

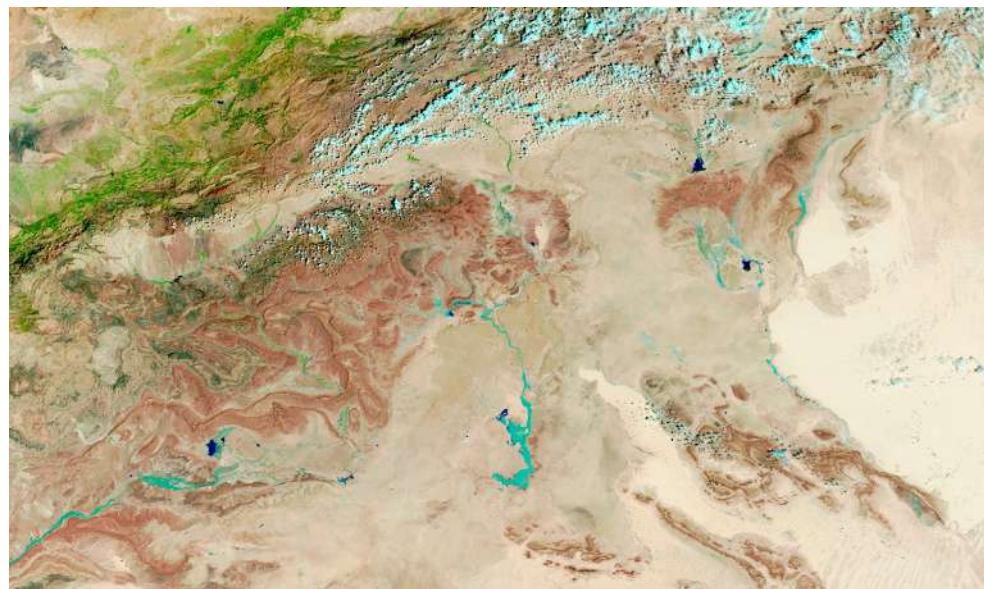
## Las extraordinarias inundaciones del 7 y 8 de septiembre de 2024 en el Sáhara: análisis de las predicciones semanales del ECMWF

JOSÉ MARÍA SÁNCHEZ-LAULHÉ

**A** principios de septiembre la desviación hacia el norte de una onda del este africana dio lugar a inundaciones en el norte del desierto del Sahara los días 7 y 8 de septiembre. Los análisis satelitales preliminares de la NASA, basados en datos IMERG<sup>1</sup>, muestran precipitaciones acumuladas de lluvia de varias decenas de mm, superando en algunos lugares los 200 milímetros. Si bien gran parte de la lluvia cayó en zonas escasamente pobladas, los medios informaron de inundaciones repentinas que causaron más de veinte fallecidos, viviendas derruidas, carreteras dañadas e interrupciones en el suministro de electricidad y agua en varias aldeas de Marruecos y Argelia. La figura 1 muestra una imagen en color falso de las escorrentías y las inundaciones obtenida combinando bandas visibles e infrarrojas del espetrorradiómetro MODIS del satélite Terra de la NASA. Las áreas cubiertas por agua aparecen con color azul. El tono del azul depende de la profundidad del agua y la cantidad de sedimento en suspensión. La vegetación aparece en verde.

### El proceso en los niveles medios de la troposfera

Las perturbaciones sinópticas principales en los trópicos en el norte de África, en la temporada del monzón, son las ondas del este africanas (AEW, *African Easterly Waves*). Son la principal forma de variabilidad meteorológica a gran escala sobre el Sahel en verano y desempeñan el papel clave de traer lluvias monzónicas a esta región propensa a la sequía. Las AEW se forman por inestabilización hidrodinámica de las ondulaciones de norte a sur de la corriente en chorro de viento del este africano (AEJ; *African Easterly Jet*), con longitudes de onda de 2000 a 2500 kilómetros. Las AEW se forman al este de África, típicamente en Sudán, y se propagan hacia el oeste a través del Sahel. Cuando las AEW



**Figura 1. Imagen del espetrorradiómetro MODIS del satélite Terra de la NASA que muestra en falso color azul la escorrentía y las inundaciones en el norte del Sahara el 10 de septiembre. El tono de azul está influenciado por la profundidad del agua y la cantidad de sedimento en suspensión. La vegetación aparece en verde**

continúan su propagación hacia el oeste sobre el Atlántico, pueden convertirse en huracanes; se estima que el 85 % de los principales huracanes del Atlántico se forman a partir de AEW.

La AEJ se forma en verano y climatológicamente se caracteriza por un máximo de viento del este de unos  $15 \text{ ms}^{-1}$  entre 600 y 700 hPa, lo que justifica el uso de estos niveles de la troposfera en los estudios meteorológicos. En este caso seguimos la evolución del episodio del 3 al 9 de septiembre a través del viento y altura del geopotencial en 700 hPa (Z700), la temperatura en 850 hPa, el espesor de la capa 925-850 y la intensidad de precipitación de los análisis operativos del modelo atmosférico IFS-HRES del ECMWF (figura 2):

- En la figura 2a, el día 3 un tren de AEW desplazándose hacia el oeste con las vaguadas de Z700 asociadas a las AEW (máximos de vorticidad) designadas por la letra C. La distancia entre C2 y C3 es bastante inferior a 2000 km (figura 2a), debido probablemente al bloqueo que la dorsal d1, al oeste de Camerún y Mauritania, ejerce al desplazamiento de C2 hacia el oeste. Dicha dorsal es el extremo sudoccidental

del anticiclón de niveles medios (A) que sobrevuela la baja térmica del Sahara. d1 se estira sobre el océano Atlántico entre la vaguada del monzón y la masa relativamente fría en niveles bajos sobre el Atlántico (marcada por las líneas de espesores de la capa 850-925 hPa).

- Posteriormente, C2 se va desplazando hacia latitudes más bajas mientras C3 gira alrededor de C2 moviéndose hacia el norte de Mauritania quedando ambas englobadas en una misma vaguada el día 7 (figura 2e). Como resultado, se forma un flujo monzónico de componente sur que alcanza Marruecos y Argelia, seguramente como una corriente de densidad, que disminuye temporalmente la temperatura en 850 hPa entre C3 y separando d1 de A.

- Durante el día 7 se forman bandas de precipitación más al norte estiradas de SO a NE, probablemente convección disparada por circulaciones frontogenéticas, asociadas a la formación del chorro subtropical en la alta troposfera, por la interacción entre este flujo del sur con la borrasca de latitudes medias situada al norte de la península ibérica (figura 3).

- El día 8, C3 empieza a ser atrapada por

<sup>1</sup> <https://gpm.nasa.gov/data/imerg>

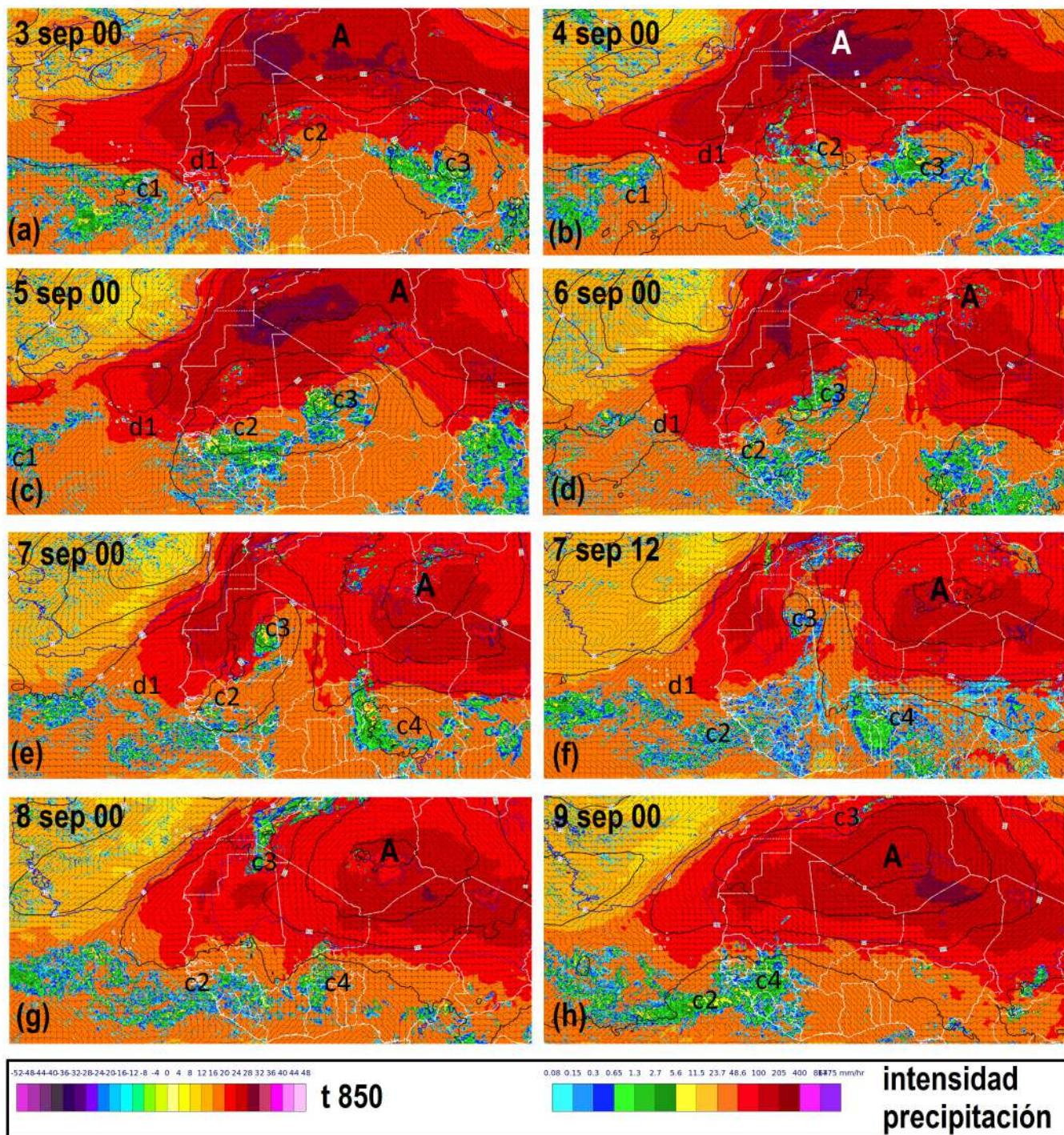


Figura 2. Análisis de 00 UTC del 3 al 9 de septiembre de 2024, y de las 12 UTC del 7 del modelo atmosférico IFS-HRES del ECMWF de los campos: viento (banderas) y altura del geopotencial en 700 hPa (isolíneas en negro); temperatura en 850 hPa (color según la escala de la izquierda en °C); espesor de la capa 850-925 hPa (contornos en azul); intensidad de precipitación (color según la escala de la derecha en mm/hr)

la corriente en chorro (figura 2g) que actúa, como es conocido, como guía de ondas de Rossby, desplazando C3 a lo largo del chorro hacia el este (figura 2h). Mientras, tanto la onda correspondiente a C4 se ha movido rápidamente hacia el oeste acercándose a C2 y restaurando la AEJ.

En la figura 4 se muestra la humedad en la capa 1 del suelo, primeros 7 cm, del modelo del ECMWF el día 9 a las 00 UTC, la banda en colores verdosos que atraviesa el Sahara viene a seguir la trayectoria de C3. Habitualmente esta humedad está

sobre el Sahara por debajo del punto de marchitez permanente (PWP; *permanent wilting point*) o en la parte amarilla por encima del PWP, que indica que las plantas apenas pueden sobrevivir, con eficiencia de evapotranspiración menor que el 20 %. En algunos puntos del Sahara el modelo indica que se superó la capacidad de campo (CAP), alcanzando la eficiencia de la evapotranspiración el 100 %.

## Las predicciones semanales

En la figura 5 se muestran las prediccio-

nes por conjuntos del modelo extendido del ECMWF para las semanas: 27 de agosto – 2 de septiembre (pasada del 26 de agosto) y 3 – 9 de septiembre (pasada 2 de septiembre).

La precipitación media prevista en la primera semana (figura 5a) muestra una anomalía positiva con un máximo zonal superior a +30 mm entre Sudán y Burkina Faso alrededor de 15-16° N, y más al oeste, sobre Camerún, muestra una anomalía negativa mayor que -30 mm. Paralelamente existía una anomalía zonal nega-

tiva a lo largo de la costa norte del golfo de Guinea ( $8^{\circ}$  N). Esta configuración zonal de las anomalías indica la propagación hacia el oeste de un tren de AEW y que su trayectoria discurre más hacia el norte de lo normal, o sea, existe un desplazamiento anómalo de la línea de discontinuidad intertropical (ITD, *Inter Tropical Discontinuity*). Para la segunda semana (y segunda pasada; figura 5b) se intensifica y desplaza el máximo de anomalía de precipitación hacia el oeste, con un máximo de anomalía de precipitación superior a 60 mm entre Chad y el sudeste de Mauritania, que reafirma la propagación corriente abajo del AEJ del tren de AEW. También la anomalía se desplaza unos grados hacia latitudes más altas hacia el oeste, y muestra un máximo mayor de + 90 mm en Mali. Sobre Camerún y sobre la costa norte del golfo de Guinea la anomalía seguía siendo negativa. El desplazamiento hacia el norte y el máximo de precipitación de Mali pueden explicarse por el bloqueo persistente en la costa atlántica generado por la extensión hacia el Atlántico de las altas presiones en la troposfera media sobre la baja térmica del Sahara (figura 2). Por otra parte, el modelo predecía dos máximos relativos de anomalía de precipitación, uno al sur del Gran Atlas en Marruecos y el otro en Argelia previsto en la meseta de Tademait, que en realidad ocurrió más al oeste como delata la humedad en el suelo (figura 4)

Las predicciones medias semanales del índice de predicción de precipitación extrema (EFI de precipitación; *Extreme Forecast Index*) ratifican lo indicado por las anomalías, aunque lógicamente con los máximos superiores a 0.8 en el Sahel algo desplazados hacia el norte respecto a las anomalías (figura 5c y 5d). Para la segunda semana los máximos previstos de EFI de precipitación sobre el Sahel fueron subiendo notablemente de latitud mientras se desplazaban con el tren de ondas hacia el oeste. Las lluvias en el Sahel fueron inusualmente intensas, según la ONG CDP (*Center for Disaster Philanthropy*) las peores en 30 años.

El EFI de temperatura a 2m medio semanal ratifica lo excepcional de la situación con valores menores que -0.9 en casi todo el Sahel (figura 5 e-f).

La anomalía media de Z500 (altura de geopotencial en 500 hPa), muestra en la segunda semana un máximo que se extiende desde los Balcanes hasta el norte de Sahel (figura 5 j), que sobre África sería

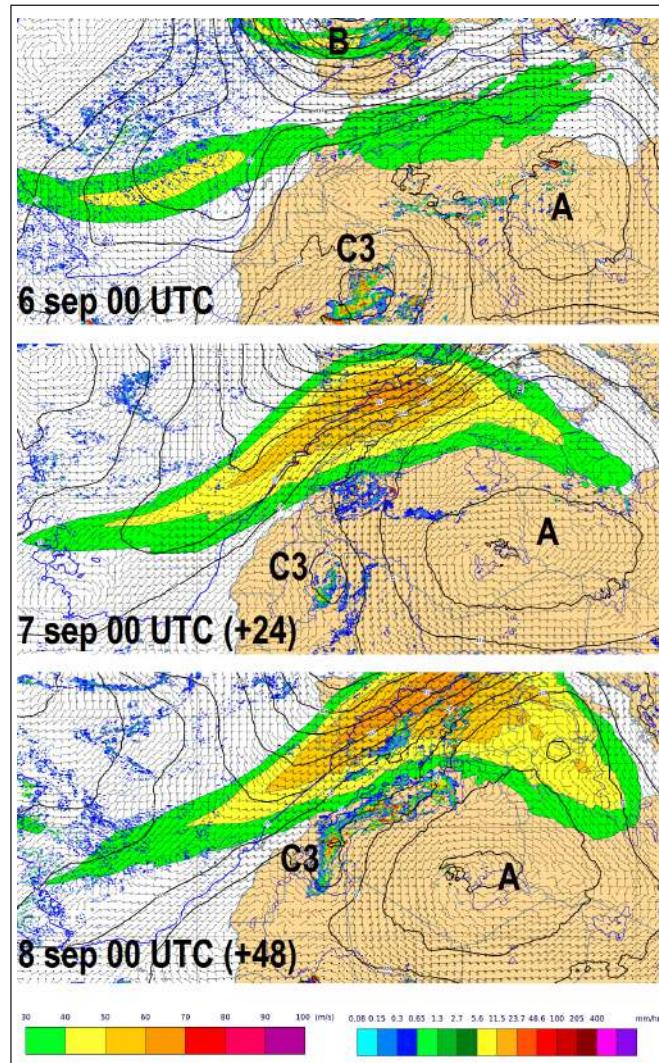


Figura 3. Análisis de 00 UTC del 6 de septiembre de 2024, y previstos para las 00 UTC de los días 7 (+24) y 8 (+48) de los campos: viento (banderas) y altura del geopotencial en 700 hPa (isolíneas en negro, en dam, intervalo 2 dam); velocidad del viento en 200 hPa (color según la escala de la izquierda en m/s); intensidad de precipitación (color según la escala de la derecha en mm/h); espesor de la capa 850-925 hPa (isolíneas azules, en dam, intervalo 2 dam). Modelo operativo atmosférico IFS-HRES del ECMWF

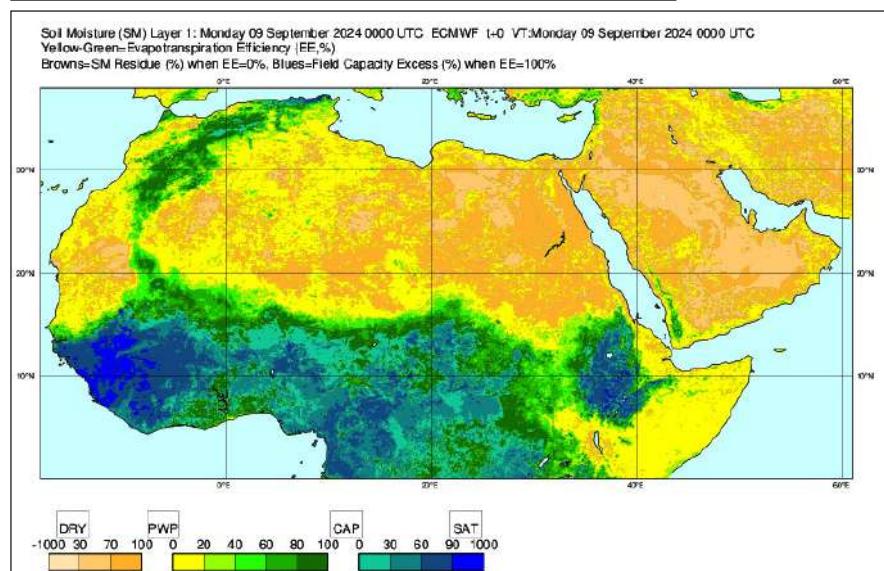


Figura 4. Humedad de la capa 1 del suelo del análisis del modelo IFS-HRES del ECMWF el día 9 a las 00 UTC

el resultado de la superposición de dos anomalías positivas: una anomalía positiva asociada a una onda de Rossby que se propaga desde Europa occidental hacia el sudeste y otra anomalía positiva de una onda de Rossby que se propaga hacia el oeste por el norte de África, asociada a las fuertes precipitaciones anómalas sobre

la India y Paquistán (figuras 5 a-d). El flujo del sur estaría asociado a dicha anomalía y coincidiría con las precipitaciones previstas por la predicción semanal en el centro y este de Argelia y con la lengua de anomalía de temperatura negativa prevista sobre Argelia (figura 5 h). La realidad fue parecida, aunque el reanálisis de la función

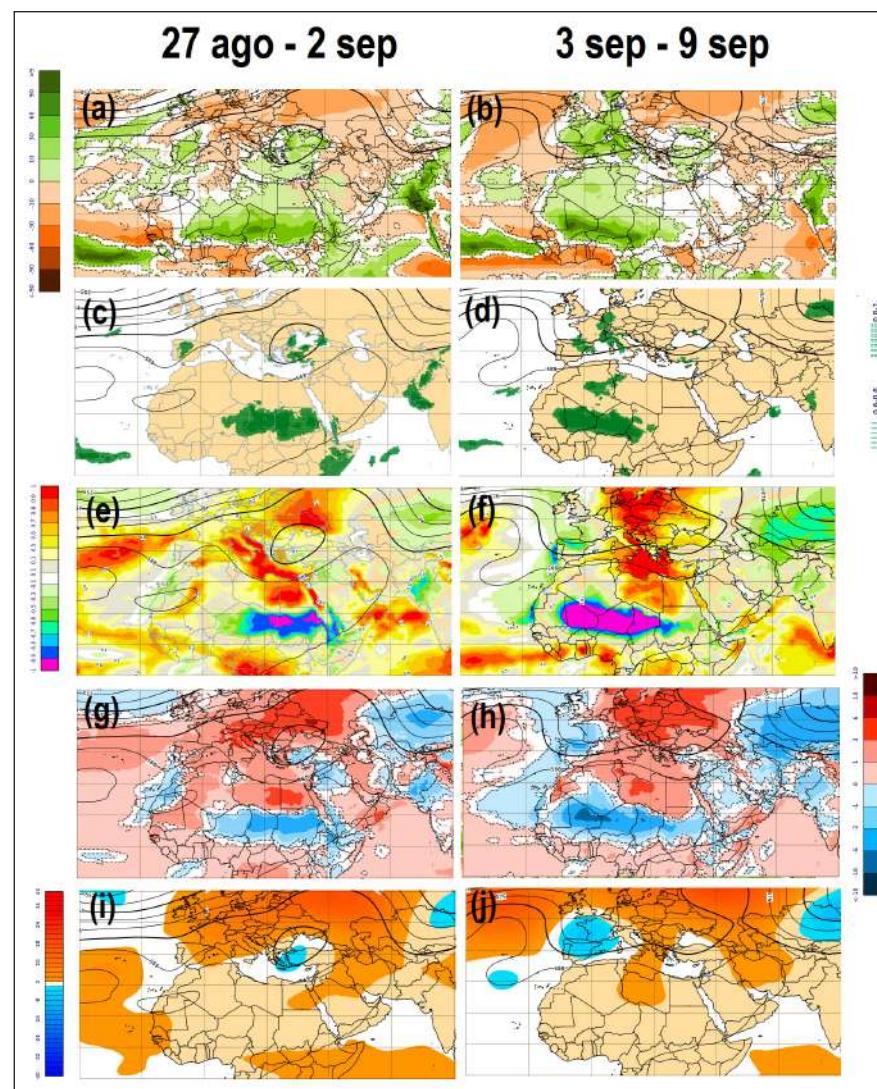


Figura 5. Predicciones semanales por conjuntos del modelo extendido del ECMWF para 27 agosto - 2 septiembre (columna izq.) y 3 - 9 septiembre (columna der.) sobre las isolíneas medios Z500 de: (a-b) anomalías de precipitación acumulada; (c-d) EFI precipitación acumulada; (e-f) EFI temperatura media a 2 m; (g-h) anomalía de la temperatura media a 2 m; (i-j) anomalía media de Z500

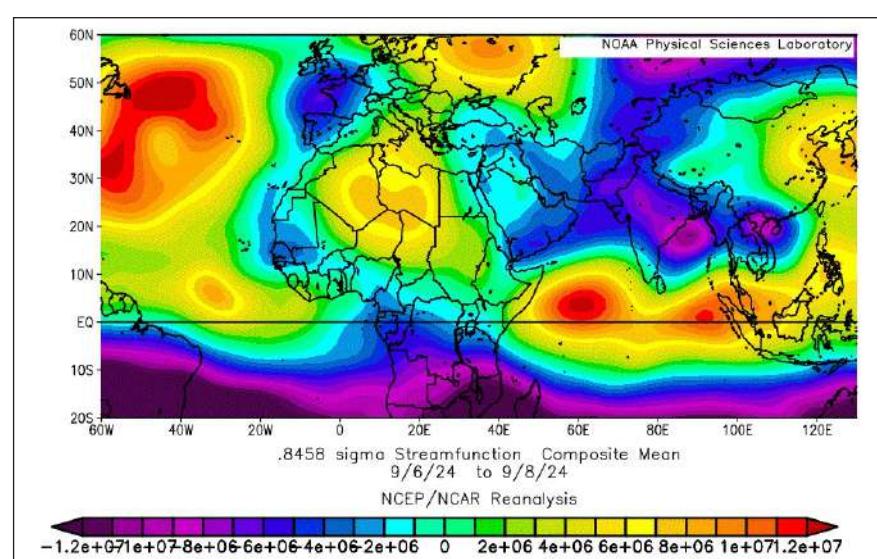


Figura 6. Función de corriente media en el nivel sigma 0.8458 para los días 6 a 8 de septiembre del reanálisis NCEP/NCAR

de corriente (más apropiada que la altura del geopotencial para latitudes bajas) en el nivel sigma 0.8458 (próximo a 850 hPa), mostrado en la figura 6, indica un alta muy intensa sobre el norte de África con un flujo de componente sur en su flanco oeste compatible con la huella de humedad en el suelo mostrada en la figura 3.

## Algunas claves

**1** Un eje de la AEJ desplazado hacia latitudes altas: el eje de la AEJ se forma en una banda zonal de fuerte gradiente meridional de temperatura de humedad que separa las regiones de húmedas y relativamente frías de Sudán de las regiones saharianas secas y cálidas. Este año las habituales inundaciones de agosto y septiembre, que son un problema anual, se produjeron en el norte del país a finales de agosto, por lo que el eje del AEJ se desplazó a una latitud de 20° N, y un tren de AEW se propagó hacia el oeste a latitudes más altas de lo normal.

**2** Presencia de altas presiones en el oeste: cuando el tren de ondas alcanzaba el oeste del continente, la presencia de altas presiones asociadas al alta norteafricana ralentizó el desplazamiento de las ondas y desvió su trayectoria; la onda C2 desvió su trayectoria hacia el ecuador mientras C3 giraba alrededor de C2.

**3** Intensificación del anticiclón del norte de África en el centro del Sahara: el desarrollo de este poderoso anticiclón se debió a un fenómeno de resonancia entre una onda de Rossby procedente de las latitudes medias y otra que se propaga hacia el este procedente de las intensas precipitaciones asociadas al monzón de la India. Como consecuencia se produjo un intenso flujo del sur en niveles bajos y medios en el este del anticiclón que arrastró a C3 hacia el norte generando precipitaciones convectivas en el oeste del Sahara.

**4** Formación de la corriente en chorro subtropical en la alta troposfera sobre Iberia que produjo precipitaciones en el norte del Sahara disparadas por las circulaciones frontogenéticas asociadas a la formación del chorro.

**NOTA FINAL:** como se observa en la figura 6 el flujo de sur de origen monzónico alcanzaba la parte delantera de la borrasca centrada al oeste de Francia, que fue denominada en Europa como tormenta Boris, formando parte del conveyor cálido. Esta tormenta produjo daños enormes en Europa central. De modo que casi se

cierra un círculo en los últimos días de agosto y primera quincena de septiembre con: inundaciones en la India y Paquistán, inundaciones en Sudán, inundaciones en el Sahel, inundaciones en el Sahara e inundaciones en Centroeuropa.