



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

APLICACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI) EN LA DETECCIÓN DE SEQUÍAS HISTÓRICAS EN MÉXICO (1920-2000)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

LUIS MANUEL GALVÁN ORTIZ

ASESORA DE TESIS:

DRA. MARIA ENGRACIA HERNÁNDEZ





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

APLICACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI) EN LA
DETECCIÓN DE SEQUÍAS HISTÓRICAS EN MÉXICO (1920-2000)

Luis Manuel Galván Ortiz

Al Dr. Miguel Cortez
Mi temaztiani (maestro)

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento, admiración y respeto al Dr. Miguel Cortez Vázquez, quien propuso y dirigió la presente investigación, así como el haberme acercado a las nuevas técnicas de análisis en Climatología (ciencia que erróneamente la consideraba sinónimo de clasificación climática) por medio de las clases que impartía en el Colegio de Geografía. Para México, con tantas carencias en materia de producción científica (y otras) le resulta una gran pérdida el fallecimiento de este destacado climatólogo quien se encontraba en la plenitud de su carrera como investigador.

“Tinochtin ompa ticateh”

(Todos vamos para allá)

Al personal del Servicio Meteorológico Nacional, por brindarme apoyo técnico y bibliográfico para la elaboración de esta investigación. A Jorge Luis Vázquez de AGROASEMEX, quien me proporciono valiosa información así como recomendaciones personales que me han sido de gran ayuda.

A los sinodales Dr. Álvaro Sánchez, Mtra. Leticia Gómez, Lic. Francisco Hernández y Mtro. José Morales quienes me proporcionaron sus comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo. Particularmente quiero manifestar mi agradecimiento a la Dra. María Engracia Hernández quien me brindó su apoyo

ante la gran pérdida del Dr. Miguel Cortez justo antes de dar por terminada esta investigación, motivo por el cual fungió como asesora de esta tesis.

A mi familia, Josefina, Roxana y Carlos, quienes me han apoyado durante este camino de formación profesional, especialmente a mi madre que gracias a su ayuda económica y una Universidad gratuita pude dedicarme al estudio de tiempo completo. De igual manera, agradezco a la Sra. Adriana Cancino y Jesús Vera, quienes siempre me han apoyado en todos los aspectos, personas que siento como parte de mi familia. Finalmente a Adriana, gracias por estos años de estar junto a mí como pareja, colega y amiga.

Nanmechmotlazohcamachililia
(Se los agradezco profundamente)

Luis Manuel Galván Ortiz
México, DF
Marzo 2007

INDICE

Índice.....	3
Agradecimientos.....	5
Introducción.....	7
Capítulo 1	
Marco teórico	
1.1 Definición de sequía.....	10
1.2 Tipos de sequía.....	14
1.3 Índices para monitorear la sequía.....	15
1.3.1 Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI).....	16
1.3.2 Deciles.....	18
1.3.3 Anomalías.....	19
1.3.4 Índice estandarizado de precipitación (SPI).....	20
1.4 Consecuencias de la sequía.....	21
1.5 Sequía en México.....	25
1.5.1 Época prehispánica.....	27
1.5.2 Época colonial.....	27
1.5.3 Época moderna.....	28
1.5.4 Época contemporánea.....	30
Capítulo 2	
Base de datos y métodos	
2.1 Calidad de las series.....	36
2.2 Base de datos.....	37
2.3 El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).....	43

2.4	Cómo funciona el SPI.....	45
2.5	Distribución gamma.....	45
2.6	Cálculo del SPI.....	49
2.7	Escalas temporales del SPI.....	49
2.7.1	SPI de 3-meses.....	50
2.7.2	SPI de 6-meses.....	50
2.7.3	SPI de 12-meses.....	51
2.7.4	SPI de 24-meses.....	51
2.8	Interpretación de las gráficas de SPI.....	53
Capítulo 3		
Resultados y discusión		
3.1	Resultados.....	57
3.1.1	Análisis de la Figura 3.1.....	61
3.2	Discusión.....	67
3.3	Conclusiones.....	77
Anexo		
	Gráficas SPI 24-meses.....	82

INTRODUCCIÓN

La sequía, es quizá, el fenómeno climático más difícil de analizar, debido a que el comienzo y final de un evento no está al alcance de la percepción humana, esto se debe a que, a diferencia de otros fenómenos del clima como los ciclones tropicales, ésta tiene un lento proceso de desarrollo y retiro. Su duración depende del concepto del tipo de sequía bajo el cual se analice, por lo que ésta puede ser de meses o años. La escala espacial es difícil determinarla, ya que los límites no se pueden precisar con exactitud, a diferencia de otros desastres naturales como las erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra o inundaciones. La dificultad del análisis de una sequía también se ve reflejada en el número de índices que existen para su detección; se tiene que tomar en cuenta que ninguno de ellos es aceptado como el que mejor refleja las condiciones de sequía, de igual forma hay un gran número de definiciones del fenómeno, a pesar de esto no existe una universalmente aceptada.

El objetivo fundamental de la presente investigación es documentar los periodos de sequía que han afectado al territorio nacional durante el período 1920-2000, utilizando el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), así como el tomar en cuenta los parámetros más importantes para su identificación: distribución, duración e intensidad.

Las principales contribuciones que esta investigación pretende hacer al conocimiento del clima en México, están asociadas con la metodología para identificar periodos de sequía con el uso del SPI.

La base de datos que se utilizó, corresponde a la misma que maneja el *North American Drought Monitor* para el monitoreo de la sequía en México, Estados Unidos y Canadá. Ésta se compone de 132 estaciones climáticas distribuidas en todo el territorio nacional.

El conocimiento de las sequias históricas es importante para determinar la normalidad con la que se presentan, así, en estudios posteriores podrá servir como referente en un tema tan complejo como lo es el “cambio climático”, ya que para saber si las sequias serán de mayor o menor intensidad en futuros años se tiene que tomar en cuenta cómo se han presentado en tiempos pasados. De igual manera, si se pretenden dar los parámetros para el pronóstico de las mismas, un referente histórico siempre será una buena forma para la comprobación de estos estudios.

El estudio está dividido en tres capítulos. El primero, relacionado con el marco teórico, incluye: definiciones, tipos e índices para identificar este fenómeno así como sus consecuencias, por ultimo se presentan las sequías que han afectado al país según estudios basados en información no climática. El capítulo dos, describe la base de datos utilizada, así como las características del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). El último apartado incluye el análisis de los resultados

obtenidos, los cuales se compararon con trabajos de otros autores para su valoración y por último se indican las conclusiones.

CAPÍTULO 1

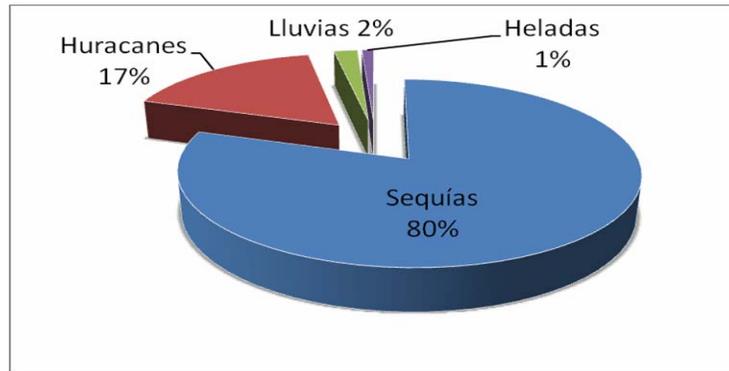
MARCO TEÓRICO

La sequía puede ser considerada como un fenómeno estrictamente climático, por tanto puede ser evaluada como una anomalía de precipitación caracterizada por una deficiencia de humedad, anormal y prolongada. Este enfoque no sólo evita incluir los complicados factores biológicos y las definiciones arbitrarias, sino que además permite derivar un sistema de análisis en el cual la severidad de la sequía es dependiente de la magnitud y duración de la deficiencia de humedad anormal. Incluso, con límites razonables, las comparaciones en el tiempo y espacio de la intensidad de las sequías son posibles (Campos, 1991).

1.1 Definición de sequía

Recientemente se ha comprobado que la sequía es el fenómeno climático que mayor daño económico causa a la humanidad (Coty et al., 1998). Ejemplo de esto es que la producción agrícola en México tiene una gran dependencia de los factores climáticos –principalmente la precipitación pluvial- que la hace altamente vulnerable ante el retraso, irregularidad o deficiencia persistente de la lluvia. En relación con esto último, los registros recientes (1995-2003) reflejan que los mayores daños en la agricultura ocasionados por desastres naturales son de origen hidrometeorológico, principalmente asociados con sequías (Figura 1.1) (AGROASEMEX, 2006) (página web 1).

Figura 1.1 Catástrofes agrícolas 1995-2003, por eventos climáticos extremos en México.



Fuente: basado en información de la SAGARPA

Los efectos provocados por una sequía difícilmente son notados en el tiempo en el que se presenta y sus impactos pueden continuar años después de que haya terminado (Wilhite, 1997). Existen factores climáticos que agravan la severidad de la sequía y que están asociados con ella como altas temperaturas, fuertes vientos y baja humedad relativa (National Drought Mitigation Center, 1991). De igual manera, la presencia de la corriente *El Niño* provoca un incremento en la intensidad de las sequías, como en los años 1997-1998 en que afectó la mayoría del territorio nacional, lo cual produjo pérdidas del orden de 204 millones de dólares por concepto de cosechas siniestradas, así como importaciones adicionales de granos con un costo de 1300 millones de dólares debido a la disminución registrada en la producción nacional (Delgadillo et al, 1999).

Uno de los primeros pasos en la investigación de un fenómeno es la definición de éste; en el caso de la sequía esto implica serios problemas debido a los diferentes enfoques o campos de estudio desde los cuales puede ser analizada (Campos, 1996).

La falta de una definición de sequía universalmente aceptada, provoca confusión sobre si existe o no en un lugar y tiempo determinado, así como su severidad, lo cual refleja la complejidad de este fenómeno climático (Wilhite, 1997). Aunque las definiciones son numerosas, la mayoría de ellas no establecen las características del fenómeno, lo que dificulta el entendimiento entre científicos, tomadores de decisiones y cualquier usuario de la información climática.

Un ejemplo de lo anterior es que los análisis de sequía que se difunden en la página del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) contienen una nota que aclara lo siguiente: "Los criterios utilizados para delimitar las zonas y severidad de la sequía en este producto no son iguales a los que se aplican para el Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN) o del Fondo de Atención a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC). Por ello no debe ser utilizado como diagnóstico oficial en asuntos relacionados con el FONDEN o el FAPRACC" (página web 2).

Los indicadores utilizados para declarar una sequía están asociados con aspectos como cantidad de precipitación, contenido de humedad del suelo, niveles de ríos, lagos y presas, e incluso salud de la vegetación (Wilhite y Svoboda, 2000).

A continuación se muestran algunas definiciones de sequía:

De acuerdo con el *National Drought Mitigation Center* (2002), la sequía es un rasgo normal y recurrente del clima, aunque con frecuencia se le considera como

un evento raro y fortuito. Ocurre de forma implícita en todas las zonas climáticas, pero sus características varían de forma significativa de una región a otra. La sequía es una aberración temporal de la lluvia y difiere de la aridez, la cual está restringida a regiones con una baja precipitación y es un rasgo permanente del clima.

En México el Centro de Investigación Sobre Sequía (página web 3), define a este fenómeno climático de la siguiente manera: ...”Una sequía es un período considerado como anormalmente seco, el cual persiste a través del tiempo y puede producir graves desbalances hidrológicos en una determinada región. La severidad de una sequía, depende en gran medida del grado de deficiencia de humedad, de la duración y de la superficie afectada”...

De acuerdo con Velásquez (sin fecha): la sequía es un periodo de tiempo anormal seco, de duración suficiente para que se presente un grave desequilibrio hidrológico, como daños en cultivos, escasez de agua, etc., dentro del área afectada.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2002) propone la siguiente definición: la sequía es un fenómeno meteorológico que ocurre cuando la precipitación es menor que el promedio y cuando esta deficiencia es lo suficientemente grande y prolongada como para dañar las actividades humanas.

Con frecuencia se confunde la sequía con la aridez, por lo que la *World Meteorological Organization* (1975) las distingue de la siguiente manera: la aridez se define generalmente en términos de baja precipitación y alta evapotranspiración (en promedio) y es una característica permanente de la región. La sequía por su parte, es una característica temporal en el sentido de que tiene presencia cuando la lluvia o humedad disponible se desvía apreciablemente por debajo de lo normal. La aridez está restringida a las regiones con baja precipitación y usualmente altas temperaturas, mientras que la sequía es posible virtualmente en cualquier régimen de temperatura y/o humedad. Mientras la aridez ocasiona que las actividades humanas se realicen en función de la baja en humedad permanente, con la sequía se interrumpen las actividades normales en la zona que afecta ante la disminución extraordinaria de humedad.

1.2 Tipos de sequía

El *National Drought Mitigation Center* (2004), clasifica a la sequía de la siguiente manera (página web 4):

Sequía meteorológica: normalmente, las medidas atmosféricas son los primeros indicadores de sequía. Este tipo de sequía se basa en la desviación de la precipitación normal durante algún período de tiempo. Esta definición es usada para regiones específicas y se base en una climatología regional.

Sequía agrícola: ocurre cuando no hay suficiente humedad en el suelo para satisfacer las necesidades de un cultivo en particular, durante un tiempo determinado. La sequía agrícola, se hace evidente después de la sequía meteorológica, pero puede identificarse antes de una sequía hidrológica.

Sequía hidrológica: se refiere a la deficiencia de suministro de agua en la superficie y en la profundidad del suelo. Es medida tanto en ríos como en lagos y en niveles subterráneos. Hay un retraso de tiempo entre la falta de lluvia o nieve y una disminución en el cauce de arroyos, ríos, lagos y reservorios, por lo que las medidas hidrológicas no son los primeros indicadores que detectan una sequía. Cuando es escasa la precipitación durante un periodo de tiempo, una estación por ejemplo, esta deficiencia se refleja en el decremento de los niveles de agua en la superficie y el subsuelo de la estación subsecuente.

En resumen, cada usuario del agua tiene su propia idea o concepción de sequía y cada concepción cambia con las condiciones operativas del usuario (Dracup et al., 1980).

1.3 Índices para monitorear la sequía

La falta de una definición única para la sequía se ve reflejada en el número de índices que han sido desarrollados para monitorearla. La mayoría de los planificadores del abastecimiento de agua encuentran útil consultar más de un índice de sequía antes de tomar una decisión (Hayes, 1998), ya que los datos

derivados de distintos índices se pueden comparar, los resultados semejantes podrán dar las bases para determinar con precisión la duración, extensión e intensidad de la sequía, como es el caso del *North American Drought Monitor*, que utiliza más de cinco indicadores (Palmer clásico, Palmer hidrológico, índice Z, índice estandarizado de precipitación, porcentaje de precipitación normal, etc.). A continuación se describen los índices de sequía que han sido más utilizados particularmente en México.

1.3.1 Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)

En 1965, W.C. Palmer desarrolló un índice para medir las anomalías de humedad, basó su índice en el concepto de suministro y demanda de la ecuación del balance hídrico, por lo que no considera sólo el déficit de precipitación en lugares específicos. El objetivo del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) es: proporcionar datos estandarizados que muestren las condiciones de humedad, así con la utilización del índice, estos datos pueden compararse espacial y temporalmente (Palmer, 1965). Posteriormente, se calcularon dos derivados de este índice, el Índice de Sequía Hidrológica de Palmer (PHDI por sus siglas en inglés) y el Índice Z que determina la sequía agrícola.

El PDSI es un índice meteorológico de sequía y responde a las condiciones atmosféricas que han sido anormalmente secas o húmedas en un período de tiempo determinado. La sequía medida por el PDSI arroja resultados sin tomar en cuenta las crecidas de los ríos, niveles de lagos y reservorios, además de otros

impactos hidrológicos de largo plazo (Karl y Knight, 1985). El PDSI es calculado con datos de precipitación y de temperatura, así como el contenido disponible de agua local del suelo. Desde el principio, todos los términos básicos de la ecuación del balance de agua pueden ser determinados, incluye la evapotranspiración, la recarga del suelo, las corrientes y la pérdida de humedad de la capa superficial del suelo. No se consideran el impacto de las actividades humanas en el balance del agua, como la irrigación (Hayes, 1998).

El PHDI surge de introducir modificaciones al PDSI destinadas a detectar las anomalías de humedad que afectan a la corriente de agua superficial, la disponibilidad de este líquido en el suelo y el nivel en lagos o embalses. El valor del PHDI evoluciona de forma lenta de un mes a otro, de tal forma que no es útil para detectar sequía meteorológica, ya que las reservas de agua no resultan afectadas hasta que ésta se ha prolongado en el tiempo. De igual forma, los valores de PHDI permanecen negativos meses después de que el PDSI retorne a valores próximos a cero (valores normales), dado el tiempo necesario de recarga de las reservas hídricas. En cualquier caso, los valores de PDSI y PHDI son casi equivalentes, por lo que mantienen los mismos valores de referencia para medir las situaciones de sequía (Marcos, 2001).

La segunda variación del PDSI es el Índice Z, que es utilizado para identificar la sequía agrícola, éste mide la anomalía mensual de humedad en un área para un mes determinado. El Índice Z, responde con rapidez a anomalías negativas de humedad de corta duración y permite detectar aquellos valores máximos de

precipitación durante un período de sequía meteorológica o hídrica que favorecen una producción agrícola próxima a la de un año normal (Marcos, op. cit.).

En México, el PDSI ha sido aplicado en trabajos realizados por: Douglas (1996) que muestra las características de la temperatura, precipitación y sequía en México; Vázquez y Arteaga (1997) cuyo trabajo muestra la presentación del software que calcula el índice; Vázquez (1999) exhibe una caracterización de las sequías en el estado de Chihuahua y norte de Durango; Herrera y Álvarez (1999) exponen con el PDSI las sequías en México durante el periodo 1921-1987 y Alcántara (2003) que, en su tesis de licenciatura, presenta los ajustes para México del PDSI.

1.3.2 Deciles

La Secretaría de Recursos Hidráulicos (1977), utilizó el método de los deciles para monitorear la sequía en México, ésta es una técnica estadística basada en las frecuencias acumuladas; se definen como los nueve valores que dividen a una serie de datos en diez partes iguales; el primer decil, se explica como aquella cantidad de lluvia que no es excedida por el 10% del total de la serie. De igual manera se explican el resto de los deciles. El orden o rango de decil, es el intervalo entre deciles; de tal manera que hay diez rangos de deciles (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Clasificación de Deciles

Deciles 1-2 20% más bajo	Muy por debajo del normal
Deciles 3-4 20% ligeramente bajo	Debajo del normal
Deciles 5-6 20% cerca de la media	Cerca del normal
Deciles 7-8 20% ligeramente alto	Sobre el normal
Deciles 9-10 20% más alto	Muy por arriba del normal

Fuente: Hayes, 1998.

1.3.3 Anomalías

Hernández (1994) calculó las anomalías anuales de la precipitación respecto a la moda, de 542 estaciones pluviométricas distribuidas a lo largo de la República Mexicana, con base en la fórmula:

$$\text{Anomalías (\%)} = \frac{X_i - M_o}{M_o} \times 100$$

En donde X_i es el valor de la precipitación de cada año y M_o la moda de largo período.

Las anomalías negativas significan que, en el año en que se presentaron, la precipitación fue menor que la moda, esto determina que fue un año seco. De acuerdo con este método en el trabajo, se consideran secos los años que presentan anomalías entre 0 y -25%; muy secos entre -25% y -50% y secos en

extremo cuando las anomalías son menores de -50%. Por otro lado, cuando las anomalías son positivas, entonces se trata de años húmedos o con exceso de humedad.

1.3.4 Índice estandarizado de precipitación (SPI)

El SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. El Centro de Investigación Sobre Sequía (CEISS), a partir del año 2002, con el uso del SPI monitorea la sequía en el estado de Chihuahua. Debido a que uno de los objetivos de la presente investigación es la aplicación de este índice en el análisis histórico de las sequías en México, en el capítulo siguiente se hace una descripción detallada del mismo.

La Tabla 1.2 muestra algunos de los índices de sequía que han sido utilizados en México, en ella se incluye el nombre del autor del índice, así como un concepto general del mismo, por último, se citan algunos de los trabajos que han aplicado los índices en el país.

Tabla 1.2 Índices de sequía que han sido utilizados en México.

Índice	Autor	Concepto principal	Aplicación en México
Índice de Palmer (PDSI).	Palmer, 1968.	Índice retrospectivo basado en la entrada, almacenamiento y salida de humedad del suelo.	Alcántara, 2003 (Nacional). Herrera y Álvarez, 1999 (Nacional). Vázquez, 1999 (Chihuahua y norte de Durango). Vázquez y Arteaga, 1997 (Nacional). Douglas, 1996 (Nacional).
Deciles.	Gibbs y Maher 1967.	Divide la distribución de ocurrencia sobre un largo periodo de precipitación.	Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1977 (Nacional).
Anomalías.		Se determina la anomalía de la precipitación respecto a la moda estadística de largo periodo.	Hernández, 1994 (Nacional).
Índice estandarizado de precipitación (SPI).	McKee et al., 1993, 1995.	Conversión de la distribución gamma original a una distribución normal de la precipitación y evaluación en desviaciones estándar.	CEISS, 2002 (Estatal). Velasco, 2000; 2001 (Cuenca del río Conchos).

Fuente: modificado de Hi-Ryong y Wilhite, 2003 (página web 5).

1.4 Consecuencias de la sequía

Los efectos de la sequía no son claramente observables, se extienden en un área geográfica más grande que otros desastres naturales, como los provocados por erupciones volcánicas, sismos, lluvias torrenciales, huracanes, entre otros, en donde el área afectada materialmente es la que determina la zona de impacto del fenómeno. Por estas razones, la cuantificación de los daños y los recursos necesarios para remediar una sequía, es una de las tareas más difíciles ante este fenómeno (Wilhite y Svoboda, op. cit.).

La vulnerabilidad ante una sequía en países pobres como México, es bastante diferente que en los países desarrollados, ya que en los primeros las preocupaciones principalmente se enfocan hacia problemas de seguridad, alimentación (para satisfacer las necesidades nutritivas de la población), degradación ambiental, y su retraso en el proceso de desarrollo (Ibid.), en esos países es común que los fenómenos naturales se enfrenten de manera reactiva, es decir, una vez ocurrido un evento se actúa ante los efectos que éste haya provocado. México debería tomar el ejemplo de Estados Unidos o Australia, países que son considerados como desarrollados, en los que se canalizan recursos importantes para la investigación y la planeación, antes, durante y después de un evento de desastre, lo que deriva en una menor vulnerabilidad de la población, por tanto, se puede decir que los países desarrollados actúan de manera preactiva ante un desastre asociado a un evento de sequía.

Los efectos inmediatos de la sequía golpean a la agricultura y, poco tiempo después, se extienden a todos los sectores de la economía, de manera que es inevitable que la población resulte afectada en su nivel de subsistencia y muy pronto todos los grupos sociales enfrentan diversos problemas (Florescano y Swan, 1995).

Las consecuencias humanas de una sequía grave dependen mucho de la manera en que se filtran sus efectos a través de las condiciones socioeconómicas y políticas de la sociedad. Por ejemplo, la reducción de la producción agrícola o los cambios de la generación de energía hidroeléctrica no son las consecuencias

últimas, los verdaderos problemas son el grado en que la gente se ve afectada en cuanto a ingreso, salud y estabilidad social (Maunder, 1990). Puesto que la sequía golpea a todas las empresas, las posibilidades de hallar empleo se reducen y, en consecuencia, el desempleo se generaliza. La sequía origina, entonces, problemas sociales que han sido bien documentados: desempleo, malnutrición, epidemias, mortalidad (especialmente infantil), migración interna y externa, aumento de violencia y criminalidad (Florescano y Swan, op. cit.). Como daños secundarios por las sequías se consideran a los incendios forestales y la aceleración de la erosión de los suelos (CENAPRED, op.cit.).

A manera de resumen, se presentan en la Tabla 1.3 los impactos de la sequía en los sectores: económico, ambiental y social, propuesto por Nagarajan (2003).

Tabla 1.3 Impacto de la sequía en la economía, el ambiente y los sectores sociales.

Economía	Ambiente	Social
<p>Pérdida de producción agrícola Pérdida de cultivos anuales y perennes. Daño a la calidad del cultivo. Reducción de la productividad de la tierra cultivable. Plagas de insectos. Enfermedades en las plantas.</p>	<p>Daño a especies animales y vegetales en estado natural. Deficiencia de alimento y agua potable. Enfermedades. Incremento de la vulnerabilidad a la depredación. Migraciones y concentraciones. Incremento del estrés. Daño a las plantas.</p>	<p>Hambruna. Desnutrición. Pérdida de vidas humanas. Estrés mental y físico. Incremento de enfermedades respiratorias. Incremento de conflictos.</p>
<p>Pérdida en la producción lechera y ganadera Reducción en la productividad de la tierra. Limitación de las tierras para pastar. Falta de agua para el ganado. Incremento en el índice de mortalidad en el ganado. Retrazo en la crianza. Incremento en la depredación.</p>	<p>Incremento en la intensidad y número de incendios. Pérdida de tierras húmedas. Impacto en estuarios (cambios en la salinidad).</p>	<p>Perturbaciones en las creencias culturales. Reevaluación de valores sociales (prioridades, necesidades, derecho). Reducción o modificación de las actividades recreativas. Disgusto público con los gobernantes. Desigualdad de la distribución de bienes para el alivio de la sequía.</p>
<p>Alcance de incendios Pérdida de producción maderera. Incendio de zonas naturales. Enfermedad en árboles. Plagas de insectos. Deterioro en la productividad de bosques.</p>	<p>Pérdida de biodiversidad. Erosión eólica.</p>	<p>Desigualdad en los impactos de la sequía con base en: grupos socioeconómicos, grupos étnicos, edad, género, antigüedad. Pérdida de valores estéticos.</p>
<p>Pérdida en la producción pesquera/aves de corral Pérdida de ingresos y quiebra de empresas dedicadas a esta actividad. Desempleo. Incremento en la demanda y déficit energético. Disminución en la producción de alimentos. Interrupción en el abastecimiento de agua. Tensión en instituciones financieras. Costo en el transporte de agua. Disminución del precio de la tierra. Agotamiento del agua corriente.</p>	<p>Agotamiento de reservorios y disminución del nivel de los lagos. Reducción del flujo de manantiales y ríos. Efectos en la calidad del agua. Efectos en la calidad de la tierra. Deterioro en la imagen del paisaje.</p>	<p>Reducción en la calidad de vida, cambio en el estilo de vida. Incremento de la pobreza en áreas rurales y urbanas. Migración de la población rural a zonas urbanas y otras regiones. Incremento en la necesidad de información y coordinación de actividades diseminadas.</p>

Fuente: Modificado de Nagarajan 2003.

1.5 Sequía en México

La ausencia de precipitaciones pluviales en el territorio nacional ha producido a lo largo de los años diversos perjuicios, sobre todo en las zonas agrícolas, donde es frecuente la pérdida de cosechas y hatos ganaderos, lo que repercute en el deterioro económico de la población afectada y, en casos extremos, induce a la pauperización de la población (Bitrán, 2001). Con una economía altamente dependiente del maíz, que constituye el alimento básico así como forraje para el ganado, México es vulnerable a la incidencia de la sequía. La mayor parte de la población rural cultiva maíz para su autoconsumo en tierras de temporal marginales, bajo condiciones climáticas precarias (Mosiño, 1976).

A principios del siglo XX, en la República Mexicana, el registro de datos meteorológicos confiables se limitaban al centro del país, pues la información de otras regiones no existía, era escasa o confusa. Mientras más se quiera ir atrás en el tiempo, el registro histórico de las sequías en México es más difuso; por ejemplo, hay datos que indican una sequía en 1064 en Coatepec, otra en 1286 en Otlaltepec y una más en 1328, en un lugar llamado *El Peñolcillo*, aunque se tienen estas fechas de sequías antiguas, como 1004, 1287, 1448, 1514, es difícil determinar su duración e imposible saber su extensión e intensidad (Florescano y Swan, op.cit.).

Hay una falta de información sistemática de las sequías en la historia de México. Por otro lado, debe considerarse que los registros climáticos existentes carecen de

precisión aunque esto no es exclusivo de México, aún en países como Estados Unidos se padece de esto, por lo que los científicos deben aplicar técnicas de análisis, para filtrar las inconsistencias de la información.

Entre más se remonta uno en el pasado, más grandes y continuas son las lagunas en la información climática. Es probable que, en tiempos más antiguos, hubiera períodos de sequía severos o geográficamente más extensos, pero se carece del registro de datos instrumentales de esos fenómenos (Ibid.). Por esta razón, cuando en climatología se habla de un nuevo registro record de una variable, se debe considerar el período de observaciones disponible, para tener una mejor idea de la representatividad del registro.

Con el fin de conocer cuáles han sido las sequías por las que a pasado el país a través del tiempo, se han considerado algunos trabajos históricos que han analizado las sequías en México los cuales toman en consideración diferentes fuentes de información, estos trabajos integran los siguientes periodos:

- Época prehispánica (antes del siglo XVI).
- Época colonial (siglos XVI, XVII y XVIII).
- Época moderna (siglo XIX).
- Época contemporánea (siglo XX).

1.5.1 Época prehispánica

Se habla de una sequía en el año de 1052 que asoló Tula y sus alrededores durante 26 años. Este evento, que puede tener algo de leyenda, se considera que pudo ser la principal causa de la caída del imperio tolteca (SARH, 1978).

Por el número de fuentes que la mencionan y la atención que se le dedicó, se puede decir que la sequía ocurrida hacia 1450 fue una de las más severas y de las que tuvo consecuencias más funestas. Al parecer esta sequía afectó un gran número de regiones. Entre sus consecuencias más desastrosas, está la grave escasez de maíz, que al parecer fue muy extendida y llegó a agotar las reservas imperiales de este producto agrícola básico; su intensidad y amplitud provocó una gran catástrofe en cuanto a pérdida de vidas. Otros de los graves efectos fueron: la venta de personas a cambio de maíz y la emigración a gran escala. Finalmente, la sequía de 1450 parece haber sido el origen de la construcción de una importante obra hidráulica que consistió en un canal para enviar agua desde Chapultepec a Tenochtitlán (Ibid.).

1.5.2 Época colonial

Durante el siglo XVI, sólo dos decenios no registran sequías, los de 1520 a 1529 y de 1560 a 1569. En el siglo XVII, sólo en una década no se presentó este fenómeno: de 1600 a 1609. En el período de 1700 a 1821 no hubo decenio en que no se padeciera sequía (Florescano y Swan, op. cit.).

Las crisis agrícolas más importantes provocadas por las sequías de 1624, 1695, 1735, 1808 y 1809, ocasionaron grandes movimientos migratorios, propagación e intensificación de epidemias, paro en las actividades económicas, tensión social en las ciudades y en ocasiones manifestaciones de descontento popular (SARH, op. cit.).

La crisis de subsistencia que siempre conlleva un alza de precios, se vuelve más intensa cuando la sequía azota distintas regiones productoras de granos, esto ocurrió en 1624, 1692, 1740, 1750, 1785 y 1807-1810, cuando más de una de las siguientes regiones agrícolas se vieron afectadas: la cuenca de México, Puebla–Tlaxcala, el Bajío y partes del Occidente (Nueva Galicia) y el Norte (Florescano y Swan, op. cit.).

1.5.3 Época moderna

En los años de 1808 y 1809 se presentó una severa sequía que afectó prácticamente todo el país; aunque ésta no fue la causa de la guerra de independencia, bien pudo haberla acelerado y una situación similar se presentó en 1908 y 1909 (SARH, op. cit.).

Durante el siglo XIX y principios del XX, se registraron 39 sequías de las que destacan por su extensión geográfica e intensidad las de: 1868, 1877, 1891 y 1892 (Florescano y Swan, op. cit.).

La SARH (op. cit.) documentó que, durante el siglo XIX, se presentaron sequías muy severas, como las de los años de 1822, 1823, 1834 y 1835 en la península de Yucatán. Esta fuente menciona que, en el año de 1877, ocurrió una sequía general, en la que casi todo el país presentó escasez de lluvias y en algunas partes el fenómeno fue extremo, lo que provocó la natural elevación de los precios del maíz y frijol. Las lluvias se vuelven a retrasar en 1878 y la Ciudad de México vivió un año difícil por el fuerte calor, la desecación de los lagos del norte y el problema general de la falta de agua. En el año de 1880, la sequía afectó severamente las regiones ganaderas y agrícolas del norte de México y la zona central del país.

Al final del siglo XIX y principio del siglo XX, durante los años 1891, 1892, 1896, 1905, 1909 y 1910, la sequía fue casi general en el país. Durante estos años la carestía de los alimentos afectó seriamente a las clases más necesitadas del país, por lo que fue necesario promulgar decretos para permitir la libre importación de cereales (Ibid.).

De acuerdo con Florescano y Swan (op. cit.), las sequías regionales más severas durante el siglo XIX fueron las de 1822–1823 y 1834–1835 en la península de Yucatán, y la de 1854, en Querétaro. La peor de todas fue la sequía de 1868 que azotó entre otras regiones, Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Aguascalientes, Nuevo León, Coahuila y la cuenca de México. Al final del siglo XIX, las sequías regionales más críticas por su distribución e intensidad, ocurrieron durante los años 1875, 1884-1885, 1896, 1901 y 1908.

1.5.4 Época contemporánea

En este período, se puede observar con mayor precisión, los efectos económicos y sociales provocados por las sequías, debido al incremento de la información documental así como la climática que, aunque no exhaustiva, ayudó a establecer una cronología de 38 sequías durante el período de 1910 a 1977 (SARH, op. cit.).

Mosiño (op.cit.), identificó una sequía que duró de 1937 a 1944. Menciona que cada año se informó sobre uno o más de los siguientes casos: escasez de víveres e inquietud civil, prohibición del gobierno de exportar productos agrícolas, control de precios en la industria alimenticia, cierre de los sistemas de procesamiento de los alimentos y escasez de potencia hidroeléctrica. Los niveles del lago de Chapala alcanzaron valores mínimos jamás registrados.

Entre los años de 1979 y 1988, el estado de Coahuila sufrió diez años de sequías. En número de años de ocurrencia le siguieron Guanajuato (diez años), Durango (nueve años) y Zacatecas (nueve años). Los estados que más pérdidas económicas sufrieron por esta causa fueron (en orden decreciente): Guanajuato, Zacatecas, Jalisco, Durango y Tamaulipas (Bitrán, op. cit.).

En 1994, se presentó una sequía con efectos devastadores en varios estados, cuando fallecieron 54 personas por deshidratación en Chihuahua; se reportó la muerte de 20 mil reses en Baja California Sur; se registraron pérdidas por 100 millones de pesos en la agricultura del estado de Guerrero y también resultaron

dañadas 5,000 hectáreas de cultivos en Tlaxcala, así como la pérdida de 12 mil hectáreas de maíz en Chiapas, a pesar de ser el estado que, tiene históricamente el mayor registro de precipitación del país (Bitrán, op. cit.).

CAPÍTULO 2

BASE DE DATOS Y MÉTODOS

Aunque existen múltiples índices para caracterizar la sequía (WMO 1975), la mayoría han sido desarrollados para condiciones y lugares específicos, y su aplicación a otros ámbitos frecuentemente es inadecuada. Además, algunos requieren determinada información que a menudo es escasa o inexistente en países que no cuentan con una larga tradición meteorológica, como es el caso del Índice de Palmer, que necesita datos de evapotranspiración, escurrimiento y humedad del suelo (Palmer 1965), información difícil de obtener en países como México. En el territorio nacional es conveniente utilizar índices como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), que a diferencia de otros índices, es práctico, ya que sólo utiliza datos de precipitación. Como se explicó en el capítulo anterior, ningún índice es totalmente aceptado, por lo que se considera adecuado utilizar más de uno para determinar la existencia de una sequía. Por ejemplo, en Estados Unidos se considera que una combinación de diferentes índices (Palmer, SPI, % de precipitación normal, entre otros) permite una mejor delimitación espacial y temporal del fenómeno. Para mayor información consultar los sitios de internet (páginas web 6 y 7) del *United States Drought Monitor* (USDM) y el *North American Drought Monitor* (NADM).

2.1 Calidad de las series

En las investigaciones del clima, la validez de los resultados depende de las técnicas empleadas en el análisis de la información y de la calidad de las series históricas de información climatológica; así, para el desarrollo de este trabajo, se tuvo especial cuidado en la selección de las estaciones que se emplearon en el análisis y en los procedimientos aplicados a la información.

En los últimos años, y particularmente desde que se identificaron los impactos de *El Niño* 1997-1998 en los sectores socioeconómicos de México (Magaña et al., 1999), se ha revalorizado la información climática, esto ha generado un interés creciente en las instancias gubernamentales y no gubernamentales, con fines aplicados o académicos, por lograr un mejor entendimiento de la variabilidad climática (Vázquez, 2006).

En los años 2004 y 2005, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), con la participación de las Gerencias Estatales de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la colaboración de instituciones como AGROASEMEX y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), realizaron esfuerzos encaminados a resolver aspectos relacionados con el manejo y uso eficiente de las bases de datos del clima en México (Ibid.).

La homogeneidad de los datos puede ser alterada por el cambio de ubicación geográfica de una estación, la renovación de instrumentos, el reemplazo de una

estación antigua por una nueva o automática (Vázquez op. cit.); también por la sustitución del personal encargado de las lecturas de los instrumentos, modificaciones del entorno como un nuevo uso de suelo y la presencia de nuevos edificios, entre otros.

Tanto el control de calidad como el análisis de homogeneidad de la información climática pueden realizarse de mejor manera si se cuenta con suficientes metadatos. Los metadatos son datos altamente estructurados que describen las características de la información. Son "información sobre la información" o "datos sobre los datos". Estos describen el origen, la calidad, los posibles cambios por causas humanas o instrumentales, las condiciones en que se realizan las mediciones y otras características adicionales. Sin embargo, no se cuenta en el país con un agregado nacional de metadatos que documente los diversos cambios relacionados con las estaciones climáticas (Ibid.).

2.2 Base de datos

Las series históricas de precipitación mensual que se utilizaron en el desarrollo de este trabajo, corresponde a la base de datos que utiliza el NADM para monitorear la sequía sobre el territorio mexicano, dicha información proviene del Banco Nacional de Datos Históricos del Servicio Meteorológico Nacional, la mayor cantidad de información se encuentra integrada en el sistema CLICOM (Clima Computarizado), de donde se seleccionaron las estaciones que se consideraron en el análisis con base en los siguientes criterios:

1. Distribución geográfica. Se buscó tener una buena cobertura del territorio nacional (una estación por estado como mínimo).

2. Número de años con registros. Se consideraron estaciones con 50 años o más de información,

3. Porcentaje de datos faltantes. Se utilizaron estaciones que tuvieran menos del 15% de datos faltantes.

Debido a que muy pocas estaciones tienen continuidad en sus registros, se tomaron las siguientes alternativas para completar las series históricas:

A. Se consultaron los archivos impresos originales para extraer aquella información que no ha sido incorporada a la base de datos de CLICOM.

B. A pesar de que se rescató una cantidad importante de información, las series de tiempo mantenían porosidades que dificultaban el análisis, por lo que se utilizó la información de las estaciones vecinas, para esto se consideraron los siguientes criterios:

1. Se tomaron únicamente estaciones localizadas a una distancia no mayor a 50 kilómetros de la estación principal.

2. Se obtuvieron correlaciones entre las estaciones y se utilizaron aquellas con los valores más altos.

3. Los datos faltantes en las series históricas de las estaciones seleccionadas fueron llenados con datos de las estaciones vecinas que cumplieron con los puntos 1 y 2.

Criterios semejantes han sido empleados en trabajos previos como el realizado por Englehart y Douglas (2002), en el que se estudia la variabilidad interanual de la lluvia de verano en México y se basa en el análisis de datos históricos de precipitación de 130 estaciones, con un período largo de observaciones (1927-1997).

Después de aplicar los procedimientos anteriores, 132 estaciones fueron identificadas. En la Tabla 2.1, se muestra el listado de éstas con su respectiva latitud, longitud, altitud y el año de inicio de las observaciones. La Figura 2.1, corresponde al mapa de ubicación de las estaciones seleccionadas.

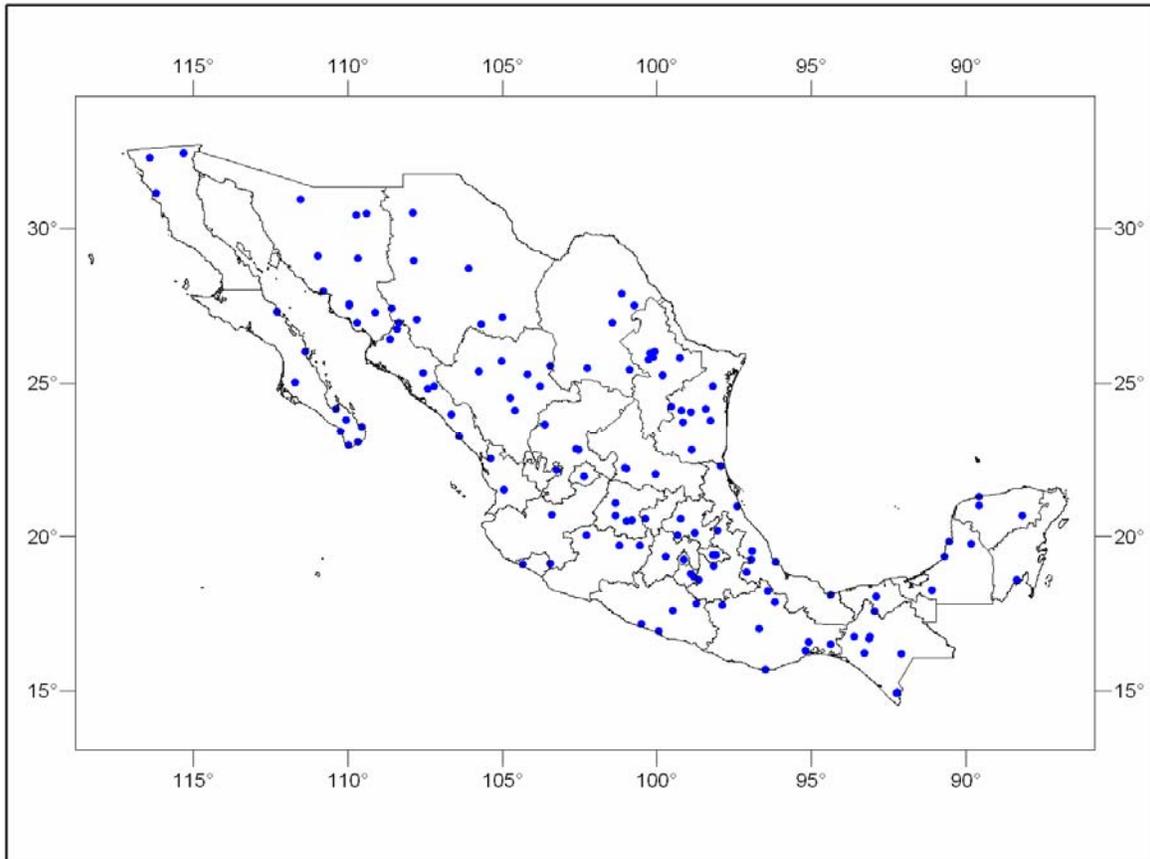
Tabla 2.1 Estaciones climáticas utilizadas para la presente investigación.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Inicio
Cabo San Lucas, B.C.S.	22° 52'	109° 54'	25	1945
Cd. Constitución, B.C.S.	25° 00'	111° 38'	48	1941
La Paz, B.C.S.	24° 09'	110° 22'	32	1920
La Ribera, B.C.S.	23° 35'	109° 33'	15	1947
Loreto, B.C.S.	26° 00'	111° 20'	15	1941
San Antonio, B.C.S.	23° 49'	110° 03'	375	1954
San José del Cabo, B.C.S.	23° 03'	109° 40'	35	1934
Santa Rosalía, B.C.S.	27° 18'	112° 17'	17	1930
Todos Santos, B.C.S.	23° 26'	110° 13'	15	1945
Ensenada, B.C.	31° 51'	110° 38'	13	1950
Mexicali, B.C.	32° 39'	115° 27'	45	1948
Valle de las Palmas, B.C.	32° 23'	116° 39'	45	1949
Cd. Obregón, Son.	27° 29'	109° 56'	38	1928
Empalme, Son.	27° 57'	110° 50'	120	1921
Etchojoa, Son.	26° 55'	109° 38'	13	1950
Hermosillo, Son.	29° 06'	110° 58'	211	1936
Minas Nuevas, Son.	27° 03'	109° 01'	520	1927
Nacozari, Son.	30° 22'	109° 41'	1040	1943
Novillo, Son.	28° 58'	109° 38'	192	1942
Presa Cuauhtemoc, Son.	30° 52'	111° 32'	590	1928
Presa Ruiz Cortines, Son.	27° 13'	109° 07'	35	1928
Presa La Angustura, Son.	30° 27'	109° 24'	965	1924
Batopilas, Chih.	27° 00'	107° 39'	702	1946
Cd. Jiménez, Chih.	27° 08'	104° 56'	1377	1925
Chihuahua, Chih.	28° 39'	106° 05'	1430	1920
Chinipas, Chih.	27° 24'	108° 32'	1640	1927
Hidalgo del Parral, Chih.	26° 56'	105° 40'	1661	1922
Nvo. Casas Grandes, Chih.	30° 25'	107° 55'	1473	1923
Temosachic, Chih.	28° 58'	107° 58'	1858	1950
Monclova, Coah.	26° 54'	101° 25'	586	1921
Presa V. Carranza, Coah.	27° 32'	100° 36'	240	1927
Parras, Coah.	25° 27'	102° 10'	1521	1948
Sabinas, Coah.	27° 52'	101° 17'	340	1925
Saltillo, Coah.	25° 25'	101° 00'	1589	1926
Torreón, Coah.	25° 35'	103° 23'	1143	1921
Cerralvo, N.L.	26° 06'	99° 37'	282	1927
Ciénega de Flores, N.L.	25° 57'	100° 10'	382	1941
General Bravo, N.L.	25° 48'	99° 11'	123	1945
Higueras, N.L.	25° 58'	100° 01'	412	1927
Montemorelos, N.L.	25° 12'	99° 50'	309	1942
Monterrey, N.L.	25° 40'	100° 18'	538	1920
Abasolo, Tamps.	24° 04'	98° 23'	84	1928
Cd. Victoria, Tamps.	23° 45'	99° 08'	321	1947
El Barretal, Tamps.	24° 06'	99° 08'	196	1945
Hidalgo, Tamps.	24° 15'	99° 26'	349	1927
Presa Saca de Agua, Tamps.	22° 47'	98° 52'	130	1923

Padilla, Tamps	24° 00'	98° 47'	153	1946
San Fernando, Tamps.	24° 51'	98° 09'	43	1932
Soto La Marina, Tamps.	23° 46'	98° 12'	25	1941
Tampico, Tamps.	22° 13'	97° 52'	6	1921
Charcas, S.L.P.	23° 08'	101° 07'	2057	1921
Río Verde, S.L.P.	21° 56'	99° 59'	987	1921
San Luis Potosí, S.L.P.	22° 09'	100° 58'	1877	1922
Guadalupe, Zac.	22° 45'	102° 31'	2265	1922
Sombrerete, Zac.	23° 39'	103° 37'	2379	1939
Zacatecas, Zac.	22° 47'	102° 34'	1440	1929
Canatlan, Dgo.	24° 30'	104° 45'	1950	1950
Cuencamé, Dgo.	24° 47'	103° 40'	1500	1930
Durango, Dgo.	24° 05'	104° 35'	1871	1923
El Palmito, Dgo.	25° 31'	104° 47'	1630	1941
Nazas, Dgo.	24° 14'	104° 07'	1264	1941
Tepehuanes, Dgo.	25° 18'	105° 45'	1967	1922
Badiraguato, Sin.	25° 22'	107° 33'	300	1925
Choix, Sin.	26° 43'	108° 17'	365	1921
Culiacán, Sin.	24° 49'	107° 24'	40	1921
El Fuerte, Sin.	26° 26'	108° 37'	84	1946
Huites, Sin.	26° 54'	108° 22'	168	1942
Ixpalino, Sin.	23° 57'	106° 37'	300	1950
Mazatlán, Sin.	23° 11'	106° 25'	10	1920
Sanalona, Sin.	24° 48'	107° 09'	170	1945
Acaponeta, Nay.	22° 30'	105° 22'	52	1923
Tepic, Nay.	21° 29'	104° 53'	940	1922
Colotlán, Jal.	22° 07'	103° 16'	1735	1927
Guadalajara, Jal.	20° 43'	103° 23'	1583	1932
Colima, Col.	19° 14'	103° 44'	498	1921
Manzanillo, Col.	19° 04'	104° 20'	3	1921
Aguascalientes, Ags.	21° 53'	102° 18'	1908	1920
Celaya, Gto.	20° 32'	100° 49'	1752	1922
Guanajuato, Gto.	21° 01'	101° 15'	2050	1942
Irapuato, Gto.	20° 41'	101° 21'	1724	1921
Villa Victoria, Gto.	21° 12'	100° 13'	1800	1925
Querétaro, Qro.	20° 35'	100° 23'	1813	1921
Ixmiquilpan, Hgo.	20° 29'	99° 13'	1745	1922
Pachuca, Hgo.	20° 08'	98° 45'	2435	1921
Presa Requena, Hgo.	19° 57'	99° 19'	2109	1927
Coatzacoalcos, Ver.	18° 08'	94° 08'	40	1931
Huatusco, Ver.	19° 09'	96° 57'	1344	1925
Jalapa, Ver.	19° 32'	96° 55'	1360	1920
Orizaba, Ver.	18° 52'	97° 04'	924	1921
Tuxpan, Ver.	20° 57'	97° 25'	10	1923
Veracruz, Ver.	19° 12'	96° 08'	16	1920
Cheitla, Pue.	18° 31'	98° 34'	1222	1943
Huachinango, Pue.	20° 11'	98° 03'	1575	1921
Puebla, Pue.	19° 02'	98° 12'	2162	1920
Apizaco, Tlax.	19° 25'	98° 09'	2408	1940

Tlaxcala, Tlax.	19° 19'	96° 14'	2240	1926
Toluca, Edo. Mex.	19° 17'	99° 42'	2720	1920
Tacubaya, D.F.	19° 24'	99° 12'	2300	1920
Cuautla, Mor.	18° 49'	98° 58'	1303	1948
Jonacatepec, Mor.	18° 41'	98° 48'	1165	1927
Cd. Hidalgo, Mich.	19° 42'	100° 34'	2020	1922
Morelia, Mich.	19° 42'	101° 11'	1941	1921
Zamora, Mich.	19° 59'	102° 19'	1561	1921
Acapulco, Gro.	16° 50'	99° 56'	28	1920
Chilpancingo, Gro.	17° 33'	99° 30'	1360	1950
Olinalá, Gro.	17° 47'	98° 45'	1415	1927
San Jerónimo, Gro.	17° 31'	101° 19'	80	1926
Huahuapán, Oax.	17° 48'	97° 47'	1650	1923
Ixtepec, Oax.	16° 35'	95° 06'	120	1949
Jacatepec, Oax.	17° 52'	96° 12'	42	1951
Oaxaca, Oax.	17° 04'	96° 44'	1550	1922
Ostuta, Oax.	16° 30'	94° 26'	35	1948
Puerto Ángel, Oax.	15° 40'	96° 30'	18	1926
Tehuantepec, Oax.	16° 18'	95° 12'	50	1945
Temascal, Oax.	18° 15'	96° 24'	80	1950
Comitán, Chis.	16° 15'	92° 08'	1530	1923
El Boquerón, Chis.	16° 39'	93° 09'	480	1949
Las Flores, Chis.	16° 45'	93° 33'	480	1949
Talismán, Chis.	14° 57'	92° 07'	148	1944
Tapachula, Chis.	14° 56'	92° 16'	179	1922
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	16° 45'	93° 07'	530	1951
Villa Flores, Chis.	16° 14'	93° 16'	631	1933
Teapa, Tab.	17° 33'	92° 57'	50	1923
Villahermosa, Tab.	71° 59'	92° 55'	10	1926
Campeche, Camp.	19° 51'	90° 32'	11	1920
Candelaria, Camp.	18° 11'	91° 03'	25	1946
Champotón, Camp.	19° 21'	90° 43'	20	1920
Hopelchen, Camp.	19° 45'	89° 52'	56	1950
Chetumal, Q.Roo.	18° 29'	88° 18'	9	1950
Mérida, Yuc.	20° 59'	89° 35'	10	1921
Progreso, Yuc.	21° 17'	89° 39'	14	1920
Valladolid, Yuc.	20° 42'	88° 13'	22	1921

Figura 2.1. Distribución de las estaciones climatológicas empleadas para el monitoreo de sequía de Norteamérica y en la presente investigación.



2.3 El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

En la actualidad, son varios los índices de sequía que se utilizan en diferentes países, como el método de deciles (Gibbs y Maher 1967; Lee 1979; Coughlan 1987) usado en Australia; el Índice de Severidad de Sequía de Palmer; el Índice de Humedad de Cosecha (Palmer op. cit.; Alley 1984) en Estados Unidos y el Índice de Humedad de Rendimiento (José et al., 1991) en Filipinas. Un índice relativamente nuevo que ha ganado popularidad en Estados Unidos y en el mundo es el SPI (Wilhite y Svoboda, 2000), desarrollado por McKee (1993 y

1995). En este apartado se describen detalladamente las características del SPI, el cual se utilizó con el propósito de identificar las sequías de mayor intensidad y duración que han afectado el territorio mexicano durante el período 1920-2000.

El SPI es una herramienta que se desarrolló principalmente para definir y monitorear este fenómeno. También se puede usar para determinar los períodos anómalamente lluviosos. Este índice permite determinar la rareza de la sequía en una escala determinada de tiempo para cualquier estación que cuente con datos históricos de lluvia. Es importante mencionar que el SPI no es una herramienta de predicción de la sequía, sino de monitoreo y diagnóstico del fenómeno (National Drought Mitigation Center, 2000).

El SPI se basa en la probabilidad de la lluvia y fue diseñado para ser un indicador espacial de la sequía, que reconoce la importancia de las escalas de tiempo en el análisis de disponibilidad de agua y su uso. Es una transformación estandarizada de la probabilidad de la precipitación observada. Puede calcularse sobre cualquier duración deseada por un usuario. En períodos cortos, como pueden ser meses (o incluso semanas), los resultados SPI pueden ser útiles para intereses agrícolas, mientras que períodos largos (años), los resultados pueden ser importantes para el manejo y suministro de agua (Guttman, 1999).

2.4 Cómo funciona el SPI

Como se mencionó anteriormente, el SPI puede obtenerse para diversas escalas de tiempo, las más utilizadas son de uno, tres, seis, doce, 24 y 48 meses. La metodología para el cálculo del SPI se fundamenta en el ajuste de una serie de registros históricos de precipitación total mensual, a la función de distribución probabilística de tipo gamma incompleta y en la transformación de los datos resultantes a la función normal estándar. En otras palabras, el SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Bajo este contexto, puede deducirse que registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes o período de meses correspondiente, darán valores del SPI positivos, lo cual representa condiciones de humedad; en contraparte, registros de precipitación inferiores al promedio histórico para el periodo de interés, arrojarán valores de SPI negativos, lo cual indica déficit de humedad (página web 3). El SPI permite hacer comparaciones entre climas húmedos y secos ya que se pueden representar de la misma manera (Hayes, 1998).

2.5 Distribución gamma

Las variables climáticas pueden presentar una distribución similar a la que caracteriza la curva normal o de Gauss, cuando los valores pueden ser tanto positivos como negativos, un ejemplo es la temperatura; en cambio existen variables como la precipitación, la velocidad del viento o la insolación cuyo límite

inferior es cero, para este tipo de variables la curva normal, abierta en ambos sentidos, no es la adecuada y se sustituye por la distribución gamma (Fernández, 1996). En un contexto climatológico, el uso de la ley de probabilidades conocida como distribución gamma, ha sido propuesta como un modelo para describir precipitaciones pluviales (Mosiño y García, 1981).

El ajuste de distribuciones de probabilidad a un conjunto de datos empíricos es fundamental en el proceso de análisis de observaciones el cual permite plantear proposiciones acerca de la ocurrencia de eventos asociados con un fenómeno bajo estudio (Coronel y Llanos, 1996). La distribución gamma (Medina, 1995), es definida por su función de densidad de probabilidad como:

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

Donde:

x = Es la variable lluvia.

β = Es un parámetro que da la escala de x .

α = Es un parámetro que da la forma de la curva.

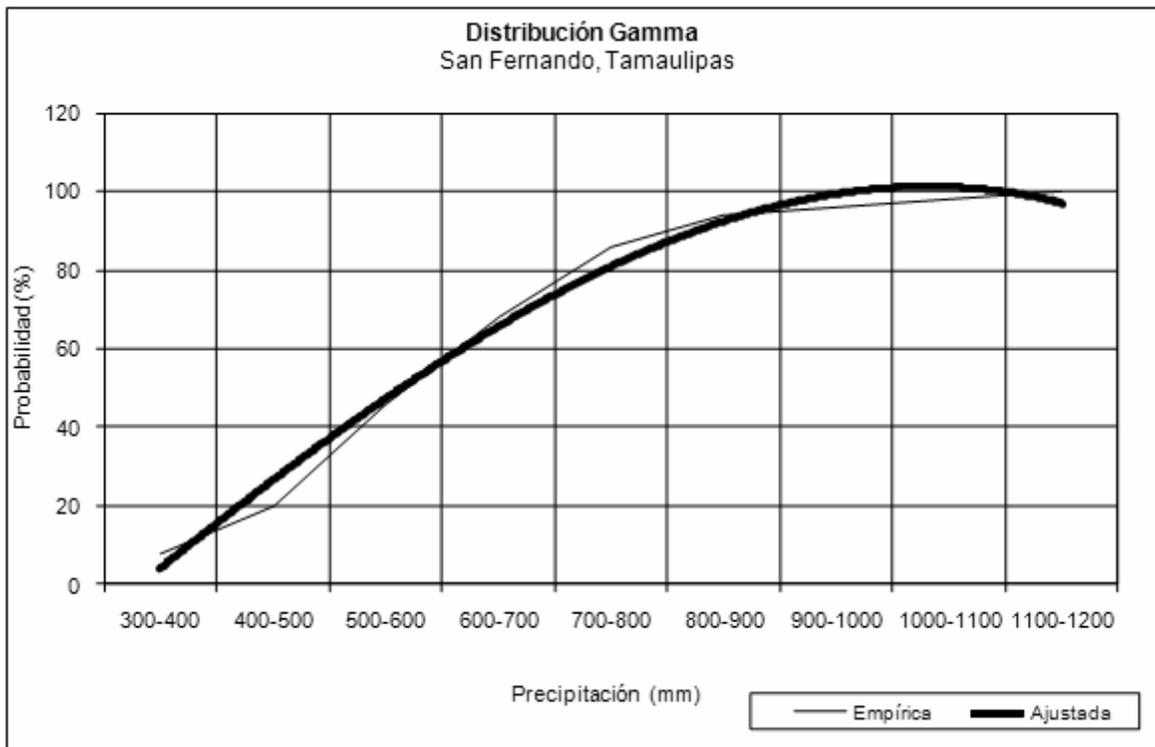
$\Gamma(\alpha)$ = Es la función Gamma de α .

e = Es igual a 2.7183 (base de los logaritmos naturales).

La función $f(x)$ para $X < 0$ es $F(X) = 0$, demuestra que la distribución tiene cero como límite inferior y no tiene límite superior, su curva es positiva y el grado de ésta es función inversa del factor de forma α (García et al., 1975).

Con los datos de la estación San Fernando, Tamaulipas, se elaboró una gráfica de distribución gamma (Figura 2.1), donde se muestra cómo la curva es asimétrica, extendida a la derecha, ya que sus límites varían de 0 a $+\infty$.

Figura 2.1. Distribución Gamma de la estación San Fernando, Tamaulipas.



En la Tabla 2.1, se muestra la relación existente entre el SPI y la probabilidad acumulada. Cuando ésta es de 0.5 que es equivalente al 50% de probabilidad de

que se registre el valor que marca la media histórica, el SPI tendrá valor de “cero” lo que significa que las condiciones de precipitación son normales. Cuando el SPI arroja el valor de -1 (una desviación estándar) es equivalente a 0.1587 de probabilidad acumulada, mientras el valor de probabilidad acumulada sea menor a 0.5, el SPI registrara valores negativos lo que se traduce en eventos secos; de igual forma, el SPI registra los periodos anómalamente húmedos con valores positivos, cuando la probabilidad acumulada tiene valores por encima de la media histórica. En otras palabras, mientras el número de desviaciones estándar por debajo de la normal sea mayor (valores de SPI negativos), el déficit de humedad será más intenso.

Tabla 2.1. SPI y Probabilidad acumulada (National Drought Mitigation Center 2000).

SPI	Probabilidad acumulada
-3.0	0.0014
-2.5	0.0062
-2.0	0.0228
-1.5	0.0668
-1.0	0.1587
-0.5	0.3085
0.0	0.5000
0.5	0.6915
1.0	0.8413
1.5	0.9332
2.0	0.9772
2.5	0.9938
3.0	0.9986

2.6 Cálculo del SPI

Para el cálculo del SPI se utiliza la siguiente fórmula (Agnew, 2000):

$$\text{SPI} = \frac{(X_{ik} - \bar{X}_i)}{\sigma_i}$$

Donde:

σ_i = Desviación estándar de estación observada.

X_{ik} = Precipitación de la estación observada y observación histórica.

\bar{X}_i = Precipitación media de la estación observada.

Para aplicar la fórmula anterior a la base de datos, se utilizó un programa de computadora elaborado por el *National Drought Mitigation Center* (op. cit.) (página web 4). Con los resultados obtenidos mediante el programa, se elaboró el Anexo, en el que se muestran los resultados de SPI 24-meses, en 132 gráficas que corresponden a las estaciones climáticas seleccionadas para la presente investigación.

2.7 Escalas temporales del SPI

Como se mencionó anteriormente, se puede obtener el SPI para diferentes escalas de tiempo; a continuación se muestra la interpretación del SPI de 3, 6, 12 y 24-meses:

2.7.1 SPI de 3-meses

Esta escala posibilita una comparación entre la precipitación sobre un período específico de tres meses y la precipitación total del mismo período para todos los años incluidos en el registro histórico. En otras palabras, un SPI de 3-meses al final de mayo, compara la precipitación total de marzo, abril y mayo, de un año, con las precipitaciones totales del período de marzo a mayo de todos los años del registro. Esta escala refleja las condiciones de humedad en un corto y mediano plazo y provee una estimación estacional de precipitación. Un período relativamente normal de tres meses podría ocurrir en medio de una sequía larga que solamente podría ser visible en escalas de tiempo mayores (página web 2) por lo que, para fines de este estudio, el cual es la identificación de sequías históricas en México, no se utilizó esta escala de tiempo.

2.7.2 SPI de 6-meses

El SPI de 6-meses compara la precipitación para ese período con el mismo período de seis meses del registro histórico. Por ejemplo, un SPI de 6-meses al final de septiembre coteja el total de la precipitación para el período de abril-septiembre con todos los totales históricos para ese mismo período.

El SPI 6-meses indica las tendencias a mediano plazo de la precipitación y se considera que es más sensible que el Índice de Palmer. Un SPI de 6-meses puede ser muy eficaz para mostrar la precipitación de distintas estaciones de lluvia. Los

resultados de un SPI 6-meses pueden ser asociados con el inicio de anomalías en los niveles de ríos y mantos acuíferos (página web 8).

2.7.3 SPI de 12-meses

El SPI en esta escala de tiempo refleja patrones de precipitación anuales. Un SPI de 12-meses es una comparación de la precipitación para doce meses consecutivos durante todos los años de datos disponibles. Debido a que esas escalas de tiempo son el resultado acumulativo de períodos anuales que pueden estar arriba o debajo de lo normal, la mayoría de resultados SPI se encuentran cercanos a cero (cercanos al promedio histórico), a menos que una tendencia específica tome lugar e indique un periodo húmedo o seco. Los valores SPI de esta escala de tiempo están relacionados con escurrimientos, nivel de reservorios y aún a niveles de agua subterránea (página web 9). El SPI 12-meses, es apropiado para la identificación de sequías con duración corta (de uno a seis meses), lo cual es de utilidad para monitorear sequía hidrológica.

2.7.4 SPI de 24-meses

El SPI de 24-meses, se explica de igual forma que el de 12-meses, ambos utilizan todos los meses del año, a diferencia del SPI de 3 y 6-meses. Los resultados del SPI de 24 y 12-meses son semejantes, la disimilitud radica en que el SPI de 24-meses, a diferencia del de 12-meses, arroja valores más suavizados y homogéneos, ya que es el doble de meses que se utiliza para dar un resultado; sin

embargo, esta escala temporal expone de mejor manera los períodos tanto húmedos como secos de larga duración y de mayor intensidad, motivo por el cual el análisis de este trabajo se basó en la interpretación de gráficas SPI 24-meses.

Para fundamentar el uso del SPI de 24-meses para la presente investigación, se hace una comparación entre gráficos de SPI 12-meses (Figura 2.2) y 24-meses (Figura 2.3) para la misma estación con el mismo registro de datos.

Figura 2.2 SPI 12-meses para la estación Tacubaya, Distrito Federal.

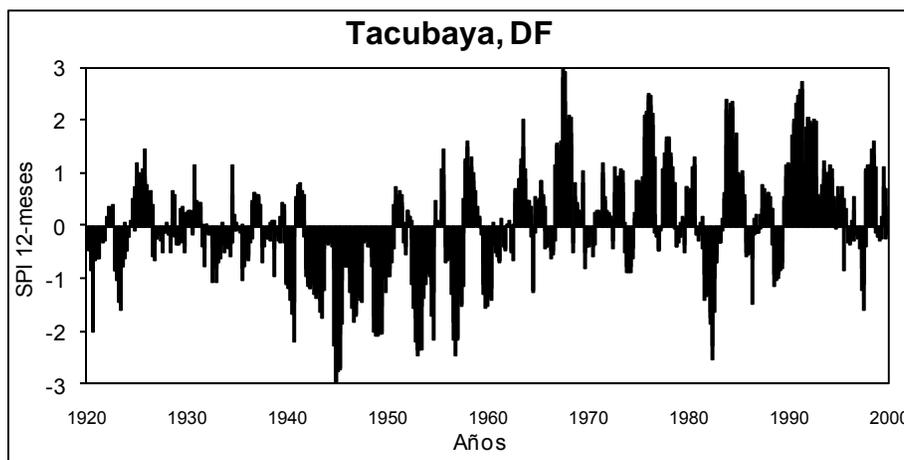
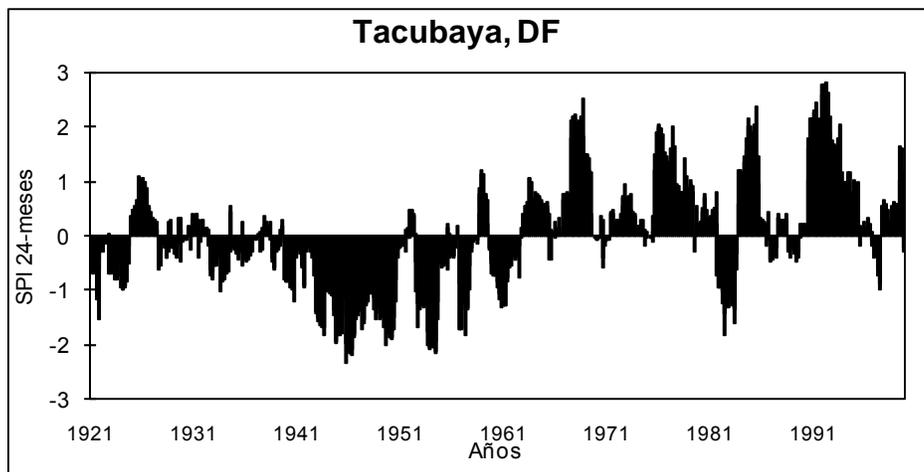


Figura 2.3 SPI 24-meses para la estación Tacubaya, Distrito Federal.



Como se mencionó anteriormente, los resultados SPI de 12 y 24-meses, son semejantes, como se observa en los patrones que muestran las Figuras 2.2 y 2.3; sin embargo, en la grafica de SPI 24-meses, se observa una mayor homogeneidad en los valores SPI que en la gráfica de 12-meses, lo que facilita la identificación de los periodos largos bajo condiciones de humedad o sequía, motivo por el cual se optó en el presente trabajo, utilizar las gráficas de SPI 24-meses (Anexo) para la identificación de sequías históricas en México durante el período 1920-2000.

2.8 Interpretación de las graficas de SPI

Un evento de sequía se inicia cuando se observa a través del tiempo, sobre el eje de las “x”, una tendencia marcada de valores negativos continuos durante dos años. La intensidad va estar dada en función del valor de SPI, el cual se da sobre el eje de las “y”; entre menor sea el valor de SPI, la intensidad será mayor. De esta manera, el evento de sequía termina cuando el SPI alcanza valores de -0.5 lo cual representa la condicion “normal seco”.

Por último, se presenta la Tabla 2.2, en la que se muestran las categorías de sequía propuestas por el *National Drought Mitigation Center* (2002) y los posibles impactos, de acuerdo con valores SPI.

Tabla 2.2 Clasificación de la sequía de acuerdo a valores de SPI.

Categoría	Posibles Impactos	Rango de SPI
Condición normal seco	Condiciones normales de precipitación	0 a -0.5
Condición anormal seco	Inicia la sequía, período corto en que se secan lentamente las siembras, cultivos y pastizales, empieza a haber peligro de incendios, déficit de agua, pasturas y cultivos no se recuperan completamente.	-0.5 a -0.8
Sequía moderada	Algo de daño a cultivos y pastizales, riesgo alto de incendio. Corrientes, represas y pozos con bajo nivel de agua, escasez de agua inminente, lo que implica la petición del cuidado del agua.	-0.8 a -1.3
Sequía severa	Posible pérdida de cultivos y pastos, riesgo de incendio alto, escasez de agua común, restricciones en el uso del agua.	-1.3 a -1.6
Sequía extrema	Pérdida mayor de cultivos/pasto, peligro extremo de incendios, restricciones estrictas de uso del agua.	-1.6 a -2.0
Sequía excepcional	Pérdida de cultivos/pasto excepcional y extendida, riesgo inminente de incendios, escasez de agua en represas, corrientes y pozos, creación de un estado de emergencia	-2.0 ó menos

Fuente: Modificado del *National Drought Mitigation Center* (2002) (página web 10).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

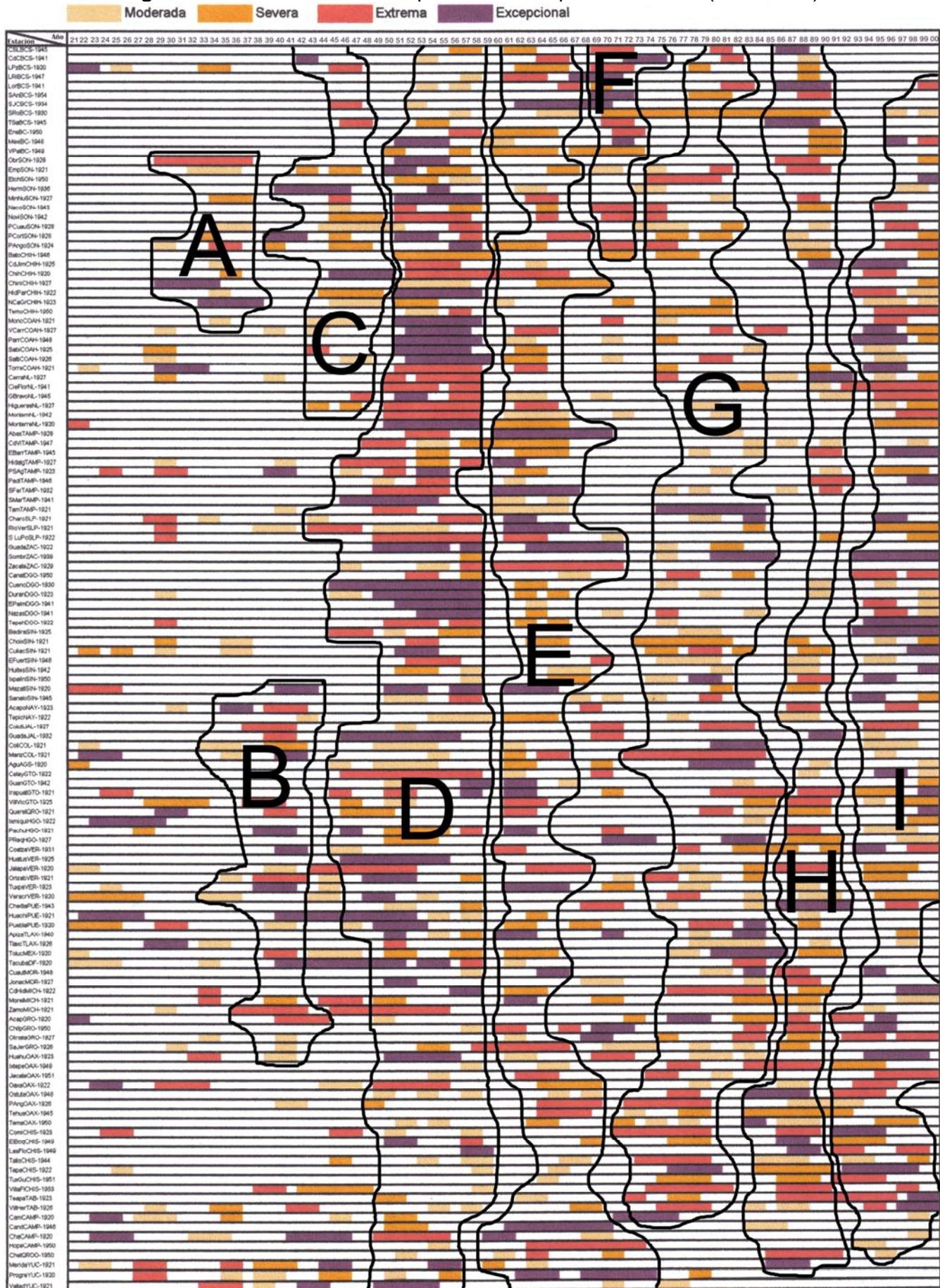
3.1 Resultados

En el presente estudio, se ha utilizado una base de datos de precipitación mensual derivada de los registros climáticos con que cuenta el país. Los resultados se muestran en la Figura 3.1, en la que se exponen las sequías históricas más relevantes en México durante el período 1920-2000. Esta gráfica es producto de la interpretación de 132 gráficas de SPI 24-meses (Anexo), que corresponde al número de estaciones seleccionadas, las cuales se encuentran distribuidas a lo largo del país, los métodos de selección de las mismas fueron descritos en el capítulo anterior. Los resultados de la presente investigación muestran, en forma gráfica, los parámetros más importantes que deben ser considerados en el análisis de la sequía: distribución, duración e intensidad.

Distribución. Para una mejor interpretación, el orden de las estaciones climatológicas sobre el eje de las ordenadas, está dado en función de la distribución norte-sur, oeste-este y este-oeste (en forma de zig-zag) de los estados de la República Mexicana.

El comportamiento espacial de las sequías, se determina cuando en la Figura 3.1, se observa la unión de un número considerable de eventos en sentido vertical, en otras palabras, la distribución se aprecia como una mancha de eventos en forma

Figura 3.1. Identificación de los periodos de sequías en México (1920-2000).



vertical, debido a que varias estaciones cercanas entre sí, mostraron sequía en el mismo periodo de tiempo.

Duración. Se determinó de la siguiente manera: la sequía inicia cuando en las gráficas analizadas de SPI 24-meses (Anexo), los datos muestran una tendencia marcada de valores negativos continuos por dos años ó más; esta continuidad no fue interrumpida a menos que los valores de SPI se normalicen por más de un año, al ocurrir esto el evento se da por concluido.

Los criterios anteriores fueron utilizados con el propósito de identificar los periodos de sequía con una duración multianual y multidecadal, dejando de lado las que presentan duración de meses, ya que el objetivo del trabajo no incluye los eventos de corta duración (menores de dos años).

En los resultados de la Figura 3.1 se tiene que tomar en cuenta (como se mencionó en el capítulo anterior) que el SPI 24-meses está diseñado para identificar sequías de larga duración y arroja resultados después de 24 meses, es decir si la base de datos inicia en enero (que es el caso de la base de datos utilizada en este trabajo), el primer resultado será a partir de diciembre del segundo año de datos y éste estará basado en los 24 meses anteriores, así, los resultados en la Figura 3.1 muestran el inicio de las sequías cerca de un año después de su inicio. Por esto, los resultados en la Figura 3.1 inician a partir de 1921 y no de 1920.

Intensidad. En consideración de que el objetivo del trabajo es la identificación de las sequías más intensas que han afectado a México de 1920-2000, no se integró la primera categoría propuesta por el *North American Drought Monitor* (condición anormal seco). La intensidad de la sequía fue asignada por el grado máximo alcanzado en el periodo específico. Se integraron en los resultados las sequías de categorías: moderada, severa, extrema y excepcional (Tabla 2.2).

Con base en los criterios anteriores para identificar las sequías históricas en México durante el periodo 1920-2000, fueron trazados sobre la Figura 3.1 los eventos de sequía a los cuales se les asignó una letra para su identificación (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 México: clasificación por letra, de los eventos de sequía identificados en la Figura 3.1.

Evento	Zona afectada	Temporalidad
A	Noroeste	1932-1937
B	Centro	1935-1942
C	Noroeste	Década de los 40
D	Nacional (93.2%)	1950-1958
E	Nacional (74.2%)	Década de los 60
F	Península de Baja California	Finales de los 60 y principios de los 70
G	Nacional (75.8%)	Finales de los 70 principios de los 80
H	Nacional (65%)	1987-1991
I	Nacional (75.8%)	1994-2000

Nota: para las sequías de escala nacional se integra el porcentaje de estaciones afectadas.

3.1.1 Análisis de la Figura 3.1

Evento A. En el noroeste del país en los estados de Sonora y Chihuahua, las estaciones que cuentan con datos a partir de 1928 presentan una sequía entre los años 1932-1937. El inicio no es simultáneo en ambos estados, en Ciudad Obregón (Sonora) y Chinipas (Chihuahua), se presentó desde 1929, mientras que en las demás estaciones el inicio de la sequía se registra alrededor de 1932. El final de este evento fue entre 1936 y 1937 en la mayoría de las estaciones de Chihuahua y Sonora. La intensidad fue entre moderada y extrema, mientras que en las estaciones de Chinipas y Nuevo Casas Grandes, ambas en Chihuahua, se alcanzó el nivel excepcional.

Evento B. En gran parte del centro del país, durante el periodo 1935-1942, se presentó un evento que osciló en intensidad de sequía moderada a excepcional, los estados afectados fueron: Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Veracruz, Puebla, México, Distrito Federal, Michoacán y Guerrero.

Evento C. En los años cuarenta, en la porción noroeste del país en los estados de Sonora, Chihuahua y Coahuila además de algunas estaciones de la península de Baja California, se presentaron condiciones de sequía severa y extrema, incluso las estaciones de Hermosillo, Presa Cortinez y Chihuahua registran una sequía de intensidad excepcional durante un período de cuatro a siete años consecutivos.

Evento D. El evento de sequía más importante, que se registra en el período de estudio (1920-2000), por su duración, extensión e intensidad es el de 1950 a 1958, ya que se presenta en la mayor parte del territorio mexicano. El inicio de ésta, es difícil determinarlo para todo el país, ya que en el norte el comienzo es alrededor de 1950, mientras que en la porción centro, se da cerca del año de 1946 y en el sureste es próximo a 1948. El final de este periodo de sequía, en contraste con el comienzo, se puede distinguir claramente, ya que en la mayor parte del territorio nacional se observa que, en el año 1958, se interrumpe súbitamente el evento. De acuerdo con los datos del SMN, 1958 fue el año más húmedo considerando el período 1941-2000, por lo que las condiciones excepcionalmente húmedas durante el verano de este año pusieron fin a este evento.

Los estados más afectados, son los que se localizan en la zona norte del país, en orden de intensidad fueron: Coahuila, Nuevo León, Durango, Chihuahua, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas; éstos presentaron intensidades de sequía extrema así como excepcional. En los estados de Nuevo León, Tamaulipas y Durango se observa que este evento tuvo su origen años antes de 1950, incluso en la estación de Cuencame, Durango, se presentó desde 1945. El centro del país, así como la península de Yucatán, también se vieron afectados; la intensidad se registró de moderada a excepcional en períodos de dos a cinco años.

En contraparte, la península de Baja California, así como el estado de Chiapas, fueron las zonas donde los valores de SPI mostraron menor intensidad y duración

durante este período; incluso, en algunas estaciones, no se presentó la sequía, como es el caso de Tuxtla Gutiérrez, en Chiapas y La Paz, en Baja California Sur.

Evento E. Otra sequía de escala nacional fue el que tuvo presencia en el decenio de los sesenta. El inicio es relativamente más claro que en el evento de los años cincuenta, ya que la mayor parte del país registra el inicio de este periodo sobre el año de 1961.

El final de este evento de la década de los sesenta es difícil definir, pero se puede decir que terminó en gran parte del territorio nacional, alrededor de 1966. En algunas estaciones, distribuidas en distintas partes del país registraron condiciones de sequía durante todo el decenio, como en San José del Cabo (Baja California Sur), Valle de las Palmas (Baja California), Abasolo (Tamaulipas), San Fernando (Tamaulipas), Guadalupe (Zacatecas), Zacatecas (Zacatecas), Candelaria (Campeche) y Hopelchen (Campeche).

La intensidad de la sequía de 1961-1966 se puede considerar, de manera general, como severa, sin dejar de lado que en algunas estaciones se alcanzó la categoría de excepcional, como es el caso de las estaciones del estado de San Luis Potosí.

Es difícil determinar si las sequías que se presentaron en las décadas de los cincuenta y sesenta, son un sólo evento multidecadal, debido que al final de los años cincuenta e inicio de los sesenta, las gráficas de SPI 24-meses, mostraron

valores de normales a húmedos. Si se toma en cuenta que es posible encontrar dentro de una sequía prolongada, períodos húmedos y normales, hace que la división entre eventos largos como los ocurridos en ambas décadas, sea difícil establecer, por lo que los límites se fundamentan bajo los criterios mencionados al principio de este apartado.

Evento F. En la península de Baja California, los años que presentaron sequía de mayor intensidad durante el periodo de estudio, se encuentran en el decenio de los sesenta y principios de los setenta. Se observan, durante este periodo (1968-1972), en Baja California Sur intensidades de extrema y excepcional, mientras que en Baja California intensidades de severa y extrema. Los años con mayor intensidad se registraron entre 1969 y 1972.

Evento G. Otro evento que cubrió grandes extensiones, es el que se presentó a finales de los años setenta y principios de los ochenta. Los únicos estados que no fueron afectados son: Baja California, parte de Chihuahua, Campeche, Quintana Roo y parte de Yucatán.

La intensidad de ésta en el norte del país, se puede considerar dentro del rango de moderada, mientras que en la porción centro las intensidades oscilaron en las cuatro categorías que se han manejado en el presente trabajo. La porción sureste, con la excepción de los estados ya mencionados, presentó sequía con intensidad de extrema principalmente y algunos casos puntuales de condiciones

excepcionales de corta duración; se tiene que considerar que, en esta parte del país, específicamente en los estados de Oaxaca, Chiapas y Tabasco, este evento tuvo lugar únicamente en los últimos años del decenio de los setenta.

Evento H. El evento de 1987 a 1991 afectó gran parte del territorio nacional, en promedio se presentaron periodos de tres a cuatro años secos. En el norte del país, la península de Baja California y el estado de Sonora hubo condiciones de intensidades que oscilaron de severa a excepcional, mientras que los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Zacatecas y Durango, no presentaron sequía. Otros estados en los que no tiene presencia, son: Colima, Distrito Federal, Campeche y Yucatán (con excepción de la estación Mérida que mostró, de 1985 a 1988, sequía excepcional). En el resto del país, el evento fue de intensidad severa y extrema, mientras que con intensidad de excepcional se encuentran estaciones aisladas entre sí, en los estados de Puebla, Oaxaca, Chiapas y, como ya se indicó, la estación de Mérida en Yucatán.

Los estados de Oaxaca y Chiapas registran el inicio de la sequía (1987-1991) años antes que el resto del país, esto se da cerca de 1983, mientras que en los estados del centro del país como: Querétaro, Hidalgo, Veracruz, Puebla, Tlaxcala, México, Morelos, Michoacán y Guerrero, el periodo seco inicia entre 1984 y 1985, por lo que es difícil establecer si esta sequía es parte del periodo que se mencionó anteriormente, de finales de los setenta y principios de los ochenta, ya que en la

Figura 3.1 se observan pocos años con datos dentro de lo considerado como húmedos y normales entre un evento y otro.

Evento I. El último evento de sequía que se observa en el periodo de estudio (1920 a 2000), inició cerca del año 1994 y abarca temporalmente hasta el año 2000. Ésta se presentó prácticamente en todo el país, con excepción de las estaciones de los estados de Baja California, Baja California Sur, México, Distrito Federal, Morelos, Yucatán, Campeche y Quintana Roo. El resto de la República Mexicana presenta las cuatro intensidades de sequía manejadas en esta investigación.

El centro-norte del país (Chihuahua, Coahuila y Nuevo León), alrededor de los años 1995 y 1996, fue una de las zonas más afectadas durante este último periodo de sequía, ya que se registró entre extrema y excepcional. En el centro del país el evento osciló entre intensidades de severa y extrema. La porción sur mostró condiciones entre excepcional y extrema, en esta zona es complicado determinar el inicio del evento de sequía durante este periodo (1994 a 2000), debido a que se observa muy cercano al final del ocurrido en los años de 1987 a 1991. El final del evento 1994-2000 en el sur del país, termina alrededor de 1998, año que se registra como húmedo en gran parte del territorio nacional.

3.2 Discusión

El uso de series de tiempo largas (1920-2000) con datos de buena calidad, con las cuales se calculó el SPI para 24 meses, permitió identificar nueve eventos de sequía multianual en el país (Tabla 3.1). Estos eventos, en términos generales, coinciden parcialmente con otros mencionados en estudios previos que utilizan distintos índices (Noble 1956; SARH 1978 y 1980; García y Hernández 1988; Hernández 1994; Douglas 1996; Herrera y Álvarez 1999 y Liverman 2000).

El trabajo de Noble (op. cit.) reporta que la Secretaria de Agricultura, el Banco Nacional de Crédito Ejidal y el Banco Nacional de Crédito Agrícola y Ganadero, consideraron, en el período de 1936 a 1952, los siguientes años como secos: 1937, 1938, 1940, 1943-1952, por lo que sólo fueron años normales los de 1936, 1939, 1941 y 1942. Este trabajo no menciona los estados o regiones que fueron afectados por dichos años secos, por lo que resulta difícil hacer una mejor comparación entre el trabajo de Noble (Ibid.) y el aquí expuesto; sólo se menciona que los años 1945 y 1949 fueron de sequía intensa, éstos coinciden parcialmente con los expuestos en el presente trabajo. Los datos concuerdan con los eventos observados en el centro del país de 1935 a 1942 y con los del noroeste durante el decenio de los cuarenta.

La SARH (1978), reporta el año de 1953 como el más grave de sequía durante la época contemporánea, éste forma parte del periodo seco del decenio de los

cincuenta. 1977 y 1978 se consideran, en el trabajo de la SARH, como los años donde se registró una de las sequías importantes, mientras que en los resultados del presente trabajo estos años sólo muestran estas condiciones en la porción centro del país y son, en sí, el principio del evento que se presentó a finales de los años setenta y principios de los ochenta, en la mayor parte del territorio.

Los trabajos de García y Hernández (1988) y el de Hernández (1994), señalan que, en el período de 1921 a 1980, por dieciseis años, más del 80% de la República Mexicana tuvo precipitación menor al valor modal, y fueron los siguientes años: 1921, 1922, 1924, 1929, 1934, 1940, 1945, 1949, 1950, 1951, 1953, 1956, 1957, 1960, 1962 y 1979. Por la escasez de datos en el presente trabajo antes del año de 1940, aunado a que los trabajos de García y Hernández señalan solo años puntuales y no períodos de sequía, resulta difícil realizar comparaciones entre los dos estudios. Los años 1945, 1950, 1951, 1953, 1956, 1957, 1960 y 1962 propuestos por García y Hernández (op. cit.) como años secos, forman parte de períodos de sequía multianuales a nivel nacional, como se propone en el presente estudio.

Se debe de tomar en cuenta que algunos años con registros de lluvias por debajo del valor modal, no implican necesariamente que éstos tuvieron sequía. Debido a que no se están comparando dos indicadores (o índices) para medir directamente la sequía, la comparación entre resultados es limitada. Ejemplo de esto es que los años 1949 y 1979 se mencionan en los trabajos de García y Hernández (Ibid.)

como años por debajo del valor modal en la mayor parte del territorio mexicano, mientras que los resultados SPI no muestran los años 1949 y 1979 con déficit de humedad importante.

Douglas (1996), con el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI por sus siglas en inglés), calculó las sequías más severas de México (PDSI de -2 o por debajo de -2) para dieciocho divisiones climáticas propuestas por él mismo en 1985. A continuación, se muestran esos resultados para las tres regiones con eventos más intensos:

Para la región 3, que comprende el noroeste de Sonora, se considera como de sequías severas a los siguientes períodos: 1942, decenio de los cincuenta, 1973-1974, 1983, y 1987-1988. En el presente trabajo, el año 1942, en el estado de Sonora no se observa la presencia de sequía severa; de las ocho estaciones climatológicas ahí localizadas con datos que cubren el año 1942, sólo tres muestran sequía. De igual forma, dentro de los resultados mostrados en el presente trabajo, el año 1983 no presenta estas condiciones en la región. El decenio de los cincuenta, 1973-1974 y 1987-1988, están en buen acuerdo con los resultados aquí mostrados.

En la región 11 que incluye partes de los estados de Guanajuato, Jalisco y Michoacán, Douglas considera con sequía severa los siguientes períodos: el principio de los años cincuenta, 1969-1979 y los veranos de 1976, 1979, 1982 y

1988. Los resultados de esta investigación concuerdan con el período de principios de los años cincuenta, mientras que de 1969-1979 no mostró sequía durante estos once años. Por la escala temporal utilizada en el presente trabajo (SPI 24-meses), se encuentra fuera del alcance realizar comparaciones con eventos de verano expuestos en el trabajo de Douglas.

En la región 16, que incluye el estado de Oaxaca, Douglas registra sequías intensas durante los años 1934-1935, 1940-1941, 1949, 1957-1958, 1977, 1982-1983, y 1987. En los períodos 1934-1935, 1940-1941 y 1949, el presente estudio no cuenta con datos suficientes para realizar comparaciones en esta región; para los años de 1957 y 1958, en la Figura 3.1, sólo se muestran condiciones moderadas en dos de ocho estaciones del estado de Oaxaca, por lo que no se podría considerar como una sequía regional de intensidad severa como lo propone Douglas. Los años 1977, 1982-1983 y 1987, se encuentran en buen acuerdo con los resultados del análisis aquí expuesto, cabe mencionar que dichos años en el presente trabajo forman parte de eventos más extensos y no años secos de forma puntual.

Otro trabajo que utiliza la regionalización climática propuesta por Douglas, así como el PDSI, es el realizado por Herrera y Álvarez (op. cit.), el cual determina que, en el período 1921-1987, el decenio de los cincuenta es el de sequía más severo a nivel nacional que ha tenido México, y la región 6, que comprende el estado de Durango excepto la porción oeste y suroeste, así como parte del estado

de Chihuahua y noroeste de Zacatecas, fue la región más afectada del país, ya que se registraron sequías severas intercaladas con extrema y moderada, en el lapso de 1950 a 1958. Los resultados de Herrera y Álvarez (Ibid.), están en buen acuerdo con los obtenidos en el presente trabajo aunque es necesario agregar, por su importancia, que los estados de Coahuila y Nuevo León, también registraron sequía excepcional durante la mayor parte del decenio de los cincuenta.

El trabajo de Liverman (2000), basado en información del impacto de la sequía en la agricultura y ganadería, determina que el año 1996, en el norte de México, fue de graves conflictos por el evento de cuatro años; los estados más afectados fueron Sonora, Sinaloa, Nuevo León y Tamaulipas. En los resultados de la presente investigación se identificó, en el centro-norte del país, los años 1995 y 1996 como los más importantes por haber registrado, intensidades de severa a excepcional, dentro de una sequía nacional que abarca de 1994 a 2000, por lo que coincide en buena manera con el trabajo de Liverman, aunque difiere en que se menciona el estado de Tamaulipas como uno de los más afectados, mientras que en la Figura 3.1 se observa que en los años de 1994 a 2000, este estado es de los menos afectados por sequía.

El Atlas Nacional de Riesgos, publicado por CENAPRED (2001), muestra el trabajo de sequías históricas en México (Tabla 3.1) realizado por Florescano para la SAHR (1980), la Tabla 3.1 fue modificada en el orden de los estados de la

Republica Mexicana para poder ser comparado con los resultados aquí mostrados.

Tabla 3.1 Mexico: grado de afectación de la sequía en los estados de la República Mexicana, de acuerdo con Florescano 1980 y CENAPRED 2001.

Estado	1948-1954	1960-1964	1970-1978	1993-1996
Baja California Sur	Regular	Severa	Regular	Severa
Baja California	Regular	Severa	Regular	Severa
Sonora	Severa	Severa	Regular	Severa
Chihuahua	Severa	Severa	Severa	Severa
Coahuila	Severa	Severa	Severa	Severa
Nuevo León	Severa	Severa	Severa	Severa
Tamaulipas	Severa	Severa	Regular	Severa
San Luis Potosí	Severa	Severa	Regular	Severa
Zacatecas	Regular	Severa	Regular	Severa
Durango	Regular	Severa	Severa	Severa
Sinaloa	Regular	Severa	Regular	Severa
Nayarit	No afectó	Regular	No afectó	Regular
Jalisco	No afectó	Regular	No afectó	Regular
Colima	No afectó	No afectó	No afectó	Regular
Aguascalientes	No afectó	Severa	Regular	Severa
Guanajuato	Regular	Severa	Regular	Severa
Querétaro	Regular	Severa	Severa	Severa
Hidalgo	Regular	Severa	Severa	Severa
Veracruz	No afectó	No afectó	No afectó	Regular
Puebla	No afectó	Regular	Regular	Severa
Tlaxcala	Severa	Severa	Severa	Severa
México	No afectó	Regular	Regular	Severa
Distrito Federal	No afectó	Regular	No afectó	Severa
Morelos	No afectó	No afectó	No afectó	Severa
Michoacán	No afectó	No afectó	No afectó	Regular
Guerrero	No afectó	No afectó	No afectó	Regular
Oaxaca	No afectó	No afectó	No afectó	Regular
Chiapas	No afectó	No afectó	No afectó	No afectó
Tabasco	No afectó	No afectó	No afectó	No afectó
Campeche	No afectó	No afectó	No afectó	No afectó
Quintana Roo	No afectó	No afectó	No afectó	No afectó
Yucatán	No afectó	No afectó	No afectó	No afectó

Como se puede observar en la Tabla 3.1, el trabajo de Florescano muestra que las sequías no tienen presencia en el sureste del territorio nacional; en contraste, los resultados de esta investigación comprueban que éstas no son exclusivas del

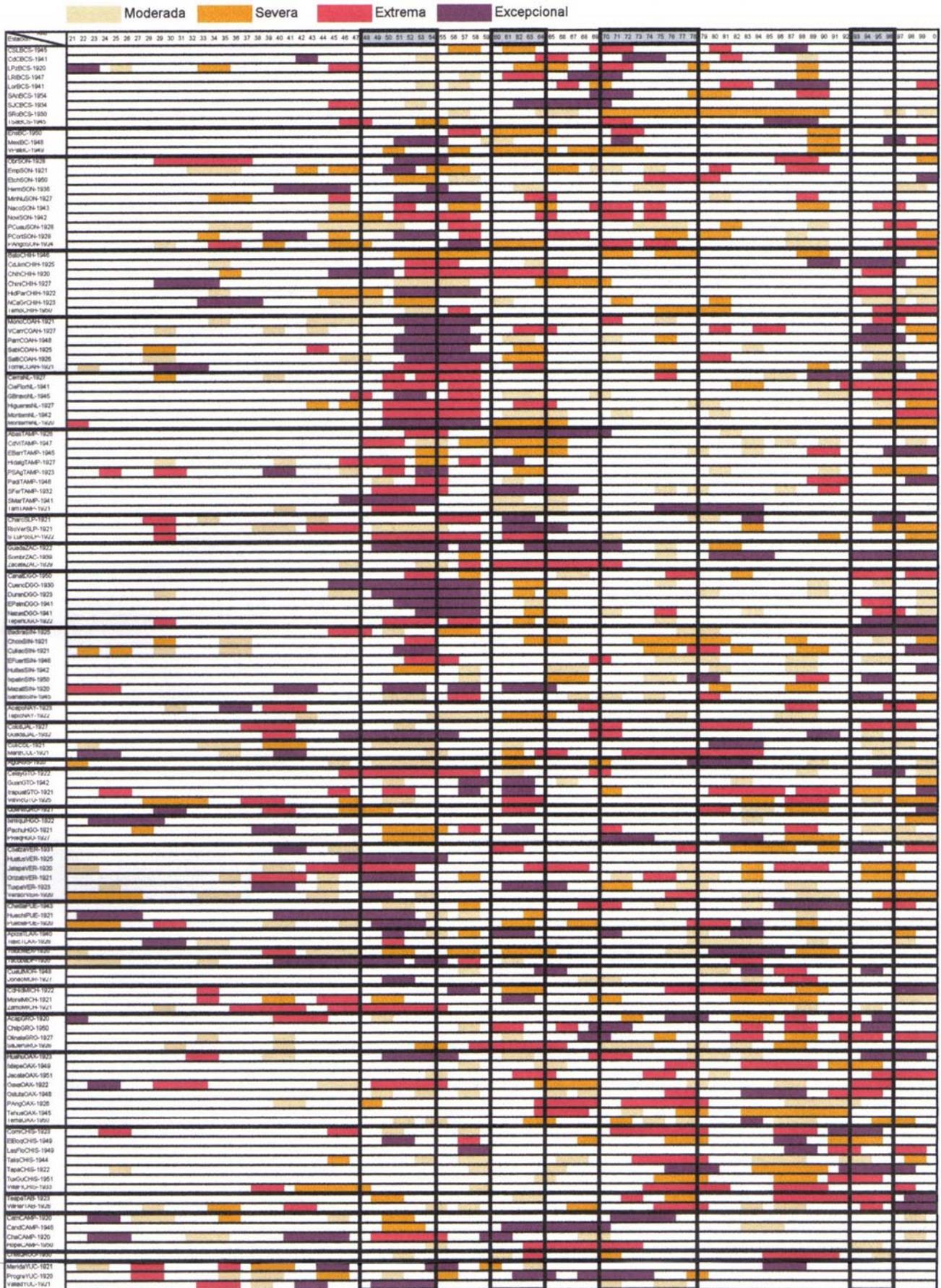
norte del país, por el contrario, éstas tienen presencia a lo largo de le país sin importar la latitud ó tipo de clima.

En la Figura 3.2 se muestran los resultados obtenidos en el presente trabajo con la adaptación de los períodos 1948-1954, 1960-1964, 1970-1978 y 1993-1996, propuestos por Florescano.

De manera general, se puede afirmar que los períodos que propone Florescano no concuerdan con los propuestos en el presente trabajo. El caso más divergente entre ambos estudios, es el del periodo de sequía de los años cincuenta, que duró de 1950 a 1958. La Figura 3.2, muestra cómo este evento es cortado por la mitad, en el año 1954, si se aplica el periodo propuesto por Florescano.

Otro caso de divergencia entre ambos trabajos se observa en el período propuesto por Florescano de 1970-1978, que muestra al país con sequía regular y severa en el norte y centro; en contraste, en la Figura 3.2, se observan condiciones cercanas a lo normal en la mayor parte del territorio, con excepción de los estados de Sonora, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Es importante indicar que en las tres últimas entidades mencionadas, en el estudio de Florescano, no registran sequías en ningún período.

Figura 3.2. México: comparación entre los periodos de sequía obtenidos por Florescano 1980 y CENAPRED 2001 y los de la presente investigación.



Los períodos de sequía 1960-1964 y 1993-1996, propuestos por Florescano, concuerdan de mejor manera con las sequías de 1961-1967 y 1994-2000 registradas en el presente estudio; sin embargo, cabe mencionar casos incompatibles como los de Baja California, Baja California Sur y Sonora, que en el estudio de Florescano, durante el período de 1993 a 1996, muestran sequía severa; en contraste, en la Figura 3.2, se observa claramente cómo estos estados de la República Mexicana no presentaron estas condiciones durante tal período.

En la Tabla 3.1, propuesta por Florescano, se muestra cómo el evento de los años 1993-1996 es el más importante por su distribución e intensidad. Esto se contrapone con los resultados expuestos en el presente trabajo así como los propuestos por Herrera y Álvarez (op. cit.), ya que se ha demostrado, en la Figura 3.1, que el período seco de los años cincuenta, es la sequía más importante si se toma en cuenta los tres parámetros más relevantes de una sequía (distribución, duración e intensidad). Las diferencias tan marcadas entre el estudio aquí expuesto y el realizado por Florescano, pueden deberse a que este último, no utiliza datos o registros climáticos, sino diferentes fuentes de información (hemerográfica, registros agrícolas, enciclopédicos, etc.) para definir un evento de sequía; así, los resultados de aplicar estas metodologías indirectas no coinciden, en general, con los resultados de trabajos que utilizan registros climáticos e índices más objetivos (SPI, PDSI).

En la presente investigación se presentó la Figura 3.1 que, a diferencia tanto de trabajos internacionales como nacionales que fueron consultados para la

elaboración de este trabajo, ninguno muestra una gráfica semejante a ésta, por lo que se puede considerar como uno de los aportes más importantes de la presente investigación. Las bondades de presentar los resultados en esta forma, radican en que, en una sólo gráfica, se muestra la duración, distribución e intensidad de la sequía, en un periodo de tiempo amplio (80 años) y en un territorio geográficamente extenso.

Por último, a manera de resumen de los resultados obtenidos en el presente estudio, se elaboró la Tabla 3.2, la cual muestra en orden de importancia (por su distribución, duración e intensidad), los periodos de sequía que han estado presentes en México durante los años 1920-2000.

Tabla 3.2 Periodos de sequía más importantes en México durante los años 1920-2000.

Clave	Distribución	Duración aproximada	Intensidad máxima del periodo de sequía
D	Nacional (93.2%)	1950-1958	Extrema
I	Nacional (75.8%)	1994-2000	Extrema
E	Nacional (74.2%)	1961-1967	Severa
G	Nacional (75.8%)	1976-1984	Severa
H	Nacional (65%)	1987-1991	Severa
B	Centro	1935-1942	Extrema
C	Noroeste	1943-1948	Severa
F	Península de Baja California	1968-1972	Extrema
A	Noroeste	1932-1937	Moderada

3.3 Conclusiones

Como se mencionó en los capítulos previos, la sequía es, quizá, el fenómeno climático más difícil de analizar; sin embargo, es posible su análisis con índices de sequía creados con la finalidad de abstraer de los datos climáticos, una cifra que determine estas condiciones, en un espacio y tiempo determinados.

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) elaborado por McKee et al., (1993; 1995) se ha utilizado para investigar y monitorear la sequía en diversos países (Guttman, 1999; Hayes et al., 2000; Vicente y Cuadrat, 2004; NDMC) y a nivel regional en México (Velasco, 2001; CEISS, 2002), estos estudios han demostrado que el SPI permite definir de manera adecuada los eventos de sequía. Sin embargo, en México el SPI no había sido aplicado a escala nacional para identificar las sequías históricas, cabe mencionar que otro trabajo ya había utilizado el SPI a escala nacional, éste es el de Giddings et al. (2005), pero, este estudio a diferencia del aquí expuesto, propone una zonificación del territorio nacional basado en la precipitación, sin incluir la identificación de sequias históricas.

El presente trabajo es una evidencia de que es posible aplicar el SPI a nivel nacional con resultados confiables; por lo anterior se propone el monitoreo de la sequía con el uso del SPI en el territorio nacional de forma sistemática con densidad de estaciones climáticas más grande que la utilizada en esta investigación, sin dejar de lado el apoyo de otros índices de sequía que

complementen los resultados obtenidos, de igual forma que actúa el *North American Drought Monitor*.

México cuenta con datos de precipitación mensual de buena calidad a partir de principios del siglo XX, por lo que fue posible aplicar el SPI y obtener resultados que fueron apoyados con trabajos previos (sin dejar de lado las inconsistencias puntuales con algunos trabajos), así como aportar información que no ha sido señalada por algún otro investigador.

Referencias

- AGROASEMEX, 2006: *La Experiencia Mexicana en el Desarrollo y Operación de Seguros Paramétricos Aplicados a la Agricultura*. Querétaro, México.
www.agroasemex.gob.mx/publicaciones
- Alcántara C. P., 2003: *Ajustes para México del Índice de Severidad de Sequía de Palmer, (PDSI)*. Tesis de Licenciatura en Biología. UNAM. México.
- Bitrán B. D., 2001: *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99*. Serie impacto socioeconómico de los desastres en México. CENAPRED. México.
- Campos A. D., 1991: *Estudio de Sequías en el Altiplano Potosino de la Republica Mexicana. Acta Científica Potosina*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí S.L.P. Vol. XIII, No. 1, pp 85-98.
- Campos A. D., 1996: *Crecientes y sequías. Eventos hidrológicos extremos*. Ciencia y Desarrollo 127, CONACYT. Marzo-abril. pp. 34-41. México
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2002: *Sequías Fascículo No. 14*. México.
- Coty K., Hayes M. y Philips T., 1998: *How to reduce drought risk*. Ed. Western Drought Coordination Council. U.S.A.
- Delgadillo M. J., Aguilar O. T. y Rodríguez V. D., 1999: *Los aspectos económicos y sociales de El Niño (1999)*. . En: Magaña V. (Editor), *Los impactos de El Niño en México*. Secretaría de Gobernación. México, D.F. pp 181-210.
- Douglas A. 1996: *Mexican temperature, precipitation and drought data base*. Asheville, NC: National climate data center.
- Dracup J.A., Lee K. S. y Paulson E. G., 1980: *On the definition of droughts*. Water Resources Research. Vol.16 No. 2 pp. 297-302.
- Florescano E. y Swan S., 1995: *Breve historia de la Sequía en México*. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. México.
- Hayes, M., 1998: *Drought indices*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska.
- Hernández M. E., 1994: *La sequía en México*. Memorias de primer taller de estudio del País: México. Cuernavaca, Morelos. Instituto Nacional de Ecología. U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, Coordinación de la Investigación Científica y Centro de ciencias de la Atmósfera. UNAM. México. pp 141-147.

- Kart, T. R. y Knight R. W., 1985: *Atlas of Monthly Palmer Hydrological Drought Indices (1931-1983) for the Contiguous United States*. Historical Climatology Series 3-7, National Climatic Data Center, Asheville, NC.
- Marcos V. O., 2001: *Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación*. Instituto Universitario de Geografía. Investigaciones geográficas. España. No. 26 pp 58-80.
- Maunder J., 1990: *El impacto humano sobre el clima*. Arias Monteno Editores (Madrid), Editorial (original) Routledge (Londres).
- Mosiño P. A., 1976: *Fluctuaciones climáticas y su impacto en las actividades humanas*. Consejo Nacional de ciencia y tecnología. Traducción del folleto "Living with climate change" editado en ingles por el Since Council of Canada.
- Nagarajan R., 2003: *Drought: Assessment, Monitoring, Management and Resources Conservation*. Indian Institute of Technology, Bombay.
- National Drought Mitigation Center, 1991: *The Basics of Drought Planning: A10-Step Process*. University of Nebraska-Lincoln.
- National Drought Mitigation Center, 2002: *What is Drought?* University of Nebraska-Lincoln. <http://drought.unl.edu/>
- National Drought Mitigation Center, 2004: *Spotting Drought Before It's Too Late*. University of Nebraska-Lincoln. <http://drought.unl.edu/>
- Palmer, W. C., 1965: *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- SARH, 1978: *Análisis de las sequías en México*. Documentación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México D.F.
- Secretaria de Recursos Hidráulicos, 1977: *Estudios de los deciles y su aplicación en la estimación de la sequía*. Subsecretaria de Planeación. Dirección General de Estudios. Reporte técnico No. 1.
- Vázquez M. S., 1999: *Caracterización de las sequías en el norte de Durango*. Tesis de maestría. Colegio de postgraduados Montecillo Texcoco.
- Vázquez P. M. y Arteaga R., 1997: *Programa para el calculo del Índice de Aridez de Palmer y su aplicación a los datos de la Estación Chapingo Edo. de México*. IV Reunión Nacional sobre sistemas de captación de lluvia. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Colegio de postgraduados en Ciencias Agrícolas. Torreón. 60-70 pp.

Velásquez G. J., Sin fecha: *Glosario de términos climáticos*. Colección Ciencia y técnicas no. 31. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Facultad de Ciencias Agrícolas.

Wilhite D. A., 1997: *Improving Drought Management in the West: The Role of Mitigation and Preparedness*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska U.S.A.

Wilhite D. A. y Svoboda M. D., 2000: *Drought Early Warning Systems in the Context of Drought Preparedness and Mitigation*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska U.S.A.

World Meteorological Organization (WMO), 1975: *Drought and Agriculture*. Technical Note No. 138. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 392:138:127 pp.

Referencias

- Agnew C. T., 2000: *Using the SPI to Identify drought*. Drought Network News. Vol. 12, No. 1, Winter 1999–Spring 2000. pp 6-12.
- Alley W.M., 1984: *The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions*. Journal of Climate and Applied Meteorology 23:1,100-1,109.
- Coronel B. H. y Llanos A. J., 1996: *Sobre el ajuste de la distribución Gamma a datos de precipitación pluvial*. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XI, No. 1, pp 15-19.
- Coughlan M.J., 1987: *Monitoring drought in Australia*. Pages 131-144 in Planning for Drought: Toward a Reduction of Societal Vulnerability (D. A. Wilhite and W. E. Easterling, ed.). Westview Press, Boulder, Colorado.
- Englehart P. J. y Douglas A. V., 2002: *México's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity*. Atmósfera Vol. XV, No. 3, pp.147-164.
- Fernández G. F., 1996: *Manual de climatología aplicada. Clima, ambiente y planificación*. Editorial Síntesis S.A. Madrid España.
- García E., Vidal R., Tamayo L., Reyna T., Sánchez R., Soto M. y Soto E., 1975: *Precipitación en la Republica Mexicana y evaluación de su probabilidad*. CETENAL, Instituto de Geografía UNAM.
- Gibbs, W. J. y Maher. J. V., 1967: *Rainfall deciles as drought indicators*. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48. Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia.
- Guttman N. B., 1999: *Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm*. Journal of the American Water Resources Association, Vol. 35, No. 2, 311- 323.
- Hayes M., 1998: *Drought indices*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska.
- Jose A. M., Magnayon F. O. y Hilario F. D., 1991: *Climate impact assessment for agriculture in the Philippines*. Unpublished paper, National Workshop on Drought Planning and Management in the Philippines, Quezon City.
- Lee, D. M., 1979: *Australian drought watch system*. Pages 173-187 in Botswana Drought Symposium (M. T. Hinchey, ed.). Botswana Society, Gaborone, Botswana.

- Magaña V., Pérez J. L., Vázquez J. L., Carrisoza E., Pérez J., 1999: *El niño y el clima*. En: Magaña V. (Editor), Los impactos de El Niño en México. Secretaría de Gobernación. México, D.F. pp 23-68.
- McKee T. B., Doesken N. J. y Kleist J., 1993: *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston.
- McKee, T. B., Doesken N. J. y Kleist J., 1995: *Drought monitoring with multiple time scales*. Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston.
- Medina B. M., 1995: *Metodología para obtener índices agroclimáticos*. Tesis de licenciatura en Geografía. UNAM. México.
- Mosiño P. A. y García E., 1981: *The variability of rain-fall in México and determination by means of the Gamma distribution*. Geografiska Annaler, 63 A:1-10.
- National Drought Mitigation Center, 2000: *The standardized Precipitation Index*. Manual del programa para el cálculo de SPI. <http://www.drought.unl.edu>
- Palmer, W. C., 1965: *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Vázquez A. J., 2006: *Datos climáticos de la Republica Mexicana: Panorama actual y requerimientos inmediatos*. Programa Nacional de Modelación del Clima en México.
- Wilhite D. A. y Svoboda M. D., 2000: *Drought Early Warning Systems in the Context of Drought Preparedness and Mitigation*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska U.S.A.
- World Meteorological Organization (WMO), 1975: *Drought and Agriculture. Technical. Note No. 138*. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 392:138:127 pp.

Referencias

- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2001: *Diagnostico de peligros e identificación de Riesgos de Desastres en México*. Atlas Nacional de Riesgos.
- Douglas A. V., 1996: *Mexican temperature, precipitation and drought data base*. Asheville, NC: National climate data center.
- García E. y Hernández M. E., 1988: *Anomalías de la precipitación en la República Mexicana de 1921 a 1980*. Revista de Geografía. México. Vol.II, No. 3.
- Giddings I., Soto M., Rutherford B. y Maarouf A., 2005: *Standardized Precipitation Index Zones for México*. *Atmósfera* 2005 pp 33-56.
- Guttman N. B., 1999: *Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm*. Journal of the American Water Resources Association, Vol. 35, No. 2, 311- 323.
- Hayes M., Svoboda M. y Wilhite D. A., 2000: *Monitoring drought using the Standardized Precipitation Index*. Drought. A Global Assessment. London and New York. Vol. I. 168-180.
- Hernández M. E., 1994: *La sequía en México*. Memorias de primer taller de estudio del País: México. Cuernavaca, Morelos. Instituto Nacional de Ecología. U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, Coordinación de la Investigación Científica y Centro de ciencias de la Atmósfera. UNAM. México. pp 141-147.
- Herrera V. G. y Álvarez E. L., 1999: *Caracterización geográfica de la sequía en México*. Memorias del IX Congreso Nacional de Meteorología. Variabilidad climática en México. Universidad de Guadalajara. pp 21-24.
- Liverman D. M., 2000: *Adaptation to Drought in México*. Drought. A Global Assessment. London and New York. Vol. II. 35-45.
- McKee, T. B., Doesken N. J. y Kleist J., 1993: *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston.
- McKee, T. B., Doesken N. J. y Kleist J., 1995: *Drought monitoring with multiple time scales*. Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology; pp. 233–236. American Meteorological Society, Boston.
- Noble G. y Lebrija M., 1956: *La sequía en México y su previsión*. Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística. México D.F.

SARH, 1978: *Análisis de las sequías en México*. Documentación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México D.F.

SAHR, 1980: *Análisis histórico de las sequías en México*. Documentación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México D.F.

Velasco I., 2001: *Índice de sequía meteorológica en la cuenca alta del río Conchos*. XI Congreso Nacional de irrigación. Guanajuato México.

Vicente S. S. y Cuadrat P. J., 2004: *Seguimiento espacio-temporal de las sequías mediante sistemas de información geográfica: aplicación y validación en el sector central del valle del Ebro*. Departamento de Geografía. Universidad de Zaragoza. España

Páginas WEB consultadas

1- AGROASEMEX

<http://www.agroasemex.gob.mx/publicaciones>

2-Servicio Meteorológico Nacional

<http://smn.cna.gob.mx/>

3-Centro de Investigación Sobre Sequía

<http://www.sequia.edu.mx/>

4-National Drought Mitigation Center

<http://drought.unl.edu>

5-Hi-Ryong y Wilhit

http://rossby.metr.ou.edu/~spark/AMON/v1_n5/Byun/Byun.html

6-United States Drought Monitor

<http://drought.unl.edu/dm/index.html>

7- North American Drought Monitor

<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/monitoring/drought/nadm/index.html>

8- National Drought Mitigation Center

<http://www.drought.unl.edu/monitor/interp6.htm>

9- National Drought Mitigation Center

<http://www.drought.unl.edu/monitor/interp12.htm>

10- National Drought Mitigation Center

<http://www.drought.unl.edu/dm/archive/99/classify.htm>

Anexo

Gráficas de SPI 24-meses, las cuales corresponden a las 132 estaciones climáticas utilizadas en la presente investigación. El orden de éstas es el utilizado en la Figura 3.1 para una fácil comparación.

