

COMPORTAMIENTO ESPACIO TEMPORAL DE LA SEQUÍA EN EL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

Temporal and Spatial Behavior of Drought in the State of Durango, Mexico

Roberto Rivera del Río^{1‡}, Guillermo Crespo Pichardo², Ramón Arteaga Ramírez¹
y Abel Quevedo Nolasco²

RESUMEN

La vulnerabilidad de México frente a los efectos devastadores de la sequía muestra evidencias de estarse incrementando. De 1910 a 1977 reportan 38 sequías y de 1955 a 1977 se han presentado de 7 a 12 sequías en el estado de Durango; este problema es preocupante para la sociedad, por su gran impacto en la destrucción de cosechas, disponibilidad de agua y todo lo que de ahí deviene. Por lo tanto, el estudio de su comportamiento y monitoreo deben considerarse como una prioridad nacional y regional, lo cual es complejo en sí mismo, pues son diversas las definiciones de sequía y los métodos de estudio; es necesario evaluar y estandarizar procedimientos para facilitar el que se formen redes de información. Los métodos más empleados en México son el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) y el índice estandarizado de precipitación (SPI), éstos no consideran las mismas variables de análisis, lo cual dificulta la comparación y extrapolación de resultados. De ahí que en esta investigación se evalúa la consistencia del diagnóstico que hace cada método. El área de estudio corresponde al estado de Durango, México. La obtención, la preparación y el procesamiento de datos se hizo con los programas de cómputo ERIC1, Surfer Versión 6.0 y Mathematica 4.0. Las variables climatológicas fueron precipitación mensual, temperatura media mensual y evapotranspiración potencial. Los resultados indican que, para escalas de tiempo mensual, el método PDSI define las variables de la sequía (inicio, fin, duración y frecuencia) con mejor consistencia y claridad, por lo que este método es mejor para fines de diseño de planes de prevención y contingencia a corto plazo, respecto al método SPI.

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Preparatoria Agrícola. 56230 Chapingo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (rivera580@hotmail.com)

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

Recibido: abril de 2005. Aceptado: junio de 2007.
Publicado en Terra Latinoamericana 25: 383-392.

Palabras clave: índice de severidad de sequía, datos climáticos, variables de sequía.

SUMMARY

Devastating droughts have been shown to be increasing in frequency in Mexico. Between 1919 and 1977, 38 droughts were reported, and from 1955 to 1977, 7 to 12 droughts have occurred in the State of Durango. This problem is of great concern for the society because of its great impact: destruction of harvests, decrease in water availability, and the consequences thereof. The study of drought behavior and monitoring must be considered a national and regional priority. This is a complex task since definitions of drought vary as do methods of studying them. It is necessary to evaluate and standardize procedures to facilitate the formation of information networks. The most used methods in Mexico are the Palmer drought severity index (PDSI) and the standardized precipitation index (SPI), which consider different analytical variables, making it difficult to compare and extrapolate results. This study assesses consistency of the diagnoses performed by each method. The study area was the State of Durango, Mexico. Data were obtained, prepared and processed with software ERIC1, Surfer Version 6.0 software and Mathematica 4.0. Meteorological data included monthly precipitation, average monthly temperature and potential evapotranspiration. The results indicate that for monthly time scales, the PDSI method defines drought parameters: beginning, ending, duration and frequency, with better consistency and clarity. It is concluded that this method is better for developing prevention and contingency plans than the SPI method.

Index words: index, drought severity, climatic data, parameters of drought.

INTRODUCCIÓN

El avance en las investigaciones referidas al estudio de la sequía aún resultan insuficientes para encontrar

los mecanismos adecuados para prevenir o mitigar los efectos de ésta, dada su variabilidad en la dimensión espacio temporal y el impacto diferenciado en la diversidad de ecosistemas en el mundo.

Aún se requiere, entre otras actividades, de una mayor claridad conceptual y una evaluación detallada de las bondades y debilidades de cada uno de los métodos que se han desarrollado para cuantificar la sequía. La experiencia que se ha generado en este tema, en diversos ámbitos, permite reconocer que la planeación a través de mecanismos de monitoreo, evaluación, mitigación y manejo de riesgos se requiere en todo el mundo, especialmente en donde la sequía se presenta cada vez con mayor frecuencia y con efectos devastadores, como es el caso de México, según refieren los trabajos de Florescano (1980), quien reporta 38 sequías de 1910 a 1977, y Magaña *et al.* (1997), quienes refieren que de 1955 a 1977 se han presentado de 7 a 12 sequías en el estado de Durango. De ahí la urgente necesidad de generar redes de información regional, estatal e internacional, por lo que es necesaria la evaluación y, en su caso, estandarización de procedimientos de monitoreo.

En este trabajo, considerando el mismo escenario de análisis espacio-temporal, se revisan dos métodos de cuantificación de severidad de sequía: el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) propuesto por Palmer (1965) y el índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) propuesto por McKee *et al.* (1993). El método SPI en México lo aplica el Centro de Investigaciones Sobre la Sequía, del Instituto de Ecología A. C. El método PDSI se aplica en los Estados Unidos, por el Centro Nacional de Mitigación de la Sequía. La estructura de ambos métodos argumenta intrínsecamente su propio concepto de la sequía: el método PDSI se plantea en términos de balance de humedad, en tanto que el método SPI desarrolla su propuesta con base en un concepto de tipo climático y matemáticamente en una solución estadística, pues sólo considera la precipitación como estimador de sequía. En este estudio se adopta la definición de sequía meteorológica propuesta por Wilhite y Glantz (1985), quienes señalan que la sequía es un proceso natural errático, que se origina como resultado de una deficiencia de precipitación durante un periodo de tiempo extenso, en general de una estación o más, provoca en consecuencia un desbalance hídrico que afecta las actividades humanas y los procesos ambientales; se trata de una situación deficiente de precipitación en relación con un comportamiento promedio considerado como normal.

Lohani y Loganathan (1997) aplican el método PDSI para caracterizar el comportamiento de sequías y proponen un sistema de alerta temprana y planes para la mitigación de sequías. Alley (1984) analiza las limitaciones y supuestos del método PDSI y concluye que, en tanto no se superen sus deficiencias, seguirá siendo uno de los mejores métodos de evaluación; por su parte, Keyantash y Dracup (2002) realizan una comparación de índices de sequía y concluyen que el método SPI es el que mejor estima la severidad de sequía. Guttman (1998) compara los métodos PDSI y SPI para diferentes escalas de tiempo y concluye que el método SPI es más fácil de interpretar. Los resultados y conclusiones son diversos, por lo que es necesario realizar estudios para diferentes periodos y espacio, de tal manera que después se pueda definir la mejor herramienta de evaluación o, en su caso, reconocer el ámbito en el que cada método puede mostrar su mayor capacidad de diagnóstico.

Considerando como punto de partida la definición de sequía adoptada, se planteó el objetivo de evaluar el comportamiento espacio temporal de la sequía, en sus variables: inicio, fin, duración y frecuencia, en el estado de Durango, con los métodos de diagnóstico referidos. La hipótesis indica que el método PDSI proporciona una mejor definición de las variables de sequía, en el tiempo y en el espacio, respecto al SPI, para escalas de tiempo mensual. Dado que el PDSI explica el fenómeno de sequía como un proceso integral, donde participan propiedades del suelo y su capacidad de retención de humedad y no sólo depende de la precipitación, los resultados generados podrán reforzar el análisis acerca de la mejor metodología a recomendar para fines de monitoreo a escala mensual, como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones político administrativas de los fondos para desastres naturales en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las regiones más afectadas por sequía en México son las del norte, noreste y noroeste; éstas constituyen 70% del país y reciben menos de 40% de la precipitación; en este contexto se seleccionó al estado de Durango, el cual se ubica entre 26° 48' y 22° 19' N, y entre 102° 28' y 107° 11' O (INEGI, 2000).

La información se extrajo de la base de datos climáticos ERIC1 (IMTA, 1995); los datos se organizaron y las estaciones se seleccionaron. Se estimaron los índices de severidad de sequía o humedad mensual de Palmer; se desarrolló el programa SPI para estimar

los índices de sequía de McKee *et al.* (1993); los valores de los índices de ambas estimaciones se procesaron con SURFER Versión 6.01 (Golden Software, 1999), para la elaboración de mapas.

Extracción de Variables Climáticas y Preparación de la Base de Datos

Se extrajeron todas las estaciones pertenecientes al estado de Durango, del periodo 1960-1990; la información para cada estación fue nombre, coordenadas, precipitación total mensual, temperatura media máxima mensual, temperatura media mínima mensual y temperatura media mensual. Se generó un archivo de salida, denominado bdtodos.txt, el cual contiene los datos referidos, previa definición del criterio para seleccionar las estaciones, que establece trabajar con un número mínimo de 15 años con datos disponibles y con una proporción de datos faltantes por año no mayor de 20%. Para las estaciones seleccionadas con datos faltantes se realizó una estimación con el modelo de relación A/B entre la estación con dato faltante (A) y la estación más cercana (B). Finalmente, se organizó la información contenida en bdtodos.txt, exactamente como deberá ingresarse a los siguientes programas.

Método del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)

Descripción. El método PDSI se basa en el concepto de demanda-suministro de agua y toma en cuenta el déficit entre la precipitación real y la precipitación necesaria para mantener las condiciones de humedad climática o normal. El procedimiento de cálculo requirió como datos de entrada, además de la precipitación mensual, las estimaciones de la evapotranspiración potencial calculada por el método de Thornthwaite modificado (Palmer, 1965) y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, con una lámina estándar de 200 mm. A cada valor del índice se asignó el nombre de la categoría correspondiente, de acuerdo con el Cuadro 1.

Estimación del Índice de Severidad de Sequía de Palmer

El proceso se basa en un algoritmo que desarrolla cada uno de los cálculos, estimaciones y operaciones lógicas descritas en la propuesta de Palmer (1965) para

obtener el índice de severidad de sequía e incorpora procedimientos que permiten generar archivos de salida con resultados parciales que facilitan la revisión de cálculos paso a paso.

Método del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

Descripción. El método SPI parte del principio de condición de sequía como el número de veces que se presenta una desviación de la precipitación respecto a un comportamiento considerado normal. El cálculo se basa en el uso de registros de precipitación, de un lugar, ajustado a una función de probabilidad gamma:

$$G(x) = [1 / (\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha))] (X^{\alpha-1}) (e^{-x/\beta})$$

donde: X es la precipitación, β es un parámetro de escala de X, α es un parámetro de forma de la curva y $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma incompleta: $\int_0^x e^{-x} X^{-(\alpha-1)} dx$, posteriormente, se transforma a una distribución de probabilidad normal estandarizada, de tal modo que el valor medio del SPI, para ese lugar, es cero y varianza uno. El método SPI utiliza un sistema de clasificación para definir intensidades de sequía (Cuadro 2).

Aplicación del programa SPI

Como dato de entrada se requirió la precipitación total mensual del archivo bdtodos.txt y el programa realizó una serie de cálculos matemáticos y estadísticos; se incluyeron procesos que permitieron la revisión de resultados parciales, hasta obtener finalmente el valor del índice Z, donde Z es el índice de anomalía de humedad para cada mes. Se aplicó el software Mathematica Versión 4.0 (Wolfram, 1999), con el cual se generaron tablas de probabilidad acumulada gamma a partir de valores continuos del parámetro alfa y de x/β , dichos

Cuadro 1. Índice de severidad de sequía de Palmer.

Valor del índice	Clasificación	Valor del índice	Clasificación
4.0 ó mayor	Extremadamente húmedo	-4.00 o menor	Sequía extrema
3.00 a 3.99	Muy húmedo	-3.00 a -3.99	Sequía severa
2.00 a 2.99	Moderadamente húmedo	-2.00 a -2.99	Sequía moderada
1.00 a 1.99	Ligeramente húmedo	-1.00 a -1.99	Sequía ligera
0.5 a 0.99	Humedad incipiente	-0.5 a -0.99	Sequía incipiente
0.49 a -0.49	Cercano a lo normal		

Cuadro 2. Clasificación del Índice Estandarizado de Precipitación para periodos húmedos y secos.

Valor del índice	Categoría de sequía	Valor del índice	Categoría de sequía
2 ó mayor	Extremadamente húmedo	-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
1.5 a 1.99	Muy húmedo	-1.5 a -1.99	Severamente seco
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo	-2 ó menor	Extremadamente seco
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal		

valores de probabilidad se requirieron para obtener el valor de probabilidad acumulada, gamma (Gx); por último, con base en el valor de Z, se asignó la categoría de sequía o humedad correspondiente.

Elaboración de Mapas

Con el programa SURFER Versión 6.01 (Golden Software, 1999) se interpolaron los valores de los índices mensuales para obtener los mapas donde se representa la distribución espacial de dichos valores. Para todas las estaciones seleccionadas del estado, se obtuvieron 12 mapas por año; durante el número de años con datos disponibles, para las 95 estaciones meteorológicas, resultaron un total de 360 para PDSI y 360 para SPI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como parte del proceso de preparación de la base de datos, con el fin de validar el método de estimación de datos faltantes, se corrió una regresión lineal simple entre una muestra de datos reales y sus respectivos estimados, para la estación 10122 de San Diego,

municipio de Santiago Papasquiaro, Durango, y se registró una r^2 de 0.928. Finalmente, se seleccionaron 95 estaciones meteorológicas, con cuyos datos se estimaron los valores de PDSI y SPI, y se generaron 1425 y 1140 archivos de salida, respectivamente; sólo se presentan, a manera de ejemplo, los Cuadros 3 y 4, que corresponden a PDSI y SPI, respectivamente, para la estación 10001 de Cuencamé, Durango. Con los valores de los índices de sequía X, para PDSI, y S, para SPI, se generaron los mapas que muestran la distribución espacial de los índices mostrados en los Cuadros 3 y 4.

En el Cuadro 5 se muestran diferencias importantes en la concentración de las frecuencias de las categorías donde la referente a cercano a lo normal presenta los valores más altos en ambos métodos: 58% y 83% para PDSI y SPI, respectivamente, los cuales indican una tendencia de la precipitación en el estado de Durango a estar cerca de lo normal para el periodo analizado; SPI muestra un comportamiento casi invariable de la humedad, sin embargo, durante un tiempo menor (16.5% de los meses) presenta condiciones de humedad que va de moderada a extrema; es decir, que para SPI prácticamente no existen eventos de sequía en el estado

Cuadro 3. Valores calculados de Z, x1, x2, x3 y x, para la estación 10001, para el año 1969.

Mes	ppt	Pe	d	d (pulg)	Z	x1	x2	x3	x
1	2.32	9.43	-7.1	-0.28	-0.82	0	-0.27	0	-0.27
2	1.42	6.26	-4.8	-0.19	-0.63	0	-0.46	0	-0.46
3	0.17	2.72	-2.6	-0.10	-0.30	0	-0.51	0	-0.51
4	0.01	7.29	-7.3	-0.29	-0.85	0	-0.74	0	-0.74
5	68.50	21.56	46.9	1.85	3.26	1.09	0	1.09	1.09
6	15.50	40.98	-25.0	-1.00	-1.70	0	-0.57	0	-0.57
7	96.40	63.96	32.4	1.28	1.74	0.58	0	0	0.58
8	37.73	85.27	-48.0	-1.87	-2.10	0	-0.70	0	-0.70
9	39.05	63.84	-25.0	-0.98	-1.27	0	-1.05	-1.05	-1.05
10	7.39	34.66	-27.0	-1.07	-1.89	0	0	-1.57	-1.57
11	5.24	11.78	-6.5	-0.26	-0.65	0	0	-1.63	-1.63
12	30.73	11.46	19.3	0.76	1.80	0.6	0	-0.86	-0.86

ppt = precipitación, Pe = precipitación ajustada, d = desviación anormal de la precipitación; Z = índice de anomalía de humedad, x1 = índice de severidad de un periodo húmedo que se está estableciendo; x2 = índice de severidad de un periodo de sequía que se está estableciendo, x3 = índice de severidad de sequía o humedad que se ha establecido, x = índice de severidad de sequía o humedad final.

Cuadro 4. Valores de S y categoría SPI, para la estación 10001, para los meses de enero de la serie 1969-1982.

Precipitación	Año	X/beta	Gx	Mes	Hx	t	S	Categoría SPI
29.1	1981	2.3181	0.9680	1	0.9872	2.9527	2.2330	Extremadamente húmedo
5	1980	0.3983	0.6289	1	0.8516	1.9533	1.0432	Moderadamente húmedo
3	1971	0.2390	0.4729	1	0.7892	1.7645	0.8033	Cercano a lo normal
1.6	1979	0.1275	0.3453	1	0.7381	1.6370	0.6372	Cercano a lo normal
0.8	1974	0.0637	0.3453	1	0.7381	1.6370	0.6372	Cercano a lo normal
0.08	1970	0.0064	0	1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal
0	1969			1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal
0	1972			1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal
0	1973			1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal
0	1975			1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal
0	1976			1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal
0	1977			1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal
0	1978			1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal
0	1982			1	0.6	1.3537	0.2529	Cercano a lo normal

beta = parámetro de la distribución gamma, Gx = probabilidad acumulada, Hx = probabilidad acumulada gamma, t = valor de transformación gamma a normal, S = valor del índice final, SPI = índice estandarizado de precipitación.

de Durango (0.7%). Por su parte, PDSI muestra una distribución de categorías normalizada y detecta eventos de humedad y sequía.

Para los propósitos de este análisis, los datos correspondientes a las categorías humedad incipiente, ligeramente húmedo, sequía incipiente y sequía ligera de Palmer, se agruparon en las categorías de moderadamente húmedo y sequía moderada de SPI, de tal manera que pudieran realizarse algunas comparaciones.

Se seleccionó una muestra de nueve estaciones, en la franja latitudinal 24' 30° y 25' 30°, y se exploraron todas las condiciones climáticas de la entidad que abarcan desde la altiplanicie hasta la sierra Madre Occidental. Se cuantificó el número de periodos secos y su varianza, para ambos métodos, independientemente de su duración.

Cuadro 5. Frecuencias relativas de valores de SPI y PDSI, para la estación 10001.

Categoría PDSI	%	Categoría SPI	%
Extremadamente húmedo	6.5	Extremadamente húmedo	2.3
Muy húmedo	1.6	Muy húmedo	4.6
Moderadamente húmedo	7.5	Moderadamente húmedo	9.6
Cercano a lo normal	57.8	Cercano a lo normal	82.8
Moderadamente seco	17.0	Sequía moderada	0
Severamente seco	6.7	Sequía severa	0
Extremadamente seco	2.9	Sequía extrema	0.7
Total	100	Total	100

SPI = índice estandarizado de precipitación.
PDSI = índice de severidad de sequía de Palmer.

En el Cuadro 6 se observa que SPI tuvo de 9 a 23 periodos secos, pero con una duración de 1 ó 2 meses, con una varianza de 20.1; en tanto que PDSI registró un promedio de seis periodos secos, con una duración de hasta 38 meses, con una varianza de 0.6. Una alta frecuencia de meses secos, pero aislados, no es indicador de sequía, según la definición adoptada.

La recurrencia de periodos secos o húmedos en el tiempo se representa en las Figuras 1 y 2; se generó una figura para cada método, para todas las estaciones muestra. A partir de aquí fue posible establecer el inicio y fin de los eventos de sequía: para el caso SPI, da inicio un periodo seco cuando las barras rebasan la línea de -1,

Cuadro 6. Número de periodos secos para SPI y PDSI, serie 1969-1983.

Estación	Método SPI		Método PDSI	
	Período seco	Duración	Período seco	Duración
		meses		meses
10003	13	1	6	9-38
10004	9	1	6	1-14
10014	23	1	6	2-16
10049	14	1	6	2-24
10060	12	1-2	5	2-13
10086	21	1-2	7	4-11
10091	18	1-2	7	6-25
10100	17	1-4	5	5-35
10122	14	1-2	5	2-16

SPI = índice estandarizado de precipitación.
PDSI = índice de severidad de sequía de Palmer.

con rumbo a valores negativos menores y finaliza cuando las barras superan la línea -1 hacia los positivos. De igual forma, para PDSI inicia un periodo de sequía cuando se alcanzan valores mensuales menores de -1 y termina cuando se rebasa la línea con valor -1 hacia los positivos. Las figuras de SPI y PDSI presentan comportamientos diferentes, ya que mientras la primera experimenta fuertes contrastes mes a mes, la segunda muestra una especie de ciclos de humedad o de sequía, donde se ve claramente el inicio y final de un periodo que puede abarcar de uno hasta más de 40 meses continuos. Dado el comportamiento de los resultados de SPI, no se realizó el análisis de identificación de inicio, fin y duración de sequías.

En la Figura 2 se muestra la distribución del PDSI mensual, para la estación 10003, durante 1969-1983; se aprecia la recurrencia de seis periodos de sequía de diferente duración.

Para facilitar el análisis de la periodicidad de sequías en toda la entidad, se organizó la información en periodos de seis meses, correspondientes a la temporada de lluvias (mayo – octubre), pues se considera la de mayor impacto en la agricultura. Para tal fin, se revisaron los índices PDSI de todos los meses de todas las estaciones y se determinó que había sequía cuando los seis meses

continuos (mayo a octubre) experimentan sequía en alguno de los niveles, con fundamento en la definición de sequía de Wilhite y Glantz (1985). En el Cuadro 7 se observa que el año 1973 fue el único que no experimentó sequía, en ninguna de las estaciones; mientras que durante 1977 sólo tres estaciones experimentaron sequía, cuya ubicación no corresponde a una región en particular, pues se encuentran muy distantes una de las otras.

Son estos dos años, 1973 y 1977, los que tuvieron un comportamiento predominantemente cercano a lo normal. Durante los años 1980 y 1982 se presentó la mayor frecuencia de estaciones con sequía, abarcando 66.7 y 53.3% del total, respectivamente, lo que podría denominarse como años de sequía generalizada para el estado de Durango.

Es importante evaluar el número de años continuos que experimentan sequía, pues su impacto ecológico y social es diferente: un año con seis estaciones que presentan sequía, debe implicar un tipo de planeación para mitigar sus efectos, y una estación con seis años continuos de sequía requiere de otro tipo de planeación. Al analizar la duración de las sequías para todas las estaciones, se encontró que sólo la 10062, ubicada en San Antonio, M. Ocampo, al norte del estado, en las estribaciones de la sierra Madre Occidental,

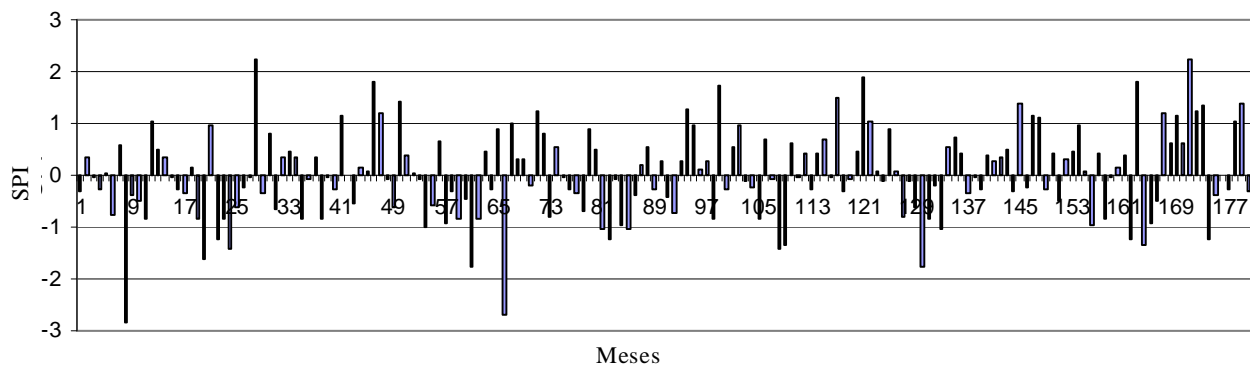


Figura 1. Índice estandarizado de precipitación (SPI), mensual, estación 10003, periodo 1969-1983.

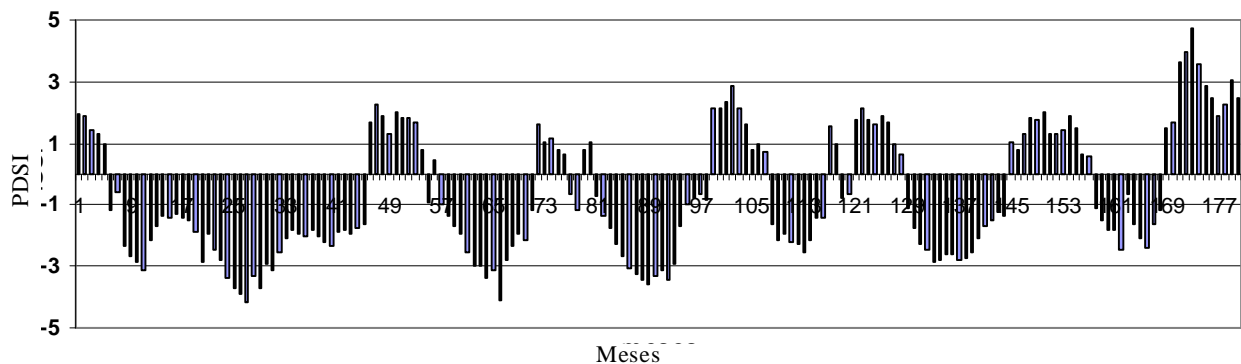


Figura 2. Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI), mensual, estación 10003, periodo 1969-1983.

Cuadro 7. Número de estaciones afectadas por sequía, temporada de lluvias.

Año	Estaciones afectadas por sequía	Porcentaje respecto al total	Año	Estaciones afectadas por sequía	Porcentaje respecto al total
1969	13	21.7	1977	3	5
1970	10	16.7	1978	14	23.3
1971	25	41.7	1979	9	15
1972	10	16.7	1980	40	66.7
1973	0	0	1981	4	6.7
1974	17	28.3	1982	32	53.3
1975	16	26.7	1983	10	16.7
1976	15	25			

no experimentó sequía en alguno de los niveles PDSI. En contraste, la estación 10053, ubicada en Peñoles, San Pedro Gallo, al centro norte del estado, es la que durante un periodo de 15 años (1969-1983) estuvo expuesta a tres periodos de sequía, de uno, dos y seis años, respectivamente, para un lapso de 15 años.

En el Cuadro 8 se muestra que la sequía de un año de duración es la que se presenta con mayor frecuencia en todos los años y todas las estaciones de la entidad, ya que durante un periodo de 15 años se presentó en 122 ocasiones, mientras que la de mayor duración fue de seis años continuos, y sólo se presentó en una ocasión, en la estación 10053, de San Pedro Gallo, Durango.

El análisis espacial de los índices PDSI y SPI se muestra a través de mapas mensuales: se presentan los meses de julio y agosto de 1971, representativos de la época de lluvia; las Figuras 3 y 4, para PDSI, y las Figuras 5 y 6, para SPI. Para el primero se registra una condición de sequía que abarca desde las categorías severa y moderada y ésta se ubica en la parte este del estado, coincidiendo con la región montañosa de la sierra Madre Occidental, en tanto que para la región de la planicie se presentan condiciones que van desde cercano a lo normal hasta extremadamente húmedo, incrementándose esta última categoría para el mes de agosto (segunda mitad del periodo normal de lluvias). Por su parte, para el SPI se registra una condición predominantemente cercana a lo normal y pequeñas

Cuadro 8. Duración de los periodos de sequía, por estación por año.

Años/sequía	Frecuencia relativa	Porcentaje
0	1	1
1	122	76
2	25	15
3	6	4
4	4	2
5	2	1
6	1	1

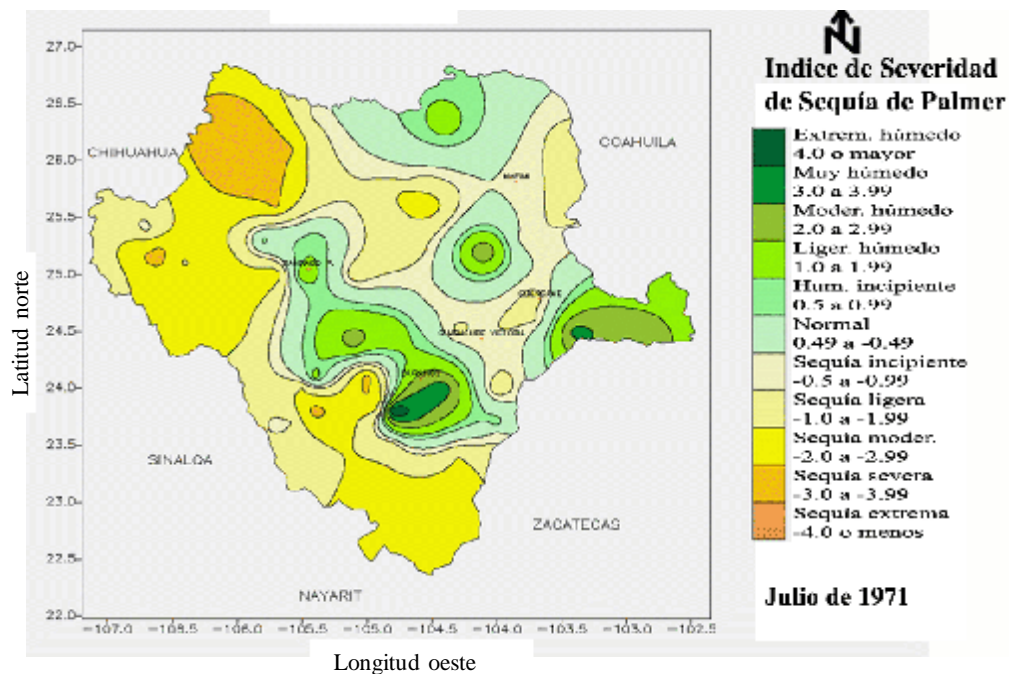


Figura 3. Distribución espacial del índice de severidad de sequía de Palmer. Julio de 1971.

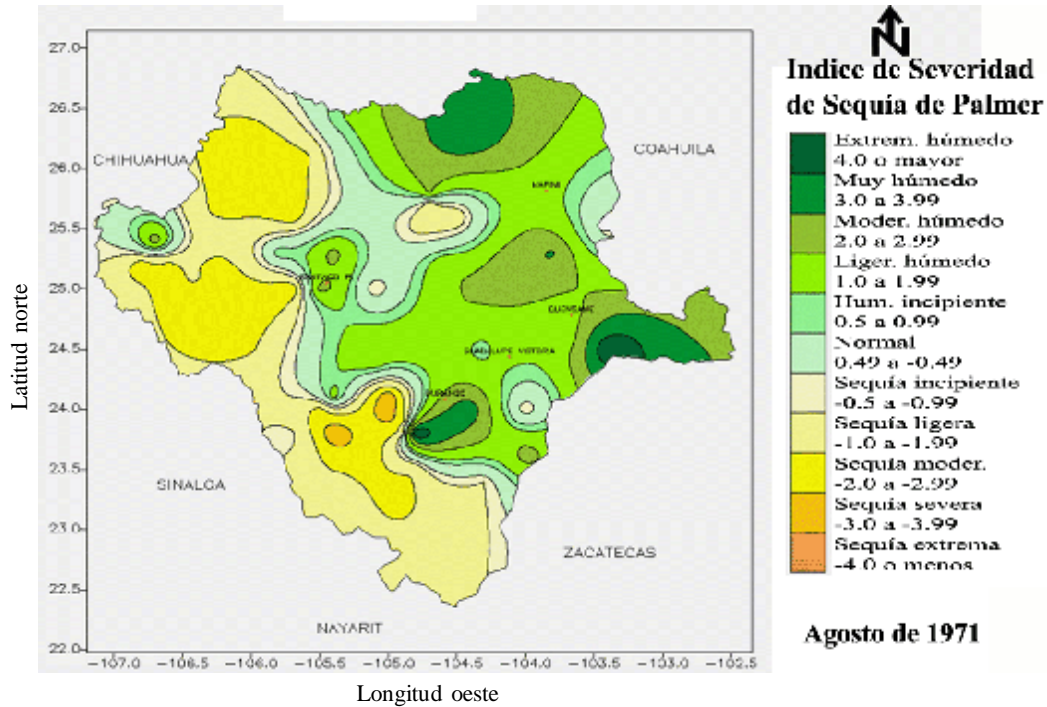


Figura 4. Distribución espacial del índice de severidad de sequía de Palmer. Agosto de 1971.

superficies, alrededor del municipio de Cuencamé, en condiciones de sequía moderada para el mes de julio; mientras que para el mes de agosto se presenta una pequeña superficie al norte de la entidad, con condiciones moderadamente húmedas y muy húmedas. Como

se aprecia, el método PDSI presenta cambios graduales de humedad que se incrementan o decrementan, según el balance de humedad; en tanto que SPI exhibe cambios de sequía a humedad o viceversa, sin un aparente patrón de distribución, en el tiempo y en el espacio.

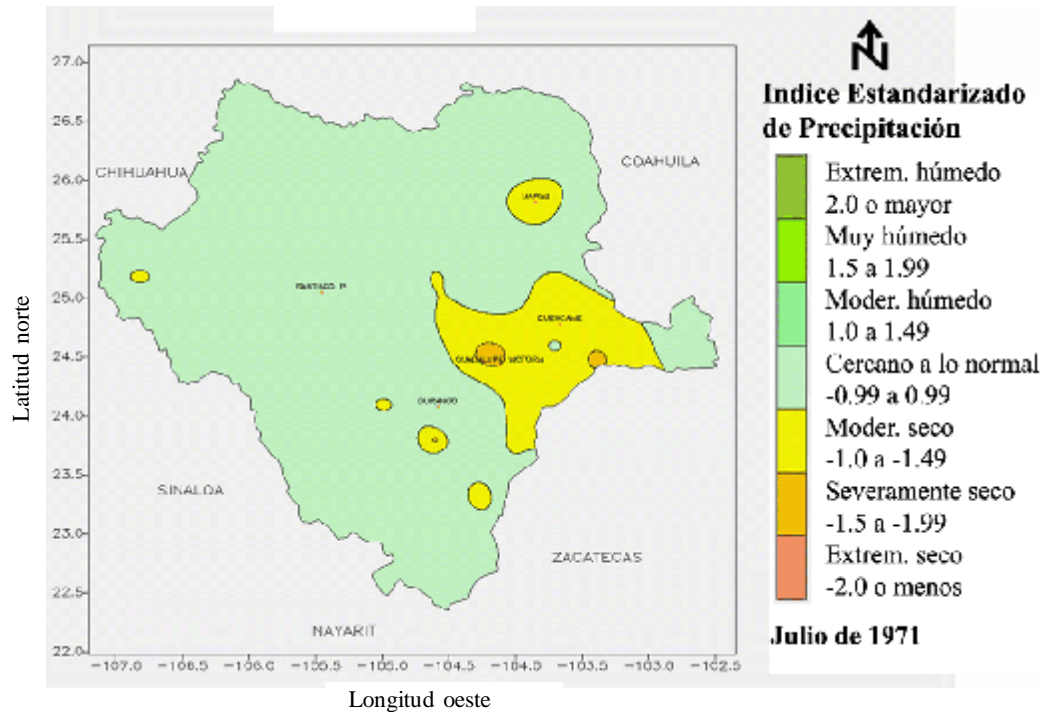


Figura 5. Distribución espacial del índice estandarizado de precipitación. Julio de 1971.

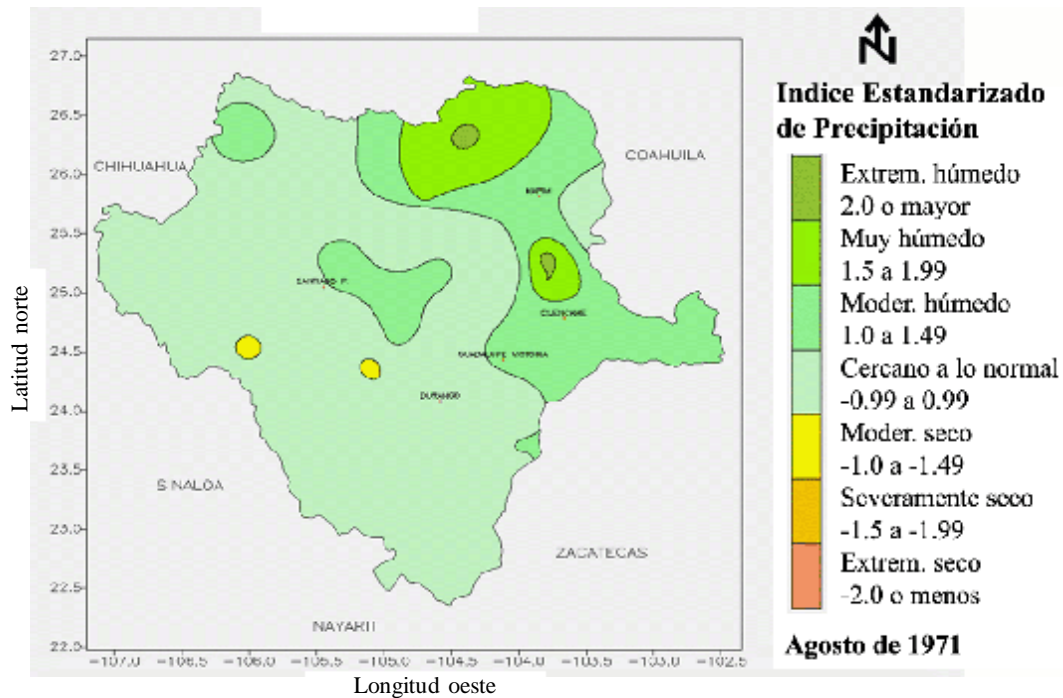


Figura 6. Distribución espacial del índice estandarizado de precipitación. Agosto de 1971.

Es importante considerar para futuras investigaciones que el algoritmo de cálculo del método PDSI debe mejorarse, en su componente capacidad total de almacenamiento de agua en el suelo, considerando otras variables como textura, pendiente, profundidad del suelo y cobertura vegetal, y no asumir sólo un valor estándar para toda una región. Además, es necesario generar una bitácora de diagnóstico de sequía que constituya, a mediano y largo plazo, una referencia para posteriores análisis.

CONCLUSIONES

- La categoría cercano a lo normal presenta los máximos valores de frecuencia en ambos métodos, lo cual sugiere que para el estado de Durango la precipitación ha mantenido un comportamiento con tendencia a lo normal para la serie de tiempo analizada.
- El método índice estandarizado de precipitación (SPI) sobrestima la recurrencia de periodos húmedos, para escalas de tiempo mensual.
- Para el método SPI, la media de la precipitación está cercana a la mayoría de los meses con registro, siendo ésta una condición cercana a lo normal, así que de haber una situación anormal, ésta será hacia la condición de humedad, independientemente de la precipitación del tiempo antecedente.

- El método SPI no considera las condiciones de humedad que anteceden a un evento de precipitación, por lo que cambios mínimos en los registros de precipitación (hacia una mayor o menor precipitación) se presentan por cambios drásticos mes a mes, en la denominación de su índice.
- Con el método SPI no es posible definir los parámetros de la sequía, empleando escalas de tiempo mensual, por lo que no se recomienda para fines de planeación y manejo de riesgos en cultivos agrícolas.
- El método índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) permite definir con mayor claridad inicio, final, duración y frecuencia de un periodo seco o húmedo, atendiendo a la definición de sequía adoptado.
- El método PDSI registró un promedio de seis periodos de sequía para una serie de 15 años.
- De acuerdo con PDSI, el año 1973 fue el que no experimentó evento de sequía, 1977 sólo con tres estaciones, 1980 y 1982 la presentaron en 66.7 y 53% del total de estaciones, respectivamente.
- La estación 10062, ubicada en San Antonio, M. Ocampo, en las estribaciones de la sierra Madre Occidental, no experimentó sequía en alguno de sus niveles; la estación 10053, ubicada en Peñoles, San Pedro Gallo, al centro norte del estado, fue la que durante un lapso de 15 años (1969-1983) estuvo expuesta a tres periodos de sequía,

siendo el mayor de seis años continuos, luego de dos, y el menor de un año, respectivamente.

LITERATURA CITADA

- Alley, W. M. 1984. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23: 1100-1109.
- Florescano, E. 1980. Las sequías en México: historia, características y efectos. *Comercio Exterior* 30: 747-757.
- Golden Software. 1999. SURFER Version 6.01. Golden, CO, USA.
- Guttman, N. B. 1998. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34: 113-121.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1995. Extractor rápido de información climatológica, ERIC1. Versión 1.0. Jiutepec, Morelos, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000. Marco geoestadístico, estado de Durango. INEGI. México, D.F.
- Keyantash, J. and J. A. Dracup. 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83: 1167-1180.
- Lohani, V. K. and G. V. Loganathan. 1997. An early system for drought management using the Palmer drought index. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 33: 1375-1386.
- Magaña, R., J. L. Pérez, C. Conde, C. Gay y S. Medina. 1997. El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) y sus impactos en México. Departamento de Meteorología General. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. pp. 179-184. *In: Eight Conference on applied climatology*, January 17-22. Anaheim, CA, USA.
- Palmer, W. C. 1965. Meteorological drought research paper 45. US Department of Commerce, Weather Bureau. Washington, DC, USA.
- Wilhite, D. A. and M. H. Glantz. 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.* 10: 111-120.
- Wolfram. 1999. Mathematica 4.0 for Microsoft Windows. Wolfram Research. Champaign, IL, USA.