

03060

7



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA INSTITUTO DE GEOFISICA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA... a Dirección General de Bibliotecas... a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional. NOMBRE: Juan Matias Méndez Pérez

FECHA: 27-Feb-2003

SIGNA: [Firma]

UN ESTUDIO DE EVENTOS HIDROMETEOROLOGICOS EXTREMOS EN LA REPUBLICA MEXICANA

T E S I S QUE PARA OBTENER EL GRADO DE: MAESTRO EN CIENCIAS (FISICA DE LA ATMOSFERA) P R E S E N T A : JUAN MATIAS MENDEZ PEREZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR O. MAGAÑA RUEDA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.

2003

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# **PAGINACIÓN DISCONTINUA**

*Llueve, llovizna, se humedece el aire, se enfría, vuelve a llover, diluvia, caen, paren las nubes a ras de tierra, desaparecen, llovizna, quedan las cosas frías, humedecidas, mojadas, distantes, aisladas, penetradas del cielo derribado, de la ascensión terrestre. El agua insiste ...*

*Jaime Sabines - Llueve, llovizna (1967)*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **Agradecimientos**

Al Dr. Víctor O. Magaña Rueda por la dirección de esta tesis, por su enseñanza, tiempo, paciencia, confianza, y amistad conmigo. Además de guiar mis primeros pasos en la investigación en el área de las Ciencias Atmosféricas.

A los sinodales, Dra. Elba Villanueva Urrutia, Dr. Carlos Gay García, Dr. Víctor O. Magaña Rueda, Dr. Artemio Gallegos García y Dr. Martín J. Montero Martínez, por el tiempo dedicado en la revisión de esta tesis y por sus valiosas sugerencias para mejorarla.

A todos mis profesores de la Maestría, Dr. Ernesto Caetano, Dr. Ricardo Prieto, Dr. Tomás Morales, Dr. Víctor M. Mendoza y Dr. Agustín Muhlía, por el apoyo y enseñanzas brindadas dentro y fuera del aula.

El soporte técnico de IIE Gustavo Vázquez, L.C.A. Jorge Luis Vázquez, M.C. José Luis Pérez, Fis. Miguel A. Villanueva y Fis. Rodolfo Meza, resultó de gran utilidad para el desarrollo de esta tesis.

A todos mis compañeros y amigos del Centro de Ciencias de la Atmósfera: Carolina, Rosa, Ceci, Vladimir, Jorge Luis, Gustavo, Joel, Misael, José Luis, Sergio, Alejandro, Adolfo, Jaime, Manuel, Óscar y Edgar. Agradezco los momentos agradables que compartimos dentro y fuera de los cubículos, además de apoyarme y estar conmigo en todo momento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca durante mi estancia en la Maestría. A los apoyos financieros adicionales para el presente trabajo, provenientes de los proyectos IAI-CRN73, PAPIIT IN-122001, CONACyT 32516-T, bajo la dirección del Dr. Víctor O. Magaña Rueda.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ***Dedicatoria***

A Dios, por darme la vida, llevarme por el camino, y por la fortuna de tener a mi familia.

A mi papá Félix Méndez Mora, por apoyarme incondicionalmente en todo, por estar conmigo cuando lo necesitaba, por su amor y amistad. Para él, todo mi respeto por ser un gran ejemplo para mí y todos mis hermanos.

A mi mamá Juana Pérez Mendoza, por su cariño y cuidados durante toda mi vida. Para ella, todo mi amor y respeto.

A mi abuelita Natalia Mora Hernández, por su cariño, cuidados y desvelos compartidos durante mi formación universitaria. Le estoy muy agradecido.

A mis hermanos Norma, Alma, Félix, Aldo e Irving, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Por la suerte de haber crecido juntos, compartiendo nuestras penas y logros, además de su ayuda cuando más los necesitaba.

A mis sobrinitas Ayutzin, Nathalie y Aleyda, por llenar de alegría a cada uno de nosotros y por llenar el vacío que dejamos mis hermanos y yo desde que estamos lejos de la familia.

A mi gran amigo de toda la vida, Juan Carlos Cortéz Cruz, de quien admiro todo el esfuerzo para lograr lo que quiere.

A Marijose, de quien he recibido su amistad y cariño por tanto tiempo. Por ser alguien especial para mí.

A mis amigos Janeth, Denisse, Pedro, Juanita y Marco, por ser un gran apoyo en esta ciudad y el estar lejos de mi familia.

A el resto de mis amigos de la escuela y fuera de ella, que bien saben que cuentan conmigo, que estoy muy agradecido y orgulloso de cada uno de ellos.

A mis amigos de la Rondalla "Voces del Alma", por su amistad y gratos momentos durante más de ocho años y por compartir algo en común: la música.

	Página
<b>ÍNDICE</b>	I
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 Eventos hidrometeorológicos extremos	1
1.2 Eventos hidrometeorológicos extremos ocurridos en México	4
1.2.1 Precipitación extrema	4
1.2.2 Sequía meteorológica	5
1.3 Aspectos climáticos de la precipitación en México	6
1.4 Objetivos	12
<b>2 DATOS Y METODOLOGÍA</b>	13
2.1 Descripción de los datos	13
2.1.1 Precipitación	13
2.1.2 Caudales de ríos y niveles de almacenamiento de presas	14
2.2 Metodología	15
2.2.1 Definición de un evento meteorológico extremo	15
2.2.2 Evento extremo de precipitación diaria	16
2.2.3 Sequía meteorológica	18
2.3 Monitoreo de sequía meteorológica	21
2.4 Disponibilidad de agua	21
<b>3 RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	23
3.1 Eventos extremos de precipitación diaria	23
3.1.1 Distribución espacial de valores extremos de precipitación diaria	23
3.1.2 Ciclo anual de eventos extremos de precipitación	24
3.1.3 Variabilidad interanual de eventos extremos de precipitación diaria	27
3.1.4 Tendencias de eventos extremos de precipitación	29
3.2 Análisis de la sequía meteorológica en el norte de México	32
3.2.1 Variabilidad de la sequía meteorológica	32

3.2.2 La sequía meteorológica y la disponibilidad de agua en el norte de México	33
3.3 Capacidad de pronóstico de eventos extremos	40
3.3.1 Precipitación diaria	40
3.3.2 Sequía meteorológica	42
<b>4 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO</b>	<b>44</b>
<b>APÉNDICES</b>	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>53</b>





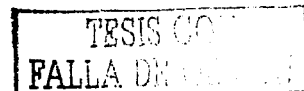
# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Eventos hidrometeorológicos extremos**

La vulnerabilidad a eventos hidrometeorológicos extremos varía dependiendo de las condiciones socioeconómicas que prevalecen en una región. Lluvias intensas causan daños materiales considerables y a veces pérdidas de vidas humanas. Los cambios en la frecuencia o intensidad de los eventos meteorológicos extremos tienen impactos socioeconómicos que son necesarios atenuar. Katz y Brown (1992), sugieren que ante un cambio climático, puede cambiar la frecuencia de los eventos extremos, tratándose de lluvias intensas o sequías. Por lo anterior, es de interés analizar las condiciones medias del tiempo y del clima bajo las cuales ocurren eventos extremos en México.

En los últimos años, los eventos meteorológicos y climáticos extremos han recibido una mayor atención debido al aumento de pérdidas de vidas humanas y a un incremento exponencial de costos asociados a ellos. Tan sólo en el periodo 1991-2000, más del 90% de las víctimas por desastres se debieron a fenómenos meteorológicos e hidrológicos extremos (OMM 2002). Un aumento en el número de pérdidas de vidas humanas y económicas, se debe a un continuo crecimiento de la población e infraestructura, es decir, a más gente expuesta a amenazas naturales, aunado a un aparente incremento en los peligros, principalmente en los de origen hidrometeorológico. Como lo muestra la figura 1.1, el número de eventos meteorológicos e hidrológicos intensos (que incluyen a lluvias intensas, inundaciones, sequías y vientos fuertes) se incrementaron en la última década. Así pues, los riesgos de la sociedad y los ecosistemas al clima extremo han cambiado no sólo por un aumento en la vulnerabilidad, sino también por cambios de origen natural y antropogénico (Meehl et al 2000).

La estructura socioeconómica y los ecosistemas se encuentran adaptados a condiciones climáticas con variaciones en un cierto rango. La capacidad de respuesta de estos sistemas a condiciones extremas disminuye conforme las condiciones de clima sobrepasan los rangos de variabilidad conocidos. En nuestro país, la agricultura, los bosques, las costas y los recursos hídricos son muy vulnerables a condiciones extremas del clima.



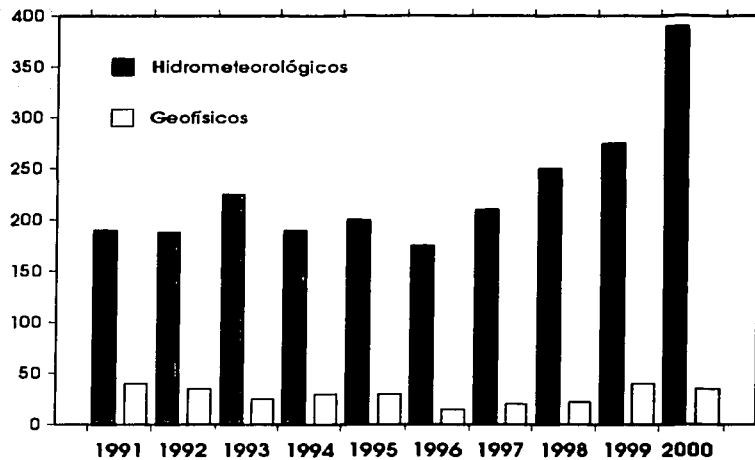


Fig. 1.1 Número de desastres geofísicos e hidrometeorológicos alrededor del mundo durante el período 1991-2000 (OMM 2002)

Las tendencias de precipitación observadas en varias regiones del mundo, coinciden con lo pronosticado por algunos modelos climáticos globales, sugiriendo que un planeta más caliente resultará en un ciclo hidrológico más intenso y en una mayor ocurrencia de eventos extremos, particularmente de precipitación y temperatura (Gordon et al 1992; Nicholls 1995; Karl y Night 1998; Hennessy et al 1997).

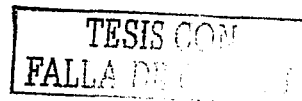
Si bien es cierto que en términos de tiempo meteorológico la mayor preocupación son las lluvias intensas, en un sentido climático la mayor preocupación es la sequía, característica normal y recurrente del clima, que frecuente y equivocadamente es considerada como un evento raro. La sequía ocurre en casi todas las regiones del mundo, aunque su severidad, duración y extensión varía significativamente de un lugar a otro. Es necesario diferenciar entre sequía y aridez. La primera se refiere a un déficit de lluvias durante un periodo de tiempo dado, por lo menos de una estación. La aridez está restringida a regiones con lluvias escasas, por lo que es una característica regional permanente. En general,

es difícil determinar cuándo empieza una sequía. Para cuando la sequía ha sido declarada, ya han ocurrido costosos daños en los sectores o actividades socioeconómicas que dependen del agua, pues sus efectos son acumulativos e involucran ciertas escalas de tiempo. Durante el siglo XX, en los Estados Unidos ocurrieron sequías intensas en las décadas de los 30s y 50s (Karl et al 1996; Woodhouse and Overpeck 1998).

La sequía impacta principalmente a los sectores agrícola y pecuario. Una reducción en la disponibilidad de agua para las actividades agrícolas lleva a la erosión del suelo que se traduce en una disminución en la producción agrícola, y en algunos casos resulta en una pérdida total de cultivos.

En México, la mayor parte de las actividades agrícolas son por cultivos de temporal, por lo que una disminución en las lluvias se traduce en una reducción en la producción y en consecuentes pérdidas económicas. Los mayores costos de la sequía sin embargo, son los sociales que están relacionados con el número de afectados. La sequía de 1997, asociada al fenómeno de El Niño, significó para México grandes pérdidas económicas en los sectores forestal, agrícola, ganadero y pesquero, sumando un total nacional aproximado de 19 000 millones de pesos en pérdidas (Magaña 1999).

Debido a los daños provocados por eventos hidrometeorológicos extremos en diversas partes del mundo, se han implementado algunas medidas para reducir estos daños. Entre estas medidas destacan el desarrollo de sistemas de observación, análisis y monitoreo de las fluctuaciones y cambios en la frecuencia de la precipitación (Karl et al 1999). Además de crear mejores bases de datos con la capacidad de detectar alguna variabilidad de extremos climáticos.



## **1.2 Eventos hidrometeorológicos extremos ocurridos en México**

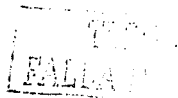
### **1.2.1 Precipitación extrema**

México es muy vulnerable a condiciones climáticas extremas, principalmente a aquéllas relacionadas con la disponibilidad (exceso o falta) de agua. Muchos de los eventos de precipitación extrema que ocurren en México, están generalmente relacionados con la actividad de sistemas tropicales como ciclones tropicales y ondas del este. Por ejemplo, en octubre de 1997, el huracán Paulina azotó las costas de Oaxaca y Guerrero, siendo el puerto de Acapulco uno de los sitios más afectados por lluvias intensas (más de 400 mm en 24 horas). Este huracán en combinación con la orografía y el cambio de uso de suelo del sitio, provocó deslizamientos de tierra, el desbordamiento del río Camarón e inundaciones violentas, con pérdidas de vidas humanas y materiales considerables.

En 1998, un sistema de baja presión localizado frente a las costas de Oaxaca, combinado con la onda tropical número 21 produjo lluvias intensas entre el 1 y el 9 de septiembre, provocando el desbordamiento de más de 15 ríos en el estado de Chiapas.

Otro caso reciente ocurrió en los primeros días de octubre de 1999, cuando la depresión tropical número 11 se localizó frente a las costas del norte del estado de Veracruz. Aún cuando este sistema no tocó tierra firme, su cercanía, desplazamiento, interacción con un sistema frontal y la orografía, ocasionó lluvias torrenciales, inundaciones y deslaves de terreno. El área afectada cubrió la parte norte y centro del estado de Veracruz, el norte del estado de Puebla y parte de Hidalgo.

De acuerdo a Jáuregui (2000), la frecuencia de aguaceros severos (mayores a 20 mm/h), se ha incrementado hasta 20 eventos en promedio para la década de los ochentas. Este incremento es al parecer inducido por un acelerado crecimiento del área urbanizada en el valle de México y al cambio en el uso de suelo. Además, un análisis espacial de lluvias extremas en la ciudad de México muestra dos máximos, uno en la parte sur y poniente de la ciudad (por efecto orográfico) y otro en el centro del área urbana (por una "isla de lluvia") (Jáuregui 2001).



Registros de precipitación de los últimos 50 años del observatorio de Tacubaya, D.F., muestran una tendencia marcadamente positiva.

### **1.2.2 Sequía meteorológica**

En el caso de la sequía en México, durante el siglo XX han ocurrido cuatro periodos largos de sequía intensa: 1948-1954, 1960-1964, 1970-1978 y 1993-1997. Recientemente, la sequía ocurrida en 1997 por causas de El Niño (Magaña 1999), se considera una de las más severas de que se tenga registro. Hasta la primavera de 1998, se habían registrado 14,302 incendios que afectaron a más de 583,664 hectáreas de bosques (SEMARNAP 1998). Los incendios forestales, las altas temperaturas y otros factores, agravaron el problema de altos niveles de contaminación ambiental en el Distrito Federal.

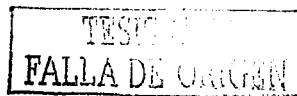
En el norte de México se habla de una sequía de más de diez años en los noventas, que ha resultado no sólo en pérdidas en agricultura y ganadería, sino en el conflicto de aguas transfronterizas con los Estados Unidos.

Es importante decir que la sequía no debe ser vista meramente como un fenómeno físico o natural. Su impacto en la sociedad resulta de una interacción entre el evento natural mismo (menos precipitación de la esperada resultado de la variabilidad climática natural) y la demanda de agua (que regularmente supera a la disponibilidad) por parte de la población.

En este trabajo, se analiza la ocurrencia de un evento hidrometeorológico extremo en la República Mexicana, en dos formas:

- i) *Precipitación extrema* (extremo superior de la estadística hidroclimática)
- ii) *Sequía meteorológica* (extremo inferior de la estadística hidroclimática)

No se piense sin embargo que la diferencia en escalas de tiempo y tratamiento de los problemas los hace independientes. Existe una importante relación entre ambos, que permite sugerir que la falta de eventos de lluvia intensa produce una sequía. Es decir, una sequía ocurre al disminuir los días con lluvia, pero quizá más importante, al disminuir el número de eventos extremos de lluvia intensa.



### **1.3 Aspectos climáticos de la precipitación en México**

Dada su situación geográfica, el clima de México en invierno es determinado por sistemas de latitudes medias, como los frentes fríos. Estos sistemas producen bajas temperaturas y en ocasiones lluvias. Algunos de estos frentes fríos logran avanzar hacia bajas latitudes, convirtiéndose en los llamados "Nortes", que afectan el Golfo de México y sureste de México, llegando incluso a Centroamérica y el Caribe (Schultz et al 1997). Los "Nortes", por ello, son una manifestación de la interacción entre los trópicos y los extratropicos.

Por otro lado, se dice que México tiene un clima monzónico, caracterizado por tener una temporada lluviosa durante el verano en la mayor parte del territorio nacional (Fig. 1.2a), en comparación con el invierno seco (Fig. 1.2b). En verano, el clima es modulado principalmente por la actividad de sistemas tropicales tales como huracanes y ondas del este. Mientras que en el invierno, el clima es modulado por sistemas extratropicales, tales como frentes fríos.

Desde la parte centro-sur y sur de México hasta Centroamérica, las lluvias de verano presentan dos máximos. El primer máximo ocurre en junio y el segundo en septiembre. Durante los meses de julio y agosto se observa un mínimo relativo (Fig 1.3), conocido como la sequía intraestival, sequía de medio verano, "canícula" o veranillo (Magaña et al 1999).

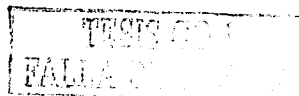
En el verano, la precipitación está modulada por algunos sistemas, como:

*la Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC,*

*el monzón mexicano*

*las ondas del este*

*huracanes en el Pacífico, Golfo de México y el Caribe*



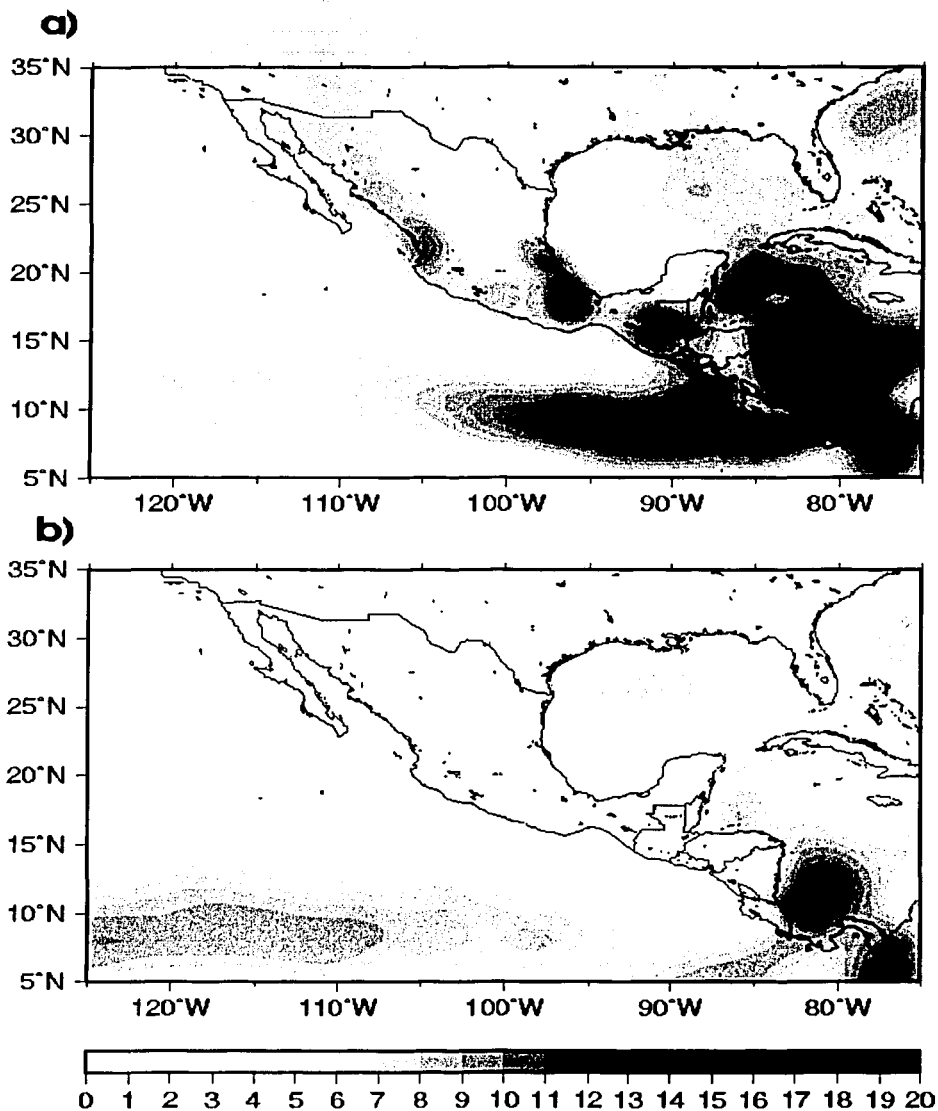


Fig 1.2 Climatología (1950-1998) de precipitación (mm/día) para  
a) verano y b) invierno

La ZITC juega un papel importante en la dinámica de la atmósfera en México durante el verano. La posición, intensidad y densidad de nubes profundas sobre esta región pueden resultar en periodos de lluvias intensas o débiles en el país.

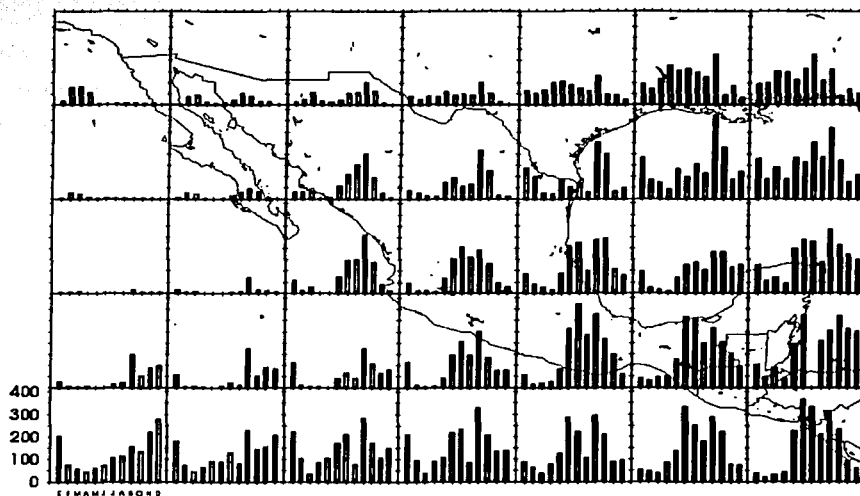


Fig. 1.3 Climatología (1950-1998) de precipitación mensual (mm) en subdominios de  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  (Magaña 1999)

Durante El Niño, la ZITC en el Pacífico del este, tiende a localizarse más cerca del ecuador ( $5^{\circ}$  N), por lo que la precipitación es mayor en el Pacífico ecuatorial del este que en la costa oeste de México (Uribe 2002). En años normales, se observa un contraste de temperatura entre la alberca de agua caliente del Pacífico mexicano y la lengua de agua fría frente a las costas de Perú, resultando en una celda tipo Hadley, llevando una mayor cantidad de humedad hacia las costas de México. En verano de años El Niño, en la mayor parte del territorio mexicano se observa una disminución en la precipitación (Fig. 1.4a), que puede considerarse sequía. Esta disminución de precipitación de verano se refleja en una menor humedad en el suelo para la primavera del año siguiente, resultando en una mayor incidencia de incendios forestales por prácticas agrícolas de roza, tumba y





quema. Durante años La Niña, las lluvias de verano se encuentran cerca de lo normal e incluso pueden estar por arriba de la media (Fig 1.4b). Esta anomalía positiva de precipitación en verano durante La Niña se debe a una mayor actividad de ondas del este y huracanes en el Caribe y el Golfo de México.

El régimen de precipitación de verano en los estados de Sonora y Sinaloa corresponde al llamado *monzón mexicano* (Douglas et al 1993). Un inicio tardío del monzón generalmente significa una temporada de lluvias deficientes, lo cual parece ocurrir durante años El Niño. Sin embargo, de acuerdo a Koster et al (2000), las lluvias de verano en esta región no están influenciadas por El Niño.

Otro factor esencial para las lluvias de verano en México son los huracanes (Jáuregui, 1989). Durante El Niño hay una disminución de las lluvias, principalmente en el noreste de México. Esto se debe a que durante El Niño hay un menor número de huracanes en el Caribe y Golfo de México (DeMaria y Kaplan 1994). Esta disminución en el número de huracanes en el Atlántico afecta principalmente a las lluvias del norte de Veracruz, Tamaulipas y Coahuila. En Tamaulipas por ejemplo, un ciclón tropical puede dejar suficiente lluvia para que la temporada de lluvias se considere anómalamente húmedo. La falta de dichos sistemas puede ocasionar sequía (Uribe 2000).

Al analizar los registros de precipitación anual de los últimos cincuenta años, se observa una tendencia positiva en la mayor parte del territorio mexicano, principalmente en los estados del norte (Fig 1.5). Por otro lado, en el sur de México la tendencia es a menos precipitación, debido a que las lluvias dependen de lo que ocurre en el Pacífico mexicano (actividad de la ZITC y huracanes).

Un aspecto particular del ciclo hidrológico en México por analizar, es la relación entre la actividad de eventos extremos de tiempo severo, representada por precipitación extrema y su reflejo en la condición climática dominante. Así, la falta de eventos de lluvia intensa en ciertas regiones podría resultar en sequía, pudiendo ser este factor más importante incluso que el número de días que llueve.

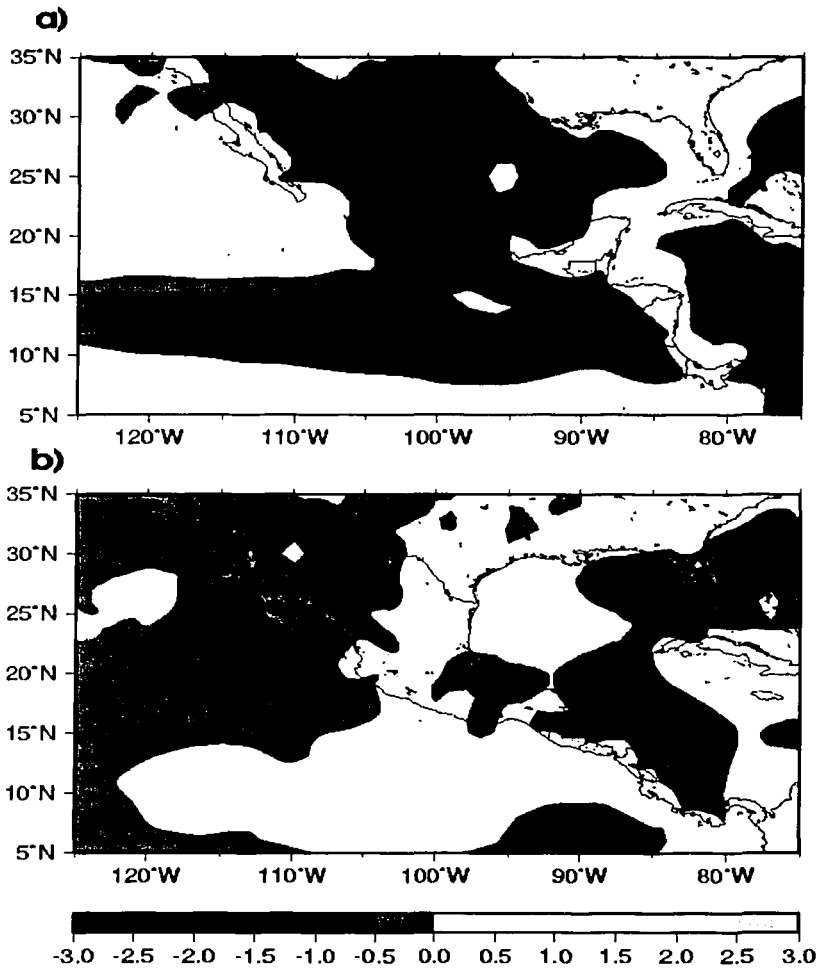


Fig 1.4 Anomalías de precipitación (mm/día) durante veranos  
a) El Niño y b) La Niña (Magaña 1999)

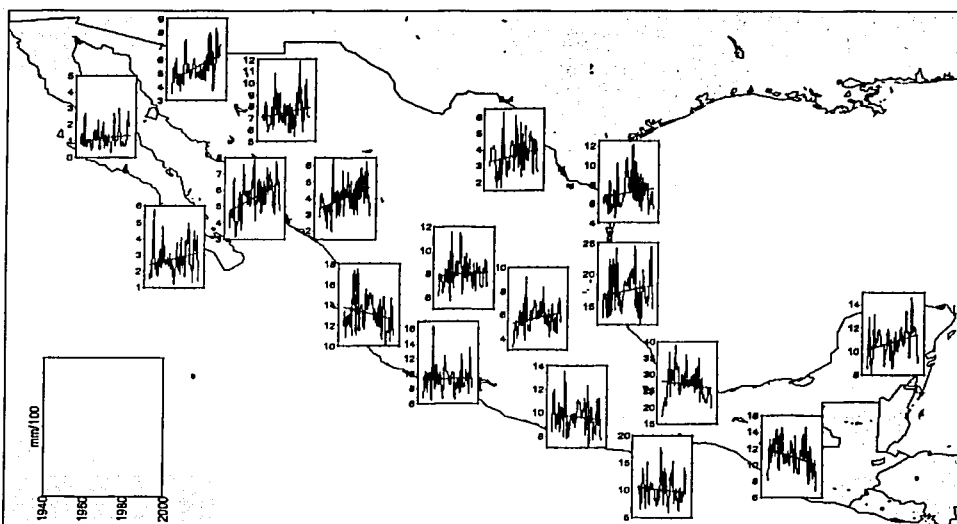


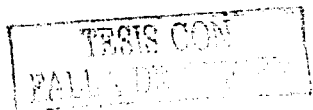
Fig. 1.5. Tendencia de precipitación anual (mm/100) en el periodo 1945-1994  
 (Douglas 1999, comunicación personal, datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN))

#### **1.4 Objetivos**

El presente estudio analiza la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos en la República Mexicana de los últimos 50 años, con el fin de determinar sus patrones espaciales, formas de variabilidad y tendencias. Por lo tanto, una determinación adecuada de cómo, cuándo y por qué ocurren estos eventos permitirá desarrollar estrategias que reduzcan sus impactos negativos en diversos sectores socioeconómicos. Este trabajo da pie a estudiar de manera más profunda los mecanismos dinámicos que controlan la ocurrencia de estos fenómenos, al plantear el potencial de pronóstico existente y discutir que existe (por determinar en este estudio) una relación entre eventos extremos de precipitación y años de sequía meteorológica.

Esta tesis está estructurada de la siguiente forma:

En el capítulo 2, se describen los datos empleados en el estudio así como la metodología desarrollada e implementada. En el capítulo 3, se discuten los resultados, revisando y comparando diagnósticos con registros históricos, la variabilidad interanual, las tendencias del clima y de eventos extremos y se hace una revisión sobre el potencial de pronóstico de eventos extremos. Finalmente, en el capítulo 4 se discuten las conclusiones y se propone el trabajo a futuro.



## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

### 2.1. Descripción de los datos

#### 2.1.1 Precipitación

La primera parte de este estudio consiste en determinar los valores extremos de precipitación acumulada en 24 horas, la distribución espacial, variabilidad y tendencias. Para esto, se utilizan datos de precipitación diaria, extraídos del sistema de consulta de datos climatológicos Dat322 v.1.0, elaborado por la Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Para un análisis estadístico más estable, las series de tiempo deben ser largas. Por lo tanto, es necesario que éstas cumplan los siguientes criterios:

1. registros suficientemente largos y continuos (periodo: 1950-1998),
2. menos del 20% de registros perdidos en cada año.

El número de estaciones que cumplieron los criterios propuestos y que se utilizaron en esta parte del estudio, fue de 78 (Fig. 2.1).

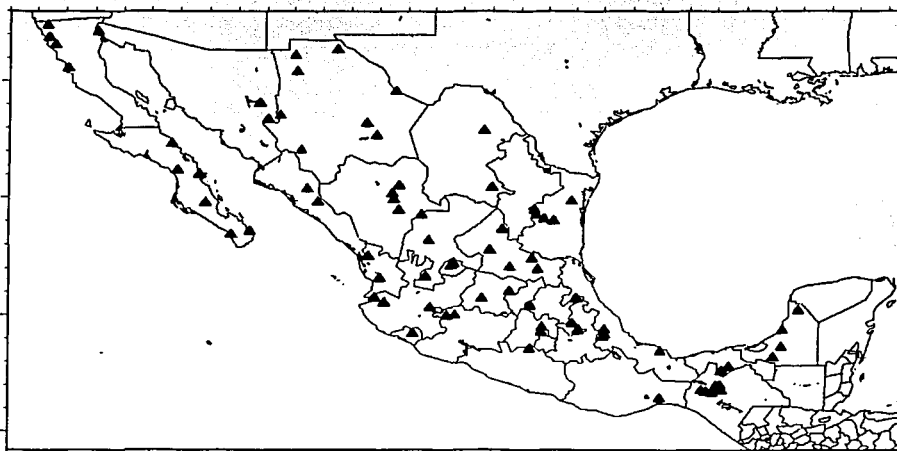


Fig. 2.1 Localización de las estaciones de estudio

### 2.1.2 Caudales de ríos y niveles de almacenamiento de presas

Una medida del impacto de los eventos hidrometeorológicos extremos se tiene en los cambios en caudales de los ríos y en menor medida, en el almacenamiento de las presas. Un análisis de estas variables (caudales y niveles de almacenamiento de presas) constituye una primera evaluación de la relación entre la meteorología y la disponibilidad de agua. Esta parte del estudio, se centra en el norte de México, dado que es precisamente en esta región del país donde en años recientes la disponibilidad de agua, sobre todo para actividades agrícolas, ha sido complicada. Los datos de precipitación diaria descritos en la sección anterior, fueron complementados con datos mensuales y anuales de caudales de ríos y de niveles de almacenamiento de presas de los estados del norte de México. Estos datos fueron extraídos del llamado Sistema de Información de Aguas Superficiales (SIAS), elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Las estaciones hidrométricas y las presas de almacenamiento utilizadas en esta sección, cumplen la condición de tener registros largos y continuos de por lo menos los últimos 30 años. Bajo tal criterio, se dispone de información para las estaciones hidrométricas y presas, que se se muestran en la figura 2.2

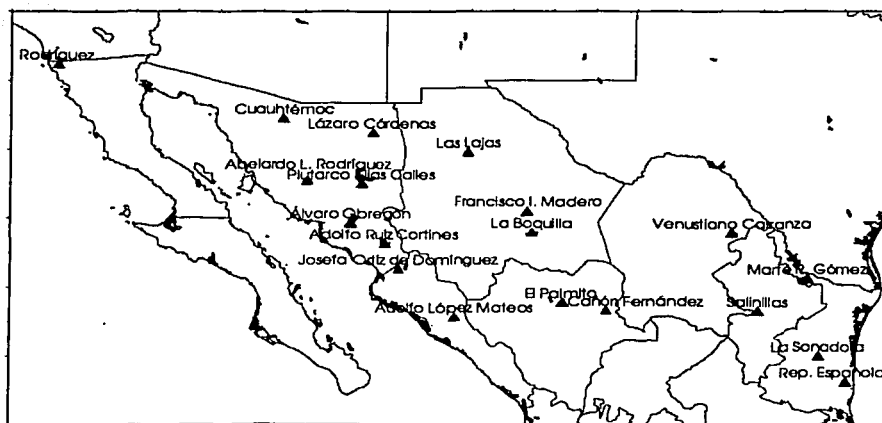
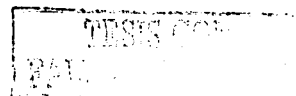


Fig 2.2 Localización de estaciones hidrométricas y presas de almacenamiento



## 2.2 Metodología

Un primer reto en el análisis consiste en definir qué es una condición hidrometeorológica extrema (precipitación extrema y sequía). Una condición hidrometeorológica extrema corresponde a un exceso o déficit de lluvias por encima o por debajo de valores dados. Cada una de estas condiciones extremas se estudia por separado, aunque más adelante se relacionan entre sí, ligando de esta forma tiempo y clima. En la primera parte, se examinan los llamados *eventos extremos de precipitación diaria*. Posteriormente, se analiza la sequía meteorológica en el norte de México. La relación entre un menor número de eventos extremos de precipitación diaria y la ocurrencia de sequía meteorológica, es particularmente importante en el norte de México. La experiencia ha demostrado que las lluvias asociadas con un huracán, pueden cambiar de una condición de sequía a una temporada con lluvias totalmente por arriba de lo esperado.

### 2.2.1 Definición de un evento meteorológico extremo

Un *evento meteorológico extremo* es aquel evento en que cierta variable, (por ejemplo la lluvia) alcanza un valor por encima o por debajo de un valor umbral dentro de una serie de tiempo, y cuya ocurrencia es relativamente rara. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), un evento meteorológico extremo es un evento *raro* dentro de su distribución estadística de referencia (distribución de probabilidad) (IPCC 2001), es decir un evento cuya probabilidad de que ocurra es muy baja.

Dada la variabilidad espacial de una variable meteorológica, lo que se considera como evento extremo en un sitio puede ser relativamente común en otro. Por ejemplo, si lluvias de 70 mm en 24 horas ocurren varias veces al año en una localidad, entonces no se trata de un evento extremo. Algunas veces son necesarias lluvias de mayor intensidad para realmente considerarse como un evento extremo. Probablemente en este sitio la infraestructura ha sido desarrollada para mitigar los potenciales daños ante lluvias de cierta magnitud, disminuyendo su vulnerabilidad a lluvias intensas. En cuanto se rebasa un determinado umbral, los daños se ven reflejados en las estructuras y

construcciones no diseñadas para condiciones extremas poco frecuentes.

### **2.2.2 Evento extremo de precipitación diaria**

Karl et al (1996), Nicholls y Murray (1999) y Plummer et al (1999) han sugerido, para el estudio de eventos meteorológicos extremos, el uso de índices basados en cantidades estadísticas. Uno de los índices más simples está dado en términos de los *percentiles*.

Por ejemplo, una forma sencilla de determinar el valor de precipitación diaria que corresponde a un percentil dado, consiste en ordenar de manera ascendente los valores de precipitación diaria y determinar qué valor se encuentra por encima del 90% (percentil 90) ó 95% (percentil 95) del resto de los datos ordenados.

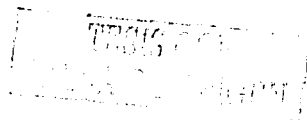
Para definir un evento extremo, se puede utilizar la distribución del número de casos para ciertos rangos de la variable, construyendo su distribución de probabilidad. De manera más formal, se pueden determinar los valores extremos de precipitación utilizando la Función de Distribución de Probabilidad (FDP) Gamma (Wilks 1995; Nicholls y Murray 1999; Katz 1999), pues la lluvia en la mayor parte de México no corresponde a una distribución Normal (Gaussiana). Es por ello que el simple cálculo de la media aritmética como representativo de la lluvia puede llevar a sobreestimaciones en esta variable.

La FDP Gamma es asimétrica, tiene sesgo positivo y está limitada del lado derecho por valores positivos, como lo muestra la figura 2.3, coincidiendo con la forma en que se distribuye la precipitación. Por esta razón, la FDP Gamma es ampliamente utilizada en meteorología para el análisis de datos de precipitación.

La FDP Gamma está definida por la expresión

$$f(x) = (x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta) / (\beta\Gamma(\alpha)) \quad 2.1$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los llamados parámetros de forma y escala, respectivamente, mientras que  $\Gamma$  es la función Gamma (Wilks 1995).





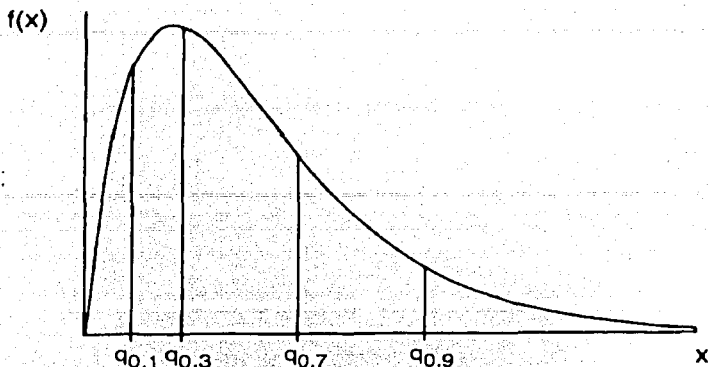


Fig. 2.3 Representación de percentiles en una FDP Gamma

El parámetro  $\alpha$  es adimensional y determina la "forma" de la distribución, correspondiendo a una distribución exponencial para  $\alpha = 1$  y adquiere una forma cercana a la Gaussiana conforme la magnitud de  $\alpha$  aumenta. Por otro lado, el parámetro  $\beta$  determina hacia qué lado se "alarga" o desplaza la distribución. En el Apéndice A se describen las características de la FDP Gamma, así como el método para determinar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ .

Para determinar los valores extremos de precipitación diaria, se utilizan los registros superiores a 0.1 mm. El ajuste de los datos de precipitación a la FDP Gamma se hace utilizando el software STATISTICA™. Después del ajuste, se dividió la distribución de la lluvia en percentiles (Fig. 2.3). Por último, se determina el percentil que asegure que la probabilidad de ocurrencia de este evento sea relativamente baja (10%). El uso del percentil 90, como un valor a partir del cual la precipitación es extrema, es una alternativa sugerida por varios autores (Easterling et al 1999; Manton et al 2001). El valor de precipitación diaria que corresponde al percentil 90, se debe entender que hay tan sólo un 10% de probabilidad de que ocurra un evento de precipitación mayor a esa magnitud, lo que puede considerarse raro. Uno bien puede escoger otro valor,

pero para hacer comparables los resultados a estudios de otras regiones, se mantendrá este valor (10% de probabilidad).

Resumiendo, el procedimiento para obtener el valor de precipitación acumulada en 24 horas a partir de la cual se considera un evento extremo de precipitación diaria, se requiere:

1. Determinar los parámetros de forma y escala de la FDP Gamma de ajuste a los datos.
2. Dividir la distribución Gamma en percentiles.
3. Determinar el valor de precipitación diaria que corresponda al percentil 90

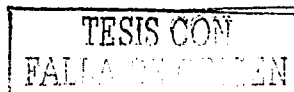
### **2.2.3 Sequía meteorológica**

Existen varias definiciones de sequía, muchas de las cuales involucran un balance de agua. Esto implica que la disponibilidad y la demanda de agua deben ser consideradas para hablar de este evento. Redmon (2002) considera que la sequía ocurre cuando el agua es insuficiente para satisfacer las necesidades de un sistema.

Debido a que la sequía afecta a diversos sectores sociales y económicos, muchas definiciones han sido desarrolladas pensando en impactos o sectores. En general, es posible categorizar las definiciones de sequía como *conceptuales* y *operacionales* (Wilhite y Glantz 1985). La definición conceptual, es aquella tipo diccionario, que sólo se limita a definir y describir al fenómeno. Mientras que la definición operacional, intenta identificar el inicio, continuación y fin del proceso, además requiere categorizar la severidad, frecuencia y duración de la sequía. Analizar la sequía involucra diversas disciplinas, cada una de ellas incorpora diferentes factores en su definición. Por lo anterior, la sequía puede ser de tipo: *meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica* (Wilhite y Glantz 1985).

#### *Sequía meteorológica*

Se define en términos de una disminución de precipitación por debajo de lo "normal" ó promedio. Otras definiciones se basan en el número de días con precipitación por debajo de un valor específico y algunas otras en el número de



días consecutivos sin lluvia. La ocurrencia de una sequía meteorológica debe ser considerada como parte de la variabilidad del clima. En este tipo de sequía se piensa en un proceso totalmente natural, sin influencia humana.

#### *Sequia hidrológica*

Ocurre cuando las fuentes de agua en la superficie y en el subsuelo están por debajo del nivel medio. Este tipo de sequía se manifiesta en superficie con una disminución en escurrimientos, caudales de ríos y niveles de almacenamiento de presas. Mientras que en el subsuelo se manifiesta por un descenso del nivel freático. Aunque resulta en general a consecuencia de una sequía meteorológica, el manejo del agua (factor humano) puede llevar a que ciertas regiones experimenten esta sequía, es decir, no es totalmente natural.

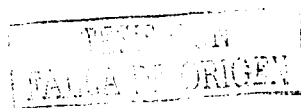
#### *Sequia agrícola.*

Se refiere a una situación en la que la cantidad de humedad disponible en el suelo no satisface las necesidades de un cultivo en particular. Este tipo de sequía depende de condiciones de sequía meteorológica e hidrológica, afectando a los cultivos más sensibles a este déficit de agua. Es en esta etapa que muchos organismos oficiales toman nota de la sequía e inician los programas para mitigar los efectos negativos. La ocurrencia de esta sequía depende en cierta medida de las anteriores, pero en mucho mayor medida de la vulnerabilidad del sector agrícola, por lo que su ocurrencia depende mayormente de factores humanos.

#### *Sequia socioeconómica*

Ésta ocurre una vez que el déficit de lluvias empieza a afectar a la sociedad y a las actividades socioeconómicas, principalmente en el sector urbano. Esta sequía se manifiesta cuando la demanda de agua, por parte de los diferentes sectores de la población, es mayor que la disponibilidad del vital líquido. La ocurrencia de esta sequía se relaciona con elementos de la administración del agua.

Existen diversos criterios para declarar la ocurrencia de una sequía meteorológica. Algunos de ellos se basan en el uso de un valor umbral dado. En otros casos se usan criterios estadísticos, es decir, definen la sequía cuando la precipitación está por debajo de los límites de su "variabilidad normal".



Para determinar la ocurrencia de sequía seguiremos el segundo criterio, utilizando datos de precipitación anual de las estaciones del norte de México. Al analizar las series de precipitación anual se observa que en algunos sitios es viable utilizar una FDP Gaussiana o Normal (Apéndice B), mientras que en otros es preferible una FDP Gamma. De acuerdo a cual sea el caso, se procede a estimar en forma estadística los periodos de sequía, de la siguiente forma:

1. Ajustar los datos a una distribución Gaussiana ó Gamma.
2. Dividir la distribución en percentiles.
3. Estimar los valores de precipitación que corresponda a los percentiles inferiores 20, 10 y 5 de la distribución correspondiente.

De esta forma, se puede clasificar la severidad de la sequía meteorológica como:

<b>Clase de sequía</b>	<b>Percentil</b>
Moderada	< percentil 20
Severa	< percentil 10
Extrema	< percentil 5

La clase de sequía correspondiente a cada percentil (20, 10 y 5) se muestra graficamente en la figura 2.4. El uso de estos tres percentiles muestran que la sequía aunque existe, sólo ocurre con una probabilidad baja (del 20%, 10% y 5%, respectivamente). Tomando en cuenta lo anterior, la sequía es un evento relativamente raro. Es por ello que sequía y aridez no deben ser confundidas pues la segunda corresponde a una condición permanente del clima.

### **2.3. Monitoreo de sequía meteorológica**

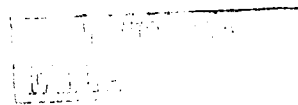
En Estados Unidos así como en otras partes del mundo, se han utilizado los llamados *índices de sequía*, como una herramienta para el análisis y monitoreo de la severidad de esta condición climática. Un índice de sequía, no es más que una variable derivada de registros meteorológicos (precipitación, humedad del suelo, temperatura, etc.) ó hidrológicos (caudal, nivel de almacenamiento, escurrimiento, etc.), cuyo valor refleja en cierta medida la disponibilidad de agua. Diversos índices han sido desarrollados (Keyantash y Dracup 2002; Heim 2002), y van desde los más simples que sólo utilizan datos de precipitación, hasta algunos relativamente complejos, en los que son necesarios para su cálculo una gran cantidad de datos.

Entre los índices de sequía más importantes, se pueden mencionar: Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, siglas en inglés), Índice de Humedad de Cultivo (MCI, siglas en inglés), Índice de Humedad de Producción, Índice de Precipitación Estandarizada (SPI, siglas en inglés), etc.

Para el caso de México, García y Hernández (1988) realizaron mapas de anomalías de precipitación con respecto a la moda usando la distribución Gamma. Con esto se evalúa si un año fue abundante ó deficiente en precipitación proporcionando una forma de evaluar la sequía meteorológica.

### **2.4 Disponibilidad de agua**

La relación entre fluctuaciones de la lluvia, los caudales de los ríos y almacenamiento de las presas, da una medida de cómo la disponibilidad de agua depende de procesos climáticos naturales. En el caso de un manejo del recurso agua, las relaciones lluvia-disponibilidad de agua podrían ser menos claras. En qué medida es este el caso del norte de México debe ser determinado, considerando las escalas de tiempo en que las relaciones son más o menos fuertes. Incluso algunas relaciones lluvia-caudal son complementarias para una potencial estrategia de manejo de agua, que aunque no será materia de este trabajo, cobra importancia a la luz de los crecientes conflictos nacionales e



internacionales por el agua, sobre todo en la región de la frontera norte de México.

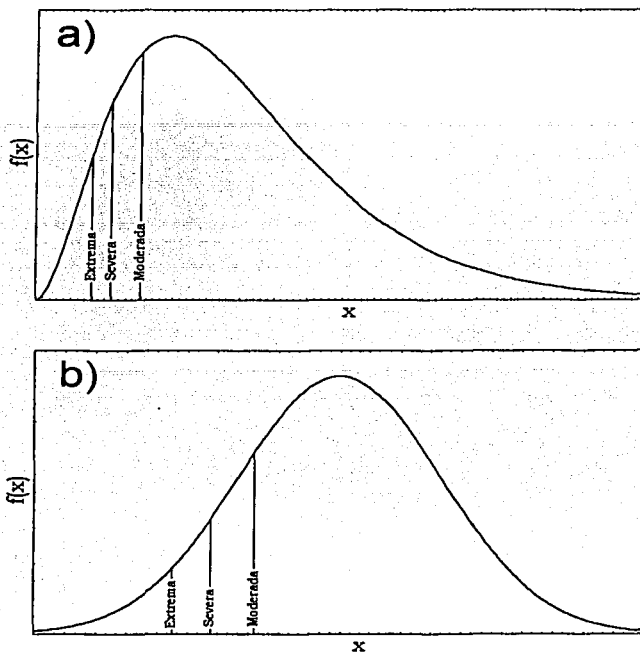


Fig. 2.4 Severidad de sequía mediante el uso de percentiles de una distribución  
a) Gamma y b) Gaussiana

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 Eventos extremos de precipitación diaria

##### 3.1.1 Distribución espacial de valores extremos de precipitación diaria

En esta etapa, se analiza el caso de eventos de lluvia intensa que se constituyen en eventos extremos de precipitación diaria. Siguiendo los criterios definidos en la sección 2.2.2, se encuentra que los valores de precipitación diaria a partir de los cuales ocurre un evento extremo, oscilan entre los 12.7 mm (Fig 3.1a), en Nuevo Casas Grandes, Chihuahua y 62.5 mm en Catemaco, Veracruz (Fig. 3.1b). Lo anterior quiere decir que, en el caso de Nuevo Casas Grandes ocurre un evento extremo de precipitación una vez que la precipitación acumulada en 24 horas rebasa los 12.7 mm.

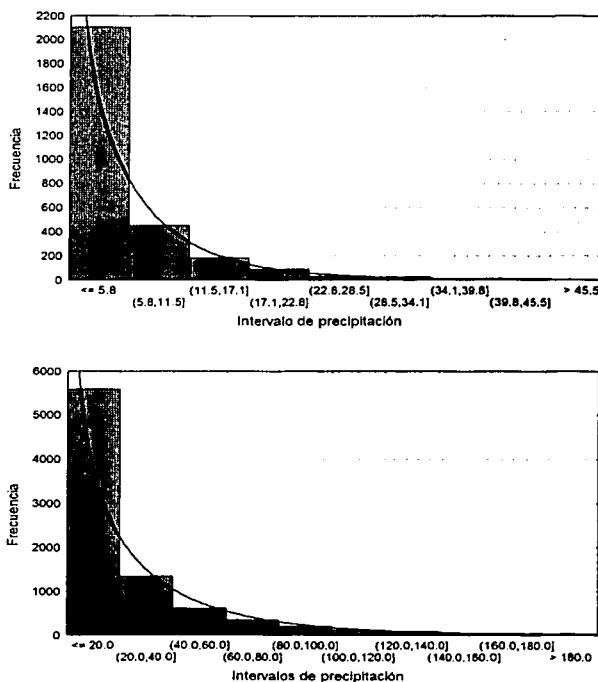


Fig. 3.1 Uso de la distribución Gamma para determinar el valor extremo de precipitación diaria en a) Nuevo Casas Grandes, Chihuahua y b) Catemaco, Veracruz

La distribución espacial de los valores extremos para las estaciones analizadas, muestra que en la región sur de México los valores extremos son de mucha mayor magnitud que los del centro y norte (Fig 3.2). Es claro, climatológicamente llueve más en el sur de México que en el resto del país. En los estados del noroeste (Sonora y Sinaloa), las lluvias extremas están relacionadas con el monzón mexicano. Durante los meses de julio y agosto, ocurre una gran actividad de tormentas severas produciendo lluvias extremas (Reyes et al 1994). En esta región ocurre el mayor número de tormentas convectivas en Norteamérica, razón por la cual aunque se trata de una zona semiárida, la mayor parte del tiempo los valores extremos de precipitación son altos.

Por otro lado, en el noreste de México (Tamaulipas), los eventos extremos de precipitación están asociados a tormentas tropicales que se combinan con las características orográficas de la Sierra Madre Oriental. Los eventos de lluvias extremas ocurren principalmente en el sur del estado y sobre la ladera oriente de la Sierra (Uribe 2000), donde el factor orográfico constituye un elemento importante en la intensificación de la actividad convectiva. Los eventos extremos de precipitación se ven favorecidos durante episodios La Niña, cuando la probabilidad de huracanes en el Golfo de México aumenta.

Finalmente, para la región de Catemaco y Los Tuxtlas en Veracruz, los eventos extremos de lluvia se deben a que esta zona es precisamente una de las más lluviosas del país, con precipitación anual promedio superior a los 3000 mm. Estas lluvias se originan por el flujo de aire húmedo proveniente del Golfo de México y su interacción con la orografía de la región. Es poco claro en que medida la recirculación del vapor de agua de la selva tropical mantiene una temporada lluviosa intensa.

### **3.1.2 Ciclo anual de eventos extremos de precipitación**

Los eventos extremos de precipitación diaria presentan un ciclo anual que refleja la evolución temporal de la precipitación. En el noroeste de México (Baja California Norte), los eventos extremos ocurren principalmente durante los meses de invierno (Fig.3.3a), dado que en esa región las lluvias frecuentemente ocurren



por el desplazamiento de sistemas frontales y tormentas. Para el resto del país, los eventos extremos son más frecuentes durante los meses de verano (Fig. 3.3b), coincidiendo con la temporada lluviosa en la mayor parte del país. Gran parte de estas lluvias se deben al paso de ondas tropicales, que traen consigo una gran cantidad de humedad del Océano Atlántico. En el centro y sur del país, se presenta una característica especial en la distribución temporal de eventos extremos de precipitación, con dos máximos (Fig 3.3c). El primer máximo ocurre en junio y el segundo en septiembre, mientras que en julio y agosto se observa un mínimo relativo. Esta característica bimodal en el número de eventos extremos corresponde al régimen de precipitación conocido como *sequía intraestival ó canícula* (Magaña et al 1999). Para ciertas regiones oceánicas parece haber una bimodalidad en la actividad de huracanes, tanto en el Pacífico (Magaña et al 1999) como en el Caribe (Inoue et al 2002). En esta última región, en julio se observa un mínimo en la actividad de la ciclogénesis, relacionado con una intensificación de los vientos alisios (corriente en chorro de bajos niveles en el Caribe) que intensifica la cizalladura vertical del viento inhibiendo los procesos convectivo profundos y en consecuencia la formación de huracanes.

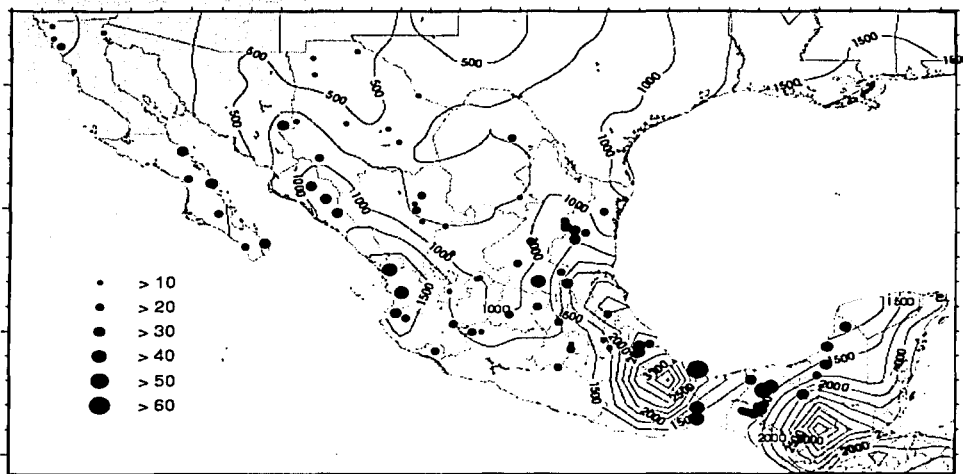


Fig 3.2 Valores extremos de precipitación diaria en mm/día y precipitación anual promedio en mm (isolíneas)

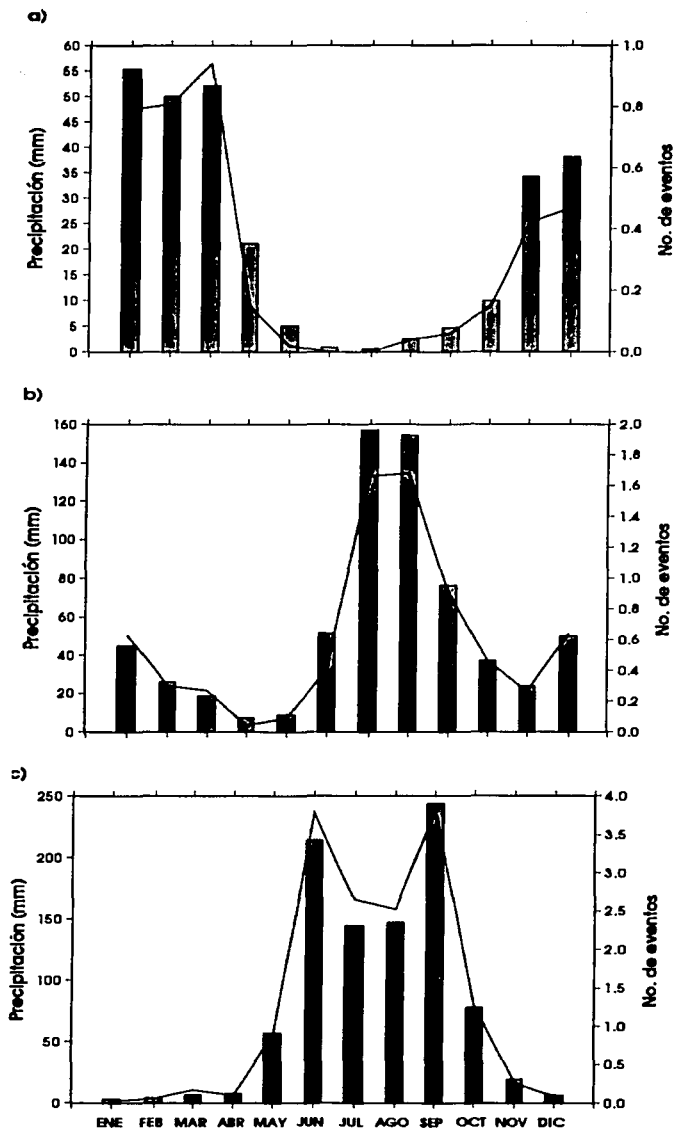


Fig. 3.3 Ciclo anual de precipitación mensual (barras) y número de eventos extremos (línea continua) en a) Ensenada, BCN, b) Batopilas, Chih. y c) Juchitán, Oax.

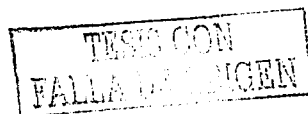
### **3.1.3 Variabilidad interanual de eventos extremos de precipitación diaria**

La variabilidad interanual de la precipitación en México es modulada en parte por el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) (Magaña y Quintanar 1997). Este evento del clima explica hasta un 30% de la variabilidad de las lluvias en ciertas regiones de México.

Durante inviernos El Niño, el paso de sistemas de latitudes medias, por ejemplo frentes fríos, se vuelve más frecuente en la parte norte de México, provocando más lluvias en el norte y centro de nuestro país. El aumento en la frecuencia de dichos sistemas está asociado con cambios en la posición de la corriente en chorro de latitudes medias y subtropicales, la cual se desplaza hacia el sur. Por lo que se experimentan lluvias invernales más frecuentes e intensas en el norte de Baja California. Bajo estas circunstancias se espera que el número de eventos extremos de precipitación aumente. El impacto de El Niño en las lluvias invernales no siempre es el mismo. Por ejemplo, El Niño 1995-96 no parece haber resultado en más eventos extremos durante el invierno, mientras que durante El Niño 1997-98 el número de eventos extremos en invierno estuvo por encima de lo normal, principalmente en el noroeste de México (Fig 3.4a).

Durante años La Niña, las anomalías de precipitación invernal parecen tener un comportamiento opuesto a las observadas durante años El Niño. Por lo que el número de eventos extremos tiende a disminuir en el noroeste de México, tal y como ocurrió durante el invierno de La Niña 1988-89 (Fig 3.4a).

Por otro lado, durante veranos El Niño, se experimenta una disminución en las lluvias en la mayor parte del país, llegando con frecuencia a producirse sequías. Se experimenta una disminución de eventos extremos de precipitación en el sur de México, tal y como ocurrió durante El Niño 1997-98 en Juchitán, Oaxaca (Fig 3.4b). Durante el verano de La Niña, en la mayor parte del territorio mexicano las lluvias son cercanas a lo normal e incluso anómalamente intensas. Entre los factores que provocan más lluvias, tienen que ver con una mayor actividad de ondas del este y huracanes en el Caribe y el Golfo de México. Este aumento en la



precipitación de verano está asociado a una mayor ocurrencia de eventos extremos, como fue el caso de La Niña 1988-89 (Fig 3.4b).

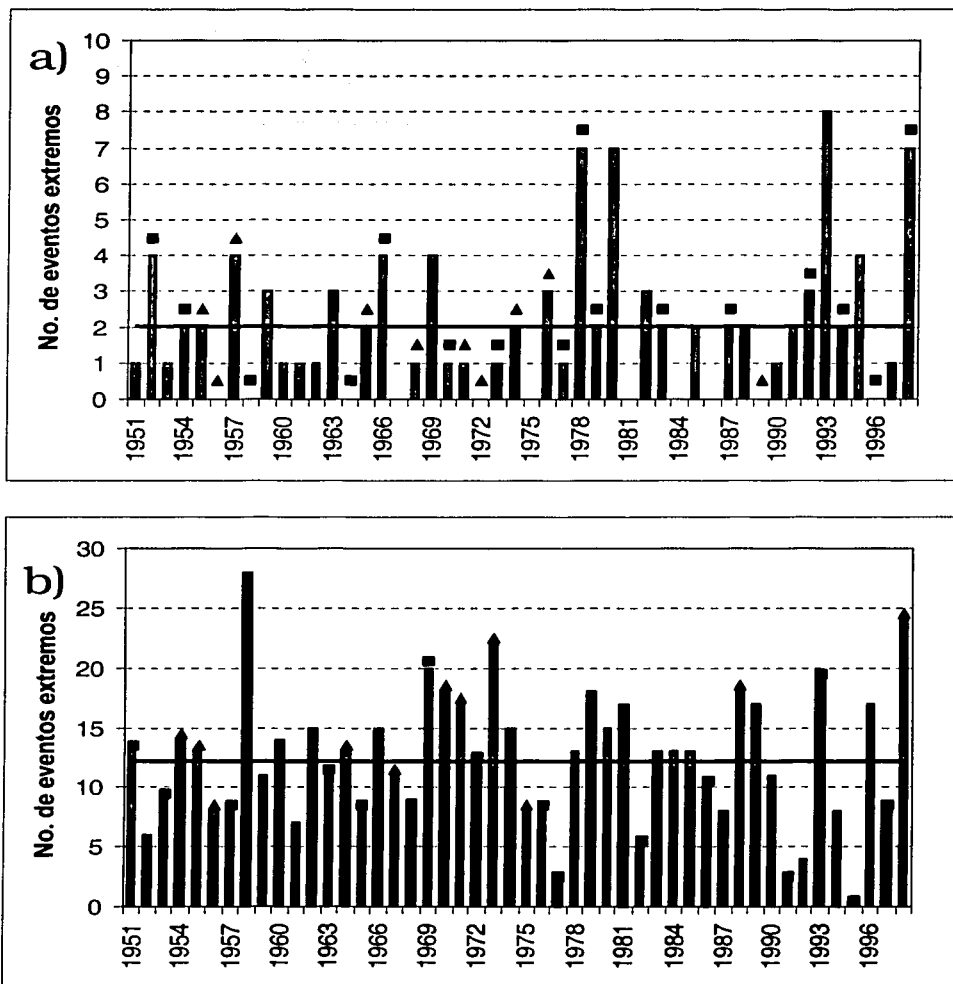


Fig 3.4. Número de eventos extremos de precipitación en a) Ensenada, BCN (invierno) y b) Juchitán, Oax (verano). (■ El Niño y ▲ La Niña)

### 3.1.4. Tendencias de eventos extremos de precipitación

La actividad convectiva que resulta en eventos extremos presenta variaciones de un año a otro, haciendo que varíe el número de estos últimos. Durante el periodo 1950-1998, el número anual de días con lluvia aumentó, principalmente en los estados del norte (Fig. 3.5), mientras que para el centro y sur hubo una tendencia a menos días de lluvia al año. Estas tendencias se reflejan en la ocurrencia de eventos extremos, ya que al aumentar ó disminuir los días lluviosos, aumenta o disminuye la probabilidad que ocurran estos eventos. Así, en sitios donde los días lluviosos han aumentado (disminuido), la tendencia es a que ocurran más (menos) eventos extremos (Fig 3.6). El hecho que aumenten ó disminuyan los eventos extremos cobra importancia en regiones de escasa disponibilidad de agua, como es el caso del norte de México. En esta región, con poca lluvia (entre 200 y 600 mm al año), gran parte del agua disponible está relacionada con eventos extremos. De aquí, se propone que una reducción en el número de eventos extremos resulte en la ocurrencia de sequía, más que la sola disminución del número de días con lluvia. Esto se discutirá en la sección del análisis de la sequía meteorológica en el norte de México (Sección 3.2).

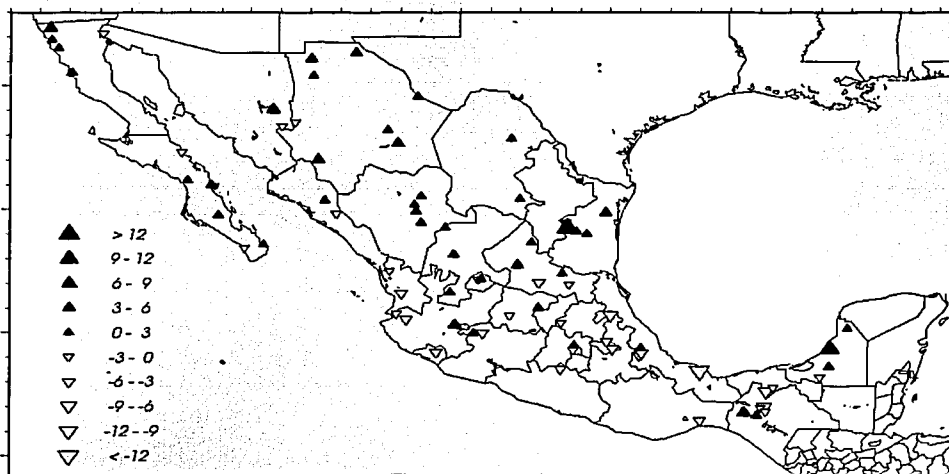


Fig. 3.5 Tendencia de número de días con precipitación (días/década)

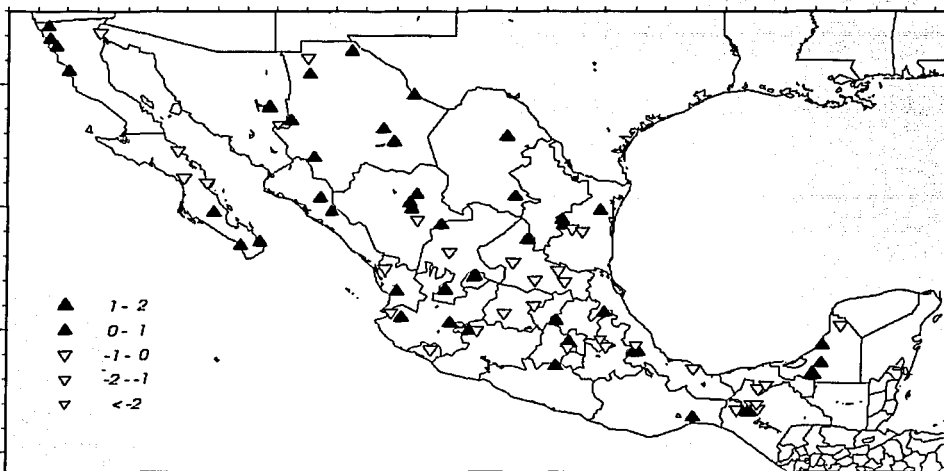


Fig. 3.6 Tendencia de número de eventos extremos de precipitación diaria (eventos/década)

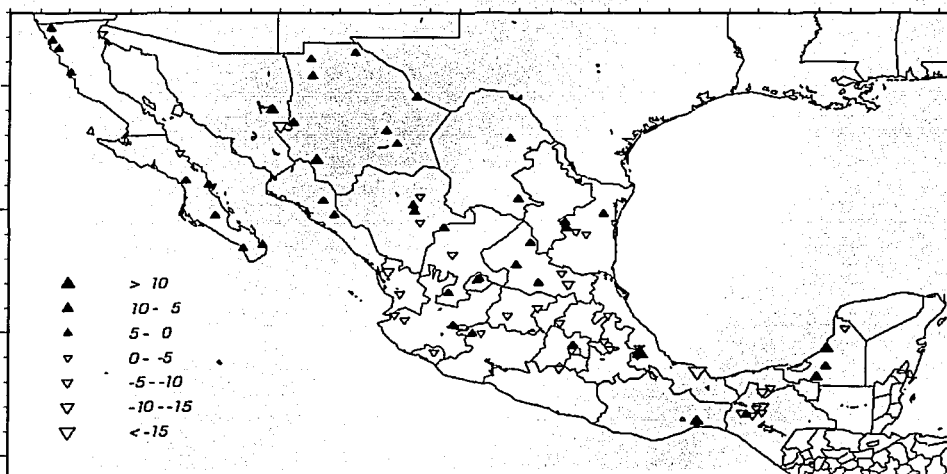


Fig. 3.7 Tendencia de precipitación anual (mm/año)

Por otro lado, un aumento de días lluviosos combinado con una mayor ocurrencia de eventos extremos (asociados a tormentas severas), contribuyen a que la precipitación anual esté aumentando en algunos sitios del país (por ejemplo Sonora y Chihuahua) (Fig 3.7). Para los estados del sur, con una tendencia a menos días lluviosos el número de eventos extremos se reduce, provocando en parte que la precipitación anual esté disminuyendo en esa región. Una explicación de tal disminución de la precipitación anual en el sur de México, es que podría estar relacionada con la actividad de la ZITC durante veranos El Niño. Cuando ocurre este fenómeno, la ZITC tiende a desplazarse hacia el sur (cerca del ecuador), favoreciendo a una mayor actividad convectiva y lluvias a esas latitudes, mientras que en latitudes más altas aumenta la subsidencia. Un incremento en la frecuencia e intensidad de El Niño en las últimas dos décadas podría estar produciendo una menor cantidad de lluvia. Por otro lado, el efecto de los huracanes debe ser considerado, aunque no es claro si éstos producen más ó menos lluvias sobre México al desplazarse por el Pacífico del este. Al producir convergencia de humedad intensa, en partes continentales tienden a secarse. En las últimas décadas ha aumentado el número de huracanes en el Pacífico del este (Pérez 2000).

## 3.2 Análisis de la sequía meteorológica en el norte de México

### 3.2.1 Variabilidad de la sequía meteorológica

Siguiendo el procedimiento estadístico se puede definir la sequía como parte de la variabilidad de las lluvias. Usando datos mensuales o anuales, se pueden analizar los casos que corresponden a menos de una o dos desviaciones estándar de la media para considerar un evento anómalamente seco. De acuerdo al criterio propuesto en la sección 2.2.3, entre 1950 y 1998 han ocurrido dos importantes periodos de sequía en el norte de México: 1950-1956 y 1993-1996, como se observa usando los datos de precipitación anual de la ciudad de Ojinaga, Chihuahua (Fig. 3.8). En este sitio han ocurrido 11 eventos de sequía, destacando por su severidad y duración los periodos mencionados arriba.

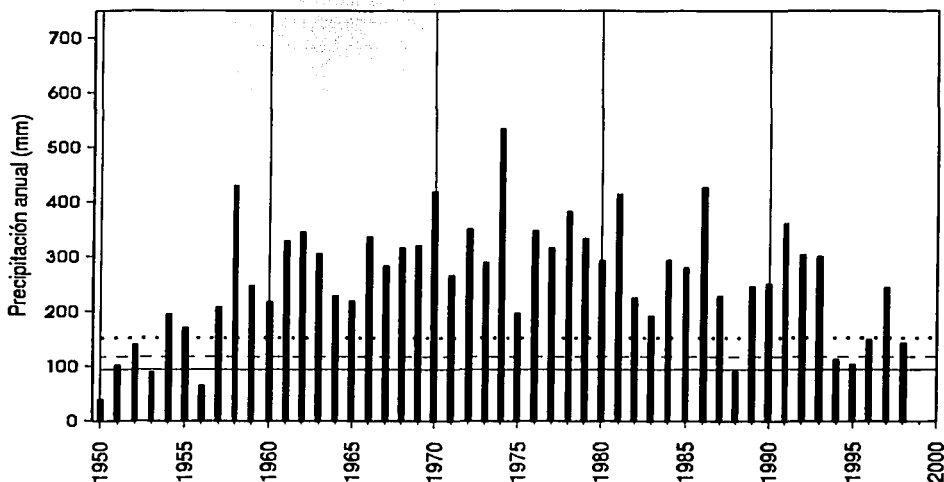


Fig. 3.8 Precipitación anual en mm, y valores umbrales que definen a la sequía moderada (línea punteada), severa (línea a trazos) y extrema (línea continua) en Ojinaga, Chih.

La sequía de inicios de los cincuentas, cubrió la región de las Grandes Planicies en los Estados Unidos (Woodhouse y Overpeck 1998), extendiéndose hasta el norte de México. Esta sequía causó graves pérdidas económicas, siendo el sector agrícola uno de los más afectados.





En el estado de Chihuahua, esta sequía fue resultado de una reducción en el número de días lluviosos al año. Éstos disminuyeron en promedio un 50%, aproximadamente 15 días menos de lluvias al año, tal y como sucedió en Ojinaga, Chihuahua (Fig 3.9). Algo semejante ocurrió durante la sequía de mediados de los noventas. En estos dos periodos de sequía, el número de eventos extremos de precipitación se redujo, por lo que su contribución a la precipitación anual fue menor en el norte de México. Dado que en esta parte del país, climatológicamente llueve poco, la ocurrencia ó ausencia de eventos de lluvia intensa determina si el año es húmedo ó seco.

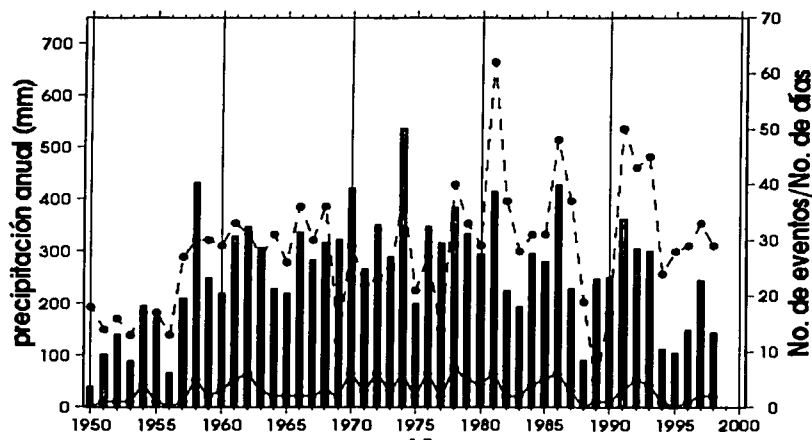


Fig. 3.9 Precipitación anual en mm ( barras), número de días lluviosos (línea punteada) y número de eventos extremos de precipitación (línea continua), en Ojinaga, Chih.

### 3.2.2 La sequía meteorológica y la disponibilidad de agua en el norte de México

La incidencia de sequía se ve reflejada, en la mayoría de las ocasiones, en el almacenamiento de las presas y en el caudal de los ríos, lo cual se traduce en el grado de disponibilidad del agua en la región.

En los primeros meses del año (enero-marzo), las presas mantienen un cierto nivel que depende del almacenamiento de los meses previos. Conforme transcurren los meses (abril-junio), se observa una temporada seca (disminuyen las lluvias) y el almacenamiento de la presa alcanza su valor más bajo. Pero una vez que inician las lluvias (julio-septiembre) las presas empiezan a recuperarse, hasta alcanzar los valores más altos del año, tal es el caso de 1981 y 1990 en presa de la Boquilla (Fig. 3.10), situada en la cuenca del Río Bravo, en el estado de Chihuahua. Si el periodo seco se prolonga por más meses, como ocurrió en 1994, la presa no logra captar suficiente agua, por lo que la disponibilidad de agua para los meses siguientes es escasa. Lo anterior debe ser tomado en cuenta, dado que una de las funciones de una presa es recolectar el agua durante la temporada lluviosa, para que en la temporada seca el agua almacenada sea distribuida en la región. De aquí que se deban llevar a cabo acciones estratégicas apropiadas para administrar el agua en esta región.

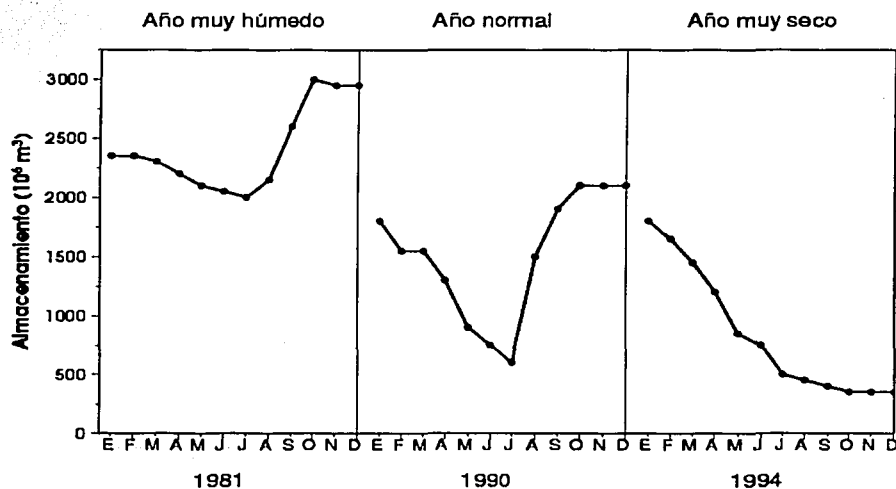
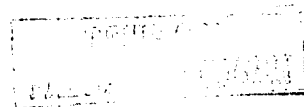


Fig 3.10 Almacenamiento mensual en millones de  $m^3$  de la presa La Boquilla, Chih., durante un año muy húmedo, normal y muy seco



En la sequía de los cincuentas, se registró una disminución en el nivel de almacenamiento de las presas. Por ejemplo, en la presa La Boquilla durante los dos periodos de sequía el almacenamiento de esta presa fue de los más bajos en su historia (Fig 3.11).

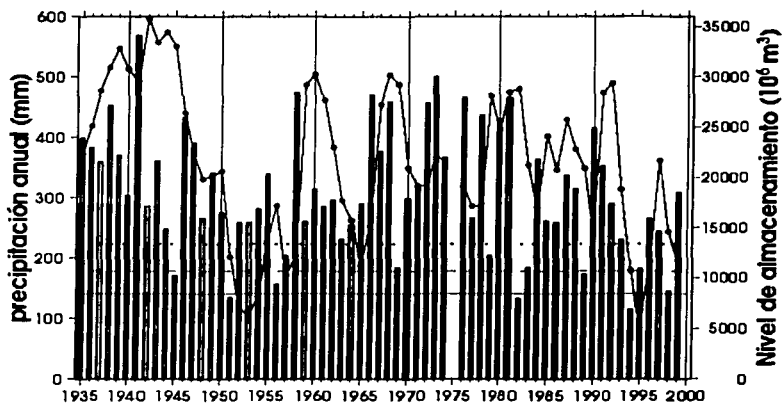


Fig. 3.11 Precipitación anual en mm (barras) y nivel de almacenamiento en millones de m<sup>3</sup> (línea continua) de la presa La Boquilla, Chih.

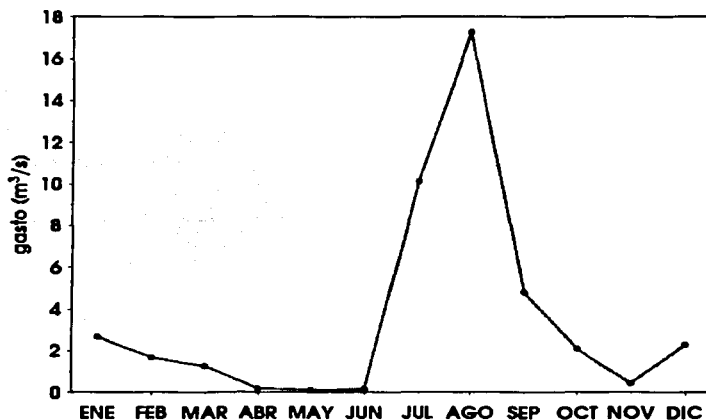


Fig 3.12 Ciclo anual del caudal en m<sup>3</sup>/s de la estación hidrométrica El Orégano (Hermosillo), Son

El caudal de los ríos, al igual que el nivel de almacenamiento de las presas, presenta un ciclo anual en que alcanza sus valores más altos durante los meses de lluvia y disminuye durante los meses secos. Como ejemplo, se puede mencionar a la estación hidrométrica El Orégano, situada cerca de Hermosillo, Sonora (Fig 3.12).

Uno de los moduladores de la precipitación en México de un año a otro es la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña. Durante años El Niño la precipitación en invierno tiende a aumentar en el noroeste de México, por lo que los niveles de agua de las presas y caudales de los ríos aumentan e incluso se recuperan de déficit previos. Por ejemplo, en la presa Plutarco Elías Calles en Sonora, la anomalía de precipitación en invierno asociada a El Niño 1982-83, provocó que los caudales del río alimentador aumentaran y con ello los niveles de la presa (Fig 3.13). Aunque El Niño generalmente significa una mayor disponibilidad de agua durante el invierno para el noroeste de México, hay años en que este no es el caso. De ahí que resulta fundamental distinguir entre diversos eventos El Niño, principalmente en cuanto a sus impactos en esta región.

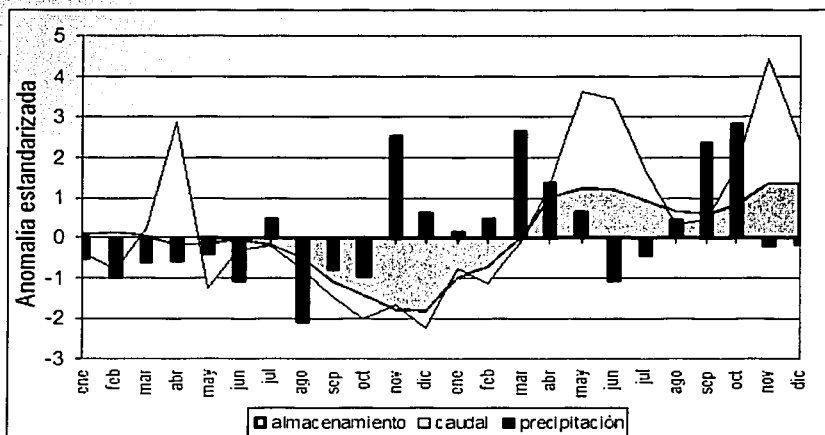
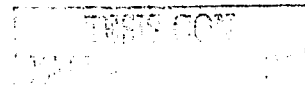


Fig 3.13 Anomalías normalizadas del nivel de almacenamiento, caudal y precipitación de la presa Plutarco Elías Calles (El Novillo, Sonora) durante El Niño 1982-83. (Magaña y Conde 2000)



En la mayoría de las estaciones hidrométricas del norte de México, el caudal anual promedio de los ríos presenta una ligera tendencia positiva, siendo más marcada en las últimas dos décadas. Por ejemplo en la estación hidrométrica El Orégano (Fig 3.14), la tendencia positiva en el caudal del río, indica en principio una mayor disponibilidad de agua para la región. Probablemente, este aumento en el caudal está relacionada con eventos El Niño más frecuentes en décadas recientes, que han impactado en las lluvias invernales.

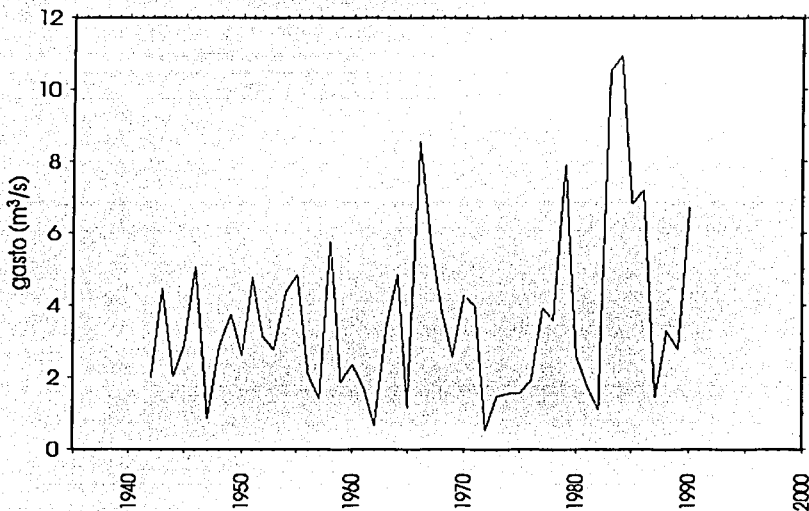


Fig. 3.14 Tendencia del caudal promedio en  $m^3/s$  de la estación hidrométrica El Orégano (Hermosillo, Son.)

Recientemente, se ha hablado de que el norte de México ha estado bajo condición de sequía durante los últimos 10 años. De acuerdo a los análisis de precipitación anual realizados en este estudio, se ha encontrado que esto no es completamente cierto quizá sólo 1994 y 2001 fueron años de sequía. La década de los 80s registró lluvia por encima de lo normal y se convirtió en un periodo anómalamente lluvioso. Los 90s sin embargo, muestran una tendencia a valores medios ó por debajo de estos valores normales, situación que ha sido interpretada como una sequía prolongada. En la región fronteriza algunas

industrias como las maquiladoras compiten por el agua con los agricultores y la población urbana, por lo que la demanda de agua crece más rápido que la disponibilidad de la misma (Magaña y Conde, 2000). Tal incremento en la demanda de agua se debe a un acelerado crecimiento demográfico del área urbana y de las actividades socioeconómicas (relacionadas con la agricultura, industria y generación de electricidad). Por ello se ha llevado a una disminución en las actividades agrícolas en los últimos años. Ante esta situación será necesario implementar estrategias que consideren la variabilidad interanual e interdecadal climática para el manejo del agua (como mejorar los sistemas de riego) y planes de adaptación. Se deberán buscar fuentes alternativas de agua (re-uso, desalinización, etc) para enfrentar las futuras demandas del vital líquido.

El Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) del Gobierno Federal, es un mecanismo financiero que apoya a entidades ante un fenómeno natural severo, coordinando las medidas necesarias para aminorar los daños. El FONDEN tiene ciertas reglas para hacer la llamada Declaratoria de Desastre Natural por sequía a petición de la Comisión Nacional del Agua. A continuación se transcribe parte de las Reglas de Operación en lo que se refiere a la sequía:

*“Los criterios para definir la presencia de una sequía son los siguientes: en la actividad pecuaria cuando las afectaciones dañan la capacidad de producción de forrajes en pastizales y agostaderos, ésta puede determinarse cuando la precipitación media mensual de mayo a noviembre en una cuenca hidrológica sea atípica e impredecible. En la agricultura, ocurre cuando los efectos de las bajas precipitaciones afectan a cultivos de ciclo corto, en este caso la determinación de la sequía estará íntimamente ligada a la etapa fenológica en que se encuentren los cultivos de la cuenca hidrológica en donde se presenten las anomalías de la precipitación, por lo que la disminución en la cantidad de lluvia puede ocurrir en un mes o menos, con respecto a su media histórica “.*

*Para determinar si la sequía es atípica e impredecible, se deberá, con la mejor información cuantitativa y cualitativa disponible, calcular las medias históricas del fenómeno en cuestión para la región de que se trate, así como las desviaciones estándares respectivas, determinándose como indicio de imprevisibilidad, una diferencia mayor a una desviación estándar de los valores medios observados.*



*La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación realizará acciones que permitan reforzar el dictamen de la Comisión Nacional del Agua en cuanto a otros elementos como la pérdida de humedad de los suelos y su efecto en los cultivos; lo cual presentarán a la Comisión Intersecretarial Gasto Financiamiento a más tardar en el mes de junio.*

En el segundo párrafo, que se refiere a considerar la sequía cuando la precipitación disminuye más de una desviación estándar por debajo del promedio. Esto supone que la precipitación se comporta como una distribución Normal (Gaussiana), cuando los análisis muestran que en la mayoría de los sitios el ajuste debe ser de tipo Gamma. Por ejemplo, utilizando el criterio del FONDEN, la sequía se declararía en Ciudad Delicias, Chihuahua, cuando la precipitación sea menor a 162 mm, mientras que con el criterio propuesto en este estudio, la sequía ocurriría una vez que la precipitación sea menor a 124 mm, como lo muestra la figura 3.15. Comparando ambos criterios, para este sitio, se observa que utilizar el ajuste normal hace que en algunas ocasiones sea declarada la sequía cuando en realidad no lo es.

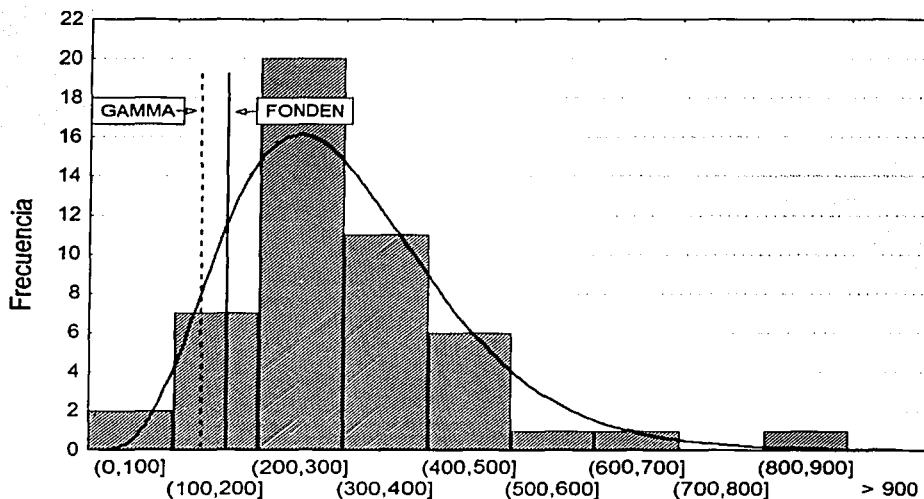


Fig 3.15 Determinación de ocurrencia de sequía mediante los criterios de FONDEN y el propuesto en este estudio (ajuste Gamma)

### 3.3 Capacidad de pronóstico de eventos extremos

#### 3.3.1 Precipitación diaria

El contar con información meteorológica que permita tomar medidas preventivas para aminorar los daños ocasionados por eventos hidrometeorológicos extremos se vuelve valiosa. Sin embargo, la prevención es posible siempre y cuando las predicciones de precipitación estén disponibles con cierta anticipación. Para tal propósito, se han desarrollado diversos modelos numéricos, los cuales son una de las herramientas más eficientes y utilizadas para el pronóstico del tiempo. En el caso de México, se ha utilizado el modelo de mesoescala MM5, desarrollado originalmente por Anthes y Warner (1978) y mejorado por la contribución de la comunidad mundial, principalmente por el National Center for Atmospheric Reserch (NCAR) (Dudhia et al 1999).

Desde junio del 2000, este modelo ha sido utilizado de manera operativa para la República Mexicana y el Valle de México. La capacidad del MM5 para pronosticar eventos extremos de precipitación en el Valle de México fue examinada por Magaña et al (2002). Los autores compararon los registros de precipitación diaria con los pronosticados durante el mes de septiembre del 2000, para el observatorio de Tacubaya, D.F. Resultó que la precipitación fue pronosticada adecuadamente (Fig. 3.16).

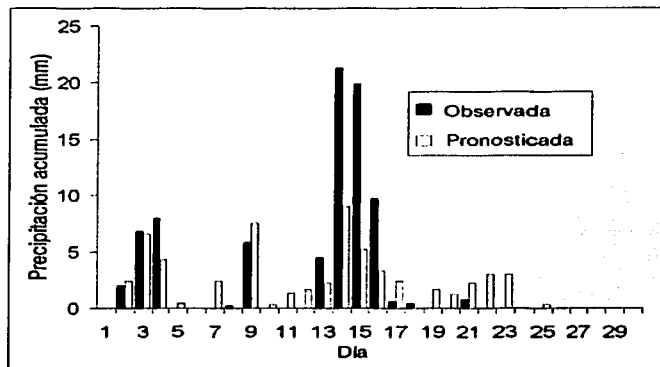


Fig. 3.16 Precipitación observada y estimada por el MM5 para septiembre del 2000, en Tacubaya, D.F.



El 14 de septiembre, se registró un evento extremo de lluvia (más de 20 mm en 24 horas), mientras que el MM5 pronosticó poco menos de 10 mm. Los autores concluyeron que el MM5 es capaz de reproducir los patrones espaciales de precipitación máxima y mínima (Fig. 3.17a y 3.17b). Sin embargo, en un dominio anidado con una mayor resolución (menos de 10 km), la localización exacta y la cantidad de precipitación en un evento extremo presentan las mayores diferencias al comparar lo observado con lo pronosticado. Diversos factores hacen que las predicciones de lluvia no sean perfectas, entre éstos destacan: la calidad de las condiciones iniciales y la limitación de los esquemas de parametrizaciones físicas (nubes Cúmulus, capa límite, radiación de onda larga y corta, etc).

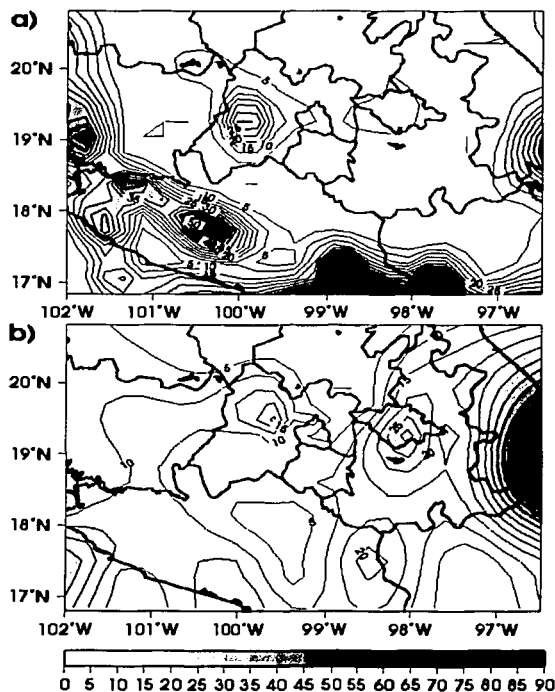


Fig. 3.17 Precipitación acumulada en mm para el día 14 de septiembre del 2000

a) estimada por el MM5 y b) observada

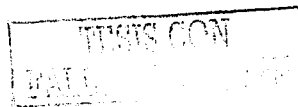
### **3.3.2 Sequía meteorológica**

Para atenuar los efectos adversos de la sequía meteorológica, es importante contar con información meteorológica y climatológica con cierta anticipación que permita tomar medidas preventivas, sobre todo en las sitios más vulnerables ante la ocurrencia de este tipo de eventos.

Para el caso de la sequía meteorológica, se utilizaron compuestos de anomalías de precipitación de simulaciones climáticas del Modelo Climático de la Comunidad (CCM3) del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Se analizó la sequía de 1994, dado que ésta afectó gran parte del territorio mexicano, principalmente el sur (Fig.3.18a). Al comparar las anomalías de precipitación simuladas con las observadas, el modelo CCM3 logra simular los patrones de anomalía negativa sobre la región sur del país (Fig 3.18b). Mientras que en el norte hubo diferencias significativas a tal grado que no logró simular la sequía en que se encontraba tal región.

Es por ello que en trabajos futuros será necesario analizar la predictibilidad del clima y determinar bajo que condiciones de pronóstico climático se pueden aplicar medidas de prevención.

Por el momento, sólo parte de la variabilidad de las lluvias (sequía) se ha explicado en términos de ENOS. Otros factores requieren ser investigados, sobre todo aquéllos relacionados con la variabilidad interdecadal del clima.



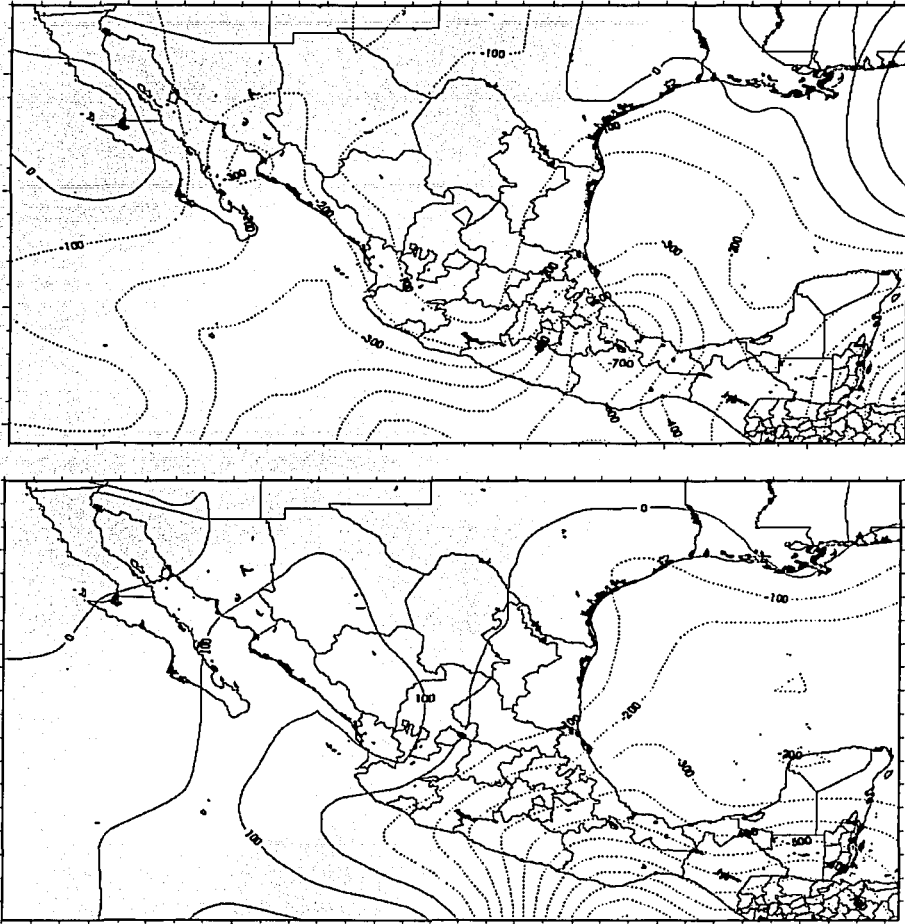


Fig. 3.18 Anomalías de precipitación en mm a) observada y b) simulada por el CCM3 durante el verano de 1994

#### **4. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO**

En la primera parte de este estudio se ha evaluado la importancia e interés que tiene la ocurrencia de eventos extremos de precipitación diaria. Este tipo de eventos no sólo trae consigo efectos negativos, como inundaciones o deslaves, sino también beneficios en lo que se refiere a la disponibilidad de agua sobre todo en el norte de México. Es decir, dado que en esta región del país anualmente llueve muy poco (entre 200 y 600 mm), el hecho que un año sea muy húmedo ó muy seco es determinado por un aumento ó disminución del número de eventos extremos.

Además, se ha observado que en la mayor parte del país, principalmente en el norte, hay una tendencia a un aumento de la precipitación anual, aunque en la última década se ha detectado una tendencia a la disminución dentro de los límites de su variabilidad. Esto ha generado cierta confusión a tal grado, que se habla de una sequía que se ha prolongado por los últimos diez años. Con los análisis realizados en este estudio se ha determinado que en efecto ha ocurrido una sequía severa, pero sólo en 1994 y 2001.

Se ha propuesto un criterio basado en una distribución Gamma para determinar la ocurrencia de la sequía meteorológica, ya que suponer que la precipitación se comporta como una distribución Normal hace que en la mayoría de las ocasiones se sobreestime y se declare sequía cuando en realidad no ha ocurrido.

En este estudio se ha discutido que en la región fronteriza del norte México la tendencia a más lluvias significa en principio una mayor disponibilidad de agua. Sin embargo, la competencia por el agua por parte de la industria maquiladora, agrícola y la población, han hecho que la demanda de agua crezca mucho más rápido que la disponibilidad de la misma. Ante esto se deben implementar estrategias para el manejo del agua que consideren la variabilidad climática. Entre estas medidas están mejorar los sistemas de captación de agua, promover una cultura del uso racional y eficaz del agua y planes de adaptación a

condiciones de sequía, entre otros. Además se deberán buscar fuentes alternativas de agua, como el re-uso, tratamiento de aguas negras y desalinización entre otras, con el fin de enfrentar las futuras demandas del vital líquido.

La importancia del agua es tal que, en el estado de Chihuahua, modula las actividades como la agricultura y la ganadería (Fig 4.1)

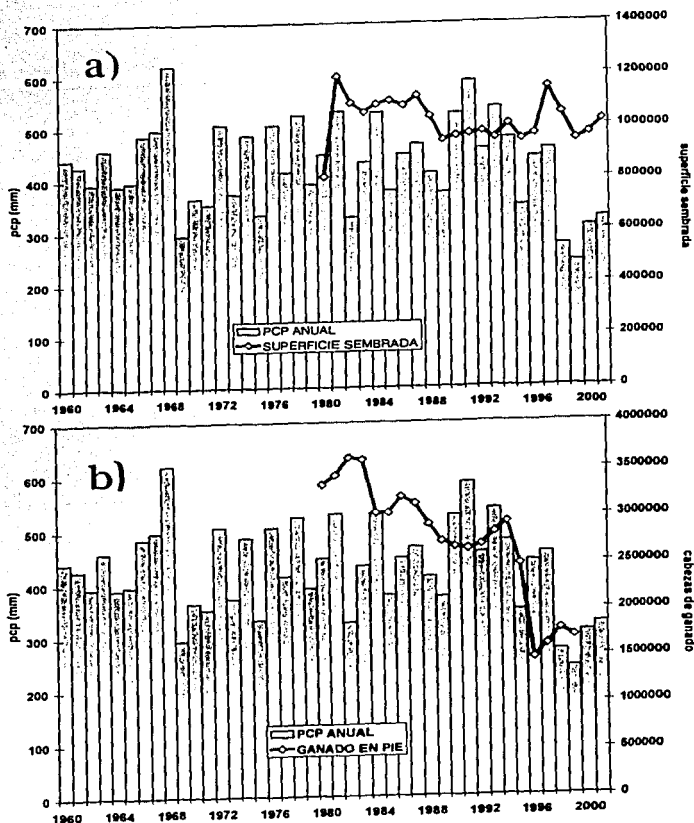
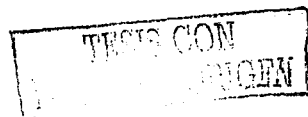


Fig 4.1 Precipitación anual en mm, a) superficie sembrada en hectáreas y b) cabezas de ganado en el estado de Chihuahua



Finalmente, se ha analizado la capacidad de pronóstico de eventos extremos de precipitación diaria, mediante el uso del modelo de mesoescala MM5. Este modelo es capaz de pronosticar la localización de los patrones de máxima y mínima precipitación, con cierta diferencia en la magnitud del evento extremo. Sin embargo, al tratar de aumentar la resolución (menor de 10 km) del dominio, se observaron diferencias entre lo observado y lo pronosticado en cuanto a la posición y magnitud de los eventos. Entre los factores que determina que los pronósticos no sean perfectos, destacan: la calidad de las condiciones iniciales y la limitación de los esquemas de parametrizaciones físicas (nubes Cúmulus, capa límite, radiación de onda larga y corta, etc.).

### **TRABAJO A FUTURO**

Como parte del trabajo a realizar, queda revisar los aspectos dinámicos que favorecen la ocurrencia y persistencia de sequía meteorológica en el norte de México.

Analizar la predictibilidad del clima y determinar bajo que condiciones de pronóstico climático se pueden aplicar medidas preventivas.

A lo anterior, surgen algunas preguntas a contestar:

¿Qué papel juega el desplazamiento hacia el norte de la Zona Intertropical de Convergencia en la subsidencia y en la disminución de la precipitación en el norte de México?

¿ Cuáles son los patrones espaciales y temporales de la sequía en el norte de México ?

¿ Qué factores físicos y dinámicos determinan la extensión espacial y la duración de una sequía ?



## APÉNDICES

### Apéndice A

#### Función de Distribución de Probabilidad Gamma

Diversas variables físicas presentan asimetría, sesgo hacia la derecha y están limitadas del lado izquierdo por el cero. Tal es el caso de la precipitación y la intensidad del viento. Aunque es matemáticamente posible hacer un ajuste mediante la distribución Normal ó Gaussiana a estas variables, los resultados en ocasiones son físicamente imposibles, por ejemplo obtener valores negativos de precipitación. Ante esta situación, para el análisis de probabilidad con datos de precipitación es recomendable utilizar la Función de Distribución de Probabilidad (FDP) Gamma.

La FDP Gamma está definida por la expresión:

$$f(x) = (x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta) / (\beta \Gamma(\alpha)) ; \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (A.1)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los llamados parámetros de *forma* y *escala*, respectivamente. Mientras que  $\Gamma$  es la función Gamma, definida por la integral

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (A.2)$$

La función Gamma debe ser evaluada numéricamente ó aproximada utilizando valores en tablas que se pueden consultar en libros de estadística. La función Gamma satisface la siguiente relación de recurrencia:

$$\Gamma(\alpha + 1) = \alpha \Gamma(\alpha) \quad (A.3)$$

La forma característica de la distribución Gamma se muestra en la figura A.1.

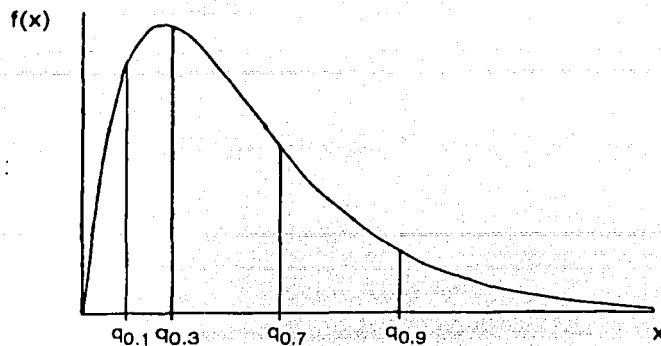


Fig A.1 Función de Distribución de Probabilidad Gamma  
y el uso de percentiles

El parámetro de forma,  $\alpha$ , es adimensional. Dependiendo del valor del parámetro  $\alpha$ , la FDP Gamma toma una gran variedad de formas (Fig. A.2). Para valores de  $\alpha < 1$  la distribución está muy sesgada hacia la derecha, con  $f(x) \rightarrow \infty$  conforme  $x \rightarrow 0$ . Para  $\alpha = 1$ , la función interseca al eje vertical en  $1/\beta$  para  $x = 0$ , este es un caso especial de la distribución Gamma llamado *distribución exponencial Gamma*. Mientras que para  $\alpha > 1$  y conforme su magnitud es cada vez mayor, resulta en un menor sesgo y la distribución se desplaza hacia la derecha. Para valores de  $\alpha$  muy grandes, la FDP Gamma se aproxima en su forma a la FDP Gaussiana.

Por otro lado, el parámetro de escala,  $\beta$ , tiene la función de “alargar”, es decir escalar, a la distribución Gamma hacia la derecha ó a la izquierda, dependiendo de los valores de los datos representados. El parámetro  $\beta$  tiene las mismas dimensiones físicas en las que se expresa la variable  $x$ . Conforme los valores de  $\beta$  aumentan, la distribución se alarga hacia la derecha y su altura debe disminuir para satisfacer A.1. Conforme la distribución Gamma se alarga hacia la izquierda, su altura debe aumentar. Estos ajustes en altura de la distribución se deben al parámetro  $\beta$  del denominador de la ecuación A.1.



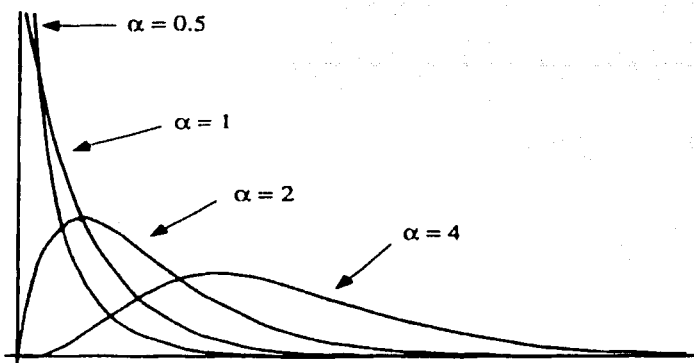


Fig. A.2 FDP Gamma para diferentes parámetros  $\alpha$

Una buena aproximación para determinar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , es utilizando el llamado método de máxima probabilidad (*maximum likelihood*). Para muchas distribuciones, incluyendo la Gamma, este ajuste requiere de un procedimiento iterativo, el cual es práctico con ayuda de una computadora. Por lo anterior, hay dos aproximaciones simples para los estimadores de la máxima probabilidad en una distribución Gamma. En ambas aproximaciones se emplea el estadístico de muestra

$$D = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (\text{A.4})$$

El cual corresponde a la diferencia entre el logaritmo natural del valor promedio de la muestra y el promedio del logaritmo natural de los datos.

La primera de las dos aproximaciones de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , fue propuesta por Thom (1958). El estimador de Thom para el parámetro  $\alpha$  es

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4D/3}}{4D} \quad (\text{A.5})$$

Mientras que  $\beta$  se obtiene con

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (\text{A.6})$$

La segunda aproximación para determinar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , es usando una expresión polinomial en términos del estadístico de muestra  $D$  :

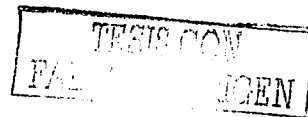
$$\alpha = \frac{0.5000876 + 0.1648852D + 0.0544274D^2}{D} \quad (\text{A.7a})$$

$$0 \leq D \leq 0.5772$$

$$\alpha = \frac{8.898919 + 9.059950D + 0.9775373D^2}{17.79728D + 11.968477D^2 + D^3} \quad (\text{A.7b})$$

$$0.5772 \leq D \leq 17.0$$

Y finalmente, el parámetro  $\beta$  se calcula con la ecuación A.6



## Apéndice B

### Función de Distribución de Probabilidad Gaussiana ó Normal

Esta distribución de probabilidad juega un papel importante dentro de la estadística. La FDP Gaussiana es la curva en forma de campana tan familiar.

La FDP Gaussiana está definida por la expresión:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]; \quad -\infty < x < \infty \quad \text{B.1}$$

donde  $\mu$  es la media aritmética,  $\sigma$  es la desviación estándar y  $\pi$  es la constante matemática 3.14159....

Al graficar la ecuación B.1, resulta la curva en forma de campana mostrada en la figura B.1. Donde  $\mu$  sitúa el centro de esta distribución simétrica, mientras que  $\sigma$  controla el grado en que los datos se distribuyen alrededor de la media aritmética. Casi toda la probabilidad está dentro de  $\pm 3\sigma$  alrededor de la media aritmética.

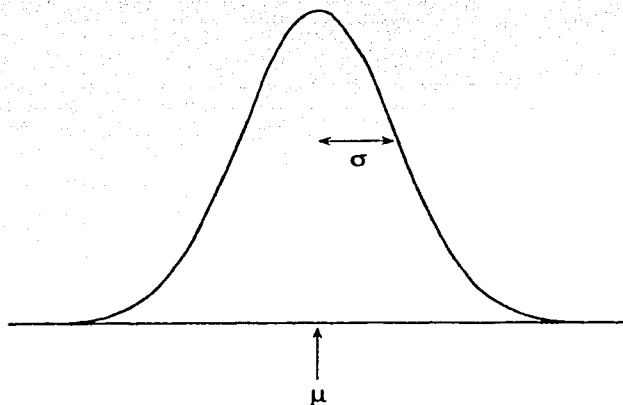


Fig B.1 Función de Distribución de Probabilidad Gaussiana ó Normal

Para calcular la probabilidad de un evento, se debe integrar B.1. La integración analítica de esta ecuación es imposible. Por lo que la probabilidad se puede obtener de dos formas. La primera consiste en aproximar la integración de B.1 mediante un algoritmo elaborado con algún lenguaje de programación (fortran, C, etc.). Y la segunda forma, es utilizando tablas de valores de probabilidad, que en cualquier libro de estadística es posible encontrar. En ambos casos, es necesario transformar los datos. Esto debido a que las tablas de probabilidad y algoritmos están diseñados para una distribución Gaussiana "estandarizada", es decir una distribución Gaussiana con  $\mu = 0$  y  $\sigma = 1$ . De aquí que la densidad de probabilidad se reduce a

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] \quad \text{B.2}$$

Cualquier variable  $x$  puede ser transformada a su forma estandarizada  $Z$ , con solo sustraerle su media y dividiéndola por su correspondiente desviación estándar:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad \text{B.3}$$

En fines prácticos, se utilizan la media y la desviación estándar de la muestra de datos, por lo que se tiene:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad \text{B.4}$$

Esta ecuación es la llamada *anomalía estandarizada*.



## BIBLIOGRAFÍA

Anthes, R.A. y T.T. Warner, 1978: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meteorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045-1078.

De Maria M. and J. Kaplan, 1994: Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones. *Journal of Climate*, **7**, 1325-1334.

Douglas, Michael W., Robert A. Maddox, Kenneth Howard, Sergio Reyes, 1993: The Mexican Monsoon. *Journal of Climate*, **6**, 8, 1665-1678.

Dudhia J., D. Gill, Y.-R. Guo, D. Hansen, K. Manning, and W. Wang, 1999: PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System Version 2).

Easterling, D., Henry F. Diaz, Arthur V. Douglas, William D. Hogg, Kenneth E. Kunkel, Jeffrey C. Rogers, Jaime F. Wilkinson, 1999: Long-term observations for monitoring extremes in the Americas. *Climatic Change*, **42**, 285-308.

Easterling, D. R., J. L. Evans, P. Ya. Groisman, T. R. Karl, K. E. Kunkel, P. Ambenje, 2000: Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **81**, 3, 417-426.

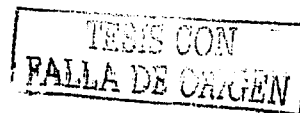
García-Enriqueta y Ma. Engracia Hernández, 1988: Anomalías de precipitación en la República Mexicana de 1921 a 1980. *Revista de Geografía*, Vol. II, No. 3. México, D.F.

Gordon H.B., Whetton P.H., Pittock A.B., Fowler A.M. and Haylock M.R., 1992: Simulated changes in daily rainfall intensity due to the enhanced greenhouse effect: implications for extreme rainfall events. *Climate Dynamics*, **8**, 83-102.

Groisman, P. Pavel Ya. Groisman, Thomas R. Karl, David R. Easterling, Richard W. Knight, Paul F. Jamason, Kevin J. Hennessy, Ramasamy Suppliah, Cher M. Page, Joanna Wibig, Krzysztof Fortuniak, Vyacheslav N. Razuvaev, Arthur Douglas, Eirik Førland, Pan-Mao Zhai, 1999: Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic Change*, **42**, 243-283.

Heim Richard R., 2002: A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 8, 1149-1165.

Hennessy, K.J., Gregory, J.M., Mitchell, J.B.F., 1997: Changes in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions. *Climate Dynamics*, **13**, 667-680.



Inoue, Masamichi, Itsuki C. Handoh, Grant R. Bigg, 2002: Bimodal Distribution of Tropical Cyclogenesis in the Caribbean: Characteristics and Environmental Factors. *Journal of Climate*. **15**, 20, 2897-2905.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report. Cambridge University Press. 1032 pp

Jáuregui, Ernesto, 1989: Los huracanes prefieren a México. *Información Científica y Tecnológica*, 11, 155 pp. México, CONACyT.

Jáuregui Ernesto, 2000: El Clima de la ciudad de México. *Temas Selectos de Geografía de México*. Editado por el Instituto de Geografía de la UNAM y Plaza y Valdés, 131pp.

Jáuregui Ernesto, 2001: Las precipitaciones extremas en la ciudad de México. II Congreso de la Asociación Española de Climatología: El tiempo del clima. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), 2001, Serie A, nº 2. Editorial Garmas Impresores, Buñol (Valencia), 574 pp.

Karl, Thomas R., Richard W. Knight, David R. Easterling, Robert G. Quayle, 1996: Indices of Climate Change for the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **77**, 2, 279-292.

Karl, Thomas and Richard W. Night, 1998: Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of American Meteorological Society*. **77**, 279-292.

Karl T.R. Neville Nicholls and Anver Ghazi, 1999: CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes. *Climatic Change*. **42**, 3-7.

Katz, Richard W., 1999: Extreme value theory for precipitation: sensitivity analysis for climate change. *Advances in Water Resources*. **23**, 133-139.

Katz R.W. and Brown, B.G., 1992: Extreme Events in a Changing Climate are more Important than Averages. *Climatic Change*. **21**, 289-302.

Keyantash, John. John A. Dracup, 2002: The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **83**, 8, 1167-1180.

Koster, Randal D., Max J. Suarez, Mark Heiser, 2000: Variance and Predictability of Precipitation at Seasonal-to-Interannual Timescales. *Journal of Hydrometeorology*: **1**, 1, 26-46.

- Magaña, Víctor, 1999: Los impactos de El Niño en México. Dirección General de Protección Civil-Secretaría de Gobernación, México.
- Magaña Víctor, Jorge Amador and Socorro Medina, 1999: The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, **12**, 6, 1577-1588.
- Magaña, Victor, and Cecilia Conde, 2000: Climate and freshwater resources in Northern Mexico: Sonora, a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, **61**, 167-185.
- Magaña, Victor and Quintanar Arturo, 1997: On the use of a general circulation model to study regional climate. UNAM-CRAY Supercomputing Conference on Earth Sciences. Mexico City, June 1997. Ed. Cambridge University Press, 39-48
- Magaña, Victor., Joel Pérez, and Matias Méndez (2002). Diagnostic and prognostic of extreme precipitation events in the Mexico Basin. *Geofísica Internacional (en prensa)*.
- Manton P.M. Della-Marta, M.R. Haylock, K.J. Hennessy, N. Nicholls, L.E. Chambers, D.A. Collins, G. Daw, A. Finet, D. Gunawan, K. Inape, H. Isobe, T.S. Kestin, P. Lefale, C.H. Leyu, T. Lwin, L. Maitrepierre, N. Ouprasitwong, C.M. Page, J. Pahalad, N. Plummer, M.J. Salinger, R. Suppliah, V.L. Tran, B. Trewin, I. Tibbig, D. Yee, 2001: Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *International Journal of Climatology*, **21**, 269-284.
- Meehl, Gerald A., Thomas Karl, David R. Easterling, Stanley Changnon, Roger Pielke, David Changnon, Jenni Evans, Pavel Ya. Groisman, Thomas R. Knutson, Kenneth E. Kunkel, Linda O. Mearns, Camille Parmesan, Roger Pulwarty, Terry Root, Richard T. Sylves, Peter Whetton, Francis Zwiers, 2000: An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts, and Model Projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*: **81**, 3, 413-416.
- Nicholls Neville, 1995: Long-term climate monitoring and extreme events. *Climatic Change*, **31**, 231-245.
- Nicholls Neville and William Murray, 1999: Workshop on Indices for Climate Change: Asheville, NC, USA, 3-6 June 1997, Breakout Grup B: Precipitation. *Climatic Change*, **42**, 23-29.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2002: Reducción de la vulnerabilidad a los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Folleto del Día Meteorológico Mundial 2002.

Pérez Fernández, Joel B. (2000) Los ciclones tropicales del Atlántico y el Pacífico mexicanos y su relación con El Niño/Oscilación del Sur. Tesis de licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana, 55 pp.

Plummer Neil, M. James Salinger, Neville Nicholls, Ramasamy Supplah, Kevin J. Hennessy, Robert M. Leighton, Blair Trewin, Cher M. Page, Janice M. Lough, 1999: Twentieth century trends in climate extremes over the Australian region and New Zealand. *Climatic Change*. **42**, 183-202

Redmond, Kelly T., 2002: The Depiction of Drought: A Commentary. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **83**, 8, 1143-1147.

Reyes, Sergio, Michael Douglas and Robert A. Maddox, 1994: El Monzón del Suroeste de Norteamérica (TRAVASON/SWAMP). *Atmósfera*, **7**, 117-137.

Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAP, 1998: Los incendios forestales en México.

Schultz D.M., W.E. Bracken, L.F. Bosart, G.J. Hakim, M.A. Bedrick, M.J. Dickinson y K.R. Tyle, 1997: The 1993 superstorm cold surge: frontal structure, gap flow, and tropical impact. *Monthly Weather Review*, **125**, 1, 5-39.

Uribe Alcántara, Edgar Misael, 2000: Análisis de la Variabilidad de la Precipitación en Tamaulipas. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Geofísica, UNAM, 44pp.

Uribe Alcántara, Edgar Misael, 2002: El inicio de la temporada de lluvias en la costa sudoeste de México: Relaciones para su diagnóstico y pronóstico. Tesis de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera). UNAM, 69 pp.

Wilhite and Glantz, 1985: Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, **10**, 111-120.

Wilks, Daniel S., 1995: Statistical Methods in Atmospheric Sciences. Academic Press, New York.

Wilhite Donald, 1993: Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies. Kluwer Academic Publishers. 293 pp

Woodhouse, Connie A. and Jonathan T. Overpeck, 1998: 2000 Years of Drought Variability in the Central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*: **79**, 12, 2693-2714.

