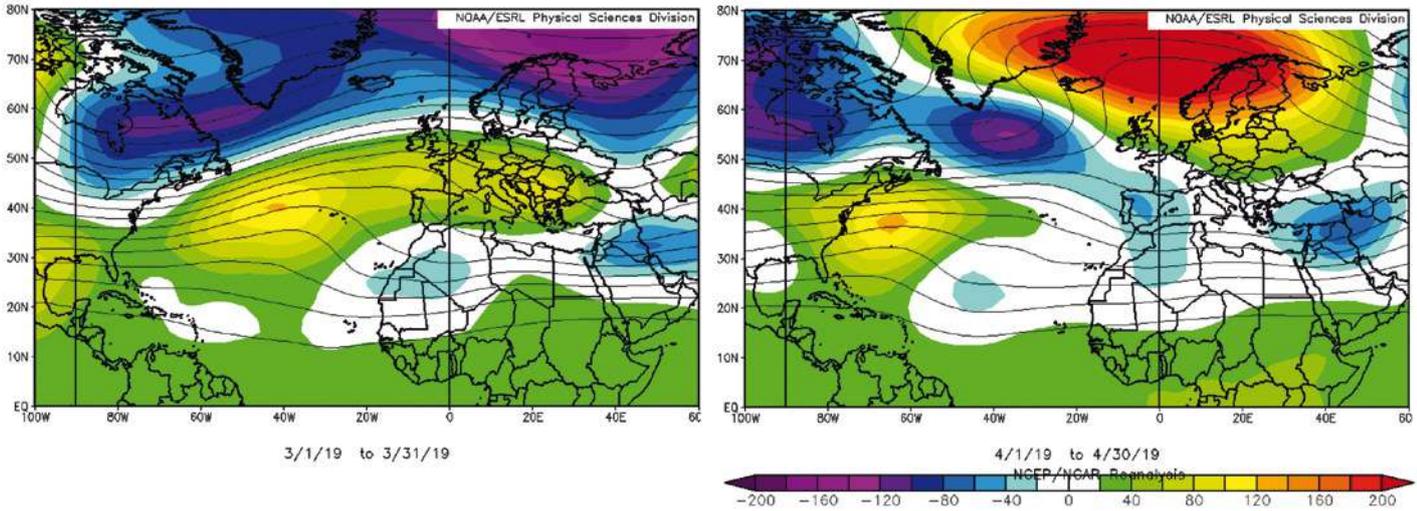


# Primavera de 2019 y Calentamiento Final de la Estratosfera

JOSÉ MARÍA SÁNCHEZ-LAULHÉ



En la figura 1 se observa que los campos medios mensuales de anomalías de la altura geopotencial en 300 hPa (Z300) sufrieron un importante cambio de marzo a abril.

En marzo, las anomalías Z300 en el sector Europa-Atlántico norte (EAN) tuvieron una disposición zonal (figura 1 izquierda), aunque ascendiendo de latitud de oeste a este. Las anomalías negativas ocupaban el este de Canadá, Groenlandia, Islandia, el océano Glacial Ártico y Escandinavia, y las anomalías positivas se extendían por la mayor parte de latitudes medias del Atlántico, Europa occidental y central, y el Mediterráneo, incluida la Península. Esta distribución indica el predominio en el mes de marzo del régimen de tiempo NAO+, fase positiva de la Oscilación del Atlántico Norte, que se corresponde con la presencia en capas altas de la troposfera de una corriente en chorro polar alejada de la Península, dirigida desde Nueva Inglaterra hasta Centroeuropa, cruzando las islas Británicas. En consecuencia, las borrascas atlánticas tuvieron escasa incidencia sobre Iberia, lo que explica la escasez de precipitaciones en marzo. Próxima a las Canarias había otra anomalía negativa Z300, que se tradujo en temperaturas frías, y tiempo normal o húmedo en cuanto a precipitaciones en buena parte de las islas.

La distribución media de las anomalías Z300 cambió radicalmente en abril (figura 1 centro). En este mes una fuerte anomalía positiva se situó entre Groenlandia y Escandinavia, afectando también a Islandia, Gran Bretaña y Centroeuropa, y, con respecto al

mes anterior, la anomalía positiva de latitudes medias atlánticas se retrotrajo al oeste de la cuenca atlántica. Entre ambas anomalías positivas, al sudeste de Groenlandia, se extendía una anomalía negativa que se prolongaba hacia el sudeste, afectando a la península ibérica, enlazando con la anomalía negativa del noroeste de África. El campo medio mensual tiene cierto parecido con el régimen de NAO-, pero con las anomalías desplazadas en el oeste de la cuenca Atlántica hacia latitudes más altas. La distribución de las anomalías descrita hizo que el chorro polar estuviera orientado zonalmente en el Atlántico occidental y central, con eje entre 45° y 50° N, pero bloqueado en el Atlántico oriental por las altas presiones sobre Europa. El estiramiento de la anomalía negativa Z300 sobre la Península refleja el paso sobre ella de las *danas* generadas por la ruptura de ondas de Rossby en el bloqueo, siendo estas bajas aisladas un ingrediente importante en la abundancia de precipitaciones de abril.

El campo medio de anomalías Z300 en mayo (figura 1 derecha) indica la persistencia de anomalías positivas en el Ártico

Figura 2. Series temporales al nivel de 30 hPa de: (izquierda) temperaturas sobre el polo norte. La línea negra muestra la temperatura diaria, y la gris indica la normal (periodo 1981-2010); (derecha) viento medio zonal en el hemisferio norte. El intervalo entre contornos es 10 m/s. Fuente CPD/JMA.

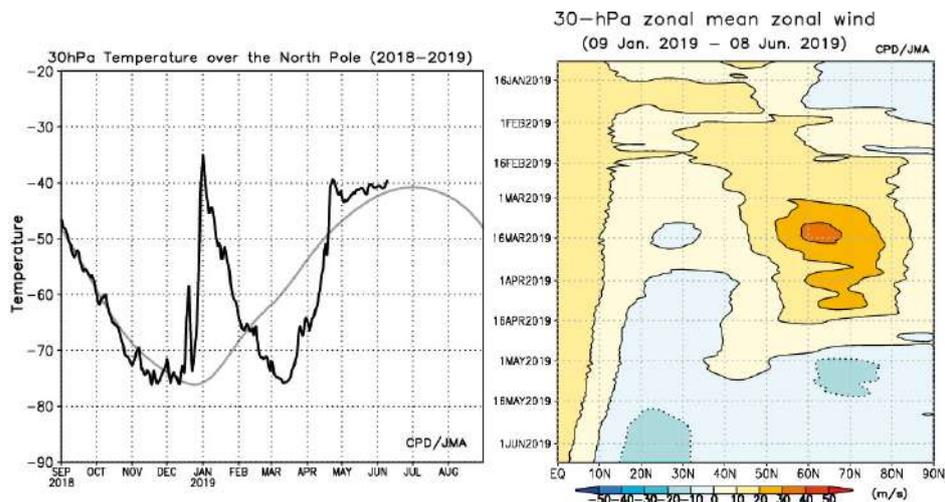
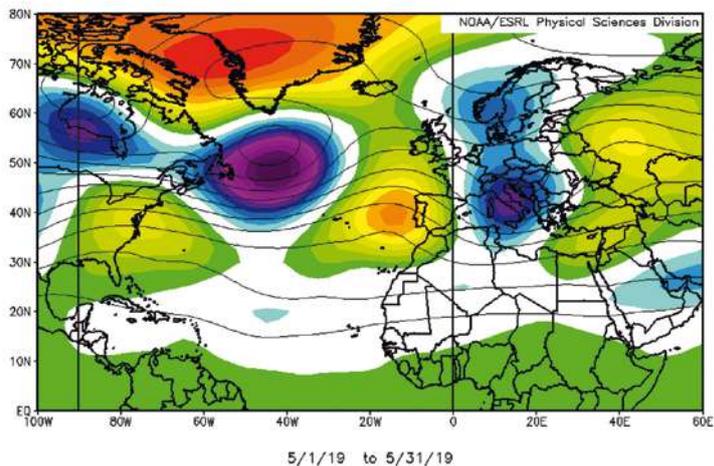


Figura 1. Campos medios mensuales de la altura geopotencial en 300 hPa (líneas negras) y sus anomalías (coloreadas) para los meses de marzo, abril y mayo de 2019. Fuente NOAA/ESRL



co, que se han desplazado hacia el oeste, provocando la profundización de la anomalía negativa al sur de Groenlandia y, como reacción, la presencia de una anomalía positiva en el Atlántico oriental, lo que significa un predominio del régimen de tiempo de dorsal atlántica en el sector EAN.

La presencia de una anomalía positiva Z300, con fuertes gradientes de este a oeste, afectando a la mayoría de la Península explica que el mes fuera en conjunto cálido, aunque con notables contrastes espaciales; mientras el sudoeste resultó muy cálido e incluso extremadamente cálido en algunas zonas, en el noreste peninsular y Baleares tuvo un carácter entre frío y muy frío. Del mismo modo, el campo de anomalías Z300 y la orientación este-oeste de la orografía, transversal al flujo de componente norte existente sobre la Península, explica que mayo haya sido en su conjunto muy seco, casi extremadamente seco, con excepciones en el País Vasco, Navarra y zonas de Cataluña y Aragón.

## El calentamiento final de la estratosfera

Según las gráficas de temperatura y de viento zonal a 30 hPa (figura 2), el *calentamiento final de la estratosfera* (CFE), que marca la transición a una estratosfera en “modo verano”, se inició algo antes de mediados de marzo, desacelerando el vórtice estratosférico polar. Se intensificó en la tercera semana de abril, invirtiéndose los vientos del oeste del vórtice polar a vientos del este particularmente fuertes a 70 °N.

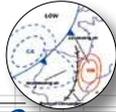
Aunque, por razones puramente estadísticas, tomamos la primavera como los meses de marzo a mayo, meteorológicamente el inicio de la primavera ocurre con la desaparición del vórtice polar estratosférico. El vórtice polar de la estratosfera es una región de gran vorticidad que se forma en invierno con el establecimiento del chorro estratosférico polar. El chorro estratosférico polar se forma por las diferencias de temperatura en invierno en la estratosfera, entre la zona po-

lar, donde no se recibe radiación solar en la noche polar y se enfría por emisión de infrarrojo hacia el espacio, y la zona tropical, que se calienta enormemente debido a la absorción de la parte ultravioleta de la radiación solar por la capa de ozono de la estratosfera. Con el fin de la noche polar, se calienta la zona estratosférica polar por la absorción de radiación ultravioleta en la capa de ozono y, consecuentemente, desaparece el chorro polar y por tanto el vórtice polar. Cada invierno concluye con el denominado evento CFE (en inglés SFW: *Stratospheric Final Warming*), de origen dinámico, que marca la transición final de vientos del oeste a vientos del este en la estratosfera extratropical. La desaparición del vórtice no suele ser un proceso gradual sino que normalmente es un evento bastante rápido. Lo normal es que los CFE ocurran por un calentamiento de origen dinámico similar a los calentamientos repentinos estratosféricos (CRE). La fecha de los CFE es muy variable de un año a otro y está controlada por la estructura del flujo estratosférico y las variaciones en la propagación vertical de las ondas planetarias troposféricas (Black et al. 2006<sup>1</sup>). En distintos trabajos se hace referencia a CFE tempranos y CFE tardíos. Los CFE tempranos suelen ocurrir a primeros de marzo, y son más frecuentes cuando no ha existido CRE en el invierno previo, y tienen una evolución rápida. Los CFE tardíos suelen darse a mitad de marzo, frecuentemente cuando han existido CRE durante el invierno, y evolucionan más gradualmente. Se considera una semana lo que tarda en propagarse el calentamiento de la estratosfera media a la baja, donde es esperable un mayor impacto troposférico. Este año se produjo un CRE a finales de diciembre por lo que cumple con la estadística, pues el CFE se inició a mitad de marzo y tuvo una evolución gradual.

Black et al. (2006) estudiaron la relación entre CFE y la circulación extratropical boreal y encontraron que los eventos CFE generan una fuerte influencia organizadora en la circulación a gran escala de la estratosfera y en bastantes casos en la troposfera durante el periodo de inicio de la primavera. Los CFE debilitan notablemente los oestes circumpolares a latitudes altas tanto en la estratosfera como en la troposfera. La manifestación troposférica de los CFE en el sector EAN consiste en una transición a una disposición parecida a la fase negativa de la NAO en el campo de altura del geopotencial. Con anomalías negativas en el nordeste del Atlántico desplazadas hacia latitudes polares, tal como se observa en el campo de anomalías Z300 de abril. Los patrones de anomalía de los eventos CFE, aunque tienen cierta similitud a los patrones de las fases negativas de la Oscilación Ártica y de la NAO, no se corresponden del todo, pues los centros de anomalía principales están desplazados hacia el polo.

Lo más destacable climatológicamente del trimestre primaveral (marzo, abril y mayo) en la Península han sido las precipitaciones del mes de abril, que parecen consecuencia del CFE de este año y que afectaron a la Semana Santa en buena parte de España. Mientras marzo y mayo han sido ambos meses muy secos a nivel nacional, abril ha sido en conjunto un mes muy húmedo, el segundo mes de abril más húmedo en España en lo que llevamos de siglo XXI, por detrás de 2008,

<sup>1</sup> Black, R.X., B.A. McDaniel, and W.A. Robinson, 2006: Stratosphere–Troposphere Coupling during Spring Onset. *J. Climate*, 19, 4891–4901, <https://doi.org/10.1175/JCLI3907.1>



y el cuarto desde 1965. En particular, ha sido extremadamente húmedo en el sudeste peninsular. El lector interesado puede encontrar más detalles en la sección *Crónicas del Tiempo*.

## Las predicciones para el verano

Cuando escribo esta colaboración a finales de junio persiste la anomalía positiva (cálida) de geopotenciales en el casquete polar y no parece fácil que desaparezca en el verano. Además la pérdida de cubierta nivosa en latitudes altas y de mar de hielo en el Ártico actuaría como retroalimentación positiva para el mantenimiento de la anomalía. De hecho las predicciones estacionales de los modelos EUROSIP mantienen la anomalía en promedio para los trimestres junio-agosto y julio-septiembre (figura 3).

Como consecuencia de los meses de predominio de El Niño, la zona tropical en todo el globo permanece con una fuerte anomalía cálida, y en el Pacífico y NO del Atlántico aparecen máximos y mínimos asociados a un tren de onda estacionario que emana del Pacífico.

La zona de la Península y el Mediterráneo, aunque presenta un mínimo relativo en anomalías Z500, es también una zona de anomalías positivas, y podría estar asociada al paso de perturbaciones ciclónicas (danas) atrapadas en un chorro subtropical quizá más intenso de lo normal.

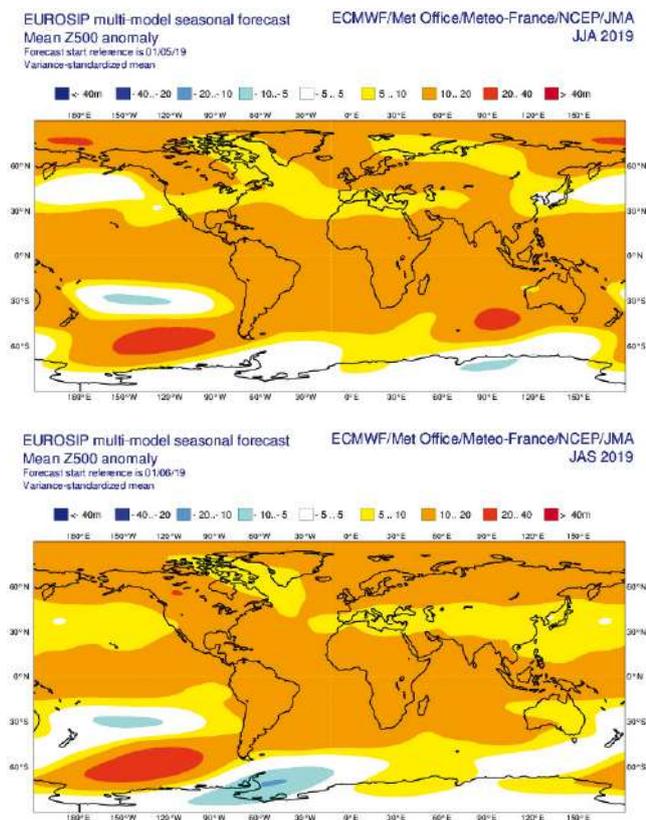


Figura 3. Mapas de anomalías de la altura del geopotencial en 500 hPa previstos por los modelos EUROSIP para los trimestres junio-agosto (arriba) y julio-septiembre (abajo). Fuente ECMWF.

Opinión



# Azares del Clima

POR JOSÉ ANTONIO LÓPEZ DÍAZ

## LAS CUENTAS ENERGÉTICAS DE LA PRECIPITACIÓN GLOBAL

En principio, si aumenta la temperatura media de la atmósfera cabe esperar que también aumente el vapor de agua contenido en ella, de acuerdo con la ecuación de Clausius-Clapeyron. Ésta establece un aumento exponencial de la proporción de vapor saturante (es decir, aquella que como máximo puede contener la atmósfera antes de empezar la condensación en agua líquida) con la temperatura del aire. En concreto la proporción saturante (en g de vapor de agua por cada kg de aire por ejemplo) aumenta un 7 % aproximadamente con cada grado de aumento de la temperatura. A su vez si aumenta el vapor de agua en la atmósfera cabe esperar un aumento correlativo de la precipitación. Pero según indican los modelos climáticos más recientes, el aumento relativo de precipitación con la temperatura es mucho menor de lo permitido por la ecuación de Clausius-Clapeyron, tan solo entre un 1 % y un 3 % de aumento de precipitación por grado de temperatura según el modelo climático, como se ve con importante incertidumbre.

El razonamiento anterior pasa por alto que la evaporación de agua de la superficie terrestre consume mucha energía, unos 2500 J/g, y esa energía pasa a la atmósfera para acabar siendo devuelta cuando el vapor condensa en el equilibrio a largo plazo. Así pues el balance energético de los modelos en la atmósfera debe contener claves de este proceso. Si aumenta la precipitación se libera más calor latente de condensación en la atmósfera, y por tanto debe aumentar el enfriamiento radiativo de la atmósfera que compense el calentamiento de la condensación para mantener el equilibrio térmico a largo plazo. Utilizando modelos radiativos simplificados de la atmósfera se puede desglosar el cambio de balance radiativo provocado por procesos simples, manteniendo el resto de las variables constantes. En la figura 1 se resume el resultado de uno de estos estudios (ver referencia); en la mitad superior de la figura se representa el balance energético de la atmósfera desglosado en el límite superior y en la superficie, y en la mitad inferior el balance total (suma de los anteriores). El color azul indica enfriamiento de la atmósfera consistente por tanto con aumento de precipitación, y el rojo calentamiento.

El proceso ATM corresponde a un calentamiento uniforme de la atmósfera de 1 °C; tanto en el límite superior como en el inferior de la atmósfera hay balance negativo con tendencia al enfriamiento, básicamente aumenta la ra-