

Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande

Israel Velasco
Javier Aparicio

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Juan B. Valdés

Universidad de Arizona y Centro SAHRA

Jaime Velázquez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Tae-Woong Kim

Universidad de Arizona y Centro SAHRA

Existen numerosos métodos e índices para caracterizar la sequía, pero ninguno es superior a los demás en todas las aplicaciones. Los índices más usados en Norteamérica son el índice de precipitación estandarizado (SPI) y el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI). Cada uno de ellos tiene elementos que pueden aprovecharse para la caracterización de la sequía y para determinar las condiciones bajo las cuales se recomendaría poner en marcha las acciones que se establecen en los planes de mitigación. El tratado México-Estados Unidos de 1944 para el aprovechamiento conjunto de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo, prevé, por ejemplo, la forma en que se modifican las asignaciones mutuas entre los dos países en caso de sequías extremas; sin embargo, no define con precisión ese concepto. De ahí la importancia de examinar con detalle la aplicabilidad y características de los métodos para determinar las sequías. En este trabajo se muestra la aplicación del SPI que, basado sólo en la lluvia, se constituye en un índice de la eficiencia temporal de la precipitación, considerada ésta como el componente hidrológico que define en gran medida la presencia y características de la sequía; y del PDSI, método basado en el balance de humedad en la capa de suelo que sustenta a la vegetación, y en el que influyen tanto las características propias del suelo como las variables hidrometeorológicas. Ambos métodos se aplican a las cuencas de los ríos Conchos y Pecos, con objeto de comparar su comportamiento. Ambos métodos, a escalas temporales comparables, muestran resultados similares que, en este caso de aplicación, indican la presencia recurrente y persistente de la sequía en dicha región. Asimismo, se presenta un análisis de sensibilidad del PDSI a variaciones de algunos de sus parámetros.

Palabras clave: sequía, índices de sequía, déficit de agua, insuficiencia de lluvia.

Introducción

La sequía es un fenómeno natural, parte intrínseca del clima. Todos los lugares del planeta están sujetos a su

eventual ocurrencia, incluso las áreas típicamente lluviosas (Dracup et al., 1980). Se caracteriza por ser un evento inevitable, todavía poco predecible (Kim et al., 2002), sin trayectoria definida ni epicentro, de avance

progresivo y frecuentemente catastrófico (Gibbs, 1975), capaz de causar daños severos al medio ambiente y a las vidas humanas. La vulnerabilidad ante la presencia del fenómeno está directamente relacionada con el grado de desarrollo social y económico: mientras que en los países desarrollados generalmente se puede soportar sin graves consecuencias, en las regiones más marginadas está frecuentemente asociado con hambrunas y muertes masivas en su etapa más crítica (Postel, 1991; Velasco y Collado, 1998). En Norteamérica se presentaron dos sequías importantes en términos de extensión espacial y temporal durante el siglo veinte. La sequía de la década de 1930 duró unos siete años y tuvo efectos considerables en las grandes planicies de Estados Unidos y en parte de México, y la sequía de la década de 1950, la cual duró alrededor de cinco años y afectó prácticamente el 100% del territorio mexicano (SARH, 1981) y el suroeste de Estados Unidos. Esta última, en particular, provocó, entre otros efectos negativos, el descenso del nivel del lago de Chapala, México, el más grave de la historia registrada. Además de estas grandes sequías, se han presentado varias más en las décadas recientes en América del Norte. Por ejemplo, la sequía de 1987-1989 cubrió el 36% de los Estados Unidos y causó pérdidas de aproximadamente 39 millardos de dólares en energía, agua, ecosistemas y agricultura en ese país (*NOAA Paleoclimatology Program*, 2000). En México, se ha estimado que las sequías se registran con una frecuencia aproximada de una en cada diez años y con duraciones que varían entre uno y tres años (SARH, 1981). La zona de la república mexicana con mayor incidencia de sequías y que por tanto tiene más vulnerabilidad y riesgo de sufrirlas comprende los estados fronterizos y prácticamente la totalidad de la parte mexicana de la cuenca del río Bravo (SARH, 1981). Por otra parte, después de una revisión de literatura paleoclimática, que incluye diversas fuentes de información, como anillos de árboles y datos instrumentales, Woodhouse y Overpeck (1998) confirman como muy probable que se presenten en el futuro sequías más severas que las de las décadas de los treinta y los cincuenta.

Dadas estas características de la sequía, la mejor opción para enfrentarla es la prevención a través de una serie de medidas estratégicas de mediano y largo plazos, tácticas de corto y mediano plazos, y emergentes de corto plazo (Wilhite, 1991). Estas medidas deben estar contempladas en un plan específico para cada cuenca o región, en el que la participación social es determinante para superar el problema con el menor impacto (Velasco, 2002; Martínez, 2001).

Se han generado múltiples métodos e índices para caracterizar la sequía (WMO, 1975; Hayes, 2003), con

diferentes enfoques y parámetros. Como suele ocurrir en estos casos, ningún método o índice es inherentemente superior a los demás en todas las circunstancias, pero algunos de ellos se ajustan mejor que otros en ciertas aplicaciones. Así, por ejemplo, un índice basado simplemente en porcentajes respecto a la media es útil para el público general que desea comparar las condiciones en diferentes momentos en una región o estación determinada, pero supone implícitamente que la precipitación tiene una distribución normal, lo cual no siempre es el caso (Hayes, 2003). Para propósitos de planeación o para la evaluación de sequías con fines operativos, existen diversos índices, como el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (*PDSI* por sus siglas en inglés) (Palmer, 1965), el Índice Estandarizado de Precipitación (*SPI* por sus siglas en inglés) (McKee et al., 1993), el Índice de Humedad de Cultivo (*CMI*, Palmer, 1968), el Índice de Suministro de Agua Superficial (*SWSI*) y el Índice de Sequía del U.S. *Bureau of Reclamation* (*RDI*), entre otros (Hayes, 2003). Todos estos índices tienen ventajas y desventajas, como por ejemplo su aplicabilidad regional en los casos del *SWSI* y el *RDI*, o el hecho de que toman en cuenta la temperatura o la nieve. De estos índices, los más utilizados en Norteamérica son el *PDSI* y el *SPI*.

El *PDSI* es un algoritmo de contabilidad de la humedad del suelo calibrado para regiones relativamente homogéneas. Se ha usado en forma muy extensa como indicador de la sequía agrícola por la gran dependencia de ésta a la falta de humedad en el suelo, y ha sido útil para el monitoreo de la sequía y para disparar acciones asociadas con planes de contingencia contra sequías (Hayes, 2003). De acuerdo con Alley (1984), este índice tiene tres características positivas que contribuyen a su popularidad: provee a los tomadores de decisión de una medida de la anomalía del clima reciente en una región; presenta una oportunidad de poner las condiciones actuales en perspectiva histórica, y proporciona representaciones espaciales y temporales de sequías históricas. Entre sus limitaciones se pueden contar las siguientes (Hayes, 2003): los valores que cuantifican la intensidad de la sequía, y señalan su inicio y final se seleccionaron arbitrariamente en el estudio de Palmer en Iowa central y Kansas occidental, y tienen poco fundamento científico; el índice es sensible al contenido de humedad disponible del suelo; el sistema de dos capas de suelo propuesto por Palmer para los cálculos de balance hídrico puede no ser suficientemente representativo de la zona en cuestión; no se toman en cuenta la nieve ni el congelamiento de suelos; no se considera el retraso entre la lluvia y el escurrimiento, y la evapotranspiración potencial se calcula mediante el

método de Thornthwaite, que sólo es una aproximación. En especial, es adecuado para las zonas de temporal, donde la humedad natural proporcionada por la lluvia es normalmente suficiente para sostener la actividad agrícola. La gran variabilidad espacial de los suelos (textura, estructura, pendiente, profundidad, etcétera), así como las diferencias que existen entre los diversos métodos para estimar la evapotranspiración, pueden hacer que el índice de Palmer sea sensible a cambios en estos parámetros y, por ende, en el resultado final (NDMC, 1998).

El *SPI* es un índice basado en la probabilidad de precipitación para cualquier escala de tiempo. Este diseño del índice permite cuantificar el déficit de precipitación para diversas escalas, dependiendo del horizonte retrospectivo que se desee analizar. Esta versatilidad es apreciada por planificadores de sequías (Hayes, 2003), aunque no toma en cuenta la humedad del suelo u otros parámetros. Al igual que el *PDSI*, no considera el retraso entre precipitación y escurrimiento. En los últimos años, este índice se usa cada vez con mayor frecuencia. El *SPI* es una herramienta apropiada para estimar la severidad (déficit total en el periodo), magnitud (déficit promedio, también conocido como intensidad), duración en tiempo y extensión geográfica (Velasco, 2001).

En 1944, México y Estados Unidos firmaron un tratado para el aprovechamiento conjunto de las aguas de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo (llamado este último Grande en Estados Unidos) (Orive, 1945). Dentro de dicho tratado, Estados Unidos se obliga a entregar a México un volumen de 1,850,234 hm³ al año de las aguas del río Colorado, mientras que México debe entregar a Estados Unidos 431,721 hm³ en promedio al año de seis afluentes mexicanos del río Bravo. El propio tratado especifica la forma en que se modifican estas asignaciones: "en caso de extraordinaria sequía"; sin embargo, no define qué se entiende como "extraordinaria sequía". Si bien hasta hace algunos años no se había tenido necesidad de establecer si esta condición se presenta, pues en general se han verificado las entregas por ambas partes en forma satisfactoria, desde 1993 la precipitación en la cuenca del río Bravo ha sido inferior a la media histórica y ello ha ocasionado retrasos en las entregas mexicanas a Estados Unidos (Moore et al., 2002). México ha argumentado que dichos retrasos se deben a que se ha presentado una "extraordinaria sequía", mientras que algunos usuarios y autoridades en Estados Unidos sostienen lo contrario, y han mantenido la presión para que México cubra los déficit (TCPS, 2002). La definición de índices apropiados es, por tanto, un elemento fundamental en ésta y otras negociaciones internacionales, en particular entre México y Estados Unidos, así como en la determinación de

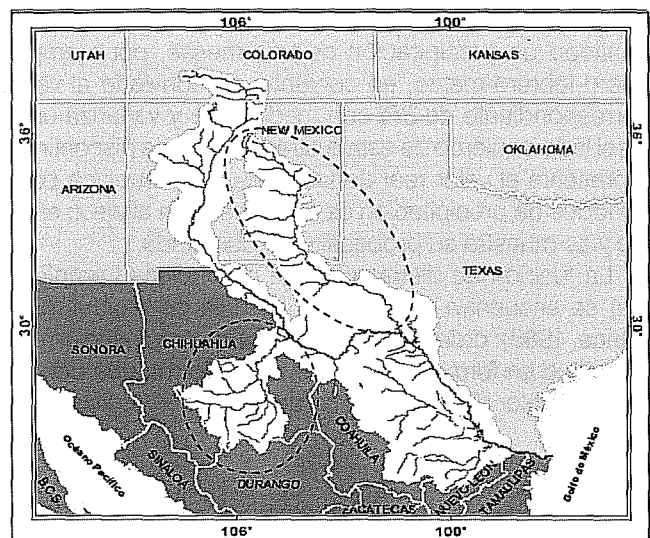
criterios cuantitativos de evaluación de las condiciones de sequía y de inicio, en su caso, de acciones de emergencia para su mitigación.

Por lo anterior, en este artículo se analiza la aplicabilidad de los índices *SPI* y *PDSI* en dos de las principales cuencas aportadoras al río Bravo: la del río Conchos en México y la del río Pecos en Estados Unidos (ilustración 1), con el objeto de determinar cuantitativamente las ventajas o desventajas de cada uno y proponer criterios de aplicación apropiados a esta región.

Índices de sequía

La aplicación de cualquier método para obtener un índice de sequía debe tomar en cuenta tanto las características propias del fenómeno, como las de la región en estudio (Velasco et al., 2002). En primer término, es conveniente definir el índice de sequía para una región árida a escalas mayores a un mes, ya que escalas menores no permiten distinguir entre el déficit de lluvia respecto a las condiciones de largo plazo ni a las variaciones propias en la precipitación, que no necesariamente conducen a un estado de sequía. Incluso a un mes, estas variaciones son todavía altas y sin tendencia definida, y por tanto hacen difícil caracterizar el fenómeno. Por otro lado, la escala mensual permite detectar si algún mes es extraordinariamente alto o bajo en lluvia, lo que, de ocurrir, puede enmascarar los resultados a mayor escala temporal y distorsionar la apreciación del fenómeno.

Ilustración 1. Ubicación geográfica de las cuencas de los ríos Conchos (México), Pecos (Estados Unidos de América) y Bravo/Grande (binacional).



Índice de precipitación estandarizada (SPI)

El *SPI* es un índice que permite evaluar retrospectivamente el comportamiento de la lluvia respecto a sus condiciones medias a largo plazo. Es, por tanto, una herramienta para monitorear y detectar los periodos de sequía meteorológica, entendida ésta como la anomalía negativa en la ocurrencia y recurrencia de la lluvia tanto en duración como en intensidad o magnitud. En virtud de que se puede usar para diferentes escalas de tiempo, permite analizar diferentes tipos de sequía. Por ejemplo, la sequía agrícola tiene en general una escala de tiempo mucho más corta que la sequía hidrológica (McKee *et al.*, 1993).

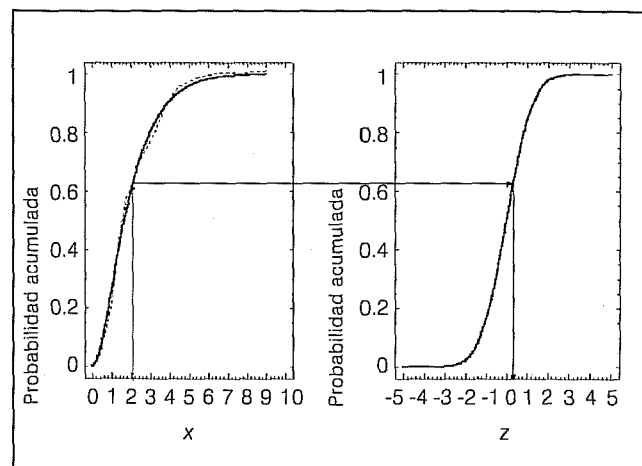
Cabe aclarar que el *SPI* sólo toma en cuenta la lluvia como fenómeno natural, y no considera otros aspectos, ya sean naturales o antropogénicos, como la cobertura vegetal, las características de los suelos, la topografía, la demanda y usos del agua, etcétera. Es simplemente un indicador de la abundancia o insuficiencia de la lluvia como parte de la marcha y la variabilidad climática, y no del *déficit*, de características inducidas o artificiales, producto de la actividad humana.

El cálculo del *SPI* comprende primeramente el ajuste a la *fdp* (función de densidad de probabilidad) gamma del registro de precipitación para cada estación meteorológica (Edwards y McKee, 1997). En Campos (1988) o Coronel y Llanos (1996), por ejemplo, se pueden consultar los detalles sobre dicho ajuste. Posteriormente, los valores ajustados se transforman a la *fdp* normal, con media cero y varianza uno, que representa el valor del *SPI*. Esta estandarización de la variable aleatoria se basa en el principio de equiprobabilidad, el cual establece que el valor de la función de distribución de probabilidad para un valor dado de la variable aleatoria es el mismo para la variable original que para la transformada. El método se observa gráficamente en la ilustración 2, en la cual la cantidad de precipitación de tres meses, por ejemplo enero-febrero-marzo, en conjunto, se convierte al valor correspondiente de *SPI* con media cero y varianza uno. En el lado izquierdo de esta ilustración, la línea discontinua representa el valor real de la distribución empírica para periodos de precipitación de tres meses en el eje *x*; en el eje *y* se muestra su probabilidad acumulada.

La función de distribución de probabilidad empírica $F(x)$ se encuentra mediante la fórmula de Weibull (vgr. Ponce, 1989): ordenando los valores de precipitación por magnitud en forma ascendente de tal forma que para el *k*-ésimo valor de una muestra de tamaño *n* (registro):

$$F(x) = \frac{k}{n+1} \quad (1)$$

Ilustración 2. Ejemplo de equiprobabilidad transformada de una función gamma ajustada a una distribución normal estándar. La línea discontinua del lado izquierdo del gráfico representa la distribución empírica del registro de precipitación.



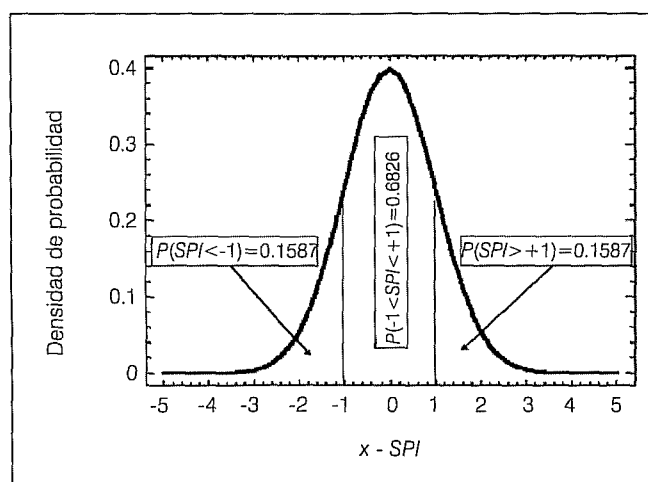
La curva continua del lado izquierdo de la ilustración 2 muestra la función de distribución acumulada de los datos de lluvia analizados, ajustados a la función gamma. La curva de la derecha de la misma ilustración representa la función de distribución $N(0,1)$ para la variable aleatoria transformada, usando la misma escala de probabilidad de la función empírica y de la gamma.

La variable normal estandarizada *Z*, que corresponde al valor del *SPI*, está representada en el eje de las abscisas de la parte derecha de la ilustración 2; la ilustración 3 muestra la función de densidad de probabilidad de dicha variable. La gráfica de la ilustración 2 puede usarse para transformar cualquier valor de precipitación dentro de la escala temporal de interés.

Para periodos de tiempo mayores a un mes, el procedimiento básico inicial para estimar el *SPI* es tomar sumas móviles; por ejemplo, para escalas de tres meses, la suma de los valores de lluvia de los primeros tres meses de la serie forman el primer valor de la nueva serie a ajustar a la *fdp* gamma; la suma de los valores de lluvia del mes dos al cuatro de la serie mensual formará el segundo valor de la serie nueva, y así sucesivamente. Por tanto, si *n* es el número total de meses de la serie histórica, y *r* la escala temporal del *SPI* (*r*=1, 2, 3,...6...12, etcétera), entonces la nueva serie tendrá $n_r = n - r + 1$ valores.

Con lo anterior, al disponer de una serie de tiempo de valores mensuales de precipitación lo suficientemente larga (idealmente de treinta años o mayor, de tal forma que sea representativa de las condiciones de largo plazo) y confiable, es posible calcular el *SPI* en cualquier mes

Ilustración 3. Distribución normal estándar que representa al SPI con media cero y varianza uno.



del registro para los i meses previos, dependiendo de la escala temporal de interés. El SPI a una escala temporal de tres meses es adecuado para la sequía estacional o de corto plazo, de 12 meses para evaluar la sequía intermedia o anual, y de 24, 36 o 48 meses para la sequía de largo plazo hidrológica. Por tanto, para un mes y año específicos, el valor del SPI depende de la escala de tiempo con que se haya calculado.

Para efectos prácticos, una escala apropiada del SPI es la de tres meses, que corresponde al periodo estacional, ya que, por ejemplo, el índice evaluado para el periodo julio-agosto-septiembre, correspondiente a la época de lluvias (monzón), determina en general si todo el año se considera seco, medio o húmedo; además, este periodo estacional es crucial en el desarrollo de las plantas sujetas sólo a la humedad de la lluvia. Visto a largo plazo —más de diez años— el SPI a esta escala permite visualizar los periodos definidos en que la precipitación fue abundante o deficiente respecto a las condiciones medias consideradas a la misma escala. A mayor escala, la de 12 meses o anual, tiene la ventaja de poder evaluar el comportamiento anual de la precipitación y no sólo de enero a diciembre, sino para cualquier mes, por ejemplo de octubre a septiembre. Esta escala temporal es útil para evaluar la sequía de mediano plazo y tomarla como referencia al dimensionar los impactos de la falta de agua en los diferentes sectores económicos y sociales. Por ejemplo, los daños en el sector ganadero usualmente se reportan y evalúan en términos anuales, así como los de la agricultura de riego, cuando la fuente de suministro es un embalse.

Escalas mayores a 12 meses son útiles para visualizar en retrospectiva el comportamiento de la lluvia a largo plazo, y en general muestran una tendencia de la lluvia más definida, es decir, con periodos recurrentes y más persistentes en cuanto a la abundancia o escasez. Dada la variabilidad de un año a otro en la lluvia, probablemente escalas mayores a la anual resulten poco prácticas para efectos de planeación, aunque sí lo pueden ser para evaluación y balance retrospectivos.

Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)

El PDSI es básicamente un balance de agua en el suelo (Palmer, 1965). El índice fue diseñado para estimar las desviaciones o déficit de humedad en el mismo, respecto a los requerimientos de las plantas; por tanto, además de las variables meteorológicas, lluvia y temperatura, también tienen un papel preponderante las variables edafológicas, como la capacidad de retención de agua, la profundidad de la capa que contiene la zona de raíces, los valores potenciales de recarga de agua, las pérdidas por evaporación y las pérdidas por escurrimiento; desde luego, también entran en juego las características propias de las plantas, fundamentalmente en el cálculo de la evapotranspiración que, a su vez, depende de la radiación solar y ésta, de la latitud del lugar.

La zona de raíces se considera dividida en dos capas adyacentes: la más superficial —en la cual el movimiento del agua es más intenso— puede considerarse, según Palmer (1965), con una capacidad de retención equivalente a 2.54 cm (una pulgada) de lámina de agua; la capa inferior depende en espesor y capacidad retentiva de múltiples factores, entre los que destacan la edafología local y el desarrollo radical de las plantas, así como sus necesidades evapotranspirativas; en general, se considera que un valor adecuado para la capacidad de retención para la capa inferior es de 12.70 cm (cinco pulgadas), que permite al menos tener una idea del comportamiento del índice. Cabe hacer notar que Palmer usó valores de 12.7 cm para Kansas y 22.86 cm para Iowa.

Entre las premisas para obtener el PDSI destaca que la humedad de la capa inferior del suelo sólo se remueve hasta que la humedad de la capa superior se agota; la capacidad conjunta de ambas capas es la *capacidad de campo*.

El método considera la estimación de cuatro valores o parámetros potenciales (Kim *et al.*, 2002):

- La evaporación potencial (PE) calculada para este trabajo, utilizando el método de Hargreaves, que toma en cuenta la radiación extraterrestre y la diferencia entre temperaturas mínimas y máximas.

- La recarga potencial (PR), considerada como el parámetro equivalente a la cantidad de agua requerida para llevar al suelo a su capacidad de campo.
- La pérdida potencial (PL) o cantidad de agua perdida por evapotranspiración si la lluvia fuera nula.
- El escurrimiento potencial (PRO), concebido como la diferencia entre precipitación potencial y recarga potencial.

Los coeficientes climáticos respectivos (α , β , γ , δ) se calculan como la proporción entre valores reales y potenciales para cada mes del año y para cada punto de observación meteorológica; a su vez, estos coeficientes se usan para estimar la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades evapotranspirativas ($\hat{P}$), y la diferencia d entre este valor y el correspondiente a las condiciones reales (P) es un indicador de la deficiencia o abundancia de agua para el mes:

$$d = P - \hat{P} = P - (\alpha PE + \beta PR + \gamma PRO + \delta PL) \quad (2)$$

donde $\alpha = \overline{ET}/\overline{PE}$, $\beta = \overline{R}/\overline{PR}$, $\gamma = \overline{RO}/\overline{PRO}$, $\delta = \overline{L}/\overline{PL}$ y $\overline{ET}$, $\overline{R}$, $\overline{RO}$, $\overline{L}$ son los valores medios mensuales de los parámetros reales.

El índice de anomalía de humedad Z se define como:

$$Z = Kd \quad (3)$$

donde K es un factor de peso, determinado a partir de los registros meteorológicos. Después de múltiples ensayos, Palmer (1965) sugirió una relación empírica de K , tal que:

$$K_i = \left(\frac{17.6}{\sum_{j=1}^{12} \overline{D}_j K'_j} \right) K'_i \quad (4)$$

donde $\overline{D}_j$ es el promedio de los valores absolutos de d , y K'_i es un parámetro que depende de la oferta y demanda promedios de agua:

$$K' = 1.5 \log_{10} \left[\left(\frac{\overline{PE} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2.80 \right) / \overline{D} \right] + 0.50 \quad (5)$$

Una vez establecido el valor de K , el $PDSI$ está dado por:

$$PDSI_i = 0.897 PDSI_{i-1} + \frac{1}{3} Z_i \quad (6)$$

Comparación entre los índices

Mientras que el $PDSI$ tiene memoria, es decir, depende de las condiciones antecedentes de precipitación y humedad en el suelo, el SPI evalúa el déficit de precipitación en intervalos de tiempo preestablecidos, independientemente de las condiciones antecedentes. Ambos índices son comparables cuando la escala temporal del SPI está entre 11 y 12 meses (Wilhite, 1997), esto es, a escalas cercanas a la anual cuando se ha completado un periodo hidrológico, si la comparación se hace de octubre a septiembre del año siguiente. Esto puede observarse en McKee et al. (1995), donde se muestra que los mayores coeficientes de correlación entre los dos índices están en las escalas de alrededor de 12 meses en la mayor parte de los Estados Unidos y norte de México. Convencionalmente, la clasificación de la sequía y su relación con los valores de los índices se define según la escala mostrada en el cuadro 1.

La cuenca del río Conchos

El río Conchos es uno de los principales tributarios mexicanos del río Bravo y la superficie de su cuenca es de aproximadamente 71,964 km². Los afluentes principales del Conchos son, a su vez, los ríos San Pedro, Balleza, Parral y Florido. El principal uso del agua es en la agricultura. En esta cuenca se ubican tres distritos de riego, con una superficie conjunta registrada con derechos de aguas superficiales de aproximadamente 92,000 hectáreas, así como numerosas pequeñas unidades de riego para el desarrollo rural (las llamadas Urderales), con una superficie estimada de unas 60,000 hectáreas, de las cuales una gran proporción se abastece de agua del subsuelo.

La parte más alta de la cuenca se ubica en la sierra Tarahumara, parte de la Sierra Madre Occidental, y termina en la confluencia del río Conchos con el Bravo, cerca de la ciudad de Ojinaga. Es un área de contrastes: la parte alta es templada en verano y muy fría en invierno, montañosa y relativamente húmeda; la parte media está compuesta de llanuras onduladas semiáridas, y la parte más baja es desértica y extremosa. La ilustración 4 muestra el conjunto de la cuenca con sus respectivas subcuencas y los detalles hidrológicos, así como la ubicación de los principales centros urbanos.

Ilustración 4. Cuenca del río Conchos, México: subcuencas y corrientes superficiales.

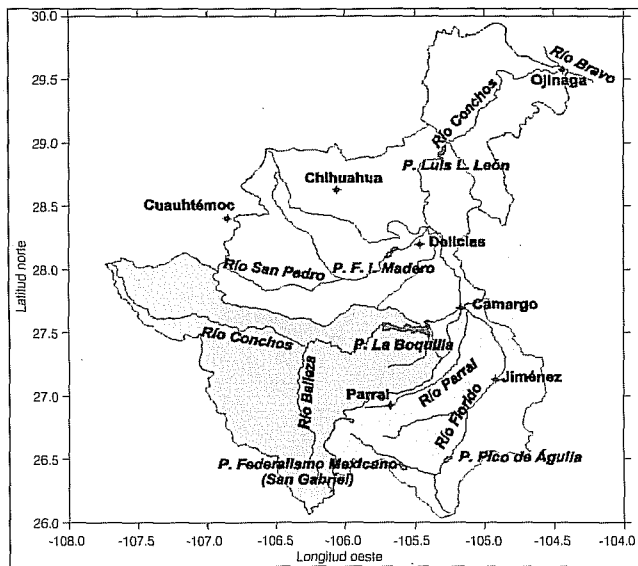
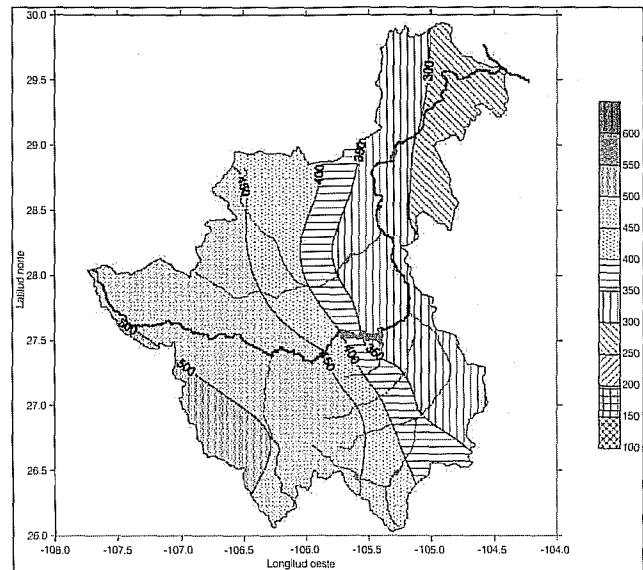


Ilustración 5. Isoyetas anuales históricas en milímetros, periodo 1970-2001; cuenca del río Conchos, México.

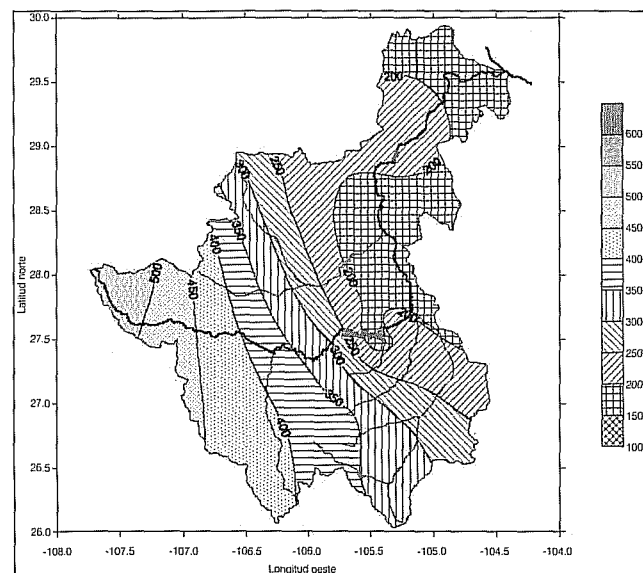


Precipitación en la cuenca

La ilustración 5 muestra el plano de isoyetas medias anuales históricas, obtenido con datos de 21 estaciones meteorológicas, 15 dentro de la cuenca y seis fuera de la misma, con registros de 1970 a 2001. En el apéndice se incluye una lista de las estaciones usadas en el análisis. La precipitación media en la cuenca es de 390 mm anuales.

De 1985 a 2001, la lluvia ha sido muy variable: mientras que de 1990 a 1992 llovió por arriba de la media, hubo mayor escurrimiento superficial, los embalses se llenaron e incluso hubo derrames importantes; de 1993 a 2001 la lluvia ha sido persistentemente menor, lo cual, ante la creciente demanda de agua, ha contribuido a la presencia de una pertinaz sequía; de hecho, los volúmenes captados y almacenados en las presas han alcanzado mínimos históricos (Velasco y Aparicio, 2002). Todo esto ha ocasionado graves trastornos económicos en la región, y la actividad principal, que es la agricultura de riego y las relacionadas con ella, se han visto sensiblemente afectadas: las restricciones en superficies a regar han conducido a situaciones de crisis en el sector agrícola y ganadero (Velasco, 2002). La ilustración 6 muestra las isoyetas correspondientes para el año 2001, tomado como ejemplo de los últimos años deficitarios. Entre estos años, el 2000 ha sido el menos severo, pero tampoco superó las condiciones medias.

Ilustración 6. Isoyetas en milímetros para el año 2001; cuenca del río Conchos, México.



Para la estación meteorológica Delicias (clave de identificación 08044, 28.18°N, 105.48°W), situada aproximadamente en el centro de la cuenca, y que puede considerarse representativa de las condiciones medias de la misma, los valores anuales registrados de lluvia para los últimos 17 años se muestran en la ilustración 7; la

Ilustración 7. Precipitación anual y promedio para la estación Delicias, Chihuahua, México (28.18°N, 105.48°W) de 1985 a 2001, en milímetros.

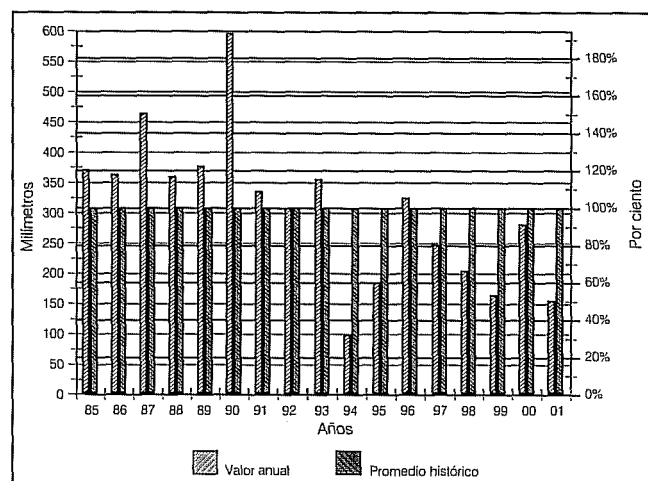


Ilustración 8. Porcentaje de lluvia en 2001 respecto a la media anual. Cuenca del río Conchos, México.

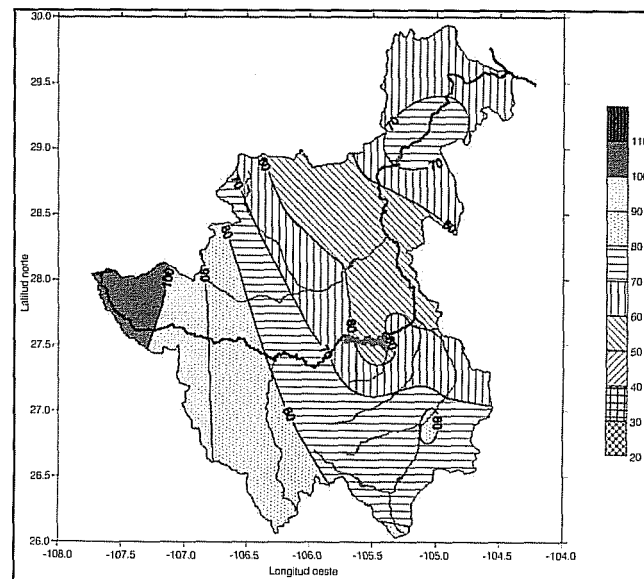


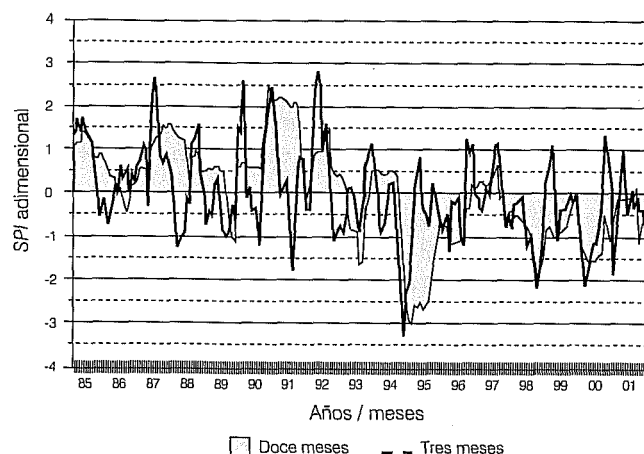
ilustración 8 representa el porcentaje de lluvia que ocurrió regionalmente, en relación con la media histórica para el año 2001; como se aprecia, 2001 fue un año con significativo déficit en la lluvia.

Índices de sequía para la cuenca del río Conchos

En la ilustración 9 se presenta la variación temporal del *SPI* para la estación Delicias a escalas de tres y doce meses para los años 1985 a 2001, inclusive. Se aprecia que entre más corta es la escala temporal, mayor resulta la variación del índice; es decir, la escala a tres meses muestra altibajos más frecuentes y pronunciados, mientras que la escala a doce meses presenta menos variación y, por ende, mayor persistencia de los valores positivos para las épocas de relativa abundancia, como ocurre de 1985 a 1992, y también en los valores negativos, como sucede de 1993 a 2001.

La ilustración 10 muestra el comportamiento temporal del *PDSI*. Aquí se aprecia cómo evoluciona el balance de agua en el suelo, de acuerdo con las condiciones de cálculo supuestas (2.54 cm de capacidad de retención en la capa más superficial y 12.7 cm en la subyacente); se observa que en los últimos años los valores persistentemente negativos del índice concuerdan con los demás hechos que conducen a afirmar la presencia de la sequía. Nótese el parecido de esta ilustración con la escala anual del *SPI* de la ilustración 9. Por otro lado, aunque el *PDSI* tiene una tendencia similar, sus valores son más persistentes; es decir, de acuerdo con este

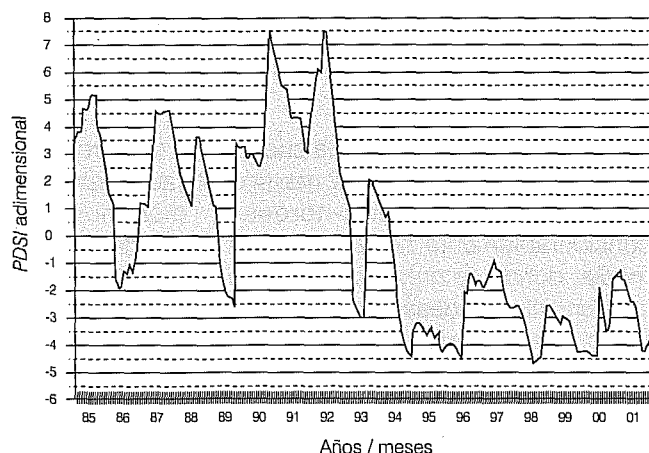
Ilustración 9. SPI para la estación Delicias, Chihuahua (28.18°N, 105.48°W), representativa de las condiciones medias de la cuenca, de enero de 1985 a diciembre de 2001.



método, las condiciones de sequía para esta estación meteorológica y su área de influencia se mantienen en niveles de moderada a extrema, mientras que con el *SPI*, los valores obtenidos muestran condiciones de incipiente a severa.

Obtenidos los índices para diversas estaciones referenciadas geográficamente es conveniente visualizar el comportamiento de la sequía en términos espaciales para analizar la extensión espacial del

Ilustración 10. PDSI para la estación Delicias, Chihuahua (28.18°N, 105.48°W), de enero de 1985 a diciembre de 2001.



fenómeno, lo que permite apreciar su severidad en la escala seleccionada. Para ese efecto se presentan los mapas de ambos índices para una misma escala temporal, y para la misma fecha de todos los puntos o estaciones de observación.

La ilustración 11 muestra el SPI en toda la cuenca para el periodo enero-diciembre de 1994. Como se aprecia, a escala anual, la sequía según este índice estuvo presente en gran parte de la cuenca, con valores que llegaron hasta los correspondientes a sequía extrema. La ilustración 12 muestra el plano de SPI para el año 1990 a escala temporal anual. La comparación visual de ambas ilustraciones, bajo la misma escala de valores del índice, muestra claramente que 1990 fue un año húmedo, mientras que 1994 tuvo severas insuficiencias en la lluvia.

Por su parte, la evaluación de la sequía con el PDSI se hizo a diciembre de los mismos años—1990 y 1994—que, como ya se ha mencionado, correspondería a la escala anual del SPI. Para este propósito se siguió a Kim—et al. (2002), suponiendo que la capacidad de retención de agua de la capa de suelo más superficial es de 2.54 cm, mientras que la capa subsuperficial retiene 12.7 cm, para un total de 15.24 cm. Estos valores son los utilizados por el Centro Nacional de Datos Climáticos de los Estados Unidos (NCDC, 2003) en regiones similares del estado de Texas en cuanto a clima y suelo.

Visto a escala anual, a diciembre de 1994, como se muestra en la ilustración 13, las condiciones de sequía descritas por el PDSI tienen una tendencia similar a las correspondientes al SPI para el mismo año (ilustración 11), pero parecen aún más intensas, pues a excepción del extremo suroeste de la cuenca, el resto presenta

Ilustración 11. SPI para el periodo enero-diciembre de 1994 en la cuenca del río Conchos, México.

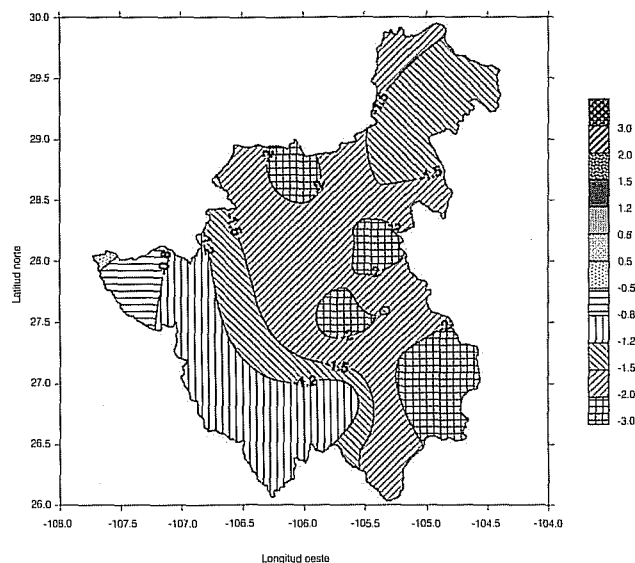
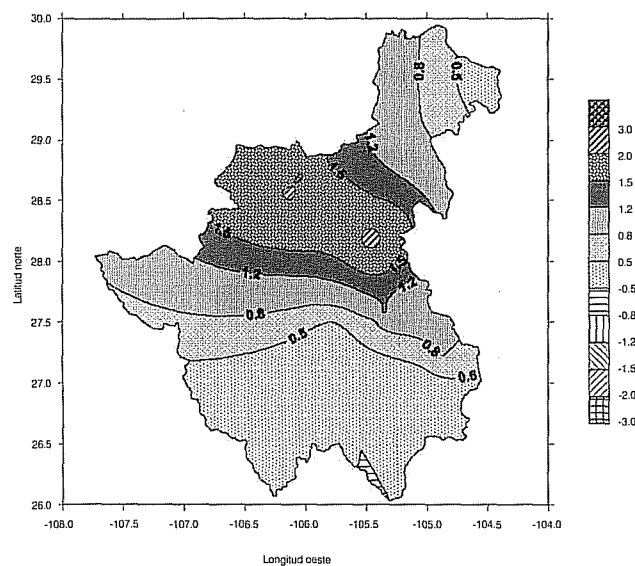


Ilustración 12. SPI para el periodo enero-diciembre de 1990 en la cuenca del río Conchos, México.



valores menores de -2, alcanzando incluso condiciones de sequía extrema en algunas áreas del centro. También hay semejanzas entre ambos índices para el año 1990, como se observa en las ilustraciones 12 y 14, las cuales muestran que las condiciones de humedad fueron superiores a los valores normales.

13. *PDSI* para el año 1994 en la cuenca del río Conchos, México.

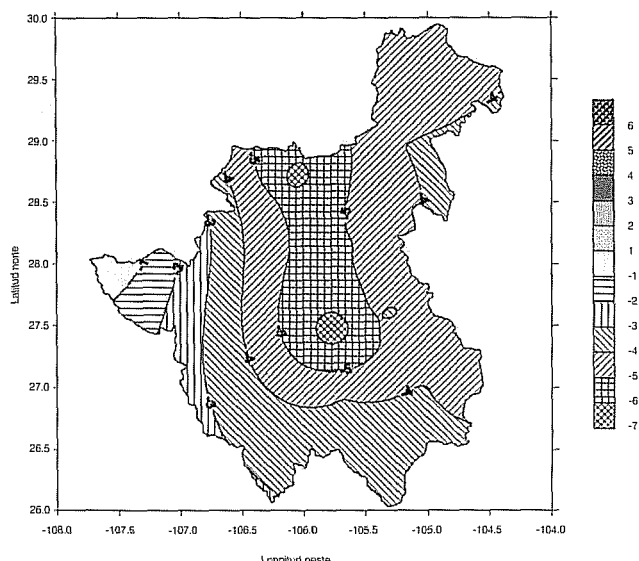
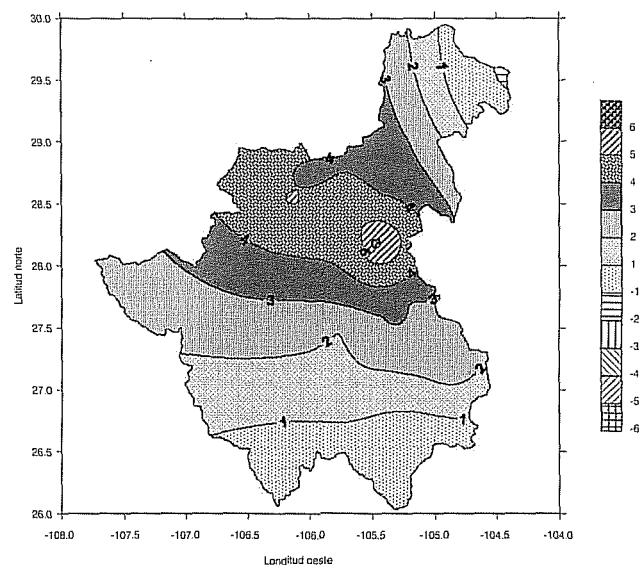


Ilustración 14. *PDSI* para el año 1990 en la cuenca del río Conchos, México.



La cuenca del río Pecos

El río Pecos se origina en la pendiente occidental de la sierra de Santa Fe en Nuevo México, Estados Unidos de América, y fluye hacia el sureste hasta su confluencia con el río Bravo o Grande, cerca de Del Río, Texas, y Ciudad

Acuña, Coahuila. El área total de drenaje de la cuenca del río Pecos es de 113,900 km². Hay numerosos almacenamientos pequeños a lo largo del río Pecos, que proveen de agua a la irrigación y zonas urbanas.

Precipitación en la cuenca

Los patrones de lluvia en esta cuenca son similares a los de la cuenca del río Conchos: mayor cantidad en las zonas montañosas del norte-noroeste, disminuyendo considerablemente hacia los valles bajos de la parte media, donde se presentan los menores valores, hasta las condiciones desérticas en la confluencia con el río Bravo. El rango de lluvia media anual histórica en la cuenca varía de 200 a 600 milímetros. Para efectos de este estudio, se consideraron datos históricos meteorológicos de 29 estaciones distribuidas en la cuenca, que se enumeran en el apéndice.

Índices de sequía para la cuenca del río Pecos

En las ilustraciones 15 a 18 se muestran los isovalores de ambos índices analizados para los años 1990 y 1994, considerados, como se ha mencionado, el más húmedo y el más seco de la última década. Como puede observarse, la tendencia en el comportamiento de la humedad disponible en el suelo (*PDSI*, ilustraciones 15 y 16), y de la lluvia (*SPI*, ilustraciones 17 y 18) es similar a la correspondiente a la cuenca del río Conchos, aunque menos acusada, pues 1990 fue menos húmedo en el Pecos que en el Conchos, y 1994 también fue menos seco. Esto muestra que es posible que se presenten condiciones diferentes de sequía en años específicos en ambas cuencas, lo cual podría orientar la percepción del fenómeno en forma distinta a ambos lados de la frontera.

Comparación de índices de sequía entre las cuencas de los ríos Pecos y Conchos

Para fines comparativos de los índices de sequía entre las cuencas de los ríos Conchos y Pecos, se hizo un análisis de ambos índices en un año típicamente seco (1994) y uno típicamente húmedo (1990). En las ilustraciones 13 y 14 se muestran los resultados correspondientes al *PDSI* para la cuenca del río Conchos, y en las ilustraciones 15 y 16, los que se refieren a la cuenca del río Pecos. Para el caso del *SPI*, las ilustraciones 11 y 12 para el Conchos, y 17 y 18 para el Pecos, muestran lo correspondiente. Se observa que en ambas cuencas, en 1994 la sequía tiende a ser más intensa en sus partes medias, y que las partes altas son relativamente más húmedas. En el año húmedo (1990), por su parte, el índice de Palmer alcanza valores

Ilustración 15. *PDSI* para el año 1994 en la cuenca del río Pecos, Estados Unidos de América.

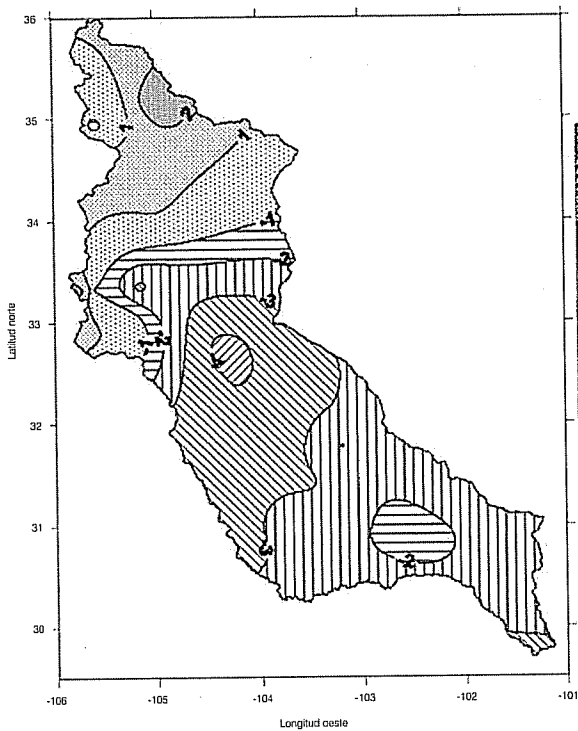


Ilustración 17. *SPI* para el periodo enero-diciembre de 1990 en la cuenca del río Pecos, Estados Unidos de América.

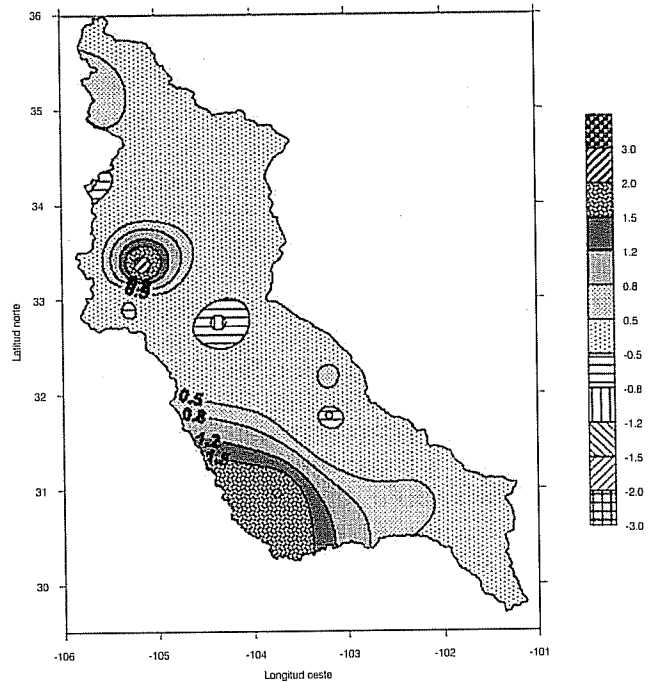


Ilustración 16. *PDSI* para el año 1990 en la cuenca del río Pecos, Estados Unidos de América.

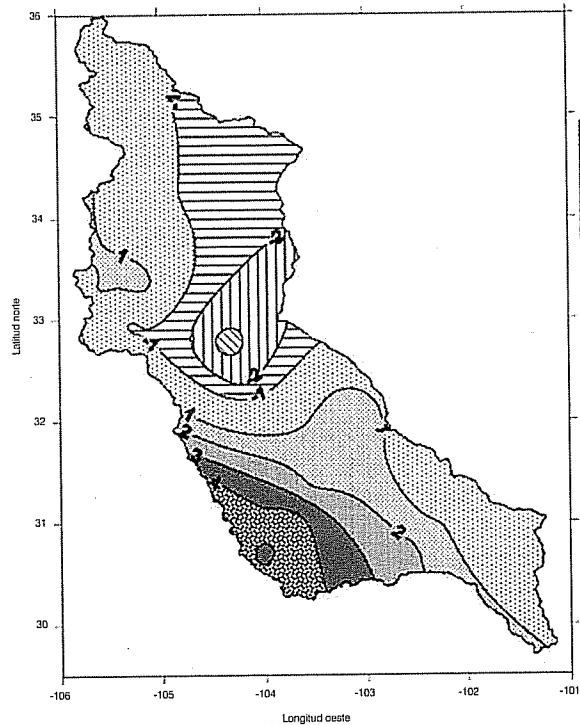
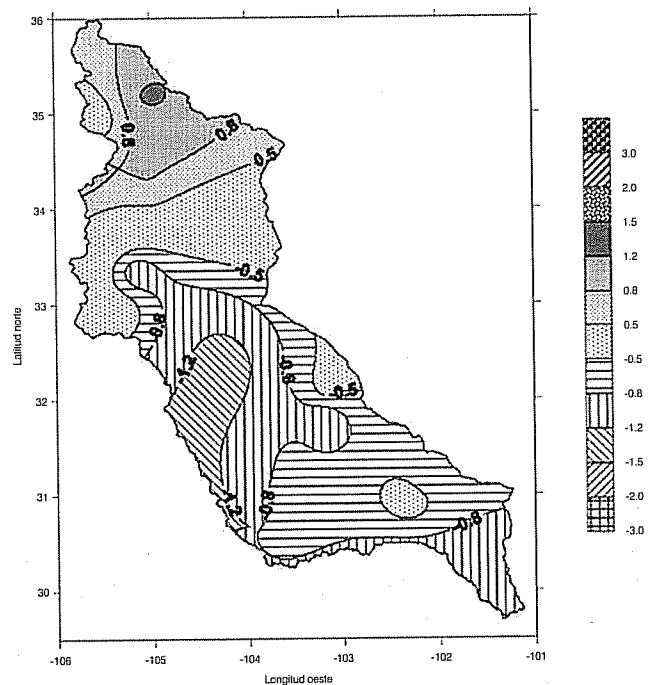


Ilustración 18. *SPI* de enero a diciembre de 1994 para la cuenca del río Pecos, Estados Unidos de América.



de hasta cinco en algunas partes de ambas cuencas, mientras que en la cuenca del Conchos, el valor mínimo no es menor que el correspondiente a las condiciones normales, pero en la del Pecos llega a indicar sequía moderada en el centro de la cuenca. En 1994, por otro lado, se observa una sequía mucho más intensa en la cuenca del río Conchos —con índices menores que -5 , es decir, sequía excepcional—, que en el caso del Pecos, donde sólo en una pequeña porción del centro de la cuenca el índice alcanza valores hasta de -4 .

En las ilustraciones 19 y 20 se muestra la distribución espacial del *SPI* y el *PDSI* para ambas cuencas en los años de 1990 y 1994, respectivamente. De estas gráficas se puede concluir que en la cuenca del río Conchos se extremaron las condiciones tanto de sequía como de abundancia de precipitación; es decir, en el año abundante de 1990, ambos índices en dicha cuenca estuvieron por encima de los correspondientes al río Pecos, y en el año seco, 1994, ocurrió lo contrario. Por otra parte, se aprecia que en el año seco de 1994 el *PDSI* indica condiciones de sequía más severas que el *SPI*, aunque la diferencia no es muy significativa.

Análisis de sensibilidad sobre el índice de Palmer

Con el objetivo de examinar los posibles efectos del contenido de humedad disponible en el suelo en el cálculo del índice de Palmer se hicieron dos tipos de pruebas: manteniendo una capacidad total de ambas capas y variando la proporción entre las dos, y también variando el total. En la primera prueba se conservaron 15.24 cm (seis pulgadas) totales de lámina como capacidad de campo (CC), y se probaron proporciones 1:5, 2:4 y 3:3 de las capas superficial y profunda, respectivamente. En la gráfica de la ilustración 21 se muestran los resultados para la estación Presa Chihuahua, en la cuenca del río Conchos. Como se aprecia, las variaciones entre estas alternativas son mínimas. Se hicieron pruebas similares en otras estaciones y los resultados fueron similares.

Por otra parte, considerando que las características de los suelos se manifiestan, entre otros hechos, en su capacidad de retención de agua, para fines del análisis de sensibilidad se hizo el mismo cálculo, suponiendo una capacidad de campo de 25.4 cm (diez pulgadas), en lugar de los 15.24 que se usaron en el resto del estudio. En la ilustración 22 se muestra el resultado. Aquí se puede apreciar que si bien la tendencia general se mantiene igual en todos los 31 años de cálculo, hay ciertos años en que, puntualmente, el índice puede variar de -2 a $+1$, como en 1988, o de $+2$ a -1 , como en 1999. Este efecto parece deberse a que el suelo con menor capacidad de campo

tiene menos inercia para el movimiento del agua. El resultado sugiere la necesidad de evaluar con mayor precisión la capacidad de campo de los suelos al aplicar el índice de Palmer, incluso cuando la división artificial del suelo en dos capas no influye significativamente en los resultados.

Conclusiones

Aunque existen diferentes métodos para detectar y evaluar la sequía, usualmente ninguno es mejor que los otros en todas las condiciones debido a la complejidad del fenómeno, el cual ni siquiera tiene una definición ampliamente aceptada (Prat, 1996), por un lado, y a que cada método atiende diferentes objetivos, por el otro.

El *SPI* es un método estadístico que caracteriza la abundancia o insuficiencia de la lluvia en el tiempo y por periodos definidos, respecto a las condiciones medias históricas. Se fundamenta en la propiedad de que, usualmente, los datos de precipitación tienen un buen ajuste a la función gamma incompleta. Al obtener esta función paramétrica para un registro de precipitación y luego transformarla a la normal estándar, es posible expresar el índice buscado en términos de la desviación estándar.

La posibilidad de utilizar varias escalas temporales permite caracterizar la sequía como insuficiencia de la lluvia para diversos periodos de interés: mensual, estacional, anual, etcétera. Esto permite evaluar la recurrencia y persistencia del fenómeno para diversos fines o intereses: el mensual como indicador de la sequía meteorológica o de corto plazo; el estacional para los aspectos agrícolas de corto a mediano plazo, y el anual para la sequía hidrológica de mediano a largo plazo.

El *PDSI*, por su parte, se basa en condiciones meteorológicas, edafológicas, geográficas y de uso consuntivo de las plantas, lo que conduce a un balance hídrico en el suelo en el que si la oferta de agua no supera a la demanda, se presentan condiciones de déficit y, por tanto, de sequía. A pesar de la debilidad científica de algunas de las bases del método y de las suposiciones en la información que usa, los resultados son consistentes con los del *SPI* en cuanto a la caracterización de las condiciones de sequía en las cuencas de los ríos Conchos y Pecos.

El *SPI* es probablemente el índice actual que sintetiza más apropiadamente las características de la sequía como fenómeno natural, partiendo del principio de que la lluvia, como parte del ciclo hidrológico, define si existe abundancia o déficit de agua respecto a las condiciones medias de la escala o periodo que se considere. El *PDSI*

Ilustración 19. Distribución espacial del SPI y el PDSI para ambas cuencas en el año húmedo de 1990.

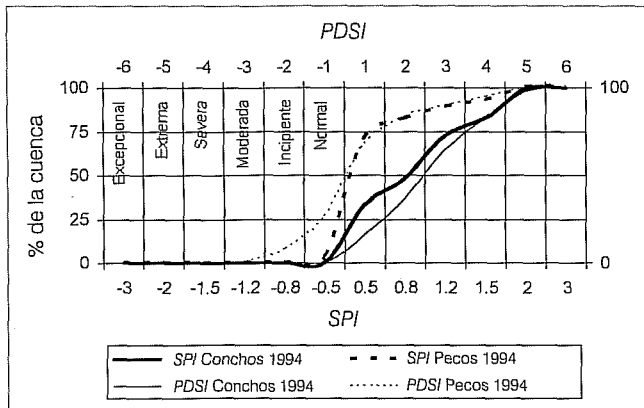
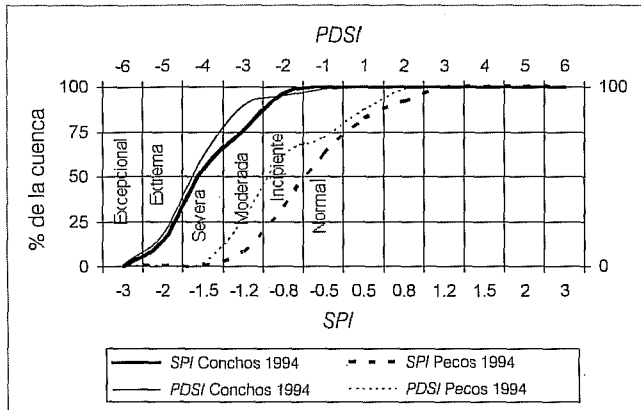


Ilustración 20. Distribución espacial del SPI y el PDSI para ambas cuencas en el año seco de 1994.



refleja las deficiencias en suplir las necesidades evapotranspirativas, dadas éstas por la capacidad de retención del suelo, la evapotranspiración potencial, y la ocurrencia de la lluvia y temperatura.

En esta aplicación, ambos métodos tienen un comportamiento similar, sobre todo cuando el PDSI se compara con el SPI a escala anual, y en ambos casos resulta que en la cuenca del río Conchos, durante los últimos años analizados y hasta 2001, se han presentado condiciones de sequía y déficit de agua. La interpretación de estos resultados es que para las condiciones hidrometeorológicas que se presentaron en ese periodo,

Ilustración 21. Análisis de sensibilidad del índice de Palmer a variaciones en la proporción de humedad disponible entre las dos capas de suelo en pulgadas. Estación Presa Chihuahua (clave 08001, 29.52°N, 106.20°W).

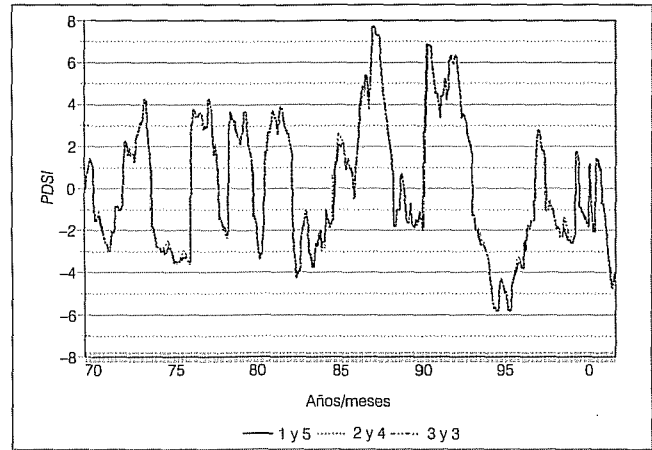
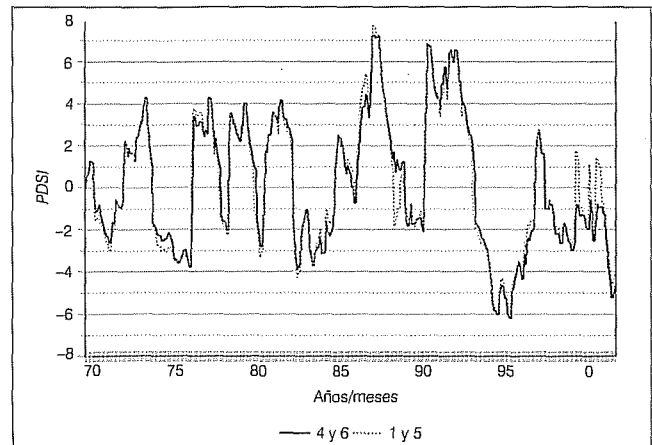


Ilustración 22. Análisis de sensibilidad del índice de Palmer a variaciones en la humedad disponible total en la zona de raíces en pulgadas. Estación Presa Chihuahua (clave 08001, 29.52°N, 106.20°W).



y dadas las características geográficas y edáficas de la región, las necesidades evapotranspirativas de la vegetación (natural o cultivada) no se alcanzaron a satisfacer con la lluvia registrada y, por ende, hubo condiciones de déficit de agua, que en algunas áreas de la cuenca del río Conchos llegaron a niveles de sequía extrema.

Por otro lado, es recomendable que si se usa el PDSI, se tenga cuidado en la selección del valor de la capacidad de campo global, pues las deficiencias en la estimación de este parámetro pueden producir resultados puntuales imprecisos.

Apéndice. Relación de estaciones meteorológicas utilizadas

Cuenca del río Conchos

Id	Estación	Latitud	Longitud	Periodo
08001	Presa Chihuahua	29.52	-106.20	70-01
08002	Camargo	27.68	-105.18	70-01
08003	Chihuahua	28.65	-106.08	70-01
08004	Presa L.L. León	28.99	-105.28	70-01
08005	Las Lajas	29.88	-107.03	71-01
08006	Delicias	28.18	-105.48	70-01
08007	El Rejón	28.61	-106.10	70-01
08008	A. González	28.48	-107.48	70-01
08009	Parral	26.88	-105.68	70-01
08010	Jiménez	27.15	-104.91	70-01
08012	Las Burras	28.51	-105.43	70-01
08013	Villa López	27.00	-105.03	70-01
08014	Casas Grandes	30.42	-107.93	70-01
08015	El Tintero	29.58	-107.38	73-01
08016	Presa Madero	28.16	-105.62	70-01
08017	Colina	27.58	-105.36	80-01
08018	Presa Boquilla	27.55	-105.41	70-01
08019	Valle Zaragoza	27.45	-105.78	70-01
08020	Temosachic	28.95	-107.83	70-01
08022	Ojinaga	29.56	-104.42	70-01
08023	San Gabriel	26.45	-105.54	80-01

Cuenca del río Pecos

Id	Estación	Latitud	Longitud	Datos
298015	Artesia	32.77	-104.38	72-01
410482	Bakersfield	30.94	-102.30	72-01
410498	Balmorhea	30.98	-103.75	72-01
291440	Capitán	33.33	-105.60	76-01
291469	Carlsbad	32.42	-104.23	72-01
291918	Clinescorner	34.93	-105.58	72-01
291982	Cochitidam	35.63	-106.32	75-01
412012	Cornudas	31.78	-105.47	72-01
412354	Dellcity	31.90	-105.22	79-01
292510	Dilia	35.18	-105.05	72-01
292865	ELK2E	32.95	-105.30	72-01
412794	El Paso 32 ene	31.83	-105.93	83-01
413262	Fort Davis	30.60	-103.88	81-01
413266	Forth Ancock 8 sse	31.22	-105.80	72-01
294346	Jal	32.10	-103.20	72-01
295084	Los Álamos	35.87	-106.32	72-01
415707	Mc Camey	31.13	-102.18	72-01
295960	Mountain Park	32.95	-105.82	72-01
416104	Mount Locke	30.67	-104.00	72-01

416892	Pecos	31.42	-103.50	72-01
296687	Pedral4E	34.63	-105.57	72-01
296804	Picacho 2WSW	33.35	-105.17	80-01
297254	Ramón	34.15	-105.00	72-01
297649	Ruidoso	33.33	-105.67	72-01
418022	Sanderson	30.15	-102.40	72-01
290600	Sandia Creek	35.67	-106.67	72-01
419275	Valentine 10WSW	30.50	-104.63	78-01
419295	Vanhorn	31.05	-104.83	72-01
419830	Wink Winkler	31.78	-103.20	72-01

Agradecimientos

Este trabajo está basado en investigaciones financiadas parcialmente por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, así como por el *Science and Technology Center for Sustainability of Semi-Arid Hydrology and Riparian Areas*, en el último caso bajo el *STC Program of the National Science Foundation*; acuerdo núm. EAR-9876800.

Recibido: 10/07/2003

Aprobado: 19/09/2003

Referencias

- ALLEY, W.M. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of climate and applied meteorology*. Vol. 23, 1984, pp. 1100-1109.
- CAMPOS, D.F. *Función de distribución de probabilidades Gamma Mixta: soluciones y aplicación*. X Congreso Nacional de Hidráulica. Morelia. Michoacán. Vol. 2, 1988, pp. 141-151.
- CORONEL, H. y LLANOS, J. Sobre el ajuste de la distribución Gamma a datos de precipitación pluvial. *Ingeniería hidráulica en México*, Vol. XI, núm. 1, enero-abril, 1996, pp. 15-20.
- DRACUP, J.A, LEE, K.S. y PAULSON, E.G. Jr. On the definitions of drought. *WRR*. Vol. 16, núm. 2, 1980, pp. 297-302.
- EDWARDS, D.C. y MCKEE, T.B. *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. Climatology Report. Núm. 97-2. Colorado State University. Department of Atmospheric Science, Paper 634, 1997, 155 pp.
- GIBBS, W.J. Drought-its definition, delineation and effects. *WMO: Drought. Special Environmental*. Núm. 5. Lectures presented at the twenty-six session of the WMO Executive Committee. WMO núm. 403, 1975, pp. 1-40.
- HAYES, M. 2003. *What is drought?* [en línea]. Drought Indices. <http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm>.
- KIM, T., VALDÉS, J.B. y APARICIO, J. Frequency and spatial characteristics of droughts in the conchos river basin, Mexico. *Water international*. Vol. 27, núm. 3, septiembre, 2002, pp. 420-430.
- MARTÍNEZ, P. Paradigmas emergentes para el manejo del agua en el siglo XXI. Conferencia Enzo Levi. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVI, número 4, II Época, octubre-diciembre de 2001, pp. 127-143.
- MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J. y KLEIST, J. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. 8th Conference on Applied Climatology, del 17 al 22 de enero, Anaheim, California, Estados Unidos de América, 1993, pp. 179-184.
- MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J. y KLEIST, J. *Drought monitoring with multiple time scales*. 9th Conference on Applied Climatology, del 15 al 20 de enero, Dallas, Texas, 1995, pp. 233-236.
- MOORE, J., RAST, W. y PULICH, W. *Proposal for an integrated management plan for the Rio Grande/Rio Bravo*. Asociación Mexicana de Hidráulica, First International Symposium on Transboundary Waters Management. Monterrey, México. Avances en hidráulica 10, 2002, pp. 189-204.
- NCDC. National Climatic Data Center. [en línea], <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>, 2003.
- NDMC. National Drought Mitigation Center. Página web del NDMC www.unl.edu/ndmc. [eb línea]. Universidad de Nebraska, 1998.
- NOAA. Paleoclimatology Program. *North American Drought: A Paleo Perspective*. <http://ngdc.noaa.gov/paleo/drought/> (Feb. 5, 2003). NCDC. 2003. *National Climatic Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration*. [en línea]. Página web <http://www.ncdc.noaa.gov/>, 2000.
- ORIVE, A.A. Informe técnico sobre el Tratado Internacional de Aguas. *Irrigación en México*. Julio-septiembre, 1945.
- PALMER, W.C. *Meteorological drought*. U.S. Washington D. C.:Department of Commerce. Weather Bureau. Research Paper 45, 1965, 58 pp.
- PALMER, W. C. Keeping track of soil moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index. *Weatherwise* 21, 1968, pp. 156-161.
- PONCE, V.M. *Engineering hydrology*. New Jersey, E.U.A.: Prentice Hall, 1989.

- POSTEL, S. *Administración del agua en épocas de escasez*. Traducción de Virginia Ugalde. Jiutepec, Morelos, México: IMTA. Colección Universo del Agua. Serie Agua y Ecología, 1991, 71 pp.
- PRAT I.F., N. La gestión ecosistémica del agua, necesidad de una visión integrada. *Tecnología del agua*. Núm. 150, abril, 1996, pp. 63-70.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Plan Nacional Hidráulico 1981, anexo 2: *Disponibilidad de Agua y Suelo*. México, 1981.
- TCPS. *The dispute over shared waters of the Río Grande/Río Bravo. A Primer*. Texas Center for Policy Studies, Austin, Texas. [en línea]. <http://www.texascenter.org/borderwater>, 2002, 17 pp.
- VELASCO, I. y COLLADO, J. Causas, efectos y maneras de afrontar las sequías. *Tláloc*. AMH. Año V, núm. 12, México, 1998, pp. 17-22.
- VELASCO, I. *Detección y evaluación de la sequía meteorológica mediante el SPI*. IV International Dialogue on Water Management, paper 158. Foz do Iguazú, Brasil, 2001.
- VELASCO, I. *Plan de preparación para afrontar sequías en un distrito de riego*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, México, 2002, 193 pp.
- VELASCO, I. y APARICIO, J. *Drought in the Conchos river basin and water deficit*. Asociación Mexicana de Hidráulica, First International Symposium on Transboundary Waters Management. Monterrey, México. *Avances en Hidráulica* 10, 2002, pp. 631-638.
- VELASCO, I., APARICIO, J., VALDÉS, J. y KIM, T. *Drought evaluation on the Pecos river and Conchos river basins, through the Palmer index*. Asociación Mexicana de Hidráulica, First International Symposium on Transboundary Waters Management. Monterrey, México. *Avances en Hidráulica* 10, 2002, pp. 89-97.
- WILHITE, D.A. Drought Planning: a Process for State Government. *Water resources bulletin*. Vol. 27, núm. 1, 1991, pp. 29-38.
- WILHITE, D. *Improving drought management in the West. The Role of Mitigation and Preparedness*. National Drought Mitigation Center. Report to the Western Water Policy Review Advisory Commission, 1997, 46 pp.
- WMO. *Drought and agriculture*. Technical Note No. 138. WMO núm. 392. Ginebra, Suiza, 1975.
- WOODHOUSE, C.A. y OVERPECK, J. T. 2000 years of drought variability in the Central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 79, núm. 12, 1998, pp. 2693-2714.

Abstract

VELASCO, I., APARICIO, J., VALDÉS, J.B., VELÁZQUEZ, J. & KIM, T.W. Drought index assessment in the watersheds of affluents from the Río Bravo/Río Grande River. Hydraulic engineering in México (in Spanish). Vol. XIX, no. 3, July-September, 2004, pp. 37-53.

There are several methods and indices to characterize drought, but none of them is superior to the others in all circumstances. The most frequently used indices in North America are the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Palmer Drought Severity Index (PDSI). Each one has characteristics which can be advantageously used to characterize drought and trigger actions established in Drought Mitigation Plans. The 1944 Mexico-US Treaty on conjunctive management of the Colorado, Tijuana and Bravo/Grande Rivers, for example, foresees ways to modify the mutual water allocations between the two countries in case of extreme drought. However, it does not define precisely such concept. Therefore, it is important to examine in detail the applicability and characteristics of both methods to characterize droughts. This paper shows the application of the SPI, which is based only on precipitation data and reflects the temporary rain efficiency, considered as the hydrological component that determines, to a great extent, the occurrence and characteristics of a drought. The PDSI method is also studied. This index is based on soil moisture balance for the soil layer where crops grow, and, therefore, not only precipitation and temperature have influence in water availability, but also soil characteristics are decisive. Both indices are applied to the Conchos and Pecos watersheds, in order to evaluate their behavior. When time scales are appropriate for both methods, the results obtained are similar, and they show that droughts have been persistent and recurrent over the region during the last few years. Besides, a sensitivity analysis of PDSI to some parameters is presented.

Keywords: drought, drought indices, water deficit, rainfall insufficiency.

Dirección institucional de los autores:

*Dr. Israel Velasco
Dr. Javier Aparicio
M. en C. Jaime Velázquez*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Coordinación de Tecnología Hidrológica,
Paseo Cuauhnáhuac 8532,
colonia Progreso,
62550 Jiutepec, Morelos, México
ivelasco@tlaloc.imta.mx, japaricio@tlaloc.imta.mx,
jaimevel@tlaloc.imta.mx

*Dr. Juan B. Valdés
Dr. Tae-Woong Kim*

NSF Science and Technology Center for
the Sustainability of Semi-Arid,
Hydrology and Riparian Areas (SAHRA),
Department of Hydrology and Water Resources,
University of Arizona, Marshall Building, 845 N.,
Park Avenue, Tucson, Arizona, 85721,
teléfono: 520 626 6974,
fax: 520 626 7770,
jvaldes@u.arizona.edu
taek@email.arizona.edu