Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México

Recibido: 23 de enero de 2007. Aceptado en versión final: 17 de mayo de 2007

Jorge Méndez González* José de Jesús Návar Cháidez** Vladimir González Ontiveros*

Resumen. En esta investigación se utiliza la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para detectar la tendencia estacional de la precipitación registrada en México. Un total de 789 estaciones climatólogicas distribuidas sobre la mayor parte del territorio Mexicano fueron analizadas; varían desde 1920-2004 y proporcionan información espacial razonable. Mediante análisis de componentes principales se generaron regiones con regímenes homogéneos de precipitación estacional. Los resultados revelan la existencia de cambios significativos en las tendencias de precipitación, especialmente durante el verano. Geográficamente, la lluvia incrementa en las regiones áridas y semiáridas en un 1.8% en promedio, de la precipitación

total anual (PPTA) y sólo 0.9% en las regiones húmedas; mientras que la disminución promedia 1.2% de la PPTA, tanto en regiones secas como húmedas, dándose a escalas regionales y consistentes. El mayor número de estaciones climatólogicas con tendencias anuales estadísticamente significativas de incremento de lluvia (p≤0.1) se ubican en las regiones áridas y semiáridas del país. El verano registra incrementos y decrementos de aproximadamente 30 mm por década, mientras que el invierno registra solamente 8 mm por década.

Palabras clave: Precipitación, tendencia, magnitud, región, régimen, México.

Analysis of rainfall trends (1920-2004) in Mexico

Abstract. In this study the non parametric Mann-Kendall test was used to identify trends in seasonal rainfall recorded in Mexico. A total of 789 climatological stations distributed throughout most of Mexico were analyzed during 1920-2004. A principal component analysis was used to obtain regions with homogeneous seasonal rainfall. Results show significant changes in the trends of summer rainfall. Geographically, rainfall has increased 1.8% per year in the arid and semi-arid regions, while an increased of 0.9% per year has been observed in the tropical humid parts of the country.

Also, a 1.2% decrease of total annual rainfall occurs for both humid and dry regions at a regional and consistent scale. The high numbers of meteorological stations with a significant rainfall increase (p<0.1) were found in arid and semiarid regions of the country. Every decade there are increases of 30 mm during summer whilst there are only 8 mm every decade during winter.

Key words: Precipitation, trends, magnitude, region, regime, Mexico.

^{*}Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario 173 de Nuevo Ideal, Durango, González y Quiroga No. 900, N. I., Durango. E-mail: jmendezg@hotmail.com; v_glz_o@yahoo.com.mx.

^{**}CIIDIR-IPN, Calle Sigma S/N. Fracc. 20 de Noviembre II, 34220, Durango, Dgo. E-mail: josedejesusnavar@yahoo.com.mx.

INTRODUCCIÓN

Hay evidencias contundentes de un cambio climático a escala global, por lo tanto, éste es un tema de gran interés para muchos países del mundo, incluyendo México. Los expertos en la materia han señalado que para evidenciar la existencia de un cambio climático, es necesario analizar las tendencias de variables climáticas, considerando diferentes escalas de tiempo y espacio. Las tendencias son cambios graduales de incremento o decremento en el tiempo de las variables estudiadas, asociadas comúnmente a factores climáticos. En este sentido, desde finales del siglo XIX hasta hoy día, se han realizado estudios para detectar cambio climático en diversas partes del mundo, por citar algunos ejemplos, las tendencias de precipitación han sido analizadas por Bradley et al. (1987) en el Hemisferio Norte; Hurrel (1995) en el Atlántico Norte; Brunetti et al. (2000) en Italia; Haylock y Nicholls (2000) en Australia; Jung et al. (2002) en Corea del Sur, y recientemente Kruger (2006) en Sudáfrica. Invariablemente de la ubicación geográfica, los resultados evidencian la presencia de cambios significativos en las tendencias de lluvia.

Adicionalmente, la variación climática se hace cada vez más notable; todo indica que la acumulación de gases invernadero en la atmósfera de la Tierra, como resultado de las actividades humanas, ha causado que las temperaturas del aire y del océano se incrementen, sin descartar que algunos de estos cambios sean parte de la variabilidad natural. Como consecuencia, en los últimos años se han presentado cambios climáticos inusuales a nivel mundial, entre ellos, cambios en los patrones de precipitación los cuales han sido asociados al calentamiento global (Bradley et al., 1987; Diaz et al., 1989; Hulme et al., 1998). Estudios de décadas pasadas indican que la precipitación ha incrementado a nivel global aproximadamente 2% desde inicios del siglo XX (Jones y Hulme 1996; Hulme et al., 1998), siendo más notable en el Hemisferio Norte y áreas continentales, este incremento es estadísticamente significativo, sin embargo, no posee consistencia espacial.

Estudiar la variabilidad del clima regional es de fundamental importancia, ya que de aquí se puede planificar el manejo de recursos naturales de un país; sin embargo, evaluar la variabilidad climática y los mecanismos que producen los cambios es muy complicado. La forma más fácil de analizar e interpretar el clima promedio de una región es en términos de medias anuales o estacionales de temperatura y/o precipitación (Ayllón, 2003). La precipitación varía gradualmente de una región a otra, por consiguiente, la distribución de lluvia determina en gran magnitud el potencial climático de una región para la agricultura (FAO, 1978).

En México la distribución de precipitación ha sido bien documentada (García, 2003) y varía enormemente en espacio y tiempo; es heterogénea a lo largo del año, geográficamente aumenta en dirección norte-sur debido a la influencia de la latitud, así mismo, está gobernada en gran medida por la proximidad al Océano Pacífico y Golfo de México (Campos, 1992), a la orografía del país y a los rasgos de la circulación atmosférica (García, 2003), así como a la teleconectividad del fenómeno del Niño (Cavazos y Hastenrath, 1990). Estudios de varios años indican que el 70% de la precipitación en México se registra de mayo a octubre (Mosiño y García, 1974). La presencia de lluvia durante el año es muy importante ya que influye en cierta medida en el sector agrícola (Englehart y Douglas, 2000), en especial la agricultura de temporal, ya que es completamente dependiente de la precipitación y por tanto altamente vulnerable a la variabilidad interanual e interestacional de la misma.

Recientemente se ha acumulado enorme evidencia de que el clima en México exhibe fluctuaciones distintas a las registradas años atrás. La evaluación de un posible cambio en el régimen pluviométrico es fundamental, ya que la precipitación tiene un papel importante en el manejo de los recursos naturales, debido a que controla las actividades agrícolas, pecuarias y forestales, así como a una gran variedad de actividades económicas e incluso al comportamiento y desarrollo social (Corte-Real et al., 1998). El interés actual por comprender las causas de la variabilidad climática, impone la necesidad de analizar tendencias de series de variables climatólogicas. Dentro de este contexto, el propósito de esta investigación fue analizar series de precipitación mediante prue-

bas no paramétricas, para identificar tendencias y patrones geográficos de aumento y decremento de lluvia en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área en estudio

La República Mexicana se encuentra en el hemisferio Norte, extendiéndose desde el paralelo 14° 30' N hasta el 32° 43' N (García, 2003). Es el país latinoamericano más septentrional; colinda al norte con Estados Unidos de América; con Guatemala y Belice al sureste; con el Golfo de México y el Mar Caribe al este; y con el Océano Pacífico al oeste. El territorio Mexicano abarca 1953162 km² y está distribuido casi por partes iguales, a ambos lados del Trópico de Cáncer (INEGI, 1997). La topografía del país es el resultado de una gran actividad tectónica ocurrida durante el Cenozoico; aproximadamente el 65% del área del país se encuentra por encima de 1 000 msnm y cerca de 47% de la superficie tiene pendientes superiores a 27% (UNAM, 1990).

El clima en el territorio mexicano contiene prácticamente todos los grupos y subgrupos climáticos posibles, existiendo variaciones de climas secos a húmedos en una distancia de pocos kilómetros. El Trópico de Cáncer marca hacia el norte el clima árido y el semiárido, y hacia el sur el clima húmedo y semihúmedo el cual es influido por los vientos alisios y por los ciclones que se presentan en esta zona (Ibid.). El 39% del territorio es semicálido (temperatura media anual entre 18 y 22° C), 37% es cálido (media anual mayor de 22° C), 23% templado (media anual entre 12 y 18° C) y el 1% restante semifrío y frío (media anual menor de 12° C; Ibid.). En el territorio Mexicano se registra una precipitación media anual de 777 mm. La precipitación pluvial en el noroeste y noreste apenas alcanza un promedio anual de 250 mm, mientras que el sureste y parte de la costa sur del Pacífico presenta una media anual de entre 2000 y 4000 mm (INEGI, 1994). La mayor parte de la precipitación ocurre durante el verano, el resto se reparte durante el año (Mosiño y García, 1974; García, 2003).

Datos

Los datos provienen de estaciones climatológicas distribuidas en todo el país, las cuales son supervisadas por la Comisión Nacional del Agua (CNA) y varían desde 1920-2004, el período de años considerado va desde 30 a 86 años, promediando 50 y la moda se ubica en 42 años (Figura 1). La información analizada corresponde a registros diarios de precipitación registrada en cada estación climatológica. Para la selección de estaciones se consideró la consistencia anual, interanual y mensual en las observaciones, así como la homogeneidad de las series. Un total de 789 estaciones climatólogicas representadas geográficamente en la Figura 2, fueron analizadas, mismas que cumplieron con los criterios previamente establecidos.

Análisis estadístico

Debido a la gran variación de precipitación registrada en México, la primera fase de esta investigación consistió en regionalizar el área en estudio de acuerdo con regímenes de precipitación estacional, para establecer bases de comparación de las tendencias. La precipitación estacional se obtuvo con la sumatoria de la lluvia de los meses según se indica a continuación: Marzo, Abril y Mayo (MAM); Junio, Julio y Agosto (JJA); Septiembre, Octubre y Noviembre (SON); Diciembre, Enero y Febrero (DEF); siendo Primavera (P), Verano (V), Otoño (O) e Invierno (I), respectivamente. En este estudio se utilizó el Análisis de Componentes Principales (ACP), (sobre la matriz temporal de precipitación total de P, V, O, I y clave de estación, usando la transformación centrada y estandarizada para obtener un ACP basado en la matriz de correlación), como herramienta para definir regiones de acuerdo con el régimen pluviométrico estacional. Ejemplos de aplicación de ACP en variables meteorológicas, específicamente precipitación, pueden ser encontrados en Richman y Lamb (1985), Comrie y Glenn (1998), Englehart y Douglas (2002). Del ACP se excluyeron variables como latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar, que pudieran alterar y dirigir o manipular los resultados. Las regiones se obtuvieron empleando los rangos de valores máximos (0.01, 0.02,..., 0.05) del Componente 1 (C1), generando isolíneas por la interpolación de

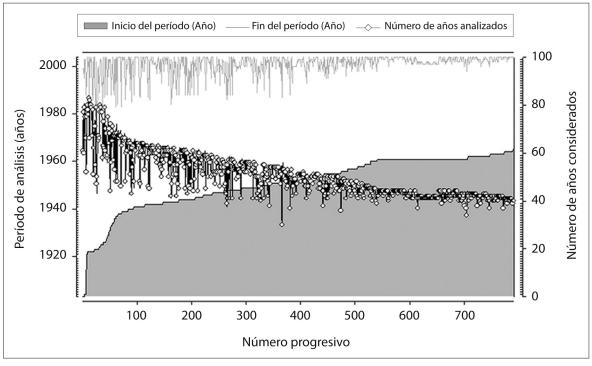


Figura 1. Número de estaciones climatológicas analizadas (eje "x"), reportando el período de análisis (eje "y") y número de años considerados (eje "y" adyacente).

C1 del ACP, a través un sistema de información geográfica (SIG), Arcmap Versión 8.1.

La segunda fase de la investigación consistió en evaluar las tendencias estacionales de la precipitación, para lo cual se utilizó la prueba estadística no-paramétrica de Mann-Kendall. Esta prueba ha sido usada ampliamente en ciencias ambientales, ya que puede analizar datos sin importar la distribución, datos perdidos y estacionales. La prueba ha sido recomendada ampliamente y usada en todo el mundo para identificar tendencias en parámetros climáticos (IPCC, 2001) debido a la consistencia y rigidez que presenta. Para mayor información consultar: Mann (1945); Hoeffding (1948); Kendall (1975) y Dietz y Killeen (1981). La magnitud de la tendencia (tasa de incremento o decremento anual) se obtuvo mediante el estimador de pendiente de Kendall, "ß", determinado por Hirsch et al. (1982). Éste, es un estimador no paramétrico robusto que cuantifica la tendencia como cambio por unidad de tiempo y no considera, bajo ninguna circunstancia, la hipótesis de que la tendencia adopta la forma de tendencia lineal en la media del proceso. Los niveles de significancia probados fueron 0.1, 0.05, 0.01 y 0.001. Mediante el programa Arcmap Versión 8.1, se realizaron interpolaciones de "ß" para determinar los patrones geográficos del incremento o decremento de precipitación estacional. Previo a la interpolación, las estaciones que no mostraron tendencia estadísticamente significativa (p≤0.1) se les asignó el valor "0". La interpolación de "ß" se realizó utilizando el método IDW (*Inverse Distance Weighted*), el cual asume que cada punto posee una influencia local que disminuye con la distancia.

RESULTADOS

Regímenes estacionales de precipitación en México

El ACP generó seis grandes regiones, según los rangos de valores del componente 1, el cual explicó el 78% de la variación total, cuyos valores más altos fueron aportados por aquellas estaciones con

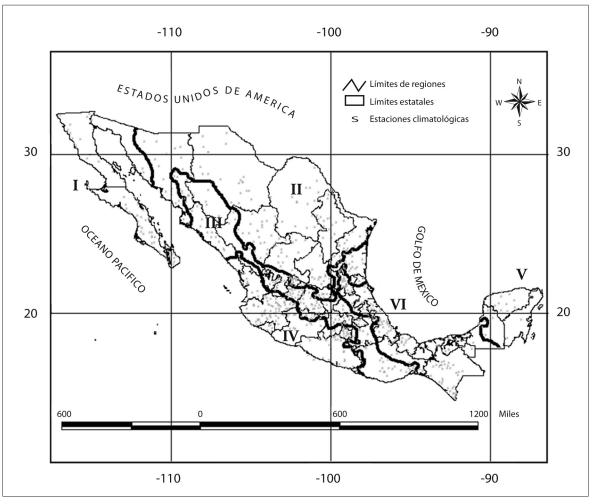


Figura 2. Área en estudio y distribución geográfica de estaciones climatológicas evaluadas (昌). Los números romanos indican las regiones geográficas de acuerdo con el régimen estacional de lluvia obtenido mediante un ACP.

los niveles mayores de precipitación y viceversa, definiendo los límites geográficamente (Figura 2). Una regionalización definida por características estadísticas de la precipitación, asociadas a la circulación general con enfoque al interés socioeconómico de México, fue realizado desde hace varias décadas (Wallén, 1955). En este estudio, las regiones obtenidas por el ACP se asemejan a los patrones espaciales de distribución de precipitación media anual en México según lo reportado por Vidal (1990), los cuales obedecen en parte a los rasgos orográficos del país (García, 2003). La Figura 2 muestra la delimitación geográfica de regiones generadas por el ACP, acorde al régimen de preci-

pitación estacional en México. La numeración de regiones (I, II, III, IV, V y VI) se asignó de acuerdo con el incremento de rango de valores del C1 del ACP, obedeciendo evidentemente a los regímenes de precipitación estacional.

Según los regímenes de precipitación estacional, la región más amplia (II) se ubica al norte de México, donde se registran precipitaciones promedio de 445.54 mm anuales, mientras que la región más pequeña (V) se ubica al sureste de México, abarcando los estados de Yucatán, Quintana Roo y parte de Campeche, cuya precipitación promedia 1 055.00 mm·año⁻¹. La región III, generada por el ACP, abarca grandes rangos de latitud y longitud,

así como la gran mayoría de los estados de la República Mexicana, pero los límites parecen obedecer básicamente a los rasgos fisiográficos representados por las Sierras Madre Oriental, Occidental y Eje Neovolcánico, la precipitación al año promedia 747.98 mm. La región I, ubicada al noroeste de México (las Bajas Californias y norte de Sonora) es la que recibe menos precipitación, la cual promedia sólo 150.74 mm anuales; contrariamente, un total de 1780.69 mm anuales se registran en la región VI (Costas del Golfo de México y Pacífico Sur). La región IV se localiza geográficamente en las Costas del Pacífico Centro-Sur de México y abarca desde Sinaloa hasta Oaxaca, registrando una precipitación media anual de 1 007.67 mm·año⁻¹.

En términos generales, la precipitación en México se registra como sigue: verano, otoño, invierno y primavera con 46.5, 31.4, 11.8 y 10.3% de la precipitación total anual (PPTA) respectivamente (Tabla 1). A nivel más específico, en verano se recibe desde un 42.30% de la PPTA en la región sureste de México (Región V) hasta un 61.25% en la región IV (Costa Sur del Pacífico Mexicano), la cual es gobernada principalmente por el movimiento latitudinal hacia el norte, de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT; Wallén, 1955; Mosiño y García, 1974; García, 2003), durante esta época. Contrariamente los niveles más bajos de lluvia en México se reportan durante el invierno, variando desde 3.75% en la región IV hasta 9.80% en la región V y obedece parcialmente a perturbaciones propias de latitudes medias, así como a la presencia de "nortes" que son producidos por masas de aire frío que se desplazan desde Canadá y Estados Unidos hacia el sur y que ocasionalmente producen precipitaciones (García, 2003). La excepción a los patrones de distribución temporal de lluvia en México se observan en Baja California y parte de Sonora (Región I) donde la mayor parte de la precipitación se registra durante el invierno (34.63%) y la menor durante la primavera (10.06%).

La Tabla 1 muestra que durante el otoño (SON), la lluvia se presenta de forma más homogénea en todo el país, ya que los porcentajes de precipitación con respecto al total anual varían desde 27.72% en la región III, hasta 34.84% en el sureste del país (Región VI). La época de primavera alcanza solamente 47.71 mm en la región IV (4.74% de la PPTA) hasta más de 140 mm en la región V (13.40% de la lluvia total registrada al año). Los meses más lluviosos en México están representados por agosto y septiembre, mientras que los menos lluviosos son febrero y marzo (Figura 3). Además, las regiones V y VI muestran claramente la presencia de una sequía intraestival conocida como canícula (e.g., Mosiño y García, 1974). Por otra parte, las regiones III y IV muestran un pico en julio el cual refleja la influencia de las lluvias monzónicas en la costa Pacífica de México.

Tabla 1. Distribución de precipitación en Mexico por epoca y regimen piuviómetrico
Región

	Región												
	I		II		III		IV		V		VI		
É. A.	PP	%	PP	%	PP	%	PP	%	PP	%	PP	%	
Primavera	15.17	10.06	54.16	12.16	69.27	9.26	47.71	4.74	141.40	13.40	214.60	12.05	
Verano	36.31	24.09	215.79	48.43	426.05	56.96	617.18	61.25	446.27	42.30	814.76	45.75	
Otoño	47.06	31.22	133.87	30.05	207.34	27.72	304.98	30.27	363.96	34.50	620.44	34.84	
Invierno	52.20	34.63	41.73	9.37	45.32	6.06	37.80	3.75	103.38	9.80	130.90	7.35	
	150.74		445.54		747.98		1 007.67		1 055.00		1780.69		

É.A. = Época del año; PP = Precipitación media (mm); % = Porcentaje de la precipitación total anual a nivel región.

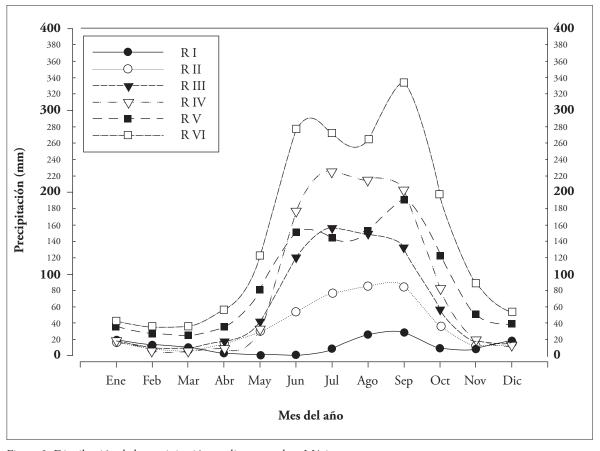


Figura 3. Distribución de la precipitación media mensual en México.

Patrones geográficos de tendencias de precipitación en México

Primavera: Según la prueba no paramétrica de Mann-Kendall y la interpolación de "ß", realizada en el SIG, la distribución geográfica de incremento de precipitación durante los meses de MAM, se registra básicamente entre los límites estatales de Baja California (norte y sur), noreste y sur del país, abarcando algunas partes de las regiones I, II, y VI (Figura 4a); mientras que la disminución de precipitación se registra especialmente al Centro y Costas del Golfo de México (Región III). Se resalta la ausencia de cambios (aumento y decremento) significativos en las series de precipitación de primavera en gran parte del noroeste de México y Centro-Sur de la costa Pacífica Mexicana (Figura 4a). Como era de esperarse, dentro de una misma región se presentaron incrementos y decrementos de precipitación, dado, no obstante, a escalas regionales, pero consistentes; en este sentido, en términos de la magnitud de "ß", y debido al régimen de lluvia, las tasas más altas de incremento de precipitación se observan en las regiones más húmedas (V y VI), las cuales promedian +1.89±0.73 mm·año⁻¹ y sólo +0.61±0.24 mm·año⁻¹ en las regiones I y II. De la misma manera, las tasas más altas de disminución de lluvia durante primavera se observan en las Costas del Golfo de México (Regiones V y VI), las cuales promedian -2.45±0.88 mm·año-1 (Tabla 3).

Verano: El incremento de lluvia durante el verano geográficamente se observa al Noreste de México y Costas Mexicanas del Pacífico Centro-Sur. Por el contrario, la disminución de precipitación se registra al centro de México, pero especialmente y de manera consistente en la región más lluviosa de México, región VI (Figura 4b), dándose a escalas

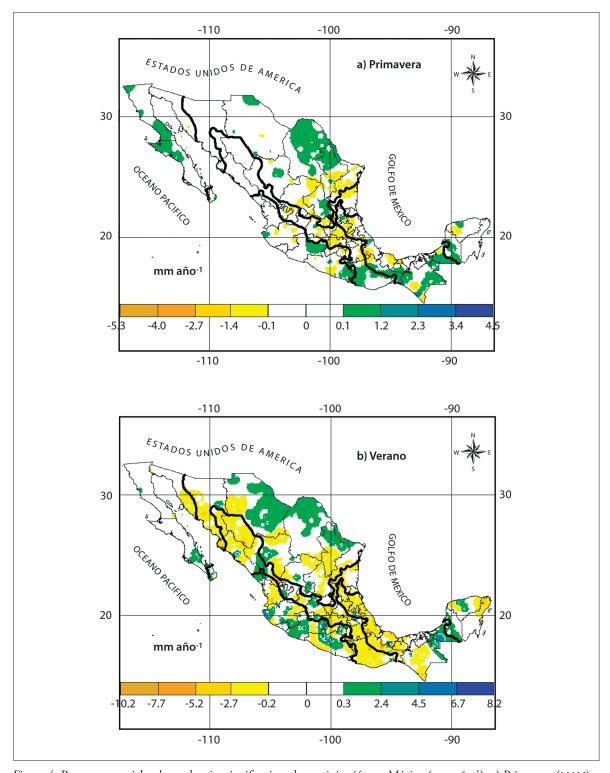


Figura 4. Patrones espaciales de tendencias significativas de precipitación en México (mm·año-1): a) Primavera (MAM) y b) Verano (JJA) (p≤0.1).

regionales, según definición del IPCC (2001). De igual manera, las tasas de incremento y decremento de lluvia, durante los meses de JJA, se dan en forma proporcional de las regiones de menor a mayor precipitación (Figura 7), con un aumento promedio de sólo +1.00±0.43 mm·año⁻¹ en la región I, hasta +5.99±2.52 mm·año⁻¹ en la región VI; y decremento promedio de -0.31±0.24 y -7.03±1.05 mm·año-1 en la región I y VI, respectivamente; las cuales se deben a los regímenes de precipitación en cada región. Los rangos predominantes de disminución de lluvia en el país durante verano (época más lluviosa del año), según el período de tiempo considerado en este estudio, van desde -0.2 hasta -2.7 mm·año⁻¹ (Figura 4b).

Otoño: El incremento y decremento de precipitación (mm·año⁻¹) durante los meses de SON se indican en la Figura 5a. Los resultados de este estudio ponen de manifiesto que muy pocas series de precipitación, del total de las analizadas, muestran cambios significativos (p≤0.1) en las tendencias (Tabla 2), las existentes se dan a escalas locales y se encuentran dispersas principalmente sobre ambas costas del país, indicando la posible influencia de tormentas tropicales y huracanes, como en Baja California Sur, Sinaloa y Veracruz. Como se ha mostrado anteriormente y evidentemente debido al régimen pluviométrico de cada región, la magnitud de incremento y decremento de lluvia es proporcional al régimen de precipitación, donde la región I promedia incrementos de +1.02±0.45 mm·año⁻¹

y la región VI, +4.32±1.17 mm·año⁻¹; mientras que la disminución de lluvia promedia -1.47±0.51 mm·año⁻¹ en la región I y II, y de -4.70±0.70 mm·año⁻¹ en las zonas más lluviosas del país (Regiones V y VI), según se muestra en la Tabla 3, y en los espacios geográficos indicados en la Figura 5. Las tendencias lineales de la magnitud promedio de "ß", por región y estación del año, se indican en la Figura 7, así como modelos para estimar el incremento y decremento promedio de lluvia por región.

Invierno: Zonas geográficas con patrones claros (consistentes) de incremento y decremento, de precipitación, a escalas regionales, durante los meses de DEF, se observan en la Figura 5b, cuyos rangos predominantes (de aumento y disminución de lluvia), en todo el país, según la interpolación de "ß", por el SIG van desde |0.1 a 1.0| mm·año⁻¹. La precipitación invernal aumenta en ciertas provincias del norte y sur de México (regiones II y VI); mientras que la disminución más notable de lluvia se registra en las costas centrales del Pacífico Mexicano (regiones III y IV), promediando -0.64±0.12 mm·año⁻¹. Consecuentemente, la tasa más alta de incremento de precipitación (1.43±0.42 mm·año⁻¹) se registra en la región VI, experimentando simultáneamente una disminución promedio de -1.15±0.49 mm·año⁻¹, en ciertas áreas, dentro de esa misma región (Figura 5b).

Los resultados indican que las regiones áridas y semiáridas del territorio Mexicano son más sus-

Tabla 2. Porcentaje de estaciones climatológicas con tendencias significativas (p≤0.1) al incremento y decremento de
precipitación en México durante 1920-2004. (N) es el número de estaciones analizadas en cada caso

Región (Número total de estaciones)													
	I (5	I (51) II (198)		III (205)		IV (160)		V (24)		VI (151)			
É. A.	% (+)	% (-)	% (+)	% (-)	% (+)	% (-)	% (+)	% (-)	% (+)	% (-)	% (+)	% (-)	
Primavera	15.69	1.96	9.60	6.57	3.90	7.80	5.63	6.88	4.17	4.17	5.96	7.28	
Verano	15.69	9.80	13.13	9.09	6.83	13.17	14.38	11.88	12.50	12.50	5.30	15.23	
Otoño	13.73	3.92	6.57	11.11	4.39	9.27	3.75	13.13	4.17	12.50	5.96	17.22	
Invierno	5.88	3.92	11.62	13.64	2.44	19.02	4.38	17.50	8.33	4.17	13.25	9.93	

É.A. = Época del año; % (+) = Porcentaje de estaciones climatológicas que muestran incremento (p≤0.1); % (-) = Porcentaje de estaciones climatológicas que muestran decremento (p≤0.1).

Tabla 3. Estadísticas básicas de magnitud de las tendencias significativas (p≤0.1) de precipitación en México (mm·año⁻¹)

Región													
]	I	I	I	I.	II	Ι	V	7	V	V	/I
E.A.	ET	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
	N	8	1	19	13	8	16	9	11	1	1	9	11
8	\overline{x}	0.45	-0.11	0.76	-0.97	1.06	-1.08	0.58	-0.58	1.44	-2.12	2.34	-2.77
Primavera	I. C.	0.20	_	0.28	0.47	0.51	0.21	0.23	0.24	_	_	0.74	0.89
rim	D. E.	0.29	_	0.62	0.86	0.74	0.44	0.35	0.41	_	_	1.13	1.50
	Min.	0.10	_	0.10	-2.85	0.11	-1.75	0.10	-1.50	_	_	1.03	-5.27
	Max.	0.73	_	1.78	-0.20	2.64	-0.17	1.02	-0.10	_	_	4.53	-0.72
	N	8	5	26	18	14	27	23	19	3	3	8	23
	\overline{x}	1.00	-0.31	1.89	-2.92	2.94	-3.73	4.50	-4.21	3.53	-3.12	5.99	-7.03
Verano	I. C.	0.44	0.24	0.42	0.63	0.67	0.67	1.16	1.14	1.35	1.42	2.52	1.05
Ver	D. E.	0.63	0.28	1.09	1.36	1.28	1.77	2.84	2.54	1.19	1.25	3.64	2.58
	Min.	0.33	-0.78	0.50	-5.52	1.34	-8.77	1.03	-10.22	2.50	-4.56	2.10	-10.22
	Max.	1.91	-0.15	4.62	-1.21	6.43	-1.05	10.79	-1.47	4.83	-2.25	10.79	-3.04
	N	7	2	13	22	9	19	6	21	1	3	9	26
	\overline{x}	1.02	-1.03	1.46	-1.92	2.29	-2.25	3.16	-3.52	3.00	-3.72	4.32	-5.69
Otońo	I. C.	0.45	0.61	0.34	0.41	1.25	0.35	1.28	0.75	_	0.71	1.17	0.69
Off	D. E.	0.60	0.44	0.63	0.98	1.92	0.78	1.60	1.75	_	0.63	1.80	1.80
	Min.	0.26	-1.34	0.57	-5.27	1.00	-4.10	1.27	-8.09	_	-4.44	2.00	-8.93
	Max.	1.94	-0.72	2.62	-0.78	7.14	-1.15	5.08	-1.40	_	-3.34	6.95	-2.54
	N	3	2	23	27	5	39	7	28	2	1	20	15
	\overline{x}	0.79	-0.43	0.71	-0.66	0.47	-0.63	0.41	-0.66	1.04	-1.59	1.43	-1.15
Invierno	I. C.	0.64	0.58	0.23	0.10	0.49	0.11	0.16	0.14	0.81	_	0.42	0.49
Invi	D. E.	0.57	0.42	0.55	0.26	0.56	0.35	0.22	0.38	0.58	_	0.95	0.96
	Min.	0.45	-0.73	0.21	-1.37	0.14	-1.67	0.16	-1.77	0.63	_	0.14	-3.34
	Max.	1.44	-0.14	2.79	-0.19	1.43	-0.12	0.70	-0.12	1.45	_	3.75	-0.37

É.A.=Época del año; E=Estadístico; T=Tendencia; (+)=Incremento; (-)=Decremento; N=Número de estaciones climatológicas; x=Promedio de la tendencia (mm·año⁻¹); I. C.=Intervalo de confianza al 0.05 (mm·año⁻¹); D. E.=Desviación estándar (mm·año⁻¹); Min.=Valor mínimo de la tendencia (mm·año⁻¹); Máx.=Valor máximo de la tendencia (mm·año⁻¹).

ceptibles a cambios en el régimen de lluvia (incremento), ya que durante P, V y O, el porcentaje del número de estaciones climatólogicas que muestran tendencias significativas (p≤0.1) en las series de precipitación, son mayores en estas regiones (Tabla 2), promediando 15.0% (región I), disminuyendo hacia las regiones lluviosas, hasta 7.6% (región VI). Así mismo, las regiones más lluviosas, registran el

mayor número de estaciones con tendencias negativas (decremento) en estas mismas épocas (P, V y O), es decir, son más susceptibles a la disminución de lluvia (Tabla 2); similarmente, el promedio es de 13.3% (región VI) y sólo 5.2% (región I) del total de estaciones analizadas.

El verano registra las tendencias positivas más importantes en el país. La mayor cantidad de esta-

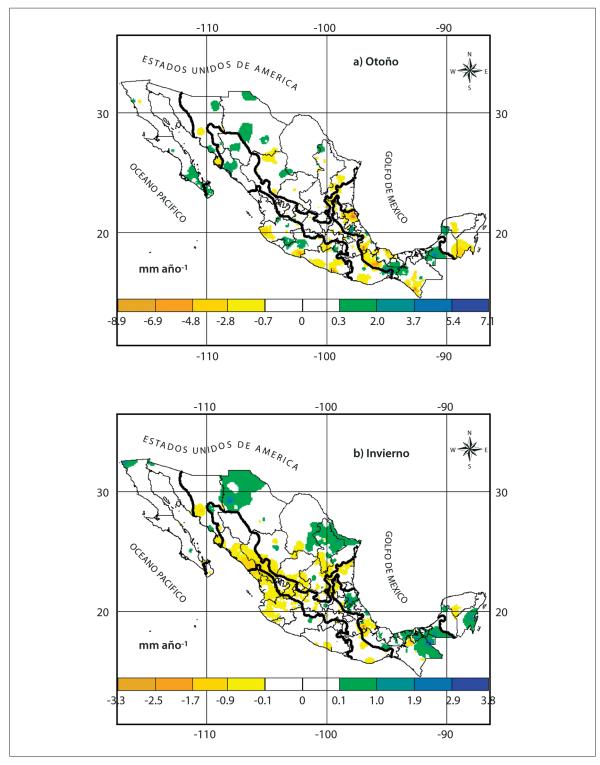


Figura 5. Patrones espaciales de tendencias significativas de precipitación en México (mm·año⁻¹): a) Otoño (SON) y b) Invierno (DEF) (p≤0.1).

ciones climatólogicas con tendencias significativas (p≤0.1) son detectadas en esta época (11.3%), mientras que durante el otoño sólo se percibe un promedio de 6.4%. De la misma manera, un promedio de 11.9% de estaciones presentan tendencias negativas durante el verano y sólo un 5.8% durante primavera.

Ejemplos típicos de tendencias de incremento y decremento de precipitación a nivel de estación, en diversos regímenes pluviométricos en México se pueden observar en la Figura 6. Adicionalmente, la figura indica la tendencia de las series estacionales de precipitación, según el estimador de pendiente de Kendall utilizado en esta investigación (línea sólida), así como la tendencia conforme a una regresión lineal simple (línea punteada). Una comparación rápida de manera visual de las figuras, indica que la magnitud de la pendiente varía sensiblemente entre ambos procedimientos, al parecer la regresión lineal arroja tasas más altas. No obstante, las ventajas del uso de las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall, en el análisis de tendencias han sido expuestas por Hoeffding (1948); Hirsch et al. (1982) y Gilbert (1987), por ello la razón de su aplicación en esta investigación.

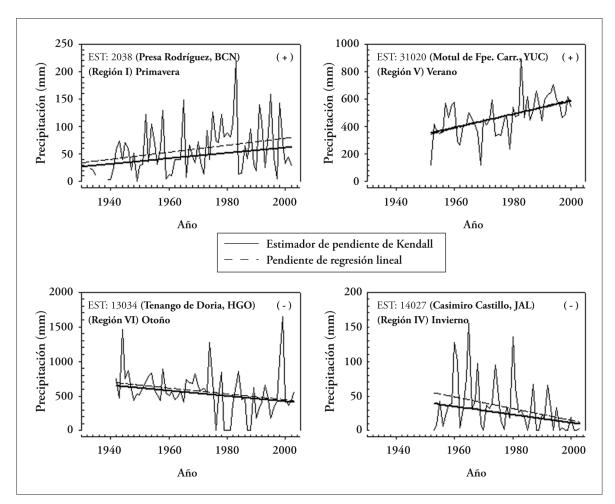


Figura 6. Tendencias de series de precipitación estacional en diferentes regiones de México.

Tendencias de magnitud y porcentaje de incremento y decremento por régimen pluviométrico

Las Figuras 7 y 8 muestran las tendencias de la precipitación estacional en milímetros y en porcentaje, respectivamente, de acuerdo con la región geográfica. A los promedios de magnitud y porcentaje (por región) se les aplicó modelos de regresión según la dispersión de datos, para identificar las tendencias o patrones. Las tendencias de la magnitud promedio de "ß", por región, son lineales y proporcionales al régimen de precipitación de las regiones especificadas en este estudio (Figura 7). Por ende, las magnitudes promedio más altas se registran durante el verano (+33.0 y -35.5 mm por década) y las más bajas durante el invierno (+8.0 y -8.5 mm por década), de incremento y decremento, respectivamente. En este sentido, patrones lineales bien definidos se registran en verano y otoño, tanto en incremento (+) como en decremento (-) de precipitación. Las pendientes más altas de las tendencias lineales se observan en las tendencias negativas; es decir, la disminución de lluvia es más drástica de una región a otra que el incremento de lluvia.

El incremento y decremento de precipitación (mm·año-1) de la Tabla 3, expresado en términos porcentuales de la PPTA, indica que los mayores porcentajes de incremento de precipitación (lado izquierdo Figura 8), se registran en las regiones áridas, disminuyendo conforme la región es más húmeda; mientras que el decremento de precipitación (lado derecho Figura 8), se da en forma homogénea en todo el país, con excepción de otoño. El incremento promedio de lluvia a nivel región es del orden de 2.4 y 1.3%, respectivamente, de la PPTA en las regiones I y II; y de sólo 0.9% en las regiones V y VI, mientras que la disminución de lluvia es similar en todo el país, promediando 1.2% de la PPTA.

A escala estacional, los porcentajes más altos de incremento de lluvia se registran durante la primavera con 1.54% de la PPTA. Los resultados de este estudio sugieren que el régimen de lluvia de las regiones áridas y semiáridas del país, se ha modificado substancialmente (positivamente) en las áreas geográficas reportados en las Figuras 4 y 5, presentándose el mayor incremento porcentual especialmente durante primavera e invierno. Asimismo, las regiones húmedas tienden a disminuir de manera importante su régimen de lluvia. Modelos de regresión para estimar el porcentaje de incremento y decremento medio por región son reportados en la Figura 8.

DISCUSIÓN

Desde hace varias décadas Klaus y Jáuregui (1975) encontraron que el incremento de precipitación durante el invierno en los años setenta en el noreste de México, se debió a un cambio en la circulación atmosférica, de zonal a meridional, asimismo, en la misma década, se observó un aumento en el número de frentes fríos y "nortes" que afectaron al noreste de México y la región del Golfo. Más recientemente, Salinas et al. (1992) reportan cambios en los regímenes de precipitación a escala regional en Baja California Sur, similar a lo encontrado en esta investigación, donde una pequeña porción de BCS registra tendencias al incremento de precipitación. A escalas más grandes, las tendencias de varios parámetros de precipitación a nivel anual en gran parte del territorio Mexicano han sido estudiadas por Méndez et al. (2005), documentando que el número de días lluviosos se incrementa al norte de México, concordando con los patrones geográficos de incremento de precipitación, especialmente de primavera y verano de este estudio.

Intentos por explicar las variaciones de precipitación en México han sido realizados desde hace varias décadas; en este sentido, Mosiño y Morales (1988) encontraron que los regímenes de lluvia por debajo de lo normal en el Centro de México, obedecieron a la intensidad de los eventos de El Niño. Asimismo, Cavazos y Hastenrath (1990) concluyeron que el incremento de precipitación invernal, en el norte del territorio Mexicano, se debió a las influencias de este mismo fenómeno. Más recientemente, resultados similares de incremento de precitación durante el invierno boreal, en el norte del territorio Mexicano, como consecuencia del fenómeno del ENSO (El Niño Oscilación del Sur) han sido encontrados por Méndez *et al.* (2007). En estos términos, parece ser que el incremento de precipitación invernal en las regiones áridas y semiáridas del territorio Mexicano,

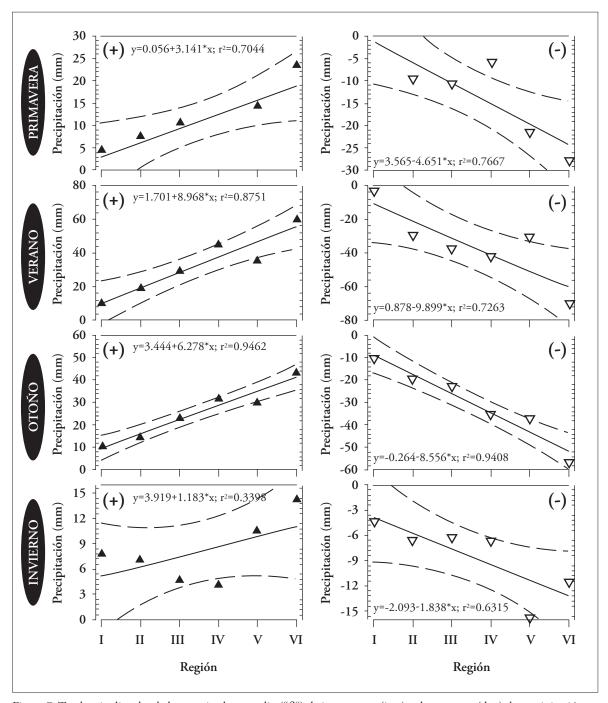


Figura 7. Tendencias lineales de la magnitud promedio ("ß") de incremento (izq.) y decremento (der.) de precipitación en México (mm por década) según regiones de la Figura 2. Las curvas quebradas indican intervalos de confianza (95%).

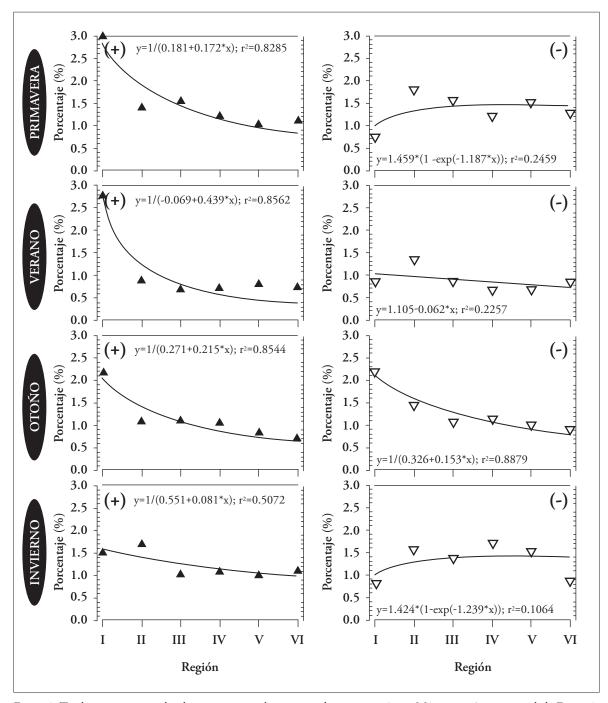


Figura 8. Tendencias porcentuales de incremento y decremento de precipitación en México, según regiones de la Figura 2.

encontrado en este estudio, se debe parcialmente a las teleconecciones del fenómeno del ENSO, el cual parece ser más intenso en el norte de México y costas del Pacífico (Ibid.). No obstante, la distribución de precipitación en tiempo y espacio en la República Mexicana, asociada a la circulación atmosférica, rasgos fisiográficos y fenómenos climáticos que la condicionan, han sido bien descritos y documentados recientemente (García, 2003; Pavia et al., 2006).

En otras partes del mundo, en el Pacífico Asiático, se ha encontrado que las variaciones de precipitación responden a los períodos de eventos El Niño y La Niña (Xu et al., 2005). Asimismo, las variaciones locales de la distribución de las tendencias de precipitación pueden atribuirse a las alteraciones en la circulación atmosférica, así como a la modificación de los forzamientos radiativos (Hurrel, 1995).

Consecuencias importantes podrían ocurrir en los próximos años en las regiones áridas y semiáridas de México, en el cual el superávit de precipitación (si continúa por varios años) podría desempeñar un papel trascendental con la redistribución geográfica de las especies vegetales en estos ecosistemas. A lo ya antepuesto, podría adicionarse el incremento de temperaturas máximas y mínimas en ciertas regiones del norte de México, las cuales actualmente experimentan cambios importantes que van desde +0.1 hasta +0.7°C por década (Méndez et al., 2005).

Los resultados evidencian la existencia de condiciones climáticas inversas a las registradas en décadas pasadas; las regiones áridas, ubicadas hacia el norte de México, tienden a incrementar la precipitación en aproximadamente 2% de la PPTA. Jones y Hulme (1996) y Hulme et al. (1998) documentan que globalmente la lluvia ha incrementado en un 2%, especialmente en las áreas continentales del hemisferio Norte. Las regiones más lluviosas del país perciben una disminución significativa de lluvia siendo del orden de 1%. Situaciones inversas a las encontradas en este estudio han sido expuestas por Kruger (2006) en Sudáfrica, donde los regímenes secos y húmedos tienden a acentuarse.

Las tendencias de las series de precipitación en México registran cambios importantes durante el período considerado (1920-2004), dándose a escalas regionales y consistentes. En términos geográficos, el incremento de precipitación se registra especialmente en regiones áridas y semiáridas, mientras que la disminución de lluvia se hace más evidente en el centro y costas del Golfo de México. Estacionalmente, el verano es la época del año que registra el mayor porcentaje de estaciones con tendencias estadísticamente significativas de incremento y decremento de precipitación (p≤0.1). En promedio, un 11.3% del total de estaciones analizadas registra incremento de lluvia y 11.9%, disminución, durante esta misma época.

Como era de esperarse, la magnitud de la tendencia, de incremento y decremento de precipitación es lineal y proporcional al régimen pluviométrico, siendo del orden de |30| mm por década durante el verano y solamente de |8| mm por década en invierno.

Los resultados de este estudio indican que los regímenes pluviométricos de las zonas áridas y semiáridas de México, en los espacios geográficos representados en las Figuras 4 y 5, están siendo modificados substancialmente. El mayor porcentaje de estaciones con tendencias significativas (incremento) se ubica en las regiones áridas y semiáridas, disminuyendo hacia las regiones lluviosas, desde 12.7 hasta 7.6% en la región I y VI, respectivamente. De manera adicional, el incremento de precipitación expresado en forma porcentual, es mayor también en las regiones más secas de México y disminuye hacia las regiones más lluviosas. En este sentido, las regiones áridas registran un incremento porcentual de lluvia de 1.8% de la precipitación total anual y de solamente 0.9% en las regiones más lluviosas de México. Las regiones más húmedas del país registran en promedio disminución de lluvia en 1.2% de la precipitación total anual.

Este estudio aporta evidencias claras de la existencia de variaciones importantes en las condiciones climáticas de México, según lo revelan los cambios significativos de las tendencias de las series de precipitación estacional, las cuales se dan a escalas regionales, con patrones geográficamente consistentes, tanto en incremento como en decremento de lluvia.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado gracias al apoyo de CoSNET mediante el proyecto No. 711.06-P. Agradecimientos especiales al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por el soporte con la información y a la doctora María Tereza Cavazos Pérez por su revisión y cometarios tan acertados. Así mismo, se agradece especialmente a la señora Paulina Bazaldúa Sánchez, por su gran ayuda en la compilación y validación de la información.

REFERENCIAS

- Ayllón, T. (2003), Elementos de Meteorología y Climatología, 2a. edición, Trillas, México.
- Bradley, R. S., H. F. Diaz, J. K. Eischeid, P. D. Jones, P. M. Kelly and C. M. Goodess (1987), "Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-19th century", Science, no. 237, pp. 171-175.
- Brunetti, M., B. Letizia, M. Maurizio and N. Teresa (2000), "Precipitation intensity trends in Northern Italy", International Journal of Climatology, no. 20, pp. 1017-1031.
- Campos, A. D. F. (1992), Procesos del ciclo hidrológico, Editorial Universitaria Potosina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Cap. III, pp. 36-46.
- Cavazos, T. and S. Hastenrath (1990), "Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation", International Journal of Climatology, no. 10, pp. 377-386.
- Comrie, A. C. and E. C. Glenn (1988), "Principal components-based regionalization precipitation regimes across the Southwest United States and Northern Mexico, with application to monsoon precipitation variability", Climate Research, no. 10, pp. 201-215.
- Corte-Real, J., B. Qian and H. Xu (1998), "Regional climate change in Portugal: precipitation variability associated with large-scale atmospheric circulation", International Journal of Climatology, no. 18, pp. 619-635.

- Díaz, H. F., R. S. Bradley and J. K. Eischeid (1989), "Precipitation fluctuations over global land areas since the late 1800s", Journal of Geophysical Research, no. 94, pp. 1195-1210.
- Dietz, E. J. and T. J. Killeen (1981), "A nonparametric multivariate test for monotone trend with pharmaceutical applications", Journal American Statistical Association, no. 76, pp. 169-174.
- Englehart, P. J. and A. V. Douglas (2000), "Dissecting the macro-scale variations in Mexican maize yields (1961-1997)", Geographical and Environmental Modeling, no. 4, pp. 65-81.
- Englehart, P. J. and A.V. Douglas (2002), "Mexico's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and changes in their connectivity", Atmósfera, pp. 147-164.
- FAO (Food and Agriculture Organization; 1978), Report on the Agro-Ecological Zones, Project, vol. 1, Methodology and results for Africa.
- García E. (2003), "Distribución de la precipitación en la República Mexicana", Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 50, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 67-76.
- Gilbert, R. O. (1987), Statistical methods for environmental pollution monitoring, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Haylock, M. and N. Nicholls (2000), "Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910-1998", International Journal of *Climatology*, no. 20, pp. 1533-1541.
- Hirsch, R. M., J. R. Slack and R. A. Smith (1982), "Techniques of trend analysis for monthly water quality data", Water Resources Research, 18(1), pp. 107-121.
- Hoeffding, W. (1948), "A class of statistics with asymptotically normal distribution", Annals of Mathematical Statistics, no. 19, pp. 293-325.
- Hulme, M., T. J. Osborn and T. C. Johns (1998), "Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HADCM2 simulations", Geophysical Research Letters, no. 25, pp. 3379-3382.
- Hurrel, J. W. (1995), "Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation", *Science*, no. 296, pp. 676-679.
- INEGI (1994), Estadísticas históricas de México, tomos I y II, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1997), Estadísticas del Medio Ambiente, México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

- IPCC (2001), Climate change. The Scientific basis. Contribution of working group I to the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, N.Y, USA.
- Jones, P. D. and M. Hulme (1996), "Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations", International Journal of Climatology, no. 16, pp. 361-377.
- Kendall, M. G. (1975), Rank Correlation Methods, 4th Ed., Charles Griffin, London.
- Klaus, D. y E. Jáuregui (1975), "Variaciones seculares de la circulación general y su relación con la sequía en el norte de México", Ingeniería Hidráulica en México, vol. IV, pp. 580-593.
- Kruger, A. C. (2006), "Observed trends in daily precipitation indices in South Africa: 1910-2004", International Journal of Climatology, 26(15), pp. 2275-2285.
- Mann, H. B. (1945), "Non-parametric tests against trend", Econometrica, no. 13, pp. 245-259.
- Méndez, G. J., J. de J. Návar Ch., R. H. González y Y. E. Jurado (2005), "Tendencias de precipitación, temperatura máxima y mínima de décadas recientes en México", VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales, noviembre, Chihuahua, México.
- Méndez, G. J., J. de J. Návar Ch., R. H. González, Y. E. Jurado y E. J. Treviño G. (2007), "Teleconecciones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México", Revista Ciencia UANL, vol X, núm. 2, pp. 290-298.

- Mosiño, P. A. and E. García (1974), "The climate of Mexico. World survey of climatology", in Bryson, R. A. and F. K. Hare (eds.), vol. II, *Climates of North* America, London: Elsevier, pp. 345-404.
- Mosiño, P. A. y T. Morales (1988), "Los ciclones tropicales, El Niño y las lluvias en Tacubaya", Geofisica Internacional, 27(1), pp. 61-82.
- Pavia, E. G., F. Graef and J. Reyes (2006), "PDO-ENSO effects in climate of Mexico, Notes and correspondence", Journal of Climate, no. 19, pp. 6433-6438.
- Richman, M. B. and P. J. Lamb (1985), "Climatic patterns analysis of three- and seven-days summer rainfall in the Central of United States: some methodological considerations and regionalization", Journal of Climate and Applied Meteorology, no. 24, pp. 1326-1343.
- Salinas, Z. C. A., D. B. Lluchota, V. S. Hernández and D. Lluchbelda (1992), "Variability of precipitation in Baja California-Sur (Mexico) in 1990 possible causes", *Atmósfera*, 5(2), pp. 79-93.
- UNAM (1990), Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, México.
- Vidal Zepeda, R. (1990), "Precipitación media anual en "Precipitación", hoja IV.4.6, Atlas Nacional de México, vol. II, escala 1:400000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Wallén, C.C. (1955), "Some characteristics of precipitation in Mexico", Geografiska Annaler, 37(1-2), pp. 51-85.
- Xu, Z. X., K. Takeuchi, H. Ishidaira and J. Y. Li (2005), "Long-term trend analysis for precipitation in Asian Pacific Friend river basins", Hydrological Processes, no. 18, pp. 3517-3532.