

2 El Niño y el clima

**Víctor Magaña¹, José Luis Pérez¹, Jorge Luis Vázquez²,
Eliseo Carrisoza³ y Joel Pérez²**

Colaboradores: Adalberto Tejeda², Eleonora Romero^{4,14}, Rubén Morales¹⁴ e Irina Tereshchenko⁵

Climatología de México

Por su ubicación geográfica, la República Mexicana es afectada por sistemas meteorológicos de latitudes medias durante el invierno, y por sistemas tropicales en el verano. Parte importante de la dinámica de una atmósfera subtropical como la mexicana, son las interacciones entre trópicos y extra-trópicos, que ayudan a entender los cambios que experimenta el tiempo día con día. Los llamados «Nortes» son una manifestación de dicha interacción entre trópicos y extratropicos. Otro elemento importante al analizar la dinámica atmosférica mexicana son los factores de frontera como la topografía, el uso de suelo y la presencia de mares, que en gran medida determinan el tipo de clima que se experimenta regionalmente.

El clima mexicano se debe estudiar considerando procesos de interacción océano-atmósfera-continente. La existencia de procesos como la canícula de verano, es una muestra de la importancia de estas interacciones, principalmente en regiones como el sur de México y Centroamérica (Magaña *et. al.* 1999).

Para entender los cambios del clima de una región a otra es necesario analizar la interacción de la atmósfera con el océano y la orografía, al igual que las características del uso del suelo.



Por extenderse desde regiones tropicales hasta latitudes medias, y debido a lo complejo de su topografía, en México se tienen una gran variedad de climas, que van desde los cálidos, con temperaturas medias anuales mayores a 32°C, hasta los fríos, con temperaturas menores a 10°C. Sin embargo, las temperaturas medias de superficie varían en el 93% del territorio nacional entre 10°C y 26°C (INEGI, 1999). Este porcentaje comprende climas cálidos-subhúmedos en 23% del territorio nacional; secos en el 28%, muy secos en el 21% y templados-subhúmedos en el 21%.

En invierno se alcanzan los mínimos de temperatura, principalmente en la región norte y en las zonas montañosas (Fig. 2.1a), ocurriendo incluso nevadas en algunas sierras. Los veranos en las zonas semiáridas son extremos, con temperaturas que alcanzan con frecuencia los 40° C o más (Fig. 2.1b). Los años recientes han sido considerados como los más cálidos en el mundo, al parecer por los efectos del calentamiento global. México no ha escapado a esta tendencia y en 1997 y 1998 se registraron temperaturas record en casi todo el país, y en particular en la Ciudad de México (Fig. 1.2).

a)

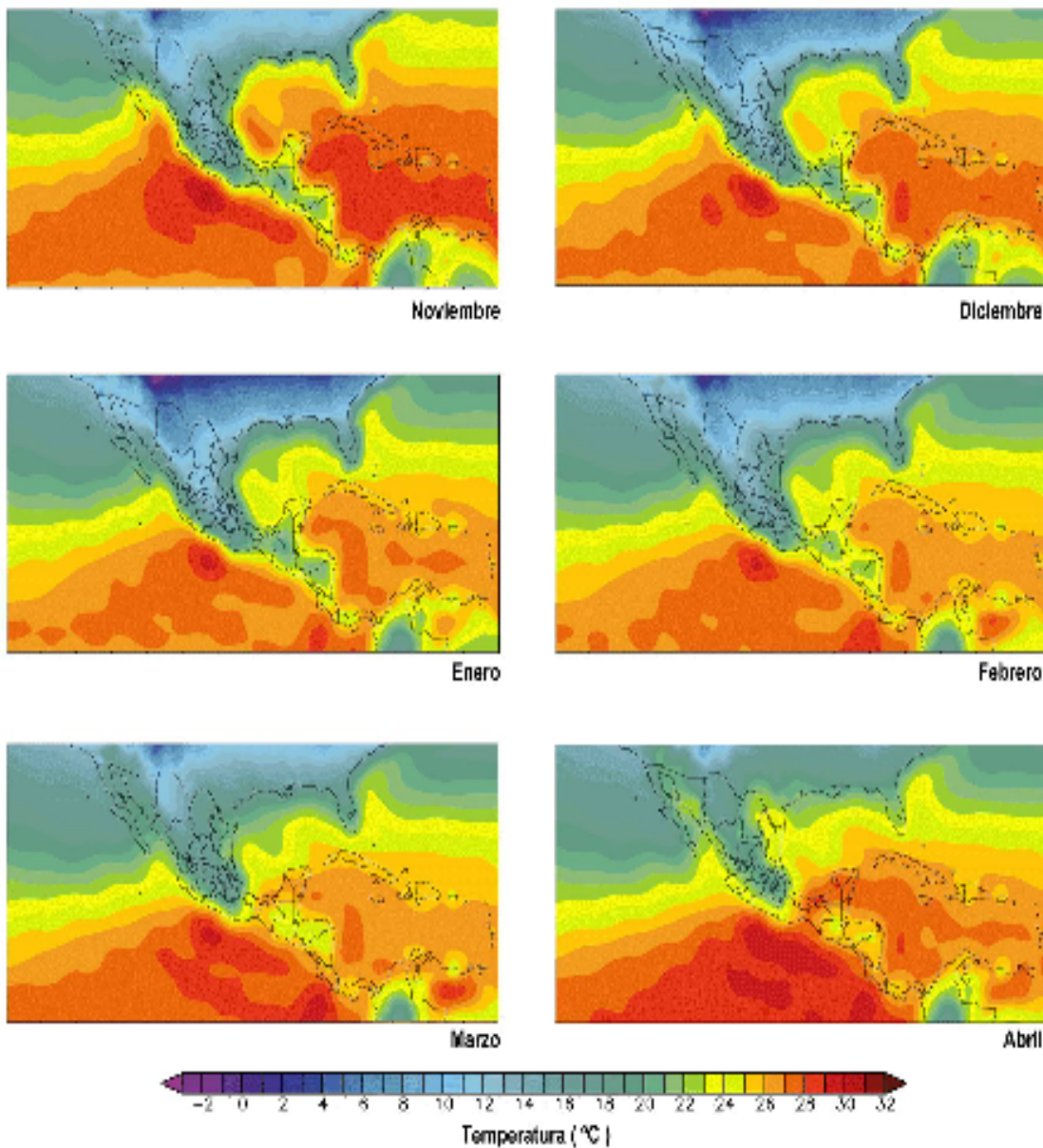
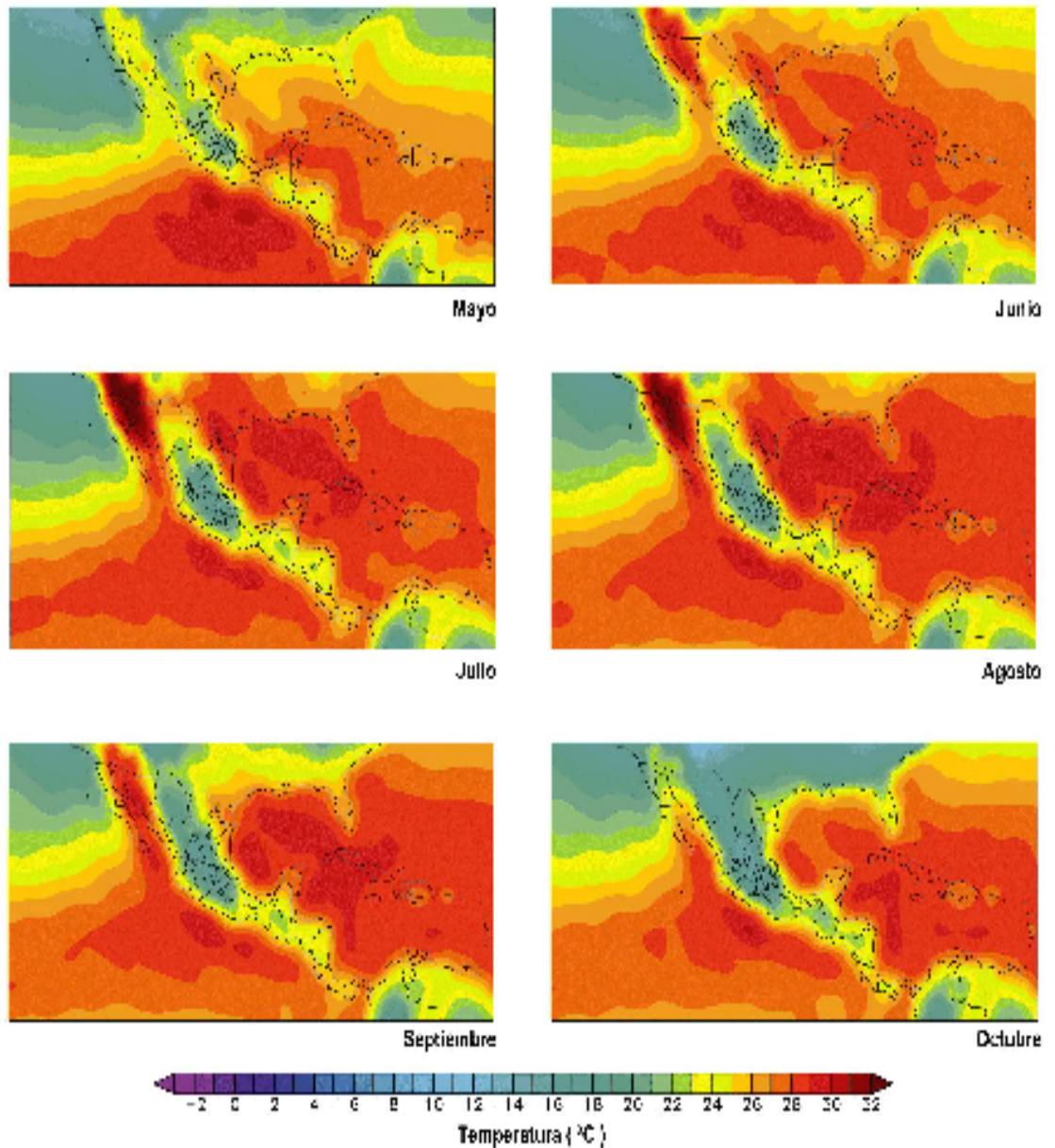


Fig 2.1a Climatología (1958-1999) de invierno de la temperatura media de superficie

b)



Aunque llueve en invierno (Fig. 2.2a), las lluvias más intensas ocurren en verano, y de forma general se puede decir que la temporada de lluvias en México comienza entre mayo y julio (Fig. 2.2), terminando entre septiembre y octubre, dependiendo de la zona de interés. Por otra parte, el invierno se caracteriza por condiciones secas en la mayor parte del territorio, excepto en el noroeste y en la vertiente del Golfo de México. Por el hecho de presentarse lluvias durante el verano (Fig. 2.2b) en la mayor parte del país y condiciones mayormente secas durante el invierno (Fig. 2.2a), se habla de que México tiene un clima monzónico.

a)

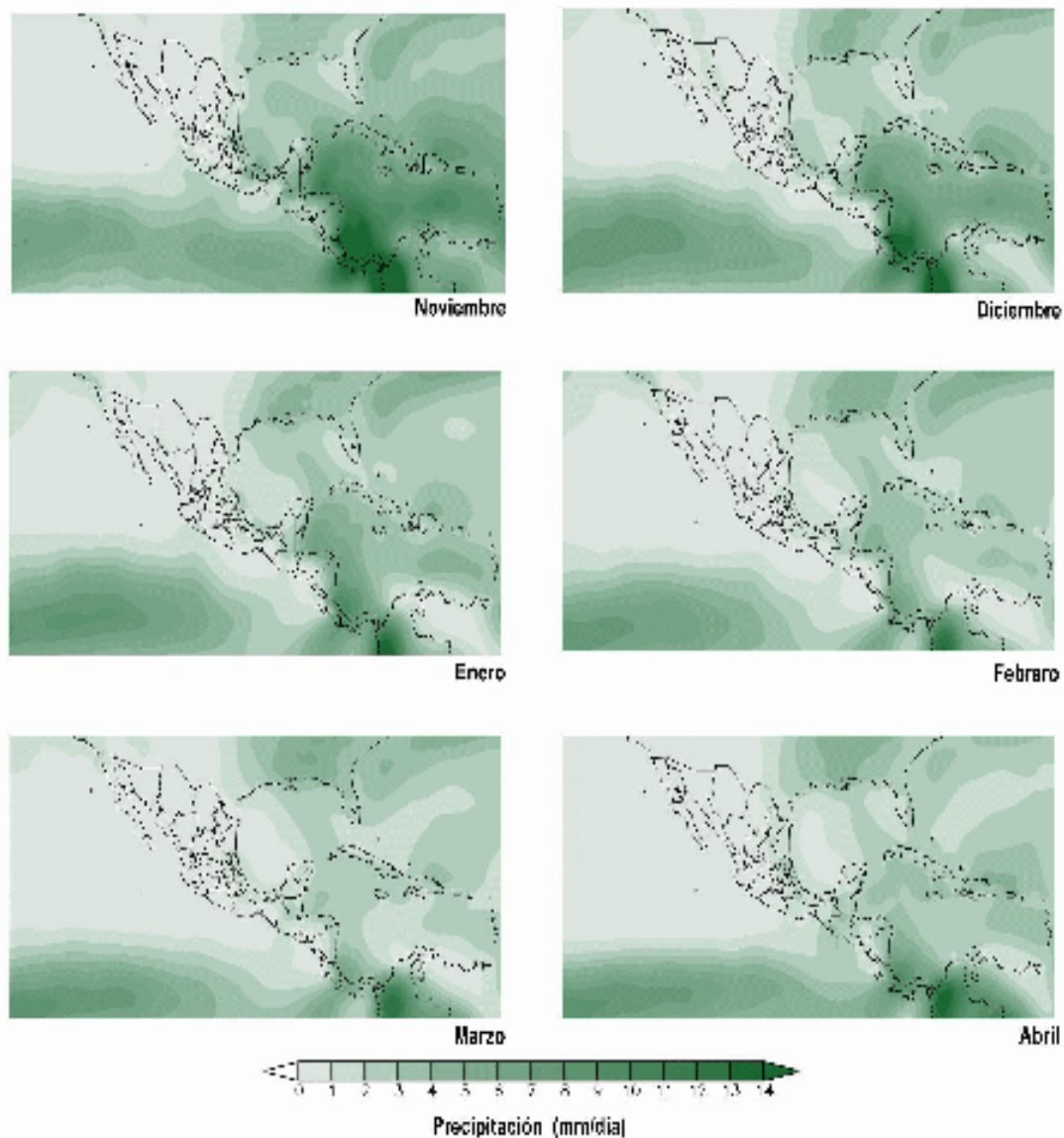


Fig. 2.2a Climatología (1958-1999) de precipitación en invierno (mm/día)

En términos de dinámica atmosférica, en el período de invierno se presentan ciclones de gran escala en latitudes medias que afectan el norte del país y que en ocasiones se propagan hacia el sur, sobre el Golfo de México y el sureste, provocando bajas de temperatura y en ocasiones lluvias desde Veracruz, hasta Yucatán, que pueden incluso alcanzar Centro América.

b)

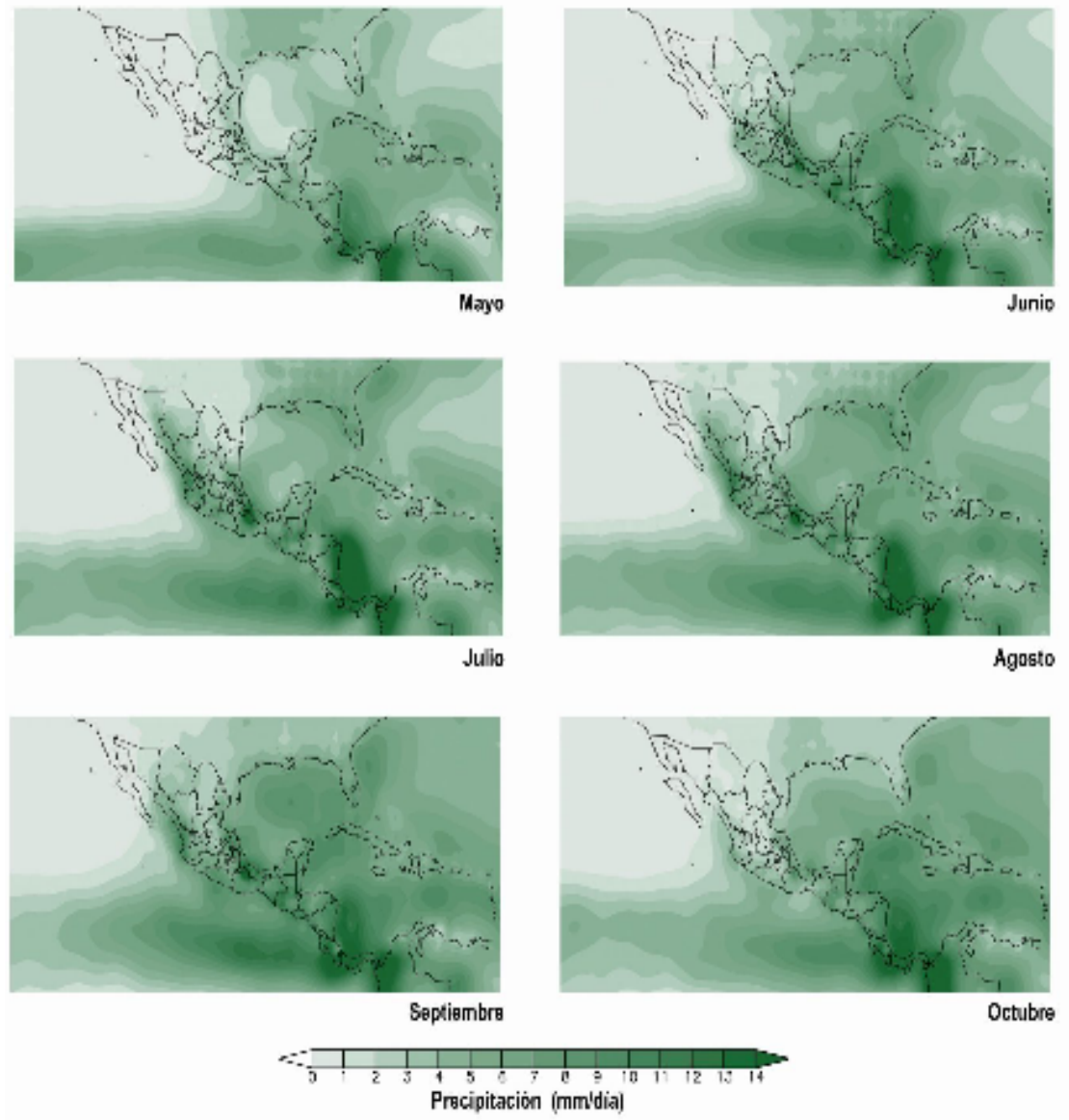


Fig. 2.2b Como en 2.2 a, pero para verano

Las lluvias de verano están asociadas a una mayor variedad de estructuras meteorológicas entre las que destacan:

- i) La Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC),
- ii) El monzón mexicano,
- iii) Las ondas del este y
- iv) Los huracanes en el Pacífico, el Caribe y Golfo de México.

Como parte del ciclo anual de las lluvias de verano, en la región centro-sur de México y hasta Centroamérica, aparecen dos máximos en la precipitación de verano, uno en junio y otro en septiembre. Por tanto, existe un mínimo relativo entre julio y agosto (Fig. 2.3) conocido como sequía intraestival, sequía del medio verano, canícula o veranillo, dependiendo de la región o país donde se experimente (Magaña *et al.* 1999).

Durante julio y agosto, tal mínimo de precipitación corresponde a una menor cantidad de nubes convectivas profundas, lo que permite la mayor incidencia de radiación solar y por lo tanto una mayor temperatura de superficie que la gente asocia con el calor agobiante de la canícula. Tal característica del ciclo anual parece ocurrir sólo en la región del Pacífico mexicano, donde se forma una alberca de agua caliente que favorece la formación de nubes profundas. Esta alberca de agua caliente juega un papel fundamental en la dinámica del clima de México y Centro América (ver Cap. 3).

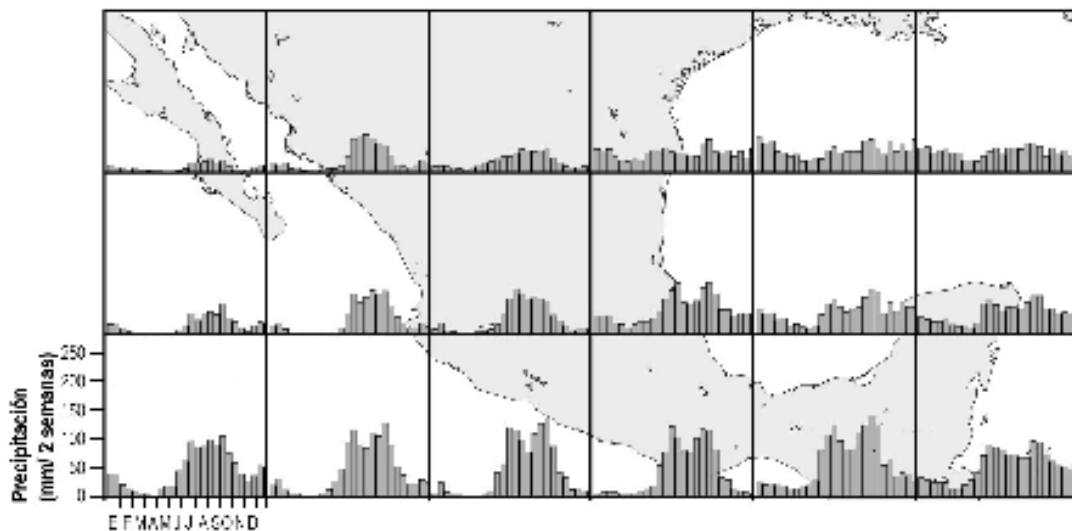


Fig. 2.3 Climatología quincenal de la precipitación (mm/2 semanas) en subdominios de 5°X5° (adaptado de Magaña *et al* 1999).

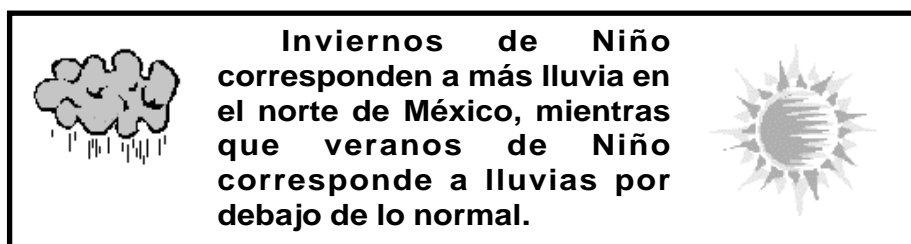
Gran parte de la dinámica atmosférica de verano en México está relacionada con la presencia de la Zona Inter Tropical de Convergencia (ZITC) en el Pacífico del este. La posición, intensidad y densidad de la convección profunda en esta región puede resultar en periodos de fuertes lluvias o severas sequías para México. Es en esta zona donde también tiene lugar la mayor actividad ciclogénica del planeta, formándose huracanes intensos. La variabilidad de la estructura espacial de la ZITC ha sido poco estudiada (Zhang 1993). Sin embargo, se sabe que la ZITC experimenta periodos de intensa y débil actividad convectiva, a veces modulados por el paso de ondas tropicales (Magaña y Yanai 1995).

El Niño y el clima de México

Las lluvias son parte fundamental de la vida. El exceso o falta de precipitaciones afecta de manera evidente los patrones de conducta de los seres humanos. Es por ello que desde siempre ha existido un gran interés en pronosticar estaciones de precipitación abundante o escasa. En México, las actividades agrícolas son las más afectadas por extremos en las características de la época de lluvias (Florescano, 1980). La ocurrencia de sequías en nuestro país ha resultado en serios problemas socio-económicos, como en el norte de México durante la década de los noventa. Por esta razón, el reto de pronosticar las lluvias ha inquietado a los especialistas del clima por mucho tiempo (Jáuregui, 1977).

Desde hace algunos años, se sabe que el fenómeno de El Niño afecta las lluvias en México (Magaña y Quintanar 1997). Por ejemplo, Mosiño y Morales (1988) encontraron que el fenómeno de El Niño tiene grandes repercusiones en la precipitación en el centro del país. Otros trabajos han confirmado el papel que juega El Niño, no sólo en las lluvias de verano, sino también en las de invierno (Cavazos y Hastenrath, 1990).

De manera general, se puede decir que las lluvias de invierno se intensifican durante años El Niño en el noroeste y noreste de México, mientras que disminuyen hacia la parte sur (Magaña, *et. al.* 1998). Los inviernos de Niño resultan más fríos en casi todo el país. Por otra parte, los veranos de Niño son más secos y cálidos que los veranos de Niña. Es por ello que, para entender los cambios que experimenta el clima mexicano durante periodos de Niño o Niña, es conveniente analizar por separado el invierno y el verano.



Evidentemente, además de El Niño existen otros procesos climáticos que resultan en más o menos lluvia. Encontrarlos es un reto científico.

La señal de El Niño en invierno

El clima mexicano es afectado por ciclones de latitudes medias que generan frentes fríos. Estos ciclones producen frecuentemente lluvias, al mismo tiempo que mueven masas de aire cambiando el tiempo atmosférico día con día (Holton 1979). En años normales, el clima mexicano es parcialmente modulado por frentes fríos y lluvias invernales, tanto en la región de Baja California, Sonora y Chihuahua, como en la de Nuevo León y Tamaulipas. Algunos de estos sistemas de latitudes medias logran alcanzar bajas latitudes convirtiéndose en "Nortes", que afectan los estados de la vertiente del Golfo de México, la península de Yucatán y partes de Centroamérica y el Caribe (Schultz *et al.* 1997).

Durante años de Niño, la circulación media invernal (Fig. 2.4a), con corrientes en chorro sobre el Pacífico norte y la costa este de los Estados Unidos, es alterada por una onda estacionaria del tipo Rossby, que se ha denominado patrón de circulación del Pacífico Norte América, o patrón PNA (Fig. 2.4b). La presencia de esta anomalía en la circulación media resulta en cambios en la posición de la corriente en chorro de latitudes medias y subtropical, que se desplazan hacia el sur alrededor de 500 km (Magaña y Quintanar, 1997).

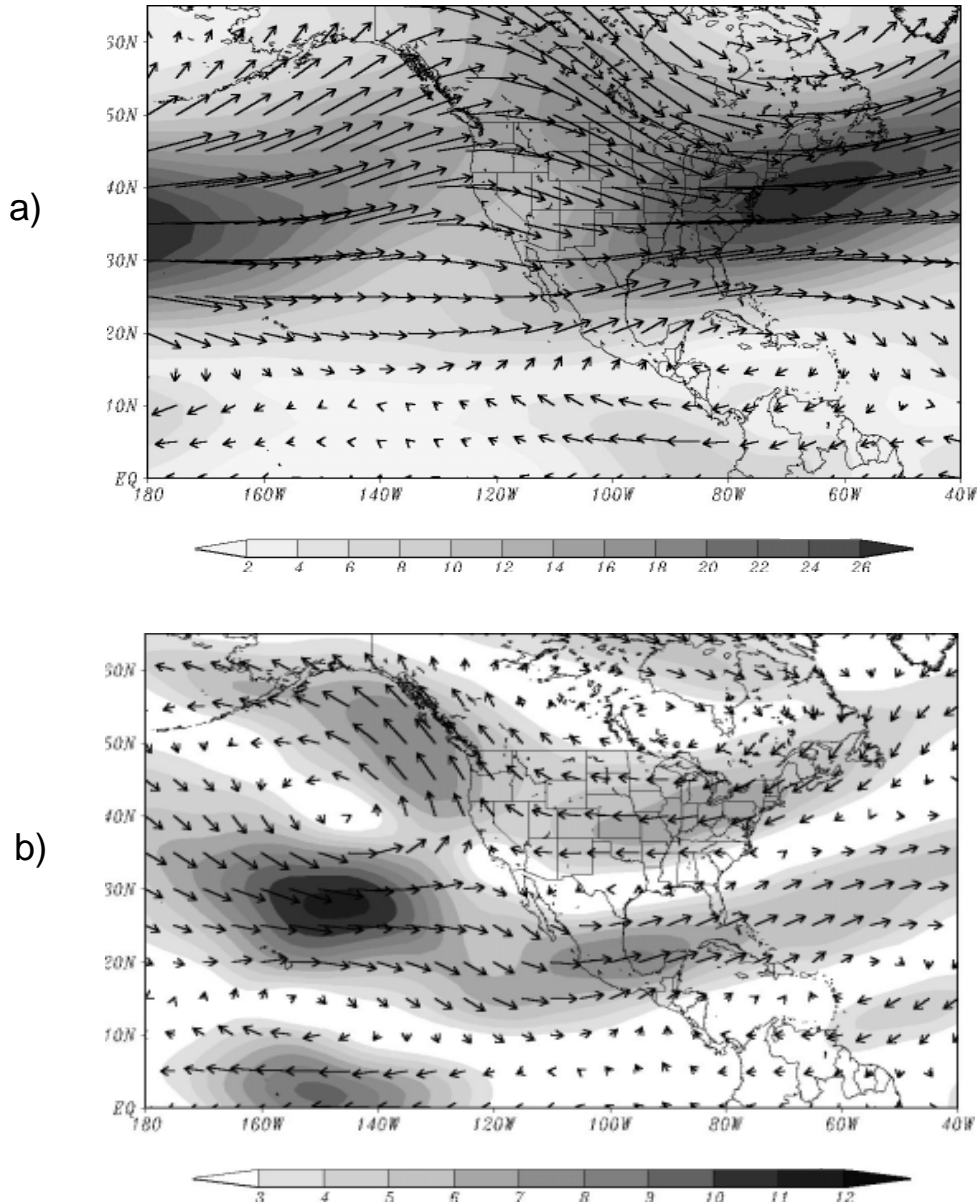


Fig. 2.4 Circulación a 500 Hpa. a) media de invierno y b) anómala durante inviernos de Niño (1965-66, 1972-73, 1982-83, 1986-87, 1991-92, 1997-98).

El sombreado corresponde a la intensidad del viento (m/s).

Dado que los sistemas de latitudes medias utilizan este sistema de corriente en chorro para adquirir energía, el paso de frentes fríos en el norte de la República Mexicana se vuelve más frecuente y con ello, se tienen más lluvias invernales en el norte y centro del país, e incluso en la península de Yucatán (Fig. 2.5a). Así, el norte de Baja California experimenta lluvias invernales más frecuentes e intensas durante periodos de Niño (Pavía y Badán, 1998), las cuales provocan en ocasiones inundaciones que afectan a la población. Por ejemplo, la compleja topografía de la ciudad de Tijuana la hace vulnerable a las intensas lluvias invernales durante años Niño (Rosquillas, 1998). Sin embargo, la experiencia de eventos El Niño anteriores ha llevado a que en años recientes la población de esta región tome medidas preventivas ante el anuncio de este fenómeno. Durante años La Niña, las anomalías en la precipitación de invierno (Fig. 2.5b) parecen simétricamente opuestas con respecto a las observadas en años de Niño.

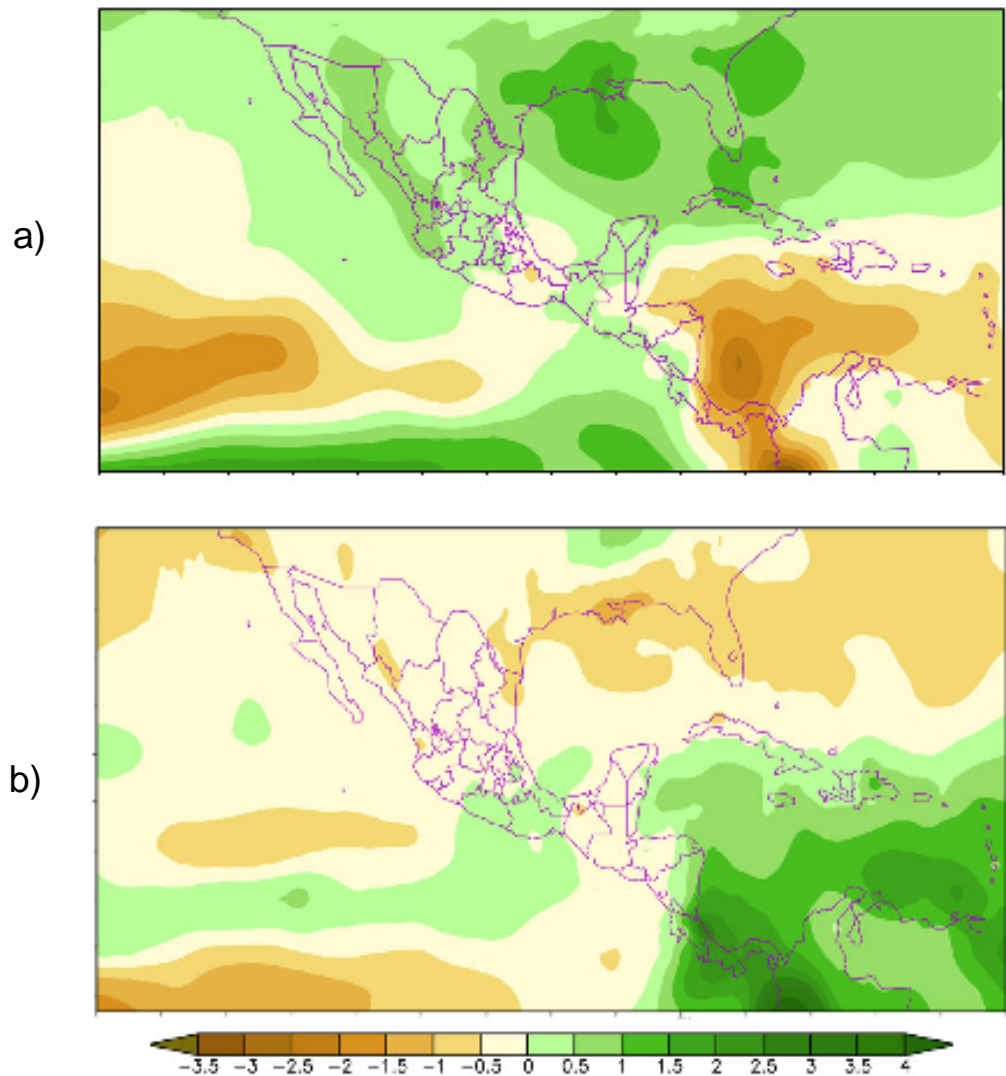


Fig. 2.5 Como en la Fig. 2.4b, pero para anomalías de precipitación (mm/día) a) durante inviernos de El Niño (1965-66, 1972-73, 1982-83, 1986-87, 1991-92, 1997-98) y b) durante inviernos de La Niña. (1964-65, 1970-71, 1973-74, 1975-76, 1988-89, 1998-99)

La presencia anómalamente continua de frentes fríos durante inviernos El Niño, provoca que las temperaturas en gran parte del país estén por debajo de lo normal (Fig. 2.6a), llegando a producirse nevadas en la sierras e incluso, en la parte central de México. Las nevadas de 1997 en Jalisco, Guanajuato y el Distrito Federal se consideran eventos extraordinarios, resultado de El Niño.

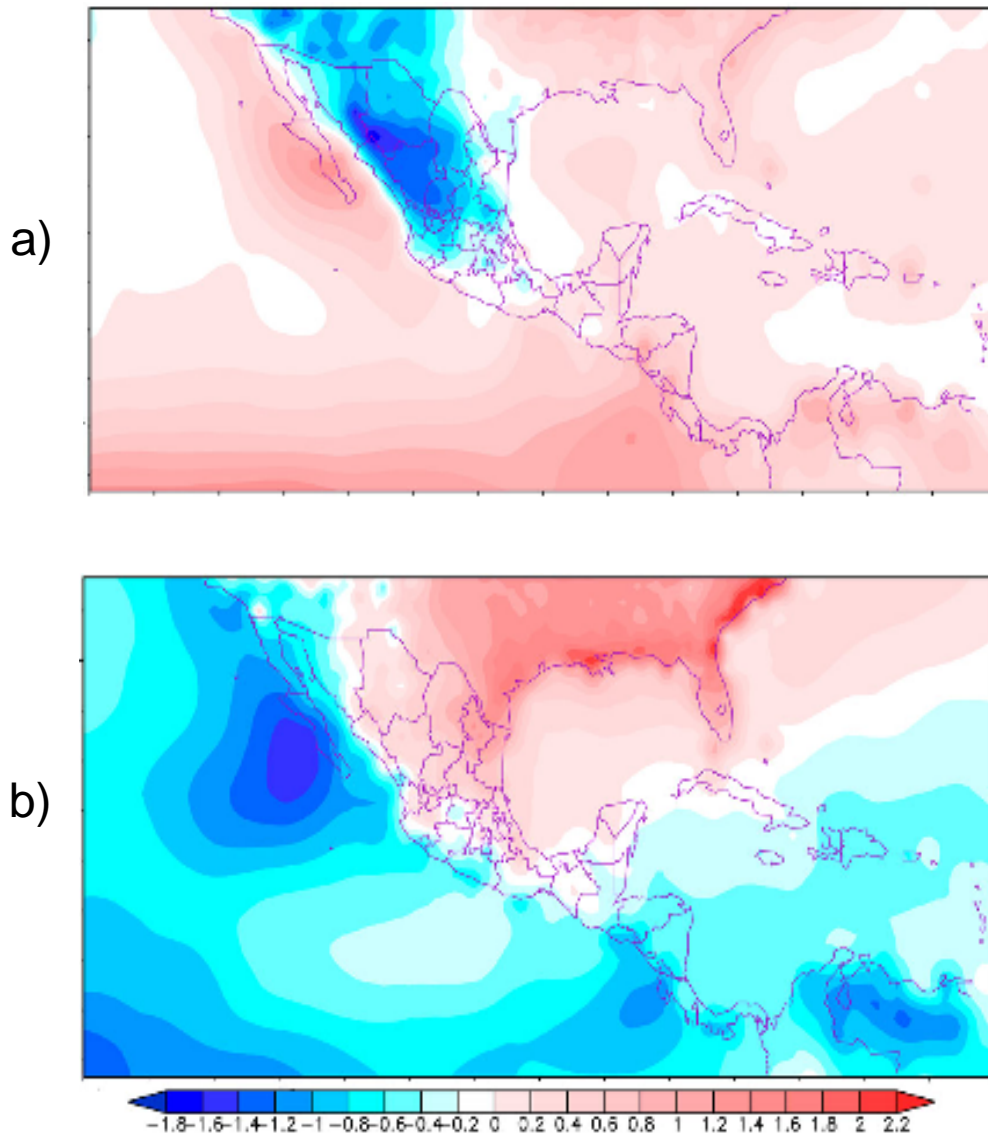


Fig. 2.6 Como en la Fig. 2.4 pero para anomalías de temperatura superficial del aire (°C) durante inviernos: a) El Niño y b) La Niña.

Como en el caso de la precipitación de invierno, durante años La Niña (Fig. 2.6b), las anomalías de temperatura de superficie parecen opuestas a las observadas durante años de El Niño.

El impacto de El Niño en las lluvias de invierno de México no es siempre el mismo. Esto quiere decir que existen diferencias en las características regionales y temporales de las anomalías de lluvia y temperatura de un año Niño a otro (Fig. 2.7). Por ejemplo, El Niño de 1986-87 no parece haber resultado en mucha mayor lluvia de invierno. El Niño de 1982-83 produjo lluvias invernales por encima de lo normal, aunque tuvo un impacto aparentemente menor al del invierno de 1991-92; mientras que El Niño de 1997-98 sólo impactó el norte de Baja California, parte de Sonora y la península de Yucatán. Estas diferencias de un año a otro en las anomalías invernales de lluvia entre eventos de Niño, dependen en gran medida de la posición de las circulaciones atmosféricas estacionarias, como el patrón PNA el cual es a la vez, influenciado por las características de la actividad convectiva anómala del Pacífico central (Ambrizzi y Magaña, 1998). Variaciones en la fase e intensidad del patrón PNA determinan la región donde ocurre la precipitación anómala. Un cambio en la fase de 5° a 10° en longitud de esta onda estacionaria, significa desplazamientos en los patrones de precipitación regional.

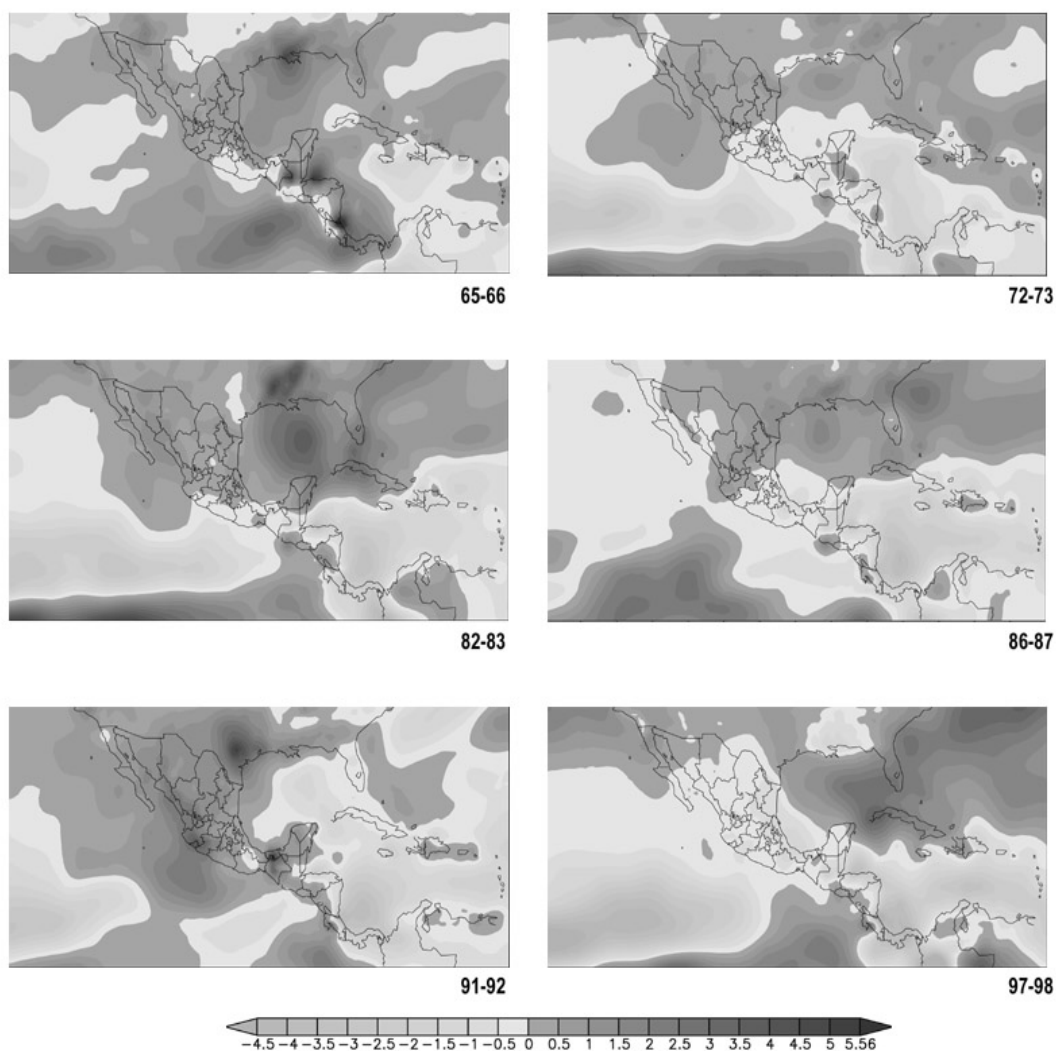


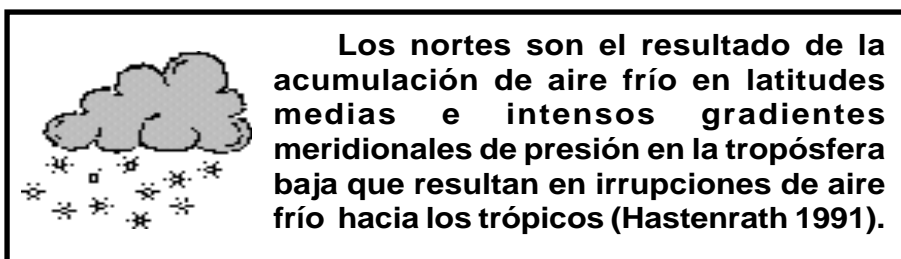
Fig. 2.7 Anomalías de precipitación (mm/día) durante eventos El Niño.

Parte de Centro América se ve afectada por la sequía invernal durante años El Niño. La subsidencia de gran escala y los efectos orográficos constituyen mecanismos mediante los cuales El Niño afecta el Caribe oriental y Centroamérica occidental. La intensa convección anómala en el Pacífico del este genera mayores circulaciones descendentes del tipo Walker y Hadley sobre el Mar Caribe (Webster, 1994), las cuales inhiben la convección profunda y las lluvias normales de invierno.

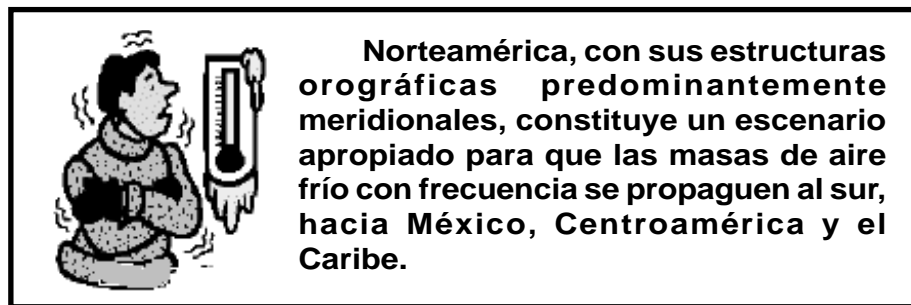
En regiones de los estados de Veracruz, Tabasco y Yucatán, el impacto de El Niño en el clima invernal se relaciona con la actividad de los Nortes, cuyo número e intensidad parecen verse afectados al cambiar la circulación atmosférica media. Los cambios en la posición e intensidad del *jet* subtropical asociados al establecimiento de circulaciones estacionarias (Fig. 2.4b), parecen provocar un aumento en el paso de estos sistemas de latitudes medias por el Golfo de México, los cuales afectan la parte sur de México, e incluso Centroamérica y el Caribe, sin que necesariamente esto se refleje en mayor precipitación. La precipitación en las regiones afectadas por Nortes parece disminuir durante años Niño. Esto resulta una interrogante científica.

Los Nortes

La atmósfera no tiene valores constantes de temperatura o densidad. Sin embargo, en algunas partes se forman masas de aire con propiedades físicas relativamente afines a las características de su región de origen. Estas masas de aire, casi-homogéneas, al desplazarse modifican el estado del tiempo regional. En ocasiones, el paso de una masa de aire puede ocasionar condiciones de tiempo severo. Por ejemplo, las masas de aire polar continental que en invierno llegan a México provocan días de intenso frío. Cuando dos masas de aire de distintas características se encuentran, se dice que ocurre un frente. En general, las condiciones meteorológicas de un frente frío se caracterizan por vientos y descensos de temperatura en superficie. Cuando el aire frío encuentra una masa de aire caliente y húmeda, se produce el desarrollo de nubes que pueden provocar precipitación. Si la posición de el frente frío es tal, que el viento sopla intensamente de norte a sur sobre el Golfo de México o Centroamérica, se tiene un "Norte".



Los Nortes ocurren preferentemente de octubre a mayo. Son parte de ondas de escala sinóptica de latitudes medias y están asociados con altas presiones que se originan al este de las montañas Rocallosas en los Estados Unidos. En la vertiente del Golfo de México, los Nortes generan vientos de hasta 30 m/s, descensos de temperatura que van de 2°C a 15°C en 24 horas, nubosidad baja, y en ocasiones, precipitación, principalmente sobre el este de las cordilleras de México y Centroamérica. Los efectos de un Norte permanecen desde un día hasta casi dos semanas después del paso del frente (Reding, 1992), pudiendo afectar actividades portuarias, la captura de crustáceos para exportación, e incluso actividades relacionadas con la industria del petróleo. Es por ello que determinar la actividad de Nortes ha sido y es de importancia económica.



Los estudios sobre la estructura y la dinámica de los Nortes estuvieron por mucho tiempo basados en la experiencia de los analistas es decir, eran de carácter subjetivo. Por ejemplo, Mosiño (1958 y 1964), clasificó patrones de circulación atmosférica sobre la República Mexicana, incluyendo los Nortes. Jáuregui (1971) analizó diversas tipificaciones del tiempo en México y encontró que la frecuencia de Nortes entre 1919 y 1965 estuvo estrechamente relacionada con la cantidad de precipitación. Klaus (1973) describió el origen de los Nortes a sotavento de las montañas Rocallosas y los clasificó dependiendo de la región mexicana afectada y de su desplazamiento meridional.

Con la aparición de sistemas de análisis objetivo de datos y modernos sistemas de cómputo, hoy es posible analizar patrones de circulación, como los de los Nortes, a partir de consideraciones dinámicas. Así, DiMego et al. (1976) mostraron que el número de frentes que penetran sobre la región del Golfo de México y el Caribe aumenta rápidamente de septiembre a octubre, alcanzando un máximo a la mitad del invierno. Trasviña y Barton (1997) analizaron cómo los Nortes afectan al Golfo de Tehuantepec con fuertes vientos, que atraviesan el Istmo de Tehuantepec mezclando sus aguas (ver Capítulo 3). Schultz *et. al.* (1998) realizaron, a partir de los análisis de Klaus (1973), una de las primeras estimaciones de actividad de Nortes en años El Niño y La Niña, aunque los resultados parecen poco concluyentes.

Para establecer las relaciones entre la ocurrencia de El Niño y los Nortes, es preciso contar con una clara definición de estos últimos. Un diagnóstico de datos históricos utilizando datos de campos de viento, temperatura y precipitación permite determinar la ocurrencia de los Nortes. Por ejemplo, se puede identificar la ocurrencia de un Norte, en un punto de la vertiente del Golfo de México, a partir de los siguientes criterios:

- i) Descenso en la temperatura superficial de 2°C o más, en 24 horas.
- ii) Cambios en la dirección del viento, siendo éste del norte o noreste.
- iii) Precipitaciones.

En la Figura 2.8 se muestra la temperatura máxima, la precipitación y la dirección del viento para enero de 1998, cerca de Veracruz, y se indican cuatro casos de descenso de temperatura mayor o igual a 2°C, de los cuales sólo tres cumplen los criterios establecidos para un Norte.

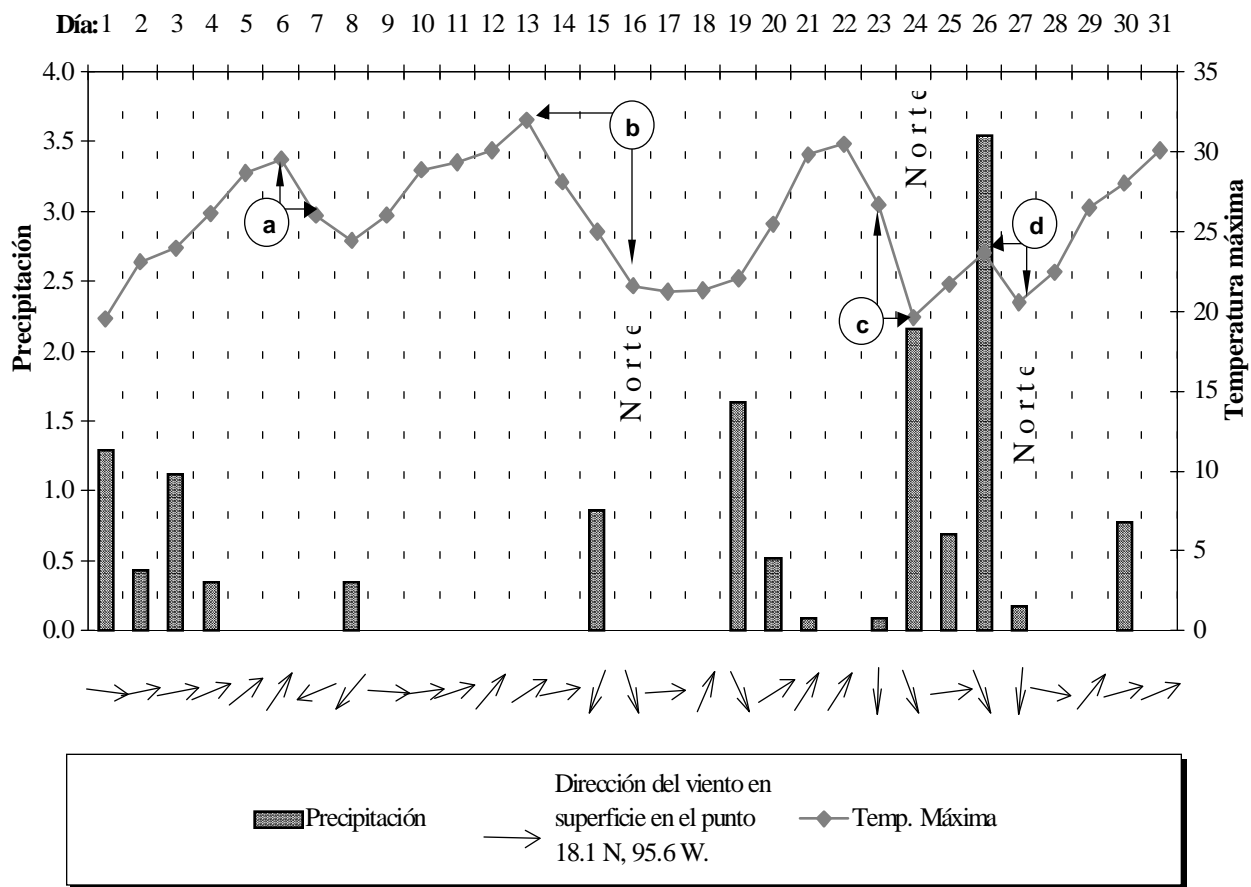


Fig. 2.8 Series de tiempo de temperatura máxima, precipitación y dirección del viento de superficie para enero 1998 en el punto 18.1N,95.6W (cerca de Veracruz, Ver.). Los círculos b, c y d corresponden a casos en que se satisfacen los criterios de ocurrencia de un Norte. El círculo a, no corresponde a un Norte.

Así, se puede determinar en forma sistemática la ocurrencia de Nortes en el Golfo de México para muchos inviernos. Para comprobar que efectivamente se «captura» la circulación a escala sinóptica, característica de este fenómeno, se obtiene el patrón compuesto del Norte con los campos meteorológicos, que no es otra cosa que el promedio de todos los casos de Norte identificados (964) entre 1958 y 1998. La evolución de los Nortes se muestra en las condiciones meteorológicas dos días antes, un día antes, durante, un día después y dos días después del evento. Este tipo de patrones compuestos se elabora para campos de vientos de bajos niveles y presión en superficie (Fig. 2.9), así como para campos de precipitación (Fig. 2.10). De los mapas sinópticos compuestos se puede concluir que un Norte se caracteriza por los siguientes elementos sinópticos:

- i) Una alta presión que se desplaza del noroeste al sureste de los Estados Unidos, es decir, desde las Rocallosas hasta la península de Florida.
- ii) Circulaciones anticiclónicas cerca de la superficie en el centro de Estados Unidos, cuyos vientos de norte a sur en el Golfo de México se intensifican, impactando directamente la costa mexicana.
- iii) Los vientos de norte a sur, que son canalizados por el Istmo de Tehuantepec, salen al Pacífico, donde producen mezclado en las capas superficiales del océano (ver Cap. 3).
- iv) Descensos drásticos en la temperatura de superficie, asociados al paso de la masa de aire polar continental.
- v) Inestabilidad convectiva que frecuentemente se traduce en precipitaciones en los estados de la vertiente del Golfo de México.

La rapidez con que se desplaza la onda de latitudes medias que caracteriza al Norte, varía dependiendo de varios factores, entre ellos la longitud de la onda del sistema y la intensidad del flujo medio en que se mueve con un comportamiento casi-geostrófico (Holton, 1979). Su velocidad de fase determina el tiempo que dura el evento de Norte.

Los huecos en la orografía de la Sierra Madre, como en del Istmo de Tehuantepec o el de Papagayo, permiten que la señal del norte alcance el océano Pacífico, con fuertes vientos que mezclan sus aguas.



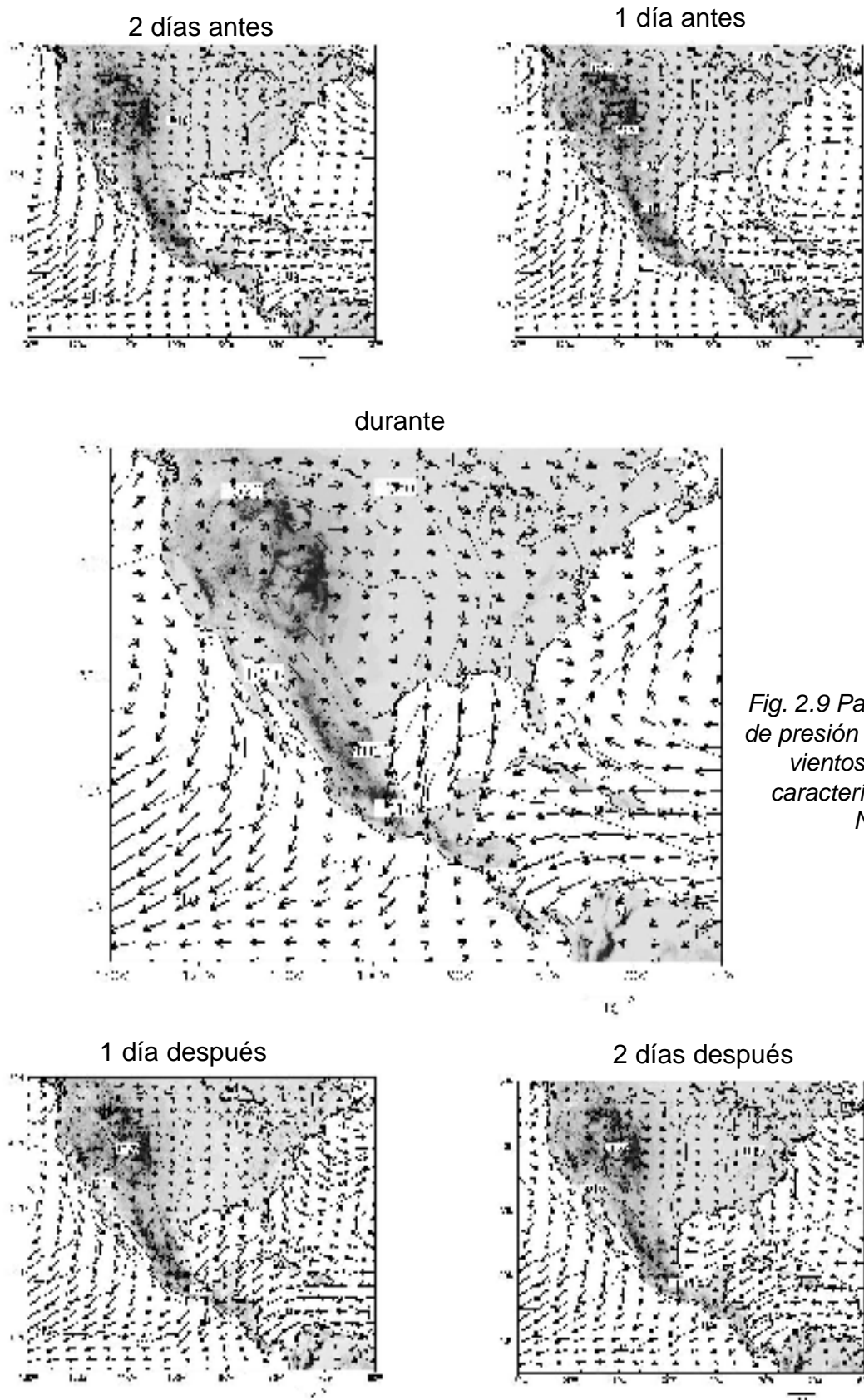


Fig. 2.9 Patrones medios de presión en superficie y vientos (925 mb), característicos de un Norte

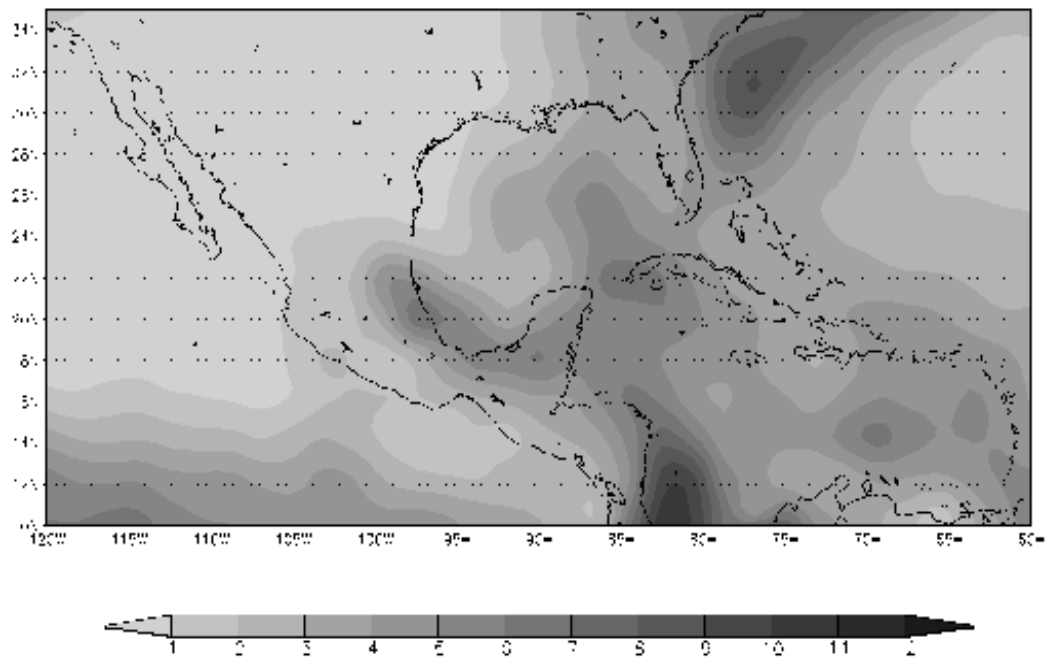


Fig. 2.10 Campo de precipitación (mm/día) media durante un evento de Norte en Veracruz, Ver.

Al comparar el número de Nortes identificados en los periodos octubre-mayo de los años 1980 a 1998, con las anomalías de temperatura superficial en la región Niño 3.4, se encuentra que en los años El Niño la actividad de Nortes tiende a aumentar, en comparación con años La Niña (Fig. 2.11). Este resultado está en concordancia con los cambios observados en la circulación media de Norteamérica, esto es, con los jets desplazados al sur en años El Niño. Sin embargo, al parecer el aumento de Nortes no necesariamente se refleja en un aumento de las precipitaciones en la región (Fig. 2.7). No existe una explicación única al por qué de esta disminución en las lluvias ante el aumento en el número de Nortes. Es probable que la mayor frecuencia de estos sistemas resulten en un paso más rápido de las lluvias y en menor duración de los periodos de precipitación. El aumento en el número de Nortes incrementa la entrada de aire frío a parte del país, resultando en inviernos más crudos (Fig. 2.6a).

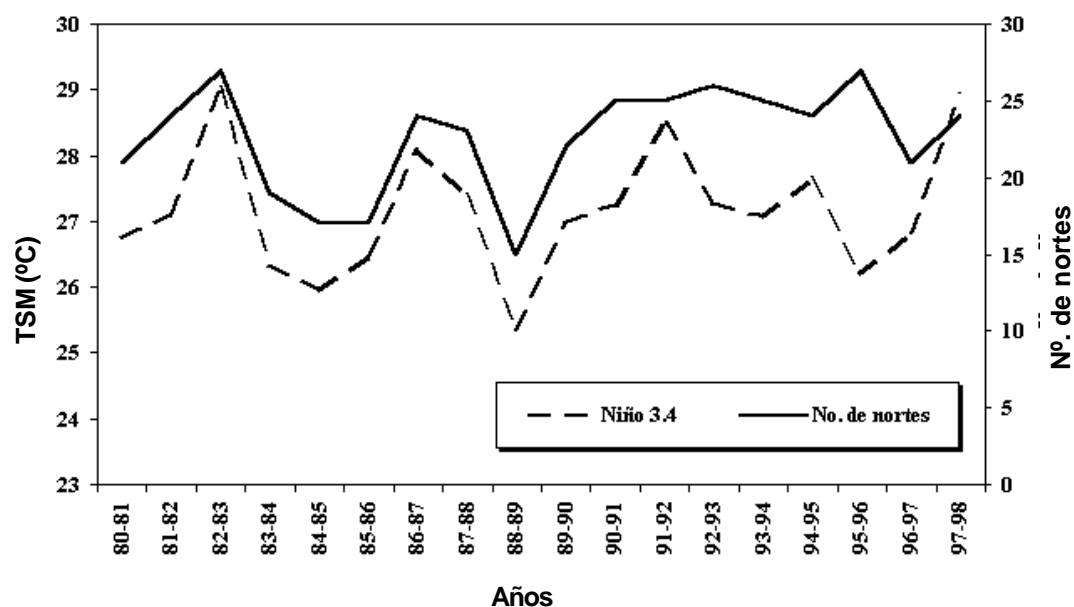


Fig. 2.11 Temperatura superficial del mar (°C) en la región Niño 3.4 y número de eventos de Norte de octubre a mayo para el periodo 1980 – 1998.

El que la actividad de Nortes esté relacionada con El Niño, da predictabilidad sobre la frecuencia de tiempo severo durante el invierno en los estados colindantes con el Golfo de México. La importancia socioeconómica que tiene el conocer la dinámica y comportamiento de estos sistemas es grande. En octubre de 1998, un Norte provocó la pérdida de vidas humanas en Xalapa, Veracruz, al caer árboles por los fuertes vientos y ocurrir accidentes de tránsito. Un pronóstico preciso y oportuno de la actividad de Nortes puede ser útil para prevenir a la población, pudiéndose preparar para evitar fallas en el sector eléctrico o de agua potable y aun en la planeación estratégica de las actividades pesqueras, dada la relación que guarda la dinámica de Nortes con el océano en el Golfo de Tehuantepec y por tanto, con la pesquería regional.

Sin embargo, se debe enfatizar que el sistema climático es no-lineal, esto es, no se puede esperar que lo que ocurre con el clima en México durante El Niño, sea exactamente opuesto a lo que ocurre durante La Niña, especialmente a nivel regional (Ambrizzi y Magaña, 1998). Por esta razón, es necesario considerar el uso de modelos dinámicos, además de relaciones estadísticas lineales, cuando se realiza un pronóstico de lluvias o de frecuencia de tiempo severo como los Nortes.

En resumen, los impactos de El Niño durante el invierno pueden describirse de manera general como lluvias y fríos anómalos en el norte de México debido a la mayor entrada de ondas de latitudes medias y frentes fríos, por causa de una alteración en la circulación invernal sobre Norteamérica (Fig. 2.12).

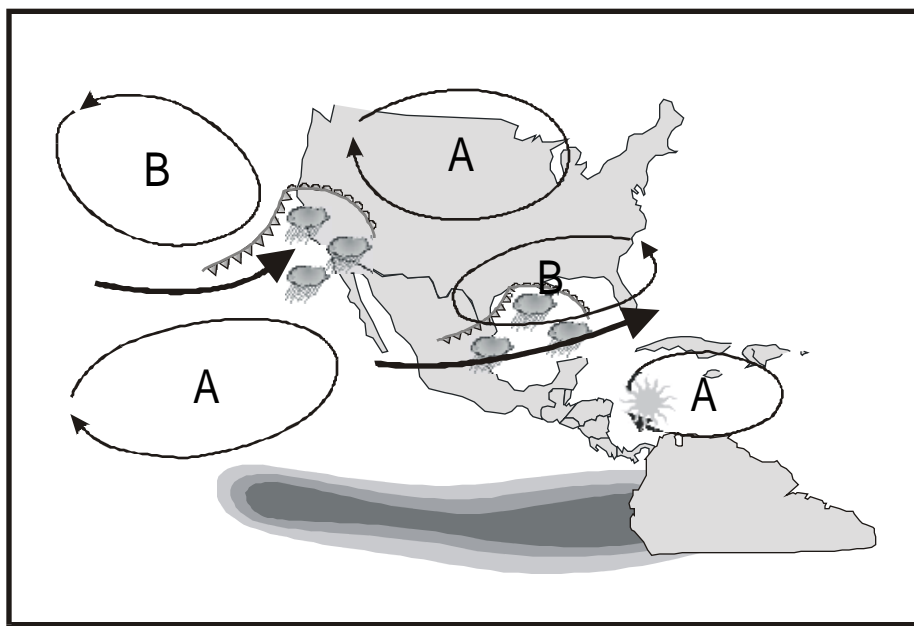


Fig. 2.12 Diagrama esquemático de los impactos de El Niño en México. A denota anomalías de circulación anticiclónica y B, anomalías de circulación ciclónica.

La señal de El Niño en verano

En México, durante el verano El Niño provoca que las lluvias en la mayor parte del país disminuyan (Fig. 2.13a), llegando con frecuencia a producir sequías. La constante aparición de El Niño en los noventa ha llevado a declarar zonas de desastre a gran parte de los estados del norte del país por la falta de lluvias (*La Jornada*, 25 de mayo de 1999). Los efectos de El Niño en materia ambiental, asociados a menores precipitaciones incluyen menos humedad en el suelo y frecuentemente, pérdidas de miles de hectáreas de bosques por incendios forestales (ver Cap. 4). En abril y mayo de 1998 se vivió uno de los peores desastres ecológicos de nuestro país, al ocurrir un gran número de incendios por la gran sequedad del terreno (Cedeño y Medina, 1999). Las pérdidas materiales fueron inmensas, superando incluso aquellas reportadas en 1983 (NOAA, 1994). Las perspectivas a futuro en materia de incendios, aun no son alentadoras (ver Cap. 6). Es por ello que los mayores esfuerzos en materia de diagnóstico y pronóstico del clima se centran en la temporada de primavera y verano.

Durante veranos La Niña, las lluvias en la mayor parte de México son cercanas a lo normal, pudiendo incluso ser anómalamente intensas (Fig. 2.13b). Varios son los factores que resultan en mayores lluvias, pero quizá el más importante sea la actividad de ondas del este y los huracanes en el Caribe y Golfo de México. Véase por ejemplo el cambio en la anomalía de las lluvias en los estados de Veracruz y Tamaulipas (Fig. 2.13). Como en el caso de invierno sin embargo, la anomalías en precipitación durante El Niño no son exactamente opuestas a las observadas durante La Niña, como sucede en Sinaloa y partes de Sonora. Tal condición es nuevamente reflejo del carácter no-lineal del clima, no sólo en México, sino en todo el mundo. Asimismo, debe recordarse que El Niño no es el único modulador del clima.

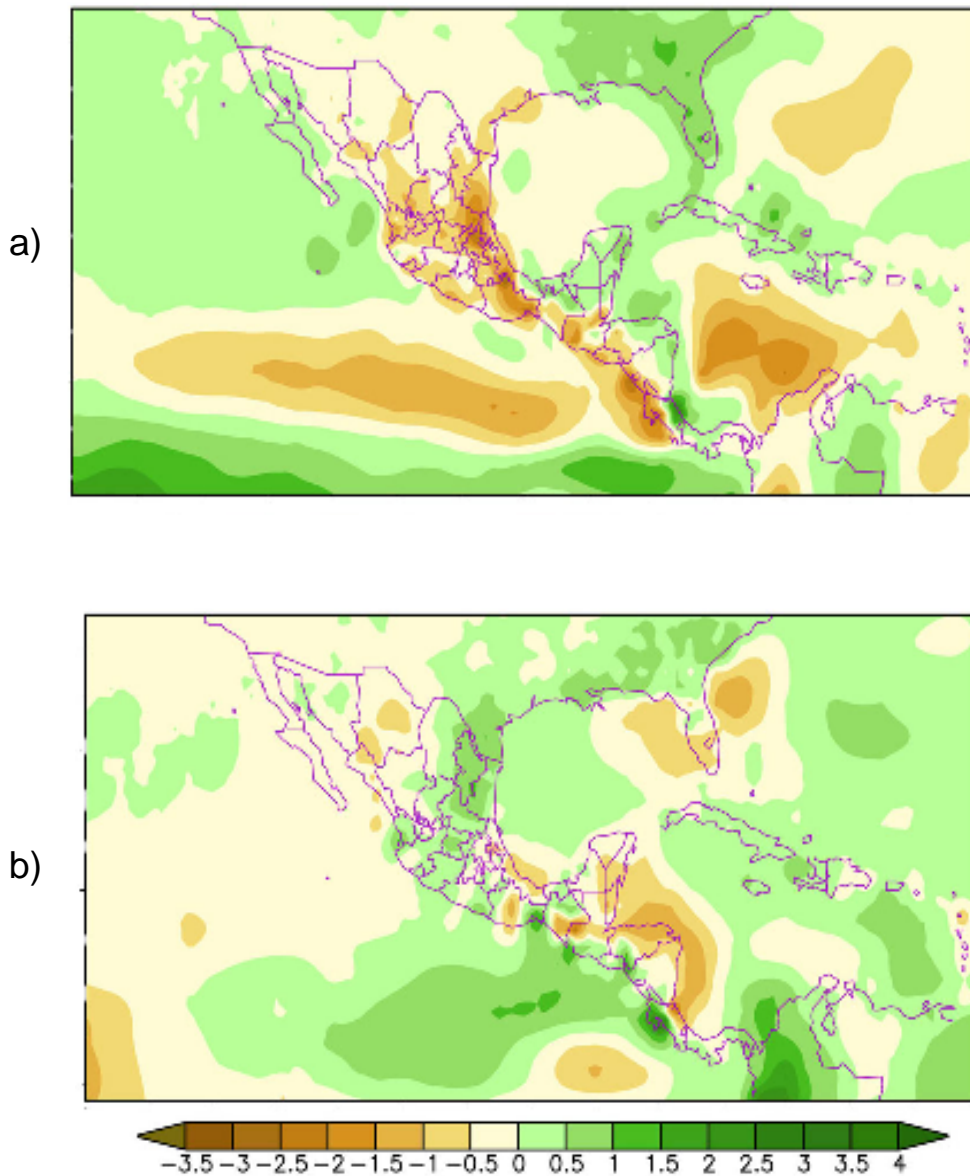


Figura 2.13 Patrón compuesto de anomalías de precipitación (mm/día) durante veranos de a) El Niño (1965, 1972, 1982, 1986, 1991, 1997) y b) La Niña (1964, 1970, 1973, 1975, 1988, 1998).

Varios son los procesos dinámicos que se combinan y que resultan en una disminución en la actividad convectiva sobre México durante veranos de Niño. Estos tienen que ver principalmente con cambios de los sistemas atmosféricos relacionados con la lluvia. En primer lugar, la Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC) del Pacífico del este, donde existe gran cantidad de nubes profundas (*cumulunimbus*), tiende a permanecer más cercana del ecuador (Waliser y Gautier 1993). Esto se debe a que la convergencia de humedad para las lluvias tiende a ser mayor en el Pacífico ecuatorial del este que frente a la costa oeste de México (Magaña y Quintanar 1997). En años normales, el contraste térmico entre la alberca de agua caliente en el Pacífico mexicano (ver Cap. 3) y la lengua de agua fría frente a las costas de Perú, resulta en una circulación directa del tipo Hadley, que parece acumular humedad frente a las costas de México. Al desaparecer este contraste térmico meridional durante El Niño, la convergencia permanece cerca de la región de agua anómalamente caliente frente a Sudamérica, por lo que los movimientos convectivos ascendentes más importantes de la estación ocurren lejos del territorio mexicano. El desplazamiento meridional de la ZITC resulta en menos actividad convectiva cerca de nuestro país y por lo tanto en menos lluvias.

La disminución en la densidad de nubes sobre México permite el aumento en la cantidad de radiación que llega a superficie con lo que se registran temperaturas por encima de lo normal en gran parte del territorio durante veranos El Niño. El contraste entre anomalías de temperatura de superficie durante veranos El Niño y La Niña tiene que ver en cierta medida con la cubierta nubosa en unos y otros periodos. Nuevamente, véase por ejemplo el caso del sur de Tamaulipas (Fig. 2.14a y b). Una disminución en la cantidad de humedad sobre el altiplano, puede resultar en mayor enfriamiento radiativo y heladas inesperadas sobre el centro de México (Magaña y Morales, 1998).

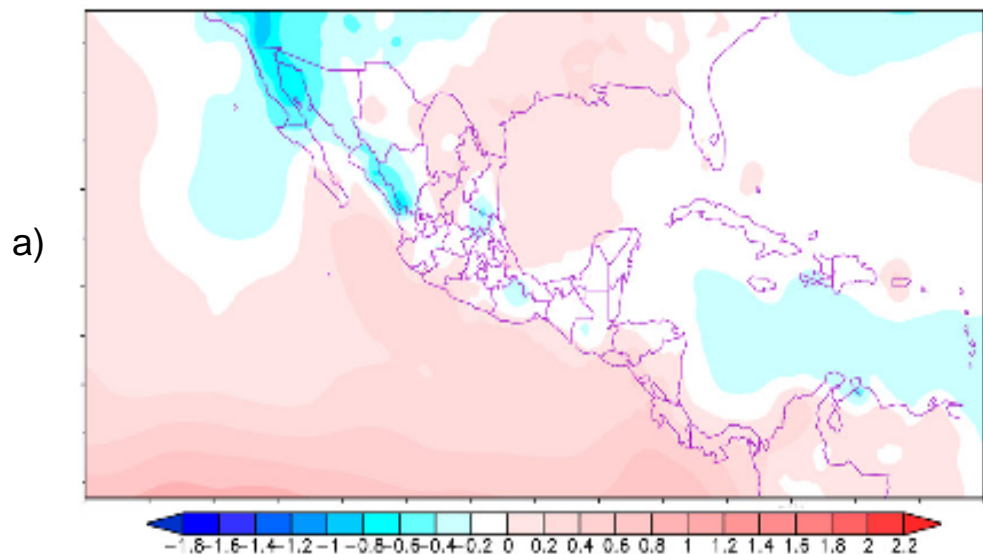


Fig. 2.14a Como en la Fig. 2.13, pero para anomalías de temperatura de superficie ($^{\circ}\text{C}$) en veranos a) El Niño y b) La Niña

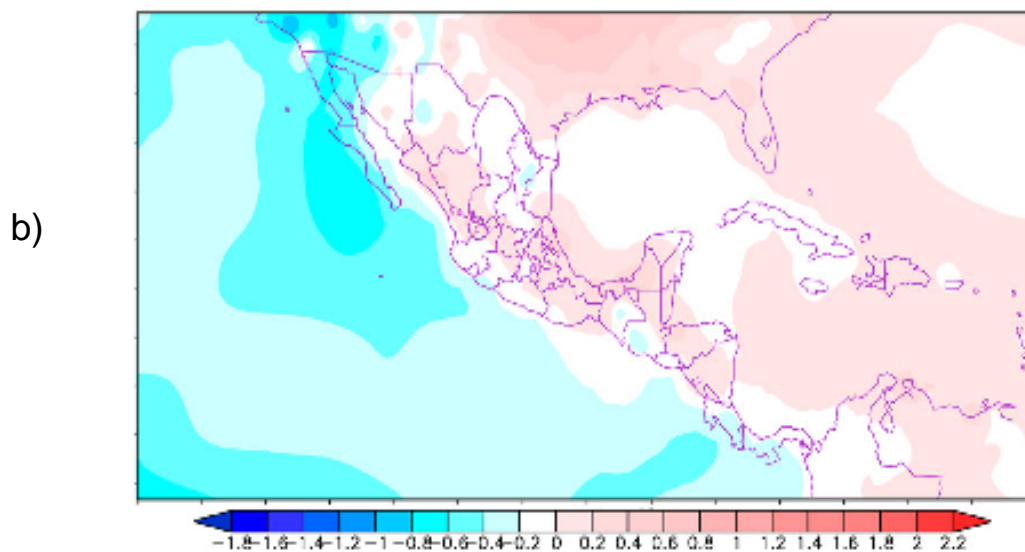


Fig. 2.14 Continuación.

Por otra parte, la actividad convectiva en la ZITC genera subsidencia (movimientos descendentes de aire) asociados a la circulación de tipo Hadley, los cuales inhiben el desarrollo de nubes convectivas profundas alrededor del trópico de Cáncer (Fig. 2.15).

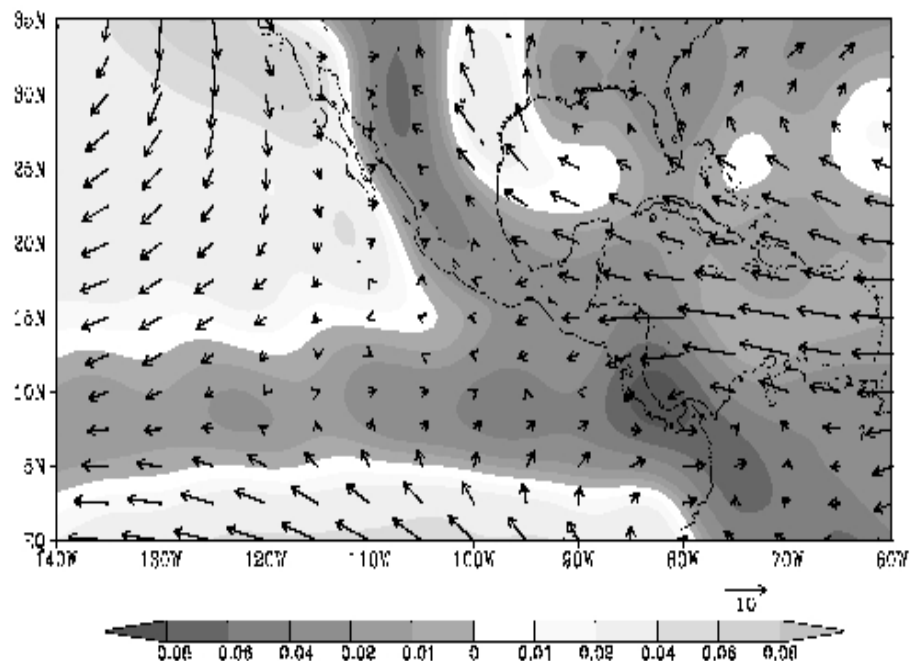


Fig. 2.15 Circulación (m/s) media a 925 HPa y velocidad vertical omega (Pa/s) a 700 Hpa durante verano. Sombreados oscuros corresponden a movimientos descendentes y sombreados claros a movimientos ascendentes.

Al parecer, con la ZITC más cerca del ecuador, la rama descendente de la celda de Hadley se refuerza en ciertas regiones del norte de México (Fig. 2.16a), provocando una disminución y debilitamiento de los procesos asociados al desarrollo de nubes profundas y de lluvia. Un efecto aproximadamente opuesto se registra durante veranos de La Niña (Fig. 2.16b).

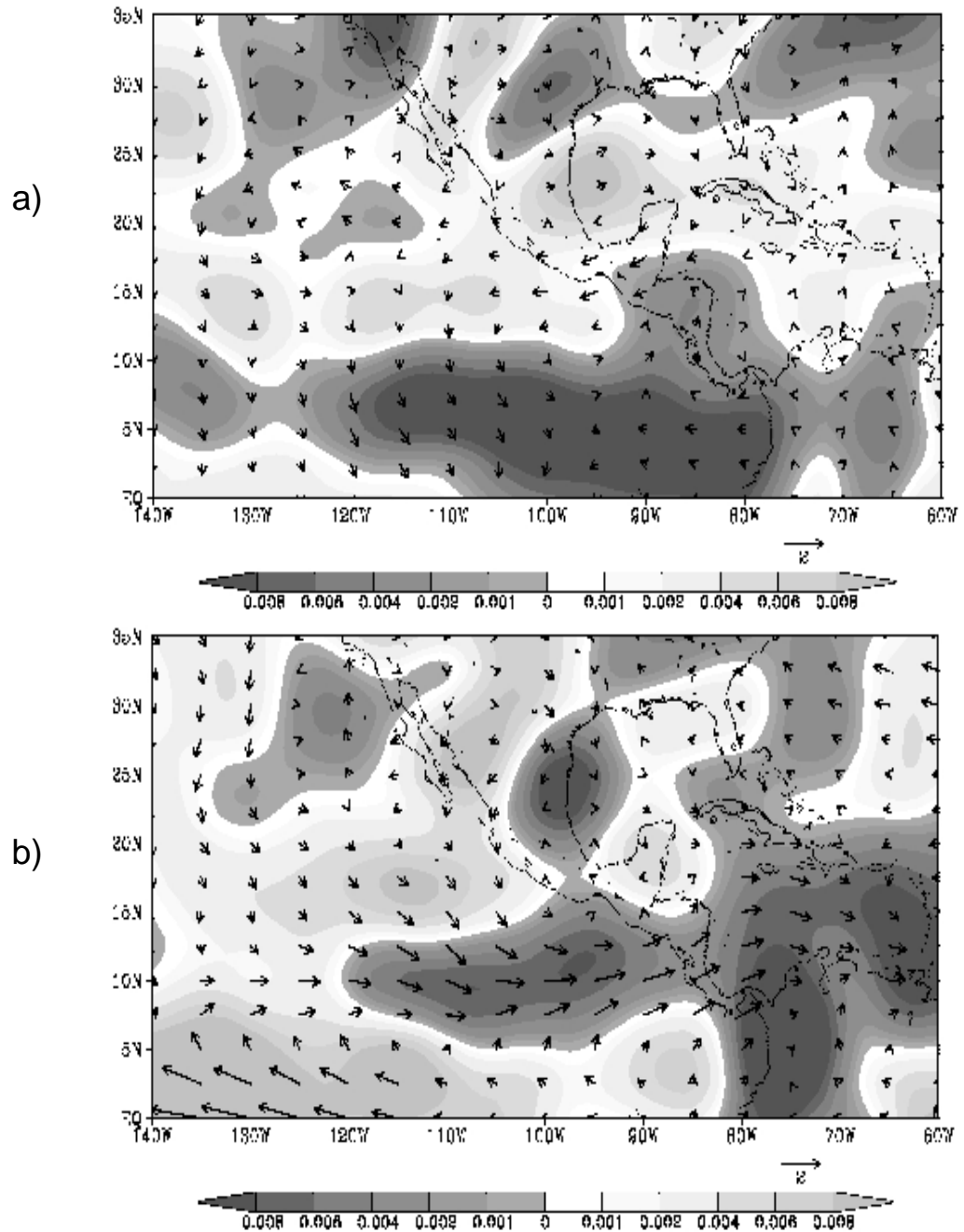


Fig. 2.16 Anomalías en la circulación (m/s) media a 925 HPa y en la velocidad vertical omega (Pa/s), a 700 Hpa, durante verano. Sombreados oscuros (claros) corresponden a movimientos anómalamente ascendentes (descendentes) a) durante El Niño, y b) durante La Niña.

Aun no es claro como determinar las regiones preferentes de la subsidencia asociadas a fuentes de actividad convectiva intensa, pero simulaciones numéricas sugieren que en las Américas tropicales, la subsidencia hacia el norte y hacia el este, es consecuencia de la actividad convectiva en la ZITC del Pacífico del este (Gandu y Silva Días 1998), por lo que la marcada disminución de las lluvias en el mar Caribe del este (Fig. 2.13a) resulta de una subsidencia anómala (Fig. 2.16a).

Un elemento adicional a considerar en veranos Niño es la intensificación de los vientos alisios sobre el Caribe y la región del Golfo de México (Fig. 2.16a). La ZITC como centro de forzamiento de calor convectivo y movimientos ascendentes, al norte del ecuador, provoca una respuesta en forma de onda de Rossby estacionaria de bajos niveles (Gill, 1982) detectable sobre la parte sur de México. Compárese por ejemplo años El Niño y La Niña sobre el Pacífico mexicano. Tal onda de Rossby estacionaria se traduce en alisios más intensos (débiles) durante veranos de Niño (Niña), que al interactuar con la orografía generan patrones de clima regional marcado (Fig. 2.13).

Los alisios intensos (débiles) resultan en más (menos) lluvias en la costa del Caribe centroamericano, mientras que producen un déficit (superávit) de precipitación en la costa del Pacífico (Magaña *et. al.*, 1999). En el sur de México, alisios más intensos pueden inhibir la entrada de humedad por las costas del Pacífico, debilitando la componente orográfica de la lluvia y con ello, la posibilidad de formación de nubes profundas y lluvias en la costa del Pacífico de México (Fig. 2.13a).

La intensificación de los alisios sobre México en años de Niño inhibe la entrada de humedad por las costas del Pacífico y debilita la componente orográfica de la lluvia, tan importante en la cantidad de precipitación en esa zona del país.



Una región de interés especial en cuanto a lluvias de verano, es la zona del monzón mexicano en el noroeste de México. Algunos estudios recientes (Higgins *et. al.*, 1999) concluyen que el monzón mexicano en la región de Sonora y Sinaloa, es débil durante veranos de Niño. Sin embargo, la señal en las lluvias en periodos de La Niña no está bien definida. El inicio del monzón en el noroeste mexicano, puede presentar adelantos o retrasos substanciales (~ 30 días), con respecto a la fecha de inicio de la temporada de lluvias (~ 17 de junio). Un inicio tardío en el monzón del noroeste mexicano generalmente significa una temporada de lluvias deficientes, lo cual parece ocurrir en años de Niño.

En años de Niña, las lluvias parecen estar alrededor o por encima de lo normal en gran parte de México, pero especialmente en el noreste del país (Fig. 2.13b). La respuesta de las lluvias a La Niña parecen casi opuestas a las observadas durante El Niño, aunque como se ha mencionado, los patrones de anomalías no son exactamente inversos (por ejemplo, en la región del monzón mexicano). Debe recordarse que además de El Niño, existen factores que influyen en las lluvias de verano en México como la temperatura de la superficie del mar tanto en el Pacífico mexicano (Magaña *et. al.*, 1999), como en el Caribe (Enfield y Mayer, 1996); la circulación media, y la humedad en el suelo (Sud *et. al.*, 1996).

Además, se debe tomar en cuenta como factor esencial para las lluvias de verano la actividad de huracanes (Jáuregui, 1989). La disminución de las lluvias en México durante años El Niño, principalmente en la región del noreste, está asociada con el decremento en el número de huracanes en el Caribe y Golfo de México (DeMaria y Kaplan, 1994). Esta relación entre El Niño y los huracanes del Atlántico es significativa. Por otro lado, no es claro que la ocurrencia de El Niño afecte el número de huracanes que se forman en el Pacífico mexicano.

Los huracanes

En verano, el país se ve afectado por huracanes, tanto en el Pacífico como en el Atlántico. Los huracanes se forman principalmente en regiones de aguas tropicales cálidas, donde los cambios de la intensidad del viento en la vertical son débiles (Emanuel, 1991). México se encuentra en medio de dos regiones ciclogénicas muy activas: el Pacífico tropical noreste y el Mar Caribe (Fig. 2.17).

Los huracanes constituyen un elemento esencial en la temporada de lluvias en México. La disminución de la actividad de estos meteoros en el Caribe y Golfo de México en años de Niño resulta en severas sequías en el noreste del país. Debemos por tanto considerar a los huracanes como nuestros «amigos».



En un análisis sobre la frecuencia de huracanes y el fenómeno El Niño, Mosiño y Morales (1988) encontraron que el número de huracanes en el Atlántico disminuye durante años El Niño, lo que provoca un déficit de lluvias en la parte central de México. Tal relación entre El Niño y el número de huracanes en el Atlántico fue originalmente propuesta por Gray (1984). Al parecer, El Niño no afecta el número de huracanes en el Pacífico nororiental.

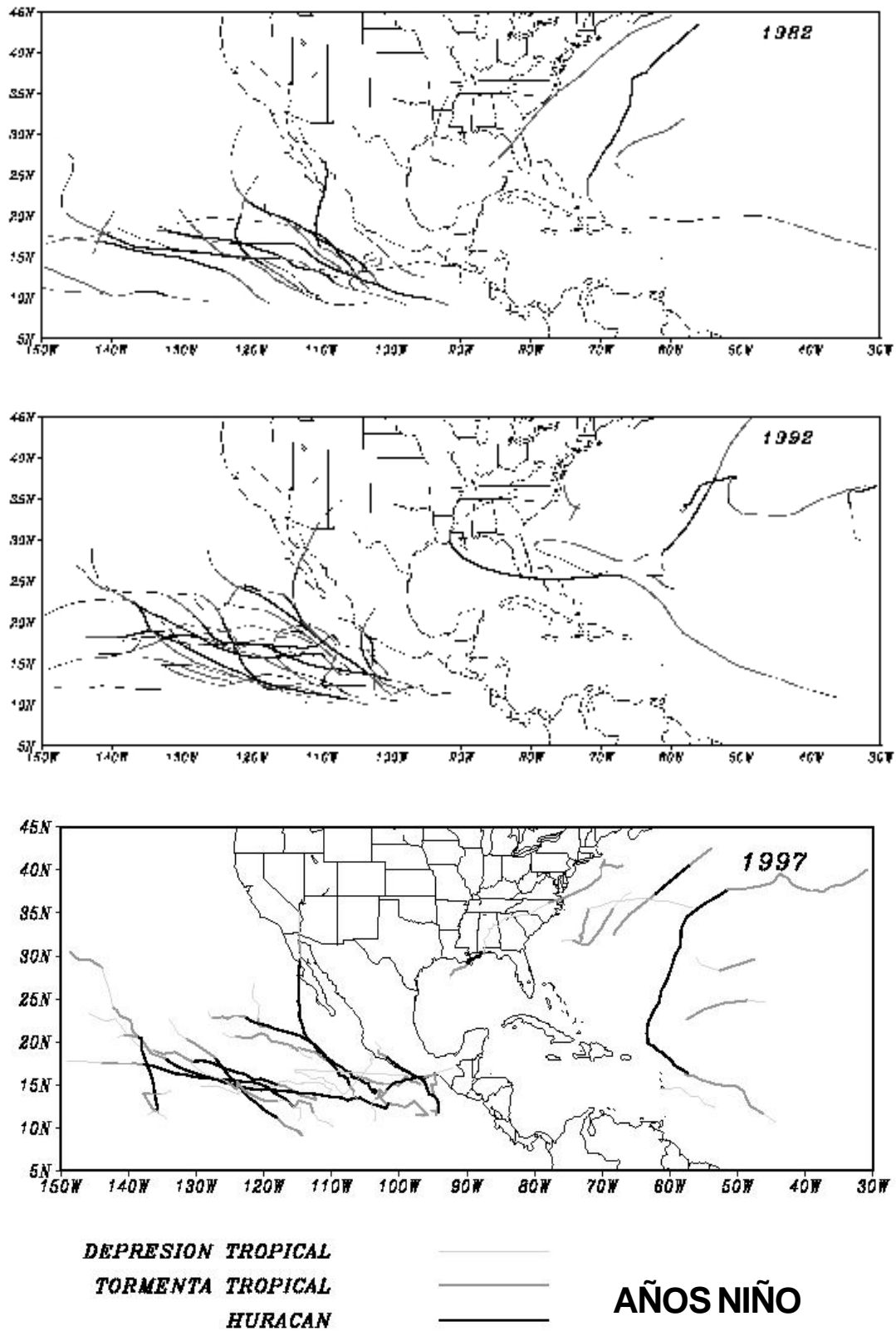


Fig. 2.17 Trayectorias e intensidades de huracanes observadas en el Pacífico y Atlántico durante veranos El Niño (1982, 1992, 1997) y veranos La Niña (1985, 1988, 1998).

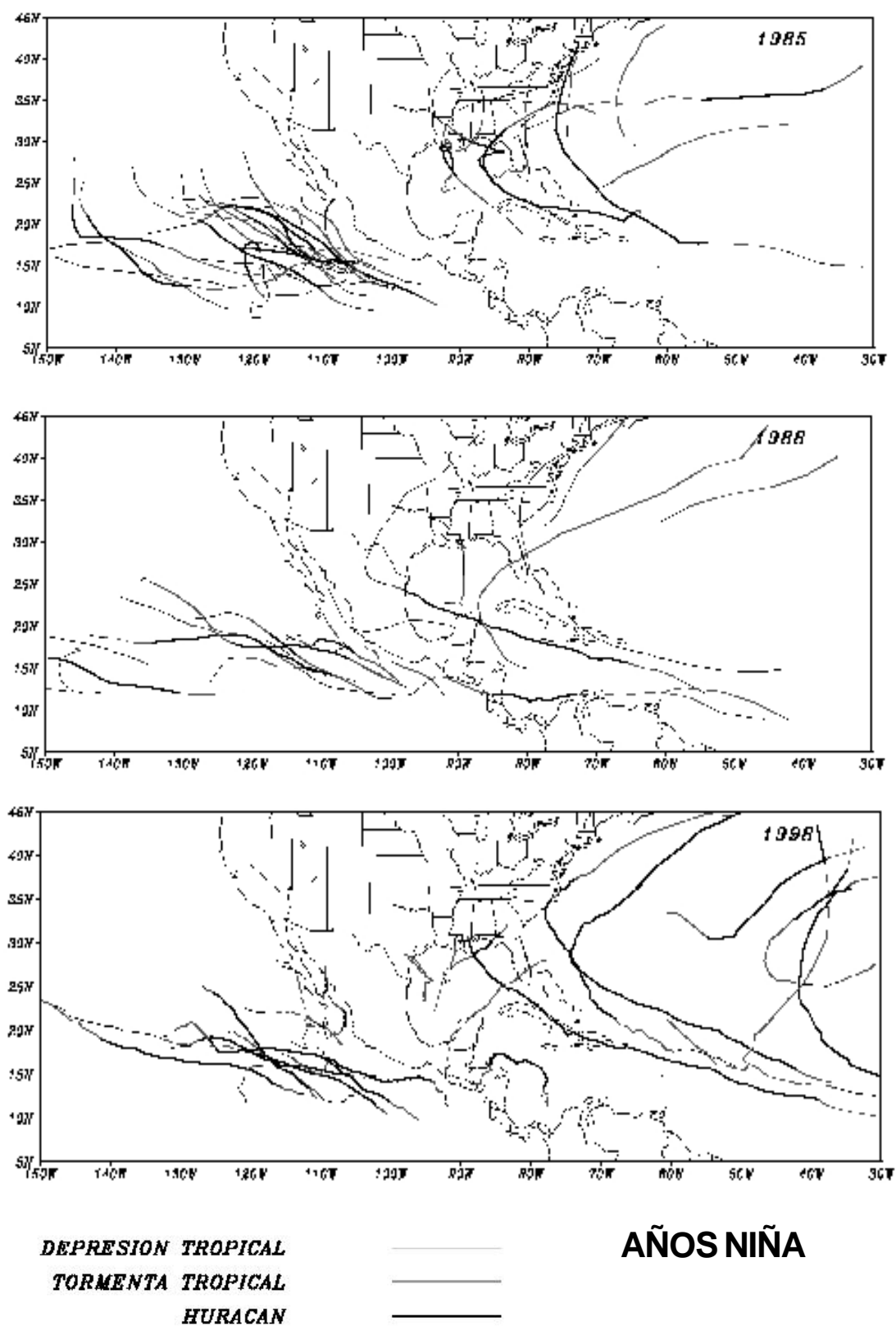
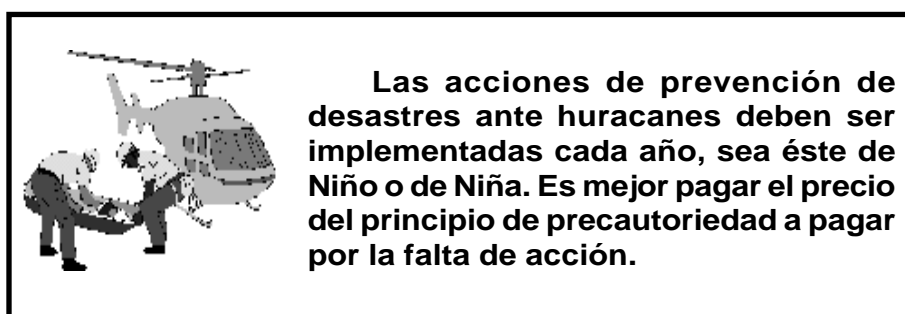


Fig. 2.17 Continuación

Hoy en día se sabe que la relación entre El Niño y el número de huracanes del Atlántico es estadísticamente significativa. Sin embargo, no es posible saber en qué lugar del Atlántico se formarían más huracanes en años La Niña, si tenderían a seguir trayectorias más cercanas o alejadas de las costas mexicanas o si serían fuertes o débiles, aún y cuando todo esto se intenta pronosticar (Gray et. al. 1984). Evidentemente, un mayor número de huracanes en el Atlántico aumenta las posibilidades de que estos toquen territorio mexicano aumentando las lluvias de verano. La disminución de huracanes en el Golfo de México, afecta principalmente las lluvias del norte de Veracruz, Tamaulipas y Coahuila. Así sucedió durante el verano de 1997, debido a la formación de un intenso fenómeno de El Niño (Fig. 1.4). Son tan importantes los huracanes en las lluvias del noreste, que un sólo huracán puede significar el fin de una sequía, como ocurrió en Texas en 1998 con el huracán Charley, que resultó en alrededor de 450 mm de lluvia en la región (WMO 1999). De manera similar, si bien el huracán Gilberto en 1988 causó graves daños en el norte del país, sus precipitaciones aumentaron sustancialmente la disponibilidad de agua en una región, donde se carece de tal elemento. En este sentido, debe también pensarse en la importancia que tienen los huracanes para nuestro país como “proveedores de agua”.

Como se mencionó, existen dudas de que haya relación entre número de huracanes en el Pacífico y El Niño. Al parecer, durante veranos en que la anomalía de agua caliente aparece en el Pacífico del este, la dispersión en la génesis y trayectorias de huracanes aumenta, pudiendo incluso extenderse hacia regiones del Pacífico central (Fig. 2.17). Sin embargo, la anomalía de agua caliente en años de El Niño alcanza las costas mexicanas, hace pensar que la intensidad de los huracanes en esta región aumente, como parece haber ocurrido con el huracán Paulina. Lo que no se puede afirmar es que la trayectoria seguida por éste huracán a lo largo de Oaxaca y Guerrero se debió a El Niño o que sea algo anómalo. Durante cada verano existe la posibilidad de huracanes entrando por las costas del Pacífico, razón por la que los planes de emergencia ante la presencia de huracanes, deben ser una constante en las ciudades y poblados de las costas mexicanas.



Con el fin de categorizar la intensidad de los huracanes, se ha elaborado una escala denominada de Saffir-Simpson (Tabla 2.1), en términos de la intensidad de la depresión en el centro del huracán y de los vientos máximos, los cuales son parcialmente responsables de los daños que ocasionan estos hidrometeoros.

Tabla 2.1 Categorías de escalas de ciclones de Saffir Simpson.

Tipo	Categoría	Presión (mb)	Viento	
			(m/s)	(km/hr)
Depresión	DT	-----	<17	<62
Tormenta Tropical	TT	-----	17-32	62-117
Huracán	1	>980	33-42	118-152
Huracán	2	965-980	43-48	153-176
Huracán	3	945-965	49-57	177-208
Huracán	4	920-945	58-68	209-248
Huracán	5	<920	>68	>248

Desafortunadamente no existe una escala que indique cantidades de precipitación en relación a la intensidad del huracán, aun cuando esta sería de más importancia para México, pues los mayores daños se asocian a los escurrimientos de las lluvias. Nuevamente, el caso de Paulina (octubre 1997) muestra que las fuertes precipitaciones y los escurrimientos causan muchos más daños a la población que los intensos vientos. Los daños por los escurrimientos ante fuertes precipitaciones parece ser común en México y Centroamérica, ante lo cual cabe preguntarse si en alguna medida no estamos pagando el precio de la gran deforestación de nuestro territorio.

Los ciclones tropicales o huracanes se desarrollan sobre océanos con temperatura superficial de al menos 26.5°C. En el huracán se producen movimientos ascendentes de hasta 10 m/s. La ocurrencia de tormentas tropicales y huracanes muestra gran variabilidad interanual. Un análisis de la ocurrencia de los ciclones tropicales para cada año del periodo 1963-1993 (DeMaria y Kaplan, 1994; Whitney y Hobgood, 1997), permite obtener algunas conclusiones sobre la variabilidad de los huracanes que afectan a México, Centroamérica y el Caribe en años El Niño y No-Niño. La información sobre posición geográfica (latitud-longitud) o intensidad máxima alcanzada resulta de gran interés para entender algunas variaciones de las lluvias.

En las últimas décadas (1963-1993) existe una tendencia a un mayor número de huracanes intensos en el Pacífico noreste (Fig. 2.18) (Whitney y Hobgood, 1997). Tal tendencia parece coincidir con ciertas predicciones que establecen que en una atmósfera más caliente, como aquella que se tendría bajo el calentamiento global, los huracanes serían más intensos.

Durante años El Niño y No-Niño, uno de los diagnósticos más interesantes es sin duda, la marcada diferencia entre el número de sistemas que se forman en el Atlántico (Tabla 2.2), principalmente por el potencial de predicibilidad asociado.

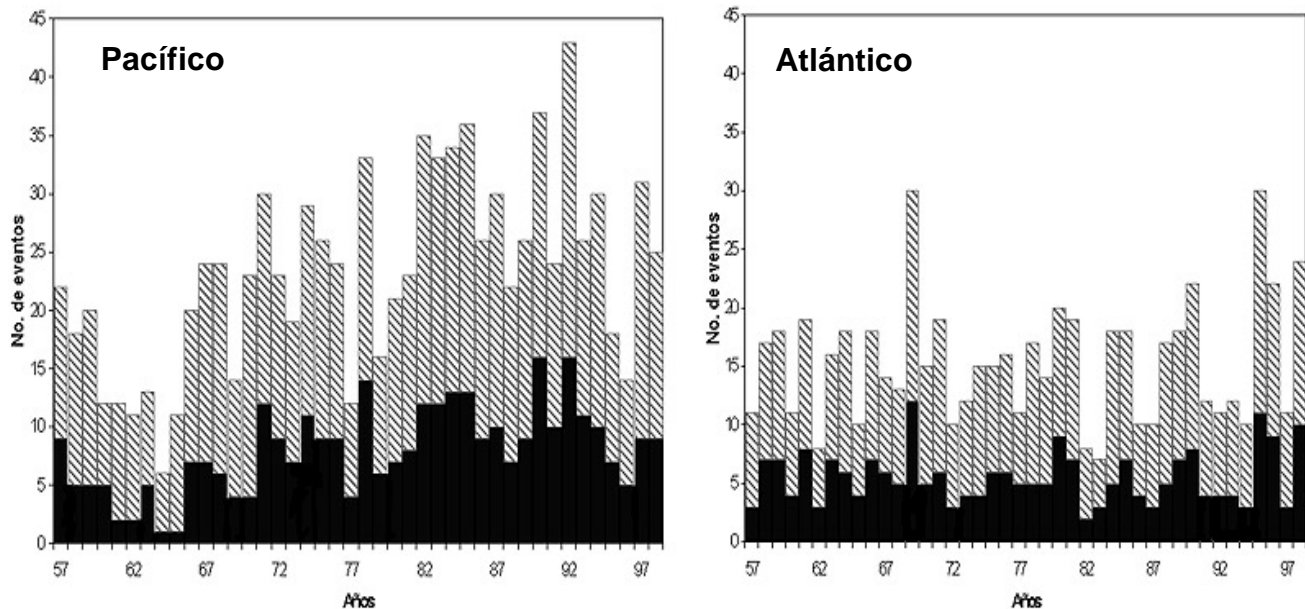


Fig. 2.18 Ocurrencia de huracanes (negro) y tormentas tropicales (achurado) en el Pacífico y en el Atlántico.

Las otras relaciones, aunque menos significativas, también permiten analizar la actividad ciclónica durante cada uno de los periodos. Por ejemplo, en años Niño, los ciclones tropicales (tormentas y huracanes) en el Pacífico tienden a ser más intensos, aunque en promedio, están más alejados de las costas mexicanas. Este resultado pareciera un poco contradictorio cuando se piensa en el caso del huracán Paulina en octubre de 1997, que entró por Oaxaca y Guerrero, afectando gravemente a la población. Ante eso, sólo puede decirse que el que haya sido año Niño, no fue relevante para que el huracán entrara a tierra. Quizá sí tuvo importancia para que alcanzara intensidad clase 5.

Existe una relación empírica entre temperatura de la superficie del mar y la máxima intensidad que un huracán puede alcanzar. No se trata de una relación lineal entre temperatura de superficie del mar e intensidad de los vientos, sino de un límite a la intensidad del sistema ciclónico. A mayor temperatura de superficie del mar, es mayor la intensidad que, potencialmente, los vientos pueden alcanzar (DeMaria y Kaplan 1994). Así, la presencia de aguas más cálidas en el Pacífico Mexicano durante años Niño, permite que la máxima intensidad de los huracanes puedan alcanzar aumente, pudiendo los vientos medios ser de 68 m/s o más. Por lo anterior, la intensidad de Paulina pudo verse modulada por la presencia de aguas anómalamente calientes en el Pacífico de México en 1997.

Tabla 2.1 Estadística de huracanes en años Niño y No Niña en el Pacífico nororiental y el Atlántico
(tomadas de Whitney y Hobgood (1977) y de De Maria y Kaplan (1994))

Factor	Nº de años	Nº promedio tormentas por año	Latitud promedio (Norte)	Latitud promedio (Oeste)	Intensidad promedio máxima (m/s)	Océano
El Niño	7	5.4	30.8	65.3	31.4	Atlántico
No-El Niño	24	9.1	26.8	66.6	32.9	Atlántico
El Niño	7	15.1	16.2	116.2	32.4	Pacífico
No-El Niño	24	15.0	17.0	114.8	31.4	Pacífico

Adicionalmente, se ha encontrado una diferencia estadísticamente significativa en lo referente a la duración de las perturbaciones tropicales en el Pacífico nororiental. El número de perturbaciones tropicales con duración mayor a los trece días aumenta en años El Niño. Esto nuevamente parece estar relacionado con la energía disponible que tienen las aguas anómalamente calientes del Pacífico del este en años El Niño (ver Cap. 3).

Las estadísticas de la Tabla 2.2, muestran que para el Atlántico, las tormentas tropicales y huracanes son (significativamente) más comunes en años No-Niño, que en años El Niño. Contrario a lo que ocurre en el Pacífico, en años No-Niño los ciclones tropicales en el Atlántico son en promedio más intensos y cercanos a México. Tal relación lleva a pensar que en años de Niña, se debe estar mejor preparado ante los huracanes del Atlántico (Fig. 2.17).

Para analizar dinámicamente las condiciones que pueden afectar la ciclogénesis y la evolución de los huracanes en años El Niño y La Niña, se pueden considerar algunos elementos meteorológicos que influyen en la formación de ciclones tropicales como son:

- i) Las anomalías en temperatura superficial del mar.
- ii) La cizalladura del viento entre los niveles bajos y superiores de la tropósfera (850 y 200 mb).
- iii) El contenido de humedad en la atmósfera.

Para el análisis de estas variables se eligieron dos dominios de referencia: uno en el Caribe (85W-60W, 10N-20N) y otro en el Pacífico nororiental (120W-95W, 10N-20N).

Analizando valores medios mensuales para el verano se encontró que:

En el Caribe: La temperatura superficial del mar alcanza un máximo durante los meses de agosto a octubre, época en la que se registra la máxima actividad de tormentas tropicales. En años de Niño, las temperaturas son ligeramente menores ($\sim 0.5^{\circ}\text{C}$) a las alcanzadas en años Niña. Quizá el cambio más substancial, y al que se le atribuye la disminución en el número de tormentas tropicales que se forman en el Caribe en veranos Niño, es el de la cizalladura (gradiente vertical) del viento. Durante El Niño, la cizalladura del viento en la región del Caribe aumenta, debido a la intensificación de los alisios (Fig. 2.16), particularmente del *jet* de bajos niveles (Amador y Magaña 1999). Este aumento de la cizalla dificulta el desarrollo vertical de las nubes profundas, de las que se compone un huracán. En cuanto a la humedad disponible, el agua precipitable en la región muestra un ligero aumento durante años de Niña, con respecto de años de Niño. La combinación de estos tres factores resulta en condiciones más favorables para la ciclogénesis en años Niña, que en años Niño.

En el Pacífico nororiental: Las diferencias en la cizalla del viento no parecen ser tan significativas. De cualquier forma, la cizalla es débil en esta región, y menos importante que en el Caribe. Los cambios más marcados entre años Niño y Niña se dan en la temperatura superficial del mar, siendo más calientes ($\sim 0.5^{\circ}\text{C}$) durante veranos Niño. Tal aumento en la temperatura permite que en principio, la intensidad de los huracanes pueda ser mayor. No se aprecian cambios apreciables en la cantidad de humedad (agua precipitable) en la región (Fig. 2.19).



Un aumento en la temperatura de mar, la disminución de la cizalla en el viento y una mayor humedad observadas en años Niña, son los elementos que resultan en más huracanes en el Caribe y Golfo de México.

Algunos autores han sugerido que la fase de la oscilación casi bienal en la estratósfera es decir, la dirección del flujo medio a 50 km aproximadamente, es un elemento modulador del número e intensidad de los huracanes que se forman tanto en el Pacífico como en el Atlántico (Gray, 1984). Este argumento sin embargo, sólo se incluye en algunos modelos estadísticos de predicción, al no ser claro el efecto dinámico que tal fenómeno estratosférico tiene sobre el desarrollo o intensidad de los huracanes.

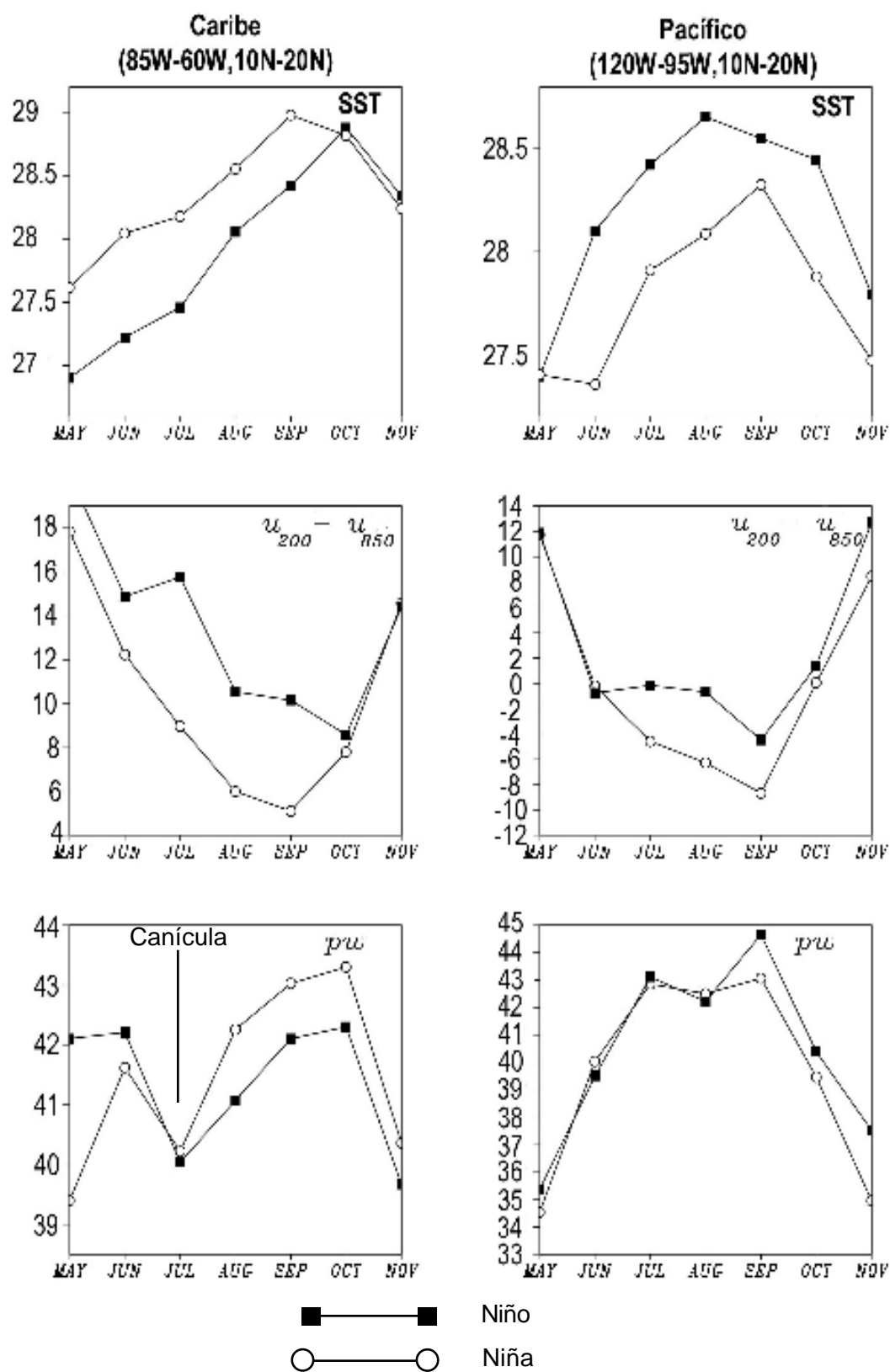


Fig. 2.19 Valores de temperatura de la superficie del mar ($^{\circ}\text{C}$), cizalladura del viento (m/s) y agua precipitable (kg/m^2) en a) el Caribe y b) el Pacífico, durante veranos El Niño y La Niña.

La Canícula

Un entendimiento más completo de la dinámica de las lluvias de verano debe incluir efectos como el de la llamada canícula o sequía intraestival, y su relación con el fenómeno de El Niño. La sequía intraestival corresponde a una disminución en las lluvias durante julio y agosto, y no a una sequía (Magaña et al 1999). Aunque se ha tratado de encontrar una relación entre la canícula y el fenómeno El Niño, no se tiene una respuesta definitiva, pues la dinámica de la canícula parece estar más relacionada con la alberca de agua caliente frente a las costas del Pacífico mexicano que con la dinámica del Pacífico del este ecuatorial.

Algunos resultados sugieren que en años No-Niño, en ciertas regiones se tiene una canícula marcada. Sin embargo, en ocasiones se presentan años El Niño que también muestran indicios de canícula, aunque con una disminución generalizada de las lluvias. Como ejemplo de las variaciones que la sequía intraestival o canícula experimenta año con año, se muestra la distribución de la razón de precipitación para dos regiones (Fig. 2.20), una en Centroamérica (12.5N,87.5W) y otra en el sur de México (17.5N, 97.5W). Al parecer, años El Niño y años La Niña presentan la señal de la canícula en mayor o menor grado.

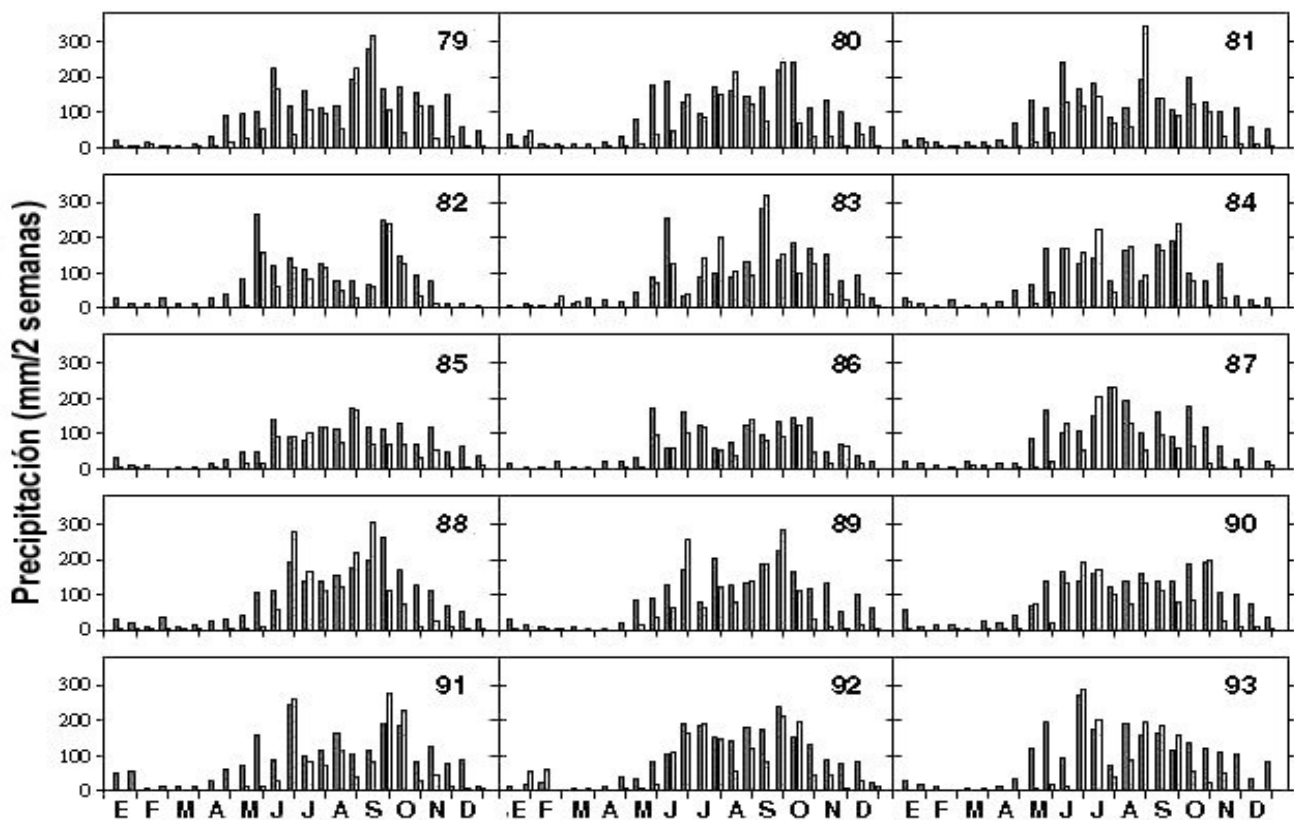


Fig. 2.20 Histogramas de precipitación quincenal en subdominios ($5^{\circ} \times 5^{\circ}$) centrados en el sur de México (17.5N, 97.5W) (gris claro) y Centroamérica (12.5N,87.5W) (gris oscuro). (tomado de Magaña, et al. 1999)

En resumen, la señal de El Niño en verano sobre México se puede presentar como disminución de las lluvias en la mayor parte del país debido a (Fig. 2.21):

- i) Permanencia de la Zona InterTropical de Convergencia (ZITC) cerca del ecuador geográfico.
- ii) Disminución del número de huracanes en el Golfo de México y el Caribe
- iii) Incremento de la subsidencia en el norte de México.
- iv) Menor humedad en la atmósfera de México por disminución de flujo del oeste.



Fig. 2.21 Diagrama de los impactos de El Niño en el clima de verano en México

Hidrología

Las sequías continúan ocurriendo sobre muchas partes del mundo con diferentes grados de duración y severidad. En su mayor parte, las sequías están asociadas a variaciones en la circulación global del sistema océano-atmósfera, como en eventos El Niño. Indonesia, el noreste de Brasil, Africa del Sur o Australia, son sólo algunos ejemplos de regiones donde El Niño provoca graves sequías. México también es frecuentemente afectado por sequías.

En el periodo 1982-83 se produjo un evento El Niño muy intenso que provocó sequías, incendios forestales y pérdidas en la agricultura. Durante el periodo 1991-1995, se estableció un periodo El Niño, que si bien no fue tan fuerte como el antes mencionado, resultó en una de las sequías más prolongadas en el norte de México. Tal fenómeno produjo problemas internos y externos por el uso del agua en las presas. Las noticias de los reclamos de agua en la Presa de "El Cuchillo" entre Tamaulipas y Nuevo León, o los conflictos por aguas en el Río Bravo con los Estados Unidos, fueron tema de análisis durante varios días. Otros años dramáticos para México, en materia de sequía y de incendios forestales, fueron 1997 y 1998, asociado al evento El Niño 1997-98, considerado por algunos como el más intenso del siglo.



Fig. 2.22 Presas de mayor capacidad en México

Ante la grave sequía del verano de 1997 y el número record de incendios en la primavera de 1998, en 1999 se destinaron cuantiosos recursos financieros para mitigar los efectos negativos de la sequía acumulada. Casi doce estados del país, principalmente en el norte, fueron apoyados con recursos federales para hacer frente a la falta de agua, y así apoyar actividades agropecuarias. Los casos descritos muestran la fuerte relación entre ocurrencia de eventos Niño y la disponibilidad de agua en México.

Las lluvias de invierno son de gran importancia para el norte de México. Durante inviernos de La Niña, se tiene una disminución de las precipitaciones. Sin embargo, inviernos de Niño resultan en general en mayores precipitaciones, permitiendo que en principio, se pueda disponer de más agua en las presas de la región norte (Fig. 2.22). Así por ejemplo, en la región de la presa Huities, entre Sonora y Sinaloa, las lluvias de diciembre y el caudal del río parecen reflejar la ocurrencia de Niño o Niña (Fig. 2.23). Aquí se observa que las mayores precipitaciones ocurren en años de Niño, pero ésta no es una condición que siempre se cumple. No todos los Niños producen la misma respuesta en las lluvias y consecuentemente en los escurrimientos, pudiéndose tener un evento Niño con lluvias invernales escasas (Fig. 2.7). En el mejor de los casos, el Niño explica sólo un 25% de la variabilidad de la precipitación invernal regional. Es por ello que otros factores deben ser considerados para tener pronósticos estacionales de lluvia más precisos.

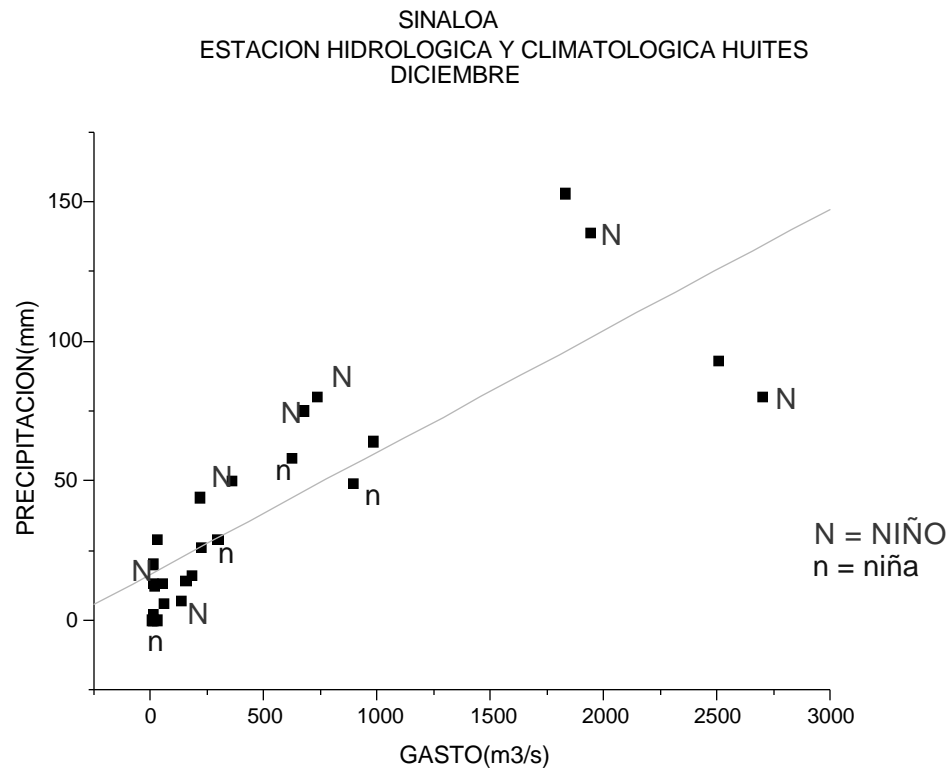


Fig. 2.23 Relación entre precipitación (mm) y caudal del río(m³/s), en la estación hidrológica Huites para diciembre.

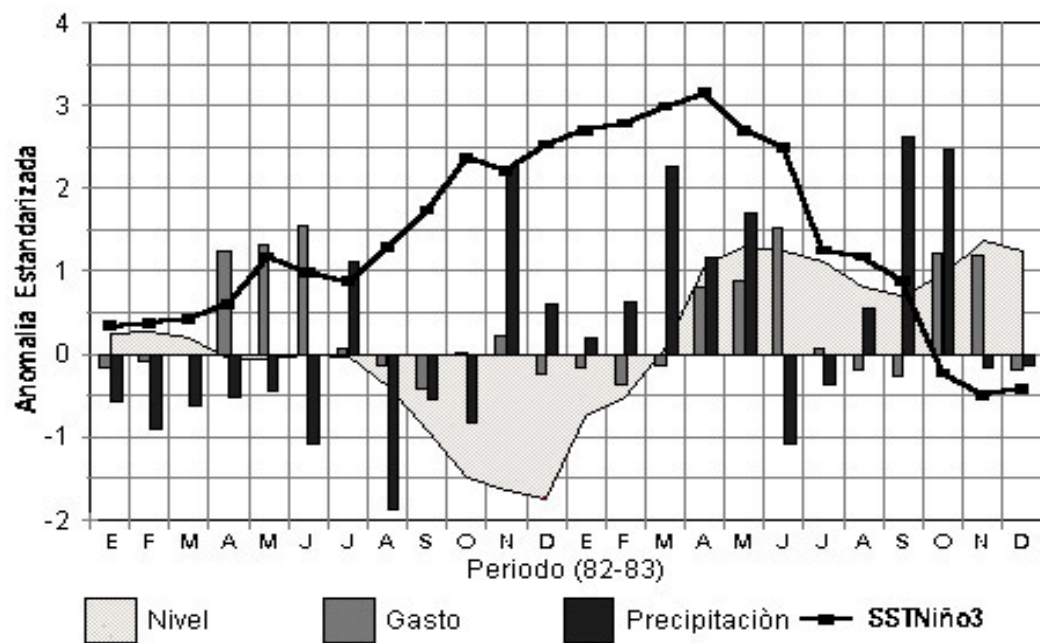


Fig. 2.24. Histogramas de anomalías estandarizadas de condiciones hidrológicas en la presa Plutarco Elías Calles, Sonora, durante el periodo (El Niño) 1982-1983.

El conocimiento de ocurrencia de El Niño en ciertos años puede permitir disponer de información para planear parte del manejo del agua. Por ejemplo, hasta antes del invierno 1982-83, el nivel de la presa Plutarco Elías Calles, en Sonora, era bajo (Fig. 2.24), pero las lluvias de invierno asociadas a El Niño permitieron una recuperación del nivel del caudal del río que alimenta la presa.

Los periodos más críticos en términos de déficit en precipitación ocurren durante veranos El Niño. En la época de lluvias, los descensos en la cantidad de lluvia son notables y por tanto, disminuyen los escurrimientos y los niveles de agua en presas y ríos. Una muestra clara de los impactos de El Niño en los escurrimientos se tiene al analizar la correlación que existe con las anomalías de la temperatura superficial del mar, en la llamada región Niño 3, y los escurrimientos en puntos cercanos a las presas del país (Fig. 2. 22).

Considerando las correlaciones, se puede ver que cuando se presentan condiciones de Niño en verano, los escurrimientos en la mayor parte de México disminuyen (Fig. 2.25a). Sólo en dos puntos muestreados, Tijuana y Campeche, la relación parece invertirse. En el caso de Tijuana, esta relación no es tan relevante, por ser mínimas las lluvias en la época de verano. Los bajos valores de correlación en otros sitios, simplemente muestran que El Niño no es un factor tan importante en las lluvias y los escurrimientos.

El caso más interesante es el de la región del Pacífico mexicano en donde los escurrimientos decrecen notablemente bajo condiciones El Niño en verano. Tal relación es mucho más clara cuando sólo se consideran eventos fuertes El Niño.

A nivel regional, la zona que parece más afectada es la del Pacífico Sur, cuyos escurrimientos están negativamente correlacionados con la ocurrencia de El Niño (Fig. 2.26). Este resultado es sólo consecuencia de la disminución en la precipitación que ocurre durante estos periodos (Fig. 2.12). Al separar los análisis de correlaciones en dos periodos de verano, junio-julio y agosto-septiembre se encuentra que El Niño afecta principalmente los escurrimientos de la segunda parte del verano, particularmente en la región del Pacífico Sur (Fig. 2.25b). Esto se debe a que conforme avanza el año, el fenómeno El Niño se intensifica.

Una de las regiones más afectadas en términos de disponibilidad de agua es la región del Pacífico norte, en donde años El Niño parecen resultar en un monzón débil y escurrimientos por debajo de lo normal. Aquí resulta clave un manejo adecuado de los recursos hidráulicos pues de otra manera, años El Niño intenso, aunque con posibles lluvias invernales importantes, continuarán provocando falta de agua y graves pérdidas en agricultura y ganadería durante el verano.

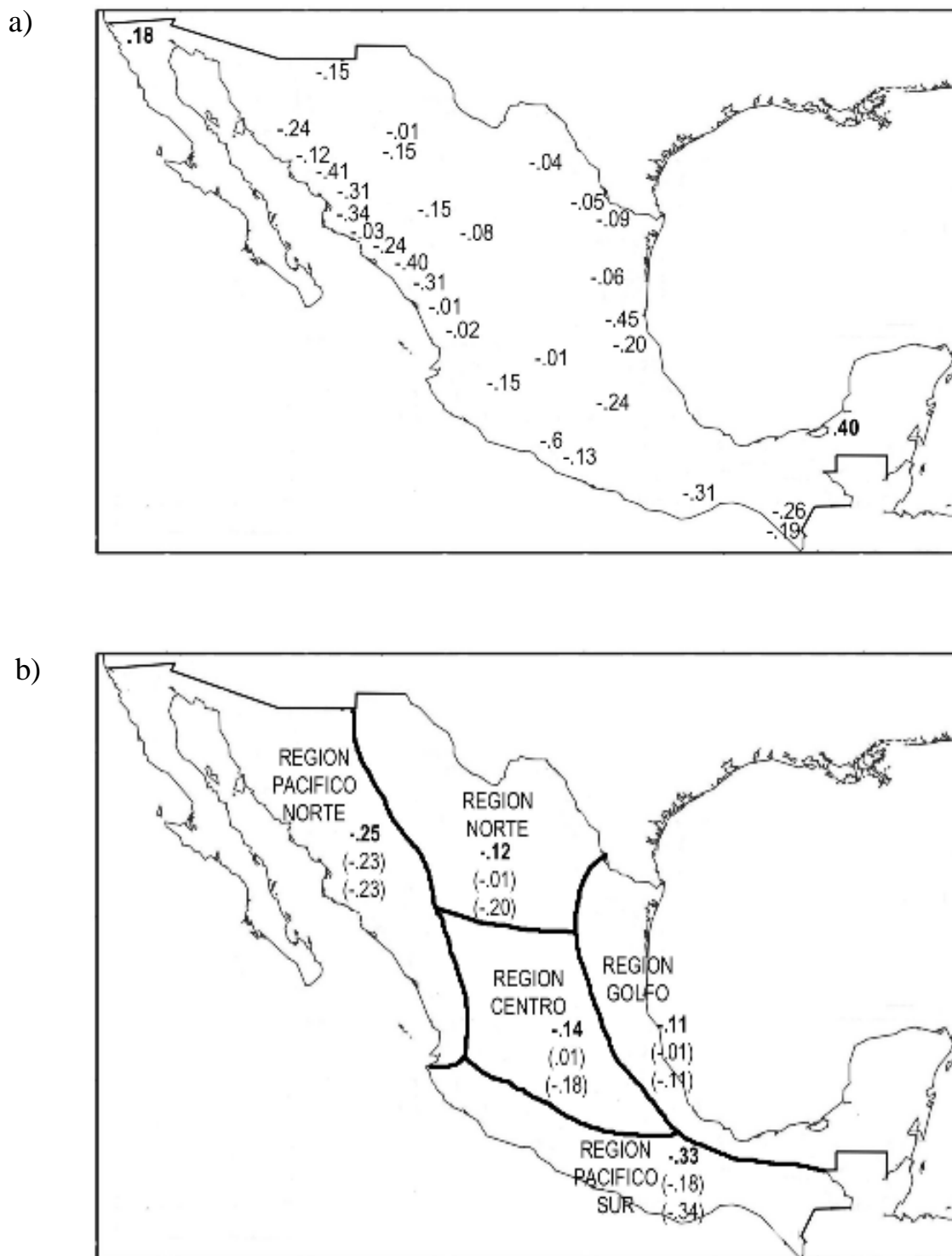


Fig. 2.25 Coeficientes de correlaciones entre temperatura de superficie del mar en la región Niño 3 y la media de escurrimientos a) por estación para el verano (jun-sep) y b) por región y periodo: jun-sep (negritas), jun-jul (paréntesis superior), ago-sep (paréntesis inferior)

El pronóstico estacional de lluvias

Frecuentemente, una medida del entendimiento de un fenómeno físico se tiene en términos de la calidad de pronóstico. El mayor reto de las Ciencias Atmosféricas y de la Meteorología en particular, ha sido el poder pronosticar el estado futuro de la atmósfera. En las últimas décadas se han registrado notables avances en el Pronóstico Numérico del Tiempo. Ya se cuenta con complejos modelos que permiten pronosticar con acierto el estado del tiempo hasta con tres días de anticipación. Los productos de estos pronósticos son de utilidad en un gran número de actividades de protección civil.

Sin embargo, históricamente el mayor interés por conocer el estado futuro de la atmósfera se ha centrado en saber con meses de anticipación, si se aproxima una buena o mala temporada de lluvias, principalmente en regiones de clima monzónico como en México. Es claro, la disponibilidad de agua y la agricultura dependen de manera crítica de las lluvias de verano.

La tradición del uso de “las cabañuelas”, de “la rueda salomónica” o del análisis del comportamiento de los animales se ha extendido hasta nuestros días con la esperanza de disponer de pronósticos del clima como una herramienta (de poco éxito) de planeación en la agricultura (ver Cap. 4). En el mundo, aumentan los intentos por pronosticar la anomalías del clima utilizando modelos numéricos. Los esquemas van desde modelos basados en ecuaciones de balance de energía (Adem, 1964) hasta complejos modelos de circulación general de la atmósfera (Trenberth, 1992).

Las tradiciones populares en materia de pronóstico del tiempo y clima incluyen «las cabañuelas», «la rueda salomónica», «el comportamiento de los animales». Aunque continúan en uso, ninguna de ellas parece ser de utilidad.



El conocimiento adquirido en años recientes sobre la importancia que el fenómeno El Niño tiene en el clima de la República Mexicana, permite utilizar técnicas estadísticas que relacionan las anomalías de la temperatura de superficie del mar con las lluvias o temperaturas a escala regional mediante modelos de regresión. Incluso, la técnica del uso de análogos parece ser de gran utilidad (Barry y Perry, 1973). Para pronosticar con análogos, considerando años El Niño y La Niña, o esquemas estadísticos, es preciso establecer relaciones de diagnóstico con o sin retraso, entre anomalías observadas o pronosticadas de temperatura superficial del mar en regiones clave (e.g., región Niño 3) y las lluvias a escala regional o incluso local. Los pronósticos de la temperatura del mar en superficie son calculados en grandes centros de pronóstico y puestos a disposición de la comunidad.

Si bien es cierto que esta técnica de pronóstico se basa en relaciones lineales de un sistema complejo y no-lineal como el clima, las predicciones resultan útiles como primera aproximación, y con frecuencia son más precisas a escala regional o local, que aquellas obtenidas directamente con modelos de circulación general. Tal estrategia ha sido seguida para elaborar pronósticos de anomalías de lluvia como el que se muestra en la Fig. 2.26a para el invierno 1997-98. La predicción de anomalías de precipitación para este periodo utilizó ecuaciones de regresión para dieciocho regiones climáticas en que se dividió el país (Douglas, 1994). Al comparar el pronóstico con las anomalías observadas (Fig. 2.26b), se encuentra que se acertó al pronosticar lluvias por encima de lo normal en la región noroeste y la península de Yucatán. En la zona central se presentaron anomalías débiles. En algunos puntos, se logró incluso pronosticar déficit de precipitación, como en ciertas partes de Veracruz, Oaxaca y Guerrero.

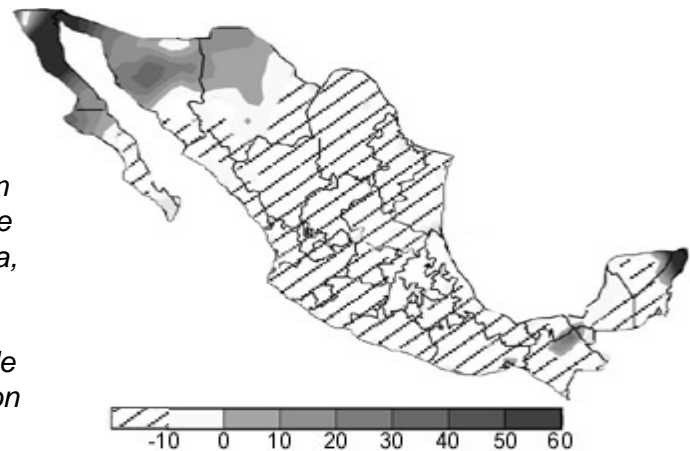
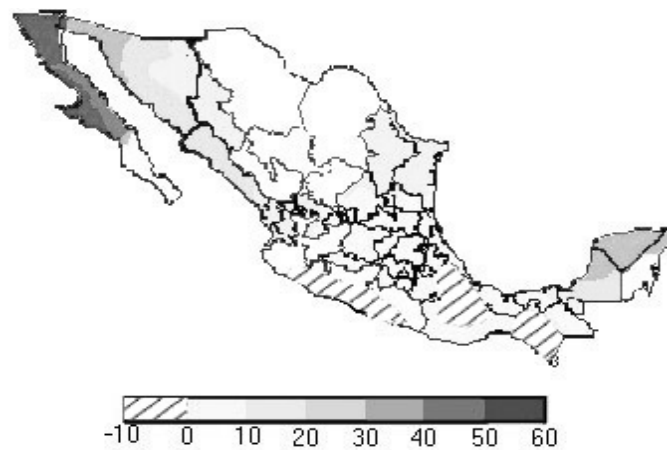


Fig. 2.26. Anomalías de precipitación (mm) para el invierno (dic-ene-feb) de 1997-98 sobre la República Mexicana, a) pronosticadas con un modelo de regresión, en dieciocho regiones climáticas, evaluado con anomalías de temperatura del mar pronosticadas con modelos dinámicos, y b) anomalías observadas.

En gran medida, el éxito de los modelos de regresión depende de un buen pronóstico de las anomalías de temperatura de la superficie del mar. En casos de eventos de Niño intensos, los pronósticos de clima regional tienden a ser más acertados, pues la señal de El Niño resulta más clara en el clima de México. Estas son buenas noticias porque después de todo son los casos extremos, como los ocurridos en 1997 y 1998, los que más alteran el clima y cuando más necesario se vuelve el pronóstico.

El uso de análogos o de pronósticos estadísticos puede extenderse a otras escalas espaciales, como se ha venido realizando en el “Estudio de Variabilidad Climática en Tlaxcala” (ver Cap. 4).

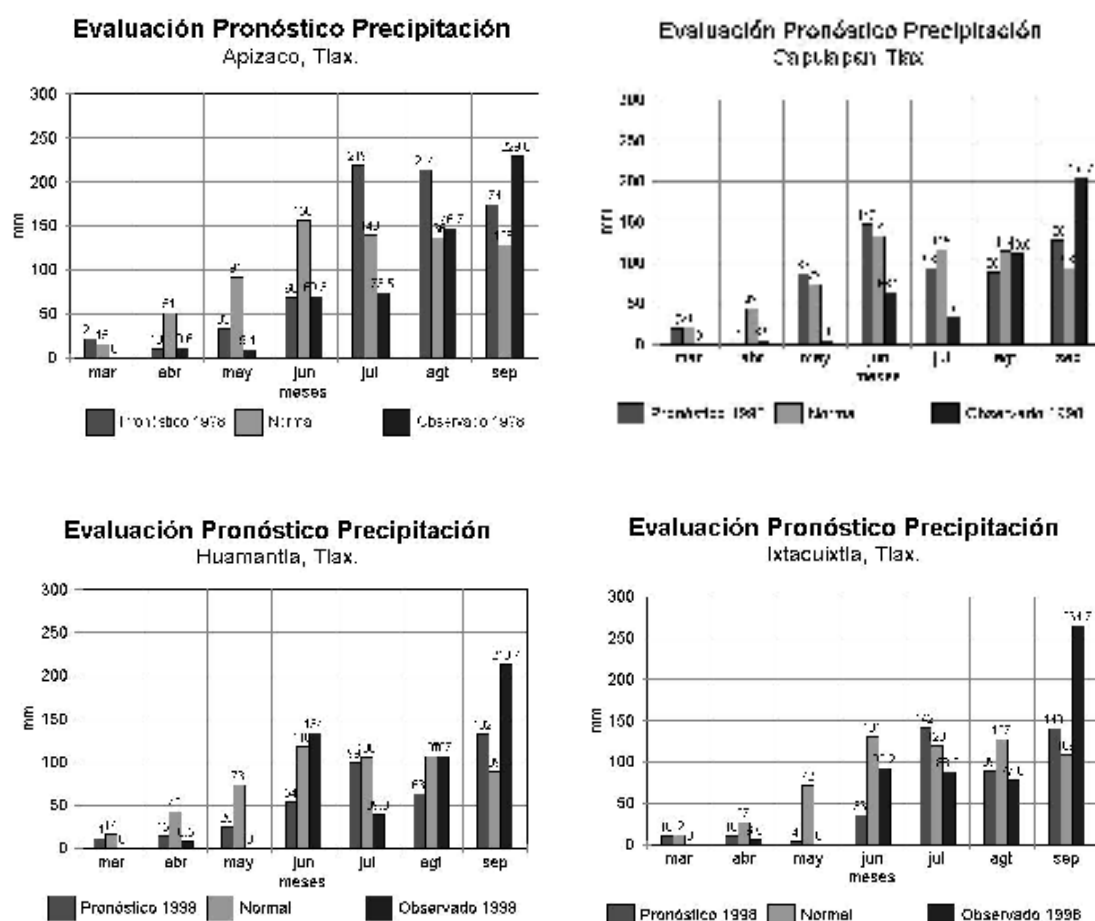


Fig. 2.28 Histogramas de pronóstico, medias climáticas y valores observados de lluvia (mm) en los meses del verano de 1998 para cuatro municipios del Estado de Tlaxcala.

Para el verano de 1998 se pronosticaba que El Niño se debilitaría para dar paso a condiciones La Niña alrededor de julio o agosto. Basados en relaciones de diagnóstico, se podía prever que mientras permanecieran las condiciones El Niño, la sequía estaría presente, pero al desaparecer El Niño, las lluvias se recuperarían. Con base en este pronóstico, en marzo de 1998 se emitieron predicciones de anomalías de precipitación (a escala local) para Tlaxcala, con el fin de que los agricultores planearan sus actividades (ver Cap. 4). Los resultados de estos pronósticos son alentadores a la luz de las comparaciones con lo ocurrido en el verano de 1998 (Fig. 2.28). En todos los casos se pronosticó adecuadamente el retraso en el inicio de la temporada de lluvias y una segunda parte del verano con lluvias abundantes.

Aunque los resultados son valiosos desde el punto de vista práctico, siempre es necesario preguntarse por qué funcionó el pronóstico y cómo funciona el clima en nuestro país, con el fin de aumentar nuestro entendimiento del sistema y mejorar los esquemas de predicción estacional. En este sentido, los modelos dinámicos resultan más útiles.

En años recientes, se han desarrollado modelos que utilizan los resultados de simulaciones con modelos de circulación general de baja resolución espacial, como condiciones iniciales de un modelo de mesoescala de alta resolución espacial. Los efectos locales o regionales, resultado de la presencia de montañas, o diferentes usos de suelo, aparecen como factores de forzamiento local del clima. Un ejemplo de este tipo de simulación es presentado en la Figura 2.29, donde se comparan el campo observado de precipitación para enero de 1992, con el simulado por el modelo de mesoescala (mesoscale model) versión 5 (MM5) cuando las condiciones de gran escala son las observadas (análisis de el *National Center for Environmental Prediction*), y con el campo simulado cuando las condiciones de gran escala son aquellas generadas por un modelo de circulación general, como el *National Center for Atmospheric Research (NCAR) Community Climate Model versión 3 (CCM3)* (Magaña y Pérez, 1998).

Apenas se comienza a avanzar en esta dirección, pero el potencial de tal esquema de diagnóstico y pronóstico es definitivamente prometedor. Con este procedimiento de análisis, diagnóstico y pronóstico comenzarán a entenderse los factores que controlan el clima a escala regional y su variabilidad.

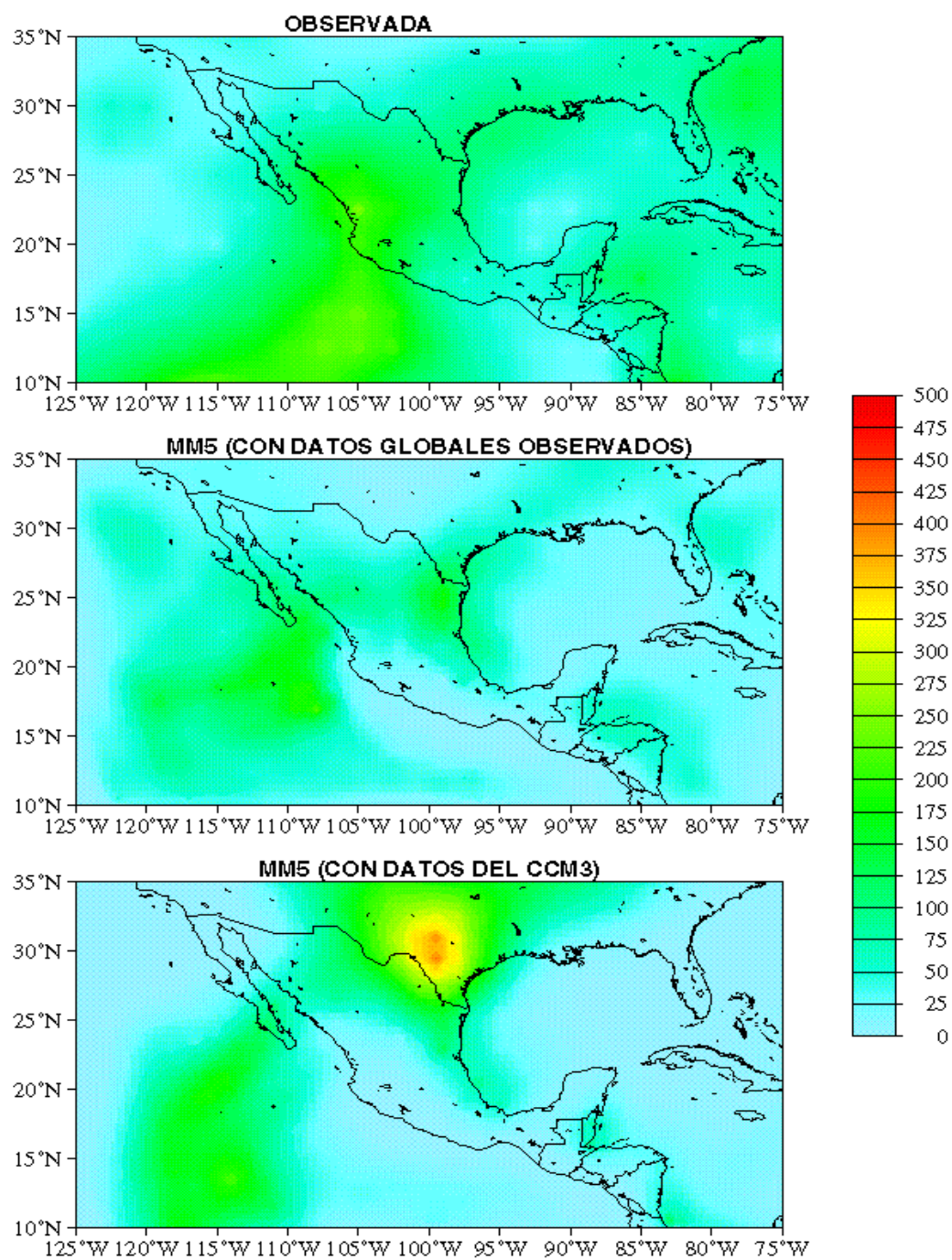


Fig. 2.29 Simulaciones de lluvia (mm) para enero de 1992, utilizando un modelo de mesoescala (ver texto).

