

CLIMA

LUIS BRITO-CASTILLO,¹ MICHAEL A. CRIMMINS² Y SARA C. DÍAZ C.³

RESUMEN. Según el sistema de clasificación de Köppen, modificado por García, y los tipos de vegetación del sistema de Brown y Lowe, en Sonora se han clasificado 24 tipos de climas y cinco sistemas de vegetación. Las dos terceras partes del estado están dominadas por el desierto sonorense donde se encuentra la zona más árida de México. Las lluvias en la entidad aumentan de norte a sur desde menos de 50 mm por año en el extremo noroeste a más de 1 000 mm por año en el extremo sureste del estado, principalmente en las zonas montañosas de la Sierra Madre Occidental. Éstas son generadas por sistemas meteorológicos de latitudes medias, predominantemente en invierno, y tropicales durante el verano. Estos sistemas se encuentran fuertemente influenciados por dos celdas semipermanentes de alta presión, una localizada en el Pacífico Oriental y otra sobre las islas Bermudas, las cuales tienen influencia en el desarrollo de los sistemas meteorológicos de menor escala. En el capítulo se hace una descripción de estos sistemas, de su influencia en los campos de temperatura y lluvia en el estado y de los tipos de climas presentes. El capítulo concluye con una descripción de las relaciones encontradas entre los tipos de vegetación y los climas y se mencionan algunos datos sobre las principales tendencias observadas en el clima de Sonora.

ABSTRACT. According to Köppen's classification, modified by Garcia, and the Biotic Communities classification of Brown and Lowe, 24 different climate types and five different types of vegetation have been described in Sonora. Two thirds of the State is dominated by the sonoran desert, where the most arid zone of Mexico is located. Rainfall in Sonora increases from north to south, from less than 50 mm in the extreme north-

west, to more than 1000 mm in the extreme southeast of the State, mainly in the mountain region of the Sierra Madre Occidental. Rainfall events are produced by mid-latitude weather systems in winter and tropical weather systems in summer. These weather systems are strongly influenced by two large-scale subtropical high pressure systems, one localized in the Eastern Pacific and the other over the Bermuda Islands which govern and control the development of weather systems of lesser extent. In this chapter, we describe these weather systems, and their influence over temperature and rainfall along the State, and the climates found in Sonora. The chapter concludes with a description of the relationships between vegetation and climate, and some of the main trends observed in the climate of Sonora.

INTRODUCCIÓN

Sonora es un estado con un claro gradiente altitudinal por encontrarse en la vertiente exterior de la Sierra Madre Occidental (SMO). Presenta un marcado declive hacia el Golfo de California desde unos 2 000 m de elevación en la sierra de Álamos al sur del estado. Las serranías están orientadas en el sentido sur-sureste (S-SE) y nor-noreste (N-NE) y entre ellas se forman valles longitudinales a los márgenes de los ríos que a veces se cortan por despeñaderos y acantilados, para abrirse con mayores dimensiones al aproximarse a la costa, hasta terminar en páramos o desiertos que adquieren su mayor extensión en los municipios de Pitiquito y Caborca al noroeste del estado. En general se puede decir que se definen dos zonas: una montañosa, que además de poseer fértiles valles en las márgenes de los ríos, tiene llanuras abiertas en las plani-

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

² University of Arizona.

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

cies altas; la otra zona es de terreno plano, ya que a medida que se aproxima a la costa, va adquiriendo mayor extensión, hasta terminar en desiertos por su constitución geológica y su clima, donde la precipitación total anual es inferior a 50 mm (Gobierno del Estado de Sonora, 2006). En la entidad abundan los climas áridos (Mosiño y García, 1973) con temperaturas extremosas y escasa precipitación. Las plantas xerófilas son las que mejor se han adaptado a estas condiciones y, por lo tanto, son las que más abundan. El matorral desértico ocupa poco más de la mitad de la superficie total de Sonora, distribuido predominantemente hacia el oeste y noroeste de la entidad. En contraste, la compleja topografía y las altas elevaciones de la SMO, ubicada al oriente del estado, donde abundan los bosques de coníferas y de encinos, se manifiesta en precipitaciones más abundantes y temperaturas menos extremosas.

Aproximadamente 95% del estado de Sonora se caracteriza por tener alguna variante de clima seco, con escasa precipitación y alta temperatura. Según el sistema de clasificación climática de Köppen, modificado por García (1988), y el sistema de clasificación de comunidades bióticas de Brown y Lowe (1994), en Sonora se han clasificado 24 tipos diferentes de climas y cinco tipos diferentes de vegetación. ¿Qué es lo que hace que la entidad sostenga esta diversidad de climas y tipos de vegetación? La respuesta es compleja, pues intervienen muchos factores como su latitud, colindancia con el Golfo de California, fisiografía, etcétera. Parte de la respuesta se encuentra en los sistemas de circulación atmosférica denominados de gran escala por cubrir un radio entre 10 000 y 40 000 km durante semanas o meses y que son suficientes para incidir en todo el planeta. Estos sistemas gobiernan el desarrollo y movimiento de los sistemas meteorológicos de escala menor que afectan de manera particular a Sonora a lo largo del año y controlan las características de temperatura y precipitación en el estado. La descripción de cómo estos sistemas influyen a lo largo del estado permite entender la presencia de tanta diversidad de climas y tipos de vegetación. Un tanto más difícil es expli-

car la relación entre los climas y los tipos de vegetación. En ocasiones sucede que en climas similares, las pequeñas diferencias en la periodicidad de eventos extremos son causas limitantes para la distribución de algunas especies.

Varios aspectos del clima de Sonora ya han sido descritos por diversos autores; por ejemplo, Mallery (1936a y 1936b) realizó una evaluación bi-anual de la lluvia del desierto sonorense y Ronald Ives (1949) efectuó una recolección de datos de campo y resumen de información climática durante el periodo de 1928 a 1947 en áreas desérticas de Arizona, Sonora y Baja California, mientras que Mosiño y García (1981) hicieron un análisis de la variabilidad de la lluvia, del que obtuvieron un diagrama de riesgos por falta de lluvia para México. En todo caso, el objetivo del presente capítulo es hacer una síntesis del conocimiento actual del clima del estado de Sonora.

CONTROLADORES ATMOSFÉRICOS DE GRAN ESCALA EN EL CLIMA DE SONORA

Sistemas de alta presión subtropicales

Los patrones dominantes de circulación atmosférica de gran escala juegan un papel importante en la determinación del clima de Sonora. La posición geográfica y zonal de Sonora es consistente con otros sitios áridos alrededor del globo. Muchos de los grandes desiertos del mundo se localizan cerca de los 30° de latitud en ambos hemisferios. La conexión entre la aridez y la latitud se explica mediante la formación de sistemas semipermanentes de alta presión superficiales cercanos a esta latitud a lo largo del globo. Estos sistemas de alta presión subtropicales se asocian con aire descendente y traen consigo tiempo claro, seco y cálido sobre las áreas donde se posicionan. Sonora se encuentra bajo la influencia cercana de dos de estos sistemas de alta presión (Schmidt, 1989): los sistemas de alta presión del Pacífico Oriental y de las Bermudas (figura 1). La formación de estos sistemas de alta presión está asociada a la circulación de escala glo-

bal que mueve el exceso de energía desde las regiones ecuatoriales hacia los polos. Durante el ciclo anual, la radiación solar incidente y el calentamiento de la superficie son mayores cerca del ecuador e inducen a la formación de una vaguada térmica con actividad de tormentas convectivas intensas. Esta vaguada térmica también se conoce como Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) y se mueve hacia el norte y hacia el sur a lo largo del año en respuesta a los cambios angulares del sol. El aire que se eleva desde la ZITC se distribuye y se mueve hacia los polos cuando alcanza el límite de la troposfera a altitudes cercanas a los 20 000 m y desciende cerca de los 30° de latitud en ambos hemisferios, lo cual se relaciona con la formación de los sistemas de alta presión subtropicales en la superficie. Debido a los contrastes térmicos entre la tierra y el mar (las aguas retienen mejor el calor que el continente y hace que éste se caliente mucho más rápido que las aguas y viceversa) los sistemas de alta presión se organizan mejor sobre el océano.

La intensidad y posición de los sistemas de alta presión del Pacífico Oriental y de las Bermudas son factores importantes que influyen en la variabilidad de la precipitación en Sonora desde escalas estacionales y decadales. Si el sistema de alta presión posicionado sobre el Pacífico Oriental es inusualmente intenso durante el invierno, puede desviar lejos hacia el norte los sistemas de tormentas y limitar la precipitación, mientras que una zona de alta presión en las Bermudas inusualmente intensa durante el verano puede fortalecer el flujo desde el sur y transportar precipitaciones por arriba del promedio en la mayor parte del norte de México.

SISTEMAS METEOROLÓGICOS

Invierno

Sonora recibe cerca de ochenta por ciento de la lluvia anual entre los meses de julio y septiembre, con algunas aportaciones importantes al final del verano y principios de otoño debidas a las tormen-

tas ocasionales producidas en los alrededores de los huracanes (Jáuregui, 1989; Reyes y Mejía-Trejo, 1991) y un segundo máximo de precipitación durante el invierno (de diciembre a febrero). La precipitación total de invierno, aun cuando es significativamente menor a la precipitación de verano, es especialmente importante para la vegetación de Sonora (Salinas-Zavala *et al.*, 2002), debido a que por su larga duración y baja intensidad tiene mayores posibilidades de infiltrarse a mayor profundidad en el suelo y estar disponible hasta la entrada de la primavera.

La precipitación de invierno está asociada a sistemas de baja presión de latitudes medias que atraviesan el norte de México, los cuales transportan humedad desde el Océano Pacífico y producen lluvias muy dispersas y nieve en zonas elevadas. La energía que impulsa a estos sistemas de baja presión proviene de las corrientes de chorro subtropical y de latitudes medias que pueden ser activas en las cercanías de Sonora durante el invierno. Sobre Sonora pueden pasar repetidas veces sistemas intensos de baja presión; en la parte frontal de estos sistemas hay un cambio brusco en las propiedades térmicas y dinámicas de las masas de aire vecinas por lo que se les conoce como frentes fríos extratropicales. Estos sistemas pueden no generar precipitación alguna debido al acceso limitado de humedad subtropical y de altas latitudes. Si ocurren en el Golfo de México, esos eventos fríos son también conocidos como Nortes y pueden promover condiciones ideales para la generación de temperaturas de congelación en un área muy extensa. Aire fresco y seco y cielos despejados permiten un enfriamiento radiacional intenso durante las noches que siguen al paso de un frente frío, seco e intenso, lo cual es causa de muerte potencial en algunos tipos de vegetación (Turnage y Hinckley, 1938).

Verano

La precipitación de verano en Sonora ocurre como resultado de dinámicas atmosféricas muy diferentes. La corriente de chorro de latitudes medias que

transporta los sistemas de tormentas de invierno se desplaza muy al norte durante el verano, mientras que la zona de alta presión del Pacífico Oriental se intensifica hacia la costa occidental de Norteamérica. Las dinámicas atmosféricas que producen la precipitación de verano no están asociadas con las corrientes de chorro de escala global ni con los sistemas de baja presión intensos, sino con las tormentas convectivas que surgen por la combinación del calentamiento solar y la humedad. La radiación y el calentamiento solar son muy abundantes en Sonora durante la primavera y principios del verano, pero las condiciones permanecen secas. El único ingrediente faltante es la humedad. Un ligero cambio en los patrones de circulación durante el verano permite la entrada de humedad desde el sur, la cual incrementa en forma dramática la actividad de tormentas convectivas sobre la región. Este cambio en la circulación y el incremento de la actividad convectiva en México se conoce como el sistema del Monzón de Norteamérica.

El Monzón de Norteamérica

La definición oficial para el término «monzón» es un patrón de flujo superficial de viento persistente causado por calentamiento diferencial que cambia de dirección de una estación a otra (Greer, 1996). El monzón más estudiado en la tierra es el de la India, o Monzón de Asia del Sur, donde el calentamiento superficial de la altiplanicie tibetana durante el verano ocasiona que el aire húmedo y cálido y las tormentas del Océano Índico fluyan hacia el continente sobre el sur de Asia. Los cambios en la dirección de los vientos durante el invierno debido a un enfriamiento mayor del continente en relación al Océano Índico hace que las lluvias cesen. Esta variación en la dirección de los vientos, del mar al continente y luego en dirección contraria, ocurre cada año con el cambio de estaciones.

Norteamérica experimenta un cambio estacional de vientos similar que controla la precipitación de verano del sur y oeste de México y el suroeste de Estados Unidos. Este fenómeno se conoció originalmente como «monzón mexicano» (Douglas

et al., 1993), por estar centrado en el noroeste de México, aunque también se ha reconocido ampliamente en la literatura con el término «Sistema del Monzón de Norteamérica» (SMNA) (Higgins *et al.*, 2003; Vera *et al.*, 2006). De junio a julio los vientos de niveles medios cercanos a los 3 000 m de altitud cambian de noroeste a sureste, al mismo tiempo que el sistema de alta presión de las Bermudas, que antes se encontraba centrado sobre el Atlántico del este, migra parcialmente hacia el noroeste en México y hacia el interior del suroeste de Estados Unidos. Las complejas interacciones entre el calentamiento superficial, la topografía y los patrones de circulación atmosférica de gran escala modulan la posición e intensidad del sistema de alta presión y permiten que la humedad se transporte, principalmente del Océano Pacífico tropical hacia el occidente de México, lo que da inicio a la estación húmeda de verano (Adams y Comrie, 1997). Existe un considerable debate sobre cuánta humedad contribuye el Golfo de México a la precipitación estacional del monzón, debido a la presencia de la SMO que funciona como barrera a este transporte de humedad (Hales, 1974; Douglas *et al.*, 1993) y también a la escasa cobertura espacial y temporal de las estaciones meteorológicas y a la importancia de la convección profunda en el transporte vertical y en el reciclamiento de la humedad (Higgins *et al.*, 2003). Los experimentos con modelos de predicción numérica han mostrado que durante el verano la humedad en niveles medios (por encima de los 3 000 m) puede fluir hacia el norte de México, desde el Golfo de México/Mar Caribe (Schmitz y Mullen, 1996), mientras que en los niveles bajos de la atmósfera la humedad del desierto sonorense fluye desde el Golfo de California (Rasmusson, 1966, 1967 y 1968; Stensrud *et al.*, 1995; Mo y Berbery, 2004).

La actividad de tormentas de la estación monzónica de verano, de julio a septiembre, puede producir grandes cantidades de precipitación sobre Sonora y constituye la mayor proporción con respecto al total anual en la región. Si un grupo de nubes interactúa con algún grado de organización en una escala horizontal de cientos de kilómetros

y un ciclo de vida de horas, se le denomina Sistema Convectivo de Mesoscala (MCS, por sus siglas en inglés) (Farfán y Zehnder, 1994). Los MCS son comunes en Sonora durante el verano (Douglas *et al.*, 1987; Reyes y Mejía-Trejo, 1991). Algunas zonas elevadas de Sonora reciben más de setenta por ciento del total anual de lluvia durante los meses de julio a septiembre con totales de precipitación por encima de los 150 mm tan sólo en julio. Existe una enorme variabilidad estacional a lo largo de la región asociada a la actividad de tormentas y al volumen de precipitación. Los períodos activos de convección a menudo son seguidos por períodos de calmas en la actividad. Esta variabilidad parece estar relacionada con ajustes de gran escala en la posición e intensidad de los sistemas de alta presión del Pacífico Oriental y de las Bermudas. Las ondas del este (García y Trejo, 1994) que producen surgencias de humedad al norte del Golfo de California pueden fortalecer la actividad de tormentas del monzón hacia el norte de Sonora, mientras que el debilitamiento del sistema de alta presión de las Bermudas y el incremento del flujo seco del suroeste desde el Pacífico puede suprimir la actividad de tormentas hacia el sur. Esta alternancia entre actividad máxima y mínima es común a lo largo de la estación monzónica. Los períodos de lluvia persistente pueden incrementar la humedad del suelo a niveles importantes para los procesos ecológicos, pero durante períodos de calmas, cálidos y secos, los suelos pueden secarse rápidamente. El aprovechamiento de la humedad del suelo durante la estación de verano requiere que la vegetación sea capaz de responder y adaptarse rápidamente a las condiciones altamente variables; las plantas de medios áridos y semiáridos exhiben numerosas adaptaciones para persistir bajo estas condiciones (Schwinning *et al.*, 2004).

Las tormentas tropicales

La actividad de tormentas tropicales en el Pacífico Oriental también puede contribuir de manera significativa a la precipitación total anual en Sonora. En general, los ciclones tropicales se componen de

varios grupos de sistemas clasificados por medio de diferentes intensidades y éstos van desde los más débiles (perturbaciones y depresiones tropicales) hasta los más intensos (huracanes). En un nivel intermedio se encuentran las tormentas tropicales. Éstas pueden desplazarse hacia el Golfo de California o entrar a tierra directamente en Sonora o muy cerca del estado, produciendo enormes cantidades de lluvia (Jáuregui, 2003). Se ha estimado que estos fenómenos pueden contribuir con 16% de la precipitación anual, con intensidades que pueden ser superiores a 50 mm/24hr (Jáuregui, 1989). El máximo en la actividad de tormentas que impactan a Sonora ocurre durante septiembre y octubre. Las lluvias diarias que acompañan a estos eventos pueden exceder 30 mm y en casos extremos pueden superar los 150 mm (Englehart y Douglas, 2002), por lo que representan una fuente importante de agua dulce que contribuye a la recarga de acuíferos y llenado de las presas.

Variabilidad estacional e interanual de la precipitación

La posibilidad de que se presenten lluvias en Sonora ocurre durante dos estaciones, verano e invierno, con períodos secos en otoño y primavera. La energía y dinámica de la atmósfera necesarias para producir la precipitación durante estas dos estaciones se crea a partir de patrones de circulación de gran escala fundamentalmente diferentes. De ahí que la variabilidad estacional de la precipitación sea importante de entender. La posición geográfica de Sonora es sólo marginal con respecto a la interceptación de actividad de tormentas invernales asociadas a la corriente de chorro de latitudes medias. Durante la mayoría de los inviernos, los sistemas de baja presión y las trayectorias de los frentes fríos pasan muy al norte y sólo ocasionalmente lo hacen suficientemente al sur como para ocasionar temperaturas frescas y precipitación cuando la humedad está disponible. La posibilidad de que se presenten las lluvias de verano es más consistente año tras año, pero también puede variar entre los años. Sonora está localizada muy cerca de

la región núcleo de actividad de tormentas asociadas con el sistema monzónico de verano, pero puede experimentar una alta variabilidad en las cantidades de precipitación durante el verano y entre veranos (variabilidad interanual) debido al cambio en la posición e intensidad de características de circulación atmosférica importantes como los sistemas subtropicales de alta presión del Pacífico Oriental y de las Bermudas (figura 1). Cambios mínimos en la posición e intensidad de estos tipos de circulación parecen estar conectados con cambios de escala global en los patrones de circulación relacionados con cambios en los patrones de temperatura superficial del mar (TSM, *v.g.*, El Niño-Oscilación del Sur) y pueden persistir por años y causar largos períodos de condiciones húmedas o secas en Sonora (Brito-Castillo *et al.*, 2003).

El Niño-Oscilación del Sur

El clima de Sonora se encuentra fuertemente influenciado por los patrones de temperatura superficial del mar en la región del Pacífico Ecuatorial (Magaña y Conde, 2000). Estos patrones son capaces de interrumpir la ubicación y trayectoria de las corrientes de chorro que transportan los sistemas meteorológicos invernales al suroeste de Estados Unidos y al norte de México. La precipitación de invierno es especialmente impactada y puede llegar a ser dramáticamente superior o inferior al promedio en función de las condiciones en el Pacífico.

Las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico tienden a oscilar con respecto a un valor definido como normal entre cálidas y frescas a lo largo del ecuador cada dos a siete años (Trenberth, 1997). Cuando las aguas son inusualmente cálidas en el Pacífico ecuatorial, desde el centro hacia la costa occidental de América, se dice que está ocurriendo un evento El Niño, mientras que por el contrario, cuando las aguas son inusualmente frías en esa misma región, se dice que está ocurriendo un evento La Niña. La presión atmosférica y los patrones de circulación se encuentran fuertemente relacionados con los cambios en la temperatura

superficial del mar. En respuesta a la presencia de aguas del mar cálidas se forman sistemas de presión superficial débiles y áreas extensas de tormentas, mientras aguas frescas fortalecen el tiempo claro y seco que acompaña a los sistemas de alta presión superficiales. El científico británico Sir Gilbert Thomas Walker publicó por primera vez las grandes oscilaciones de la presión atmosférica entre la India y el Océano Pacífico y su correlación con las pautas de temperatura y lluvias a lo largo de muchas regiones tropicales de la tierra, incluyendo a la India. Sus resultados ayudaron a entender los cambios que experimenta el campo de presiones entre Darwin y Tahití en el Océano Pacífico, pero no fue sino hasta la década de 1960 que se reconoció su relación con el fenómeno oceánico de El Niño (Rasmusson y Wallace, 1983), por lo que se acuñó el término El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). El Niño se refiere a los cambios periódicos en las temperaturas superficiales del mar (Cane, 1983), mientras que la Oscilación del Sur es la respuesta atmosférica a estos patrones (Rasmusson y Wallace, 1983).

Los eventos El Niño y La Niña modulan el movimiento de las corrientes de chorro subtropical y de latitudes medias (*i.e.*, Rasmusson y Wallace, 1983), que pueden favorecer o impedir los mecanismos de precipitación sobre Sonora. El patrón de circulación asociado con El Niño es una corriente de chorro subtropical intensificada que libera humedad y tiempo húmedo directamente en el norte de México y el suroeste de Estados Unidos. Los eventos La Niña se encuentran asociados a la presencia de un domo de alta presión que funciona como bloqueo (alta subtropical del Pacífico intensificada) sobre el oeste de Estados Unidos, el cual dirige las tormentas invernales hacia el norte de Estados Unidos y deja sequía en Sonora.

Debido a la influencia en la cantidad de precipitación invernal, la ciclicidad entre eventos El Niño y La Niña tiene implicaciones muy prolongadas en los patrones de variabilidad de la precipitación. Se cree que los eventos persistentes de La Niña durante la década de 1950 fueron los causantes de precipitaciones invernales por debajo del

promedio sobre el norte de México y, de una extensión mayor, sobre la región del oeste de Estados Unidos, lo que dio origen a un período largo de sequía (Cole y Cook, 1998). En contraste, el período comprendido desde mediados de la década de 1970 hasta finales de la de 1990 fue húmedo, asociado con el incremento en la frecuencia de la actividad de El Niño.

La relación entre el ENSO y la precipitación de invierno para Sonora no es lineal. La conexión entre la precipitación de invierno por debajo del promedio y eventos La Niña es más intensa que aquella que existe entre la precipitación de invierno por arriba del promedio y eventos El Niño. Los eventos La Niña tienden a favorecer la intensificación del sistema de alta presión del Pacífico Oriental, que es especialmente efectiva en conducir la actividad de tormentas fuera de los límites de Sonora y limita la humedad necesaria para la precipitación. Los eventos El Niño tienden a aparecer con diferentes características en relación a su intensidad general y al patrón de temperaturas superficiales del mar a través del Pacífico (Hoerling y Kumar, 2002). Las características diferentes de El Niño pueden crear variaciones en la posición e intensidad de la corriente de chorro subtropical y éstas pueden a su vez variar entre eventos, por lo que eventos distintos de El Niño pueden acarrear precipitaciones por debajo o por arriba del promedio en función de la posición e intensidad de sus características.

La conexión entre el ENSO y la precipitación de verano en Sonora es menos clara que durante la estación de invierno. Muchos estudios han examinado la posible conexión entre la precipitación de la estación cálida sobre el norte de México y la fase del ENSO, pero han fracasado en identificar una relación consistente. Reyes y Mejía Trejo notaron en su estudio hecho en 1991 que la precipitación de verano puede ser intensificada cuando le sigue a eventos El Niño de invierno/primavera debido a la intensificación de la actividad de tormentas tropicales y al flujo de humedad sobre el noroeste de México. El estudio realizado por Castro *et al.* (2001) concluye que la intensidad del domo sub-

tropical del monzón fue más débil durante eventos El Niño y que creó precipitaciones de verano por debajo del promedio en México y el suroeste de Estados Unidos. Ambos estudios sugieren que existen diferentes relaciones entre el ENSO y la precipitación de verano y que al parecer varían entre eventos específicos. Se requiere más investigación para identificar si existe una relación mucho más generalizada.

La Oscilación Decadal del Pacífico

Los registros históricos y las reconstrucciones paleoclimáticas de precipitación sobre el norte de México muestran una variabilidad adicional que ocurre en escalas de tiempo más largas que el período de 2-7 años característico del ENSO. Los períodos húmedos y secos persistentes, de varias décadas, están presentes en los registros del clima de Sonora. Períodos extensos de sequía ocurrieron durante la década de 1950 y a finales de la de 1990, mientras que el último período, en la década de 1970, fue inusualmente húmedo (Brito-Castillo *et al.*, 2003). El causante potencial de esta variabilidad de largo período en la precipitación es un fenómeno conocido como Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés). El PDO se manifiesta como cambios decadales en la temperatura superficial del mar y los patrones de circulación en el Pacífico Norte (Mantua *et al.*, 1997). Durante la fase positiva (o negativa) del PDO, las temperaturas superficiales del mar a lo largo de las costas de Norteamérica están por arriba (o por abajo) del promedio con un sistema de baja presión intensificado (o debilitado) en el golfo de Alaska.

La fase del PDO es importante para Sonora debido a su aparente conexión con la actividad del ENSO y con los patrones de teleconexión (McCabe y Dettinger, 1999; Brown y Comrie, 2004; Pavia *et al.*, 2006). El patrón de teleconexión de invierno, de condiciones húmedas durante eventos El Niño, tiende a ser más intenso cuando el PDO se encuentra en su fase positiva. La situación inversa durante la fase negativa del PDO también resulta cierta, cuando la teleconexión de inviernos secos-

La Niña es más evidente. Hay controversia sobre el origen y mecanismos del PDO así como de su papel en la modulación de los regímenes de precipitación local. Hay un consenso creciente de que el PDO es un reflejo de largo período de la variabilidad del ENSO en el Pacífico Norte en lugar de ser un modo de variabilidad atmosférica independiente (Newman *et al.*, 2003; Schneider y Cornuelle, 2005). No obstante, el PDO parece representar un mecanismo atmosférico de largo período que puede impactar las cantidades de precipitación sobre Sonora por lapsos extensos (Brito-Castillo *et al.*, 2002).

La Oscilación Multidecadal del Atlántico

Investigaciones recientes han implicado también una variabilidad de largo período en los patrones de temperatura superficial del mar a través del Océano Atlántico con la variabilidad del clima de Norteamérica. McCabe *et al.* (2004) sugieren que la fase entre el PDO y los cambios de largo período en los patrones de temperatura superficial del Océano Atlántico (Oscilación Multidecadal del Atlántico o AMO, por sus siglas en inglés) (Barnston y Livezey, 1987; Enfield *et al.*, 2001) favorecen los patrones de circulación que pueden originar períodos muy extendidos (de 10 a 30 años) de condiciones secas en el oeste de Estados Unidos y el norte de México. El impacto de la AMO sobre el clima de Norteamérica por sí solo parece ser más intenso durante la estación de verano (Sutton y Hodson, 2005). La AMO puede modular la intensidad y posición del sistema de alta presión subtropical de las Bermudas que, en consecuencia, impacta el flujo de humedad sobre el Golfo de México y el interior de México durante la estación monzónica. Se necesita hacer más investigación para identificar la sinergia o independencia de los impactos de las oscilaciones atmosféricas y oceánicas de gran escala como el PDO y la AMO sobre los regímenes de precipitación de largo período en el norte de México.

Los sistemas meteorológicos por regiones

Pese a toda la variedad de elementos que contro-

lan el clima de Sonora, se han realizado algunos esfuerzos por identificar la contribución de los sistemas meteorológicos capaces de causar nubosidad y lluvia en el estado, aunque es necesario aclarar que éstos se han realizado regionalmente (véase, por ejemplo, Douglas y Englehart, 2007). En el estudio realizado por García y Trejo (1994) se consideran tres regiones para el estado de Sonora (Desierto de Altar, Llanura Costera del Pacífico y Norte de la SMO) y mediante el análisis de 15 años de imágenes de satélite diarias, en conexión con las cartas del tiempo producidas por el Servicio Meteorológico Nacional, se identificaron los sistemas meteorológicos que podían causar nubosidad y posible lluvia en éstas. Para la región del Desierto de Altar, que cubre parte del noroeste de Sonora (véase García y Trejo, 1994), existe un marcado equilibrio en la contribución a la generación de nublados y lluvias anuales de los sistemas meteorológicos de invierno (de noviembre a abril), como los vientos del oeste, la corriente de chorro y los frentes extratropicales, lo mismo que en los de verano (mayo a octubre), como los vientos alisios del este y noreste, los ciclones tropicales y el Monzón. Estos sistemas, de acuerdo con García y Trejo (1994), contribuyen con 49.8 y 50.2% en cada estación, respectivamente. Este equilibrio es mucho más evidente hacia la porción noroccidental de Sonora, donde las lluvias de invierno van siendo cada vez más dominantes en relación con las lluvias de verano. En el caso de la región de la llanura costera del Pacífico, que cubre el sur del estado, y la región del norte de la SMO, que cubre la porción nororiental de Sonora, los sistemas meteorológicos de verano dominan sobre los de invierno, con una contribución equivalente a 58.5 y 60.2% en cada región, respectivamente.

TEMPERATURA

Sonora es un estado donde se presentan veranos muy calurosos e inviernos muy fríos, puesto que aquí convergen masas de aire de diferente temperatura y contenido de humedad. Una masa de aire

es un volumen inmenso de aire que cubre miles de kilómetros de superficie horizontal, uniforme en cuanto a su temperatura y contenido de humedad. Las masas de aire cambian sus características e intercambian calor y humedad sobre el territorio donde se desplazan cuando ascienden sobre una zona montañosa o por calentamiento o enfriamiento radiacional. De hecho, los desiertos del norte de México, como el sonorese, son zonas de origen de una masa de aire continental tropical cálida y seca que se desarrolla en verano y produce las altas temperaturas estivales. En verano, en 74.2% del territorio sonorese las temperaturas llegan a ser superiores a 40° C a la sombra. Las temperaturas más altas se presentan en los meses de junio o julio, con un segundo máximo que muchas estaciones registran en septiembre y que es típico de las zonas intertropicales. Por el contrario, cuando la masa de aire polar continental ingresa a territorio sonorese en invierno, ya sea en forma de nortes, vórtices fríos o depresiones ciclónicas (Mosiño, 1958; Mosiño y García, 1973; García, 1989), se alcanzan los mínimos de temperatura, lo que genera nevadas en algunas partes de la SMO. En invierno, en 68.2% del territorio sonorese las temperaturas pueden llegar a ser inferiores a 0° C. Cuando la temperatura se reduce por debajo de los 0° C hay ocurrencia de heladas, muy comunes en enero (más de cien al norte de la SMO), que es cuando la temperatura se reduce por debajo de los -4° C (Maderrey-Rascón *et al.*, 2001). Las heladas ocurren en una porción considerable del desierto sonorese (Turner *et al.*, 2003), con excepción de las zonas costeras, donde las temperaturas mínimas promedio anuales oscilan entre 12 y 22° C. La ocurrencia de heladas limita fuertemente la distribución de especies de las selvas bajas y matorrales espinosos en Sonora y Sinaloa que llegan a penetrar en el desierto sonorese (Shreve, 1934). Las heladas pueden llegar a matar individuos de especies vegetales al rebasar sus límites mínimos de tolerancia, con lo que se altera la composición de especies y la estructura de las comunidades (Turner *et al.*, 2003). Otro fenómeno que incide en los valores de temperatura es la nubosidad, la cual reduce las tempe-

raturas máximas durante el día e incrementa las temperaturas mínimas durante la noche (Easterling *et al.*, 1997). En Sonora, la cantidad promedio de días nublados anuales se reduce de 120 al sureste del estado, sobre la SMO, a menos de 40 en el extremo noroeste sobre el desierto de Altar (Jáuregui, 1970).

En cuanto a la distribución de las zonas térmicas, menos de 1% del territorio sonorese presenta temperaturas medias anuales inferiores a 12° C (tabla 1), las cuales corresponden a la clasificación de semifrías y cubren principalmente una fracción reducida de la SMO hacia el oriente del estado (figura 2). La mayor proporción del territorio sonorese (68.3%) presenta temperaturas medias anuales entre 18 y 22° C, las cuales corresponden a la clasificación de semicálidas y se distribuyen principalmente hacia el oeste y noroeste del estado, donde se localiza el desierto de Altar. El sur del estado presenta predominantemente temperaturas medias anuales entre 22 y 26° C, las cuales corresponden a la clasificación de cálidas (tabla 1 y figura 1). Debido a que la humedad aumenta hacia el sur del estado, el incremento de las temperaturas medias anuales involucra una mayor evapotranspiración, por lo que el tipo de vegetación existente en el sur se diferencia de los tipos de vegetación localizados más hacia el norte. La vegetación en el sur está más íntimamente ligada a la selva baja caducifolia y al matorral espinoso (Felger, 1993; Brown y Lowe, 1994).

Tabla 1. Superficie cubierta por cada uno de los intervalos de temperatura media anual presentes en el estado de Sonora

Temperatura (°C)	Zona térmica	Área (miles de km ²)	% estatal
8 a 10	Semifría	0.002	0.001
10 a 12		0.40	0.22
12 a 14	Templada	2.14	1.20
14 a 16		11.11	6.22
16 a 18		14.55	8.14
18 a 20	Semicálida	29.26	16.37
20 a 22		80.30	44.91
22 a 24	Cálida	37.65	21.06
24 a 26		3.39	1.89

Tendencias actuales en la temperatura

Debido al gran interés que ha despertado el tema del calentamiento global (Easterling *et al.*, 1997; Houghton *et al.*, 2001) y a la necesidad de estudiar la respuesta de los ecosistemas a este fenómeno, resulta necesario mencionar dicho tema para el caso de Sonora. A inicios de 1900 las heladas severas en el desierto de Sonora ocurrían cada dos a tres años (Webb, 1996; Turner *et al.*, 2003). Esta frecuencia se redujo de manera irregular durante el siglo XX a tal punto que ahora las heladas en el desierto de Sonora ocurren cada dos décadas o más (Weiss y Overpeck, 2005) debido al incremento de las temperaturas mínimas cuya tendencia se ha mantenido en los últimos cuarenta años, con lo que se incrementó la temporada libre de heladas y disminuyeron los días con temperaturas inferiores a 0° C. En el caso de las temperaturas máximas en Sonora, éstas se están incrementando a un ritmo más acelerado que las temperaturas mínimas, provocando que a partir de 1970 la tendencia en la oscilación térmica diaria (OTD), esto es, la temperatura máxima menos la temperatura mínima en el día, sea positiva (Englehart y Douglas, 2005). No está claro todavía de qué manera ha contribuido el incremento de los gases de invernadero en la atmósfera a este calentamiento regional pero se sugiere que los cambios en el uso del suelo, así como la degradación provocada por el sobrepastoreo, que reduce la cubierta vegetal y disminuye la transpiración, hacen que la temperatura del suelo se eleve y se incremente el flujo de calor sensible en relación con el flujo de calor latente, lo que promueve el calentamiento de las temperaturas máximas e incrementa la OTD (DeFries *et al.*, 2002; Englehart y Douglas, 2005).

PRECIPITACIÓN

Características de la precipitación en Sonora

Ya se han discutido los mecanismos principales de gran escala que controlan en Sonora la precipita-

ción de invierno y de verano de un año a otro, pero no así la naturaleza de la precipitación en cada estación. La intensidad, duración, frecuencia y tipo de precipitación son todas críticas de cuánta agua está disponible y cuándo lo está para la vegetación. Las precipitaciones de invierno están relacionadas generalmente con circulaciones atmosféricas de latitudes medias como los sistemas de baja presión y frentes fríos. Éstas son producidas a partir de las tormentas extratropicales del Pacífico (Jáuregui, 1995) que se asocian con la penetración de la corriente de chorro polar (Brito-Castillo *et al.*, 2003) y con vaguadas intensas (García y Trejo, 1994; Jáuregui, 1995) y que en ocasiones interactúan con la corriente de chorro subtropical (Douglas y Englehart, 1984). Estos sistemas producen áreas extensas de precipitación con bajas intensidades en periodos largos (de horas a días). La precipitación puede a menudo caer y acumularse en forma de nieve en las áreas elevadas. Estos eventos de baja intensidad y larga duración pueden permitir que la precipitación se infiltre a mayor profundidad en áreas con poca pendiente y poco escurrimiento superficial. Las temperaturas frescas y el ángulo solar bajo durante el invierno también mantienen bajas las tasas de evapotranspiración, lo que permite que el agua permanezca en el suelo por períodos más largos.

La precipitación de verano, en contraste, se caracteriza por ser local, de alta intensidad y corta duración y por mostrar una alta variabilidad en pocos kilómetros (Gochis *et al.*, 2004). El Sistema del Monzón de Norteamérica transporta la humedad hacia Sonora y crea un medio favorable para las masas de aire de tormentas. Las masas de aire de tormentas no se originan o se ajustan por características de circulación de gran escala, sino por características topográficas de escala menor. Estas tormentas convectivas pueden producir altas tasas de lluvia (>25 mm/hr), pero a menudo son de corta duración (<5 hrs) y pequeñas en cobertura (<10 km de amplitud). Las cuencas de drenaje que reciben la lluvia a partir de tormentas convectivas pueden experimentar inundaciones repentinas que retroceden rápidamente tan pronto la tormenta se ha disipado. Bajo estas condiciones puede infiltrarse

algo de agua hacia el suelo pero el mayor volumen se pierde por escurrimiento. En la región montañosa de la parte media del estado la lluvia media diaria es del orden de 5 mm/día (Gochis *et al.*, 2004) y el máximo mensual y estacional se localiza en la vertiente occidental de la SMO. El eje de máxima precipitación se aleja de las partes altas de la sierra en su trayectoria de sur a norte, lo que indica que la distancia al Golfo de California y el relieve son factores importantes de este comportamiento. Las lluvias diarias ocurren muy temprano en el día y con mayor frecuencia sobre las partes elevadas de la SMO, pero con poca intensidad. En cambio, en zonas poco elevadas, la precipitación no es frecuente, pero ocurre con gran intensidad (Gochis *et al.*, 2004) y está desplazada hacia la tarde y noche (Berbery, 2001).

El inicio de las lluvias usualmente es momentáneo, con cambios abruptos de un tiempo caluroso y seco a uno más húmedo y menos caluroso (Higgins *et al.*, 2003). En las laderas occidentales de la SMO la lluvia total media mensual, durante el verano, excede los 30 cm, lo que provoca, en el transcurso de seis a ocho semanas, el reverdecimiento de la vegetación y cambios drásticos en el paisaje árido hacia condiciones típicas de bosque tropical. El incremento de la precipitación coincide con el incremento del transporte vertical de la humedad por convección (Douglas *et al.*, 1993) y la ocurrencia de vientos del sur que soplan hacia el norte del Golfo de California (Badán-Dangón *et al.*, 1991; Bordoni *et al.*, 2004), los cuales constituyen una fuente importante de surgencias de humedad hacia el desierto sonorense (Schmitz y Mullen, 1996) que afectan en gran medida las regiones costeras de poca elevación (Gochis *et al.*, 2004) y contribuyen a la alta variabilidad estacional de las lluvias. Las altas temperaturas y la radiación solar intensa provocan que las plantas utilicen rápidamente el agua disponible después de los eventos de lluvia antes que la humedad se evapore. Los suelos se secan muy rápido después de una tormenta, lo que fuerza a las plantas a conservar el agua y los recursos hasta que ocurran las siguientes lluvias.

La precipitación total anual en el estado de So-

nora decrece de sur a norte y de este a oeste y alcanza más de 1 000 mm en una porción que es inferior a 1% del territorio estatal (tabla 2) localizada al occidente y sureste del estado (figura 3). En contraste, la lluvia anual es inferior a 50 mm en el extremo noroeste, una pequeña porción de territorio que cubre 0.23% de la superficie estatal. En 18.3% de la entidad la lluvia anual es inferior a 200 mm a lo largo de la planicie costera (figura 3), mientras que en 70.5% del territorio estatal ésta se presenta entre 200 y 600 mm en una franja que corre de noroeste a sureste en la porción media del estado. En el 11.2% restante la precipitación total anual es superior a 600 mm, distribuida principalmente hacia el sureste de Sonora, en las partes más elevadas (figura 3).

Tabla 2. Superficie cubierta por intervalos de precipitación anual

Intervalo de precipitación (mm)	Área (miles de km ²)	% estatal
Menos de 50	0.41	0.23
50 a 100	7.78	4.35
100 a 200	24.53	13.72
200 a 300	32.86	18.37
300 a 400	30.18	16.88
400 a 500	33.79	18.89
500 a 600	29.29	16.38
600 a 800	13.52	7.56
800 a 1 000	5.71	3.20
Más de 1 000	0.76	0.43

CLIMA

El estado de Sonora se ubica al norte del Trópico de Cáncer y, como ya se ha mencionado, se encuentra bajo la influencia del cinturón de altas presiones del hemisferio norte, lo que incide fuertemente en las condiciones de aridez del estado (Schmidt, 1989). La celda semipermanente de alta presión del Pacífico Nororiental y la corriente fría de California determinan que en 95% del territorio sonorense los climas sean muy áridos, áridos y semiáridos (Mosiño y García, 1973). Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1988), en Sonora se identifican 24 tipos dis-

tintos de climas (figura 4), de los cuales, los que mayor cobertura tienen en son los muy áridos o muy secos, los cuales ocupan 42.2% del territorio (tabla 3) y se caracterizan por su precipitación inferior a 400 mm al año y por su temperatura media anual de 18 a 26° C; son considerados muy extremos, ya que su oscilación térmica es mayor a 14° C. Se distribuyen en una extensa franja de terreno paralela a la costa, que va desde el límite con Sinaloa –ensanchándose en el norte– hasta la porción noroccidental en la frontera con Estados Unidos. Los gráficos de las figuras 5a y 5b muestran el comportamiento térmico y la distribución mensual de la lluvia a lo largo del año, en estaciones características de estos tipos de climas cuya ubicación en el terreno se puede consultar en la figura 4. Con base en su temperatura y el régimen de lluvias, estos climas se subdividen en cálidos con lluvias en verano en el sur (estación Presa Álvaro Obregón, Oviachic), cálidos con lluvias todo el año en el centro (estación El Orégano, Hermosillo) y semicálidos con lluvias todo el año en el noroeste (estación Riito, San Luis Río Colorado). Los climas muy áridos cálidos con lluvias en verano tienen influencia en la zona costera, del centro hacia el sur, y comprenden 8% del territorio estatal. En el centro se distribuye en los alrededores de Hermosillo, Miguel Alemán y El Triunfo, así como en una mínima porción al suroeste de Caborca. Hacia el sur lo hace por Guaymas, Empalme, Ciudad Obregón, Navojoa y Huatabampo. La estación Presa Álvaro Obregón, característica de estos climas, muestra que las lluvias de julio a septiembre concentran la mayor proporción en relación con las lluvias anuales, con un máximo en el mes de agosto (figura 5a). Cabe mencionar, sin embargo, que más hacia el occidente, en la zona costera, el máximo de lluvias se desplaza a septiembre. Los climas muy áridos con lluvias todo el año se distribuyen predominantemente en los terrenos situados al centro entre los cálidos con lluvias en verano y semicálidos con lluvias todo el año. La estación El Orégano, Hermosillo (figura 5a), característica de este tipo de climas, muestra que las lluvias de invierno se incrementan ligeramente en

relación con los otros tipos, pero siguen siendo las lluvias de verano las que predominan, con el máximo de lluvias presente en el mes de julio. La estación Riito, San Luis Río Colorado, situada más hacia el norte, donde predominan los climas muy áridos semicálidos, muestra que las lluvias de verano son inferiores en volumen a las lluvias de invierno, lo que indica que, para el caso de Sonora, las lluvias provenientes de los frentes extratropicales de invierno van cobrando mayor importancia en relación con las lluvias monzónicas en esta parte del estado.

Los climas áridos influyen en los terrenos situados al este de los que presentan climas muy áridos; ocupan cerca de 22% del estado y se extienden en una franja orientada noroeste-sureste, con prolongaciones hacia las zonas montañosas (figura 4). También comprenden las tierras localizadas entre Agua Prieta, Villa Hidalgo y Bavispe. La altitud de estas áreas varía de 600 a 1 400 m, pero dominan las menores a 1 000 m; entre ellas cabe destacar los valles y cañones de los ríos San Miguel de Horcasitas, Moctezuma y Yaqui, lo mismo que los sitios donde se ubican las presas Plutarco Elías Calles, Álvaro Obregón y La Angostura. Con respecto a su temperatura media anual, se dividen en: cálidos (con valores de 22° C en adelante), los cuales se distribuyen del centro hacia el sur del estado, como la estación Sahuaripa, Sahuaripa (SMN) (figura 5a); semicálidos (entre 18 y 20° C), del centro hacia el norte, y templados (entre 12 y 18° C), en el noreste, como la estación Agua Prieta y la colonia Ruiz Cortínez (cortina). Obsérvese que en esta estación las lluvias pueden presentarse todo el año, con abundantes volúmenes durante la época invernal, particularmente en los climas áridos templados y, en menor proporción, en los climas áridos cálidos (figura 5a). Los climas semiáridos se distribuyen hacia el este de los climas áridos (figura 4), ocupan 29.4% de la entidad (tabla 3) y se extienden en una franja orientada de noroeste a sureste. Con respecto a su temperatura media anual y el régimen de lluvias se dividen en: templados (entre 12 y 18° C), con lluvias de verano, distribuidos en el norte de la entidad, donde las alturas superan los 1 000 m,

como la estación Bacanuchi, Arizpe (figura 5a); semicálidos (entre 18 y 22° C), con lluvias todo el año, distribuidos al centro-norte del estado, donde las lluvias anuales pueden variar de 300 a 1 000 mm, como la estación Mazatán, Mazatán (figura 5b), y con lluvias de verano, distribuidos al centro-sur de la entidad; cálidos (entre 22 y 26° C), con lluvias todo el año (entre 500 y 800 mm), distribuidos al centro del territorio, y con lluvias en verano, distribuidos al sur de la entidad, como la estación Minas Nuevas, Álamos (SMN) (figura 5b). En menor proporción y distribuidos mayoritariamente hacia el oriente del estado, en la zona montañosa, donde las alturas superan los 1 000 m, se localizan los climas semicálidos subhúmedos (1.56%), como la estación Los Algodones, Álamos (figura 5b); templados subhúmedos (4.5%), como

las estaciones Yécora, Yécora (DGE), Mulatos, Sahuaripa (SMN) y San Javier, San Javier; cálidos subhúmedos (0.01%) y semifríos subhúmedos (0.23%).

RELACIÓN ENTRE EL CLIMA Y LA VEGETACIÓN

Las plantas poseen una gran sensibilidad a los numerosos factores físicos y biológicos que interactúan en el medio ambiente y que influyen en las características estructurales, florísticas y de diversidad de una comunidad vegetal (Rzedowski, 1978; Foster, 1980; Medina, 1995; Mooney *et al.*, 1995). Por ejemplo, el límite norte de la distribución de muchos organismos del matorral espinoso y de la

Tabla 3. Superficie del estado cubierta por cada tipo de clima

Tipo climático ^a	Símbolo ^b	Régimen de lluvias ^c	Área (miles de km ²)	% estatal
Muy árido cálido	BW(h')w	Verano (5 a 10.2)	14.35	8.02
Muy árido cálido	BW(h')(x')	Todo el año (>18)	6.96	3.89
Muy árido semicálido	BWh(x')	Todo el año (>18)	54.11	30.25
Árido cálido	BS ₀ (h')w	Verano (5 a 10.2)	7.01	3.92
Árido cálido	BS ₀ (h')(x')	Todo el año (>18)	6.90	3.86
Árido semicálido	BS ₀ hw	Verano (5 a 10.2)	0.05	0.03
Árido semicálido	BS ₀ h(x')	Todo el año (5 a 10.2)	23.23	12.99
Árido templado	BS ₀ k(x')	Todo el año (>18)	2.42	1.35
Semiárido templado	BS ₁ k(x')	Verano (>18)	17.44	9.75
Semiárido semicálido	BS ₁ h(x')	Todo el año (>18)	23.06	12.89
Semiárido semicálido	BS ₁ hw	Verano (5 a 10.2)	6.25	3.49
Semiárido cálido	BS ₁ (h')(x')	Todo el año (>18)	0.64	0.36
Semiárido cálido	BS ₁ (h')w	Verano (5 a 10.2)	5.19	2.90
Semicálido subhúmedo (intermedio)	(A)C(w ₁)	Verano (5 a 10.2)	0.40	0.22
Semicálido subhúmedo (menos húmedo)	(A)C(w ₀)	Verano (5 a 10.2)	2.03	1.13
Semicálido subhúmedo (menos húmedo)	(A)C(w ₀)x'	Verano (>10.2)	0.37	0.20
Templado subhúmedo (más húmedo)	C(w ₂)	Verano (5 a 10.2)	0.36	0.20
Templado subhúmedo (más húmedo)	C(w ₂)x'	Verano (>10.2)	0.55	0.31
Templado subhúmedo (intermedio)	C(w ₁)	Verano (5 a 10.2)	0.23	0.13
Templado subhúmedo (intermedio)	C(w ₁)x'	Verano (>10.2)	4.08	2.28
Templado subhúmedo (menos húmedo)	C(w ₀)	Verano (5 a 10.2)	0.02	0.01
Templado subhúmedo (menos húmedo)	C(w ₀)x'	Verano (>10.2)	2.81	1.57
Cálido subhúmedo (menos húmedo)	Aw ₀	Verano (5 a 10.2)	0.02	0.01
Semifrío subhúmedo	Cb'(w ₂)x'	Verano (> 10.2)	0.40	0.23

^a Cálido (temperatura media anual >22° C); semicálido (temperatura media anual entre 18 y 22° C); semifrío (temperatura media anual entre 5 y 12° C). Los grados de humedad se definen por la relación lluvia/temperatura en húmedo. ^b Según el sistema de clasificación de Copen modificado por García (1988). ^c Se refiere al porcentaje de lluvia invernal (enero a marzo) con respecto a la lluvia total anual.

selva baja, y en especial de las plantas perennes, está limitado por heladas severas (Felger, 1993). De igual forma, la riqueza de especies de hábito trepador está limitada por las temperaturas mínimas de enero (Molina-Freaner *et al.*, 2004). La evidencia sobre esta restricción en la distribución de especies proviene de observaciones sobre daño en el tejido vegetal durante las heladas que ocurren en la región (Shreve, 1914; Turnage y Hinckley, 1938; Jones, 1979) y las correlaciones que existen entre la distribución de especies y las temperaturas de invierno (Shreve, 1911 y 1914; Molina-Freaner *et al.*, 2004). Por otra parte, la humedad del suelo puede también afectar significativamente la distribución de las plantas en las zonas áridas (Shreve, 1951; Noy-Meir, 1973). Sin embargo, la influencia de la humedad del suelo en la distribución de plantas del estado de Sonora no está bien documentada.

Considerando las cartas de climas, temperaturas y precipitación (García, 1997a, 1997b y 1997c) proporcionadas por la Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad, junto con la clasificación de comunidades bióticas de Brown y Lowe (1994), se establecieron las relaciones entre los tipos de vegetación que se encuentran en Sonora y las condiciones climáticas en las que se establecen (tabla 4), así como su proporción en cada grupo climático (tabla 5). A partir de los resultados presentados en los tablas 4 y 5, se observa que

para cada tipo de vegetación hay más de un tipo de clima y, consecuentemente, de intervalos amplios de condiciones térmicas y de lluvia anual donde éstos coexisten. La vegetación matorral desértico se desarrolla principalmente en un clima árido semicálido con lluvias todo el año en el extremo nororiental (tablas 4 y 5) y ocupa 10% de la entidad. El matorral espinoso se desarrolla en el grupo de climas áridos que predominan en el estado, por lo que es el tipo de vegetación que más superficie ocupa (60%). En los climas muy áridos se establece 50.1% de este tipo de vegetación, 33.9% en los climas áridos y 16.0% en los semiáridos (tabla 5), distribuidos hacia el noroeste, centro-norte y norte de la entidad. Este tipo de vegetación se ha adaptado muy bien a condiciones con un amplio rango de temperaturas (de 14 a 24° C) y lluvias (de menos 50 a 800 mm) (tabla 4). La selva baja se desarrolla en pequeña proporción en climas templados, pero predominantemente en climas áridos y semiáridos. Otro tipo de vegetación como el pastizal se desarrolla principalmente en climas semiáridos pero ocupa tan sólo 3% de la entidad, principalmente en el norte y extremo nororiental de Sonora. En resumen, se puede decir que, aunque los diferentes tipos de vegetación pueden establecerse en condiciones climáticas muy diversas, éstos muestran preferencia por algún tipo de clima (tablas 4 y 5).

Para concluir, es importante mencionar los cam-

Tabla 4. Relación entre los tipos de vegetación que se encuentran en Sonora y las condiciones climáticas en las que se establecen

Tipo de vegetación	Tipo de clima	Temperatura media anual (°C)	Lluvia anual (mm)
Matorral desértico	BWh(x'), BW(h')w, BS ₀ h(x'), BW(h')x'	14 a 24	<50 a 500
Matorral espinoso	BWh(x'), BW(h')(x'), BW(h')w, BS ₀ (h')w, BS ₀ h(x'), BS ₀ k(x'), BS ₀ hw, BS ₀ (h')w, BS ₀ (h')(x'), BS ₁ h(x'), BS ₁ k(x'), BS ₁ hw, BS ₁ (h')w, C(w ₀)x'	14 a 24	<50 a 800
Pastizal	BS ₀ h(x'), BS ₀ k(x'), BS ₁ h(x'), BS ₁ k(x'), Bwh(x'), C(w ₁)x', C(w ₀)x'	12 a 22	100 a 1000
Bosque de coníferas	Aw ₀ , (A)C(w ₁), (A)C(w ₀), (A)C(w ₀)x', BS ₀ h(x'), BS ₀ k(x'), BS ₀ (h')(x'), BS ₁ hw, BS ₁ h(x'), BS ₁ k(x'), BS ₁ (h')w, BS ₁ (h')(x'), Cb'(w ₂)x', C(w ₁), C(w ₁)x', C(w ₂), C(w ₂)x', C(w ₀), C(w ₀)x'	8 a 26	200 a 1200
Selva baja	Aw ₀ , (A)C(w ₁), (A)C(w ₀), (A)C(w ₀)x', BS ₀ h(x'), BS ₀ (h')w, BS ₀ (h')(x'), BS ₁ hw, BS ₁ h(x'), BS ₁ k(x'), BS ₁ (h')w, BS ₁ (h')(x'), BW(h')w, C(w ₁), C(w ₁)x', C(w ₂), C(w ₂)x', C(w ₀), C(w ₀)x'	14 a 26	300 a 1200

Tabla 5. Proporción de los tipos de vegetación establecidos en Sonora en cada grupo climático

Tipo de vegetación	Área (miles de km ²)	Clima cálido subhúmedo	Climas semicálidos	Climas áridos	Climas semiáridos	Climas muy áridos	Climas templados	Clima semifrío subhúmedo
Matorral desértico	14.379	0.000	0.000	200	100	400	0.000	0.000
Matorral espinoso	91.476	0.000	0.278	117.730	87.797	393.950	0.244	0.000
Selva baja	18.578	0.066	7.748	81.083	88.812	19.266	3.026	0.000
Bosque de coníferas	19.112	0.070	13.036	53.479	247.077	25.000	236.548	24.802
Pastizal	4.642	0.000	0.000	67.097	126.342	0.000	6.561	0.000

bios que se están documentando en el clima de Sonora y las tendencias observadas en las temperaturas mínimas (Weiss y Overpeck, 2005) y máximas que, junto con el sobrepastoreo y la sobreexplotación de los recursos naturales, se espera que tengan un impacto significativo en los ecosistemas de Sonora, por lo que resulta necesario realizar investigación sobre sus consecuencias ecológicas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las autoridades del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste y a la Universidad de Guadalajara por el apoyo recibido en la realización de este capítulo. Este trabajo fue posible gracias al apoyo otorgado por los proyectos S0013-2006-1-48492 y J-50757-F de Conacyt y PC-3.7 del Cibnor.

LITERATURA CITADA

- ADAMS, D.K. y A.C. COMRIE. 1997. The North American Monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 2197-2213.
- BADÁN-DANGÓN, A., C.E. DORMAN, M.A. MERRIFIELD y C.D. WINANT. 1991. The Lower Atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 96: 16877-16896.
- BARNSTON G. y LIVEZEY R.E. 1987. Classification, Seasonality and Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Monthly Weather Review* 115: 1083-1126.
- BERBERY, E.H. 2001. Mesoscale Moisture Analysis of the North American Monsoon. *Journal of Climate* 14: 121-137.
- BORDONI, S., P.E. CIESIELSKI, R.H. JOHNSON, B.D. MCNOLDY, y B. STEVENS. 2004. The Low-Level Circulation of the North American Monsoon as Revealed by QuikSCAT. *Geophysical Research Letters* 31, L10109, doi: 10.1029/2004GL020009.
- BRITO-CASTILLO, L., A. LEYVA-CONTRERAS, A.V. DOUGLAS y D. LLUCH-BELDA. 2002. Pacific Decadal Oscillation and the Filled Capacity of Dams on the Rivers of the Gulf of California Continental Watershed. *Atmósfera* 15: 121-138.
- BRITO-CASTILLO L., A.V. DOUGLAS, A. LEYVA-CONTRERAS y D. LLUCH-BELDA. 2003. The Effect of Large-Scale Circulation on Precipitation and Streamflow in the Gulf of California Continental Watershed. *International Journal of Climatology* 23: 751-768.
- BROWN D.E., y C.H. LOWE. 1994. Biotic Communities of the Southwest. En: D.E Brown, ed., *Biotic Communities Southwestern United States and Northwestern Mexico*. University of Utah Press, pp. 342
- BROWN, D.P. y A.C. COMRIE. 2004. Spatial Variability of Fall ENSO-Winter Precipitation Relationships in the Western United States. *Geophysical Research Letters* 31.
- CANE, M.A. 1983. Oceanographic Events during El Niño. *Science* 222: 1189-1195.
- CASTRO, C.L., T.B. MCKEE y R.A. PIELKE. 2001. The Relationship of the North American Monsoon to Tropical and North Pacific Sea Surface Temperatures as Revealed by Observational Analyses. *Journal of Climate* 14: 4449-4473.
- COLE, J.E. y E.R. COOK. 1998. The Changing Relationship between ENSO Variability and Moisture Balance in the Continental United States. *Geophysical Research Letters* 25: 4592-4532.
- DEFRIES, R.S., L. BOUNOUA y G.J. COLLATZ. 2002. Human Modifications of the Landscape and Surface Climate in the Next Fifty Years. *Global Change Biology* 8: 438-458.
- DOUGLAS, A.V., R.H. BLACKMON y PH.J. ENGLEHART.

1987. Mesoscale Convective Complexes in Extreme Western Mexico. A Regional Response to Broad-scale Drought. En: *Proceedings of the 11th Annual Climate Diagnostics Workshop*. U.S. Department of Commerce, NASA, pp. 129-140.
- DOUGLAS, A.V. y PH.J. ENGLEHART. 1984. Factors Leading to the Heavy Precipitation Regimes of 1982-83 in the United States and Mexico. En: *Proceedings of the Eight Annual Climate Diagnostics Workshop*. U.S. Department of Commerce, NOAA, pp 42-55.
- DOUGLAS, A.V. y PH.J. ENGLEHART, 2007. A Climatological Perspective of Transient Synoptic Features during NAME 2004. *Journal of Climate* 20: 1947-1954.
- DOUGLAS, M.W., R.A. MADDOX, K. HOWARD K. y S. REYES. 1993. The Mexican Monsoon. *Journal of Climate* 6: 1665-1677.
- EASTERLING, D.R., B. HORTON, P.D. JONES, TH.C. PETERSON, TH.R. KARL, D.E. PARKER, M.J. SALINGER, V. RAZUVAYEV, N. PLUMMER, P. JAMASON y CH.K. FOLLAND. 1997. Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. *Science* 277: 364-367.
- ENFIELD, D.B., A.M. MESTAS-NÚÑEZ, PJ. TRIMBLE. 2001. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its Relation to Rainfall and River in the Continental U.S. *Geophysical Research Letters* 28: 2077-2080.
- ENGLEHART, PH.J. y A.V. DOUGLAS. 2002. Mexico's Summer Rainfall Patterns: an Analysis of Regional Modes and Changes in their Teleconnectivity. *Atmósfera* 15: 147-164.
- ENGLEHART, Ph.J. y A.V. DOUGLAS. 2005. Changing Behavior in the Diurnal Range of Surface Air Temperatures over Mexico. *Geophysical Research Letters* 32: L01701, doi:10.12029/2004GL021139, d005.
- FARFÁN L.M., y J.A. ZEHNDER, 1994. Moving and Stationary Mesoscale Convective Systems over Northwest Mexico during the Southwest Area Monzón Project. *Weather and Forecasting* 9: 630-639.
- FELGER, R.S. 1993. Investigación ecológica en Sonora y localidades adyacentes en Sinaloa: una perspectiva. En: E. Contreras Barragán, J.J. Gracida Romo, J.L. Moctezuma Zamarrón, J.C. Montané Martí, R.P. Ramos y C.A. Quijada López, eds., *Noroeste de México. Sonora: Antropología del desierto*. INAH/Universidad de Sonora, 243 p.
- FOSTER, R.B. 1980. Heterogeneity and Disturbance in Tropical Vegetation. En: M. Soulé y B.A. Wilcox, eds., *Conservation Biology. An Evolutionary Ecological Perspective*. Sinauer Associates Pub., Sunderland, Mass., pp. 75-92.
- GARCÍA, E. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* 4a. ed. Offset Larios, México.
- GARCÍA, E., 1989. *Apuntes de climatología*. Talleres Larios, México, 155 p.
- GARCÍA, E. 1997a. Carta de climas. Sistema de Köppen, modificado por E. García. Escala 1:1000 000. *Conabio-Estadigrafía*, México.
- GARCÍA, E., 1997b. Isotermas medias anuales (zonas térmicas según el sistema de Köppen modificado por E. García) Escala 1:1000 000. *Conabio-Estadigrafía*, México.
- GARCÍA, E., 1997c. Precipitación total anual. Escala 1:1000 000. *Conabio-Estadigrafía*, México.
- GARCÍA, E. y R.I. TREJO. 1994. La presencia del monzón en el noroeste de México. *Boletín del Instituto de Geografía* 28: 33-64.
- GOCHIS, D.J., A. JIMÉNEZ, CH.J. WATTS, J. GARATUZAPAYÁN y J. SHUTTLEWORTH. 2004. Analysis of 2002 and 2003 Warm-Season Precipitation from the North American Monsoon Experiment Event Rain Gauge Network. *Monthly weather Review* 132: 2398-2953.
- GREER, I. W. 1996. Glossary of Weather and Climate. American Meteorological Society.
- Gobierno del estado de Sonora, 2006 (<http://www.sonora.gob.mx/portal/Runscript.asp?p=ASP\pg145.asp>) consultada en diciembre de 2006.
- HALES, J.E. 1974. Southwestern United States Summer Monsoon Source. Gulf of Mexico or Pacific Ocean? *Journal of Applied Meteorology* 13: 331-342.
- HIGGINS, R.W., A.V. DOUGLAS, A. HAHMANN, E.H. BERBERY, D. GUTZLER, J. SHUTTLEWORTH, D. STENSRUD, J. AMADOR, R. CARBONE, M. CORTEZ, M. DOUGLAS, R. LOBATO, J. MEITIN, CH. ROPELEWSKI, J. SCHEMM, S. SCHUBERT y CH. ZHANG. 2003. Progress in Pan American Clivar Research: The North American Monsoon System. *Atmósfera* 16: 29-65.
- HOERLING, M.P. y A. KUMAR. 2002. Atmospheric Response Patterns Associated with Tropical Forcing. *Journal of Climate* 15: 2184-2203.
- HOUGHTON, J.T., Y. DING, D.J. GRIGGS, M. NOGUER, P.J. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL y C.A. JOHNSON. eds. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Nueva York, 881 p.

- IVES, R.L. 1949. Climate of the Sonoran Desert Region. *Annals of the Association of American Geographers* 39: 143-187.
- JÁUREGUI, E. 1970. Distribución de la frecuencia de heladas, lluvias y tormentas eléctricas en México. *Revista de Ingeniería Hidráulica en México* XXIV: 320-340.
- JÁUREGUI, E. 1989. Los ciclones del norte de México y sus efectos sobre la precipitación. *Ingeniería Hidráulica en México* IV: 43-50.
- JÁUREGUI, E. 1995. Rainfall Fluctuations and Tropical Storm Activity in Mexico. *Erkunde* 49: 39-48.
- JÁUREGUI, E., 2003. Climatology of Landfalling Hurricanes and Tropical Storms in Mexico. *Atmósfera* 16: 193-204.
- JONES, W. 1979. The Effect of the 1978 Freeze on Native Plants of Sonora, Mexico. *Desert Plants* 1: 33-36.
- MADDOX, R.A. 1983. Large-Scale Meteorological Conditions Associated with Mid Latitude, Mesoscale Convective Complexes. *Monthly Weather Review* 111: 1475-1493.
- MADEREY-RASCÓN, F. CRUZ-NAVARRO y L. GODÍNEZ-CALDERÓN. 2001. Relación entre los fenómenos acuosos y los elementos térmicos del clima en México. *Agrociencia* 35: 23-40.
- MAGAÑA V.O. y C. CONDE. 2000. Climate and Freshwater Resources in Northern Mexico: Sonora, A Case Study. *Environmental Monitoring and Assessment* 61: 167-185.
- MALLERY, T.D. 1936a. Rainfall Records for the Sonoran Desert. *Ecology* 17: 110-121.
- MALLERY, T.D. 1936b. Rainfall Records for the Sonoran Desert. II Summary of Readings to December, 1935. *Ecology* 17: 212-215.
- MANABE S. y A.J. BROCCOLI. 1990. Mountains and Arid Climates of Middle Latitudes. *Science* 247: 192-195.
- MANTUA, N.J., S.R. HARE, Y. ZHANG, J.M. WALLACE y R.C. FRANCIS. 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 1069-1079.
- MCCABE, G.J., M.A. PALECKI y J.L. BETANCOURT. 2004. Pacific and Atlantic Ocean Influences on Multidecadal Drought Frequency in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101: 4136-4141.
- MCCABE, G.J. y M.D. DETTINGER. 1999. Decadal Variations in the Strength of ENSO Teleconnections with Precipitation in the Western United States. *International Journal of Climatology* 19: 1399-1410.
- MEDINA, E. 1995. Diversity of Life Forms of Higher Plants in Neotropical Dry Forests. En: S.H. Bullock, H.A. Mooney y E. Medina, eds. *Seasonally Dry Tropical Forest*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 221-242.
- MO K.C., E.H. BERBERY, 2004. Low-Level Jets and the Summer Precipitation Regimes over North America. *Journal of Geophysical Research* 109, D06117, doi: 10.1029/2003JD004106.
- MOLINA-FREANER, F.E., R. CASTILLO G., C. TINOCO-OJANGUREN y A.E. CASTELLANOS. 2004. Vine Species Diversity across Environmental Gradients in Northwestern Mexico. *Biodiversity and Conservation* 13: 1853-1874.
- MOONEY, H.A., J. LUBCHENKO, R. DIRZO y O.E. SALA, coords. 1995. Section 6. Biodiversity and Ecosystem Function. Basic Principles. En: V.H. Heywood y R.T. Watson, eds. *Global Biodiversity Assessment*. PNUMA-Cambridge University Press, Cambridge, pp. 327-452.
- MOSIÑO, A.P. 1958. Una clasificación de las configuraciones de flujo aéreo sobre la República Mexicana. *Revista de Ingeniería Hidráulica en México* XII: 3-8.
- MOSIÑO, A.P. y E. GARCÍA, 1973. The climate of Mexico. En: R.A. Bysan y F.K. eds. *Hare Climates of North America, World Survey of Climatology* 11, cap. 4. H.E. Landsberg, ed. en jefe. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands, pp. 345-404.
- MOSIÑO A.P. y E. GARCÍA. 1981. The Variability of Rainfall in Mexico and its Determination by Means of the Gamma Distribution. *Geografiska Annaler* 63: 1-10
- NEWMAN, M., G.P. COMPO y M.A. ALEXANDER. 2003. ENSO-Forced Variability of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate* 16: 3853-3857.
- NOY-MEIR, I. 1973. Desert Ecosystems: Environment and Producers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 25-51.
- PAVIA E.G., F. GRAEF y J. REYES. 2006. Notes and Correspondence. PDO-ENSO Effects in the Climate of Mexico. *Journal of Climate* 19: 6433-6438.
- RASMUSSEN, E.M. 1966. *Atmospheric Water Vapor Transport and the Hydrology of North America*. Report A-1, Planetary Circulations Project. Massachusetts Institute of Technology, 170 p.
- RASMUSSEN, E.M. 1967. Atmospheric Water Vapor Transport and the Water Balance of North America. Part I. Characteristics of the Water Vapor Flux

- Filed. *Monthly Weather Review* 95: 403-426.
- RASMUSSEN, E.M. 1968. Atmospheric Water Vapor Transport and the Water Balance of North America. Part II. Large-Scale Water Balance Investigations. *Monthly Weather Review* 96: 720-734.
- RASMUSSEN E.M., J.M. WALLACE. 1983. Meteorological Aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science* 222: 1195-1202.
- REYES, S. y A. MEJÍA-TREJO. 1991. Tropical Perturbations in the Eastern Pacific and the Precipitation Field over North-Western Mexico in Relation to the ENSO Phenomenon. *International Journal of Climatology* 11: 515-528.
- RZEDOWSKI, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, México.
- SALINAS-ZAVALA, C.A., A.V. Douglas y H.F. Díaz. 2002. Interannual Variability of NDVI in Northwest Mexico. Associated Climatic Mechanisms and Ecological Implications. *Remote Sensing of Environment* 82: 417-430.
- SCHMIDT JR., R.H. 1989. The Arid Zones of Mexico: Climatic Extremes and Conceptualization of the Sonoran Desert. *Journal of Arid Environment* 16: 241-256.
- SCHMITZ, J.T., y S. MULLEN. 1996. Water Vapor Transport Associated with the Summertime North American Monsoon as Depicted by ECMWF Analyses. *Journal of Climate* 9: 1621-1634.
- SCHNEIDER, N. y B.D. CORNUELLE. 2005. The Forcing of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate* 18: 4355-4373.
- SCHWINNING, S., O.E. SALA, M.E. LOIK y J.R. EHLE-RINGER. 2004. Thresholds, Memory, and Seasonality: Understanding Pulse Dynamics in Arid/Semi-Arid Ecosystems. *Oecologia* 141: 191-193.
- SHREVE, F. 1911. The Influence of Low Temperatures on the Distribution of the Giant Cactus. *Plant World* 14: 136-146.
- SHREVE, F. 1914. The Role of Winter Temperatures in Determining the Distribution of Plants. *American Journal of Botany* 1: 194-202.
- SHREVE, F. 1934. Vegetation of the Northwestern Coast of Mexico. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 61: 373-380.
- SHREVE, F. 1951. Vegetation of the Sonoran Desert. En: F. Shreve e I. L. Wiggins. *Vegetation and Flora of the Sonoran Desert*. Parte I. Carnegie Institute Washington, p. 591.
- STENSRUD, D.J., R.L. GALL, S.L. MULLEN, K.W. HOWARD. 1995. Model Climatology of the Mexican Monsoon. *Journal of Climate* 8: 1775-1794.
- SUTTON, R.T. y D.L.R. HODSON. 2005. Atlantic Ocean Forcing of North American and European Summer Climate. *Science* 309: 115-118.
- TRENBERTH, K.E. 1997. The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 2771-2777.
- TURNAGE, W.V. y A.L. HINCKLEY. 1938. Freezing Weather in Relation to Plant Distributions in the Sonoran Desert. *Ecological Monographs* 8: 529-550.
- TURNER, R.M., R.H. WEBB y J.R. BOWERS. 2003. *The Changing Mile Revisited*. University of Arizona Press, Tucson, Az.
- VERA C., W. HIGGINS, J. AMADOR, T. AMBRIZZI, R. GARRAUD, D. GOCHIS, D. GUTZLER, D. LETTENMAIER, J. MARENGO, C.R. MECHOSO, J. NOGUES-PAEGUEL, P.L. SILVA DIAZ, y C. ZHANG. 2006. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate*, special section, 19: 4977-5000.
- WEBB, R.H. 1996. *Grand Canyon: A Century of Change*. University of Arizona Press, Tucson, Az.
- WEISS, J.L. y J.T. OVERPECK. 2005. Is the Sonoran Desert Losing Its Cool? *Global Change Biology* 11: 2065-2077.

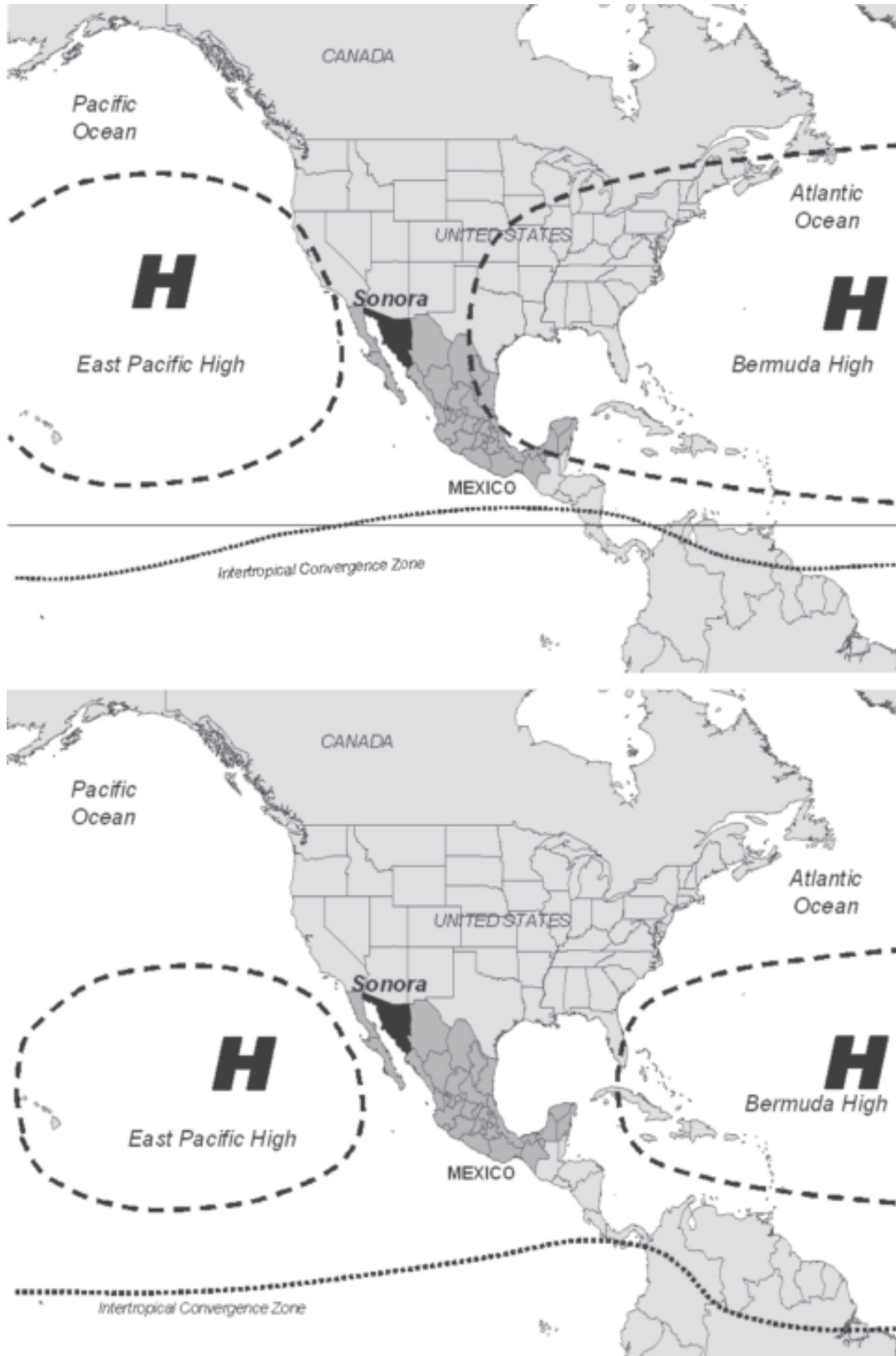


Figura 1. Posición media de las características de circulación atmosférica de gran escala en las proximidades de Sonora durante verano (imagen superior) e invierno (imagen inferior).

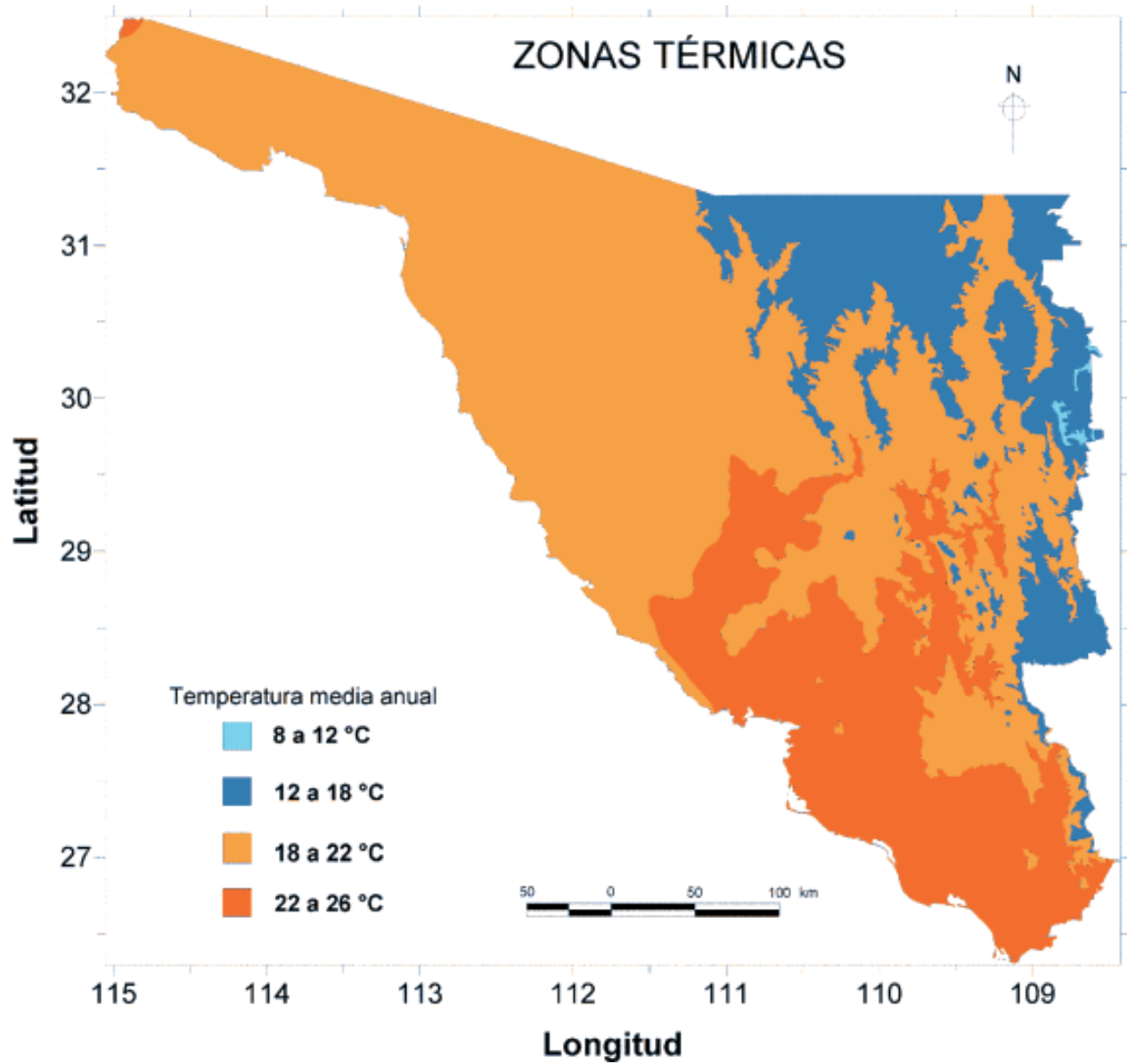


Figura 2. Mapa de zonas térmicas del estado de Sonora. Modificado de García (1997b).

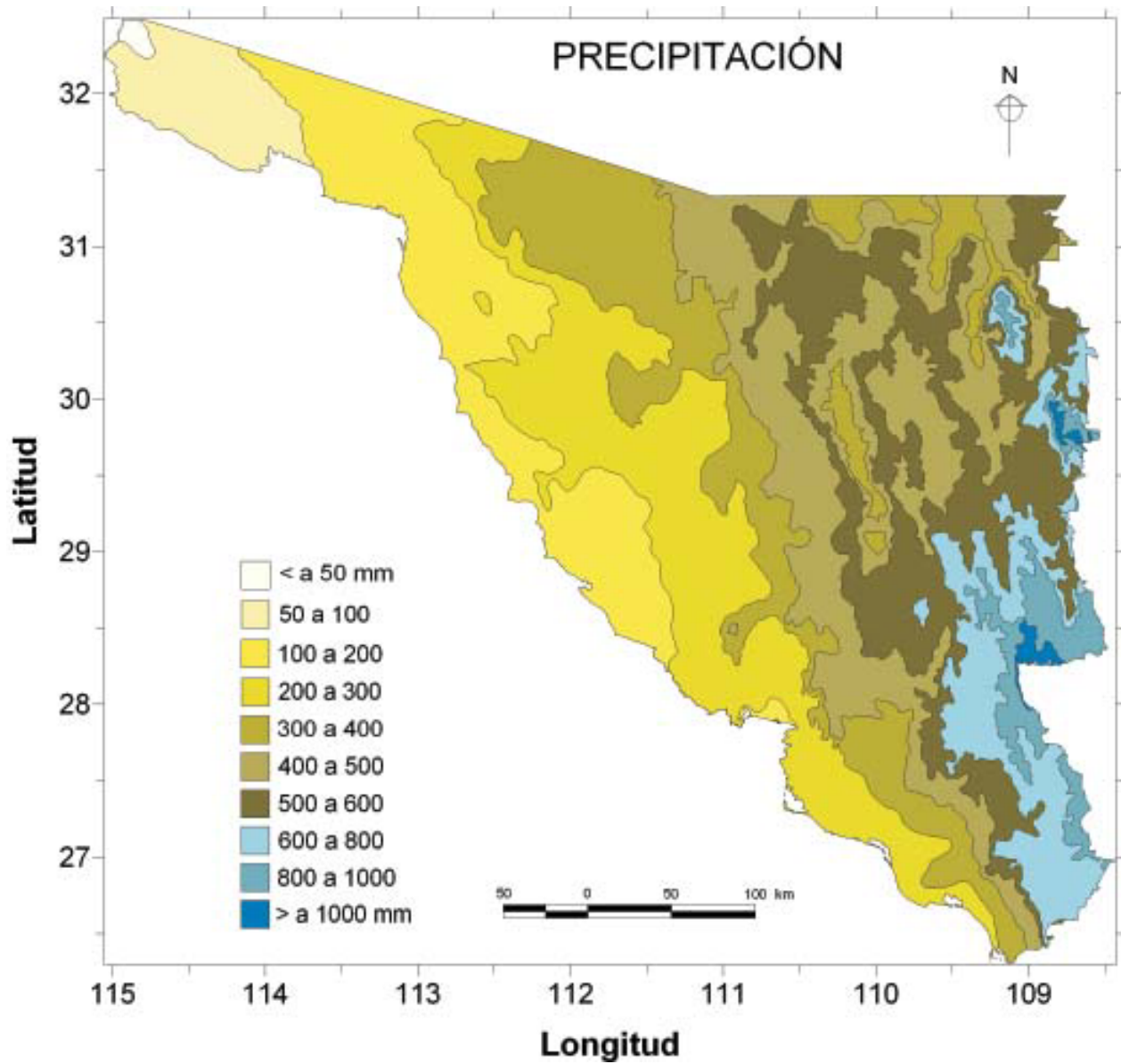


Figura 3. Distribución de la precipitación anual en el estado de Sonora. Modificado de García (1997c).

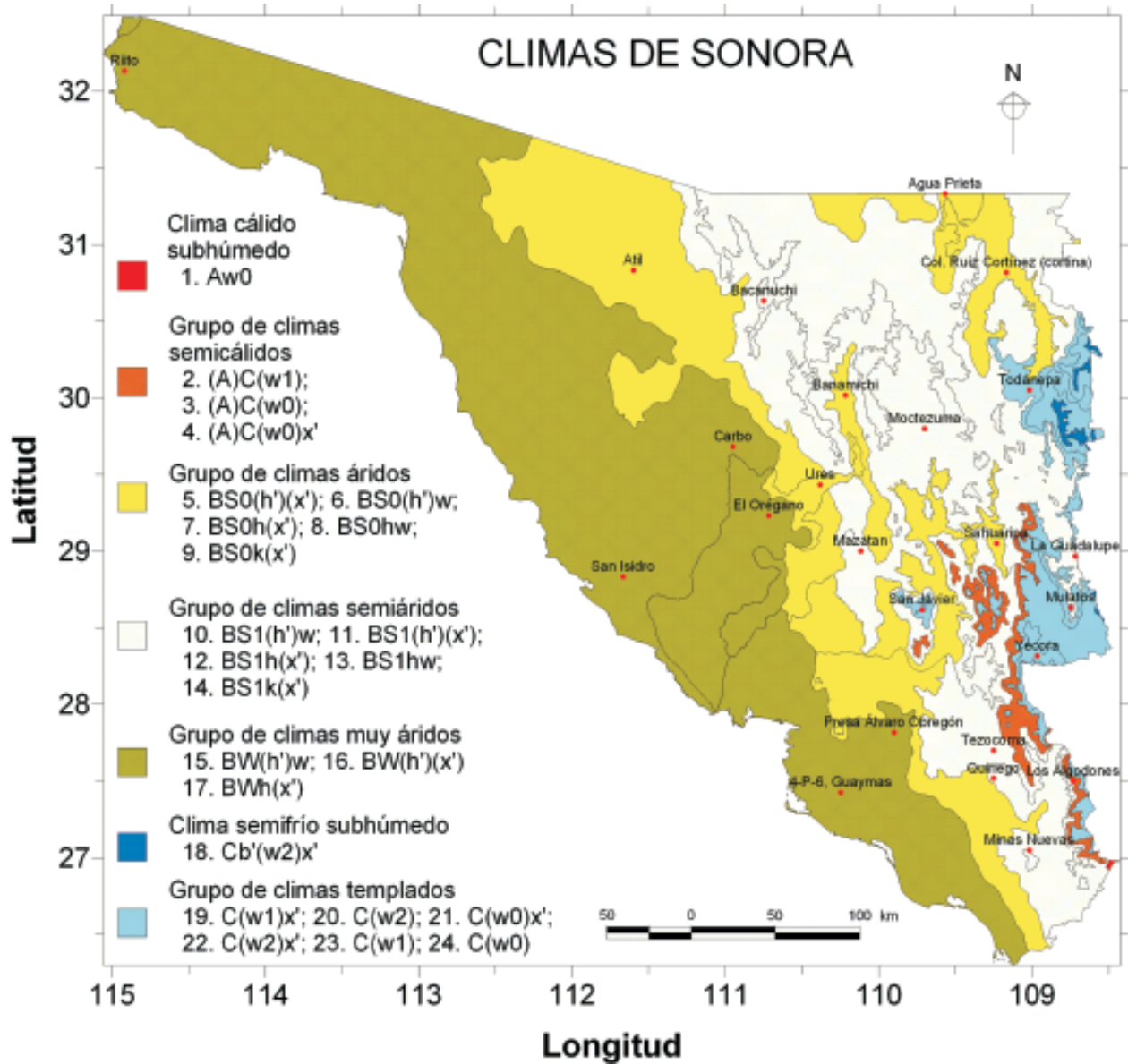


Figura 4. Climas en el estado de Sonora según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1997a).

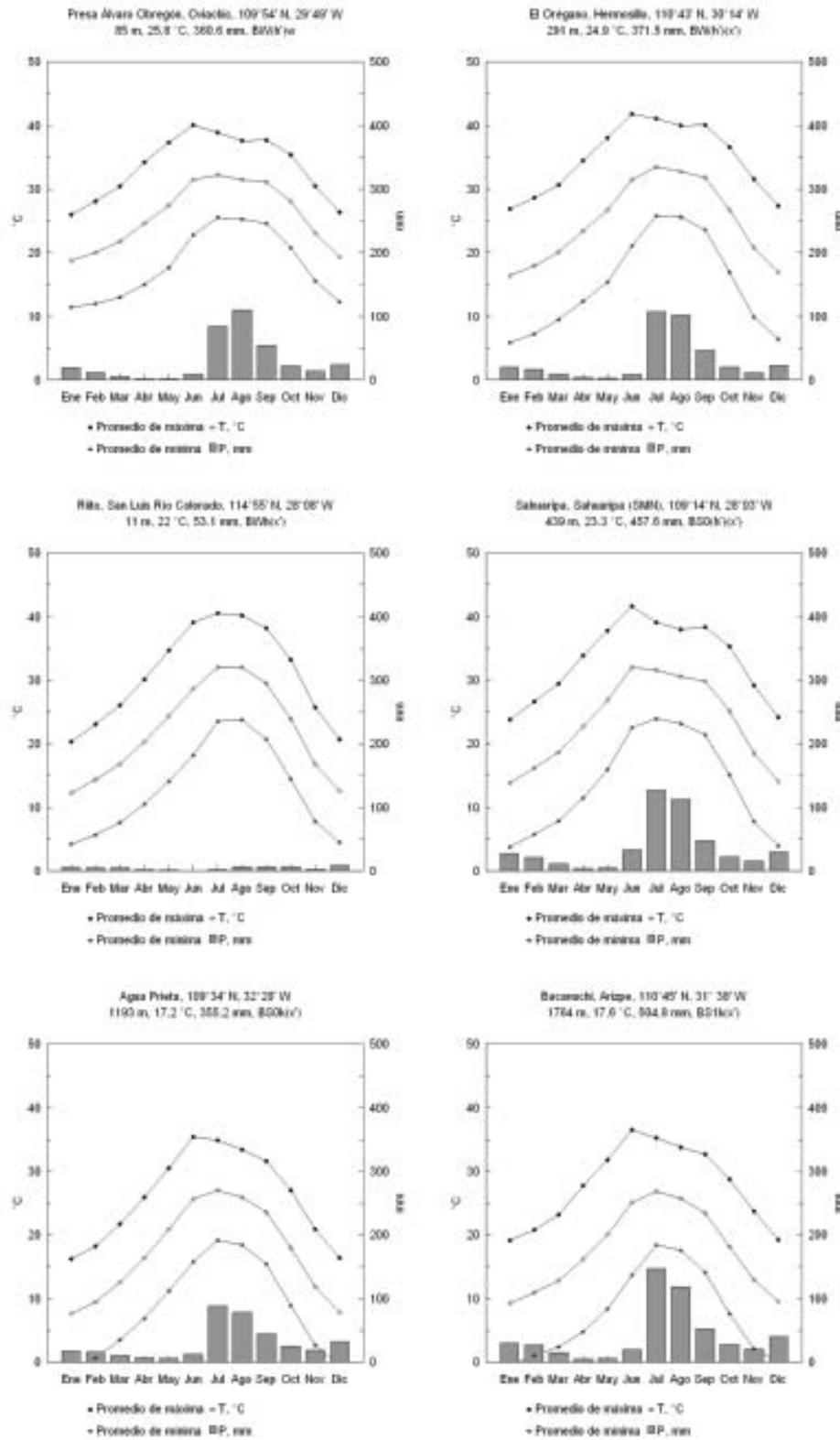


Figura 5a. Gráficas de estaciones climatológicas en las que se muestran localidad, coordenadas geográficas, altitud en metros, marcha anual de las temperaturas máxima, media y mínima en grados centígrados, precipitación total anual en milímetros y clasificación climática de acuerdo con Köppen, modificado por García (1988), representando a los climas muy áridos, áridos y semiáridos.

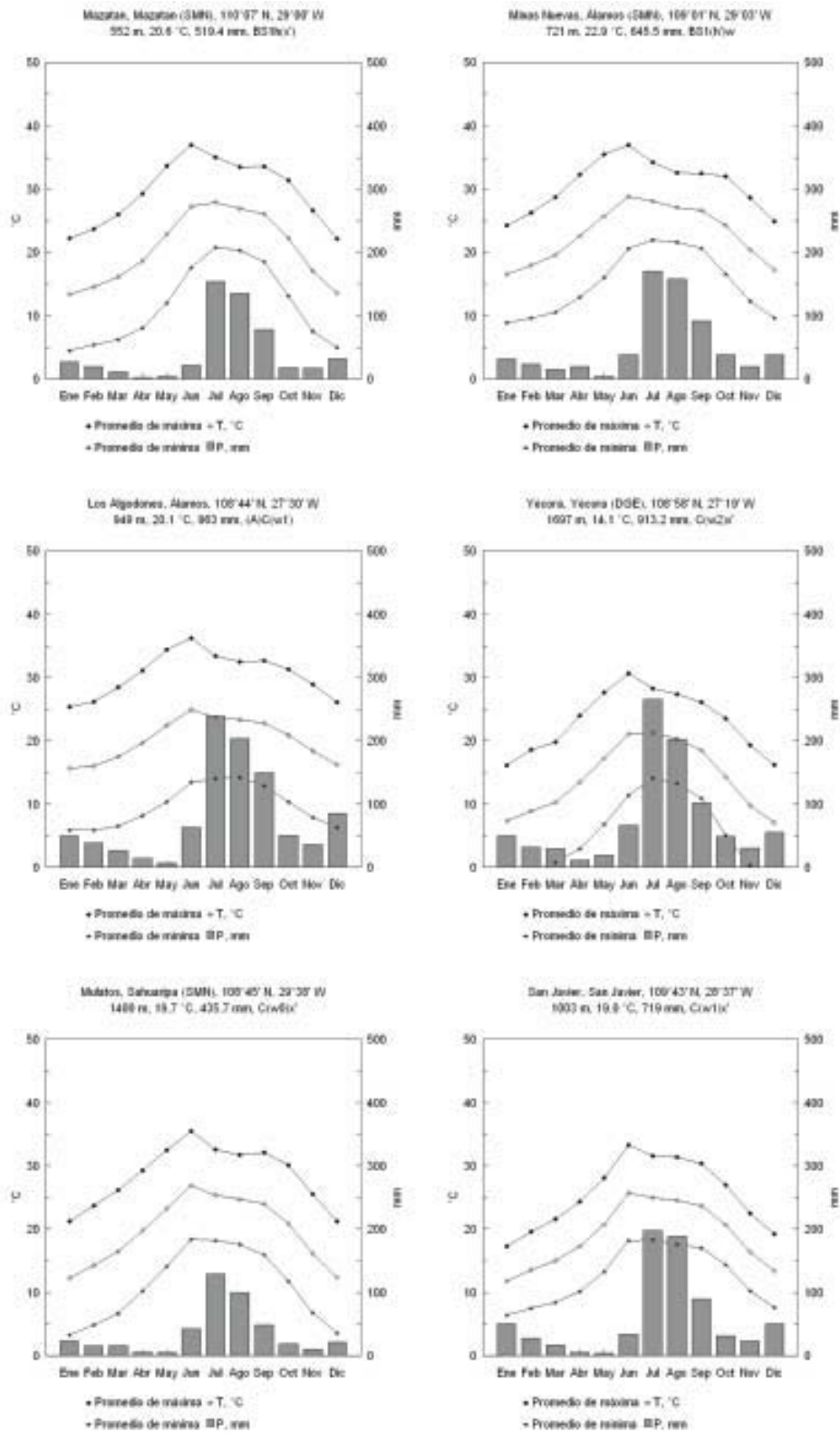


Figura 5b. Gráficas de estaciones climatológicas en las que se muestran localidad, coordenadas geográficas, altitud en metros, marcha anual de las temperaturas máxima, media y mínima en grados centígrados, precipitación total anual en milímetros y clasificación climática de acuerdo con Köppen, modificado por García (1988), representando a los climas semiárido semicálido, semiárido cálido, semicálido subhúmedo y templados subhúmedos.