I. TEXTOS MONOGRÁFICOS
6. MEDIO AMBIENTE

MITOS Y REALIDADES DE LA SEQUÍA EN MÉXICO

María Engracia Hernández Cerda
Germán Carrasco Anaya
Gloria Alfaro Sánchez

IG
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
UNAM

TEMAS SELECTOS DE GEOGRAFÍA DE MÉXICO

María Engracia Hernández Cerda es doctora en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México e investigadora asociada del Instituto de Geografía de la propia UNAM.

Germán Carrasco Anaya es licenciado en Geografía por el Colegio de Geografía y profesor de tiempo completo titular en la Escuela Nacional Preparatoria de la UNAM.

Gloria Alfaro Sánchez es maestra en Ciencias por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México y técnico académico titular del Instituto de Geografía-UNAM.

MITOS Y REALIDADES DE LA SEQUÍA EN MÉXICO
I.6.3

Temas Selectos de Geografía de México

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Juan Ramón de la Fuente
Rector

Lic. Enrique del Val Blanco
Secretario General

Dr. Daniel L. Barrera Pérez
Secretario Administrativo

Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez
Secretaria de Desarrollo Institucional

Mtro. José Antonio Vela Capdevilla
Secretario de Servicios a la Comunidad

Mtro. Jorge Islas López
Abogado General

Dr. René Drucker Colín
Coordinador de la Investigación Científica

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

Dr. Adrián Guillermo Aguilar
Director

Dr. José Omar Moncada Maya
Secretario Académico

Dra. Teresa Reyna Trujillo
Editora Académica

Lic. Raymundo Rodríguez Salgado
Secretario Administrativo

MITOS Y REALIDADES DE LA SEQUÍA EN MÉXICO

I.6.3

María Engracia Hernández Cerda
Germán Carrasco Anaya
Gloria Alfaro Sánchez

Colección *Temas Selectos de Geografía de México*

Coordinadoras Académicas
y Editoriales: Dra. María Teresa Sánchez Salazar
Dra. María Teresa Gutiérrez de MacGregor

Diseño de portada: Juan Carlos del Olmo

Editora Técnica: Martha Pavón
Redactora Cartográfica: María del Consuelo Gómez Escobar

MITOS Y REALIDADES DE LA SEQUÍA EN MÉXICO
I. Textos monográficos. 6. Medio ambiente
Clave: I.6.3

Primera edición: octubre de 2007

©Instituto de Geografía
©Coordinación de la Investigación Científica

Derechos exclusivos de edición reservados para todos los países de habla española. Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin autorización escrita de los editores

Instituto de Geografía, UNAM
Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán
04510 México, D.F.
www.igeograf.unam.mx

ISBN: UNAM (Obra General): 968-36-8090-9
ISBN: UNAM 978-970-32-4692-2

Este libro presenta los resultados de una investigación científica y contó con dictámenes de expertos externos, de acuerdo con las normas editoriales del Instituto de Geografía. Para su publicación, recibió el apoyo financiero de la Coordinación de la Investigación Científica y de la Dirección del Instituto de Geografía de la UNAM. Por este apoyo, las coordinadoras de la Colección expresamos nuestro agradecimiento.

ÍNDICE

Presentación 9
Introducción 13

I. Cronología de las sequías en el mundo y en México 17

II. Definición de sequía 27
Sequía y aridez 28
Algunos aspectos de la sequía 30

III. Clasificación de las sequías 33
Definiciones conceptuales de sequía 33
Definiciones operativas de sequía 34

IV. Circulación general de la atmósfera 41
Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) 45
La región de las corrientes descendentes subtropicales (altas presiones subtropicales) 46
Los vientos alisios (*Trade winds*) 47
Los vientos del Oeste 50
Altas presiones polares 50
Frente polares 51

V. Principales condiciones meteorológicas que favorecen la sequía en México 53
Sistemas anticiclónicos 54
Vientos del Oeste 54
Vientos del Este (alisios) 55
Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) 55
Corrientes en chorro 57
Circulación monzónica 60
Frente fríos 62
Ondas del Este 63
Ciclones tropicales 65

VI. La sequía: su relación con El Niño y otros índices de circulación 69
El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) 69
La Oscilación Cuasi-*bienal*, OCB (*Quasi Biennal Oscillation*, QBO) 73
La Oscilación Madden-Julian, OMJ (*Madden Julian Oscillation*, MJO) 75
La Oscilación Decadal del Pacífico, ODP (*Pacific Decadal Oscillation*, PDO) 77
La Oscilación Multidecadal delAtlántico, OMA (*Atlantic Multidecadal Oscillation*, AMO) 80
La Oscilación del Atlántico Norte, OAN (*North Atlantic Multidecadal Oscillation*, NAO) 80
Temperatura de la superficie del mar (TSM) 82
Regímenes pluviométricos en México 84

VII. La sequía, la desertificación y la degradación del suelo 87
Procesos asociados a la desertificación 90
Consecuencias de la desertificación 91

VIII. Efectos de la sequía y medidas de mitigación 97
Medidas de mitigación contra las sequías 103
Paso 1: Integrar una comisión para la sequía 106
Paso 2: Definir el propósito y los objetivos del plan para la sequía 107
Paso 3: Buscar la participación de los usuarios y resolver los conflictos entre ellos 107
Paso 4: Levantar un inventario de recursos e identificar los grupos en peligro 108
Paso 5: Desarrollar una estructura organizativa y preparar un plan para la sequía 108
Responsabilidades específicas de la comisión para la sequía 109
Comité de monitoreo 110
Medidas de mitigación en Australia 110
Medidas de mitigación en México 112

IX. El pronóstico de las sequías 117

X. La investigación sobre la sequía en México 127

XI. Consideraciones finales 133

Bibliografía 139

PRESENTACIÓN

El problema con la sequía, es que cada quien quiere que sea lo que a él le conviene que sea, ya para justificar una mala planeación de acuerdo con la verdadera climatología del sitio, ya para obtener apoyo del FONDEN o del FAPPRAC o el pago del seguro por AGROASEMEX, ya para evitar cumplir con una obligación previamente adquirida. Más aún, algunos verdaderamente afectados por las sequías no tienen ni el conocimiento ni la capacidad de monitorear las condiciones que la justificarían, asignando su mala suerte a un "acto de Dios". Así pues, un libro con este sugestivo título, escrito directamente en español y anclado a la idiosincrasia de nuestras culturas latinoamericanas, resulta bienvenido en la comunidad que de una u otra manera se encuentra asociada a los aspectos prácticos de la meteorología o la climatología, incluyendo en este público a los futuros involucrados en esto: los actuales estudiantes, por ejemplo, de Geografía, Ciencias Atmosféricas, Meteorología, Ciencias o Ingeniería Ambiental. Tampoco existe duda en que será útil para productores agropecuarios altamente productivos que ya empiezan a existir en nuestro país en forma significativa (en el contexto de la fracción total de los alimentos que consumimos que ellos producen, si no en número absoluto).

De hecho, la sequía no se parece a la mayoría de los otros fenómenos hidrometeorológicos extremos, en el sentido de que no inicia

de manera absoluta en un cierto momento, no tiene una duración definida clara e inclusive su terminación puede resultar engañosa. Más que un fenómeno hidrometeorológico específico, se puede ver como una etapa de la variabilidad climática usual en cada sitio, definida de manera relativamente objetiva como un *lapso de tiempo* que va de semanas a años, en los que la precipitación pluvial muestra un claro déficit con respecto a lo que resulta *normal* para la zona afectada. Y los conceptos en letras cursivas resultan importantes. Por un lado el establecimiento, duración y terminación de una sequía se definen para acumulados de lluvia en diversos intervalos de tiempo, como podrían ser un mes, tres meses, la temporada de lluvias, uno o varios años. Dado que la variabilidad climática existe a todas las escalas de tiempo, resulta perfectamente posible que una sequía comprobable a duración de 24 meses, contenga en su interior un lapso de tiempo, digamos de un mes, en el que la precipitación pluvial estuvo ¡por arriba de lo normal! Y aquí aparece el segundo concepto en cursivas: "normal". Obsérvese que no se define como simplemente *por debajo de la media climatológica*. Una fracción extraordinariamente alta del tiempo se encuentra en una condición por debajo de la media, bajo condiciones simplificadas del orden de la mitad del tiempo. Por ello es necesario definir qué es "normal". Existen numerosas maneras de hacerlo, pero en todos los casos debe incluir un rango (*vs*. un valor único) que se encuentre asociado a la variabilidad usual de la precipitación en el sitio. Evidentemente, diferentes medidas de *normalidad* producirán diferentes inicios, duraciones y terminaciones de la sequía.

La sequía también es peculiar en el sentido de que sus efectos están asociados al déficit acumulado de precipitación pluvial durante el tiempo que lleva declarada la misma, no por su valor máximo o por un cierto valor instantáneo. De la misma manera, la declaración de su terminación debe considerarse no sólo porque la precipitación pluvial *normal* se haya vuelto a alcanzar, sino porque el déficit acumulado haya sido repuesto de alguna manera. El no considerar esta realidad en las medidas específicas que se toman para mitigar los

efectos de la sequía, llevan a severas sobreexplotaciones de los recursos hídricos que, aunque hayan sido disparados por la sequía, se hacen permanentes en el panorama hídrico de la región cuando desechamos las medidas restrictivas en el uso del agua, antes de que el déficit acumulado se haya repuesto.

Algunas otras particularidades de la sequía es que existen muchas personas que la usan equivocadamente en lugar o en asociaciones de términos como *estiaje*, *aridez* o *desertificación*. Puede existir sequía en la temporada de lluvia, o en la temporada de estiaje; puede existir sequía en una zona árida o en una zona tropical lluviosa. Inclusive, en zonas en las que los recursos hídricos son más que suficientes para satisfacer las necesidades locales de la actividad humana, la sequía puede resultar imperceptible para la población, es decir, aun bajo condiciones de sequía, las necesidades de agua del hombre se encuentran satisfechas. Esto no le quita su carácter de sequía. Ciertamente la desertificación puede ser un efecto del mal manejo de la variabilidad climática en general, de la sequía en particular, pero una no implica necesariamente a la otra. Existe una fuerte asimetría en el trato de esta etapa de la variabilidad climática, lo que se puede identificar fácilmente tratando de responder a la pregunta ¿cómo se le denomina a la etapa opuesta a la sequía, una en que en un lapso de tiempo relativamente largo ocurren precipitaciones pluviales por arriba del rango considerado como normal? Parece que no hemos acuñado un nombre específico para este caso.

La definición y la declaración de la sequía se complica por múltiples factores como el crecimiento poblacional, el crecimiento en la dotación diaria a la población, la no consideración de la llamada agua virtual (la usada para producir cada uno de los productos que consumimos), la sobreexplotación sistemática del recurso hídrico en alguna de sus formas, la *esperanza* de que el año próximo será mejor por lo que puedo (y debo) gastarme el agua disponible en las presas este año, el manejo político del agua a muy corto plazo, ignorando que los límites físicos existen y que no desaparecerán mágicamente en el próximo trienio o sexenio.

Por si esto fuera poco, tenemos un nuevo actor en la escena, uno que interviene todo y cuyo tratamiento mediático ha contaminado todo, por supuesto también el manejo de la sequía: el *cambio climático global* por incremento en la concentración de los gases de *invernadero*. En forma simplista podríamos decir que es una condición que puede introducir tendencias sistemáticas en todos y cada uno de los factores que intervienen en la sequía, por ejemplo un cambio en la *banda de normalidad*, un cambio en la variabilidad (el ancho de la *banda de normalidad*), la distribución temporal y geográfica de la lluvia. Más aún, este nuevo actor parece ser el ideal *villano de la película*, pues permite justificar prácticamente la totalidad de los efectos no previstos y la falta de planeación realista.

El lector de estas líneas de presentación, que no se haya convencido de que el tema de la sequía requiere de un tratamiento documental, objetivo, amplio y convincente adicional al que hasta ahora hemos tenido, quizá no tenga sentido que lea el libro de la doctora María Engracia Hernández. Yo por mi parte, le doy la bienvenida a *Mitos y realidades de la sequía en México*, y lo recomiendo ampliamente al público de nuestro país y del extranjero.

Michel Rosengaus Moshinsky
Coordinador General
Servicio Meteorológico Nacional
Subdirección General Técnica
Comisión Nacional del Agua

INTRODUCCIÓN

Cuando en nuestro país se presenta un episodio de sequía, los medios de comunicación se encargan de "bombardearnos" con noticias de pérdidas de cosechas y muerte de ganado. Esto nos hace pensar de inmediato en el aumento de precios y escasez de alimentos, migración de la población del campo y, por supuesto, falta de agua para todas las necesidades del hombre. ¿Será la sequía la causa de estos problemas nacionales? Mucho se ha escrito al respecto, pero las explicaciones se complican desde el momento mismo de definirla, lo que ha generado una serie de controversias sobre la manera de establecer qué es la sequía. Existe, por tanto, una gran cantidad de propuestas que han polarizado fuertemente la investigación al tratar de encontrar una definición que abarque todos los ámbitos en que influye. Además de la problemática de la definición de sequía, hay algunas dificultades para establecer su ocurrencia, ya que no es notoria en su inicios y puede pasar desapercibida por la mayoría de la población, y sólo cuando los efectos son evidentes nos damos cuenta de que está presente; además, no se conoce del todo su frecuencia y son menos conocidas las causas que la originan.

Sobre esto último se han propuesto diferentes ideas para explicar su presencia en nuestro país, entre ellas se encuentra la elabora-

da en los años setenta por el doctor Jorge A. Vivó (1978) quien, a partir del análisis de artículos periodísticos, estableció que la causa principal de la sequía en México era el proyecto *Stormfury*. Éste, auspiciado por la NASA durante los años sesenta y setenta, consistía en utilizar aviones para sembrar con yoduro de plata las bandas nubosas internas de los ciclones tropicales en el Atlántico, con la idea de disminuir su intensidad y propiciar su disipación. El trabajo presentado por Vivó en 1978, establecía que los cambios en las trayectorias de los ciclones tropicales eran la causa de la sequía en México y la región de Centroamérica en 1977; este argumento fue utilizado para explicar la presencia de la sequía de ese año. ¿Realidad o mito?

El conocimiento actual de la climatología de México permite reconocer que durante la época invernal la mayor parte de nuestro país recibe poca precipitación, sin embargo, es común la proliferación de noticias sobre la presencia de sequía en estos meses del año, e incluso algunos estados son declarados como zonas de desastre. ¿Realidad o mito?

Por otro lado, en nuestro país el impacto de la sequía es muy variable, pues va desde pequeños efectos hasta cuantiosos daños que obligan a tomar acciones de respuesta inmediata, así como elaborar planes y programas para enfrentar su futura ocurrencia, sin embargo, al paso del tiempo se olvidan los daños causados y se piensa que no volverá a ocurrir. ¿Realidad o mito?

Si bien no se debe olvidar el problema del agua que siempre ha influido en el desarrollo de las civilizaciones, el uso racional de los recursos hídricos, mediante obras hidráulicas que permiten la regulación y almacenamiento del agua para su utilización en periodos de escasez y la aplicación del riego, ha sido un reto presente en numerosos pueblos, sobre todo en las áreas semiáridas.

En la actualidad el problema del agua, lejos de solucionarse, se ha agravado debido a la demanda creciente en las grandes aglomeraciones urbanas, la implantación de nuevas zonas agrícolas y el uso cada vez más extendido en la industria.

En nuestro país se tiene conocimiento de que desde el establecimiento de las primeras civilizaciones prehispánicas se padeció la sequía en sus diferentes manifestaciones; cabe aclarar que en los últimos años, por el desarrollo propio del país, ha adquirido una gran relevancia, dado que los daños, que de ella se originan, superan en magnitud a la producida por otros fenómenos hidrometeorológicos.

Ante estas interrogantes es que surge este libro, en donde se pretende dar al lector un panorama general de las sequías y sobre todo resaltar su importancia en México. En el texto se revisarán aspectos sobre la sequía meteorológica, sus antecedentes históricos, su definición, sus condiciones meteorológicas, su relación con otras variaciones atmosféricas, sus efectos, medidas de mitigación, algunos métodos de pronóstico y se tratará de dar un breve panorama de los diferentes grupos de trabajo que se dedican a estudiar este fenómeno en México.

I. CRONOLOGÍA DE LAS SEQUÍAS EN EL MUNDO Y EN MÉXICO

El libro inicia con este tema debido a la necesidad de situar a nuestro país en el contexto mundial de las sequías, ya que desde la más remota antigüedad se citan las grandes y pequeñas sequías que han asolado al mundo. Al revisar las diversas fuentes se encontró que no existe un criterio único para caracterizar la sequía, sin embargo, los efectos más graves y conocidos se presentaron en regiones poco desarrolladas como África, zonas de Asia y el noreste de Brasil, aunque también han asolado otras partes del mundo; entre otros, Europa, Estados Unidos, Canadá, Australia. Por tanto, el fenómeno no es selectivo, se podría decir que la diferencia está en cómo se han enfrentado y mitigado los efectos, con base en qué recursos disponibles, así como en la preparación y actitud de la población para reducir sus consecuencias (Figura 1).

En la mayoría de las regiones más secas del mundo se han presentado recientemente variaciones climáticas, que en algunos lugares se han prolongado por varios años. La más conocida es la llamada sequía del *Sahel*, al sur del desierto del Sahara, que es en realidad un periodo de progresiva desecación que ocurre regularmente (1910-1914, 1940-1944, 1972-1975, 1982-1985). A principios de 1974 una

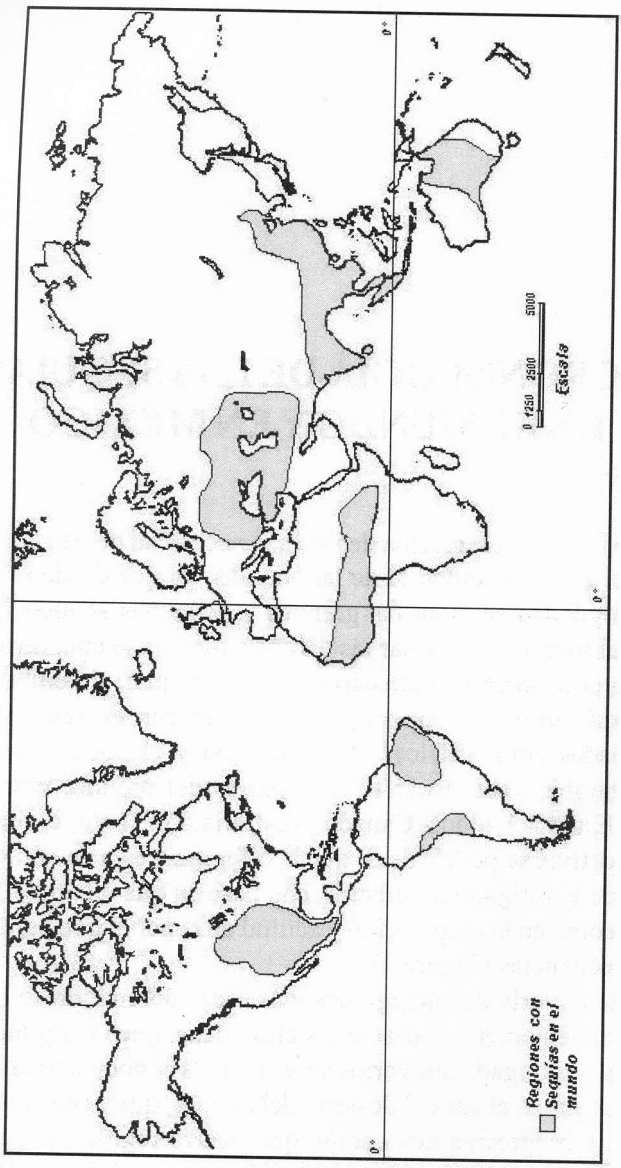

Figura 1. Zonas con sequía frecuente en el mundo (Hardy *et al.*, 1990).

sequía que llevaba siete años de duración había causado la destrucción de cosechas y ganado, afectando gravemente a unos doce millones de personas. Se extendió hacia el sureste de la región y causó la muerte de unos 100 000 etíopes y más del 50% de animales domésticos, con lo que amenazó la supervivencia de más de un millón de nómadas en Etiopía.

En India (Bihar), en 1965-1967, la sequía afectó a más de la mitad de la población de ese estado y redujo la cosecha de arroz a menos de la cuarta parte de lo que se esperaba en 1966; el hambre se propagó en la región y el número de muertos fue de casi millón y medio.

Como se ha mencionado, los países situados en latitudes medias no escapan tampoco a los efectos de las sequías, y aunque las consecuencias son menos dramáticas que en regiones áridas o semiáridas, no dejan de ser costosas. Así, la sequía padecida en algunos países de Europa occidental, entre 1975 y 1976, causó graves pérdidas en el sector agrícola y fue necesario restringir el suministro de agua por 17 horas al día en el sur de Inglaterra. Consecuencias semejantes tuvieron las sequías de 1989-1991 en el Reino Unido, que ocasionaron daños superiores a mil millones de libras esterlinas; 1989 fue el año más seco de los últimos veinticinco en Inglaterra. Las regiones agrícolas de Alemania, Polonia, Hungría y algunas regiones de Francia, también han sufrido grandes pérdidas por los efectos de este fenómeno meteorológico.

En Estados Unidos las llanuras centrales, entre el río Mississippi y las Montañas Rocosas, constituyen el área más afectada por esporádicas sequías. Sobresalen los episodios de 1909-1914 y el más intenso de los años treinta (1933-1937); además de la disminución de precipitaciones, hubo gran sequedad ambiental y tormentas de polvo en los estados centrales. Los efectos de la llamada "Cuenca Polvorienta" (*Dust Bowl*) alcanzaron al 64% del país y contribuyeron a agravar la difícil coyuntura económica de la Gran Depresión, forzando la emigración de numerosas familias de los estados centrales hacia California; otros destacados episodios han sido los de 1952-1956,

1962-1966, en los estados del noreste. El sur de California experimentó lluvias por debajo de la normal durante los meses invernales de 1976 y 1977; la sequía se hizo más severa que a principios de 1977, y el agua fue racionada debido a su disminución. En julio y agosto de 1986 se sufrió una sequía combinada con una ola de calor que costó 48 vidas humanas. En 1988-1989 también se presentaron condiciones de sequía en este país.

Para Canadá se presentaron alrededor de 20 sequías severas en el siglo xx. La más sobresaliente fue la de 1930, pues aproximadamente un cuarto de millón de personas abandonaron las planicies; ésta ocasionó erosión del suelo; afectó la vida salvaje, sobre todo de aves acuáticas; dio lugar a la aparición de plagas y malas hierbas; se incrementaron los incendios de bosques y pastizales. La sequía de 1977, que inició en el verano de 1976 y terminó en abril de 1977, provocó que las compañías dedicadas al deporte del esquí fueran afectadas por la escasa cubierta de nieve durante el invierno, los agricultores no pudieron sembrar en la primavera pues el suelo no tuvo la suficiente humedad para la germinación, se incrementaron los incendios forestales y hubo tormentas de polvo semejantes a las de 1930. En 1980, después de nueves años de sequía, muchos agricultores abandonaron las praderas canadienses.

En Australia, en 1967-1969, se tuvieron muchos incendios forestales como consecuencia de las sequías. En los últimos años el país ha sido afectado por una serie de periodos de sequía, la más importante, en 1972-1973; fue el fin de una prolongada desecación de numerosas áreas. Graves sequías volvieron a registrarse en Australia oriental en 1982-1983.

Las islas del Pacífico tuvieron daños severos por la sequía de 1982-1983 y fue necesario suministrar alimentos a aproximadamente 30 000 personas.

En Portugal, durante 1974-1976, se presentó una severa sequía que disminuyó considerablemente las reservas de agua (subterránea y presas), y por tanto hubo una gran disminución en la producción de energía hidroeléctrica, y una reducción de la producción agrícola y el

suministro de agua potable en algunas áreas urbanas (Alzira *et al.*, 1983, citado en Vázquez, 1999).

Entre las referencias sobre sequías que se tienen para México, destaca el trabajo de García (1974), que intenta explicar las condiciones climáticas que pudieron ser dominantes durante el auge y la caída de la cultura teotihuacana, mediante analogías con la precipitación, además correlaciona el área en estudio con otras regiones de Europa y África bajo la influencia de la celda de alta presión Bermuda-Azores, así como con hechos históricos reportados en el Viejo Continente. La conclusión que obtiene es que el clima durante el auge de esta cultura era tan húmedo como puede ser durante los años más lluviosos en el presente, y supone que la decadencia y desaparición de la cultura teotihuacana se debió, en parte, a la intensa sequía que pudo empezar entre los 700 o 750 años d. C.

Otras investigaciones importantes son las desarrolladas por Sánchez (1980) García Acosta (1993), y Florescano y Swan (1995), en las cuales se plantea una cronología de las sequías históricas de México que va desde el año 1500 a. C. hasta el siglo XX.

Sánchez (1980) indica que en la época prehispánica, que incluye desde el Preclásico hasta la llegada de los españoles (1500 a. C. a 1521 d. C.) se tiene un total de 14 sequías, dos de ellas a lo largo de 2 000 años, debido a que los datos disponibles para este prolongado periodo son muy escuetos y dispersos. Reporta que la sequía de 1052 contribuyó a la caída del imperio tolteca y la ocurrida hacia 1450 fue una de las más severas; su intensidad y amplitud provocó una gran catástrofe en cuanto a pérdida de vidas. También señala que otros de sus dramáticos efectos fueron la venta de personas a cambio de maíz y la emigración en gran escala, y que esta gran sequía parece haber sido el origen de la construcción de una importante obra hidráulica que consistió en un canal para traer agua desde Chapultepec.

Sancho y Cervera *et al.* (1978) y Florescano *et al.* (1980; Desierto y ciencia) citan que en 1460 los habitantes del Valle de México percibieron de esta manera el fenómeno de la sequía: "En este año llovió fuego, es decir que hizo tanto sol que parecía llover

fuego por cuya causa se desarraigaron los más grandes ahuehuetes y se secaron los más gruesos".

En la época colonial (1521 a 1821), Florescano y Swan (1995) indican que en el Virreinato se manifiesta una tendencia a la sequía a lo largo de tres siglos, y así plantean: "que de 1521 a 1600 se presentaron 13 sequías; de 1600 a 1699, 25 eventos y de 1701 a 1821, 50 episodios, lo que da un total de 88 sequías en este periodo". Del análisis de estos eventos, entre otros aspectos, resalta que la variabilidad en el clima fue más fuerte de 1807 a 1810, dado que hubo carestías y graves crisis agrícolas que, además, intervinieron y se mezclaron con la crisis política de 1810.

En este periodo se tienen 50 casos de sequía en el Valle de México, en los cuales el fenómeno abarca dos años consecutivos (1597-1598, 1620-1621, 1641-1642, 1701-1702, 1764-1765, 1772-1773 y 1808-1809), y dos en los cuales la sequía se presenta a lo largo de tres años continuos (1616-1617-1618 y 1778-1779-1780).

Durante el periodo independiente de 1821 a 1910 se registraron 39 sequías (*Ibid.*). Algunas de las registradas en esta época fueron muy severas, como la de 1822-1823, 1834 y 1835 en la península de Yucatán, cuyos efectos fueron desastrosos. Estas sequías provocaron la muerte de numerosas personas y grandes desplazamientos de población. En 1877, en casi todo el país, se experimentó escasez de lluvias. En 1878 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 1880 la sequía afectó las regiones ganaderas del norte de México y la zona central del país. En 1891, 1892, 1896, 1905, 1909 y 1910, la sequía fue casi general en el país.

García Acosta (1993) menciona que para el periodo independiente, el cual se inicia con la consumación de la independencia mexicana en 1821 y durante todo el siglo XIX, se detectaron 46 sequías que tuvieron intensidades diferentes. Los eventos que destacan por su severidad y amplios efectos económicos y sociales, son los de 1822-1823 y 1834-1835 en Yucatán, el de 1854 en Querétaro y el de 1868, que afectó un área muy extensa del país (Chiapas, Veracruz,

Oaxaca, Guerrero, Aguascalientes, Nuevo León, Coahuila y el Valle de México). Durante el Porfiriato, las sequías más severas se presentaron en 1875, 1882, 1884-1885, 1891-1892, 1896, 1901 y 1908.

Con base en estas investigaciones históricas, el último periodo establecido, el correspondiente al de 1910-1977, se registraron 38 sequías, de donde se desprende que de 1910 a 1930 se presentaron con alguna frecuencia, pero moderadas; en cambio, en los años restantes, se indica que hubo 20 sequías severas y seis que podrían clasificarse de extremadamente severas. Según la información disponible, los estados más afectados fueron Coahuila, con 22 sequías durante el periodo examinado; Nuevo León, con 18; Chihuahua con 13, y Sonora y Tamaulipas, con 12 cada uno (Castorena *et al.*, 1978).

García y Hernández (1988) analizan 60 cartas de anomalías de la precipitación respecto a la moda estadística de largo periodo en la República Mexicana para los años de 1921 a 1980, de donde se puede decir que en 1978 sólo se presentó sequía en el Balsas; en 1979 se registró sobre toda la Altiplanicie Mexicana y llanura costera del Océano Pacífico de Sonora a Guerrero, y en 1980 este fenómeno se presentó en la mitad noreste del país, en Sonora y Baja California sur, así como en la Meseta Central de Chiapas.

García *et al.* (2002) realizan una reseña histórica de sequías en México sobre los principales acontecimientos debidos a las sequías de los periodos 1948-1954, 1960-1964, 1970-1978 y 1993-1996, de este último periodo estos autores reportan que en 1993 se presentó la sequía en el norte y centro del país, en 1994 en Chihuahua y en Chiapas; en 1995 en el norte y centro del país, y en 1996 en Coahuila y Sonora. Estos eventos provocaron pérdidas de cosechas, cabezas de ganado, problemas en el abastecimiento de agua potable, incendios forestales y el efecto más dramático: el fallecimiento, en Chihuahua en 1994, de 54 personas por deshidratación. Estos autores reportan también sequía para 1998, la cual dejó sentir sus efectos a todo el país. Para 1999 se registraron daños por este evento en los estados del norte y noroeste del país y parte de Morelos, y en el 2000, en el norte y noreste.

La sequía que se registró en 1998 se ha considerado como un caso excepcional del siglo XX, dado el alto número de incendios que se presentaron, lo cual no tiene precedente en México por su frecuencia y área afectada. Se reportaron 14 mil incendios que afectaron unas 530 000 ha, 21% de las cuales correspondieron a zonas forestales, y el restante 79% a zonas cubiertas de matorrales y pastos. La cifras finales aportadas por la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), fueron de más de 1 500 incendios y 849 000 ha incendiadas (Palacio *et al.*, 1999). Otro aspecto climatológico relevante de este año fue la recurrencia de ondas de calor, que dieron como resultado el rebasar las temperaturas máximas históricas en algunos lugares del país.

De este breve esbozo de las sequías de México, presentadas en la época actual, se puede observar que hay una falta de registro sistemático de este evento en la historia del país, las fuentes de información son múltiples y entre más remotos son los periodos de tiempo que se analizan, la escasez de datos aumenta y carecen de precisión.

En general, la reconstrucción de las cronologías climáticas históricas (Le Roy, 1991) se basa en el uso de registros históricos como una forma de datos que sustituyan a los instrumentales, en inglés *proxy*, los cuales se caracterizan por presentar una tendencia a tener una especificidad geográfica y, aunque son muy abundantes para América del Norte y norte de Europa, son muy escasos para los trópicos, como es el caso de México.

Existe una gran variedad de fuentes históricas, las cuales son utilizadas para reconstruir las condiciones climáticas de México a través del pasado reciente. Algunas de las fuentes más antiguas son los restos de los pocos códices que se conservan y las cartas de relación, las cuales proporcionan información de México antes y después de la conquista de los españoles. Los precios del maíz resultan indicadores confiables de cambios meteorológicos y principalmente de la recurrencia de las sequías. Si bien esta fuente está basada en la estrecha relación existente entre el clima y la producción agrícola, no se debe ignorar que es también influenciada por otros factores.

Una fuente muy importante y confiable son las rogativas religiosas, las cuales han dado lugar a una línea de investigación de reciente creación en nuestro país y que en el capítulo de la investigación de la sequía en México se comentará un poco más.

También las fluctuaciones en el nivel de los lagos, en especial en el centro del país, son reconocidas como respuesta a cambios climáticos a largo plazo. Las inundaciones en la cuenca de México son indicadoras importantes de variaciones en la lluvia.

Existen considerables fuentes de evidencia para la reconstrucción de la historia del clima reciente para el territorio nacional, sin embargo, la mayoría están referidas para la cuenca de México.

Un ejemplo en donde se utiliza parte de esta variedad de indicadores, es el estudio del clima de México desde tiempos de los aztecas, realizado por Metcalfe (1987) y O'Hara y Metcalfe (1997), donde se indica la recurrencia de las sequías en diferentes épocas de nuestra historia actual.

Las fuentes mencionadas son sólo algunas de las muchas que existen, sin embargo, no se pueden dejar de mencionar otros registros de sequías que permiten hacer estudios del clima para periodos de larga duración, es decir, para miles de años.

Estos registros paleoclimáticos de sequías se han desarrollado a partir de una variedad de tipos de datos de indicadores paleoclimáticos *proxy*, cubriendo desde los siglos pasados a decenas de miles de años, y aun más prolongados. La información aportada por este tipo de datos permite observar patrones de la variabilidad natural de la sequía y comparar las sequías del siglo XX con las del pasado. Estos registros también pueden ser estudiados y relacionados con los actuales conocimientos que se tienen de la circulación atmosférica y fenómenos que resultan importantes para las sequías en la actualidad, tales como el ENOS, entre otros.

Los estudios basados en registros paleoclimáticos de sequía y las características de la circulación atmosférica permiten determinar con qué frecuencia las condiciones cambiantes del clima pueden influir en la ocurrencia de sequías prolongadas o de mayor frecuencia. Entre otros, se pueden mencionar a manera de ejemplo los registros

paleoclimáticos provenientes de anillos de árboles (dendrocronología), donde se analizan los anillos de los árboles que cada año se forman en el tronco de éstos, los cuales se relacionan con la mayor o menor abundancia de lluvias. Otros son los sedimentos de lagos y dunas, y el estudio de muestras de polen fosilizado (palinología), mediante las cuales pueden conocerse las especies vegetales nativas o cultivadas que existieron en tiempos pasados, lo que a su vez es un indicador de las condiciones climáticas prevalecientes en cada época.

Otro método es la fenología de las plantas, que consiste en el estudio de las fechas de las diferentes etapas de su ciclo de vida, como la floración o la madurez de los frutos de las plantas. De esta forma pueden medirse los cambios de las condiciones meteoroló-gicas de un año a otro, con base en el estudio de los ciclos biológicos de las plantas. También se puede mencionar el análisis del dióxido de carbono (CO_2) en rocas sedimentarias, que es un indicador del periodo de vida de las plantas y de las condiciones del clima en una época determinada.

La dendrocronología, de desarrollo reciente en México, ha aportado información valiosa en el campo del conocimiento de las sequías históricas: como ejemplo se puede citar la reconstrucción de la precipitación invernal para más de 600 años en el estado de Durango, basada en el estudio de los anillos de los árboles. Con ello se pudo determinar que la peor sequía del siglo XX ocurrió entre 1950-1965, pero que fueron más severas las que se presentaron en el periodo 1850-1860 y en especial la megasequía registrada a mediados del siglo XVI, de 1540 a 1579, donde 33 de los 40 años fueron secos (Cleaveland *et al.*, 2003).

En este sentido, es interesante mencionar que en este mismo periodo se registraron tres grandes epidemias que se iniciaron entre 1519-1520, cuando se calcula que fallecieron aproximadamente ocho millones de indígenas; la segunda entre 1545 y 1576, donde se registraron aproximadamente 12 y 15 millones, y la última en 1576, con más o menos dos millones de decesos causados por fiebres hemorrágicas, transmitidas por roedores y agravadas por condiciones de extrema sequía (Acuña *et al.*, 2002).

II. DEFINICIÓN DE SEQUÍA

Uno de los mayores problemas a enfrentar cuando se reporta la presencia de una sequía es saber si se trata o no de este fenómeno y para ello se necesita conceptualizarlo con precisión. La sequía, en forma universal y cuantitativa, es extremadamente difícil de explicar y se debe admitir que sus definiciones son casi tan numerosas como las publicaciones que se refieren a este tema, pero, en términos generales, la sequía puede considerarse como la falta de suficiente agua para la demanda de la sociedad.

La sequía difiere de otros fenómenos meteorológicos en aspectos temporales, ya que su inicio y final son a menudo algo inciertos con respecto al tiempo, su duración puede ser relativamente prolongada. El término "inicio de la sequía" depende mucho de la definición utilizada, como causa de la falta de lluvia, por su escasez en el suelo y por sus efectos en la población.

La Academia de la Lengua Española define a la sequía como "tiempo seco de larga duración". El Vocabulario Meteorológico Internacional de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) la define como "la ausencia prolongada o déficit notable de precipitación". Sin embargo, la falta de lluvia es relativa y depende de factores naturales (clima, topografía, etc.) y socioeconómicos (actividad económica, aspectos culturales); esto dificulta tener una definición con aceptación general.

Con base en los factores mencionados, se ha considerado a la sequía como un fenómeno meteorológico que se presenta cuando la lluvia o el escurrimiento natural en un periodo dado es menor al valor normal, y cuando esta deficiencia es lo suficientemente importante y prolongada para provocar efectos en las actividades humanas.

Aunque el término sequía es más comúnmente utilizado con respecto a la precipitación y la humedad del suelo, también se aplica para referirse a deficiencias o carencias de agua de otras fuentes, por ello muchos investigadores consideran sólo los efectos adversos para el hombre.

Para la población existe sequía cuando tiene que reducir su consumo de agua y considerar la cantidad de agua de reserva y sus necesidades de uso. En caso contrario, se pueden generar mayores necesidades de consumo y un más rápido agotamiento de las reservas de agua. Por tanto, la sequía no tendría mayor significación para el hombre, si ésta no afectara sus actividades.

Ante ello la sequía no debe ser vista sólo como un fenómeno físico o evento natural, sus impactos en la sociedad resultan de la interrelación entre el evento natural (menor precipitación de la esperada por la variabilidad climática natural) y la demanda de la población de suministro de agua. En la actualidad, se ha planteado que el hombre está favoreciendo el impacto de la sequía a través de sus actividades. Las sequías recientes en países desarrollados y en desarrollo han generado impactos económicos y ambientales que han mostrado a toda la sociedad su vulnerabilidad frente a este riesgo "natural".

Sequía y aridez

La sequía es un rasgo normal del clima, aunque muchos erróneamente la consideran como un fenómeno raro y aleatorio. Ocurre en todas las zonas climáticas, pero sus características varían significativamente de una región a otra y en algunas áreas este fenómeno es más frecuente. La sequía es temporalmente negativa y difiere de la aridez, pues esta última se restringe a regiones de baja precipitación o de agua disponible y es un rasgo permanente del clima, caracterizado

por escasa lluvia. En cambio, la sequía como un fenómeno común de la naturaleza se origina por las deficiencias de precipitación en un amplio periodo de tiempo, comúnmente una estación o más. Esta deficiencia da como resultado una escasez de agua para alguna actividad, grupo, o sector del ambiente.

La sequía debe considerarse en relación con el promedio de largo periodo del balance entre la precipitación y la evapotranspiración (evaporación + transpiración) en un área en particular, una condición a menudo percibida como "normal". También se relaciona con la ocurrencia (principal estación en que se presenta, retraso en el inicio de la estación lluviosa, la ausencia de lluvias en relación con las principales etapas del crecimiento de los cultivos) y la efectividad de la lluvia (intensidad, número de días con lluvia). Otros factores climáticos como las altas temperaturas, fuertes vientos y una baja humedad relativa están asociados con la sequía en muchas regiones del mundo y pueden de manera significativa agravar su severidad.

Las actividades de las regiones áridas están adaptadas a la permanencia de la aridez; en contraste, la presencia de la sequía origina la interrupción de las actividades normales en todas ellas.

Se han propuesto muchos índices de aridez para caracterizar en forma cuantitativa las zonas áridas del mundo. Meigs (1953), con base en el índice pluvial utilizado, define tres grados de aridez a los que designa con las letras E, A y S:

- Extremadamente árido (E), con un índice pluvial debajo de –40
- Árido (A), con valores entre –20 y –40.
- Semiárido (S), entre 0 y –20.

Es decir, que la cantidad requerida de precipitación mensual para cubrir las necesidades de agua para un máximo de evaporación y transpiración durante el curso del año, está dada por el índice pluvial de humedad que deberá tener valor de cero o más.

Algunos aspectos de la sequía

La sequía por definición se caracteriza por un periodo de déficit de lluvia prolongado, que puede durar unos pocos meses o inclusive varios años. Las condiciones en la sequía pueden variar en espacio y tiempo en relación con la irregular distribución espacio-temporal de la lluvia y con la heterogénea respuesta hidrológica en las cuencas de los ríos afectados. El carácter de la sequía puede ser diferente para el régimen climatológico e hidrológico en las diferentes partes del mundo (Figura 2).

En general, se puede decir que no existe una definición universal de sequía, debido a que sus efectos se dejan sentir en los sectores económicos y sociales, y ocurre en casi todas las regiones del mundo, tanto en países en desarrollo como desarrollados, y con diferente frecuencia; es por ello que estos eventos tienen diferente significado para las distintas sociedades, por lo que no se ha logrado un criterio uniforme. Por eso existen decenas de definiciones que reflejan diferencias regionales e ideológicas, necesidades y propuestas disciplinarias.

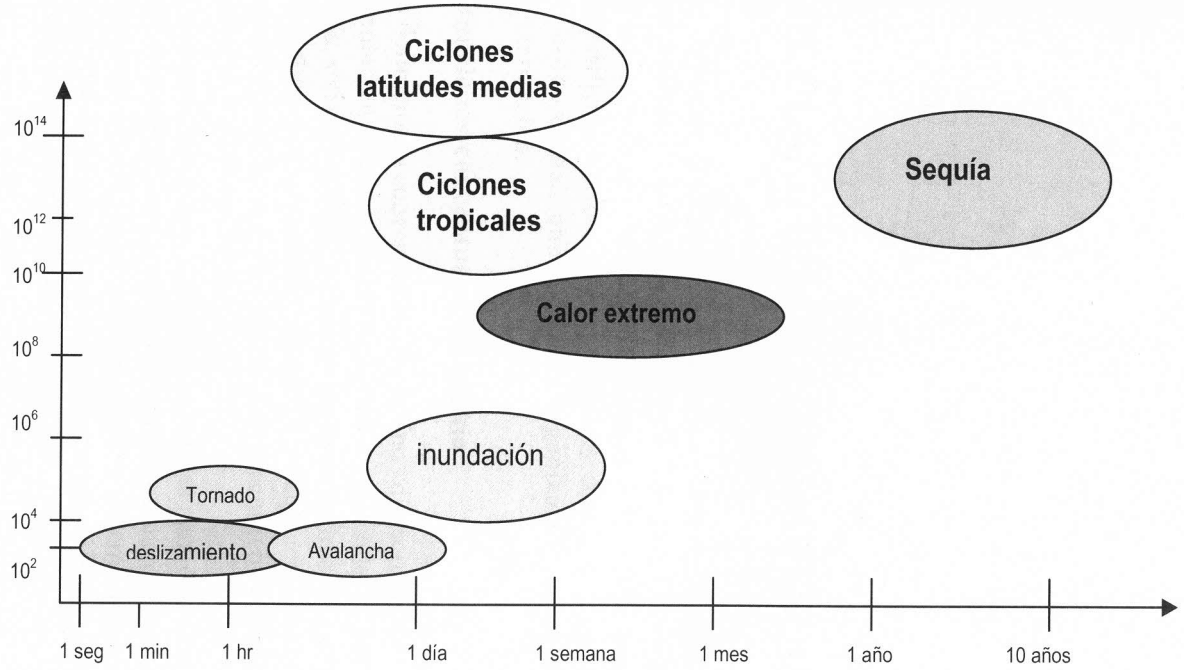

Figura 2. Extensión (m^2) y temporalidad de la sequía y otros fenómenos. (Tomada de la Organización Metereológica Mundial (OMM), 14 nov.2005. http://www.wmo.int/files/disasters/img/affectedArea.png)

III. CLASIFICACIÓN DE LAS SEQUÍAS

La definición de sequía, como ya se vio en el capítulo anterior, puede tener muchas variantes, es por ello que Wilhite y Glantz (1985) al analizar más de 150 definiciones publicadas de sequía, propusieron una clasificación en dos grupos principales: conceptuales y operativas, que proporcionan una forma de organización de su compleja caracterización.

Definiciones conceptuales de sequía

Las definiciones conceptuales son de tipo "diccionario", es decir, se formulan en términos generales, ayudan a entender el concepto de sequía, son genéricas en la descripción de su definición, por ejemplo: "La sequía es un prolongado periodo de precipitación deficiente que da como resultado un daño extensivo de los cultivos y pérdidas de su producción" (Wilhite, 2000a).

Las definiciones conceptuales son útiles para describir el fenómeno, pero no pueden ser utilizadas para determinar el establecimiento de la sequía, debido a la falta de especificidad, sin embargo, incorporan el concepto de intensidad y duración del evento y la necesidad de tener una concepción general.

Definiciones operativas de la sequía

Este tipo de definiciones ayudan a identificar el inicio, final y grado de severidad de la sequía, y constituyen la base de un efectivo primer sistema de alerta.

Para determinar el inicio de una sequía meteorológica, las definiciones operativas especifican el grado de partida del promedio de precipitación o alguna otra variable climática en un periodo de tiempo. Esto es comúnmente hecho al comparar la situación actual con el promedio histórico, y a menudo basado en un periodo de registros de 30 años.

Una definición operativa de sequía agrícola debe comparar los valores de precipitación diaria con tasas de evapotranspiración que determinen la tasa de reducción de la humedad del suelo y expresen esas relaciones en términos de efectos de la sequía a partir del comportamiento de la planta en sus diferentes etapas fenológicas. Tal definición puede ser utilizada en valoraciones operativas de la severidad de la sequía y sus efectos por el seguimiento de las variables meteorológicas, humedad del suelo y condiciones de los cultivos durante la estación de crecimiento, reevaluando en forma continua el impacto potencial de esas condiciones al final de la producción. Las definiciones operativas pueden también ser empleadas para analizar la frecuencia, severidad y duración de la sequía para un periodo de tiempo determinado (*Ibid.*).

Estas definiciones, sin embargo, requieren datos horarios, diarios, mensuales, o de otras escalas de tiempo, posiblemente, datos de los efectos (producción agrícola), dependiendo de la naturaleza de la definición utilizada. El desarrollo de la climatología de la sequía para una región proporciona un gran conocimiento de sus características y de la probabilidad de ocurrencia en varios niveles de severidad. La información de este tipo es muy benéfica en el desarrollo de estrategias de respuesta y mitigación, y planes de prevención.

Si bien el criterio más común o más conocido es aquél que agrupa a las definiciones por tipos: meteorológico, hidrológico, agrícola y socioeconómico, cada uno proporciona una definición y

caracterización distinta. Los tres primeros se aproximan más a considerar a la sequía como un fenómeno físico. La última se asocia con la sequía en términos de suministro y demanda, y los efectos del déficit de agua como afectaciones en los sistemas socioeconómicos.

Sequía meteorológica: también mal llamada climatológica o atmosférica, es comúnmente una reducción de la precipitación respecto a la normal en un periodo de tiempo. Estas definiciones son generalmente para una región específica y basadas en un completo conocimiento de la climatología regional. La variedad de definiciones meteorológicas para distintos países en diferentes momentos es muy amplia; a continuación se muestran ejemplos, porque es erróneo que una definición de sequía desarrollada en una parte del mundo se aplique a otra:

- Estados Unidos (1942): menos de 2.5 mm de lluvia en 48 horas.
- Gran Bretaña (1936): 15 días consecutivos con una precipitación diaria total menor a 0.25 mm.
- Libia (1964): cuando la lluvia anual es menor a 180 mm.
- India (1960): si la actual estación lluviosa es deficiente por más de dos veces la desviación media.
- Bali (1964): un periodo de seis días sin lluvia.

Las mediciones meteorológicas son los primeros indicadores de sequía.

Sequía agrícola: también denominada biológica, ocurre cuando no hay suficiente humedad en el suelo para satisfacer las necesidades de un cultivo en particular en un tiempo específico. La sequía agrícola ocurre después de la sequía meteorológica pero antes de la hidrológica. La agricultura es el primer sector económico afectado por la sequía.

Sequía hidrológica: se refiere a las deficiencias en disponibilidad de agua superficial y subterránea. Se mide por las corrientes, así como en un lago, una presa y por los niveles de agua subterránea. Hay un tiempo de retraso entre la carencia de lluvia y la menor

cantidad de agua en las corrientes, ríos, lagos y presas; así, las medidas hidrológicas no son los indicadores primarios de la sequía. Cuando la precipitación se reduce o es deficiente en un periodo de tiempo amplio, esta escasez se refleja en una reducción de los niveles de agua superficial y subterránea.

Sequía socioeconómica: ésta se presenta cuando la escasez física del agua empieza a afectar a la población; en términos más abstractos, la mayoría de las definiciones socioeconómicas de sequía asocian a ella la disponibilidad y la demanda de un bien económico. Se podría plantear que la escasez física del agua sin efectos socioeconómicos es como un éxito político. Dentro de este grupo se menciona la existencia de sequías artificiales cuando la demanda de agua es superior a las disponibilidades normales por ampliación de regadíos, proliferación de urbanizaciones o crecimiento de la población de una gran ciudad.

Por último, existe en la literatura otro tipo de sequía no tan común como los anteriores, y es el de *sequía edáfica*, la cual se refiere a la falta de humedad en las tierras a la altura de las raíces de árboles y plantas, causada por una acusada evaporación desde la superficie del suelo y por una rápida infiltración hacia el subsuelo (García y Ruiz, 1989).

A continuación se mencionan algunas de las definiciones que se han propuesto a lo largo del tiempo, muchas de ellas basadas en la precipitación, otras en la temperatura, evapotranspiración, radiación solar, humedad del suelo y etapa de desarrollo de la planta, según los países y organismos que las proponen; entre las más comunes se pueden señalar las siguientes.

La sequía es comúnmente definida como un periodo de días consecutivos sin lluvia; una sequía existe cuando durante un periodo de 21 días o más la lluvia es el 30% del promedio para ese lugar y época (OMM, 1975).

La *British Rainfall Organization* distingue para Gran Bretaña tres tipos de sequía (1936):

- *Sequía absoluta*, cuando durante 15 días consecutivos el total diario es inferior a .25 mm.
- *Sequía parcial*, cuando la cantidad anterior no se supera durante un periodo continuado de 29 días.
- *Temporada seca*, cuando durante un periodo de 15 días en ninguno se ha alcanzado 1 mm de precipitación.

Gibbs y Maher (1967) utilizaron deciles de precipitación para obtener la distribución espacial de la sequía en Australia, donde establecieron que las áreas con lluvia comprendida dentro del rango del primer decil coincide como primera aproximación con las áreas de sequía.

La OMM estableció en 1986 que hay sequía en una región cuando la precipitación anual es inferior al 60% de la normal durante más de dos años consecutivos en más del 50% de la superficie de la región. Su objetivo es dar una definición de aplicación general, en el supuesto de que los ecosistemas naturales y los sistemas sociales y económicos pueden resistir una disminución de la precipitación de un 40% durante un año, pero son afectados seriamente cuando esta situación se prolonga.

Índice de la Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI). Índice retrospectivo basado en la entrada, almacenamiento y salida de humedad del suelo (Palmer, 1965).

Índice de Disponibilidad Superficial (SWSI). Como el PDSI, pero considerando la nieve (Shafer and Dezman, 1982).

Índice de Precipitación Estandarizada (SPI). Conversión de la distribución gamma original a una distribución normal de la precipitación y evaluación en desviaciones estándar (McKee *et al.*, 1995).

El Instituto Nacional de Meteorología español utiliza el método de los quintiles para clasificar los meses o años en cinco categorías (García F., 1996):

CALIFICACIÓN	PRECIPITACIÓN (%)	QUINTILA
Muy seco	0-20	Inferior a la 1ª.
Seco	20-40	Entre la 1ª. 2ª.
Normal	40-60	Entre 2ª. 3ª.
Húmedo	60-80	Entre la 3ª. 4ª.
Muy Húmedo	80-100	Superior a la 4ª.

El Departamento de Meteorología de la India (1998) define como "sequía" cuando en cualquier área la lluvia que se presenta es menor del 75% con respecto a la normal; la considera "sequía moderada" cuando el déficit de lluvia está entre 25 y 50%, y "sequía severa" cuando la deficiencia es mayor al 50% (Prasad, 1998).

Otro aspecto interesante de las sequías es que existen algunos otros criterios para clasificarlas según el área que abarcan y así son clasificadas como *continentales*, *regionales*, *zonales* o *locales*. Por su duración, se pueden ordenar en *permanentes*, *estacionales* y *contingentes*, y por último, en cuanto a su magnitud también han sido agrupadas como *leves*, *moderadas*, *severas* y *extremadamente severas*; respecto a este último parámetro tanto el valor y la designación para indicar la intensidad de este fenómeno dependen del índice utilizado para valorarla.

Respecto a las *sequías permanentes* que se presentan en los climas más secos de manera continua durante todo el año, Palmer (1965) menciona que bajo estas condiciones y sin posibilidades de cambio es mejor utilizar el término "aridez", que de hecho se reconoce como un parámetro importante en la delimitación de regiones climáticas.

Las *sequías estacionales* son aquellas temporadas menos húmedas y bien definidas que se presentan entre una y otra estación lluviosa. En México se les conoce como *canícula sequía intraestival*, *sequía de medio verano* o *sequía de agosto*, y se presenta en la mitad caliente del año y lluviosa del año.

Mosiño y García (1968) indican que durante la estación de lluvias en la mitad caliente del año (mayo-octubre), el territorio nacional, con excepción del extremo noroeste, tiene un porcentaje muy alto de la precipitación total anual, sin embargo, las porciones oriental y sur del país, o solamente el sur, así como Centroamérica (Magaña *et al.*, 1999a), presentan una pequeña temporada seca a mediados de la estación de lluvias, es decir, el ciclo anual de lluvia presenta una distribución bimodal con un máximo durante junio y septiembre-octubre y un mínimo relativo durante julio y agosto. A este periodo de sequía, localizado en la mitad lluviosa del año, se le conoce como *sequía intraestival* o *sequía de medio verano*, algunos autores la denominan *canícula* y otros *sequía de agosto*, también recibe el nombre de veranillo; todas estas designaciones varían de acuerdo con la región o país donde se registra.

Este mínimo de precipitación que se presenta durante los meses de julio y agosto, coincide con una menor cantidad de nubes convectivas, lo que permite la mayor incidencia de radiación solar y, por tanto, una mayor temperatura en superficie que la gente asocia con el calor agobiante de la canícula. Estas condiciones parece que se presentan sólo en la región del Pacífico mexicano, donde se forma una alberca de agua caliente que favorece la formación de grandes nubes, y éstas son causadas por fluctuaciones en la intensidad y localización de la Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) en el Pacífico oriental. Durante esta transición de la actividad convectiva, de intensa a débil (débil a intensa), los vientos alisios son más intensos (débiles) en el mar Caribe. Este aumento en la intensidad de los vientos alisios es parte de la respuesta dinámica en los niveles bajos de la atmósfera a la magnitud del forzamiento convectivo en la ZITC. La mayor intensidad de los vientos alisios durante julio y agosto y el forzamiento orográfico en las montañas en la mayor parte de Centroamérica resulta en una máxima precipitación a lo largo de la costa del Caribe y un mínimo de precipitación a lo largo de la costa del Pacífico de Centroamérica.

Cambios en la divergencia (convergencia) de los vientos en niveles bajos sobre la "alberca caliente" en la costa oeste del sur de México y Centroamérica determinan la evolución de esta sequía de medio verano. La máxima actividad convectiva profunda en el Pacífico norte ecuatorial, durante la época de lluvias de verano, es alcanzada cuando la temperatura de la superficie del mar rebasa los 29° C (alrededor de mayo). Después de éste, la temperatura de la superficie del mar (TSM), sobre la "alberca de agua caliente" del Pacífico oriental, disminuye aproximadamente 1° C, debido al descenso de la radiación solar y a los vientos alisios más intensos (durante julio y agosto). Esta variación en la TSM, cerca de los 28° C, da lugar a una fuerte disminución en la actividad convectiva, asociada con una interacción no lineal entre la temperatura de la superficie del mar y la alta convección tropical.

El descenso en la convección profunda tropical permite el incremento de la radiación solar y un ligero incremento en la TSM, condiciones que dan lugar al segundo máximo (aproximadamente 28.5° C) al final de agosto y principios de septiembre. Este incremento en la TSM resulta en una convergencia más fuerte, lo que aumenta la alta convección y, por consiguiente, provoca un segundo máximo de precipitación (*Ibid.*).

Las *sequías contingentes* son las más importantes, ya que no se presentan en una época bien definida; tanto la duración como la frecuencia son muy variables y generalmente son de carácter severo.

IV. CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA

Las causas fundamentales de las sequías no han sido hasta ahora identificadas plenamente, pero el proceso de generación de lluvia y su alta variabilidad es un rasgo clave para caracterizar la existencia o no de la sequía.

Como se sabe, la precipitación es uno de los elementos más importantes del clima y la vegetación, los cultivos, la distribución de la población y de la industria, dependen en gran parte de su disponibilidad; de ahí el interés por conocer los procesos de formación, las estructuras meteorológicas que la generan, los factores que la modifican, su distribución espacial y temporal, así como su variabilidad y su relación con la sequía.

Existen muchas teorías que explican la formación de la lluvia; una de las más sencillas y que se puede sintetizar en pocas palabras es la siguiente: la humedad atmosférica es transportada por el viento hacia arriba, y como el aire al subir se expande, debido a que hay menos peso sobre la masa de aire ascendente a grandes altitudes, el trabajo mecánico efectuado por el aire ascendente al aumentar su volumen trae como resultado la pérdida de energía interna dentro de su masa, lo que equivale a una disminución de temperatura, es decir,

se enfría y produce la condensación en gotas o la sublimación en cristales de hielo, que son esenciales para el proceso de precipitación, por tanto, la condición crucial para la formación de la lluvia es entonces el ascenso del aire. Este proceso puede estar ausente debido a varios mecanismos que impiden el movimiento del aire hacia arriba, por lo que las nubes no se forman y la precipitación no ocurre.

En general, hoy día, se considera que la sequía se debe a la presencia de anomalías en los patrones generales de circulación atmosférica, así como a las características de la geografía del lugar, su latitud, altitud, condiciones orográficas, suelo, etc., que influyen en los patrones tanto de la precipitación como del escurrimiento superficial y del flujo subterráneo; actualmente, se estima también que el calentamiento y modificación, tanto naturales como inducidos, en la atmósfera del planeta, derivado en parte de las actividades industriales del hombre, puede contribuir sensiblemente a la modificación del movimiento y contenido de las masas atmosféricas y su efecto en la superficie terrestre.

También se ha observado que las grandes corrientes marinas tienen una influencia decisiva en el movimiento de las masas de aire que contienen humedad, así como en las áreas en las que ésta precipita. Por ejemplo, las grandes corrientes de Humboldt, del Labrador y del Golfo, definen en gran medida las condiciones pluviométricas de las áreas bajo su influencia, como también lo hace el fenómeno de El Niño. Así pues, aun cuando las características hidrometeorológicas de un lugar están en gran parte definidas por las condiciones locales, también pueden tener marcada influencia de los grandes movimientos marítimos y atmosféricos que se dan planetariamente.

En México, la sequía se asocia con anomalías en los aspectos meteorológicos que controlan la variabilidad de la lluvia, si bien antes de indicarlos se considera importante hacer una breve descripción del comportamiento de los movimientos del aire a gran escala en el planeta, lo que se conoce con el término de circulación general de la atmósfera. México se ubica en la zona de transición entre las latitudes medias y tropicales del globo, por lo que sobre su territorio dominan

fenómenos meteorológicos propios de ambas latitudes. La porción norte se localiza en una zona de alta presión y estabilidad atmosférica, y con ello la posibilidad y susceptibilidad a la falta de agua aumenta.

La circulación general de la atmósfera (Figura 3) puede interpretarse como el sistema mundial de vientos mediante el cual se lleva a cabo el transporte de calor desde las latitudes tropicales hasta las polares, necesario para mantener las temperaturas globales.

El modelo de vientos medios planetarios también conocido como Circulación General de la Atmósfera, representa el promedio de vientos observados en un largo periodo de tiempo y establece los movimientos de la atmósfera a mayor escala. La actual circulación en cualquier momento puede diferir significativamente del modelo promedio (Balling and Cerveny, 2005).

Una forma esquematizada de la circulación general de la atmósfera fue la propuesta, en 1947, por el modelo tricelular de Carl G. Rossby, el cual considera que existen tres celdas en cada hemisferio: Hadley, en las latitudes tropicales y subtropicales, Ferrel, en las latitudes medias, y Polar, en las altas latitudes. Asimismo, presentan otras características propias de cada celda o la interacción entre ellas, tales como la circulación de los vientos superficiales (alisios, del Oeste o polares) o de los vientos de altura (contralisios, corrientes de chorro), etc., el modelo generalizado asume que la Tierra está cubierta sólo por los océanos y tiene características normales de rotación (Oliver y Hidore, 2002).

Al estar la Tierra en movimiento de rotación se origina este sistema de circulación, de tal manera que se forman cuatro zonas o franjas de alta presión, dos en cada hemisferio y tres cinturones de baja presión, uno en cada hemisferio y otro a lo largo de la línea imaginaria llamada ecuador térmico, que es la línea que une los puntos de máxima temperatura en la superficie terrestre, y no necesariamente coincide con el ecuador geográfico sino que se mueve a ambos lados de éste, junto con todo el sistema de celdas, según sea la época del año, es decir, es la respuesta al propio desplazamiento que experimenta la incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre.

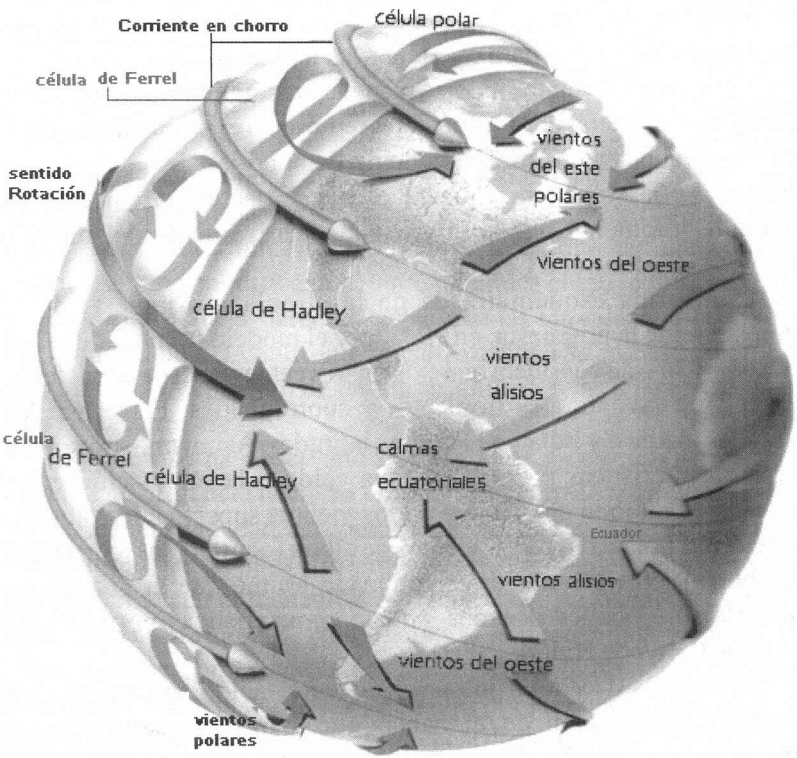

Figura 3. Modelo del Sistema de Circulación General de la Atmósfera (Burroughs *et al.*, 1998).

Como se observa en la Figura 3, en superficie, las fronteras de cada celda están marcadas por características muy bien definidas; como ejemplo se puede mencionar la franja de presiones altas, centrada alrededor de los 30°-40° de latitud, en la región subtropical, que separa las celdas Hadley y Ferrel; el frente polar, centrado alrededor de los 60°, separa las celdas Ferrel y Polar; la circulación de los vientos de ambos hemisferios converge en el ecuador, dando lugar a lo que se conoce como la Zona Intertropical de Convergencia (ZITC). También se pueden ver en el esquema los niveles superiores de la troposfera; los límites entre las tres celdas de circulación definen características muy importantes conocidas como corrientes de chorro: entre las celdas Hadley y Ferrel se encuentra la corriente de chorro subtropical; entre la celda Ferrel y la Polar se encuentra la corriente de chorro polar.

Existen dos limitaciones importantes para el modelo de circulación tricelular de la atmósfera, la primera es que las tres celdas son una forma muy simplificada que no expresan la verdadera complejidad del flujo del aire superior. Muchos climatólogos no aceptan este modelo y prefieren considerar sólo la celda de Hadley y otra celda más compleja de las latitudes medias y polares. La segunda, los patrones horizontales son también muy generales en relación con las características propias, que varían en un momento determinado. Sin embargo, existe un acuerdo general de que este esquema es útil en un principio para después profundizar a más detalle en las características que incluyen la actual distribución geográfica de las masas continentales, la superficie del mar y los rasgos topográficos (Balling y Cerveny, 2005) .

Zona intertropical de Convergencia (ZITC)

El calentamiento excesivo en el Ecuador origina a lo largo de él una zona de baja presión (baja presión ecuatorial). El aire (alisios) que viene de las altas subtropicales de ambos hemisferios converge a lo largo de esta zona de baja presión y se eleva verticalmente dando origen a la región de las calmas ecuatoriales o bajas presiones ecuatoriales (*Ibid.*).

La ZITC es un área estrecha que varía en extensión desde 80 a 300 km de ancho y se ubica entre los 5° norte y sur del ecuador, su posición varía de un día a otro y de una semana a la siguiente, pero normalmente se encuentra dentro del hemisferio estival, es decir, se desplaza hacia el norte del ecuador en los periodos de calentamiento del hemisferio norte y hacia el sur en los periodos de enfriamiento de éste, siendo más notoria su migración en las áreas continentales (Yee Yan, 2005).

Sobre los océanos, la ZITC es normalmente más ancha y origina regiones, al este de los océanos, con poco o ningún viento, de ahí su nombre de calmas ecuatoriales, a estas zonas se las conoce genéricamente con el nombre de *doldrums*.

El movimiento estacional de la ZITC es generalmente mayor sobre tierra y es un factor importante del momento de inicio, duración y término de la estación de lluvia de muchas áreas tropicales. En el Pacífico oriental y Océano Atlántico, la ZITC permanece principalmente en el hemisferio norte debido al efecto generado por la presión ascendente en el océano y la convección de nubes. Para estas dos regiones el inicio del máximo latitudinal de la ZITC ocurre dos meses después del ciclo solar, debido a la lenta reacción en el calentamiento superficial de los océanos. A causa de esto, la máxima posición al norte se alcanza en el otoño del hemisferio norte cuando la temperatura de los océanos es más alta. Para el área de América del Sur, la ZITC predomina en el sur durante todo el invierno boreal y se debilita en el verano.

La región de las corrientes descendentes subtropicales (altas presiones subtropicales)

El aire que entra a la región de las calmas ecuatoriales no puede seguir subiendo porque se enfría y aumenta su densidad, de modo que se dispersa horizontalmente hacia el norte en el hemisferio norte y hacia el sur en el hemisferio sur. Pero esto ocurre de una manera gradual y constantemente en la parte alta de la troposfera por lo que este movimiento de retorno no se percibe en la superficie.

Debido al movimiento de rotación de la Tierra, el aire se desvía hacia el este; por su propia densidad y peso, desciende y forma corrientes de aire verticales con ciertos movimientos verticales. Este aire es en un principio fresco pero seco, por lo que no puede producir condensaciones, ya que, además, al bajar se calienta por compresión y al calentarse aumenta su capacidad para contener el vapor de agua sin condensarlo.

Estas latitudes se caracterizan por un alto grado de estabilidad atmosférica que viene determinada por la subsidencia generalizada del aire desde las capas altas de la atmósfera. Las zonas en que dominan coinciden con áreas de altas presiones subtropicales, que se hallan próximas a los paralelos 30° N y 30° S, se conocían como zona de los *horse latitudes* (no existe un término específico en español); una traducción literal sería "latitudes de los caballos". Su origen tuvo lugar durante los tiempos coloniales. Los comerciantes de Nueva Inglaterra que transportaban caballos a las Indias Occidentales, cuando sus barcos pasaban por estas zonas, podían estar parados por largos periodos de tiempo, por lo que las reservas de agua potable disminuían considerablemente, de manera que los caballos debían ser lanzados por la borda. En estas regiones se presentan los grandes desiertos de la Tierra debido a la ausencia de nubes y, por tanto, a la carencia de precipitaciones pluviales que les es característica.

Los vientos alisios (*Trade winds*)

Este término se refiere a los vientos que soplan hacia el ecuador y con dirección contraria a la rotación; son bastante constantes y regulares y recorren estas latitudes a una velocidad media de unos 20 km/h; están constituidos por aire divergente desde las altas presiones subtropicales y emigran de estas zonas de alta presión hacia la zona de baja presión ecuatorial, para cerrar la celda de Hadley; el circuito que de esta manera se establece, forma los vientos alisios, que por ir de paralelos menores a mayores se desvían hacia el oeste, alimentando a las regiones de las calmas ecuatoriales.

El contenido de humedad de los vientos alisios depende de la superficie por la que atraviesan: si ésta es el mar recogen humedad y son vientos húmedos, si es un continente son vientos secos. Análogamente, si se ven obligados a subir una montaña, se enfrían y condensan su vapor de agua produciendo lluvias; si descienden por la ladera de sotavento de una barrera montañosa se calientan por compresión y no producen lluvia.

Una característica de los vientos alisios es su estabilidad. Sobre los océanos los vientos tienen su mayor regularidad, en promedio del 60-70%. Aunque se caracterizan por su constancia, los vientos alisios demuestran una considerable variabilidad interanual en su intensidad, especialmente en años de El Niño, cuando se debilitan considerablemente. Sin embargo, análisis de sus trayectorias en las cuencas del Atlántico y Pacífico han mostrado que han sufrido un fortalecimiento. Esto parece que está en relación con un incremento en la intensidad de los sistemas anticiclónicos oceánicos de los cuales los vientos alisios se generan.

Los alisios se componen de dos capas verticales claramente diferenciadas: una capa inferior, muy húmeda por su trayecto oceánico, y otra superior, más cálida y seca, que se separa de la anterior a través de una inversión térmica. Esta inversión no es constante a lo largo de todo su recorrido, sino que varía en latitud y longitud, es intensa al este de los océanos y cerca de los trópicos, donde se suelen situar en torno a los 500 m de altura y alcanza una magnitud de unos 5° C. Al oeste de los océanos y hacia el ecuador la inversión va elevándose en altura y perdiendo intensidad: de hecho, al oeste de los océanos la inversión suele situarse por encima de los 2 000 m y rara vez supera la magnitud de 1 o 2° C, respectivamente.

Del lado este de las celdas anticiclónicas el aire superficial es considerablemente más frío (de origen polar y con vientos de componente norte), que el que se sitúa en el lado oeste (procedencia tropical y con vientos de componente sur); asimismo, también influye la naturaleza de las corrientes marinas que se sitúan en cada uno de los flancos de estos anticiclones (corrientes frías al este, frente a

corrientes cálidas en el extremo oeste (Corriente del Golfo, para el caso de México). Esto da lugar a que en el lado oriental del anticiclón el aire superficial, más frío, aumente su densidad y se estabilice, lo cual inhibe los movimientos convectivos y facilita el pleno desarrollo de la subsidencia. Todo lo contrario sucede en el flanco occidental, donde el calor superficial favorece el desarrollo de la convección y la inestabilización del aire, lo cual debilita los movimientos subsidentes desde las capas altas de la atmósfera.

En el lado oeste del anticiclón, los alisios, cargados de humedad tras su recorrido oceánico, llegan a áreas continentales con cadenas montañosas que interceptan este flujo de aire y lo hacen elevarse, favoreciendo su inestabilización. Este fenómeno no tiene lugar en el flanco este, donde los vientos siguen una trayectoria orientada desde el continente hacia el océano. Esto explica las marcadas diferencias que se registran en estas latitudes entre los flancos orientales y occidentales de los continentes, siendo los primeros mucho más húmedos y lluviosos que los segundos.

En general, se puede decir que los alisios constituyen vientos predominantemente estables. Por ello en las latitudes recorridas por estos vientos suelen predominar cielos despejados o la presencia de bandas de nubes altas (estratocúmulos), que traducen el desarrollo de brotes convectivos que quedan detenidos en el nivel en el que se registra la inversión térmica.

Sin embargo, en ocasiones esta inversión térmica puede llegar a desaparecer, predominando entonces el ascenso del aire hasta las capas más altas de la atmósfera y la aparición consecuente de grandes *cumulonimbus* y lluvias más abundantes. Esto suele suceder con frecuencia en las costas orientales de los continentes caracterizadas por barreras montañosas que interceptan perpendicularmente el flujo de los alisios. Ocurre, por último, con ocasión de las perturbaciones que pueden desarrollarse en el interior de este flujo general de los vientos alisios, otras perturbaciones que responden a diversos mecanismos genéticos (ondas del Este, ciclones tropicales, etc.) y en todos los casos alteran el comportamiento "habitual" de la atmósfera en estas latitudes.

El nombre es derivado del inglés antiguo, en el cual *trade* significa *path*, debido al curso regular de los vientos en esa zona y por su importancia para la navegación, otros idiomas tienen también nombres específicos para estos vientos como: *Alisios, Alizes, Alisei* y *Passatére* en español, francés, italiano y alemán, respectivamente (Strahler y Strahler, 2000).

Los vientos del Oeste

Las altas presiones subtropicales emiten vientos de componente oeste hacia los círculos polares (zona de baja presión subpolar) formando los vientos del Oeste (genéricamente llamados *westerlies*), son vientos más intensos que los alisios que, por ir de los paralelos 30° N y 30° S (paralelos mayores) hacia los círculos polares Ártico y Antártico, respectivamente (paralelos menores), se desvían hacia el este.

El contenido de humedad de estos vientos y su capacidad para producir precipitación varía también con el tipo de superficie por la que atraviesan y la orientación de las barreras orográficas sobre las que inciden. Este cinturón de vientos presenta regiones muy extensas de mezclas entre anticiclones con movimiento descendente y ciclones con movimiento ascendente; es en esta zona de vientos donde se forman los ciclones extratropicales.

Altas presiones polares

En los polos, debido al excesivo enfriamiento, se forman áreas de alta presión en las que dominan corrientes de aire descendentes; llamadas regiones de las calmas polares el aire desciende ahí debido a su gran densidad y peso. Las regiones de las calmas polares son frías y secas.

Vientos polares. El aire traído a la superficie por las corrientes descendentes polares emigra de los polos, que son zonas de alta presión, hacia las zonas de bajas presiones subpolares, que se localizan aproximadamente a los 60° N y 60° S; estos vientos, por ir de los polos hacia paralelos mayores, se desvían hacia el oeste.

Frentes polares

En las regiones subpolares de las latitudes medias del globo, los vientos polares chocan contra los vientos del Oeste, ocasionando que el aire menos frío acarreado por éstos ascienda sobre aquéllos que son más fríos, formándose una superficie de discontinuidad llamada "frente polar".

Las corrientes ascendentes que se originan a lo largo del frente polar obligan al aire a enfriarse y producir precipitación que generalmente es en forma de lluvia o nieve. Este aire, al llegar a la parte alta de la troposfera, se bifurca y una rama emigra hacia el Polo para alimentar por arriba a las regiones de calmas polares, cerrando así el circuito denominado celda polar. La otra rama emigra hacia los paralelos de 30°, también en las capas altas de la troposfera, que en superficie no se manifiestan, pues van encima de los vientos del Oeste para alimentar los vientos descendentes subtropicales; con esto se cierra la celda de Ferrel. De esta manera quedan cerrados tres circuitos de vientos en el hemisferio norte y tres en el sur.

La celda de Hadley es la circulación dominante en los trópicos. Se desarrolla fuertemente durante el invierno y se debilita en el verano. La celda de Ferrel es mucho más débil que la de Hadley, pero está bien definida. En el hemisferio norte la celda polar es tan extremadamente débil que su existencia se pone algunas veces en duda.

Debido a la existencia de los océanos, continentes y cadenas montañosas, las zonas de alta y baja presión no son fajas continuas sino que están formadas por series de centros de alta y baja presión, los cuales son semiestacionarios y con una marcada variación entre la época invernal y la de verano, en particular en el hemisferio norte. Las áreas de alta presión se llaman "centros de acción", su tamaño, intensidad y localización varían paulatinamente durante el año, originando cambios en el tiempo o regímenes de tiempo meteorológico sobre las regiones bajo su influencia inmediata.

Debido a los diferentes periodos de calentamiento para uno y otro hemisferio, en verano, la ZITC se desplaza hacia el norte y simultáneamente con ella todo el sistema de vientos y el conjunto de centros

de acción, de manera que sobre una misma región no dominan los mismos centros de acción ni los mismos sistemas de vientos durante todas las épocas del año. Los centros de acción además sufren un corrimiento hacia el oeste en ambos hemisferios.

V. PRINCIPALES CONDICIONES METEOROLÓGICAS QUE FAVORECEN LA SEQUÍA EN MÉXICO

En el capítulo anterior se señaló que la sequía en México se asocia con anomalías en los aspectos meteorológicos que controlan la variabilidad de la lluvia en el territorio nacional, entre ellos destacan:

Fenómenos meteorológicos de escala planetaria

Los sistemas anticiclónicos
Los vientos del Oeste
Los vientos del Este (alisios)
Las corrientes en chorro *jet streams*
La Zona Intertropical de Convergencia (ZITC)
La circulación monzónica

Fenómenos meteorológicos de escala sinóptica

Los frentes fríos "Nortes"
Las ondas del Este
Los ciclones tropicales

Sistemas anticiclónicos

Los dos centros de alta presión denominados también anticiclones, que influyen en las condiciones meteorológicas de México son, por un lado, el del Pacífico oriental al noroeste del país (también denominado como la alta del Pacífico o bien anticiclón de las Hawaii) y el llamado Bermuda-Azores (alta del Atlántico) en el Atlántico norte. Estos centros de alta presión, asociados a flujo divergente y anticiclónico, son reconocidos como la fuente de origen de las masas de aire, conocidas como del este y oeste que afectan al clima y estado del tiempo en México.

En el caso de la primera, se extiende desde la costa del Pacífico hasta los 160° W, con su centro cerca de los 30° N y 140° W, en invierno. Su extensión longitudinal alcanza los 160° E y su centro se localiza cerca de los 45° N y 150° W en verano. Sus principales efectos en la circulación sobre México se presentan durante el invierno, cuando los vientos del oeste se intensifican por arriba de los 3 000 m y penetran profundamente en el país, por un lado, y por otro, inhiben la intensificación hacia el norte de los ciclones tropicales durante el verano.

La alta subtropical del Atlántico, en el invierno, generalmente se encuentra centrada cerca de los 30° N y 35° W, y durante el verano a los 40° N. Sus efectos ocurren en la época del verano, pues el comportamiento del ciclo anual de este centro está en estrecha relación con la estación de lluvias.

Vientos del Oeste

El flujo que se origina en el centro de alta presión del Pacífico, da como resultado un flujo de vientos constantes en superficie con dirección oeste-noroeste, que afectan a la península de Baja California y se les observa hasta más al sur de los 20° de latitud.

Los vientos del oeste asociados con las depresiones ciclónicas de las latitudes medias, que atraviesan la parte norte del país, en invierno pueden dar lugar a precipitaciones en el noroeste y norte de México.

Vientos del Este (alisios)

La influencia de estos vientos en el territorio mexicano depende de la localización, extensión e intensidad de los centros de alta presión del Atlántico y del Pacífico. La acumulación del aire en la altura es a menudo asociado con una alta en la tropopausa; esta situación se encuentra frecuentemente en los profundos anticiclones cálidos asociados con la sequía; no es extraño, particularmente durante la estación fría del año, que los movimientos de descenso estén inducidos en las corrientes de aire de la troposfera media del noroeste. Así, en estas regiones, si el flujo se mantiene o es recurrente, las deficiencias de precipitación son importantes y por ello la sequía puede ocurrir.

En general, la dinámica y la termodinámica asociada con la subsidencia deben considerarse como fuente y trayectoria de la humedad. Obviamente, la lengua de aire húmedo que proviene del Golfo de México origina su propio sistema de movimiento ascendente que puede producir fuertes lluvias, mientras que la lengua descendente en áreas continentales puede dar lugar a *deficientes precipitaciones.*

Durante el verano, los alisios del este sobre México presentan perturbaciones tropicales conocidas como las ondas del Este, que generan un incremento de las precipitaciones en el centro y este del país, en concordancia con la posición de la ZITC, que en esta época se desplaza hacia el norte.

Zona Intertropical de Convergencia (ZITC)

El desplazamiento hacia el norte o hacia el sur de la ZITC introduce variaciones anuales de la precipitación en el país (Figura 4). En invierno, cuando esta zona se desplaza hacia el sur, los alisios actúan sólo en la parte sur, en cambio, la parte norte tiene la influencia de los vientos del Oeste de las latitudes medias. En verano, la zona de convergencia se desplaza al norte, por lo que domina un sistema de vientos del este o sureste que provienen del centro subtropical de alta presión del Atlántico y van hacia el de baja presión del continente.

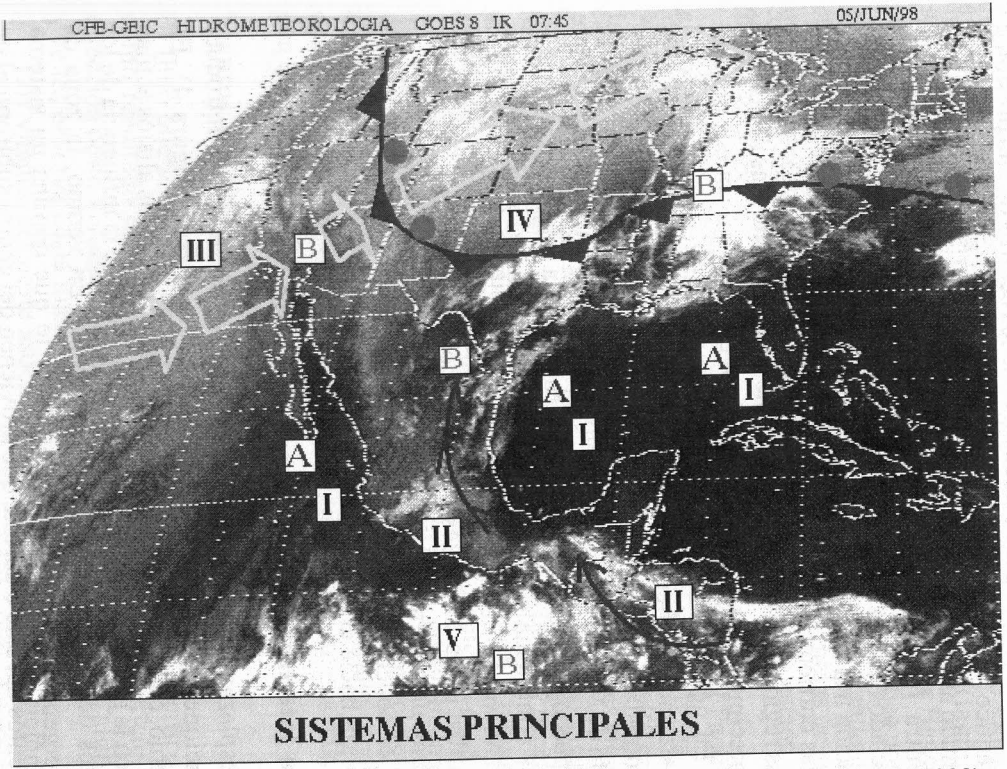

Figura 4. Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) al sur de México (junio 5 de 1998).

La influencia del desplazamiento de la ZITC permite que en la parte media del territorio se generalice la temporada de lluvias durante el verano, al existir en el continente sistemas de baja presión y ubicarse la ZITC en la costa sur del país, lo que favorece la entrada de humedad, por tanto, se tiene un régimen de lluvias de verano en gran parte del país, con excepción del noroeste, donde se reciben lluvias en el invierno, y en algunas áreas de la vertiente sur del Golfo de México y del sureste que presentan un régimen de lluvias abundantes durante todo el año.

La dinámica atmosférica de verano en México está muy relacionada con la presencia de la ZITC en el Pacífico del este (Magaña *et al.*, 1999b). La posición, intensidad y densidad de la convección profunda en esta región puede dar lugar a eventos de fuertes lluvias o sequías intensas en México. Además, en esta zona es donde se tiene la mayor actividad ciclogenética mundial y, por tanto, donde se forman ciclones muy intensos. El mismo autor agrega que la variabilidad de la estructura espacial de la ZITC ha sido poco estudiada, pero se conoce que experimenta etapas de intensa y débil actividad convectiva, que en algunas ocasiones son reguladas por las ondas tropicales.

Corrientes en chorro

Entre los límites de las celdas atmosféricas de Hadley, Ferrel y Polar de los dos hemisferios, se localizan unas zonas donde el viento corre con una gran intensidad, aproximadamente entre los 200 y 400 mb (12 y 8 km de altitud); estos flujos de viento muy rápidos se conocen como corrientes en chorro o *jet streams*. Estas corrientes en chorro son sistemas de vientos que dan la vuelta a toda la Tierra en forma discontinua y ondulada, y están representadas por segmentos de varios miles de kilómetros de longitud (de 3 000 a 5 000 km), de varios cientos de kilómetros de ancho en la horizontal (de 100 a 600 km) y por 1 o 2 km de espesor en la vertical (Figura 5).

En el invierno, cuando se observan las mayores intensidades, los vientos dentro de la corriente en chorro varían entre los 75 km/h en los extremos, hasta unos 350 km/h en la parte central, si bien se han

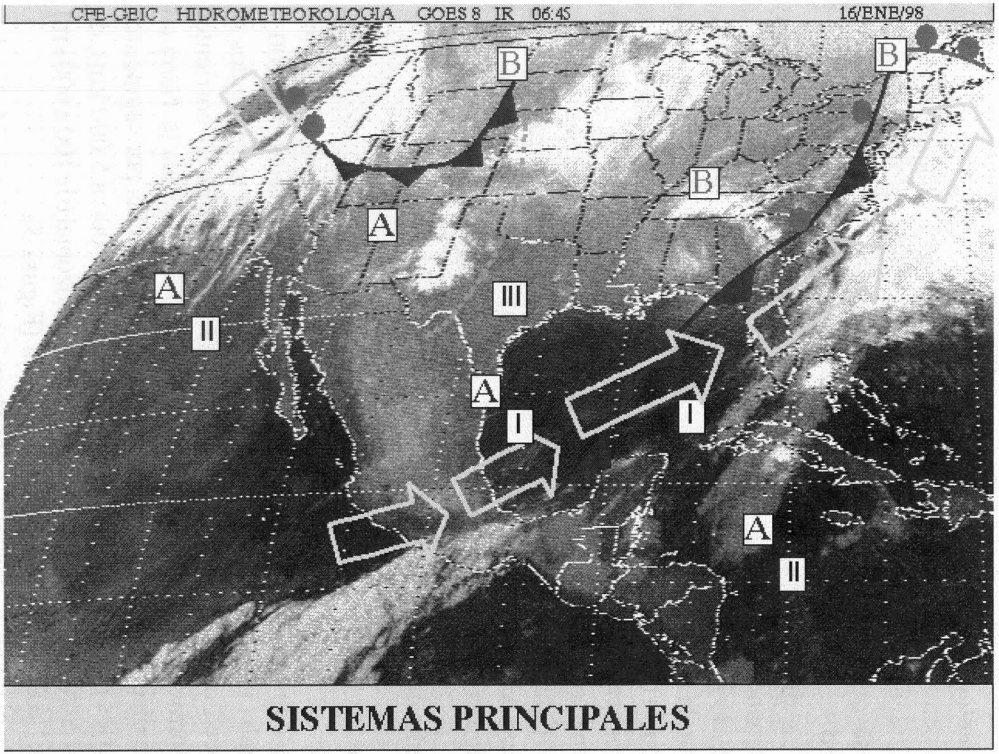

Figura 5. Corriente de vientos máximos en el centro de México (enero 16 de 1998).

reportado vientos hasta de 500 km/h. Por el contrario, durante el verano los vientos en la corriente en chorro son, en gran medida, menos intensos, pues los gradientes de temperatura son más débiles (Reyes, 2001).

La corriente en chorro sufre un desplazamiento hacia el polo durante el verano; cuando las latitudes medias reciben una gran cantidad de radiación solar, disminuye el gradiente meridional de temperatura entre polo y ecuador y, consecuentemente, se da una mayor influencia de los fenómenos de origen tropical en las latitudes altas. Lo contrario ocurre en el invierno, el gradiente meridional de temperatura aumenta y favorece que la corriente en chorro se desplace hacia el ecuador y permite también una mayor influencia de los fenómenos extratropicales en las latitudes bajas.

Estas corrientes son muy variables en posición de unos días a otros, pero como ya se indicó, se pueden establecer dos corrientes en chorro: la corriente en *chorro subtropical* entre la celda de Ferrel y la de Hadley, y la corriente en *chorro polar* en el límite superior entre la celda Ferrel y la celda Polar; sin embargo, en la realidad y para un momento determinado, ninguna de estas celdas de circulación está perfectamente definida, por lo que tampoco se encuentran bien definidas en forma simultánea ambas corrientes en chorro; es más común observar sólo una: ésta recibe el nombre de corriente polar o subtropical, dependiendo de la faja de latitud y estación del año de que se trate.

En el caso particular de México, se le llama corriente en chorro polar durante el invierno, cuando se observa una mayor entrada de frentes de origen polar hacia la vertiente del Pacífico, y corriente en chorro subtropical durante el verano, cuando se observa una mayor entrada de lenguas de aire húmedo y cálido del Pacífico tropical hacia la parte central y norte de México (*Ibid.*).

Alrededor de la zona de la baja polar, los vientos del Oeste abarcan todo el espesor de la troposfera, aunque ésta es más delgada en las altas latitudes que en las bajas. El flujo de este viento se ve perturbado por la penetración de aire frío que forma amplias ondulaciones

llamadas *ondas planetarias* o de *Rossby* que se desarrollan a lo largo de la superficie de contacto de la masa de aire polar y del aire cálido tropical, en el llamado frente polar, área inestable que genera diversas perturbaciones atmosféricas.

Debido a la fragmentación entre océanos y continentes de la superficie terrestre, asociada al campo de temperatura y a la distribución entre los océanos y los continentes, la corriente en chorro del oeste sufre perturbaciones en su magnitud y dirección, de tal manera que se pueden presentar desviaciones latitudinales en su movimiento. En contraste, el viento del Oeste en el hemisferio sur es poco perturbado, pues hay menos continentes, por lo que los vientos del Oeste y las corrientes en chorro en ese hemisferio son relativamente más intensos y persistentes que en el hemisferio norte. Normalmente se observan entre tres y seis ondas de Rossby completas en el hemisferio norte.

Especialmente hacia fines del invierno, el país se ve invadido por la corriente en chorro o *jet stream* en la parte alta de la troposfera, introduciendo humedad, la cual, si coincide con un norte o frente frío, lo que es común en el invierno, la precipitación que se produce es muy abundante y muchas veces se da en forma de nieve en las montañas.

Circulación monzónica

La palabra monzón se deriva del vocablo árabe *mausin* que significa estación. La circulación tipo monzón es ocasionada por la diferencia de calentamiento que experimentan los océanos respecto de los continentes. Durante el verano los continentes se calientan más rápidamente que los océanos y alcanzan mayor temperatura.

Esta diferencia de temperatura determina que se formen áreas de relativa alta presión sobre los continentes en invierno y de relativa baja presión en verano, y es causa de que los vientos soplen del mar hacia la tierra en verano y desde la tierra al mar en invierno. Se generan circulaciones monzónicas: en el suroeste de Asia y el Índico;

en Australia y la Polinesia; en África noroccidental y el Atlántico oriental, y en el suroeste de América del Norte y el Golfo de México.

Los monzones pueden perturbar considerablemente la circulación planetaria y generar anomalías climáticas de importancia, tales como abundantes precipitaciones, dramáticas sequías, ondas de calor, etc. (*Ibid.*)

El monzón de Norteamérica, aunque más débil que el de Asia, afecta el patrón de precipitación, temperatura y vientos desde América Central hasta el suroeste de los Estados Unidos por la costa del Océano Pacífico, siendo en el noroeste de México y el suroeste del país vecino donde su influencia es más importante dentro de la precipitación.

Este sistema de circulación que se presenta en los meses de verano (julio, agosto y septiembre) en el desierto sonorense y que comprende la península de Baja California, Sonora y Arizona en el suroeste de América del Norte, ha recibido varios nombres, entre los que se pueden mencionar: monzón de Arizona, monzón del suroeste de Estados Unidos, monzón del suroeste de Norteamérica o monzón mexicano.

Estas condiciones monzónicas se caracterizan por un gran calentamiento, una alta temperatura y una baja presión atmosférica superficial; este patrón físico favorece la convergencia de masas de aire húmedo y cálido originadas en el Océano Atlántico y en el Golfo de México, con las masas de aire provenientes del Pacífico tropical oriental y el Golfo de California, siendo limitado al noroeste por aire relativamente frío y seco originado en el Océano Pacífico del norte.

El monzón se relaciona con el inicio de las lluvias de verano, con el flujo de humedad del sur sobre el Golfo de California y con la formación de un centro de baja presión centrado en Sonora y Arizona, el cual está a su vez asociado a una convergencia y circulación sobre la Sierra Madre Occidental y la vertiente del Pacífico mexicano.

Las características y efectos de esta circulación monzónica sobre el clima de la región muestran que el mayor porcentaje de la humedad está contenido en los niveles inferiores de la troposfera y se asocian a los máximos de precipitación de verano del noroeste mexicano y el

suroeste de Estados Unidos. Durante el verano, un considerable porcentaje de humedad en el noroeste de México y Arizona tiene su origen en las perturbaciones tropicales y huracanes del Pacífico oriental, que son canalizadas a lo largo del Golfo de California.

En general, se considera que la humedad en la alta y media troposfera proviene del Golfo de México y del Atlántico, mientras que la humedad observada en los niveles bajos de la troposfera tiene su origen en el Océano Pacífico tropical y en el Golfo de California; aún no es claro cuánta humedad proviene de la evaporación del Golfo de California y cuánta es transportada desde el Pacífico tropical (Douglas *et al.*, 1993; Adams *et al.*, 1997; Reyes, 2001, 2004).

Magaña *et al.* (1999b, 2004) indican que México se caracteriza por presentar un clima monzónico debido a que la mayor parte del territorio nacional recibe lluvias en el verano y presenta condiciones secas en el invierno.

Frentes fríos

En general, se puede decir que un frente meteorológico es una región donde interaccionan masas de aire de distintas características atmosféricas y en donde se presenta una marcada transición en los parámetros meteorológicos, tales como temperatura, densidad, presión, humedad y viento. Éste se puede extender por varios miles de kilómetros, en la horizontal, y desde la superficie hasta la tropopausa, en la vertical.

La nubosidad y la precipitación asociada a los dos tipos principales de frentes (fríos y cálidos) de latitudes medias es muy considerable, pues abarca grandes extensiones sobre la superficie oceánica hasta de varios miles de kilómetros de largo, y en algunas ocasiones, hasta de 1 000 km de ancho. Estos fenómenos meteorológicos que nacen sobre los océanos, son particularmente intensos durante los meses de otoño e invierno, cuando la circulación atmosférica es dominada por las masas de origen polar con bajas temperaturas, mientras que la superficie oceánica aún mantiene una relativa alta temperatura (Reyes, 2001).

Estas perturbaciones se desplazan hacia los trópicos donde afectan a México y aun hasta Centroamérica. En general, las condiciones meteorológicas de un frente frío se caracterizan por vientos y descensos de temperatura en superficie, como es el caso de las masas de aire polar continental que en invierno llegan a México y provocan condiciones anticiclónicas de relativa sequía, con bajas precipitaciones y condiciones extremadamente frías, ocasionando severas heladas en los estados del norte y centro de México.

Cuando el aire frío encuentra una masa de aire caliente y húmeda, se produce el desarrollo de nubes que pueden producir lluvia. Si los frentes fríos se desplazan al sur y al oriente de México, tienden a hacerse inestables en sus niveles superficiales (el suelo es más cálido) y se producen intensos vientos conocidos como "Nortes" en el Golfo de México.

Los "Nortes" se presentan generalmente de octubre a mayo. En la vertiente del Golfo de México los "Nortes" generan vientos de hasta 30 m/s, descensos de temperatura que van de 2 a 15° C en 24 horas, nubosidad baja y, en ocasiones, precipitación, principalmente sobre las laderas de la Sierra Madre Oriental que se inclinan hacia dicho golfo y al este de las sierras de Centroamérica (Magaña *et al.*, 1999b). Si la masa de aire polar es muy profunda, es capaz de traspasar la Sierra Madre Oriental y afectar el sur de la Altiplanicie Mexicana y otras regiones del interior, produciendo condiciones lluviosas y frías.

Ondas del Este

Estas ondas se producen en el cinturón de los alisios, son un sistema de baja presión; entre las latitudes 5-20° N y S, y en el Atlántico se presentan aproximadamente alrededor de los 15° N con una longitud de onda del orden de 2 000 y 4 000 m (McGregor and Nieuwolt, 1998); se mueven hacia el oeste entre 6-7° de longitud por día y con velocidades del orden de 8 m/seg. Son líneas de flujo onduladas sobrepuestas a los vientos del Este, de ahí derivan su nombre (Figura 6).

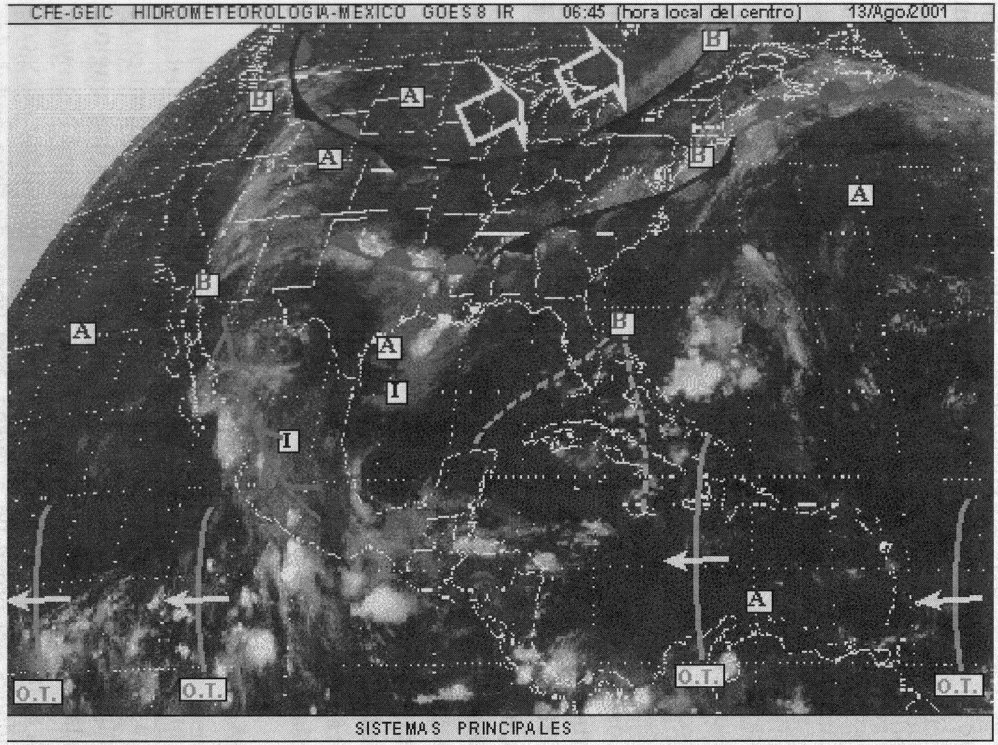

Figura 6. Ondas del Este, O.T. (agosto 13 de 2001).

Las ondas del Este son más comunes en el Atlántico occidental, sin embargo, tienen su máxima amplitud al oeste del continente africano donde se originan, atraviesan las aguas frías del Atlántico oriental donde se debilitan considerablemente, pero muchas alcanzan el Atlántico occidental, Mar Caribe y Pacífico.

Estas ondas son frecuentes en el hemisferio norte, sobre todo en el verano, y pueden aparecer con una periodicidad de tres a cinco días. Estos sistemas afectan la parte centro-sur del país. En la actualidad, se acepta que la onda del Este tenga varios subtipos con distintas características. De acuerdo con ciertas condiciones favorables, una onda del Este puede evolucionar y transformarse en un ciclón tropical o en un huracán.

Algunos autores, citados por Cortez (1998), indican que la mitad de los ciclones que afectan al Caribe se originan a partir de las ondas del Este, y que algunos logran atravesar el istmo centro-americano y llegan al Pacífico en donde se intensifican como tormentas tropicales.

Ciclones tropicales

En las regiones donde se originan los ciclones tropicales se presenta generalmente un mayor número de ondas del Este (Reyes, 2001). En condiciones de viento, humedad y temperatura favorables, las ondas del este se intensifican para formar una perturbación tropical, en la que se inicia el movimiento giratorio de los vientos ciclónicos del orden de 4 a 7 m/seg en la superficie, con vientos más intensos en los niveles superiores. Este término se emplea para designar todos los elementos de flujo que alteran las corrientes tropicales normales. Las perturbaciones tropicales más activas son los violentos ciclones que se forman sobre los océanos cálidos de las regiones tropicales.

Los ciclones tropicales son áreas de baja presión localizados dentro de los trópicos, con fuertes vientos y enormes sistemas de nubes *cumulonimbus*, girando alrededor de un centro de presión baja comúnmente llamado "ojo", caracterizado por cielos despejados y calmas; el viento circula en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte, lo que se conoce como circulación

"ciclónica". La OMM los ha clasificado en "depresión tropical", cuando la intensidad de los vientos es menor a 61 km/h, "tormenta tropical" (con vientos más intensos, entre 61 y 113 km/h) y "huracán" (con vientos de 114 km /h o más; Figura 7).

Aunque el número de huracanes es pequeño comparado con los ciclones de otras latitudes (fuera de los trópicos), la posibilidad para su desarrollo en cada temporada es siempre alta (80 en promedio) en el mundo. Su formación rara vez ocurre sorpresivamente; las áreas de nubes y lluvia que se encuentran en los océanos tropicales, tienen condiciones ideales para el desarrollo de tormentas.

Los ciclones tropicales que pueden afectar a México se localizan en los océanos Pacífico nororiental y Atlántico. En el Océano Atlántico estas perturbaciones meteorológicas empiezan a originarse desde la segunda quincena de junio y dejan de hacerlo en el mes de noviembre, aunque existen años en los que, extraordinariamente, se han presentado en diciembre. La probabilidad de que los ciclones tropicales del Atlántico afecten al país ocurre durante los meses de agosto y septiembre. Lo mismo sucede en el Océano Pacífico nororiental; en general, empiezan desde el mes de mayo y terminan en la segunda quincena de noviembre (también han ocurrido en diciembre). En este caso, la posible mayor afectación al territorio nacional ocurre en los meses de septiembre, octubre y algunas veces en mayo.

En general, se presenta mayor número de ciclones por el lado del Pacífico (512) que por el Atlántico (312); un comportamiento similar se nota en aquéllos que tocan tierra, es decir, el promedio para el Océano Pacífico es de 2.26 ciclones por año y el del Atlántico de 1.06 por año: El área ciclogenética del Pacífico tropical tiene la más alta frecuencia en la generación de ciclones tropicales por unidad de área en el mundo (Azpra *et al.*, 2001).

Englehart *et al.* (2001) establecen que las tormentas tropicales del Pacífico norte, en su porción oriental, influyen en la lluvia del oeste de México, puesto que aportan del 20 al 60% de la lluvia a lo largo de la costa del Pacífico, y en casos extremos, pueden contribuir con el 25 al 30% del total de lluvia estacional recibida en localidades

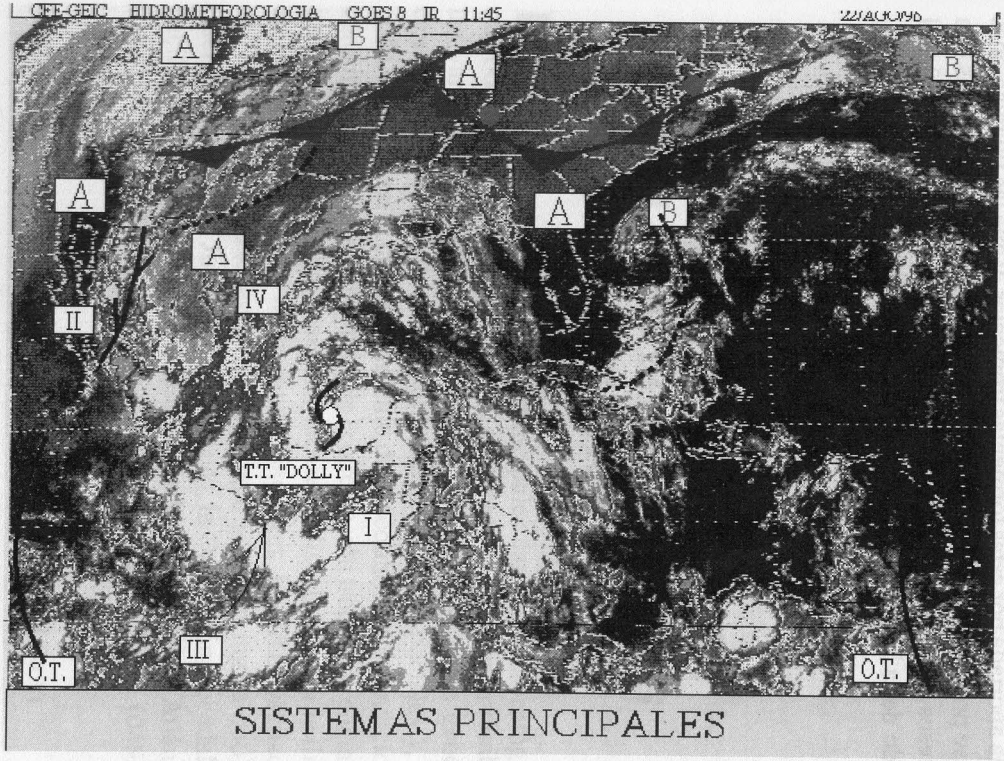

Figura 7. Tormenta tropical "Dolly" frente a las costas del Golfo de México (agosto 22 de 1996).

del interior del país, en su vertiente occidental. Por último, estos autores indican que no se observa una tendencia en el comportamiento de la lluvia aportada por estas tormentas tropicales, y que las fluctuaciones que se presentan año con año parece que están correlacionadas con procesos a gran escala como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y el estado de la Temperatura Superficial (TSM) del Pacífico norte.

VI. LA SEQUÍA: SU RELACIÓN CON EL NIÑO Y OTROS ÍNDICES DE CIRCULACIÓN

Después de haber revisado las principales causas meteorológicas que ocasionan la lluvia en México, es necesario considerar también las variaciones estacionales y no estacionales, las cuales generan cambios en la precipitación en diferentes escalas espaciales y, por ende, influyen en el comportamiento de la sequía. Estas condiciones constituyen una parte importante de la circulación tropical y, por tanto, influyen en la presencia, ausencia, escasez y distribución de la lluvia en México. Algunas de estas condiciones son: El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación *Cuasi*-bienal (OCB, en inglés QBO), la Oscilación Madden Julian (en inglés MJO), la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP, en inglés PDO), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA, en inglés AMO) y la Oscilación del Atlántico Norte (OAN, en inglés NAO).

El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS)

En primer lugar, es importante señalar la influencia del fenómeno mundial ENOS en la variabilidad de la lluvia de nuestro país. Las sequías de principios de los noventa o las más recientes (1997-1998), así

como las inundaciones ocurridas en el sureste de México, han despertado gran interés por comprender los factores que modulan el clima del territorio nacional. Es por ello que la influencia de El Niño en las lluvias, la temperatura y en la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, se ha desarrollado rápidamente con el fin de entender los cambios que están sucediendo en el medio ambiente (Magaña *et al.*, 1999b).

En la actualidad, El Niño-Oscilación del Sur se considera como un fenómeno de escala planetaria y la causa principal de la variabilidad climática observada en distintas regiones del mundo. Año con año parece que las variaciones del clima en México están en gran medida asociadas a la ocurrencia del fenómeno El Niño; entre éstas, se pueden mencionar las sequías que se presentaron a principios de la década de los noventa y las más recientes del evento 1997-1998.

El término El Niño es el nombre que se da al fenómeno que se presenta cuando la temperatura superficial del mar sobre la región del Océano Pacífico ecuatorial del este, costas occidentales suramericanas, registra valores muy por arriba del valor climatológico, acompañado de fuertes lluvias costeras en Perú y Chile.

Este término fue utilizado por primera vez para referirse a un calentamiento en la superficie del océano frente a las costas de Perú y Ecuador que se presenta de manera irregular, observándose su máximo desarrollo durante el mes de diciembre, de ahí el nombre asociado a El Niño Jesús. Esta situación, que dura varios meses, provoca una disminución de nutrientes, y por ende, una reducción en la población de peces. También se ha utilizado para designar estas condiciones de calentamiento de la superficie del mar, que además de afectar al desarrollo de la vida marina, resulta en graves alteraciones en el clima global y los ecosistemas.

Este fenómeno está asociado a las condiciones atmosféricas conocidas como la Oscilación del Sur, la cual consiste en una fluctuación anormal del gradiente de presión atmosférica superficial entre la región oriental y la occidental del Océano Pacífico del sur y que puede dar como consecuencia una inversión en la circulación de

los vientos sobre la superficie del Océano Pacífico tropical. En la actualidad, la relación entre la Oscilación del Sur y El Niño a menudo es referida como el ENSO (*El Niño Southern Oscillation* en inglés) o FENOS (Fenómeno El Niño Oscilación del Sur), es decir, que los dos son parte de un mismo fenómeno climático que involucra interacciones entre la atmósfera y el Océano Pacífico tropical.

Como resultado de las investigaciones acerca de este fenómeno, se han establecido cuatro áreas básicas en el Pacífico Oriental, siendo la región de El Niño-3 (5° N-5° S, 90° W-150° W) la de mayor extensión.

Al hablar de este fenómeno se hace necesario mencionar a La Niña, la cual implica también condiciones anómalas en la temperatura del océano en el Pacífico tropical del este, de acuerdo con la definición propuesta por Trenberth (1997). El Niño se refiere a condiciones climáticas en las que la TSM está 5° C o más por encima de la media del periodo 1950-1979, por lo menos seis meses consecutivos, en la región conocida como "El Niño 3", de esta forma se reportan para los últimos cincuenta años doce acontecimientos El Niño, entre los cuales se deben mencionar los eventos 1982-1983 y el de 1997-1998, los cuales han sido los más intensos del siglo XX.

El último episodio cálido, estimado como débil, fue el de 2004-2005, el cual impactó el régimen climático de invierno en México con sequía en la mayor parte del Golfo de México y en porciones de Michoacán y Guerrero. Esta sequía está asociada a un incremento en la frecuencia y rapidez del paso de los frentes fríos que penetran de las latitudes medias hacia los trópicos, por la presencia de El Niño.

En 2005, con base en las condiciones y las tendencias observadas (variaciones de la TSM en la diferentes regiones de El Niño, el Centro de Predicción Climática/NCP (8 de septiembre de 2005), respalda la continuidad de condiciones ENOS neutrales durante los siguientes 3-6 meses.

Se llama La Niña (o el Viejo, o el anti-Niño) a la fase fría del ENOS en cuanto a los eventos más recientes en los años de 1988-1989, 1995-1996, 1998-1999, el de 1999 que persistió casi tres años;

el evento de La Niña más fuerte en los últimos veinte años se dio en 1988, aparentemente La Niña persistió hasta 2000, en 2001 se presentó Niño y en 2002 otra vez Niña.

La ocurrencia de estos eventos se puede decir que es cíclica, pero no periódica, es decir, no se presentan cada cierto número de años: si bien parece que el ENOS puede ocurrir cada dos a siete o bien cada tres a cuatro años, no tiene una periodicidad regular. Por otro lado, a una situación de La Niña no le sigue un evento de El Niño, o al contrario. También la intensidad de estos eventos es muy variable, por lo que se clasifican en fuertes, moderados, débiles o muy débiles, dependiendo de la amplitud de la anomalía en la TSM.

En forma muy sucinta el fenómeno del ENOS se puede describir de la siguiente forma: en condiciones normales la zona ecuatorial, en el Pacífico oriental, está más fría que en el Pacífico del oeste. Esto es por efecto principalmente de los vientos alisios y por el flujo de la corriente fría de las costas de Chile y del fondo del mar en las costas de Perú y Ecuador. Estos vientos ocasionan que el agua tropical más caliente se acumule en el Pacífico oeste, es decir, en la región de Indonesia.

Por el aumento de la temperatura del mar en esta zona, el aire es más ligero, crea una atmósfera inestable, lo que ocasiona una gran convergencia de humedad, formación de nubes y por tanto lluvias intensas. En cambio, el Pacífico oriental es en general más frío, como ya se indicó, lo que da lugar a la formación de nubes bajas frente a las costas de Ecuador y Chile, y por tanto se tienen menos lluvias.

Si, por el contrario, hay un debilitamiento de las corrientes tanto atmosféricas (alisios) como oceánicas (las surgencias oceánicas cesan), y la temperatura del mar aumenta, se transfiere una cantidad considerable de energía en forma de calor y humedad a la atmósfera tropical, lo que da lugar a una modificación de los patrones de alta convección y, por tanto, a la formación de una intensa actividad convectiva de la atmósfera con sistemas de nubes cúmulus y tormentas tropicales muy intensas que provocan inundaciones en Ecuador, Perú y Chile, así como sequía en Indonesia y Australia.

El fenómeno del ENOS afecta en muy diversas formas e intensidad a México, siendo la sequía uno de los más importantes embates que debe sufrir el país durante estos eventos: se puede decir que en años de El Niño, en el verano se dan condiciones de sequía. De acuerdo con Magaña *et al.* (2003) las situaciones que se presentan en condiciones de El Niño y que ocasionan anomalías negativas de precipitación que pueden resultar en severas sequías, son: una subsidencia reforzada por causa de un desplazamiento hacia el sur de la zona intertropical de convergencia (ZITC), alisios más intensos de lo normal, un menor número de ciclones tropicales en el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México y una reducción en la humedad relativa. Otro efecto que ejerce este fenómeno es la disminución de la lluvia en el Istmo de Tehuantepec en el invierno. En forma general se puede considerar que los veranos de Niño son más secos y cálidos que los veranos de Niña.

Por otro lado, se puede argumentar que la Oscilación del Sur modula la lluvia de México durante todo el año en forma alternada, pues se tiene una manifestación de "latitudes medias" en la temporada seca del invierno boreal y una respuesta "tropical" durante la época de lluvias veraniegas (Cavazos y Hastenrath, 1990).

En general, cabe decir que el impacto de El Niño en las lluvias de México no es siempre el mismo: implica decir que existen diferencias en las características regionales y temporales de las anomalías de lluvia y temperatura de un año Niño a otro.

La Oscilación *Cuasi*-bienal, OCB (*Quasi Biennial Oscillation*, QBO)

Al inicio de la década de los años sesenta las investigaciones meteorológicas demostraron que los vientos estratosféricos sobre las regiones ecuatoriales tienen una marcada variabilidad en su dirección de un año a otro; en un año dominan vientos del este muy intensos, mientras que al año siguiente los vientos dominantes son vientos fuertes del oeste, que se dan a una altura de 25 km sobre la superficie terrestre (50 mb). Esta oscilación de vientos estratosféricos entre los del oeste y este se conoce como *Cuasi*-bienal. El prefijo *cuasi* fue

usado para designar el intervalo de tiempo entre este cambio de dirección, que no es de 24 meses exactamente, los vientos del Este soplan durante 12 meses y los del oeste durante un periodo similar. La oscilación completa un ciclo de 27 meses aproximadamente, además de considerarse como un rasgo distintivo de los vientos estratosféricos ecuatoriales.

En general, se ha visto que los vientos del Este son más intensos que los del Oeste y que el tiempo transcurrido entre los máximos de la fase vientos del Este y la fase de los del Oeste es mucho más corto que en sentido contrario; la periodicidad en promedio es de alrededor de dos años, pero hay una considerable variabilidad tanto en la amplitud como en la periodicidad de la OCB. Otra característica adicional es que los vientos del Este y Oeste se propagan hacia abajo a través de la atmósfera con el tiempo. La media a la cual los vientos se mueven hacia abajo es aproximadamente 1 km por mes, en los dos tipos de vientos, sin embargo, los vientos del Oeste se mueven más rápido. Para la mayoría de los niveles de la atmósfera, la transición de la fase del oeste a la fase del este es suave con el tiempo; sin embargo, para la región entre los 30 y 40 mb, los vientos con sentido oeste pueden persistir por varios meses, tanto que la transición al cambio a la dirección del este a menudo se retrasa. Por encima del nivel de los 50 mb la amplitud de la OCB no cambia en gran forma, pero, debajo de este valor, decrece rápidamente. La máxima variación entre estas dos direcciones se presenta a los 20 mb y la velocidad entre los vientos del Este y Oeste decrece con la altitud.

Para algunos lugares situados a latitudes bajas, tanto la lluvia como la temperatura han mostrado variaciones temporales que se parecen a las de la OCB; por esta razón los climatólogos se interesan en utilizarla en combinación con otras oscilaciones de gran escala, tales como la Oscilación del Sur y la de Madden-Julian en el pronóstico climático a largo plazo. Sin embargo, todavía queda mucho por estudiar de la OCB, en especial en su relación con otros componentes de la circulación tropical, tales como la Oscilación del Sur, el monzón y la frecuencia de los ciclones tropicales.

En el caso de los ciclones tropicales, se ha observado que el número de estos meteoros, así como la frecuencia de tormentas intensas en el Atlántico, tiende a incrementarse cuando la OCB está en su fase más oeste (Gray, 1984). También Pérez *et al.* (1998) consideran que la fase oeste en la oscilación *cuasi*-bienal del viento estratosférico (OCB) se relaciona con temporadas más activas de ciclones tropicales en Cuba.

Un hecho interesante en relación con esta oscilación, es el citado por Garduño (1994), quien refiere que la erupción del Chichón (primavera de 1982) coincidió con que la fase este de la OCB era máxima, razón por la cual la nube de aerosol, ceniza y polvo, se extendió rápidamente hacia el oeste y en tres semanas ya formaba un cinturón alrededor del mundo, entre los paralelos 5 y 30° N. También agrega que debía haberse presentado un efecto térmico, por lo denso de esta capa, pero esto no fue muy notorio, debido a que en esos meses se presentó el fenómeno de El Niño, el cual ocultó el impacto térmico del Chichón.

La Oscilación Madden-Julian, OMJ (*Madden Julian Oscillation,* MJO)

En 1971 Madden y Julian presentaron los resultados de un análisis de superficie y atmósfera superior de la cuenca ecuatorial del Pacífico, donde mostraron que había una variación de baja frecuencia en la intensidad de los vientos en los niveles altos de la atmósfera, en la temperatura a diferentes niveles, así como en la presión atmosférica en el nivel de superficie. Estos autores encontraron una periodicidad en estas variaciones entre 41 y 53 días, con la mayor frecuencia cerca de los 45 días. Esta situación se conoce también como la oscilación tropical 40-50 días (40-50 *Day Tropical Oscillation*), aunque la oscilación cubre un amplio rango de periodos entre los 30 y 60 días. Esta oscilación posee varias características temporales; la de mayor interés es el movimiento de la oscilación de oeste a este, en la forma de una onda atmosférica, la mayor parte asociada con grandes celdas convectivas.

Esta oscilación resulta ser el rasgo más característico de la variabilidad tropical intraestacional, y es la que, al parecer, modula la ocurrencia de eventos extremos. La actividad del monzón Asiático-Australiano está fuertemente influenciada por la propagación y evolución de los eventos de la OMJ. También se ha definido su efecto en el desarrollo de anomalías en la circulación del Pacífico Norte durante el invierno del Hemisferio Norte; se ha observado que existe cierta asociación entre la variabilidad de la lluvia a lo largo de la parte occidental de los Estados Unidos y eventos extremos, con la posición longitudinal de las anomalías convectivas del OMJ. Asimismo, que la actividad convectiva de la OMJ está asociada a la variabilidad de la precipitación de verano del hemisferio norte sobre México y América del Sur, así como a las anomalías de la circulación de invierno sobre el sector americano del Pacífico Sur.

Estudios recientes (Alizer *et al.*, 2003) han mostrado que fases particulares de la OMJ son más favorables que otras en el desarrollo de tormentas tropicales/huracanes tanto en el Atlántico como en el Pacífico, y que existe una importante interacción en las variaciones del ENOS.

Parece que las variaciones de la oscilación Madden-Julian presentan varias características que ayudan a explicar algunos aspectos de la variabilidad en los patrones de circulación en los trópicos y, por tanto, de las condiciones climáticas de estas regiones.

Recientes estudios basados en el análisis de patrones de *outgoing longwave radiation*, OLR, una medida aproximada de convección tropical, han mostrado claramente que no sólo es el Océano Índico una importante área donde se presentan anomalías en la convección tropical, sino también el Pacífico norte y las regiones norte y sur del Atlántico, además de la cuenca del Amazonas, la del Congo y el Océano Pacífico central, donde también parecen ser áreas importantes con anomalías convectivas tropicales.

La oscilación es más larga durante diciembre a febrero y más pequeña durante junio a agosto. Esas variaciones estacionales son consideradas como producto de la migración estacional de la actividad

convectiva asociada con el movimiento de la ZITC. Aunque algunos cambios estacionales del periodo de la oscilación son pequeños, se presentan distintas variaciones interanuales en el periodo; por ejemplo, el periodo más frecuente que se presentó en los años 1980-1985 fue de 26 días, en contraste con el promedio normal de 30-50 días. Los análisis en la periodicidad de esta oscilación con años de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) y La Niña, han mostrado la tendencia de la oscilación a tener una mayor frecuencia para años de ENOS.

La Oscilación Decadal del Pacífico, ODP (*Pacific Decadal Oscillation*, PDO)

Como ya se mencionó, existen otros patrones climáticos además de El Niño, investigados en las últimas décadas, que ejercen importante influencia en los climas regionales alrededor del mundo. Uno de ellos, de importancia relativa, es la Oscilación Decadal del Pacífico, para algunos autores Decenal, ODP, la cual parece ser que junto con el ENOS, son los principales moduladores del clima en la región de Norteamérica (Mantua *et al.*, 1997). Esta oscilación tiene características propias en cuanto a cambios estacionales en el esquema de vientos, temperatura del aire y precipitación, además, se caracteriza por un típico periodo de actividad; por su importancia actual ha sido incorporada a la predicción del clima.

Este término fue desarrollado por Steven Hare para describir la oscilación de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico Norte, cuando estudiaba las conexiones entre los ciclos de producción del salmón en Alaska y el clima del Pacífico. Esas oscilaciones se han designado como "fase negativa", cuando los valores de la TSM están por encima del valor normal; cuando se encuentran por debajo del mismo se le denomina "fase positiva".

La ODP es descrita como un patrón de la variabilidad climática del Pacífico al igual que El Niño, pero de larga duración, si bien se distingue por dos principales características: la primera, un típico evento de la ODP que muestra una persistencia relativa (aproximadamente entre 20 y 30 años) y contribuye a los eventos del ENOS; la segunda,

las señales del ODP son más visibles en la región del Pacífico Norte, mientras que sólo en los trópicos se muestran señales secundarias; lo contrario sucede con el ENOS.

Actualmente se tiene evidencia para dos ciclos completos del ODP en el siglo pasado. La fase fría prevaleció durante el periodo 1890-1924 y nuevamente en el de 1947-1976, mientras que fases calientes dominaron en el de 1925-1946 y de 1977 hasta mediados de los años noventa.

En general, se puede decir que esta oscilación, ODP, en condiciones de neutralidad de ENOS, ejerce una gran influencia sobre las condiciones del clima en el noroeste de nuestro país. Como ya se mencionó, esta oscilación se caracteriza por una alternancia de signo en el campo de anomalías de la temperatura superficial del mar, entre el Pacífico Norte oeste y el este. Los últimos análisis sobre la ODP sugieren que ha llegado al término de su fase positiva en el que se podrán observar, durante los siguientes 15 a 20 años, condiciones dominantemente frías sobre el Pacífico nororiental y cálidas sobre el Pacífico noroccidental.

Zúñiga (citado por Venegas, 2005), después de analizar los datos de estaciones climatológicas del noroeste de Baja California, ha encontrado que, en un periodo de 40 años, en la mayoría de las estaciones se marcan bastante bien los ciclos de sequía y humedad, o las fases frías o calientes en rangos de 25 años, es decir, de 1950 a 1976 se presentó un periodo de sequía prolongada y de 1977 a 1998 se manifestó un periodo de humedad que se correlaciona con la oscilación de la ODP.

Biondi *et al.* (2001), utilizando datos *proxy* de la dendrocronología, reconstruyen los periodos cíclicos de la ODP desde 1661 hasta 1992; para ello analizan los datos obtenidos del *Pinus jeffreyi,* pinácea que crece en la sierra de San Pedro Mártir, Baja California. Estos autores dicen que la evaluación de los datos *proxy* de la dendrocronología es la que mejor se ajusta a periodos recurrentes de sequía y humedad en ciclos de 22 años.

La CNA (2002, citada en Venegas, 2005) reporta que el inicio de otra sequía en el noroeste de Baja California se originó a partir del

invierno de 1999, lo que ha obligado a los ganaderos a vender o sacrificar gran parte de sus hatos, mientras que los productores agrícolas, que utilizan tierras de temporal con cultivos de invierno, no han tenido cosechas a partir de esas fechas, ya que las lluvias de invierno no han alcanzado la media anual, salvo en el 2001.

Reyes (2004) señala que el periodo multidecenal de sequías en el noroeste de Baja California coincide con valores negativos de la ODP (caracterizada por aguas marinas superficiales frías frente a Norteamérica) y frecuentes eventos de La Niña, mientras que condiciones lluviosas coinciden con valores positivos de la ODP (caracterizada por aguas marinas superficiales cálidas frente a Norteamérica) y frecuentes eventos El Niño. Al final, el autor, indica que en un escenario futuro, existe la posibilidad de un periodo decenal seco para el noroeste de Baja California de 1999 a 2015, aproximadamente.

Mendoza *et al.* (2003) con un modelo climático termodinámico aplicado a la atmósfera, océanos y continentes que sirve para realizar pronósticos numéricos mensuales y estacionales de temperatura y precipitación en el hemisferio norte, donde tomaron anomalías de la TSM en condiciones de fases calientes y frías de la oscilación decadal del Pacífico, superponiéndole además la presencia o ausencia de El Niño y La Niña, encontraron que el modelo muestra cierta capacidad para pronosticar condiciones de sequía y humedad para México, asociadas con las fases calientes y frías del ODP, respectivamente.

De esta forma, los resultados obtenidos fueron observaciones de la temperatura del aire en superficie y la precipitación, que sugieren que las condiciones de sequía en México, caracterizadas por temperaturas por encima de lo normal y precipitaciones por debajo de lo normal, están asociadas con la fase caliente del ODP. Estas situaciones de sequía pueden ser incrementadas si la fase caliente del ODP está superpuesta con El Niño. Lo contrario, condiciones húmedas en México, caracterizadas por temperaturas por debajo de lo normal y precipitación arriba de la normal, están asociadas con la fase fría de la ODP, las cuales pueden ser incrementadas si la fase fría del ODP es superpuesta con La Niña.

Englehart y Douglas (2002), utilizando métodos estadísticos y de teleconexión, mostraron que la lluvia monzónica registrada sobre la región occidental de la Sierra Madre Occidental está ligeramente correlacionada con el fenómeno del ENOS, pero sólo durante las fases positivas de la Oscilación Decadal del Pacífico. Lo contrario sucede durante la fase positiva del ODP, en la Altiplanicie Mexicana donde no hay ninguna correlación con el fenómeno del ENOS. Correlaciones significativas entre el ENOS y la precipitación durante la fase negativa de la ODP no se han encontrado en ninguna región.

La Oscilación Multidecadal del Atlántico, OMA (*Atlantic Multidecadal Oscillation,* AMO)

Es una oscilación en la temperatura de la superficie del Océano Atlántico, con una duración entre 65 y 70 años, la cual surge de la variabilidad interna océano-atmósfera, es decir, es el promedio de la TSM y presenta una fase positiva y una negativa. Parece estar relacionada con la precipitación de los Estados Unidos, durante los periodos más calientes del índice OMA (positivo): la mayor parte del país vecino recibe menos lluvia con respecto a la media. Un ejemplo de la fase positiva se presentó de 1930 a 1959, y una fase negativa de 1965 a 1994 (Enfield, 2001). El mayor efecto se presenta en las lluvias de verano.

Se señala que los patrones de la variabilidad interanual de la lluvia invernal asociados por el fenómeno ENOS, también son significativamente modificados por las fases del OMA. La última fase caliente de OMA, que se inició a partir de 1994, muestra una tendencia a aumentar y, por tanto, la lluvia en territorio norteamericano podría experimentar un descenso que pudiera prolongarse.

La Oscilación del Atlántico Norte, OAN (*North Atlantic Multidecadal Oscillation,* NAO)

Es otra forma de la variabilidad climática invernal en la región del Atlántico Norte y abarca, principalmente, desde el centro de Norteamérica, Europa y norte de Asia. Consiste en una fluctuación

en las presiones atmosféricas entre la alta subtropical y la baja polar. Este índice varía año con año, pero también presenta una tendencia a permanecer en una fase por periodos de varios años.

En el Atlántico Norte, la circulación atmosférica muestra normalmente un fuerte contraste meridional (contraste norte-sur) de las presiones atmosféricas. Así, en las regiones septentrionales (Baja de Islandia) existen bajas presiones, mientras que en las regiones subtropicales (Alta subtropical Bermuda-Azores), existen altas presiones; este contraste de presiones ocasiona que los vientos superficiales y las tormentas de invierno de las latitudes medias, se dirijan de oeste a este a través del Atlántico Norte, aportando aire cálido y húmedo al continente europeo. Sin embargo, en condiciones del índice OAN positivo, esta diferencia de presiones se hace más alta que lo normal, lo que favorece el aumento en la cantidad e intensidad de tormentas de invierno que cruzan el Océano Atlántico en una trayectoria más al norte, lo que provoca inviernos cálidos y secos en la zona del Mediterráneo, inviernos cálidos y húmedos en Europa septentrional, inviernos templados y húmedos en la costa oriental de Estados Unidos, e inviernos fríos y secos en el norte de Canadá y Groenlandia.

En cambio, cuando esta diferencia de presiones entre la Baja de Islandia y la Alta Bermuda-Azores se debilita, durante la fase negativa del índice OAN, ocasiona que disminuya el número e intensidad de tormentas invernales que cruzan el Atlántico, además de seguir una trayectoria hacia el este, de tal forma que estas tormentas llevan humedad a la región del Mediterráneo, los inviernos son fríos y secos en el norte de Europa, inviernos fríos en la costa oriental de Estados Unidos e inviernos más templados en Groenlandia (Ahrens, 2003).

El índice de la OAN muestra una gran variabilidad a lo largo de los 175 años de registro instrumental. Diversos estudios muestran la existencia de periodicidades situadas en 24.8 y 2.1 años. También se ha determinado la existencia de una periodicidad de 70 años; el último ciclo completo de 70 años se sitúa entre los altos índices de la década de los años veinte y los altos índices de la década de los noventa. El índice explica gran parte del comportamiento atmosférico del Atlántico Norte (Luque, 2003).

Temperatura de la superficie del mar (TSM)

Las observaciones de temperatura de la superficie del mar son ya una costumbre desde fines del siglo XIX. En la actualidad, buena parte de esta información se obtiene a través de observaciones realizadas desde los satélites. Desde hace unos 15 años, una red de boyas (60 en total) ancladas en el fondo marino, funcionan a lo largo del Pacífico ecuatorial, que entre otras variables atmosféricas y oceánicas permiten mantener un seguimiento continuo (diario) de las condiciones térmicas superficiales y subsuperficiales en esa región (Programa TAO/NOAA).

Las variaciones interanuales de la TSM ecuatorial, si bien no se han mencionado como una condicionante en forma particular que influya sobre la variabilidad de la lluvia en México, sí se han indicado en cuanto a su relación con muchos de los fenómenos meteorológicos de mesoescala y escala sinóptica, así como de los eventos no estacionales, ya descritos. Pero dada su importancia, se prefirió darle un espacio donde, de manera muy general, se mencionen algunas de las variaciones interanuales de la TSM en el Pacífico ecuatorial que han sido asociadas a intensas, y en muchos casos fatales, anomalías del clima en distintas partes de México, si bien cuando se presentan estas condiciones extremas, los patrones de circulación atmosférica se ven bastante afectados en diferentes partes del mundo.

Tampoco se pueden pasar por alto las variaciones de la TSM en el Atlántico ecuatorial y, como ejemplo, se puede mencionar que desde hace mucho tiempo se conoce el papel que desempeña la TSM en la formación e intensificación de los ciclones tropicales, y que valores más altos de la TSM resultan en un incremento potencial para que los ciclones tropicales alcancen vientos más intensos, si bien estos meteoros no siempre alcanzan esa intensidad potencial máxima (50%), pues esto depende de otros factores tanto oceánicos como de la dinámica de la atmósfera (DeMaria y Kaplan, 1994).

Se han observado cambios multidecadales en la actividad de huracanes del Océano Atlántico que son causados por las variaciones

de la TSM y su impacto sobre la cizalladura vertical del viento, la estabilidad estática húmeda y el fortalecimiento del monzón del África occidental (las precipitaciones en el Sahel occidental). Actualmente existen fuertes indicadores de que se está entrando en una era de incremento en la actividad de huracanes intensos. Se tienen evidencias de ello por los cambios experimentados en la TSM del Atlántico, la cizalladura vertical del viento y el propio carácter de los huracanes intensos. Estos cambios pueden haber comenzado a manifestarse a finales de los años ochenta, pero fueron enmascarados por la influencia de El Niño del periodo 1991-1994. Sin embargo, durante 1995 y 1996 hay señales claras de que los huracanes intensos han retornado, ya que se observaron once huracanes con esta categoría, el mayor número para dos años consecutivos según la muestra disponible. De aquí se concluye que las próximas dos décadas estén acompañadas por un régimen activo de huracanes para el Atlántico, quizá con profundos impactos para los países del Caribe, Centroamérica y Estados Unidos (Godenberg *et al.*, 1998).

Por último, para dar una idea acerca de la compleja interacción entre uno y otro de los índices físicos antes mencionados y que están asociados a las situaciones hidrometeorológicas del país, se cita parte del pronóstico meteorológico de las condiciones para el verano 2005 (Foro VIII), donde se menciona que sin la presencia de condiciones El Niño, el clima de verano en México está modulado por otros factores, entre los que se encuentran la región de agua cálida frente a la costas del Pacífico al sur de México, la Oscilación *Cuasi*-bienal, la Oscilación del Atlántico Norte y la Oscilación Decadal del Pacífico.

En particular, para el mes de julio, en la parte del diagnóstico se consideraron: la anomalía de la temperatura del agua en la superficie del mar en el Pacífico norte y ecuatorial, la radiación saliente de onda larga (OLR) en el Pacífico Central, la Oscilación *Cuasi*-bienal, así como la anomalía de alturas geopotenciales a 700 mb en el hemisferio norte.

Del análisis de estos índices se pudo observar que durante este mes, la ZITC continuó poco activa al sur de México, situación que fue

poco favorable para una mayor entrada de humedad hacia el país. En cuanto a la OCB, se observó que la fase este favoreció un menor desplazamiento hacia el norte de la ZITC, lo que dio lugar a una pequeña entrada de humedad hacia México desde el Pacífico.

Regímenes pluviométricos en México

En México se tienen diversos regímenes pluviométricos asociados a los diversos fenómenos meteorológicos ya mencionados. El régimen intermedio entre verano e invierno se presenta en la frontera norte de nuestro país, así como a lo largo de la península de Baja California, excepto su extremo noreste. Este régimen es ocasionado por eventos meteorológicos de poca intensidad que propician precipitaciones poco copiosas en cualquier época del año.

Hacia la zona templada, en el noroeste de la Península de Baja California, se localiza el régimen mediterráneo o de lluvias de invierno en el que, sobre áreas relativamente extensas, se desatan fuertes chaparrones lo mismo de día que de noche, con nevadas en las montañas. Al norte de la Sierra Madre Occidental la precipitación, aunque es en verano, registra un alto porcentaje en invierno.

En la zona tropical las lluvias se presentan en la estación caliente del año y caen en forma de tormentas violentas, pero limitadas en extensión; preferentemente se producen durante las primeras horas de la tarde. No obstante su localización en la zona tropical, las laderas de la Sierra Madre Oriental que se inclinan hacia el Golfo de México y una parte de la península de Yucatán, también presentan, como el norte del país, un régimen intermedio entre el verano e invierno; aunque en general, la lluvia en forma de aguaceros torrenciales ocurre en verano y de manera más uniforme en invierno, esta última de tipo frontal ocasionada por los nortes.

En México se presenta una gran variabilidad de las precipitaciones; hay una enorme diferencia entre la cantidad de lluvia de un año a otro, la cual es una característica típicamente zonal de la regiones tropical y subtropical. En las regiones áridas, esta situación

se debe al carácter esporádico de las precipitaciones, y en las húmedas, a la presencia de fenómenos meteorológicos como los ciclones tropicales. Otro rasgo típico es la presencia de canícula o sequía de medio verano. Más de la mitad oriental del país sufre durante la temporada lluviosa del verano una merma en la cantidad de precipitación. Dicha sequía relativa puede durar de unos cuantos días a dos o tres meses.

Las condiciones del valor más frecuente de la precipitación, moda, presentan una estrecha relación con la distribución de la precipitación en México. Como se observa en la Figura 8, en el mes de abril la moda es la más baja en el año, predomina el valor cero en la mayor parte del territorio nacional, sólo ocurren valores bajos de 0.1 a 40 mm en cinco áreas: el noreste del país, parte de Coahuila, Nuevo León y el occidente de Tamaulipas; la segunda corresponde al centro de México, sobre lugares circundantes a la Ciudad de México en el Sistema Volcánico Transversal; la región central de Veracruz (estribaciones de la Sierra Madre Oriental) es la tercera; la cuarta incluye los valles centrales de Oaxaca y la última, el estado de Chiapas.

En cambio, en septiembre es cuando ocurren los valores más altos de la moda de la precipitación en México, las áreas con valor cero se ubican en el norte y noroeste, mientras los valores máximos se presentan en las costas y lugares de mayor altitud como las sierras Madre. De lo anterior se puede señalar que la mayoría de las precipitaciones se presentan durante los meses de mayo a octubre, lo que coincide con la etapa cálida del año.

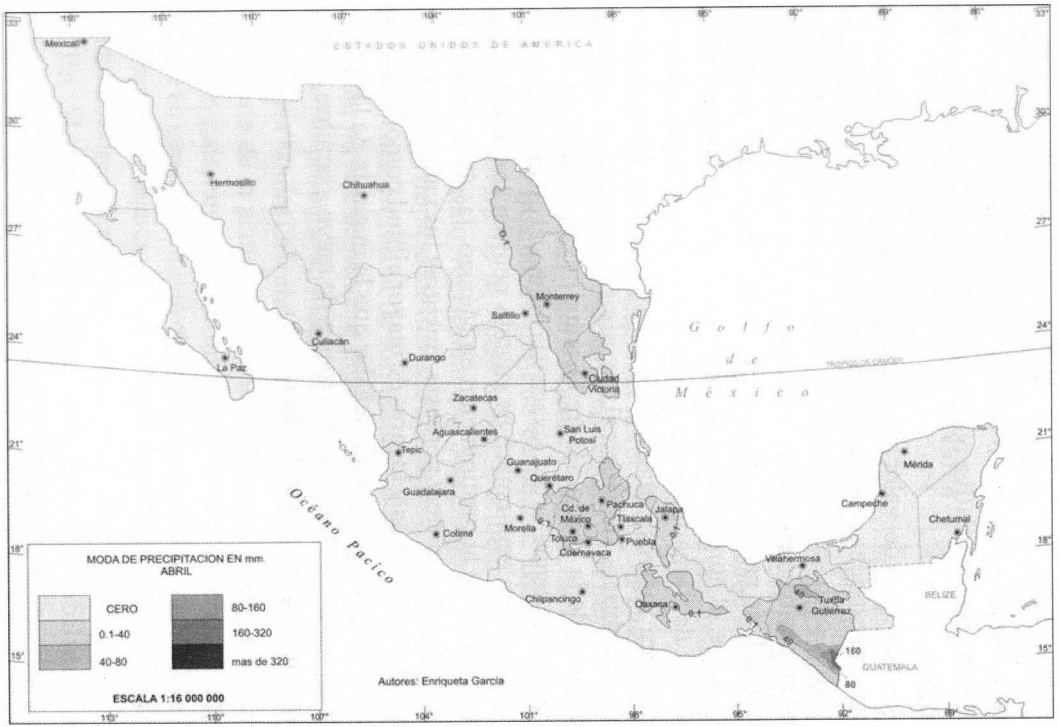

Figura 8. Moda de la precipitación, mes de abril.

VII. LA SEQUÍA, LA DESERTIFICACIÓN Y LA DEGRADACIÓN DEL SUELO

La sequía severa y prolongada que se presentó en la parte más seca del norte de África y que incluía la región semidesértica contigua a ella, inició en 1968 y continuó hasta las décadas de los años setenta y ochenta, con variaciones tanto en intensidad como temporalidad. Ésta ocasionó afectaciones en los aspectos físicos, sociales y económicos, y dio lugar a la Conferencia sobre Desertificación de las Naciones Unidas (UNCOD) realizada en Nairobi en 1977, donde fue adoptado el Plan de Acción de Combate a la Desertificación (PACD).

En 1992 se realizó la Conferencia del Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas (UNCED) en Río de Janeiro; de estas actividades resultó el Comité de Negociación Intergubernamental (INCD) para preparar una Convención de Naciones para Combatir la Desertificación en aquellos países que experimentaban serias sequías y/o desertificación, en particular en África. La Asamblea General de las Naciones Unidas respondió a favor de que la Convención de Naciones para combatir la Desertificación adoptara sus acuerdos en París el 17 de junio de 1994 y los pusiera a disposición de las naciones del

mundo para su firma a partir del 14 de octubre de 1994. Éstas fueron ratificadas el 26 de diciembre de 1996 por 50 países.

En la Conferencia de 1992, se tomó la decisión de definir a la desertificación como la degradación de la tierra en zonas áridas y semiáridas y subhúmedas secas, resultado de varios factores, entre los cuales se incluyen tanto las variaciones climáticas como las actividades humanas.

Aunque el término sequía no se menciona en la definición, se sabe que es uno de los factores más significativos que contribuyen a la degradación del suelo en las regiones áridas. Sin embargo, las actividades humanas son la principal causa de este proceso (Dregne, 2000).

El ejemplo más conocido de la relación entre sequía y desertificación, es el problema de una rigurosa sequía que sufrieron los países que forman la denominada franja del Sahel, que se presentó desde 1968 hasta 1974. En esta región se practica la ganadería nómada así como los cultivos de gramíneas, los cuales fueron afectados al grado de que el ganado se quedó sin forraje para su sustento. Durante los peores periodos de esta sequía, los nómadas se vieron forzados a vender el resto del ganado, lo que significaba acabar con sus únicos medios de subsistencia. Cinco millones de cabezas de ganado perecieron y muchos miles de personas murieron por los efectos del hambre y las epidemias.

En el Sahel, sin embargo, se tiene constancia documental de sequías periódicas en décadas pasadas. Los desplazamientos en la posición del cinturón subtropical de altas presiones y la zona de convergencia intertropical de bajas presiones, se deben tener en cuenta en el momento de explicar estas épocas de sequías y los periodos intermedios de precipitación superior a lo normal. Asociado con esta sequía, se presentó el fenómeno especial conocido como desertificación, el cual consiste en el cambio en la fisonomía de una porción de la superficie terrestre por otra muy semejante al desierto, debido en gran parte a la destrucción de las praderas, arbustos y árboles que existían previamente. También son palpables los efectos de la erosión del suelo formando surcos, abarrancamientos de las laderas, sobre-

acumulación de sedimentos en los cauces de los ríos. La deflación también se acentúa; se puede observar en las superficies de los suelos pulidos y acumulaciones de los materiales acarreados por el viento en el lado de barlovento de los obstáculos (Strahler y Strahler, 2000).

La desertificación de la sabana africana se atribuye al gran incremento de la población y del ganado. Los administradores europeos de las colonias africanas favorecieron al aumento de habitantes con el suministro de alimentos en los periodos de hambre, reduciendo la mortandad por enfermedades y por la extracción de las aguas freáticas para la irrigación de los cultivos y para abrevar el ganado. Con cada nueva sequía se presentaba un mayor impacto en la vegetación y en el suelo. Finalmente, la degradación terrestre fue demasiado severa como para permitir una recuperación de la cobertura vegetal en la estación lluviosa o en los periodos más húmedos o con fuertes lluvias estacionales. De este modo, la desertificación, con un tiempo prolongado de sequía y la presión demográfica, va adquiriendo visos de permanencia y toma un aspecto externo de cambio hacia un clima desértico (Dregne, 2000).

Luego de la rigurosa sequía de 1968 a 1974, el Sahel experimentó una precipitación algo mayor entre 1975 y 1980, pero de nuevo en 1981 y hasta 1984 se volvió otra vez a un periodo seco.

Las estadísticas reportan que la desertificación afecta aproximadamente a la sexta parte de la población mundial; al 70% de todas las tierras secas (equivalente a 3 600 millones de hectáreas) y a la cuarta parte de la superficie total de tierras del mundo.

Algunas estimaciones indican que cerca del 10% de la superficie de la tierra del planeta ha sido transformada por la acción humana, convirtiendo en desiertos las áreas forestales y praderas. Por otra parte, más de un 25% de la tierra se encuentra en riesgo de degradación (World Resources Institute, 1990).

Los procesos erosivos provocan la pérdida de tierra agrícola por alrededor de 6 a 7 millones de hectáreas por año, registrándose una pérdida adicional anual de 1.5 millones de hectáreas como resultado de inundaciones, salinización y alcalinización (Brundtland *et al.*, 1987).

Más del 50% de la degradación de suelos es causada por la deforestación en Asia, seguida de Suramérica (17%). La deforestación es la principal causa de degradación en Suramérica, Asia y Europa. El sobrepastoreo es el principal motivo de la degradación en África, Australia y Asia, en donde el 35% de los suelos han sido degradados por manejo inadecuado.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO) estima que en América Latina y El Caribe existen alrededor de 250 millones de hectáreas de tierras degradadas, siendo las principales causas el crecimiento del proceso erosivo, la deforestación, las actividades agrícolas no sustentables, el sobrepastoreo y la sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico.

En América del Sur, 170 millones de hectáreas han sido degradadas debido a la deforestación y el sobrepastoreo; por otro lado, en el Caribe, la urbanización acelerada y mal planificada ha provocado la pérdida de tierras para uso agrícola, protección de cuencas y conservación de la biodiversidad.

La falta de protección ambiental a menudo conduce a decisiones inadecuadas para la explotación de tierras. El uso excesivo de las tierras puede deberse a circunstancias económicas, o a legislaciones y prácticas territoriales inadecuadas. Quizás la pobreza no deje otra alternativa que extraer lo que pueden de los escasos recursos de que disponen, aunque ello implique degradar las tierras.

Procesos asociados a la desertificación

Existen siete procesos que son responsables de la desertificación. Los cuatro primeros son considerados procesos primarios de desertificación, llamados así porque sus efectos son amplios y tienen un impacto muy significativo sobre la producción de la tierra. Los procesos primarios son:

a) Degradación de la cubierta vegetal (deforestación): se refiere a la remoción o destrucción de la vegetación natural existente en un área determinada.

b) Erosión hídrica: es el proceso de remoción del suelo, principalmente la capa arable del mismo, por la acción del agua. El proceso de erosión hídrica se acelera cuando el ecosistema es perturbado por actividades humanas, tales como la deforestación y/o el cambio de uso del suelo (explotación agrícola, pecuaria, vías de comunicación, asentamientos humanos, entre otros).

c) Erosión eólica: es el desprendimiento y arrastre de las partículas del suelo ocasionados por el viento. Este tipo de erosión en las regiones áridas y semiáridas se debe, principalmente, al sobrepastoreo que destruye o altera a la vegetación natural, a la tala inmoderada y a las prácticas agrícolas inadecuadas.

d) Salinización: es el deterioro de los suelos por el incremento en el nivel de sales solubles que reduce su capacidad productiva. Generalmente ocurre cuando existe un desbalance hídrico y salino que favorece la concentración de las sales.

Los procesos secundarios son:

a) Reducción de la materia orgánica del suelo: proceso causado indirectamente a causa de la pérdida de la vegetación, la cual provee de los nutrientes orgánicos al suelo.

b) Encostramiento y compactación del suelo: este fenómeno es consecuencia de los procesos ya mencionados, así como la escasez de materia orgánica, de la presencia de suelos ricos en limo y arcilla, y de la constante utilización de maquinaria agrícola o sobrepastoreo.

c) Concentración de substancias tóxicas y pérdidas de bases: en este proceso se consideran todos los diferentes tóxicos de la concentración de sales derivada de la actividad industrial.

Consecuencias de la desertificación

La desertificación disminuye la resistencia de las tierras ante la variabilidad climática natural. El suelo y la mayoría de los elementos

de las tierras secas, en general, son resistentes y logran recuperarse después de sufrir perturbaciones climáticas y efectos provocados por el hombre. Sin embargo, cuando las tierras se degradan, esta capacidad de recuperación se reduce sustancialmente, lo que conlleva repercusiones físicas y socioeconómicas.

El suelo se vuelve menos productivo, la vegetación se deteriora. La degradación de tierras puede ocasionar inundaciones aguas abajo, disminuir la calidad del agua y aumentar la sedimentación en ríos y lagos, y la deposición de lodos en pantanos y vías de navegación. Puede, asimismo, provocar tempestades de polvo y contaminar el aire, lo que a su vez daña las máquinas, reduce la visibilidad, aumenta los depósitos de sedimentos indeseables y ocasiona presiones sobre el suelo. Las ráfagas de polvo también pueden empeorar los problemas de salud, como las infecciones oculares, enfermedades respiratorias y alergias.

Si no se detiene o revierte la desertificación, la producción de alimentos en muchas áreas afectadas disminuirá, lo que puede causar malnutrición y hambrunas.

La desertificación conlleva enormes costos sociales. Hay una creciente percepción de los vínculos que existen entre la desertificación, los desplazamientos civiles y los conflictos. En África muchas personas han debido desplazarse internamente o emigrar a otros países a causa de la guerra, la sequía o la degradación de tierras. Los recursos naturales en las ciudades y sus alrededores, y en los campamentos de refugiados sufren una intensa presión. Las difíciles condiciones de vida y la pérdida de identidad cultural socavan aún más la estabilidad social.

La degradación del suelo se entiende como el cambio de una o más de las propiedades que posee condiciones inferiores a las originales, por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos. En términos generales, la degradación del suelo provoca alteraciones en su nivel de fertilidad y, consecuentemente, en su capacidad de sostener una agricultura productiva.

Este proceso de degradación consiste en la pérdida de la productividad y complejidad biológica o económica de las tierras agrícolas, los pastizales y las regiones forestales, y se debe principalmente a la variabilidad climática y a las actividades no sustentables del hombre. Las formas más comunes de utilización no sustentables de la tierra son el sobrecultivo, el pastoreo excesivo, la deforestación y las prácticas inadecuadas de riego.

La degradación de tierras también afecta la cantidad y calidad de los abastecimientos de agua dulce. La sequía y la desertificación están asociadas a la disminución de los niveles hídricos de ríos, lagos y capas acuíferas, por ejemplo; las prácticas de riego no sostenibles pueden secar los ríos que desembocan en los grandes lagos; así, los volúmenes del Mar de Aral y el Lago de Chad se han reducido en forma espectacular. Es, asimismo, una fuente mayor de contaminación de los océanos desde tierra firme, ya que los sedimentos y aguas contaminados se vierten en los principales ríos.

La acumulación de sustancias tóxicas para las plantas o los animales es causada por el uso excesivo de fertilizantes y métodos químicos de control de plagas, los cuales envenenan el suelo provocando la pérdida de la cubierta vegetal y, en consecuencia, los otros procesos descritos.

La desertificación es un problema complejo, con múltiples causas y consecuencias, por lo que no existen soluciones fáciles. La lucha contra la desertificación debe, en efecto, abarcar múltiples soluciones encaminadas al manejo adecuado de los recursos naturales en regiones desertificadas; al reemplazo de la leña como combustible doméstico, mediante la introducción de tecnologías apropiadas; a la creación de fuentes de ingreso o actividades productivas alternativas para las poblaciones afectadas; a la aplicación de programas de reforestación y de manejo adecuado del ganado, particularmente caprino; y a la sensibilización y educación, entre muchos otros aspectos.

En México se reúnen muchas de las causas naturales que favorecen la degradación del suelo; el problema principal es la falta de conciencia del hombre que con sus diversas actividades empobrece

a los ecosistemas hasta convertirlos en sitios improductivos, erosionados y contaminados, entre otras situaciones por el uso y manejo inadecuado de los recursos.

México cuenta con una diversidad de ecosistemas donde se observan asociaciones biológicas que han sido modificadas por un cambio en el uso diferente a su vocación, lo que provoca la degradación de los ecosistemas y, por consecuencia, del suelo.

Ortiz *et al.* (1995) indican que, de acuerdo con el Censo Agrícola Ejidal de 1960, en México había 150 millones de hectáreas con problemas de degradación del suelo (desertificación), lo que representa casi el 80% de la superficie del país. Se estima que el deterioro avanza de 100 000 a 200 000 ha/año, lo que implica que la superficie agrícola disminuya a causa de los procesos de degradación.

Una característica de México es el predominio de paisajes montañosos, donde es vital que se mantenga el bosque para contribuir al desarrollo normal del ciclo del agua y, por consiguiente, se aseguren las condiciones de fertilidad de las partes bajas y planas. El inadecuado manejo de los recursos forestales ha llevado al país a una crisis ecológica, lo que conlleva la erosión masiva del suelo. Las áreas agrícolas de temporal en México coinciden con suelos donde las condiciones topográficas no son propicias para dicha actividad

En el 2002, 72.58% del país aún estaba cubierto por comunidades naturales en diferentes grados de alteración; el porcentaje restante había sido convertido en terrenos agrícolas, ganaderos, urbanos y otras cubiertas modificadas por el hombre. El hecho de que casi tres cuartas partes del territorio nacional aún conservaran vegetación natural no significa que permanecieran inalteradas. Según esta misma evaluación, sólo 50.8% del territorio nacional (70% de la vegetación remanente) conservaba vegetación primaria (es decir, que no presenta perturbación importante), siendo las selvas las que habían experimentado la perturbación más extensa, ya que sólo 35% de éstas (en superficie) se mantenían como selvas primarias (SEMARNAT, 2006).

En el estudio de degradación del suelo en México, Estrada (1991) concluye que ésta abarca el 95% de la superficie del territorio, y el

proceso más intenso que se presenta es la pérdida de la materia orgánica en un 80% de territorio, seguido por la degradación hídrica que afecta al 60% del país y, en menor porcentaje, los efectos por pérdida de bases por lixiviación y el ensalitramiento.

Ortiz *et al.* (1995) hacen una estimación de la degradación en cuatro categorías (ligera, moderada, severa y muy severa), lo que refleja que todos los estados de la República sufren deterioro en su territorio: destacan Tabasco (85%), Jalisco y Colima (75%), Michoacán y Campeche (70%), Aguascalientes y Veracruz (55%), y Quintana Roo (60%), en grado muy severo. Estos mismos autores consideran que el deterioro avanza de 100 000 a 200 000 ha/año, lo que indica que la superficie agrícola disminuye a causa de los procesos de degradación. Sin embargo, la más reciente evaluación oficial muestra que los suelos afectados por algún tipo de degradación representan 45% del área total del país; de esta superficie, 5% presenta un deterioro severo o extremo y 95% queda ubicado dentro de los márgenes de ligero a moderado (SEMARNAT, 2006).

VIII. EFECTOS DE LA SEQUÍA Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN

La sequía históricamente ha causado problemas económicos, sociales y ambientales a través del mundo; algunos son difíciles de evitar, aunque se cuente con una preparación para ello, sin embargo, otros daños son evitables, especialmente aquellos efectos económicos resultado de la sequía; asimismo, su distribución espacial es mayor que la cubierta por los daños ocasionados por otros peligros naturales.

La sequía produce una red compleja de impactos que atraviesan los ámbitos de un territorio y su alcance va más allá del área que experimenta plenamente la sequía. Esta complejidad existe porque el agua es un recurso básico en nuestra capacidad de producir mercancías y de proporcionar servicios. Algunos efectos duran poco tiempo y las condiciones regresan a la normalidad al finalizar la sequía. Otros pueden llegar a ser de mayor duración o permanentes.

Los efectos de la sequía son comúnmente clasificados como directos o indirectos. Los primeros hacen referencia a pérdida de cultivos, menor producción forestal, mayor riesgo de incendios, niveles reducidos de agua disponible, creciente mortalidad del ganado y de la fauna, y daños al hábitat de la fauna y de la flora. Las consecuencias de estos efectos ilustran impactos indirectos, por ejemplo, la reducción

en las cosechas y la productividad del bosque pueden dar lugar a un menor ingreso para los agricultores; los precios crecientes de los alimentos y la madera, el desempleo y la falta de préstamos, orillan a los campesinos a abandonar sus actividades tradicionales y a emigrar. También los impactos de la sequía se pueden clasificar en económicos, ambientales y sociales.

Por otra parte, la sequía se asocia con el aumento de afectaciones por insectos, enfermedades de las plantas y la erosión provocada por el viento, ya que los insectos pueden causar problemas a la vegetación; así también, durante los periodos de sequías aumenta dramáticamente la posibilidad de incendios forestales.

Los agricultores no son los únicos que padecen durante las sequías. Los negocios que proporcionan mercancías y servicios a los granjeros también se ven afectados. Esta situación, de continuar, conduce al desempleo y a la pérdida de ingresos fiscales para el gobierno. Las actividades de recreación y del turismo se dañan seriamente porque los turistas no desean viajar a un país que esté sufriendo de una escasez severa del agua. La falta de ciertos productos da lugar a su importación desde otros sitios e inclusive desde del exterior.

Las pérdidas ambientales son causadas por daños a las especies de plantas y animales. El hábitat de la fauna y la calidad del aire y del agua son dañados generalmente debido a una carencia del agua y al aumento de incendios forestales. La mayoría de los efectos de la sequía son a corto plazo: cuando la sequía acaba, muchos de los problemas se solucionan. Sin embargo, muchos otros efectos ambientales permanecen en el área por largos periodos después de que la sequía ocurrió. Por ejemplo, el hábitat de la fauna se puede dañar con la pérdida de humedales, de lagos y de vegetación. Asimismo, alguna especie animal puede modificar su distribución hacia afuera del área afectada por la sequía.

El vapor de agua existente en el aire y el agua retenida en los suelos actúan como moderadores y evitan los acusados contrastes del calor seco o del frío seco. En periodos de sequía, con precipitaciones escasas e irregulares, suelen presentarse episodios térmicos extremos: olas de frío o golpes de calor.

Otros efectos de la sequía incluyen los impactos sociales, como problemas de salud, seguridad pública, conflictos entre los usuarios del agua y la reducción de calidad de vida. Durante las sequías, mucha gente emigra al exterior; cuando esto sucede, el área de origen pierde población. En Brasil, por ejemplo, entre 1950 y los años ochenta las sequías provocaron una pérdida de 5.5 millones de personas del medio rural.

A continuación se presentan los principales efectos económicos, ambientales y sociales relacionados con la sequía.

Económicos

- reducción del desarrollo económico nacional;
- daños a la calidad de la cosecha, menor producción de alimentos;
- aumento de precios de los alimentos;
- importación creciente de alimentos;
- plagas de insectos;
- enfermedades de las plantas;
- pérdida de la producción ganadera;
- falta de agua y de alimentos para el ganado, lo que conduce a la alta mortalidad de éste;
- interrupción de los ciclos de la reproducción;
- creciente depredación;
- pérdida de ganancias para los granjeros;
- desempleo debido a la menor producción;
- descenso en las actividades recreativas y el turismo;
- reducción en la producción de energía hidroeléctrica;
- limitación en la navegación a través de los ríos y de los canales.

Ambientales

- mayor sequedad con daños en las especies animales;
- reducción y degradación del hábitat de la fauna;
- carencia de alimentos y agua potable para la fauna;
- aumento de la depredación;

- pérdida de fauna en algunas áreas y migración de muchas en otras;
- mayor peligro de extinción de algunas especies;
- daños en algunas especies de plantas;
- número y severidad crecientes de incendios;
- mayor erosión del viento y del agua en los suelos.

Sociales

- escasez de alimentos;
- pérdida de vidas humanas por falta de alimentos (suicidios, violencia);
- conflictos entre los usuarios del agua;
- conflictos políticos en la región;
- menor calidad de vida que conduce a cambios en la forma de vida;
- aumento de la población pobre;
- migración de la población.

Los costos y pérdidas económicas, sociales y ambientales asociados con este evento se incrementan cada día, aunque es difícil cuantificar esta tendencia debido a la falta de estimaciones de pérdidas históricas por la sequía; esto se debe a que este fenómeno es uno de los menos reportados, pues la mayoría de las fuentes estadísticas son de organizaciones de ayuda internacional. Sólo los países afectados por la sequía y que requieren de asistencia de estas organizaciones reportan estos eventos. Así, sequías tan severas como las presentadas en Australia, Brasil, Canadá, España, Inglaterra y Estados Unidos, y de muchos otros países no se incluyen en estas estadísticas.

Varios autores concuerdan en que los impactos de la sequía son cuantiosos y difieren bastante entre los países desarrollados y en desarrollo. Por ejemplo, en la mayor parte de las economías africanas sur-saharianas son dependientes de la agricultura; así, los efectos de las sequías son directos y pueden ser desastrosos. En estos países, la mayor parte de la población se emplea en la agricultura o en el

pastoreo, y las cosechas del sector primario contribuyen a la entrada de divisas. Así, las ramificaciones de los efectos de la sequía se extienden a través de la economía. Zimbabwe hizo frente a pérdidas económicas enormes como resultado de la sequía de 1982-1983, incluyendo 360 millones de dólares en pérdidas agrícolas directas y 120 millones de dólares como costos de los efectos de la sequía (Ogallo, 2000).

Florescano (1995), en su libro sobre la historia de las sequías en México, muestra que los efectos que producen los cambios meteorológicos se transmiten al conjunto de la sociedad en la forma de carestía, hambre, epidemias, mortandades, explosiones sociales y conflictos políticos.

A manera de ejemplos, indica que en casos extremos, cuando en el valle de México se consumían las reservas acumuladas, la gente se veía forzada a recurrir a otras fuentes alimenticias: raíces de plantas acuáticas del lago, pescado, mosquitos, ranas o camarón de la laguna grande. En años de sequías prolongadas, aun estos recursos alternativos desaparecían, en parte, porque también sufrían los estragos de la sequía.

En la época colonial la primera consecuencia de la crisis agrícola era el incremento en el precio del maíz; inmediatamente después de esta carestía, se presentaba la de la carne, pues el ganado se sacrificaba para compensar la falta de granos alimenticios.

Un estudio sobre la diversidad de los efectos producidos por la sequía, lo realizó Oñate (1978), para determinar la vulnerabilidad de una sociedad ante fluctuaciones meteorológicas como la sequía de 1972; para ello se seccionaron tres regiones: el Bajío, el sureste del estado de Oaxaca y la zona fronteriza del estado de Baja California, que incluye los municipios de Mexicali, Tijuana y Ensenada; cada región presenta características tanto ecológicas como socioeconómicas diferentes.

El año de 1972 no fue considerado anormal en cuanto a precipitación pluvial en el Bajío, más bien hay evidencia de ciclos de cuatro a seis años de lluvias escasas y uno de precipitación adecuada. El medio ecológico, firmemente integrado a diversas ramas de la actividad

económica y con un desarrollo de infraestructura de muchos años, no se ha visto en peligro de desestabilización, salvo por algunas áreas deforestadas y por la sobre-utilización del agua del subsuelo para riego que amenaza convertir eventualmente ciertos valles, como el de León, en tierras de temporal.

En el caso del norte de la Península de California, las fluctuaciones de 1972 sí se consideraron anómalas y prácticamente redujeron a cero la producción de cultivos de temporal. El medio, sin embargo, no ha sido dañado y se mantiene en condiciones de adaptación natural a la sequía dentro de la estructura de un sistema ecológico desértico. Es una región de alta productividad, muy capitalizada, de elevada tecnología.

La región de Oaxaca constituye, por el contrario, un caso claro en el que la sequía de 1972 tuvo efectos desastrosos sobre un sistema ecológico desestabilizado. Las perturbaciones ambientales originadas por la acción de grupos humanos y el predominio de cultivos muy frágiles a la sequía provocaron graves pérdidas económicas y problemas sociales.

Ahora bien, algunas medidas tomadas para evitar los efectos de la sequía, han sido el desarrollo de una infraestructura de almacenamiento de agua y niveles de vida suficientemente altos como para permitir el desarrollo de un sentido de comunidad; esta ha sido la medida más eficaz contra la variabilidad climática. El caso de Baja California y el Bajío así lo muestran. En regiones como Oaxaca es necesario evitar el uso irracional de los recursos. Las comunidades agrarias necesitan asesoría para modernizar sus técnicas productivas, de tal manera que no degraden las tierras realizando el mismo cultivo año tras año, y que asimilen el uso de los fertilizantes, la rotación de cultivos y las técnicas de almacenamiento de agua.

Los efectos económicos de la sequía son, por tanto, influenciados por la etapa de desarrollo económico de un país, pues los menos desarrollados o las economías de subsistencia con grandes sectores agrícolas son inmediatamente afectados por la sequía. El resultado es una declinación en el producto nacional bruto (PNB), las exportaciones

agrícolas, las posibilidades de empleo y el poder adquisitivo doméstico. El resto de la economía tiende a ser afectada y en menor proporción. Una situación similar se presenta en los países que tienen sectores extractivos grandes (mineros) poco ligados con otros sectores tales como el agrícola. Por tanto, es en la agricultura y los sectores relacionados, incluyendo la silvicultura y la industria del pescado, donde hay mayores efectos, debido a que estas actividades se abastecen de agua superficial y subterránea, además de las pérdidas ocasionadas en la producción agrícola y ganadera.

La sequía representa uno de los disparadores naturales más importantes para la desnutrición y el hambre, el cual constituye un problema significativo y extenso en muchas partes de África y en otros países también. Las muertes que resultan del hambre se atribuyen a veces únicamente a la sequía, sin tomar en cuenta otras causas como las guerras o conflictos civiles.

Medidas de mitigación contra las sequías

Sin duda, en la mayoría de los países en los que la sequía ocurre con más frecuencia, se han utilizado diversos métodos y medidas para defenderse de ellas pero, evaluando dichas medidas, se puede afirmar que, en la mayoría de los casos, éstas han carecido de fundamento o no han estado bien consolidadas.

Algunas de tales medidas fueron improvisadas y los pasos para su aplicación se dieron principalmente *a posteriori*, en lugar de ser preventivas y las acciones más bien perseguían salvar la situación en el momento, logrando sólo resultados parciales. Para aprender lo más posible de las experiencias pasadas sobre las medidas de mitigación de las sequías, es indispensable recoger y analizar correctamente estas medidas y evaluarlas para llegar a la conclusión más inteligente posible (Vermes, 1997).

Es un hecho comprobable que la sociedad, por lo general, se encuentra mal informada y poco preparada para afrontar una situación de sequía. El público y los responsables de la toma de decisiones tienden a ocuparse preferentemente de los problemas cotidianos y

de los que más les presionan, y aquellos otros poco frecuentes o inesperados, como son los causados por la sequía, suelen contemplarse muy por encima, hasta que suceden de nuevo y entonces, atraen la atención de todo el mundo.

Una vez pasada la sequía es frecuente que se olvide y que se vea como algo poco probable que vuelva a ocurrir. De hecho, el comportamiento social está influido no sólo por los hechos, sino también por los sentimientos y las creencias. Siempre se piensa que la próxima sequía (como cualquier otro desastre o peligro natural) no será tan grave como la anterior, actitud que es también común entre los agricultores y que, por desgracia, tienden a imitar los responsables de la planificación y de la toma de decisiones.

En algunos países se han propuesto diversas medidas para combatir las sequías; éstas se pueden reunir en dos grandes grupos: estructurales y no estructurales. Las estructurales se refieren a construcciones y obras de ingeniería que ayudan a controlar y distribuir el agua, para optimizarla en época de sequía. Entre estas obras se encuentran presas, tanques de almacenamiento, sistemas de abastecimiento de agua potable, plantas de tratamiento de aguas negras, perforación de pozos, canales revestidos y sistemas de riego. Las presas son las obras de ingeniería de mayor importancia para almacenar agua, seguidas por las plantas de tratamiento de aguas negras, las cuales pueden ser utilizadas para el riego, para ciertas industrias, uso sanitario y jardines. De forma general todas estas obras de ingeniería para mitigar las sequías son costosas y por sí solas no son una solución que las evite, ya que son más bien el complemento de otras acciones. Las no estructurales son acciones que se adoptan antes y durante la sequía para disminuir sus efectos negativos; pueden ser socioeconómicas, legales, de planeación y se refieren sobre todo a reglamentar el uso del agua.

Además, existe otra forma de clasificación de las medidas de mitigación para la sequía (Campos, 1996), apoyadas en las acciones institucionales, que pueden ser: reactivas, y preventivas o prospectivas. Las medidas reactivas se aplican durante el evento e implican que

las personas hagan algo para reducir los efectos, como por ejemplo, racionar el uso del agua para la población y la agricultura, programas de emergencia de apoyo a los campesinos y ganaderos, redistribuir el agua en las diferentes actividades económicas con base en su importancia, sin olvidar que el primer lugar lo ocupa el uso doméstico de la población. La medidas preventivas o prospectivas se instauran mucho antes de que ocurra una sequía, básicamente con el objetivo de crear una cultura del cuidado del agua en la población; las acciones que se incluyen pueden ser: programas en las escuelas para promover el uso y conservación de los recursos naturales, incluida el agua; reparto de folletos a la población en general; aplicar técnicas de riego que reduzcan la cantidad de agua empleada en la agricultura; introducción de un tipo de ganado o cultivo mejor adaptado al clima del lugar; entre otras.

Para afrontar adecuadamente los problemas más críticos de la sequía, es esencial planificar todas las adaptaciones, modificaciones y prácticas cuya activación pueda ser necesaria en la lucha contra este fenómeno: *a)* la gravedad del impacto se relaciona con el déficit de lluvias, el nivel de las precipitaciones, el periodo de duración, el área de erosión de la superficie del terreno y la extensión de la región climática desértica; *b)* la sequía cambia el entorno bioclimático de la región y las condiciones del agua subterránea.

Debido a que la sequía sucede en casi cualquier clima, es necesario desarrollar planes para reducir su impacto (Wilhite, 1990b). El Centro Nacional para la Mitigación de la Sequía de la Universidad de Nebraska, Estados Unidos, ha desarrollado una propuesta que ha sido revisada y actualizada en varias ocasiones para incluir las diversas experiencias estatales, nacionales e internacionales en el proceso de planeación ante el problema de las sequías. También se han incorporado las experiencias en prevención y mitigación de sequías, talleres sobre planeación ante sequías y técnicas de análisis de riesgo para reestructurar la metodología de planeación ante tales eventos.

Con todas sus tendencias perturbadoras, la sequía es una característica natural del clima. Las sequías llegan y se van, y lo que

queda es un impacto y degradación sobre los suelos, animales y vegetación. Las primeras lluvias traen un nuevo sentimiento de seguridad y la sociedad reanuda su armonía con el estado del tiempo, hasta que la lluvia vuelve a faltar. Es curioso que en el intervalo de tiempo entre una sequía y otra la gente se olvide de su prevención, en vez de prepararse para cuando llegue una nueva. Debiera, pues, implementarse un "plan de acción" para el futuro y realizar investigación, vigilancia y predicción de la evolución atmosférica que pudiera desembocar en una nueva época de sequía, pues es necesario reconocer las enormes pérdidas causadas por las sequías.

Quizá uno de los retos más grandes en la planeación ante una sequía es la comunicación efectiva entre los grupos apropiados, en donde tres grupos requieren ser involucrados: climatólogos y demás profesionales afines, quienes monitorean la cantidad de agua disponible en el momento y en el futuro predecible (Comité de Monitoreo); administradores de recursos naturales y demás personas, quienes determinan cómo la carencia de agua está afectando los diversos intereses, como la agricultura, el abastecimiento urbano, etc. (Comité de Evaluación de Riesgo); funcionarios de alto nivel que toman decisiones, que tienen la autoridad para actuar con base en la información que reciben acerca de la disponibilidad de agua y los efectos de la sequía (Comisión para la Sequía). La coordinación de estos tres grupos es parte central de un plan exitoso para la sequía. El plan para enfrentar una sequía de acuerdo con el Centro de Mitigación de la Sequía, consiste en los siguientes pasos.

Paso 1: Integrar una comisión para la sequía

El proceso de planeación se inicia con el nombramiento de una comisión para la sequía, que depende directamente del gobierno de la entidad federativa correspondiente. Esta comisión tiene dos propósitos: supervisar y coordinar el desarrollo del plan para la sequía.

Una vez que se ha desarrollado el plan y durante el periodo en que el plan se encuentre activo, la comisión coordina las acciones,

implementa programas de mitigación y de respuesta, y emite recomendaciones de planes de acción al gobernador.

La comisión debe reflejar la naturaleza multidisciplinaria de la sequía y sus impactos, y debe incluir representantes de las dependencias gubernamentales estatales y federales y universidades (por ejemplo, climatólogos, especialistas en planes de acción, planeadores, entre otros).

Paso 2: Definir el propósito y los objetivos del plan para la sequía

Como primera acción oficial, la comisión para la sequía debe presentar el plan para la sequía, el cual busca reducir los impactos de la sequía al identificar las principales actividades, grupos o regiones en riesgo, y promover acciones de mitigación y programas para alterar estas vulnerabilidades. El plan está dirigido para proveer al gobierno de medios efectivos y sistemáticos de evaluación de las condiciones de la sequía, desarrollar acciones y programas de mitigación para reducir el riesgo antes de que ocurra la sequía, y desarrollar opciones de respuesta que minimicen el impacto devastador en la economía, en el medio ambiente y en la sociedad durante el periodo de sequía.

Paso 3: Buscar la participación de los usuarios y resolver los conflictos entre ellos

A medida que los recursos de agua escasean, los diversos intereses sociales, económicos y ambientales se confrontan ante la intensificación de la competencia por el vital recurso. Por lo tanto, es importante que los miembros de la comisión para la sequía identifiquen a todos los grupos ciudadanos y sus intereses, que vayan a ser afectados por el plan para la sequía. Estos grupos deben ser involucrados temprana y continuamente para lograr una representatividad justa, además de lograr una planeación y administración efectiva de la sequía.

Paso 4: Levantar un inventario de recursos e identificar los grupos en peligro

La comisión para la sequía requiere contar con un inventario de los recursos naturales, humanos y biológicos, incluyendo la identificación de las restricciones que pueden impedir el proceso de planeación. Los recursos humanos deben contemplar el trabajo requerido para desarrollar recursos de agua, tender tubería, transportar el agua y alimentar a los animales, procesar las quejas ciudadanas, proveer asistencia técnica y dirigir a los ciudadanos hacia los servicios disponibles.

También es necesario identificar las restricciones en el proceso de planeación y en la activación del plan en respuesta a una sequía en evolución. Estas restricciones pueden ser físicas, financieras, legales o políticas.

Paso 5: Desarrollar una estructura organizativa y preparar un plan para la sequía

Este paso describe el proceso de integración de los comités relevantes para desarrollar y escribir el plan para la sequía y desarrollar la estructura organizativa necesaria para poder desempeñar sus responsabilidades. El plan para la sequía debe contar con tres componentes primarios: *monitoreo, evaluación del peligro, mitigación y respuesta.* Se recomienda que se integren comités para concentrarse en las primeras dos componentes; la función de mitigación y respuesta en muchos casos la puede desempeñar la comisión para la sequía.

Estos comités tendrán sus propias tareas y metas, pero es una necesidad contar con un buen flujo de comunicación e información entre los comités y la comisión para la sequía a fin de asegurar una buena planeación.

La comisión para la sequía se compone de expertos elaboradores de planes de acción de las diversas dependencias estatales y federales. El grupo debe estar en excelente posición para recomendar y/o implementar acciones de mitigación, solicitar asistencia a través de los varios programas federales, o recomendar planes de acción a la legislatura o al gobernador.

Responsabilidades específicas de la Comisión para la Sequía

1. Determinar las acciones de mitigación y respuesta para cada uno de los principales sectores de impacto, en colaboración cercana del comité de evaluación de riesgos. De esta forma, la comisión de la sequía debe plantear dos recomendaciones para enfrentar la sequía en dos escalas de tiempo:

a. Respuestas a corto plazo para implementarse durante la sequía, como guías de conservación de agua voluntaria, un teléfono de contacto público, procedimientos administrativos fluidos para evaluar aplicaciones de asistencia en las emergencias y producir materiales de difusión sobre mejores prácticas de administración para los productores agrícolas y ciudadanos.

b. Proyectos de mitigación de la sequía a largo plazo, como programas de educación para proporcionar al diverso auditorio los fundamentos necesarios para que puedan entender los reportes de sequía o los índices de sequía científicos; programas para convencer a la gente de que adopte medidas para mejorar el contenido orgánico del suelo, conserven agua, y de otra forma incrementen la resistencia de los sistemas naturales y sociales que son vulnerables a la sequía.

2. Contar con un inventario de todos los programas y formas de asistencia del gobierno local, estatal y federal en el caso de una sequía severa. La comisión para la sequía deberá evaluar estos programas y los apropiados que son para atender emergencias de corto plazo y vulnerabilidad ante la sequía a largo plazo. La asistencia se debe definir de una manera amplia para que abarque todas las formas disponibles de programas técnicos, de mitigación y de ayuda.

3. Trabajar con los comités de monitoreo y evaluación de riesgo para establecer indicadores. El comité de monitoreo puede aconsejar a la comisión para la sequía sobre cuáles índices de sequía y de reserva de agua son más relevantes para el estado o una región. Es útil establecer una sucesión de términos descriptivos para las alertas de

niveles de reserva de agua, tales como "advertencia", "alerta", "emergencia" y "racionamiento" (en vez de términos más genéricos como "fase 1" y "fase 2", o términos sensacionalistas como "desastre").

4. Establecer diversas áreas de administración de la sequía. Esta subdivisión es útil en la administración de sequías pues permite que se regionalicen las etapas de la sequía y las opciones de mitigación y respuesta. La comisión para la sequía deberá desarrollar una página de Internet para difundir información sobre monitoreo de la sequía y para dar a conocer el plan para ésta.

Comité de monitoreo

Una información muy valiosa en periodos secos y periodos húmedos, es una evaluación confiable del agua disponible y el pronóstico a corto y a largo plazo. Durante una sequía esta información es crítica. El comité de monitoreo debe incluir representantes de las dependencias cuya responsabilidad es la de monitorear el estado del tiempo y las reservas de agua. Es recomendable que los datos y la información de cada uno de los indicadores apropiados (por ejemplo precipitación, temperatura, evapotranspiración, pronósticos de tiempo de largo alcance, humedad de suelo, flujo de ríos, niveles de presas y capa de nieve) se consideren en la evaluación del comité sobre la situación del agua y se haga el pronóstico estatal.

El comité de monitoreo deberá reunirse periódicamente, en especial antes de la época de demanda pico. Después de cada reunión se deben preparar reportes y darlos a conocer a la comisión para la sequía, a las dependencias estatales y federales relevantes, y a los medios de comunicación.

Medidas de mitigación en Australia

Australia es un territorio árido con alta variabilidad en su lluvia anual, lo que origina severas y frecuentes sequías con sus consecuentes

costos financieros y sociales para la nación y sus habitantes, además de la potencial degradación del suelo.

En Australia la sequía no es un asunto de vida o muerte como ocurre en los países de agricultura de subsistencia. Sin embargo, los problemas que se requieren enfrentar en el manejo de la sequía son similares, a pesar de que cada país presenta situaciones diferentes. Por tanto, las principales intenciones de la propuesta australiana se pueden resumir de la forma siguiente.

La sequía es aceptada y reconocida como un factor normal del clima de Australia, el cual debe ser considerado como parte de un riesgo agrícola normal en la toma de decisiones, más que como la crisis de un desastre natural. Se requiere de suficiente información que sea la base de las decisiones; además de una política apropiada, institucional, y otros preparativos para la valoración, comunicación y aplicación de la información, se requiere una aproximación interdisciplinaria que proporcione una apreciación completa del problema. Asimismo, la efectividad en el manejo del riesgo por sequía ha sido reconocida como algo que debe ser investigado a detalle para que tengan información quienes toman las decisiones dentro de un contexto completo de planeación agrícola.

Para que este cambio de dirección sea exitoso, los gobiernos estatales y el nacional deben reconocer que será necesario cambiar las actitudes y comportamientos arraigados de los agricultores a través de medidas que los acerquen al conocimiento de la sequía. Como ejemplo, la política nacional de sequía en Australia de 1992 estableció los objetivos sobre la manera de enfrentarla, y éstos fueron: *a)* estimular a los productores y otros del sector rural de Australia para adoptar una mayor confianza en el manejo de esta variabilidad meteorológica; *b)* en situaciones climáticas extremas, mantener y proteger la agricultura australiana y la base de los recursos ambientales durante esos periodos de mayores efectos, y *c)* asegurar la pronta recuperación de la agricultura y las agroindustrias, para mantener niveles de sustentabilidad de largo plazo.

Medidas de mitigación en México

La sequía en la historia de México ha estado siempre presente, por eso desde épocas remotas se han buscado acciones para combatirla. Florescano y Swan (1995) agrupan en tres tipos las estrategias que se han tomado para combatir la sequía en México desde la época prehispánica. En el primer grupo se tienen las medidas que tienden a influir directamente en el estado del tiempo, como los actos mágicos, las rogativas a dioses o santos, hasta la aplicación de técnicas más sofisticadas, como la provocación de la lluvia mediante el uso de tecnologías más avanzadas.

En el segundo grupo se consideran aquellas acciones encaminadas a controlar el resultado de los fenómenos ambientales como son la construcción de presas, bordos, pozos, los sistemas de riego y las investigaciones avanzadas dirigidas a seleccionar y mejorar semillas más resistentes a la sequía mediante estudios de genética.

El tercer grupo, relacionado con las políticas para disminuir los efectos de la sequía en la vida social, incluye la construcción de bodegas para el almacenamiento adecuado de granos, establecimiento de controles de precios, importación de granos básicos y diferentes formas de ayuda a la población afectada por las crisis agrícolas.

En las regiones áridas y semiáridas de México, de acuerdo con Velasco Molina (1995), se han empleado trece formas de abastecimiento de agua para el consumo humano durante todo el siglo XX, consideradas también como formas de mitigación de la sequía; entre ellas se encuentran: los estanques, las norias de cubos, el agua de techos, los aljibes, las ollas de agua, los molinos de viento y guimbaletes, los manantiales, el agua transportada, los pozos equipados con bomba, las trampas de agua de lluvia y techos de cuenca, las plantas desaladoras, las plantas solares y los sistemas de compartimientos. De todas estas formas de abastecimiento de agua, el estanque o presa de tierra sigue siendo la fuente más usada y la más segura, a pesar de ser la más rudimentaria y menos higiénica de todas, sin embargo, algunas de las otras podrían ser mejoradas, e inclusive modificadas, pues son, en muchas ocasiones, las únicas alternativas ante la sequía. En este

sentido, la recolección de agua de techos debería ser una medida obligada en todos los lugares de las regiones de baja precipitación del país. Ésta, como otras formas de almacenamiento de agua, son urgentemente necesarias en las enormes y sedientas regiones de México.

Una propuesta para almacenar agua son los silos de acrilato de potasio, producto plástico que tiene la capacidad de absorber gran cantidad de agua (se le conoce como silo de agua porque cumple la misma función de almacén que un silo de campo para los granos, además de reducir la erosión del suelo, la contaminación de los mantos acuíferos y disminuir hasta en un 50% el uso de agroquímicos). En México, es la primera vez que se introduce como material para almacenar agua de lluvia y guardarla en costales. Esta nueva tecnología ha llegado al desierto de Sonora y a entidades como Baja California, Chiapas, Tabasco y Zacatecas (Rico, 2004).

En el caso particular de Chihuahua y otras entidades del norte, noreste y noroeste de México, la sequía trastoca la economía regional en casi todos los niveles. Sin embargo, los devastadores efectos de la prolongada ausencia de lluvias serían menores de haberse administrado racionalmente los recursos acuíferos almacenados en las presas. La poca prevención y el despilfarro abren las compuertas hacia un agotamiento de las reservas, lo que acaba convirtiendo a las regiones en zona de desastre. Porque, además de las deficientes lluvias, lo que ha faltado en el país es una adecuada política de manejo del agua.

La CNA, a través del *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*, establece la necesidad de prevenir los riesgos y atender el impacto económico, político y social que generan los cambios meteorológicos extremos en México. Reconoce, a su vez, que la manera más efectiva de afrontar las sequías es a través de medidas de prevención, como la elaboración de planes estratégicos en los que se incluya un proceso estructurado, dinámico, flexible y viable; además de contar con un fondo para desastres (FODEM), con el cual se pueda proporcionar ayuda de inmediato.

Cuando la severidad y extensión de algunas sequías es mayor, el gobierno federal declara a las áreas donde éstas ocurren como zonas de desastre; así, los programas de emergencia se inician para mitigar sus efectos. En estos casos, la CNA coordina el uso del agua, trabaja con agencias de los estados y municipios afectados para disminuir los daños, permitiendo así que las condiciones regresen a la normalidad lo más pronto posible.

Al inicio del año agrícola, la CNA pone la cuota de agua que debe ser utilizada en cada distrito de riego, especialmente en aquéllos que cuentan con suministros de presas y represas. Las cuotas son hechas con base en las evaluaciones previas y el análisis de los requerimientos, así como también en las condiciones actuales y el pronóstico hidrológico de la estación invernal. Si las condiciones no son favorables, se restringe la superficie de área cultivada y se determina el volumen de agua a utilizar. Para finales de marzo, la situación actual y de los siguientes meses es evaluada con base en las condiciones ambientales y los programas de cultivo de primavera-verano, para realizar los ajustes pertinentes. Esto constituye el manejo de riesgo, porque se intentan mitigar los efectos negativos de una posible falta de agua.

Durante el curso del año, si ocurre un déficit o es mayor a lo esperado, las medidas comunes de mitigación son el racionamiento del agua y programas que promuevan su uso eficiente. Para complementar estas medidas, la CNA apoya a los usuarios del agua y a los gobiernos estatales y municipales, quienes llevan a cabo la tarea, de tal manera que las condiciones socioeconómicas de la población sean afectadas lo menos posible –especialmente los sectores de la población que tienen pocos recursos y quienes tienen su ingreso regularmente de actividades relacionadas con la agricultura: jornaleros, operadores de tractores, recolectores y peones.

Ciertamente, los pequeños agricultores son también beneficiados con estos programas, pero el objetivo básico es que ellos sufran los menos cambios y mínimos daños posibles. Desafortunadamente, este objetivo no siempre es logrado, y, en condiciones extremas, aun los más ambiciosos programas son insuficientes para mitigar los efectos.

A pesar de eso, no tomar ninguna acción podría tener más consecuencias desastrosas y el tiempo de recuperación sería mayor (Velasco, 1999).

Para que los planes sean exitosos, su conceptualización y aplicación deben llevarse a cabo en los consejos de cada cuenca hidrológica. De igual manera, uno de los mecanismos para combatir ambos fenómenos sería fomentar la eficiencia y productividad de las zonas de riego (se estima en 50%), al tiempo de lograr el uso y aprovechamiento pleno de la infraestructura disponible. Actualmente, se cuenta con 6.3 millones de hectáreas con riego; en 90% de esta superficie se utiliza el sistema de gravedad y en muchos casos se emplean métodos de inundación sin control que propician baja eficiencia y el desperdicio del agua.

Las acciones específicas de estos programas incluyen: protección y apoyo a jornaleros, y perforación de pozos profundos y estaciones de bombeo, recolección del agua de lluvia (se prepara el suelo para capturar y mantener el agua de lluvia), donde es posible realizar la sustitución de cultivos de otoño-invierno por cultivos de primavera-verano y la formación de grupos que vigilen el uso del agua.

Estas acciones, las cuales deben ser ejecutadas por las asociaciones de usuarios de agua, ayudarán a sostener parcialmente los ingresos de la población local. Deben generarse trabajos para la gente del campo, así como ayudar a disminuir la migración, para evitar un mayor empobrecimiento y controlar los problemas sociales.

Finalmente, la sequía que continúa afectando a varios estados del norte del país, junto a la problemática por el adeudo de agua que México tiene con Estados Unidos (derivada del Tratado Internacional de Aguas de 1944), constituyen dos graves problemas que invitan a reflexionar sobre el cuidado y protección de los recursos hidrológicos del país.

La Comisión Nacional de la Zonas Áridas (CONAZA) surgió como una respuesta a la necesidad de procurar la mejora de las condiciones de vida de la población localizada en comunidades rurales dentro de las regiones áridas y semiáridas, e incrementar el aprovechamiento

racional de los recursos naturales en ellas ubicadas, así como para el control de la desertificación. Entre los objetivos específicos que tienen relación con el agua o, en su defecto, con la sequía, está el de satisfacer las necesidades de agua para uso humano, así como mejorar el entorno de las comunidades rurales de las regiones áridas.

Una de las formas para contrarrestar el problema de la sequía en México es la aplicación de recursos económicos; por ejemplo, en el 2001, la Secretaría de Hacienda proporcionó al estado de Chihuahua recursos por un monto de 160 millones de pesos para la perforación de pozos y la conexión a la red de distribución doméstica, del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) y paliar la falta del líquido en al menos 70 comunidades urbanas y rurales (CNA; *El Universal*, domingo, junio 17, 2001).

IX. EL PRONÓSTICO DE LAS SEQUÍAS

La sequía produce diversos efectos y se cuenta con diversas medidas para reducirlos; algunos investigadores se han enfocado a analizar su comportamiento en el tiempo y a caracterizar sus posibilidades de ocurrencia, lo que ha permitido el desarrollo de métodos para su pronóstico. Por tanto, en este capítulo se mostrarán algunos ejemplos de ello.

En épocas anteriores, las predicciones se fundamentaban en observaciones locales de signos y señales como el aspecto del cielo y de la naturaleza, las variaciones del viento, sucesos fenomenológicos como la llegada de la primer ave migratoria o la caída de las hojas de los árboles, entre otros, todos ellos analizados en forma intuitiva por la experiencia y transmitidos de generación en generación.

A finales del siglo XIX y principios del XX, la comunidad científica se avocó al estudio del pronóstico del estado del tiempo, gracias a la invención de distintos instrumentos, aparatos de observación y medición e instalación de redes locales de observación.

Entre 1985 y 1994, se implementó el proyecto Sistema Océano-Atmósfera Tropical (TAO, por sus siglas en inglés), integrado por 70

boyas ancladas y distribuidas en el Pacífico ecuatorial, que constituyen uno de los más importantes sistemas de advertencia mundial, las cuales toman información completa en tiempo y espacio sobre las anomalías de los vientos, la temperatura superficial del mar y los cambios de la termoclina que caracterizan a El Niño.

Hoy día, además, se tienen satélites artificiales meteorológicos alrededor de la Tierra que realizan observaciones continuas de su atmósfera y su superficie, y toman y trasmiten información e imágenes de los distintos parámetros atmosféricos y oceánicos. La OMM es la encargada de la coordinación de los programas mundiales para operar la red mundial de todos estos datos.

También en épocas recientes esta capacidad de observación de la atmósfera y el océano aumentó considerablemente con la entrada en operación de satélites que detectan cambios en la temperatura superficial del mar, la vegetación continental y la producción primaria de los océanos, como el satélite TOPEX/Poseidón, de una misión franco-estadounidense, que fue puesto en órbita en agosto de 1992, y el cual es capaz de medir el aumento del nivel de la superficie del mar y trasmitir información acerca de la circulación oceánica, aspectos muy importantes para el desarrollo del fenómeno de El Niño. (Dejó de funcionar en enero de 2006, y a partir de 2001 Jason lo sustituyó.)

En este momento, la predicción se realiza para distintos periodos de tiempo: corto, mediano y largo plazo. En general, se puede decir que todo pronóstico tiene cierto grado de incertidumbre. En sí, sólo es posible pronosticar de forma determinista las condiciones de la atmósfera a menos de quince días.

En las predicciones a corto plazo (uno o dos días), se desea conocer en qué regiones del país lloverá o hará frío, dando valores precisos a cada una de las variables en el espacio y el tiempo. Hasta 1950 prácticamente todas las técnicas científicas de predicción seguían el llamado "método sinóptico", que consiste en tratar de elaborar, a partir de un mapa sinóptico del tiempo, otro mapa similar válido para las horas siguientes y deducir del mismo las condiciones meteorológicas que cabe esperar de la nueva situación; con ello se intenta

determinar el desplazamiento y la evolución de los sistemas atmosféricos identificados, desde luego considerando, en gran medida, las habilidades y experiencia personal del pronosticador.

Durante los siguientes años, el desarrollo del pronóstico numérico del estado del tiempo no avanzó; este resultado hizo suponer al matemático y meteorólogo Edward Lorenz, desde principios de los años sesenta, que el problema radicaba en la naturaleza misma de la atmósfera y no en la capacidad de los modelos numéricos o las computadoras, es decir, en el caos propio de los fenómenos de la atmósfera (Reyes, 2001).

Con el desarrollo de los modelos matemáticos y las nuevas tecnologías, se generó otro método, el de la predicción numérica, cuyo objetivo es considerar la circulación atmosférica como un problema termodinámico y de mecánica de fluidos, donde el fluido a examinar, en este caso el aire, es de densidad variable, tiene un calentamiento desigual y, además, está sometido al influjo de la rotación terrestre y al rozamiento con el suelo.

El pronóstico tiene como punto de partida el análisis detallado, sobre una extensa área geográfica, del estado de la atmósfera en un momento determinado (esto es lo que corresponde al tiempo = 0), y a partir de él se predice el estado correspondiente a veinticuatro horas más tarde (t=24) mediante la resolución numérica de ecuaciones básicas de la física del aire, que permiten conocer los futuros valores de temperatura, presión, densidad y velocidad del viento (Cuadrat *et al.*, 1997).

Existen varios modelos atmosféricos que difieren entre sí por su grado de complejidad: el modelo barotrópico y baroclínico.

En las predicciones de largo plazo se trata de determinar la probabilidad de que las condiciones climáticas medias en una región del planeta se vean alteradas en un cierto porcentaje. Esto es, en las predicciones del clima se habla de anomalías en lluvias o temperatura, es decir, de valores por arriba o por debajo de la media.

Para este tipo de pronósticos se siguen varios métodos:

a) Estadístico. Se basa en el análisis estadístico del comportamiento de la atmósfera, expresado en forma de ecuaciones de regresión, probabilidades, analogías, entre otros, tratando de encontrar las periodicidades que permiten un pronóstico a partir de datos del momento.

b) Por analogías. Se fundamenta en la hipótesis de que las condiciones atmosféricas actuales evolucionarán de igual manera que lo hicieron situaciones análogas en el pasado; el problema consiste, pues, en hallar una situación lo más similar posible al presente y en utilizar la secuencia del tiempo que tuvo lugar en esa ocasión como guía para predecir el futuro.

c) Dinámico. Este método engloba varios procedimientos con diversos enfoques, que intentan conocer la respuesta de la atmósfera a los cambios probables de factores externos como la humedad del suelo, cubierta de nieve, hielo marino, anomalías de la superficie del mar, entre otros más.

En la actualidad, la investigación en el área de dinámica de fluidos geofísicos, el rápido desarrollo en el campo de la computación y los programas mundiales de observaciones meteorológicas, han permitido contar con análisis globales y continuos de los fenómenos que ocurren en la atmósfera en diversas escalas de espacio y tiempo, lo que ha permitido rápidos avances en la modelación numérica de la atmósfera y en el establecimiento de sólidos esquemas de pronóstico operativo del tiempo.

En nuestro país, los estudios sobre modelación numérica de la atmósfera evolucionaron lentamente; el principal ejemplo es el llamado Modelo Termodinámico del Clima (MTC), desarrollado por Julián Adem (en 1964), del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este modelo se fundamenta principalmente en considerar la energía que entra (onda corta) y que es re-emitida al espacio (onda larga). Considera parametrizaciones de los procesos que alteran el albedo y la emisividad del planeta.

En la misma institución, el grupo de Meteorología Tropical también trabaja con modelos de circulación regional como el *Comunity Climate Model* Versión 3 (CCM3) desarrollado por el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), con el fin de analizar las sequías en el país.

Hoy día, este grupo utiliza la información climática en términos probabilísticos para la generación de escenarios climáticos. También implementó un modelo de mesoescala más completo (y complejo), que permite simulaciones de gran variedad de procesos atmosféricos observados sobre el territorio nacional; este modelo fue desarrollado por Anther y Warner en la Universidad Estatal de Pennsylvania y enriquecido con los trabajos del NCAR, y dieron origen a una quinta generación de éste, ahora como modelo de mesoescala 5 o o MM5 (Magaña y Pérez, 1998).

En la actualidad, el sistema MM5 es utilizado tanto para investigación como para trabajo operativo en grandes centros de pronóstico. En la mayoría de los casos, el MM5 funciona en ambientes de supercómputo, aunque existen algunos desarrollos para estación de trabajo. Incluso, ya se trabaja para que el sistema MM5 completo pueda ser utilizado en una computadora personal de alta capacidad. Desde luego, los tiempos que tome el modelo para las simulaciones son proporcionales a la capacidad del equipo. El MM5 se utiliza como el modelo operativo de pronóstico numérico del tiempo para el país, en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Para realizar pronósticos operativos en tiempo real, se utilizan como condiciones iniciales los análisis globales generados en NOAAA mediante modelos de circulación general de la atmósfera que pronostican el tiempo a 72 horas. Los campos meteorológicos que estos modelos entregan son de baja resolución (aproximadamente 300 x 300 km). El sistema MM5 utiliza el campo inicial que corresponde al análisis de observaciones más recientes, y toma además los pronósticos que estos modelos generan para disponer de condiciones a la frontera cada 6 o 12 horas. Mediante DATAGRID, los campos de vientos, temperatura, humedad, altura geopotencial, presión de superficie y a

nivel del mar, así como temperaturas de superficie del océano, son interpolados a la malla de alta resolución (120 x 120 km) en el dominio de interés y, subsecuentemente, a coordenadas sigma. Los pronósticos con MM5 se realizan a 24 y 48 horas. La variable de mayor interés es la precipitación.

En términos generales, el modelo es capaz de reproducir el patrón y el orden de magnitud de la lluvia. Sin embargo, algunos investigadores indican que es necesario trabajar en aspectos relacionados con la parametrización de nubes cúmulos y en los campos de humedad analizados en la región tropical para que las simulaciones mejoren.

Actualmente se realizan evaluaciones al pronóstico numérico a través del análisis de lluvia y temperatura de superficie, para compararlos con los generados en el pronóstico, o a través de la comparación de los radiosondeos que se realizan sobre la República Mexicana con los perfiles meteorológicos generados por el modelo.

Algunos de los experimentos que han realizado investigadores en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM), para entender la variabilidad climática en México, están relacionados con la ocurrencia de El Niño. También han realizado simulaciones con el MM5, alimentado con datos de gran escala observados, y que parecen reproducir los patrones de lluvia mensual acumulada, aunque difieren en la magnitud. Este grupo de investigadores agrega que se tiene un caso similar cuando el MM5 es alimentado por un modelo de circulación general como el *Comunity Climate Model* versión 3 (CCM3), desarrollado en NCAR, y utilizado en el CCA-UNAM para estudios climáticos. Las investigaciones sobre procesos de dinámica de la atmósfera a escala regional se han visto beneficiados por el desarrollo de modelos numéricos de mesoescala (Magaña, 1998b).

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) se han analizado los factores que afectan las variaciones del clima del planeta a muy largo plazo y también se han llevado a cabo experimentos con el modelo CCM3. Respecto a este modelo, se le han hecho varias modificaciones que permiten realizar predicciones estacionales del clima.

El Centro de Investigaciones y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE) efectúa trabajos en materia de modelación del clima regional para simular los efectos de los frentes fríos y los eventos de precipitación extrema en el noroeste de México. Los avances están encaminados a la utilización de modelos de mesoescala para regionalizar salidas de modelos de mayor escala.

El SMN es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país; depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Los objetivos del SMN se concentran en la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológicos que pueden afectar las distintas actividades económicas y, sobre todo, originar la pérdida de vidas humanas, además de realizar el acopio de la información climatológica nacional.

Desde hace varios años, el SMN ha realizado predicciones estacionales del clima, basadas en el método de análogos, en particular para la predicción de precipitaciones. Esta información se incluye en el portal de la institución y es actualizado cada mes. Se planea desarrollar y usar herramientas para el pronóstico, como los modelos numéricos tipo CCM3.

Antes del 2000, en el SMN no se desarrollaban de manera operativa actividades de monitoreo de la sequía. Algunos análisis se elaboraban de acuerdo con las necesidades del momento, para lo cual hasta esa fecha se utilizó con mayor frecuencia el método de deciles propuesto por Gibbs y Maher (1967).

Aunque México (SMN), Estados Unidos y Canadá tienen programas de monitoreo de la sequía, la cooperación y coordinación entre expertos e investigadores de los tres países ha sido limitada. Hasta el 2002, los productos del monitoreo de la sequía terminaban en las fronteras internacionales de cada país, debido a un pobre intercambio de información (datos históricos y en tiempo casi real), disponibilidad de recursos e infraestructura, así como al uso de

diferentes criterios (índices) para definir y monitorear la sequía. Estos aspectos evidenciaron la necesidad de diseñar un proyecto de colaboración entre los tres países, para realizar actividades de monitoreo de la sequía en todo el sector de América del Norte.

El Monitor de Sequía de América del Norte *(North American Drought Monitor)* es un esfuerzo compartido entre expertos de México, Estados Unidos y Canadá, y su principal objetivo es elaborar análisis de diagnóstico (¡no un pronóstico!) de la sequía en el territorio de los tres países. El proyecto tiene como antecedente el *Drought Monitor* de los Estados Unidos, y forma parte de un programa más amplio, encaminado a monitorear los eventos climáticos extremos sobre la región.

Actualmente, el mapa del Monitor de Sequía de América del Norte tiene el carácter de un producto "experimental"; conforme los procedimientos de integración de la información, las técnicas de análisis y el proceso de coordinación entre las instituciones y el grupo de trabajo maduren, el producto no requerirá más tal etiqueta. Por otra parte, el éxito del proyecto ayudará a determinar si la transición de productos mensuales a productos semanales, en la misma escala espacial, sea factible en un futuro cercano.

Las agencias participantes en el proyecto son:

- National Climatic Data Center (NCDC/NOAA)
- Climate Prediction Center (CPCNOAA)
- US Department of Agriculture (USDA)
- National Drought Mitigation Center (NDMC)
- Agriculture and Agrifood Canada
- Meteorological Service of Canada
- Comisión Nacional del Agua (CNA)
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

El primer producto se obtuvo en enero de 2003 y el análisis se actualiza cada mes (la versión en español del producto se puede consultar en el sitio: http://smn.cna.gob.mx/).

La versión en inglés del análisis, así como otros productos asociados se pueden consultar en la dirección: http://www.ncdc.noaa.gov./oa/climate/monitoring/drought/nadm/index.html.

En años recientes se han realizado Foros de Predicción Climática para todo el país, en conjunto con otras instituciones nacionales, donde se plantean las perspectivas climáticas para las épocas invernales y de verano, y además de tomar en cuenta la temperatura del mar en el Pacífico ecuatorial del este y la presencia de El Niño o La Niña, se consideran también las predicciones del Instituto Internacional para la Investigación en Predicción Climática (IRI), del Modelo Termodinámico del Clima de la UNAM (MTC), del SMN y del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Esta información se puede consultar en la página Web del SMN, donde también se pueden encontrar las expectativas de sequía.

En el capítulo VI se revisó el fenómeno de El Niño y se vio que existe una conexión entre esta corriente oceánica cálida ecuatorial, que se aproxima a veces a la zona del Perú (reemplazando a la corriente fría usual) y la siguiente estación de precipitación en el sur. Parece que esta anomalía de la corriente cálida ecuatorial tiene influencia en otras partes del mundo y está asociada con la Oscilación del Sur. Esta conexión que se ha denominado ENOS, es un tipo de teleconexión entre las condiciones climáticas en distintas regiones, que actualmente puede ser útil como un predictor de sequías en nuestro país.

Con base en lo anterior, se puede decir que en México, se está cada vez más consciente de la importancia de crear grupos dedicados a la modelación numérica para trabajar en conjunto a nivel nacional, con la finalidad de constituir un equipo de expertos que generen información climática de utilidad para quienes se encargan de planear y tomar decisiones usando pronósticos o escenarios climáticos (Magaña, 2004).

Por último, el avance en el desarrollo de los modelos de pronóstico es tal, que las predicciones del clima estacional son ya usadas en diversas partes del mundo para planear actividades como la

agricultura, el manejo del agua, la administración de la energía y muchas otras actividades. También es importante agregar que existen limitaciones en cuanto a la calidad de las predicciones de ciertos parámetros dentro de la predicción de largo plazo, que no permitirán tener sino escenarios probabilísticos de las condiciones del clima y, desde luego de la lluvia futura. Por ello, es vital aprender a utilizar esta información dentro del manejo de riesgo por sequía, para poder generar esquemas de decisiones por las diferentes partes involucradas, que permitan disminuir los impactos negativos de estos eventos.

Antes de finalizar este capítulo, es interesante mencionar el aspecto del conocimiento empírico que se tiene de los diferentes elementos del clima, que se encuentra plasmado en los conocidos dichos populares, basados en la experiencia de muchos años y que han pasado a través de numerosas generaciones. Ejemplo de este conocimiento tradicional son: "Marzo florido, es un año perdido". "Lluvias de abril granos mil" Como se ve, ¡son pronósticos de sequía o de lluvias abundantes, respectivamente!

Otro aspecto que es más de índole religiosa, corresponde a las procesiones que implicaban el traslado de la virgen de los Remedios desde Naucalpan a la Catedral Metropolitana en condiciones de sequía, principalmente, para pedirle que lloviera; esto se realizaba desde la última década del siglo XVI hasta aproximadamente la década de los años cincuenta del siglo XIX, y ¡la mayoría de la veces llovía!

área de Cambio Climático y Radiación, el doctor Carlos Gay y la doctora Cecilia Conde, junto con otros investigadores, trabajan en la comparación de las condiciones actuales y las que potencialmente se presentarían ante un cambio climático, para lo cual utilizan modelos de Circulación General (MCG) para experimentos numéricos de 1 x CO_2 (concentración de CO_2) y 2 x CO_2 (concentración de CO_2), con salidas interpoladas. Por tratarse de modelos atmosféricos, el océano y la atmósfera no interactúan durante el experimento. Para lo anterior, se emplean datos de temperatura y de precipitación, y los resultados que se obtienen son a diferentes escalas de espacio y de tiempo (aproximadamente entre los años 2075 a 2100).

La comparación entre las condiciones actuales de precipitación para una región en un determinado periodo de tiempo, y las que potencialmente se presentarían ante los cambios climáticos, permiten la identificación y la cuantificación del grado de vulnerabilidad de los lugares donde se tendrían efectos adversos por disminución del nivel de los cuerpos de agua y de la cantidad de lluvia.

El otro grupo de trabajo del mismo centro relacionado con la sequía, corresponde a la Sección de Meteorología Tropical, encabezada por el doctor Víctor O. Magaña Rueda, jefe del Departamento. Entre sus líneas de investigación, que tienen relación con el fenómeno de la sequía, destaca el estudio de la variabilidad climática del país, mediante el apoyo en modelos climáticos, los cuales permiten pronosticar que la probabilidad de la lluvia esté por arriba o por debajo de la normal, en condiciones del evento de El Niño y/o La Niña a nivel nacional, regional y estacional.

Los resultados obtenidos no indican cuánta lluvia caerá, para poder determinar las acciones a tomar ante la sequía, pero, en cambio, muestran el valor de su probabilidad, lo que constituye una información de gran valor para la agricultura y el manejo del agua,

El doctor Gustavo Garza Merodio, investigador del Departamento de Geografía Social del Instituto de Geografía de la UNAM, está implementando una línea de investigación sobre climatología histórica, considerada como una especialidad paleoclimática, basada en el

análisis de las denominadas ceremonias de rogativas, la cual ofrece un potencial muy importante, fiable y preciso para la investigación de cambios medioambientales seculares como las inundaciones, sequías, entre otros eventos.

Las fuentes de información son la documentación generada y resguardada en los archivos municipales y eclesiásticos. El registro de estas rogativas ha permitido definir la intensidad y temporalidad precisa de las anomalías climáticas detectadas. En el caso de la Ciudad de México –investigación concluida– y Morelia –investigación en proceso–, la información obtenida sólo ha sido fiable para la construcción de series de sequía

En el mismo Instituto de Geografía, la doctora Teresa Reyna Trujillo ha realizado diversos trabajos sobre la sequía intraestival en el ámbito nacional e internacional; sus investigaciones dentro del área de la agroclimatología han buscado la relación de algunos cultivos con la presencia de este evento climático.

Otro grupo de trabajo en donde también se estudia el fenómeno de la sequía, es el que desarrolla el proyecto "Gestión de Riesgos de Desastre ENOS en América Latina", en donde participa el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS) junto con otras ocho instituciones, representantes de ocho países (Perú, Argentina, Brasil, Chile, Ecuador, Colombia, Costa Rica y Estados Unidos). Este proyecto es parte del programa de redes de Investigación Cooperativa (CRN) del Instituto Interamericano para la Investigación sobre el Cambio Global (IAI). Corresponde al tema "Evaluación Integrada, Dimensiones Humanas y Aplicaciones" de la Agenda IAI.

El objetivo del proyecto es producir y difundir nuevo conocimiento científico e información sobre los patrones, las causas y la gestión de riesgos de desastre ENOS en América Latina, para facilitar la aplicación de los pronósticos y alertas tempranas ENOS; aumentar la relevancia, efectividad y eficiencia de las políticas, planes y programas de gestión de riesgos de desastre y maximizar el uso de las capacidades de investigación, trabajo en red, difusión y capacidad existentes en la región.

Entre sus resultados, se pueden mencionar una extensa bibliografía producida desde 1993 por la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina: LA RED, la cual ha publicado más de quince libros dedicados a temas claves en el campo de la gestión de los riesgos y la prevención de los desastres, el primero de los cuales lleva precisamente por título "Los desastres no son naturales" (Maskrey y comps., 1993), así como su revista científica semestral *Desastres y Sociedad*, que tiene ya en circulación nueve números. Esta bibliografía reúne contribuciones teóricas y metodológicas, análisis de casos y propuestas de política producidas, desde América Latina, y en donde desde luego están consideradas las sequías.

También a nivel internacional, instituciones de casi todos los países de Centroamérica y México han emprendido un proyecto conjunto para rescatar datos y documentos sobre el clima de la región en el siglo XIX, el cual coordinan el doctor Jorge Amador del Centro de Investigaciones Geofísicas y la Escuela Física de la Universidad de Costa Rica, y la doctora Luz Fernanda Azuela, del Instituto de Geografía de la UNAM. Uno de sus objetivos es buscar información meteorológica para disponer de un mayor banco de datos que ayude a caracterizar algunos aspectos del clima regional y así intentar comprender estos cambios pasados y, de ser posible, el comportamiento potencial del clima en un futuro próximo, particularmente en relación con las alteraciones provocadas por la emisión de gases de efecto invernadero. Entre otros productos que pueden proporcionar estos documentos históricos, se encuentran reportes referidos al comportamiento del régimen pluviométrico, en especial a los comportamientos hídricos extremos.

En el estado de Chihuahua se ubica el Centro de Investigaciones sobre la Sequía (CEISS), que es un centro regional del Instituto de Ecología (I de E), que investiga la problemática generada por la sequía en el estado para la planeación estratégica y como soporte científico-técnico del programa Chihuahua siglo XXI. Contribuye a impulsar iniciativas de gran impacto, en particular para el logro del uso sustentable del agua en el desarrollo del estado de Chihuahua y el

Norte de México. En este Centro se tienen diferentes proyectos donde se estudian algunas problemáticas de la sequía, como la relación agua-planta-suelo, la ganadería extensiva y la sequía, el desarrollo de software para análisis de sequía y eventos de sequía en el norte de México, entre otros.

XI. CONSIDERACIONES FINALES

Como se ha podido ver a lo largo del texto, la sequía tiene una compleja definición y existen muchos criterios para hacerlo, la existencia de diferentes tipos de sequía hace también poco claro entender a cuál de ellas se refieren los medios de comunicación, cuando señalan que hay un aumento de precios por la sequía, se racionará el agua por la sequía, tenemos la sequía más intensa de la historia, entre muchas otras, sobre todo en los meses previos a la temporada de lluvias. Tales afirmaciones agrandan la importancia del agua en muchas de las actividades humanas y en el ambiente mismo.

Otro aspecto también complicado de precisar son las causas que originan la sequía meteorológica en México. Nuestro país, por su ubicación geográfica, presenta regularmente sequías, lo que responde a los principales sistemas meteorológicos y a su variabilidad durante el año, así como a la influencia de otras variaciones en las relaciones océano-atmósfera.

Sin embargo, en México la distribución espacial de la sequía meteorológica puede apreciarse en los siguientes mapas (Figuras 9 y 10). En el primero, que se refiere a la sequía meteorológica por frecuencia de años muy secos y extremadamente secos, se observa que este fenómeno se presenta en la mayor parte de México,

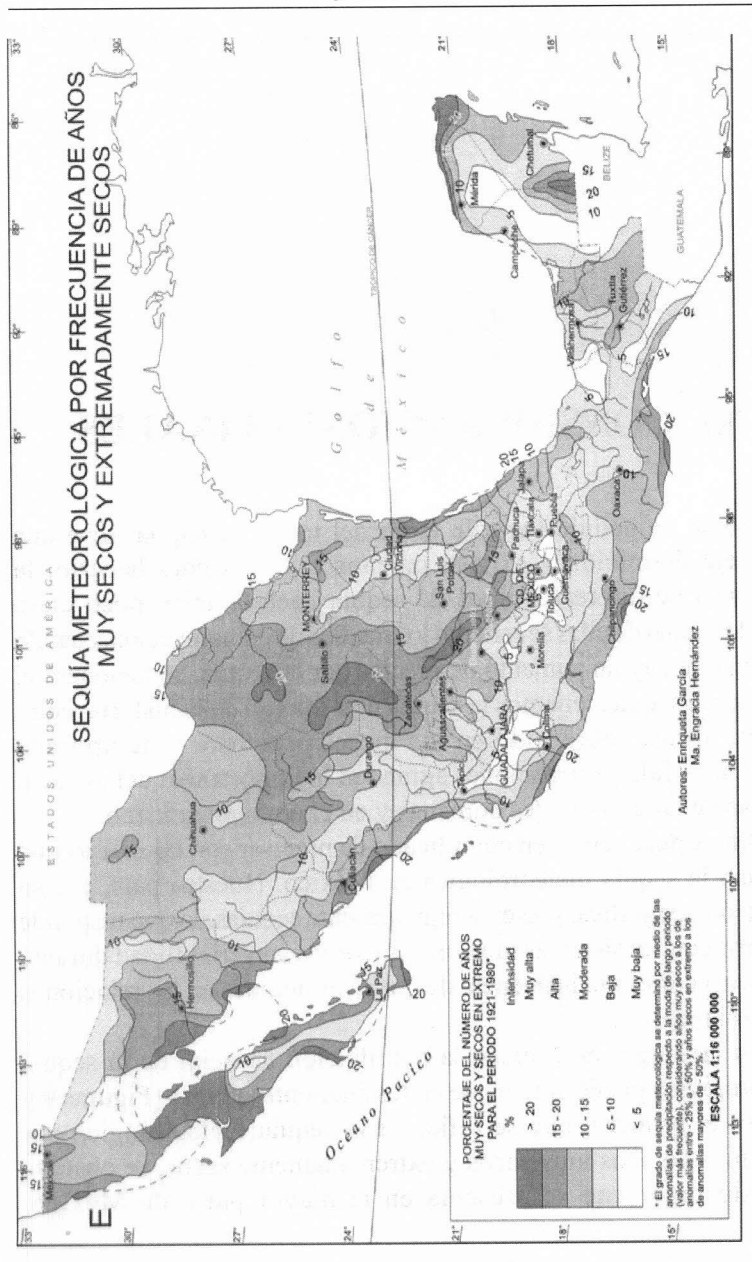

Figura 9. Sequía metereológica por frecuencia de años muy secos y extremadamente secos (García *et al.*, 1992).

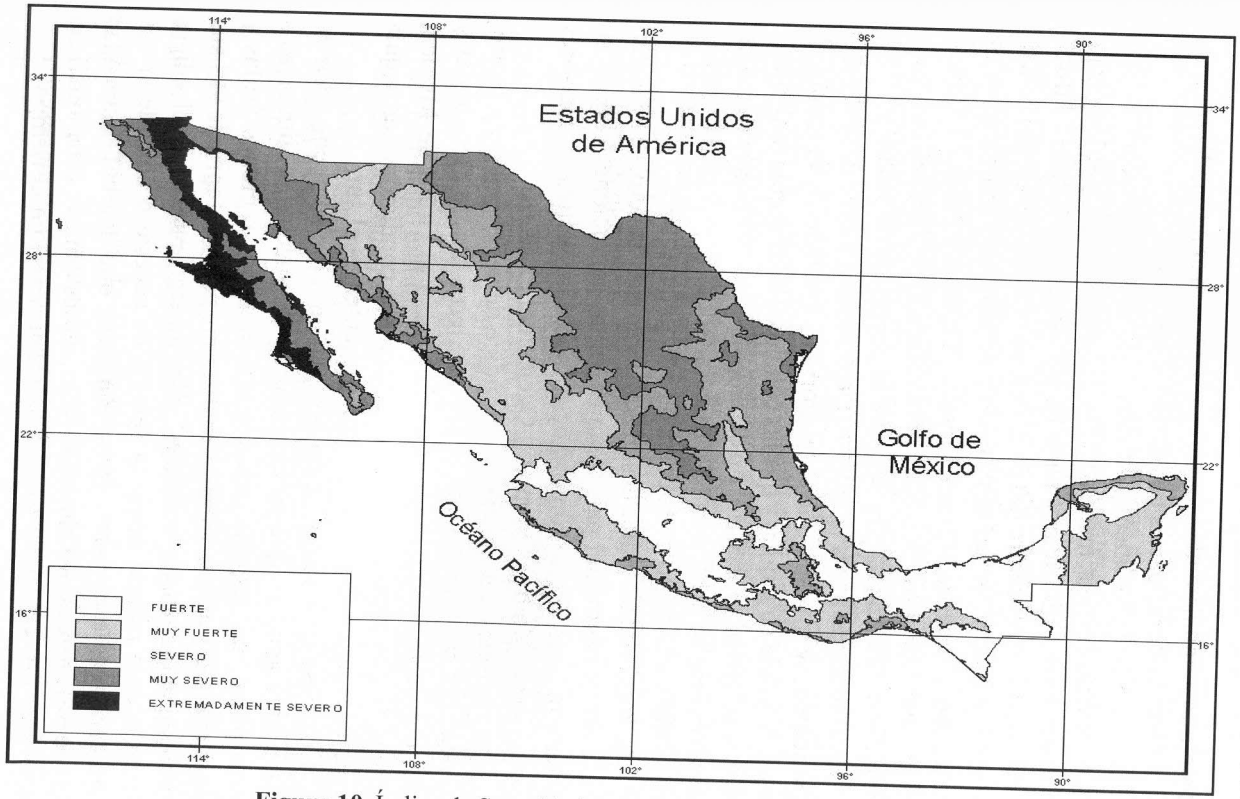

Figura 10. Índice de Severidad de la Sequía (Hernández, 2000).

registrándose intensidades mayores a 10 (intensidad moderada), en casi las tres terceras partes del territorio nacional.

Por otro lado, la intensidad muy baja sólo se presenta en seis pequeñas áreas del país, menos del 5% del área nacional, y se localizan: una al occidente, que abarca parte de los estados de Nayarit, Jalisco y Colima; dos en el centro del país, una, en el norte del estado de Michoacán, y otra en el sur del Distrito Federal que abarca parte de Michoacán, Estado de México, Morelos, Tlaxcala y Puebla. Las otras tres se localizan al sureste, una sobre el estado de Tabasco otra en la porción sur de Chiapas y la sexta en la península de Yucatán.

En el segundo mapa (Figura 10), referente al índice de severidad de la sequía, se muestra que el territorio es afectado en su totalidad, por algún grado de sequía, y que las condiciones de sequía muy fuerte abarcan la mayor superficie. En cambio, las condiciones extremadamente severas se presentan en particular sobre la península de Baja California y a lo largo de la costa de estado de Sonora.

Las áreas con un índice designado como muy severo, se localizan en el norte y centro del país. Asimismo, las condiciones severas se encuentran tanto al este como al oeste, sobre las vertientes interiores de las Sierras Madres Oriental y Occidental.

Las regiones que muestran un índice de severidad muy fuerte, se localizan principalmente sobre la Sierra Madre Occidental y vertiente de la Sierra Madre Oriental hacia el Golfo de México, además de tres áreas más al sur del país. Las condiciones de sequía designadas como fuerte, sólo están presentes en el sur.

Con base en la distribución espacial anterior, se puede decir en forma muy general, que en términos de fluctuaciones climáticas a corto plazo, las sequías que experimentan las regiones áridas y semiáridas de nuestro país constituyen parte integrante de sus condiciones climáticas "normales". Sin embargo, para medir el peligro de un evento natural como la sequía, es necesario considerar sus características esenciales: extensión (área que abarca), intensidad (grado de repercusión), duración (días, meses o años), estacionalidad (época en que ocurre) y frecuencia (recurrencia en el tiempo).

En verdad, nadie sabe realmente cuándo comienza a gestarse una sequía, pero después de una larga temporada de falta de lluvia (en cantidad y oportunidad) sobre amplias comarcas, se desemboca en un periodo de escasez de agua en fuentes, ríos y embalses y de déficit de humedad en tierras, pastos y montes. Incluso pueden llegar a agotarse capas freáticas del suelo; ello repercute en la falta de agua a la altura de las raíces de las plantas, y en la carencia de agua en pozos y manantiales.

Es también justo decir que la sequía no termina cuando comienzan los temporales de lluvia, pues se requiere un periodo de recuperación por parte de los suelos y la vegetación. Cuando se tienen niveles de lluvia por encima de lo normal, aumentan los cultivos y se extiende la explotación de los suelos, sobrepasando los niveles normales. Por tanto, la intensidad y duración de los problemas de sequía difieren enormemente a través de todo el país, debido a la amplia variación en la cantidad de lluvia, su distribución estacional y su variabilidad año tras año. Es común la proliferación de noticias sobre el tema como la siguiente:

> Alrededor de 470 municipios fueron declarados zonas de desastre en 1999 por escasez de agua y lluvias. Los recursos fueron insuficientes. A solicitud de autoridades estatales, el gobierno federal emitió 25 declaratorias de desastre y, debido a la gravedad del fenómeno natural, 1999 ha sido clasificado como "atípico" en materia de sequía, es decir, grave. Pese a la tragedia, en noviembre pasado se dio por agotado el presupuesto del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN), destinado a ese rubro (*El Universal*, sábado, enero 8, 2000).

Los efectos sociales y económicos de la sequía son otra forma de notar su presencia, por ejemplo, en notas como la siguiente:

> Una elevada tasa de desempleo, una creciente migración y una distorsión del mercado, en el que se está dando una oferta desmedida de granos, porque los campesinos quieren vender, a

toda costa y al precio que sea, la poca producción que salvaron. La situación es desesperante (*Ibid.*).

Como se mencionó al principio, alrededor del fenómeno de la sequía se han generado muchos mitos, los cuales dificultan el conocimiento real del mismo. Con base en el breve análisis que se ha hecho de las sequías en México, se puede decir que este fenómeno meteorológico ha sido y seguirá siendo recurrente en el país, también es evidente que la exclusiva valoración de los aspectos físicos de una sequía (su magnitud, duración, intensidad y extensión geográfica)

Bibliografía

Azpra Romero, E., A. G. Carrasco Anaya, D. O. Delgado Delgado y F. J. Villicaña Cruz (2001), *Los ciclones tropicales de México*, Colec. Temas Selectos de Geografía de México (I.6.1), Instituto de Geografía-UNAM, Plaza y Valdés, México.

Balling, Jr. R. C. and R. S. Cerveny (2005), "Winds and wind systems", in Oliver, J. E. (ed.), *Encyclopedia of World Climatology*, Springer, Great Britain, pp. 813-819.

Biondi, F., A. Gershunov and D. R. Cayan (2001), "North pacific decadal climate variability since 1661. *Amer. Meteor. Soc.* 14, pp. 5-10.

Burroughs, W. J., R. Crowder R., E. Vallier-Talbor and R. Whitaker (1998), *Observar el tiempo*, Editorial Planeta, Barcelona, p. 30.

Bruce, J. P. (1992), *La Meteorología y la hidrología para el desarrollo sostenible*, Organización Meteorológica Mundial, núm. 769, Ginebra, Suiza.

Bruins, J. H. and R. P. Berliner (1998), "Aridity, climatic variability and desertification", in Bruins, J. H. and L. Harvey (eds.), *The arid frontier: interactive management of environment and development*, Kluwer Academic, Israel, pp. 100-112.

Brundtland, H. G. (1987), *Our common future ("Brundtland Report")*, World Commision on Environment and Development

(WCED),www.are.admin.ch/are/en/nachhalting/international_uno/unterseite02330/

DeMaria, M. and J. Kaplan (1994), "Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic Tropical Cyclones", *Journal of Climate*, no. 7, pp. 1324-1334.

Douglas, W. M., A. R. Maddox, H. Kenneth and S. Reyes (1993), "The Mexican Monsoon", *Journal of Climate*, no. 6, pp. 1665-1679.

Dregne, E. H. (2000), "Drought and desertification. Exploring the linkages", in Wilhite, D. A. (ed.), *Drought, a global assessment,* Routledge Hazards and Disasters Series, London and New York, no. 2, pp. 231-240.

El Universal, sábado, enero 8, 2000.

El Universal, domingo, junio 17, 2001.

Enfield, B. D., M. A. Mestas-Núñez and J. P. Trimble (2001), "The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S.", *Geophysical Research Letters*, 28(10), pp. 2077-2080.

Englehart, J. P. and V. A. Douglas (2001), "The role of eastern north Pacific tropical storms in the rainfall Climatology of Western Mexico", *International Journal of Climatology*, no. 21, pp. 1357-1370.

Englehart, J. P. and V. A. Douglas (2002), "Mexico´s summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity", *Atmósfera*, no. 15, pp. 147-164.

Estrada Berg, W. J. W. (1991), "Diagnóstico y perspectivas sobre el suelo en México", Seminario: *Transformaciones del agro mexicano en los noventa*, Universidad Autónoma Chapingo, México.

Fernández, G. F. (1996), *Manual de Climatología Aplicada. Clima, Medio Ambiente y Planificación*, Síntesis, Madrid, pp. 116-132.

Florescano, E., J. Sancho y Cervera y A. D. Pérez-Gavilán (1980), "Las sequías en México: historia, características y efectos", *Desierto y Ciencia*, pp. 16-28.

Florescano, E. y S. Swan (1995), *Breve historia de la sequía en México*, Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver., México.

García-Acosta, V. (1993), "Las sequías históricas de México. Desastres y sociedad", *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, año 1, núm. 1, pp. 83-96.

García de Pedraza, L. y B. L. Ruiz (1989), *La sequía y el clima*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, Hojas Divulgadas, núm. 1/89 HD.

García, E. (1974), "Situaciones climáticas durante el auge y la caída de la cultura teotihuacana", *Boletín*, núm. 5, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 35-69.

García, E. (1989), *Apuntes de Climatología*, Offset Larios, México.

García, E. y M. E. Hernández (1988), "Anomalías de la precipitación en la República Mexicana de 1921 a 1980", *Revista de Geografía*, 2(3), pp. 1-23.

García, E. y M. E. Hernández (1992), "Sequía meteorológica por frecuencia de años muy secos y extremadamente secos; zonas susceptibles a desastres por fenómenos naturales", en García de Fuentes, A. (ed.), *Atlas Nacional de México*, vol. II, cap. V, núm. 2.9, escala: 16 000 000, Instituto de Geografía, UNAM, México.

García, F. F. (1996), *Manual de Climatología Aplicada. Clima, medio ambiente y planificación*, Síntesis, Madrid, pp. 116-132.

García, J. F., M. O. Fuentes y G. L. Matías, R. (2002), *Sequías*, Serie Fascículos, CENAPRED, Secretaría de Gobernación, México.

Garduño, R. (1994), *El veleidoso clima*, Fondo de Cultura Económica, La Ciencia desde México, núm. 127, México.

Gibbs, W. J. and J. V. Maher (1967), "Rainfall deciles as drought indicators", *Bureau of Meteorology*, Bulletin 48, Melbourne, Australia.

Gochis, J. D., L. Brito-Castillo and J. W. Shuttleworth (2006), "Hidrometeorology of the North American Monsoon region in northwest Mexico", *Journal of Hydrology*, no. 316, pp. 53-70.

Goldenberg S., B., L. J. Shapiro and Ch. W. Landsea (1998), "Are we entering an active era for major hurricane activity?", Conferencia científica sobre ciclones tropicales "Rodríguez Ramírez" *in Memoriem, Memorias*, Sociedad Meteorológica de Cuba, Instituto de Meteorología, Organización Meteorológica Mundial, pp. 24-30.

Gray, W. M. (1984), "Atlantic seasonal hurricane frecuency. Part I: El Niño and 30 mb Quasi-biennial Oscillation influences", *Mon. Wea. Rev.*, no. 112, pp. 1649-1668.

Hare, K. F. (1985), *Sequía, variación climática y desertificación*, Ginebra, Suiza, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, núm. 653.

Hardy, R., P. Wright, J. Gribbin y J. Kington (1990), *El libro del clima*, vol. 3, Blume ediciones, Barcelona, p. 365.

Hastenrath, S. (1991), *Climate Dynamics of the Tropics*, Update edition from Climate and circulation of the Tropics, Kluwer Academic Publishers.

Hernández, M. E. (2000), "Riesgos climáticos. Índice de severidad de la sequía. Fenómenos hidrometeorológicos", *Catálogo de información cartográfica digital del Sistema de Información Geográfica para el Ordenamiento Ecológico*, Instituto Nacional de Ecología, escala 1: 1 000 000.

Hopking, W. J. (1990), *Policy making for conservation in Latin America: National Parks Reserves, and the Environment*, World Resources Institute, Washington.

Jones, Ch. (2000), "Ocurrence of extreme precipitation events in California and relationship with the Madden-Julian Oscillation", *Journal of Climate*, no. 13, pp. 3576-3587.

Le Roy, L. E. (1991), *Historia del clima desde el año mil*, Fondo de Cultura Económica, México.

Luque M., J. A. (2003), *El Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6 000 años. El registro de la Pequeña Edad del Hielo (LIA), los eventos Dansgaard-Oeschger (D-O), y el ciclo de Bond*, tesis Doctoral, Facultat de Geología, Universitat de Barcelona. 4-7, http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UB/AVAILABLE/TDX-0612103-114154//ItroYObjetivos.pdf

Madden, R. and P. Julian (1994), "Observations of the 40-50 day Tropical Oscillation", *A Review. Mon. Weather. Rev.*, no. 122, pp. 814-837.

Magaña, Z. D. y M. F. Venegas (1981), *Metodología para el análisis de sequías*, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México (Proyecto PY8302).

Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez and C. Gay (1997), "Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico", *Climate Research*, 9(1-2), pp. 107-114.

Magaña, V. y J. L. Pérez (1998a), "Variabilidad climática en los mares intra-americanos", *Memorias del VIII Congreso de la Organización Mexicana de Meteorólogos*, pp. 69-72.

Magaña, V. y J. L. Pérez (1998b), "Usos de un Modelo de Mesoescala en el estudio de la dinámica atmosférica regional de México", *GEOUNAM*, 5(1), pp. 33-39.

Magaña, V., A. J. Amador and S. Medina (1999a), "The midsummer drought over Mexico and Central America", *Journal of Climate*, no. 12, pp. 1577-1588.

Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrisoza y J. Pérez (1999b), "El clima y El Niño", en Magaña, V. (ed.), *Los impactos de El Niño en México*, Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México, pp. 23-66.

Magaña, V., J. Vázquez, L. Pérez and B. J. Pérez (2003), "Impact of El Niño on precipitation in Mexico", *Geofísica Internacional*, 42(3), pp. 313-330.

Magaña, V. (2004), Proyecto: *Evaluación de modelos y construcción de capacidades para la evaluación de la vulnerabilidad al Cambio Climático. Primero, Segundo y Tercer Informe*, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana Regional y Global del Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace and R. C. Francis (1997), "A Pacific decenal climate oscillation with impacts 1079.

Maskrey, A. (comp.; 1993), *Los desastres no son naturales*, *La Red*, Tercer Mundo Editores, Bogotá.

McGregor, R. G. and S. Nieuwolt (1998), *Tropical Climatology*, John Wiley and Sons, England.

McKee, T., N. Doesken and J. Kleist (1995), "Drought monitoring with multiple time scales", *9th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, pp. 233-236.

Meigs, P. (1953), "World distribution of arid and semiarid homoclimates", *Review of Research on Arid Zone Hydrology*, Arid Zone Programme, 1, UNESCO, Paris, pp. 203-210.

Mendoza, M. V., B. Oda y J. Adem (2003), "Predicción estacional de la temperatura y la precipitación en la República Mexicana asociada con la Oscilación Decadal del Pacífico", *GEOS*, 23(2).

Metcalfe, S. E. (1987), "Historical data and climatic change in Mexico: a review", *Geographical Journal*, no. 153, pp. 211-222.

Mosiño, A. P. y E. García (1968), *Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana*, Colegio de Posgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México, pp. 35-59.

Ogallo, A. L. (2000), "Predicting drought in Kenya. Prospects and challenges", in Wilhite, A. D. (ed.), *Drought. A Global Assessment*, no. 2, pp. 52-67.

O'Hara, L. S. and E. S. Metcalfe (1997), "The climate of Mexico since the Aztec Period", *Quaternary International,* 43/44, pp. 25-31.

Ojanguren, S. (1996), "Desertificación y desiertos", *Ciencia y Desarrollo*, 22(128), pp. 39-41.

Oliver, E. J. and J. J. Hidore (2002), *Climatology. An atmospheric Science,* Prentice Hall, New Jersey.

Oñate, V. A. (1978), Proyecto: *La sequía y el hombre. Una interpretación histórica de la relación entre la naturaleza y la sociedad en tres regiones de la República Mexicana*, UAM-Xochimilco (preparado para: The International Federation of Institutes for Advanced Study, Ginebra.

OMM (1975), *Drought and agricultura Technical*, World Meteorological Organization (WMO), Ginebra, no. 138.

OMM (1986), *Manual para la estimación de la precipitación máxima probable*, Organización Meteorológica Mundial, núm. 332, Ginebra.

Ortiz S., M. de la L., G. M. Anaya, J. W. Estrada B. W. (1995), *Evaluación, cartográfica y políticas preventivas de la degradación de la tierra*, Colegio de Posgraduados, Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA), Montecillo, México.

Palacio-Prieto, J. L., L. Luna González y M. L. Macías (1999), "Detección de incendios en México utilizando imágenes AVHRR (temporada 1998)", *Investigaciones Geográficas*, *Boletín*, núm. 38, Instituto de Geografía, UNAM, pp. 7-14.

Palmer, W. C. (1965), *Meteorological drought*, Research Paper 45, Washington D. C., USA.

Peralta, O. (2002), "Datos históricos del clima en Centroamérica y México en el siglo XIX (entrevista)", *El Faro*, año 2, núm. 20, México, pp. 4-5.

Pérez, R., M. Ballester, C. González y M. Limia (1998), "Los ciclones tropicales de Cuba. Variaciones y tendencias observadas", Conferencia científica sobre los ciclones tropicales "Rodríguez Ramírez" *in Memoriem*, *Memorias*, Sociedad Meteorológica de Cuba, Instituto de Meteorología, Organización Meteorológica Mundial, pp. 30-34.

Prasad, P. (1998), *Famines and droughts. Survival strategies*, Rawwat Publications, Jaipur and New Delhi, 25, pp. 115-151.

Rosquillas, A. H. (1998), "Efectos del fenómeno de El Niño en Tijuana", *Prevención*, núm. 21, pp. 32-36.

Romero-Centeno, R. J., A. Zavala-Hurtado, A. Gallegos and J. J. O'Brien (2003), "Isthmus of Tehuantepec wind climatology and ENSO signal", *Journal of Climate*, no. 16, pp. 2628-2639.

Rico-Velazco, S. J. (2003), "El acrilato de potasio, opción para guardar agua de lluvia", *Gaceta,* núm. 3630, UNAM, México, p. 12.

Reyes-Coca, S. (2001), *Introducción a la Meteorología*, Universidad de Baja California, México.

Reyes-Coca, S. (2004), "Modulación multidecenal de la lluvia invernal en el noroeste de Baja California", *Ciencias Marinas,* 30(1ª), pp. 99-108.

Sánchez-Mora, E. (1980), "Las sequías en el México antiguo", en Sancho y Cervera, J. (coord.), *Análisis histórico de las sequías*

en México, Documentación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, núm. 22, México, pp. 15-20.

Sancho y Cervera, J. y A. D. Pérez-Gavilán (1978), *Análisis de las sequías en México*, Documentación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, núm. 20, México.

Sancho y Cervera, J., Z. F. Zavala, V. M. Sánchez y V. Martínez, (1980), *Monitoreo de sequías y heladas*, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Dirección General de Planeación Nacional, Dirección de Inventarios de Agua y Suelo, México, Proyecto IA 8007.

SEMARNAT (2006), *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales 2005*, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Shafer, B. A. and L. E. Dezman (1982), "Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas", *Proceedings of the Western Snow Conference*, 64.175, Colorado State University Fort Collins, Colorado, www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm.

Strahler, N. A. y H. A. Strahler (2000), *Geografía Física*, Omega, Barcelona.

Thomas, H. E. (1962), "The meteorologic phenomenon of drought in the southwest. Drought in the southwest, 1942-56, *Geological Survey Professional Paper 372-A*, United States Government Printing Office, Washington.

Tinker, M., D. Palecki, D. Stooksbury, Miskus and S. Stephens (2002), "The drought monitor", *Bull. Amer. Meteor.*, Soc., 83, pp. 1181-1190.

Trenberth, K. E. (1997), "The definition of El Niño", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, no. 78, pp. 2771-2777.

Vázquez, M. S. (1999), *Caracterización de las sequías en el estado de Chihuahua y norte de Durango*, tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados, Montecillos, Texcoco, Estado de México.

Venegas, C. R. (2005), *La aptitud territorial en el noroeste del estado de Baja California: retos y oportunidades de*

planeación regional, tesis Doctoral, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Velasco-Molina, A. H. (1991), *Las zonas áridas y semiáridas. Sus características y manejo*, Limusa, México.

Velasco-Molina, A. H. (1995), "Sistemas de sobrevivencia en los semidesiertos mexicanos", en Anaya-Garduño, M. y S. F. Díaz-Calero (ed.), *Memorias del IV curso sobre Desertificación y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe*, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Estado de México, pp. 195-236.

Velasco, M. I. (1999), "Severe drought becoming recurrent, more persistent in Mexico", *Drought Network News*, 11(1), pp. 4-6.

Vermes, L. (1997), "What should be the content of a national drought strategy?", De Jaguer, J. M., L. P. Vermes and R. Ragab (eds.), *Actas del Taller Internacional del ICID sobre el Riesgo Sostenible en Zonas de Escasez de Agua y Sequía*, Oxford, Inglaterra, pp. 221-228.

Vivó Escoto, A. J. (1978), "La sequía en México, Antillas, Colombia y América Central en 1977", Conferencia Magistral, *Memoria del VII Congreso Nacional de Geografía Aplicada*, Saltillo, Coahuila, Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, México, pp. 285-311.

Wang, B. (1994), "Climatic regimes of tropical convection and rainfall", *J. Climate*, 7, pp. 1109-1118.

Wilhite, D. A. and M. H. Glantz (1985), "Understanding the drought phenomenon: the role of definitions", *Water International*, no. 10, pp. 111-120.

Wilhite, D. A. (2000a), "Drought as a natural hazard", in Wilhite, D. A. (ed.), *Drought, a global assessment*, Routledge Hazards and Disasters Series, London and New York, no. 1, pp. 3-18.

Wilhite, D. A. (2000b), "Preparing for drought. A methodology", in Wilhite, D. A. (ed.), *Drought, a global assessment*, Routledge Hazards and Disasters Series, London and New York, no. 2, pp. 89-104.

WMO (1975), "Drought and agriculture", *Technical Note 138*, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

World Resources Institute (1990), *World Resources 1990-1991: a report, The United Nations Development Programme*, Oxford University, New York.

Yee Yan, Y. (2005), "Intertropical Convergence Zone (ITCZ)", in Oliver, J. E. (ed.), *Encyclopedia of World Climatology*, Springer, Great Britain, pp. 429-432.

MITOS Y REALIDADES DE LA
SEQUÍA EN MÉXICO

Se terminó de imprimir en el mes
de octubre del 2007, en los talleres de
Diseño y Letras, calle Úrsulo Galván No. 12-3
Col. Presidentes Ejidales.
Tiraje de 500 ejemplares.

TEMAS SELECTOS DE GEOGRAFÍA DE MÉXICO

Coordinación Académica y Editorial

Dra. María Teresa Sánchez Salazar
Dra. María Teresa Gutiérrez de MacGregor

Secciones:

I. Textos monográficos

1. Historia y Geografía
2. Naturaleza
3. Sociedad
4. Urbanismo
5. Economía
6. Medio Ambiente
7. Relaciones Internacionales
8. La Cuenca de México
9. Costas y Mares
10. Ordenamiento Territorial

II. Textos de carácter general

III. Métodos y técnicas para el estudio del territorio

Las sequías son un componente normal del clima, aunque por sus efectos, muchos en forma equivocada las consideran como fenómenos excepcionales y aleatorios. Están presentes en todas las zonas climáticas del mundo, sin embargo, sus características varían de una región a otra y son más frecuentes en algunas áreas de nuestro planeta.

En México, las sequías han estado presentes desde tiempos prehispánicos hasta nuestros días, han ocasionado efectos con diferente magnitud en la población y en sus actividades. Este libro pretende dar un panorama general de las sequías, en particular de nuestro país. Está dirigido al público en general y a aquellas personas interesadas en conocer con mayor detalle la sequía, en cuanto a sus definiciones, causas y relaciones con otros fenómenos como el ENSO, efectos, medidas de mitigación y pronóstico. Por último, se mencionan algunos grupos de investigación dedicados al estudio de la sequía en México.

ISBN 970-32-4692-3