



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

ESTUDIO SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA OSCILACIÓN MADDEN-JULIAN EN EL PACÍFICO TROPICAL Y POTENCIAL DE PRONÓSTICO EXTENDIDO DE PRECIPITACIÓN PARA MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

ROBERTO PINEDA LEÓN

TUTORA:

DRA. ROSARIO DE LOURDES ROMERO CENTENO
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

CDMX, MÉXICO, JULIO, 2024

Agradecimientos

A mis compañeros de vida, Andrea Anguiano, Mazapán, Saturno y Bolillo, por ser esa fuerza que me ha permitido continuar en los momentos más oscuros, por ser una parte esencial en mi día a día, por preocuparse y ocuparse y sobre todo por hacerme sentir que mis batallas también son suyas.

A quien con mucho cariño tengo la fortuna de llamar madre, Ana Ávila, agradezco sus incansables consejos y las largas charlas de vida, cada vez que las he necesitado, las cuales sin duda han sido más de las que me gustaría aceptar y por ser siempre un pilar fundamental en mi vida.

Un agradecimiento del tamaño de esta investigación, a mi asesora, la Dra. Rosario, por confiar en mí y en que juntos podríamos lograr este trabajo. Por ser una maravillosa persona y una excelente asesora, y que, a pesar de sus incontables responsabilidades, siempre tuvo el tiempo, la dedicación y sobre todo la paciencia para contribuir a mi crecimiento personal y académico.

A Ixs Fulges, por brindarme su hermosa amistad, por compartirme sus experiencias, consejos y tan reconfortantes palabras de ánimo. Les quiero mucho amixes.

A las bellas personas que pude conocer a lo largo de esta aventura, la Dra. Karina Ramos, el Dr. Erick Olvera, el Dr. Efrain Moreles, quienes siempre han visto en mí, a alguien con más potencial del que creo poseer.

A mis sinodales, Dra. Paulina Ordóñez Pérez, Dra. Ma. Eugenia Allende Arandía, Dr. Víctor Torres Puente y Dr. Arturo Quintanar Isaías, gracias por sus valiosos consejos y aportaciones que enriquecieron la presente investigación.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, así como al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, por los apoyos que permitieron desarrollar y concluir esta investigación.

Al Programa de Apoyo para la Titulación y Obtención de Grado del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por el apoyo económico otorgado mediante la beca del Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios.

Resumen

Los patrones de precipitación en México son complejos y están asociados a fenómenos que presentan diferentes escalas de variabilidad, tanto espacial como temporal. Por ello, es importante analizar la influencia y modulación de fenómenos meteorológicos como la Oscilación Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés) sobre los patrones de precipitación en México.

En este sentido, el presente estudio se enfoca en analizar el impacto de la MJO en la variabilidad espacio-temporal e intensidad de eventos de precipitación en la región centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes durante los meses de lluvia (mayo-octubre) para el periodo 1981-2021. Para ello, se utilizaron dos índices, el RMM (*Real-Time Multivariate MJO Index*) y el índice OMI (*OLR MJO Index*); se usaron también datos del reanálisis de quinta generación del ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) y de la base de datos de precipitación conocida como CHIRPS. Asimismo, el estudio pretende aportar conocimiento para la obtención de un pronóstico extendido (con 2 a 3 semanas de antelación) de la precipitación en dicha región.

A partir del registro de datos de amplitud y fase del índice RMM, se seleccionaron las fechas en las que la amplitud de la señal convectiva de la MJO fue mayor a 1, por lo menos durante 5 días consecutivos, con una secuencia de fases continua y creciente. Estas fechas se emplearon para obtener compuestos de las anomalías estandarizadas de la precipitación y de las anomalías de los campos de viento. A partir de los compuestos obtenidos se analizó la evolución espacial y temporal de la señal convectiva de la MJO a lo largo del océano Índico ecuatorial y del océano Pacífico tropical. El análisis inicia 15 días antes del registro de cada una de las fases de la MJO y culmina 15 días después.

Los resultados obtenidos al emplear el índice RMM en el análisis de la evolución temporal de los patrones de precipitación durante la temporada lluviosa, permiten identificar el posible efecto de la ubicación espacial de la señal convectiva de la MJO en la distribución e intensidad de la precipitación en la región centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes. Además, es posible identificar, en términos porcentuales, la influencia de la actividad convectiva de la MJO en las regiones que tendrán condiciones de precipitación superiores al valor climatológico mensual. Asimismo, se plantea la posibilidad de que la señal convectiva de la MJO influya hasta por dos semanas en el desarrollo de los patrones de precipitación en la región centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes

Índice General

Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Índice de Figuras.....	VI
Índice de Tablas.....	X
1. Introducción.....	11
1.1. Patrones de precipitación en México.....	11
1.2. La Oscilación Madden-Julian.....	13
1.2.1. Estructura general.....	13
1.2.2. Mecanismos precursores y ciclo de vida de la MJO.....	17
1.3. Hipótesis.....	20
1.4. Objetivos.....	20
1.4.1. Objetivo general.....	20
1.4.2. Objetivos particulares.....	20
2. Datos y Métodos.....	21
2.1. Datos.....	21
2.1.1. CHIRPS.....	21
2.1.2. ERA5.....	22
2.1.2.1. Precipitación total.....	22
2.1.2.2. Componente zonal y meridional del viento.....	23
2.1.3. Índices de la MJO.....	24
2.1.3.1. Índice RMM.....	24
2.1.3.2. Índice OMI.....	26
2.2. Metodología.....	27
2.2.1. Área de estudio.....	27
2.2.2. Fechas con actividad convectiva intensa asociada a la MJO.....	28
2.2.3. Anomalías y anomalías estandarizadas.....	29

2.2.3.1. Compuestos de las anomalías estandarizadas de precipitación.....	30
2.2.4. Evolución temporal de la precipitación.....	31
2.2.5. Evolución temporal de los patrones de precipitación y de los campos del viento.....	32
3. Resultados.....	33
3.1. Condiciones promedio de precipitación durante los meses de lluvias.....	33
3.2. Distribución de frecuencias de las fases de la MJO según los índices RMM y OMI.....	36
3.3. Compuestos de anomalías estandarizadas de precipitación empleando el índice RMM.....	39
3.4. Compuestos de anomalías estandarizadas de precipitación empleando el índice OMI.....	42
3.5. Evolución temporal de las anomalías de precipitación en relación con las fases de la MJO.....	44
3.6. Análisis porcentual de la evolución temporal de la precipitación en la región de interés asociada a la MJO.....	47
3.7. Evolución temporal de los patrones de precipitación y viento asociados a las fases de la MJO.....	50
3.7.1. Evolución temporal de la precipitación y campos de viento en la fase 1 durante el mes de agosto.....	50
3.7.2. Evolución temporal de la precipitación y campos de viento en la fase 2 durante el mes de agosto.....	53
3.7.3. Evolución temporal de la precipitación y campos de viento en la fase 3 durante el mes de agosto.....	55
3.7.4. Evolución temporal de la precipitación y campos de viento en la fase 4 durante el mes de agosto.....	57
3.7.5. Evolución temporal de la precipitación y campos de viento en la fase 5 durante el mes de agosto.....	60
3.7.6. Evolución temporal de la precipitación y campos de viento en la fase 6 durante el mes de agosto.....	62
3.7.7. Evolución temporal de la precipitación y campos de viento en la fase 7 durante el mes de agosto.....	64
3.7.8. Evolución temporal de la actividad convectiva en la fase 8 durante el mes de agosto.....	67
4. Conclusiones.....	70
Anexo.....	74
Bibliografía.....	116

Índice de Figuras

<i>1.1. Patrón anual de precipitación (mm/día) para una región en México que presenta sequía de medio verano durante los meses de julio y agosto. Se calculó empleando datos pentadales de la base de datos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) del periodo 1981-2010. La línea en color rojo representa la media móvil de 30 días. Tomada de Perdigón-Morales (2020).....</i>	13
<i>1.2. Diagrama de longitud y altura a lo largo del ecuador, que describe las características a gran escala de la MJO durante su ciclo de vida (iniciando en el panel superior y culminando en el panel inferior). Los símbolos de nubes representan el centro convectivo, las flechas indican la dirección de la circulación zonal, las curvas por encima de la circulación representan perturbaciones en la tropósfera superior, mientras que las áreas sombreadas y curvas por debajo de la circulación, representan las anomalías, tanto positivas como negativas, de la presión a nivel del mar. Tomada de Madden y Julian (1972).....</i>	14
<i>1.3. Representación esquemática de la relación entre el núcleo convectivo de la MJO (representado por los símbolos de nubes) y el viento zonal en superficie (representado por las flechas). Los valores máximos del viento zonal en superficie se representan con las flechas de mayor grosor; las curvas en la parte inferior de cada panel representan las anomalías de la temperatura superficial del mar debidas a la MJO (positivas por encima de la línea horizontal y negativas por debajo de ésta). El modelo I coincide con el modelo propuesto por Madden y Julian (1972) (ver Figura 1.2), el cual representa el patrón de la MJO más común en el océano Índico, mientras que el modelo II representa el comportamiento más común en el océano Pacífico. Modificada de Zhang y Anderson (2003).....</i>	15
<i>1.4. Diagramas Hovmöller (longitud en el eje horizontal y tiempo en el eje vertical, iniciando abajo y culminando arriba) de: (a) viento zonal diario (m/s) a 850 hPa (aproximadamente 1.5 km sobre el nivel del mar), empleando datos provenientes del reanálisis del Centro de Predicción Ambiental/Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP/NCAR) (Kalnay et al., 1996) con una resolución espacial de 2.5 ° y (b) es la precipitación (mm/día), utilizando el conjunto de datos combinados de GPCP (Huffman et al., 1997), con una resolución espacial de 1°, para el periodo de junio del 2000 a mayo del 2001. Ambas series fueron promediadas de 10°N a 10°S. Las líneas en color blanco señalan eventos identificados de la MJO, con una velocidad de propagación hacia el este de 5 m/s. Tomada de Zhang (2005).....</i>	16
<i>1.5. Estructura de los vientos a gran escala de la MJO. La región nubosa indica el centro convectivo. Las flechas horizontales en 850 y 200 hPa representan vientos anómalos. Las flechas en 500 hPa representan los movimientos verticales. “A” y “C” indican los centros de circulación anticiclónica y ciclónica, respectivamente. Tomada de Rui y Wang (1990).....</i>	17

1.6. Efecto modulador de la MJO en diversos sistemas atmosféricos. Se muestra su influencia en la intensidad y duración de los monzones, en la frecuencia de ciclones tropicales en las cuencas del océano Pacífico y del océano Atlántico, en la intensidad de las tormentas y en la variabilidad de la precipitación. Tomada de Lin et al. (2006).....	19
2.1. Esquema que representa el vector de viento (en verde) y sus componentes horizontales. Componente zonal (u) en color rojo, con valor positivo cuando el viento es del oeste. Componente meridional (v) en color azul, con valor positivo cuando el viento es del sur. La magnitud del vector de viento es la rapidez, que se calcula mediante la ecuación 2.1.....	23
2.2. Diagrama de ocho fases del índice RMM. Cada punto representa un día e indica la ubicación aproximada de la señal convectiva de la MJO. Los puntos dentro del círculo representan una señal débil o nula de la oscilación. Tomada de Wheeler y Hendon (2004).....	24
2.3. Diagrama de ocho fases que retoma lo propuesto por Wheeler y Hendon (2004). Cada punto representa la ubicación e intensidad que tuvo la señal convectiva de la MJO en un día dado, incorporando una agrupación diferente. Los puntos en color azul representan un estado inactivo de la actividad convectiva de la MJO (amplitud < 1.0), los puntos en color verde representan un estado activo (1.0 ≤ amplitud < 1.5), los puntos en color naranja representan un estado muy activo (1.5 ≤ amplitud < 2.5), y los puntos en color rojo representan un estado extremadamente activo (amplitud ≥ 2.5). Tomada de (Lafleur et al., 2015).....	25
2.4. Extracto del registro histórico de la actividad de la MJO en función del índice RMM. Las tres primeras columnas corresponden a la fecha (año, mes y día) del ciclo de vida de la MJO; la cuarta y quinta columnas corresponden a la primera y segunda componentes del análisis de FEOs (RMM1 y RMM2); la sexta columna corresponde a la fase, y la séptima columna muestra la amplitud de la señal. Tomado de la Oficina de Meteorología, Clima y Agua de Australia (http://www.bom.gov.au/climate/mjo/#tabs=MJO-phase).....	26
2.5. Extracto del registro histórico de la base de datos del índice OMI. Las cuatro primeras columnas corresponden a la fecha (año, mes, día y hora), la quinta y sexta columna a las dos primeras componentes principales y la séptima columna a la amplitud. Tomada del PSL de la NOAA (https://psl.noaa.gov/mjo/mjoindex/omi.1x.txt).....	27
2.6. Dominio 1, que tiene una cobertura global en longitud y una extensión de 5°S a 50°N en latitud. El recuadro rojo delimita el segundo dominio (ver Figura 2.7).....	28
2.7. Dominio 2, que abarca la zona centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes, de 108°W a 86°W en longitud y de 13°N a 23°N en latitud.....	28

3.1. Condiciones promedio de la precipitación acumulada diaria (mm/día) en el Dominio 1 empleando datos del reanálisis ERA5 para los meses de mayo a octubre, considerando el periodo 1981-2021.....	33
3.2. Climatología global de la precipitación media anual (mm/día), empleando datos de GPCP (Global Precipitation Climatology Project), para el periodo 1979-2010. Tomada de Adler et al., (2016).....	34
3.3. Condiciones promedio de precipitación acumulada diaria para la principal región de estudio, correspondientes a los meses de mayo a octubre del periodo 1981 al 2021, usando la base de datos CHIRPS.....	35
3.4. Similar a la Figura 3.2 pero a partir de los datos del reanálisis ERA5.....	35
3.5. Distribución de frecuencias de las 8 fases del índice RMM para los meses de mayo a octubre del periodo 1981-2021, en términos del número de días con actividad convectiva intensa asociada a la MJO. El promedio mensual de días que se presentó la MJO en cualquiera de sus fases se representa con una línea horizontal continua en color rojo. Los límites que marcan los umbrales para definir una mayor (M) y menor (m) frecuencia se representan con líneas horizontales segmentadas en color magenta.....	37
3.6. Distribución de frecuencias de las 8 fases del índice OMI para los meses de mayo a octubre del periodo 1981-2021, en términos del número de días con actividad convectiva intensa asociada a la MJO. El promedio mensual de días que se presentó la MJO se presenta en una línea horizontal continua en color rojo. El límite que marca los valores de mayor (M) y menor (m) frecuencia se presenta en líneas horizontales segmentadas en color magenta.....	38
3.7. Compuestos de anomalías estandarizadas de precipitación, calculadas para los meses de lluvias (renglones) en función de las fases (columnas) del índice RMM. Se emplearon datos de precipitación acumulada diaria del reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2021.....	40
3.8. Compuestos de anomalías estandarizadas de precipitación, calculadas para los meses de lluvia (renglones) en función de las fases (columnas) del índice OMI. Se emplearon datos de precipitación acumulada diaria del reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2021.....	43
3.9. Diagramas Hovmöller de anomalías positivas de precipitación, en donde el eje horizontal representa las coordenadas de longitud y el eje vertical representa el tiempo en días con respecto al día 0 (línea roja segmentada). Se presentan los diagramas en función de las 8 fases del índice RMM (correspondientes a las columnas) y para cada uno de los meses del periodo de lluvias (correspondientes a los renglones).....	45

3.10. Diagramas del porcentaje de área que superó la anomalía de precipitación de 1.77 mm/día, desde 15 días previos al registro de la fase hasta 15 días posteriores (eje horizontal) en función de las fases del índice RMM (eje vertical), para los meses de lluvia (mayo-octubre).....	48
3.11. Evolución temporal de los patrones de anomalías positivas de precipitación acumulada diaria y anomalías de viento diario a 850 mb para la fase 1 durante el mes de agosto. Se presentan los patrones a intervalos de 5 días, iniciando 15 días previos al registro de la fase (día -15), durante el registro de la fase (día 0) y hasta 10 días posteriores a éste (día 10), con base en los datos del índice RMM.....	51
3.12. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 2.....	54
3.13. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 3.....	56
3.14. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 4.....	58
3.15. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 5.....	61
3.16. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 6.....	63
3.17. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 7.....	65
3.18. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 8.....	68

Índice de Tablas

<i>3.1. Fases que se presentan con mayor (M) o menor (m) frecuencia en cada mes, con base en los umbrales determinados a partir del promedio y la desviación estándar del número de días que presentó actividad la MJO de acuerdo con el índice RMM. Se marcan en color azul las fases cuya frecuencia superó el umbral M y en color verde las fases cuya frecuencia estuvo por debajo del umbral m.....</i>	37
<i>3.2. Fases que se presentan con mayor (M) o menor (m) frecuencia en cada mes, con base en los umbrales determinados a partir del promedio y la desviación estándar del número de días que presentó actividad la MJO de acuerdo con el índice OMI. Se marcan en color azul las fases cuya frecuencia superó el umbral M y en color verde las fases cuya frecuencia estuvo por debajo del umbral m.....</i>	38

1. Introducción

En el presente capítulo se describen brevemente los patrones de precipitación en México. Se abordan también las características generales de la Oscilación Madden-Julian (MJO) y las características particulares que presenta en su trayecto por la región tropical del océano Pacífico. Esto permitirá plantear, en capítulos posteriores, las bases para un potencial pronóstico extendido de precipitación para la región centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes en función del ciclo de vida de la MJO.

1.1. Patrones de precipitación en México

La precipitación desempeña un rol fundamental en la energía global, el ciclo hidrológico y el sistema climático (Schneider, et al., 2008), y contribuye considerablemente al transporte de humedad de los trópicos hacia las regiones extratropicales (Vázquez-Proveyer, 2023). Aproximadamente, el 37 % de la energía que ingresa a la atmósfera proviene de la liberación de calor latente de procesos asociados al vapor de agua. Este calor se mantiene en la atmósfera y provee de energía a los procesos convectivos y a los sistemas de circulación atmosférica de gran escala (Rosenfeld et al., 2008).

Los regímenes de precipitación son determinantes en actividades de diversos sectores, incluyendo la agricultura, el transporte y la industria energética. Además, la precipitación tiene un gran impacto en la sociedad por las implicaciones que tiene un déficit o exceso, ya que su escasez prolongada puede provocar sequías meteorológicas, mientras que eventos de precipitación extrema pueden provocar inundaciones y ocasionar pérdidas materiales y humanas (Vázquez-Proveyer, 2023). Por lo tanto, es esencial llevar a cabo un adecuado estudio de la misma, que nos permita conocer tanto su distribución espacial, como su variabilidad en diferentes escalas temporales (diaria, estacional, intraestacional y anual) (Perdigón-Morales et al., 2018).

El clima en las Américas tropicales del hemisferio norte presenta un ciclo anual caracterizado por una estación relativamente seca de noviembre a abril, durante el invierno boreal, y una estación lluviosa de mayo a octubre, durante el verano boreal (Magaña et al., 1999). En invierno, la presencia de frentes fríos que pueden llegar hasta Centroamérica modulan la temperatura en superficie (Schultz et al., 1998), mientras que, en verano la actividad convectiva es muy intensa en la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) (Magaña y Caetano, 2005).

México se ubica entre las albercas de agua cálida, del Pacífico tropical nororiental, del Golfo de México y el Mar Caribe (Wang, 2001; Magaña y Caetano, 2005). En particular, la región centro-sur de México se sitúa dentro de la zona de los vientos alisios, por lo que la interacción entre procesos tropicales y de latitudes medias desempeña un papel esencial en el clima de esta región (Perdigón-Morales, 2020), el cual también, se ve influenciado por los sistemas subtropicales de alta presión del Atlántico norte y del Pacífico nororiental que modulan los gradientes de presión (de Anda Sánchez, 2020; Romero-Centeno et al., 2007). De acuerdo con Magaña et al. (2003), la radiación solar entrante y los vientos de bajo nivel son factores que influyen en la modulación de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar sobre la región nororiental del océano Pacífico, lo que a su vez influye directamente en las variaciones del patrón de lluvias durante el verano. En esta época también se manifiesta el monzón mexicano y, con frecuencia, se presentan ondas del este y ciclones tropicales (Magaña, 2003; Torres y Thorncroft, 2022).

Este contexto climático contribuye significativamente a la alta variabilidad espacial y temporal de la precipitación en México. En particular, la temporada de lluvias en la zona centro-sur de México se extiende desde mayo hasta octubre y está caracterizada por presentar un patrón bimodal, con dos máximos de precipitación que generalmente se presentan en junio y septiembre (Curtis, 2002; Englehart y Douglas, 2002; Perdigón-Morales, 2020). A mitad de la temporada de lluvias se observa una reducción de la actividad convectiva y de la precipitación (**Figura 1.1**), fenómeno conocido como sequía de medio verano o canícula. Este comportamiento impacta directamente en numerosas actividades económicas en la región, especialmente aquellas relacionadas con la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica (Magaña y Caetano, 2005; Perdigón-Morales et al., 2018; Perdigón-Morales et al., 2019; de Anda Sánchez, 2020), actividades que están estrechamente vinculadas al ciclo estacional de la precipitación. En consecuencia, el éxito o fracaso de un cultivo depende de las características específicas de la temporada de lluvias (inicio, duración, distribución temporal, etc.) (Magaña et al., 1999).

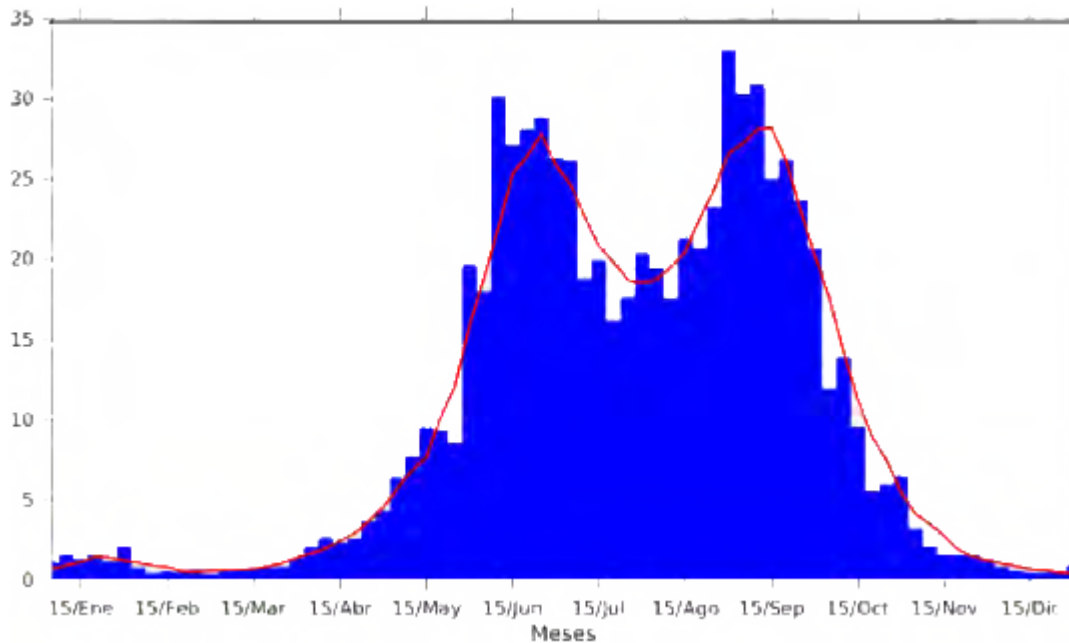


Figura 1.1. Patrón anual de precipitación (mm/día) para una región en México que presenta sequía de medio verano durante los meses de julio y agosto. Se calculó empleando datos pentadales de la base de datos CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) del periodo 1981-2010. La línea en color rojo representa la media móvil de 30 días. Tomada de Perdigón-Morales (2020).

1.2. La Oscilación Madden-Julian

Una característica notable de la circulación atmosférica y la convección húmeda en los trópicos es la tendencia a organizarse en estructuras de escala planetaria, con un periodo intraestacional local de 30 a 90 días y con una propagación hacia el este sobre las regiones ecuatoriales en donde la superficie del mar es cálida (Zhang, 2005). Este comportamiento fue descubierto por Madden y Julian (1971, 1972) al analizar las anomalías de la componente zonal del viento en el océano Pacífico y recibió el nombre de Oscilación Madden-Julian.

1.2.1. Estructura general

Un evento de la MJO se caracteriza por un centro de convección profunda y precipitación abundante ("región activa o fase activa") flanqueado tanto al este como al oeste por regiones de convección débil y escasa precipitación ("regiones inactivas" o "suprimidas") (**Figura 1.2**), que alcanza extensiones zonales de 12,000 a 20,000 km (aproximadamente de 120° a 200° en longitud) (Rui y Wang, 1990). A pesar de que la velocidad de la MJO varía ligeramente entre eventos individuales y durante las diferentes etapas de su ciclo de vida, se considera que tiene una velocidad de desplazamiento

promedio de 5 m/s (Hendon y Salby, 1994; Weickmann et al., 1985). Generalmente existe un solo evento de la MJO completamente desarrollado, aunque ocasionalmente pueden coexistir dos eventos débiles, uno en etapa inicial en el océano Índico y otro en etapa final en la región centro-oriental del océano Pacífico (Wheeler y Hendon, 2004).

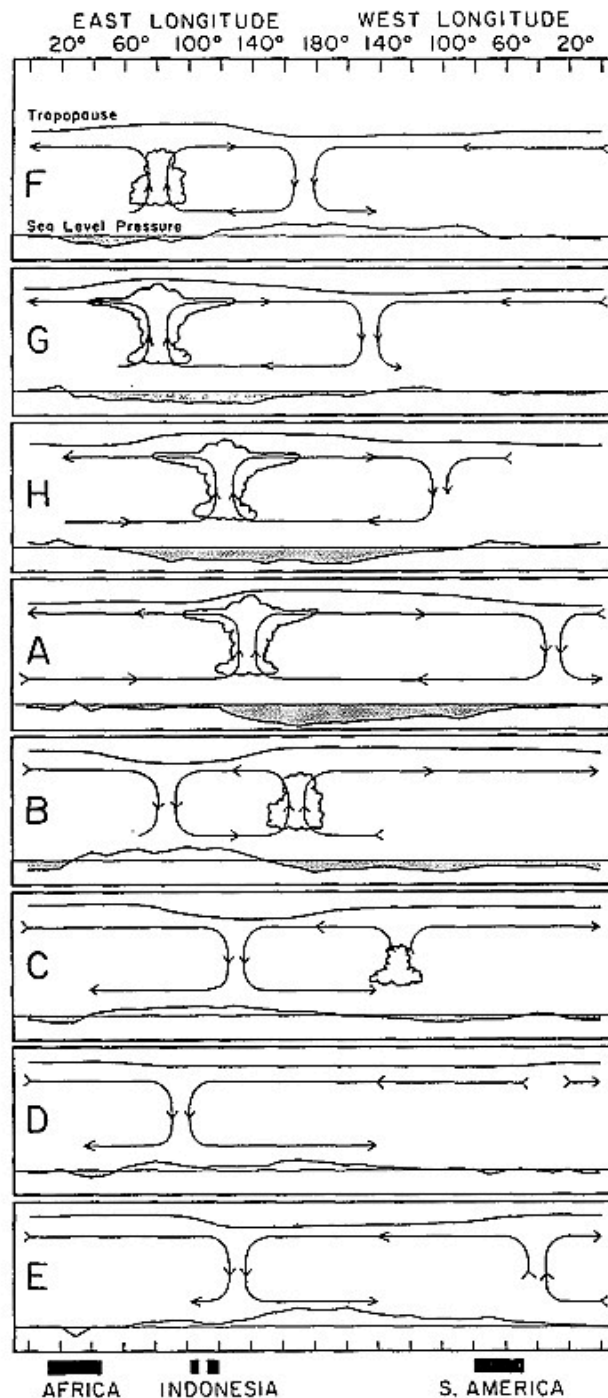


Figura 1.2. Diagrama de longitud y altura a lo largo del ecuador, que describe las características a gran escala de la MJO durante su ciclo de vida (iniciando en el panel superior y culminando en el panel inferior). Los símbolos de nubes representan el centro convectivo, las flechas indican la dirección de la circulación zonal, las curvas por encima de la circulación representan perturbaciones en la tropósfera superior, mientras que las áreas sombreadas y curvas por debajo de la circulación, representan las anomalías, tanto positivas como negativas, de la presión a nivel del mar. Tomada de Madden y Julian (1972).

Las señales convectivas de la MJO usualmente se limitan a los océanos Índico y Pacífico (**Figura 1.2**), ya que la inestabilidad convectiva solo se puede mantener sobre la región cálida del mar (Zhang, 2005). Cuando inicia el desarrollo de un evento de la MJO en el océano Índico, es muy común que predomine la presencia de vientos superficiales del oeste de gran intensidad al oeste del centro convectivo, mientras que al este se presentan vientos del este de menor intensidad (modelo I **Figura 1.3**). Por otra parte, cuando la MJO se desplaza hacia el océano Pacífico, suele presentarse un cambio en el comportamiento de los vientos superficiales del centro convectivo, presentando vientos del oeste de gran intensidad (modelo II **Figura 1.3**) (Zhang, 2005).

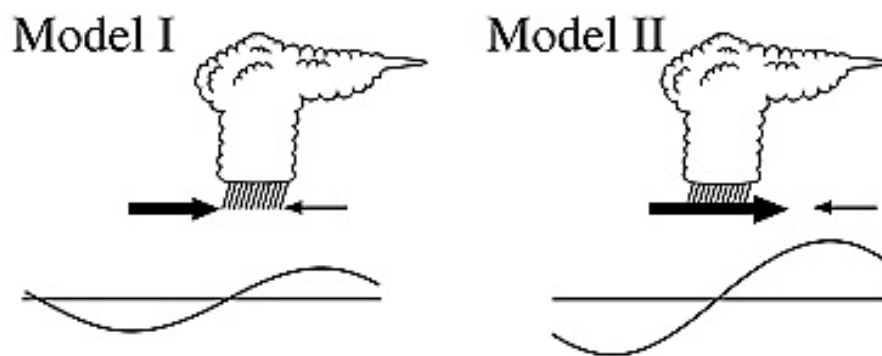


Figura 1.3. Representación esquemática de la relación entre el núcleo convectivo de la MJO (representado por los símbolos de nubes) y el viento zonal en superficie (representado por las flechas). Los valores máximos del viento zonal en superficie se representan con las flechas de mayor grosor; las curvas en la parte inferior de cada panel representan las anomalías de la temperatura superficial del mar debidas a la MJO (positivas por encima de la línea horizontal y negativas por debajo de ésta). El modelo I coincide con el modelo propuesto por Madden y Julian (1972) (ver Figura 1.2), el cual representa el patrón de la MJO más común en el océano Índico, mientras que el modelo II representa el comportamiento más común en el océano Pacífico. Modificada de Zhang y Anderson (2003).

A gran escala, el desplazamiento hacia el este de la región activa de la MJO se puede ver como un conjunto de sistemas convectivos de pequeña escala que se propagan en diferentes direcciones y que se desarrollan cada uno ligeramente al este del anterior (**Figura 1.4**) (Hendon y Liebmann, 1994; Zhang, 2005). La extensión de los sistemas convectivos (región activa) es mucho menor que la de la circulación atmosférica que la rodea (región inactiva), debido a que el calentamiento atmosférico ocurre de manera localizada (Salby et al., 1994). Por lo tanto, la región activa de la MJO se asemeja más a un pulso aislado o discreto, que a una oscilación (Salby y Hendon, 1994). Debido al comportamiento de las señales convectivas de la MJO, sus características (incluyendo el desvanecimiento en el Pacífico oriental) se pueden identificar en observaciones de precipitación sin necesidad de filtrar los datos. Esto puede verse en la **Figura 1.4**, mediante un análisis temporal de los patrones globales del viento zonal diario a 850 hPa y de la

precipitación diaria (mm/día), en donde la propagación de la MJO es representada con líneas en color blanco.

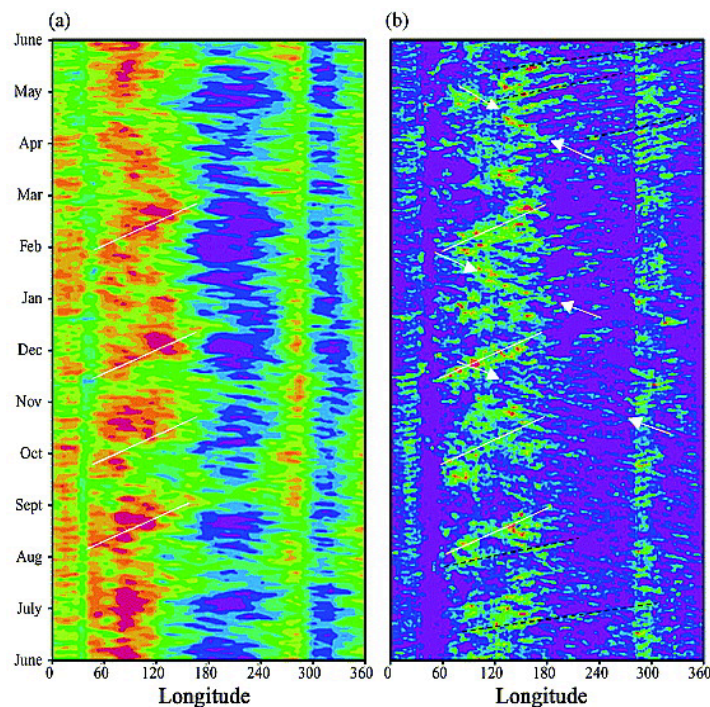


Figura 1.4. Diagramas Hovmöller (longitud en el eje horizontal y tiempo en el eje vertical, iniciando abajo y culminando arriba) de: (a) viento zonal diario (m/s) a 850 hPa (aproximadamente 1.5 km sobre el nivel del mar), empleando datos provenientes del reanálisis del Centro de Predicción Ambiental/Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP/NCAR) (Kalnay et al., 1996) con una resolución espacial de 2.5° y (b) es la precipitación (mm/día), utilizando el conjunto de datos combinados de GPCP (Huffman et al., 1997), con una resolución espacial de 1°, para el periodo de junio del 2000 a mayo del 2001. Ambas series fueron promediadas de 10°N a 10°S. Las líneas en color blanco señalan eventos identificados de la MJO, con una velocidad de propagación hacia el este de 5 m/s. Tomada de Zhang (2005).

Las regiones o fases activa e inactiva de la MJO interactúan verticalmente a lo largo de la tropósfera baja, generando una celda de circulación zonal (**Figura 1.5**). La circulación de vientos zonales a lo largo de la tropósfera superior (generalmente alrededor de 200 hPa, aproximadamente a 13 km de altura) invierte la dirección de la circulación zonal que se observa en superficie (Zhang, 2005). Esto indica que, en superficie, inmediatamente al este del centro convectivo, hay convergencia de bajo nivel, con movimientos ascendentes y anomalías positivas de humedad; mientras que inmediatamente al oeste se produce divergencia de bajo nivel, movimientos descendentes y anomalías negativas de humedad (**Figura 1.5**) (Zhang, 2005).

La estructura de vientos a gran escala de la MJO a menudo se describe como ondas ecuatoriales acopladas a la convección profunda. El comportamiento de los patrones de viento al este del centro convectivo (vientos del este en niveles bajos de la tropósfera y vientos del oeste en niveles superiores) se asemeja a una onda de Kelvin ecuatorial pero

con una menor intensidad de vientos (Zhang, 2005), ya que usualmente las ondas de Kelvin suelen alcanzar velocidades superiores a los 15 m/s (Wheeler y Kiladis, 1999). Al oeste del centro convectivo se observan elementos característicos de una onda de Rossby ecuatorial, con vientos del oeste en los niveles bajos y un par de giros ciclónicos que se extienden a ambos lados del ecuador, mientras que en los niveles superiores se observan vientos del este y un par de giros anticiclónicos (Figura 1.5) (Madden, 1986; Nogués-Paegle et al., 1989). Debido a que las ondas de Kelvin son el único fenómeno ecuatorial de escala planetaria con campos de viento zonales que se propagan hacia el este, mostrando un comportamiento similar a la MJO, se consideran un elemento esencial en la dinámica de esta oscilación. Milliff y Madden (1996) y Matthews (2000) destacan que, si bien la señal convectiva de la MJO usualmente desaparece en el Pacífico oriental, es posible identificar la propagación de la señal más hacia el este, como ondas libres con velocidades mucho mayores (cerca de 35 m/s), visibles tanto en el viento como en la presión en superficie.

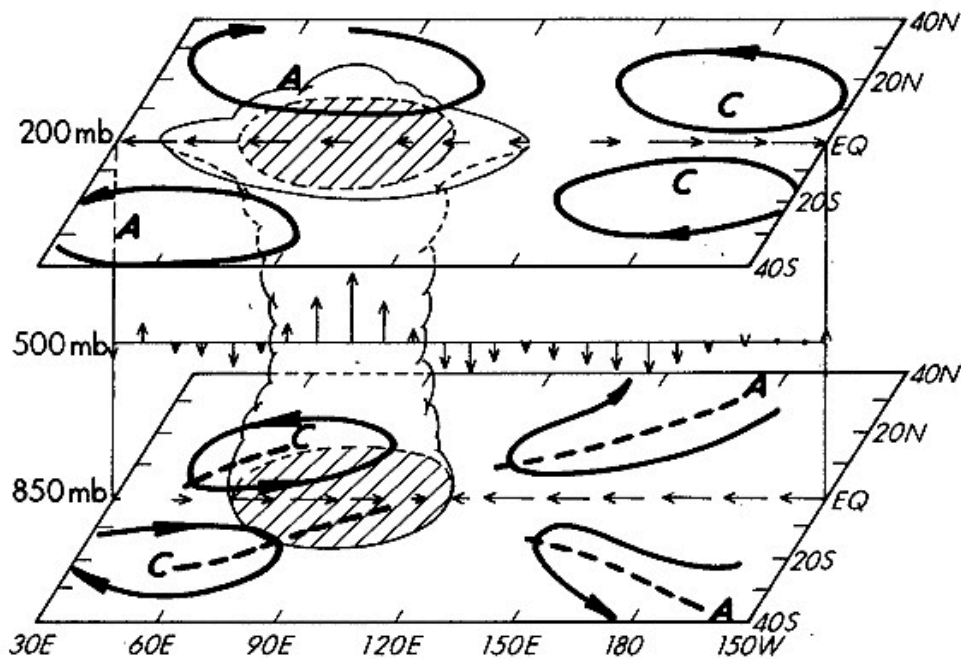


Figura 1.5. Estructura de los vientos a gran escala de la MJO. La región nublada indica el centro convectivo. Las flechas horizontales en 850 y 200 hPa representan vientos anómalos. Las flechas en 500 hPa representan los movimientos verticales. "A" y "C" indican los centros de circulación anticiclónica y ciclónica, respectivamente. Tomada de Rui y Wang (1990).

1.2.2. Mecanismos precursores y ciclo de vida de la MJO

A pesar de la basta información que se tiene hoy en día sobre la MJO, aún se mantiene la interrogante referente al inicio de la actividad convectiva. Zhao et al. (2013) clasifican las teorías propuestas considerando un origen interno (tropical) o un origen externo (extratropical). Las hipótesis de origen tropical consideran forzamientos derivados

de la circulación de un evento previo de la MJO, cambios locales en la circulación aire-mar, alteraciones en la temperatura superficial del mar y en la humedad, así como la convergencia de la capa límite planetaria. Asimismo, el océano Índico ecuatorial occidental juega un papel clave para el desarrollo de la MJO, ya que de cinco a diez días previos al inicio de la señal convectiva se observa un aumento de la temperatura y de la humedad específica en la tropósfera inferior de la región, dando paso a una inestabilidad atmosférica que marca el comienzo de la actividad convectiva de la MJO (Zhao et al., 2013 y los trabajos allí citados). Esta teoría propone que al pasar por el continente africano, la señal de la MJO puede desencadenar convección profunda sobre la región cálida y húmeda del océano Índico, debido a un posible efecto de elevación topográfica. Las hipótesis de origen extratropical consideran los forzantes de perturbaciones de latitudes medias, que incluyen dispersión de energía o el transporte de momento de las ondas de Rossby y de perturbaciones baroclínicas (Zhao et al., 2013 y los trabajos allí citados).

La intensidad y el alcance latitudinal que tendrá cada evento de la MJO se ven condicionados por el ciclo estacional (Madden, 1986; Salby y Hendon, 1994; Jones, 2000). La estación en la que se presenta una mayor actividad convectiva de la MJO es a finales del verano austral y principios del otoño, teniendo las señales de mayor intensidad al sur del ecuador. Adicionalmente, en el verano boreal se presenta un segundo periodo de alta frecuencia, en el cual las señales más fuertes se encuentran al norte del ecuador (Zhang, 2005). El análisis de la actividad de la MJO se realiza en función de la intensidad y ubicación del núcleo convectivo en un determinado momento. En este sentido, se han desarrollado diversos índices, entre los que destacan aquellos que se definen a partir de las dos primeras componentes principales de un análisis de *Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)*, con las cuales se construye un diagrama de fases que nos permite conocer la ubicación e intensidad del núcleo convectivo (En la **subsección 2.1.3** se profundiza en estos índices).

Si bien la MJO no es el único factor responsable de la variabilidad intraestacional de la atmósfera tropical, sí es el componente dominante (Hendon et al., 1999; Zhang, 2005; Lin et al., 2006 y los trabajos allí citados). Además, influye en la circulación atmosférica de la región tropical, así como en el tiempo meteorológico y en el clima de las regiones extratropicales de todo el mundo (Hendon et al., 1999; Zhang, 2005; Lin et al., 2006; Barret et al., 2012; Perdigón, 2020). La **Figura 1.6** ilustra el efecto modulador de la MJO en sistemas atmosféricos y, en consecuencia, en la precipitación, tanto de regiones tropicales como extratropicales, a lo largo de todo el año (Hendon y Liebmann, 1990; Zhang, 2005; Donald et al., 2006; Lin et al., 2006).

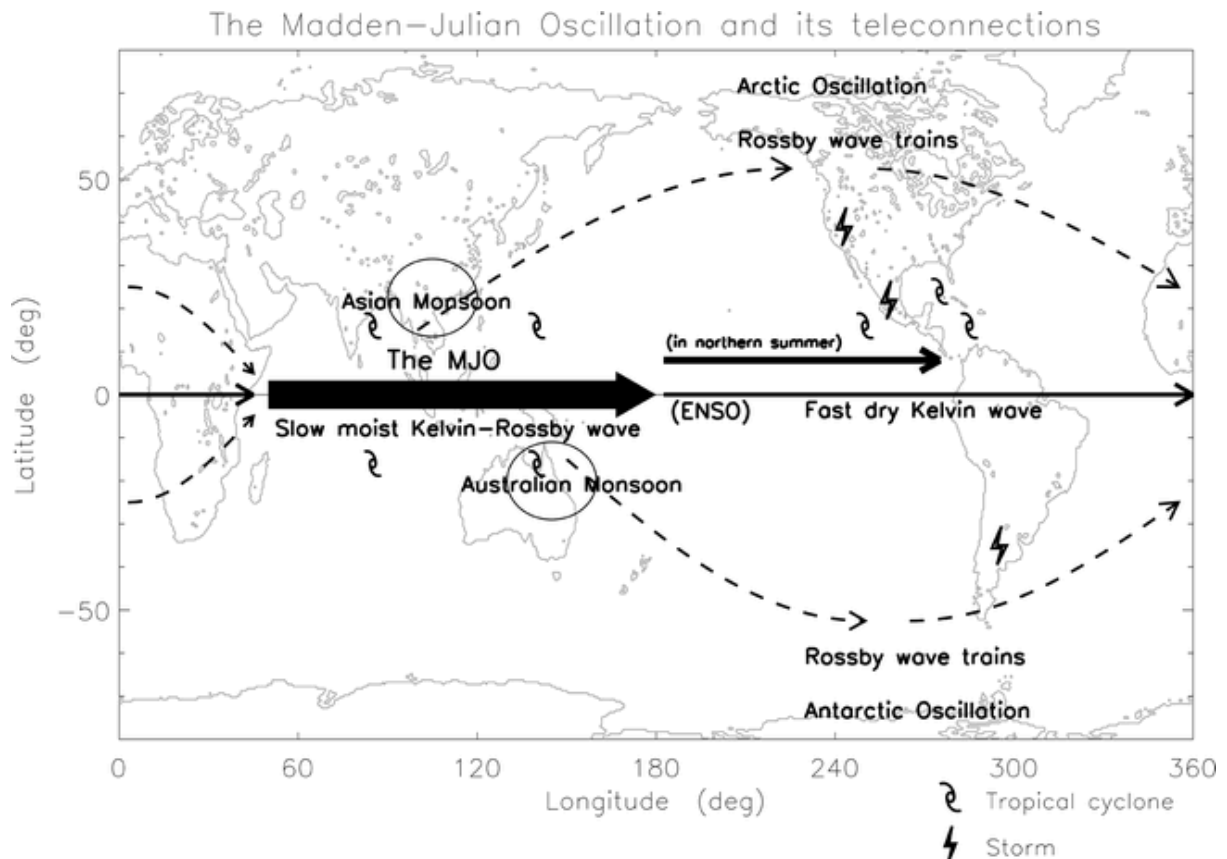


Figura 1.6. Efecto modulador de la MJO en diversos sistemas atmosféricos. Se muestra su influencia en la intensidad y duración de los monzones, en la frecuencia de ciclones tropicales en las cuencas del océano Pacífico y del océano Atlántico, en la intensidad de las tormentas y en la variabilidad de la precipitación. Tomada de Lin et al. (2006).

Además de lo anterior, los impactos de la MJO en el continente americano han sido ampliamente documentados, destacando algunos estudios al respecto. Por ejemplo, Jones (2000) encontró que la MJO modula la frecuencia y ocurrencia de eventos extremos de precipitación sobre el estado de California; Bond y Vecchi (2003) demostraron que la MJO tiene una influencia en los patrones de precipitación durante el invierno en la región occidental de los estados de Oregón y Washington; Zheng et al. (2018) encontraron que la MJO tiene impactos significativos en el tiempo meteorológico en América del Norte, influyendo en la trayectoria y frecuencia de tormentas en el centro de Canadá, el sureste de Estados Unidos y el Pacífico oriental. Asimismo, Barlow y Salstein (2006) encontraron que durante el verano boreal la MJO desempeña un papel fundamental en la modulación de la precipitación en México y Centroamérica; mientras que Barrett y Esquivel (2013) reportan que, de junio a septiembre, la ubicación geográfica de la MJO influye directamente en los patrones de precipitación locales en México, en concreto en el Estado de Guanajuato.

Aunado a esto, se ha demostrado el efecto modulador de la MJO en la génesis de los ciclones tropicales en el océano Pacífico y el Golfo de México (Liebmann et al., 1994; Maloney y Hartmann, 2000; Hall et al., 2001); así como su contribución en la fecha de inicio

y variabilidad intraestacional de la precipitación del monzón de verano asiático y en el comportamiento de la precipitación del monzón de América del Norte (Zhang, 2013). Por otra parte, Jones et al. (2004), Jones y Carvalho (2012) y Zhang (2013) mencionan que cuando la MJO se encuentra en estado activo, los eventos de precipitación extrema (valores que superan el percentil 90 de la distribución de frecuencias) pueden aumentar hasta en un 40 % en relación a cuando ésta no se encuentra en estado activo. Este resultado también lo reporta Vázquez-Proveyer (2023) en el estudio que realizó para el Valle de México.

1.3. Hipótesis

La propagación e intensidad de la MJO a lo largo de su ciclo de vida influye y modula los patrones de la precipitación de verano en México y tiene un alto potencial para el desarrollo y mejora de los pronósticos extendidos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar la evolución temporal de la señal convectiva de la MJO y su influencia en los patrones de precipitación en la región centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes durante los meses de lluvia (mayo-octubre), y estudiar el posible potencial de la MJO para el desarrollo de un pronóstico a mediano plazo.

1.4.2. Objetivos particulares

1. Caracterizar la variabilidad e intensidad de la precipitación en la región centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes en función de las fases de la MJO empleando datos climatológicos (CHIRPS) y de reanálisis (ERA5).
2. Analizar la posible influencia de la señal convectiva de la MJO en los patrones de precipitación de la zona centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes en el mediano plazo (con 2 a 3 semanas de antelación).
3. Caracterizar la variabilidad e intensidad de los campos de viento y su posible influencia en los patrones de precipitación de la zona centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes.

2. Datos y Métodos

En este capítulo se describen las fuentes de datos y las variables meteorológicas que se utilizaron en la presente investigación, así como los índices empleados para medir la actividad de la MJO. Adicionalmente, se realiza una descripción detallada de la metodología que se siguió, la cual incluye el procesamiento de datos históricos de los índices utilizados, la elaboración de compuestos de anomalías estandarizadas, la elaboración de diagramas Hovmöller y el análisis temporal de los patrones espaciales de la precipitación y los campos de viento, elementos que servirán para analizar la variabilidad de la precipitación en la región centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes asociada al ciclo de vida de la MJO.

2.1. Datos

En el presente estudio se emplearon los datos de precipitación total de la base de datos CHIRPS (*Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations data*), así como la precipitación total y las componentes zonal y meridional del campo de viento a 850 mb del reanálisis de quinta generación del ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), conocido como ERA5. A continuación se describen estas bases de datos y las variables analizadas.

2.1.1. CHIRPS

La base de datos CHIRPS es un producto desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos en colaboración con el Centro de Riesgos Climáticos de la Universidad de Santa Bárbara, California. Contiene datos de precipitación en un dominio que abarca de 50°S a 50°N en latitud y de 180°W a 180°E en longitud, con una alta resolución espacial de 0.05° (\approx 5.5km) y con una resolución temporal diaria, pentadal y mensual, teniendo un registro histórico desde 1981 hasta el presente (Funk et al., 2014). Para este estudio se emplearon los datos de precipitación acumulada diaria.

CHIRPS se basa en técnicas de interpolación “inteligentes” aplicadas a una climatología de alta resolución espacial e incorpora estimaciones de precipitación basadas en observaciones infrarrojas satelitales y datos de estaciones meteorológicas (Funk et al., 2014). También utiliza mediciones de lluvia tropical y análisis de precipitación multisatélite

para calibrar las estimaciones de precipitación global derivadas del método de *Duración de Nube Fría* (CCD, por sus siglas en inglés)¹.

Se han realizado algunos estudios en los que se ha evaluado el desempeño de esta base de datos para México. Por ejemplo, Perdigón-Morales (2020) menciona que los datos de CHIRPS comparados con observaciones de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional muestran valores similares a las climatologías mensuales de la precipitación acumulada y reproducen adecuadamente la sequía de medio verano. Asimismo, Vázquez-Proveyer (2023) menciona que esta base de datos reproduce el patrón espacial de los acumulados de precipitación mensual y anual en sitios de la Zona Metropolitana del Valle de México con datos de estaciones meteorológicas (CLICOM y SACMEX).

2.1.2. ERA5

El reanálisis ERA5 combina observaciones globales con simulaciones de modelos numéricos mediante una asimilación de datos que incorpora versiones corregidas a partir de las observaciones originales, permitiendo generar un análisis de mayor calidad (Hersbach et al., 2020).

ERA5 proporciona estimaciones horarias de una gran cantidad de variables atmosféricas, terrestres y oceánicas. Tiene una resolución espacial horizontal de 0.28° (≈ 31 km), y en la vertical cuenta con 173 niveles híbridos (coordenadas σ^2 cerca de la superficie terrestre y coordenadas η o de presión a mayor altura) que inician en la superficie terrestre y culminan a 0.01 hPa. Cuenta con un sistema de asimilación de datos 4D-Var y con datos desde 1950 hasta el presente (Hersbach et al., 2020).

2.1.2.1. Precipitación total

La precipitación total cuantifica el total del agua líquida y congelada, es decir, la lluvia y la nieve que cae a la superficie terrestre. Representa la suma de la precipitación a gran escala generada por el esquema de nubes en el IFS (*Integrated Forecasting System*) y la precipitación convectiva generada mediante el esquema de convección; este cálculo no incluye la niebla, el rocío o la precipitación que se evapora en la atmósfera antes de alcanzar la superficie (Hersbach et al., 2020). Es importante recalcar que la precipitación proveniente de este reanálisis es resultado de distintas parametrizaciones, tanto para la gran escala (Tiedtke, 1989, 1993), como para procesos microfísicos (Forbes and Tompkins,

¹ La cantidad de lluvia se puede determinar midiendo el tiempo en el que la temperatura en la parte superior de la nube es más fría que un cierto valor de referencia.

² Son el resultado de dividir la presión (P) en un nivel dado por la presión en superficie (P*), es decir, P/P^*

2011; Forbes et al., 2011; Forbes and Ahlgrimm, 2014). Esta variable proporciona el acumulado de precipitación total a una, tres o veinticuatro horas y se cuantifica en metros (los metros de espesor que alcanzaría el agua si se distribuye de manera uniforme como una lámina) (Hersbach et al., 2020). En el presente estudio se usaron los datos horarios.

A partir de los datos de precipitación total se calcularon las condiciones de precipitación promedio por día (mm/día), para los meses de mayo a octubre en el periodo de 1981 a 2021. Estos datos son el punto de partida para los análisis de precipitación realizados en el presente estudio.

2.1.2.2. Componente zonal y meridional del viento

La componente zonal (u) del viento representa la componente horizontal de la velocidad del viento en dirección este-oeste, con sentido positivo hacia el este. La componente meridional (v) del viento representa la componente horizontal de la velocidad del viento en dirección norte-sur, con sentido positivo hacia el norte. La **Figura 2.1** muestra un esquema del vector de viento y sus componentes horizontales. Las unidades de u y v son metros por segundo (m/s).

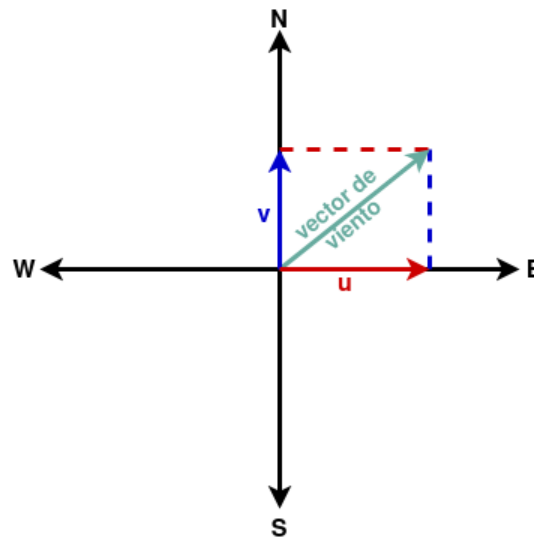


Figura 2.1. Esquema que representa el vector de viento (en verde) y sus componentes horizontales. Componente zonal (u) en color rojo, con valor positivo cuando el viento es del oeste. Componente meridional (v) en color azul, con valor positivo cuando el viento es del sur. La magnitud del vector de viento es la rapidez, que se calcula mediante la ecuación 2.1.

A partir de las componentes del viento se puede calcular la rapidez:

$$rapidez = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.1)$$

y la dirección del viento horizontal:

$$\phi = \arctan\left(\frac{u}{v}\right) \quad (2.2)$$

Por lo anterior, si la componente meridional del viento es positiva (vientos del sur), al ángulo obtenido se le debe sumar 180° , si la componente zonal es positiva (vientos del oeste) y la componente meridional es negativa (vientos del norte), al ángulo obtenido se le debe sumar 360° .

2.1.3. Índices de la MJO

El análisis de la actividad de la MJO se realiza en función de la intensidad y ubicación del núcleo convectivo en un determinado momento. Con la finalidad de determinar la intensidad y la región geográfica en la que se encuentra la MJO se han desarrollado diferentes índices, entre los que destacan el Índice RMM (*Real-Time Multivariate MJO Index*) y el Índice OMI (*Outgoing Longwave Radiation MJO Index*).

2.1.3.1. Índice RMM

El índice RMM fue desarrollado por Wheeler y Hendon (2004). Éste divide la región comprendida entre África oriental y el océano Pacífico occidental en 8 regiones diferentes, denominadas fases (**Figura 2.2**). Cada una de estas fases proporciona la ubicación aproximada de la región activa de la MJO, analizando la señal, desde su origen en el océano Índico y a lo largo de su trayectoria, incluyendo el hemisferio occidental, África y la región centro-occidental del océano Pacífico.

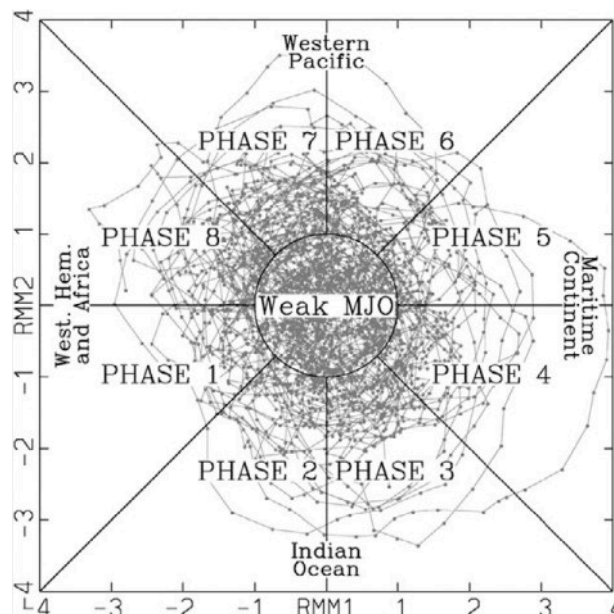


Figura 2.2. Diagrama de ocho fases del índice RMM. Cada punto representa un día e indica la ubicación aproximada de la señal convectiva de la MJO. Los puntos dentro del círculo representan una señal débil o nula de la oscilación. Tomada de Wheeler y Hendon (2004).

El índice RMM también proporciona los valores de la intensidad de la MJO (amplitud). La intensidad (amplitud) se define como la distancia entre el punto a analizar de un día en particular y el punto central del diagrama de fases (Lafleur et al., 2015). Cada punto situado dentro del diagrama de fases del índice RMM representa la ubicación e intensidad en un día específico del ciclo de vida de un evento de la MJO (**Figura 2.2 y 2.3**). La amplitud también define dos estados de actividad de la MJO: el estado activo cuando la amplitud es mayor o igual a 1 y el estado inactivo cuando la amplitud es menor a 1. Sin embargo, Lafleur et al. (2015) proponen una clasificación con mayor detalle, la cual considera como un estado inactivo cuando la amplitud es menor a 1, un estado activo cuando la amplitud se encuentra entre 1.0 y 1.5, un estado muy activo cuando se encuentra entre 1.5 y 2.5, y un estado extremadamente activo cuando es mayor a 2.5 (**Figura 2.3**).

En diversos estudios se ha demostrado que el índice RMM captura de manera eficiente la propagación de la señal convectiva de la MJO en las américas tropicales (Barrett y Esquivel, 2013; Ordoñez et al., 2013; Perdigón et al., 2019, Vázquez-Proveyer, 2023), lo cual lo hace apropiado para los objetivos propuestos en el presente trabajo.

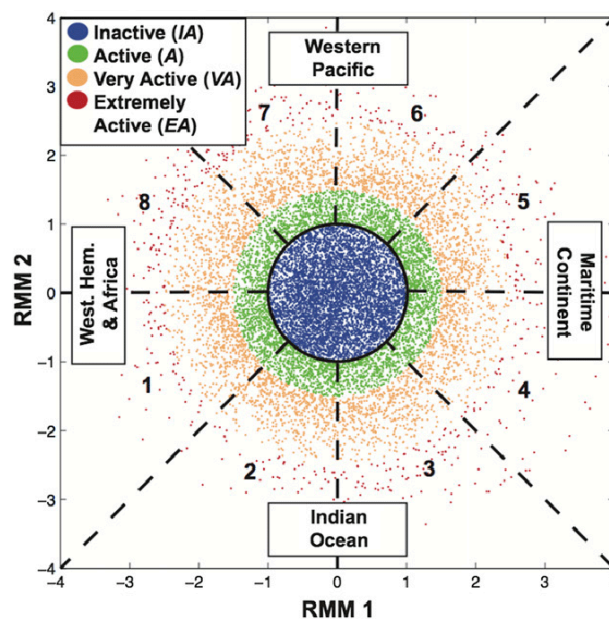


Figura 2.3. Diagrama de ocho fases que retoma lo propuesto por Wheeler y Hendon (2004). Cada punto representa la ubicación e intensidad que tuvo la señal convectiva de la MJO en un día dado, incorporando una agrupación diferente. Los puntos en color azul representan un estado inactivo de la actividad convectiva de la MJO (amplitud < 1.0), los puntos en color verde representan un estado activo ($1.0 \leq$ amplitud < 1.5), los puntos en color naranja representan un estado muy activo ($1.5 \leq$ amplitud < 2.5), y los puntos en color rojo representan un estado extremadamente activo (amplitud ≥ 2.5). Tomada de (Lafleur et al., 2015).

El *Bureau of Meteorology* de Australia cuenta con un registro histórico de valores del índice RMM desde 1974 y se actualiza cada día (**Figura 2.4**). En él se registra la fecha, el valor de las dos primeras componentes principales del análisis de FEOs, la fase y la

amplitud de la señal convectiva de la MJO para cada día. En el presente estudio se utilizaron las fechas, la amplitud y fase de esta base de datos histórica.

year	month	day	RMM1	RMM2	phase	amplitude	Missing Value= 1.E36 or 999	
1974	6	1	1.6344700	1.2030400		5	2.0294800	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	2	1.6028900	1.0151200		5	1.8972900	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	3	1.5162500	1.0855100		5	1.8647600	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	4	1.5098100	1.0357300		5	1.8309200	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	5	1.5590600	1.3051800		5	2.0332601	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	6	1.2062600	1.6288900		6	2.0269001	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	7	0.61110097	1.7224801		6	1.8276700	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	8	0.32639500	1.7781800		6	1.8078901	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	9	9.38282013E-02	1.3569400		6	1.3601800	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	10	-8.61262977E-02	0.77547598		7	0.78024399	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	11	0.11139400	0.38953400		6	0.40514800	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	12	0.12048900	1.38852000E-02		5	0.12128600	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	13	1.92805994E-02	-0.21766999		3	0.21851900	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	14	-0.10436000	-0.38104999		2	0.39508200	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	15	-0.18294001	-0.64534998		2	0.67077500	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	16	-0.23596001	-0.47106999		2	0.52686501	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	17	-0.49869001	-0.48752001		1	0.69740200	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	18	-0.56980002	-0.36398000		1	0.67613399	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	19	-0.69502997	-0.35556999		1	0.78070498	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	20	-0.72915000	-0.47646001		1	0.87101501	Final_value: OLR & NCEP_winds
1974	6	21	-1.0944300	-0.83275002		1	1.3752300	Final_value: OLR & NCEP_winds

Figura 2.4. Extracto del registro histórico de la actividad de la MJO en función del índice RMM. Las tres primeras columnas corresponden a la fecha (año, mes y día) del ciclo de vida de la MJO; la cuarta y quinta columnas corresponden a la primera y segunda componentes del análisis de FEOs (RMM1 y RMM2); la sexta columna corresponde a la fase, y la séptima columna muestra la amplitud de la señal. Tomado de la *Oficina de Meteorología, Clima y Agua de Australia* (<http://www.bom.gov.au/climate/mjo/#tabs=MJO-phase>).

2.1.3.2. Índice OMI

Barrett et al. (2021) mencionan que, si bien el índice RMM es utilizado operacionalmente debido a la disponibilidad de datos en tiempo real, éste exhibe algunas deficiencias, como una detección inadecuada de la convección y precipitación a escala sinóptica, provocando que en ocasiones este índice detecte una propagación errónea de la MJO hacia el oeste, causada por un sesgo, al priorizar la variable del viento zonal por encima de la OLR. Por lo anterior, se consideró esencial incluir un segundo índice (índice OMI) en el análisis realizado.

De manera análoga al índice RMM, el índice OMI se basa en un análisis de FEOs, con la diferencia de que solo se consideran valores de OLR obtenidos mediante un filtro pasabandas de 20 a 96 días en la región de 20°S a 20°N. Esta metodología permite identificar la ubicación e intensidad de la señal de la MJO en un espacio de fases similar al del índice RMM (Barrett et al., 2021). Kiladis et al., 2014 compararon los resultados derivados del índice RMM con los obtenidos a partir del índice OMI, concluyendo que, los índices RMM y OMI pueden ser comparables en cualquier fecha cuando se invierte el orden entre la primera y la segunda componente principal. Destacando que, ambos índices son equivalentes cuando la segunda componente principal del índice OMI se considera cómo análoga a la primera componente principal del índice RMM, mientras que la primera

componente principal del índice OMI con signo negativo se considera análoga a la segunda componente principal del índice RMM.

En la actualidad, el PSL (*Physical Sciences Laboratory*) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) cuenta con una base de datos histórica del índice OMI desde 1979 hasta 2021. En esta base de datos se registra la fecha (año, mes, día y hora), la primera y segunda componentes del análisis de FEOs, a partir de las cuales se puede obtener la fase en la que se sitúa el núcleo convectivo de la MJO (siguiendo las particularidades mencionadas en el párrafo anterior) y la amplitud de la señal (**Figura 2.5**).

1979	1	1	0	0.16495	0.77777	0.79507
1979	1	2	0	0.02067	0.85471	0.85496
1979	1	3	0	-0.15643	0.91998	0.93319
1979	1	4	0	-0.35961	0.96423	1.02910
1979	1	5	0	-0.57882	0.97869	1.13704
1979	1	6	0	-0.80114	0.95673	1.24786
1979	1	7	0	-1.01203	0.89509	1.35107
1979	1	8	0	-1.19710	0.79426	1.43663
1979	1	9	0	-1.34391	0.65793	1.49632
1979	1	10	0	-1.44325	0.49180	1.52474
1979	1	11	0	-1.48972	0.30245	1.52011
1979	1	12	0	-1.48168	0.09663	1.48482

Figura 2.5. Extracto del registro histórico de la base de datos del índice OMI. Las cuatro primeras columnas corresponden a la fecha (año, mes, día y hora), la quinta y sexta columna a las dos primeras componentes principales y la séptima columna a la amplitud. Tomada del PSL de la NOAA (<https://psl.noaa.gov/mjo/mjoindex/omi.1x.txt>).

2.2. Metodología

2.2.1. Área de estudio

Con el objetivo de identificar la evolución y propagación de la MJO a lo largo de su ciclo de vida en la región tropical, incluyendo el océano Pacífico y el Mar Caribe, así como su efecto modulador en los patrones de precipitación de la región centro-sur de México, y regiones oceánicas adyacentes se definió un dominio base (Dominio 1) que abarca una extensión global en longitud y de 5°S a 50°N en latitud (**Figura 2.6**).

Si bien este dominio tiene la ventaja de visualizar el comportamiento general de la MJO a lo largo de su ciclo de vida, desde su nacimiento en el océano Índico hasta su posible llegada a territorio nacional, también presenta una limitación en el análisis detallado del efecto modulador en los patrones de precipitación de la región centro-sur de México y regiones oceánicas aledañas, principal región de interés en el presente estudio. Por esta razón, se consideró necesario incluir un segundo dominio que permita el análisis detallado de los patrones de precipitación y viento en esta región. Este dominio (Dominio 2) abarca de

108°W a 86°W en longitud y de 13°N a 23°N en latitud (**Figura 2.7**). En el resto del documento, se hace referencia a este dominio como “dominio de interés” o “región de interés”.

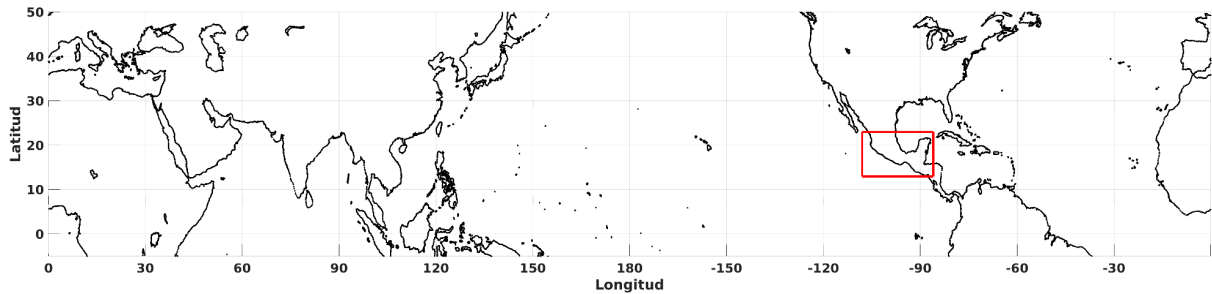


Figura 2.6. Dominio 1, que tiene una cobertura global en longitud y una extensión de 5°S a 50°N en latitud. El recuadro rojo delimita el segundo dominio (ver **Figura 2.7**).

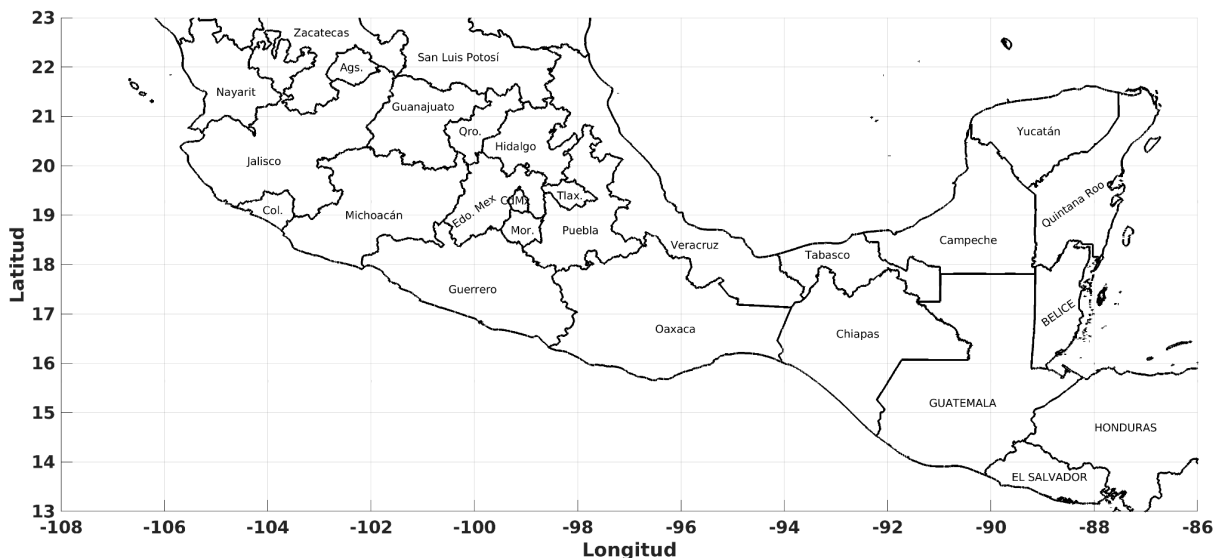


Figura 2.7. Dominio 2, que abarca la zona centro-sur de México y regiones oceánicas adyacentes, de 108°W a 86°W en longitud y de 13°N a 23°N en latitud.

2.2.2. Fechas con actividad convectiva intensa asociada a la MJO

En este trabajo se adoptaron algunas de las recomendaciones propuestas por el *CPC (Climate Prediction Center)* del *NWS (National Weather Service)* de la *NOAA* para realizar un análisis adecuado de las fechas en las que la MJO registró una actividad convectiva intensa. Esto permitió proponer una serie de pasos basados en el análisis de los datos históricos de los índices RMM y OMI:

1. Se restringen los datos de la región de interés a los meses de lluvia (mayo-octubre).
2. Se identifican los datos que indican una señal convectiva intensa (amplitud mayor a 1).

3. Partiendo del conjunto de datos que indican las fechas en las cuales se registró una señal convectiva intensa de la MJO, se identifican las fechas en las cuales el orden de las fases es sucesivo y creciente. Esta condición se incorpora con la finalidad de mitigar la variabilidad de alta frecuencia a escala sinóptica, la cual puede afectar los resultados al indicar una dirección de propagación errónea de la MJO (en sentido este-oeste).
4. Del conjunto de datos que capturan una señal convectiva intensa asociada a la MJO y una adecuada propagación de oeste a este, se descartan aquellos en los que no se registra una señal convectiva intensa por al menos 5 días consecutivos. Esta condición se implementó con el objetivo de identificar adecuadamente eventos convectivos intensos asociados a la MJO, excluyendo aquellos datos que alternan entre condiciones intensas y débiles, los cuales generalmente corresponden a la parte final del ciclo de vida de la MJO.

2.2.3. Anomalías y anomalías estandarizadas

En las ciencias atmosféricas se denomina una anomalía (x') a la diferencia entre un dato de interés (x) y las condiciones promedio del conjunto de datos que se esté analizando (\bar{x}):

$$x' = x - \bar{x} \quad (2.3)$$

Wilks (2019) menciona que el término anomalía no necesariamente hace referencia a valores anormales o inusuales, más bien muestra el comportamiento que tienen los datos de la variable a analizar con respecto a la media definida en el intervalo de interés.

Por otra parte, las anomalías estandarizadas (Ecuación 2.4) se calculan mediante el cociente entre la anomalía (x') y la desviación estándar (S_x) definida en el intervalo de interés de la variable a analizar:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{S_x} = \frac{x'}{S_x} \quad (2.4)$$

Las anomalías estandarizadas pretenden eliminar las influencias de la ubicación y la dispersión del conjunto de datos (Wilks, 2019). Son cantidades adimensionales y se pueden interpretar como el número de desviaciones estándar que se desvía un valor particular de la media del conjunto de datos analizados. En este sentido, permiten identificar eventos que pueden considerarse como extremos o inusuales.

En el presente estudio, se calcularon compuestos de las anomalías de los campos de viento y compuestos de las anomalías estandarizadas de la precipitación total. Estos permiten realizar un análisis detallado de la variabilidad espacial de estas variables con respecto a su estado climatológico, lo cual proporciona una perspectiva sobre las fluctuaciones y patrones regionales tanto de la precipitación como de la rapidez y dirección del viento.

2.2.3.1. Compuestos de las anomalías estandarizadas de precipitación

El análisis de la variabilidad de la precipitación en la región de interés se realizó mediante compuestos de las anomalías estandarizadas de precipitación, durante los meses de lluvia, en función de la fase en la que se sitúa la actividad convectiva intensa asociada a la MJO. Lo anterior está basado en los trabajos de Lin et al. (2009) y Martin y Schumacher (2011), quienes mencionan que la mejor forma de analizar la precipitación asociada a algún fenómeno es sustrayendo las condiciones promedio de precipitación del periodo de análisis.

El número de días que se consideró para el cálculo de los compuestos de cada fase es altamente variable entre meses y fases, puesto que las fechas empleadas corresponden a los días en los que la MJO presentó actividad convectiva intensa (ver **Figura 3.5**). El criterio empleado es el mismo para ambos índices.

Debido a que la metodología que se siguió para los compuestos de las fases por mes es idéntica, a manera de ejemplo se detallan los pasos que se siguieron para generar el compuesto de la anomalía estandarizada de precipitación de la fase 1 en el mes de mayo:

1. Identificar los días en los que la MJO registró actividad convectiva intensa en la fase 1, durante el mes de mayo, en el periodo 1981-2021, de acuerdo a los criterios descritos en la **subsección 2.2.2**.
2. Extraer los datos de precipitación total acumulada diaria para las fechas identificadas en el paso anterior (esto se realizó con los datos del reanálisis ERA5).
3. A partir de los datos de precipitación acumulada diaria obtenidos en el paso anterior, se calcula el promedio de la precipitación total diaria, lo cual permite obtener las condiciones promedio de la precipitación en la fase 1, durante el mes de mayo (\bar{x}_i).
4. Adicionalmente, también se extraen los datos de precipitación total diaria correspondientes a los 31 días del mes de mayo, para cada año del periodo 1981-2021, con los cuales se calcula el promedio (\bar{x}) y la desviación estándar (Sx), datos que nos permiten conocer las condiciones climatológicas y la variabilidad mensual.

5. Con los datos de las condiciones de precipitación promedio de cada fase de un mes dado, las condiciones promedio y la variabilidad mensual se calcula la anomalía estandarizada (Ecuación 2.3) de la precipitación.

Los compuestos mensuales de las anomalías estandarizadas se generaron con el fin de conocer la variabilidad espacial de la precipitación en los meses lluviosos, así como su relación con las fases de la MJO. Además, se pretende moderar la señal ante la influencia de otros fenómenos meteorológicos en los patrones de precipitación que se desarrollan en la región de interés durante estos meses. Tal es el caso de la presencia de frentes fríos en los meses de septiembre y octubre (CONAGUA, 2024), o la ocurrencia de ciclones tropicales, que de acuerdo con la NOAA (2023) en la cuenca del Pacífico tropical oriental se presentan desde mediados de mayo hasta finales de noviembre.

El procedimiento descrito para el cálculo de compuestos de las anomalías estandarizadas de precipitación, usando datos climatológicos y de reanálisis numérico, se replicó usando el índice OMI.

2.2.4. Evolución temporal de la precipitación

Con la finalidad de conocer la posible relación tanto espacial como temporal entre las fases de la MJO y los patrones de precipitación en la región de interés, se planteó la siguiente metodología complementaria:

1. Se seleccionan los días en los cuales la MJO presentó actividad convectiva intensa, tal como se detalla en la **subsección 2.2.2**. Estas fechas se definen como el día de registro o el **día 0**.
2. Se extraen los datos de precipitación en una ventana que inicia 15 días previos a cada una de las fechas definidas como **día 0** y finaliza 15 días después del **día 0**.
3. Se realiza el promedio de cada día de la ventana temporal de los datos obtenidos en el paso anterior. Esto se realizó con la finalidad de obtener las condiciones promedio de precipitación (mm/día) de los 31 días de la ventana temporal. Este procedimiento se realiza para cada fase de la MJO de los diferentes meses analizados.
4. Se reduce la extensión de los datos al Dominio 2 con la finalidad de observar en detalle los patrones de precipitación en la región de interés (ver **Figura 2.7**).
5. Se promedian los datos en latitud, con la finalidad de obtener las condiciones promedio zonales.

6. Se generan diagramas tiempo-longitud (diagramas Hovmöller) para estudiar la evolución temporal y espacial de la precipitación a lo largo del Pacífico centro-oriental y la región de interés.

De manera complementaria, se realizó el cálculo del porcentaje de píxeles que superan el umbral de 1.77 mm/día en las anomalías positivas de la precipitación. Este valor se seleccionó considerando el promedio climatológico de la tasa de precipitación en la región de interés durante los meses de lluvia del periodo evaluado (1981-2021), que es de 3.44 mm/día. La elección de este umbral se fundamenta en la intención de analizar espacialmente las anomalías que exceden el 50 % del valor promedio en dicha región. Para llevar a cabo este análisis, se utilizó la siguiente metodología:

1. Se calculó el número total de píxeles que conforman el dominio (89 píxeles en longitud y 41 píxeles en latitud, arrojando un total de 3,649 píxeles).
2. Se contabilizó el número de píxeles que superan el valor umbral de 1.77 mm/día para cada uno de los días de las ventanas temporales de las diferentes fases de los meses lluviosos.
3. Se calcula el porcentaje de píxeles que superó el valor umbral de las anomalías positivas de precipitación en la región de interés.

Los resultados de este análisis se muestran en la **sección 3.6**.

2.2.5. Evolución temporal de los patrones de precipitación y de los campos del viento

Con la finalidad de complementar los análisis propuestos, se construyeron compuestos que integran espacialmente anomalías de los campos del viento a 850 mb (únicamente se consideraron las anomalías con una rapidez mayor a 1.5m/s) y las anomalías estandarizadas de precipitación para una ventana temporal que inicia 15 días antes del registro de la fase (*día 0*) y culmina 10 días después de la fase.

Estos análisis se enfocan exclusivamente en las anomalías estandarizadas positivas, dado que los objetivos del estudio pretenden analizar la contribución o influencia positiva de la MJO en los patrones de precipitación de la región de interés. Este análisis se muestra en la **sección 3.7**, en las **Figuras 3.11-3.18** y se complementa con las **Figuras A01-A40** del Anexo.

3. Resultados

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos en este estudio. En primer lugar, se realiza un análisis comparativo de las climatologías de la precipitación para los meses de lluvias empleando datos de la climatología CHIRPS y del reanálisis ERA5. A continuación, se efectúa una breve comparación del número de días que la MJO registró actividad convectiva intensa en cada una de sus fases, utilizando tanto el índice RMM como el índice OMI. Posteriormente, se realiza un análisis comparativo entre ambos índices, mediante los compuestos de anomalías estandarizadas de precipitación. Asimismo, se realiza una descripción exhaustiva de la evolución temporal de los patrones de precipitación, destacando el efecto modulador de la MJO a mediano plazo, de 2 a 3 semanas. Finalmente, se analiza la influencia de la MJO en los patrones de precipitación de la región de interés, mediante el análisis conjunto de anomalías positivas de precipitación y anomalías de los campos de viento.

3.1. Condiciones promedio de precipitación durante los meses de lluvia

En la **Figura 3.1** se presentan las condiciones promedio o climatológicas de la precipitación acumulada diaria para los meses de lluvia (mayo-octubre), calculadas para el Dominio 1 mediante datos del reanálisis ERA5 en el periodo 1981-2021. Se observa una notable abundancia de precipitación al norte del ecuador, asociada a la ITCZ, tanto en el Pacífico como en el Atlántico ecuatorial, así como concentraciones significativas de precipitación al noreste del Golfo de Bengala y en los países que definen al *continente marítimo*. Los valores más altos de precipitación del Pacífico tropical oriental se registran en zonas costeras occidentales de Colombia y Ecuador, y se observan valores moderados de precipitación en las costas occidentales del sur de México.

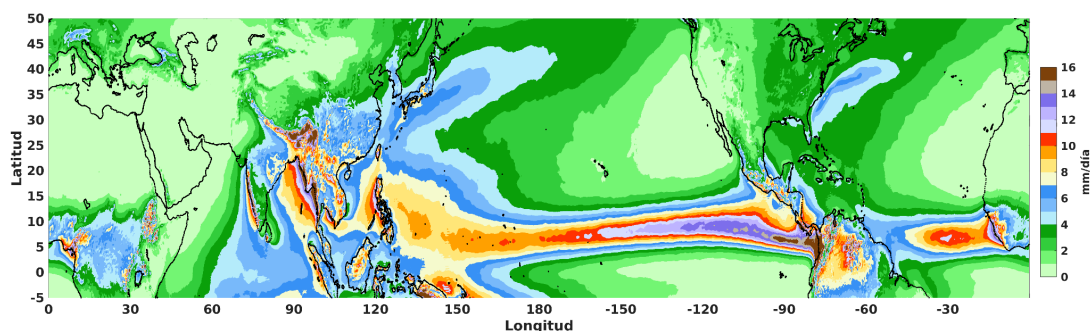


Figura 3.1. Condiciones promedio de la precipitación acumulada diaria (mm/día) en el Dominio 1 empleando datos del reanálisis ERA5 para los meses de mayo a octubre, considerando el periodo 1981-2021.

Se puede observar que la climatología de la precipitación anual (**Figura 3.2**), que considera todos los meses del año, muestra patrones muy similares a la climatología de mayo-octubre en las regiones tropicales, dado que las precipitaciones más abundantes en tales regiones se presentan en esos meses.

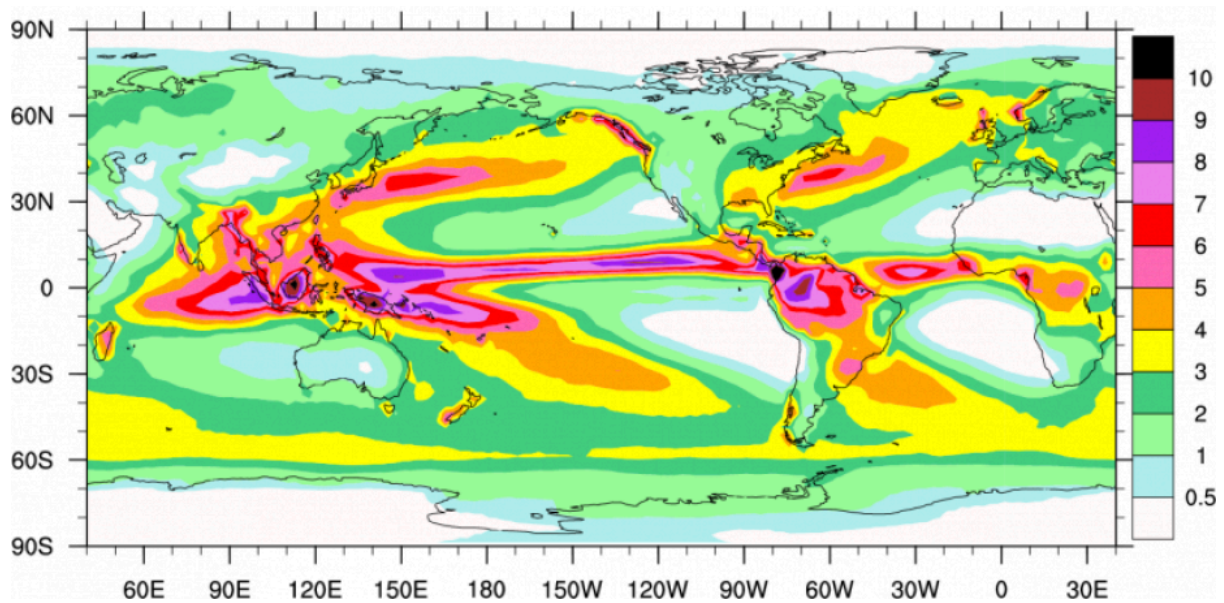


Figura 3.2. Climatología global de la precipitación media anual (mm/día), empleando datos de GPCP (Global Precipitation Climatology Project), para el periodo 1979-2010. Tomada de Adler et al., (2016).

Al centrar el análisis en la región de interés, se observan algunas diferencias entre los resultados obtenidos a partir de la base de datos CHIRPS (**Figura 3.3**) y los derivados del reanálisis ERA5 (**Figura 3.4**). Cabe señalar que los datos de CHIRPS únicamente incluyen datos en la parte terrestre, lo cual impide el análisis de los patrones de precipitación a través de las regiones oceánicas.

El mapa de la **Figura 3.3** muestra un patrón de precipitación complejo, el cual se puede dividir en tres grupos. En el primero, los acumulados de precipitación más bajos se observan principalmente en la parte centro-norte del dominio. En el segundo grupo, se observan acumulados de precipitación moderados sobre algunas regiones de los estados de la costa occidental, como Nayarit, Jalisco, Colima y Michoacán, así como de los estados costeros del Golfo de México y Caribe mexicano, como la región norte de Veracruz, Campeche, Quintana Roo y Yucatán, y algunas regiones de otros estados, como el Estado de México, la Cd. de México, Morelos y Guerrero. Finalmente, en el tercer grupo, los mayores acumulados de precipitación se registran en regiones de los estados de Tabasco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas y el sur de Veracruz.

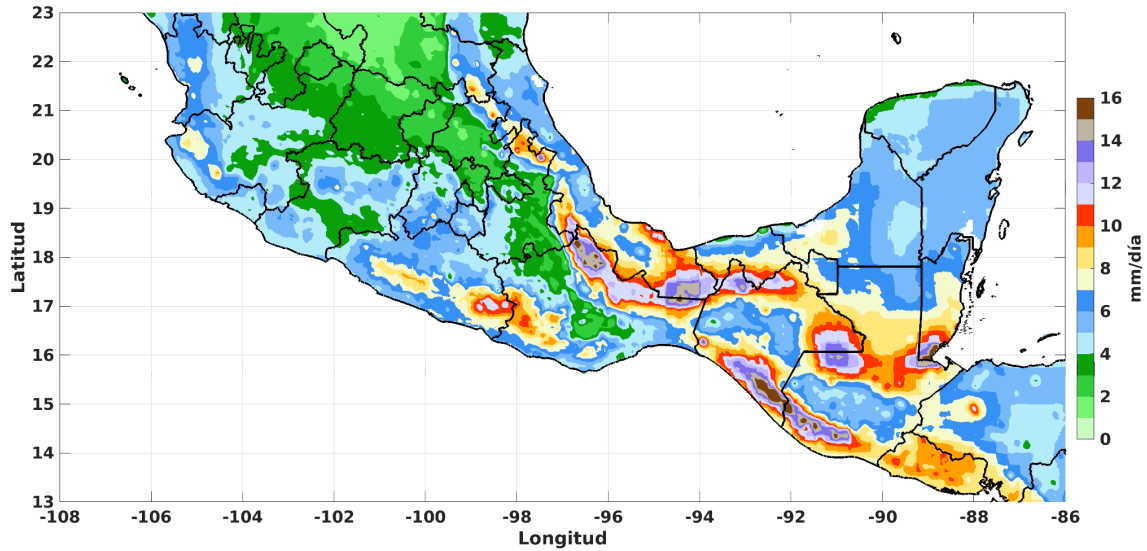


Figura 3.3. Condiciones promedio de precipitación acumulada diaria para la principal región de estudio, correspondientes a los meses de mayo a octubre del periodo 1981 al 2021, usando la base de datos CHIRPS.

En lo correspondiente a la climatología de precipitación acumulada diaria generada a partir de datos del ERA5 (**Figura 3.4**), se observa como principal ventaja en comparación con los datos de CHIRPS, la disponibilidad de información en la parte oceánica.

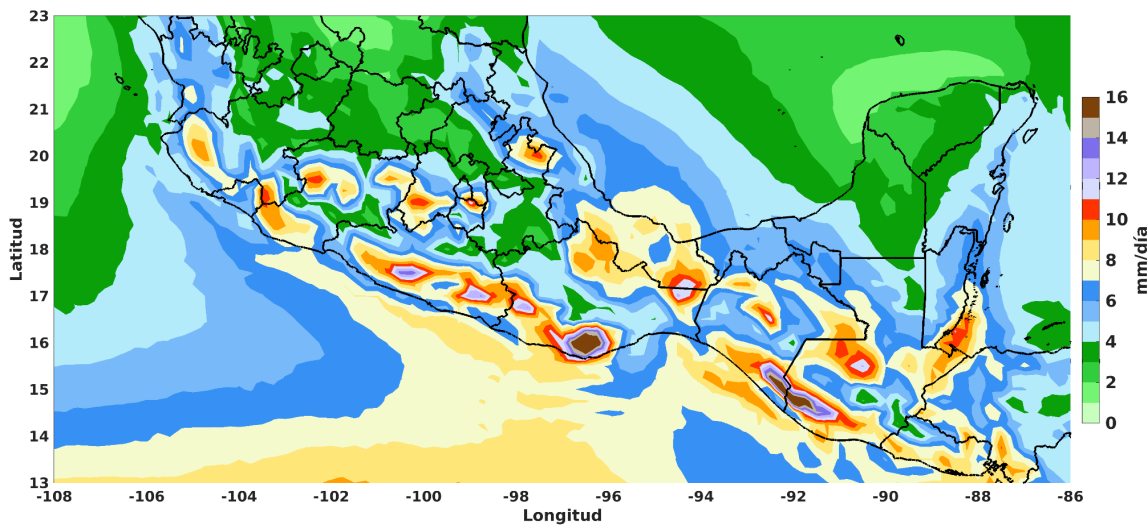


Figura 3.4. Similar a la **Figura 3.2** pero a partir de los datos del reanálisis ERA5.

En general, los patrones de precipitación en la región de estudio son similares en ambas bases de datos, sobre todo en la región norte del dominio. Sin embargo, sí se observan algunas regiones con diferencias marcadas, tanto con valores subestimados como sobreestimados por ERA5 en comparación con la base de datos CHIRPS. Las regiones donde ERA5 presenta mayores subestimaciones son, principalmente, en aquellas donde CHIRPS registra los acumulados de precipitación más altos, con excepción de algunas regiones en estados como Michoacán, Edo. de México, Morelos, Guerrero y Oaxaca en

donde ERA5 muestra valores más altos. Es evidente que un factor que podría influir en este comportamiento es la menor resolución espacial de los datos del reanálisis ERA5. Sin embargo, para los objetivos del presente estudio, y dado que los datos de CHIRPS no incluyen la parte oceánica, para los objetivos del presente estudio se consideran como datos aceptables los provenientes de ERA5.

3.2. Distribución de frecuencias de las fases de la MJO según los índices RMM y OMI

A continuación, se presentan los resultados derivados de la metodología presentada en la **subsección 2.2.2**, con la cual se determinó el número de días en que la MJO presentó actividad convectiva intensa en cada fase, de acuerdo a los índices RMM y OMI durante los meses de lluvia. Los histogramas de las **Figuras 3.5** (considerando el índice RMM) y **3.6** (considerando el índice OMI) muestran una alta variabilidad mensual, indicando la ausencia de un patrón consistente en los meses analizados. Este resultado sugiere que la MJO se manifiesta de manera diversa en cada uno de estos meses, posiblemente en respuesta a condiciones atmosféricas específicas de cada mes o a la interacción con otros fenómenos climáticos.

Se proponen umbrales mensuales con el propósito de definir fases consideradas como de mayor (***M***) o menor (***m***) frecuencia. Estos umbrales se calculan considerando el promedio (\bar{d}) y la desviación estándar (S_d) mensual del total de días en que se manifiesta la MJO, teniendo:

$$M = \bar{d} + \frac{1}{2}S_d \quad (3.1)$$

$$m = \bar{d} - \frac{1}{2}S_d \quad (3.2)$$

La **Tabla 3.1** presenta el registro de las fases cuya frecuencia es igual o mayor a ***M*** (fases de mayor frecuencia), así como aquellas cuya frecuencia es menor o igual a ***m*** (fases de menor frecuencia). Los resultados muestran que las fases 1 y 2 son las que ocurren con mayor frecuencia entre junio y agosto, aunque la fase 2 también se presenta frecuentemente en mayo y septiembre. Por su parte, las fases 7 y 8 son, en general, las menos frecuentes entre junio y octubre, aunque se presentan frecuentemente en mayo. La fase 4 resulta ser poco frecuente entre mayo y agosto, pero es, junto con las fases 2 y 5, una de las más frecuentes en el mes de septiembre.

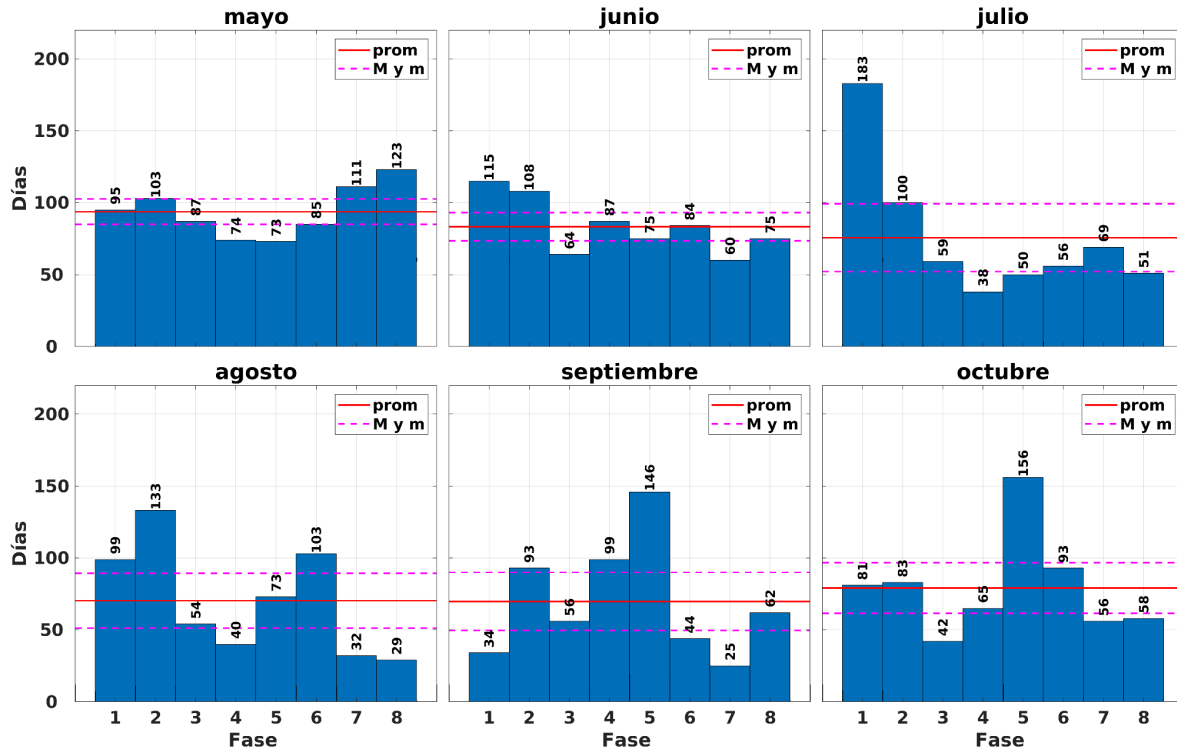


Figura 3.5. Distribución de frecuencias de las 8 fases del índice RMM para los meses de mayo a octubre del periodo 1981-2021, en términos del número de días con actividad convectiva intensa asociada a la MJO. El promedio mensual de días que se presentó la MJO en cualquiera de sus fases se representa con una línea horizontal continua en color rojo. Los límites que marcan los umbrales para definir una mayor (*M*) y menor (*m*) frecuencia se representan con líneas horizontales segmentadas en color magenta.

Tabla 3.1. Fases que se presentan con mayor (*M*) o menor (*m*) frecuencia en cada mes, con base en los umbrales determinados a partir del promedio y la desviación estándar del número de días que presentó actividad la MJO de acuerdo con el índice RMM. Se marcan en color azul las fases cuya frecuencia superó el umbral *M* y en color verde las fases cuya frecuencia estuvo por debajo del umbral *m*.

Fase/ Mes	Prom	Desv	M	m	1	2	3	4	5	6	7	8
M	93.88	17.66	102.71	85.05								
J	83.50	19.57	93.29	73.72								
J	75.75	47.07	99.29	52.22								
A	70.38	38.15	89.46	51.31								
S	69.88	40.36	90.06	49.70								
O	79.25	35.21	96.86	61.65								

De manera análoga, los resultados obtenidos con el índice OMI se presentan en la **Figura 3.6** y la **Tabla 3.2**. En este caso se observa que, en general, la fase 2 se presenta

con frecuencia en julio-agosto y octubre, mientras que la fase 3 resulta frecuente en mayo-junio y septiembre-octubre, lo cual difiere de los resultados obtenidos con el índice RMM que no muestran a la fase 3 como una de mayor frecuencia en ninguno de los meses. Por otra parte, la fase 4 es la menos frecuente en la mayoría de los meses, exceptuando junio, y la fase 8 es poco frecuente de junio a septiembre, resultados que coinciden hasta cierto punto con lo obtenido a partir del índice RMM.

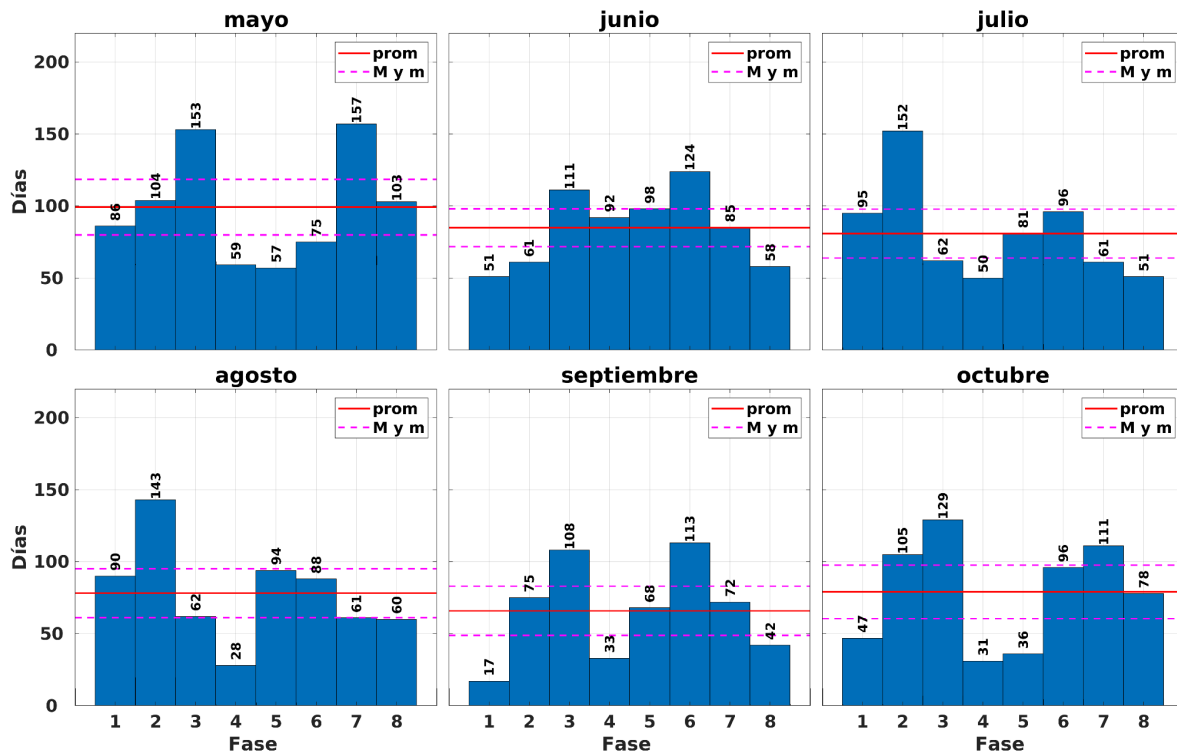


Figura 3.6. Distribución de frecuencias de las 8 fases del índice OMI para los meses de mayo a octubre del periodo 1981-2021, en términos del número de días con actividad convectiva intensa asociada a la MJO. El promedio mensual de días que se presentó la MJO se presenta en una línea horizontal continua en color rojo. El límite que marca los valores de mayor (*M*) y menor (*m*) frecuencia se presenta en líneas horizontales segmentadas en color magenta.

Tabla 3.2. Fases que se presentan con mayor (*M*) o menor (*m*) frecuencia en cada mes, con base en los umbrales determinados a partir del promedio y la desviación estándar del número de días que presentó actividad la MJO de acuerdo con el índice OMI. Se marcan en color azul las fases cuya frecuencia superó el umbral *M* y en color verde las fases cuya frecuencia estuvo por debajo del umbral *m*.

Fase/ Mes	Prom	Desv	M	m	1	2	3	4	5	6	7	8
M	99.250	38.600	118.55	79.95								
J	85.000	26.393	98.20	71.80								
J	81.000	33.983	97.99	64.01								
A	78.250	34.003	95.25	61.25								

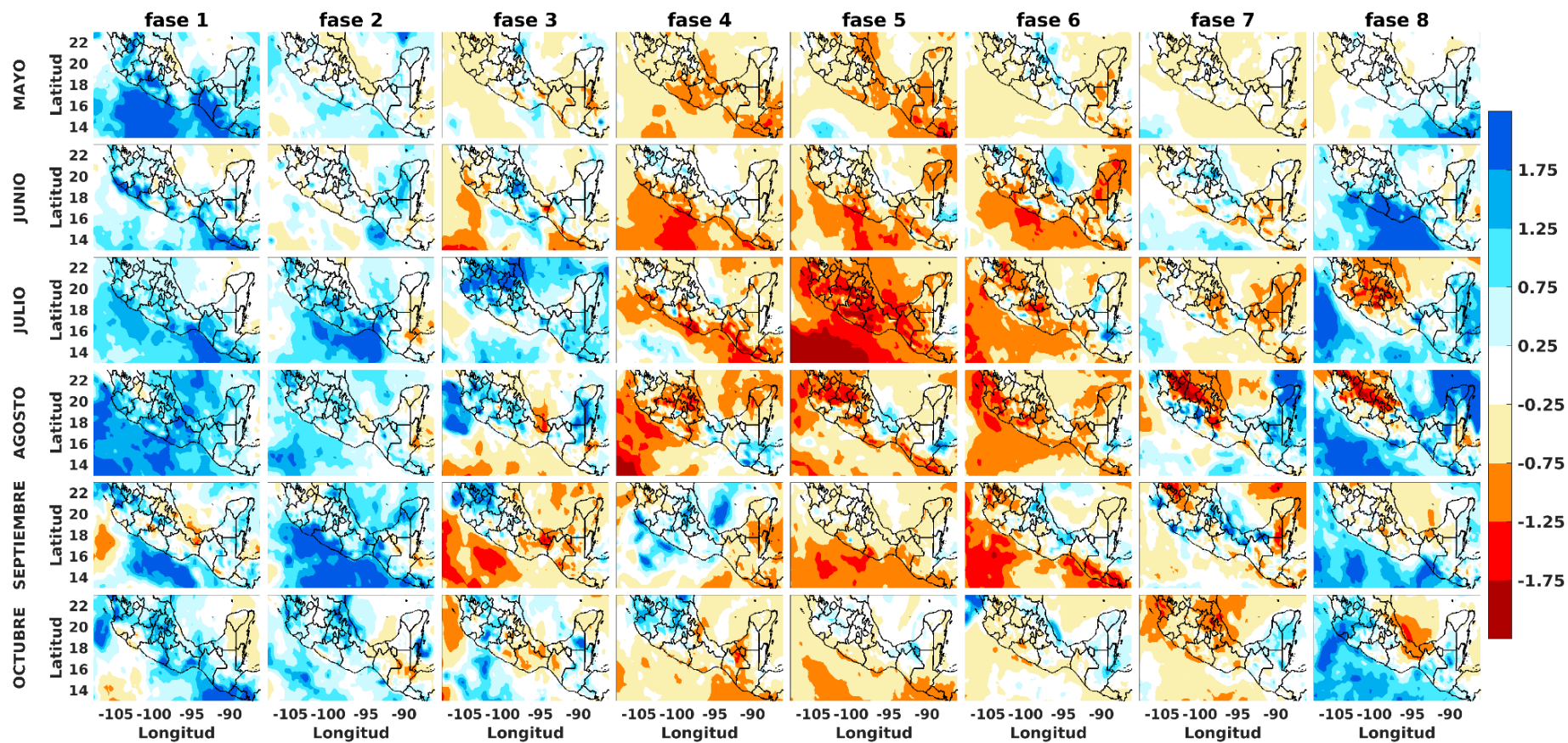


Figura 3.7. Compuestos de anomalías estandarizadas de precipitación, calculadas para los meses de lluvias (renglones) en función de las fases (columnas) del índice RMM. Se emplearon datos de precipitación acumulada diaria del reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2021.

En las fases 7 y 8 destaca la presencia de anomalías con ambos signos, siendo más evidentes en la fase 7 durante agosto y en la fase 8 durante julio y agosto. Las anomalías negativas de mayor intensidad se registran principalmente en la región centro-norte del dominio, mientras que las anomalías positivas se registran hacia el oeste y sur del territorio así como sobre el Pacífico y la Península de Yucatán. En general, las anomalías sobre la región oceánica en la fase 7, ya sean positivas o negativas, son muy pequeñas, mientras que en la fase 8 destacan anomalías positivas muy marcadas en el Pacífico prácticamente en todos los meses. También destaca lo que ocurre en la fase 8 en julio y agosto (meses en los que ocurre con menor frecuencia), con marcadas anomalías negativas en la parte terrestre y positivas en la parte oceánica; un patrón parecido se presenta en septiembre, pero con anomalías negativas muy bajas en tierra. A diferencia de este patrón, en junio y octubre las anomalías positivas abarcan también amplias regiones en tierra durante la fase 8.

En resumen, durante las fases 1 y 2 se observa un favorecimiento de la precipitación en casi todo el dominio, mientras que durante las fases 4, 5 y 6 se evidencia una inhibición de la precipitación en la mayoría de los meses, sobre todo en la región del Pacífico. Durante las fases 3 y 7 no domina un patrón que favorezca o inhiba la precipitación a lo largo de la temporada de lluvias en la región de interés. Por otra parte, la fase 8 es interesante, ya que presenta un contraste de valores positivos en la parte oceánica y valores negativos en la parte terrestre, manteniendo una marcada anomalía positiva sobre el Pacífico desde junio hasta octubre.

La agrupación de las fases 4, 5 y 6 como aquellas que inhiben la precipitación en el dominio de interés es consistente con estudios previos, como el de Perdigón et al., (2019) y el de Barrett y Esquivel (2013). Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente estudio no muestran a la fase 8 como una fase que favorezca el aumento de eventos de precipitación en todo el dominio de interés, mostrando un efecto particular de inhibición de la precipitación en tierra y favorecimiento en la región oceánica. Es importante mencionar que la metodología empleada en el presente trabajo sigue más la línea propuesta por Perdigón et al., (2019), pero incorporando restricciones más rigurosas en el manejo de la amplitud del índice RMM, lo cual puede ser un factor en las diferencias encontradas.

3.4. Compuestos de anomalías estandarizadas de precipitación empleando el índice OMI

Los resultados que se presentan en esta sección se obtuvieron empleando el índice OMI y datos provenientes del reanálisis ERA5. La **Figura 3.8** muestra los compuestos mensuales de las anomalías estandarizadas de precipitación para cada fase, destacando que no se observa una relación tan consistente entre las fases de la MJO y los patrones de anomalías a lo largo de los meses de lluvia, a diferencia de los resultados obtenidos con el índice RMM. Por ejemplo, aunque durante las fases 1 y 2 se observa cierta predominancia de anomalías positivas, hay meses que presentan patrones mixtos, es decir, que favorecen la precipitación en algunas regiones y la inhiben en otras; como el patrón asociado a la fase 1 en el mes de septiembre, que muestra inhibición de la precipitación en buena parte del dominio. También se observa una notable diferencia en los patrones asociados a la fase 8 (recordando que es de las menos frecuentes en casi todos los meses), que en este caso presenta anomalías negativas de agosto a octubre sobre gran parte del territorio, mientras que al emplear el índice RMM se obtienen marcadas anomalías negativas en tierra y positivas en el océano principalmente en julio y agosto.

De manera análoga al índice RMM, en las fases 4, 5 y 6 predomina un patrón de anomalías negativas (con excepción del mes de octubre en las fases 4 y 5), por lo que se pueden considerar como fases que inhiben los eventos de precipitación en la mayor parte de la región de interés. En cuanto a la fase 7, también se puede considerar que inhibe la precipitación entre julio y septiembre, cuando se observan marcadas anomalías negativas en gran parte del dominio (exceptuando regiones al este de 95°W).

A diferencia de lo observado con el índice RMM, los resultados del índice OMI no muestran con claridad alguna fase que presente el favorecimiento de la precipitación en la región de interés y que prevalezca a lo largo de los meses analizados.

Respecto a estas diferencias entre índices, Kiladis (2014) menciona que el uso de diferentes índices puede llevar a conclusiones bastante dispares sobre la ubicación e intensidad de la actividad convectiva derivada de la MJO, e incluso sobre si existe o no un evento en un tiempo dado. También comenta que al emplear datos de radiación de onda larga saliente en lugar de los campos de circulación atmosférica se presenta una desventaja, debido a que es un campo mucho más ruidoso que la circulación a gran escala, lo que implica la necesidad de filtrar los datos para obtener resultados estables a lo largo del ciclo anual.

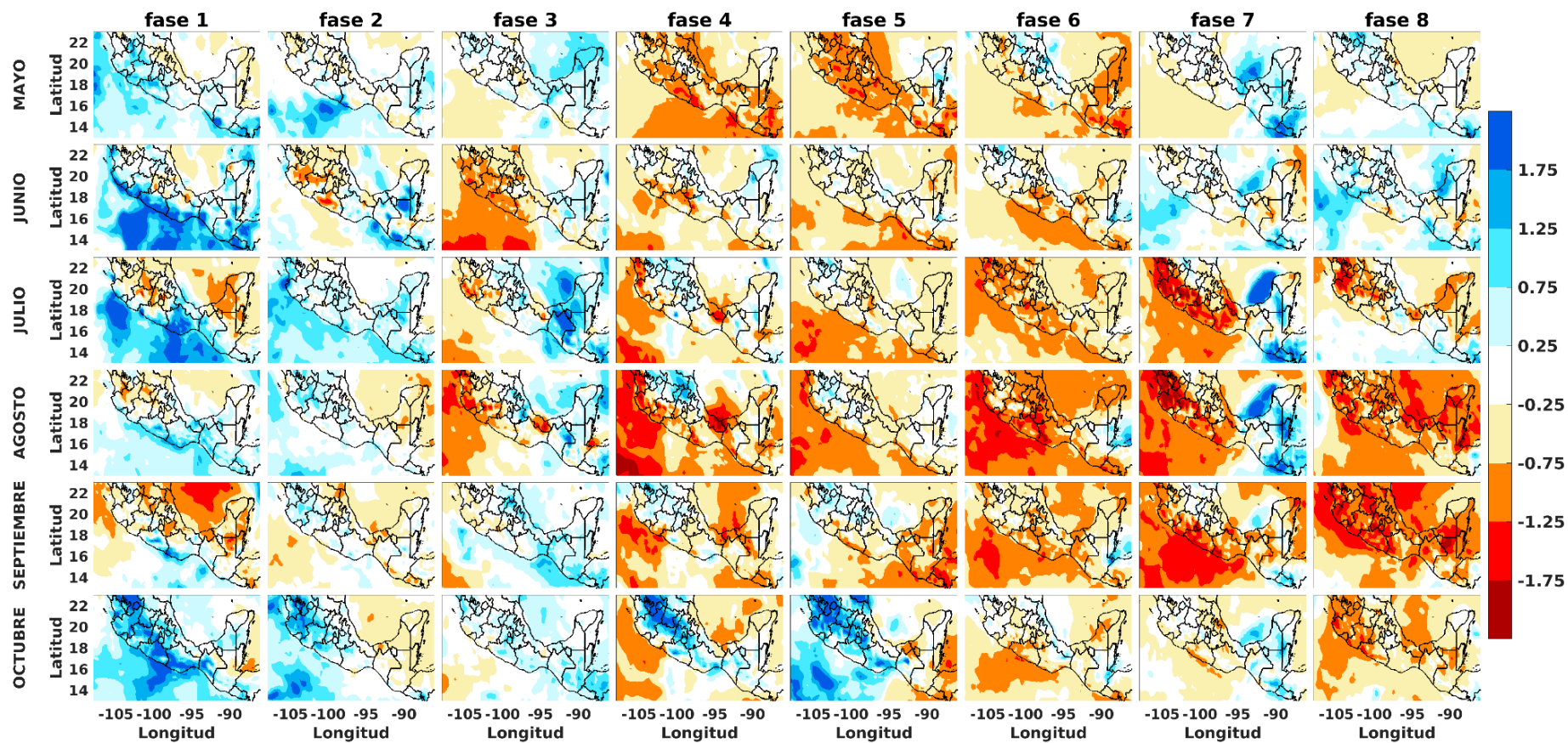


Figura 3.8. Compuestos de anomalías estandarizadas de precipitación, calculadas para los meses de lluvia (renglones) en función de las fases (columnas) del índice OMI. Se emplearon datos de precipitación acumulada diaria del reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2021.

Los resultados obtenidos mediante el índice RMM permiten identificar un patrón consistente de anomalías positivas de precipitación en las fases 1 y 2 a lo largo de los meses analizados. Además, este índice ha sido empleado en estudios estadísticos que exploran el efecto de la MJO en eventos de precipitación extrema (Jones, 2000; Vázquez-Proveyer, 2023), y en estudios sobre el impacto modulador de la MJO en la precipitación (Bond y Vecchi, 2003; Perdigón et al., 2018; Perdigón-Morales, 2020). Por lo tanto, se decidió realizar los análisis subsiguientes considerando al índice RMM como la métrica principal para determinar tanto la ubicación como la intensidad de la señal convectiva de la MJO.

3.5. Evolución temporal de las anomalías de precipitación en relación con las fases de la MJO

De manera complementaria, se realizó un análisis detallado de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación en función de las fases de la MJO empleando diagramas Hovmöller, tal como se indica en la subsección 2.2.4. En estos diagramas (**Figura 3.9**) se marcan los límites longitudinales de la región de interés mediante líneas verticales en color negro, y con una línea segmentada horizontal en color rojo el momento correspondiente al *día 0*, es decir, cuando la MJO registró actividad convectiva intensa en cada fase. La evolución temporal considera desde quince días antes hasta quince días después respecto al *día 0*, lo cual se representa en el eje vertical de los diagramas.

Los resultados muestran que en las fases 1 y 2 las condiciones promedio pueden favorecer eventos de precipitación a lo largo de todos los meses analizados, con anomalías que pueden rebasar los 5 mm/día de agosto a octubre en la fase 1. Por lo general, las anomalías más grandes se observan desde alrededor de ocho días previos al registro de la fase y hasta doce días posteriores, aunque eventos menos intensos pueden ocurrir con mayor antelación y hasta después de quince días del registro de la fase. Es interesante observar que, en el mes de octubre, los eventos de precipitación más significativos ocurren generalmente con antelación al registro de ambas fases.

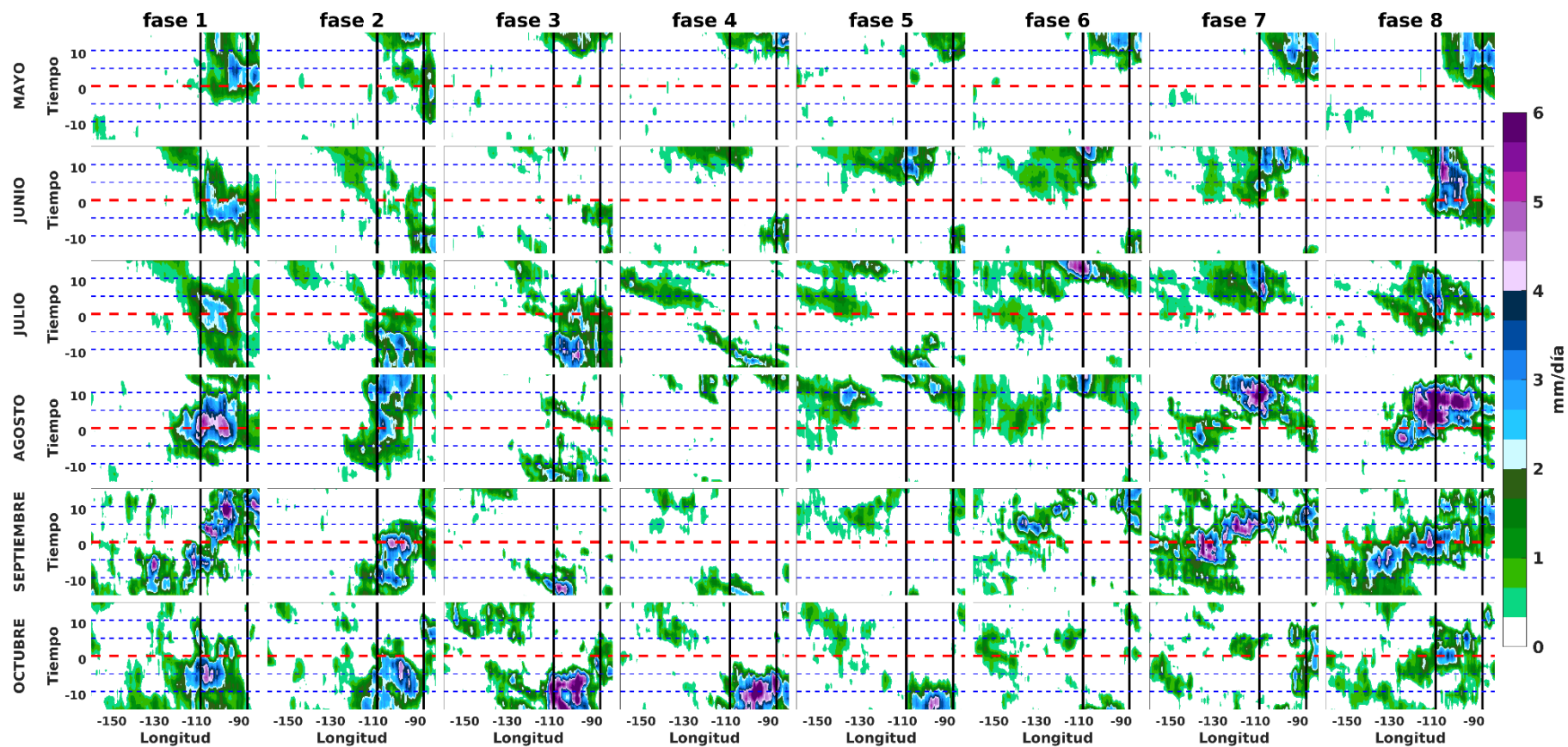


Figura 3.9. Diagramas Hovmöller de anomalías positivas de precipitación, en donde el eje horizontal representa las coordenadas de longitud y el eje vertical representa el tiempo en días con respecto al *día 0* (línea roja segmentada). Se presentan los diagramas en función de las 8 fases del índice RMM (correspondientes a las columnas) y para cada uno de los meses del periodo de lluvias (correspondientes a los renglones).

Las condiciones promedio también muestran la posibilidad de que se presenten eventos de precipitación intensa antes del registro de las fases 3, 4 y 5 durante el mes de octubre. Asimismo, la fase 3 también muestra la posible ocurrencia de eventos importantes de precipitación en julio, sobre todo alrededor de diez días antes del registro de la fase. Es notorio que durante la fase 4 son raras las anomalías positivas de precipitación entre alrededor de cinco días previos y hasta diez días posteriores al registro de la fase en la región de interés; un comportamiento similar se presenta en las fases 5 y 6 en algunos de los meses.

En la fase 7, las condiciones promedio muestran anomalías positivas que indican la posible ocurrencia de eventos de precipitación en la región de interés en los días posteriores al registro de la fase, teniendo una intensidad de baja a moderada en la mayoría de los meses, pero pudiendo alcanzar valores altos durante agosto. En el mes de septiembre se observan anomalías positivas importantes sobre la región del Pacífico entre cinco días previos y cinco días posteriores a la ocurrencia de la fase.

Es interesante que en la fase 8 se muestra la posible ocurrencia de eventos de precipitación de moderada a intensa en varios meses, con las anomalías más altas en junio y agosto (superiores a los 6 mm/día); dichos eventos pueden ocurrir con algunos días de anticipación al registro de la fase y hasta diez días después de ésta. A diferencia de lo que se muestra en las fases 3, 4 y 5 en el mes de octubre en la fase 8 las anomalías de precipitación son relativamente bajas y se centran principalmente alrededor del registro de la fase. En septiembre se observa un comportamiento similar al descrito para la fase 7.

Las condiciones promedio en algunos meses muestran patrones de precipitación con un desarrollo hacia el oeste, lo cual podría estar vinculado a la influencia de ondas tropicales del este. Por ejemplo, durante junio en la fase 2 y durante julio en la fase 4, se podrían presentar eventos de baja intensidad. Además, podrían ocurrir eventos de intensidad baja a moderada durante agosto en la fase 5, así como eventos intensos en julio y agosto en la fase 6. En contraparte, las condiciones promedio también sugieren un posible patrón de propagación hacia el este, posiblemente vinculado al efecto modulador de la MJO. Por ejemplo, en las fases 1, 2, 7 y 8 durante el mes de septiembre, se observan anomalías positivas de precipitación que varían de moderadas a altas.

3.6. Análisis porcentual de la evolución temporal de la precipitación en la región de interés asociada a la MJO

El estudio del efecto modulador de la señal convectiva de la MJO en los patrones de precipitación de la región de interés se lleva a cabo mediante un análisis porcentual, tal como se describe en la **subsección 2.2.4**. Los resultados obtenidos se resumen en la **Figura 3.10**, en donde cada panel corresponde a un mes del periodo de lluvias, las fases se muestran en el eje vertical y en el eje horizontal se representa el número de días con respecto al *día 0* (línea roja vertical). El efecto modulador se cuantificó mediante el porcentaje de píxeles que superan la anomalía positiva de precipitación de 1.77 mm/día, considerando el total de píxeles que conforman la región de interés. Este umbral se eligió con base en el promedio climatológico de la precipitación en la región de interés durante los meses de lluvia del periodo 1981-2021, que es de 3.44 mm/día, y para el cálculo se consideraron las anomalías que exceden el 50 % del valor promedio.

En el mes de mayo resalta el hecho de que no se presentan eventos de precipitación significativos (que excedan el umbral establecido) en los días previos al registro de las fases (*día 0*), con excepción de la fase 1. Para las fases 3, 4, 5 y 6, este comportamiento sin eventos de precipitación significativos persiste hasta aproximadamente 8 días posteriores al *día 0*. Solamente durante el registro de la fase 1 se presentan eventos con precipitaciones significativas que abarcan alrededor del 40 % de la región de interés, los cuales pueden persistir durante varios días, para posteriormente reducir su intensidad. Por el contrario, durante las fases 2, 3 y 6, es hacia los últimos días del periodo considerado que se presentan valores superiores al 40 %. En la fase 8 se observan porcentajes relativamente bajos desde el *día 0* y unos cuantos días posteriores, para después aumentar a valores de entre 30 % a 45 % para el resto del periodo analizado. Algo similar se presenta en la fase 7, pero a partir del tercer día del registro de la fase.

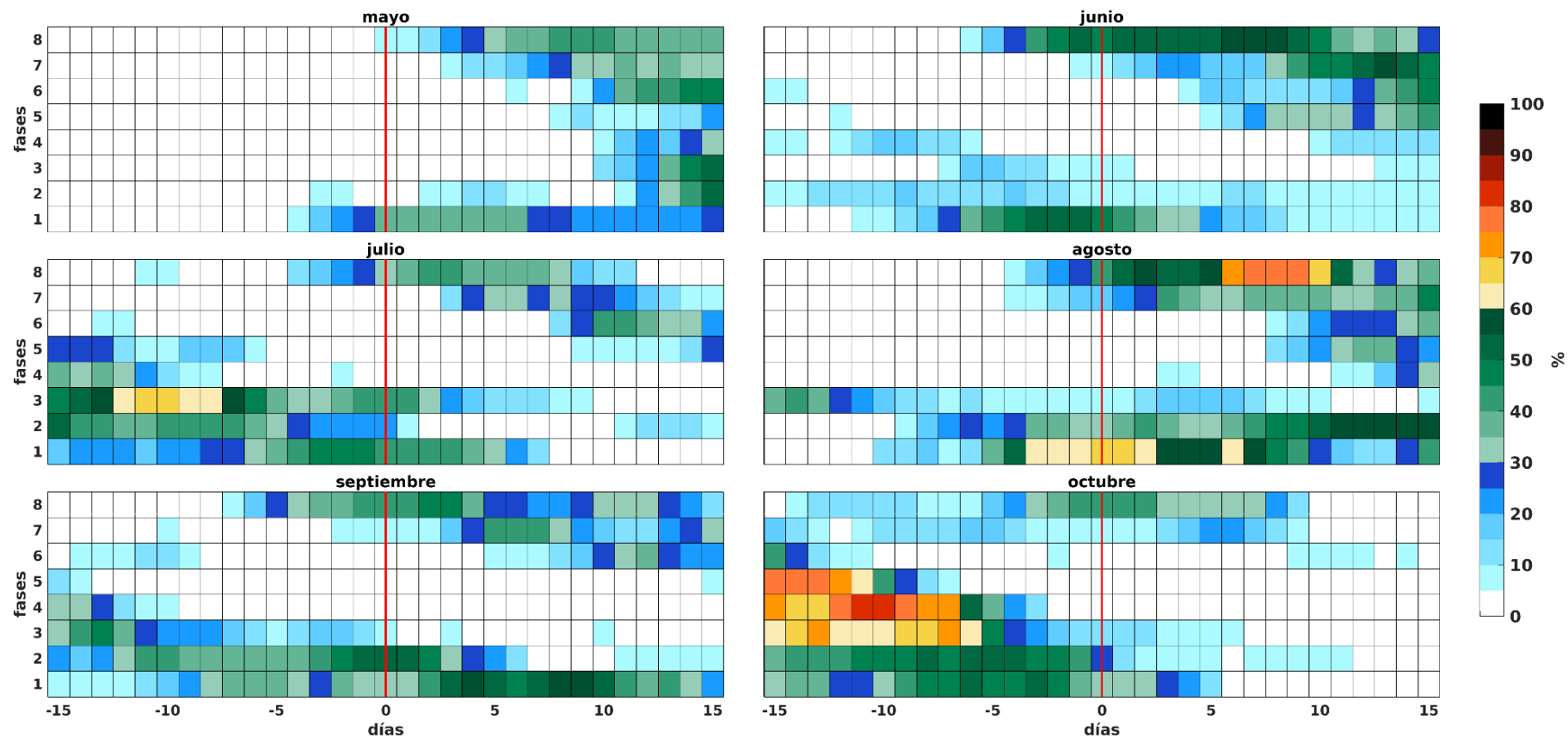


Figura 3.10. Diagramas del porcentaje de área que superó la anomalía de precipitación de 1.77 mm/día, desde 15 días previos al registro de la fase hasta 15 días posteriores (eje horizontal) en función de las fases del índice RMM (eje vertical), para los meses de lluvia (mayo-octubre).

En el mes de junio resalta la fase 1, en la que se presentan precipitaciones importantes que pueden llegar a superar el 50 % del área varios días antes del *día 0*, disminuyendo en los días posteriores a éste, pero siempre abarcando al menos el 5 % de la región. Aunque cubriendo porcentajes pequeños, durante las fases 2, 3 y 4 pueden presentarse precipitaciones importantes hasta con 15 días de anticipación al registro de las fases, los cuales pueden persistir hasta el final del periodo en la fase 2. Sobresale también la fase 8 en junio, con precipitaciones importantes que abarcan alrededor del 40 % de la región de interés desde algunos días antes del *día 0*, y que pueden abarcar más del 50 % varios días después de esa fecha. En las fases 5, 6 y 7 también puede haber precipitaciones importantes cubriendo un porcentaje considerable de la región, pero principalmente hacia el final del periodo analizado.

En el mes de julio destacan los altos porcentajes de área cubiertos con precipitaciones que rebasan el umbral establecido alrededor de 15 días antes al registro de las fases 1 a 3, sobresaliendo la fase 3 con porcentajes cercanos al 70 % alrededor de 10 días previos al registro de la fase. Porcentajes de alrededor del 40 % se mantienen hasta varios días después del *día 0* en las fases 1 y 3, pero disminuyen drásticamente hacia el final del periodo considerado. El comportamiento para las fases 6, 7 y 8 es parecido al del mes de mayo, aunque con porcentajes menores hacia el final del periodo.

Los porcentajes en el mes de agosto muestran valores de alrededor del 45 % cuando se registra la fase 8, pero que pueden rebasar el 75 % varios días después de esa fecha. En la fase 1 el porcentaje de área con precipitaciones importantes puede ser superior al 60 % cuando se registra la fase y también algunos días antes y después de esa fecha. La fase 2 muestra porcentajes de entre 30 % y 40 % alrededor del *día 0*, que aumentan hacia finales del periodo, alcanzando valores de hasta 60 %. Las fases 5 y 6 muestran un comportamiento similar al de mayo y junio, con eventos significativos de precipitación en la región de interés, presentándose aproximadamente una semana después del registro de las fases.

El patrón de los porcentajes en el mes de septiembre se asemeja al de junio, con algunas variaciones en sus magnitudes, principalmente en las fases 1, 2 y 8. En este caso, los porcentajes más altos en la fase 1 se presentan algunos días después del registro de la fase, pudiendo rebasar el 50 % del área. Alrededor del registro de la fase 2, los porcentajes de área con precipitaciones significativas son de aproximadamente el 40 %, y pueden ser superiores al 30 % aproximadamente 10 días antes.

El mes de octubre es particularmente interesante, ya que el patrón de porcentajes presenta diferencias marcadas con los meses previos. En este mes, los días previos al

registro de las fases 3, 4 y 5 es cuando eventos de precipitación importantes alcanzan los mayores porcentajes de área, llegando a ser superiores al 80 % alrededor de 10 días previos al registro de la fase 4. Sin embargo, el área con precipitaciones importantes disminuye drásticamente o desaparece alrededor del *día 0* y en días posteriores a éste.

3.7. Evolución temporal de los patrones de precipitación y viento asociados a las fases de la MJO

En esta sección se presentan los patrones de las anomalías positivas de precipitación y de las anomalías de los campos de viento en el dominio de 5°S a 50°N en latitud y global en longitud, asociados a las distintas fases de la MJO durante el mes de agosto. La elección de este mes se fundamenta en los resultados mostrados en la **sección 3.3**, los cuales indican la presencia de marcadas anomalías positivas de precipitación en la mayor parte del dominio durante las fases 1 y 2 y anomalías positivas en algunas regiones durante las fases 3 y 8; así como en los resultados mostrados en la **sección 3.5**, en los cuales destacan condiciones promedio con anomalías positivas intensas a lo largo del periodo analizado. Es conveniente aclarar que para la fase 1 se analizan los patrones más relevantes en el dominio mencionado, mientras que para el resto de las fases el análisis se restringe a la región comprendida entre el Pacífico central y el Atlántico centro-occidental, con particular énfasis en la región de interés. Los resultados correspondientes a los meses restantes se presentan como Anexo.

3.7.1. Evolución temporal de la precipitación y de los campos de viento asociados a la fase 1 durante el mes de agosto

La **Figura 3.11**, mediante seis paneles, proporciona una representación detallada de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación y del viento asociadas a la fase 1 de la MJO durante el mes de agosto, en un periodo de veinticinco días.

Aproximadamente quince días antes del registro de la fase (**Panel A**), destacan anomalías positivas de precipitación desde el Índico centro-oriental hasta el Pacífico occidental en una franja que abarca alrededor de los 10°N a 20°N, alcanzando valores de hasta 8 mm/día. Estas anomalías parecen estar estrechamente relacionadas con las anomalías de los campos de viento, que muestran anomalías meridionales con una componente del sur en el Índico occidental, anomalías zonales con una componente del oeste en el Índico central y anomalías meridionales del sur en la región occidental del Pacífico.

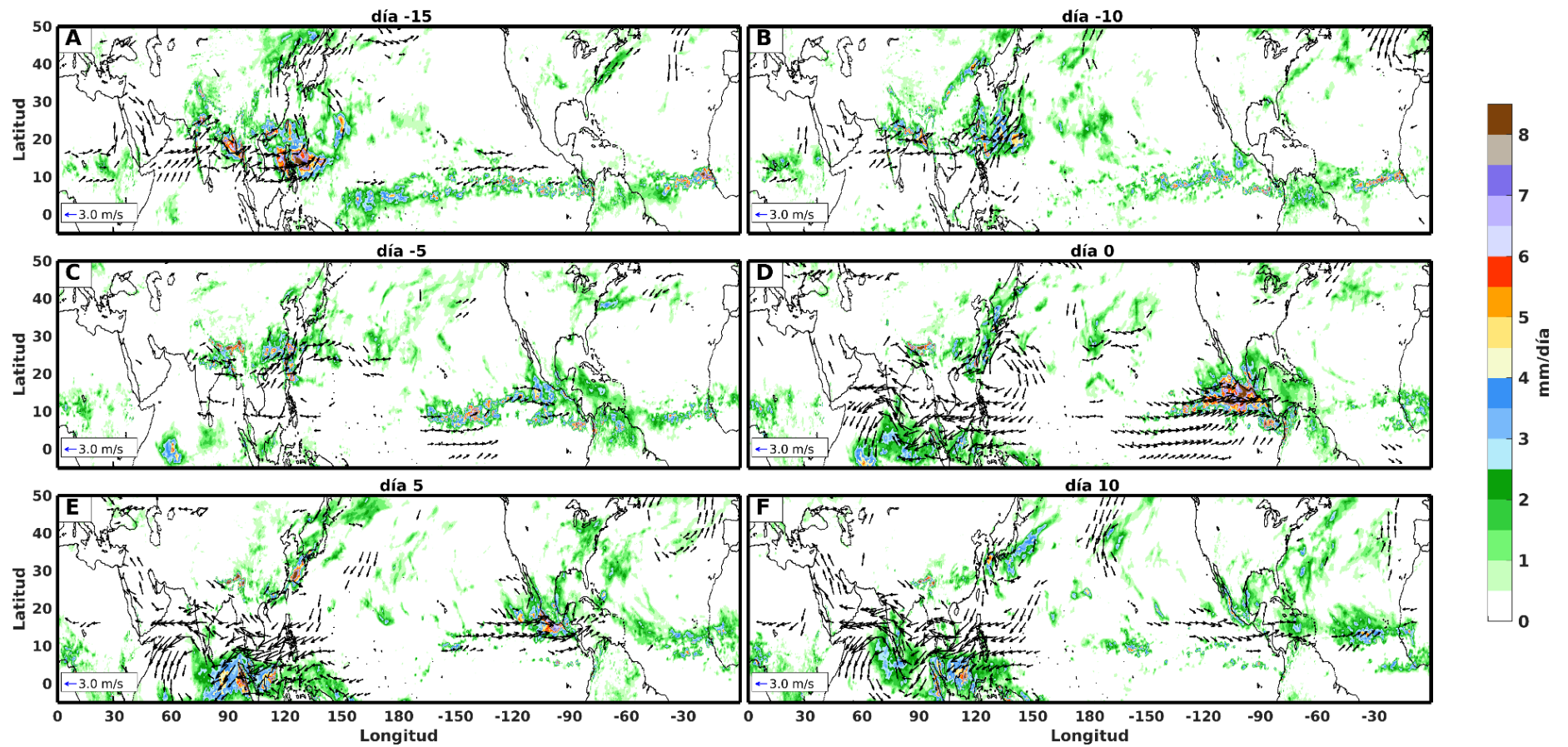


Figura 3.11. Evolución temporal de los patrones de anomalías positivas de precipitación acumulada diaria y anomalías de viento diario a 850 mb para la fase 1 durante el mes de agosto. Se presentan los patrones a intervalos de 5 días, iniciando 15 días previos al registro de la fase (día -15), durante el registro de la fase (*día 0*) y hasta 10 días posteriores a éste (día 10), con base en los datos del índice RMM.

Por otra parte, se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en el Atlántico y Pacífico ecuatorial, en la región de la ITCZ, alrededor de los 0° a los 10°N, coincidiendo entre los 10°N y 20°N en el Pacífico centro-oriental, con un predominio de anomalías de vientos del este.

Diez días antes de la fase (**Panel B**), las anomalías positivas de precipitación ubicadas entre el Índico centro-oriental y el Pacífico occidental presentan un debilitamiento. Sin embargo, aún se observan anomalías de moderada a alta intensidad en regiones muy puntuales. En los campos de viento se observan anomalías zonales del oeste que se extienden desde el Índico central hasta el Pacífico occidental, donde predominan anomalías meridionales del sur. Cabe destacar la persistencia de anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en esta región en el resto del periodo analizado. Adicionalmente, de diez (**Panel B**) a cinco días (**Panel C**) antes de la fase, las anomalías positivas de precipitación en el Pacífico reducen su extensión, limitándose principalmente a la región centro-oriental, entre los 10°N y 25°N, incluyendo las costas de México y Centroamérica. Asimismo, diez días antes de la fase (**Panel B**), las anomalías de los campos de viento muestran la ausencia de un patrón dominante de vientos en el Pacífico. Sin embargo, cinco días antes de la fase (**Panel C**), se presenta un cambio en las anomalías de vientos, presentando un patrón dominante de vientos zonales del oeste, es decir, con dirección contraria a los observados diez días antes de la fase (**Panel A**).

En el *día 0* de la fase 1 (**Panel D**), se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en la región comprendida entre el Índico centro-occidental y el Pacífico occidental, por debajo de los 10°N. Las anomalías de los campos de viento muestran una circulación horaria frente a las costas orientales de Asia, así como un comportamiento ondulatorio de anomalías de viento del este que abarcan desde el Índico centro-occidental hasta el Pacífico occidental. Además, se registran anomalías de hasta 8 mm/día frente a las costas occidentales de México y Centroamérica y con menor intensidad en la parte terrestre de la región de interés. Estas anomalías coinciden espacialmente con marcadas anomalías de vientos zonales del oeste, que se extienden desde el Pacífico central hasta las costas occidentales de México y Centroamérica, en la franja de -5° a 20°N

Cinco días después de la fase (**Panel E**), las anomalías positivas de precipitación que abarcan desde el Índico central hasta el Pacífico occidental se intensifican, alcanzando valores cercanos a los 6 mm/día. Las anomalías de los campos de viento continúan con un comportamiento ondulatorio de vientos del este que abarcan desde el Índico centro-occidental hasta el Pacífico occidental. Por otra parte, frente a las costas occidentales de México y Centroamérica las anomalías positivas de precipitación muestran

un claro debilitamiento, aunque aún se observan anomalías de intensidad moderada frente a las costas de Michoacán. Este debilitamiento, también se refleja en la intensidad y extensión de las anomalías de los campos de viento, las cuales se concentran en una pequeña franja de 10° a 20°N en el Pacífico centro-oriental.

Diez días después de la fase (**Panel F**), las anomalías de precipitación que se extienden desde el Índico central hasta el Pacífico occidental reducen su intensidad. Esto se puede deber, en parte, al comportamiento ondulatorio y a la formación de una circulación antihoraria en el Índico occidental que se observa en las anomalías de los campos de viento. Asimismo, en el dominio de interés, predominan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad y persisten anomalías de vientos del oeste en la franja de 10° a 20°N, abarcando desde el Pacífico oriental hasta el Atlántico occidental.

3.7.2. Evolución temporal de la precipitación y de los campos de viento asociados a la fase 2 durante el mes de agosto

La **Figura 3.12**, mediante seis paneles, proporciona una representación detallada de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación y del viento asociadas a la fase 2 de la MJO durante el mes de agosto, en un periodo de veinticinco días.

De quince (**Panel A**) a diez días (**Panel B**) antes de la fase, se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad, en la región de la ITCZ, desde el Pacífico central, hasta las costas occidentales de África. Adicionalmente, diez días antes de la fase (**Panel B**), se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en las costas occidentales de México y Centroamérica. Estas anomalías de precipitación coinciden con una ausencia de anomalías en los campos de viento desde el Pacífico central hasta el Atlántico oriental, incluyendo las zonas cercanas a la región de interés.

Aproximadamente cinco días previos al registro de la fase (**Panel C**), se observa una intensificación de las anomalías de precipitación frente a las costas de Centroamérica, así como anomalías de baja intensidad, con valores cercanos a los 2 mm/día, en las costas occidentales de México, en conjunto con anomalías de vientos con una componente zonal del oeste entre los 10° y 20°N en el Pacífico oriental, incluyendo las costas de la región de interés y Centroamérica.

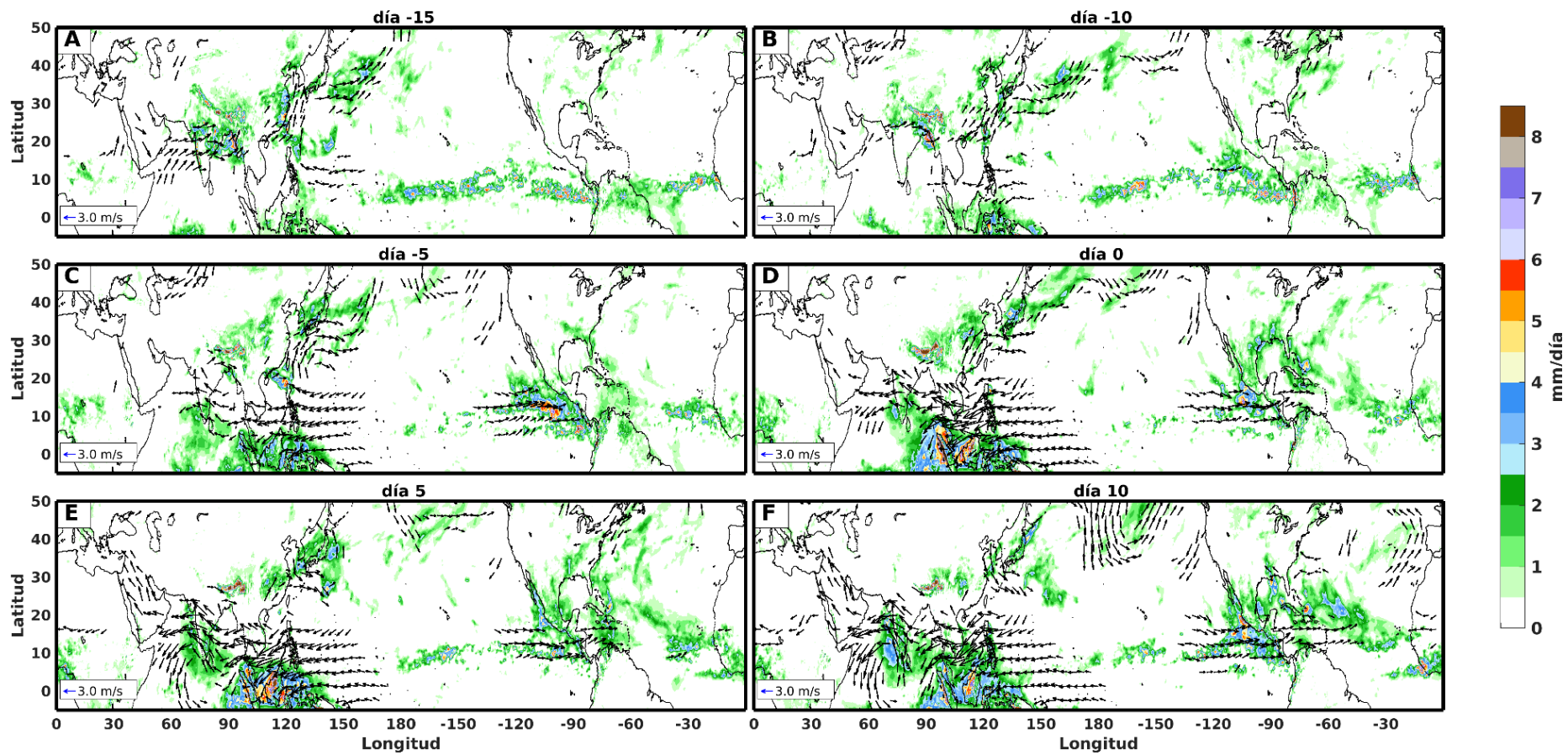


Figura 3.12. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 2.

En el *día 0* de la fase 2 (**Panel D**), se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en la mayor parte de la región de interés, con valores cercanos a los 2 mm/día. Sin embargo, las anomalías intensas de precipitación observadas cinco días antes frente a las costas occidentales de Centroamérica, presentan un marcado debilitamiento. En cuanto a los patrones de viento, persisten anomalías de vientos zonales del oeste, que se extienden desde el Pacífico oriental hasta el Mar Caribe.

Cinco días después del registro de la fase (**Panel E**), se observa la persistencia de anomalías de precipitación de baja intensidad en la región de interés, manteniendo valores cercanos a los 2 mm/día, así como anomalías de vientos zonales del oeste que se extienden de los 10°N a los 20°N a lo largo del Pacífico oriental y el Mar Caribe.

Aproximadamente diez días después del registro de la fase (**Panel F**), persisten anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en la región terrestre del dominio de interés, con presencia de anomalías de mayor intensidad frente a las costas de Jalisco y Nayarit, con valores de hasta 5 mm/día. En los campos de viento se observa la presencia de anomalías de vientos del oeste en el Pacífico oriental, el Mar Caribe y Atlántico centro-occidental.

3.7.3. Evolución temporal de la precipitación y de los campos de viento asociados a la fase 3 durante el mes de agosto

La **Figura 3.13**, mediante seis paneles, proporciona una representación detallada de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación y del viento asociadas a la fase 3 de la MJO durante el mes de agosto, en un periodo de veinticinco días.

Quince días antes de la fase (**Panel A**), se observan anomalías positivas de precipitación a lo largo del Pacífico, destacando anomalías de gran intensidad frente a las costas occidentales de Centroamérica, aunque también se observan anomalías de gran intensidad en las costas de Colima y Michoacán. Las anomalías de los campos de viento muestran vientos zonales del oeste por debajo de los 20°N, en el Pacífico oriental, incluyendo las costas occidentales de la región de interés y Centroamérica. Adicionalmente, destaca una circulación de vientos ciclónicos frente a las costas occidentales de la región centro-norte de México.

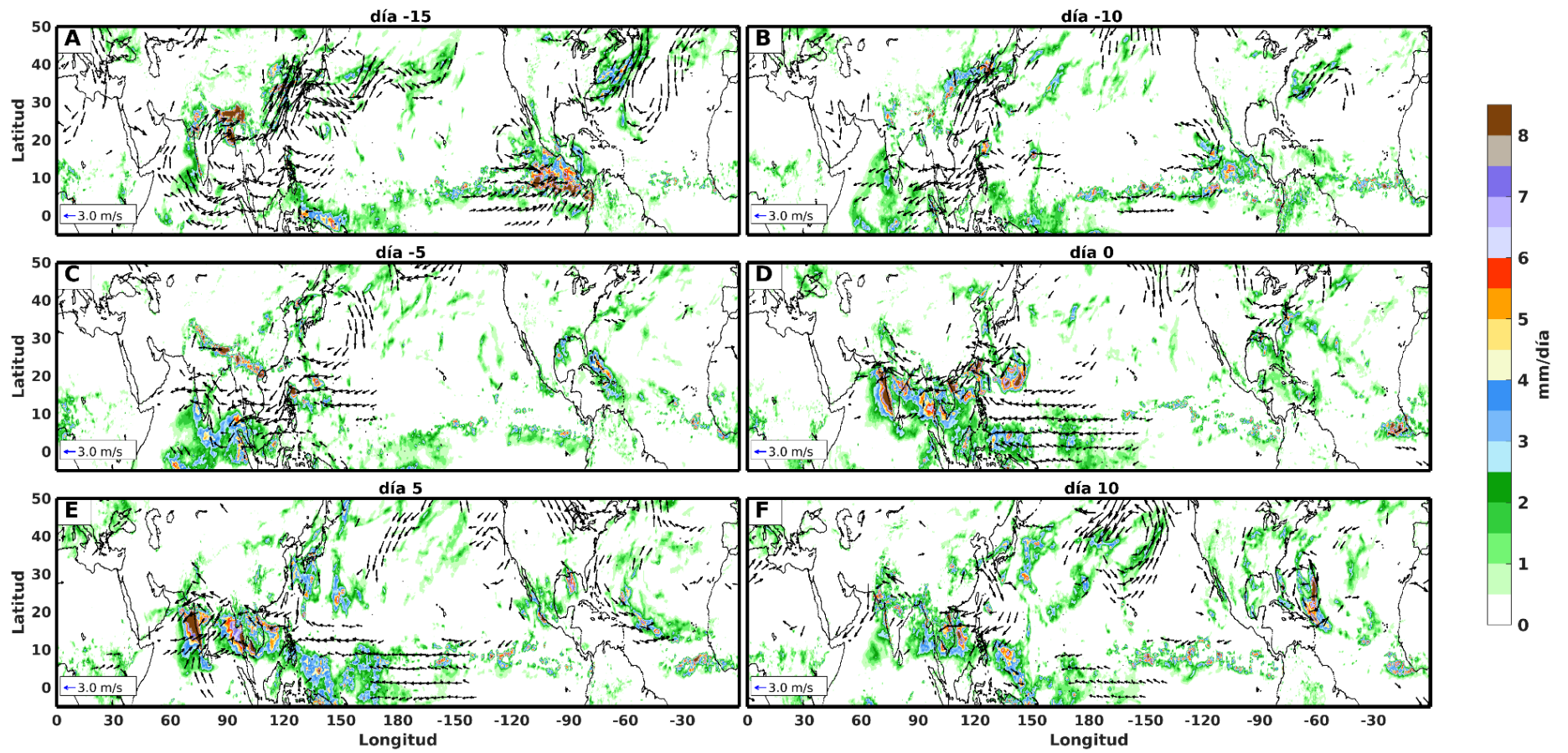


Figura 3.13. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 3.

Aproximadamente diez días antes de la fase (**Panel B**), continúa la presencia de anomalías positivas de precipitación a lo largo del Pacífico, en la región de la ITCZ, destacando una marcada disminución en las anomalías de precipitación observadas frente a las costas occidentales de la región de interés y Centroamérica, con un predominio de valores cercanos a los 2 mm/día. Las anomalías de los campos de viento muestran un desplazamiento hacia el oeste de la circulación antihoraria situada frente a las costas occidentales de la región centro-norte de México, la cual parece reforzarse por vientos zonales del oeste ubicados entre los 0° y 10°N en el Pacífico centro-oriental.

Cinco días antes del registro de la fase (**Panel C**), destaca un desplazamiento hacia el sur de las anomalías positivas de precipitación correspondientes a la ITCZ. Además, se observan anomalías positivas de baja intensidad en las costas occidentales de la región de interés, principalmente sobre Jalisco, Nayarit y Michoacán. Asimismo, destaca la ausencia de un patrón dominante en las anomalías del viento.

En el *día 0* de la fase 3 (**Panel D**), se observa un debilitamiento significativo de las anomalías positivas de precipitación de la ITCZ en el Pacífico centro-oriental. Por otra parte, se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad que abarcan casi en su totalidad la parte terrestre de la región de interés. En las anomalías de los campos de viento persiste la ausencia de un patrón dominante.

Pasados cinco días del registro de la fase (**Panel E**), en la región de interés y al norte de la misma se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad. Por otra parte, persiste la ausencia de anomalías significativas en los campos de viento en la región de interés y zonas cercanas, destacando anomalías de vientos del norte en el Atlántico occidental. Mientras que diez días después de la fase (**Panel F**) destaca la ausencia de anomalías de precipitación y viento en la región de interés y zonas cercanas.

3.7.4. Evolución temporal de la precipitación y de los campos de viento asociados a la fase 4 durante el mes de agosto

La **Figura 3.14**, mediante seis paneles, proporciona una representación detallada de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación y del viento asociadas a la fase 4 de la MJO durante el mes de agosto, en un periodo de veinticinco días.

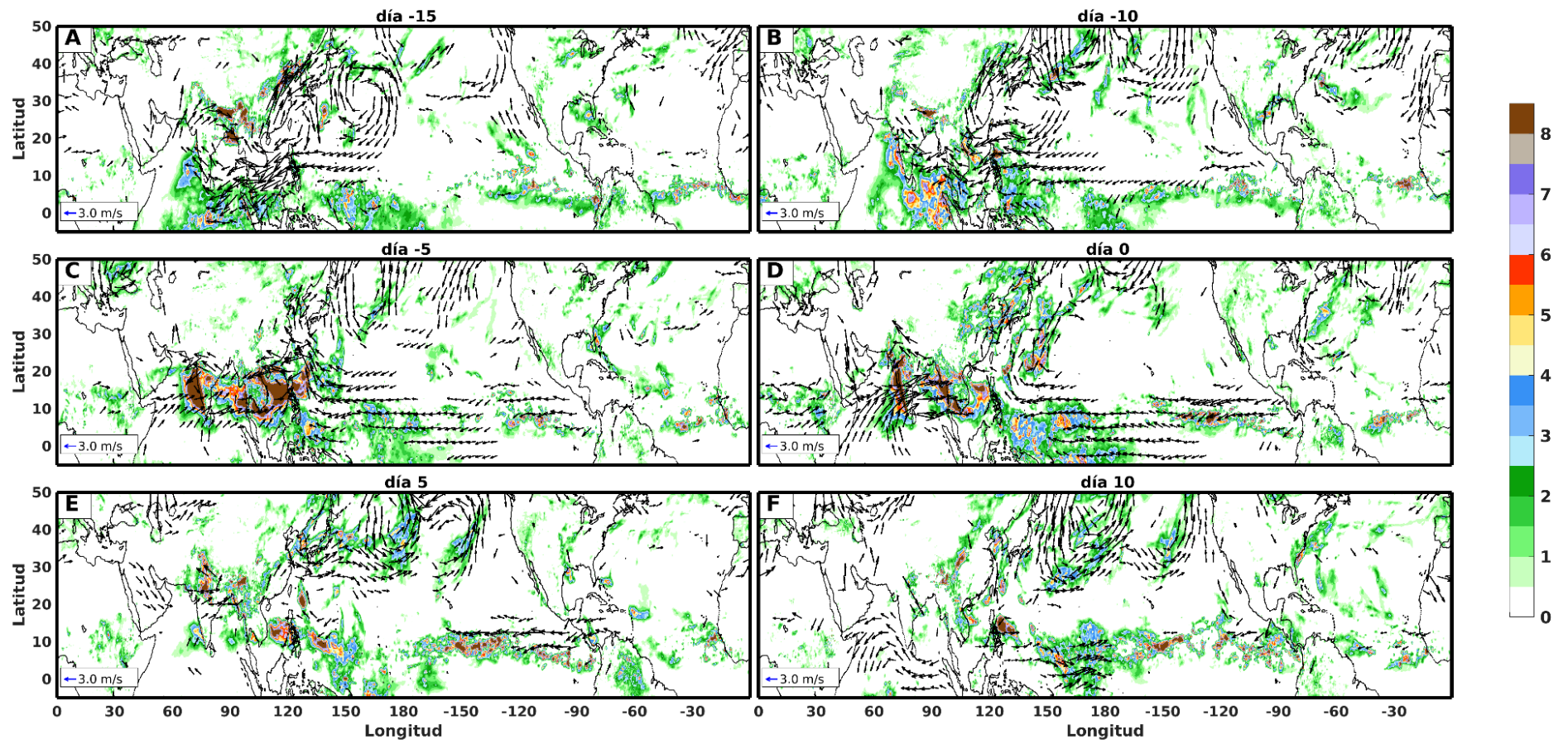


Figura 3.14. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 4.

Quince días antes de la fase (**Panel A**), destacan anomalías positivas de precipitación desde el Pacífico central hasta el Atlántico oriental, alrededor de los 0°, con una presencia casi nula de anomalías positivas de precipitación en la región de interés. Sin embargo, se observan anomalías de baja intensidad frente a las costas occidentales de Centroamérica. En los campos de viento, destacan anomalías de vientos del sur frente a las costas occidentales de la región norte de México.

Diez días antes de la fase (**Panel B**), se observa una intensificación de las anomalías de precipitación en la región de la ITCZ, principalmente en el Pacífico centro-oriental. Además, destacan anomalías de precipitación de baja intensidad en tierra, en la parte norte de la región de interés y al norte de la misma, junto con anomalías de vientos zonales del este, frente a las costas occidentales de la región de interés.

Cinco días antes de la fase (**Panel C**), se observa un debilitamiento de las anomalías de precipitación en el Pacífico oriental, en la región de la ITCZ, con un aparente desplazamiento de las anomalías hacia el Pacífico central. Esto se refleja en las anomalías de los campos de viento, con la presencia de vientos zonales del este frente a las costas occidentales de Centroamérica y de la región norte de América del Sur. Además, destacan en tierra anomalías positivas de precipitación de baja intensidad al norte de la región de interés.

En el *día 0* de la fase 4 (**Panel D**), destaca un desplazamiento hacia el oeste de anomalías positivas de precipitación de gran intensidad en el Pacífico centro-oriental, en la región de la ITCZ. Esto también se refleja en los campos de viento con anomalías de vientos zonales del este por debajo de los 20°N, abarcando la mayor parte del océano Pacífico. También se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad al sur de la región de interés, principalmente en las costas orientales de Centroamérica.

Cinco días después de la fase (**Panel E**), se observa una intensificación de las anomalías positivas de precipitación en el Pacífico central, alrededor de los 10°N, alcanzando valores de hasta 8 mm/día. Este comportamiento es favorecido por anomalías de vientos zonales del este en el Pacífico centro-oriental y el Mar Caribe, entre los 10°N y 20°N. Por otra parte, en la región de interés se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad, principalmente en las costas de Oaxaca, Guerrero, Veracruz y Tabasco.

Diez días después de la fase (**Panel F**), se observan anomalías de precipitación distribuidas a lo largo del Pacífico, en la región de la ITCZ, con una zona de anomalías

positivas de gran extensión e intensidad en el Pacífico oriental, frente a las costas occidentales de Centroamérica, al sur de la región de interés.

3.7.5. Evolución temporal de la precipitación y de los campos de viento asociados a la fase 5 durante el mes de agosto

La **Figura 3.15**, mediante seis paneles, proporciona una representación detallada de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación y del viento asociadas a la fase 5 de la MJO durante el mes de agosto, en un periodo de veinticinco días.

Quince días antes de la fase (**Panel A**), se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en la región de interés, abarcando la mayor parte de la región oceánica y la parte norte terrestre. En cuanto a las anomalías de los campos de viento, destaca la ausencia de un patrón dominante en la región de interés. Sin embargo, al sur de la región de interés se observan vientos del este, sobre el Mar Caribe.

Diez días antes de la fase (**Panel B**), se observa una disminución en las anomalías de precipitación, observando anomalías de muy baja intensidad principalmente en las costas de Veracruz. Las anomalías de los campos de viento alrededor de los 10°N muestran un desplazamiento de los vientos del este, pasando del Mar Caribe al Pacífico centro-oriental.

Cinco días antes de la fase (**Panel C**), se observa una ausencia casi total de anomalías de precipitación en la región de interés. Además, se observa un aumento en la intensidad de anomalías positivas de precipitación en la región de la ITCZ, alrededor de los 10°N, principalmente en el Pacífico centro-oriental y el Atlántico oriental. Las anomalías de precipitación del Pacífico parecen estar estrechamente relacionadas con las anomalías de los campos de viento, que muestran un predominio de vientos con una componente del este que se extienden por debajo de los 10°N en el Pacífico central y alrededor de los 10°N en el Pacífico oriental y el Mar Caribe.

En el *día 0* de la fase 5 (**Panel D**), persiste la ausencia casi total de anomalías positivas de precipitación en la región de interés. Sin embargo, destaca la intensificación de las anomalías de precipitación a lo largo del Pacífico, en la región de la ITCZ, alrededor de los 10°N. Estas anomalías se ven reforzadas por un aumento en la extensión de las anomalías de vientos del este, abarcando desde el Pacífico centro-occidental, hasta el Pacífico oriental, por debajo de los 15°N.

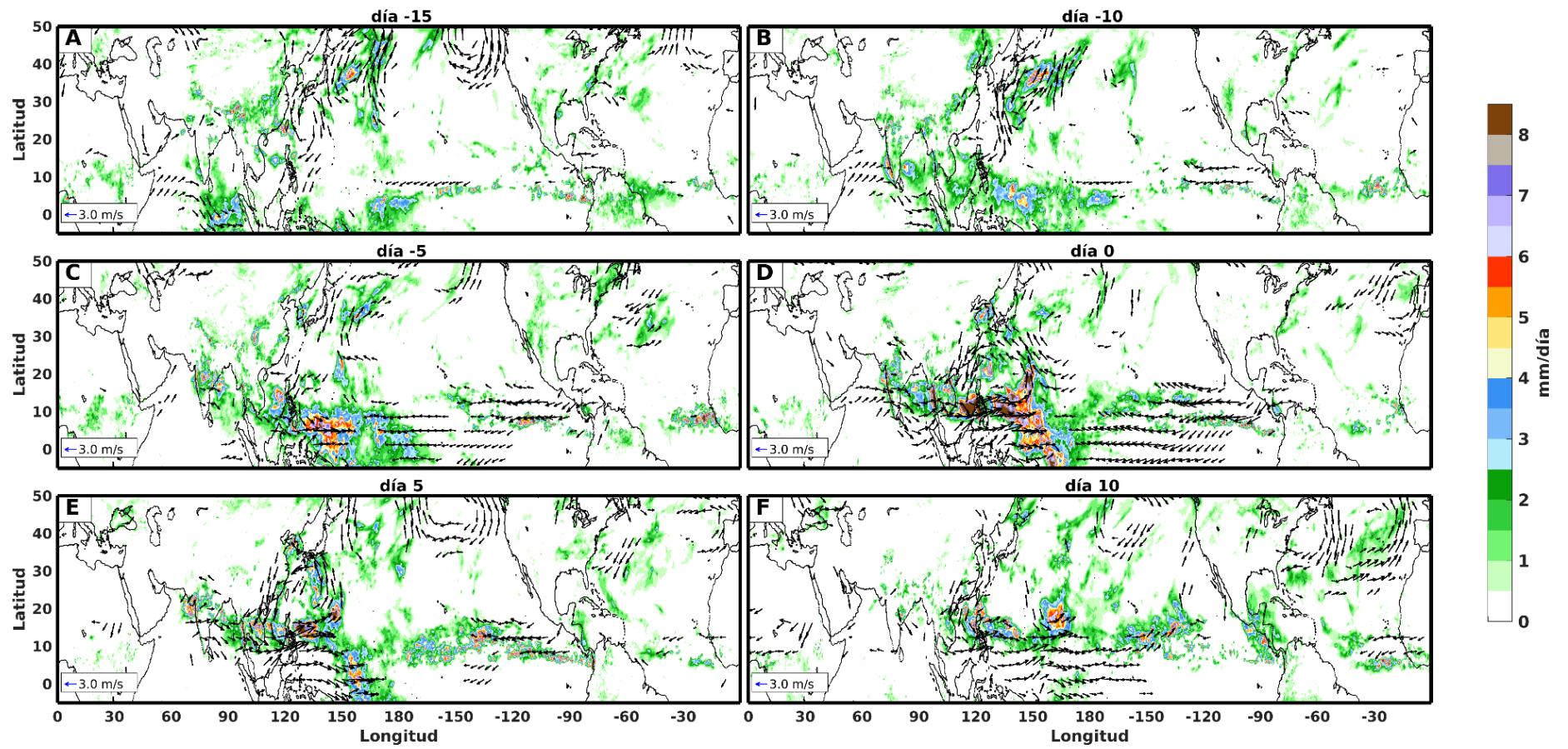


Figura 3.15. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 5.

Cinco días después de la fase (**Panel E**), se observan anomalías positivas de precipitación de muy baja intensidad frente a las costas orientales de la parte sur de México y Centroamérica. Además, se observa un aumento en las anomalías de precipitación de la ITCZ, en particular, en el Pacífico central, las cuales parecen relacionarse con las anomalías de vientos del este que se extienden alrededor de los 10°N, desde el Pacífico central hasta el Pacífico oriental.

Diez días después de la fase (**Panel F**), se observa una mayor presencia de anomalías de precipitación de baja intensidad en la parte sur del dominio de interés, así como en Centroamérica. Además, se observa un debilitamiento en las anomalías de precipitación de la ITCZ, en el Pacífico oriental, junto con un desplazamiento hacia el norte en el Pacífico occidental y central de las anomalías de precipitación. Las anomalías de los campos de viento, destacan la ausencia de un patrón dominante en la región de interés y zonas cercanas.

3.7.6. Evolución temporal de la precipitación y de los campos de viento asociados a la fase 6 durante el mes de agosto

La **Figura 3.16**, mediante seis paneles, proporciona una representación detallada de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación y del viento asociadas a la fase 6 de la MJO durante el mes de agosto, en un periodo de veinticinco días.

Quince días antes de la fase (**Panel A**), se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad alrededor de los 10°N, las cuales se extienden a lo largo del Pacífico y el Atlántico, así como en la parte sur de la región de interés, en particular sobre Yucatán y Quintana Roo y en las costas orientales de Centroamérica. Las anomalías de los campos de viento muestran un predominio de vientos con una componente del este que se extienden desde el Pacífico central hasta el oriental, de los 10°N a los 20°N.

Diez días antes de la fase (**Panel B**), se observa un desplazamiento hacia el norte de las anomalías positivas de precipitación de la ITCZ, en el Pacífico, situándose entre los 10°N y 20°N. Sin embargo, es destacable la ausencia de anomalías positivas de precipitación en la región de interés. Por otra parte, se presenta una intensificación en las anomalías de vientos del este que se extienden desde el Pacífico central hasta el Pacífico oriental, por debajo de los 20°N. Cinco días antes de la fase (**Panel C**), se presentan condiciones muy similares.

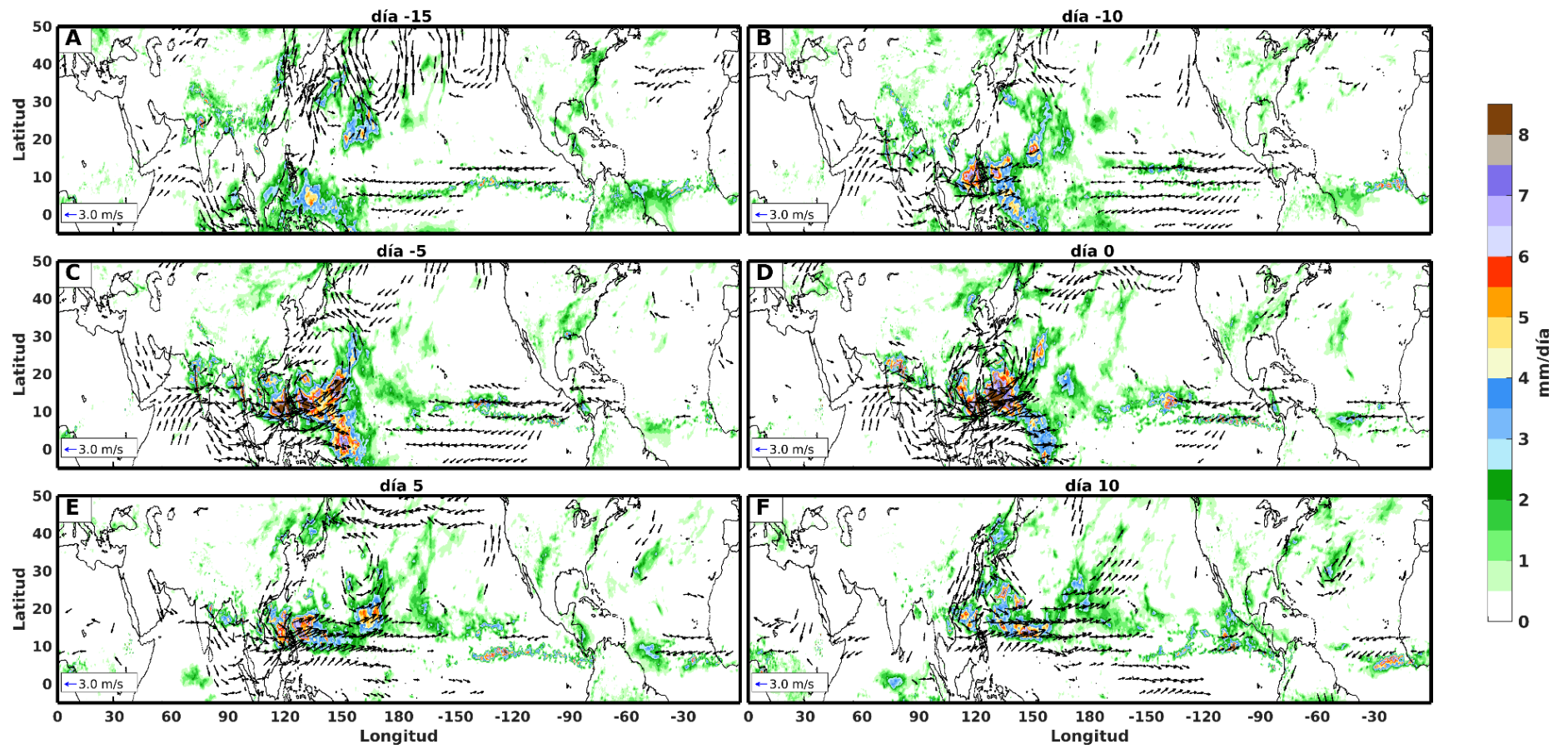


Figura 3.16. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 6.

En el *día 0* de la fase 6 (**Panel D**), se observan anomalías positivas de precipitación, de intensidad moderada en el Pacífico central, alrededor de los 20°N. Además, se observa un debilitamiento considerable en la extensión de las anomalías de viento, limitándose al Pacífico oriental y manteniendo el predominio de vientos con una componente del este. Destaca la ausencia de anomalías positivas de precipitación en la región de interés, aunque se observan anomalías positivas de baja intensidad en las costas orientales de Centroamérica.

Cinco días después de la fase (**Panel E**), se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad principalmente en la región sur del dominio de interés, así como en Centroamérica. Las anomalías de los campos de viento no muestran un patrón dominante en la región de interés y zonas cercanas.

Diez días después de la fase (**Panel F**) se extienden anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en el Pacífico oriental de los 10°N a los 20°N, incluyendo la mayor parte de la región de interés y Centroamérica. Por otra parte, es notable la ausencia de un patrón predominante en las anomalías de los campos de viento.

3.7.7. Evolución temporal de la precipitación y de los campos de viento asociados a la fase 7 durante el mes de agosto

La **Figura 3.17** proporciona una representación detallada de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación y del viento asociadas a la fase 7 de la MJO, durante el mes de agosto, en un periodo de veinticinco días.

Quince días antes del registro de la fase (**Panel A**) se destaca la ausencia de anomalías positivas de precipitación en la región de interés. Sin embargo, se observan anomalías de baja intensidad al sur de esta región, en las costas orientales de Centroamérica. También se observan anomalías de moderada y baja intensidad en el Pacífico central, entre los 10°N y 20°N. Destacan intensas anomalías de viento con una componente del este por debajo de los 20°N, que se extienden desde el Pacífico centro-occidental hasta el Pacífico oriental, así como anomalías de vientos del este en el Mar Caribe. Diez días antes de la fase (**Panel B**), persiste el patrón de anomalías de precipitación y de viento observado cinco días antes.

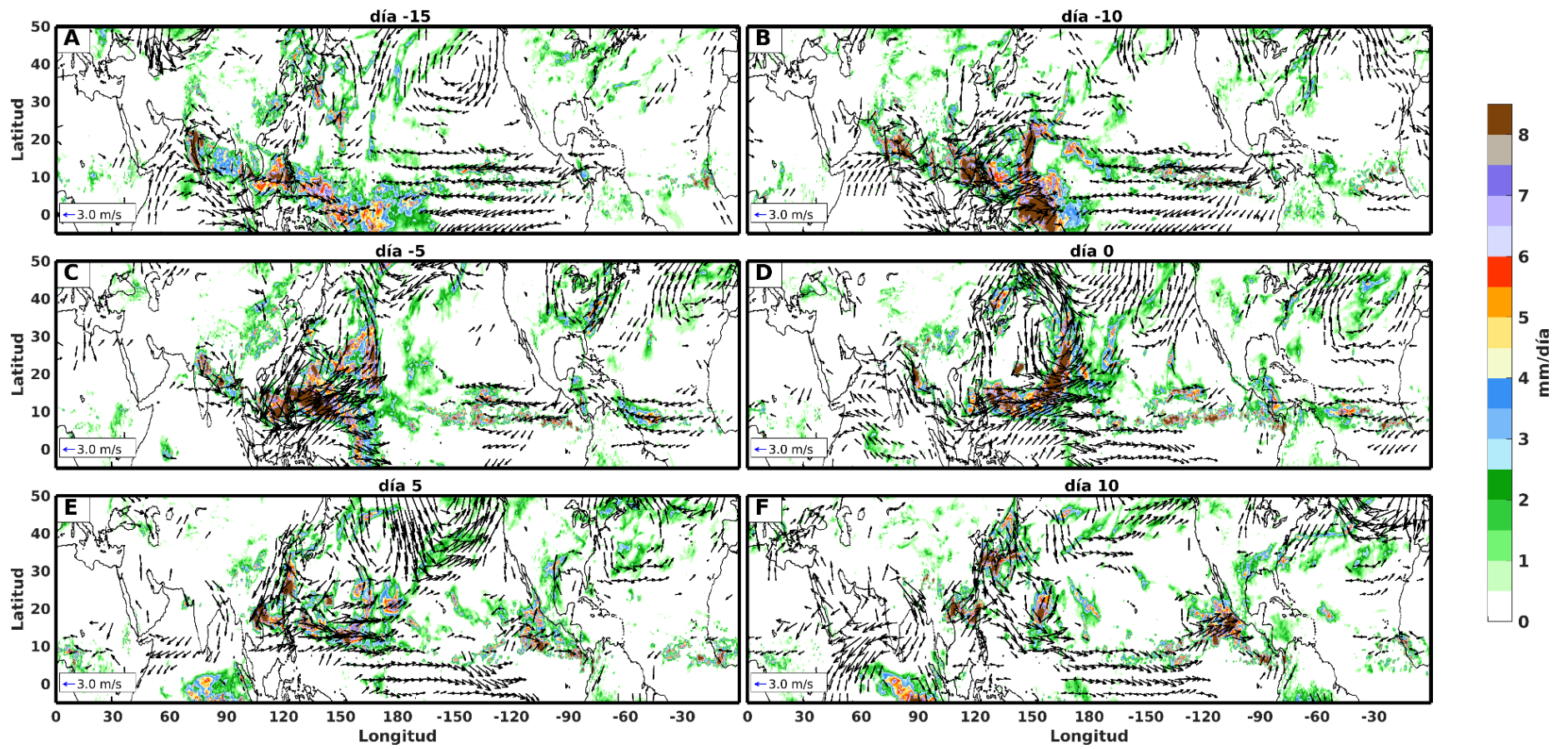


Figura 3.17. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 7.

Cinco días antes del registro de la fase (**Panel C**), se observa una intensificación de las anomalías positivas de precipitación en el Pacífico central, entre los 10°N y 20°N. Las anomalías de vientos del este del Pacífico muestran una marcada reducción en la extensión, limitándose al Pacífico centro-oriental. Asimismo, se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en las costas orientales de la parte sur de la región de interés y en Centroamérica. Además, se observan anomalías de vientos del este en el Mar Caribe y a lo largo del Atlántico, por debajo de los 20°N.

En el día 0 de la fase 7 (**Panel D**), se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad que se extienden en casi toda la parte terrestre de la región de interés, con mayor predominancia en la parte sur. También se observan anomalías de precipitación de intensidad moderada y alta en Centroamérica, el Pacífico centro-oriental y el Atlántico centro-occidental. Únicamente se observan anomalías de vientos del este en el Atlántico centro-oriental y una pequeña región de anomalías de vientos del noreste en el Pacífico central, entre los 10°N y 20°N.

Cinco días después del registro de la fase (**Panel E**), persisten las anomalías positivas de precipitación de baja intensidad en la región de interés. Sin embargo, destaca la presencia de anomalías de intensidad moderada y alta frente a las costas de Jalisco y Nayarit, con valores de hasta 8 mm/día, así como anomalías en su mayoría de baja intensidad en Centroamérica, aunque en regiones puntuales se observan anomalías de alta intensidad. Se observan anomalías de vientos del oeste a lo largo del Pacífico centro-occidental, por debajo de los 10°N, así como vientos del suroeste en el Pacífico oriental, entre los 10°N y 20°N, que se extienden hasta las costas occidentales de la parte norte de la región de interés.

Diez días después del registro de la fase (**Panel F**), destacan anomalías positivas de precipitación de alta intensidad, con valores superiores a los 8 mm/día en y frente a las costas de Jalisco, Nayarit y Michoacán, así como anomalías en su mayoría de baja intensidad en la parte terrestre de la región de interés. En las anomalías de viento, persiste el patrón de vientos del oeste a lo largo del Pacífico centro-occidental, por debajo de los 10°N, teniendo una intensificación de vientos del suroeste en el Pacífico oriental, entre los 10°N y 20°N, los cuales se extienden hasta las costas occidentales de la región de interés. También se observan vientos del sur frente a las costas occidentales de la región norte de América del Sur.

3.7.8. Evolución temporal de la precipitación y de los campos de viento asociados a la fase 8 durante el mes de agosto

La **Figura 3.18** proporciona una representación detallada de la evolución temporal de las anomalías positivas de precipitación y del viento asociadas a la fase 8 de la MJO, en el mes de agosto, en un periodo de veinticinco días.

Quince días antes de la fase (**Panel A**), se observan anomalías positivas de precipitación de intensidad baja, moderada y alta, alrededor de los 10°N, desde el Pacífico occidental hasta el Atlántico oriental. Destacan anomalías de mayor intensidad, con valores superiores a los 8 mm/día tanto en el Pacífico centro-oriental como en el Atlántico central. Además, destacan anomalías de vientos del este que se extienden por debajo de los 20°N, a lo largo del Pacífico, con presencia de anomalías de vientos del norte frente a las costas occidentales de América del Sur. Destaca la ausencia de anomalías de precipitación en la región de interés.

Diez días antes de la fase (**Panel B**), se observa una intensificación de las anomalías de precipitación en la ITCZ, con anomalías de gran intensidad alrededor de los 10°N en el Pacífico central y Atlántico oriental. También se observan anomalías de precipitación de baja intensidad en las costas orientales de la parte sur de la región de interés y en Centroamérica. Asimismo, se observa un debilitamiento de las anomalías de vientos del oeste en el Pacífico oriental.

Cinco días antes de la fase (**Panel C**), prevalecen las anomalías positivas de precipitación de alta intensidad en la ITCZ, en el Pacífico centro-oriental, incluyendo las costas occidentales de Centroamérica. Además, destacan anomalías de vientos del sur en el Pacífico oriental, por debajo de los 10°N, así como vientos del este en el mismo Pacífico oriental, alrededor de los 20°N.

En el *día 0* de la fase 8 (**Panel D**), destacan anomalías positivas de precipitación de alta intensidad en la ITCZ, a lo largo de todo el Pacífico, alrededor de los 10°N, con grandes áreas frente a las costas occidentales de la región de interés y Centroamérica, en donde se observan anomalías con valores superiores a los 8 mm/día. Además, en la parte sur de la región de interés se observan anomalías positivas de precipitación de baja intensidad. Estas anomalías parecen estar fuertemente relacionadas con las anomalías de los campos de viento, que muestran un predominio de vientos del este en el Pacífico central, por debajo de los 10°N, así como anomalías de vientos con una componente del sur frente a las costas occidentales de la parte norte de América del Sur.

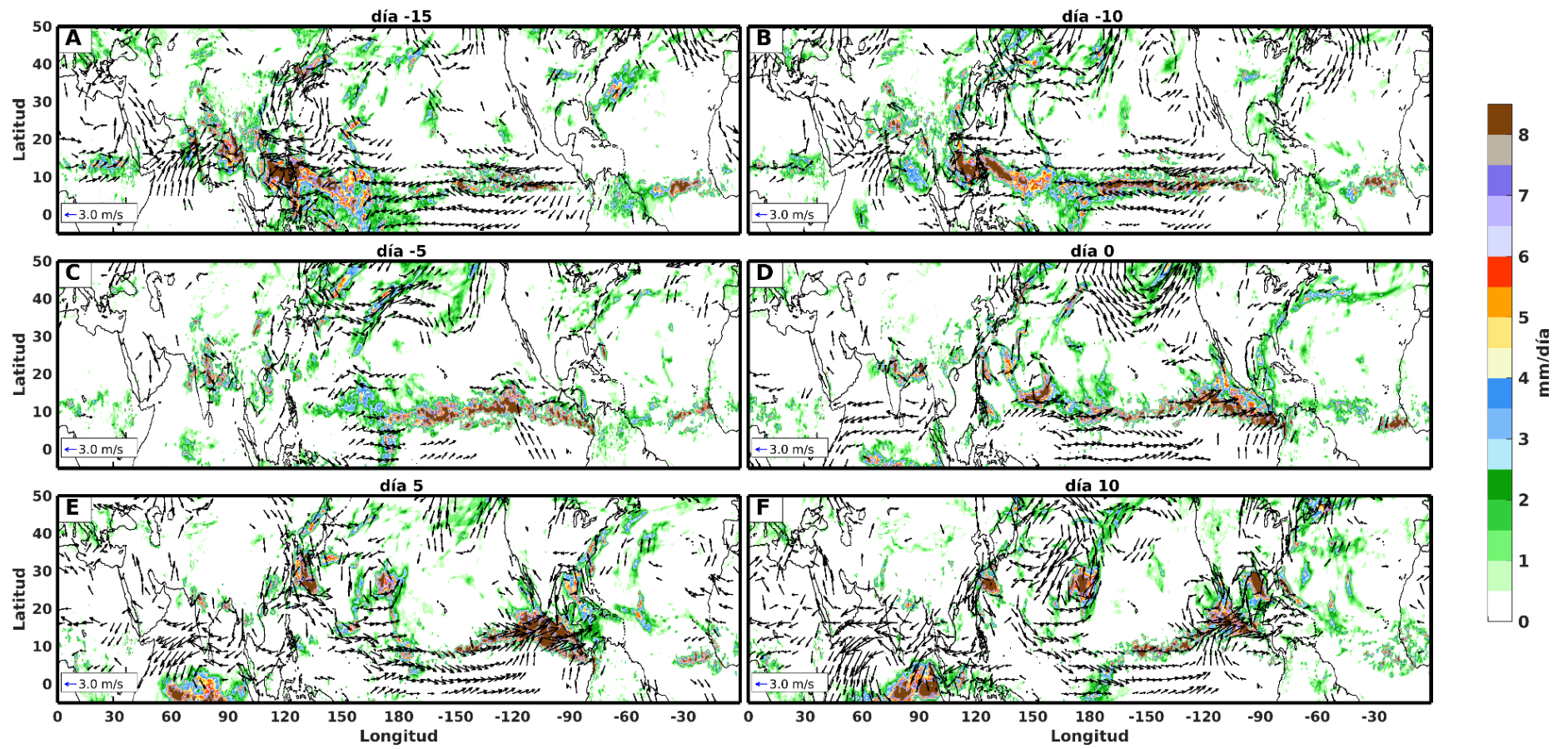


Figura 3.18. Similar a la Figura 3.11., pero considerando la fase 8.

Cinco días después de la fase (**Panel E**), se observa un claro desplazamiento de las anomalías positivas de precipitación de alta intensidad de la ITCZ en el Pacífico hacia las costas occidentales de la región de interés y Centroamérica, donde se observan anomalías con valores superiores a los 8 mm/día. Este comportamiento se ve claramente reforzado por anomalías de vientos con una componente del oeste, a lo largo del Pacífico centro-oriental, por debajo de los 10°N. Asimismo, en el Pacífico oriental se observan anomalías de viento con una componente del sur, las cuales se extienden hasta las costas occidentales de la región de interés.

Diez días después de la fase (**Panel F**), persisten anomalías positivas de precipitación de alta intensidad, con valores superiores a los 8 mm/día en la mayor parte de las costas occidentales de la región de interés. Estas anomalías continúan estrechamente relacionadas con las anomalías de vientos del oeste que persisten a lo largo del Pacífico central y las anomalías de vientos del sur que se extienden en el Pacífico oriental, por debajo de los 10°N.

4. Conclusiones

En este estudio se examinó la evolución temporal de la señal convectiva de la MJO a lo largo de su ciclo de vida y su influencia en los patrones de precipitación durante los meses de lluvia (mayo-octubre) en la región de interés, la cual abarca el centro-sur de México y zonas oceánicas adyacentes, centrándose principalmente en el Pacífico tropical y, dejando en segundo plano al Golfo de México y el Mar Caribe.

Se realizó una caracterización mensual detallada sobre la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la región de interés en función de las 8 fases de la MJO, utilizando datos de los índices RMM y OMI y del reanálisis ERA5. Los resultados revelaron diferencias marcadas en las distribuciones de frecuencias mensuales de las fases (ver **Figuras 3.5 y 3.6**, y **Tablas 3.1 y 3.2**) y en los compuestos de anomalías estandarizadas obtenidos con la información de los dos índices (ver **Figuras 3.7 y 3.8**), mostrando la complejidad asociada a la evolución de la MJO y a la dificultad de generalizar los resultados con base en la información de uno de los dos índices. Sin embargo, se consideró que los resultados obtenidos a partir del índice RMM permiten identificar de manera más clara las fases que favorecen o inhiben la ocurrencia de eventos de precipitación en la región de estudio. Aunado a lo anterior, el índice RMM ha sido utilizado en estudios estadísticos que exploran el efecto modulador de la MJO en los patrones de precipitación en México y otras regiones (Bond y Vecchi, 2003; Perdigón et al., 2018; Perdigón-Morales, 2020), así como su impacto en eventos de precipitación extrema (Jones, 2000; Vázquez-Proveyer, 2023). Por lo tanto, se optó por emplear este índice como la métrica para determinar la ubicación e intensidad de la señal convectiva de la MJO.

El análisis de la influencia de la señal convectiva de la MJO en los patrones de anomalías de precipitación en la región de interés, indicó que, cuando la señal convectiva de la MJO se sitúa en las fases 1 y 2 (ver **Figura 3.7**), se presenta un aumento significativo de la precipitación durante el periodo de lluvias, aunque con ciertas diferencias en los patrones espaciales mensuales, siendo más evidente esta influencia en la fase 1. Los patrones de anomalías presentan mayor variabilidad espacial en la fase 3, con algunos meses mostrando condiciones favorables al aumento de precipitación (particularmente en julio y agosto sobre tierra) y en otros, condiciones inhibitoras ya sea en tierra o en las zonas oceánicas adyacentes. La fase 8 también muestra patrones complejos, con aumentos significativos de precipitación mayormente sobre el Pacífico mexicano de junio a octubre, mientras que en tierra se presentan fuertes anomalías negativas principalmente en julio y agosto. Asimismo, la fase 7 presenta variaciones espaciales que no muestran un patrón

bien definido de anomalías de precipitación a lo largo de los meses lluviosos. En contraste, cuando la señal convectiva de la MJO se encuentra en las fases 4, 5 y 6, se observa un efecto inhibitor de los eventos de precipitación en la mayoría de los meses y en amplias regiones del dominio.

Se realizaron dos análisis separados, pero que son complementarios, para estudiar la evolución temporal de la influencia de la MJO sobre los patrones de precipitación desde varios días antes de la fecha en que se registra una fase en particular (denominado *día 0*) hasta varios días después de ésta. El primer análisis se basó en la construcción de diagramas Hovmöller de las anomalías positivas de la precipitación considerando promedios latitudinales del dominio que abarca de 160°W a 85°W, para todos los meses y fases (ver **Figura 3.9**). El segundo análisis consistió en calcular el porcentaje de píxeles de la región de interés que supera un valor umbral de 1.77 mm/día, el cual corresponde al 50 % del valor climatológico de los meses lluviosos para el periodo 1981-2021, considerándolos como eventos significativos de precipitación (ver **Figura 3.10**). De ambos análisis se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Con excepción de la fase 1, en mayo no se registran eventos significativos de precipitación en los días previos al registro de las fases. Este comportamiento persiste en las fases 3, 4, 5 y 6 hasta por varios días posteriores al *día 0*. En general, es hacia los últimos días del periodo considerado (10 a 15 días posteriores al *día 0*) que se presentan eventos de precipitación que pueden llegar a cubrir alrededor del 50 % del área de interés.
- Con excepción del mes de octubre, en el resto de los meses analizados las condiciones que se presentan durante las fases 4, 5 y 6 no favorecen la ocurrencia de eventos significativos de precipitación alrededor de una semana antes y después del *día 0*. Por el contrario, las fases 1, 2 y 8 muestran una influencia más consistente a favorecer eventos significativos de precipitación, aunque con algunas diferencias en las fechas y en la extensión de dichos eventos.
- A diferencia del comportamiento observado en otros meses, en octubre los eventos de precipitación significativos que llegan a cubrir gran parte de la región de interés, ocurren con antelación al registro de las fases 3, 4 y 5. En los días posteriores al *día 0*, únicamente durante las fases 1 y 8 los eventos de precipitación llegan a cubrir entre el 30 % y el 40 % de la región de interés, mientras que en el resto de las fases los porcentajes son muy bajos o prácticamente nulos.

- En julio, los eventos de precipitación que cubren las mayores extensiones se observan también con antelación al registro de las fases, pero estos ocurren principalmente en las fases 1, 2 y 3. Por el contrario, en las fases 6, 7 y 8 estos eventos se observan en días posteriores al *día 0*.
- En el mes de agosto resalta, la fase 1 con eventos significativos de precipitación que abarcan más del 60 % de la región de interés durante el registro de la fase y días cercanos a ésta; y la fase 8, con porcentajes que pueden ser superiores al 70 % alrededor de una semana después del *día 0*.
- A pesar de ser uno de los meses más lluviosos en amplias regiones del centro y sur de México, en el mes de septiembre no se observan eventos significativos de precipitación que abarquen áreas tan grandes como en julio, agosto y octubre, lo que puede indicar que la MJO no es un factor dominante en la modulación de los eventos de precipitación durante este mes.

Para finalizar, se realizó un análisis enfocado en estudiar el efecto modulador de las fases de la MJO a lo largo de su ciclo de vida, en el desarrollo y evolución temporal de los patrones de precipitación y de los campos de vientos en la región de interés. Este análisis abarca de 15 días antes de la fecha en que se registra una fase en particular (denominado *día 0*) a 10 días después de ésta. Teniendo las siguientes conclusiones:

- Se observa una transición de anomalías de vientos del este a anomalías de vientos del oeste en el Pacífico tropical, acompañada de un aumento en las anomalías positivas de precipitación en la región de interés. Durante los meses de, agosto, en las fases 1, 7 y 8 (ver **Figuras 3.11, 3.17 y 3.18**), mayo, en las fases 1, 7 y 8 (**A01, A07 y A08**), junio, en las fases 5, 6 y 8 (**A13, A14 y A16**), julio, en las fases 7 y 8 (**A23 y A24**), septiembre, en las fases 1, 7 y 8 (**A25, A31 y A32**) y octubre, en las fases 7 y 8 (**A38 y A39**).
- Se observa un predominio de anomalías de vientos del este en el Pacífico tropical y una ausencia de anomalías significativas de precipitación en la región de interés, con una transición a vientos del oeste en los últimos días del periodo, acompañada de anomalías positivas de precipitación de intensidad baja-moderada en la región de interés. Durante los meses de, agosto, en la fase 6 (**Figura 3.16**), mayo, en las fases 5 y 6 (**A05 y A06**), junio, en la fase 7 (**A15**), julio, en la fase 6 (**A22**) y septiembre, en la fase 6 (**A30**).

- Se observa un predominio de vientos del este en el Pacífico tropical y anomalías positivas de precipitación de muy baja-baja intensidad en la región de interés. Durante los meses de, agosto, en las fases 4 y 5 (**Figuras 3.14 y 3.15**), mayo en las fases 2, 3 y 4 (**A02, A03 y A04**), septiembre, en la fase 5 (**A29**) y octubre, en la fase 6 (**A38**).
- Se observa un predominio de vientos del oeste en el Pacífico tropical y anomalías positivas de precipitación de intensidad moderada a alta en la región de interés, a lo largo del periodo analizado. Durante los meses de agosto, en la fase 2 (**Figura 3.12**), junio, en la fase 1 (**A09**), julio, en la fase 1 (**A17**) y octubre, en la fase 1 (**A33**).
- Se observa una transición de anomalías de vientos del oeste a vientos del este en el Pacífico tropical, acompañada de una disminución de las anomalías positivas de precipitación en la región de interés. Durante los meses de agosto, en la fase 3 (**Figura 3.13**), junio, en las fases 2, 3 y 4 (**A10, A11 y A12**), julio, en las fases 2, 3, 4 y 5 (**A18, A19, A20 y A21**), septiembre, en las fases 2, 3 y 4 (**A26, A27 y A28**) y octubre, en las fases 2, 3, 4 y 5 (**A34, A35, A36 y A37**).

Los resultados derivados de este análisis destacan la importancia de la MJO como un modulador relevante del clima regional. Además, permiten identificar patrones específicos de anomalías de precipitación y de los campos de viento en función de las fases de la MJO, a lo largo de su ciclo de vida. También se obtiene información que ayuda a comprender cómo la MJO influye en las condiciones meteorológicas intraestacionales locales. Estos resultados pueden aportar información sumamente importante para el desarrollo y mejora de las predicciones meteorológicas a mediano plazo, así como para un adecuado manejo de los recursos hídricos en la región de interés (Jiang, et al., 2015).

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos que han analizado la influencia de la MJO en los patrones de precipitación y en los campos de viento. Investigaciones como la de Zhang (2005), Perdígón et al. (2018); Perdígón-Morales (2020) y Vázquez-Proveyer (2023) han demostrado el efecto modulador de las diferentes fases de la MJO en los patrones de lluvias en diversas regiones tropicales y subtropicales, incluyendo a México. Asimismo, esta investigación contribuye con estos hallazgos al proporcionar un análisis temporal más detallado del comportamiento de la precipitación y de los campos de viento a lo largo de los meses de lluvias, en función de las fases de la MJO, desde 15 días previos a que el núcleo convectivo se encuentre en una fase dada, hasta 15 días después de que se registró la fase, si se considera únicamente la precipitación y 10 días después si se considera el análisis conjunto de la precipitación y los campos de viento.

Anexo

A continuación se presentan los compuestos de las anomalías positivas de precipitación acumulada diaria y las anomalías de los campos de viento diario a 850 mb, en función de las fases de la MJO a lo largo de su ciclo de vida, para los meses de mayo, junio, julio, septiembre y octubre, considerando el periodo 1981-2021. En los gráficos se muestra la evolución temporal de las anomalías de precipitación y viento en un dominio global en longitud y de 5°S a 50°N en latitud, mediante seis paneles que inician quince días previos (*día -15*) a que el núcleo convectivo de la MJO se sitúe en una fase específica en un mes dado (*día 0*) y concluyen diez días después (*día 10*), con intervalos de cinco días. La lista de figuras es la siguiente:

Figura A01. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de mayo.

Figura A02. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de mayo.

Figura A03. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de mayo.

Figura A04. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de mayo.

Figura A05. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de mayo.

Figura A06. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de mayo.

Figura A07. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de mayo.

Figura A08. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de mayo.

Figura A09. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de junio.

Figura A10. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de junio.

Figura A11. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de junio.

Figura A12. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de junio.

Figura A13. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de junio.

Figura A14. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de junio.

Figura A15. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de junio.

Figura A16. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de junio.

Figura A17. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de julio.

Figura A18. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de julio.

Figura A19. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de julio.

Figura A20. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de julio.

Figura A21. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de julio.

Figura A22. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de julio.

Figura A23. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de julio.

Figura A24. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de julio.

Figura A25. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de septiembre.

Figura A26. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de septiembre.

Figura A27. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de septiembre.

Figura A28. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de septiembre.

Figura A29. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de septiembre.

Figura A30. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de septiembre.

Figura A31. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de septiembre.

Figura A32. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de septiembre.

Figura A33. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de octubre.

Figura A34. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de octubre.

Figura A35. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de octubre.

Figura A36. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de octubre.

Figura A37. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de octubre.

Figura A38. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de octubre.

Figura A39. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de octubre.

Figura A40. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de octubre.

Inicio de los mapas correspondientes al mes de mayo.

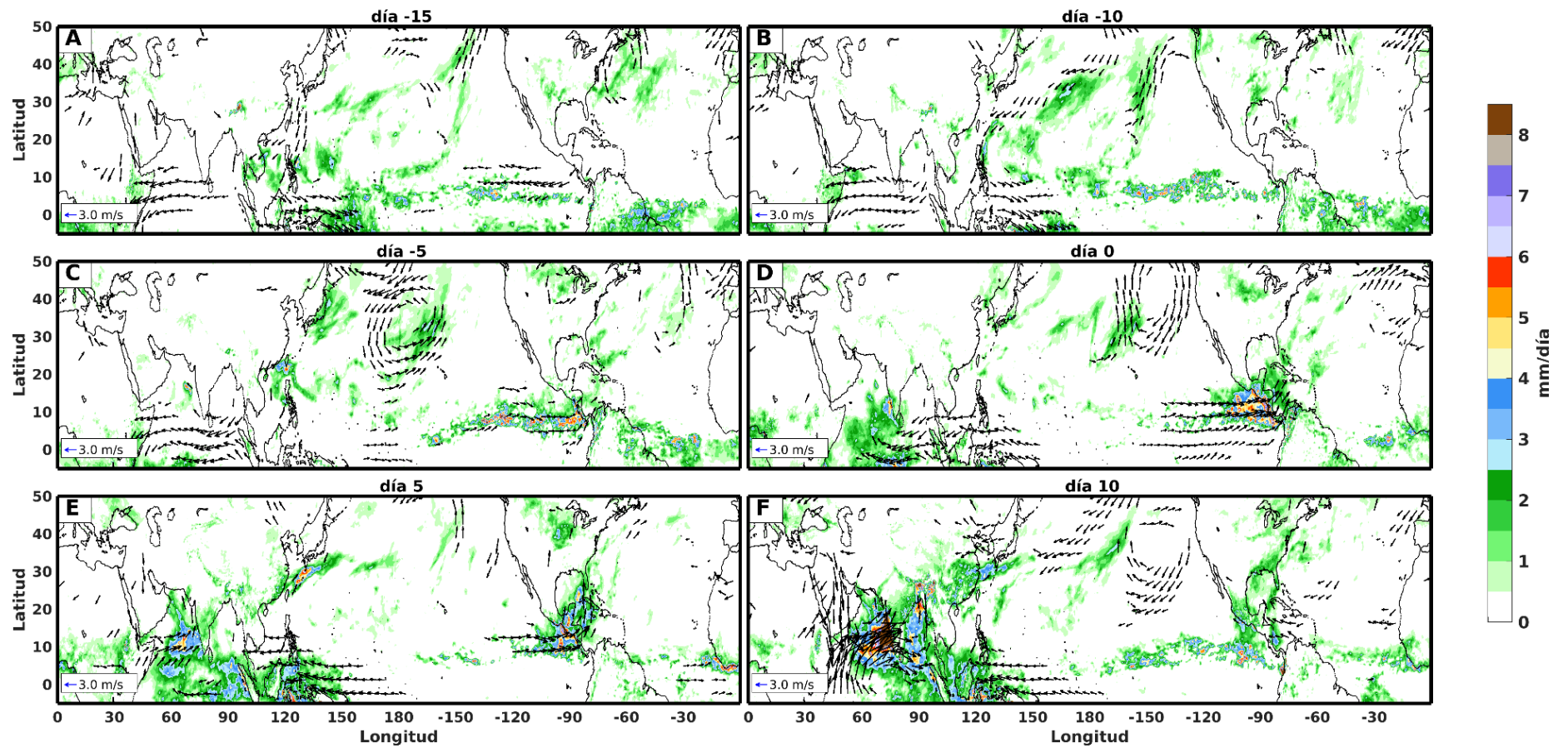


Figura A01. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de mayo.

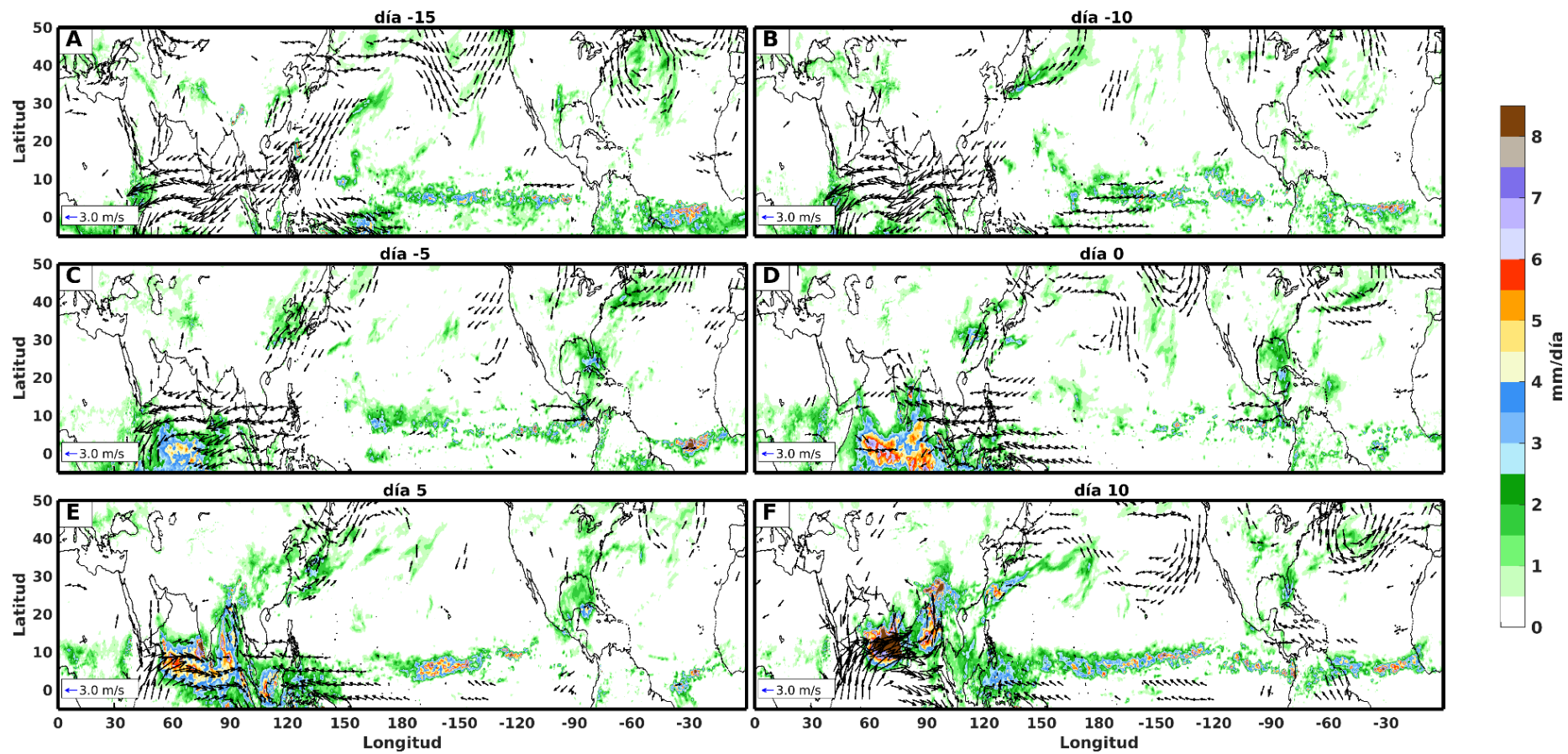


Figura A02. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de mayo.

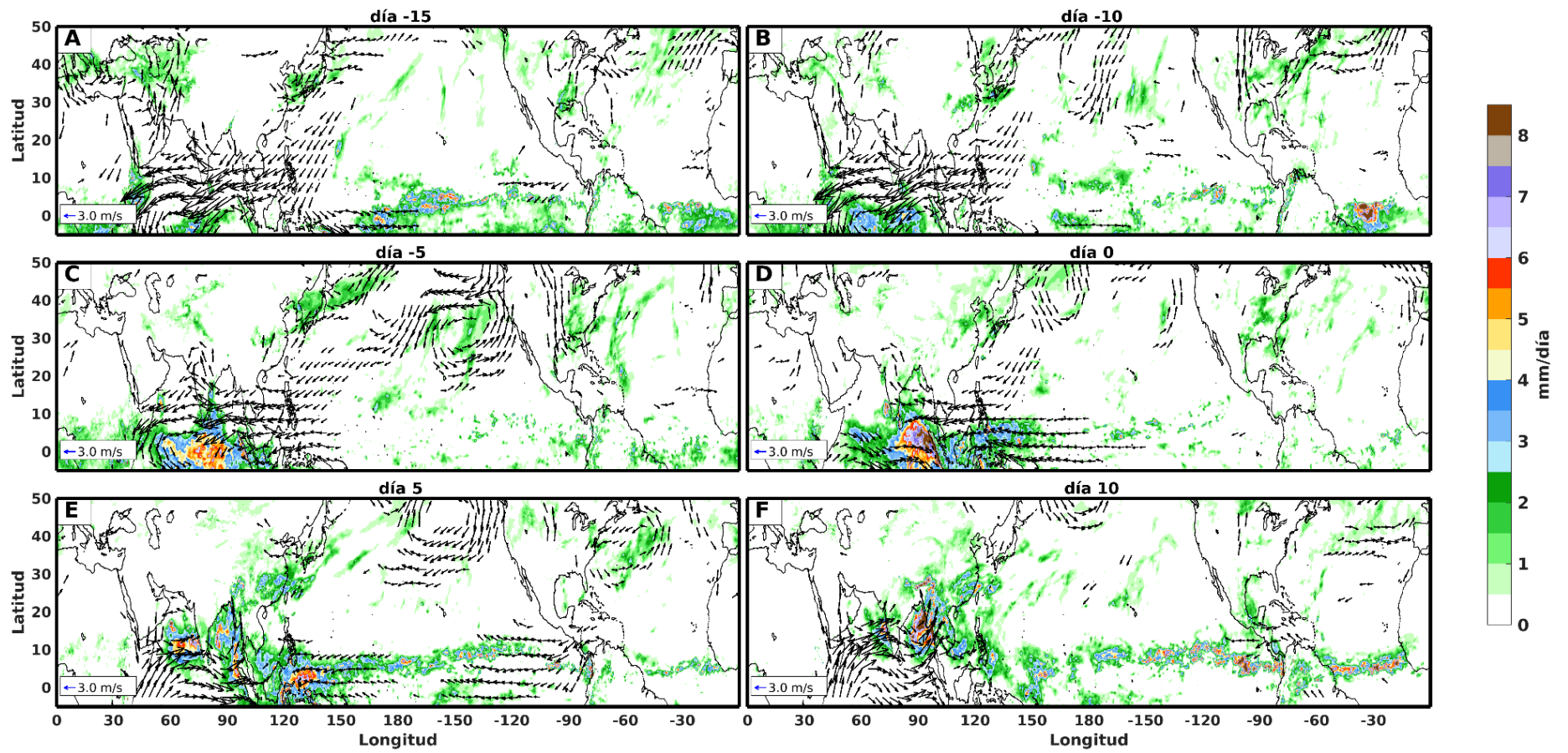


Figura A03. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de mayo.

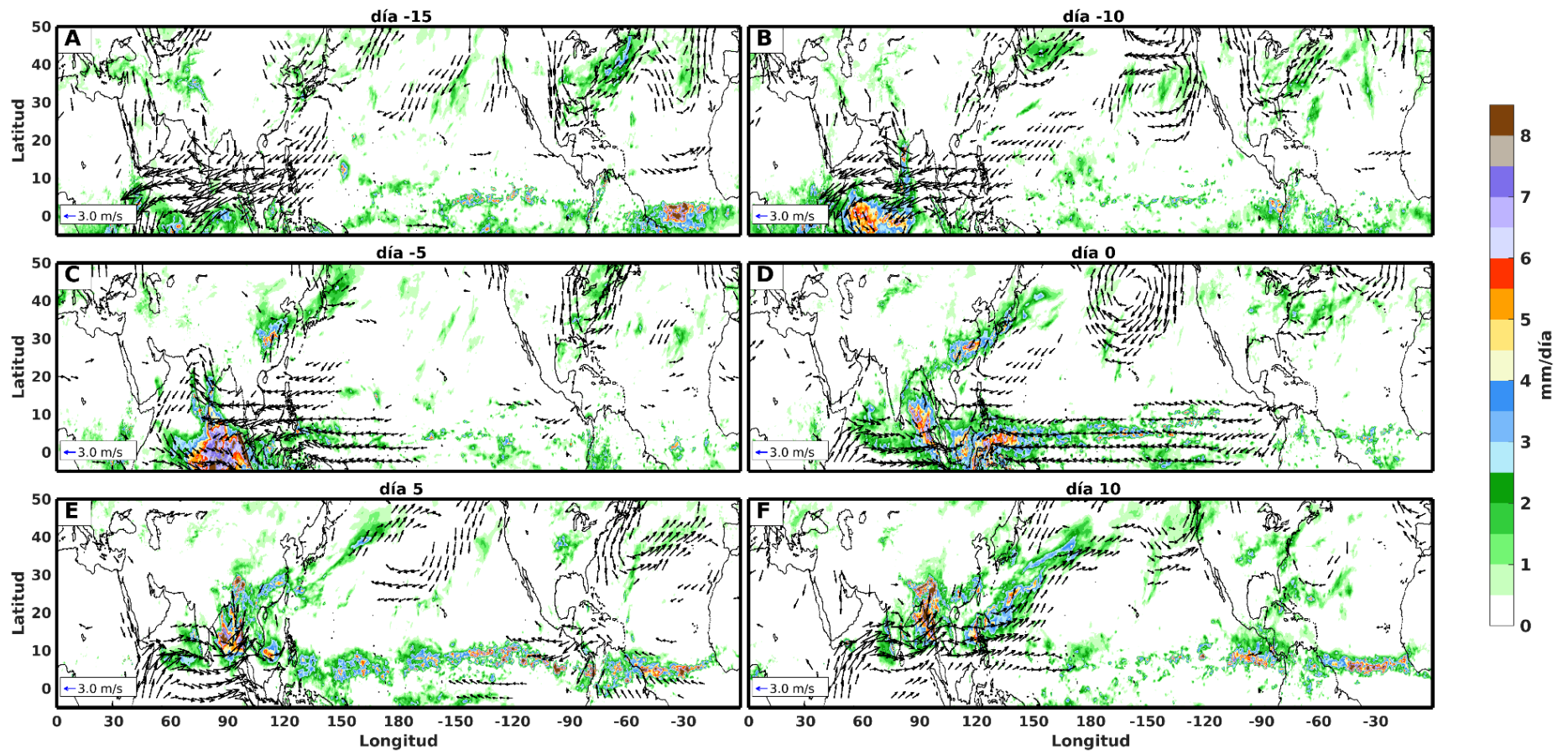


Figura A04. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de mayo.

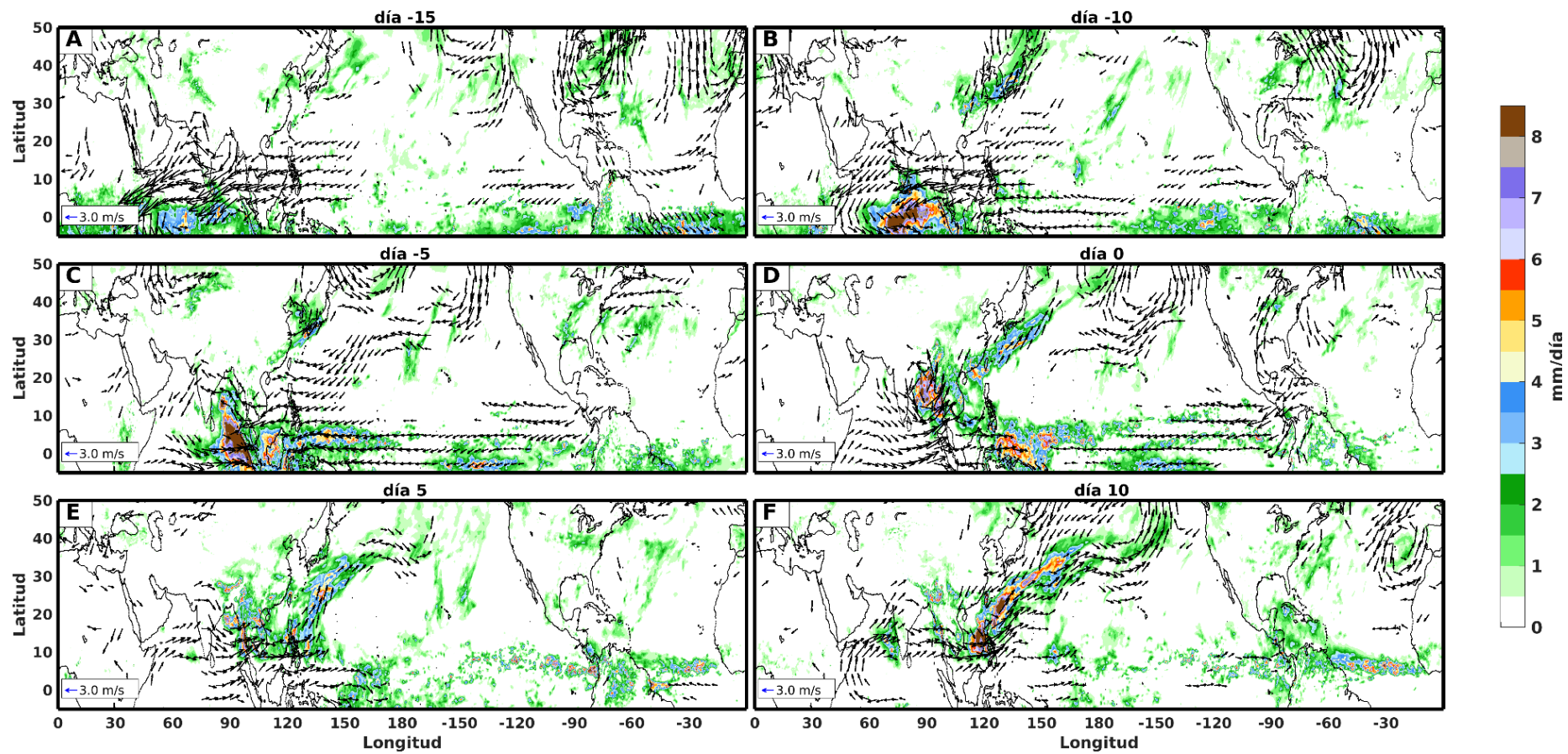


Figura A05. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de mayo.

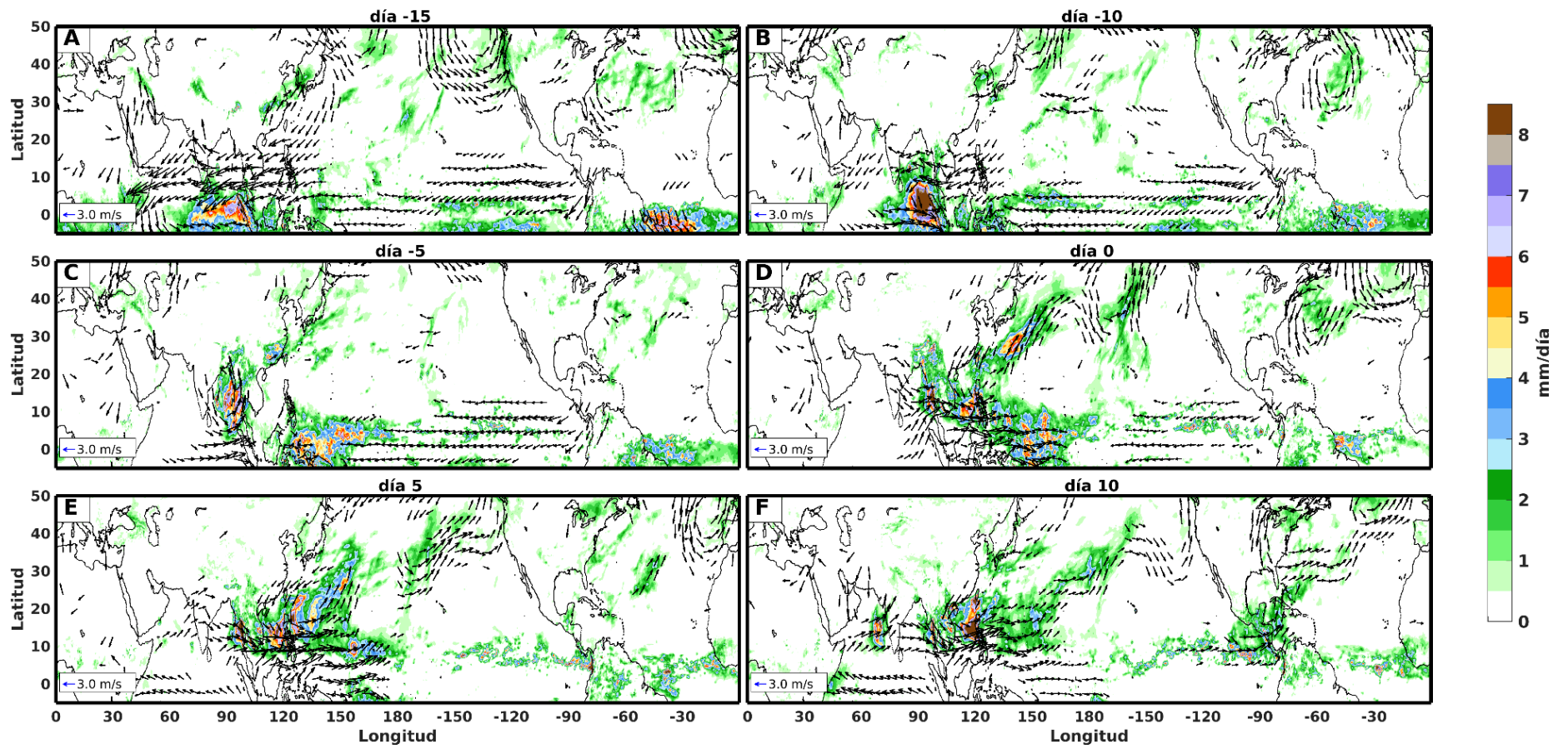


Figura A06. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de mayo.

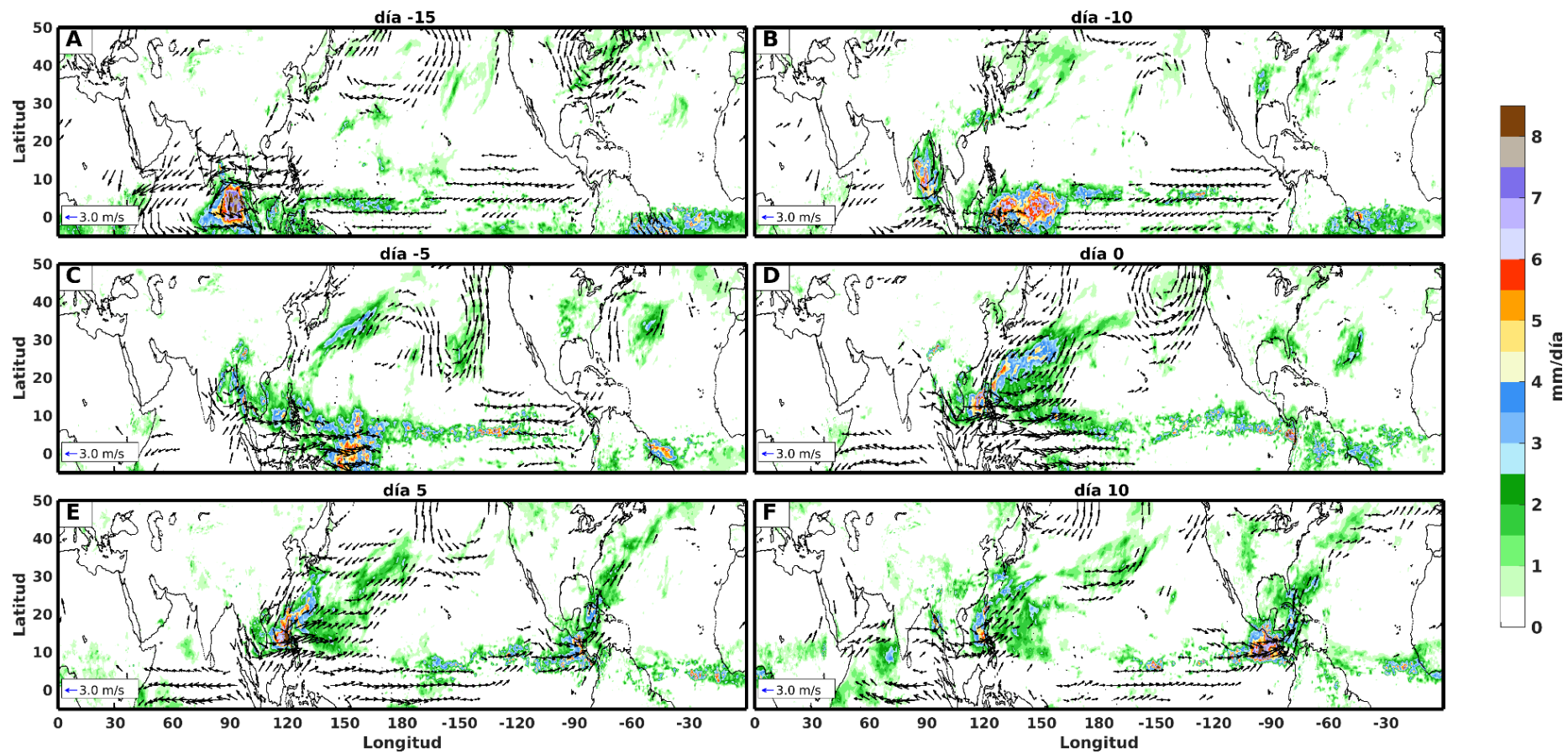


Figura A07. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de mayo.

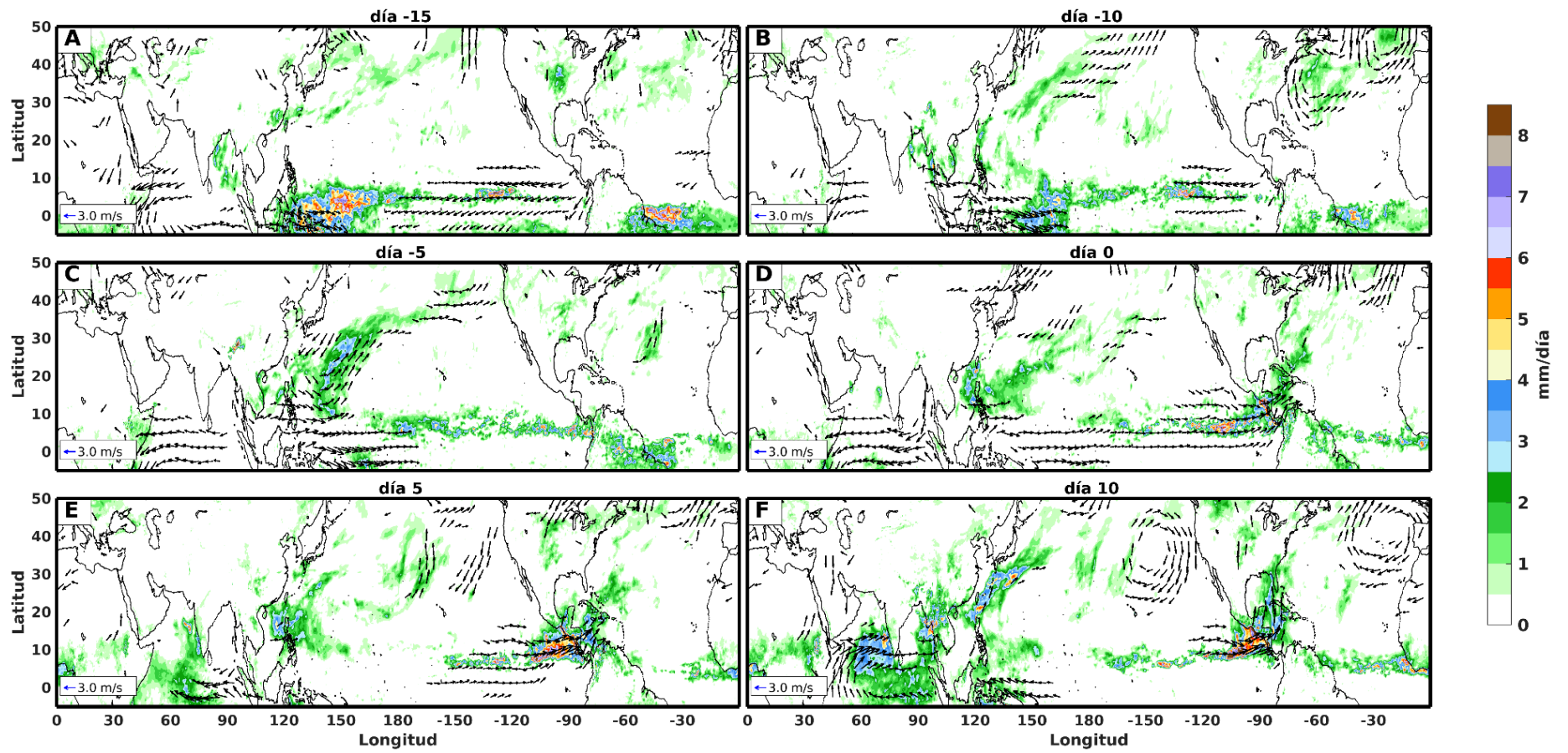


Figura A08. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de mayo.

Inicio de los mapas correspondientes al mes de junio.

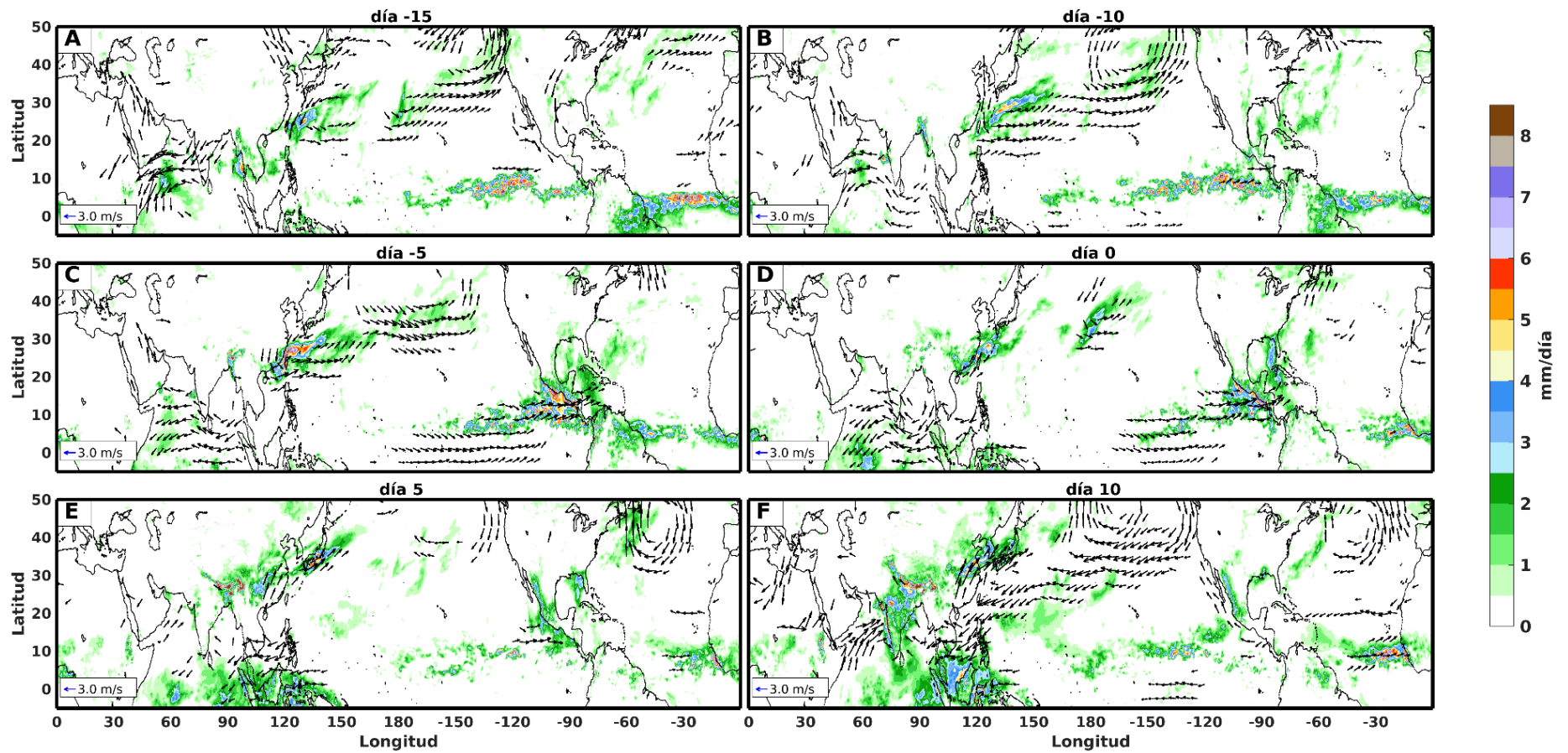


Figura A09. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de junio.

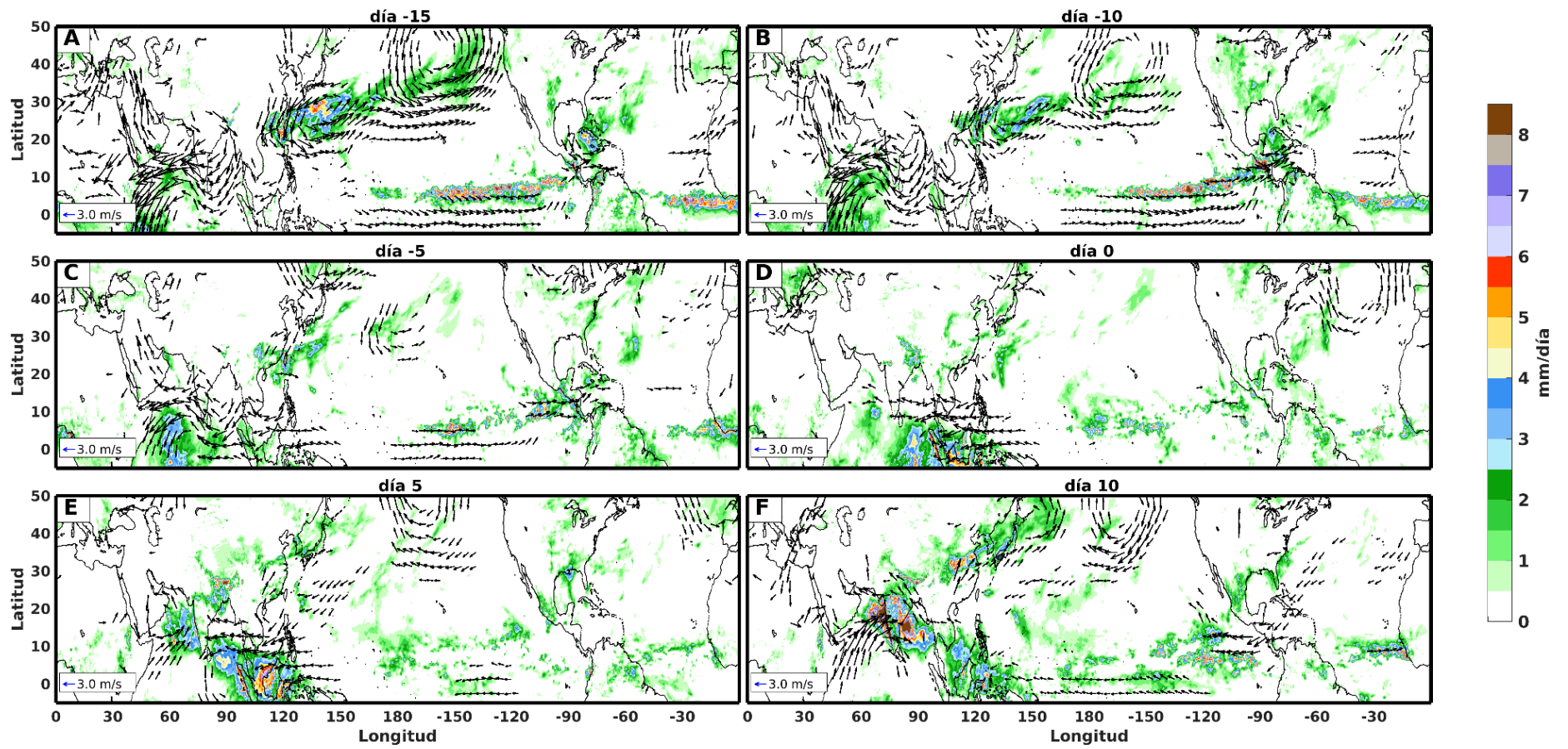


Figura A10. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de junio.

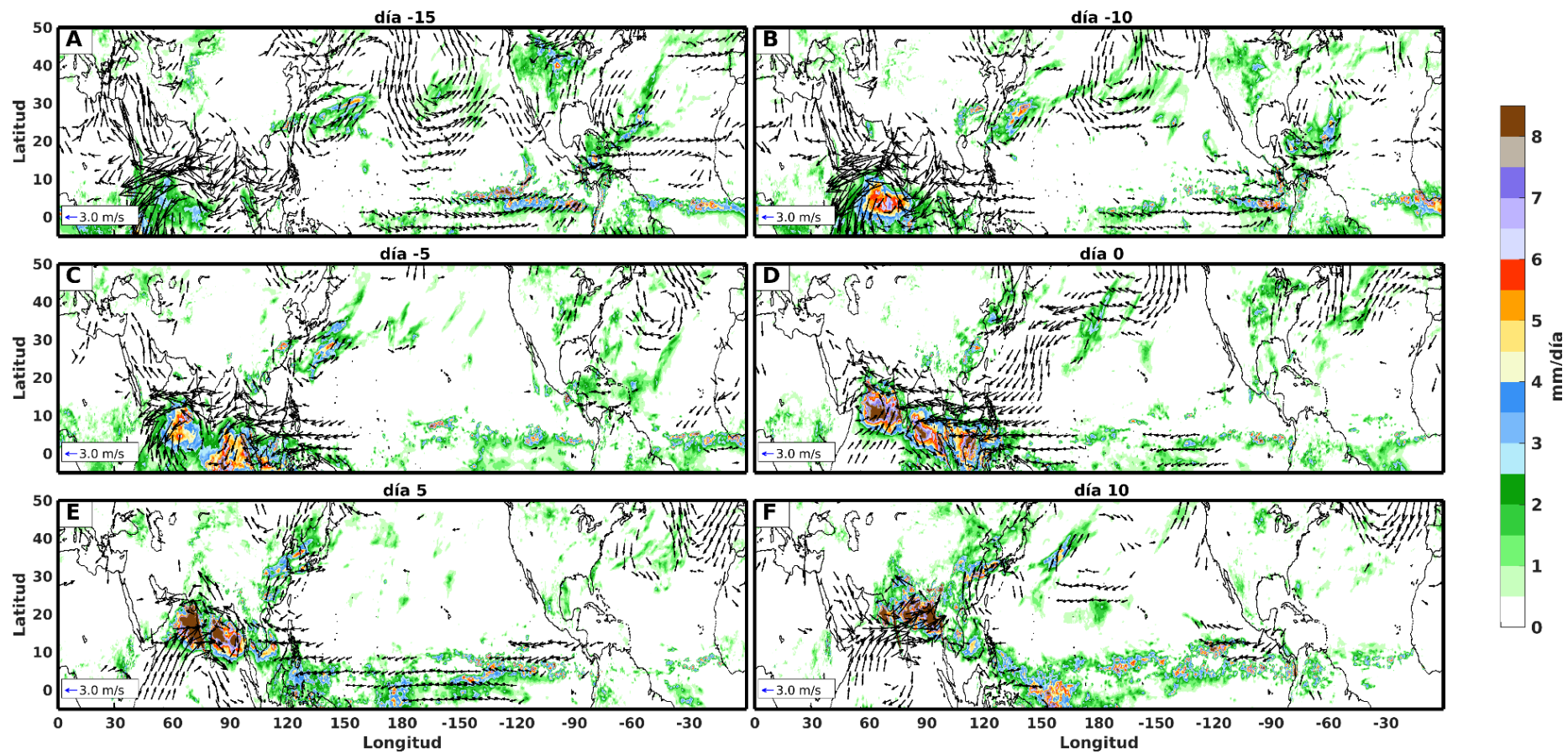


Figura A11. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de junio.

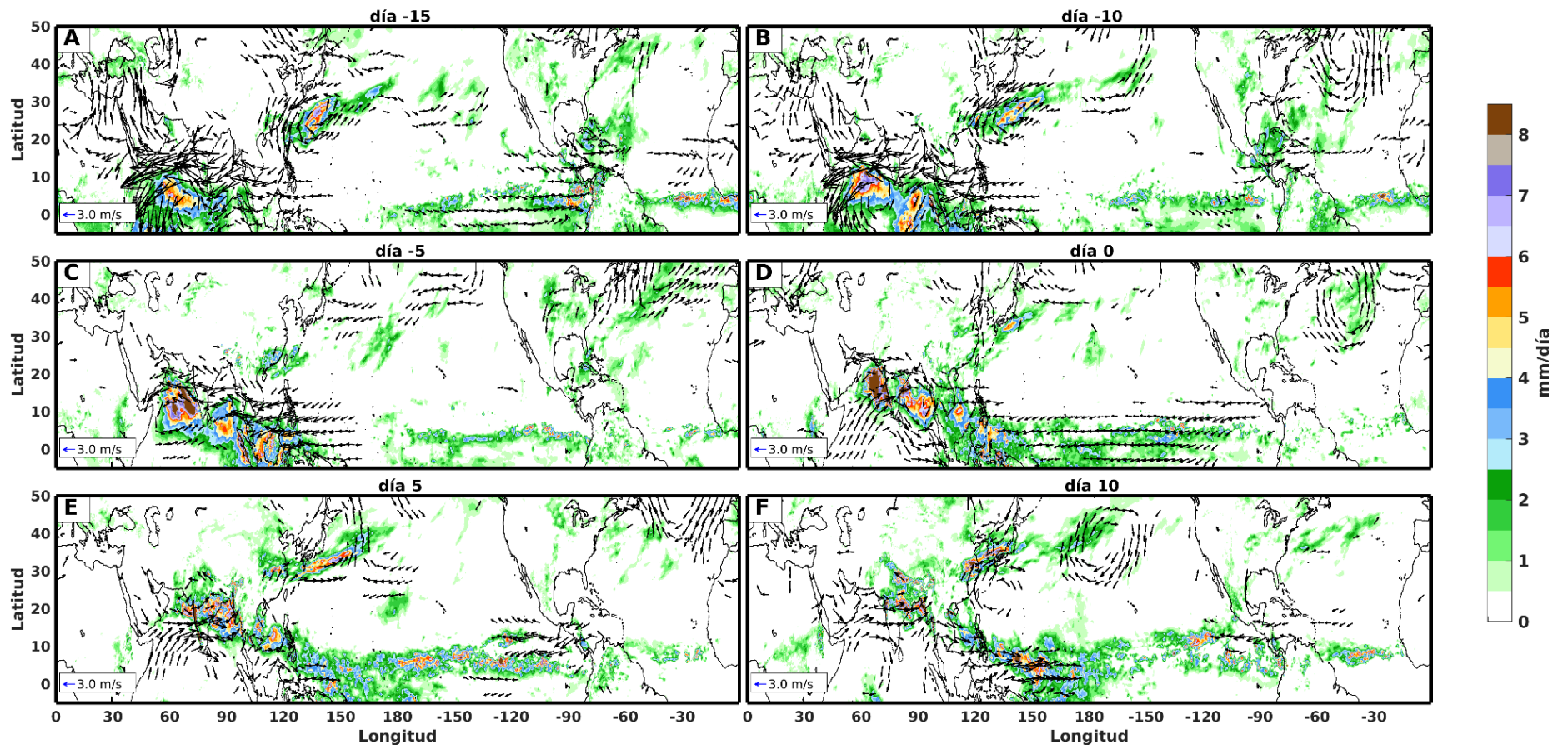


Figura A12. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de junio.

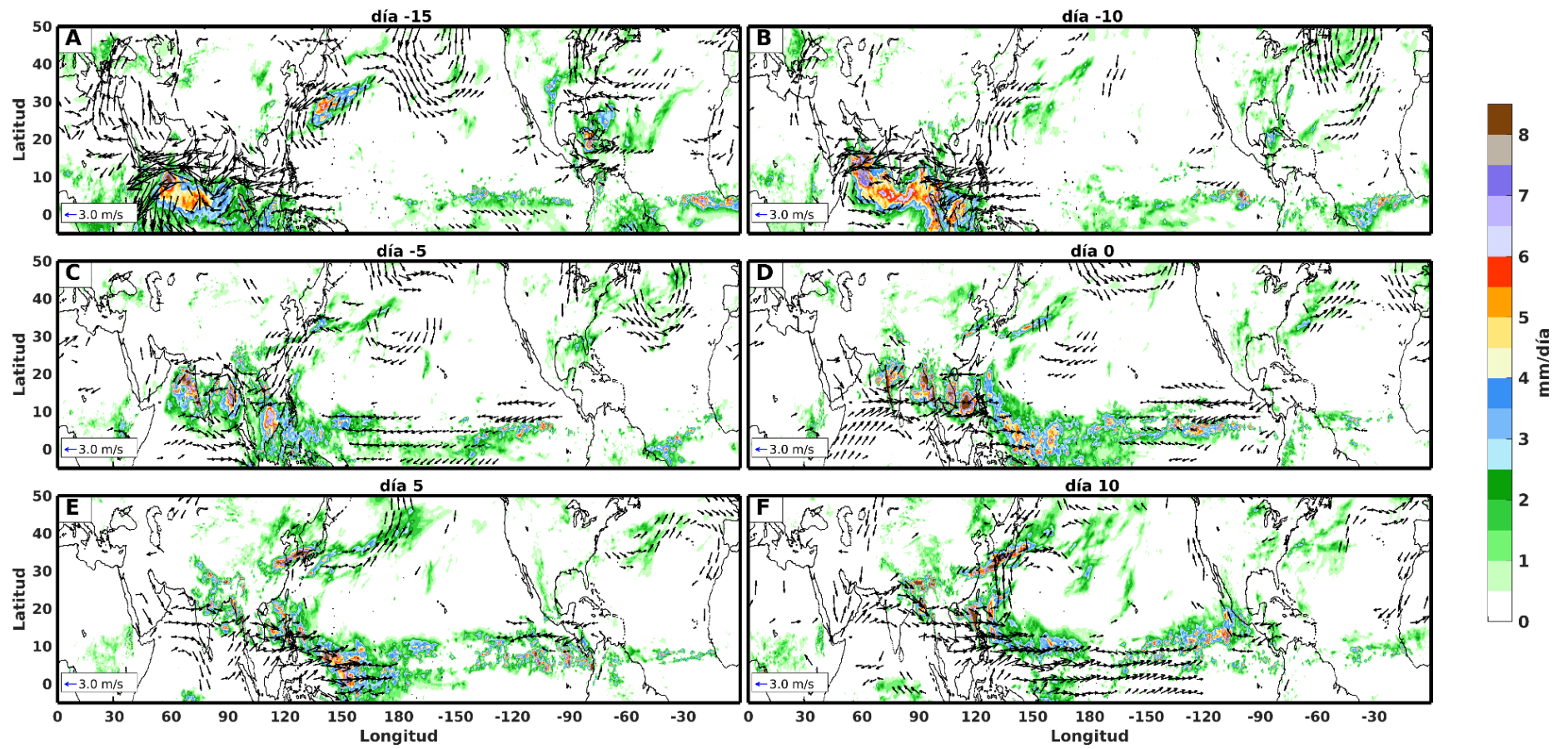


Figura A13. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de junio.

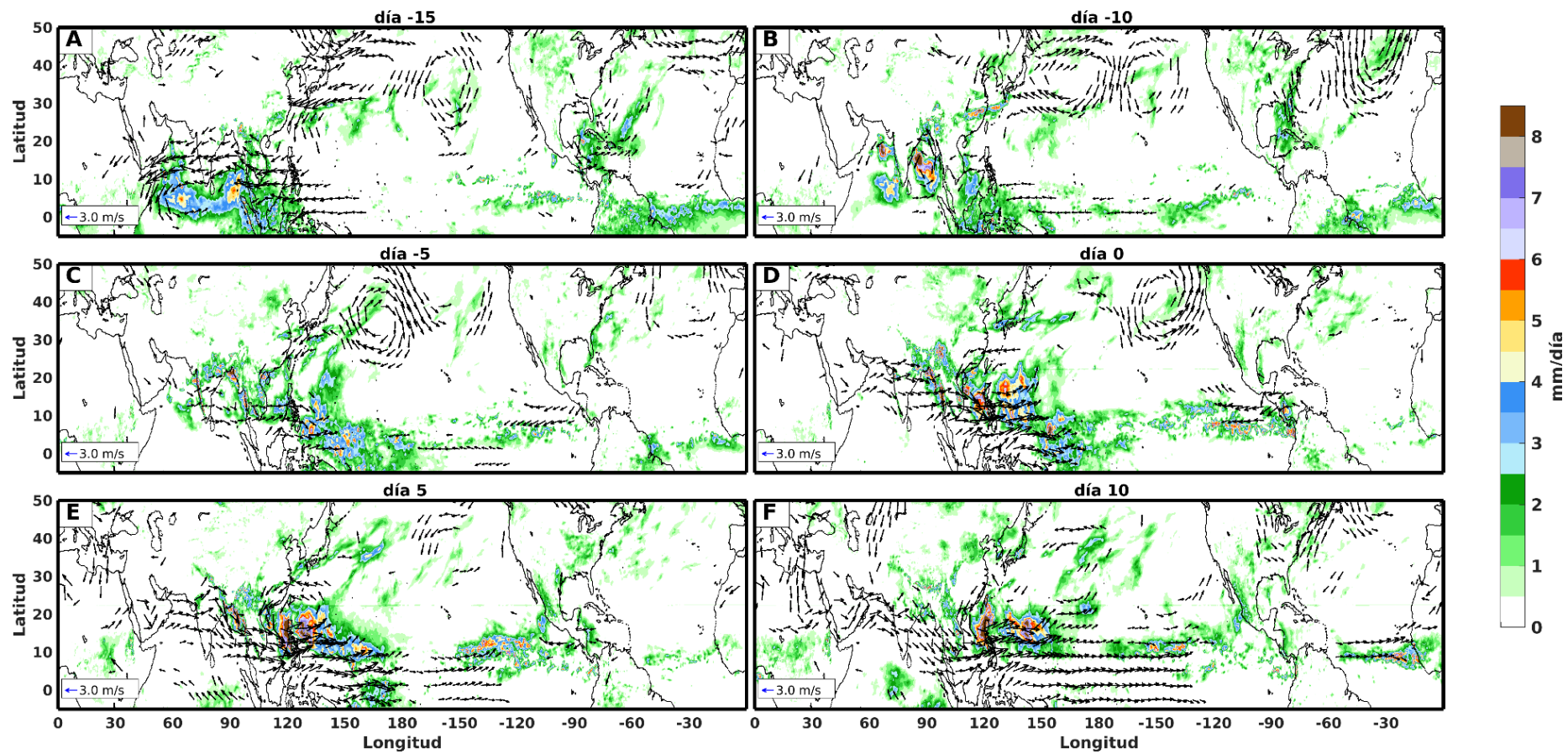


Figura A14. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de junio.

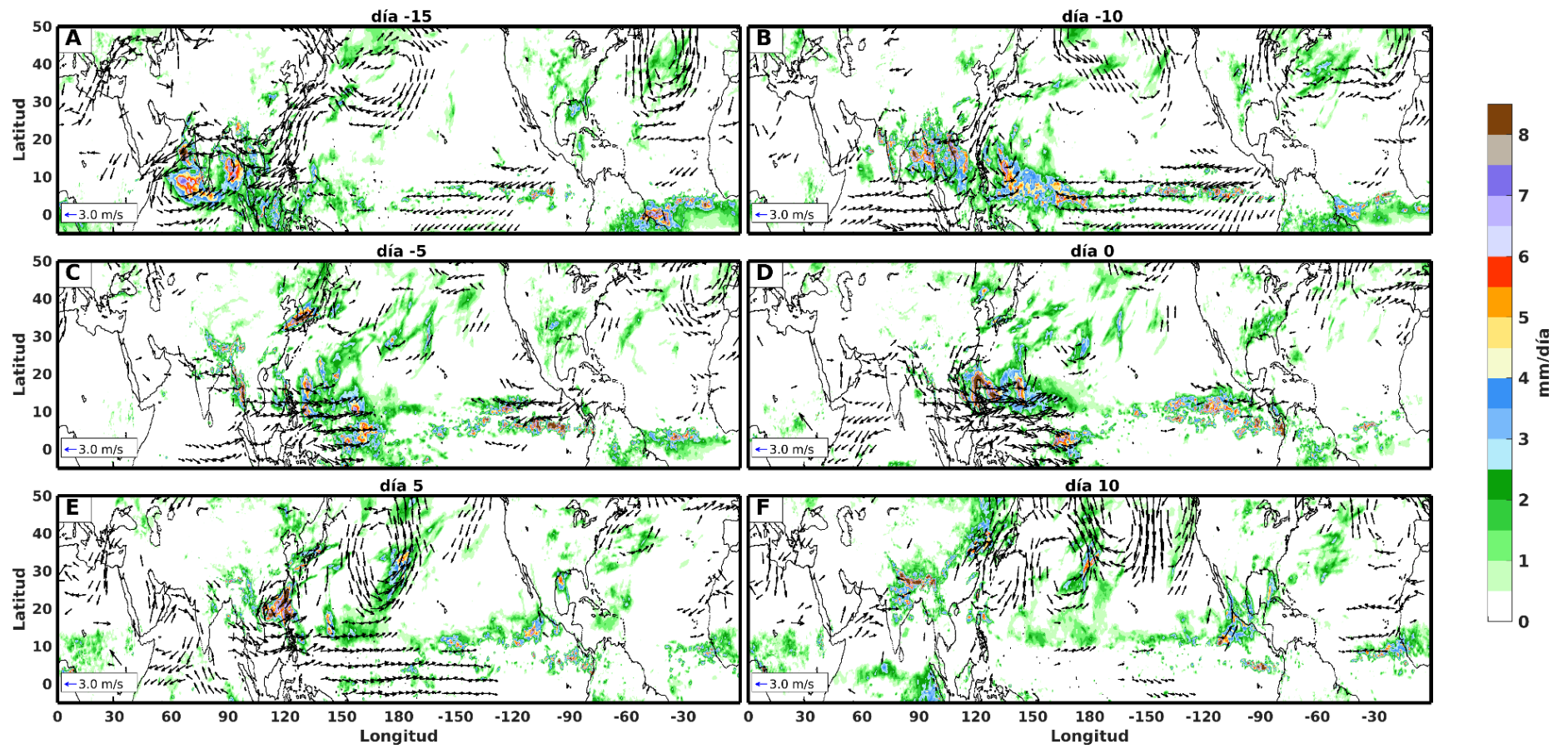


Figura A15. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de junio.

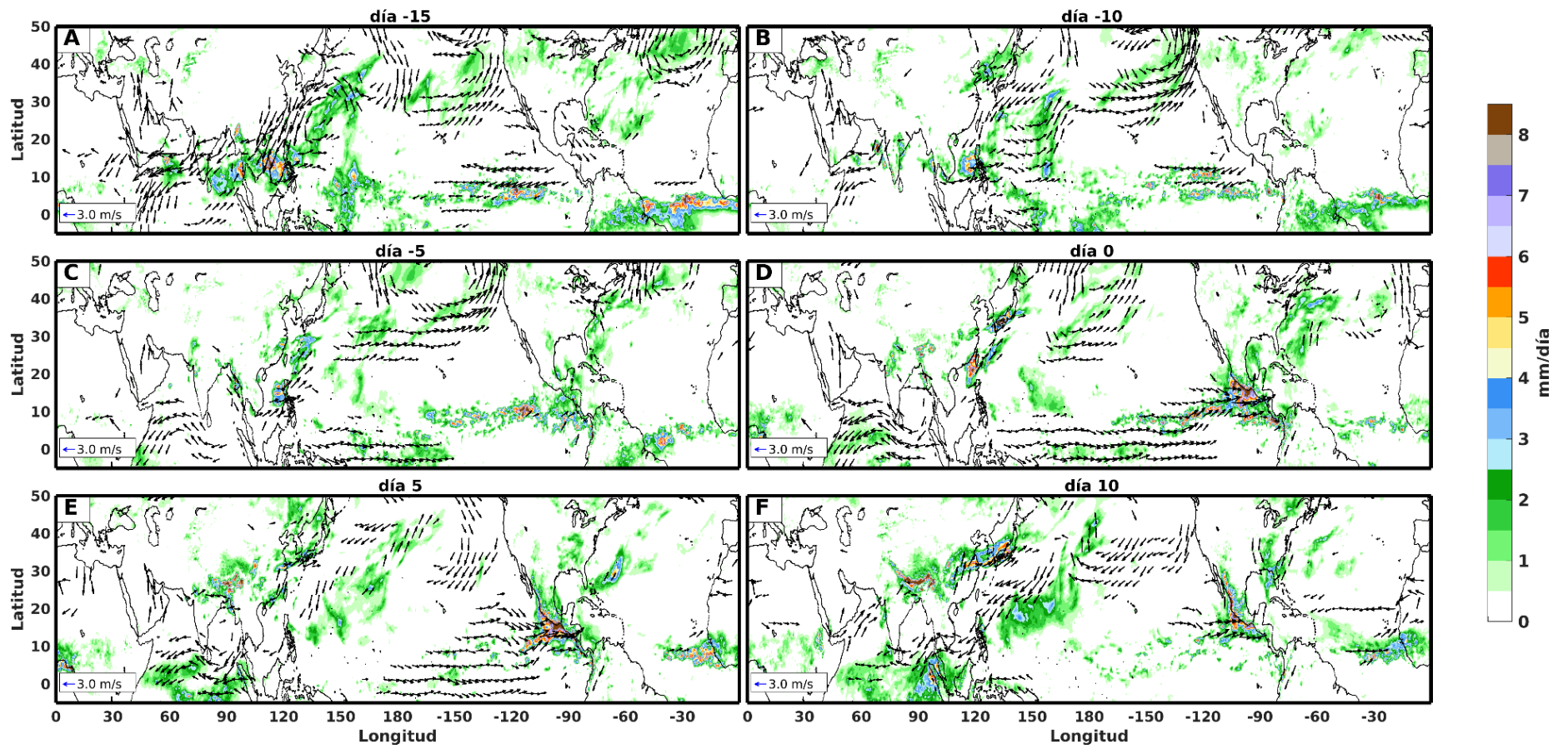


Figura A16. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de junio.

Inicio de los mapas correspondientes al mes de julio.

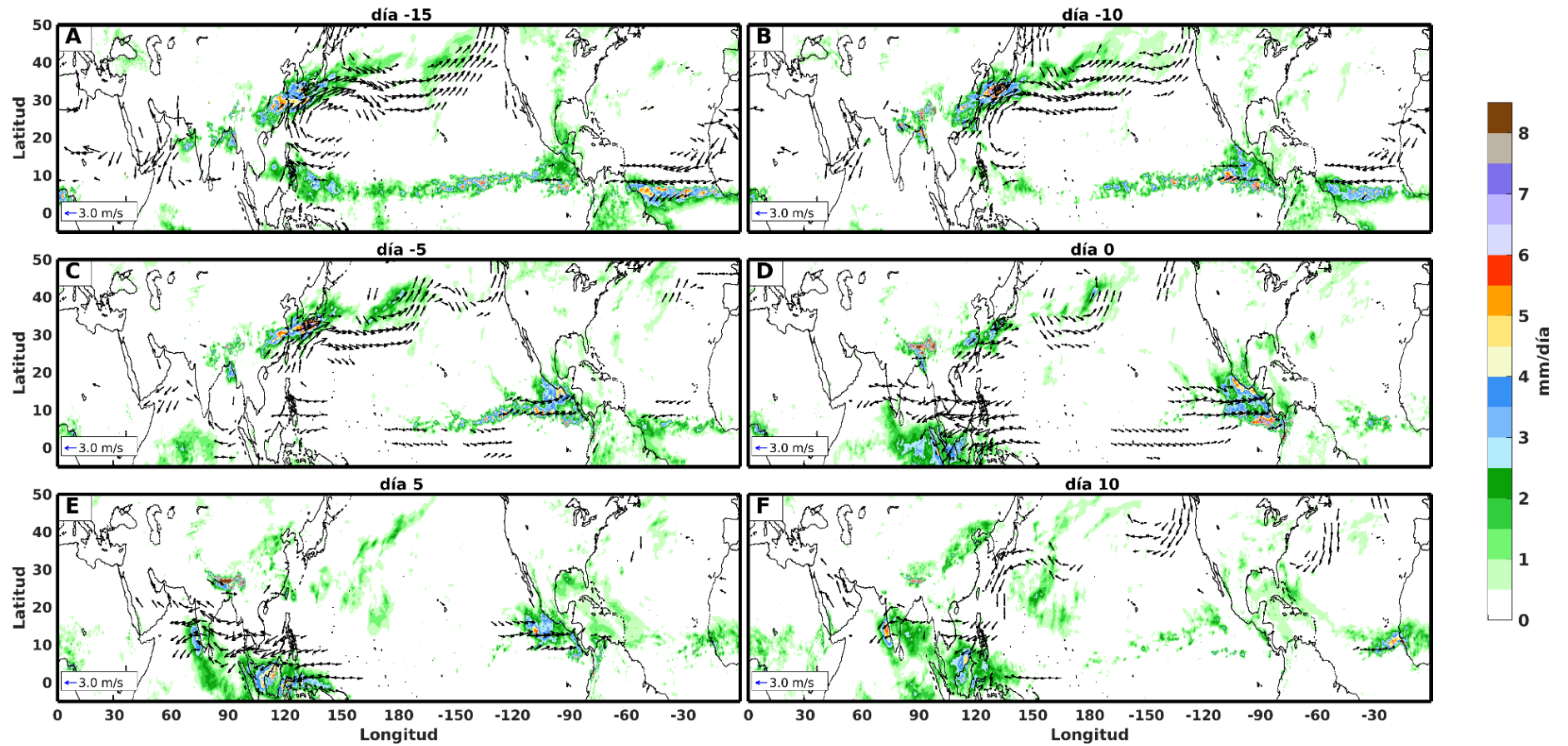


Figura A17. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de julio.

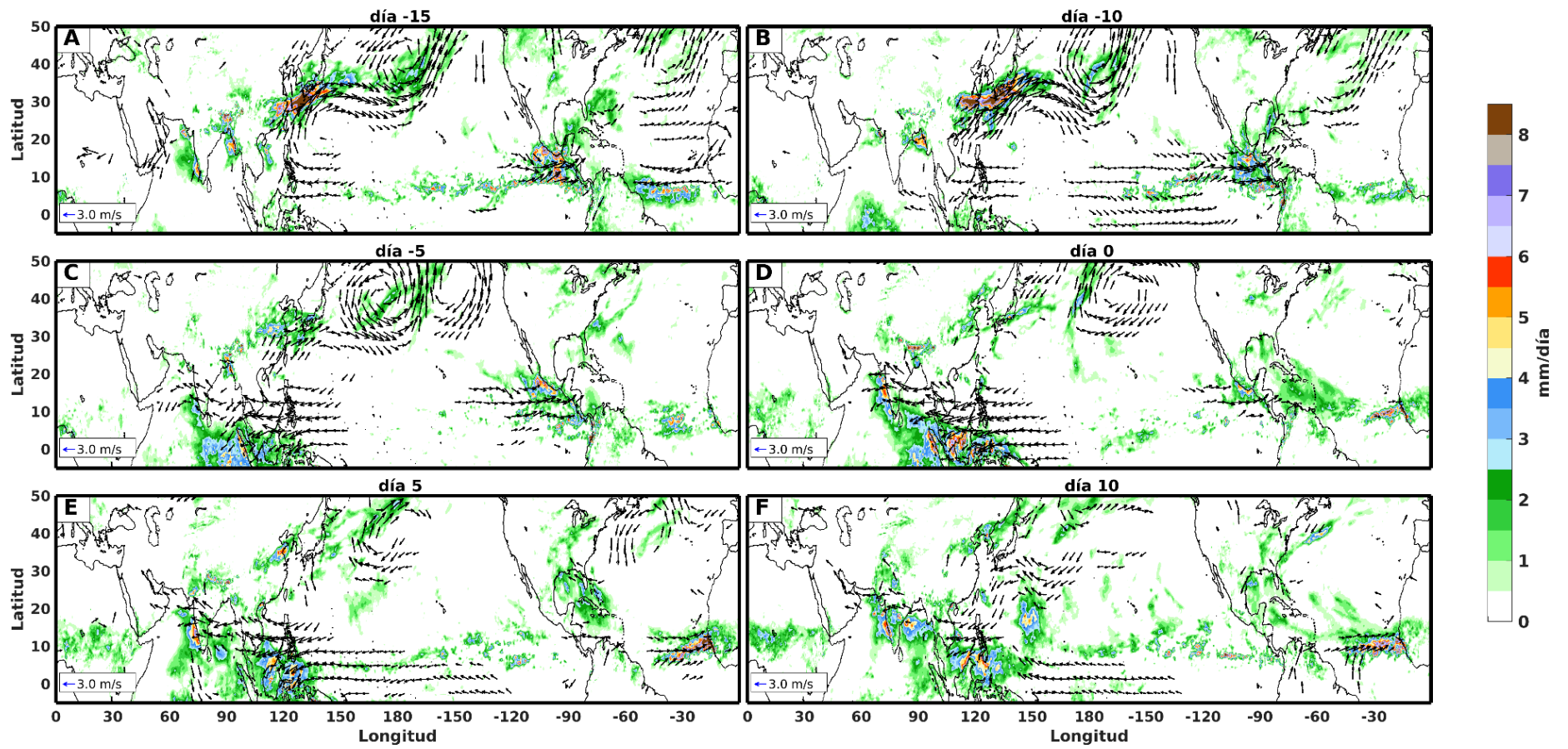


Figura A18. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de julio.

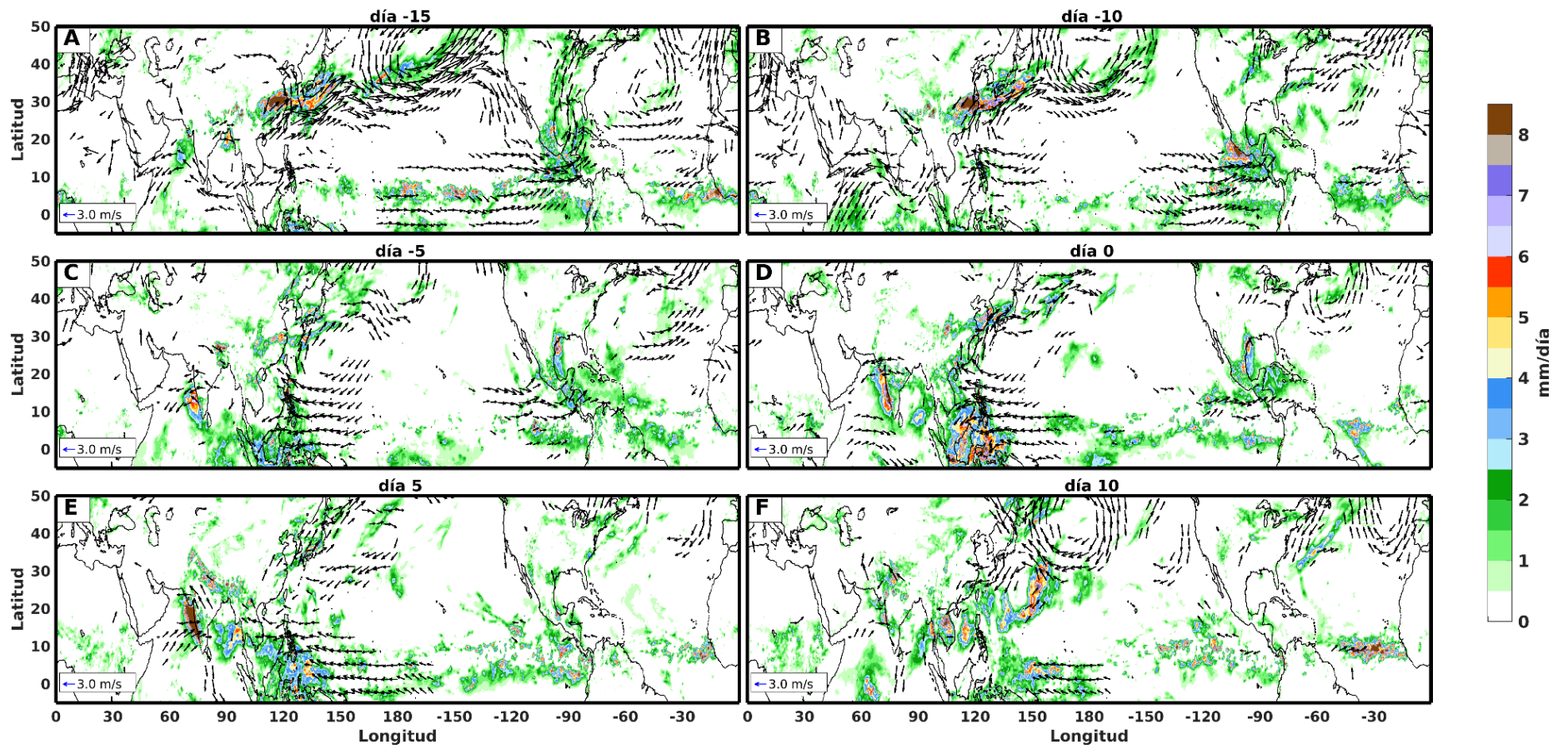


Figura A19. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de julio.

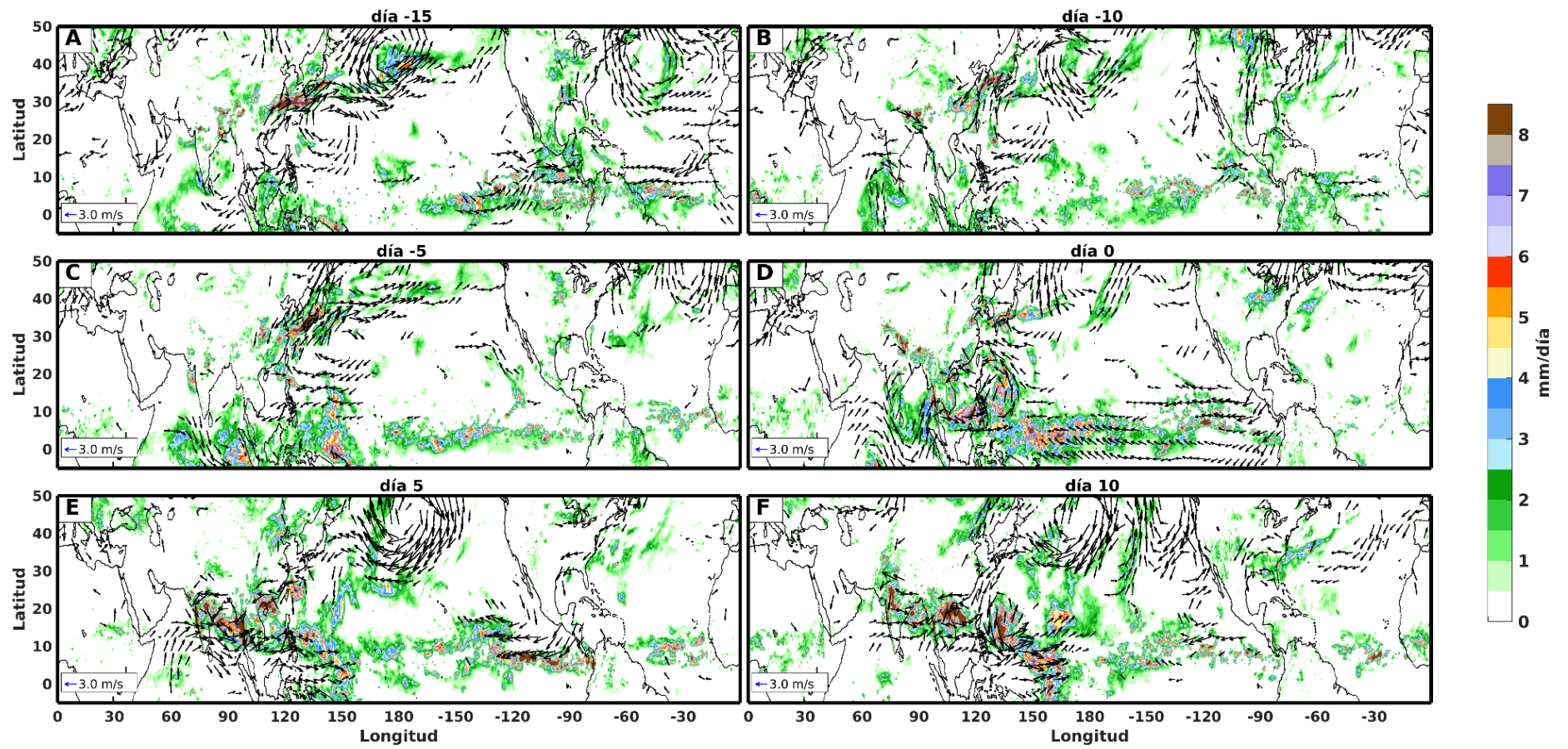


Figura A20. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de julio.

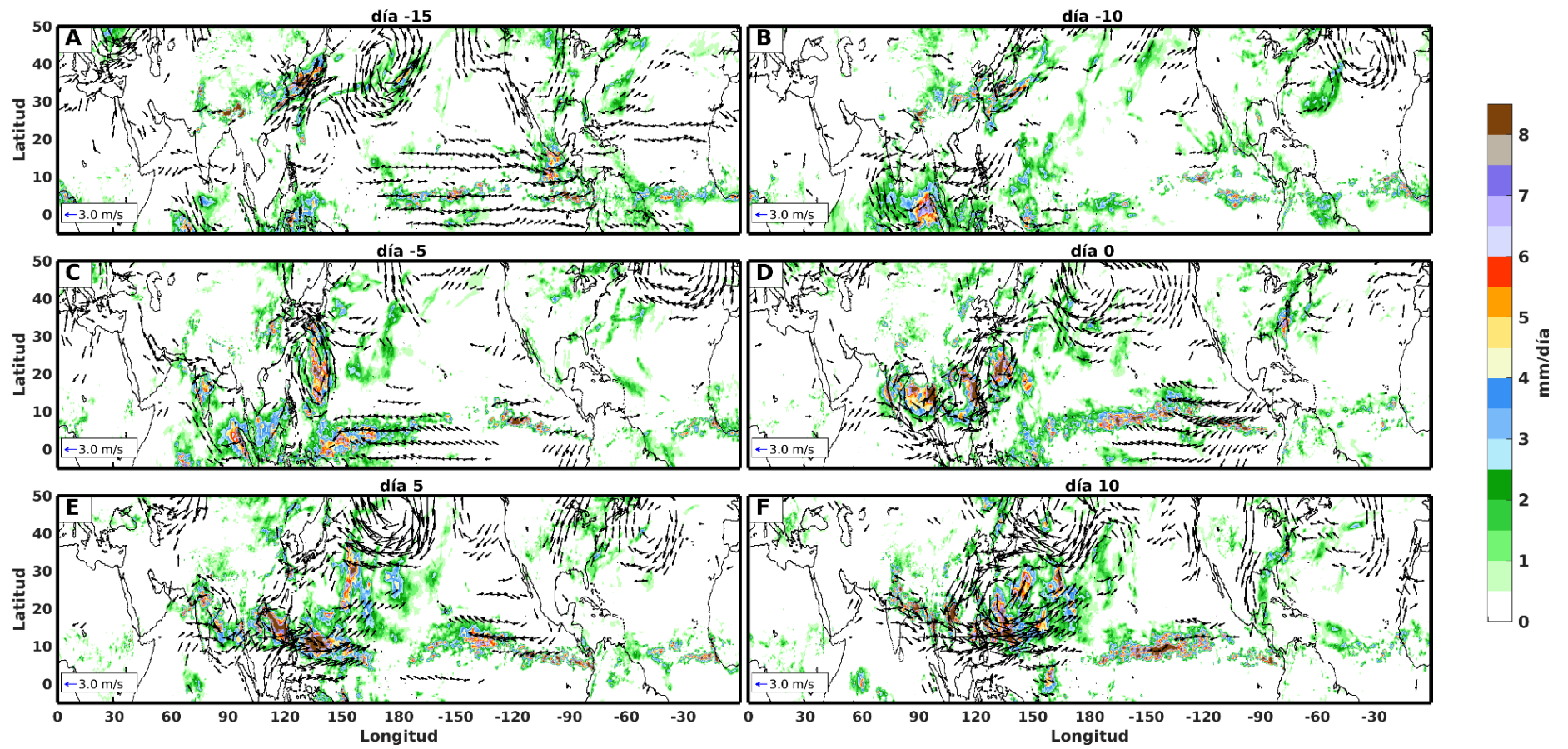


Figura A21. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de julio.

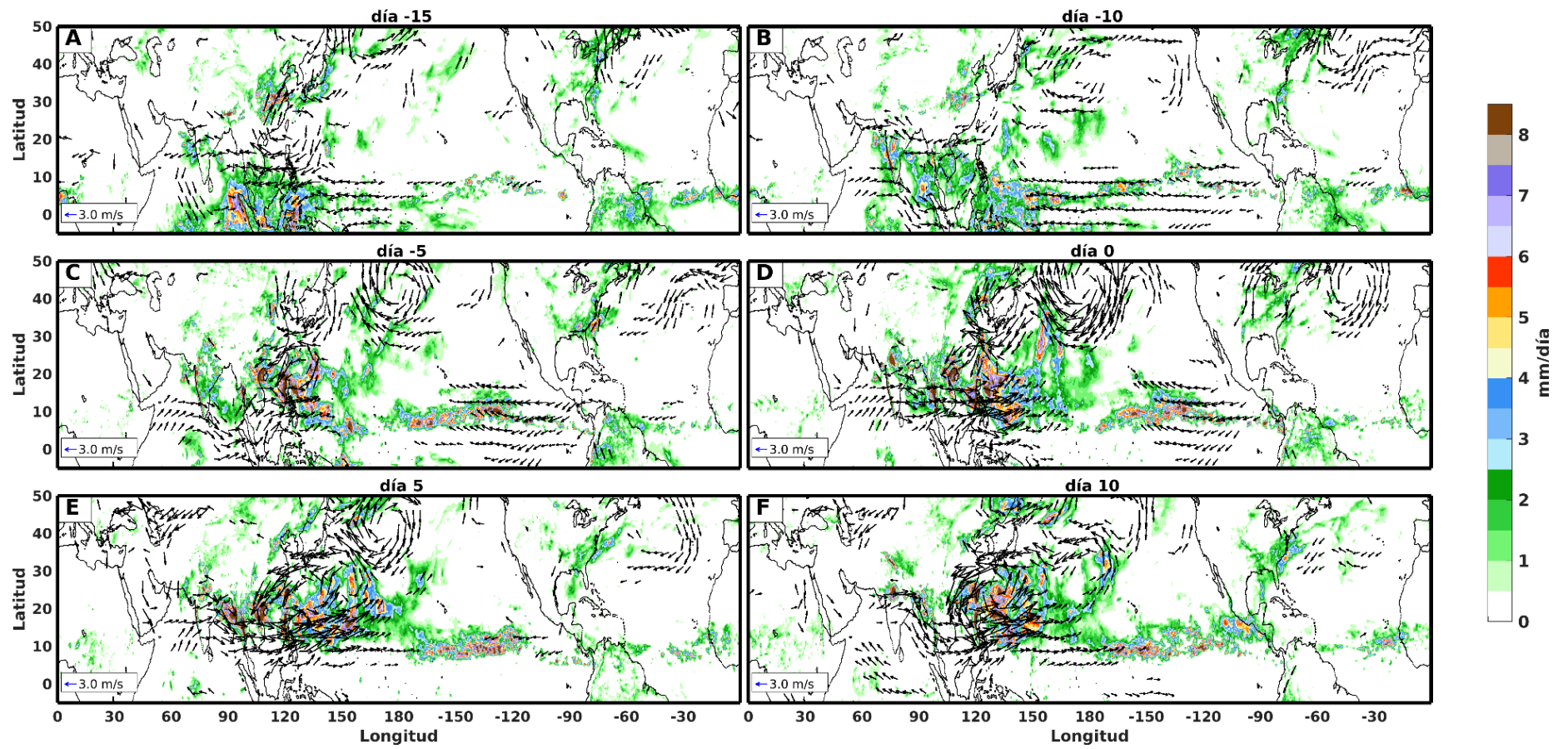


Figura A22. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de julio.

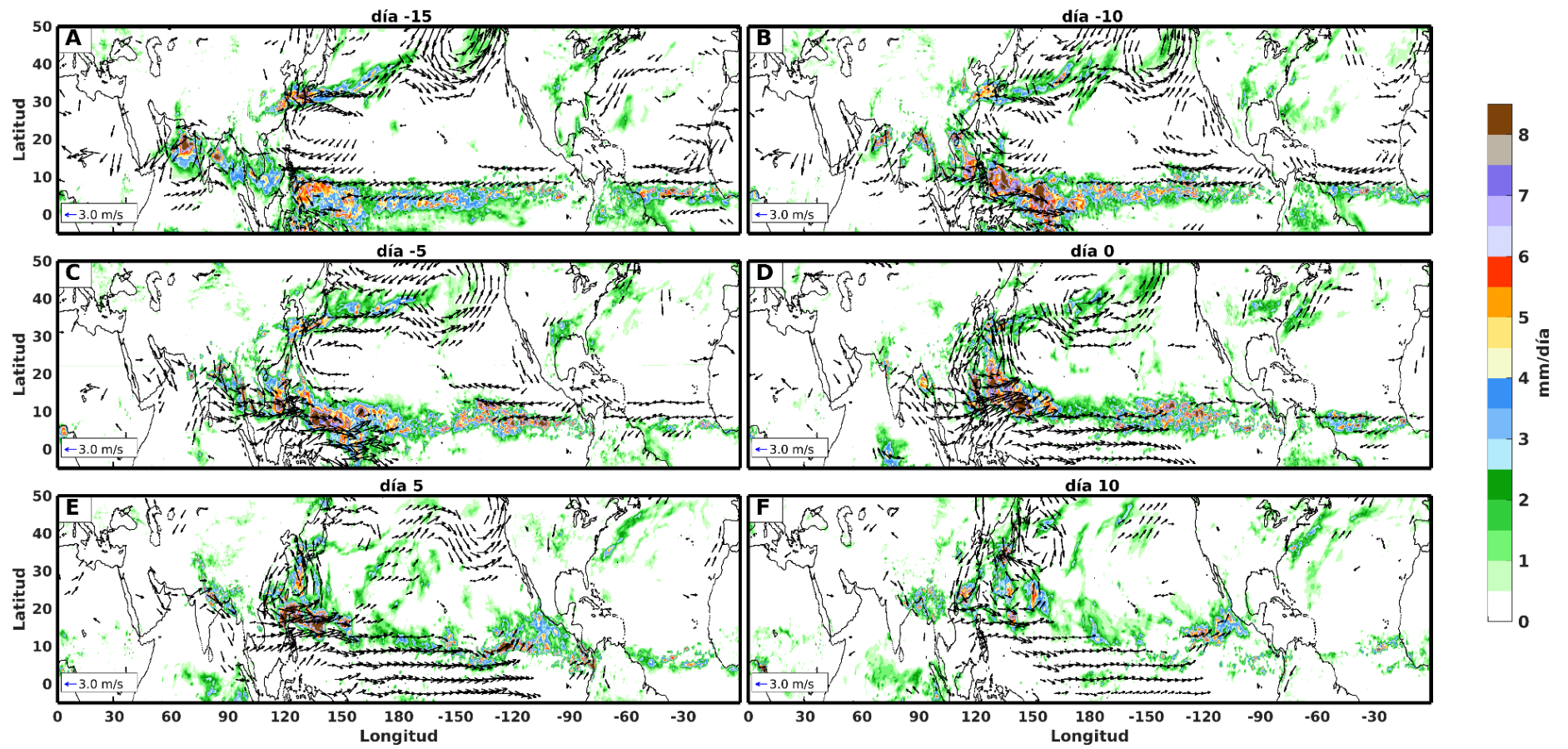


Figura A23. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de julio.

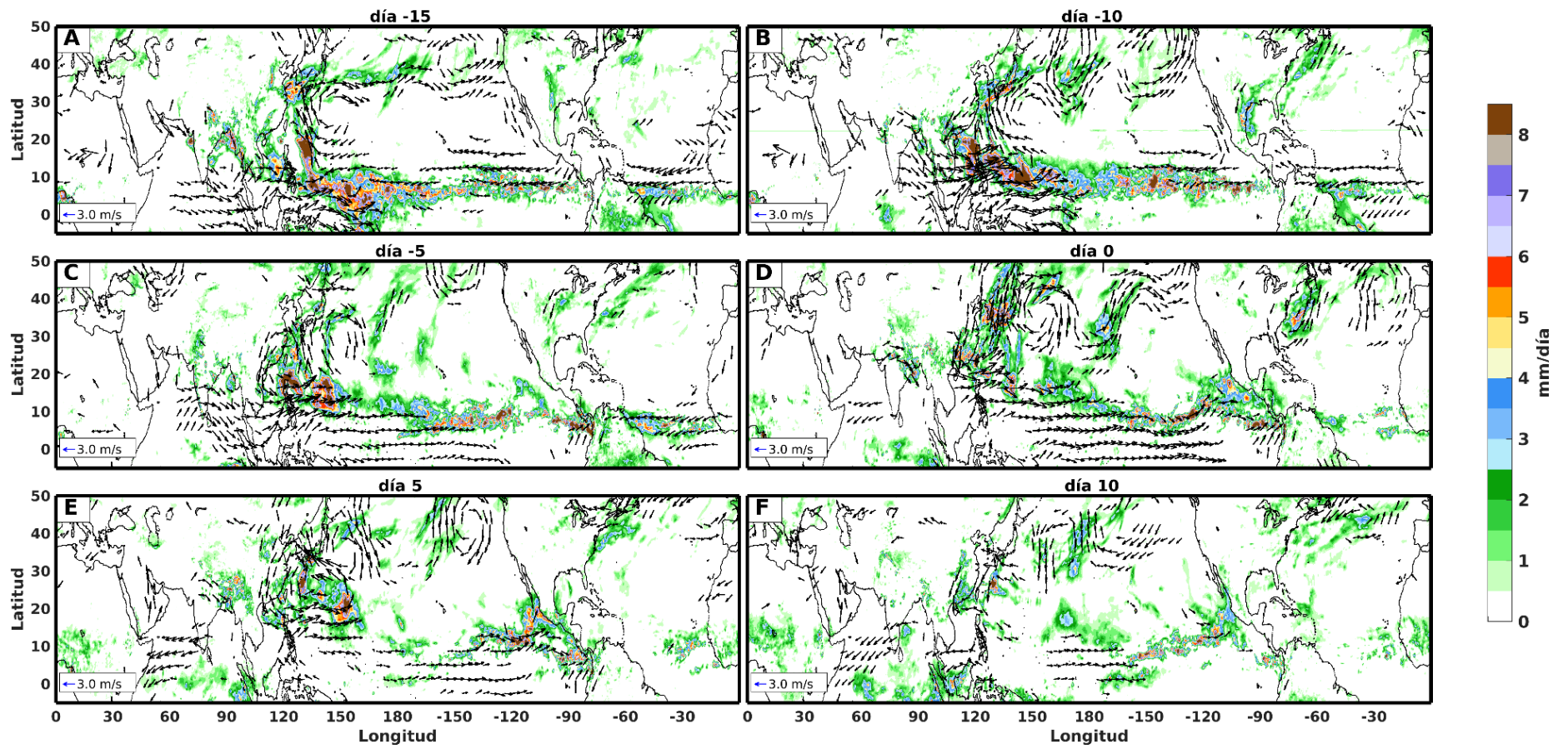


Figura A24. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de julio.

Inicio de los mapas correspondientes al mes de septiembre.

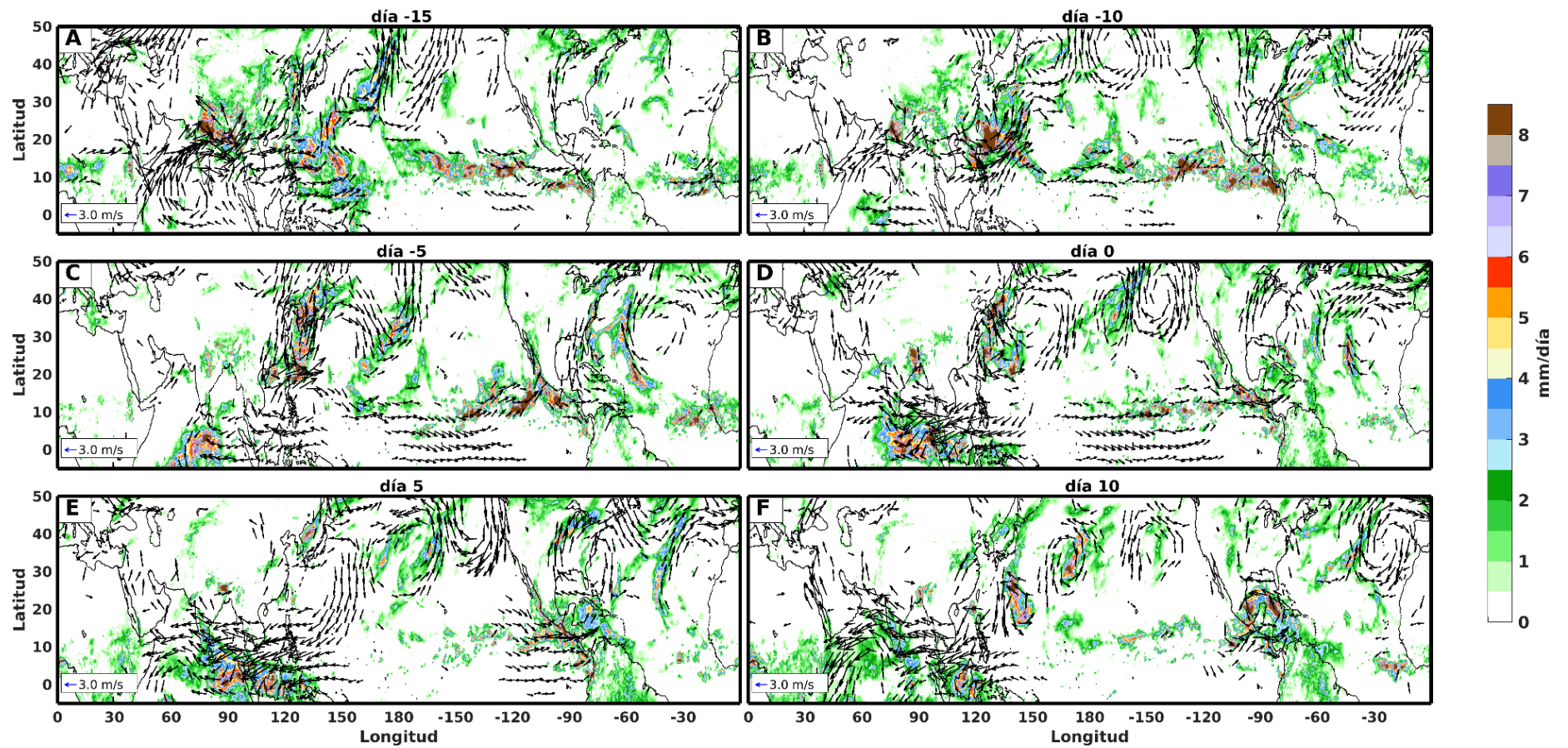


Figura A25. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de septiembre.

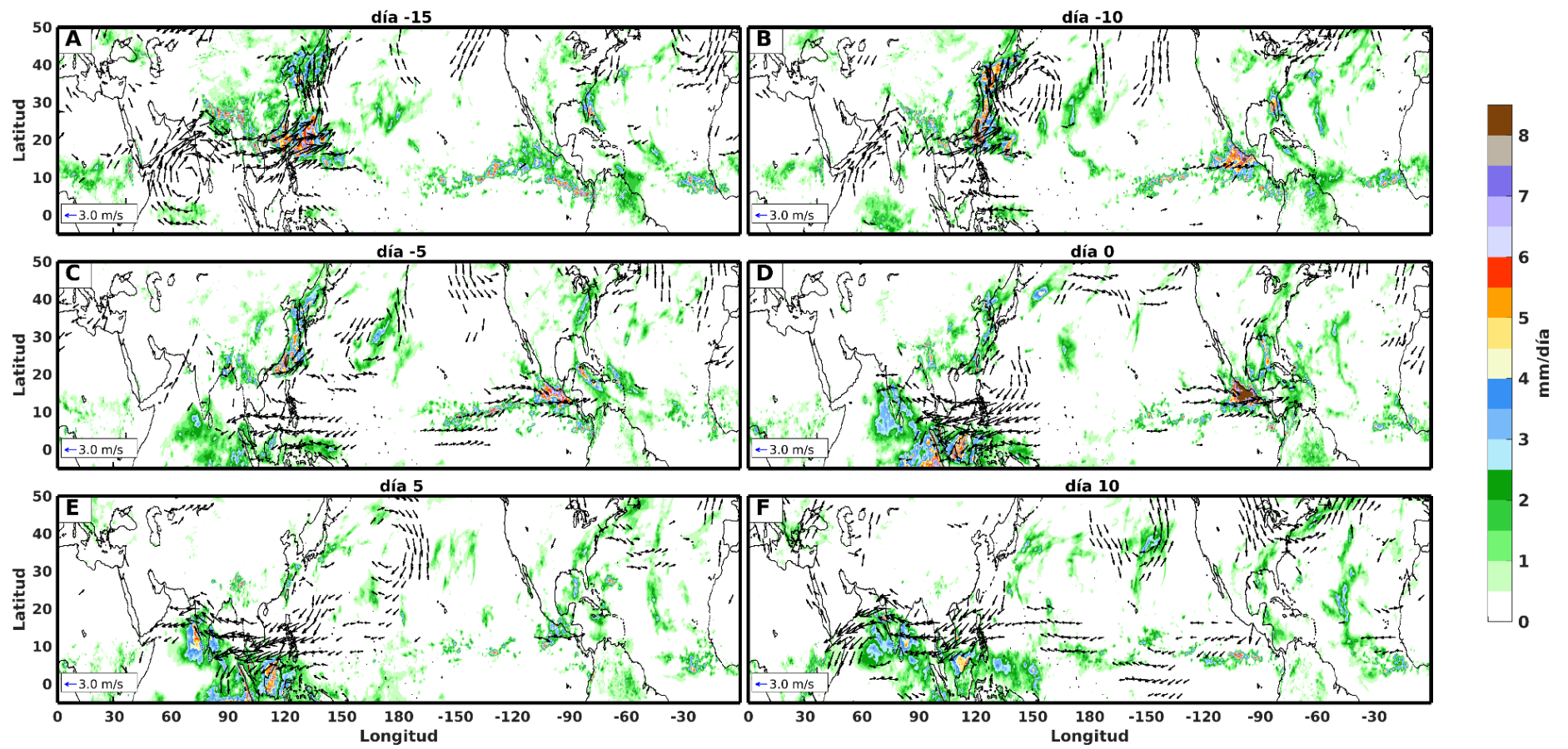


Figura A26. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de septiembre.

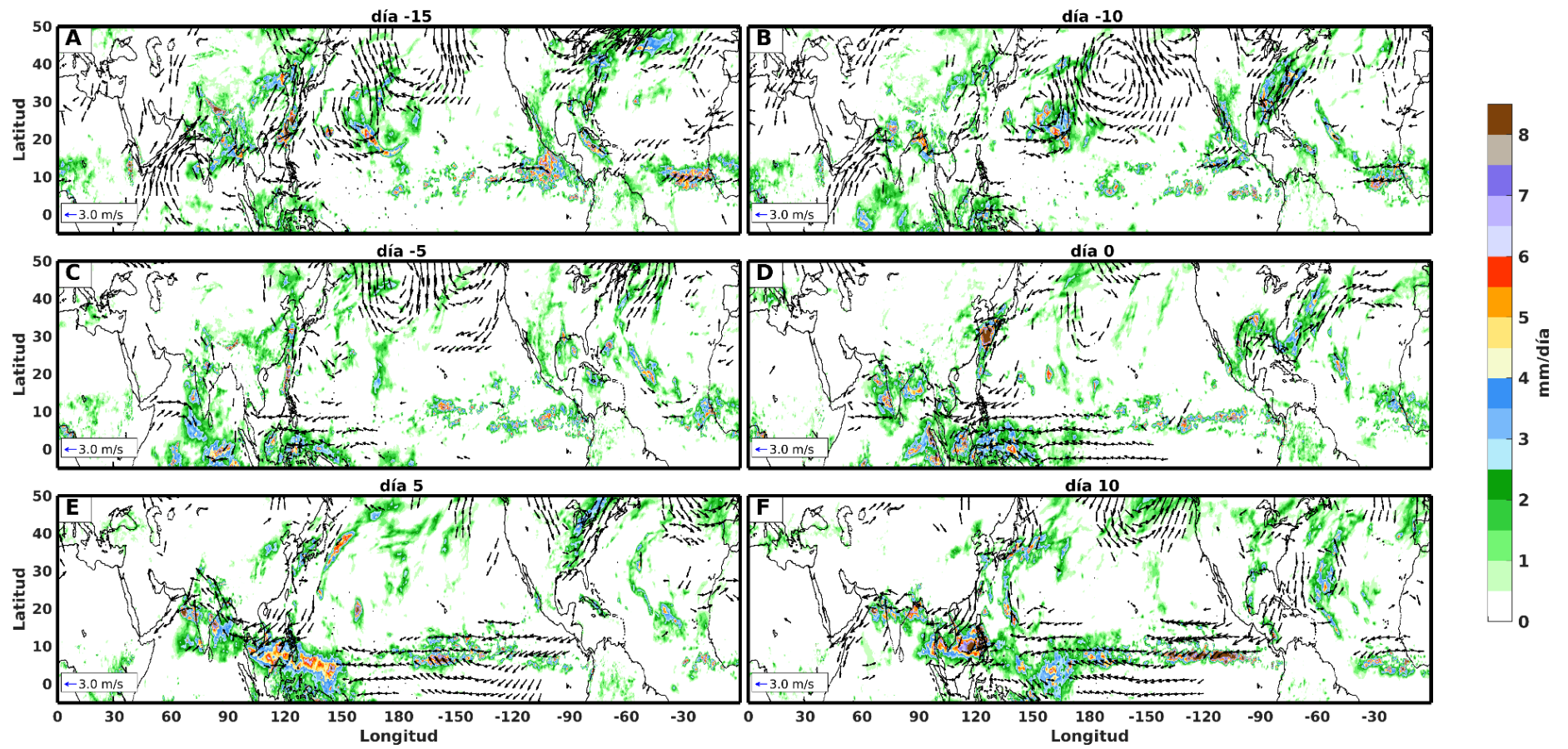


Figura A27. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de septiembre.

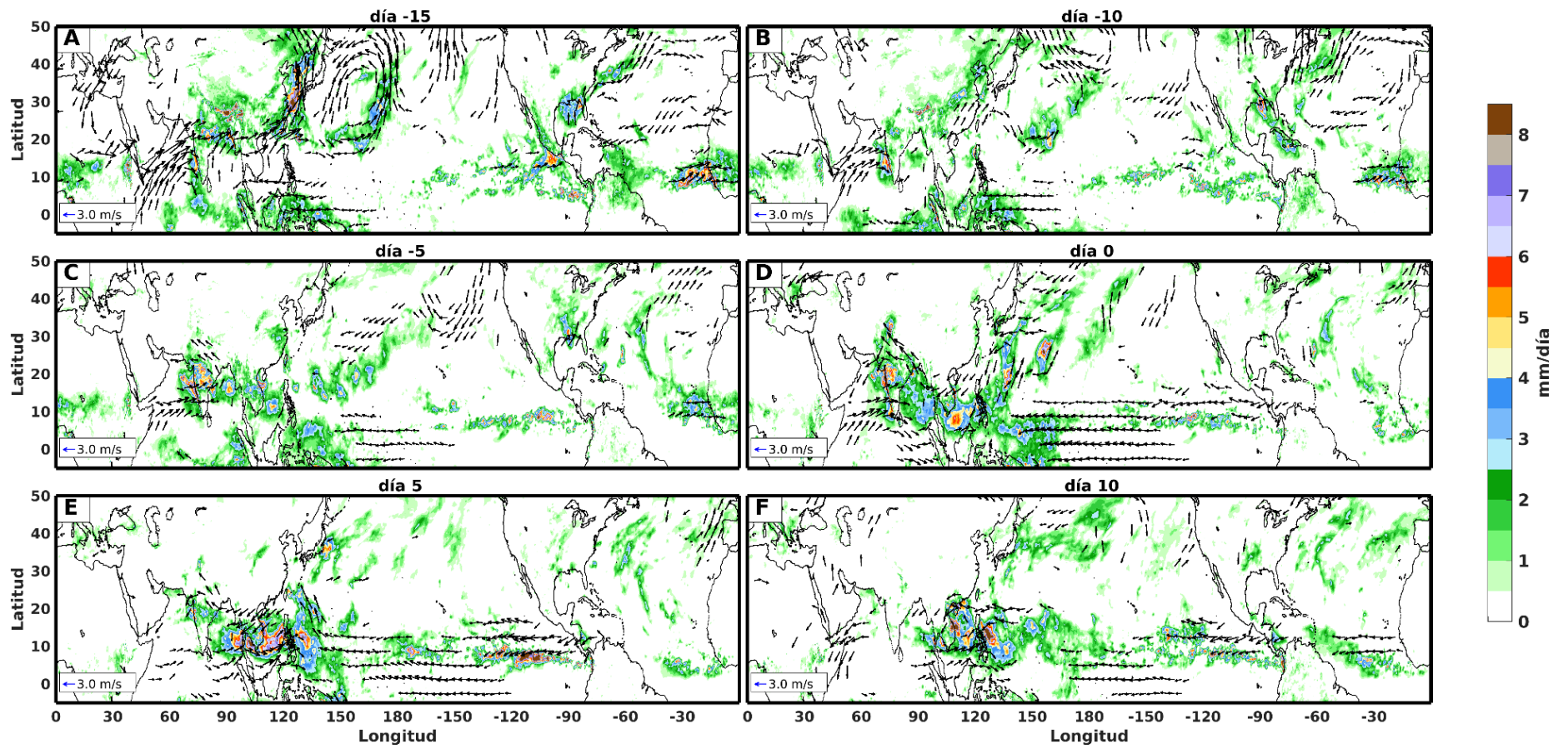


Figura A28. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de septiembre.

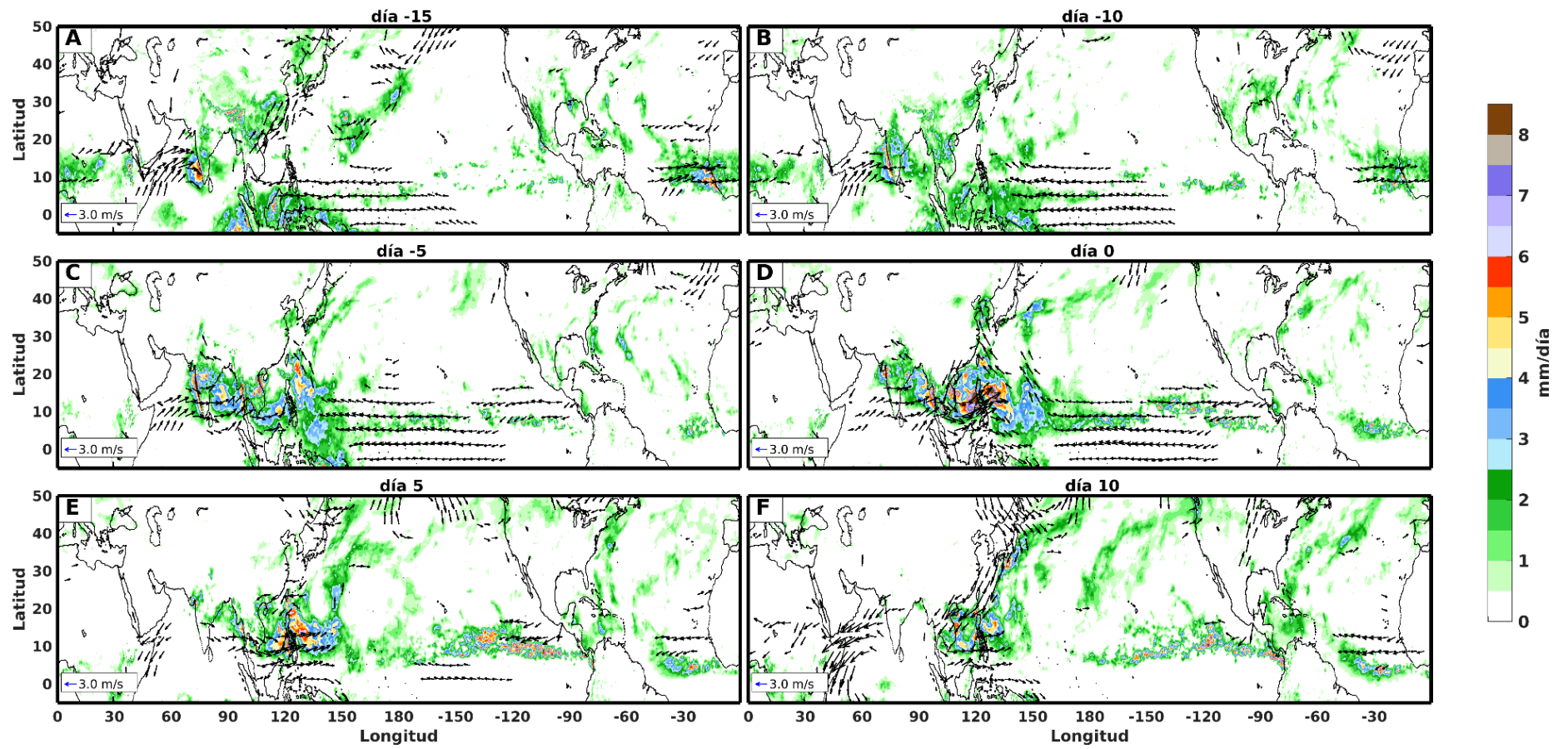


Figura A29. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de septiembre.

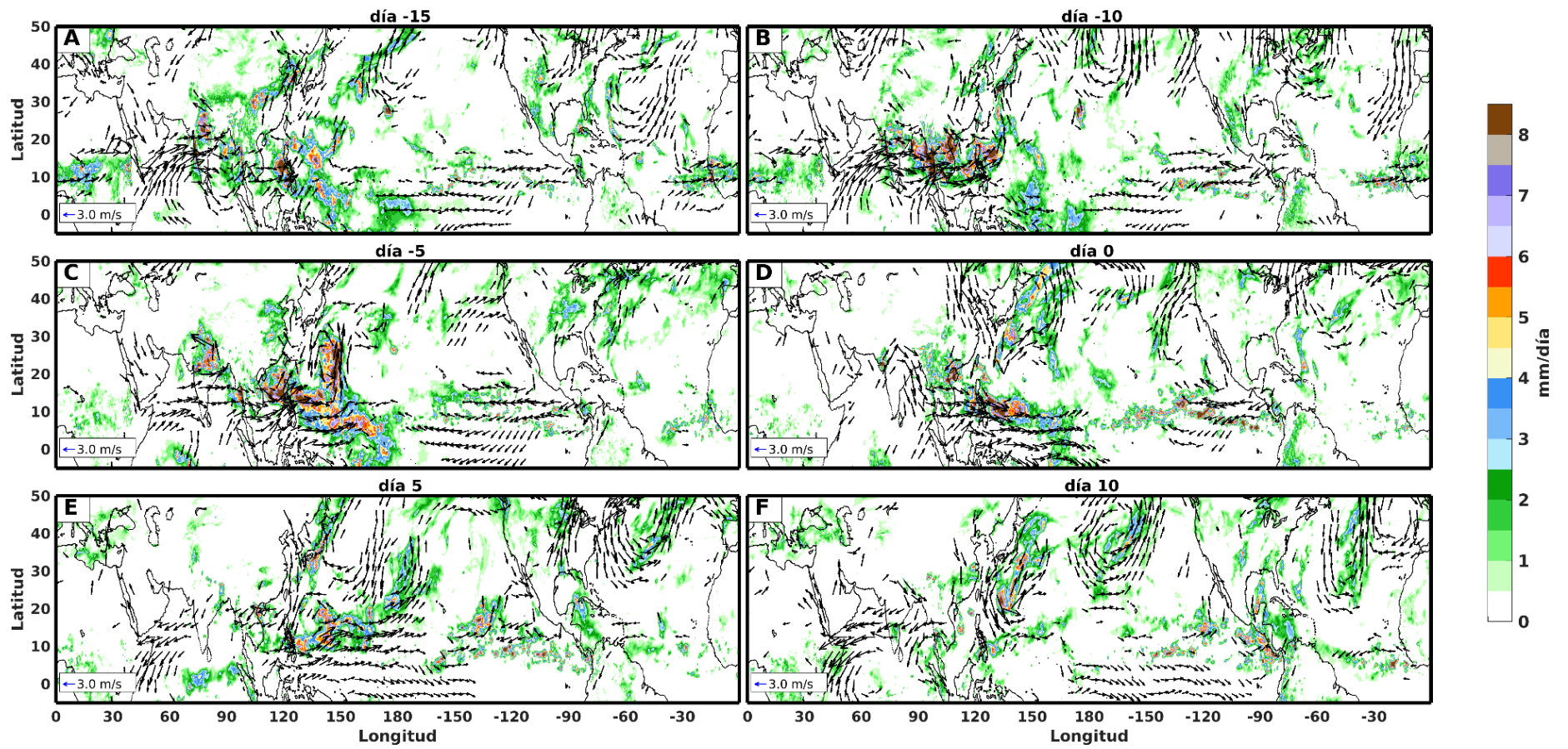


Figura A30. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de septiembre.

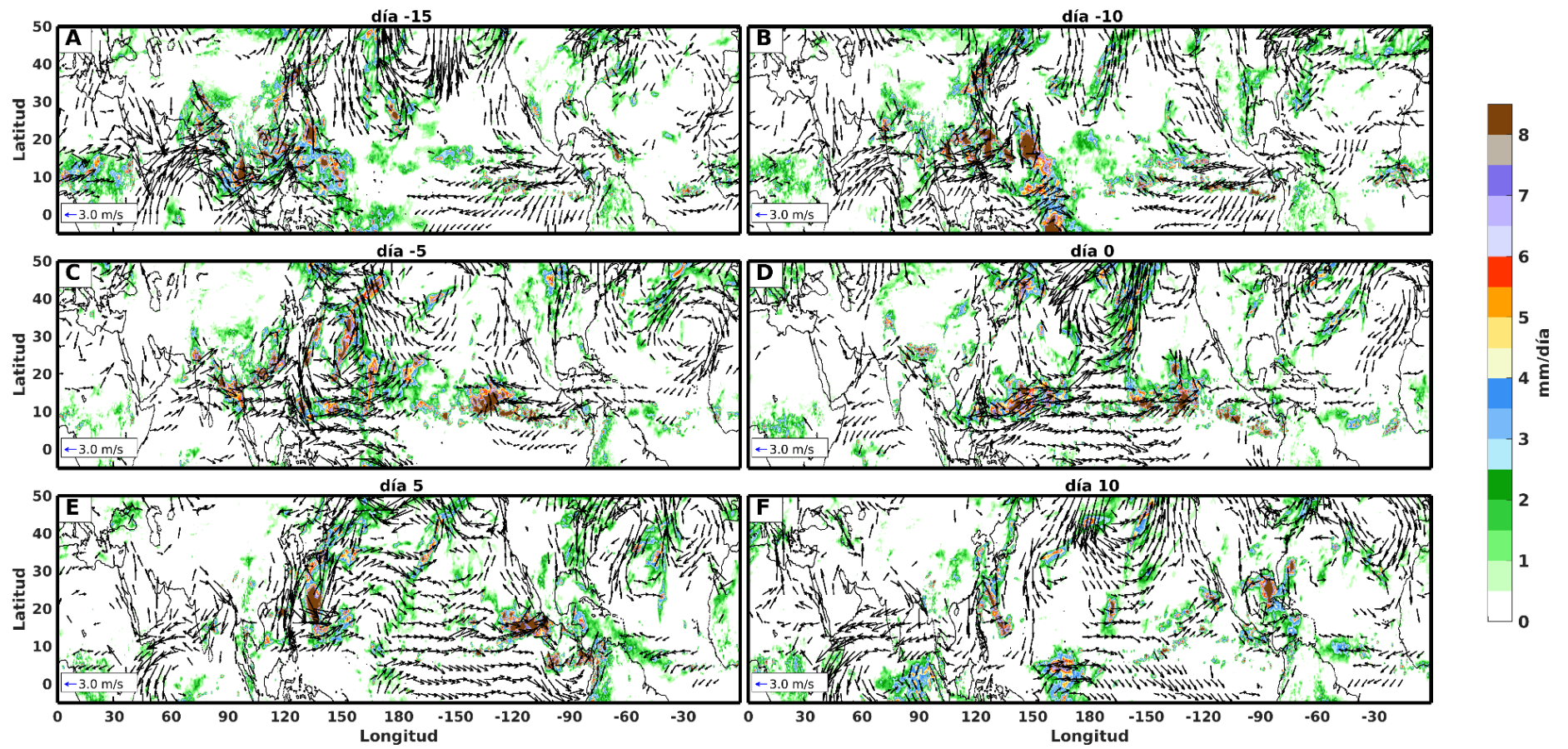


Figura A31. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de septiembre.

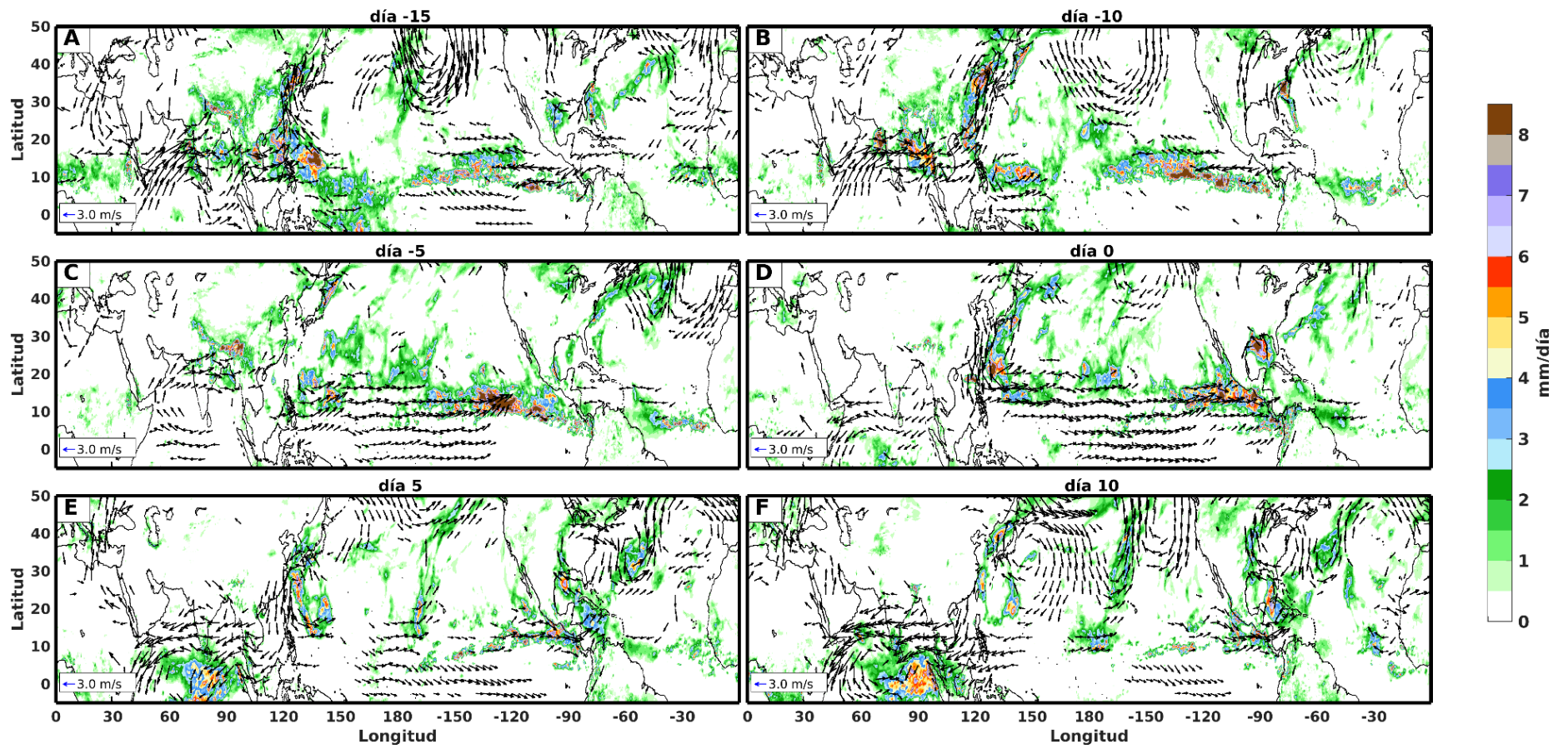


Figura A32. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de septiembre.

Inicio de los mapas correspondientes al mes de octubre.

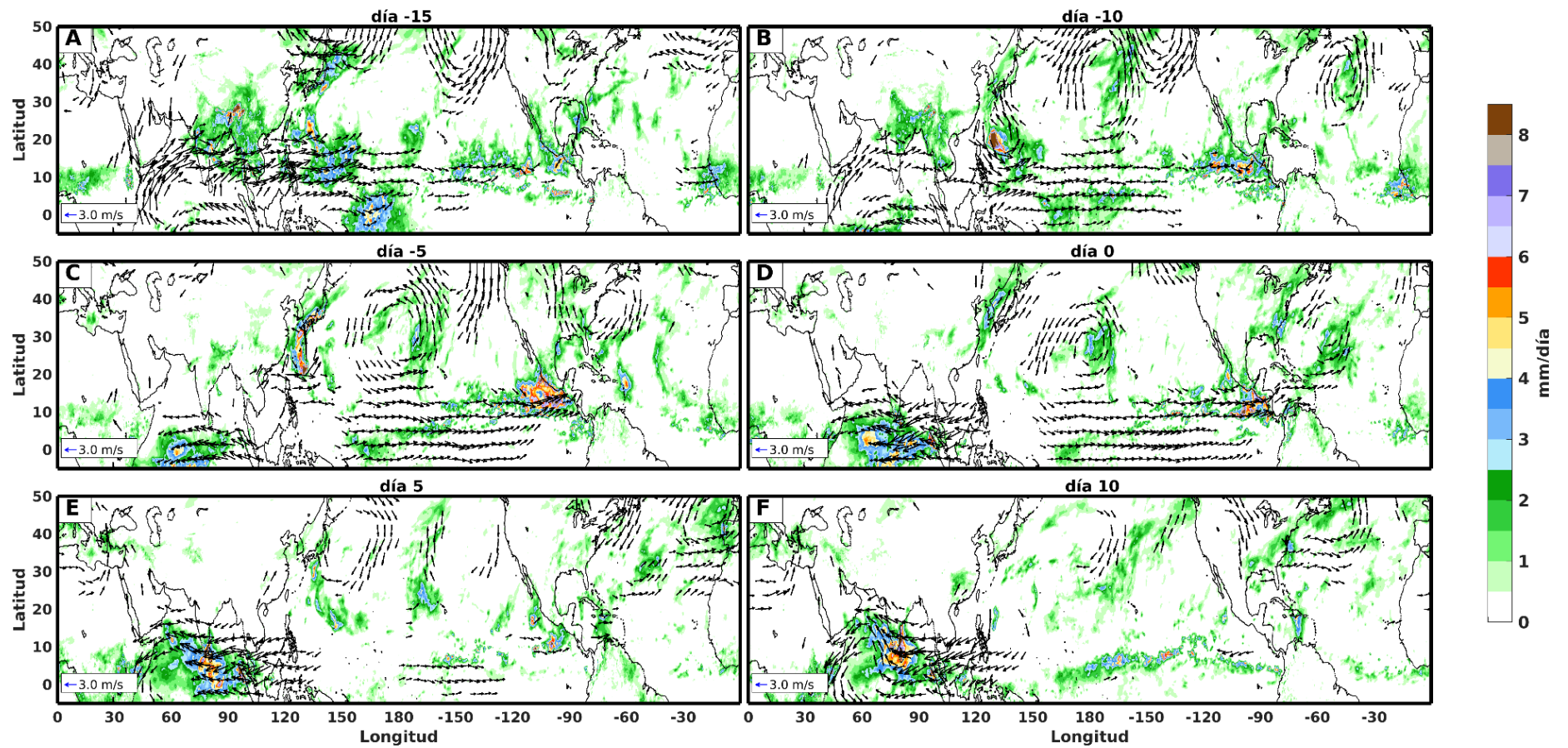


Figura A33. Compuestos correspondientes a la fase 1 durante el mes de octubre.

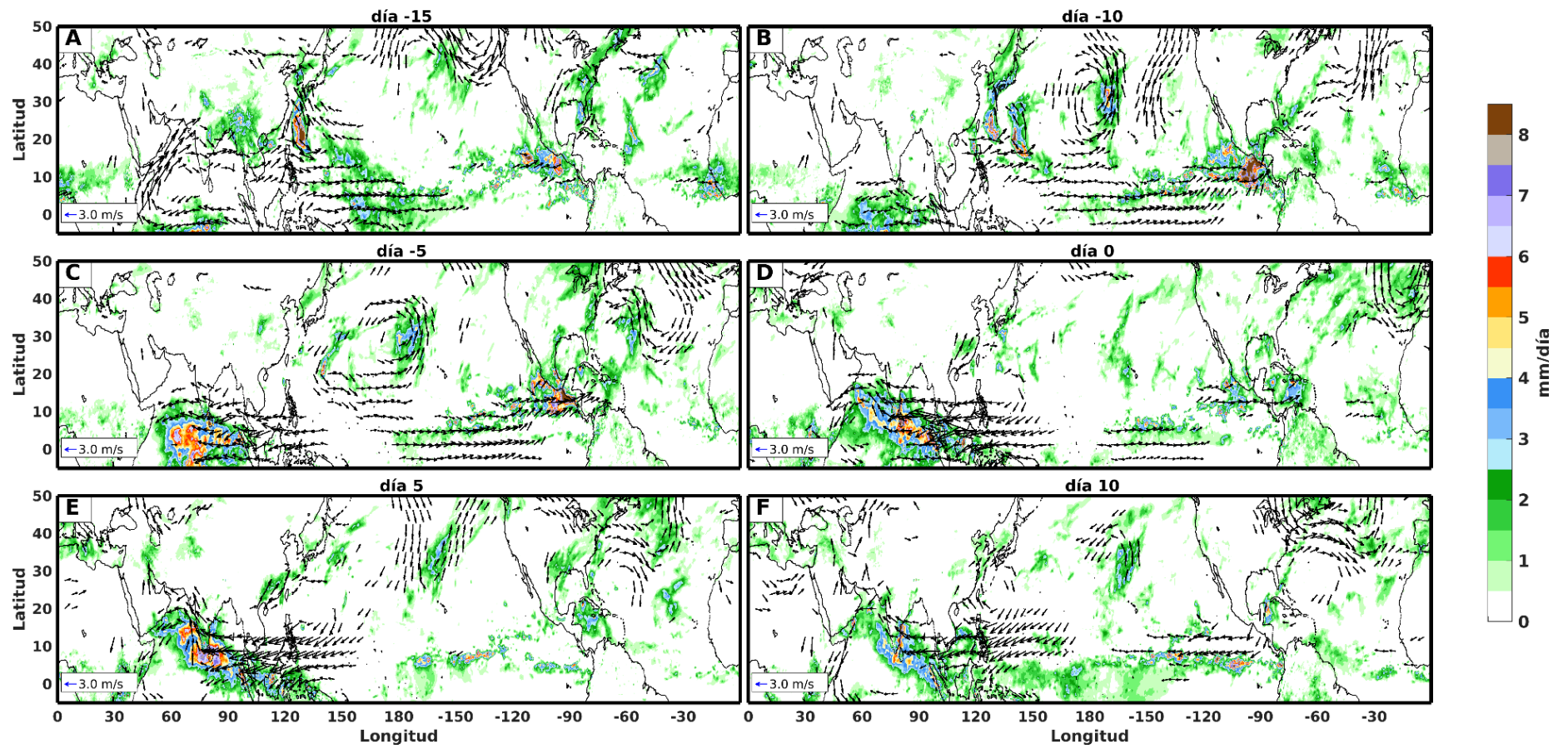


Figura A34. Compuestos correspondientes a la fase 2 durante el mes de octubre.

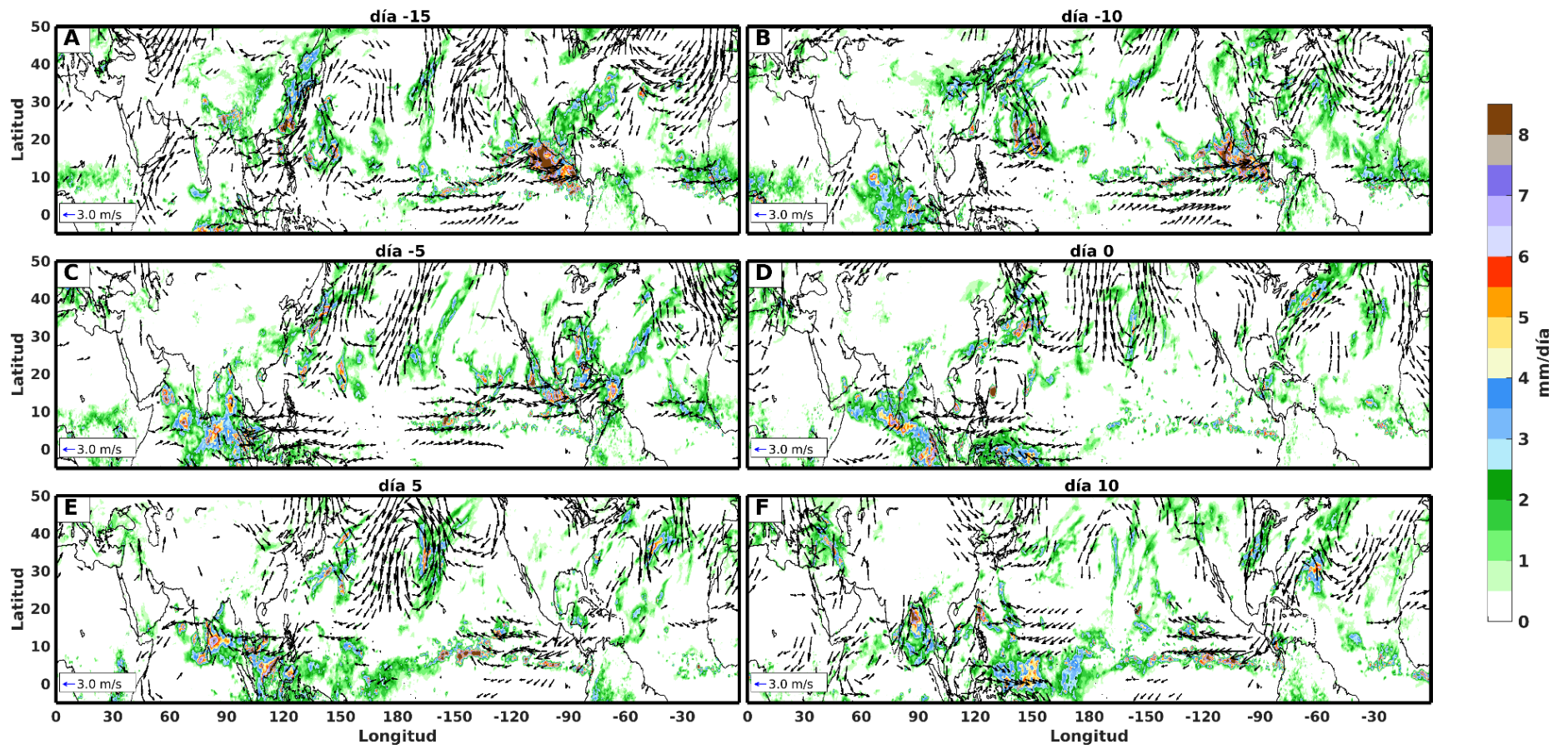


Figura A35. Compuestos correspondientes a la fase 3 durante el mes de octubre.

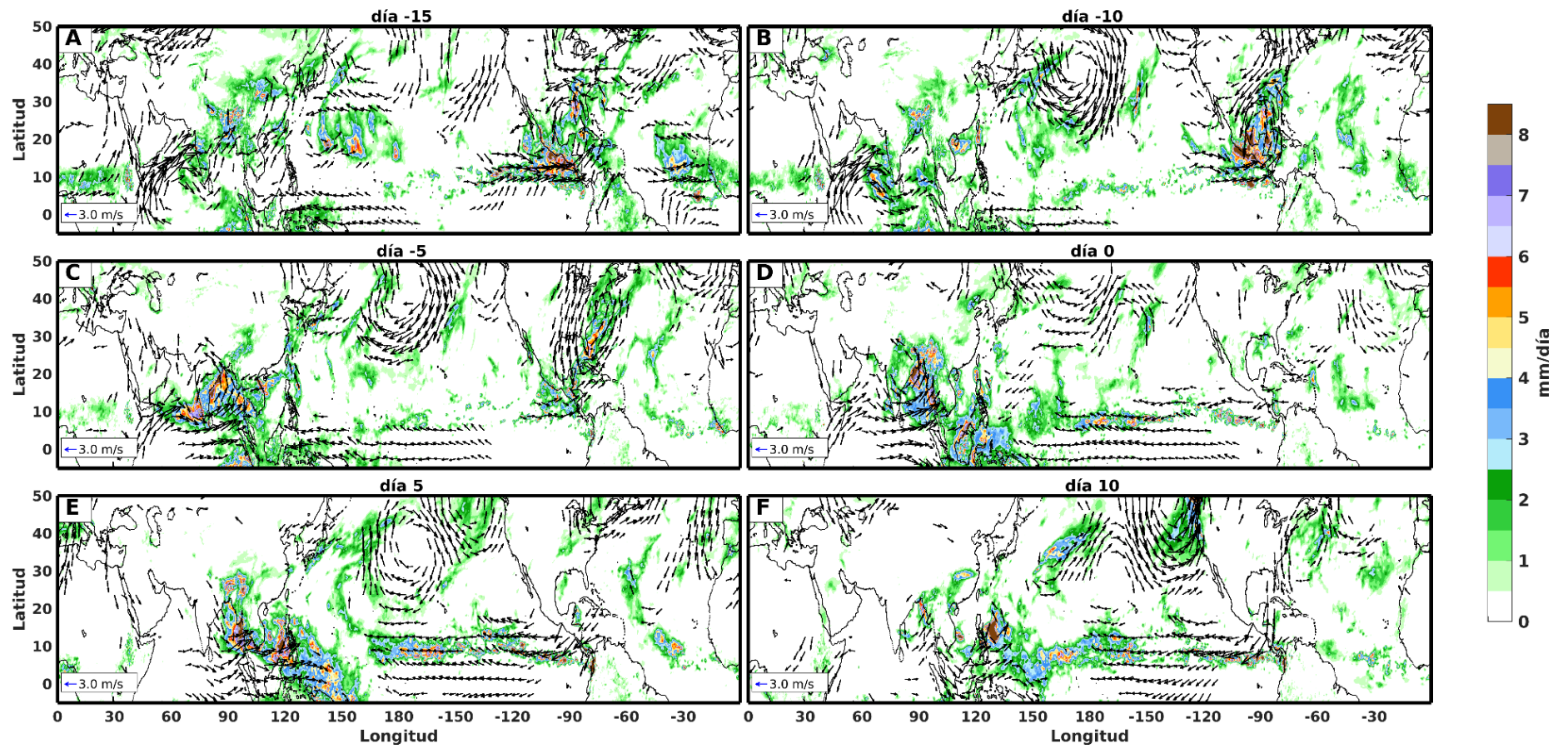


Figura A36. Compuestos correspondientes a la fase 4 durante el mes de octubre.

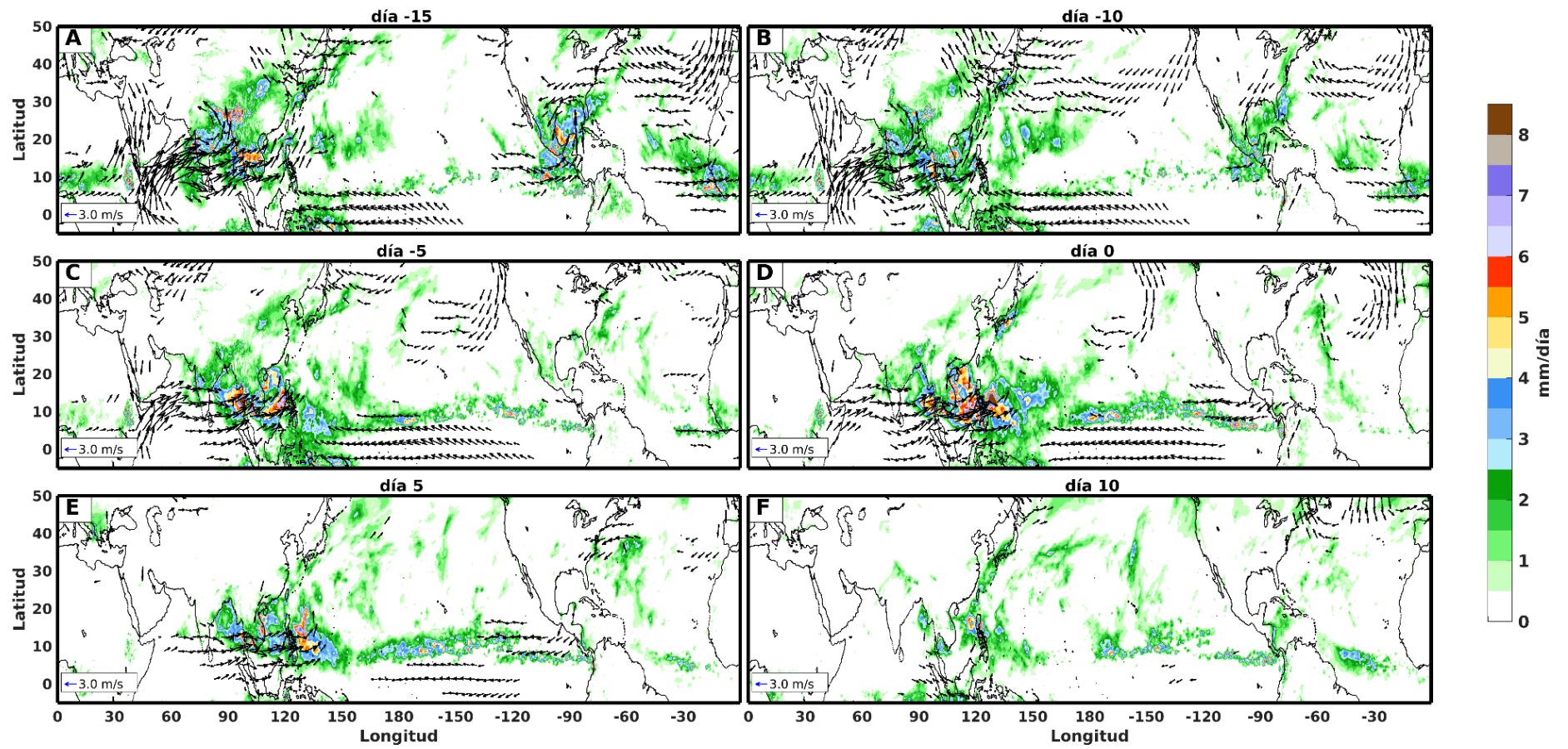


Figura A37. Compuestos correspondientes a la fase 5 durante el mes de octubre.

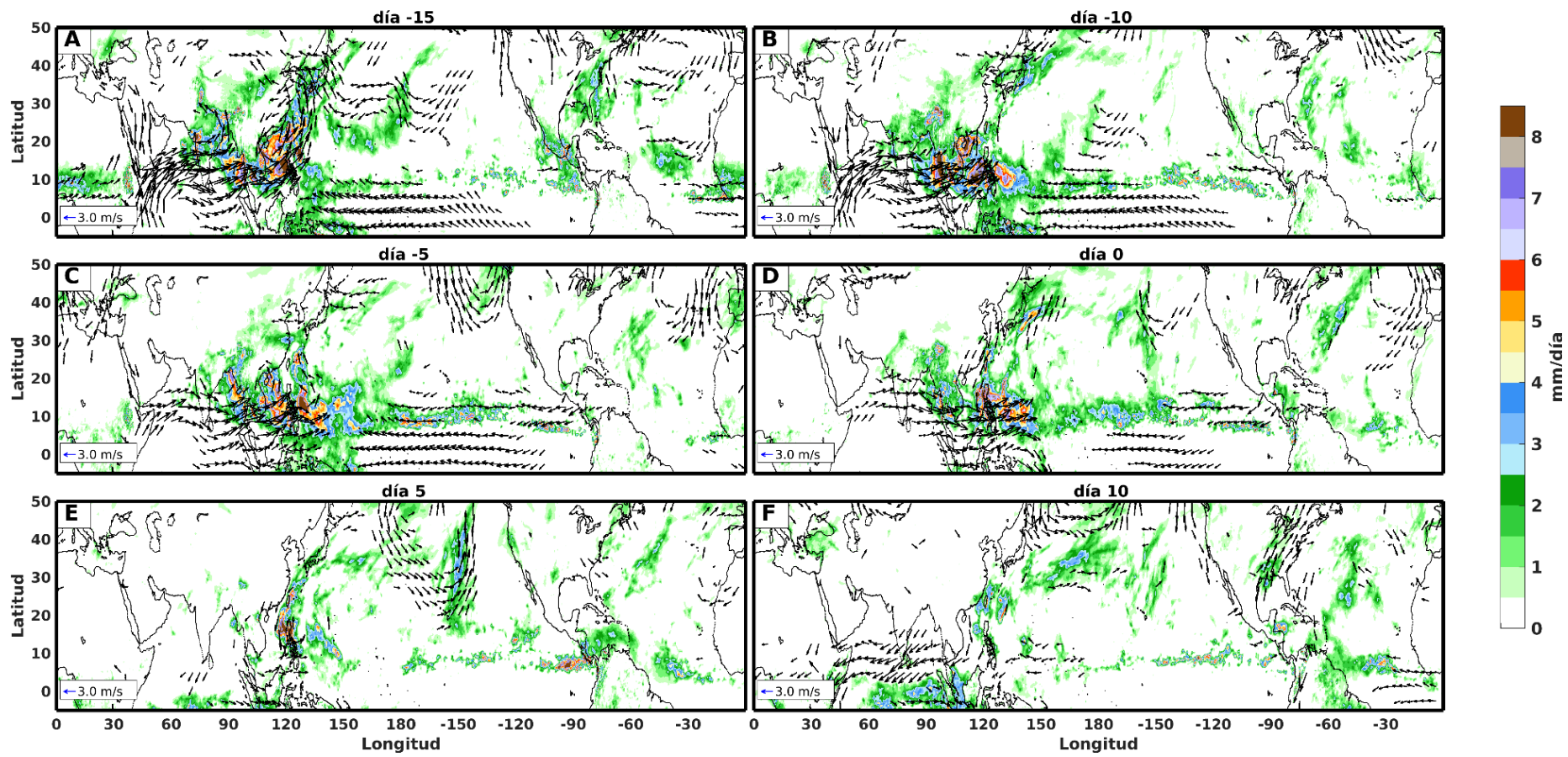


Figura A38. Compuestos correspondientes a la fase 6 durante el mes de octubre.

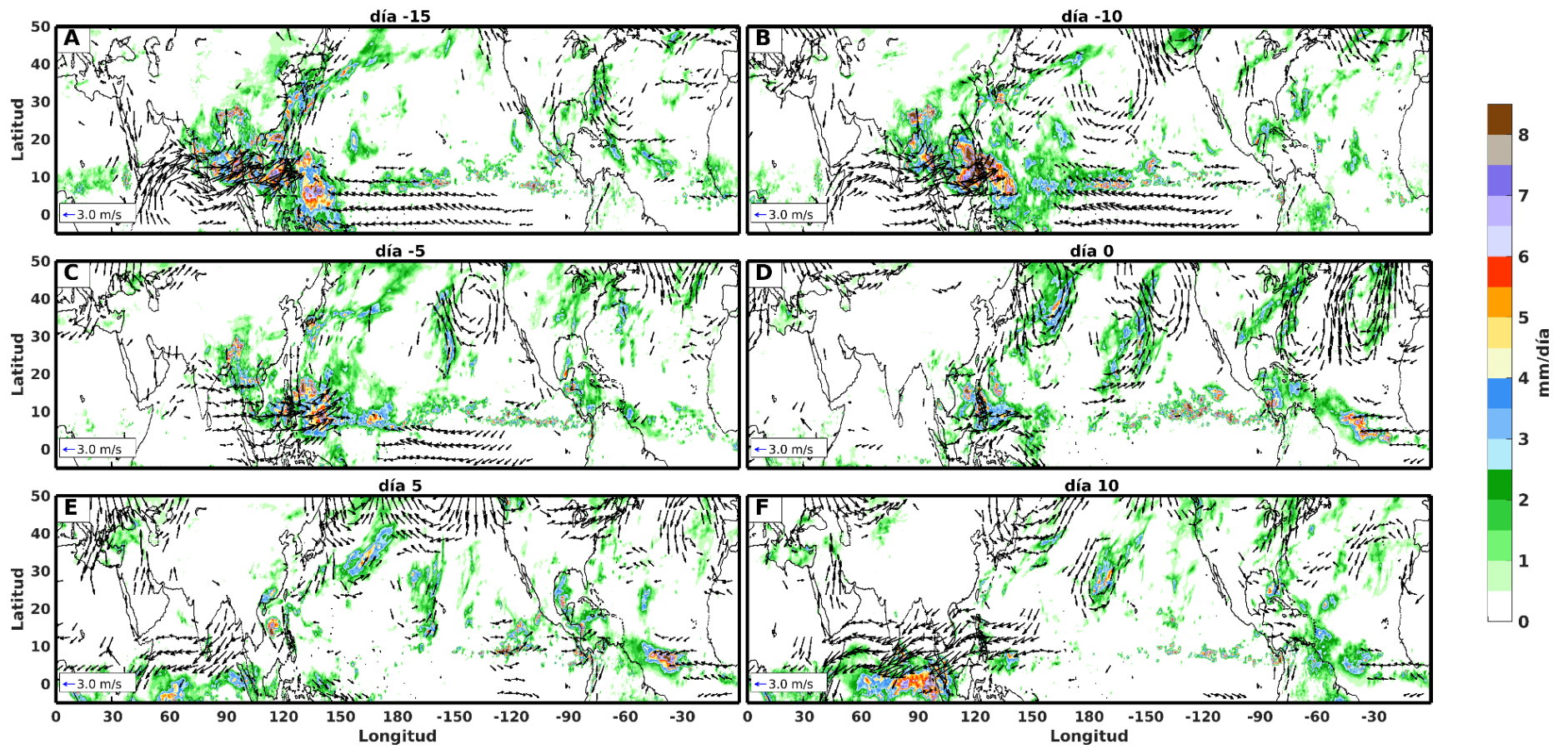


Figura A39. Compuestos correspondientes a la fase 7 durante el mes de octubre.

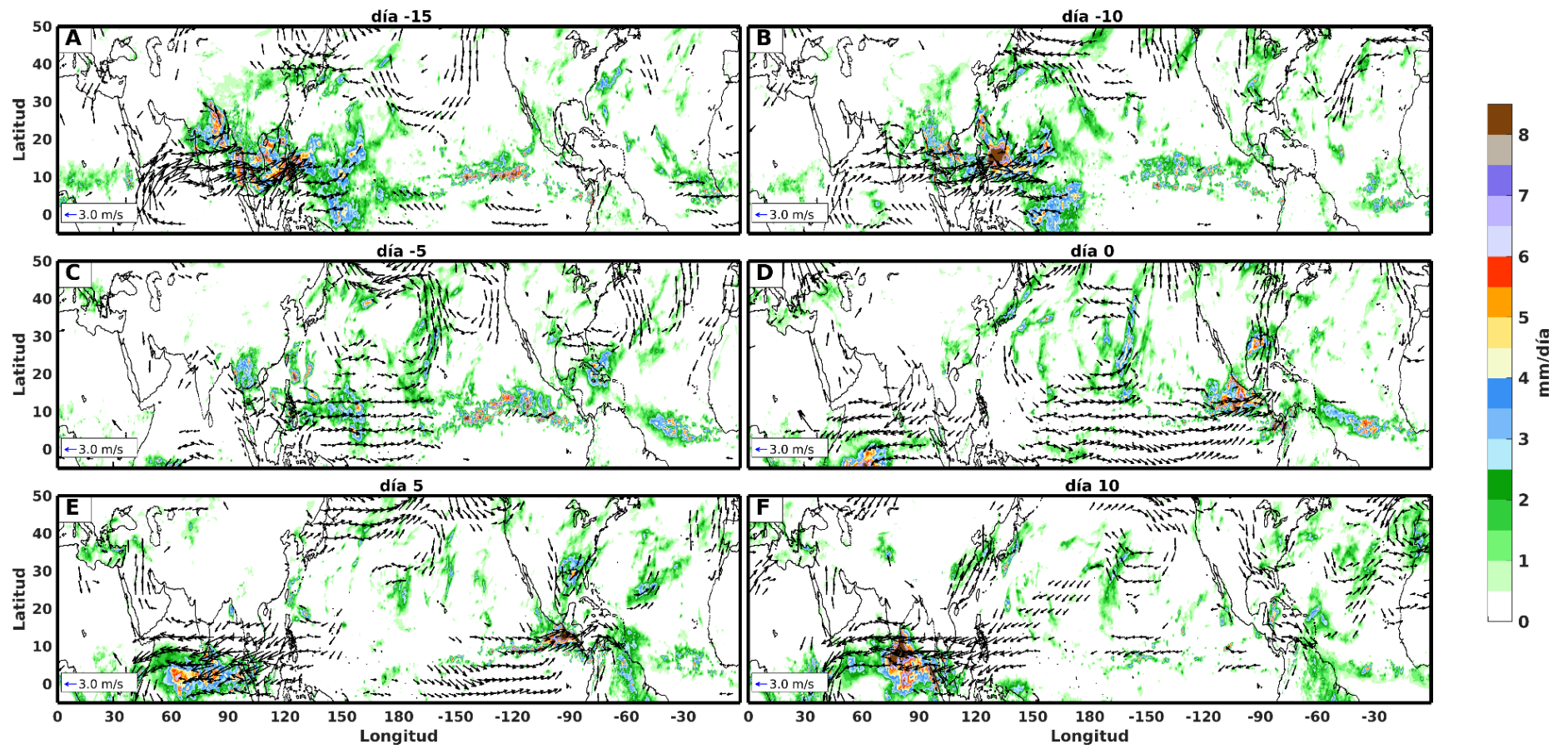


Figura A40. Compuestos correspondientes a la fase 8 durante el mes de octubre.

Bibliografía

Adler, Robert; Wang, Jian-Jian; Sapiano, Matthew; Huffman, George; Chiu, Long; Xie, Ping Ping; Ferraro, Ralph; Schneider, Udo; Becker, Andreas; Bolvin, David; Nelkin, Eric; Gu, Guojun; & NOAA CDR Program (2016). Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Climate Data Record (CDR), Version 2.3 (Monthly). National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V56971M6 [consultado el 13 de marzo de 2024].

Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, Hurricane Research Division, NOAA (2023). *Hurricanes, Typhoons, and Tropical Cyclones [recurso electrónico]*. Recuperado el 11 de junio de 2023, de <https://web.archive.org/web/20060718065833/http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/G1.html>

Australian Government. Bureau of Meteorology (2023). Madden-Julian Oscillation (MJO) [recurso electrónico]. Recuperado el 21 de enero de 2024, de <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/#tabs=MJO-phase>

Barlow, M., & Salstein, D. (2006), Summertime influence of the Madden-Julian Oscillation on daily rainfall over Mexico and Central America, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21708, doi:10.1029/2006GL027738.

Barrett, B. S., Carrasco, J. F., & Testino, A. P. (2012). Madden–Julian Oscillation (MJO) Modulation of Atmospheric Circulation and Chilean Winter Precipitation, *Journal of Climate*, 25(5), 1678-1688. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00216.1>

Barrett, Bradford & Densmore, Casey & Ray, Pallav & Sanabia, Elizabeth. (2021). Active and weakening MJO events in the Maritime Continent. *Climate Dynamics*. 57. 1-16. 10.1007/s00382-021-05699-8. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05699-8>

Barrett, B. S., & Esquivel Longoria, M. I. (2013). Variability of precipitation and temperature in Guanajuato, Mexico. *Atmósfera*, 26(4), 521-536.

Bond, N. A., & Vecchi, G. A. (2003). The Influence of the Madden–Julian Oscillation on Precipitation in Oregon and Washington, *Weather and Forecasting*, 18(4), 600-613. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<0600:Tiotmo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<0600:Tiotmo>2.0.co;2)

Climate Prediction Center-Climate Weather Linkage. (2023). *Madden-Julian Oscillation [recurso electrónico]*. Recuperado el 11 de junio de 2023, de <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/mjo.shtml>

Curtis, S. (2002). Interannual variability of the bimodal distribution of summertime rainfall over Central America and tropical storm activity in the far-eastern Pacific. *Climate Research*, 22(2), 141-146.

de Anda Sánchez, J. (2020). Precipitation in Mexico. In: Raynal-Villasenor, J. (eds) *Water Resources of Mexico*. World Water Resources, vol 6. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40686-8_1

Donald, A., Meinke, H., Power, B., Maia, A. de H. N., Wheeler, M. C., White, N., Stone, R. C., & Ribbe, J. (2006), Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L09704, doi:10.1029/2005GL025155.

Englehart, P. J., & Douglas, A. V. (2002). Mexico's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera*, 15(3), 147-164.

Forbes, R. M., & Ahlgrimm, M. (2014). On the representation of high-latitude boundary layer mixed-phase cloud in the ECMWF global model. *Monthly Weather Review*, 142(9), 3425-3445.

Forbes, R., & Tompkins, A. (2011). An improved representation of cloud and precipitation. *ECMWF Newsletter*, 129(129), 13-18.

Forbes, R. M., Tompkins, A. M., & Untch, A. (2011). A new prognostic bulk microphysics scheme for the IFS.

Funk, C.C., Peterson, P.J., Landsfeld, M.F., Pedreros, D.H., Verdin, J.P., Rowland, J.D., Romero, B.E., Husak, G.J., Michaelsen, J.C., & Verdin, A.P., (2014), A quasi-global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p. <http://pubs.usgs.gov/ds/832/>

Gobierno de México, CONAGUA. (2024). *Perspectiva y seguimiento de Frentes Fríos [recurso electrónico]*. Recuperado el 21 de enero de 2024, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/frentes-frios>

Hall, J. D., Matthews, A. J., & Karoly, D. J. (2001). The Modulation of Tropical Cyclone Activity in the Australian Region by the Madden–Julian Oscillation. *Monthly Weather Review*, 129(12), 2970-2982. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2970:TMOTCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2970:TMOTCA>2.0.CO;2)

Hendon, H. H., & Liebmann, B. (1990). The Intraseasonal (30–50 day) Oscillation of the Australian Summer Monsoon. *Journal of Atmospheric Sciences*, 47(24), 2909-2924. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2909:TIDOOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2909:TIDOOT>2.0.CO;2)

Hendon, H. H., and Liebmann, B. (1994), Organization of convection within the Madden-Julian oscillation, *J. Geophys. Res.*, 99(D4), 8073–8083, doi:10.1029/94JD00045.

Hendon, H. H., Zhang, C., & Glick, J. D. (1999). Interannual Variation of the Madden–Julian Oscillation during Austral Summer. *Journal of Climate*, 12(8), 2538-2550. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2538:IVOTMJ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2538:IVOTMJ>2.0.CO;2)

Hendon, H.H., & Salby, M.L. (1994). The Life Cycle of the Madden–Julian Oscillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51, 2225-2237.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2020): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.adbb2d47 (Fecha de consulta 2022-02-05)

Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B., & Schneider, U. (1997). The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(1), 5-20. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2)

Jiang, Xianan & Waliser, Duane & Xavier, Prince & Petch, Jon & Klingaman, Nicholas & Woolnough, Steven & Guan, Bin & Bellon, Gilles & Crueger, Traute & Demott, Charlotte & Hannay, Cecile & Lin, Hai & Hu, Wenting & Kim, Daehyun & Lappen, Cara-Lyn & Lu, Mong-Ming & Ma, Hsi-Yen & Miyakawa, Tomoki & Ridout, James & Zhu, Hongyan. (2015). Vertical Structure and Physical Processes of the Madden-Julian Oscillation: Exploring Key Model Physics in Climate Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 120. n/a-n/a. 10.1002/2014JD022375.

Jones, C. (2000). Occurrence of Extreme Precipitation Events in California and Relationships with the Madden–Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 13(20), 3576-3587. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<3576:OOEPEI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<3576:OOEPEI>2.0.CO;2)

Jones, C., & Carvalho, L. M. V. (2012). Spatial–Intensity Variations in Extreme Precipitation in the Contiguous United States and the Madden–Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 25(14), 4898-4913. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00278.1>

Jones, C., Waliser, D. E., Lau, K. M., & Stern, W. (2004). Global Occurrences of Extreme Precipitation and the Madden–Julian Oscillation: Observations and Predictability. *Journal of Climate*, 17(23), 4575-4589. <https://doi.org/10.1175/3238.1>

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)

Kiladis, G. N., Dias, J., Straub, K. H., Wheeler, M. C., Tulich, S. N., Kikuchi, K., Weickmann, K. M., & Ventrice, M. J. (2014). A Comparison of OLR and Circulation-Based Indices for Tracking the MJO, *Monthly Weather Review*, 142(5), 1697-1715. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00301>.

Lafleur, Donald & Barrett, Bradford & Henderson, Gina. (2015). Some Climatological Aspects of the Madden-Julian Oscillation (MJO). *Journal of Climate*. 28. 150501115958009. 10.1175/JCLI-D-14-00744.1.

Liebmann, B., Hendon, H. H., & Glick, J. D. (1994). The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian oscillation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 72(3), 401-412.

Lin, H., Brunet, G., & Derome, J. (2009). An Observed Connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden–Julian Oscillation, *Journal of Climate*, 22(2), 364-380. doi: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2515.1>

Lin, J., Kiladis, G. N., Mapes, B. E., Weickmann, K. M., Sperber, K. R., Lin, W., Wheeler, M. C., Schubert, S. D., Del Genio, A., Donner, L. J., Emori, S., Gueremy, J., Hourdin, F., Rasch,

- P. J., Roeckner, E., & Scinocca, J. F. (2006). Tropical Intraseasonal Variability in 14 IPCC AR4 Climate Models. Part I: Convective Signals. *Journal of Climate*, 19(12), 2665-2690. <https://doi.org/10.1175/JCLI3735.1>
- Liu, P., Zhang, Q., Zhang, C., Zhu, Y., Khairoutdinov, M., Kim, H., Schumacher, C., & Zhang, M. (2016). A Revised Real-Time Multivariate MJO Index. *Monthly Weather Review*, 144(2), 627-642. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0237.1>
- Madden, R. A. (1986). Seasonal Variations of the 40-50 Day Oscillation in the Tropics. *Journal of Atmospheric Sciences*, 43(24), 3138-3158. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<3138:SVOTDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<3138:SVOTDO>2.0.CO;2)
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1971). Detection of a 40–50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific. *Journal of Atmospheric Sciences*, 28(5), 702-708. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2)
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1972). Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40–50 Day Period. *Journal of Atmospheric Sciences*, 29(6), 1109-1123. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2)
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Magaña, V., & Caetano, E. (2005). Temporal evolution of summer convective activity over the Americas warm pools, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02803, doi:10.1029/2004GL021033.
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica internacional*, 42(3), 313-330.
- Maloney, E. D., & Hartmann, D. L. (2000). Modulation of Eastern North Pacific Hurricanes by the Madden–Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 13(9), 1451-1460. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1451:MOENPH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1451:MOENPH>2.0.CO;2)
- Martin, E. R., & Schumacher, C. (2011). Modulation of Caribbean Precipitation by the Madden–Julian Oscillation, *Journal of Climate*, 24(3), 813-824. doi: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3773.1>
- Matthews, A.J. (2000), Propagation mechanisms for the Madden-Julian Oscillation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 126: 2637-2651. <https://doi.org/10.1002/qj.49712656902>
- Met Office. (2023). *Intertropical Convergence Zone (ITCZ) [recurso electrónico]*. Recuperado el 16 de noviembre de 2023, de <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/atmosphere/intertropical-convergence-zone>
- Milliff, R. F., & Madden, R. A. (1996). The Existence and Vertical Structure of Fast, Eastward-Moving Disturbances in the Equatorial Troposphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 53(4), 586-597. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<0586:TEAVSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<0586:TEAVSO>2.0.CO;2)

NOAA.GOV. (2023). *Inter-Tropical Convergence Zone [recurso electrónico]*. Recuperado el 17 de noviembre de 2023, de <https://www.noaa.gov/jetstream/tropical/convergence-zone>

Nogués-Paegle, J., Lee, B., & Kousky, V. E. (1989). Observed Modal Characteristics of the Intraseasonal Oscillation. *Journal of Climate*, 2(5), 496-507.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<0496:OMCOTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<0496:OMCOTI>2.0.CO;2)

Ordonez, P., Ribera, P., Gallego, D., and Pena-Ortiz, C. (2013), Influence of Madden-Julian Oscillation on water budget transported by the Somali low-level jet and the associated Indian summer monsoon rainfall, *Water Resour. Res.*, 49, 6474–6485, doi:10.1002/wrcr.20515.

Physical Sciences Laboratory. NOAA (2024). Madden-Julian Oscillation (MJO) [recurso electrónico]. Recuperado el 21 de enero de 2024, de <https://psl.noaa.gov/mjo/>

Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Barrett, B. S., & Ordoñez, P. (2019). Intraseasonal Variability of Summer Precipitation in Mexico: MJO Influence on the Midsummer Drought. *Journal of Climate*, 32(8), 2313-2327.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0425.1>.

Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Pérez, P.O. & Barrett, B.S. (2018), The midsummer drought in Mexico: perspectives on duration and intensity from the CHIRPS precipitation database. *Int. J. Climatol*, 38: 2174-2186. <https://doi.org/10.1002/joc.5322>

Perdigón-Morales, J., (2020), Influencia de la oscilación Madden-Julian en la precipitación de verano en México. [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México.
[132.248.9.195/ptd2020/enero/0799458/Index.html](https://repositorio.unam.mx/handle/132.248.9.195/ptd2020/enero/0799458/Index.html)

Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., & Raga, G. B. (2007). Midsummer Gap Winds and Low-Level Circulation over the Eastern Tropical Pacific. *Journal of Climate*, 20(15), 3768-3784. <https://doi.org/10.1175/JCLI4220.1>

Rosenfeld, Daniel and Lohmann, Ulrike and Raga, Graciela B and O'Dowd, Colin D and Kulmala, Markku and Fuzzi, Sandro and Reissell, Anni and Andreae, Meinrat O. (2008). Flood or drought: how do aerosols affect precipitation?. *Science*, 321(5894), 1309-1313.

Rui, H., & Wang, B. (1990). Development Characteristics and Dynamic Structure of Tropical Intraseasonal Convection Anomalies. *Journal of Atmospheric Sciences*, 47(3), 357-379.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<0357:DCADSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<0357:DCADSO>2.0.CO;2)

Salby, M. L., & Hendon, H. H. (1994). Intraseasonal Behavior of Clouds, Temperature, and Motion in the Tropics. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(15), 2207-2224.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<2207:IBOCTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2207:IBOCTA>2.0.CO;2)

Salby, M. L., R. R. Garcia, & H. H. Hendon. (1994), Planetary-scale circulations in the presence of climatological and wave-induced heating, *J. Atmos. Sci.*, 51, 2344-2367.

- Schneider, U., Fuchs, T., Meyer-Christoffer, A., & Rudolf, B. (2008). Global precipitation analysis products of the GPCC. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet Publikation, 112.
- Schultz, D. M., Bracken, W. E., & Bosart, L. F. (1998). Planetary- and Synoptic-Scale Signatures Associated with Central American Cold Surges. *Monthly Weather Review*, 126(1), 5-27. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0005:PASSSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0005:PASSSA>2.0.CO;2)
- Tiedtke, M. (1989). A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly weather review*, 117(8), 1779-1800.
- Tiedtke, M. (1993). Representation of clouds in large-scale models. *Monthly Weather Review*, 121(11), 3040-3061.
- Torres, V. M., & Thorncroft, C. D. (2022). Analysis of the Environment that Supports Easterly Waves over the Eastern Pacific and the Intra-Americas Sea in the Boreal Summer—A Potential Vorticity Perspective. *Journal of Climate*, 35(12), 3961-3977. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0482.1>
- Vázquez-Proveyer, Liset (2023), Impacto de la MJO sobre las precipitaciones extremas en el Valle de México. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México. 132.248.9.195/ptd2023/junio/0840730/Index.html
- Wang, C., & Enfield, D. B. (2001). The tropical Western Hemisphere warm pool. *Geophysical research letters*, 28(8), 1635-1638.
- Weickmann, K. M., Lussy, G. R., & Kutzbach, J. E. (1985). Intraseasonal (30–60 Day) Fluctuations of Outgoing Longwave Radiation and 250 mb Streamfunction during Northern Winter. *Monthly Weather Review*, 113(6), 941-961. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1985\)113<0941:IDFOOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1985)113<0941:IDFOOL>2.0.CO;2)
- Wheeler, M., & G. N. Kiladis, 1999, Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber-frequency domain, *J. Atmos. Sci.*, 56, 374-399.
- Wheeler, M. C., & Hendon, H. H. (2004). An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction. *Monthly Weather Review*, 132(8), 1917-1932. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2)
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.
- Zhang, Chidong., 2005, The Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.* 43. [10.1029/2004RG000158](https://doi.org/10.1029/2004RG000158).
- Zhang, C. (2013). Madden–Julian Oscillation: Bridging Weather and Climate, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(12), 1849-1870. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00026.1>
- Zhang, C., & Anderson, S. P. (2003). Sensitivity of Intraseasonal Perturbations in SST to the Structure of the MJO. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(17), 2196-2207. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<2196:SOIPIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<2196:SOIPIS>2.0.CO;2)

Zhao, C., Li, T., & Zhou, T. (2013). Precursor Signals and Processes Associated with MJO Initiation over the Tropical Indian Ocean, *Journal of Climate*, 26(1), 291-307. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00113.1>

Zheng, C., Kar-Man Chang, E., Kim, H., Zhang, M., & Wang, W. (2018). Impacts of the Madden–Julian Oscillation on Storm-Track Activity, Surface Air Temperature, and Precipitation over North America. *Journal of Climate*, 31(15), 6113-6134. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0534.1>