



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

**VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN LA
REPÚBLICA MEXICANA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS
(FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)**

PRESENTA

JORGE LUIS VÁZQUEZ AGUIRRE

DIRECTOR DE TESIS

DR. VÍCTOR O. MAGAÑA RUEDA



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.

Dedico la conclusión de este trabajo

A Elena Palacios, por el significado y la vida que da a mi vida con su presencia.

A mis buenos amigos(as) con quienes he tenido la dicha de compartir lo cotidiano.

A la memoria de Miguel Cortez, colega y amigo que dio un giro a mi carrera profesional.

Agradezco

A todos y cada uno de los que han aportado desde una sola palabra hasta un esfuerzo mayor en tiempo o recursos para mi crecimiento académico y personal; mencionarlos a todos sería muy complicado para mí en el momento de escribir estas líneas, pero en nuestro diálogo, silencio, mirada, abrazo o apretón de manos todos ustedes saben bien de mi sincero agradecimiento. Muchas gracias.

*La primera lluvia del año moja las calles,
Abre el aire,
Humedece mi sangre.
¡Me siento tan a gusto y tan triste, Tarumba,
viendo caer el agua desde quién sabe,
sobre tantos y tanto!
Ayúdame a mirar sin llorar,
Ayúdame a llover yo mismo sobre mi corazón
Para que crezca como la planta del chayote
O como la yerbabuena.
¡Amo tanto la luz adolescente
de esta mañana
y su tierna humedad!
¡Ayúdame, Tarumba, a no morirme,
a que el viento no desate mis hojas
ni me arranque de esta tierra alegre!*

Jaime Sabines: Tarumba, fragmento.

• Esta tesis de maestría fue realizada gracias a las siguientes contribuciones:

La atinada dirección de mi asesor y director académico el Dr. Víctor Magaña Rueda.

La acertada evaluación de los miembros del jurado: Dr. Ernesto Jáuregui Ostos, M. en C. René Garduño López, Dr. Victor Mendoza Castro y Dr. Ernesto Dos Santos Caetano Neto.

Mis estudios de maestría y la realización de esta tesis recibieron apoyo financiero de:

El Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM a través de los proyectos de investigación del Grupo de Meteorología Tropical.

El IAI a través de los proyectos CRN I, específicamente de los apoyos a la CRN73.

La Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres y el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El Instituto Nacional de Ecología a través del Programa Nacional de Modelación del Clima.

Comentarios técnicos, datos, sugerencias, facilidades y otros apoyos son mérito de:

El Lic. Jesús Escamilla Juárez y su equipo en AGROASEMEX, S.A., con mención especial a los diálogos con Luisarturo Castellanos.

Edgar Méndez y Juan Matías Méndez impulsaron sobremanera la conclusión de esta tesis, mediante su apoyo académico, técnico y amistoso, e igual mi compadre Gustavo Vázquez.

Los Dres. Tomás Morales y Carlos Gay del CCA-UNAM. El Posgrado en Cs. De la Tierra.

El Dr. Adalberto Tejeda Martínez y el Grupo de Climatología Aplicada de la UV.

El Dr. Juan Cervantes Pérez y la Mtra. Beatriz Palma de la UV.

Los Dres. Jorge Amador, Eric Alfaro y Javier Soley de la Universidad de Costa Rica.

La M.C. Patricia Ramírez Obando y el grupo del Foro del Clima de Centroamérica.

Los Dres. Manola Brunet y Enric Aguilar de la Universitat Rovira i Virgili y el

Prof. Phil Jones de la Climatic Research Unit, UEA.

El Servicio Meteorológico Nacional a través de los Dres. Michel Rosengaus y Valentina Davydova, y en espeical de como de Miguel Cortez, Javier Espinoza, Alejandro González,

Adolfo Portocarrero, Reynaldo Pascual y desde el PROMMA el Dr. Venancio Trueba.

Los Dres. Wei Shi y Harry Glahn de NOAAy el Dr. Arthur V. Douglas de Creighton.

Elena Palacios me acompañó durante la travesía de concluir este trabajo brindándome su paciencia, motivación y espíritu de progreso, el cual siembra siempre entre sus estudiantes.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CIUDAD UNIVERSITARIA

DELEGACION COYOACAN

C.P. 04510 MEXICO, D.F.



Of. No. PCT/JOCE/904/02

Asunto: Asignación de jurado para
examen de grado.

JORGE LUIS VAZQUEZ AGUIRRE

Estudiante de Maestría

Física de la Atmósfera

Presente

El Comité Académico del Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 4 de junio del año en curso, aprobó a los siguientes investigadores como el jurado de examen de grado ante quien defenderá la tesis titulada "Variabilidad de la precipitación en la República Mexicana":

Dr. Ernesto Jáuregui Ostos	Presidente
M. en C. René Garduño	Vocal
Dr. Victor Magaña Rueda	Secretario
Dr. Victor Manuel Mendoza Castro	Suplente
Dr. Ernesto Caetano Neto	Suplente

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Ciudad Universitaria a 6 de junio del 2002

EL COORDINADOR DEL PROGRAMA

DR. J. OSCAR CAMPOS ENRIQUEZ

JOCE'achg

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Institutos de Investigaciones Matemáticas Aplicadas y de Sistemas,
Geofísica, Geología y Geografía. ocampos@tonatiuh.igeofcu.unam.mx, tolsen@servidor.unam.mx
Tel. 56224130, 56224137 y 56224324 Ext. 122 Fax: 56224097 y 5622 43 26



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Centro de Ciencias de la Atmósfera

CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA
C. P. 04510 MEXICO, D. F. MEXICO

Ciudad Universitaria, México, D.F. a 6 de junio de 2007.

Dra. Blanca Emma Mendoza Ortega
Coordinadora del Programa de Posgrado en
Ciencias de la Tierra.
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente.

Por este conducto me permito comunicar a usted que, en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (opción Física de la Atmósfera), **Jorge Luis Vázquez Aguirre**, he leído y revisado la tesis titulada **"Variabilidad de la precipitación en la República Mexicana"** y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente


Dr. Ernesto Jáuregui Ostos



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Centro de Ciencias de la Atmósfera

CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA
C. P. 04510 MEXICO, D. F. MEXICO

Ciudad Universitaria, México, D.F. a 5 de junio de 2007.

Dra. Blanca Emma Mendoza Ortega
Coordinadora del Programa de Posgrado en
Ciencias de la Tierra.
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente.

Por este conducto me permito comunicar a usted que, en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (opción Física de la Atmósfera), **Jorge Luis Vázquez Aguirre**, he leído y revisado la tesis titulada "**Variabilidad de la precipitación en la República Mexicana**" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente


M. en C. René Garduño López



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Centro de Ciencias de la Atmósfera

CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA
C. P. 04510 MEXICO, D. F. MEXICO

Ciudad Universitaria, México, D.F. a 31 de mayo de 2007.

Dra. Blanca Emma Mendoza Ortega
Coordinadora del Programa de Posgrado en
Ciencias de la Tierra.
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente.

Por este conducto me permito comunicar a usted que, en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (opción Física de la Atmósfera), **Jorge Luis Vázquez Aguirre**, he leído y revisado la tesis titulada "**Variabilidad de la precipitación en la República Mexicana**" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente

Dr. Víctor O. Magaña Rueda
Director de la Tesis y miembro del jurado.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Centro de Ciencias de la Atmósfera

CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA
C. P. 04510 MEXICO, D. F. MEXICO

Ciudad Universitaria, México, D.F. a 7 de junio de 2007.

Dra. Blanca Emma Mendoza Ortega
Coordinadora del Programa de Posgrado en
Ciencias de la Tierra.
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente.

Por este conducto me permito comunicar a usted que, en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (opción Física de la Atmósfera), **Jorge Luis Vázquez Aguirre**, he leído y revisado la tesis titulada "**Variabilidad de la precipitación en la República Mexicana**" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente



Dr. Victor M. Mendoza Castro



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

Centro de Ciencias de la Atmósfera

CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA
C. P. 04510 MEXICO, D. F. MEXICO

Ciudad Universitaria, México, D.F. a 4 de junio de 2007.

Dra. Blanca Emma Mendoza Ortega
Coordinadora del Programa de Posgrado en
Ciencias de la Tierra.
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente.

Por este conducto me permito comunicar a usted que, en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (opción Física de la Atmósfera), **Jorge Luis Vázquez Aguirre**, he leído y revisado la tesis titulada "**Variabilidad de la precipitación en la República Mexicana**" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente

Dr. Ernesto Dos Santos Caetano Neto

CONTENIDO

DEDICATORIA	3
CRÉDITOS	4
DESIGNACIÓN DE JURADO Y VOTOS APROBATORIOS	5
PREFACIO	11
<i>Objetivo</i>	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. <i>Mecanismos generadores de lluvia en la región</i>	14
1.1.2. Frentes	14
1.1.3. Ciclones Tropicales	15
1.1.4. Ondas del Este	18
1.1.5. Convección local y orografía	20
1.2. <i>¿Qué modula la variabilidad de la lluvia en México?</i>	21
1.2.1. El ciclo anual	22
1.2.2. Desplazamiento latitudinal de la ZITC	23
1.2.3. El Niño / Oscilación del Sur	24
1.2.4. La canícula o sequía de medio verano	27
1.2.5. El Monzón de Norteamérica	29
1.2.6. Oscilaciones de baja frecuencia	30
1.3. <i>Relevancia socioeconómica</i>	33
2. DATOS	37
2.1. <i>Panorama de los datos de lluvia en México</i>	38
2.2. <i>Series de tiempo: control de calidad y homogeneidad</i>	43
2.3. <i>Mallas regulares: análisis objetivo y asimilación de datos</i>	48
2.4. <i>El método de Cressman</i>	50
2.5. <i>Construcción de una bdd de lluvia diaria en mallas regulares</i>	53
2.6. <i>El concepto de incertidumbre</i>	62
2.7. <i>Requerimientos inmediatos</i>	64
3. ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA LLUVIA	69
3.1. <i>Lluvia generada por sistemas meteorológicos</i>	69
3.2. <i>Climatología de lluvia.</i>	73
3.3. <i>Anomalías de lluvia ante la presencia de moduladores.</i>	78
3.4. <i>Principales modos de variabilidad de la lluvia</i>	83
3.4.1. <i>La técnica de análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs)</i>	83
3.4.2. <i>Cálculo de EOFs para la lluvia en diversas escalas de tiempo</i>	85
4. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	97
5. REFERENCIAS	100
ANEXO 1. GUÍA RÁPIDA DE EXPLOTACIÓN DE LA BASE DE DATOS	106
ANEXO 2. CONTENIDO DEL DVD QUE ACOMPAÑA LA TESIS.	108

Prefacio

La lluvia es una de las variables climáticas que ofrece mayor diversidad para su estudio y es por ello que se debe ser cuidadoso al delimitar el enfoque y el área desde la cual será investigada. Estudiada como un proceso físico, ofrece diversas alternativas de investigación. Por ejemplo: desde la física de nubes o la termodinámica del aire húmedo puede investigarse el origen de la precipitación al estudiar los procesos internos de una nube o la formación de gotas; desde la termodinámica y la dinámica de la atmósfera puede investigarse el origen y los efectos de los intercambios de momento y energía entre los trópicos y los polos al estudiar los movimientos advectivos asociados con frentes, el transporte de calor sensible mediante los ciclones tropicales o liberación de calor latente en zonas de convección profunda, la energía potencial disponible en el sistema climático dado el papel de la lluvia en el ciclo hidrológico o las interacciones océano-atmósfera; combinando conceptos físicos y métodos estadísticos es posible describir la variabilidad de la lluvia, y así sucesivamente.

Al seleccionar un aspecto particular de la precipitación para su estudio es importante mantener en mente la escala en espacio y tiempo a ser estudiada. En cuanto al espacio, las escalas posibles son global, sinóptica, regional o local. En lo referente al tiempo es conveniente diferenciar entre tiempo y clima. El tiempo, se refiere a los procesos atmosféricos que ocurren en escalas cronológicas de segundos, horas y hasta algunos días (frentes, tormentas severas, huracanes), mientras que el clima se refiere a los procesos de interacción océano-atmósfera-continente en periodos de meses, estaciones, años, décadas (la sequía de un periodo en particular, las anomalías de lluvia en el verano, etc). El estudio de los fenómenos del tiempo corresponde a la meteorología mientras que la climatología se encarga de estudiar los procesos que ocurren en plazos más largos. Considerando lo anterior, este estudio se sitúa en la escala regional y es de carácter climatológico.

El capítulo 1 resume aspectos ya conocidos de la lluvia en la región. El capítulo 2 trata sobre los datos de lluvia obtenidos, el método utilizado para construir las mallas regulares a escala diaria y aspectos sobre los datos climáticos en México. El capítulo 3 muestra los análisis realizados y discute las componentes principales de la lluvia en la región. Finalmente, el capítulo 4 concluye este estudio y propone los siguientes pasos.

Objetivo

Desarrollar una base de datos de lluvia diaria en mallas regulares de alta resolución utilizando la mayor cantidad de información disponible, para luego analizar en diferentes escalas de espacio y tiempo la variabilidad de la lluvia en México con base en conceptos físicos y estadísticos, de manera que los datos y los análisis producidos resulten útiles en las áreas de diagnóstico y pronóstico del clima con aplicaciones socioeconómicas.

1. Introducción

El número de estudios sobre el clima (y la lluvia) en México es abundante y continúa creciendo. Un recuento completo y conciso de éstos ha sido reportado por Garduño (1999). De los esfuerzos pioneros por documentar las características de la lluvia en México, destacan a mediados del siglo XX los estudios de Wallen (1955, 1956) y posteriormente los de Mosiño y García (1973, 1981). Dichos estudios reportan, con base en los datos disponibles hasta el momento en que fueron realizados, características importantes de la lluvia en México, sobre todo en lo que se refiere a la variabilidad espacial (el trabajo de Wallen propone incluso una regionalización de la lluvia) y temporal (Mosiño y García documentan la sequía de medio verano o canícula y el ciclo anual).

Es conocido actualmente que la lluvia no tiene una función de densidad de probabilidad de tipo gaussiano. Las funciones paramétricas de probabilidad gamma y gamma incompleta son las de uso frecuente para realizar ajustes probabilísticos a la variable lluvia. En su trabajo de 1981, Mosiño y García (Op. Cit) analizaron la variabilidad de la lluvia en México utilizando el coeficiente de variación y el parámetro de forma de la distribución gamma, encontrando representaciones de las variaciones de lluvia en el país consistentes con otros análisis reportados en la actualidad.

El clima en la República Mexicana es de carácter monzónico, esto es, exhibe dos estaciones bien diferenciadas, una cálida y húmeda, denominada verano (de mayo a octubre) y otra fría y seca denominada invierno (noviembre a abril). En la mayor parte del país, el 80% de la lluvia ocurre durante el verano (mayo a octubre) y el resto durante el invierno; pero en el extremo noroeste del territorio nacional el régimen de lluvia es de tipo mediterráneo, es decir, con lluvias más importantes durante los meses de invierno.

Por su ubicación geográfica entre las latitudes medias y las latitudes tropicales, el país está expuesto a una gran variedad de sistemas meteorológicos que son responsables de la lluvia en la región. Holton (1992) establece que es necesario que ocurra un transporte de momento entre las latitudes medias y los trópicos para mantener el balance energético del planeta. Esta interacción entre trópicos y extratropicos, al igual que las características fisiográficas de la República Mexicana (dos de los principales factores que influyen en el comportamiento de la lluvia son la configuración orográfica y el uso de suelo), imprimen a su clima un carácter único en cuanto a la variedad de regímenes y sistemas presentes. De

este modo, la República Mexicana es afectada mayormente por sistemas meteorológicos de latitudes medias durante el invierno y por sistemas tropicales en el verano.

1.1. Mecanismos generadores de lluvia en la región

El régimen de invierno o el de verano determinan el tipo de sistemas meteorológicos generadores de lluvia que se van presentando. Durante el invierno, el paso de sistemas frontales provenientes de las latitudes medias son la principal causa de la lluvia registrada en la región, mientras que durante el verano, sistemas como los ciclones tropicales, las ondas del este y la interacción de viento húmedo con las montañas son los responsables de la ocurrencia de lluvia. Los principales sistemas meteorológicos que se ven involucrados en el proceso de generación de lluvia en la región se describen a continuación.

1.1.2. Frentes

Durante todos los meses del año, pero especialmente entre noviembre y abril (invierno del HN) se observan movimientos ondulatorios en las latitudes medias que transportan masas de aire hacia las latitudes tropicales. Estos sistemas de transporte de momento, conocidos como ondas de Rossby son el mecanismo que provoca el encuentro de masas de aire frío de latitudes medias con masas de aire cálido de latitudes cercanas a los trópicos, dando lugar a los sistemas llamados frentes. Las ondas de Rossby, también conocidas como ondas planetarias, son oscilaciones que se producen en el océano y en la atmósfera y que tienen su origen en el principio de conservación de la vorticidad potencial. A su paso, la mayoría de los frentes producen precipitación. De ahí que la mayor parte de la lluvia que se observa en invierno sea de tipo frontal (advectiva). El paso de los frentes de invierno hacia los trópicos ocasiona descensos de temperatura que pueden ir desde 1° C hasta 14° C en 24 horas. Cuando la configuración de un frente frío es tal que la dirección dominante del viento en superficie sobre el Golfo de México es del norte, el sistema es denominado como condición de *norte* sobre el Golfo de México. Hill (1969) estudió los frentes invernales en México distinguiéndolos en frente tipo *norte* y frentes del Pacífico. Aunque los *nortes* pueden impactar áreas de México en la vertiente del Pacífico, éstos impactan mayormente la planicie costera del Golfo de México. Una descripción de la climatología invernal en México puede encontrarse en Vidal (2001) .

Durante años El Niño, la circulación media invernal, con corrientes en chorro desde el Pacífico norte y hasta la costa este de los Estados Unidos, es alterada por una onda estacionaria que se ha denominado patrón de circulación del Pacífico Norte América, o patrón PNA. La presencia de esta anomalía en la circulación media resulta en cambios en la posición de la corriente en chorro de latitudes medias y subtropical, que se desplaza hacia el sur alrededor de 500 km (Magaña y Quintanar, 1997). Dado que los sistemas de latitudes medias utilizan este sistema de corriente en chorro para adquirir energía, el paso de frentes fríos en el norte de la República Mexicana se vuelve más frecuente y con ello, se tienen más lluvias invernales en el norte y centro del país. Sin embargo, aunque con un mayor número de *nortes* sobre el Golfo de México en inviernos de El Niño se esperaría que ocurriera más lluvia en los estados de la costa, sucede que la anomalía de lluvia invernal bajo estas condiciones es negativa. Vazquez (2000) encuentra que esta disminución de la lluvia ante un aumento en el número de *nortes* puede deberse al importante incremento de la velocidad de fase de las ondas de Rossby en la que se desplazan los *nortes*, la que ocasiona que estos sistemas pasen demasiado rápido sin tener tiempo de dejar a su paso la cantidad de lluvia advectiva que dejarían pasando a menor velocidad. La Fig. 1 muestra el patrón característico de un frente frío configurado como *norte* en el Golfo de México.

1.1.3. Ciclones Tropicales

Así como los frentes son el sistema meteorológico característico del invierno, los ciclones tropicales son uno de los sistemas meteorológicos que caracterizan el verano. Un modelo conceptual de estos sistemas desde el punto de vista de la dinámica de fluidos se encuentra en Emanuel (1991).

Aún cuando está comprobado que una vez que tocan tierra en el país traen consigo lluvias intensas o extremas (Fig. 2), es todavía un tema de investigación el determinar en forma más precisa las relaciones entre ciclones tropicales y lluvia, pues existe la hipótesis de que cuando éstos no tocan tierra y solo pasan a cierta distancia del continente pueden actuar como sumideros de humedad en vez de fuentes de agua precipitable.

No existe aun una teoría definitiva que explique el por qué sólo una pequeña parte de las perturbaciones tropicales alcanza la categoría de huracán. En el Atlántico, la mayoría de los ciclones tropicales se originan a partir de ondas del este, pero también de

desprendimientos de ondas de latitudes medias. En el Pacífico es menos claro el origen de los huracanes.

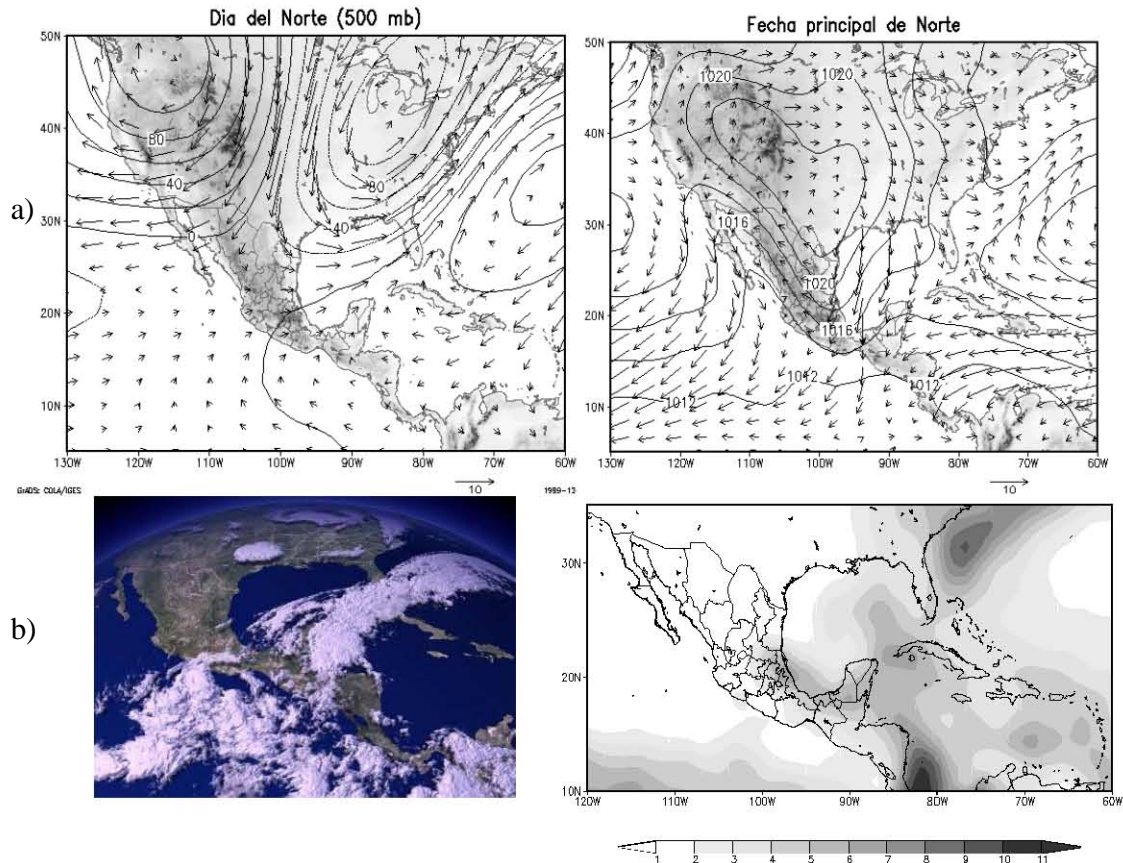


Fig 1. a) Patrón compuesto de precipitación durante un *norte* en el Golfo de México en el nivel de 500 hPa (arriba izquierda) y en superficie (arriba derecha); b) Imagen de satélite de un frente frío típico desplazándose hacia los trópicos (abajo izquierda) y patrón de precipitación (mm/día) durante un *norte* (abajo derecha).

Englehart y Douglas (2001) exploraron el papel de los ciclones tropicales del Pacífico norte en la climatología de la lluvia en el oeste de México. Diferenciando la lluvia como asociada a ciclones tropicales o no, en función de un umbral de distancia (550 km), concluyeron que existe evidencia de una sólida relación entre la actividad de los ciclones tropicales y la cantidad de lluvia del oeste de México. Adicionalmente, para la lluvia no derivada de ciclones tropicales, sugieren que ésta presenta una tendencia vinculada con fluctuaciones de largo plazo del sistema océano-atmósfera y que si bien, la lluvia derivada de ciclones tropicales no presenta tendencia alguna, su variabilidad interanual está ligada

con moduladores de gran escala como El Niño – Oscilación del Sur y con el estado de la temperatura del mar en el Pacífico norte.

Jáuregui (1995, 2003) analizó la climatología de los ciclones tropicales que impactaron México encontrando un incremento en su frecuencia en la década de 1990.

Farfán y Cortez (2005) desarrollaron un análisis observacional del huracán Marty y de sus impactos en Baja California en el año 2003. De acuerdo con estos autores, la lluvia máxima registrada durante la entrada a tierra de este ciclón tropical estuvo en el rango de 380 a 410 mm, valor mayor que la climatología anual de la región. Puesto que los ciclones tropicales ocurren en la escala de tiempo meteorológico, determinar la lluvia asociada a ellos resulta de gran valor, ya que la presencia de estos sistemas puede justificar la existencia de valores extremos en los datos de lluvia, los cuales, sin la consideración de un ciclón tropical serían considerados como datos aberrantes o errores.

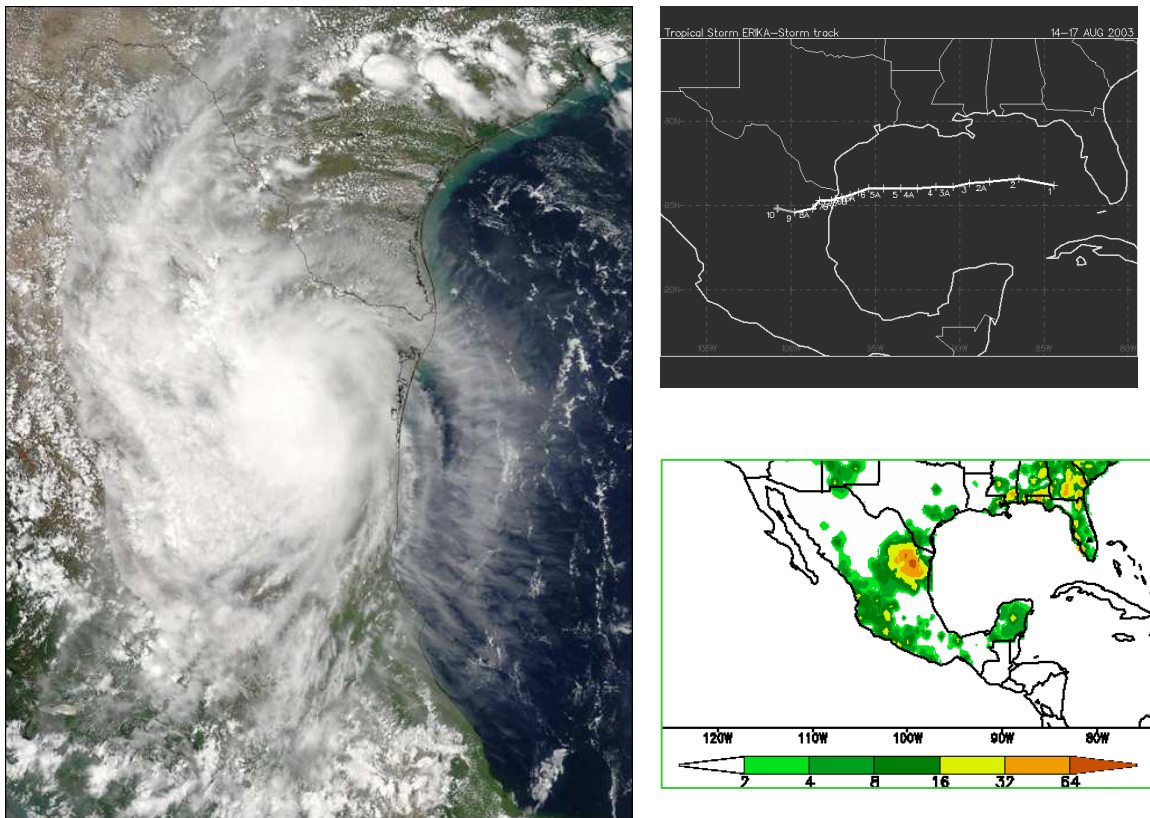


Fig 2. Impacto en tierra de la tormenta tropical Erika (14 al 17 de agosto de 2003) mostrada en imagen de satélite (izquierda), trayectoria (arriba derecha) y precipitación acumulada el día de entrada a tierra (abajo derecha).

1.1.4. Ondas del Este

Las perturbaciones tropicales de la atmósfera dan lugar a diferentes movimientos ondulatorios que han sido ampliamente estudiados y tipificados (Johnson, 1974). De las diversas ondas ecuatoriales, las denominadas ondas del este resultan de interés para la región de México y sus alrededores, dado que son uno de los mecanismos generadores de lluvia durante el verano y según algunos autores son también un importante mecanismo de ciclogénesis, tomando en cuenta la hipótesis de que en las regiones de cúmulus de las ondas del este tienen origen muchos de los ciclones tropicales (Yanai, 1961, 1968). Las ondas del este viajan desde África hasta América a través del Atlántico y tienen un ciclo de vida de una a varias semanas. Su velocidad es del orden de 5 a 7 grados de latitud por día.. Nieuwolt (1977) propuso un modelo gráfico de la vista desde arriba y de la sección transversal de una onda del este idealizada en el Caribe (Fig.3). El patrón de las ondas del este puede detectarse en las cartas de líneas de corriente y su amplitud máxima se observa en los niveles de 700 a 500 hPa. La longitud de onda característica es del orden de 2000 km y sus periodos varían entre dos y cinco días. Generalmente, al oeste de la línea de vaguada se observa buen tiempo debido a la subsidencia y divergencia dominantes, mientras que al este del eje de vaguada se observa convección, convergencia y humedad, y lluvia.

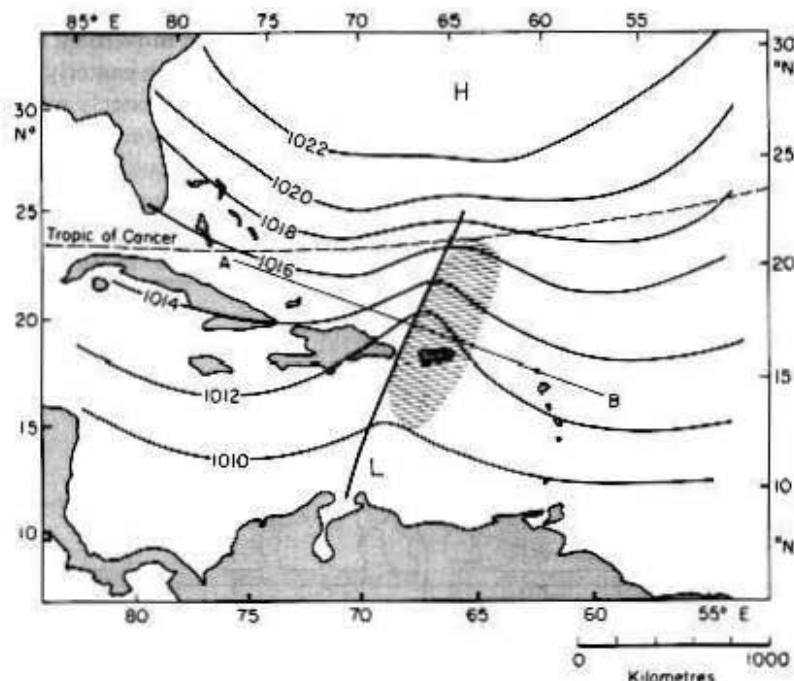


Fig 3. Vista desde arriba de un modelo de onda del este idealizada en la región del Caribe; el área sombreada indica la región principal de lluvia (Nieuwolt, 1977).

La Fig. 4 muestra una secuencia de imágenes infrarrojas del satélite GOES 8, en las que se sigue la evolución de una onda del este entre el 22 de agosto y el 1 de septiembre del año 2000.

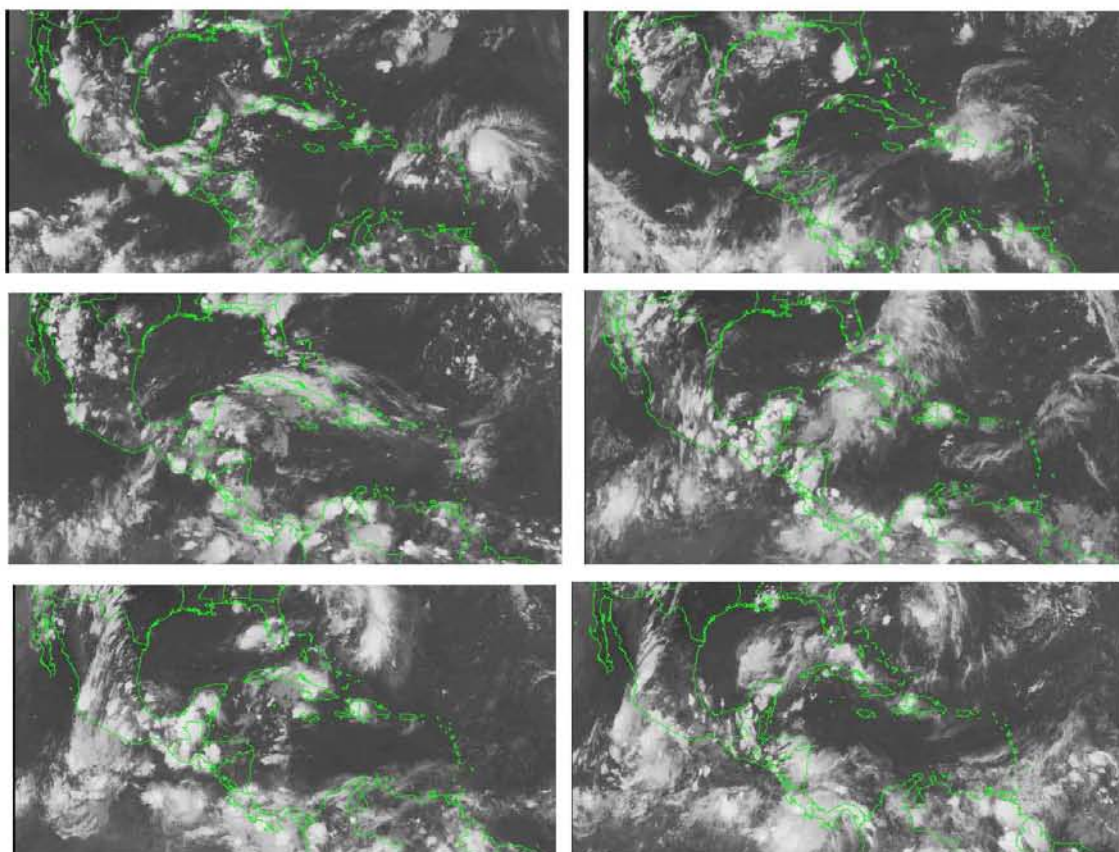


Fig. 4. Secuencia de imágenes infrarrojas GOES 8 (de izquierda a derecha y de arriba a abajo) para los días 22, 24, 26, 29, 30 y 31 de agosto de 2000 en las que se aprecia la evolución de una onda del este desde la mitad del Atlántico hasta su paso por México y Centroamérica.

Según Salinas (2006), al año ocurren en promedio cuarenta y cinco ondas del este y su actividad mantiene una estrecha relación con la corriente en chorro del Caribe, de modo que en mayo y julio las ondas del este pierden energía cinética mientras que la corriente en chorro del Caribe la gana, acelerándose; ocurriendo el caso inverso en agosto, septiembre y octubre .

Zehnder (1991) postula que la interacción de las ondas del este con la topografía de la Sierra Madre, resulta en un mecanismo de origen de los ciclones tropicales cercanos a la costa de México.

1.1.5. Convección local y orografía

Por la naturaleza del movimiento al cual está asociada, la lluvia puede ser de origen advectivo o convectivo. La primera es causada por sistemas que se desplazan zonal o meridionalmente, como en el caso de los frentes y la segunda se debe a movimientos verticales como en el caso de los ciclones tropicales.

Un aspecto de suma importancia en las regiones del planeta con orografía compleja, es el papel de ésta como una de las causas de ocurrencia de lluvia. El caso más conocido es aquel en el que las barreras montañosas actúan como forzantes de la lluvia causando el movimiento ascendente del aire húmedo, lo cual propicia la saturación, la formación de gotas y finalmente la precipitación

Por otra parte, algunas características del uso del suelo combinadas con condiciones locales propicias pueden dar lugar a convección de carácter local en lo que se conoce como ‘sistemas convectivos de mesoescala’.

Tanto el proceso de lluvia orográfica como el de convección local pueden ocurrir en escalas espaciales pequeñas (Fig. 5), por lo que este tipo de lluvia no es fácilmente visible en los modelos de escala sinóptica o incluso en los modelos numéricos de escala regional. No obstante, algunos modelos de diagnóstico han sido propuestos para lluvia orográfica (Sinclair, 1994).

El estudio de la convección local a menudo conlleva el uso de instrumentos de medición a cortísimo plazo (radar meteorológico) para evaluar el origen y evolución del proceso inestabilidad-convección-lluvia. Este tipo de estudios aún son escasos en México; sin embargo en algunas regiones de los Estados Unidos (Fritsch et al 1986) mostraron que la lluvia derivada de este tipo de sistemas puede representar desde un 30 hasta un 70% del total del verano (abril – septiembre), casi tanto como la derivada de ciclones tropicales.



Fig. 5. Fotografías que ilustran la orografía y el movimiento de convección en la escala de una nube cúmulus.

1.2. ¿Qué modula la variabilidad de la lluvia en México?

Webster (1994) describió el papel de los procesos hidrológicos en las interacciones océano-atmósfera, identificando aspectos relevantes tales como el hecho de que las regiones oceánicas de agua cálida ($T > 28^\circ \text{C}$) son zonas de convección profunda y que buena parte de los procesos involucrados en la termodinámica del sistema océano-atmósfera se describe en la ecuación de Clausius-Clapeyron. Por su papel como contenedor de energía térmica, el océano es uno de los forzantes más importantes del sistema climático, y es por ello que las variaciones de la temperatura superficial del mar (TSM) son ampliamente utilizadas para tratar de explicar las variaciones del clima y por tanto de la precipitación. El caso más conocido de explicación de la variabilidad del clima como función de la TSM, es el de El Niño – Oscilación del Sur (Bjerknes, 1966). Sin embargo, es importante no perder de vista que los cambios de temperatura en el océano modulan únicamente una fracción de las variaciones del clima. Otras variaciones de diferentes escalas espacio-temporales se encuentran inmersas en la evolución del sistema climático. Así por ejemplo, puede hablarse de moduladores de escala regional como la humedad disponible en el suelo, el contraste térmico en regiones cercanas o de moduladores de mayor escala como la variación en la posición de circulaciones semi-permanentes de escala regional, sinóptica o global. Respecto a este último aspecto es conveniente mencionar que la región de México y los mares adyacentes se caracteriza por la presencia de los vientos alisios (Fig. 6), cuyas fluctuaciones modulan el clima de la región, y en buena medida, son factores determinantes en la variabilidad interestacional e interanual de la cantidad de precipitación.

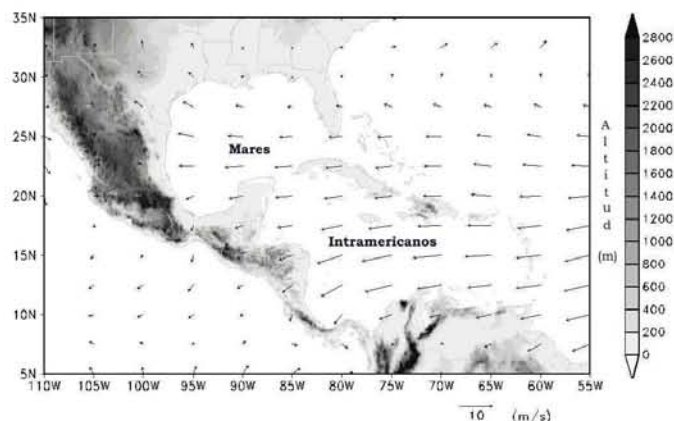


Fig 6. Promedio anual del viento a 850 mb (m/s) y topografía.

En lo referente a la modulación de la variabilidad de la lluvia en México a través del tiempo, se pueden registrar variaciones al interior de una estación o intraestacionales -como en el caso de la sequía de medio verano-, variaciones de una estación a otra o interestacionales, variaciones en escalas de lustros o décadas, conocidas como de 'baja frecuencia' e incluso es posible hablar de tendencias de largo plazo. Una descripción simple de las principales modulaciones del clima en la región de México se realiza enseguida.

1.2.1. El ciclo anual

La forma más conocida de variabilidad de la lluvia en México es el ciclo anual, en el que se distinguen claramente dos estaciones: una seca y una húmeda. La estación seca corresponde a las temperaturas más bajas y a los meses de invierno (noviembre-abril), mientras que la estación húmeda, corresponde a las temperaturas más altas y a los meses de verano (mayo-octubre); sólo en la porción noroeste del país el régimen de lluvia se establece durante el invierno. La mayor parte de la precipitación de invierno y verano en la región se produce por el paso de sistemas de escala sinóptica o de mesoescala.

Durante el invierno, dada la baja temperatura del mar que se observa ($< 27\text{ }^{\circ}\text{C}$), la intensa subsidencia y la poca humedad disponible, la actividad convectiva es débil sobre la mayor parte de la región. En esta época del año, los sistemas de latitudes medias se desplazan hacia los trópicos alcanzando latitudes bajas, causando fuertes descensos de temperatura y en ocasiones precipitación intensa. El paso de los frentes fríos sobre la región presenta una estrecha relación con la posición de la corriente de chorro subtropical (DiMego et al., 1976), dado que dichos sistemas aprovechan ésta para su desplazamiento (Fig. 7). El periodo de invierno se caracteriza porque se alcanzan los mínimos de temperatura, sobre todo en la región norte de México y las zonas montañosas. Adicionalmente, se tiene la ocurrencia de sistemas ciclónicos de latitudes medias de gran escala, que afectan el norte de México y que pueden propagarse hacia el sur, sobre el Golfo de México, provocando bajas de temperatura y a veces lluvias desde Veracruz hasta Yucatán y Centroamérica. De este modo, aunque el invierno se distingue por las condiciones secas en la mayor parte de la región, se puede hablar de un régimen de lluvias para el invierno sobre la vertiente del Golfo de México.

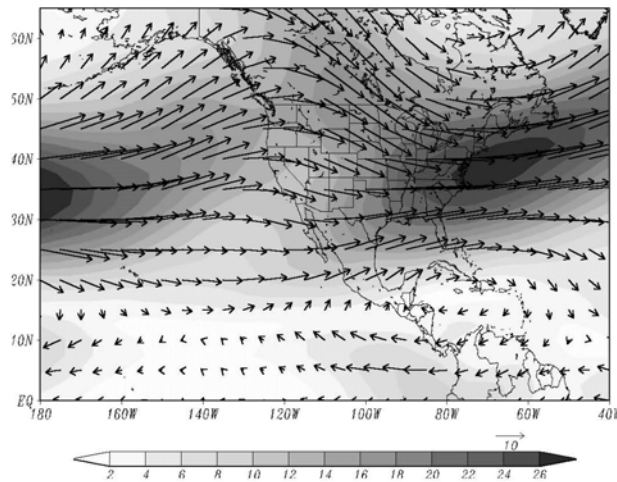


Fig. 7. Circulación media de invierno a 500 hPa. El sombreado corresponde a la intensidad del viento en m/s (Tomada de Magaña et al., 1999).

Aunque una pequeña fracción de la lluvia total anual se registra en invierno, las lluvias más intensas ocurren en verano, y de forma general se puede decir que la temporada de lluvias en México comienza entre mayo y julio, terminando entre septiembre y octubre.

Entre junio y octubre los sistemas meteorológicos a considerar en el estudio de la lluvia incluyen:

- I. La Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC),
- II. El monzón mexicano,
- III. Las ondas del este y
- IV. Los huracanes en el Pacífico, el Caribe y Golfo de México.

1.2.2.Desplazamiento latitudinal de la ZITC

La Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC, Fig. 8), como su nombre lo indica, es la región en donde se encuentran (convergen) los vientos alisios del hemisferio norte y el hemisferio sur. Esta zona representa el ‘ecuador meteorológico’ del planeta y se caracteriza por los fuertes movimientos ascendentes que allí tienen lugar como producto del encuentro de las celdas de Hadley de ambos hemisferios.

La ZITC no es un elemento físico estático y presenta una dinámica bien definida a lo largo del año, misma que se caracteriza por desplazamientos meridionales. Estas migraciones de norte a sur de la ZITC ejercen una influencia importante en el transporte de humedad y en consecuencia en la ocurrencia de lluvia en el sur de México.

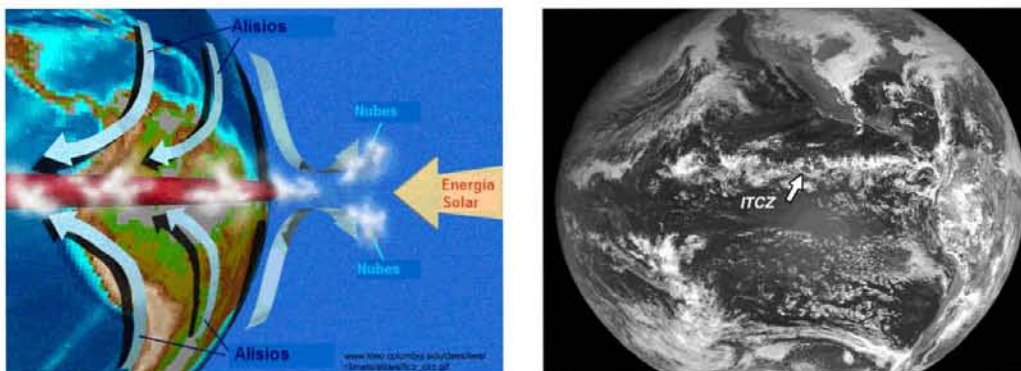


Fig 8. Corte meridional que muestra la circulación de gran escala en la ZITC e imagen de satélite.

Gran parte de la dinámica atmosférica de verano en México está relacionada con la presencia de la Zona Inter-Tropical de Convergencia en el Pacífico del este. La posición, intensidad y densidad de la convección profunda en esta región puede resultar en periodos de fuertes lluvias o severas sequías para México. Se sabe que la ZITC experimenta periodos de intensa y débil actividad convectiva, a veces modulados por el paso de ondas tropicales (Magaña y Yanai 1991).

Uribe (2002) planteó que algunos indicadores para medir el desplazamiento meridional de la ZITC pueden ser de utilidad en el diagnóstico del inicio de la temporada de lluvias en el sur de México. Específicamente, el monitoreo del gradiente térmico del dipolo oceánico en el Pacífico ecuatorial puede servir como indicador del inicio de la temporada de lluvias.

1.2.3. *El Niño / Oscilación del Sur*

El Niño es una condición anómala en la temperatura del océano en el Pacífico tropical del este. Por tratarse de un sistema acoplado océano-atmósfera relacionado con las variaciones de presión entre Darwin y Tahití (la Oscilación del Sur), el fenómeno completo es denominado El Niño – Oscilación del Sur (ENOS). Una de las definiciones más aceptadas de ENOS (Trenberth, 1997) dice que este fenómeno ocurre cuando la temperatura superficial del mar se encuentra 0.5 °C o más, por arriba de la media del periodo 1950-1979, durante al menos seis meses consecutivos, en la región denominada “Niño 3” (4°N-4°S, 150°W-90°W) (Fig. 9).

Contrariamente a lo que ocurre durante El Niño, en el fenómeno conocido como La Niña, la temperatura superficial del mar en el Pacífico del este presenta anomalías negativas de temperatura, es decir, se encuentra más fría de lo normal.

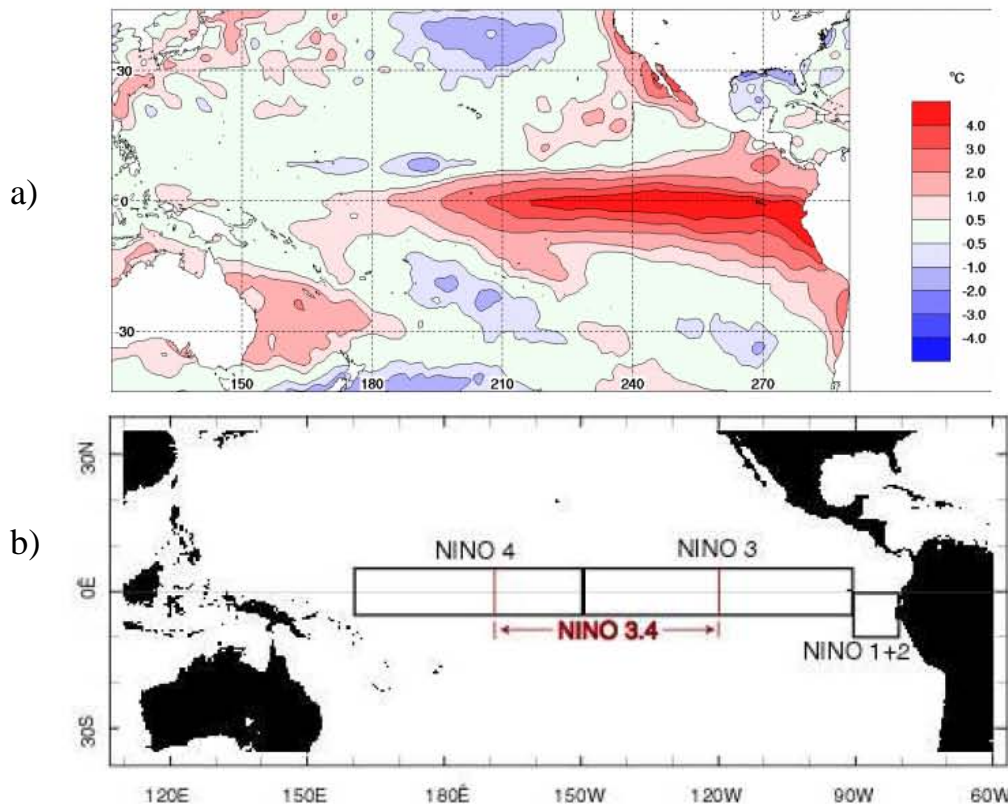


Fig. 9. a) Anomalías de TSM en noviembre 1997; b) Regiones de monitoreo de El Niño.

El Niño y La Niña se desarrollan en los meses de abril a junio; tienden a alcanzar su máxima intensidad entre diciembre y febrero, y típicamente persisten por periodos de 9 a 12 meses, aunque ocasionalmente duran hasta 2 años.

A un evento El Niño no necesariamente sigue uno La Niña o viceversa. Esto dificulta su predicción, aunque a la fecha es posible contar con pronósticos confiables hasta con 6 meses de anticipación.

La investigación de Ropelewski y Halpert (1987, 1989, 1996) para detectar los impactos de El Niño y de la Oscilación del Sur en el globo, fue de los primeros estudios en identificar la sensibilidad de la lluvia en México a los episodios de ENSO.

Magaña et al. (1999b, 2003) reportaron el impacto de El Niño en las lluvias de México. Encontrando que durante inviernos El Niño se observan más lluvias en el norte y centro del país e incluso en la Península de Yucatán; mientras que durante inviernos La Niña, las anomalías en la precipitación parecen simétricamente opuestas con respecto a las observadas en Niño.

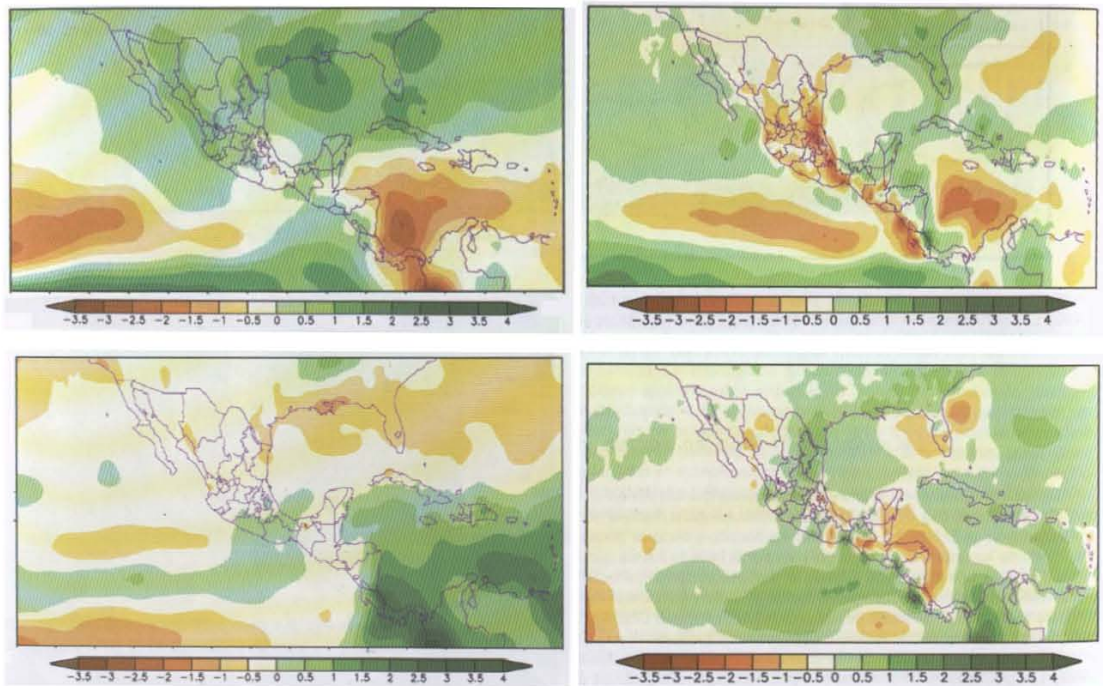


Fig. 10. Anomalías de lluvia en México (mm/día) durante condiciones de El Niño (arriba) y La Niña (abajo) en las estaciones de invierno (izquierda) y verano (derecha) de acuerdo a Magaña et al.

Durante el verano, bajo la influencia de El Niño las condiciones han resultado en severas sequías en la mayor parte de México, exceptuando las penínsulas, mientras que veranos La Niña implican un retorno a la lluvia normal o incluso lluvias por encima de la media en casi todo el país (Fig. 10). La sequía que se observa durante El Niño está asociada a mecanismos tales como una subsidencia reforzada por causa de un desplazamiento hacia el sur de la ZITC y un menor número de ciclones tropicales en los mares intra-americanos.

Una de las principales modificaciones del clima en invierno debidas a El Niño, es el cambio en el número de nortes sobre el Golfo de México el cual varía con relación directa al fenómeno.

Algunos análisis encontraron que el número de huracanes en el Atlántico disminuye durante años El Niño, lo que provoca un déficit de lluvias en la parte central de México. La

disminución de huracanes en el Golfo de México, afecta principalmente las lluvias del norte de Veracruz, Tamaulipas y Coahuila. En el caso del Pacífico nororiental, El Niño no afecta el número de huracanes, pero la anomalía de agua caliente en años de El Niño alcanza las costas mexicanas, lo que resulta en una intensificación de los huracanes en esta zona. Así, aunque en años Niño los ciclones tropicales en el Pacífico tienden a ser más intensos, en promedio están más alejados de las costas mexicanas.

1.2.4. La canícula o sequía de medio verano

Como parte del ciclo anual de las lluvias de verano, en la región centro-sur de México y hasta Centroamérica, aparecen dos máximos en la precipitación de verano, uno en junio y otro en septiembre. Por tanto, existe un mínimo relativo entre julio y agosto conocido como sequía intraestival, sequía del medio verano o canícula (Mosiño, 1973; Magaña et. al. 1999). La canícula o mínimo relativo que se observa en las lluvias de verano en México y Centroamérica, es una característica particular del clima mexicano. La Fig. 11 da un ejemplo de este mínimo relativo en las estaciones climatológicas Oaxaca y Tapachula.

La sequía de medio verano está asociada con los cambios en la intensidad y posición de la ZITC del Pacífico del este. La modulación de esta sequía es función de periodos de transición de actividad convectiva de intensa a débil y viceversa en la 'alberca de agua caliente' frente a las costas del sur de México en el Pacífico. Estas transiciones en la actividad convectiva débil/intensa están relacionadas con la intensificación/debilitamiento de los vientos alisios, por lo que en la región Centroamericana, debido a forzamientos orográficos, se registra un máximo de lluvia en la región del Caribe y un mínimo en la costa del Pacífico.

De acuerdo a la hipótesis de Magaña et al (1999), la evolución temporal de la sequía de medio verano inicia con un máximo de la actividad convectiva al norte del Pacífico ecuatorial del este durante el inicio de la estación lluviosa (climatológicamente en los últimos días de mayo o los primeros de junio) cuando la temperatura superficial del mar es mayor que 29° C. Posteriormente, por causa de la nubosidad y de la intensificación de los alisios, la TSM disminuye durante julio y agosto (TSM \approx 28° C) decreciendo también la convección en julio y agosto, dando lugar al mínimo relativo. Esta disminución en la convección permite que aumente la cantidad de radiación recibida ocasionando un ligero

incremento en la TSM ($\approx 28.5^\circ \text{C}$) hacia finales de agosto y el mes de septiembre, lo que resulta nuevamente en convergencia de bajos niveles, convección reforzada y un segundo máximo de lluvia.

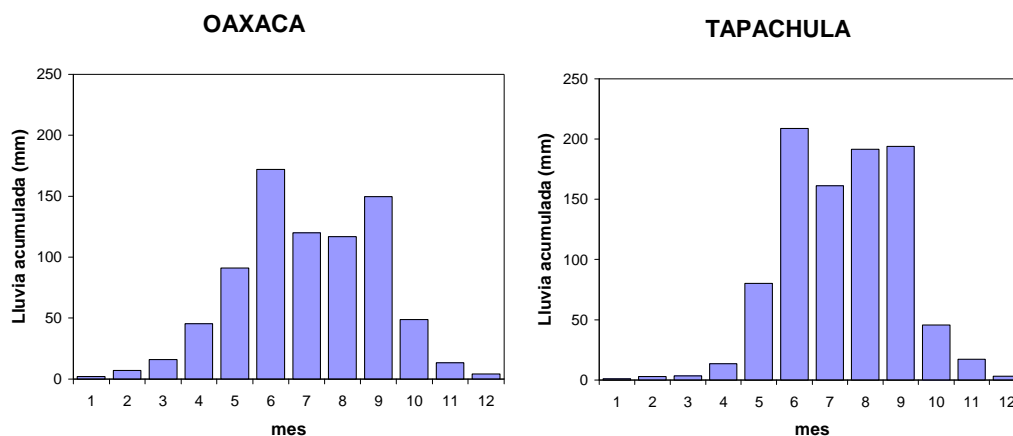


Fig 11. Climatología de lluvia mensual en Oaxaca, Oax., y Tapachula, Chis. Nótese el mínimo relativo de la canícula a la mitad del verano entre julio y agosto.

Existen diferentes hipótesis sobre los mecanismos que controlan la retroalimentación entre la nubosidad y la temperatura del mar en las zonas de convección intensa. Por una parte, Ramanathan y Collins (1991) postulan que las nubes que se desarrollan en dichas zonas actúan como un termostato que limita el calentamiento de la TSM a un máximo de 32°C a la vez que reflejan radiación provocando un ligero enfriamiento posterior. Por otra parte, Arkin y Ziskin (1994) apoyan las hipótesis propuestas originalmente por Bjerknes y Namias, de que las albercas de agua caliente son producto de las circulaciones atmosféricas y oceánicas de gran escala y de los procesos de interacción océano-atmósfera.

La sequía de medio verano ha sido referida utilizando una terminología variada. Mosiño (1966) se refería a la sequía de medio verano como 'el inviernillo', haciendo alusión a que el mínimo relativo de la mitad del verano guarda semejanzas con el mínimo que se observa entre dos veranos consecutivos (mínimo que corresponde al invierno). El término *canícula* tiene origen astronómico, pues se refiere a las fechas entre el 20 de julio y el 25 de agosto de cada año, cuando el Sol está alineado o en conjunción con la estrella Sirio de la constelación del *Canis Major*. Con el paso del tiempo el significado original del

término se fue olvidando y el periodo canicular empezó a asociarse con los días más calurosos del verano, los cuales generalmente coinciden con las fechas originalmente planteadas por encontrarse en una ‘sequía’ de medio verano¹.

1.2.5. El Monzón de Norteamérica

Una característica importante del clima en el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos es la circulación del viento durante la estación de verano. La Fig. 12 muestra el patrón de viento y de precipitación entre julio y septiembre. En la figura claramente se observan dos corrientes de niveles bajos tanto en el Golfo de California como en el Golfo de México, los cuales producen transporte de vapor de agua hacia la sierra madre occidental y resultan en convección profunda en el noroeste de México, generando la formación de cumulus y ocasionando lluvia intensa.

Stenrud et al (1995) sostienen que la lluvia del monzón en el noroeste de México durante los meses de julio, agosto y septiembre equivale a un porcentaje de entre el 60 y el 80% del total anual, mientras que en esos mismos meses en el área de Arizona equivale a más del 40% del acumulado en el año.

El monzón de Norteamérica es difícil de pronosticar, por lo que en años recientes se inició un proyecto intensivo de investigación, llamado NAME (North American Monsoon Experiment), con el objetivo de estudiar a fondo la predecibilidad de este sistema (Higgins, 2003).

Englehart y Douglas (2006) proponen que el monzón de Norteamérica exhibe formas diferenciadas de variabilidad intraestacional en la región de Sonora vs la de Arizona e identifican para la primera una tendencia positiva en intensidad. Estos autores formulan la hipótesis de que la variabilidad intraestacional del monzón norteamericano está conectada con ENSO en ambas regiones, mientras que sólo el área de Sonora tiene una teleconexión con fluctuaciones de largo plazo como la Oscilación Decadal del Pacífico.

¹ Consultado en Internet el 29 de mayo de 2007 <http://es.wikipedia.org/wiki/Can%C3%ADcula>

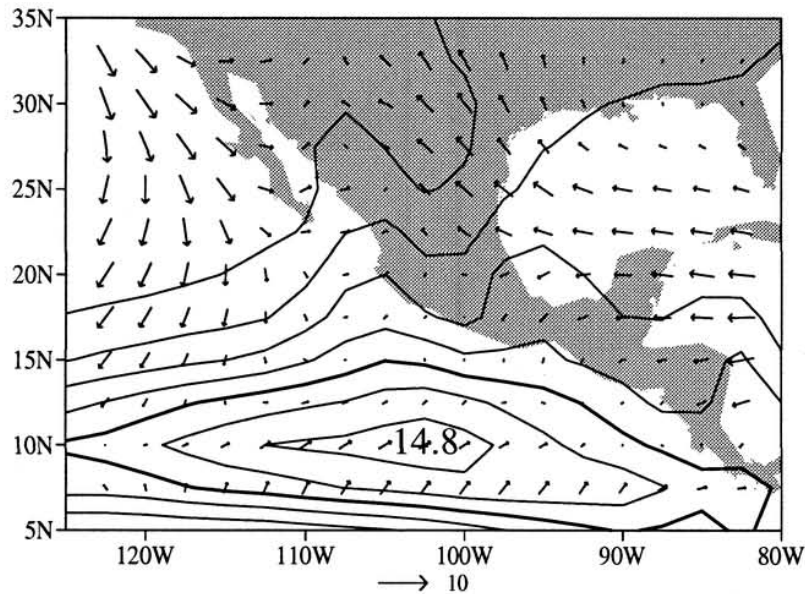


Fig. 12. Climatología de precipitación (1979-1997) y viento superficial en verano (jul, ago, sep) con datos de lluvia de Xie y Arkin (1996) y vientos de reanálisis NCEP/NCAR. Tomada de Yu y Wallace (2000).

1.2.6. Oscilaciones de baja frecuencia

Además de las variaciones intraestacionales y de la variabilidad interanual, el comportamiento de la lluvia en México y la región circundante se ve influenciado por variaciones cíclicas en la temperatura de los océanos adyacentes. Estas variaciones ocurren en periodos de tiempo del orden de décadas y por ser estos periodos tan grandes, estas oscilaciones son llamadas de baja frecuencia.

De éstas, las dos cuya teleconectividad se ha investigado hasta ahora son la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés).

La Oscilación Decadal del Pacífico es un patrón recurrente de variaciones océano-atmósfera que se observa en la cuenca oceánica del Pacífico Norte. La Fig. 13 muestra el patrón de TSM relacionado con el índice de la PDO (Fig. 14). Los registros instrumentales indican cambios importantes en la polaridad de esta oscilación en los años de 1925, 1947 y 1977 (Mantua et al 1997).

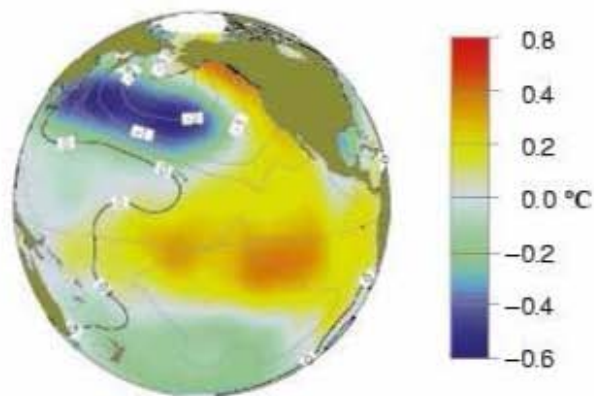


Fig. 13. Correlación de la temperatura superficial del mar (colores) y de la presión al nivel del mar con el índice de la PDO. Tomada de Mantua et al (1997).

Las anomalías de lluvia correspondientes a ENSO, que se discutieron en la sección 1.2.3 no cumplen una regla en forma absoluta. Es cierto que el territorio mexicano tiende a secarse durante los veranos bajo condiciones El Niño, pero la intensidad de la sequía no guarda una relación directa con la magnitud de la anomalía de El Niño. Un caso similar sucede con el comportamiento de la lluvia en Australia. Esto lleva a la conclusión de que la relación entre el ENSO y la lluvia tiene implícitos procesos de carácter no-lineal. No obstante, mediante el uso de modelos acoplados océano-atmósfera de escala global, Power et al (2006) plantean la hipótesis de que la PDO parece modular las teleconexiones del ENSO en periodos de tiempo del orden de décadas. Englehart y Douglas (2003) sugieren que la PDO tiene un vínculo sistemático con la sequía en el centro de Estados Unidos, mientras que la relación de dicha sequía con el ENSO no es una teleconexión simple ni robusta. Schneider y Cornuelle (2005) apoyan una hipótesis que postula que la PDO no es un modo dinámico de variabilidad, sino un resultado de la superposición de fluctuaciones de la temperatura superficial del mar con diferentes orígenes dinámicos.

Jáuregui (1979) analizó las fluctuaciones de la lluvia en México en escalas interdecadales, estableciendo de acuerdo a lo propuesto por Lamb (1966) que las fluctuaciones mencionadas están ligadas con cambios correspondientes de la intensidad de la corriente de vientos de gran escala en el oeste en el hemisferio norte.

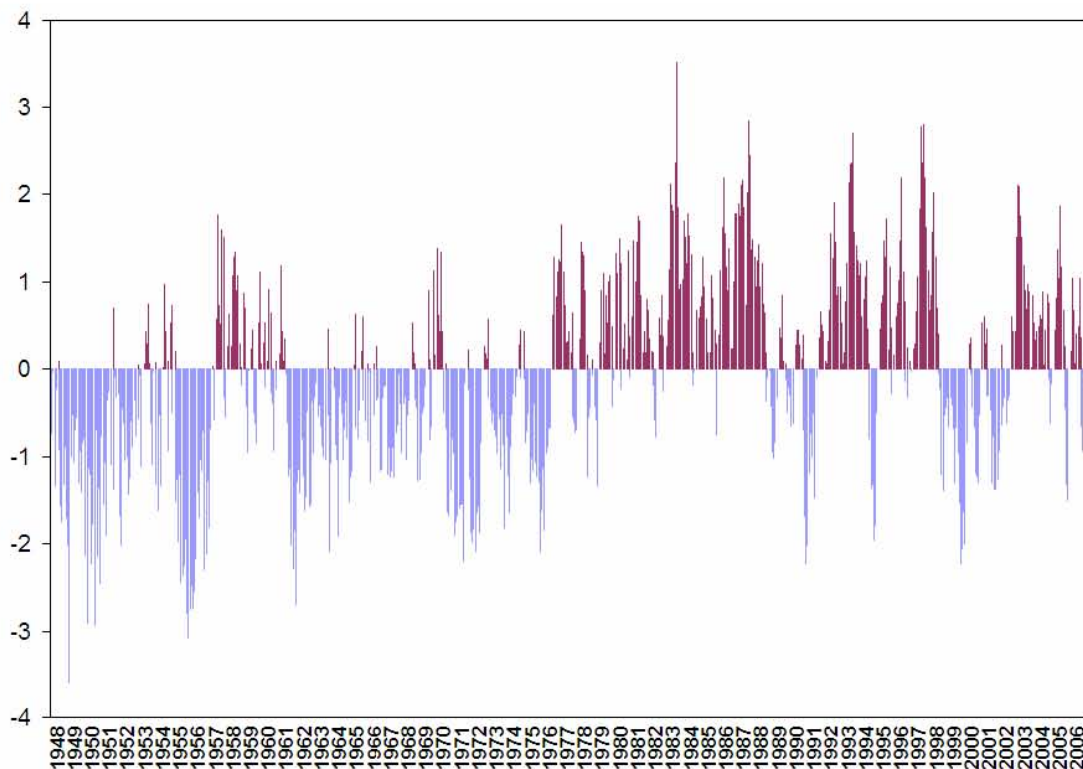


Fig. 14. Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) de 1948 a 2006. Datos de la Universidad de Washington en Seattle: <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>

La Oscilación Multidecadal del Atlántico por su parte, fue primeramente aislada por Folland et al (1986). Mientras algunos autores vinculan la actividad de ciclones tropicales en el Atlántico con la AMO, Man y Emanuel (2006) sugieren que la intensificación de estos sistemas en esa cuenca oceánica tiene su origen en contribuciones antropogénicas.

La AMO registró fases cálidas en los periodos 1860 a 1880 y 1940 a 1960. Las fases frías de esta oscilación ocurrieron de 1905 a 1925 y de 1970 a 1990. Actualmente la AMO se encuentra en su fase cálida. De acuerdo con Enfield et al (2001), las fases de la AMO pueden ser responsables de cambios en la variabilidad interanual asociada a los patrones de invierno observados en condiciones de El Niño. Estos autores muestran que durante las fases cálidas de la AMO se han observado déficits de lluvia en la mayor parte de los Estados Unidos, incluyendo la sequía de los 1930s y los 1950s en el medio-oeste de ese país. La Fig. 15 muestra la serie corta (1948-2002) de la AMO.

El estudio de las teleconexiones entre las oscilaciones de baja frecuencia y la variabilidad de la lluvia en México es un tema todavía poco explorado, que ofrece oportunidades de investigación a la comunidad.

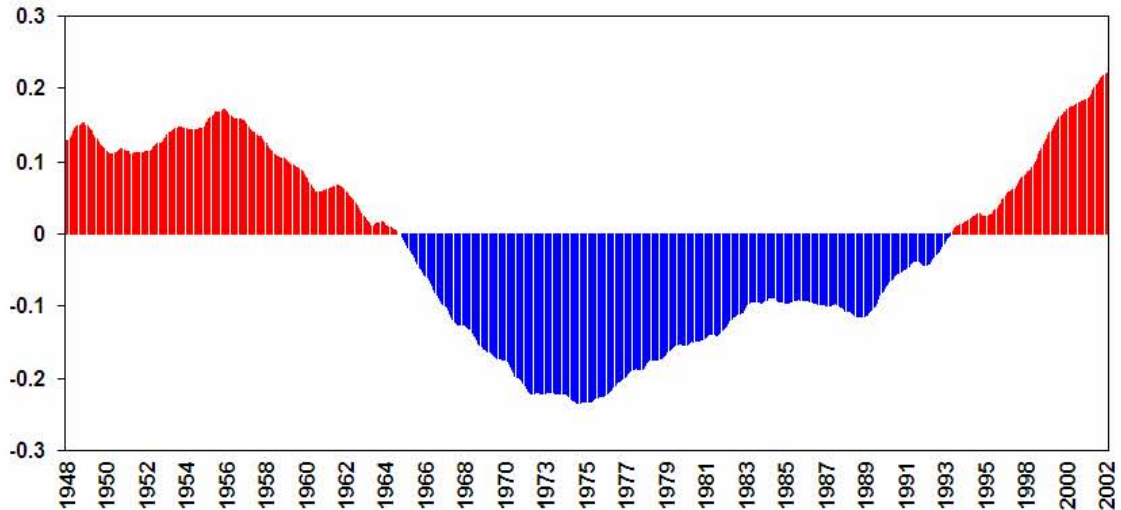


Fig. 15. Índice de la Oscilación Multi-decadal del Atlántico (AMO). Serie corta suavizada. Earth System Research Laboratory, NOAA. <http://www.cdc.noaa.gov/Timeseries/AMO/>

1.3. Relevancia socioeconómica

La importancia de la lluvia en la socioeconomía mexicana radica en su relación directa con la disponibilidad de agua. Es mediante la lluvia y los procesos del ciclo hidrológico que año con año se dispone de agua en el país para la mayoría de las actividades socioeconómicas y, a su vez, esta agua disponible determina en buena medida la productividad asociada a actividades como la agricultura, la generación de energía (hidroeléctrica) y la industria. La relevancia de la lluvia en México reside también en su papel como insumo para la renovación o permanencia de otros recursos naturales (p. ej. bosques, acuíferos, manantiales) y como elemento modulador del manejo de agua (recarga de presas, suministro a la población, compromisos internacionales).

De lo anterior se desprende que cualquier esfuerzo por adquirir o mejorar nuestro conocimiento sobre la lluvia en la región, sea de carácter causal o consecuente, es de gran valor. Entender mejor el comportamiento de la lluvia terminará por traducirse en mejor capacidad para diagnosticar y pronosticar sus variaciones. Es bien sabido que los

diagnósticos y pronósticos confiables y oportunos resultan útiles en planificación y toma de decisiones para eficientar el uso de los recursos, al igual que para la prevención, gestión y mitigación de riesgos relacionados con el clima.

Como un ejemplo de los impactos que la variabilidad de la lluvia puede tener en la economía del país, considérese la estadística de las indemnizaciones realizadas por el Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC) de 1995 a 2003 (Fig. 16). De acuerdo a esta información, en el sector agrícola las mayores afectaciones (80%) se deben a la falta de lluvia (sequía), seguidas de los impactos de huracanes, heladas y lluvias extremas. La operación de instrumentos de transferencia de riesgos asociado al clima se inició recientemente en México (últimos tres años), específicamente el seguro paramétrico contra sequía basado en índices de lluvia acumulada (AGROASEMEX, 2006).

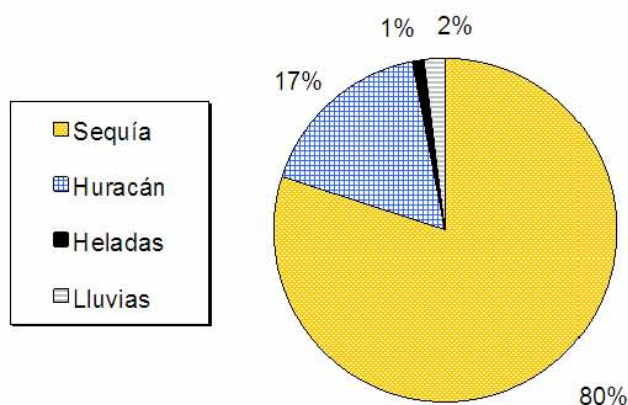


Fig 16. Catástrofes Agrícolas 1995-2003 por causa. (Elaborada por AGROASEMEX, S.A. con base en información de la SAGARPA).

En lo que respecta a aplicaciones socioeconómicas del conocimiento del clima y su variabilidad, es importante no perder de vista que mientras algunos sectores pueden verse favorecidos por los cambios del clima, otros pueden resultar simultáneamente afectados. Por ejemplo, El Niño 1997-98 en Estados Unidos impactó: en el este, provocando ausencia de huracanes y la consecuente reducción de pérdidas en infraestructura y protección civil, pero a su vez, incrementando el riesgo de incendios; mientras que en el suroeste, mayor

lluvia invernal incrementó la vegetación y el atractivo del paisaje favoreciendo el turismo, pero aumentó los riesgos de alergias, afectando la salud (Stern & Easterling, 1999).

Las comunidades de investigadores y tomadores de decisiones hoy día se han percatado de que para realizar una gestión eficiente del riesgo asociado al clima y su variabilidad, los enfoques de las disciplinas individuales no bastan; manejar adecuadamente este tipo de riesgo implica mantener una interacción continua entre diversos actores y disciplinas con el fin último de desarrollar programas de enfoque ‘múltiple’, que simultáneamente incluyan diversas áreas del conocimiento, impacten varios sectores, enfrenten las amenazas y generen capacidad de respuesta ante múltiples riesgos. Todos estos rasgos de la gestión multidisciplinaria del riesgo asociado a la variabilidad del clima incluye migrar de la reacción a la prevención, atender necesidades específicas de la gama de usuarios e incidir en economías y culturas específicas. Algunas rutas estratégicas de acción existen ya reportadas en la literatura (Glantz 2001, 2006; Nicholls and Kestin, 1998) e instrumentos internacionales como el Marco de Acción de Hyogo (ISDR, 2005), y los documentos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático establecen las prioridades.



Fig 17. Modelo conceptual de la gestión de riesgo asociada a la variabilidad del clima (adaptada de Brooks et al 2006).

El modelo conceptual de Brooks et al (2006) generado a través de interacción científica de diversas disciplinas vinculan la del clima con aplicaciones socioeconómicas (Fig. 17). Bajo las consideraciones allí planteadas, considérese pues que los resultados de este trabajo de tesis tienen el propósito de incrementar las capacidades existentes en la región en materia de diagnóstico y pronóstico del clima y en los procesos de verificación de éstos (validación de modelos numéricos).

2. Datos

Durante las dos últimas décadas en el mundo se han realizado diferentes esfuerzos por disponer de información meteorológica y climatológica de calidad, analizada sistemática y objetivamente. Entre estos esfuerzos destacan los grandes proyectos de asimilación de datos (también llamados reanálisis), la redefinición de las redes de observación existentes y la creación de otras nuevas, el uso de datos de satélite y de radar, y la implantación de puntos de medición en el océano. Los avances en materia de sensores remotos y la incorporación de nuevas técnicas de análisis y asimilación de datos han permitido un desarrollo exponencial en materia de datos como insumo fundamental para la investigación y el monitoreo del sistema climático.

Así, utilizando datos históricos y en tiempo real se han realizado estudios sobre monitoreo y detección del cambio climático (Brunet-India y López-Bonillo, 2001), identificación de patrones recurrentes en el comportamiento de los eventos extremos (Aguilar et al, 2005; Alexander et al 2006) y estrategias para reducir el grado de vulnerabilidad a las variaciones y cambios del clima; estudios que, como es de esperarse, han requerido el uso de información confiable de las variables del clima. En el caso de México, son varias las bases de datos que se encuentran disponibles. Sin embargo, en la mayoría de ellas no se ha aplicado un proceso de control de calidad, homogeneidad y análisis espacio-temporal para generar un conjunto de datos estándar utilizable en la generación de productos operativos y de investigación. Por lo tanto, es válido hasta cierto punto proponer la reformulación de los estudios hasta ahora realizados, una vez que los datos en los que éstos se basaron hayan sido mejorados en su calidad. Algunos resultados previamente obtenidos probablemente variarán mientras que otros mantendrán su esencia. Lo anterior, plantea la necesidad inmediata de trabajar en el control de calidad y homogeneización de las series climáticas de la República Mexicana, así como de desarrollar con seriedad trabajos de análisis objetivo y asimilación de datos, todos ellos con el fin último de que la observación y el estudio de la variabilidad del clima a escala regional se basen en los mejores datos disponibles. Las bases de datos climáticas de calidad permitirán no sólo mejorar nuestro entendimiento de la variabilidad climática regional, sino también avanzar en su modelación y en la valoración de los posibles impactos del cambio

climático. La base de datos desarrollada en esta tesis es uno de los primeros pasos para incursionar en estos desarrollos en la República Mexicana.

2.1. Panorama de los datos de lluvia en México

En el estudio de las variaciones climáticas de largo periodo es posible utilizar datos reconstruidos o datos ‘proxy’, los cuales son generados por los paleoclimatólogos; sin embargo, el presente estudio está basado únicamente en mediciones directas realizadas en lo que se denomina el ‘periodo instrumental’. Aunque a lo largo del texto de este trabajo se hará referencia a los datos del clima en general, considérese de manera implícita la alusión a los datos de lluvia, variable de interés de este trabajo.

En los últimos años, y particularmente desde que se identificaron los impactos de El Niño 1997-98 en los sectores socioeconómicos de México (Magaña et al, 1999; CONACYT, 2001), se ha observado un interés creciente en las instancias gubernamentales y no gubernamentales con fines aplicados o académicos por lograr un mejor entendimiento de la variabilidad climática.

A finales de los 90’s, diversas bases de datos relacionadas con el clima se hicieron disponibles en el país, la mayoría de ellas en disco compacto (ERIC I, ERIC II, Dat322, etc.). Por su fácil distribución, éstos datos fueron utilizados de manera intensiva por la comunidad como la fuente de información climática hasta alrededor del año 2002, y a la fecha, son la única fuente de datos conocida por algunos investigadores o instituciones usuarias (Vázquez, 2006).

Mas la actualización de estos discos compactos por las instituciones emisoras hasta la fecha mantiene un carácter incierto y aperiódico, limitando la información disponible a la que se tiene en el momento de la grabación o impresión de los discos compactos. Por ello, con el paso del tiempo, los datos de los discos compactos de finales de los 90’s quedaron obsoletos y en muchos casos los estudios actualizados quedaron dependiendo de las posibles actualizaciones de los datos. Esto motivó a que diversas instituciones incursionaran en la obtención directa de datos del clima o incluso en la instalación de redes de observación alternas, aspecto este último que en la mayoría de los casos en vez de ser un beneficio se convierte en un factor de vulnerabilidad para la continuidad en la longitud de las series de tiempo observadas.

En los años 2004 y 2005 el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), con la participación de las Gerencias Estatales de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la colaboración de otras agencias, realizó un esfuerzo importante en materia de rescate de información y digitalización de datos climáticos. Durante este esfuerzo se capturaron y actualizaron datos de la red de estaciones climatológicas convencionales en la mayoría de los estados del país para reducir al mínimo el número de valores “no disponibles” en la base de datos nacional. Entre las instituciones que participaron activamente en este proceso se destacan los trabajos realizados por AGROASEMEX o el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Actualmente el número de datos por capturar es mínimo, pero es necesario continuar los esfuerzos de rescate de datos climáticos disponibles en papel.

Por otra parte, de acuerdo a lo documentado en Vázquez (2002), en las memorias de congresos o reuniones nacionales de las comunidades de meteorólogos y geofísicos se tiene registro de diversos esfuerzos que han sido encaminados a resolver aspectos relacionados con el manejo y uso eficiente de las bases de datos del clima en México. Sin embargo, aún se observa amplia diversidad en la calidad, extensión y disponibilidad de estos datos, y la actualización periódica nacional aún presenta incertidumbre asociada a factores logísticos que parecen ir más allá de las posibilidades de acción con que cuenta actualmente el SMN. Si bien es cierto que se cuenta con una red de estaciones hidrometeorológicas automáticas, cuyos datos están disponibles en tiempo real, esta red tiene un periodo corto de registro y su densidad es baja, por lo que no necesariamente satisface las demandas para estudios de clima regional.

La base de datos del clima con carácter oficial en el país es la operada en el SMN en el sistema CLIma COMputarizado (CLICOM). Esta base de datos contiene la información de temperatura y precipitación registrada en la red de estaciones climatológicas convencionales. La información de CLICOM presenta un retraso importante en el tiempo de digitalización de los datos observados. Este retraso puede variar desde algunos meses hasta varios años y está relacionado básicamente con dificultades de acceso a los datos en papel y con retrasos en el proceso de captura y envío de la información al SMN por las entidades federativas y no es uniforme entre las diversas estaciones climatológicas.

La Figura 18 muestra el número de observaciones pluviométricas en la República Mexicana (CLICOM) en el periodo de 1958 a 2004. De la figura se concluye que en la mayor parte de este periodo se dispone del orden de tres mil observaciones por día aproximadamente; el máximo de mediciones se realizó a mediados de la década de 1980 cuando se registraron entre cuatro y cinco mil datos diarios de lluvia; y finalmente en años recientes el número de reportes diarios de lluvia decrece aproximadamente hasta dos mil datos por día. Esta disminución en los datos disponibles obedece a una disminución real en el número de pluviómetros (y de estaciones climatológicas) funcionales en el país.

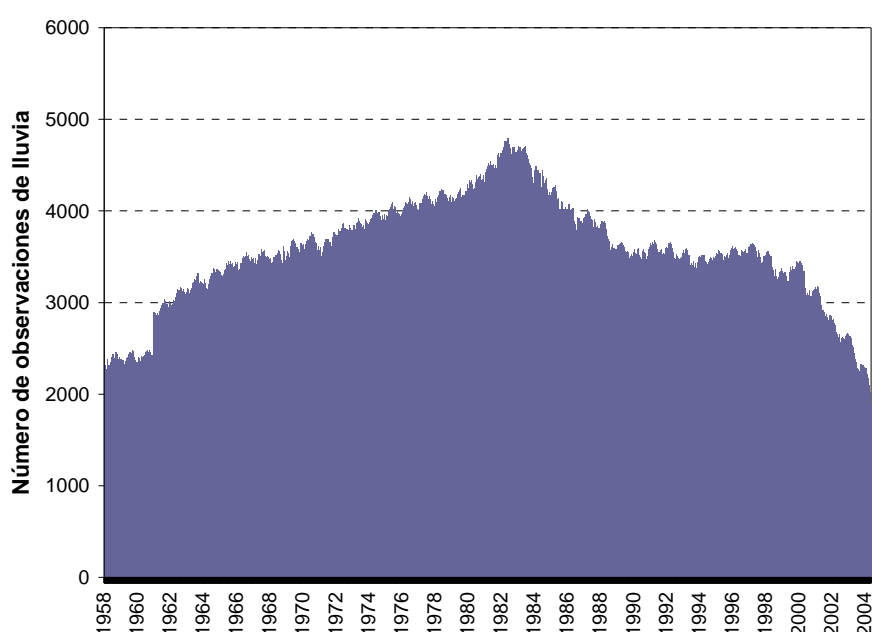


Fig. 18. Número de observaciones de lluvia en la República Mexicana en el periodo de 1958 a 2004 con base en datos de la base CLICOM del SMN.

Un aspecto que es interesante mencionar es que la disminución en el número de observaciones (y de estaciones) no sólo está sucediendo en la base de datos mexicana, sino también en otras bases de datos climáticas del mundo tal y como se describe en un estudio realizado por Beck et al (2005), según el cual, el decaimiento en la disponibilidad de datos en los períodos más recientes puede atribuirse a retrasos en la actualización de la mayoría de las fuentes, y la única alternativa para compensar parcialmente este retraso parece ser el uso de datos transferidos en tiempo semi-real (por ejemplo con los reportes Climat y Synop) en los sitios donde se cuente con este tipo de reportes. El análisis de Beck et al

sobre el número de observaciones disponibles en el mundo concluye que el máximo global de reportes tiene lugar también a mediados de los ochenta, seguido de un decaimiento posterior.

En la actualidad y en el caso de la República Mexicana, del promedio de alrededor de 3000 puntos de observación pluviométrica que existen en el país, sólo unos cuantos reportan de manera continua en el tiempo y muchos de ellos ya no reportan más.

Del total existente, sólo aproximadamente 800 estaciones reportan en tiempo real a través de radio, teléfono y fax, o capturando la información en el Sistema de Información Hidroclimatológica (SIH) de la CNA. El SIH es un sistema de base de datos en línea que la CNA utiliza en su red interna (intranet) para el manejo oportuno de la información hidroclimatológica del país. Este sistema es de uso exclusivo de la CNA, aunque su potencial es muy grande por ser funcional en plataforma Web. Las estaciones con reportes en tiempo real inician su periodo de registro en el año 1995 y están todas adscritas a la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la misma CNA, oficina encargada del manejo de agua en el país. Así, el envío en tiempo real de la información de precipitación obedece a requerimientos hidrológicos más que climatológicos. Es por ello que con el fin de depurar la información y procesarla con más cuidado, el SMN mantiene el resguardo de la base climatológica nacional.

Algunas aplicaciones de investigación al igual que actividades operacionales, sobre todo de monitoreo, requieren del uso de series de tiempo de lluvia que además de contar con registros históricos continuos, tengan datos en el presente. Puesto que la mayoría de los datos de la GASIR iniciaron su registro en 1995, no cuentan con una serie larga y dado que los datos de CLICOM tienen un retraso en su digitalización, pareciera que tal requerimiento no puede satisfacerse. Sin embargo, al comparar los datos de ambas fuentes en el periodo común (por ejemplo de 1995 a 2002) es posible concluir que varios puntos de medición en el país con reportes de GASIR coinciden exactamente con puntos de medición de CLICOM [*Comunicación Personal*: Venancio Trueba, Carlos Cervantes y Edna Cervantes, Programa para el Mejoramiento en el Manejo del Agua (PROMMA) Comisión Nacional del Agua, 2003]. La Figura 19 muestra un ejemplo para la localidad de Aguascalientes, Ags, en donde la serie histórica de CLICOM de la estación con clave 01030 (abajo) se corresponde con la estación de GASIR registrada en el SIH con clave AGSAG (arriba). Esta similitud

observada en las gráficas de Lluvia de ambas fuentes se corrobora al comparar cada uno de los datos de Lluvia registrados, con la particularidad de que exhiben un desfase temporal de un día (Tabla 1). El desfase de un día entre los datos de CLICOM y de GASIR se debe a que en esta última las observaciones se reportan con la fecha del día en que fueron realizadas, mientras que en el CLICOM la lluvia observada corresponde a la cantidad de lluvia en las últimas veinticuatro horas y por lo tanto la fecha reportada es la del día anterior a aquel cuando se realiza la medición.

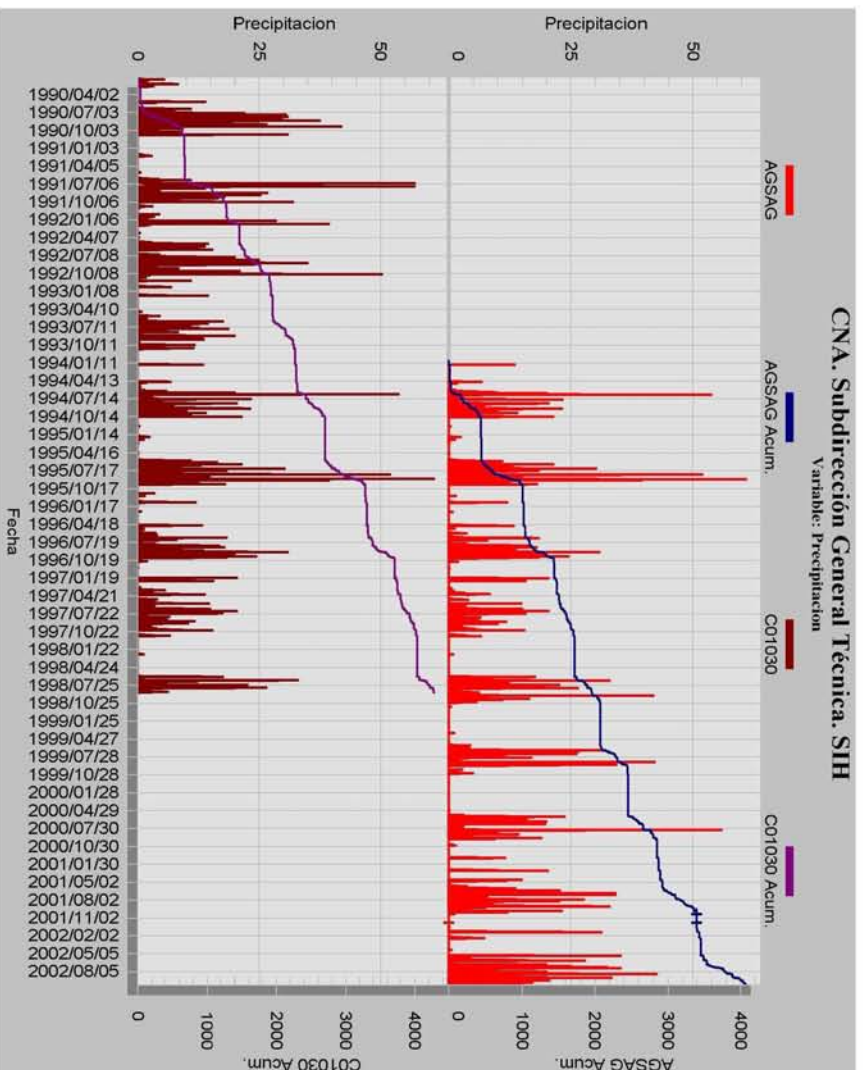


Fig 19. Serie de tiempo de lluvia diaria reportada en Aguascalientes, Ags., en las bases de datos de CLICOM (abajo) y GASIR (arriba) para el periodo de 1999 a 2002.

El ejercicio de comparar cada uno de los datos diarios entre las series de CLICOM y de GASIR considerando el desfase de un día, permite obtener la lista de estaciones con registros históricos y reportes en tiempo real. Una primera lista de las estaciones así caracterizadas fue obtenida en AGROSEMEX como parte de los desarrollos del Seguro Agrícola Catastrófico basado en índices de Lluvia (AGROSEMEX, 2006). No obstante que lo aquí descrito ofrece una alternativa para obtener series largas y continuas útiles en

algunas aplicaciones, es necesario hacer énfasis en que los datos oficiales del clima son los emitidos por el SMN en la base de datos de CLICOM.

Tabla 1. Comparación de datos CLICOM vs datos de GASIR para Aguascalientes, Ags.

	A	B	C	D
1	Variable	Fecha	AGSAG (SIH)	CO1030
1702	Precipitacion	28/08/1994	0	11.8
1703	Precipitacion	29/08/1994	11.8	0
1704	Precipitacion	30/08/1994	0	2.1
1705	Precipitacion	31/08/1994	2.1	20
1706	Precipitacion	01/09/1994	20	23.2
1707	Precipitacion	02/09/1994	23.2	7.2
1708	Precipitacion	03/09/1994	7.2	0
1709	Precipitacion	04/09/1994	0	0
1710	Precipitacion	05/09/1994	0	0
1711	Precipitacion	06/09/1994	0	2.4
1712	Precipitacion	07/09/1994	2.4	0

Existen otras fuentes de datos atmosféricos en el país, tales como los datos de observatorios sinópticos, radiosondeo, satélite, radar y de otras redes de medición, mas éstos no son mencionados aquí porque su uso es en la mayoría de los casos con fines agrometeorológicos o trabajos de corto plazo, mientras que el tema de esta tesis es la variabilidad de la lluvia en México en la escala regional y en términos climatológicos. Una clara diferencia entre los datos sinópticos y los climáticos y sus aplicaciones ha sido documentada por Boissonade et al (2002). Tal y como sigue, el análisis de la lluvia puede realizarse con base en dos tipos de datos: series de tiempo o mallas regulares.

2.2. Series de tiempo: control de calidad y homogeneidad

Aunque la mayoría de las series de tiempo de las variables climáticas disponibles en México tienen un periodo corto de registro (del orden de 30 a 50 años) esa longitud en las series permite realizar diversos tipos de análisis sobre la variabilidad del clima. Sin embargo, resulta aventurado obtener conclusiones contundentes si no se ha realizado previamente a los análisis un control de calidad de los datos a utilizar. Este tipo de análisis ya ha empezado a realizarse en varias partes del mundo (Jones and Hulme, 1996; Mekis and Hogg, 1999; González-Rouco et al 2001; Klein et al 2002).

Por un lado, se tiene que las series de tiempo no son perfectas y pueden contener registros en los que las mediciones no se reportaron, es decir, datos faltantes. Los métodos

de análisis a menudo requieren que las series estén completas por lo que los investigadores utilizan diversas estrategias para ‘rellenar’ los faltantes. Esto aumenta la incertidumbre de los resultados, pues al rellenar las series se crea artificialmente un comportamiento del clima que en realidad nunca sucedió. Además de los datos faltantes, puede haber en la serie de tiempo valores extraños que excedan o disminuyan en forma exagerada los valores habituales de la variable a analizar (Fig. 20). Estos datos sospechosos pueden tener su origen en errores humanos, como en el caso de los errores realizados durante la digitación de los datos (capturar 200 en vez de 20.0), errores sistemáticos por mala calibración o reemplazo de los instrumentos, cambio de ubicación de la estación o cambio de observador (Jones et al 1997), aunque también podrían ser registros verídicos de la ocurrencia de eventos extremos.

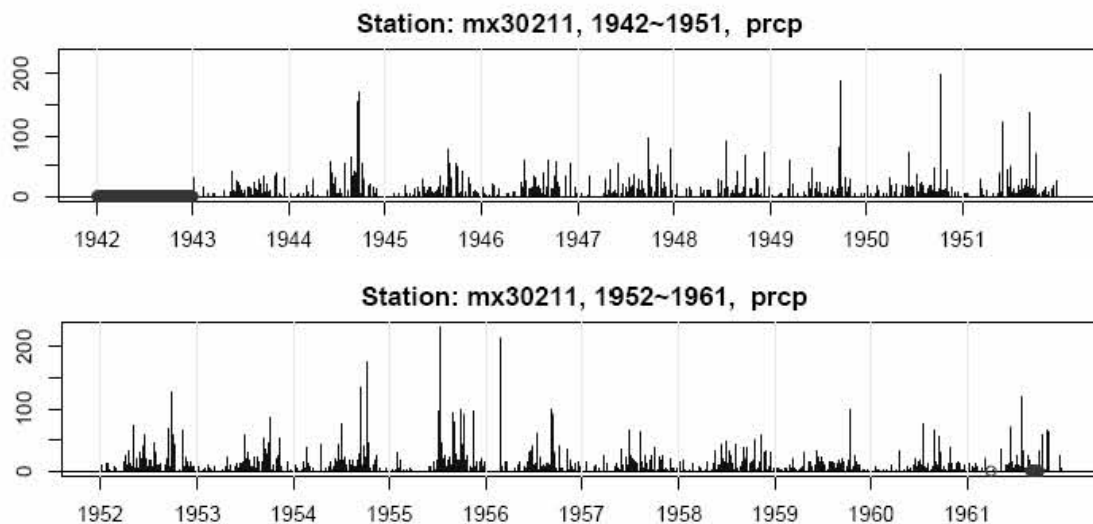


Fig. 20. Serie de tiempo de precipitación diaria en la estación 30211 (Las Vigas, Ver.) que ilustra la presencia de valores sospechosos en 1942 y en los máximos del resto de la serie. Registros de lluvia tan altos pueden ser errores en la base de datos, aunque podrían ser también extremos que en verdad sucedieron.

Surgen entonces interrogantes como las siguientes: ¿Cómo saber si los datos sospechosos en verdad sucedieron? ¿Se trata de eventos extremos reales en el caso de fuertes descensos de temperatura o precipitaciones de valores altísimos? ¿Estos datos sospechosos pueden ser ajustados o deben dejarse tal y cómo están? ¿Qué impacto tiene en los análisis utilizar la base de datos tal y cómo está sin un control de calidad previo? ¿Cómo

definir un evento extremo?¿La precisión requerida en el control de calidad depende del uso que se vaya a dar a los datos?

El sistema CLICOM permite incluir algunos aspectos elementales de control de calidad frecuentemente utilizados, como por ejemplo, el uso de las medias de largo periodo como valores de referencia o el uso de una forma de validación que realiza una revisión espacial del valor mediante la reunión de todos los valores registrados al mismo tiempo y comparándolos entre sí. Este tipo de control de calidad sólo puede usarse para algunos datos y requiere de una red relativamente densa de estaciones, lo suficientemente densa como para que las estaciones adyacentes registren valores que tengan algo en común; sin embargo, variables como la lluvia pueden diferir tanto de estación a estación que frecuentemente este tipo de análisis no es útil. Entonces, criterios de validación simples como referencias a la media de largo periodo no bastan para realizar un control de calidad eficiente (You and Hubbard, 2006). La experiencia ha mostrado que deben utilizarse criterios estadísticos más robustos para detectar datos extraños e incluso es necesario incorporar el conocimiento de expertos locales para definir si un valor sospechoso es factible de haber ocurrido o no. Una de las consideraciones más efectivas en el control de calidad se relaciona con el hecho de que los valores anómalos registrados en una estación se reflejen también en las estaciones más cercanas.

El Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI por sus siglas en inglés) de la Organización Meteorológica Mundial propone un enfoque de control de calidad que consiste en utilizar umbrales estadísticos para identificar los valores sospechosos (típicamente ± 4 desviaciones estándar) y posteriormente recurrir a expertos locales para, mediante análisis sinóptico y de climatología física, determinar si el valor sospechoso es en verdad un dato aberrante o un extremo factible de haber ocurrido. Un software auxiliar de licencia GPL para la detección de datos sospechosos (Rclimindex) puede obtenerse del sitio de Internet de este grupo [<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/>].

En la literatura puede encontrarse evidencia de métodos más complejos de control de calidad (Gandin, 1988), desde los que se basan en el uso de percentiles y análisis de funciones de densidad de probabilidad hasta los que incorporan técnicas multivariadas o multidimensionales o incluso los que incorporan mediciones de radar y satélite meteorológicos para validar la ocurrencia de eventos extremos.

Los cambios en la variabilidad climática registrada en una estación son también un elemento que debe explorarse para aumentar la confiabilidad de los análisis basados en series de tiempo. El tema de la homogeneidad de los datos climáticos incide directamente en la posibilidad o no de calcular tendencias o identificar oscilaciones de baja frecuencia (Alexanderson and Moberg, 1997; Peterson et al, 1998; Vincent et al, 2002; Groisman et al, 2005). Este tema se vuelve especialmente delicado cuando los análisis de los datos tienen como objetivo obtener conclusiones relacionadas el cambio climático. El cambio de ubicación geográfica de una estación, la renovación o cambio de instrumentos, el reemplazo de una estación antigua por una nueva o automática puede causar cambios en el rango de variabilidad de las mediciones.

Es por tanto imperativo que previo al análisis de los datos en series de tiempo, se analice la homogeneidad de éstas y la ocurrencia de puntos de cambio significativos (Wang, 2003), así como también es necesario verificar si los cambios se encuentran documentados o si pueden estar asociados a teleconexiones (Menne and Williams, 2005). La Figura 21 muestra un ejemplo de 'puntos de cambio' en una serie de tiempo de temperatura y precipitación; este punto de cambio puede deberse a un cambio en la ubicación de la estación, o bien podría haber sido ocasionado por variabilidad natural en bajas frecuencias. Si el cambio es detectado como significativo, la serie de tiempo no puede utilizarse para el cálculo de tendencias.

Tanto el control de calidad como el análisis de homogeneidad de las series de tiempo de variables climáticas puede realizarse de mejor manera si se cuenta con suficientes metadatos. Los metadatos son datos altamente estructurados que describen las características de la información. Son "información sobre la información" o "datos sobre los datos". Entre otros, describen el origen, la calidad, los posibles cambios de origen humano o instrumental, las condiciones en que se realizan las mediciones y otras características de la información.

El mantenimiento de los metadatos garantiza en buena medida la confiabilidad de los datos. Sin embargo, no se cuenta en la República Mexicana con un agregado nacional de metadatos que documente los diversos cambios relacionados con ubicación de las estaciones, reemplazo o actualización de instrumentos, cambios de observador, cambios del entorno (uso de suelo, edificios, cuerpos de agua). Quizá se cuente con metadatos para la

red de estaciones convencionales a nivel estatal, regional o de estación. Es por lo tanto un requerimiento urgente en el país la integración hasta donde sea posible de metadatos de las diferentes redes de observación existentes. Como punto de apoyo, la Organización Meteorológica Mundial ha publicado una guía sobre metadatos y homogeneidad (Aguilar et al 2003).

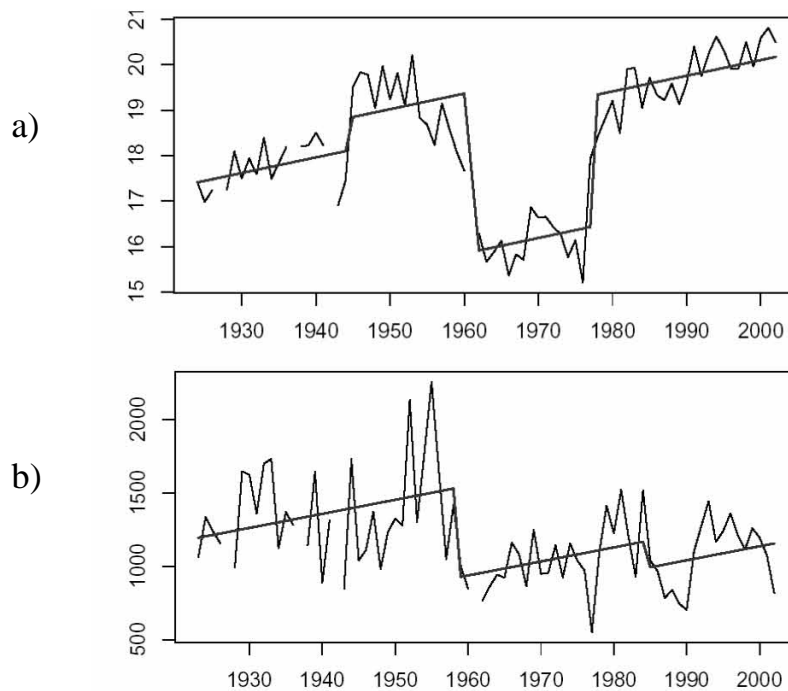


Fig. 21. Serie de tiempo de a) temperatura máxima y b) precipitación en la estación 30211 (Las Vigas, Ver.) ambas gráficas muestran la ocurrencia de saltos o cambios en la variabilidad alrededor de 1960. La significancia de los puntos de cambio puede volver a la serie inhomogénea.

Tanto el control de calidad como el análisis de homogeneidad de las series tienen por objeto la correcta valoración en los análisis de los eventos extremos. No existe una definición única de evento extremo, pero de ellos puede decirse que son los eventos ocurridos cuyo valor observado excede un umbral específico en toda la serie de tiempo y cuya probabilidad de ocurrencia es muy baja. Para la identificación de extremos de precipitación calculados a partir de datos diarios, Nicholls y Murray (1999) sugieren al menos tres índices: a) la frecuencia de días que exceden los percentiles 90, 95 y 99, calculando los percentiles únicamente con los días con lluvia; b) el 'índice simple de intensidad de lluvia' calculado dividiendo la lluvia total por el número de días con lluvia y

c) el porcentaje de la lluvia en un periodo (año, estación, etc) que ocurre en los días con lluvia por arriba de los percentiles 90, 95 y 99.

2.3. Mallas regulares: análisis objetivo y asimilación de datos

Varias aplicaciones tales como construcción de climatologías y cálculo de anomalías o patrones compuestos (Higgins and Shi, 2000, 2001), control de calidad (Eischeid et al, 1995), evaluación de modelos numéricos (Magaña y Pérez, 1998), se facilita si se realiza a partir de campos que han sido llevados de observaciones irregularmente distribuídas en el espacio a mallas regulares (Fig. 22). Este proceso forma parte de una rama de estudio de las ciencias atmosféricas denominada “análisis objetivo”. En esta rama de las ciencias atmosféricas se han documentado varios métodos para realizar interpolación espacial (Thiebaux and Pedder, 1987) a partir de valores observados en estación.

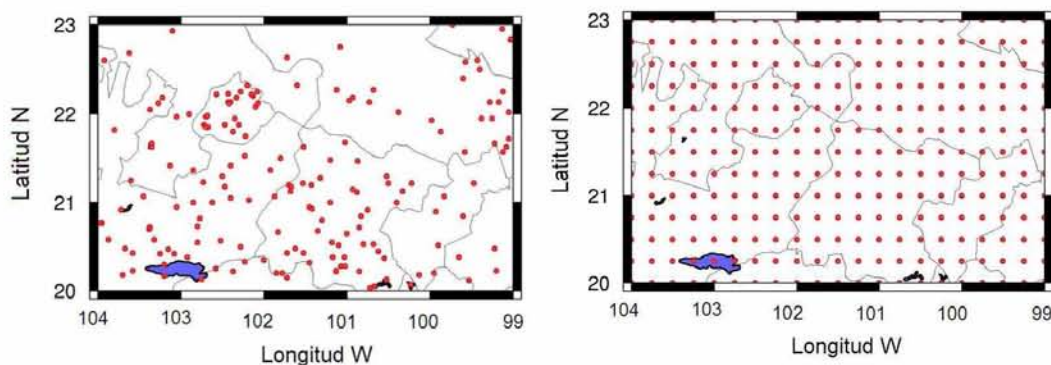


Fig. 22. Localización geográfica irregular de estaciones climatológicas (izquierda) y arreglo de los datos en una malla regular con análisis objetivo (derecha).

Un método más robusto que también genera resultados como mallas regulares es la asimilación de datos (Talagrand, 1997; Kalnay, 2002;). Las técnicas de asimilación de datos utilizan las observaciones, los métodos de análisis objetivo y la información derivada de los modelos climáticos para producir campos realistas del estado atmosférico útiles en la predicción numérica del tiempo (v.gr. Hoke and Anthes, 1976) y en el reanálisis de datos. Un sistema de asimilación de datos permite también realizar actividades de monitoreo y análisis de calidad (Hollingsworth et al 1986).

El sistema de asimilación de datos climáticos más conocido en la comunidad de ciencias atmosféricas es quizá el de los reanálisis NCEP/NCAR, que utilizan el modelo

global de NCEP para la asimilación (Kalnay, 1996). Recientemente, tuvo lugar el desarrollo de un sistema de asimilación de datos regional basado en el modelo ETA, dando lugar al conjunto de datos asimilados conocido como los Reanálisis Regionales de Norteamérica, NARR (Mesinger et al, 2005). Sistemas similares de asimilación de datos podrían construirse para México con algún otro modelo regional (RAMS, MM5, WRF) aunque el solo hecho de evaluar las asimilaciones ahora disponibles (NARR) es ya un requerimiento de investigación, con el fin de detectar errores sistemáticos y documentar la utilidad de los datos asimilados. En el caso de México, los datos asimilados regionalmente tienen potencial para ofrecer alternativas ante la baja densidad de algunas observaciones, como por ejemplo para la variable viento. Es claro que una de las principales necesidades en materia de datos climáticos en la República Mexicana, es llegar a contar con Sistemas de Asimilación de Datos a escala regional.

Es importante mantener en mente que el uso de datos en mallas regulares no significa que se deje de lado el análisis en series de tiempo de las estaciones existentes. Las bases de datos analizadas objetivamente y en mallas regulares complementan el trabajo con series de tiempo en estaciones.

El desarrollo del análisis objetivo inició a finales de los años cincuenta con los trabajos de Panofsky (1949) y de Gilchrist y Cressman (1954) consistentes, respectivamente, en el ajuste de un polinomio cúbico y de uno de segundo grado a datos meteorológicos generando una malla regular. Posteriormente, Cressman (1959) mejoró las estimaciones basadas en polinios mediante un método de aproximaciones sucesivas. Los desarrollos posteriores de Barnes (1964) dieron lugar a un esquema similar al de Cressman con diferente forma de ponderar las observaciones, el cual fue ampliamente aceptado por la comunidad de investigadores de la mesoescala. Los métodos de análisis objetivo son útiles cuando se desea analizar los campos de observaciones sin que se utilice aún un modelo numérico.

El desarrollo del análisis objetivo continua en la actualidad. Los métodos más avanzados desarrollados hasta ahora incorporan técnicas de interpolación óptima (Thiebaux and Pedder, 1987) aunque su desempeño no es siempre el mejor para análisis de eventos extremos. Algunas investigaciones exploran actualmente la utilidad de la interpolación

óptima en regiones con orografía compleja (Bhargava and Danard, 1994). Otras técnicas recientes incluyen el uso de filtros de Kalman y métodos de estadística Bayesiana.

En México, algunos esfuerzos se han realizado para generar bases de datos en mallas regulares, como el producto del SMN denominado MAYA v1; sin embargo, su uso no es recomendable dado que, basado únicamente en interpolación como función de la distancia, es similar a los esfuerzos de la década de los años 50. Una mejor alternativa sería sin duda el uso de los datos de NARR.

Por lo anterior, actualmente persiste en el país la necesidad de generar bases de datos mediante análisis objetivo por parte de especialistas de las ciencias atmosféricas. El correcto desarrollo de bases de datos en mallas regulares es de utilidad para el entendimiento de la variabilidad espacio-temporal del clima (New et al, 2000). Es así que como parte de este trabajo se decidió desarrollar una base de datos de lluvia diaria en mallas regulares con el método de Cressman.

2.4. El método de Cressman

El método de Cressman (1959) fue una de las primeras técnicas de análisis objetivo utilizadas en forma operativa para la estimación de campos de variables meteorológicas. Este método consiste en utilizar un campo inicial el cual es modificado sucesivamente (generalmente de 4 a 6 veces) mediante una función que pondera la información disponible en las estaciones cercanas dentro de un radio de influencia especificado (Fig. 23).

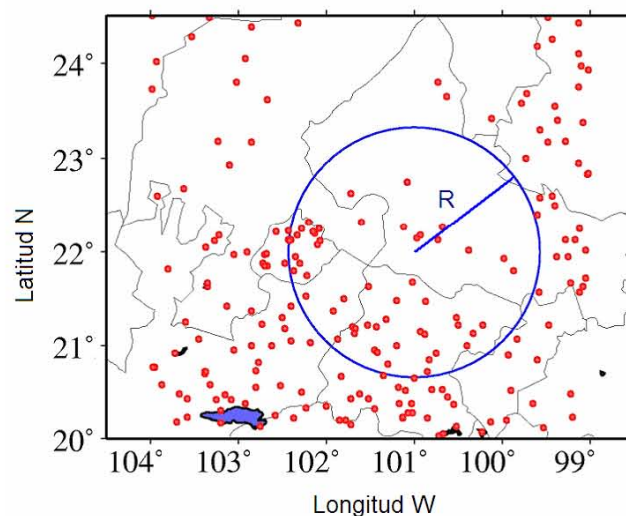


Fig. 23. Mapa que muestra puntos de estación y ejemplifica el concepto del radio de influencia del método de Cressman.

En otras palabras, el esquema de Cressman consiste en tener una primera aproximación de la variable a analizar y aprovechando los datos reportados como observados (de estaciones), se corrige la primera aproximación al comparar la diferencia entre el campo preliminar y las observaciones alrededor. A través de aproximaciones sucesivas, se define un valor umbral de error por debajo del cual se considera que se tiene una aproximación en malla suficientemente cercana a los valores reportados en las estaciones. El procedimiento anterior permite eliminar datos considerados erróneos. Sus ventajas radican en que es económico computacionalmente y relativamente simple, sobre todo cuando se dispone de suficientes datos en todo el dominio de interés.

Así, en el método de Cressman es necesario contar con los siguientes elementos:

- a) un campo preliminar de la variable a analizar objetivamente
- b) una red densa de observaciones de la variable a analizar
- c) un conjunto definido de radios de influencia
- d) una función de ponderación o pesos

El campo preliminar puede ser obtenido de la climatología o de un modelo físico de la atmósfera entre otras posibilidades.

La red de observaciones corresponde a las mediciones hechas para el momento de tiempo en que se desea tener el análisis. La densidad de las observaciones debe ser preferentemente alta en el área geográfica del análisis, lo cual garantizará estabilidad y consistencia en los resultados. La escala de los resultados y el nivel de detalle varían conforme a la densidad de las observaciones.

El conjunto de radios de influencia en el que se consideran las observaciones para construir la función de estimación se reduce en cada aproximación sucesiva con el fin de incorporar información de escala regional y local. Un análisis de Cressman típico realiza de cuatro a seis aproximaciones sucesivas con sus correspondientes radios de influencia.

Finalmente la función de ponderación o función de pesos es la relación entre la estación y el punto de malla que se está calculando. Esta función asigna mayor (menor)

importancia a los reportes de las estaciones que se encuentran más cerca (lejos) del punto que se va a estimar. En el esquema de Cressman, la función de ponderación está dada por

$$W = \frac{(R^2 - d^2)}{(R^2 + d^2)} \quad (1)$$

donde R es el radio de influencia y d es la distancia entre el punto de malla y la estación.

La función de ponderación descrita en (1) implica que las observaciones cuya ubicación geográfica es más cercana al punto de malla a estimar tienen mayor influencia en la estimación. Conforme la distancia entre la estación y el punto de malla aumenta, las observaciones tienen menos influencia en la estimación. La Figura 24 muestra la ponderación de las observaciones en función de la distancia para un radio de influencia unitario.

El método de Cressman ha sido utilizado no sólo para realizar análisis objetivo simple, sino también como un paso intermedio en la asimilación de datos, como en el caso de los NARR (Mesinger et al 2005). El esquema de Cressman tiene la ventaja de ser simple y computacionalmente económico; en términos generales ha mostrado ser más preciso que otros métodos de análisis objetivo como la interpolación simple o la estimación por ajustes polinomiales. Las principales desventajas del método son que puede volverse inestable si la densidad de la malla a estimar es mucho mayor que la densidad de las observaciones disponibles; es sensible a los errores en las observaciones; puede producir valores extremos ficticios, sobre todo en las fronteras de la malla a generar y no cuenta con un método óptimo para determinar el radio de influencia, éste debe estimarse por ensayo y error.

Glahn et al (1985) realizaron una adaptación del método de Cressman diferenciando entre variables continuas y las que presentan discontinuidades, incluyendo en estas últimas a la lluvia. Fundamentalmente, el Cressman modificado por Glahn et al, utiliza el valor de la estación más cercana al punto de malla en vez de la aproximación sucesiva correspondiente cuando se trata de un valor extremo. Charba et al (1992), basándose en la propuesta de Glahn et al (Op. Cit.), realizó una modificación posterior, incorporando funciones que toman en consideración la distribución de las observaciones y ajustan el radio de influencia como una función del espaciamiento medio entre las observaciones. En

esta tesis se utilizará el método original de Cressman, tal y como se encuentra descrito en Krishnamurti y Bounoua (1996).

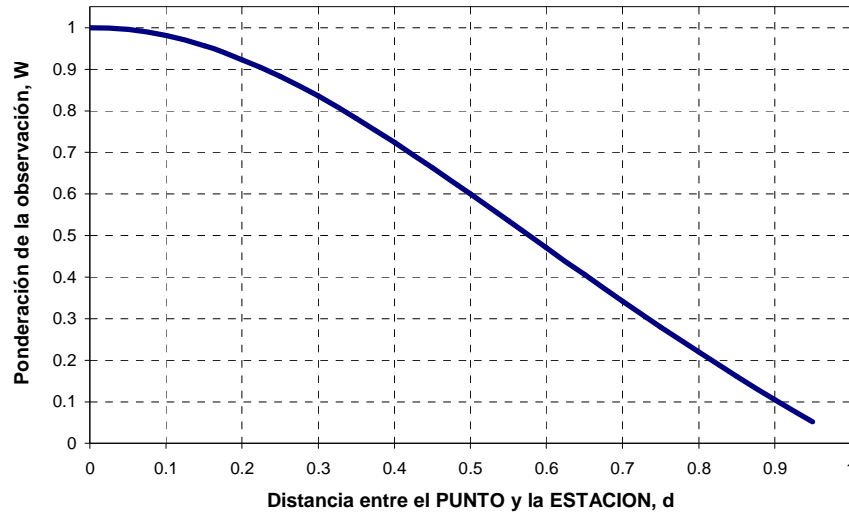


Fig. 24. Función de ponderación de la ecuación (1) utilizada en el método de Cressman para el caso de un radio de influencia unitario $R = 1$.

2.5. Construcción de una bdd de lluvia diaria en mallas regulares

Para cumplir con el objetivo de analizar la variabilidad de la lluvia en la región es necesario utilizar una base de datos de alta resolución lo más completa posible, de manera que la identificación de los patrones espacio-temporales característicos de la lluvia corresponda en forma realista a las observaciones.

La rápida evolución de la tecnología computacional ha permitido que a la fecha la comunidad cuente con diversas bases de datos de precipitación, aunque casi todas han sido desarrolladas con resolución espacial relativamente baja y para la escala temporal mensual.

Por ejemplo, para la escala global, Legates y Willmot (1990) desarrollaron una climatología global de precipitación usando mediciones de pluviómetros y estimaciones de barcos e interpolando en una malla de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grados. Luego, Legates (1995) evaluó en forma comparativa las climatologías de precipitación desarrolladas hasta mediados de la década de los noventa, llegando a la conclusión de que es preferible utilizar climatologías construídas a partir de datos que aquellas compiladas subjetivamente con base en la

experiencia. Su análisis es uno de los primeros en mostrar que no existe un conjunto de datos único, sino medidas de dispersión entre los diferentes datos disponibles.

Xie y Arkin (1996) combinaron datos de pluviómetros con estimaciones de satélite (GOES, MW Grody y MW Chang) y de modelos de pronóstico numérico (ECMWF) para desarrollar mallas globales de precipitación mensual, concluyendo que el 'ensamble' de datos mejora la representatividad de la precipitación de las fuentes individuales.

En la escala mensual una de las bases de datos más elaboradas es la de Chen et al (2002) para el periodo 1948-2000, aunque su resolución es de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; previamente al desarrollo de estos datos los autores evaluaron cuatro procedimientos de análisis objetivo (Cressman, Barnes, Shepard e Interpolación Óptima), encontrando que el método de Interpolación Óptima es el que produce los análisis más estables y precisos en esa escala espacio-temporal. Una conclusión importante de este estudio es que al generar datos en mallas se obtienen mejores resultados si se interpolan anomalías en vez de los valores absolutos de precipitación.

En la Climatic Research Unit (CRU) de la Universidad de East Anglia, varias bases de datos globales se han desarrollado incluyendo temperatura y precipitación, y también se han generado climatologías sobre las áreas continentales con alta resolución ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) como la desarrollada por New et al (1999).

Un aspecto que a la fecha está abierto a la investigación es el de la precisión de las estimaciones de lluvia sobre las áreas oceánicas. En la actualidad, la mayoría de estos datos son obtenidos a través de algoritmos que utilizan la información de satélite para estimar lluvia. Sin embargo, desarrollos como los de Dorman y Bourke (1979) han mostrado la importancia de incorporar las mediciones directas (p.ej. de barcos) en el análisis de la lluvia sobre el océano; en su estudio, estos autores encuentran que para el océano Pacífico, el máximo de lluvia ocurre en julio y agosto para los trópicos mientras que para latitudes al norte de 28°N la mayor parte de la lluvia ocurre en los meses de invierno.

La Organización Meteorológica Mundial a través del Programa Mundial de Investigación del Clima (WRCP por sus siglas en inglés) estableció el Proyecto de Climatología Global de Precipitación (GPCP) con la finalidad de solucionar el problema de cuantificar la distribución de la lluvia en el globo en un periodo de muchos años. El enfoque de este proyecto consiste en combinar la información de precipitación disponible

en diversas fuentes incluyendo información derivada de satélites, sondeos verticales y datos pluviométricos. El procedimiento utilizado operacionalmente para generar los datos del GPCP se describe en Adler et al (2003). La resolución de las mallas de este proyecto es de $1^\circ \times 1^\circ$ y el periodo cubierto es de 1979 a la fecha (datos mensuales). Por tratarse de un proyecto de gran magnitud, diversos subproductos se han generado a partir de los datos originales y en el caso de la escala diaria, el producto denominado 1DD (1 degree-daily) produce estimaciones de lluvia a partir de 1997 (Huffman et al, 2001). Desafortunadamente, por su fecha de inicio, la longitud del registro histórico de estos datos en la escala diaria es aún muy corta.

Diversos desarrollos han tenido lugar también para regiones específicas del planeta: Para la región de los Estados Unidos, Higgins et al (1996) desarrollaron una base de datos de precipitación horaria en mallas para el periodo 1963-1993; Charba et al (1998) desarrollaron mallas regulares medias mensuales para la precipitación de cada 1, 3 y 6 horas; Janowiak et al (1999) similarmente, desarrollaron una base de datos diaria de temperatura máxima y mínima para la región conexas de Estados Unidos (también llamada CONUS).

Para la región de los Grandes Alpes, Efthymiadis et al (2006) desarrollaron una base de datos de precipitación acumulada mensual en mallas para el periodo 1800-2003 a una resolución de 10 minutos (aproximadamente 18.5 km); esta base de datos se basa en información de 192 series de tiempo homogeneizadas en el dominio del estudio (43° N a 49° N y 4° E a 19° E) con un máximo de observaciones disponibles entre 1931 y 2000.

Un desarrollo excepcional es el de Feng et al (2004) que, con base en las modificaciones de Glahn y Charba al esquema de Cressman, generaron una base de datos diaria en mallas regulares para varias variables en China.

Con base también en el esquema de Cressman modificado, en el Centro de Predicción del Clima de Estados Unidos (CPC) se mantiene como producto operacional el producto llamado USMEX, consistente en una malla diaria de lluvia para Estados Unidos y México. Aunque en la actualidad la resolución de esta malla es de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, esta resolución de malla se tiene sólo desde el año 2002, cuando el análisis objetivo empezó a realizarse en tiempo real mediante un acuerdo de cooperación con el SMN. Para los datos históricos, el producto USMEX incorpora únicamente del orden de 300 estaciones en

México por lo que la resolución histórica es de $1^\circ \times 1^\circ$ [Comunicación personal: Wei Shi, CPC. 2006].

De este modo, dado que las bases de datos disponibles arriba descritas son en su mayoría de lluvia mensual o de resolución relativamente baja, como parte de esta tesis y para poder analizar la variabilidad de la precipitación en la República Mexicana y sus alrededores, se procedió a crear una base de datos de lluvia diaria en mallas regulares con resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ para el dominio del sur de Estados Unidos, México, Centroamérica y el Caribe [de 130°W a 60°W y de 5°N a 40°N] y para el periodo de 1958 a 2004. Diversas fuentes de información fueron incluidas para incorporar la mayor cantidad de observaciones disponibles en la región.

Las mallas diarias regulares generadas tienen la característica de ser de alta resolución espacial y de cubrir una vasta región continental y oceánica. La figura 25 muestra los puntos de observación con reportes pluviométricos que se utilizaron en el desarrollo de la base de datos de lluvia diaria en mallas regulares. Es importante notar que en el océano y sólo en el océano se utilizaron datos de los Reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay et al 1996) para proveer continuidad espacial útil en el análisis objeto de este trabajo.

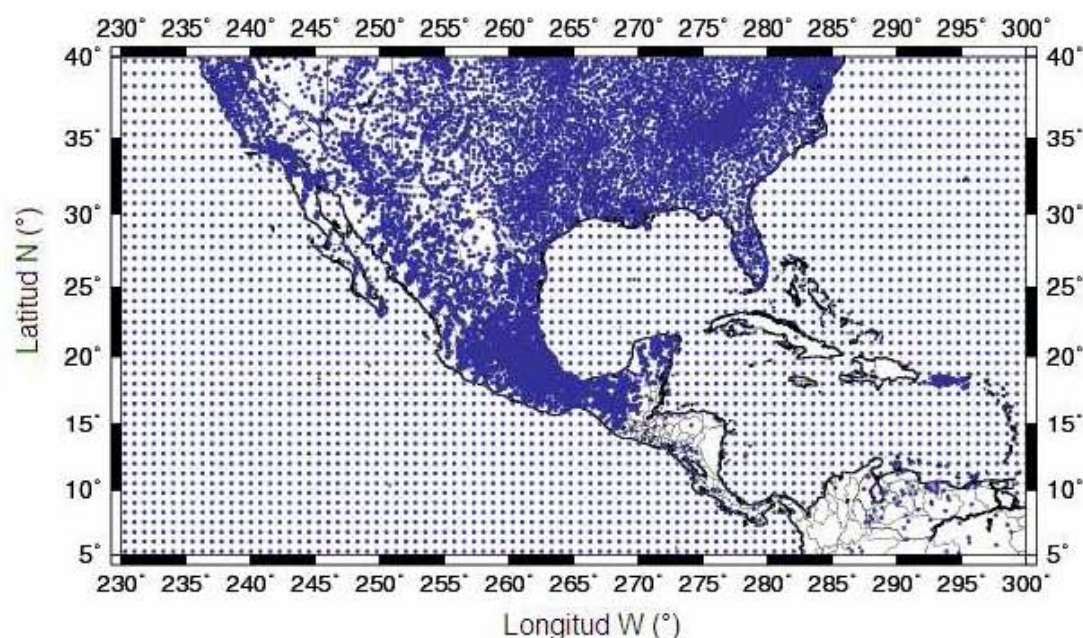


Fig 25. Estaciones pluviométricas en el continente y datos de reanálisis en el océano en la región donde se construyó la base de datos de precipitación diaria en mallas regulares.

Las fuentes de información pluviométrica que se incluyeron son:

a) Global Historical Climatology Network – Daily v.1 (GHCN). Este conjunto de datos corresponde a la Red de Climatología Histórica Global y fue obtenido del acervo del Centro de Nacional de Datos Climáticos de los Estados Unidos de Norteamérica (*National Climatic Data Center, NCDC*). Los datos del GHCN fueron sometidos en el NCDC a algunos procedimientos de control de calidad simples que incluyen análisis de duplicados, corrección de formato, supresión de valores ilógicos y valores fuera de rango; sin embargo, estos datos se utilizaron para contar con información únicamente en las regiones extranjeras del dominio de interés, por lo que todas las series de GHCN utilizadas se ubican fuera de la República Mexicana.

b) Datos del sistema CLIma COMputarizado (CLICOM) del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua.-

c) Datos de algunas estaciones de la región Centroamericana.

d) Reanálisis NCEP/NCAR.- Para la realización de este estudio, se utilizó la base de datos Reanálisis (Kalnay et al., 1996), generada por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR).

El total de series de tiempo utilizadas para la construcción de la malla es de 12597. La moda del número de observaciones por día fue de 9624. Con fines de estandarizar los identificadores de las estaciones climatológicas utilizadas para el desarrollo de la base de datos de esta tesis, se adoptó la convención de utilizar claves de once dígitos, en las que los tres primeros dígitos corresponden al país y los ocho restantes a a la clave local de la estación. Dicha convención es similar a la utilizada por el National Climatic Data Center de los Estados Unidos en el desarrollo de la base Global Historical Climatology Network (GHCN). Los tres primeros dígitos identificadores se resumen en la Tabla 2.

En los casos de las áreas geográficas de Colombia y Nicaragua no fue posible incluir puntos de observación debido a la no disponibilidad de datos, por lo que en esas áreas las mallas de lluvia mostrarán resultados distantes de la realidad.

Tabla 2. Código de identificación y región correspondiente para los puntos utilizados en la construcción de la base de datos diaria.

ID (1-3)	Región
055	Reanálisis NCEP/NCAR (océano)
305	Colombia
314	Venezuela
405	Costa Rica
408	El Salvador
410	Guatemala
412	Honduras
413	Jamaica
414	México
415	Nicaragua
416	Panamá
419	Estaciones operadas por Francia
423	Bahamas
425	Estados Unidos de América

La aplicación del método de Cressman generalmente se realiza con cuatro a seis aproximaciones sucesivas. Como ya se mencionó, no existe en dicho método una forma de obtener los radios de influencia óptimos, sino que éstos deben determinarse por ensayo y error. Por lo tanto, se procedió a experimentar con diferentes radios de influencia para seleccionar el conjunto de éstos que mejor representaran los patrones de lluvia diaria.

La Figura 26 muestra los cinco radios de influencia seleccionados para la generación de la base de datos en mallas diarias, los cuales corresponden a distancias de 2.2, 0.8, 0.6, 0.4 y 0.2 grados.

Así, utilizando la mayor cantidad de información pluviométrica disponible en el dominio de interés y aplicando el método de análisis objetivo de Cressman, se generó un total de 17167 mallas de lluvia, una para cada día del periodo 1958-2004 tomando en cuenta el día adicional de los años bisiestos.

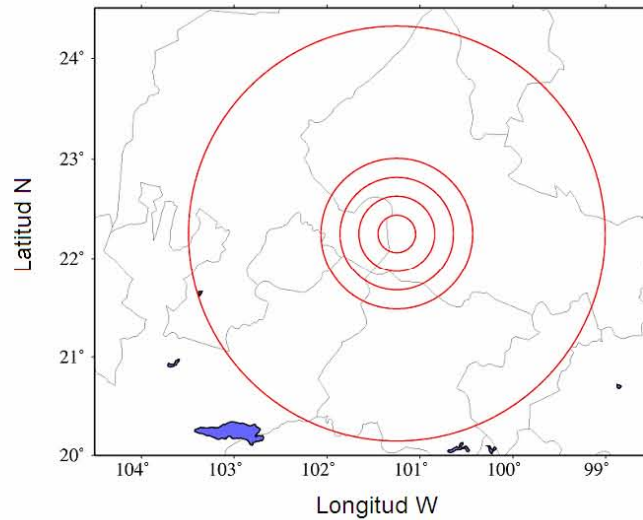


Fig. 26. Conjunto de cinco radios de influencia (2.2, 0.8, 0.6, 0.4 y 0.2 grados) usados en las aproximaciones sucesivas durante la generación de las mallas diarias de este estudio.

La evaluación de la base de datos en mallas regulares puede realizarse considerando aspectos relacionados con estadísticas básicas de los campos de lluvia. Adicionalmente, una forma de evaluar la calidad de los datos es comparando los patrones espaciales de precipitación de la malla con los previamente reportados en la literatura sobre la climatología, la evolución del ciclo anual, la variabilidad interanual y comparando los valores de lluvia estimados en la malla con los reportes de estación. La comparación de los patrones de lluvia con otros ya reportados será discutida en el Capítulo 3 como parte del análisis de variabilidad.

En el caso de las comparaciones entre la lluvia estimada en la malla vs los datos de estación, la Figura 27 muestra el caso de la lluvia acumulada mensual en la estación de Apizaco, Tlaxcala. Se puede observar que los datos interpolados (barras negras) siguen muy de cerca los cálculos de los valores reportados en la estación (barras blancas). Ciertamente la intensidad no es idéntica, pero el patrón del comportamiento de la lluvia mensual a lo largo del año es capturado con bastante precisión en la estimación en malla.

Puesto que el proceso de estimación de valores de lluvia en los puntos de malla implica realizar una interpolación, se debe considerar la factibilidad de que este paso lleve al *suavizamiento* de las series y en consecuencia a una subestimación de los valores extremos. Así, si se comparan los datos diarios estimados en la malla con los que se reportan en la estación, se llega a la conclusión de que los eventos de lluvia son captados

uno a uno, pero en el caso de eventos extremos éstos son suavizados por efecto de la interpolación. Para ejemplificar lo anterior, considérese la lluvia diaria en la estación Huimilpan, Querétaro (clave de CLICOM 22029) vs la estimación de la malla. Al comparar ambas series de datos se aprecia un suavizamiento en la intensidad de la precipitación extrema (Fig. 28).

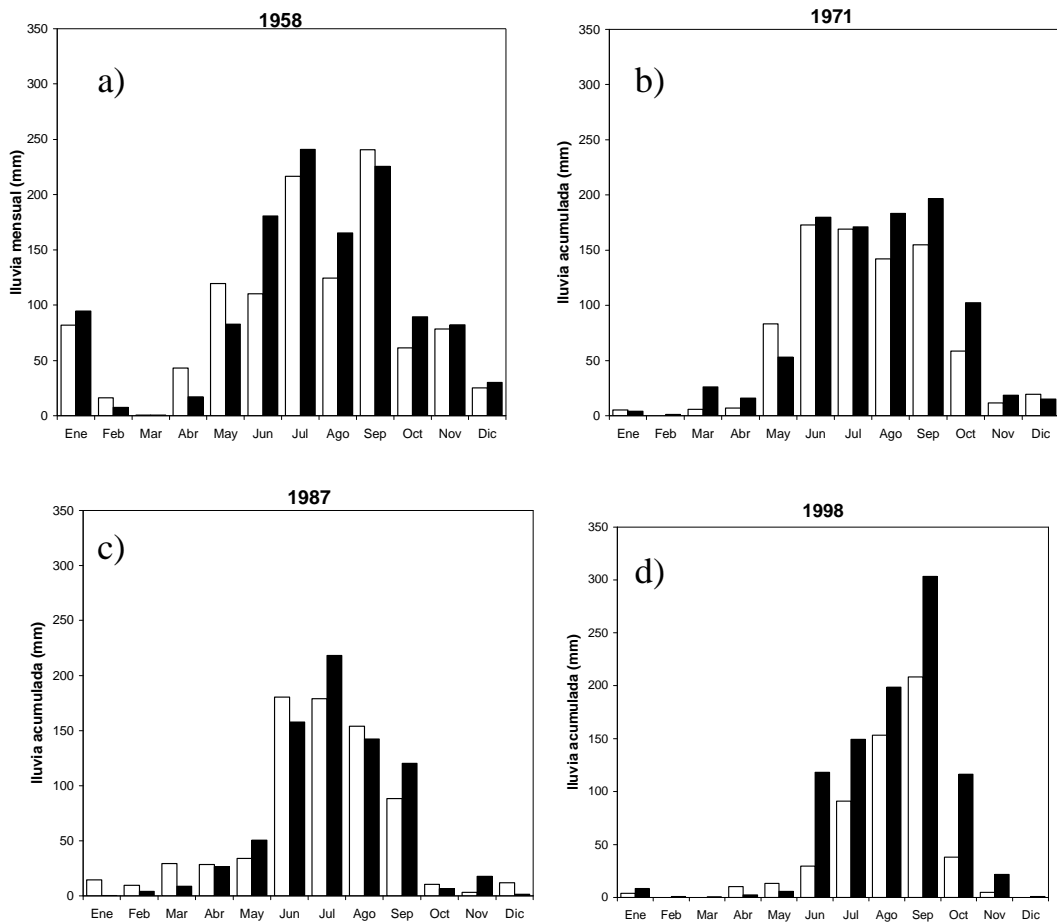


Fig. 27. Lluvia acumulada mensual observada en la estación Apizaco, Tlaxcala (blanca) VS estimada a partir de la malla de este estudio (negra) para: a) 1958, b) 1971, c) 1987 y d) 1998.

El dato extremo de los primeros días de enero de 1988 resulta sospechoso, mas el hecho de determinar su factibilidad de ocurrencia requiere la realización de un análisis sinóptico tal y como se mencionó en la sección sobre series de tiempo. No obstante lo anterior, de la comparación se desprende que el esquema de análisis objetivo empleado para llevar los datos de estación a puntos de malla captura los eventos diarios de precipitación.

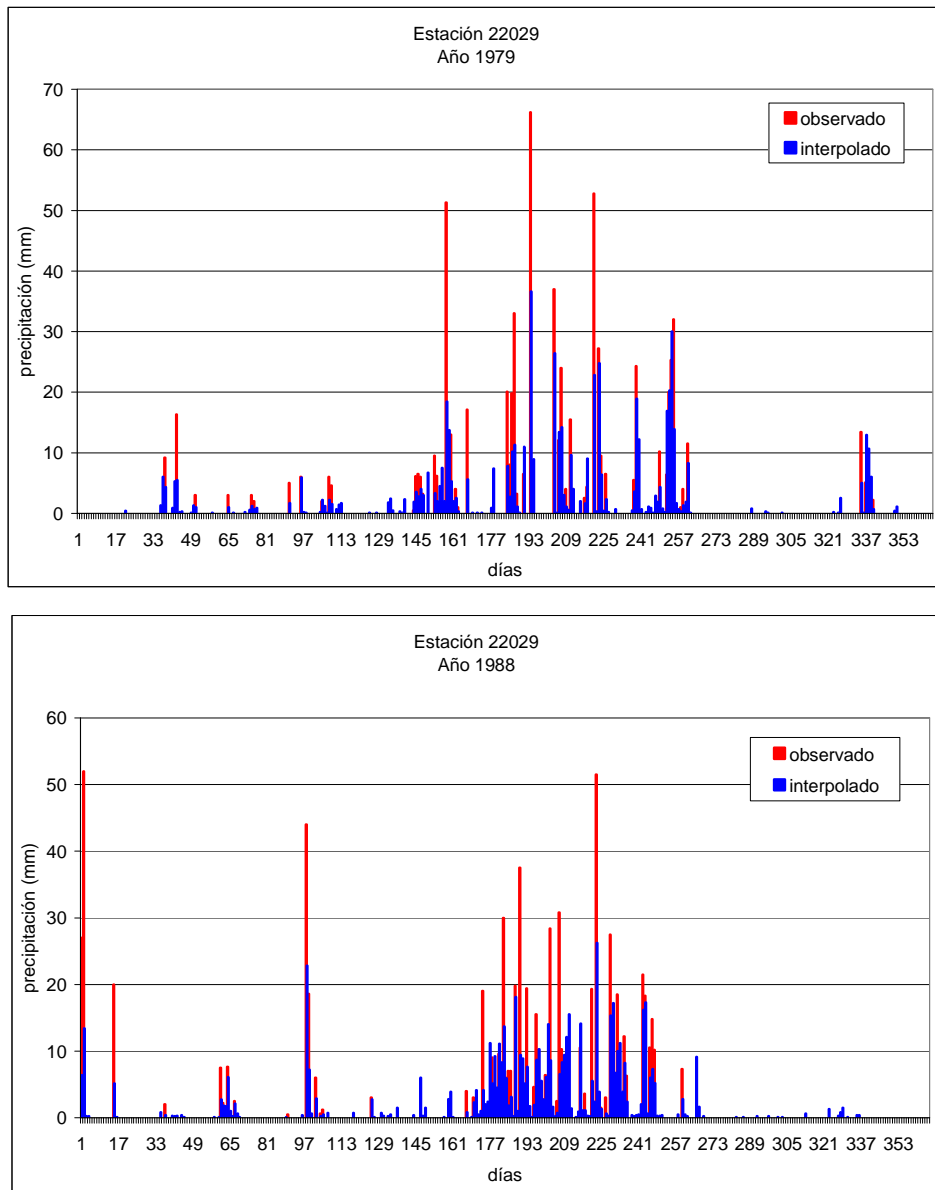


Fig. 28. Lluvia diaria observada en estación (rojo) vs estimada en la malla (azul) para la estación Huimilpan, Qro. (22029) en los años 1979 (arriba) y 1988 (abajo).

Uno de los criterios que se puede utilizar para mostrar que los datos están generando la cantidad de precipitación adecuada es utilizando la distribución de la lluvia diaria. Para ello, considérese como ejemplo la distribución de probabilidad en la estación Huimilpan a partir de la lluvia observada en la estación y los datos estimados en la malla diaria. Tal análisis muestra que existe un sesgo en los datos interpolados a generar algunos días más de

lluvia que los reportados por la estación, pero la magnitud de los eventos extremos es menor que la reportada en la estación (Fig. 29).

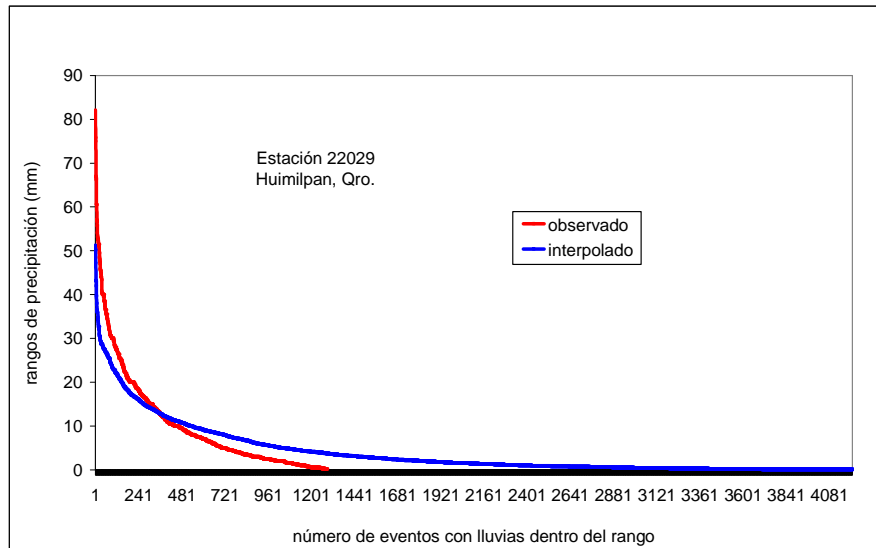


Fig. 29 Distribución de lluvia diaria observada y estimada en la malla en la estación Huimilpan, Qro.

Al analizar la distribución de los datos de lluvia diaria se confirma la tendencia existente en los datos de la malla a suavizar los eventos extremos y a producir algunos eventos de baja intensidad en mayor número con respecto a los valores observados en estación. El resultado es que el área bajo la curva de la serie estimada y de la serie observada resulta comparable indicando que la precipitación total es muy parecida, por lo que en general la base de datos obtenida mediante análisis objetivo ofrece una buena alternativa para analizar los patrones de lluvia en diferentes escalas de tiempo. En cambio, el análisis de intensidad de eventos particulares será más preciso si se realiza utilizando datos en series de tiempo. El análisis de los patrones de lluvia obtenidos de la malla se discute en el Capítulo 3.

2.6. El concepto de incertidumbre

La incertidumbre existe en la mayoría de los procesos que involucran a las variaciones del estado atmosférico y es claro que no existe una fuente de datos única que corresponda al verdadero estado de la atmósfera. Basta con imaginar que cambiar el número de puntos de observación ocasionaría variaciones en la representación de la variable medida. Así, necesitaríamos conocer la condición meteorológica en cada punto del espacio del planeta para aproximarnos a la verdadera condición del estado atmosférico, lo cual no es factible de

implementarse. Considerando que existe incertidumbre asociada a los datos climáticos, diremos que no existe una base de datos única o que una sola fuente de información sea la que deba utilizarse siempre; una medida de la incertidumbre derivada de diversas fuentes permite tener un mejor panorama de todo el espectro de información sobre el estado de una variable atmosférica. La Figura 30 muestra el concepto de propagación de incertidumbre.

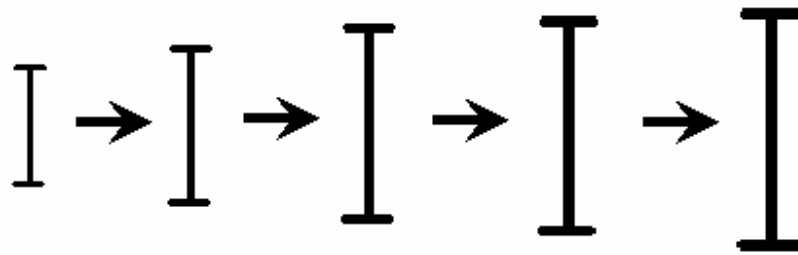


Fig. 30. Propagación de incertidumbre en diferentes etapas.

Primeramente se cuenta con un estado inicial de la atmósfera observado. Este estado inicial es imperfecto: las estaciones están espaciadas irregularmente, existe incertidumbre asociada a las mediciones, los datos pueden provenir de diversas fuentes (pluviómetros convencionales, digitales, etc.); luego, existe incertidumbre asociada a los esquemas de procesamiento de la información como en el caso de los sistemas de análisis objetivo; esta incertidumbre se propaga hacia los modelos numéricos, los cuales pueden tomar en cuenta dicha incertidumbre hasta cierto punto (por ejemplo en los esquemas de pronóstico por ensambles o en los sistemas de asimilación de datos se incorpora en las condiciones iniciales información sobre la estructura de los errores asociados a las observaciones); finalmente el usuario (científico o aplicado) debe también enfrentarse al manejo de la incertidumbre de la información.

A lo largo de lo documentado en este trabajo se ha visto que existen diversas bases de datos de lluvia con diferentes características, sin que se pueda realmente hablar de “la mejor base de datos”. Es tema de otros estudios la incursión en la intercomparación de los diferentes conjuntos de datos disponibles para obtener una medida de la incertidumbre asociada a la información de lluvia en la región (Covey et al, 2002). Proyectos como el GPCP buscan integrar la información de diversas fuentes con el fin de minimizar la

incertidumbre. Recientemente se inició en la comunidad de pronosticadores el uso de ‘ensambles’ para, en vez de utilizar una sola estimación del estado atmosférico inmediato, seleccionar la condición más probable de todo un espectro de eventos factibles de ocurrir.

Por lo tanto la base de datos de lluvia diaria en mallas regulares aquí desarrollada no es una base de datos perfecta. Si bien es cierto que viene a llenar un vacío de información existente en el país, se trata de un análisis más en la lista de bases de datos de precipitación sobre la región. Sin embargo, debe enfatizarse que las mallas diarias aquí generadas son uno de los elementos de mayor valor agregado de esta tesis, por lo que en el análisis de variabilidad del Capítulo 3 se busca evaluar la calidad de la información generada al considerar su capacidad para reproducir patrones de variabilidad de la lluvia en la región.

Dado el amplio número de propósitos con que la información de una variable puede ser utilizada (diagnóstico, inicialización de pronóstico, evaluación de modelos, educación, alertamiento, etc.), se concluye que el tema del manejo de incertidumbre es finalmente un tema multidisciplinario.

2.7. Requerimientos inmediatos

Además de los requerimientos de control de calidad, análisis de homogeneidad y análisis objetivo descritos en la sección sobre series de tiempo y de datos en mallas respectivamente, algunos requerimientos inmediatos en el país en materia de datos climáticos son:

a) Institucionalización de la administración de los datos

El SMN es el organismo representante de la OMM en México. Actualmente el SMN es una unidad de la Comisión Nacional del Agua (CNA), que a su vez pertenece a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Quizá en el país no se ha dado la importancia adecuada al SMN, que actualmente requiere fortalecer sus capacidades técnicas e institucionales en forma estratégica. Aunque la información que se genera en el SMN es de carácter público y está abierta a todo el que la solicite, los sectores de atención prioritaria son protección civil y manejo de agua, de modo que las demandas de otros sectores socioeconómicos no han llegado al punto de contar con productos específicos por sector. El creciente interés

multisectorial por incorporar la información del clima en la toma de decisiones parece rebasar la capacidad actual del SMN, que tiene bajo su cargo la recolección y administración de los datos climáticos de México. Salvo que ocurriera inmediatamente un fortalecimiento de capacidades del SMN, resultaría conveniente la creación de una institución, centro o grupo de trabajo, con recursos asignados y dedicado exclusivamente a la concentración, depuración, optimización y manejo de los datos climáticos, tomando en cuenta que éstos constituyen un patrimonio nacional de alta importancia económica. Es así que se propone considerar una prioridad la creación de un Centro Nacional de Datos Climáticos, que con mayores recursos humanos, tecnológicos y capacidades fortalecidas permita dar respuesta oportuna y eficiente en materia de datos climáticos a los sectores usuarios y a la comunidad científica mexicana. Es importante enfatizar que una de las principales funciones de dicha institución sería la de garantizar la calidad y la aplicación de los datos con objetivos de beneficio socioeconómico. No obstante, la creación de una institución nacional de esta naturaleza puede requerir bastante tiempo, por lo que una alternativa sería la creación de este tipo de centros en la escala estatal o regional.

Para respaldar la idea de que es necesario crear instituciones de esta índole, baste como ejemplo mencionar que en los Estados Unidos de América existe el Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC) como parte del Departamento de Comercio. Quizá la falta de una institución de este tipo en la República Mexicana se debe a que hasta ahora, los gobernantes aún no han dimensionado el potencial de capitalización/mitigación de pérdidas en función de la información climática, aspecto evidenciado en otros países emergentes (Tarhule and Lamb, 2003); o bien, se debe a que es necesario incrementar la heurística y la exploración de las áreas de oportunidad para el rescate de información de manera análoga a los trabajos realizados en otras regiones del mundo (Page et al, 2004).

b) Rescate de información durante el periodo instrumental

En los años recientes diversas instituciones han realizado esfuerzos importantes para digitalizar la información climática que se tiene disponible en papel, como ha sido el caso del Servicio Meteorológico Nacional, AGROASEMEX, el IMTA y las

Gerencias Estatales de CNA. En vista de lo anterior, el acervo de información del clima disponible en medio digital se ha incrementado de manera importante. Estos esfuerzos requieren ser mantenidos y llevados hasta donde sea posible, con la finalidad de tener en las bases de datos el mínimo de información faltante.

El rescate de datos instrumentales y el mantenimiento de la red de medición. es una tarea prioritaria y elemental que debe ser permanente. Las condiciones de las estaciones climatológicas varían también desde las que están en muy buen estado hasta las que requieren mantenimiento urgente (Fig 31).



Fig. 31. Ejemplo de las condiciones de dos estaciones climatológicas convencionales en el estado de Veracruz: 30158 (izquierda) y 30125 (derecha).

c) Disponibilidad en Línea

La rápida evolución de los recursos informáticos contemporáneos ha permitido que el intercambio de información sea eficiente y seguro en medios electrónicos. Vázquez (2002) documentó un procedimiento para hacer disponibles las bases de datos climáticas a bajo costo con base en el uso de software libre. Actualmente, el Instituto Internacional para el Clima y la Sociedad (IRI) (<http://iri.columbia.edu>) mantiene una biblioteca de datos climáticos en la que recientemente fue incorporada una base de datos de precipitación mensual generada en la Universidad Nacional Autónoma de México. En el sitio web del IRI es posible no sólo el acceso a dicha información, sino también su graficación y análisis en línea. Otros ejemplos se encuentran en el Centro Nacional de Datos Climáticos de los Estados Unidos (<http://www.ncdc.noaa.gov>) y en los sitios descritos por Nicholls (2001). Se requiere en México implementar

mecanismos informáticos similares a los mencionados para las diversas bases de datos que existen en el país.

d) Políticas de uso

La OMM, órgano de las Naciones Unidas, a través de sus países miembros promueve el libre intercambio de información meteorológica para el bien común. Lo anterior ha sido documentado en la Resolución 40 de las políticas de la OMM. Sin embargo, cada país conserva datos que no necesariamente son susceptibles de compartirse de manera pública o irrestricta. Incluso, algunos países comercializan la información climática con costos que van desde aquellos que siendo mínimos buscan únicamente recuperar gastos de operación, hasta aquellos en los que el costo de la información implica fuertes ganancias respecto al costo de obtención real de los datos. Es necesario en México definir una política de uso de la información climática que haya pasado por un proceso de control de calidad, con la finalidad de garantizar su sustentabilidad y uso adecuado con incidencia en los sectores interesados. Algunas ideas respecto a las políticas de uso de los datos climáticos han sido previamente documentadas (WMO, 1996). Un paso importante en materia de políticas de uso de la información climática consistirá en una revisión del marco legal en el que se circunscriben los alcances y limitaciones de la generación y uso de datos e información climática.

e) Recursos Humanos

Vukicevic et al (2004) postulan que los avances en materia de predicción numérica del tiempo e investigación en cambio climático han sido posibles gracias a los avances en tres áreas: modelación, métodos de observación y asimilación de datos. Estos autores, proponen la creación de un programa de educación en el tema de asimilación de datos en los Estados Unidos que forme especialistas en los niveles de licenciatura, maestría y doctorado, dado que en la actualidad los expertos en el tema son pocos y están dispersos. En su trabajo mencionan los esfuerzos por formar recursos humanos en la materia en las universidades de Maryland, Florida State, Oklahoma, Colorado, Colorado State y Ohio. Por otra parte, también se tienen avances en la materia en la Comunidad Europea, con especialistas principalmente en

el Reino Unido (Universidades de Reading y de East Anglia). En el caso de México, es el momento propicio para preparar especialistas en asimilación de datos, mismos que preferentemente deberán formarse al lado de los expertos mundiales mediante investigaciones doctorales. No existe en México, un programa que cubra estas necesidades, por lo que la formación de quienes asimilen los datos deberá realizarse en el extranjero. Vale la pena preguntarse, si los programas nacionales que actualmente se tienen en ciencias atmosféricas están generando recursos humanos con un nivel de conocimiento a la altura de los requerimientos internacionales. El perfil de los expertos en asimilación de datos, deberá ser de carácter multidisciplinario y flexible, de manera que aún siendo especialistas en datos atmosféricos les permita interactuar con expertos provenientes de áreas tan diversas como meteorología, química atmosférica, oceanografía, hidrología, biosfera y dinámica de suelos, matemáticas aplicadas, estadística, métodos de observación, ciencias computacionales y aplicaciones socioeconómicas.

3. Análisis de la variabilidad de la lluvia

En el Capítulo 2 se desarrolló una base de datos de lluvia diaria en mallas regulares con resolución de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ para el periodo de 1958 a 2004. Esta base de datos se utilizará en este capítulo para analizar la variabilidad de la lluvia en la República Mexicana en diferentes escalas de espacio y tiempo.

Era sabido a priori que para una base de datos como la generada en el Capítulo 2, el método de análisis objetivo produciría subestimaciones en los eventos de lluvia intensa y extrema. Sin embargo, los datos desarrollados resultan de gran valor para el análisis de los patrones de variabilidad de la lluvia, objetivo principal de este trabajo.

El análisis de la variabilidad de la precipitación en la República Mexicana constará de cuatro componentes, las cuales se corresponden con lo descrito en el Capítulo 1:

- i) análisis de lluvia generada por sistemas meteorológicos
- ii) climatología de lluvia (en estaciones, meses, catorcenas y pentadas)
- iii) patrones compuestos de anomalías de lluvia ante moduladores climáticos
- iv) análisis de los principales modos de variabilidad de la lluvia

3.1. Lluvia generada por sistemas meteorológicos

Entre el 28 de abril y el 1 de mayo de 1998 se desarrolló el paso de un frente frío desde las latitudes medias hacia los trópicos. La configuración sinóptica de este frente correspondió a una situación de *norte* en el Golfo de México. Es sabido que la lluvia invernal en México está asociada al paso de sistemas frontales. La base de datos de este estudio captura la señal de la lluvia frontal y de su continuidad como se aprecia en la Fig. 32. La lluvia más intensa se observa los días 28 y 29 de abril sobre los Estados Unidos y frente a su costa en el Golfo de México. Consistentemente la lluvia frontal se desplaza hacia el este conforme pasan los días hasta situarse sobre la Península de Florida el día 30 de abril para luego disiparse. Aunque se observa consistencia en el patrón de lluvia en tierra y océano, llama la atención que al comparar la lluvia registrada en la malla con la estimada por satélite (GPCP, mapas de la columna derecha) estos últimos muestran una cantidad mayor de lluvia, aspecto que se acentúa sobre la Península de Yucatán el día 30 de abril. Por el contrario el día 2 de mayo la malla indica lluvia ligera, mas no así el satélite. En términos generales puede concluirse que el patrón de lluvia frontal es capturado satisfactoriamente en la malla.

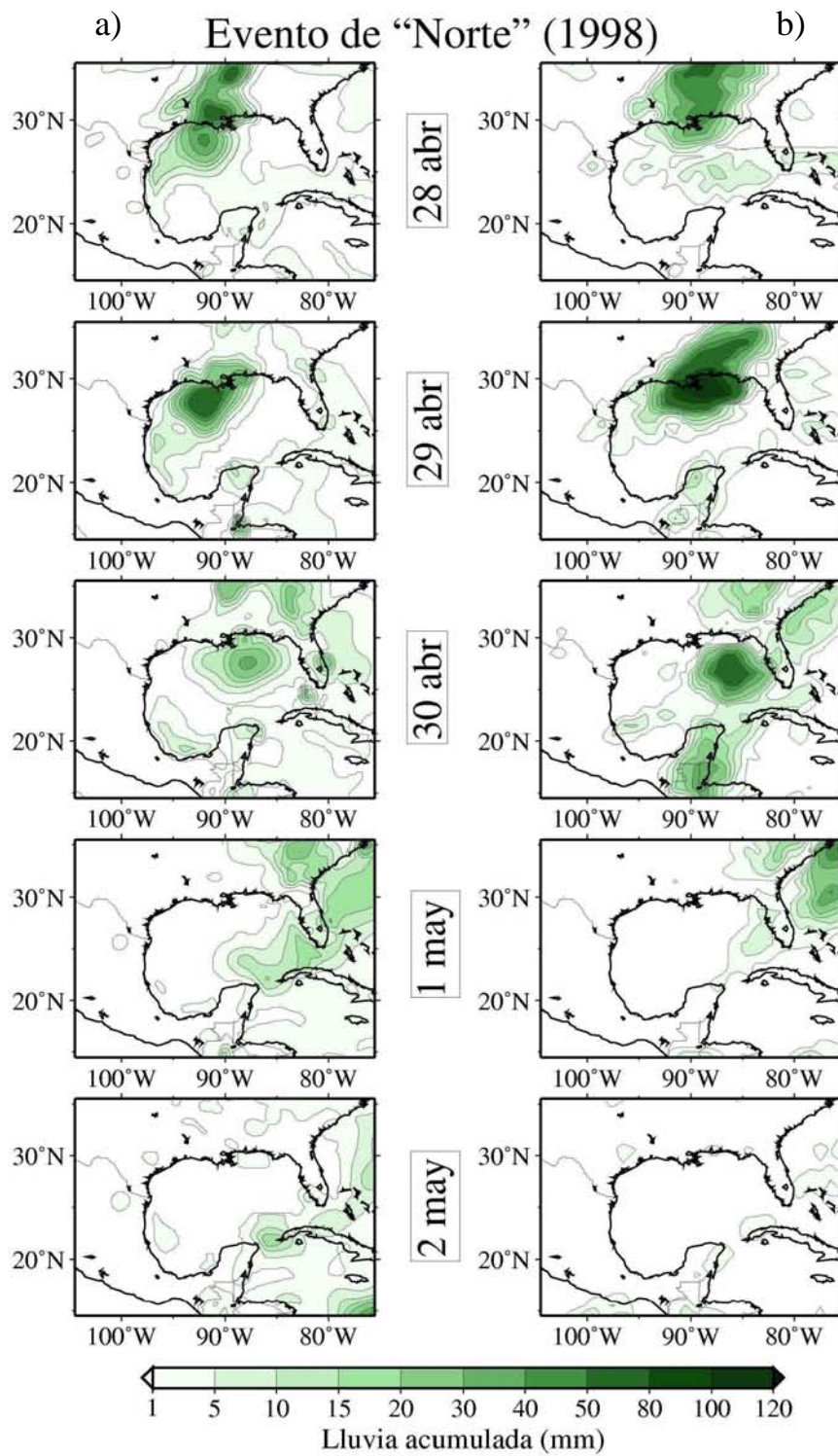


Fig. 32. Lluvia acumulada en 24 horas durante el paso de un 'Norte' en el Golfo de México (del 28 de abril al 2 de mayo de 1998) utilizando datos de a) la malla diaria de este estudio (columna izquierda) y b) estimaciones derivadas de satélite GPCP (columna derecha).

La Fig. 33 muestra la lluvia acumulada en 24 horas del 6 al 10 de octubre de 1997, fechas en las que el huracán Paulina tuvo su mayor proximidad a las costas del sur de México en el Pacífico. En la figura se contrasta la lluvia estimada en la malla diaria (mapas de la columna izquierda) vs la lluvia estimada por el proyecto GPCP (mapas de la columna derecha). Al observar los mapas de ambas columnas se encuentran diferencias importantes en la ubicación de los sistemas de precipitación en las fechas graficadas. En términos generales la estimación de satélite (GPCP) reporta lluvias mucho más intensas que las de la malla. Sin embargo, la malla muestra patrones espaciales de lluvia más consistentes. Mientras que la estimación de GPCP muestra fuertes intensidades de lluvia, las áreas lluviosas son limitadas y se encuentran concentradas en regiones pequeñas. Esto puede deberse a que al ser una estimación derivada del satélite, no logra capturar la precipitación causada por efecto orográfico ante el flujo de humedad ocasionado por la proximidad del ciclón tropical a territorio mexicano. Nótese la diferencia en los patrones de los días 7, 8 y 9 de octubre principalmente, en los que mientras la malla exhibe lluvia a lo largo de la Sierra Madre Oriental, la estimación de GPCP únicamente muestra sistemas localizados en la zona cercana al centro del ciclón tropical en el sur del país. Por lo tanto puede concluirse que los datos de la malla diaria capturan en forma adecuada el patrón de lluvia asociado a un ciclón tropical y sus efectos secundarios (flujo de humedad y lluvia orográfica), mas no así la intensidad de dichos sistemas.

Finalmente, para corroborar que en la base de datos desarrollada se logra capturar la lluvia asociada al paso de sistemas meteorológicos sobre México, el patrón de lluvia asociada al paso de una onda del este por territorio mexicano es analizada en la Fig. 34. Los mapas muestran la lluvia acumulada en 24 horas para los días 22, 24, 26, 29, 30 y 31 de agosto del año 2000, correspondiéndose con la secuencia de imágenes satelitales de la Fig. 4. En la figura se aprecia la evolución de la precipitación ocasionada por la onda del este, cuya máxima intensidad se localiza para el día 22 al este de Dominicana y Haití, y desplazándose hacia el oeste en los días subsecuentes se sitúa sobre Cuba para el día 24, dejando lluvia sobre el sureste de México durante los días 26, 29 y 30, para luego disiparse una vez que el sistema se interna en el océano Pacífico.

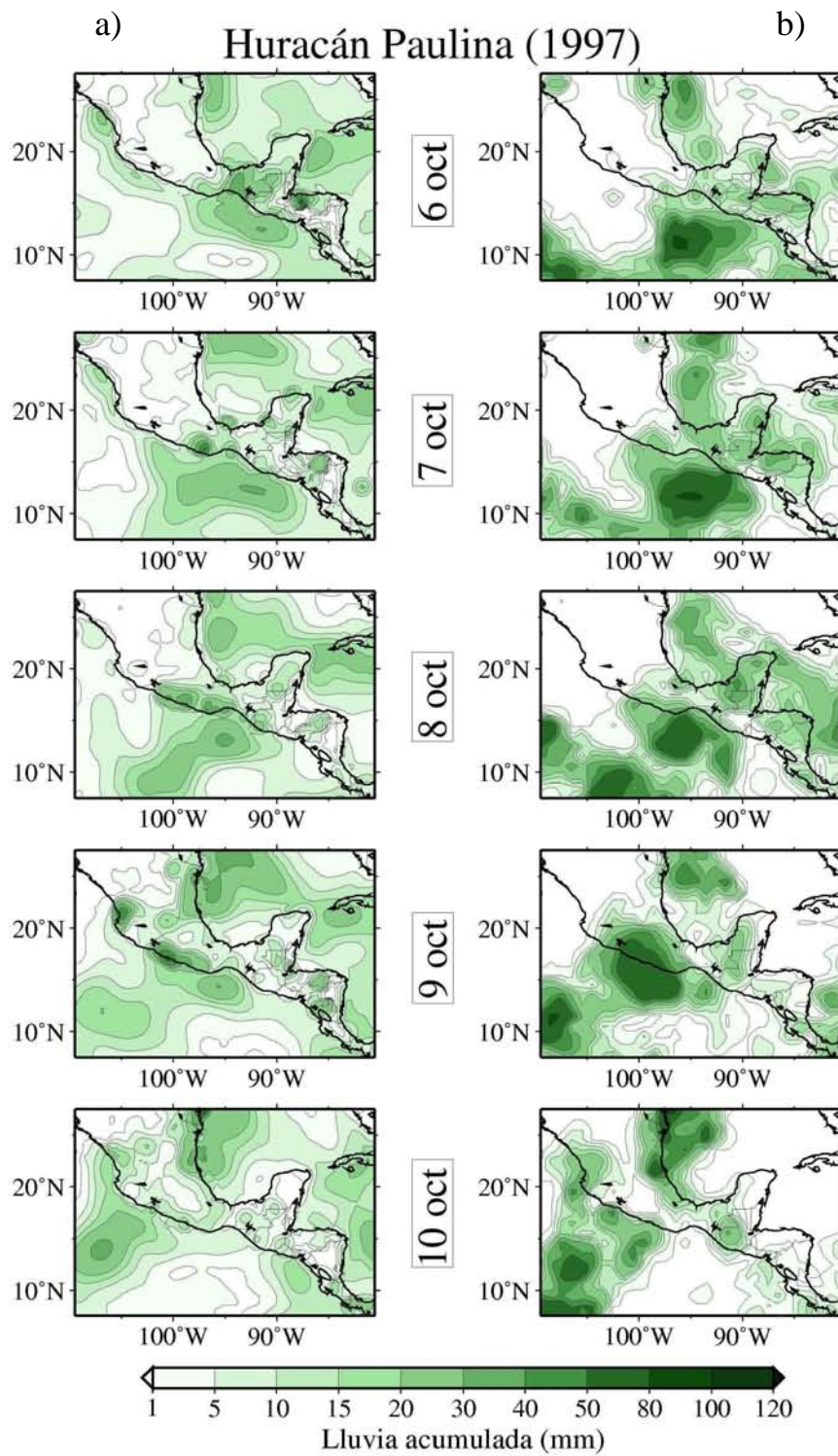


Fig 33. Lluvia acumulada en 24 horas durante los días de mayor proximidad del huracán Paulina a la costa de Guerrero y Oaxaca (del 6 al 10 de octubre de 1997) utilizando datos de a) la malla diaria de este estudio (columna izquierda) y b) estimaciones derivadas de satélite GPCP (columna derecha).

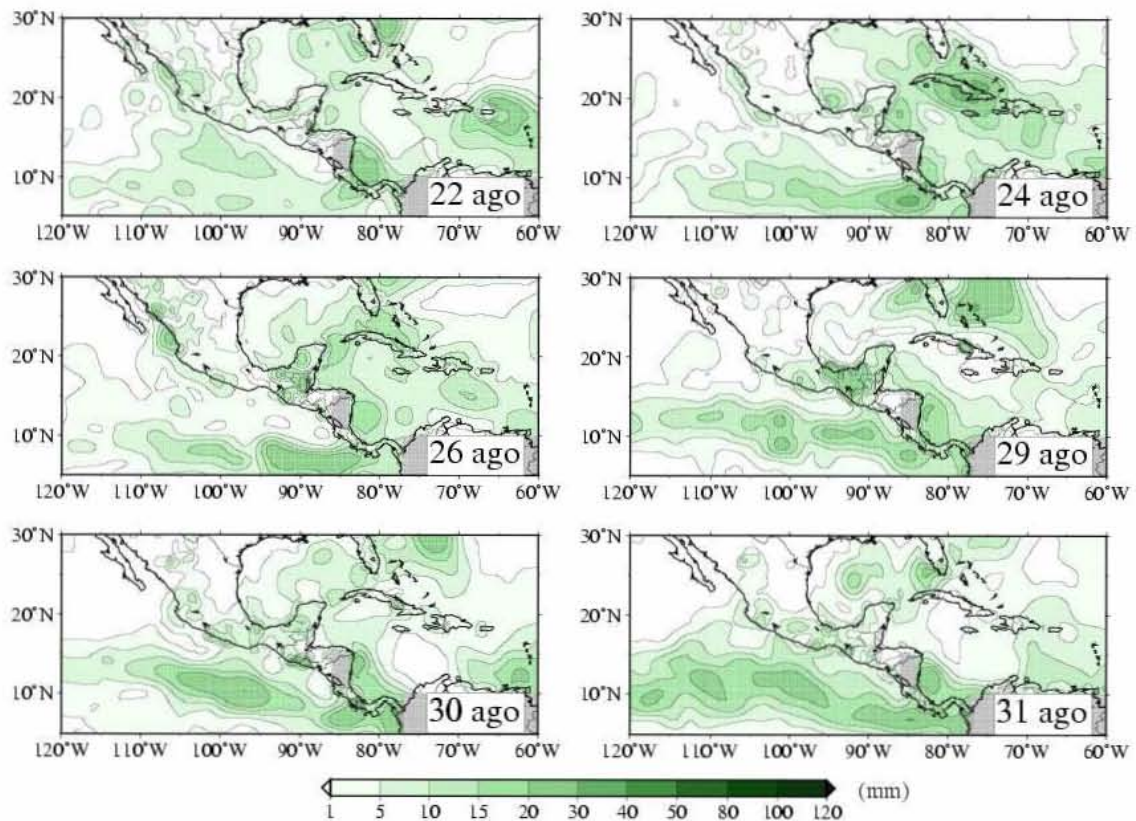


Fig. 34. Lluvia acumulada en 24 horas para los días 22,24,26,29,30 y 31 de agosto del año 2000, fechas correspondientes al paso de una onda del este por la República Mexicana. La secuencia de mapas se corresponde con la secuencia de imágenes satelitales de la Fig. 4.

Como se mencionó en la introducción, las ondas del este son uno de los mecanismos generadores de lluvia de verano en México más importantes, siendo también responsables de la formación de ciclones tropicales. En todos los mapas de esta tesis, una máscara gris aparece en la región de Nicaragua y Colombia, indicando que en esas áreas no se tuvieron datos disponibles.

3.2. Climatología de lluvia.

Según la Organización Meteorológica Mundial, la climatología de una variable meteorológica corresponde a su media durante un periodo de 30 años. En este trabajo, la climatología considerará los 47 años del periodo 1958-2004. Adicionalmente, en vez de la media aritmética, se utilizará el valor de la mediana para calcular la climatología. La mediana es una medida robusta de centralidad y con menor sensibilidad a la presencia de extremos, además de que la lluvia no tiene distribución normal (Mosiño y García, 1981).

Las figuras 35 y 36 muestran la climatología de invierno (def) y verano (jjas), mostrando que los datos en malla reproducen adecuadamente el ciclo anual, registrando lluvia escasa (abundante) durante el invierno (verano).

Climatología de lluvia (mediana) en invierno (def)

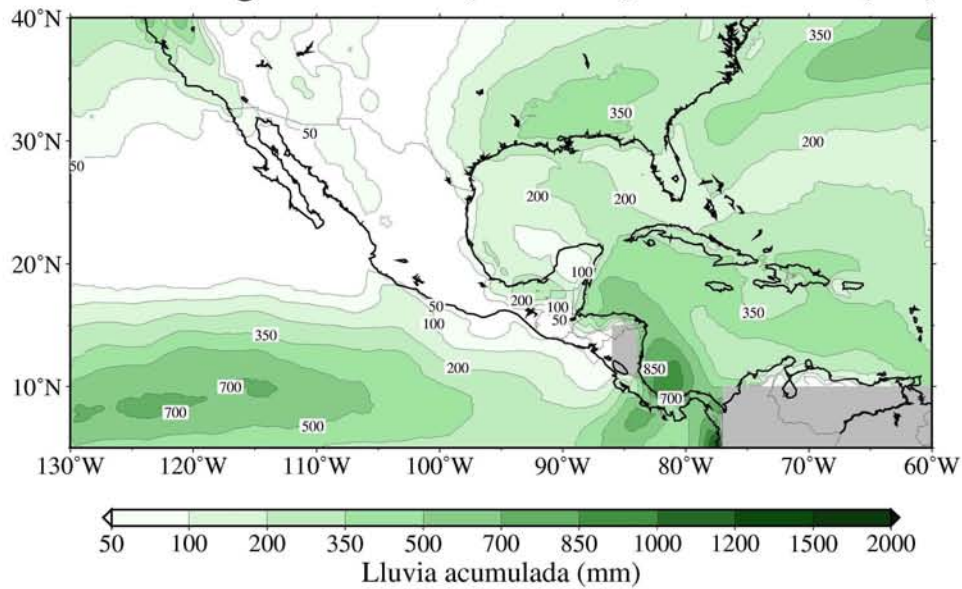


Fig. 35. Climatología de lluvia de invierno (mediana dic-ene-feb 1958-2004)

Climatología de lluvia (mediana) en verano (jjas)

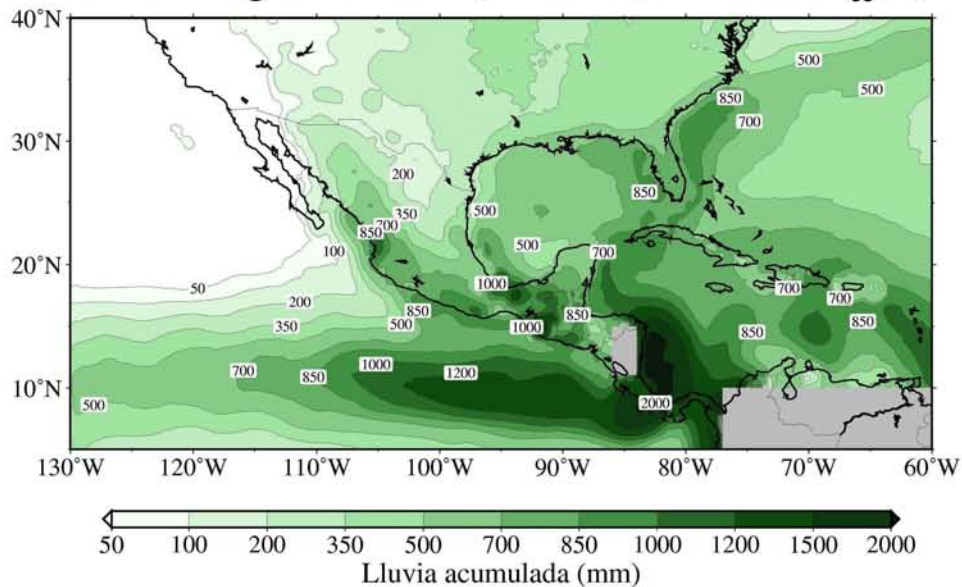


Fig. 36. Climatología de lluvia de verano (mediana jun-jul-ago-sep 1958-2004)

La Fig. 37 muestra la climatología de invierno mes a mes. En los mapas de esta figura se puede apreciar que en el noroeste de México se tiene un régimen bien establecido de lluvia durante el invierno, lo cual se aprecia en el patrón de lluvia sobre Sonora y Sinaloa desde noviembre hasta febrero. Por otra parte, los mapas del régimen de lluvia de invierno muestran también la importancia de la lluvia invernal sobre la costa del Golfo de México debido al paso de los sistemas frontales, tal y como era de esperarse. En los Estados Unidos una amplia región del este del país, en las áreas cercanas a la costa del Golfo de México, recibe precipitación durante los meses de invierno.

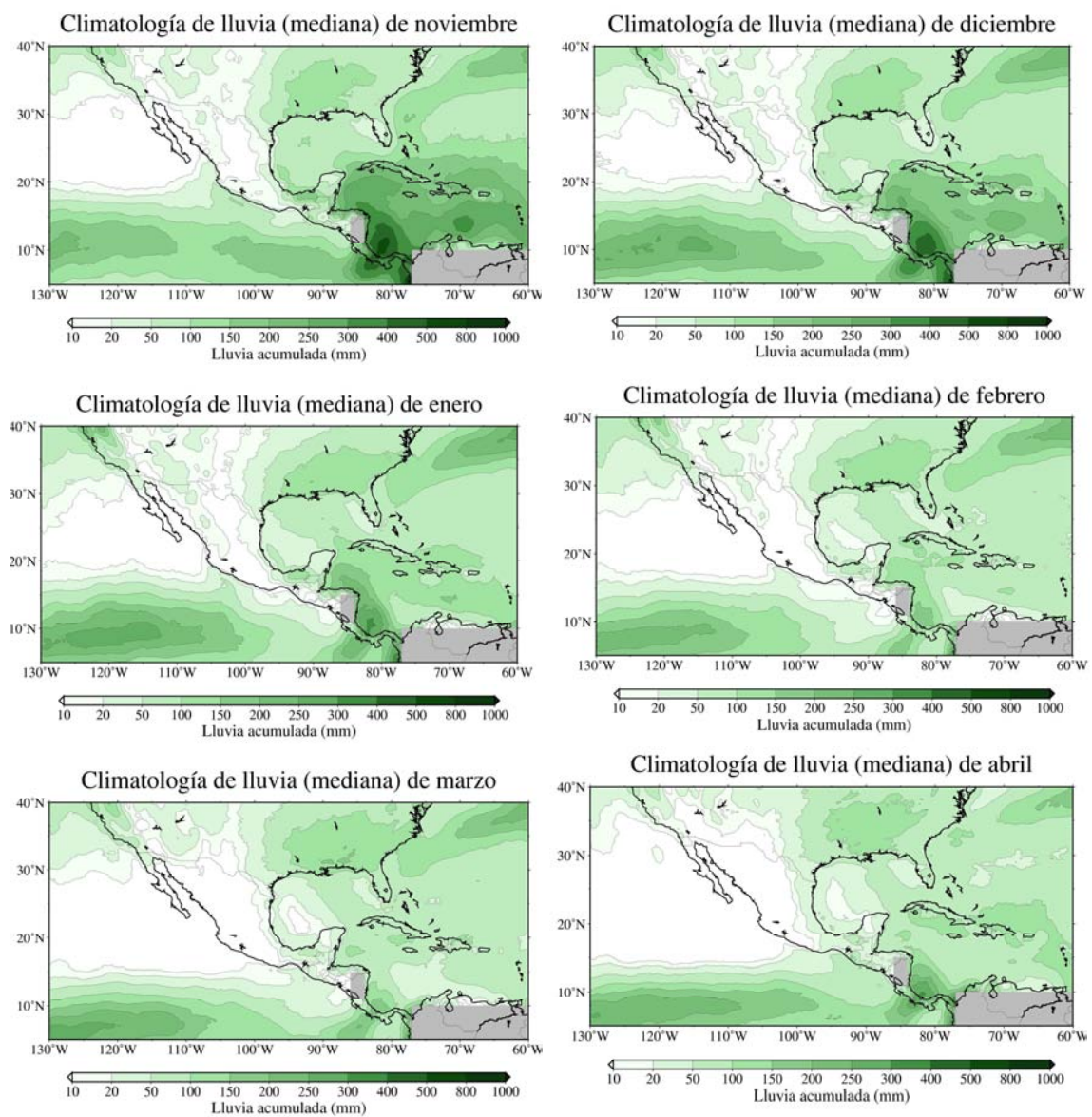


Fig. 37. Climatología de lluvia invernal mes a mes calculada como la mediana 1958-2004.

En forma análoga, la Fig. 38 muestra la lluvia de verano mes a mes desde mayo hasta octubre. En la secuencia se puede apreciar el establecimiento de las lluvias de verano en el sur de México a partir del mes de junio, aspecto asociado a los desplazamientos latitudinales de la ZITC. En el mes de julio, un incremento en la precipitación sobre el noroeste del país muestra el establecimiento del monzón. La lluvia de verano se mantiene hasta el mes de septiembre, para finalmente retirarse en el mes de octubre. Los resultados aquí mostrados coinciden con los reportados por Magaña et al. (1999).

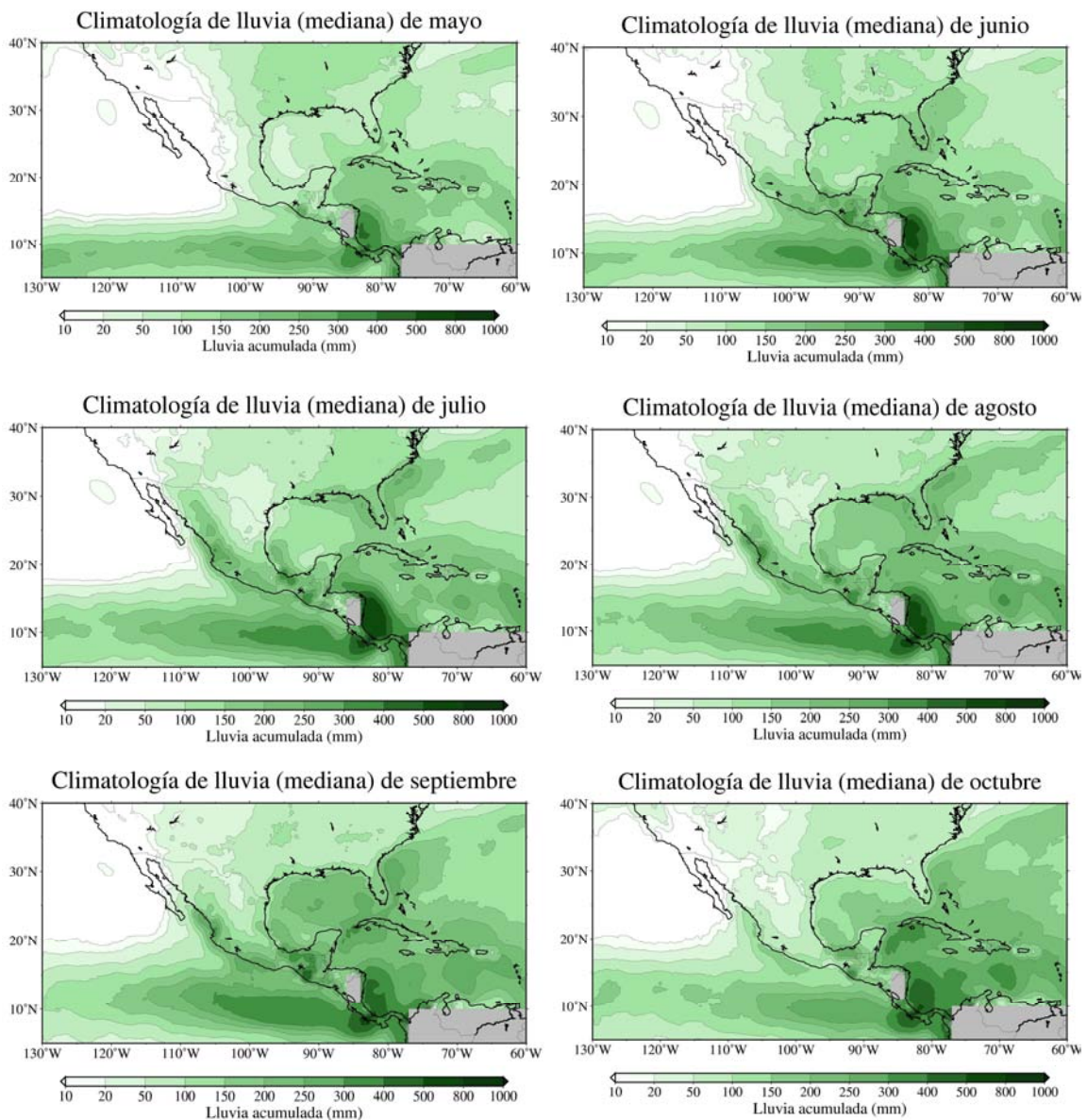


Fig. 38. Climatología de lluvia de verano mes a mes calculada como la mediana 1958-2004.

Las Figs. 39 y 40 muestran la climatología de la lluvia en áreas de 5×5 grados para el dominio geográfico de la base de datos para acumulados catorcenales y pentadales respectivamente. En términos generales los resultados coinciden con los reportados por Magaña et al (1999) y se captura la señal de la sequía de medio verano en el sur de México. Es importante notar en la región Centroamericana el contraste en la cantidad de lluvia que se registra en el Caribe vs la que se registra en el Pacífico. Este contraste puede estar asociado a la presencia del jet de bajos niveles del Caribe.

Climatología catorcenal de la lluvia (mediana)

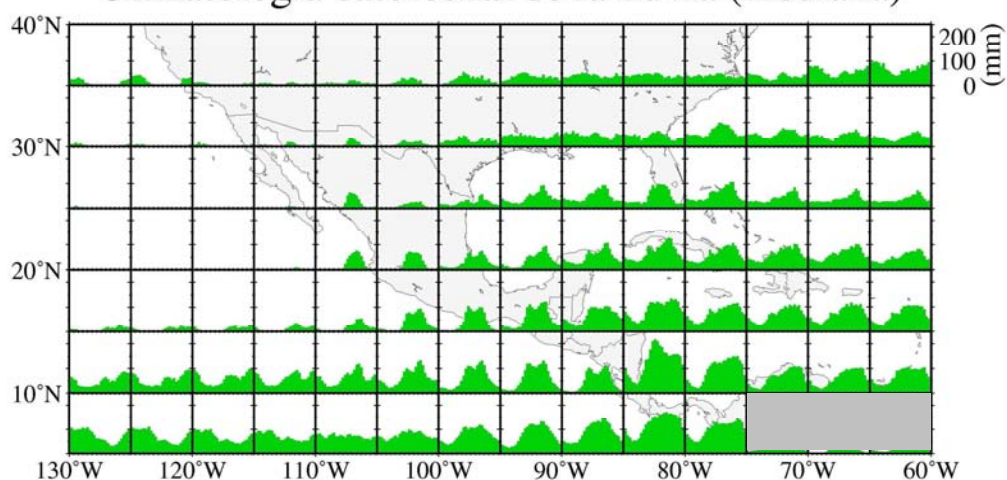


Fig. 39. Climatología de lluvia en catorcenas para áreas de 5×5 grados con base en la mediana del periodo 1958-2004.

Climatología pentadal de la lluvia (mediana)

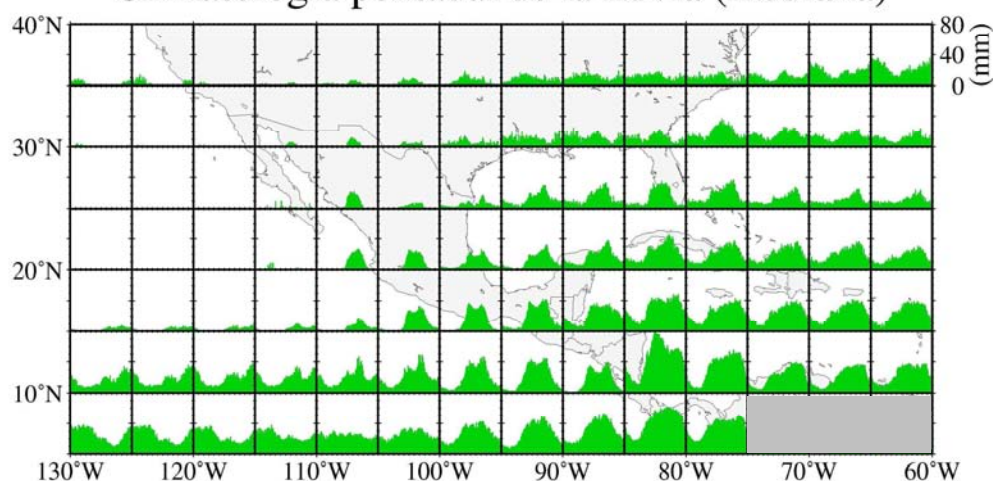


Fig. 40. Climatología de lluvia en pentadas para áreas de 5×5 grados con base en la mediana del periodo 1958-2004.

En las gráficas anteriores se observa correctamente la distribución geográfica de la cantidad de lluvia que ocurre en la República Mexicana con altas precipitaciones en el sur y escasa lluvia en el norte. Con el fin de mostrar el régimen de lluvia en el noroeste, la Fig. 41 muestra una ampliación en mm/día de la lluvia en pentadas. La cantidad de lluvia disminuye hacia el oeste frente a la costa del Pacífico debido a la fuerte subsidencia predominante en esa región.

En contraste con la baja cantidad de lluvia que se registra en el Pacífico frente a Baja California, en el mes de julio sobre la Sierra Madre Occidental se tiene precipitación abundante debido al monzón de norteamérica, cuando la interacción del viento con la orografía y la entrada de humedad asociada a los sistemas de gran escala producen convergencia en el noroeste de México y ocasionan intensas lluvias, tal y como se aprecia en la Fig. 42 en la que se muestra la diferencia de la climatología de lluvia acumulada mensual entre el mes de julio con respecto al mes de junio.

3.3. Anomalías de lluvia ante la presencia de moduladores.

Diversos forzantes atmosféricos y oceánicos pueden ser responsables de variaciones bien definidas en los patrones de precipitación sobre México. Las variaciones que mayor atención han recibido son las asociadas al bien conocido modulador de gran escala ENSO. Análisis simples de los cambios en la cantidad de lluvia con respecto a la climatología bajo condiciones de El Niño o La Niña pueden llevar a conclusiones generalizadas sobre el comportamiento de la lluvia en tales circunstancias. Así, Magaña et al (2003) establecen que ENSO es un modulador directo de la precipitación en México, de modo que las anomalías de lluvia observadas durante eventos El Niño son casi simétricamente opuestas a las observadas durante La Niña, estos autores encuentran que durante veranos El Niño la mayor parte de México se encuentra en condiciones deficitarias de precipitación, es decir, El Niño ocasiona sequía en el verano, mientras que La Niña significa condiciones normales o incluso por arriba de lo normal en la lluvia de verano; en cuanto al invierno, sugieren que condiciones El Niño se traducen en más lluvia de lo normal en casi todo el país y condiciones La Niña en menos lluvia invernal. Las figuras 43 y 44 muestran la anomalía de lluvia bajo condiciones de El Niño y La Niña durante el invierno y el verano respectivamente, promediando seis eventos elegidos al igual que en Magaña et al (1999).

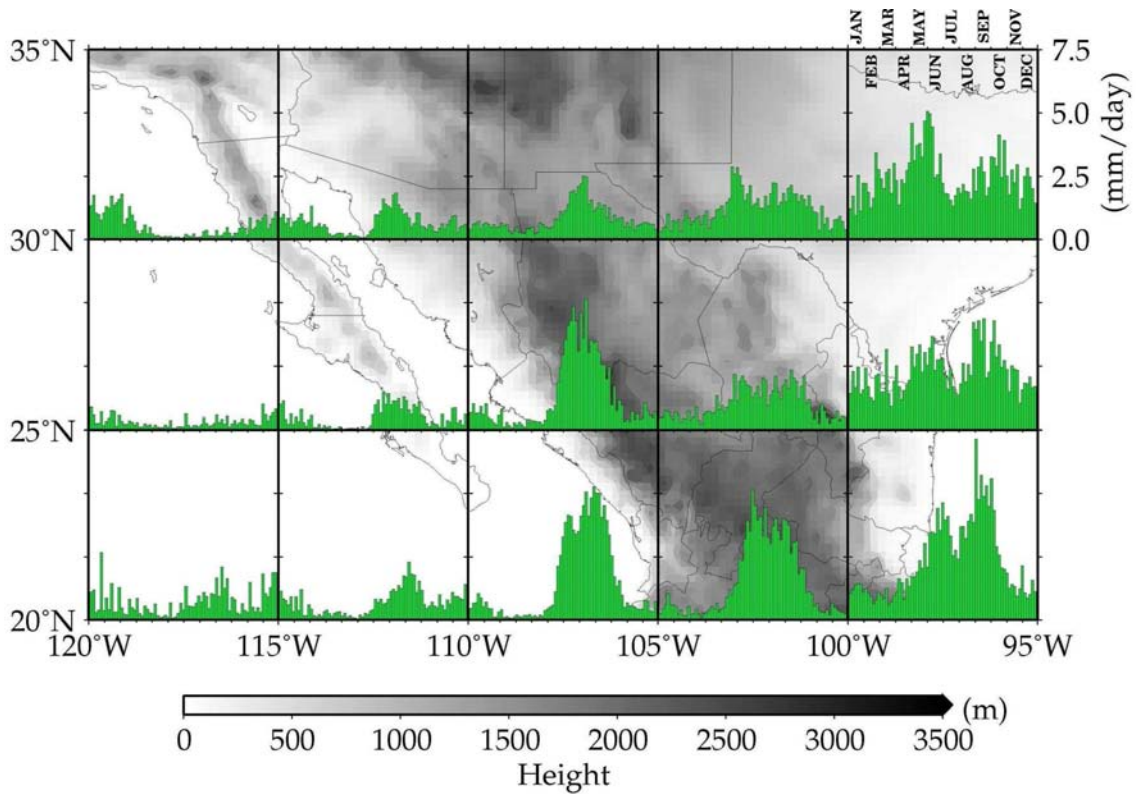


Fig. 41. Climatología de lluvia en pentadas para áreas de 5 × 5 grados con base en la mediana del periodo 1958-2004 para el noroeste de México.

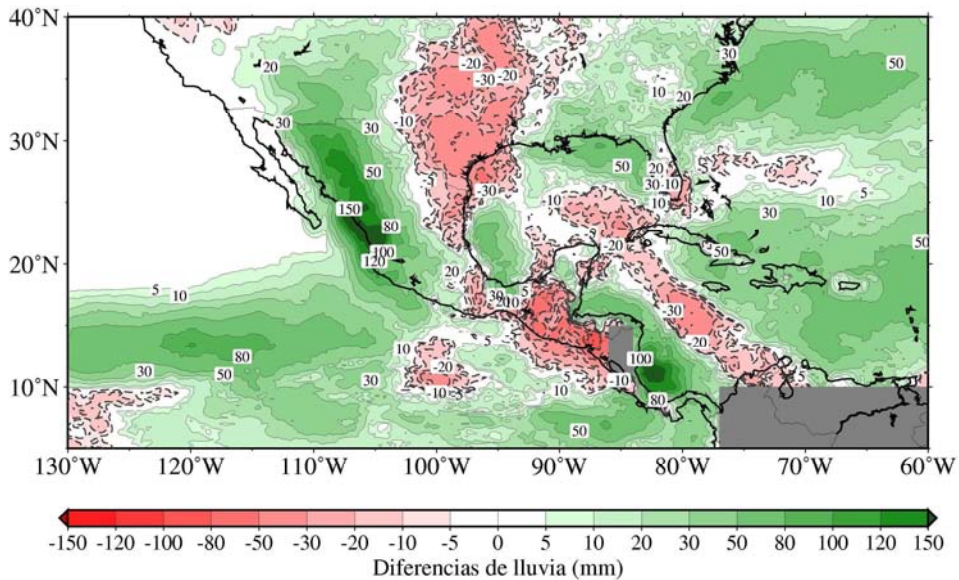


Fig. 42. Diferencia de la climatología de lluvia (julio – junio) correspondiente al establecimiento del monzón en el noroeste de México.

Básicamente, los resultados del análisis de anomalías de lluvia en condiciones ENSO corrobora lo encontrado por Magaña et al (1999).

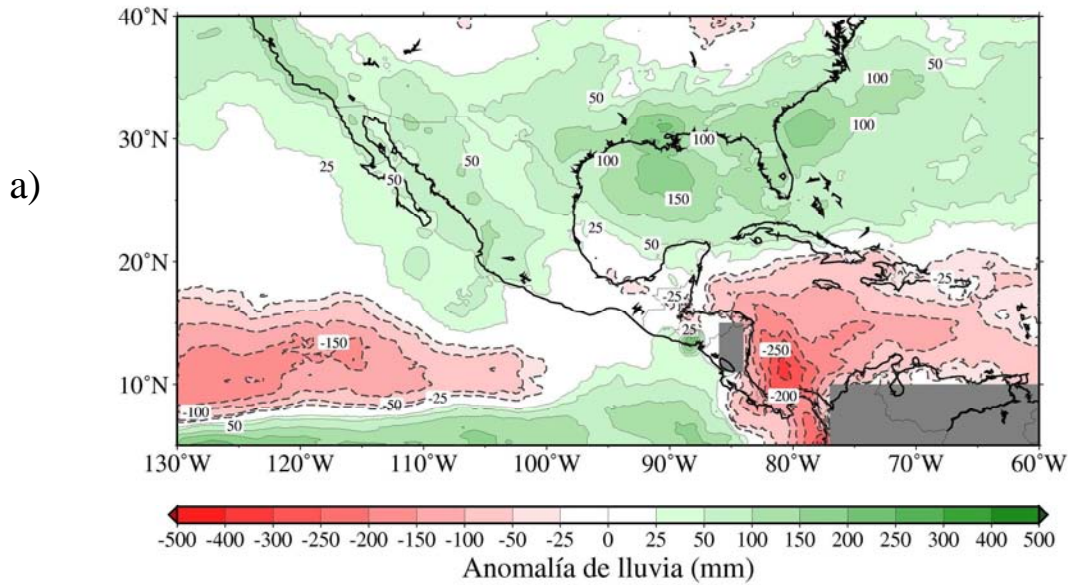
Los patrones compuestos de anomalías de lluvia durante El Niño muestran que la presencia de este fenómeno se traduce en más lluvia de lo normal durante el invierno con excepción de una parte del sur de México, mientras que los inviernos en los que se tienen condiciones de La Niña se traducen en lluvias en el rango normal, con excepción de anomalías negativas en la zona de Nayarit y el sur de Sinaloa.

Por el contrario, durante el verano las anomalías de lluvia asociadas a la presencia de El Niño indican que en la mayor parte de la República Mexicana, con excepción del noroeste, la lluvia ocurre por debajo de lo normal, mientras que en La Niña, el país (nuevamente exceptuando el noroeste) se ve impactado por más lluvia que la media de largo periodo. En el caso de la región Centroamericana es interesante notar el contraste en las anomalías de lluvia que se observa en la vertiente del Caribe con respecto a la vertiente del Pacífico. Debe anotarse también el hecho de que la región del noroeste de México no parece tener una relación clara con la presencia de ENOS en cualquiera de sus dos fases.

Con base en un análisis de anomalías como este, pudiera pensarse que la relación entre la lluvia en México y el ENSO es directa, mas no es así. La relación de la lluvia en la región con el ENSO es altamente no-lineal y el comportamiento de la lluvia durante el ENSO puede ser totalmente diferente al descrito en párrafos anteriores. Por lo tanto, es importante enfatizar que tanto el análisis de anomalías aquí mostrado como el de Magaña et al (1999, 2003) se basan en patrones compuestos de únicamente seis casos de El Niño y La Niña, en los que las anomalías ocurrieron consistentemente en signo. Sin embargo, si se calculan las anomalías de otros casos de El Niño o La Niña se encuentra que no siempre El Niño se traduce en sequía durante el verano, sino que se tiene un alto rango de variabilidad inter-ENSO, esto es, de un fenómeno a otro.

Es tema de estudios posteriores el abordar el comportamiento no lineal de los impactos de ENOS en la lluvia de la región. Este comportamiento no lineal podría estar asociado a la intensidad del fenómeno, aunque bien podría deberse a que en algunos eventos el ENOS no es el modulador dominante de la lluvia en México. Por ejemplo, Mendoza et al (2005) encuentran que las sequías históricas en el centro de México ocurrieron durante años de El Niño de intensidad fuerte y muy fuerte.

Anomalías de lluvia en inviernos El Niño



Anomalías de lluvia en inviernos La Niña

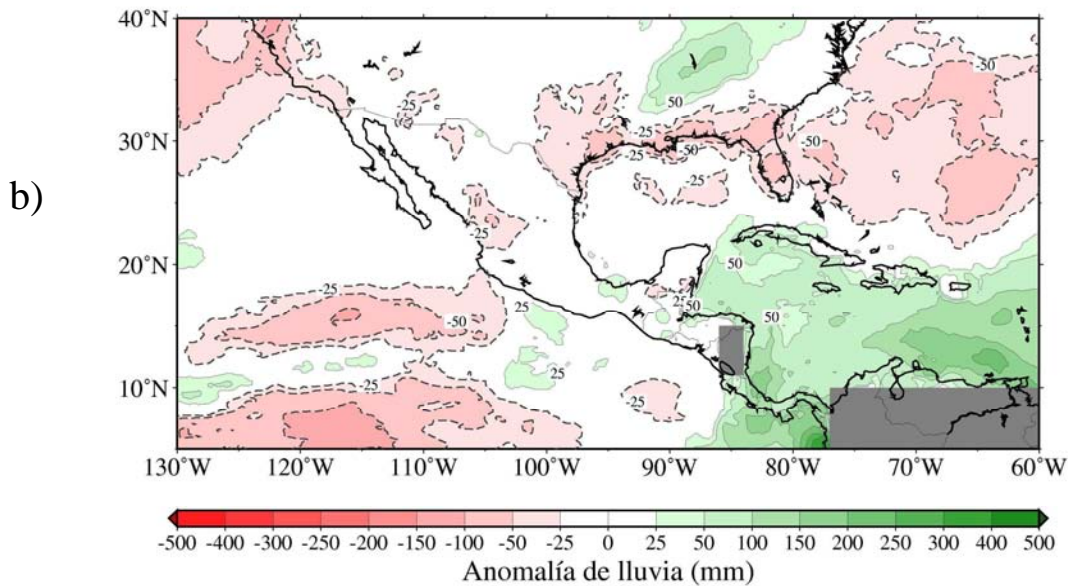
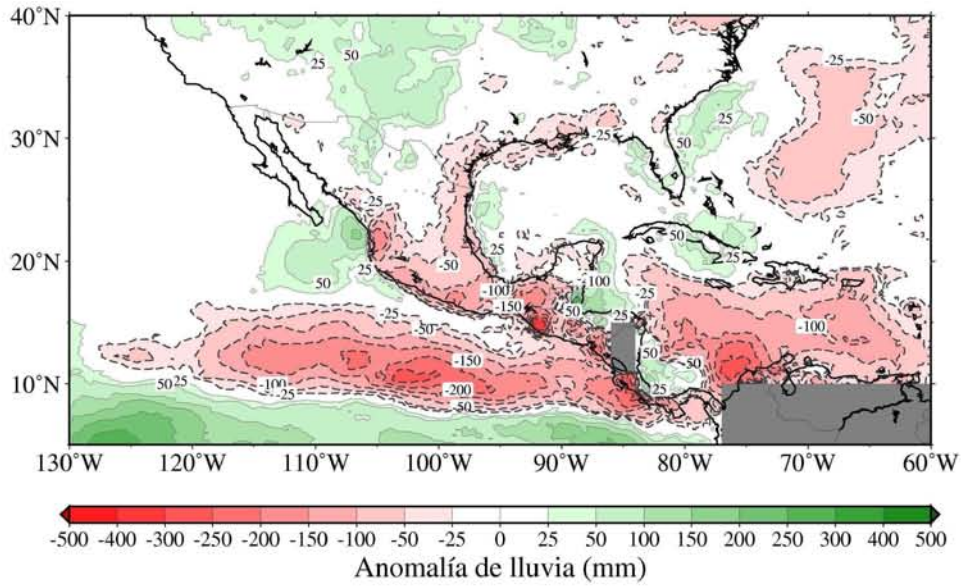


Fig 43. Anomalías de lluvia en invierno (dic,ene,feb) de condiciones ENSO para a) *El Niño* (1965-66, 1972-73, 1982-83, 1986-87, 1991-92, 1997-98) y b) *La Niña* (1964-65, 1970-71, 1973-74, 1975-76, 1988-89, 1998-99).

Anomalías de lluvia en veranos El Niño

a)



Anomalías de lluvia en veranos La Niña

b)

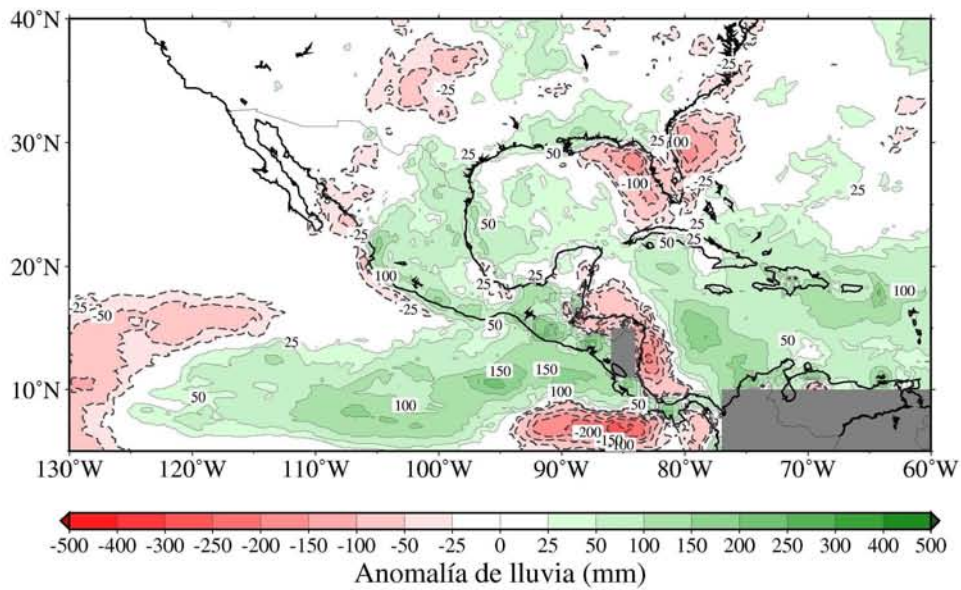


Fig 44. Anomalías de lluvia en verano (jun,jul,ago,sep) de condiciones ENSO para a) *El Niño* (1965, 1972, 1982, 1986, 1991, 1997) y b) *La Niña* (1964, 1970, 1973, 1975, 1988, 1998).

3.4. Principales modos de variabilidad de la lluvia

El análisis durante eventos particulares, la climatología, anomalías en años específicos y patrones compuestos son útiles para caracterizar algunos aspectos del comportamiento de la lluvia, pero a menudo es insuficiente para identificar la estructura espacio-temporal de sus principales formas de variabilidad. Es entonces necesario hacer uso de otras técnicas de análisis más sofisticadas, combinando la estadística con conceptos físicos.

3.4.1. La técnica de análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs)

La técnica multivariada conocida como análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs por sus siglas en inglés) es ampliamente utilizada en ciencias atmosféricas desde hace más de medio siglo, cuando Lorenz (1956) introdujo su uso en meteorología. Esta técnica es también frecuentemente referida como Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés) y ambos términos son utilizados indistintamente para referirse al mismo procedimiento de análisis de datos atmosféricos. Ocasionalmente, esta técnica llega a ser llamada incorrectamente ‘análisis de factores’, siendo este último un método de análisis multivariado diferente al análisis de EOFs. Los conceptos de EOFs utilizados en esta tesis se basan en el libro de Wilks (2006), aunque un tratado completo del uso de esta técnica con aplicaciones geofísicas puede encontrarse en Preisendorfer (1988).

El análisis de EOFs tiene por objetivo reducir un conjunto de datos con un gran número de variables en otro con un número menor de variables. Las variables del conjunto de datos reducido deben tener la propiedad de ser combinaciones lineales de las variables contenidas en el conjunto original, de manera que representen el máximo porcentaje posible de la variabilidad contenida en los datos iniciales. Esto es, dadas múltiples observaciones ($K \times 1$) de un vector de datos x , el análisis de EOFs permite encontrar ($M \times 1$) vectores u , cuyos elementos son combinaciones lineales de los elementos de x manteniendo la propiedad de que en u se conserva la mayoría de la información contenida en x . Cuando $M \ll K$ el análisis de EOFs cumple su propósito en forma más efectiva, pues entonces sucede que para las variables contenidas en x existen correlaciones sustanciales entre sí y los elementos de los nuevos vectores en u contienen los principales modos de variabilidad de los datos originales, esto último es la razón por la que los elementos de u son llamados componentes principales o funciones empíricas ortogonales.

El análisis de EOFs ofrece un amplio potencial para identificar la varianza de un conjunto de datos y sus patrones asociados tanto en el espacio como en el tiempo. Así, interpretaciones de los datos originalmente contenidos en x que no son visibles en forma simple, pueden encontrarse al analizar la naturaleza de las combinaciones lineales de u . En general, resulta conveniente calcular las EOFs como combinaciones lineales de las anomalías del campo a analizar $x' = x - \bar{x}$. La primera componente principal u_1 , es la combinación lineal de x' que contiene la varianza más alta. Las componentes principales subsecuentes u_m , $m = 2, 3, \dots$, son las combinaciones lineales que tienen las siguientes varianzas más altas posibles, con la condición de que no tienen ninguna correlación con las componentes principales que les preceden. Por lo tanto, todas las componentes principales están mutuamente incorrelacionadas.

En el caso del análisis realizado como parte de esta tesis, se utilizó un arreglo espacio-temporal de las anomalías de lluvia en $M = L \times K$ puntos de malla, con L vectores para longitud oeste y K vectores para latitud norte. El arreglo se hizo para N tiempos en diferentes escalas (estaciones, meses, catorcenos y pentadas). Si M y N son número enteros, entonces la matriz de datos originales es tal que

$$X = M \begin{bmatrix} N \\ \end{bmatrix} = x_{i,j} \quad \text{con } i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N \quad (2)$$

si X^T es la matriz *transpuesta* de X , definida como

$$X^T = N \begin{bmatrix} M \\ \end{bmatrix} = X_{j,i} \quad \text{con } i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N \quad (3)$$

entonces la matriz de dispersión de datos puede definirse como

$$XX^T \quad (4)$$

cuyo resultado es una matriz simétrica $M \times M$ que describe la estructura de los datos a través de la dimensión N .

La matriz XX^T es la matriz de covarianza construída a partir de los datos de anomalías de lluvia. El análisis de EOFs consiste en obtener los eigen-valores a partir de esta matriz. Cualquier matriz simétrica R se puede descomponer de la siguiente forma mediante una diagonalización o eigen-análisis:

$$R e_i = \lambda_i e_i \quad (5)$$

$$RE = EA \quad (6)$$

donde E es la matriz con los eigen-vectores e_i como sus columnas y A es la matriz con los eigenvalores λ_i en su diagonal. Los eigenvalores indican cuánta varianza es explicada por cada eigen-vector. Un tratamiento matemático más detallado de las funciones empíricas ortogonales y el álgebra lineal relacionada puede encontrarse en Wilks (2006), Preisendorfer (1988) y Grossman (1992).

3.4.2. Cálculo de EOFs para la lluvia en diversas escalas de tiempo

El contar con una base de datos en mallas regulares a escala diaria ofrece la oportunidad de analizar la variabilidad de la lluvia en escalas temporales con mayor resolución que las comúnmente analizadas: meses y estaciones. Por lo tanto, en este trabajo se decidió calcular las componentes principales para la escala de catorcenas y pentadas con el fin de estudiar la consistencia de los modos de variabilidad dominantes a través del tiempo. La Figura 45 muestra el porcentaje de varianza explicada para cada una de las EOFs de la lluvia en la región de estudio. En la figura se observa que en verano la mayor varianza es explicada por las tres primeras EOFs mientras que en el invierno por las primeras dos EOFs. En este trabajo se analizarán los primeros tres modos de variabilidad de verano y el primer modo de variabilidad en invierno en las escalas de tiempo estacional, mensual catorcenal y pentadal.

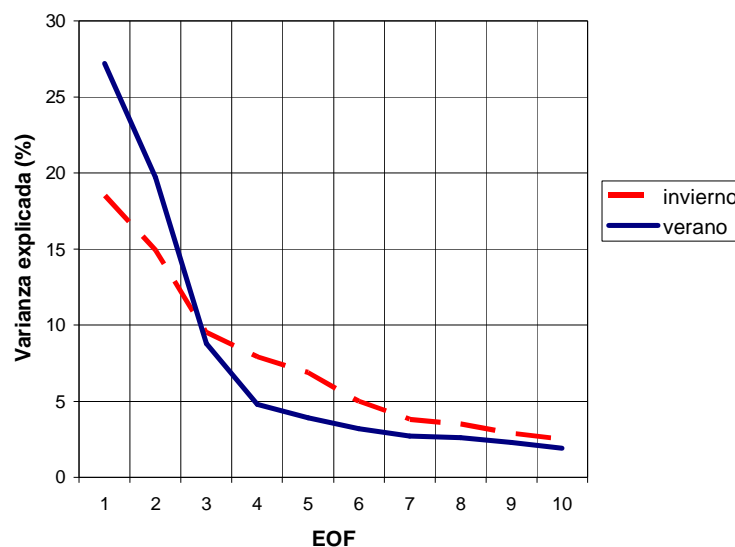


Fig. 45. Varianza explicada vs número de EOF para invierno y verano.

En seguida se discuten las componentes principales de la lluvia en la región tras haber aplicado la técnica de componentes principales al campo de anomalías de lluvia en diferentes escalas de tiempo. La misma EOF se calculó para la escala estacional (todo el verano desde junio hasta septiembre o todo el invierno desde diciembre hasta febrero), mensual (los mismos periodos pero mes a mes en vez de un anomalías totales), catorcenal (en forma análoga pero para las anomalías de cada catorce días) y pentadal (idem para periodos de cinco días). El hecho de calcular la misma EOF a partir de anomalías en diferentes intervalos de tiempo busca explorar si la estructura de los modos de variabilidad es persistente. Para interpretar las figuras que se discuten a continuación, considérese al campo espacial como la EOF y a la serie temporal como su coeficiente C . Partiendo del hecho de que cada una de las componentes principales es una combinación lineal del campo original de anomalías que explica la mayor cantidad de varianza posible, puede decirse que

$$C_1\text{EOF}_1 + C_2\text{EOF}_2 + \dots + C_n\text{EOF}_n = \alpha \quad (7)$$

Por lo tanto, al multiplicar el campo en el espacio por el coeficiente en el tiempo se obtiene el campo de anomalías. Las figuras 46 y 47 muestran la primera componente principal de la lluvia en verano. Esta primera componente explica el 27.2 % de la varianza total de la lluvia de verano y se caracteriza por un modo dominante en el espacio de gran amplitud sobre la región del Pacífico del este y el Golfo de México. Con base en el razonamiento físico, se concluye que dicha estructura espacial corresponde a las circulaciones de gran escala (influencia de los alisios en el Caribe y Golfo de México y de la Zona Intertropical de Convergencia en el Pacífico). En su estructura temporal, este modo presenta una clara tendencia de largo plazo; esta tendencia indica un cambio de signo alrededor de 1980, por lo que en los años recientes se interpreta como una tendencia a menos lluvia en la región del Caribe tal y como se ha reportado en otros estudios. Al incrementar la resolución temporal del campo de anomalías y rehacer el análisis, la varianza explicada por este modo disminuye a 16.6, 14.5 y 10.6% para meses, catorcenas y pentadas respectivamente, lo que se interpreta como una menor (mayor) influencia de la escala global (regional) en la lluvia de verano. Sin embargo, en todas las escalas de tiempo el patrón interpretado como la ZITC es persistente, mientras que el de los alisios se vuelve débil para la lluvia catorcenal y se disipa para la escala de cinco días.

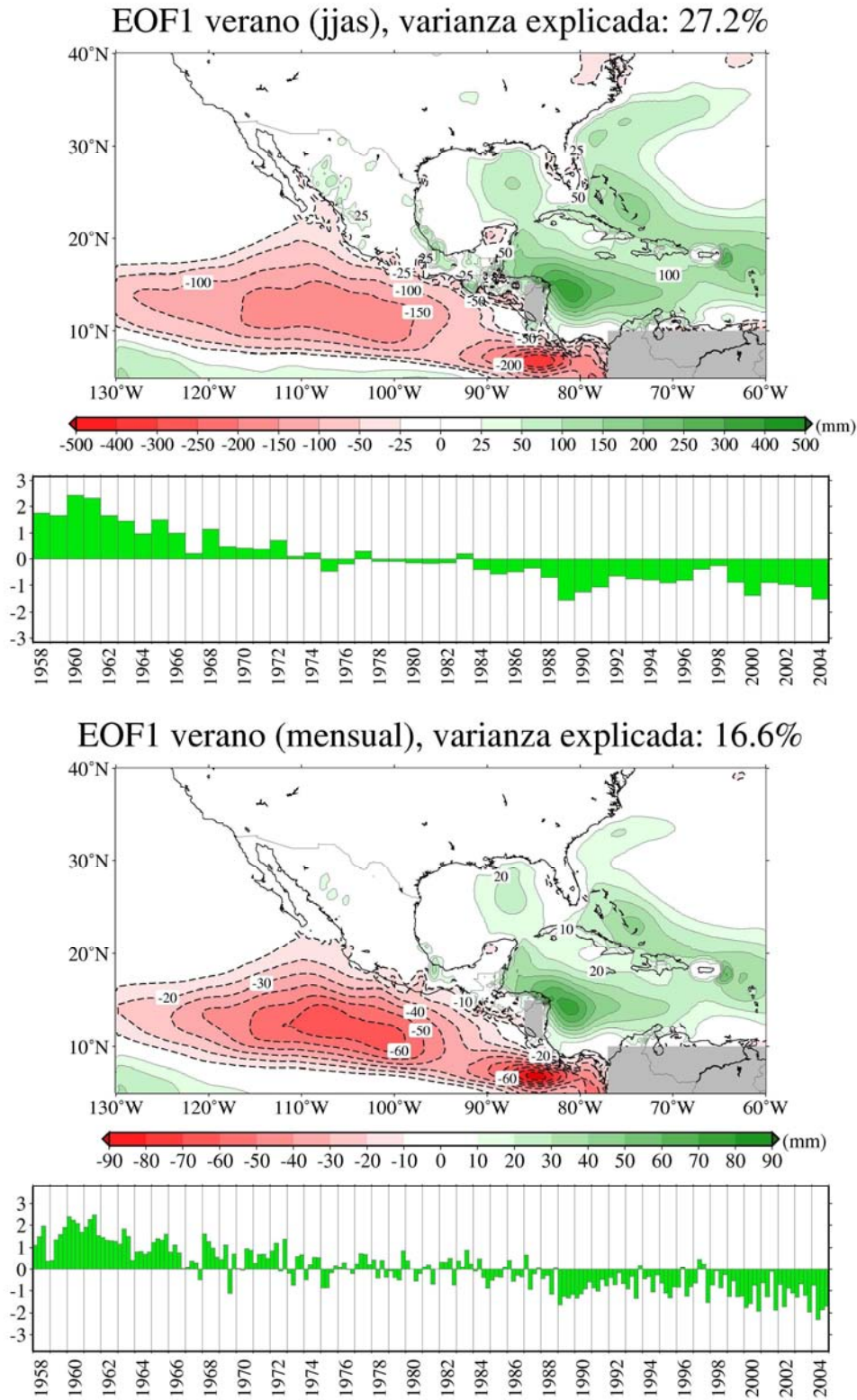
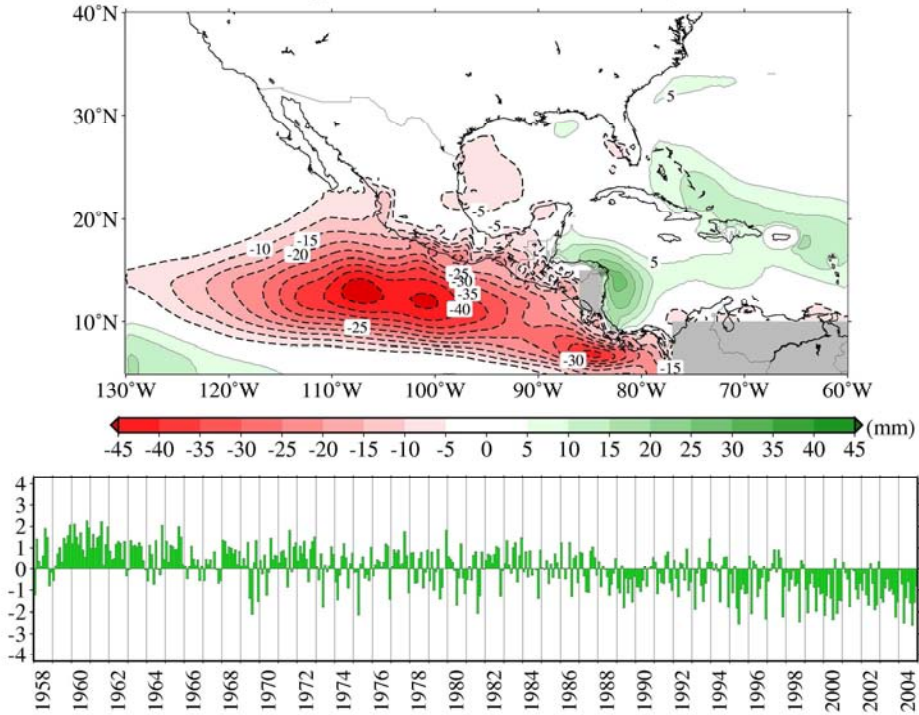


Fig. 46. Primera componente principal de la lluvia de verano para la escala estacional (arriba) y mensual (abajo).

EOF1 verano (quincenal), varianza explicada: 14.5%



EOF1 verano (pentadas), varianza explicada: 10.6%

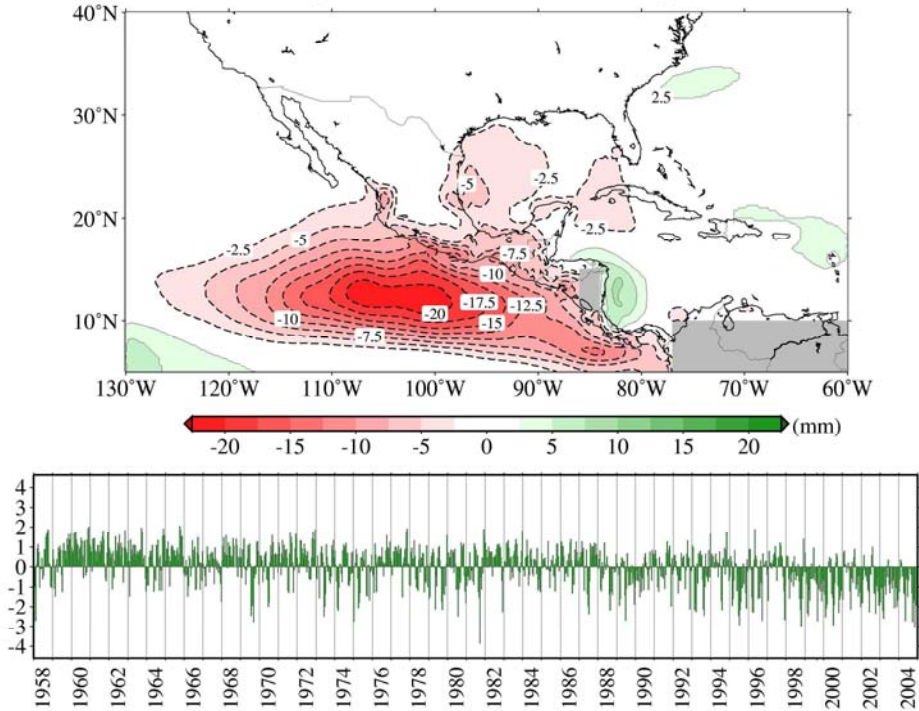


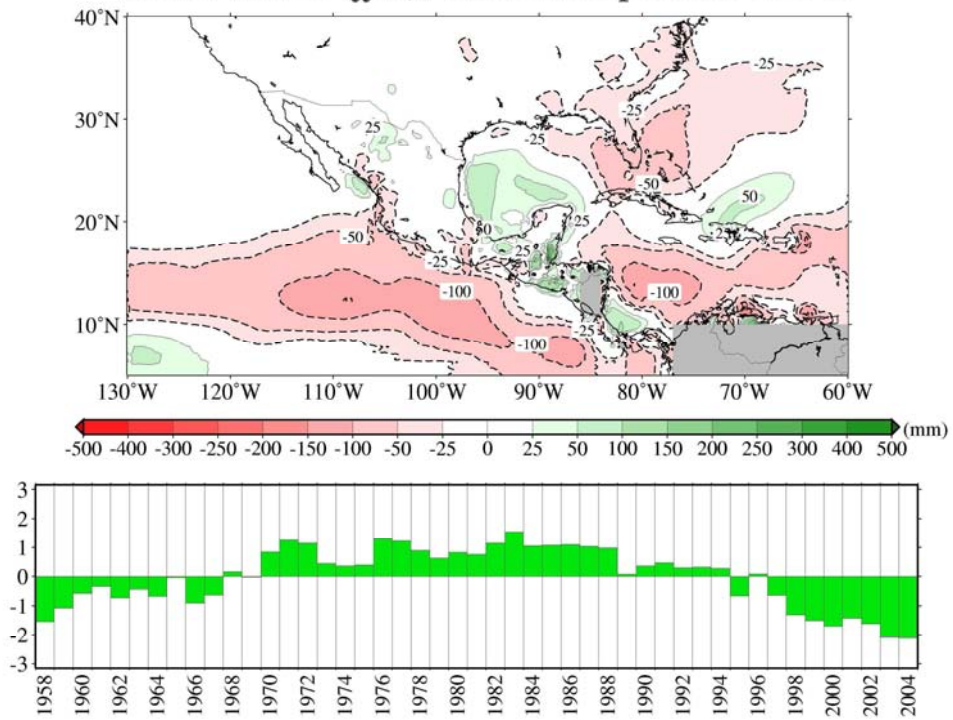
Fig. 47. Primera componente principal de la lluvia de verano para la escala catorcena (arriba) y pentadal (abajo).

Las figuras 48 y 49 muestran la segunda componente principal de la lluvia de verano en la región. Esta componente explica para las escalas estacional, mensual, catorcenal y pentadal el 19.7, 11.7, 9.2 y 7.2% de la varianza respectivamente.

La configuración espacial de este modo se concentra en la región del océano Atlántico persistentemente para todas las escalas de tiempo. Sólo en los análisis para el intervalo de tiempo de toda la estación de verano y por meses se configura en el Pacífico un patrón de modulación de la lluvia. No es claro si esta configuración en la región del Pacífico mexicano pudiera obedecer a la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical o bien a la Alberca de Agua Caliente del Pacífico Mexicano. Se descarta que pudiese tratarse de la Oscilación Decadal del Pacífico, dado que justamente en la zona donde se tiene el patrón modulador en esta componente, es donde la correlación de la TSM con el índice de la PDO es muy pequeña (ver Fig. 13). La interpretación de esta componente principal se vuelve evidente al observar el comportamiento en el tiempo de su coeficiente en la gráfica de barras. El comportamiento temporal de este modo de variabilidad muestra cambios de signo alrededor de 1968 y 1994 coincidiendo exactamente con los cambios de fase de la Oscilación Multidecadal del Atlántico como se mostró en la Fig. 15. Por lo tanto, se concluye que el segundo modo principal de variabilidad de la lluvia de verano está asociado a las oscilaciones de baja frecuencia, específicamente la AMO en cualquier escala de tiempo y además de la AMO a la convección local en escala de meses y estaciones.

Las figuras 50 y 51 muestran la tercera componente principal de la lluvia de verano. Esta componente explica aproximadamente el 8% de la varianza estacional y mensual y entre el 4 y el 6% de la varianza catorcenal y pentadal. El patrón en el espacio se corresponde cercanamente para la escala estacional y mensual con el patrón de anomalías de lluvia durante El Niño, mientras que el patrón temporal parece afirmar que se trata de variabilidad interanual asociada al ENOS, ya que se capturan las sequías de al menos cinco eventos El Niño (1965,1982,1986,1991 y 1997, ver Fig. 44). En cuanto a la escala catorcenal, la componente muestra persistencia de la influencia de la AMO mostrada en la segunda componente principal, mientras que en el caso de las pentadas la variabilidad de la lluvia de verano está asociada a otros moduladores no determinados en este estudio.

EOF2 verano (jjas), varianza explicada: 19.7%



EOF2 verano (mensual), varianza explicada: 11.7%

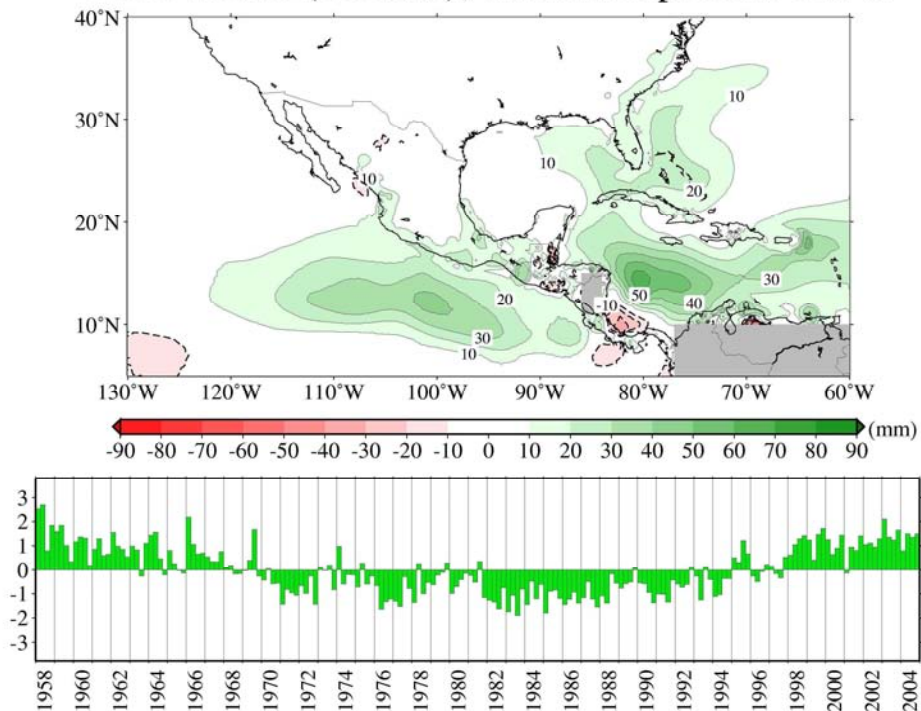
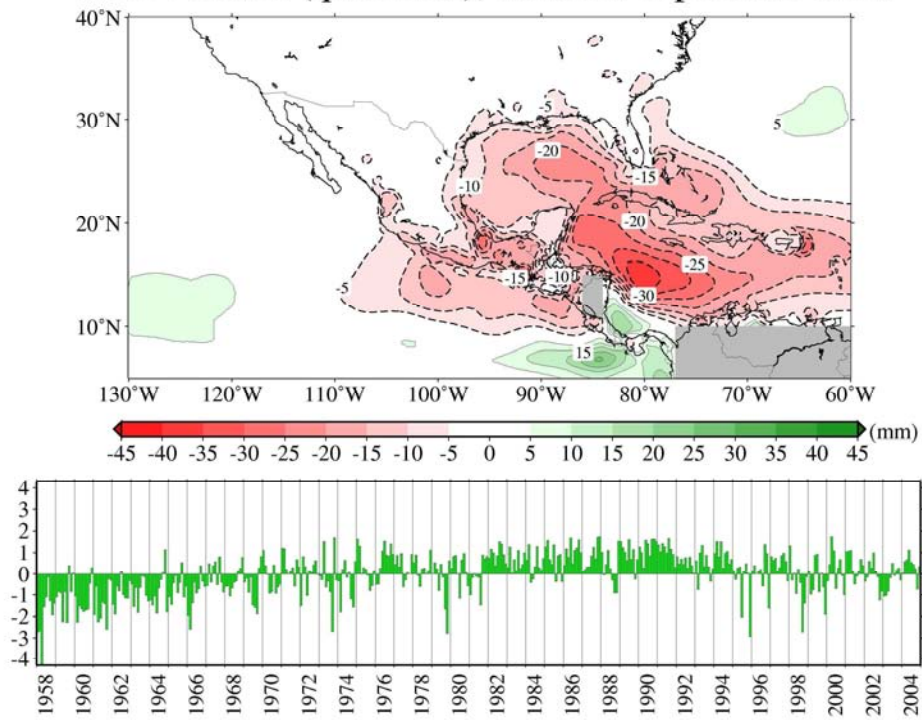


Fig. 48. Segunda componente principal de la lluvia de verano para la escala estacional (arriba) y mensual (abajo).

EOF2 verano (quincenal), varianza explicada: 9.2%



EOF2 verano (pentadas), varianza explicada: 7.2%

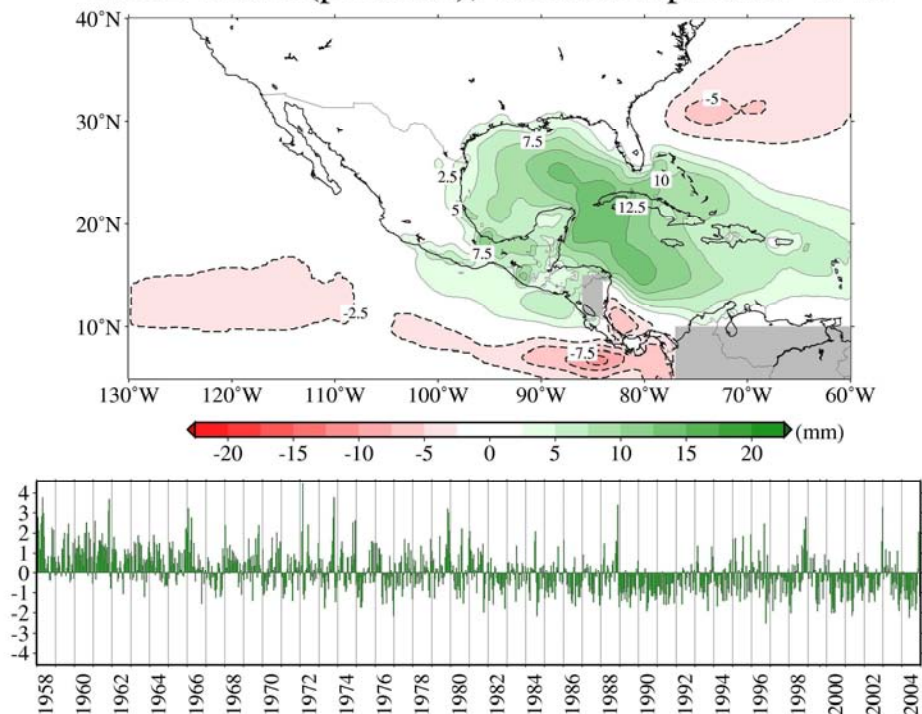
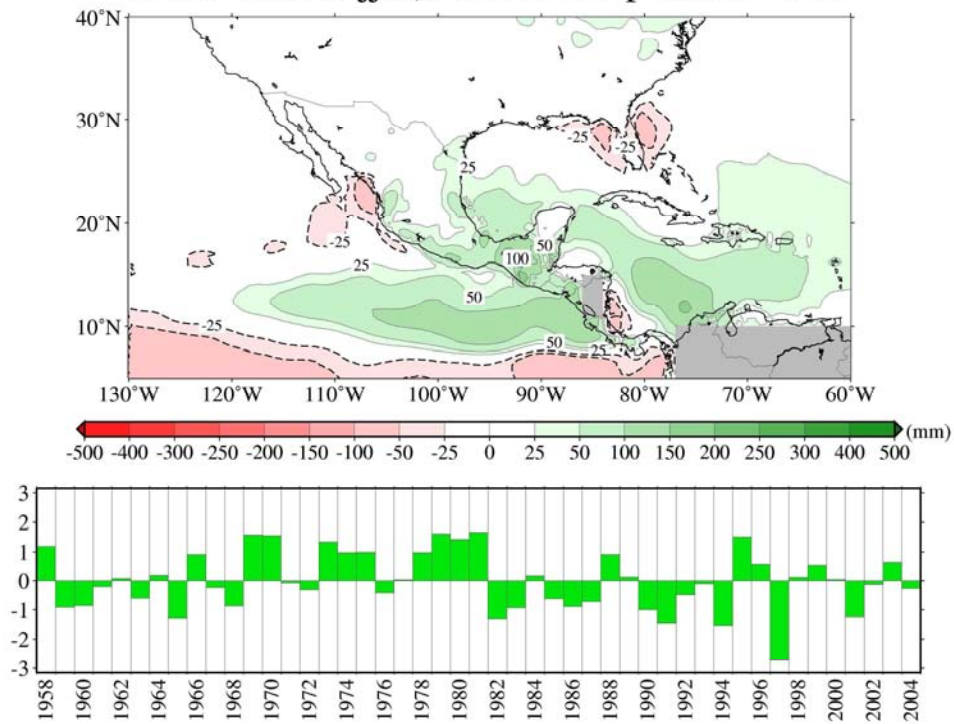


Fig. 49. Segunda componente principal de la lluvia de verano para la escala catorcenal (arriba) y pentadal (abajo).

EOF3 verano (jjas), varianza explicada: 8.8%



EOF3 verano (mensual), varianza explicada: 7.9%

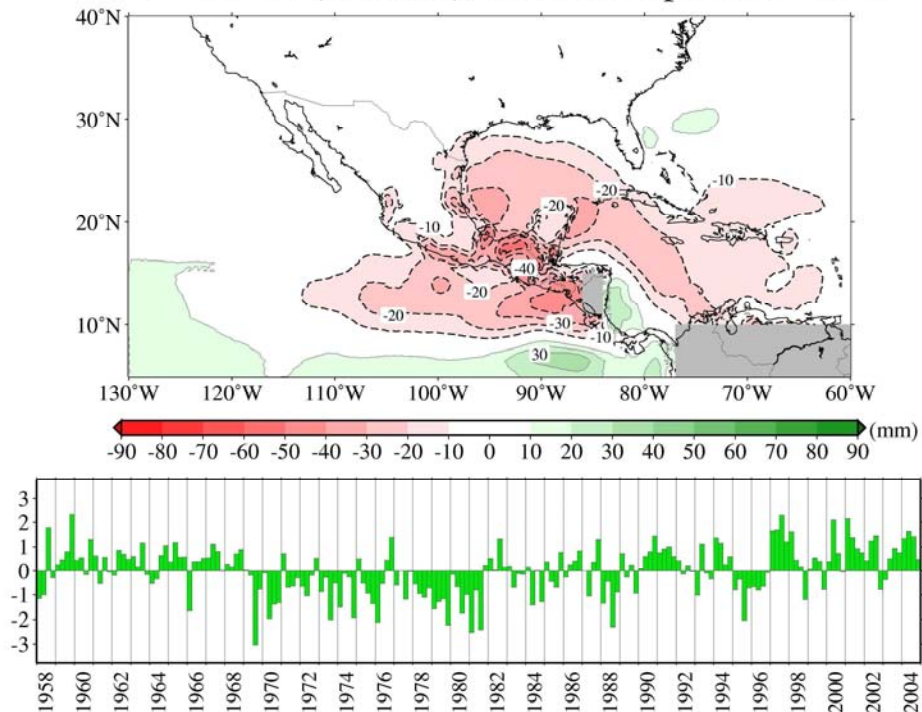
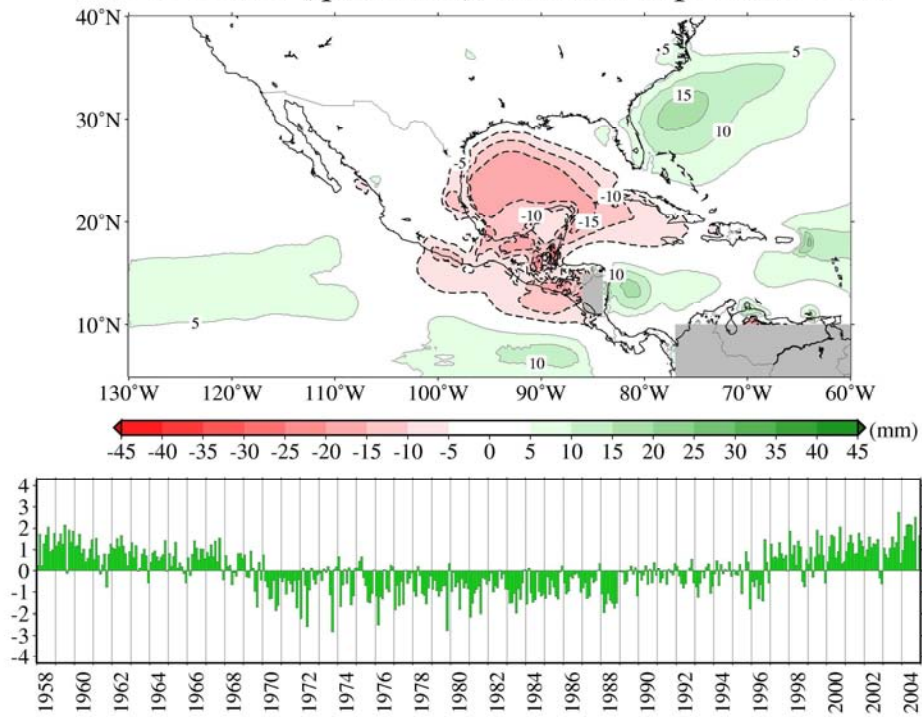


Fig. 50. Tercera componente principal de la lluvia de verano para la escala estacional (arriba) y mensual (abajo).

EOF3 verano (quincenal), varianza explicada: 6.4%



EOF3 verano (pentadas), varianza explicada: 4.5%

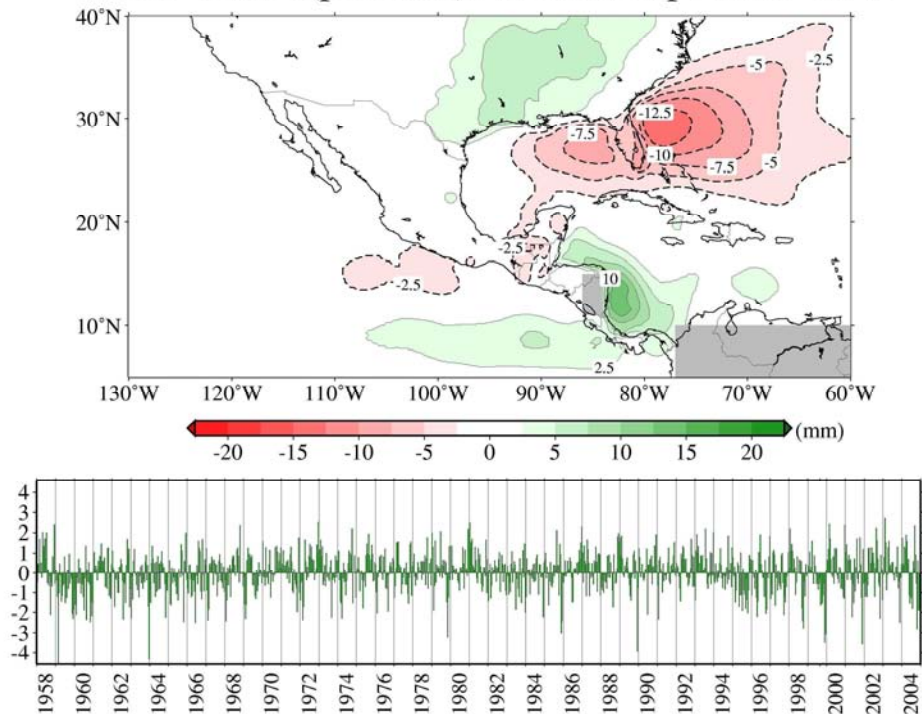


Fig. 51. Tercera componente principal de la lluvia de verano para la escala catorcena (arriba) y pentadal (abajo).

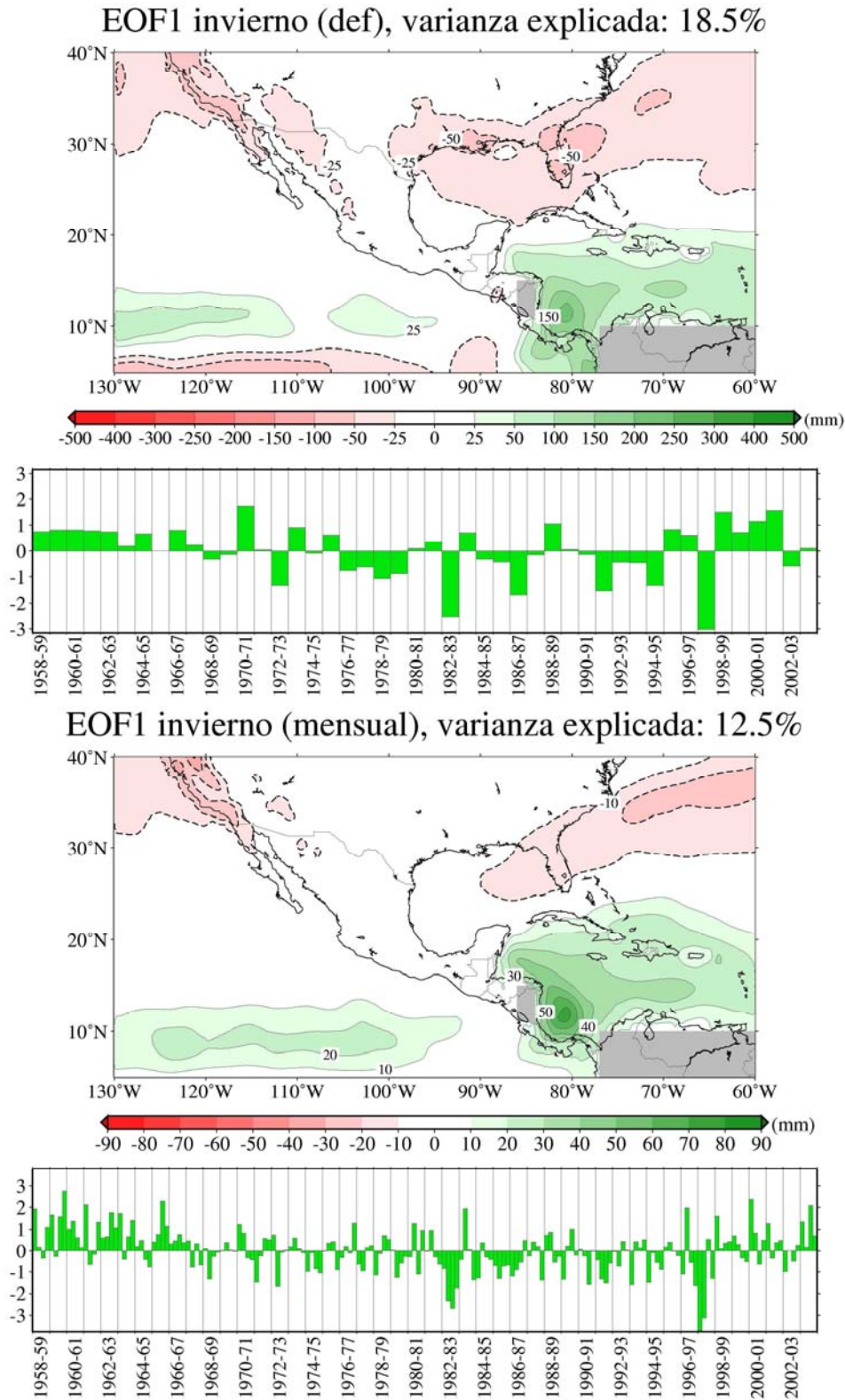
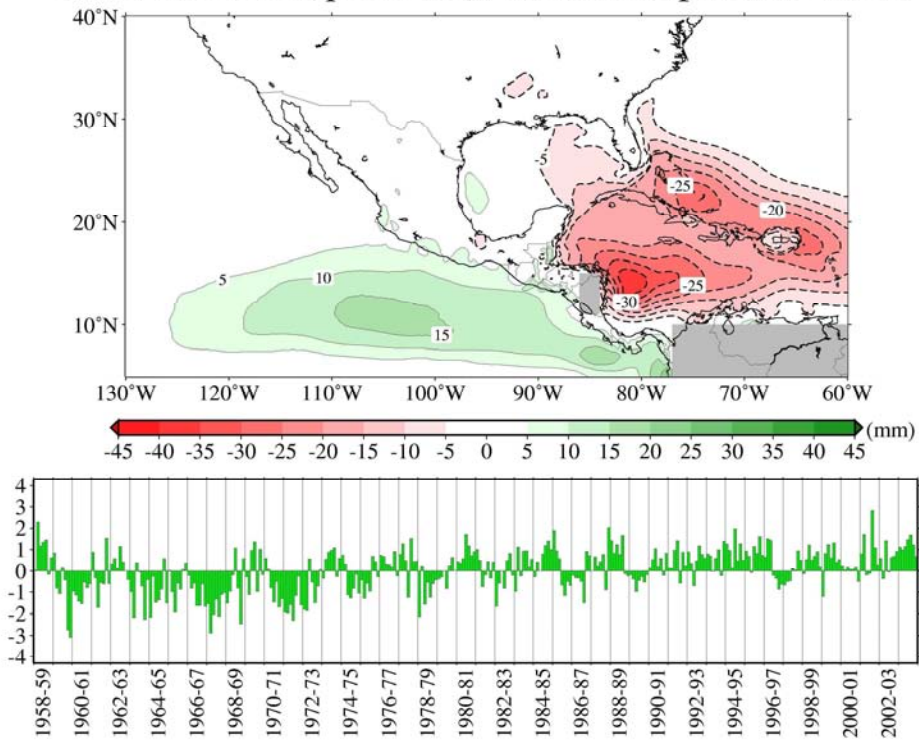


Fig. 52. Primera componente principal de la lluvia de invierno para la escala estacional (arriba) y mensual (abajo).

EOF1 invierno (quincenal), varianza explicada: 11.2%



EOF1 invierno (pentadas), varianza explicada: 9.7%

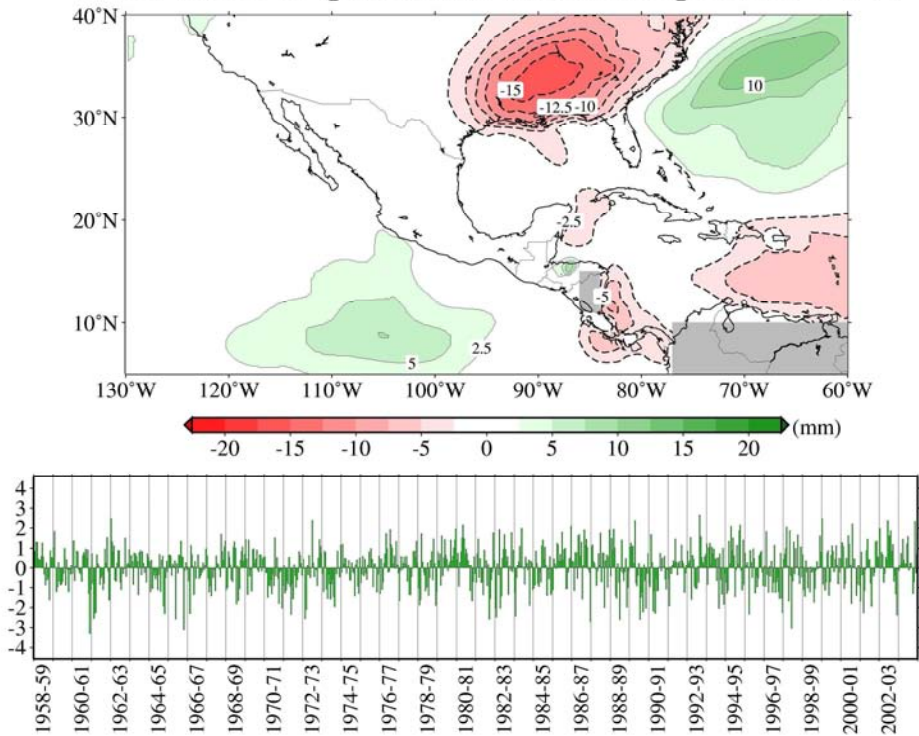


Fig. 53. Primera componente principal de la lluvia de invierno para la escala catorcena (arriba) y pentadal (abajo).

Finalmente, para el régimen de invierno, las figuras 52 y 53 muestran la primera componente principal, la cual explica las siguiente cantidad de varianza: estacional 18.5%, mensual 12.5%, catorcenal 11.2%, pentadal 9.7%. En la escala estacional y mensual, este modo de variabilidad parece corresponderse con los cambios de fase de la Oscilación Decadal del Pacífico (ver Fig. 14) aunque también parece corresponderse con las anomalías de lluvia durante eventos La Niña. En la escala de catorcenas la principal influencia en la lluvia de invierno parece estar vinculada a los sistemas de gran escala y la tendencia de largo plazo , mientras que en los periodos de 5 días no hay una señal clara en el patrón temporal, pero el patrón en el espacio sugiere una relación con la presencia de la corriente de chorro de latitudes medias, lo cual tiene sentido si se piensa que esta corriente es responsable en buena medida del desplazamiento de los sistemas frontales de latitudes medias, los cuales también tienen un ciclo de vida del orden de cinco días.

4. Conclusiones y trabajo a futuro

- La lluvia en la República Mexicana exhibe un ciclo anual bien definido con dos estaciones principales, una seca durante el invierno (noviembre a abril) y otra húmeda durante el verano (mayo a octubre). Aunque el ciclo anual es la forma de variación de la lluvia más elemental, la presencia de sistemas meteorológicos y la modulación de los cambios de la cantidad de lluvia que ocurre en el país se debe a otros factores.
- Los sistemas que generan lluvia en la región son durante el invierno los frentes de latitudes medias en su paso hacia los trópicos y durante el verano la presencia de ciclones tropicales, ondas del este, el desplazamiento de la zona intertropical de convergencia y el monzón del oeste de México.
- La compleja orografía del país juega un papel primordial en la generación de lluvia a escala regional o local cuando se presenta interacción de viento húmedo con las montañas. En el país también puede presentarse el desarrollo de convección local con la consecuente generación de lluvia.
- La lluvia en la región está influenciada por moduladores climáticos de diversas escalas tanto en el espacio como en el tiempo. Uno de los moduladores cuya influencia ha sido ampliamente documentada es el fenómeno de El Niño / Oscilación del Sur, sin embargo existe influencia de oscilaciones de baja frecuencia como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) y en general por las variaciones de la temperatura del mar en los océanos circundantes (p. ej., en la región de la Alberca de Agua Caliente del Pacífico Mexicano).
- Existe suficiente información pluviométrica en la región para analizar la variabilidad de la lluvia a diferentes escalas, pero se carece de esfuerzos para sistematizar el uso de dicha información.
- El análisis de la variabilidad de la lluvia puede realizarse utilizando datos en series de tiempo o bien datos en mallas regulares. En ambos casos es importante previo a los análisis de la lluvia realizar procedimientos de control de calidad, y en el caso de las series de tiempo poner énfasis especial en analizar la homogeneidad de las series, sobre todo si se desea calcular tendencias. El control de calidad en series de

tiempo puede estar basado en criterios estadísticos, pero requiere de análisis físicos (sinópticos y dinámicos) para evaluar la factibilidad de ocurrencia de eventos extremos

- En la República Mexicana, la base oficial de datos del clima es la del Servicio Meteorológico Nacional administrada en el sistema CLICOM. Esta base de datos presenta un retraso en la digitalización de las observaciones. En promedio se cuenta con datos de aproximadamente tres mil puntos de observación de lluvia en el país.
- La Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de la Comisión Nacional del Agua (GASIR) realiza también mediciones de precipitación con fines de manejo de agua. En algunos casos los puntos de observación de la GASIR concuerdan con los puntos del CLICOM-SMN. Los reportes de GASIR tienen un día de desfase respecto a los de CLICOM. Comparando los reportes de lluvia de ambas fuentes es posible generar series de tiempo de lluvia históricas con reportes en el presente.
- Los métodos de análisis objetivo y asimilación de datos permiten llevar los datos de variables meteorológicas espaciados en forma aleatoria a mallas regulares mediante diversos algoritmos. Uno de los métodos más utilizados para realizar análisis objetivo es el método de Cressman.
- Conjuntando la información disponible en la región del sur de Estados Unidos México, Centroamérica y el Caribe, y utilizando los datos de reanálisis NCEP/NCAR en las regiones oceánicas, se generó mediante el método de Cressman una base de datos de lluvia diaria en mallas regulares con resolución de 0.25 x 0.25 grados para el periodo 1958-2004. Esta base de datos no tiene precedente en el país y es uno de los principales productos de esta tesis.
- La base de datos de lluvia diaria en mallas minimiza la intensidad de los eventos extremos, por lo que su uso no es recomendable para hacer estudios de lluvias muy intensas como las asociadas a ciclones tropicales.
- La base de datos generada reproduce con buena precisión los patrones climatológicos ya conocidos como el ciclo anual, la sequía de medio verano y el comportamiento anómalo de la lluvia ante condiciones de El Niño Oscilación del Sur.

- En los estudios de la lluvia es necesario considerar la variabilidad intraestacional como la asociada a la sequía de medio verano así como también la variabilidad interestacional, esto es de una estación a otra.
- La variabilidad de la lluvia en México asociada al ENOS es de carácter no lineal, por lo que se debe tener cuidado en estudios futuros de determinar las variaciones de la lluvia ante ENOS de diferentes intensidades.
- Se realizó un análisis de componentes principales para analizar las estructuras de la variabilidad de la precipitación en México en diversas escalas de tiempo.
- En el verano la primera componente principal está relacionada con la gran escala y las tendencias de largo periodo, específicamente con la presencia de los vientos alisios y de la zona inter-tropical de convergencia y su desplazamiento latitudinal. La segunda componente principal está relacionada con las oscilaciones de baja frecuencia, específicamente con la oscilación multi-decadal del atlántico aunque en escalas de tiempo más cortas la lluvia está influenciada por el comportamiento de la alberca de agua caliente del Pacífico Mexicano. La tercera componente principal de la lluvia está asociada con ENOS y en plazos cortos (pentadas) con la AMO.
- En el invierno el modo principal de variabilidad de la lluvia en la escala estacional y mensual está asociado con la presencia de El Niño y probablemente con la Oscilación Decadal del Pacífico, mientras que en escalas de tiempo cortas la variabilidad se asocia con los sistemas de gran escala y con la corriente de chorro de latitudes medias.
- En general se distingue que la variabilidad de la lluvia en México está modulada por diferentes factores en dos escalas de tiempo: la estacional y mensual por un lado, y la catorcenal y pentadal por otro.
- Se recomienda como trabajo futuro regenerar la base de datos de este estudio utilizando el esquema de Cressman modificado por Glahn y Charba para reducir la subestimación de los eventos extremos, incorporar datos en las zonas donde no se consiguió información (Nicaragua, Colombia, el Caribe) y ampliar el periodo de cobertura de la base de datos.
- Estudios a mayor profundidad sobre la variabilidad de la lluvia en México son recomendables, como aquéllos basados en el uso de modelos numéricos.

5. Referencias

- Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf., U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin and E. Nelkin (2003). The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-present). J. Hydromet. 4,1147-1167.
- Aguilar, E., I. Auer, M. Brunet, T.C. Peterson, and J. Wieringa (2003), Guidelines on Climate Metadata and Homogenization, WCDMP-No. 53, WMO-TD No. 1186, 55 pp., World Meteorological Organization, Geneva.
- Aguilar, E., T.C. Peterson, P. Ramírez Obando, R. Frutos, J.A. Retana, M. Solera, I. González Santos, R.M. Araujo, A. Rosa Santos, V.E. Valle, M. Brunet India, L. Aguilar, L. Álvarez, M. Bautista, C. Castañón, L. Herrera, E. Ruano, J.J. Siani, F. Obed, G.I. Hernández Oviedo, J.E. Salgado, J.L. Vázquez, M. Baca, M. Gutiérrez, C. Centella, J. Espinosa, D. Martínez, B. Olmedo, C.E. Ojeda Espinoza, M. Haylock, R. Núñez, H. Benavides and R. Mayorga (2005), Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and Northern South America, 1961-2003, J. Geoph. Res.
- AGROASEMEX, S.A. (2006). La Experiencia Mexicana en el Desarrollo y Operación de Seguros Paramétricos Aplicados a la Agricultura. Quéretaro, Qro. México.
- Alexander, L.V.; X. Zhang; T. C. Peterson; J. Caesar; B. Gleason; A.M.G Klein Tank; M. Haylock; D. Collins; B. Trewin; F. Rahimzadeh; A. Tagipour; K. Rupa Kumar; J. Revadekar; G. Griffiths; L. Vincent; D. B. Stephenson; J. Burn; E. Aguilar; M. Brunet; M. Taylor; M. New; P. Zhai; M. Rusticucci and J.L. Vázquez (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. J. Geoph. Res.
- Alexanderson, H. and A. Moberg (1997). Homogenization of Swedish Temperature data: Part 1: Homogeneity test for linear trends. Int.J. Clim. 17, 25-34.
- Arkin, A., and D. Ziskin (1994). Relationship between Clouds and Sea Surface Temperatures in the Western Tropical Pacific. J. Climate 7,988-1000.
- Barnes, S. L. (1964). A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. J. Appl. Met. 3, 396-409.
- Beck, C., J. Grieser and B. Rudolf (2005): A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000. Climate Status Report 2004. German Weather Service, Offenbach, Germany.
- Bhargava M. and M. Danard (1994). Application of Interpolation to the Analysis of Precipitation in Complex Terrain. J. Appl. Met. 33, 508-518.
- Bjerknes, J. (1966). A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. Tellus 8,820-828.
- Boissonnade, Auguste C.; Heitkemper Lawrence J. and Whitehead David (2002). Weather Data: Cleaning and Enhancement. In: Dischel, Robert (ed). Climate Risk and the Weather Market. Financial Risk Management with Weather Hedges. RISK Books. London.
- Brooks, H., B. Brown, P. Ganderton, J. Lazo, B. Mills and R. Morss (2006). A Societal and Economic Research and Applications Agenda for the North American THORPEX Programme. 2nd THORPEX International Science Symposium. Germany.
- Brunet-India, M. and López Bonillo, D. (Eds.) (2001): Detecting and Modelling Regional Climate Change, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 650 pp.
- Charba, J. P., A. W. Harrel III and A. C. Lackner III (1992). A Monthly Precipitation Amount Climatology Derived from Published Atlas Maps: Development of a Digital Database. NOAA TDL Office Note 92-7. 20 p.
- Charba, J.P., Y. Liu, M. H. Hollar, B. Exley and A. Belayachi (1998). Gridded Climatic Monthly Frequencies of Precipitation Amount for 1-, 3-, and 6-h Periods over the Conterminous United States. Wea. and Forecast. 13:25-57.
- Chen, M., P. Xie and J. E. Janowiak (2002). Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations. J. Hydromet. 3,249-266.
- CONACYT (2001). Los efectos del fenómeno El Niño en México 1997-1998. Escobar-Briones, E., M. Bonilla, A. Badán, M. Caballero y A. Winckell (compiladores). Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología, México. 1ª. Ed. 245 P.

- Covey, C., K.M. AchutaRao, M. Fiorino, P. J. Gleckler, K. E. Taylor and M. F. Wehner (2002). Intercomparison of Climate Data Sets as a Measure of Observational Uncertainty. Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison Lawrence Livermore National Laboratory. National Technical Information Service, Springfield, VA.
- Cressman, G.P. (1959). An Operational Objective Analysis System. Mon. Wea. Rev. 87, 367-374.
- DiMego, G.J.; Bosart, L.F. and Endersen, G.W. (1976). An Examination of the Frequency and Mean Conditions Surrounding Frontal Incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. Mon. Wea. Rev. 104:709-719.
- Dorman, C. E. and R.H. Bourke (1979). Precipitation over the Pacific Ocean, 30°S to 60°N. Mon. Wea. Rev. 107:896-910.
- Efthymiadis, D., P.D. Jones, K. R. Briffa, I. Auer, R. Böhm, W. Schöner, C. Frei and J. Schmidli (2006). Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800-2003. J. Geoph. Res. 111, D01105, 1-22.
- Eisched, J.; B. Baker, T. Karl and H. Díaz (1995). The quality control of long-term climatological data using objective data analysis. J. Appl. Met. 34:12, 2787-2795.
- Emanuel, K. A. (1991). The Theory of Hurricanes. Annu. Rev. Fluid Mech. 23: 179-196.
- Enfield, D.B., A.M. Mestas-Nunez and P.J. Trimble (2001). The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S., Geoph. Res. Lett. 28: 2077-2080.
- Englehart P.J. and A. V. Douglas (2001). The Role of Eastern North Pacific Tropical Storms in the Rainfall Climatology of Western Mexico. Int. J. Clim. 21: 1357-1370.
- Englehart P.J. and A.V. Douglas (2003). Assessing Warm Season Drought Episodes in the Central United States. J. Climate 16(11):1831-1842.
- Englehart P. J. and A.V. Douglas (2006). Defining Intraseasonal Rainfall Variability within the North American Monsoon. J. Climate 19:4243-4253.
- Farfán, L.M. and M. Cortez (2005). An Observational and Modeling Analysis of the Landfall of Hurricane Marty (2003) in Baja California, Mexico. Mon. Wea. Rev. 133:2069-2090.
- Feng, S., Q. Hu and W. Qian (2004). Quality Control of Daily Meteorological Data in China, 1951-2000: A New Dataset. Int. J. Clim. 24: 853-870.
- Folland, C. K., T. N. Palmer and D. E. Parker (1986). Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, Nature, 320, 602-607.
- Fritsch, J.M; R.J. Kane and C.R. Chelius (1986). The Contribution of Mesoscale Convective Weather Systems to the Warm-Season Precipitation in the United States. J. Appl. Met. 25(10):1333-1345.
- Gandin, L. (1988). Complex quality control of meteorological observations. Mon. Wea. Rev. 116:5, 1137-1156.
- Garduño, R. (1999). Aportaciones Mexicanas al estudio del Clima. Revista GEOFISICA. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No. 51. Julio-Diciembre.
- Gilchrist B. and G.P. Cressman (1954). An Experiment in Objective Analysis. Tellus 6(4):309-318.
- Glahn, H.R., T.L. Chambers, W. S. Richardson and H. P. Perroti (1985). Objective Map Analysis for the Local AFOS MOS Program. NOAA Technical Memorandum NWS TDL 75. Techniques Development Laboratory, Silver Spring, MD. 34 p.
- Glantz, M.H. (Ed.), (2001). *Once Burned, Twice Shy? Lessons Learned from the 1997-98 El Niño*. Tokyo: ed Nations University.
- Glantz, M.H. (2006). Making climate serve the people. WMO Bulletin, 55(2), 116-125.
- González-Rouco, J., J.L. Jiménez, V. Quesada and F. Valero (2001). Quality Control and Homogeneity of Precipitation Data in the Southwest of Europe. J. Climate 14, 964-978.
- Groisman, P.Y., R. W. Knight, D.R. Easterling and T. R. Karl (2005). Trends in Intense Precipitation in Climate Record. J. Climate 18,1326-1350.
- Grossman, S.I. (1992). *Algebra lineal con aplicaciones*. Cuarta edición. McGraw Hill. México, D.F. 536 pp.
- Higgins, R.W., J.E. Janowiak and Y. Yao (1996). A gridded hourly precipitation database for the United States (1963-1993). NCEP/CPC Atlas, No. 1. Washington, D.C.
- Higgins, R.W. and W. Shi (2000). Dominant Factors Responsible for Interannual Variability of the Summer Monsoon in the Southwestern United States. J. Climate, 13, 4.

- Higgins, R.W. and W. Shi (2001). Intercomparison of the Principal Modes of Interannual and Intraseasonal Variability of the North American Monsoon System. *J. Climate* 14,3.
- Higgins, W. (2003). Overview of the North American Monsoon Experiment (NAME). American Meteorological Society. Consultado en Internet el 28 de mayo de 2007: <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/54183.pdf>
- Hill, J.B. (1969). Temperature Variability and Synoptic Cold Fronts in the Winter Climate of Mexico. Climatological Research Series No. 4. Department of Geography, McGill University. Montreal, Canada. 71 p.
- Hoke, J. E. and R. A. Anthes, (1976): The initialization of numerical models by a dynamic initialization technique. *Mon. Wea. Rev.*, 104, 1551-1556.
- Hollingsworth, A., D. Shaw, P. Lonnberg, L. Illari, K. Arpe and A. Simmons (1986). Monitoring of observation and analysis quality by a data-assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 1225-1242.
- Holton, J.R. (1992). An Introduction to Dynamic Meteorology. Third Edition. Int. Geophysics Series. Vol. 48. Academic Press, Inc. San Diego, Ca. USA.
- Huffman, G.J., R. F. Adler, M. M. Morrissey, D. T. Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock and J. Susskind (2001). Global Precipitation at One Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations. *J. Hydromet.* 2,36-50.
- ISDR (2005). Hyogo Framework for Action 2005-2015. International Strategy for Disaster Reduction. World Conference on Disaster Reduction., Hyogo, Japan.
- Janowiak, J.E. G.D. Bell and M. Chelliah (1999). A gridded database of daily temperature maxima and minima for the conterminous United States 1948-1993. NCEP/Climate Prediction Center Atlas 6. Washington, D.C.
- Jáuregui, E. (1979). Algunos Aspectos de las Fluctuaciones Pluviométricas en México en los Últimos Cien Años. *Bol. Inst. Geogr.*No. 9. UNAM, México.
- Jáuregui, E. (1995). Rainfall fluctuations and tropical storm activity in Mexico. *Erdkunde*, 49,39-48.
- Jáuregui, E. (2003). Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico. ATMOSFERA 16,193-204.
- Johnson, Gregory L. and Clayton L. Hanson (1974). Topographic And Atmospheric Influences On Precipitation Variability Over A Mountainous Watershed. *J. Appl. Met.* 34:68-83.
- Jones, P.D. and M. Hulme (1996). Calculating Regional Climatic Time Series for Temperature and Precipitation: Methods and illustrations. *Int. J. Clim.* 16,361-377.
- Jones, P.D., T.J. Osborn and K.R. Briffa (1997). Estimating sampling errors in large-scale temperature averages, *J. Climate*, 10, 2548-2568.
- Kalnay, E.; M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne and D. Joseph (1996). The NCEP/NCAR 40 Year Reanalysis Project. BAMS, 77, 437-471.
- Kalnay, E. (2002). Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press 364 p.
- Klein Tank A.M.G., J.B. Wijngaard, G.P. Können, R. Böhm, G. Demaree, A. Gocheva, M. Miletta, S. Pashiardis, L. Hejkrlik, C. Kern-Hansen, R. Heino, P. Bessemoulin, G. Müller-Westmeier, M. Tzanakou, S. Szalai, T. Palsdottir, D. Fitzgerald, S. Rubin, M. Capaldo, M. Maugeri, A. Leitass, A. Bukantis, R. Aberfeld, A.F.V. van Engelen, E. Forland, M. Miletus, F. Coelho, C. Mares, V. Razuvaev, E. Nieplova, T. Cegnar, J. Antonio Lopez, B. Dahlstrom, A. Moberg, W. Kirchhofer, A. Ceylan, O. Pachaliuk, L.V. Alexander and P. Petrovic (2002). Daily surface air temperature and precipitation dataset 1901- 1999 for European Climate Assessment (ECA), *Int. J. Clim.* 22, 1441-1453.
- Krishnamurti, T.N. and L. Bounoua (1996). An introduction to numerical weather prediction techniques. CRC Press, 293 p.
- Legates, D.R. and C. J. Willmott (1990). Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge-Corrected, Global Precipitation. *Int. J. Clim.* 10,111-127.
- Legates, D.R. (1995). Global and Terrestrial Precipitation: A Comparative Assessment of Existing Climatologies. *Int. J. Clim.* 15, 237-258.
- Lorenz (1956). Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction. Scientific Report 1. Statistical Forecast Project, Department of Meteorology, MIT. 49 p.

- Magaña, V. and M. Yanai (1991). Tropical Mid-latitude Interaction on the Time Scale of 30 to 60 Days during the Northern Summer of 1979. *J. Climate* 4:180-200.
- Magaña V and A. Quintanar, (1997). On the use of a general circulation model to study regional climate. In 2nd. UNAM-CRAY Supercomputing Conference on Earth Sciences. Mexico City. June 1997. Edited by F. García et al. Cambridge University Press. 39-48.
- Magaña, V. y J.L. Pérez (1998). Usos de un modelo de mesoescala en el estudio de la dinámica atmosférica regional de México. *Bol. Inf. Cs. de la Tierra* 5:33-39.
- Magaña, V.; J. A. Amador and S. Medina (1999). The Midsummer Drought over México and Central America. *J. Climate* 12:1577-1588.
- Magaña, V. (Ed.) (1999). Los impactos de El Niño en México. Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación. México, 1999. 229 p.
- Magaña, V.O.; J.L. Vázquez; J.L. Pérez and J.B. Pérez (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geof. Int.* 42,3:313-330.
- Mann, M.E. and K. A. Emanuel (2006). Atlantic Hurricane Trends Linked to Climate Change. *EOS* 233-241.
- Mantua, N.J.: S. R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace and R.C. Francis (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *BAMS* 78:1069-1079.
- Mekis E., and W.D. Hogg (1999), Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation timeseries, *Atm.-Ocean*, 37, 53-85.
- Mendoza, B., E. Jáuregui, R. Díaz-Sandoval, V. García-Acosta, V. Velasco and G. Cordero (2005). Historical Droughts in Central Mexico and Their Relation with El Niño. *J. Appl. Met.* 44(5):709-716.
- Menne, M. J. and C. N. Williams (2005), Detection of undocumented change points: On the use of multiple test statistics and composite reference series, *J. Climate*.
- Mesinger, F.; G. DiMego, E. Kalnay, K. Mitchell, P.C. Shafran, W. Ebisuzaky, D. Jovic, J. Woollen, E. Rogers, E.H. Berbery, M.B. Ek, Y. Fan, R. Grumbine, W. Higgins, H. Li, Y. Lin, G. Manikin, D. Parrish and W. Shi (2005). North American Regional Reanalysis. *BAMS*, 87:3, 343-360.
- Mosiño, A. P. and E. García (1966). Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana. *Proc. Conf. Reg. Latinoamericana Unión Geogr. Int.*, 3, 500–516.
- Mosiño, P.A. and E. García (1973). The Climate of Mexico. In: *Climates of North America*. R.A. Bryson and F.K. Hare (Eds). Elsevier. The Netherlands.
- Mosiño, P.A. and E. García (1981). The variability of rainfall in Mexico and its determination by means of the gamma distribution. *Geogr. Ann.* 63 A: 1-2.
- New, M., M. Hulme and P. Jones (2000). Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961-90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. *J. Climate* 829-856.
- Nieuwolt, S. (1977). *Tropical Climatology, An Introduction to the Climates of the Low Latitudes*. John Wiley and Sons, New York, 207 pp
- Nicholls, N. and T. Kestin (1998). Communicating Climate. *Clim. Change* 40, 417-420.
- Nicholls, N. and W. Murray (1999). Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes: Asheville, NC, USA, 3-6 June 1997. Breakout Group B: Precipitation. *Clim. Change* 42:23-29.
- Nicholls, N. (2001). Doing Climate Research in the Internet. How to use other people's data, software & computers (with their blessing) to investigate climate variations and trends. Downloadable from <http://www.bom.gov.au/bmrc/cfor/cfstaff/nnn/climateinternet.ppt>. BMRC, Melbourne, Australia.
- Page, C.; N. Nicholls, N. Plummer, B. Trewin, M. Manton, L. Alexander, L. Chambers, Y. Choi, D. Collins, A. Gosai, P. Della-Marta, M. Haylock, K. Inape, V. Laurent, L. Maitrepierre, E. Makmur, H. Nakamigawa, N. Ouprasitwong, S. Mcgree, J. Pahalad, J. Salinger, L. Tibig, T. Tran, K. Vediapan and P. Zhai. 2004: Data Rescue in the Southeast Asia and South Pacific Region: Challenges and Opportunities. *BAMS*, 85: 10, 1483–1489.
- Panofsky, J. (1949). Objective weather-map analysis. *Journal of Meteorology* 6,386-392.
- Peterson, T. C., D. R. Easterling, T. R. Karl, P. Ya. Groisman, N. Nicholls, N. Plummer, S. Torok, I. Auer, R. Boehm, D. Gullett, L. Vincent, R. Heino, H. Tuomenvirta, O. Mestre, T. Szentimre, J. Salinger, E. Førland, I. Hanssen- Bauer, H. Alexandersson, P. Jones, and D. Parker (1998). Homogeneity of in situ atmospheric climate data: A review, *Int. J. Clim.*, 18, 1493-1517.

- Power, S.; M. Haylock, R. Colman and X. Wang (2006). The Predictability of Interdecadal Changes in ENSO Activity and ENSO Teleconnections. *BAMS* 19(19):4755-4771.
- Preisendorfer, R.W. (1998). Principal component analysis in Meteorology and Oceanography. C.D. Mobley, ed. Elsevier, 425 pp.
- Ramanathan, V. and W. Collins (1991). Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Niño. *Nature*, 351,27-32.
- Ropelewski, C. and M. Halpert (1987). Global and regional scale precipitation associated with El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1606-1626.
- Ropelewski, C. and M. Halpert (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *J. Climate*, 2: 268-284.
- Ropelewski, C. and M. Halpert (1996). Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships. *J. Climate*, 9: 1043-1059.
- Salinas, J.A. (2006). Dinámica de las ondas del este y su interacción con el flujo medio en el Caribe. Tesis de doctorado en física de la atmósfera. UNAM. México, 93 pp.
- Schneider, N. and B.D. Cornuelle (2005). The Forcing of the Pacific Decadal Oscillation. *J. Climate* 18:4355-4373.
- Sinclair, M.R. (1994). A Diagnostic Model for Estimating Orographic Precipitation. *J. Appl. Met.* 33:1163-1175.
- Stenrud, D.J.; R.L. Gall, S.L. Mullen and K.W. Howard (1995). Model Climatology of the Mexican Monsoon. *J. Climate* 8:1775-1794.
- Stern and Easterling (Eds), (1999). Making Climate Forecasts Matter. National Academy Press. Washington, D.C.
- Talagrand, O. (1997). Assimilation of observations:an introduction. *J. Met. Soc. Japan*. 75, 191-209.
- Tarhule, A. and P. Lamb (2003). Climate Research and Seasonal Forecasting for West Africans: Perceptions, Dissemination and Use? *BAMS* 84:12, 1741-1759.
- Thiebaux, H.J. and M.A. Pedder (1987). Spatial objective analysis with applications in atmospheric science. Academic Press. 299 p.
- Trenberth, K.E. (1997). The definition of El Niño. *BAMS*, 78: 2771-2777.
- Uribe, E.M. (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. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. México. 69 p.
- Vázquez, J.L. (2000). Caracterización objetiva de los Nortes del Golfo de México y su variabilidad interanual. Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 62 p.
- Vázquez, J.L. (2002). Bases de Datos e Línea: Un Avance Necesario en la Comunidad Meteorológica Mexicana. Memorias Congreso Nacional de Meteorología, Cancún .Q. Roo.
- Vázquez, J.L. (2006). Datos Climáticos de la República Mexicana: Panorama Actual y Requerimientos Inmediatos. En: Memorias del I Foro del Medio Ambiente Atmosférico de Veracruz, Marzo 2006; y también en: Programa de Modelación del Clima en México. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.
- Vidal-Zepeda, R. (2001). Climatología de los Inviernos en México. Tesis de doctorado en geografía. Facultad de Filosofía y letras. Universidad Nacional Autónoma de México.140 p.
- Vincent, L.A., X. Zhang, B.R. Bonsal and W.D. Hogg (2002), Homogenization of daily temperatures over Canada, *J. Climate*, 15, 1322-1334.
- Vukicevic, T.; E. Kalnay and T. Vonder Haar (2004). The Need for a National Data Assimilation Education Program. *BAMS* 85:1, 48-49.
- Wallen, C.C. (1955). Some characteristics of precipitation in Mexico. *Geogr. Ann.* 37: 51-85.
- Wallen, C.C. (1956). Fluctuations and variability in Mexican rainfall. *Am. Assoc. Advan. Sci., Publ.*, 43:141-155.
- Wang, X.L. (2003). Comments on "Detection of undocumented changepoints: A revision of the two-phase regression model". *J. Climate*, 16,3383-3385
- Webster, P.J. (1994). The Role of Hydrological Processes in Ocean-Atmosphere Interactions. *Rev. Geoph.* 32,4:427-476.
- Wilks, D.S. (2006). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition. International Geophysics Series. Academic Press / Elsevier. USA. 627 p.

- WMO (1996). Exchanging Meteorological Data. Guidelines on Relationships in Commercial Meteorological Activities. WMO No. 837. Policy and Practice. Geneva, Switzerland.
- Xie, P. and P.A. Arkin (1996). Analyses of Global Monthly Precipitation Using Gauge Observations, Satellite Estimates and Numerical Model Predictions. J. Climate 9,840-858.
- Yanai, M. (1961). A detailed Analysis of Typhoon Formation. J. Met. Soc. Japan 39,187-214.
- Yanai, M. (1968). Evolution of a Tropical Disturbance in the Caribbean Sea Region. J. Met. Soc. Japan 46,86-109.
- You, J. and K. G. Hubbard (2006). Quality control of weather data during extreme events. J. Atm. Oc. Tech. 23:2, 184-197.
- Yu, B. and J.M. Wallace (2000). The Principal Mode of Interannual Variability of the North American Monsoon System. J. Climate 13:2794-2800.
- Zehnder, J.A. (1991). The Interaction of Planetary-Scale Tropical Easterly Waves with Topography: A Mechanism for the Initiation of Tropical Cyclones. J. Atm. Sci. 48(10):1217-1230.

Anexo 1. Guía rápida de explotación de la base de datos

i) Fortran

La base de datos de lluvia diaria en mallas regulares fue creada utilizando el compilador GNU Fortran 77 [<http://www.gnu.org>] y se encuentra en archivos binarios secuenciales con las siguientes dimensiones por unidad de tiempo: X = 281, Y = 141. La resolución es de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

Todos los archivos tienen extensión *.grd (denotando grid –malla-) aunque son simples binarios escritos con Fortran. Como ejemplo de lectura de los datos, el siguiente bloque de código (fortran 77) lee las mallas desde un archivo binario y los guarda en memoria en el arreglo de números reales pcp para el año bisiestro 1976.

```
parameter(nx=281,ny=141,nt=366)
real x(nx,ny), pcp(nx,ny,nt)
open(1,file='wqc1976.grd',form='unformatted',
&      access='direct',recl=4*nx*ny)
do k=1,nt
  read(1,rec=k) x
  do j=1,ny
    do i=1,nx
      pcp(i,j,k)=x(i,j)
    enddo
  enddo
enddo
close(1)
continue
```

El programa *interpgrd2point.f* incluido en el DVD que acompaña esta tesis genera la serie de tiempo interpolada para un punto geográfico a partir de los cuatro nodos circundantes en la malla.

ii) GrADS

Recomiendo ampliamente el uso del software Grid Analysis and Display System (GrADS) para realizar cálculos y despliegues con la base de datos de lluvia de este estudio. GrADS es software libre (licencia GPL) y funciona en la mayoría de las plataformas de software y hardware. Fue creado por Brian Doty y actualmetne recibe soporte y mantenimiento por una amplia gama de usuarios de todo el mundo.

Como ejemplo del potencial de aprovechamiento de datos en mallas con el uso de GrADS baste mencionar que el cálculo de las EOFs de esta tesis se realizó utilizando un script para GrADS desarrollado por Matthias Munich de la Universidad de California en Los Ángeles, EU [<http://www.atmos.ucla.edu/~munnich/Grads/EOF/index.html>]. El sitio principal en Internet del software GrADS se hospeda en la página del Centro de Estudios Océano-Tierra-Atmósfera (COLA) del Instituto del Ambiente Global y la Sociedad (IGES) en Maryland [<http://grads.iges.org/grads/grads.html>], de donde puede descargarse el software.

GrADS utiliza un ‘archivo descriptor’ (con extensión *.ctl) para procesar cada archivo binario. Por lo tanto, cada archivo *.grd debe tener un archivo *.ctl correspondiente. En este último se incluye la información de las dimensiones de las mallas así como el número de tiempos t con que cuenta el archivo y el nombre de las variables en él contenidas. En el caso de las mallas diarias de lluvia, la variable se denominó con la letra r (denotando rainfall). Las siguientes son algunas instrucciones comunes de GrADS:

```
'open wqc1976.ctl'   Prepara al software para procesar las mallas del año 1976.  
'set time t'        Donde  $t$  es un número ordinal. Selecciona el tiempo  $t$  del archivo.  
'display r'         Despliega el campo de lluvia  $r$  (el default es en contornos).  
'display sum(r,t=1,t=31)'  Calcula la suma de  $r$  del tiempo  $t=1$  al tiempo  $t=31$ .
```

iii) Herramientas en línea

Como mencioné en el Capítulo 2, una de las mejores formas de acceder las bases de datos del clima en el mundo es mediante sistemas de análisis y despliegue en línea. Ejemplo de estos sistemas se encuentran al acceder a los datos de Reanálisis NCEP/NCAR y a los NARR. El Instituto Internacional para el Clima y la Sociedad (IRI) localizado en Palisades, Nueva York, ha desarrollado una Biblioteca de Datos que desde mi punto de vista es una de las más poderosas herramientas en línea para análisis y despliegue de las bases de datos del clima en el mundo. La base de datos de este estudio, al igual que la bases de datos mensuales del clima mexicano desarrolladas por Juan Matías Méndez, están disponibles en la Biblioteca de Datos del IRI, donde pueden ser graficadas y analizadas en línea [<http://iridl.ldeo.columbia.edu/index.html>]. Las bases de datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera se encuentran en los enlaces a ‘Datasets by Source’ → ‘UNAM’.

Anexo 2. Contenido del DVD que acompaña la Tesis.

El DVD que acompaña a esta tesis contiene la base de datos de lluvia diaria en mallas regulares con resolución de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ para el periodo 1958-2004 desarrollada como parte de los estudios de maestría de Jorge Luis Vázquez. Las mallas regulares se generaron utilizando el método de análisis objetivo de Cressman.

Importante: Los datos contenidos en el DVD fueron creados con propósitos de investigación y se ofrecen tal cual, sin garantía alguna. Su correcto aprovechamiento es responsabilidad del usuario.

Cualquier comentario o pregunta sobre los datos será ampliamente apreciada en la siguiente dirección de correo electrónico: climademexico@yahoo.com

La forma de citar los datos de esta tesis hasta el momento de escribir esta tesis es:

En español:

Vázquez, J.L. (2007). Base de datos de Lluvia Diaria en México. En: Variabilidad de la lluvia en la República Mexicana, Tesis de Maestría en Física de la Atmósfera, UNAM. México. 105 p. Copias disponibles bajo petición a climademexico@yahoo.com.

En inglés:

Vázquez, J.L. (2007). Mexican Daily Precipitation Database. In: 'Variabilidad de la lluvia en la República Mexicana'. Master Thesis in Atmospheric Physics. UNAM. Mexico. Copies available under request to climademexico@yahoo.com

Contenido del DVD:

readme.txt	La información de esta descripción.
/daily	Folder de datos diarios.
/pentad	Folder de datos pentadales.
/biweek	Folder de datos catorcenales..
/monthly	Folder de datos mensuales..
/season	Folder de datos estacionales.
/tools	Folder de herramientas.
/tools/g77	Subfolder de GNU Fortran 77.
/tools/grads	Subfolder de GrADS.

Archivos dentro del folder /daily/:

wqc1958.grd Mallas de lluvia diaria para 1958.
wqc1959.grd Mallas de lluvia diaria para 1959.
wqc1960.grd Mallas de lluvia diaria para 1960.

... y así sucesivamente hasta el año 2004.

wqc1958.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqc1958.grd
wqc1959.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqc1959.grd
wqc1960.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqc1960.grd

... y así sucesivamente hasta el año 2004.

wqcclimdlymna.grd Malla de climatología diaria (mediana de 1958 a 2004)
wqcclimdlymna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcclimdlymna.grd

Archivos dentro del folder /pentad/:

wqcclimpenmna.grd Malla de climatología pentadal (mediana de pentadas 1958 a 2004)
wqcclimpenmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcclimpenmna.grd
wqcpentad.grd Malla de datos en pentadas de 1958 a 2004
wqcpentad.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcpentad.grd
wqcanompenmna.grd Malla de anomalías pentadales de 1958 a 2004.
wqcanompenmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcanompenmna.grd

Archivos dentro del folder /biweek/:

wqcclimbwmna.grd Malla de climatología catorcenal (mediana de catorcenas 1958- 2004)
wqcclimbwmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcclimbwmna.grd
wqcbiweek.grd Malla de datos catorcenales de 1958 a 2004
wqcbiweek.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcbiweek.grd
wqcanombwmna.grd Malla de anomalías catorcenales de 1958 a 2004
wqcanombwmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcanombwmna.grd

Archivos dentro del folder /monthly/:

wqcclimmonmna.grd Malla de climatología mensual (mediana de meses 1958 a 2004)
wqcclimmonmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcclimmonmna.grd
wqcmonthly.grd Malla de datos mensuales de 1958-2004
wqcmonthly.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcmonthly.grd
wqcanommonmna.grd Malla de anomalías mensuales de 1958 a 2004
wqcanommonmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcanommonmna.grd

Archivos dentro del folder /season/:

wqcclimdjfmna.grd Malla de climatología de invierno (mediana DJF de 1958 a 2004)
wqcclimdjfmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcclimdjfmna.grd
wqcdjf.grd Malla de datos de invierno dic-ene-feb (DJF) de 1958 a 2004
wqcdjf.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcdjf.grd
wqcanomdjfmna.grd Malla de anomalías de invierno (DJF) de 1958 a 2004
wqcanomdjfmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcanomdjfmna.grd
wqcclimjjasmna.grd Malla de climatología de verano (mediana JJAS de 1958 a 2004)

wqcclimjjasmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcclimjjasmna.grd
wqcjjas.grd Malla de datos de verano jun-jul-ago-sep (JJAS) de 1958 a 2004
wqcjjas.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcjjas.grd
wqcanomjjasmna.grd Malla de anomalías de verano (JJAS) de 1958 a 2004
wqcanomjjasmna.ctl Archivo descriptor de GrADS para el binario wqcanomjjasmna.grd

Archivos dentro del folder /tools/:

grd2asciimonthly.f Código fuente de Fortran 77 que convierte las mallas binarias en archivos ascii.
interpgrd2point.f Código fuente de Fortran 77 que genera una serie de tiempo en un punto geográfico especificado interpolando desde los cuatro puntos de malla circundantes.
medianameses.f Códifo fuente de Fortran 77 utilizado para el cálculo de la mediana.
spread.f Código fuente de Fortran 77 que separa un archivo único en varios.

/g77/ Subfolder que contiene una distribución binaria para Windows del compilador GNU Fortran 77. Obtenida del sitio [<http://www.geocities.com/athens/olympus/5564/>]. Contiene también una copia en formato postscript del libro gratuito de Clive G. Page “Professional Programmer’s Guide to Fortran 77”. Las instrucciones de instalación se encuentran en G77.htm

/grads/ Subfolder que contiene una distribución binaria de GrADS para Windows nativo (archivo grads-1.8sl11-win32e.exe) y una para Linux (archivos grads-bin-1.8sl11-linux.tar.gz y data.tar.Z). Para conocer los términos bajo los que esta versión del software se ha incluido en el CD por favor lea antes de instalar el software la Licencia Pública General versión 2 [<http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>]. Generalidades sobre la versión se encuentran en el documento de Arlindo Da Silva Getting_win32e_Started.html el cual puede leerse en línea en la dirección [http://grads.iges.org/grads/Getting_win32e_Started.html].

La mayor parte de las gráficas de la tesis fueron realizadas con ayuda de Edgar Méndez García utilizando el software GPL Generic Mapping Tools (GMT) [<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>]

El procesamiento de los datos se realizó en el sistema operativo GNU/Linux Fedora Core, el cual se encuentra disponible en el sitio de Internet [<http://fedoraproject.org/>].