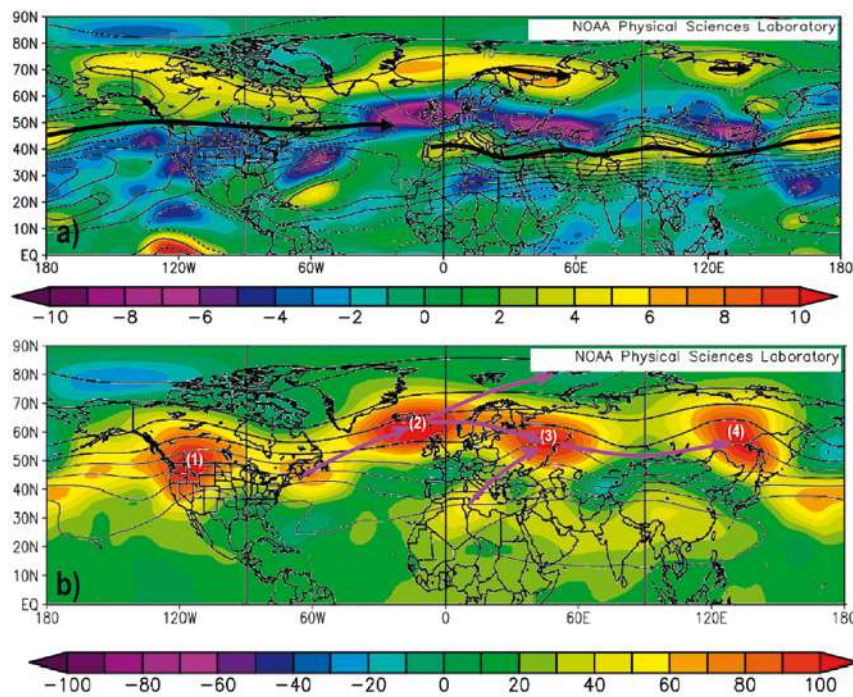


Figura 2. Valores medios para el verano de 2021 de (a) componente zonal del viento (m/s) en 250 hPa (líneas) y sus anomalías (color) (b) altura del geopotencial (m) en 200 hPa (líneas) y sus anomalías (color). Las líneas gruesas con flechas indican la propagación de ondas de Rossby generadas por el monzón norteamericano. Período de referencia 1991-2020.

tes incendios forestales en muchas partes de la región, siendo especialmente afectadas Argelia, el sur de Turquía y Grecia. España fue afectada por una intensa ola de calor del 11 al 17 de agosto: la estación de Montoro de AEMET estableció un récord nacional de temperatura máxima con 47.4 °C para España el día 14.

La circulación del verano

Como se observa en la figura 2a, la corriente en chorro media del verano casi circundaba el globo terrestre con una orientación casi zonal, propia de esta época del año. Además la circulación presentaba rasgos característicos de veranos de AA, como: (a) las anomalías positivas de viento del oeste

Fuentes de ondas de Rossby

Hay que resaltar la existencia de una diferencia importante entre la distribución de los máximos de las anomalías positivas Z200 próximas a 60 N de este verano de 2021



y la tendencia observada por Liu et al. (2022) en la distribución de dichos máximos con el calentamiento climático. Según estos autores en estas latitudes la tendencia es a formarse tres anomalías positivas ubicadas en el este de Norteamérica y Groenlandia, Europa oriental y el este de Siberia, que forman parte de una onda casi estacionaria zonal de Rossby de número de onda 3.

Las diferencias entre las anomalías Z300 de este verano y las indicadas por Liu et al. (2023) podría deberse al intenso monzón de América del Norte, que generaría la siguiente dinámica:

A) el calentamiento troposférico asociado a las precipitaciones del monzón causó, sobre el Atlántico subtropical occidental y el este de EE. UU., un mínimo en el campo medio del potencial de velocidades y divergencia del viento en niveles altos de la troposfera, señalada con D en la figura 4, que implica un acortamiento vertical de las columnas atmosféricas en dichos niveles altos.

B) El mínimo del potencial de velocidades afectaba al flanco sur de la corriente en chorro, una zona de fuerte vortici­dad absoluta, en una zona marcada con una S en la figura 4, situada en el este de América del Norte, a unos 40 °N, que es una zona de generación de ondas de Rossby (zona fuente)². Durante su transcurrir de oeste a este a través de S, las

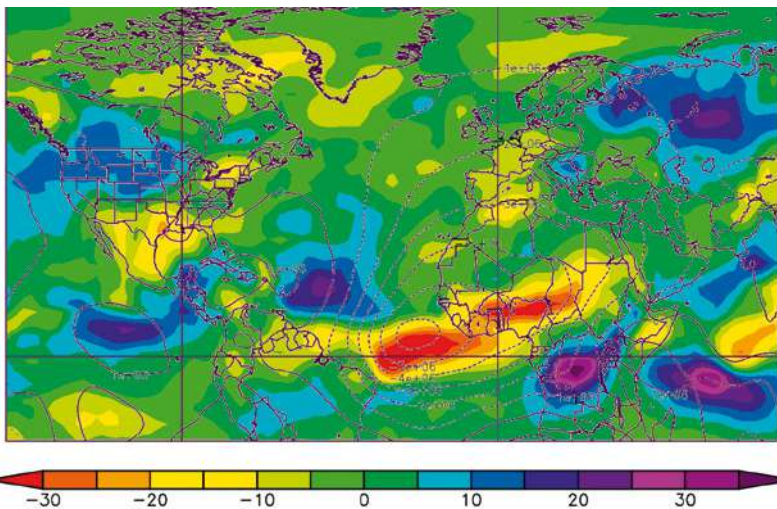
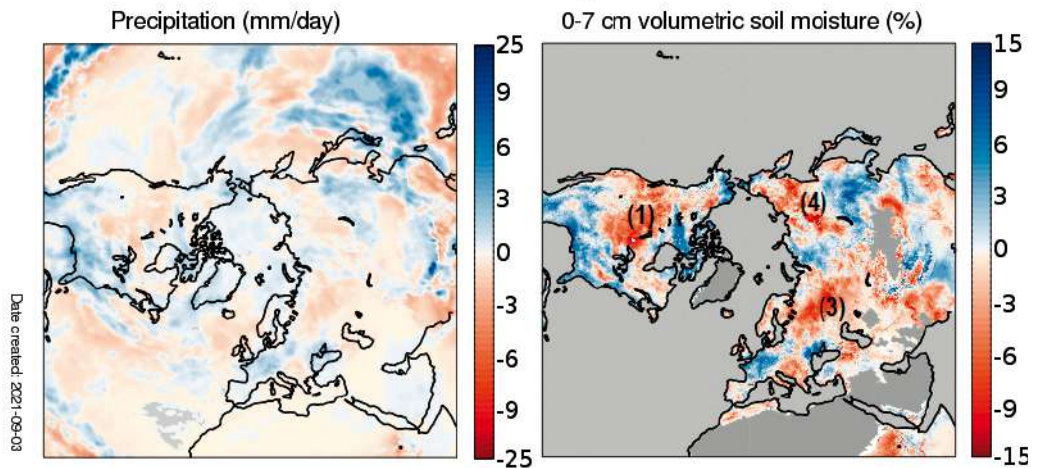


Figura 4. Anomalía de la radiación de onda larga saliente (OLR) media, en w/m^2 , (color) y anomalías del potencial de velocidades en sigma 0.2101, en m^2/s , para el verano de 2021

Anomalies for June to August 2021



(Data: ERA5. Reference period: 1991-2020. Credit: C3S/ECMWF)

Figura 3. Anomalías de la precipitación y de la humedad en el suelo para Junio-Agosto

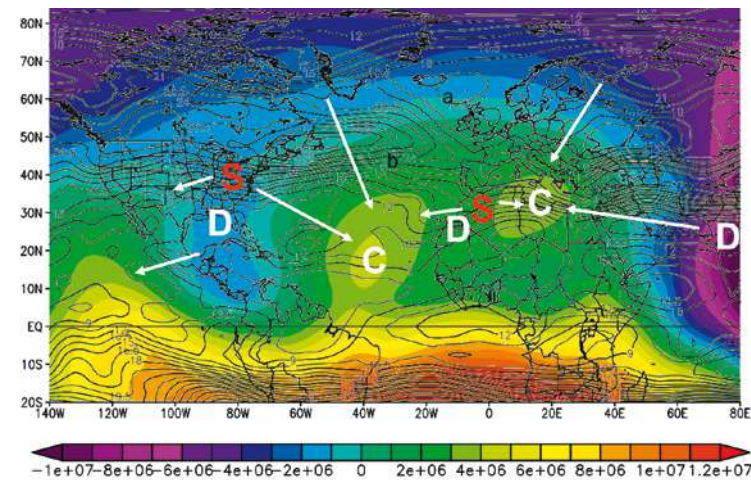


Figura 5. Promedios para el verano de la velocidad del viento en 250 hPa (contornos en m/s) y del potencial de velocidades en la superficie sigma 0.2101 (color en m^2/s). C y D son zonas de convergencia y de divergencia de viento. Las flechas blancas son perpendiculares a las líneas de potencial de velocidades y dirigidas hacia valores más altos del potencial de velocidades, indican esquemáticamente el flujo del viento divergente. S indican zonas fuentes de ondas de Rossby.

partículas de aire en niveles altos pierden vortici­dad absoluta un ritmo aproximado de $d\zeta_a/dt = -\zeta_a D$, siendo positivas tanto la divergencia del viento, D , como la vortici­dad absoluta, ζ_a . La disminución de la vortici­dad genera una anomalía positiva Z200 sobre la costa atlantica de EE. UU. y una onda de Rossby cuya propagación hacia el NE se señala con línea gruesa con flechas en la figura 2b.

C) La interacción de esta onda con la propagación de la onda zonal procedente de las Rocosas genera el máximo de anomalía Z200 marcado como (2). Posteriormente, parte de la onda prosigue su trayectoria hacia al polo afectando en el mínimo de presión que predominó sobre el Ártico en buena parte del verano, y parte quedó capturada zonalmente en la

² Las fuentes de ondas de Rossby se trataron en más detalle en esta revista en Sánchez-Laulhé (2020)

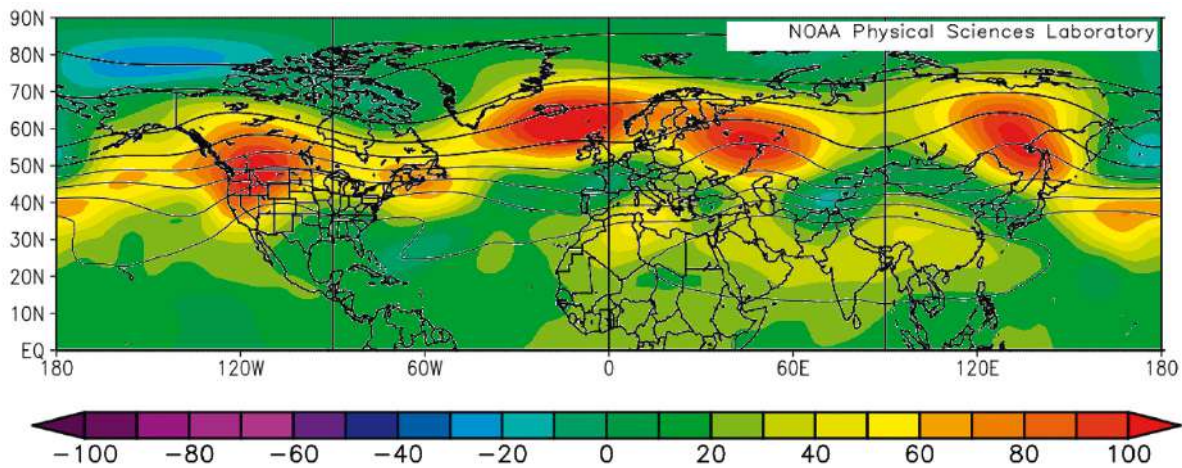


Figura 6. Valores medios para el verano de 2021 de la altura del geopotencial (m) en 200 hPa (líneas) y sus anomalías (color). Periodo de referencia 1991-2020.

guía de onda zonal del chorro. La anomalía positiva (2) entre Islandia e Irlanda, hace situarse una vaguada en la zona NE de América-Groenlandia desplazando la anomalía positiva Z200 corriente arriba sobre la costa pacífica norteamericana. Esta sería la principal diferencia con las anomalías indicadas por Liu et al. (2022).

d) La anomalía desplazada hacia el Pacífico interactuaría con las ondas sinópticas móviles atrapadas en el chorro creciendo su amplitud por resonancia.

e) Probablemente el monzón de América del Norte intervendría más directamente en la amplificación de la dorsal estacionaria sobre el oeste de Norteamérica a través de ondas de Rossby que se propagan hacia el oeste, asociadas al mecanismo monzón-desierto (Rodwell and Hoskins, 1996).

OLR, por lo que el forzamiento de esta circulación anómala fue el máximo de la temperatura de la superficie del mar en esta zona (figura 1) asociado a El Niño Atlántico. Se observa que los valores negativos de la anomalía del potencial de vorticidades afectaron significativamente al Atlántico norte subtropical y el noroeste de África.

La ola de calor del 11 al 17 de agosto en España

En España el verano 2021 tuvo un carácter normal, con una temperatura media sobre la España peninsular de 0.3 °C por encima de la media 1981-2010, siendo el octavo más frío del siglo XXI. Sin embargo la ola calor del 11 al 17 de agosto fue

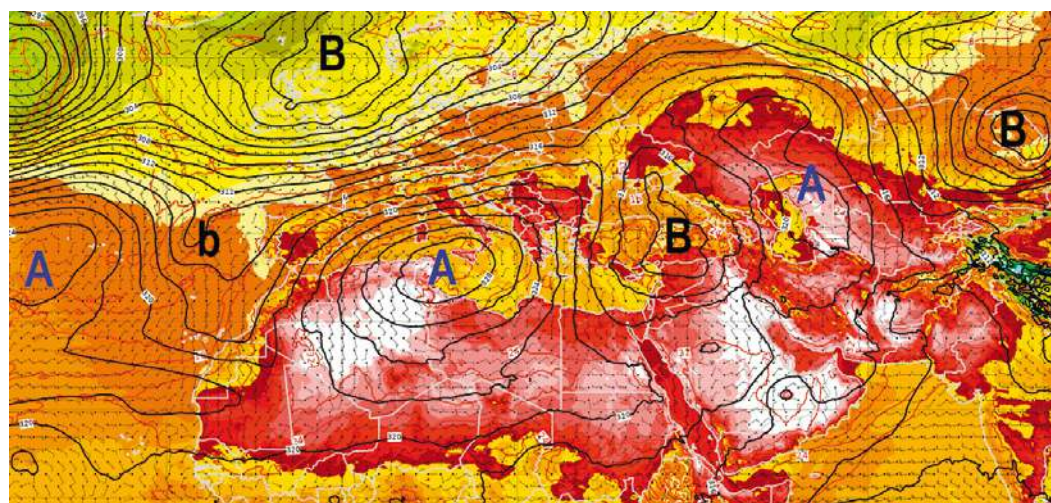


Figura 7. Análisis del HRES-IFS del ECMWF del día 9 de agosto a las 12 UTC de: altura del geopotencial en 700 hPa (líneas negras); viento en 850 hPa (banderas viento); y temperatura a 2 m (colores).

Otra zona fuente de ondas de Rossby estacionaria existió en la entrada del chorro subtropical asiático, en el norte de África, también marcada con S en la figura 5, que dio lugar a una anomalía Z200, bastante intensa para su latitud, centrada en el estrecho de Sicilia y a una onda de Rossby. En la figura 2b está representada esquemáticamente con una flecha la propagación de esta onda hacia el NE, contribuyendo a la anomalía Z200 de Rusia occidental; marcada con (3).

En la figura 4 se observa que la mayor anomalía del potencial de vorticidades en el verano fue un mínimo situado sobre el Atlántico tropical oriental, inmediato a un mínimo de

excepcional: la estación de Montoro de AEMET estableció un récord nacional de temperatura máxima con 47.4 °C para España el día 14 (AEMET, 2021), siendo este día, el segundo con la temperatura media de las máximas más elevada a nivel nacional, con 37.77 °C; el 12 de agosto el tercero; y el 13 el séptimo (Rodríguez-Balasteros, 2021), lo que da idea de la magnitud del episodio.

A finales de julio la circulación en el HN experimentó cambios importantes que afectaron a Europa y el Mediterráneo. El campo medio Z200 de agosto (figura 6) presentaba una anomalía positiva en la mayor parte del Ártico, que hacía que el índice de la Oscilación Ártica (OA) se volviera predominantemente negativo. Igualmente se volvió predominantemente negativo el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), cuyo polo meridional principal se desplaza normalmente del Atlántico a Europa en el verano tardío, presentando una vaguada en Europa central. Por otra parte sobre el Magreb se mantenía una anomalía anticiclónica en el Mediterráneo central. La vaguada europea y la anomalía anticicló-

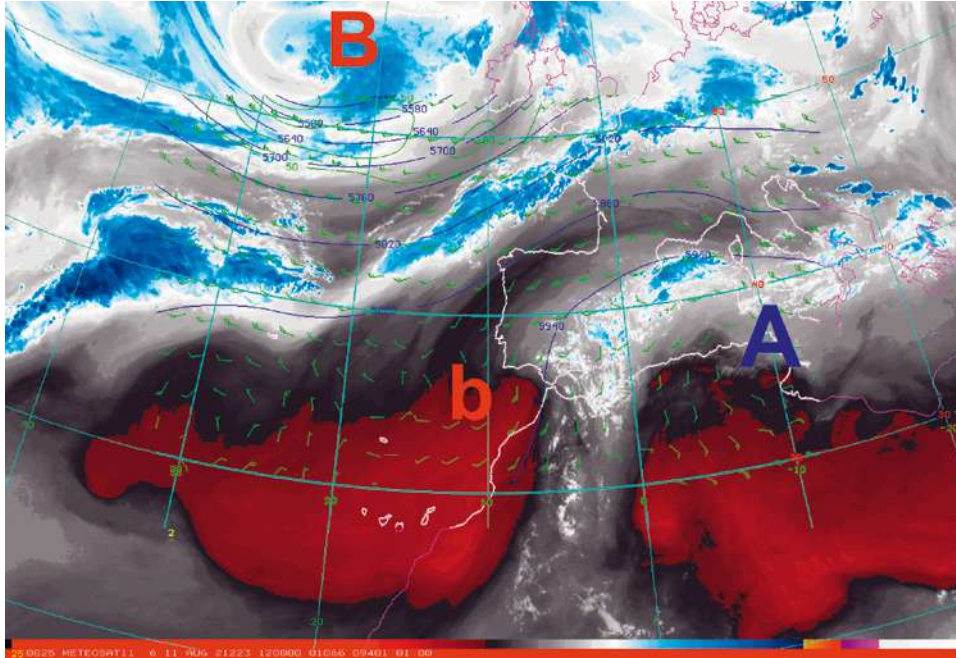


Figura 8. Imagen de vapor de agua $7.3 \mu\text{m}$ del satélite Meteosat de 12 UTC del 11 de agosto. Superpuestos la altura del geopotencial (contornos azules) y vientos (banderas verdes) en 500 hPa previstos + 12h del modelo ECMWF

nica mediterránea prolongaban el chorro subtropical asiático hasta la península ibérica.

La formación de una dana sobre Turquía sobre el día 8 de agosto, causante de inundaciones en ese país, intensificó la dorsal/alta presión del Mediterráneo que al aumentar su escala provocó su desplazamiento hacia el oeste. En la figura 7 se pueden observar la baja fría sobre el mar Negro y Turquía y el anticiclón abarcando la mayor parte del Mediterráneo y el Magreb en el campo de altura del geopotencial en 700 hPa del día 9 de agosto a las 12 UTC. En el desplazamiento del anticiclón hacia el oeste, los vientos cálidos procedentes de continente africano que inicialmente afectaban al oeste de Turquía, Grecia, Italia, Túnez y Argelia acabaron afectando a Marruecos, Francia y España, causando las olas de calor y los incendios forestales que se han descrito antes. Sobre Grecia y el oeste de Turquía los etesios, vientos del norte descendentes fueron

especialmente intensos, cálidos y secos, muy favorables a los incendios forestales. Sin embargo, en el Mediterráneo occidental y la península ibérica los vientos fueron de componente sur, débiles a moderados, lebeche en el sudeste peninsular, acompañados de abundante nubosidad de niveles medios y altos que se generaba principalmente en las proximidades del Mediterráneo. Los ascensos que generaron esta nubosidad se debieron a la circulación transversal directa de la entrada del chorro subtropical, que se fue desplazando hacia el oeste con el anticiclón mediterráneo. Las imágenes de vapor de agua $7.3 \mu\text{m}$ del satélite Meteosat (figura 8) recogen el origen tropical de la entrada “húmeda” por encima de la capa límite sahariana y el desarrollo de la nubosidad en el Mediterráneo y Península. Probablemente, y como indican Pfahl et al. (2015) para la formación de bloqueos, fue un factor clave en la intensidad de la ola de calor el desarrollo de nubosidad sobre la Península que provocó el consiguiente recalentamiento del aire de procedencia tropical en niveles altos por liberación de calor latente, y posteriormente por calentamiento adiabático al descender en el seno del anticiclón. Contribuyó probablemente a este evento la existencia de un monzón del oeste de África más intenso de lo normal (figura 4).

Referencias

- AEMET (2021) Resumen estacional climatológico: verano 2021. http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/estacionales/2021/Est_verano_21.pdf
- Beverley JD, Woolnough SJ, Baker LH, et al. (2019) The northern hemisphere circumglobal teleconnection in a seasonal forecast model and its relationship to European summer forecast skill. *Clim Dyn* 52(5):3759–3771. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4371-4#citeas>
- Coumou D, Di Capua G, Vavrus S et al. (2018) The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. *Nat Commun* 9, 2959 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05256-8>
- Kornhuber K, Petoukhov V, Petri S, et al. (2017) Evidence for wave resonance as a key mechanism for generating high-amplitude quasi-stationary waves in boreal summer. *Climate Dyn.*, 49, 1961–1979, <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3399-6>.
- Liu Y, Sun C, Li J (2022) The Boreal Summer Zonal Wavenumber-3 Trend Pattern and Its Connection with Surface Enhanced Warming, *Journal of Climate*, 35(2), 833–850. Retrieved Jan 17, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/35/2/JCLI-D-21-0460.1.xml>
- Pfahl S, Schierozza C, Croci-Maspoli M, et al. (2015) Importance of latent heat release in ascending air streams for atmospheric blocking. *Nature Geosci.* 8, 610–614, <https://doi.org/10.1038/ngeo2487>
- Rodríguez-Ballesteros C. (2021) 21 de agosto de 2021 actualizada la entrada: ¿Sabes qué días han sido los de temperatura máxima más elevada desde 1941? <https://climaenmapas.blogspot.com/>
- Rodwell MJ, Hoskins BJ (1996) Monsoons and the dynamics of deserts. *Q J R Meteor Soc* 122:1385–1404. <https://doi.org/10.1002/qj.49712253408>
- Sánchez-Laulhé JM (2020) Un invierno sin Amplificación Ártica. *Tiempo y Clima* V5, 68 <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/2373/2574>
- Schubert SD, Wang H, Koster RD, Suarez MJ, Groisman PY (2014). Northern Eurasian Heat Waves and Droughts, *Journal of Climate*, 27(9), 3169–3207. Retrieved Jan 17, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/27/9/jcli-d-13-00360.1.xml>