

VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN MÉXICO: UNA APROXIMACIÓN A LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS

• Gabriel Díaz-Padilla • Ignacio Sánchez-Cohen •
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

• Roberto Quiroz •
Centro Internacional de la Papa, Perú

• Jaime Garatuza-Payán •
Instituto Tecnológico de Sonora, México

• Christopher Watts-Thorp •
Universidad de Sonora, México

• Isidro Roberto Cruz-Medina •
Instituto Tecnológico de Sonora, México

• Rafael Alberto Guajardo-Panes •
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

Resumen

Se desarrolla un proceso metodológico para el estudio de la variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México, considerando información histórica de al menos veinte años a partir de 2 165 estaciones climatológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional; se eliminaron datos atípicos y fueron estimados con *ClimGen*, siempre y cuando la información faltante no sobrepasara el 25% del total. Se probó bondad de ajuste con respecto a la distribución gamma de dos parámetros en los periodos anual y mayo-octubre; este último, por registrar el 80% de la precipitación pluvial anual en México. Se observó que en 1 786 estaciones del periodo anual y en 1 727 del periodo mayo-octubre se ajustaron a la distribución gamma. Se evaluaron las técnicas de interpolación espacial: kriging, cokriging, inverso de la distancia y thin plate smoothing spline; este último registró menor cuadrado medio del error, y se consideró en la interpolación de los parámetros de forma y escala, para generar mapas de precipitación pluvial al 70, 80 y 90% de probabilidad. Finalmente, se analizó la frecuencia, duración e intensidad de periodos húmedos y secos en México, considerando la clasificación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el cual se interpoló para generar mapas *raster* anuales en el periodo 1961-2003, con resolución de 900 metros; se observó incremento en la duración de las sequías y disminución en su intensidad. Esta investigación pretende coadyuvar a mejorar la modelación del ciclo hidrológico, al estudio del cambio climático y a la delimitación de zonas vulnerables en México.

Palabras clave: precipitación, interpolación espacial, bondad de ajuste, SPI.

Introducción

La precipitación pluvial abastece de agua dulce al planeta y es una de las variables fundamenta-

les del ciclo hidrológico (Gourou *et al.*, 1977). Sin embargo, la cambiante cantidad, duración, frecuencia e intensidad con que ocurre, origina que sea uno de los fenómenos atmosféricos más

difícil de modelar y predecir, además de que es uno de los hidrometeoros más afectados por eventos naturales, como los llamados fenómenos de “El Niño” o de “La Niña”. En México, el 80% de la lluvia precipitada en un año hidrológico ocurre de mayo a octubre. En este periodo se siembran cerca de 12 millones de hectáreas de temporal con cultivos cíclicos (SIAP, 2008). Normalmente 10% de esta superficie se pierde, entre otras causas, por la falta o el exceso de lluvia. Cabe señalar que este ciclo de siembra conocido como de primavera-verano de temporal (PV) aporta el 50% del volumen total de la producción agrícola. Es importante destacar que en México, la toma de decisiones respecto a en qué periodos y superficies sembrar se sustenta en muchos de los casos en el cálculo de la lluvia promedio histórica precipitada en un cierto lugar, o bien se calcula su probabilidad y anomalía con base en la distribución normal, lo cual matemática y estadísticamente es posible; sin embargo, los resultados generalmente son incorrectos. Wilks (1995) menciona que las series de tiempo de precipitación se ajustan a una distribución de probabilidad tipo gamma. Haddad y Rahman (2005) verificaron mediante pruebas de Kolgomorov-Smirnov y Anderson-Darling que los datos de precipitación registrados en el 65% de las estaciones del estado de Victoria, Australia, se ajustaron a la distribución gamma. García *et al.*, en 1973, lo confirmaron para México. No obstante, estos autores utilizaron el método de momentos para el cálculo de los parámetros de forma y escala, el cual, en sentido técnico, puede ser “ineficiente”, ya que no hace uso máximo de la información contenida en la base de datos. La consecuencia práctica de esta “ineficiencia” de acuerdo con Wilks (2006) es que los valores pueden ser erráticos o “innecesariamente” variar de una muestra a otra. Una mejor aproximación para fijar el valor de los parámetros de esta distribución es usar el método de máxima verosimilitud, el cual requiere un proceso iterativo que sólo es práctico mediante el uso de la computadora. Cabe señalar que García *et al.* (1973) no

presentan en sus resultados los valores críticos de alguna prueba estadística de bondad de ajuste (Anderson Darling, Kolmogorov y Smirnov, o Chi-cuadrada), lo que permitiría valorar de una manera estadísticamente aceptable el ajuste de los datos de precipitación a una distribución gamma. Por otra parte, una vez valorada la bondad de ajuste de los datos puntuales, es necesario conocer un método de interpolación espacial que permita calcular valores desconocidos con el mínimo error posible. Díaz *et al.* (2008) evaluaron diferentes interpoladores espaciales, concluyendo que el que menor cuadrado medio del error presentó al interpolar datos de precipitación fue el de thin plate smoothing spline, desarrollado por Hutchinson (2004) e incluido en el programa de cómputo *Anusplin*. Es importante destacar el Índice Estandarizado de Precipitación, SPI, por sus siglas en inglés (Standardized Precipitation Index), desarrollado por McKee *et al.* (1993), para determinar si en una región y en un periodo determinado hay déficit o exceso de precipitación respecto a las condiciones normales. Hayes *et al.* (1999), Tadesse *et al.* (2004) y Komuscu (1999) destacan que el método SPI por su rapidez, gran aproximación en el análisis de sequía, su simplicidad y requerimiento mínimo de datos lo hacen un método ideal para utilizarse. Fue diseñado para ser un indicador que reconoce la importancia de la escala del tiempo en el análisis de la disponibilidad y uso del agua. El SPI puede ser fácilmente interpretado por un proceso simple de medias móviles (Guttman, 1998). Es importante señalar que en su algoritmo de cálculo se asume que los datos de precipitación se ajustan a una distribución gamma. Con base en lo anterior, el propósito del presente trabajo es aplicar técnicas estadísticas para la evaluación de la bondad de ajuste de la precipitación a la distribución gamma, evaluar métodos de interpolación espacial y aplicar los resultados obtenidos para la evaluación de periodos de sequía y excesos de humedad, utilizando para esto el SPI. Lo anterior permitirá hacer cálculos más aproximados de la incidencia

probabilística de la precipitación en México, generar mapas continuos de probabilidad, observar la variación de los parámetros de forma y escala de la distribución gamma, así como delimitar espacialmente las zonas de nuestro país afectadas frecuentemente por periodos de sequía o exceso de humedad. Por lo anterior, en el presente trabajo se muestra el desarrollo de una metodología para el análisis espacial y temporal de la precipitación pluvial en México, considerando técnicas de simulación y cómputo iterativo.

Materiales y métodos

Los datos de precipitación provienen de la Red de Monitoreo Meteorológico de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y fueron consideradas sólo las estaciones que contenían al menos veinte años de información entre 1961 y 2003, y que la información faltante no sobrepasara el 25% del total.

Prueba de bondad de ajuste y cálculo de parámetros de la distribución gamma

La función probabilística de densidad (fpd) de muchas variables atmosféricas son claramente asimétricas y sesgadas a la derecha (Wilks, 1995), algunos ejemplos comunes son la cantidad de precipitación pluvial que ocurre en un lugar determinado y la velocidad del viento. Ajustar estas variables a distribuciones, como por ejemplo la Gaussiana, podría llevar a resultados incorrectos, al modelar o cuantificar cierta probabilidad de ocurrencia. Como se ha asentado anteriormente, una distribución continua que se ha observado ajusta bien a datos de la precipitación pluvial es la distribución gamma. Quizá fueron Barger y Thom (1949), y Thom (1949), citado por Mosiño y García en 1981, quienes primero llamaron la atención de utilizar la función de distribución gamma de dos parámetros para representar datos de lluvia. Esta distribución se define por la fpd:

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad x, \alpha, \beta > 0$$

Donde x es un valor de precipitación observada, y α y β son los parámetros de forma y escala de la distribución. La función $\Gamma(\alpha)$ está definida por la integral:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

Ésta debe ser evaluada numéricamente o aproximada utilizando valores tabulares provistos en tablas (Wilks, 1995; Sánchez et al., 2008). Una de las dificultades de la distribución gamma es el cálculo de sus parámetros y para ello varios autores proponen diferentes formas para estimarlos, uno de los mejores es el de máxima verosimilitud, el cual requiere un proceso computacional. Wilks (1995) describe las aproximaciones para este propósito, el primero de ellos es el señalado por Thom (1958) y el segundo es una aproximación polinomial para el parámetro de α propuesto por Greenwood y Durand (1960). Gran parte del análisis realizado en este trabajo se fundamenta en el trabajo de Cheng (2006), quien desarrolló una serie de algoritmos y programas en *Visual Basic* incorporados en hojas de cálculo, con los cuales fue posible, mediante el método de máxima verosimilitud (MLE), estimar los parámetros α y β de la distribución gamma, sus intervalos de confianza, funciones de distribución acumulada, empírica y de probabilidad, así como realizar la prueba de bondad de ajuste mediante remuestreo "*Bootstrap*" (por su nombre en inglés) empleando la prueba de Anderson-Darling, con su correspondiente valor crítico y valor p .

Evaluación de métodos de interpolación

Para llevar a cabo investigaciones sobre el impacto del clima en diferentes ámbitos

es necesario entender la variación de las condiciones climáticas (Hartkamp *et al.*, 1999; Hong *et al.*, 2005). La interpolación de variables climáticas ha sido ampliamente estudiada en todo el mundo y se han empleado varias técnicas para generar superficies continuas tanto de precipitación como de temperatura (Dressler *et al.*, 2000). El proceso de interpolación se considera de suma importancia, en virtud de que, en un plano, se asigna un valor desconocido a un punto georreferenciado, partiendo de valores conocidos cercanos a ese punto. Algunos esfuerzos reportados son los de Hartkamp *et al.* (1999), Téllez *et al.* (2003), Jiménez *et al.* (2004) y Treviño *et al.* (2002), donde el común denominador de estos estudios fue la aplicación de técnicas de interpolación para la obtención de superficies continuas de distintos temas climáticos. Por otro lado, Descroix *et al.* (1997) realizaron un estudio en la cuenca alta del río Nazas, donde se encontró correlación de la precipitación con la altitud (0.85) y distancia al océano (-0.85), indicando que la precipitación se incrementa con la altura y decrece a medida que se aleja del océano, explicando un 85% la variación de la cantidad de lluvia. De estos trabajos se puede concluir que el método de interpolación empleado debe ser en función de las características de la variable de interés, su continuidad espacial, la superficie geográfica sobre la cual se va aplicar y el número de datos disponible.

Resultados

De las 5 088 estaciones climáticas analizadas, sólo 2 165 cumplieron los criterios de calidad y cantidad de datos establecidos con anterioridad. Dichas estaciones se integraron a un Sistema de Información Climática (Díaz y Sánchez, 2007) para facilitar su procesamiento y análisis. Los datos atípicos más comunes detectados con *R-ClimDex* (Zhang y Yang, 2004) fueron temperaturas máximas por debajo de las mínimas, temperaturas mínimas rebasando las máximas y precipitaciones negativas. En caso necesario, los datos faltantes, como ya se indicó, fueron estimados con el *ClimGen* (Nelson, 2003). En cuanto a la evaluación de la bondad de ajuste, las rutinas desarrolladas por Cheng (2006) resultaron ser prácticas y rápidas para calcular los parámetros de forma (α) y escala (β), valores críticos, valores- p , e intervalos de confianza de dichos parámetros. La aplicación iterativa de estas rutinas permitió estimar los parámetros y estadísticos de la prueba de bondad de ajuste para los periodos mayo-octubre y anual. El cuadro 1 corresponde a los resultados del análisis de bondad de ajuste a los datos de precipitación anual; sólo se listan algunas estaciones con los parámetros y estadísticos de prueba resultantes, y se encuentran ordenadas por el valor- p . En la parte superior se encuentran las estaciones con probabilidades altas de que los datos de precipitación se ajusten a una

Cuadro 1. Parámetros y estadísticos de prueba de la bondad de ajuste a la distribución gamma para el periodo anual.

Estación	Años	Pp-Mín	Pp-Máx	Pp-Med	Parámetro		AD	Valor crítico AD	Valor p
					Forma (α)	Escala (β)			
Bustamante	34	279	864	513	13.98	36.65	0.14	0.76	0.98
Yurécuaro	35	486	1 152	763	22.61	33.74	0.15	0.75	0.97
Sto. Domingo Teojomulco	36	1 229	3 152	2 095	33.67	62.22	0.69	0.74	0.07
Chicontepec Tejada	40	1 216	4 163	1 947	11.30	172.37	0.93	0.74	0.02
San Miguel del Monte	23	183	1 949	1 018	4.44	229.03	1.00	0.74	0.01

distribución gamma y en la parte inferior se tienen las que registraron menor valor- p (menor a 0.05), lo que conduce a rechazar la hipótesis de que los datos siguen el patrón de la distribución antes mencionada.

Posterior a la evaluación de la bondad de ajuste se interpolaron los parámetros de forma (α) y escala (β), mediante el programa *Anusplin*, que con base en el trabajo de Díaz et al. (2008) resultó con menor cuadrado medio del error de predicción, al compararlo con los interpoladores espaciales: kriging y cokriging. La figura 1 muestra el comportamiento geográfico del parámetro α ; la figura 2 muestra el comportamiento del parámetro β , cuya información proviene de la precipitación pluvial anual registrada en 1 786 estaciones.

En cuanto a la precipitación anual acumulada y mayo-octubre, el parámetro α , representado en la figura 1, tiende a formar un patrón simétrico en la región de la Sierra Madre Occidental y no en la región de la Sierra

Madre Oriental ni en la región centro sur y sureste del país; en tanto que en regiones como la península de Baja California, Sonora, y gran parte de la región noreste y norte-centro, tiende a presentar fuertes sesgos.

Monitoreo de sequías y excesos de humedad en México mediante el SPI

La demostración de algunas de las aplicaciones basadas en los resultados obtenidos y herramientas desarrolladas en el presente trabajo se describen a continuación. El cálculo del SPI sirve para determinar si en una región y en un periodo determinado hay déficit o exceso de precipitación en cuanto a las condiciones normales de ocurrencia. Fue diseñado para ser un indicador que reconoce la importancia de la escala del tiempo en el análisis de la disponibilidad y uso del agua. El cálculo del SPI se basa en el ajuste de la serie histórica de precipitación a la distribución gamma que se

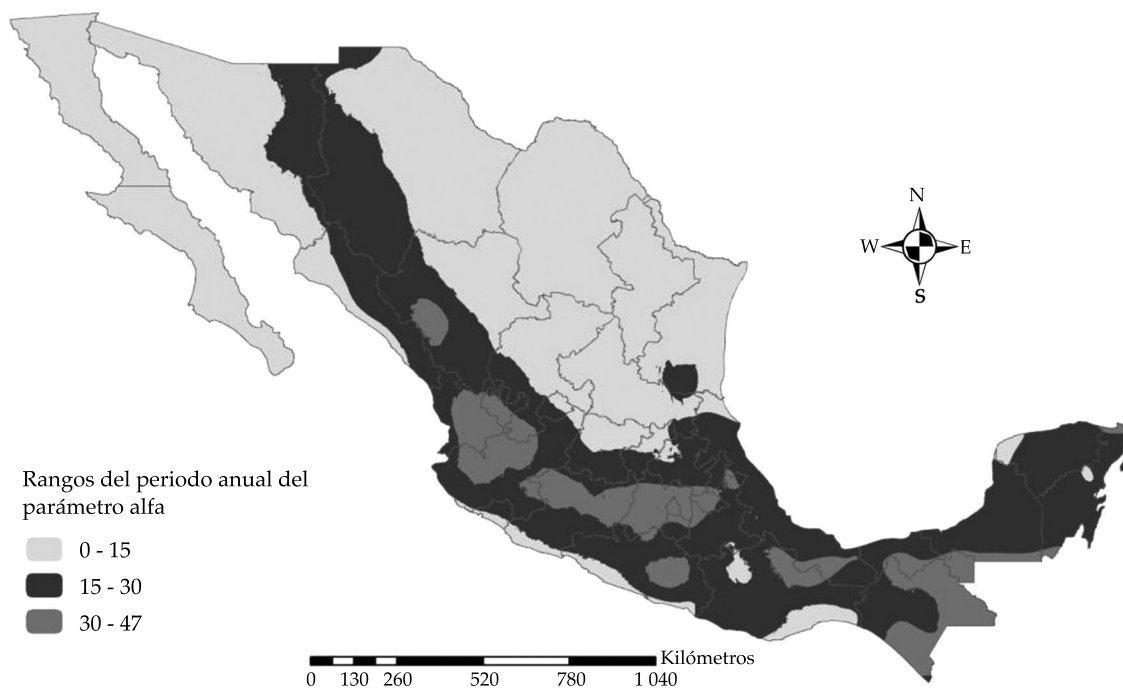


Figura 1. Delimitación geográfica del parámetro α de la distribución de probabilidad gamma en el territorio nacional, correspondiente a la precipitación pluvial anual registrada en 1 786 estaciones.

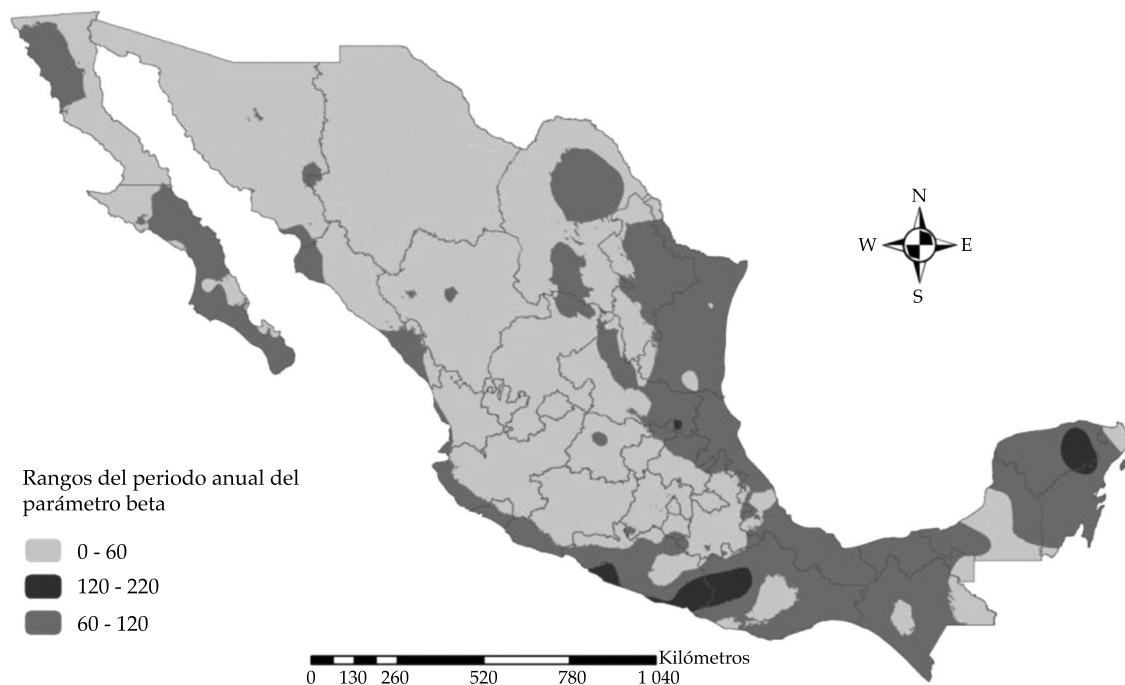


Figura 2. Delimitación geográfica del parámetro β de la distribución de probabilidad gamma en el territorio nacional, correspondiente a la precipitación pluvial anual registrada en 1 786 estaciones.

transforma a una distribución de probabilidad normal estandarizada. De modo que el valor medio del SPI es cero y varianza uno, lo que indica que los valores positivos son mayores a la mediana y los negativos son menores a ésta (Crespo, 2005).

Para ello se estiman los parámetros α y β de la distribución para cada escala de tiempo de interés. Estos parámetros se utilizan para encontrar las probabilidades acumuladas de un evento de precipitación en un periodo determinado de acuerdo con los datos disponibles de cada estación. Dichas probabilidades acumuladas se transforman en una variable estándar con media igual a cero y varianza igual a 1, lo cual es el valor del índice SPI, donde tiene la ventaja de ser calculado para distintos periodos de tiempo, por ejemplo 1, 3, 6, 12 o 72 meses. Una descripción paso a paso de su estimación puede consultarse en el trabajo realizado por Giddings y Soto (2005).

A continuación, el cuadro 2 presenta la categorización de los valores de SPI de acuerdo con los valores obtenidos después del proceso, dicha clasificación es la que utiliza el National Drought Monitoring Center, y algunas otras instituciones alrededor del mundo.

Se realizó el estudio para la estación climatológica de Pánuco, Veracruz, México, donde se interpretan sus valores de SPI para las escalas de tiempo de 6 y 12 meses. En lo referente a la escala de tiempo de seis meses, la intensidad de eventos de humedad se presentó a principios de 1968, poco antes de medio año de 1982, y principios de 1992; este último es uno de los periodos con mayor duración, puesto que abarca de finales de 1990 hasta mediados de 1992; otro evento importante fue el de 1973 hasta principios de 1975; en ambos periodos se nota un ligero descenso, para posteriormente incrementarse nuevamente a muy húmedo y extremadamen-

Cuadro 2. Clasificación de los valores del SPI de acuerdo con el National Drought Monitoring Center.

Valor de SPI	Categorías de sequía
2 o mayor	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Muy seco
-2 o menor	Extremadamente seco

te húmedo. Respecto a las condiciones de sequía, se distinguen cinco eventos de categoría extremadamente seco, sin embargo, los años en que se hace más notable son 1971, 1980 y 1982. En cuanto a intensidad y duración, se destacó el evento de sequía ocurrido a finales de 1962 hasta principios de 1964. En cuanto al periodo anual, se observó que el evento

más húmedo se presentó a principios de 1992, con una duración desde finales de 1990 hasta finales de 1992, presentando dos “picos” extremadamente húmedos; en la categoría de muy húmedo es donde se hace presente la mayor duración, ya que abarca a partir de medio año de 1973 hasta 1977. En relación con la sequía, se apreció un evento extremadamente seco a mediados de 1965 y otro con muy poca presencia en 1983; en intensidad y duración de algún evento de sequía ocurrió a finales de 1961 hasta finales de 1965, donde alcanzó la categoría de extremadamente seco. En el lapso de 1994 a 2001 se presentó un evento clasificado como moderadamente seco, también considerado como de mayor duración. Por último y en términos generales, es importante hacer mención que la frecuencia de la sequía en los periodos de 6 y 12 meses se hace cada vez más presente en sus diferentes

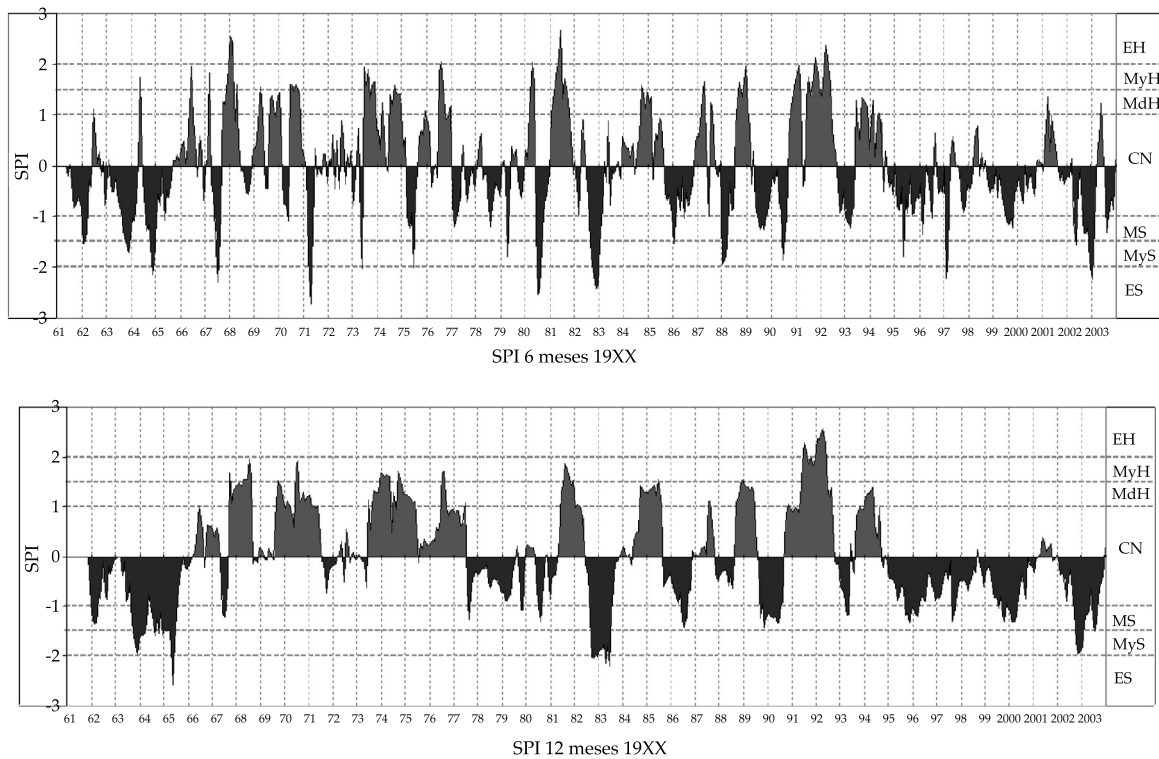


Figura 3. Valores del SPI generados para diferentes escalas de tiempo en la estación climatológica Pánuco del estado de Veracruz, para el registro histórico de la precipitación del periodo 1961-2003.

categorías, haciéndose más ausentes los periodos de humedad (figura 3).

Otra de las ventajas del cálculo de los valores del SPI es que permite la comparación de escalas temporales de interés particular, por ejemplo, en la figura 4 se presentan los valores de SPI para el periodo mayo-octubre de Pánuco, Veracruz, para el periodo 1961-2003.

De la figura 4 se puede apreciar la frecuencia de eventos extremos manifestados en dos de cada 27 años; las condiciones del temporal van a ser de sequía extrema y de condiciones muy húmedas en la misma proporción. Respecto a la asociación de sequías extremas con años Niño o Niña, se puede indicar que 1982 fue uno de los años más desastrosos de la agricultura en México (Magaña y Morales, 2004) y, como se aprecia en la gráfica, el valor del SPI sí captó la presencia del fenómeno en 1982; sin embargo, la sequía de 1994 no se reporta como evento Niño o Niña, por lo que se requerirían estudios más profundos al respecto. Magaña y Morales (2004) señalan que el evento El Niño más intenso fue el ocurrido entre los años 1991 y 1995, el cual fue registrado perfectamente por el SPI como sequía extrema.

Incertidumbre climática y política pública

En la definición e implementación de políticas públicas dirigidas a promover el desarrollo rural sustentable y mejorar las condiciones de vida de los productores del campo mexicano es necesario, como ha quedado de manifiesto en el presente trabajo, cuantificar y delimitar el riesgo climático. Esto significa considerar los diagnósticos y pronósticos climáticos realizados para diferentes variables atmosféricas que impactan en el desarrollo y la productividad de los cultivos, la conservación de los recursos naturales y el bienestar social en general. Este esquema de análisis ayudaría a evitar impactos negativos significativos que redundarían en elevados costos económicos y sociales para el país. En la figura 5 se muestra la distribución espacial del SPI durante el año 1982, notándose que más del 50% de la superficie nacional se vio afectada por sequía severa, demeritando las bondades hipotéticas de los programas nacionales promulgados en esa época. Las causas fueron desastrosas para el país, en donde cerca del 40% de la agricultura de temporal sembrada con maíz fue declarada

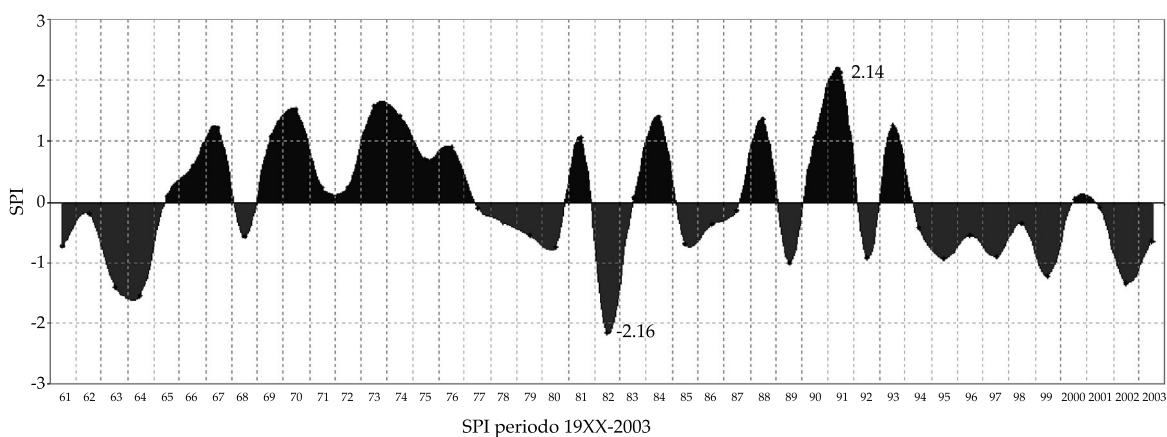


Figura 4. Frecuencia, intensidad y severidad de eventos de sequía y humedad para la estación de Pánuco, Veracruz.

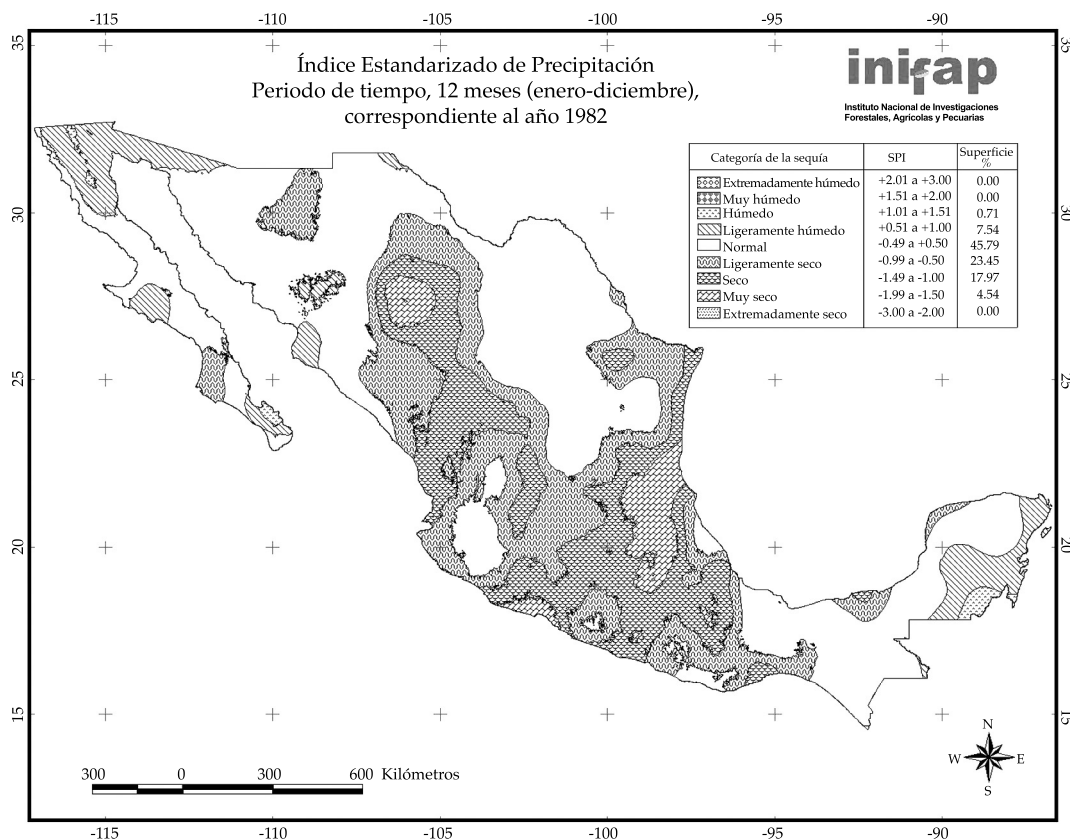


Figura 5. Distribución espacial Índice Estandarización de Precipitación, donde se ha reportado condiciones de El Niño.

como siniestrada a causa, principalmente, de la intensa sequía.

Con la idea de concentrar los resultados obtenidos se presenta el cuadro 3, que muestra un concentrado de cómo han variado través del tiempo las condiciones de sequía y humedad en el territorio nacional.

De esta manera puede apreciarse que para 1961, cerca del 73% del territorio nacional se ubicó en la categoría de condiciones normales y cerca del 17% del mismo en condiciones de ligera sequía.

La información de la figura 6 proporciona un reflejo del comportamiento histórico de los eventos de sequía, los cuales han ido en aumento a partir de la década de los noventa, en tanto que las condiciones de humedad han venido disminuyendo notablemente a partir de la misma década.

Sin duda, estos indicadores pueden considerarse para contar con apreciaciones objetivas de las probabilidades de éxito en acciones con impacto social y adecuar la toma de decisiones en consecuencia, al considerar los distintos escenarios climáticos que pueden ocurrir en el sector agropecuario nacional.

Discusión

Para la integración de series climáticas de calidad y sin datos faltantes, se sugiere el uso del *software R-ClimDex* como una alternativa para valorar la calidad y el volumen de datos de las series históricas diarias de precipitación. *ClimGen* mostró ser un generador climático confiable para la estimación de datos faltantes diarios de precipitación, ya que respeta los

Cuadro 3. Porcentaje de la superficie incidente de la república mexicana acorde con las diferentes clasificaciones del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) anual, para el periodo 1961-2003.

Año	Extremadamente húmedo	Muy húmedo	Húmedo	Ligeramente húmedo	Normal	Ligeramente seco	Seco	Muy seco	Extremadamente seco
1961	0.00	0.00	0.34	8.20	72.93	16.79	1.61	0.12	0.00
1962	0.00	0.00	0.61	2.74	47.39	32.87	16.23	0.15	0.00
1963	0.00	0.00	1.97	10.60	64.44	19.98	2.93	0.08	0.00
1964	0.00	0.00	0.01	6.03	62.61	21.56	8.85	0.95	0.00
1965	0.00	0.19	1.14	8.75	64.35	21.85	3.72	0.00	0.00
1966	0.00	0.00	4.77	24.99	66.23	2.50	0.81	0.41	0.29
1967	0.35	4.60	14.91	22.66	44.60	11.39	1.51	0.00	0.00
1968	0.01	1.93	10.34	24.51	47.50	8.76	4.36	2.25	0.34
1969	0.02	0.80	5.95	15.09	40.78	21.32	12.76	3.21	0.07
1970	0.00	0.00	0.72	10.28	62.68	20.53	5.26	0.39	0.15
1971	0.64	1.22	5.25	17.04	51.88	18.59	4.77	0.61	0.00
1972	0.00	0.20	5.11	20.47	62.54	11.48	0.40	0.00	0.00
1973	0.37	2.28	10.43	27.13	45.23	14.23	0.19	0.00	0.00
1974	0.00	0.10	3.74	11.37	61.15	16.66	5.55	1.25	0.17
1975	0.00	0.00	0.87	5.73	56.96	27.12	9.24	0.08	0.00
1976	0.00	4.35	15.88	26.48	47.39	4.60	1.30	0.00	0.00
1977	0.00	0.08	0.23	2.89	55.35	31.10	9.76	0.59	0.00
1978	0.82	2.81	9.82	25.05	59.47	2.03	0.00	0.00	0.00
1979	0.00	0.00	1.49	9.35	47.96	27.35	11.97	1.88	0.00
1980	0.00	0.00	2.23	10.00	64.04	17.37	6.03	0.33	0.00
1981	0.00	3.50	26.78	32.91	35.18	1.63	0.00	0.00	0.00
1982	0.00	0.00	0.71	7.54	45.79	23.45	17.97	4.54	0.00
1983	0.22	4.70	11.85	13.68	56.30	11.45	1.60	0.00	0.00
1984	0.00	5.55	22.44	28.33	40.33	2.44	0.91	0.00	0.00
1985	0.00	0.00	0.31	12.67	76.87	10.14	0.01	0.00	0.00
1986	0.00	0.47	14.88	16.09	48.17	17.77	2.61	0.01	0.00
1987	0.00	0.00	1.58	17.64	39.79	31.88	8.93	0.18	0.00
1988	0.00	0.29	1.20	11.69	71.19	13.00	1.75	0.84	0.04
1989	0.00	0.00	0.00	3.05	53.34	33.36	9.01	1.17	0.07
1990	0.00	1.95	15.54	22.65	44.57	12.30	2.80	0.18	0.00
1991	0.00	0.08	12.95	24.67	50.44	9.59	2.23	0.04	0.00
1992	0.00	2.11	12.53	36.98	47.04	1.34	0.00	0.00	0.00
1993	0.00	0.59	3.99	18.64	66.23	9.92	0.63	0.00	0.00
1994	0.00	0.00	1.66	8.80	44.09	29.04	10.68	5.73	0.00
1995	0.00	0.40	3.91	12.27	41.81	29.63	12.04	0.00	0.00
1996	0.00	0.00	0.31	6.08	62.27	22.74	8.60	0.00	0.00
1997	0.00	0.00	1.21	10.23	78.42	10.00	0.14	0.00	0.00
1998	0.00	0.09	1.18	8.24	48.08	31.49	10.80	0.12	0.00
1999	0.00	0.64	3.35	8.83	39.44	28.02	14.71	4.47	0.54
2000	0.00	0.00	1.59	6.54	64.94	21.56	4.77	0.60	0.00
2001	0.00	0.00	0.37	1.54	60.77	30.49	6.68	0.15	0.00
2002	0.00	0.00	2.61	9.91	63.03	20.55	3.90	0.00	0.00
2003	0.00	0.00	2.34	11.74	63.14	17.96	4.75	0.07	0.00

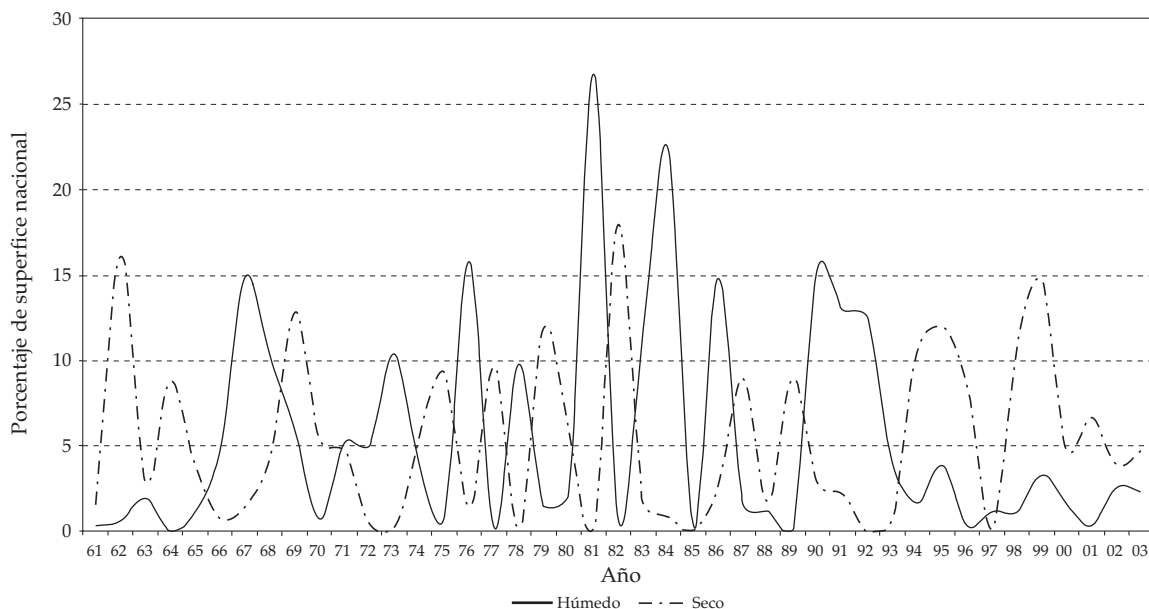


Figura 6. Comportamiento cronológico de las superficies registradas bajo condiciones de humedad y sequía en México.

datos existentes y sólo genera los faltantes; además, resultó más preciso al compararlo mediante pruebas estadísticas, con otros generadores climáticos. Respecto a la bondad de ajuste de la precipitación a la distribución gamma, la distribución de probabilidad teórica gamma de dos parámetros es la adecuada para la modelación probabilística de la precipitación pluvial en México tanto para los registros anuales como para los del periodo mayo-octubre, y se propone su uso en los cálculos de anomalías climáticas y la predicción de eventos extremos. No se observó algún patrón geográfico, climático o espacial que influyera en la bondad de ajuste de esta distribución, por lo que podrá utilizarse en cualquier clima o espacio geográfico de México. El método adecuado de interpolación espacial de la precipitación pluvial es el thin plate smoothing spline, dado que registró el menor cuadrado medio del error de predicción al compararlo con algunos otros métodos de interpolación (kriging, inverso de la distancia al cuadrado-IDW- y cokriging). Se recomienda usar

los mapas interpolados de los parámetros de forma y escala de la distribución gamma para modelar el ciclo hidrológico y el cambio climático, y para el cálculo probabilístico de eventos extremos en México. El SPI resultó ser una herramienta sencilla de calcular e interpretar, y captó en forma eficiente los diversos periodos de humedad y sequía en México. Se deduce que con las series históricas calculadas e interpoladas del SPI es posible monitorear puntual y espacialmente la intensidad, frecuencia y duración de las sequías o exceso de humedad en México. Al concentrar los resultados de la interpolación de las series históricas del SPI, se encontró que el periodo 1993-2003 se caracteriza por un incremento en la duración de las sequías y una baja en la intensidad de las mismas. Al no considerar los avances de los conocimientos científicos y no aplicarlos a la definición de políticas públicas, los tomadores de decisiones podrían incurrir en errores considerables, tal es el caso del lanzamiento del programa Sistema Alimentario Mexicano (SAM) en

1982, para promover la siembra de maíz en México, sin considerar que las condiciones climáticas del país estaban afectadas por la influencia de un año Niño, por lo que el porcentaje de siniestro fue uno de los más altos de la historia. La delimitación espacial del impacto de eventos climáticos como de El Niño y La Niña pueden monitorearse a través de los mapas interpolados del SPI y deben ser la base para el estudio de la variabilidad, cambio climático y zonas de vulnerabilidad en México. Finalmente, algunos otros resultados y conclusiones relevantes pueden consultarse con más detalle en el trabajo de Díaz (2009).

Conclusiones

Se desarrolló un proceso metodológico para la delimitación espacio-temporal de la variabilidad de la precipitación pluvial en México. Con base en el ajuste de las series históricas de precipitación a la función de densidad gamma de dos parámetros, se procedió al cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación, el cual resultó ser un método sencillo, preciso y práctico para detectar la intensidad, frecuencia y duración de las anomalías o variabilidad puntual y espacial de la precipitación pluvial en México. Es importante destacar que mediante el cálculo e interpolación de series históricas del SPI se detectó una tendencia al incremento y una baja en la intensidad de los eventos de sequía en México. Los resultados obtenidos en la presente investigación coadyuvarán, entre otros aspectos, al modelaje del ciclo hidrológico, al estudio del cambio climático y a la delimitación de zonas vulnerables en México.

Recibido: 11/02/10
Aceptado: 14/04/11

Referencias

- BARGER, G.L. and THOM, H.C.S. Evaluation of drought hazard. *Agronomy Journal*. Vol. 41, 1949, pp. 519-526.
- CHENG, R. Validating and comparing simulation models using resampling. *Journal of Simulation*. Vol. 1, 2006, pp. 53-63.
- CRESPO, P.G. *Comparación de dos metodologías para el cálculo de severidad de sequía para doce reservas de la biosfera mexicana*. Informe de beca MAB [en línea]. Consultado el 24 de febrero de 2006. Disponible en *World Wide Web*: <http://www.unesco.org.uy/mab/fileadmin/ciencias%20naturales/mab/crespo-becamab.pdf>.
- DESCROIX, L., NOUVELOT, J.F. y ESTRADA, J. *Geografía de las lluvias en una cuenca del Norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la región hidrológica* 36. Folleto Científico No. 10. SAGARPA. INIFAP. CENID RASPA/ORSTOM. Gómez Palacio, Durango, México, 1997.
- DÍAZ, P.G. *Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México: una aproximación a la evaluación de impactos*. Tesis de Doctorado. Ciudad Obregón, México: Instituto Tecnológico de Sonora, 2009, 152 pp.
- DÍAZ, P.G., SÁNCHEZ, I., QUIROZ, R., GARATUZA, J. WATTS, C. y CRUZ, R. *Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México*. *Agric. Téc. Méx.* Vol. 34, núm. 3, 2008, pp. 279-287.
- DÍAZ, P.G. y SÁNCHEZ, I. *Sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México*. En Sánchez, I. y Chebhouni, G. (compiladores). *Procesos hidrológicos en zonas áridas y semiáridas*. Gómez Palacio, México: INIFAP-RASPA, 2007, pp. 21-39.
- DRESSLER, K.A., FASSNACHT, S.R., BALES, R.C., DAVIS, R.E., LAMPKIN, D., and MYERS, D.E. *Geostatistical interpolation of point-measured SWE in the Colorado River basin*. EOS Transactions, American Geophysical Union, Fall Meet. 81 Suppl., 48, Arizona, USA, 2000, F397.
- GARCÍA, E., VIDAL, R., TAMAYO, L., REYNA, T., SÁNCHEZ, R. y SOTO, M. *Precipitación y probabilidad de la lluvia en la república mexicana y su evaluación*. México D.F.: Instituto de Geografía, UNAM y Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Secretaría de la Presidencia, 1973.
- GIDDINGS, L. and SOTO, M. Standardized precipitation index zones for Mexico. *Atmósfera*. Vol. 8, núm. 1, 2005, pp. 33-56.
- GOUROU, P. y PAPY, L. *Compendio de Geografía General*. Madrid: Rialp, S.A. 1977, 309 pp.
- GUTTMAN, B.N. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 34, No. 1, 1998, pp. 113-121.
- GREENWOOD, J.A. and DURAND, D. Aids for fitting the gamma distribution by maximum likelihood. *Technometrics*. Vol. 2, 1960, pp. 55-65.
- HADDAD, K. and RAHMAN, A. *Producers, decision support systems and GPFARM: lessons learned from a decade of development*. International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of

- Australia and New Zealand, Canberra, Australia, 2005, pp. 170-176.
- HARTKAMP, A.D., DE BEURS, K., STEIN, A., and WHITE, J.W. *Interpolation techniques for climate variables*. NRG-GIS Series 99-01. Texcoco, México: CYMMYT, 1999, 26 pp.
- HAYES, M.J., SVOBODA, M.D., WILHITE, D.A., and VANYARKHO, O.V. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 80, 1999, pp. 429-438.
- HONG, Y., NIX, H.A., HUTCHINSON, M.F., and BOOTH, T.H. Spatial interpolation of monthly mean climate data for China. *International Journal of Climatology*. Vol. 25, 2005, pp. 1369-1379.
- HUTCHINSON, M.F. *Anusplin (computer program) version 4.3*. Canberra, Australia: The Australian National University. Centre for Resource and Environmental Studies, 2004.
- JIMÉNEZ, A., VARGAS, V., SALINA, W.E., AGUIRRE, M. DE J.M. y RODRÍGUEZ, D. Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas*. Vol. 53, 2004, pp. 58-74.
- KOMUSCU, A.U. Using the SPI to analyze spatial and temporal drought patterns in Turkey. *Drought Network News*. Vol. 11, No. 1, 1999, pp. 7-13.
- MAGAÑA, V.O. y MORALES, C. *Introducción de los impactos de El Niño en México*. Magaña, V.O. (editor). México, D.F.: Pembu, 2004, p.1-17.
- MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J., and KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. *Memories of Eighth Conference on Applied Climatology*. American Meteorology Society, Anaheim, California, 1993, pp. 179-186.
- MOSIÑO, A.P. and GARCÍA, E. The variability of rainfall in Mexico and its determination by means of the gamma distribution. *Geogr. Ann.* Vol. 63, núm. 1-2, 1981, pp. 1-10.
- NELSON, R. *ClimGen (computer program) versión 4.01.5* [en línea]. Washington, D.C.: Washington State University, consultado el 5 de octubre de 2003. Disponible en *World Wide Web*: <http://www.bsyse.wsu.edu/climgen/>.
- SÁNCHEZ, I., DÍAZ, G., ESTRADA, J. y CUETO, J.A. *Incertidumbre climática y toma de decisiones: consideraciones de riesgo y vulnerabilidad social*. Folleto Científico No. 25. Gómez Palacio, México: INIFAP-RASPA, 2008, 55 pp.
- SIAP. México: *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*, consultado el 1 de febrero de 2008. Disponible en *World Wide Web*: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>.
- TADESSE, T., WILHITE, D.A., HARMS, S.K., HAYES, M.J., and GODDARD, S. Drought monitoring using data mining techniques: a case study for Nebraska, USA. *Natural Hazards*. Vol. 33, No. 1, 2004, pp. 137-159.
- TÉLLEZ, O., DÁVILA, P.D., STEIN, J.L. y LIRA, R. Sistema de información climática de la reserva de la biosfera Tehuacan-Cuicatlán, México y sus aplicaciones. *GEOS*. Vol. 23, 2003, pp. 221-222.
- THOM, H.C.S. A note on the gamma distribution, monthly weather review. *American Meteorological Society*. Vol. 86, No. 4, 1958, pp. 117-122.
- TREVIÑO, E.J., MUÑOZ, C.A., CAVAZOS, C. y BARAJAS, L. Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL*. Vol. 5, 2002, pp. 525-530.
- WILKS, D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Ithaca, USA: Academic Press. 1995, 467 pp.
- WILKS, D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2nd ed. Ithaca, USA: Academic Press, 2006, 627 pp.
- ZHANG, X. and YANG, F. *RClimDex (computer program) versión 1.0* [en línea]. Ontario: Climate research branch environmental Canada, consultado el 9 de noviembre de 2004. Disponible en *World Wide Web*: <http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.html>.

Abstract

DÍAZ-PADILLA, G., SÁNCHEZ-COHEN, I., QUIROZ, R., GARATUZA-PAYÁN, J., WATTS-THORP, C., CRUZ-MEDINA, I.R. & GUAJARDO-PANES, R.A. *Space-time variation of rainfall in Mexico: an approach for assessing impacts*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. II, No. 4, October-December, 2011, pp. 51-64.

This work discusses the development of a process to approach the study of spatial and temporal rainfall patterns in Mexico, considering historical information for at least 20 years from 2 165 weather stations belonging to the National Weather Service. Outlier data were eliminated and estimates were made using ClimGen, provided that the missing information did not exceed 25% of the total. Goodness-of-fit was tested with respect to the two-parameter gamma distribution for the annual period and the period from May to October, the latter of which registers 80% of the annual rainfall in Mexico. It was noted that 1 786 of the stations for the annual period and 1 727 stations for May to October adjusted to the gamma distribution. The following spatial interpolation techniques were assessed: kriging, co-kriging, inverse distance and thin-plate smoothing spline. The latter showed lower mean square error and was considered in the interpolation of the shape and scale parameters to generate precipitation maps for 70, 80 and 90% rainfall probability. Finally, we analyzed the frequency, duration and intensity of wet and dry periods in Mexico considering the classification by the Standardized Precipitation Index (SPI), which is interpolated to generate annual raster maps for the period 1961-2003 with a resolution of 900 meters. An increase was observed in the duration of droughts and a decrease in their intensity. This research aims to help improve the modeling of the hydrological cycle, the study of climate change and the delineation of vulnerable areas in Mexico.

Keywords: precipitation, spatial interpolation, goodness of fit, SPI.

Dirección institucional de los autores

Dr. Gabriel Díaz Padilla

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias
Km. 3.5 carretera Federal Xalapa-Veracruz
(edificio SAGARPA), Colonia Ánimas
91190 Xalapa, Veracruz, MÉXICO
Teléfono: +52 (228) 8125 744
diaz.gabriel@inifap.gob.mx

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias
Km. 6.5, margen derecha Canal de Sacramento
35150 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 7191 076
sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

Dr. Roberto Quiroz

Centro Internacional de La Papa-Perú
Avenida La Molina 1985, Lima, PERÚ
Teléfono: +51 (1) 3496 017
cip-pse@cgiar.org

Dr. Jaime Garatuza Payán

Instituto Tecnológico de Sonora
Calle Antonio Caso s/n

Colonia Villa ITSON
85130 Ciudad Obregón, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (644) 4109 000, extensión 1328
gararatuza@itson.edu.mx

Dr. Christopher Watts Thorp

Universidad de Sonora
Boulevard Luis Encinas y Rosales s/n
Colonia Centro
83000 Hermosillo, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (662) 2592 108, extensión 8108
watts@aramuri.fisica.uson.mx

Dr. Isidro Roberto Cruz Medina

Instituto Tecnológico de Sonora
Calle Antonio Caso s/n
Colonia Villa ITSON
85130 Ciudad Obregón, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (644) 4109 000, extensión 2098
rcruz@itson.mx

Lic. Rafael Alberto Guajardo Panes

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias
Km. 3.5 carretera Federal Xalapa-Veracruz
(edificio SAGARPA), Colonia Ánimas
91190 Xalapa, Veracruz, MÉXICO
Teléfono: +52 (228) 8125 744
guajardo.rafael@inifap.gob.mx