

Variaciones intraestacionales de la actividad convectiva en México y América Central

MIGUEL CORTEZ VAZQUEZ

Department of Geography, Graduate School of Science, Tokyo University, Japan

(Manuscrito recibido oct. 23, 1998; aceptado en forma final sept. 20, 1999)

RESUMEN

Con base en el análisis de variaciones en los campos de radiación saliente de onda larga (RSOL) y viento en niveles bajos (1,000 y 850hPa) para periodos de cinco días, se documentan los cambios intraestacionales de la actividad convectiva en México. Los resultados muestran que conforme la convección se incrementa a mediados de junio en el noroeste de México, la tendencia opuesta es visible sobre la parte centro/sur del país, el Caribe, América Central y el Pacífico Oriental, en donde se observa una disminución de la misma, que corresponde al periodo de Canícula. Cambios en la intensidad del viento en niveles bajos sobre América Central y el Pacífico oriental, son consistentes con las fases de inicio y desarrollo de la estación de lluvias sobre el área de estudio.

ABSTRACT

Based on the analysis of variations in the five day mean OLR and low-level wind fields (1,000 and 850hPa), intra-seasonal changes in the convective activity in Mexico are documented. The results show that as the convection over northwestern Mexico tend to increases from the middle of June, the opposite tendency is visible in the southern part of the country, the Caribbean, Central America, and the eastern tropical Pacific, where a period of less convection, locally termed "canicula", occurs in the middle of the rainy season. Changes in the intensity of low-level wind over Central America and the eastern Pacific are consistent with the onset and evolution of the rainy season over the studied region.

1. Introducción

La documentación clara de los principales elementos del régimen de precipitación estacional en México, en un contexto que incluya tanto la porción continental como marítima, constituye el primer paso encaminado a lograr una mejor comprensión de su variabilidad estacional y anual. En esta tarea, las bases de datos derivadas de las observaciones de satélite y los análisis operativos a escala global, obtenidos a partir de modelos numéricos, proveen de información con una resolución espacial y temporal adecuada para el estudio de sistemas atmosféricos de pequeña escala como núcleos convectivos, hasta fenómenos de escala global como los relacionados con El Niño/La Oscilación del Sur (ENSO).

En un trabajo previo, en el que se utiliza este tipo de información, fueron identificados dos regímenes convectivos sobre México (Cortez, 1999). El primero, corresponde a la estación de lluvias sobre América Central y sur de México y está relacionado con el desplazamiento anual sur/norte de la zona intertropical de convergencia (ZITC). El segundo, es un fenómeno convectivo de escala regional centrado sobre el noroeste del país, área de influencia del denominado monzón mexicano (Douglas *et al.*, 1993). Debido a que los trabajos recientes aquí citados centran su atención en aspectos específicos o regionales, posibles relaciones entre los dos regímenes, así como sus variaciones intraestacionales, no han sido documentadas.

El análisis de valores medios para cinco días de radiación saliente de onda larga, muestra que la estación húmeda sobre el centro/sur de México se extiende desde mediados de mayo hasta principios de octubre (cinco meses), aspecto que permite considerarla como un evento interestacional. En comparación, el periodo de lluvias sobre el noroeste de México abarca de mediados de junio a finales de septiembre (aproximadamente noventa días), por lo que puede ser visto como un evento climatológico intraestacional.

Por otra parte, los resultados sugieren que la fase de inicio del monzón mexicano a mediados de junio, es acompañada por una disminución en la convección sobre el centro/sur de México, el Caribe, América Central y el Pacífico Oriental, en donde la distribución de la precipitación presenta dos máximos, con un periodo de marcada disminución de aproximadamente dos meses de duración, que corresponde a la canícula o sequía relativa de medio verano. Conforme el monzón mexicano inicia su fase de retiro a partir de la segunda mitad de agosto, la convección se desplaza al este y sur de esta región, lo que da lugar al segundo máximo sobre las zonas en donde se observa el fenómeno. Los cambios en la intensidad del viento en niveles bajos sobre América Central y el Pacífico oriental, son consistentes con el desarrollo de la estación de lluvias sobre el área de estudio.

2. Bases de datos y método de análisis

Las bases de datos utilizadas en este trabajo son 12 años de radiación saliente de onda larga (en adelante abreviada como RSOL), derivada de las observaciones de satélite de órbita polar de la NOAA, para el periodo de 1975 a 1987 excepto 1978, así como una base de datos de viento zonal y viento meridional en niveles bajos (1,000 y 850hPa), extraída de los análisis operativos (12 horas GMT) a escala global del *European Centre for Medium-range Weather Forecast* (ECMWF) durante el periodo de 1980 a 1992. Estas bases de datos, con una resolución espacial de 2.5° de longitud/latitud, han sido ampliamente utilizadas en el estudio de la actividad convectiva en los trópicos y son de gran utilidad, pues cubren tanto las regiones continentales como marítimas (Horel *et al.*, 1989; Matsumoto, 1989; Wang, 1994).

Debido a que el establecimiento y desarrollo de la estación de lluvias en las regiones tropicales tiene lugar de manera súbita, se decidió utilizar valores medios para periodos de cinco días o pentadas, que permiten una resolución temporal más satisfactoria que los análisis de valores

medios mensuales. Para este fin, el valor medio diario, que se obtuvo después de promediar el total de observaciones disponibles, fue promediado en periodos de cinco días, con lo que el año quedó dividido en 73 pentadas. Este valor medio, describe el ciclo anual de la actividad convectiva sobre el área de estudio y es identificado como P1..., P73. Adicionalmente, para reducir la influencia de sistemas atmosféricos de escala sinóptica en años particulares, debidas al periodo relativamente corto de observaciones, se calculó una media ponderada (1-2-1) entre tres pentadas consecutivas. Por otra parte, para documentar los cambios intraestacionales en el desarrollo de la estación de lluvias, se calculó la diferencia (incremento) de valores medios entre tres pentadas. Ya que el trabajo se centra en el periodo estacional de lluvias, para una mejor comprensión de la marcha anual de la actividad convectiva en México, se recomienda consultar a Cortez (1999).

3. Resultados

3.1. Las fechas de inicio y retiro de la estación de lluvias

La Figura 1 representa regiones con valores medios de RSOL menores de 240 Wm^{-2} , un umbral frecuentemente utilizado para identificar áreas con precipitación en las zonas tropicales (Rasmusson *et al.*, 1988; Murakami and Matsumoto, 1994; Wang, 1994). Esta figura muestra el patrón de convección durante la segunda mitad de julio, el cual se extiende hasta mediados de agosto. Dicho patrón se caracteriza por la marcada asimetría sobre la parte norte del país, pues mientras que un eje de nubosidad se ha desarrollado sobre la Sierra Madre Occidental, un centro cerrado de altos valores de RSOL sobre el noreste (no se muestra), indica condiciones de cielo despejado.

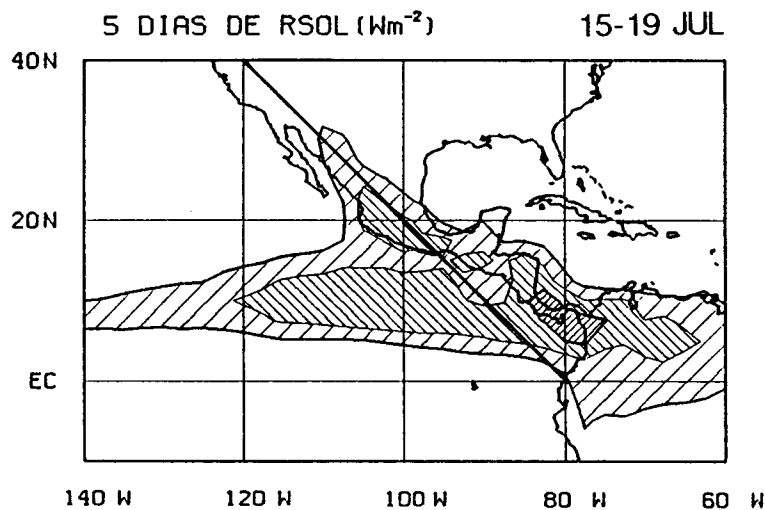


Fig. 1. Doce años de valores medios de RSOL para el periodo del 15 al 19 de julio. Las zonas sombreadas corresponden a regiones con valores menores de 240 Wm^{-2} , valor utilizado para identificar áreas con precipitación. Las líneas de contorno son por cada 20 Wm^{-2} . Los intervalos de 200 y 240 Wm^{-2} se indican con líneas gruesas. La línea a lo largo del eje de mayor convección sobre México corresponde al corte temporal que se muestra en la Fig. 2.

La Figura 2 corresponde a un corte a lo largo del eje de mayor convección sobre México y el Pacífico oriental como una función de tiempo y espacio, tal como se indica con una línea gruesa en la Figura 1. Las fases de inicio de los dos regímenes convectivos, mencionados anteriormente, se pueden identificar mediante una expansión de la región con bajos valores de RSOL, la primera

durante la pentada 28 (del 16 al 20 de mayo) y la segunda durante la pentada 35 (del 20 y 24 de junio). Un aspecto interesante en la misma figura es un marcado descenso en la convección de aproximadamente dos meses de duración, en la región comprendida entre 8° y 20° N, el cual corresponde al periodo de canícula. Es de notar que aun durante este periodo se tienen valores de RSOL por abajo del criterio considerado para identificar áreas con precipitación (240Wm^{-2}), por lo que los términos de sequía de medio verano (*mid-summer drought*) y sequía intraestival, son un tanto imprecisos.

Como se observa también en la Figura 2, la convección asociada al monzón mexicano finaliza durante el periodo 54 (23-27 de septiembre), mientras que la estación húmeda en la parte centro/sur de México finaliza hacia el periodo 56 (3-7 de octubre).

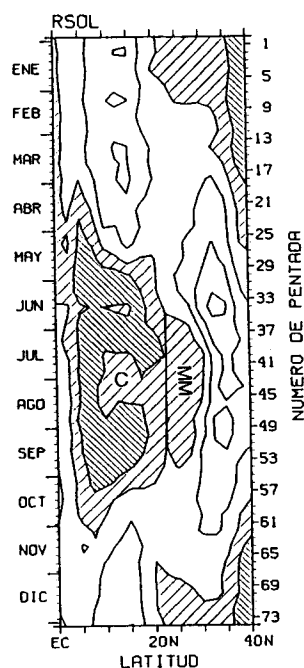


Fig. 2. Corte temporal-latitudinal a lo largo del transecto indicado con una línea gruesa en la Figura 1. Las áreas con valores menores de 240Wm^{-2} aparecen sombreadas. Las líneas de intervalo son por cada 20Wm^{-2} . La línea aproximadamente a los 23° N separa el área de influencia del monzón mexicano (MM), mientras que el periodo de canícula (C) se observa al sur de los 20° N.

3.2. Variaciones intraestacionales de la convección

La Figura 3 representa la diferencia (incremento) de valores medios de RSOL entre: (a) pentada 25 y 22, (b) pentada 28 y 25 y, (c) pentada 31 y 28. Debido a que en los trópicos la RSOL presenta una correlación negativa con la cubierta nubosa (Morrissey, 1986), incrementos negativos de RSOL identifican zonas donde la convección (nubosidad) tiende a aumentar, mientras que áreas con incrementos positivos, corresponden a regiones donde ésta tiende a disminuir.

La Figura 3a muestra el patrón para finales de abril y principios de mayo, el cual corresponde a un periodo de transición, cuando la zona de intensa convección se desplaza del Hemisferio Sur al Hemisferio Norte. En la figura destacan dos zonas de incrementos contrastantes orientadas zonalmente, una a lo largo de 10° N, donde la RSOL tiende a disminuir, lo que indica un incre-

mento en la convección, mientras que otra franja en el Hemisferio Sur, con incrementos positivos de 10Wm^{-2} , indica una disminución de la misma. En la Figura 3b (mediados de mayo), un súbito descenso de -30Wm^{-2} frente a las costas de Guerrero y Oaxaca, sugiere una intensificación de la convección asociada al desarrollo de la ZITC sobre el Pacífico oriental. Como se puede apreciar, durante este periodo tiene lugar el establecimiento de la estación de lluvias sobre la parte centro/sur de México, en buen acuerdo con la Figura 2.

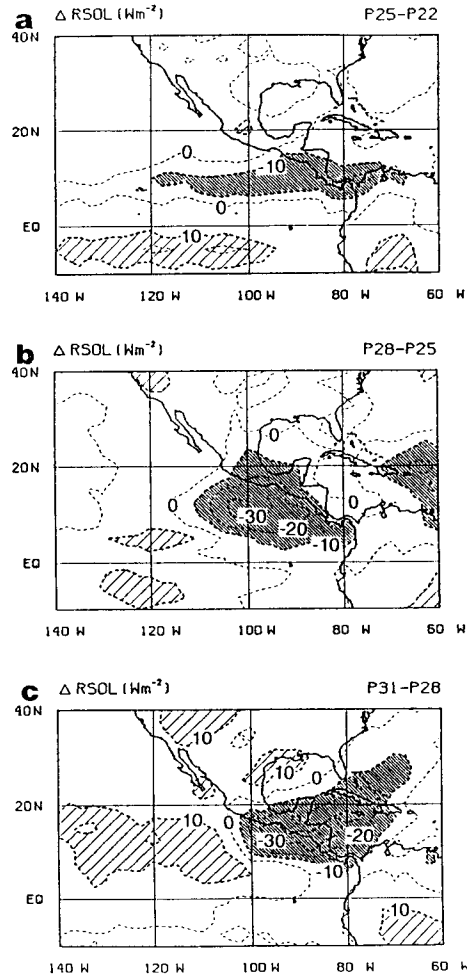


Fig. 3. Diferencia (incremento) de valores medios de RSOL entre: (a) pentada 25 y 22, (b) pentada 28 y 25 y (c) pentada 31 y 28. Las líneas de intervalo son por cada 10Wm^{-2} . Las regiones con incrementos positivos (menor convección) aparecen indicadas con líneas espaciadas, mientras que las zonas con incrementos negativos (mayor convección) se indican con líneas cerradas.

El aspecto más destacado para finales de mayo y principios de junio es el contraste entre la zona este y oeste del meridiano de 100°W (Fig. 3c), pues mientras en la primera se tiene un súbito incremento en la convección (América Central, sur de México y el Caribe) indicado por incrementos negativos de RSOL de -30Wm^{-2} , incrementos positivos al oeste de este meridiano sugieren una disminución de la misma. Otras regiones donde la convección tiende a disminuir incluyen la cuenca del Amazonas, la costa noroeste del Golfo de México y el suroeste de los Estados Unidos. Es de notar que los incrementos positivos sobre la última región, están más relacionados con un incremento de la temperatura en superficie sobre la zona desértica, que con

una disminución en la convección. Un aspecto más a destacar durante este periodo es que la zona de incremento en la convección se extiende sobre las Grandes Antillas, asociado a un máximo secundario en la actividad de ciclones tropicales (McBride, 1996). El mismo patrón se observa también en los análisis de valores medios de RSOL (Cortez, 1999).

La Figura 4 corresponde a la diferencia entre (a) pentada 34 y 31, (b) pentada 34 y 37 y, (c) pentada 37 y 40. Esta figura muestra las fases de establecimiento y desarrollo de la estación húmeda sobre el noroeste de México. De acuerdo con la Figura 4a, el inicio de la actividad convectiva asociada al monzón mexicano tiene lugar sobre Nayarit y sur de Sinaloa a mediados de junio, en correspondencia con la Figura 2. Como se puede observar, el contraste este/oeste, mencionado anteriormente ha cambiado a una dirección noroeste/sureste. Al inicio de la estación de lluvias en el noroeste del país, un área de incrementos positivos de RSOL cubre el suroeste de los Estados Unidos y se extiende hacia las Planicies Centrales y el noreste de México. Otras áreas con incrementos positivos incluyen el extremo este del Pacífico tropical, el Caribe y las Grandes Antillas. Este aspecto sugiere que estas zonas experimentan una disminución en la convección conforme se desarrolla el monzón mexicano.

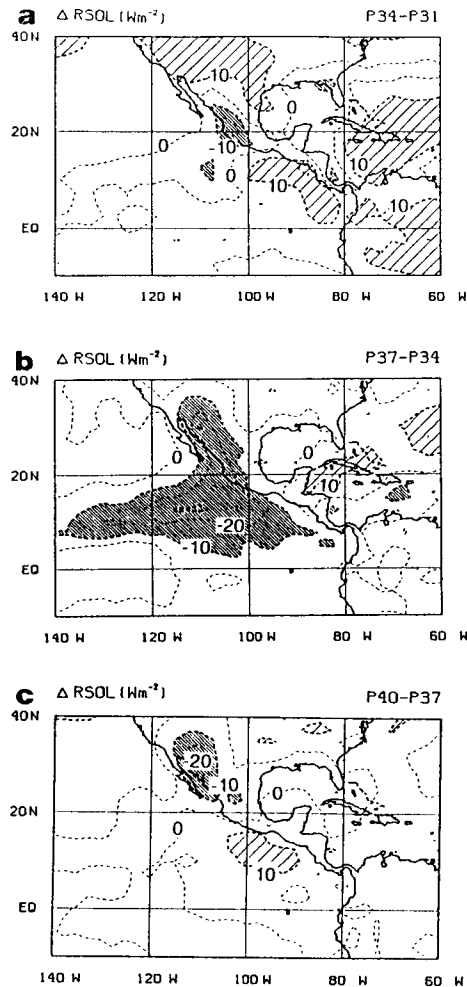


Fig. 4. Igual que la Figura 3, pero entre: (a) pentada 34 y 31, (b) pentada 37 y 34 y (c) pentada 40 y 37.

Para finales de junio y principios de julio la actividad convectiva se ha extendido a lo largo de la Sierra Madre Occidental, con los mayores incrementos sobre su vertiente oeste (Fig. 4b), aspecto que está en buen acuerdo con análisis que utilizan datos de precipitación en superficie (Douglas *et al.*, 1993). Durante este mismo periodo se observa una intensificación de la convección asociada a la ZITC cerca de 15°N y 110°W . Para mediados de julio (Fig. 4c), la zona donde la convección se incrementa aparece centrada sobre Sonora y penetra hacia el suroeste de los Estados Unidos, en donde la estación de lluvias de verano es identificada como el monzón de Arizona (Bryson and Lowrey, 1955; Adang and Gall, 1989). Aunque el establecimiento de la estación de lluvias sobre el noroeste de México es menos pronunciado que en América Central y sur de México en términos de ΔRSOL , es importante hacer notar que el monzón mexicano es un evento climatológico notable y único en América del Norte.

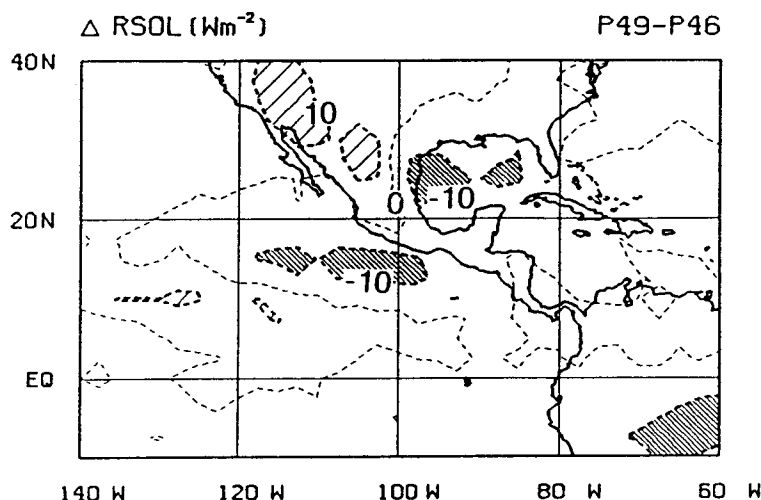


Fig. 5. Igual que la Figura 3, pero entre la pentada 49 y 46, cuando la actividad convectiva se desplaza hacia el noreste de México y el Pacífico oriental.

El eje de nubosidad sobre la Sierra Madre Occidental inicia su retiro durante la segunda mitad de agosto y la convección se desplaza al este y sur de esta región (Fig. 5), lo que da lugar al segundo máximo en el patrón de precipitación de las zonas que presentan canícula, aunque de menor intensidad que el primero, excepto en el noreste de México, región afectada durante esta época del año por ciclones tropicales y sistemas de latitudes medias.

3.3. Circulación en los niveles bajos (1,000 y 850hPa)

Con el fin de investigar los cambios en la circulación regional asociados a los patrones convectivos descritos arriba, se construyeron los mapas de campos de viento en los niveles de 1,000 y 850hPa.

A lo largo del año, la circulación sobre el área de estudio es fuertemente influenciada por los centros de alta presión subtropical del Atlántico y del Pacífico. Conforme el verano se aproxima, estos centros de alta presión se intensifican y se desplazan con dirección oeste. Un cambio a finales de abril y principios de mayo (Fig. 6a), precursor del inicio de la estación de lluvias sobre el centro/sur de México, es la intensificación de los vientos del este sobre el Caribe, los cuales toman un giro anticiclónico en el Golfo de México y penetran al noreste de México y Texas como vientos del sureste. Durante este mismo periodo, los vientos del este sobre América Central y el

Pacífico oriental se debilitan (Fig. 6b). En el Pacífico norte, vientos del noroeste se observan a lo largo de la península de Baja California hasta más al sur de 20°N .

A finales de mayo y principios de junio (Fig. 6c), una débil circulación ciclónica sobre el suroeste de los Estados Unidos sugiere el establecimiento de la baja térmica del noroeste de México, en la misma posición descrita por Rowson y Colucci (1992) y Douglas y Li (1996), mientras que vientos del noroeste, asociados a la formación de un pequeño centro anticiclónico cerca de 10°N y 110°W , soplan a lo largo de la costa del Pacífico hasta el área centroamericana. Este cambio en el patrón de circulación sobre el Pacífico oriental ayuda a explicar la distribución de ΔRSOL durante este periodo (Fig. 3c).

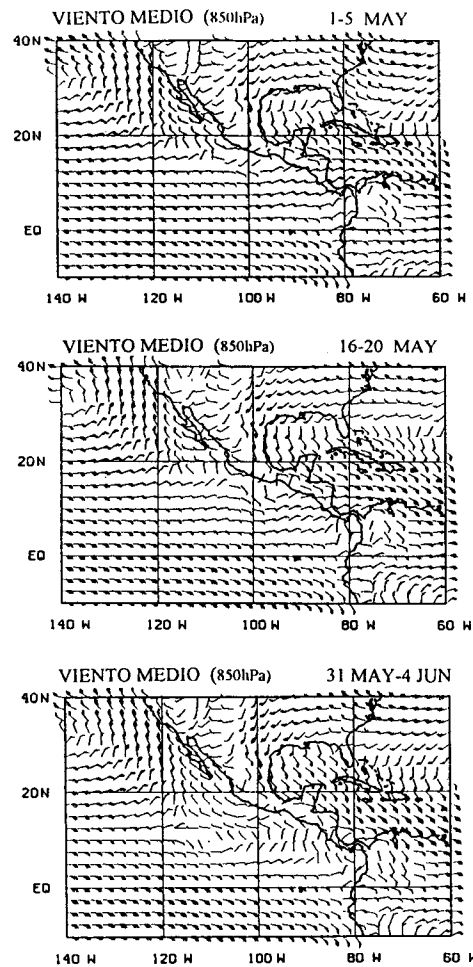


Fig. 6. Viento medio en el nivel de 850hPa durante: (a) pentada 25 (principios de mayo), (b) pentada 28 (mediados de mayo) y (c) pentada 31 (finales de mayo y principios de junio). Una barra representa velocidades de 2 m s^{-1} , media barra 1 m s^{-1} .

En el nivel de 1,000hPa, un cambio asociado al desarrollo de la estación de lluvias en América Central y sur de México tiene lugar en el Pacífico oriental, en la región comprendida entre América Central y el meridiano de 120°W , en donde la dirección del viento cambia de un flujo del este durante el invierno (de noviembre a abril), a un flujo del oeste (vientos ecuatoriales del oeste) durante el verano (de mayo a octubre), conforme la ZITC se desplaza hacia su posición media durante el verano boreal (no se muestra).

Cambios en la circulación, asociados al establecimiento y desarrollo del monzón mexicano, se observan en la Figura 7. Durante la pentada 34 (mediados de junio, Fig. 7a), los vientos del noroeste se debilitan y toman un giro hacia el oeste al sur de la península de Baja California, mientras que el centro anticiclónico sobre el Pacífico oriental desaparece. Durante este periodo se observa un aceleramiento de los vientos del este sobre el Caribe y América Central, los cuales toman un giro anticiclónico sobre el Pacífico oriental. A finales de junio y principios de julio, vientos del sureste por arriba del nivel de 850hPa se observan a lo largo de la costa pacífica de México hasta más allá de 20°N (Fig. 7b y c). Este flujo del sureste contribuye al transporte de humedad desde el Caribe hacia el noroeste de México (Barlow *et al.*, 1998).

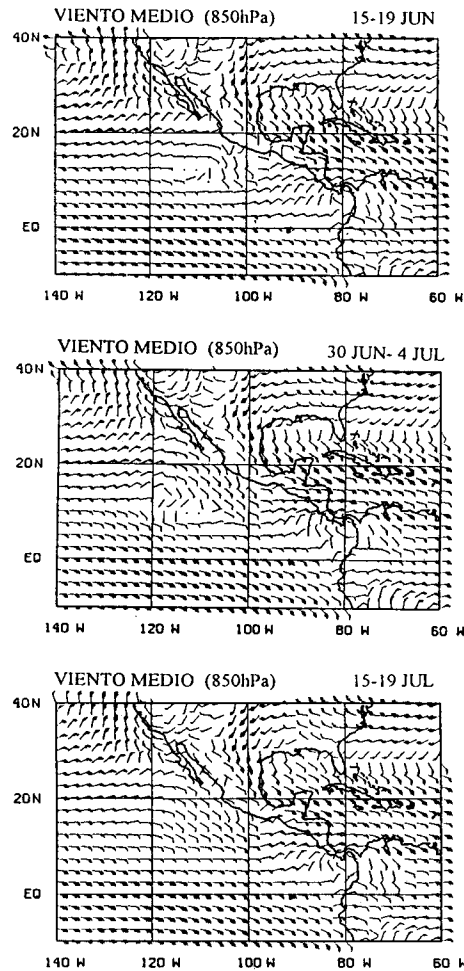


Fig. 7. Igual que la Figura 6, pero para: (a) pentada 34 (mediados de junio), (b) pentada 37 (finales de junio y principios de julio) y (c) pentada 40 (mediados de julio).

3.4. Variaciones en la circulación de niveles bajos

Para un mejor análisis de las variaciones en la circulación de niveles bajos, se procedió a calcular el incremento cada tres pentadas, de igual manera que en los campos de RSOL y se obtuvieron los mapas respectivos (ΔUV). Es de notar que tales mapas no representan cambios reales de la circulación, sino una intensificación o debilitamiento del flujo. Con fines de explicación, los símbolos "C" y "A" en las Figuras 8 y 9, denotan centros ciclónicos y anticiclónicos, respectivamente.

Los cambios más notables, asociados al desarrollo de la estación de lluvias sobre el área de estudio, incluyen una variación estacional sobre el Pacífico oriental, en el cinturón comprendido entre 15°S y 15°N , en donde el flujo se incrementa hacia el Hemisferio Sur desde mediados de octubre hasta mediados de marzo (no se muestra). La tendencia opuesta es visible desde mediados de abril hasta mediados de septiembre (e.g., Figura 8a), en asociación con el desarrollo y migración hacia el norte de la ZITC. Es de notar que a lo largo del año, el flujo medio se encuentra orientado predominantemente hacia el Hemisferio Norte. Resultados similares han sido documentados por Horel (1982).

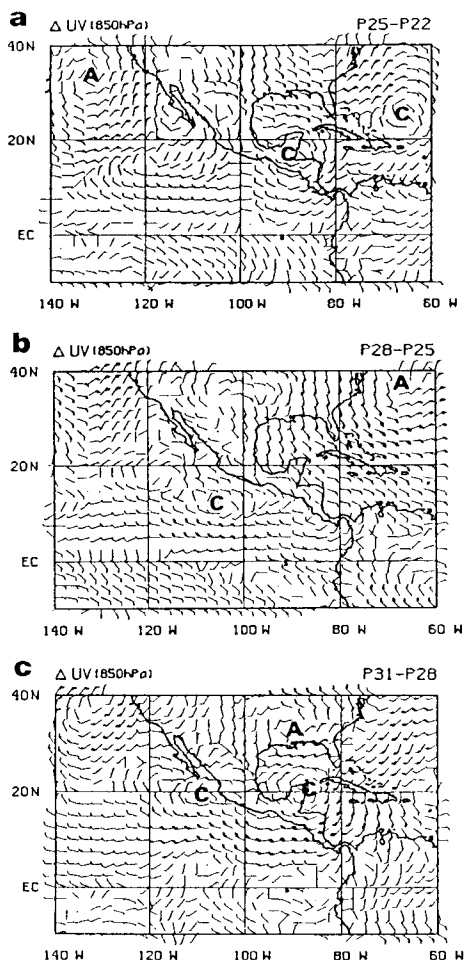


Fig. 8. Diferencia (incremento) del viento medio en el nivel de 850hPa entre: (a) pentada 25 y 22, (b) pentada 28 y 25 y (c) pentada 31 y 28. Una barra representa velocidades de 1 m^{-1} , media barra 0.5 m^{-1} .

La anterior variación estacional norte/sur es acompañada por una variación en la intensidad de los vientos del este sobre el Pacífico oriental, en la región entre 5° y 15°N , en donde los vientos ecuatoriales del oeste se intensifican a finales de abril (Fig. 8a), cambio también visible en el flujo medio de 1,000hPa. A mediados de mayo (Fig. 8b), un centro "C" cerca de 10°N y 105°W , sugiere una intensificación en la convección, en buen acuerdo con la Figura 3b que muestra los mayores incrementos negativos de RSOL sobre la misma zona. A finales de mayo y principios de junio (Fig. 8c), los vientos del oeste toman un giro ciclónico sobre América Central y el Caribe. Dos centros "C" se forman durante este periodo a lo largo de 20°N , estas celdas "C" están inmersas dentro de una zona de intensa convección (Fig. 3c) y por lo tanto son de

origen convectivo. Cuando estas dos celdas se combinan, tienden a formar un gran centro de circulación ciclónica sobre el Pacífico oriental y centro/sur de México, con vientos ecuatoriales del oeste cerca de la superficie en su parte sur.

El patrón anterior súbitamente se revierte a mediados de junio (Fig. 9a), cuando dos centros "A" cerca de Cuba substituyen la circulación "C" sobre Yucatán, lo que sugiere subsidencia y un reforzamiento del Alta del Atlántico, mientras que en el Pacífico, dos centros "C", originados por una intensificación de la convección asociada a la ZITC, se han desarrollado. Este patrón explica la intensificación de los vientos del este sobre el Caribe, América Central y a lo largo de la costa del Pacífico en México. Este cambio coincide con la fase de inicio de la estación de lluvias sobre el noroeste de México y con una disminución de la convección sobre el resto del país.

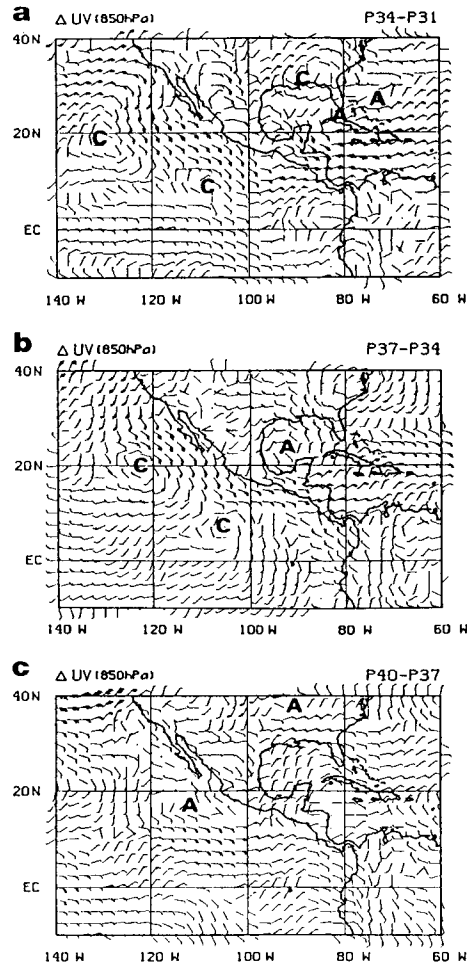


Fig. 9. Igual que la Figura 8, pero entre: (a) pentada 34 y 31, (b) pentada 37 y 34 y (c) pentada 40 y 37.

Un aspecto interesante en la Figura 9b es la intensificación del flujo procedente del Hemisferio Sur, centrado a lo largo de 100°W , el cual es más visible en el nivel de $1,000\text{hPa}$ (no se muestra). Este aspecto apoya los resultados de Reyes y Cadet (1988), quienes sugieren el transporte de humedad desde el Hemisferio Sur hacia el noroeste de México y lo relacionan con una intensificación del alta subtropical del Pacífico sur. Notablemente, durante el periodo de principios

de junio y hasta mediados de julio, los mapas muestran una intensificación en los vientos del sur que entran y soplan a lo largo del Golfo de California, en mayor acuerdo con los análisis de Douglas *et al.* (1993).

A principios de agosto, los vientos ecuatoriales del oeste sobre el Pacífico tropical y América Central tienden a incrementarse nuevamente, pocos días después el monzón mexicano inicia su fase de retiro y la actividad convectiva se desplaza hacia el noreste de México y el Pacífico tropical.

4. Discusión

En este estudio se han documentado aspectos relacionados con las fases de inicio y retiro de la estación de lluvias en México, así como de sus variaciones intraestacionales. Los análisis de valores medios para cinco días de RSOL muestran que la estación de lluvias en el centro/sur de México tiene una duración temporal de cinco meses, por lo que puede ser considerada como un evento interestacional, mientras que el monzón mexicano sobre el noroeste del país, con una duración aproximada de noventa días, puede ser visto como un evento climatológico intraestacional.

Un resultado interesante es que estos dos regímenes convectivos, aparentemente, presentan una relación desfasada. El desarrollo del monzón mexicano es acompañado por una disminución en la convección sobre el centro/sur de México, América Central y el Pacífico oriental, que corresponde al periodo de canícula. A mediados de agosto, conforme la estación de lluvias sobre el noroeste de México inicia su retiro, la convección se desplaza hacia el este y sur de esta región, lo que da lugar al segundo máximo en la precipitación de aquellas áreas donde se observa el fenómeno. Esta posibilidad debe ser analizada en futuros trabajos con el uso de bases de datos independientes. Una pregunta, sin respuesta definitiva por el momento, es: ¿cuál es el mecanismo físico que da lugar a esta relación?

El análisis de los campos de viento en niveles bajos, muestra que un aspecto precursor al establecimiento y desarrollo de la actividad convectiva sobre América Central y sur de México, es la intensificación de los vientos ecuatoriales del oeste cerca de la superficie, conforme la ZITC se desarrolla sobre el Pacífico oriental. Durante la segunda mitad de junio, cuando se observa una intensificación en la convección (menos de 200 Wm^{-2}) sobre la alberca de aguas cálidas cerca de 10°N y 100°W , este patrón súbitamente se revierte; los vientos del este tienden a intensificarse sobre el Caribe, cruzan América Central y toman un giro hacia el noroeste a lo largo de la costa pacífica mexicana, encuadrando el inicio del monzón mexicano. El cambio en la intensidad del flujo de niveles bajos es inducido por una intensificación de la actividad convectiva asociada a la ZITC sobre el Pacífico oriental, que da lugar a movimientos ascendentes y vorticidad ciclónica, de acuerdo con el modelo de Gill (1982, 469-471pp.), lo que en turno, favorece subsidencia sobre el Golfo de México y el Caribe, posibilidad que ha sido sugerida en trabajos previos (Gandú and Silva, 1998).

Un punto débil de este estudio es que no incluye el análisis de la temperatura superficial del mar sobre el Pacífico. Al respecto, recientes trabajos destacan el papel de la alberca de aguas cálidas frente a las costas de Guerrero y Oaxaca en el desarrollo de la estación de lluvias sobre México. Por ejemplo, Magaña *et al.* (1999), sugieren que un incremento en la temperatura de las aguas en esta zona, produce una aceleración de los vientos del este (debilitamiento de los vientos ecuatoriales del oeste), lo que disminuye el transporte de humedad desde el Pacífico oriental al sur de México y América Central, situación que da lugar al periodo de canícula, en buen acuerdo con los resultados del presente trabajo. Para una mejor comprensión de los mecanismos físicos que dan lugar a las variaciones intraestacionales de la estación de lluvias en México, son necesarios mayores estudios. Por ejemplo, es importante analizar la componente divergente del viento y el flujo de humedad, aspectos que motivan una futura investigación.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al apoyo del Ministerio de Educación, Ciencia y Cultura del Gobierno del Japón. El autor desea manifestar su agradecimiento al Dr. J. Matsumoto, Dr. T. Murakami y Dr. Víctor Magaña, así como a dos revisores anónimos, por sus comentarios y sugerencias. Durante la realización del trabajo se tuvo el apoyo de Martín Téllez Saucedo del Servicio Meteorológico Nacional. Para la elaboración de los mapas se utilizó la computadora HITACHI-MP5800 del Centro de Cómputo de la Universidad de Tokyo (CCUT), así como subrutinas gráficas del *National Center for Atmospheric Research of Japan*, adaptadas al CCUT.

REFERENCIAS

- Adang, T. C., and R. L. Gall, 1989. Structure and dynamics of the Arizona Monsoon boundary. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1423-1438.
- Barlow, M., S. Nigam, and E. Berbery, 1998. Evolution of the North American monsoon system. *J. Climate*, **11**, 2238-2257.
- Bryson, R. A., and W. P. Lowrey, 1955. Synoptic climatology of the Arizona summer precipitation singularity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **36**, 329-339.
- Cortez, M., 1999. Marcha anual de la actividad convectiva en México. *Atmósfera*, **12**, 101- 110.
- Douglas, M. W., R. A. Maddox, K. Howard, and S. Reyes, 1993. The Mexican Monsoon. *J. Climate*, **6**, 1665-1777.
- Douglas, M. W., and S. Li, 1996. Diurnal variation of the lower-tropospheric flow over the Arizona Low Desert from SWAMP-1993 observations. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1211-1224.
- Gandú, A. W., and P. L. Silva Dias, 1998. Impact of tropical heat sources of the South American upper tropospheric circulation. *J. Geophys. Res.*, **103**, 6001-6015.
- Gill, E. G., 1982. Atmosphere-ocean dynamics. Academic Press, 662 pp.
- Horel, J. D., 1982. On the annual cycle of the tropical Pacific atmosphere and ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1863-1878.
- Horel, J. D., A. N. Hahmann, and J. E. Geisler, 1989. An investigation of the annual cycle of convective activity over the Tropical Americas. *J. Climate*, **2**, 1388-1403.
- Magaña, V., J. Amador and S. Medina, 1999. The mid-summer drought over Mexico and Central America. *Mon. Wea. Rev.*, **12**, 1577-1588.
- Matsumoto, J., 1989. The seasonal changes of tropical cloud distribution as revealed from 5-day Outgoing Longwave Radiation. *Bulletin of the Department of Geography. University of Tokyo*, **21**, 19-35.
- McBride, J. L., 1996. Tropical cyclone formation. *Global perspective on tropical cyclones*. WMO/TD-No 693, 63-105 pp.
- Morrisey, M. L., 1986. A statistical analysis of the relationships among rainfall, Outgoing Longwave Radiation and the moisture budget during January-March, 1979. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 391-942.
- Murakami, T., and J. Matsumoto, 1994. Summer monsoon over the Asian Continent and Western North Pacific. *J. Met. Soc. Japan*, **72**, 719-145.
- Rasmusson, E. M., C. F. Ropelewski, and M. S. Halpert, 1988. Time'space scales of low frequency tropical rainfall variability. *Tropical rainfall measurements*. Theon, J. S., and N. Gugono Eds., A. DEEPAK Publishing, Hampton, Virginia, USA.

- Reyes, S., and D. L. Cadet, 1988. The southwest branch of the North American Monsoon during summer 1979. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1175-1187.
- Rowson, D. R., and S. J. Colucci, 1992. Synoptic climatology of thermal low-pressure systems over south-western North America. *Int. J. Climatol.*, **12**, 529-545.
- Wang, B., 1994. Climate regimes of tropical convection and rainfall. *J. Climate*, **7**, 1109- 1118.